

Hochauflösende Verarbeitung von Radardaten mit synthetischer Apertur

Vom Fachbereich Elektrotechnik und Informatik
der Universität-Gesamthochschule Siegen
zur Erlangung des akademischen Grades

Doktor der Ingenieurwissenschaften
(Dr.-Ing.)

genehmigte Dissertation

VON

Diplom-Ingenieur Josef Mittermayer

1. Gutachter: Univ.-Prof. Dr.-Ing. O. Loffeld
2. Gutachter: Dr.-Ing. habil. R. Bamler

Tag der mündlichen Prüfung: 13.07.2000

VORWORT

Diese Arbeit entstand am Institut für Hochfrequenztechnik und Radarsysteme des Deutschen Zentrums für Luft- und Raumfahrt (DLR). Dem Direktor dieses Instituts, Herrn Dr. Wolfgang Keydel, sowie meinem Gruppenleiter, Herrn Dr. Stefan Buckreuß, danke ich für die stetige Unterstützung meiner Arbeit.

Herzlich bedanken möchte ich mich bei Herrn Prof. Dr.-Ing. Otmar Loffeld von der Universität-Gesamthochschule Siegen für die Bereitschaft, die fachliche Betreuung meiner Dissertation zu übernehmen. Aus den Diskussionen mit ihm habe ich viele wertvolle Anregungen für meine Arbeit gewinnen können. Seinem persönlichen Einsatz verdanke ich den raschen Abschluß der Arbeit inklusive der Prüfung. Ebenso bedanke ich mich bei Herrn Dr.-Ing. habil. Richard Bamler für die Übernahme des Korreferats, für sein Interesse und für seine kompetenten Anmerkungen zur Abrundung der Arbeit. Den weiteren Mitgliedern der Prüfungskommission, Herrn Prof. Dr. Brück und Herrn Prof. Dr. Wojtkowiak, gilt mein Dank für ihre wertvolle Zeit, die sie für mich aufgewendet haben.

Ein besonderer Dank gilt dem Leiter der Abteilung SAR-Technologie am Institut für Hochfrequenztechnik und Radarsysteme, Herrn Dr. Alberto Moreira, welcher mir stets mit seiner großen Erfahrung zur Seite stand und mir seine knappe Zeit für zahlreiche Diskussionen zur Verfügung stellte. Meinen Dank aussprechen möchte ich auch Herrn Rolf Scheiber, mit dem ich oft Fragestellungen zur Interferometrie besprechen konnte. Er war auch meine Schnittstelle zu den Daten des E-SAR-Systems. Bedanken möchte ich mich auch bei meinen vielen Arbeitskollegen beim DLR, die durch ihr kollegiales und freundschaftliches Verhalten zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen haben.

Das sicher nicht immer leichte Korrekturlesen der Arbeit wurde bereitwillig von zwei sehr guten Freunden übernommen. Ich bedanke mich recht herzlich bei Frau Bettina Grill und Frau Lydia Kraus.

Nicht zuletzt danke ich meiner Familie, welche mir die moralische Unterstützung gegeben hat, ohne die eine solche Arbeit nicht hätte entstehen können.

Oberpfaffenhofen, im Juli 2000

KURZFASSUNG

Diese Arbeit stellt das neuartige Frequenz-Skalierungs-Verfahren zur effizienten und genauen Verarbeitung von *Spotlight*-SAR-Daten ohne Interpolation vor. Es wird eine genaue analytische Modellierung der *Spotlight*-Abbildungsgeometrie bei gerader Flugbahn des Trägers eingeführt und damit ein gültiger und ein beleuchteter Zielbereich definiert. Eine neue analytische Formulierung für SAR-Rohdaten mit *Dechirp on Receive*-Operation in Entfernung wird abgeleitet, welche den *Residual Video Phase*-Term durch eine Faltung mit einem *Chirp*-Signal ausdrückt. Aufbauend auf dieser Formulierung erfolgt die Entwicklung einer interpolationsfreien Korrektur der Zielentfernungsänderung, der sogenannten Frequenz-Skalierung.

Wegen der für alle Ziele gleichen Anfangs- und Endzeitpunkte der Beleuchtung im *Spotlight*-Modus bietet das SPECAN-Verfahren eine sehr effiziente Verarbeitung in Azimut, wurde aber auf Grund seiner ungenauen Verarbeitung bisher nur auf ScanSAR- und nicht auf *Spotlight*-Daten angewendet. Außerdem erfordert eine SPECAN-Verarbeitung den Einsatz von Interpolationen. Im Rahmen dieser Arbeit wurde eine Azimut-Skalierung entwickelt, welche eine hochgenaue und interpolationsfreie Verarbeitung von *Spotlight*-SAR-Daten mit der SPECAN-Methode ermöglicht. Die Kombination von SPECAN-Methode und Azimut-Skalierung wird zuerst am Beispiel des *Extended Chirp Scaling*-Algorithmus auf ScanSAR-Daten angewendet und dann in die genaue *Spotlight*-Verarbeitung des Frequenz-Skalierungs-Verfahrens eingefügt.

Die Verarbeitung von *Spotlight*-Rohdaten mit *Dechirp*-Operation in Entfernung erfordert die Erhöhung der Abtastung in Azimut vor der Datenverarbeitung. Zur Vermeidung dieser Erhöhung wird eine Subapertur-Verarbeitung eingeführt, welche die benötigte Azimutabtastung während der Verarbeitung auf die in den Rohdaten vorhandene Pulswiederholfrequenz verringert.

Die hohe Verarbeitungsqualität des Frequenz-Skalierungs-Verfahrens wird anhand von simulierten und realen Rohdaten des E-SAR-Sensors des DLR gezeigt. Der Nachweis der für viele Anwendungen sehr wichtigen Phasentreue wird anhand von simulierten Punktzielen und durch das Interferogramm einer E-SAR-Szene erbracht. Als Anwendungsbeispiel dient ein *Spotlight*-Interferogramm, das aus E-SAR-*Stripmap*-Rohdaten generiert ist. Interessante physikalische Besonderheiten des *Spotlight*-Abbildungsmodus werden durch den Vergleich des *Spotlight*-Interferogramms mit dem *Stripmap*-Interferogramm derselben Szene herausgearbeitet.

ABSTRACT

In this thesis, the novel Frequency Scaling Algorithm for efficient and accurate interpolation-free processing of Spotlight SAR data with *Dechirp on Receive* has been developed. An accurate analytical model of the Spotlight illumination geometry for a straight flight path of the carrier is introduced. Using this model, a valid and an illuminated target area is defined.

A new analytical formulation for SAR raw data with one-dimensional *Dechirp on Receive Operation* is derived, which expresses the *Residual Video Phase Term* by a convolution with a chirp signal. Starting with this formulation, an interpolation-free range cell migration correction is developed. This range cell migration correction is called Frequency Scaling.

Due to the constant target illumination start and end time in Spotlight SAR data, the SPECAN approach offers a very efficient processing in azimuth but due to the poor accuracy, it has only been used for ScanSAR and not for Spotlight data up to now. Furthermore, a SPECAN approach always requires interpolations. In the frame of this thesis, an azimuth scaling operation has been developed, which allows a highly accurate and interpolation-free processing of Spotlight data by the SPECAN approach. The combination of SPECAN approach and azimuth scaling is first applied to ScanSAR data in order to improve the *Extended Chirp Scaling Algorithm*. Then it is extended to Spotlight processing.

Spotlight raw data with one-dimensional *Dechirp on Receive* have to be upsampled in azimuth before the data processing. In order to avoid this upsampling, a sub-aperture approach is introduced, which reduces the required azimuth sampling during the processing down to the pulse repetition frequency of the raw data.

The high quality performance of the Frequency Scaling Algorithm is demonstrated by processing simulated and real raw data acquired with the E-SAR-Sensor of DLR. The phase fidelity, which is important for many applications, is proved by point target processing and by the generation of an interferogram of an E-SAR scene. As application example, a spotlight interferogram is generated from E-SAR raw data. Interesting physical properties of the Spotlight mode are demonstrated by the comparison of a Spotlight and a Stripmap interferogram, processed from the same raw data.

INHALTSVERZEICHNIS

KURZFASSUNG	3
ABSTRACT	4
INHALTSVERZEICHNIS	5
1 EINFÜHRUNG	8
2 SAR GRUNDLAGEN	11
2.1 DEFINITION DER <i>STRIPMAP</i> -ABBILDUNGSGEOMETRIE.....	12
2.2 DER SQUINTWINKEL.....	13
2.3 DIE ENTFERNUNGSVARIATION	15
2.4 BILDUNG DER SYNTHETISCHEN APERTUR.....	21
2.5 MAXIMALE GEOMETRISCHE AUFLÖSUNG IN AZIMUT	22
2.6 GEOMETRISCHE AUFLÖSUNG IN ENTFERNUNGSRICHTUNG	23
2.7 DIE SAR-SYSTEMANTWORT	24
2.8 WEITERE SAR-BETRIEBSMODI.....	26
2.8.1 DER <i>SCANSAR</i> -MODUS	26
2.8.2 DER <i>SPOTLIGHT</i> -MODUS	30
2.8.3 DER HYBRID-MODUS	31
2.9 DIE IMPULSKOMPRESSION	32
2.9.1 DIE OPTIMALFILTERUNG	33
2.9.1.1 <i>Stripmap-Modus und Entfernungsverarbeitung</i>	33
2.9.1.2 <i>Verarbeitung für Rohdaten mit nicht kontinuierlicher Azimutabbildung</i>	35
2.9.2 DAS <i>SPECAN</i> -VERFAHREN.....	38
2.9.2.1 <i>Stripmap- und Entfernungsverarbeitung</i>	38
2.9.2.2 <i>Verarbeitung für Rohdaten mit nicht kontinuierlicher Azimutabbildung</i>	40
2.9.3 BEISPIEL EINER ZWEIDIMENSIONALEN IMPULSANTWORT.....	42
2.10 ANALYSE DER PUNKTZIELANTWORT.....	43
2.10.1 DIE GEOMETRISCHE AUFLÖSUNG	43
2.10.2 NEBENZIPFELVERHÄLTNISS.....	45
3 VERFAHREN ZUR SAR-VERARBEITUNG	46
3.1 DATENVERARBEITUNG IM <i>STRIPMAP</i>-MODUS	46
3.1.1 DAS <i>RANGE DOPPLER</i> -VERFAHREN	46
3.1.2 DER <i>WAVENUMBER</i> -ALGORITHMUS	49
3.1.3 DAS <i>CHIRP SCALING</i> -VERFAHREN.....	52
3.1.4 DER <i>INVERSE SCALED FOURIER-TRANSFORM</i> -ALGORITHMUS (ISFT)	61
3.2 METHODEN ZUR <i>SCANSAR</i>-VERARBEITUNG	63
3.2.1 VERWENDUNG VON <i>STRIPMAP</i> -VERFAHREN.....	64
3.2.2 <i>SPECAN</i> -VERARBEITUNG VON <i>SCANSAR</i> -DATEN	64

3.2.3 DAS <i>EXTENDED CHIRP SCALING</i> -VERFAHREN (ECS) FÜR <i>SCANSAR</i>	65
3.2.3.1 Azimut-Skalierung für die <i>ScanSAR</i> -Verarbeitung	66
3.2.3.2 Einstellen des Abtastabstandes in Azimut durch die Azimut-Skalierung.....	69
3.3 VERFAHREN ZUR <i>SPOTLIGHT</i>-PROZESSIERUNG	70
3.3.1 VERFAHREN FÜR ROHDATEN MIT <i>DECHIRP</i> -OPERATION IN ENTFERNUNG.....	70
3.3.1.1 Wavenumber-Algorithmus für die Verarbeitung von <i>Spotlight</i> -Daten.....	70
3.3.1.2 <i>Chirp Scaling</i> -Verarbeitung im <i>Spotlight</i> -Modus	71
3.3.2 VERFAHREN FÜR ROHDATEN MIT ZWEIDIMENSIONALER <i>DECHIRP</i> -OPERATION.....	72
3.3.2.1 Tomographische Verarbeitung von <i>Spotlight</i> -SAR	72
3.3.2.2 Der Polar Format-Algorithmus.....	76
3.3.2.3 Der Convolution Backprojection-Algorithmus	79
3.3.3 VERGLEICH DER ALGORITHMEN ZUR <i>SPOTLIGHT</i> -VERARBEITUNG.....	81
<u>4 GENAUE MODELLIERUNG DER <i>SPOTLIGHT</i>-GEOMETRIE UND -ROHDATEN</u>	<u>86</u>
4.1 MODELLIERUNG DER BELEUCHTUNGSGEOMETRIE	86
4.1.1 DIE AUGENBLICKSBANDBREITE	87
4.1.2 DIE <i>SPOTLIGHT</i> -BANDBREITE.....	88
4.1.3 GÜLTIGER ZIELBEREICH	89
4.1.4 BEREICH BELEUCHTETER ZIELE	90
4.1.5 DURCH BELEUCHTUNGSGEOMETRIE ERZEUGTE AZIMUTMODULATION	91
4.2 MODELLIERUNG DER ROHDATEN EINES PUNKTZIELS	92
4.3 DIE <i>DECHIRP ON RECEIVE</i>-OPERATION IN ENTFERNUNG	93
4.4 SIGNAL NACH <i>DECHIRP</i>-OPERATION IN ENTFERNUNG.....	95
<u>5 EIN NEUES VERFAHREN ZUR VERARBEITUNG VON <i>SPOTLIGHT</i>-SAR-DATEN.....</u>	<u>96</u>
5.1 DIE FREQUENZ-SKALIERUNG.....	97
5.1.1 ROHDATEN EINES PUNKTZIELS IM ENTFERNUNGS-DOPPLERBEREICH	97
5.1.2 KORREKTUR DER ZIELENTFERNUNGSÄNDERUNG.....	102
5.1.3 SKALIERUNG EINER FUNKTION IM FREQUENZBEREICH	104
5.1.4 ABLEITUNG DER FREQUENZ-SKALIERUNGSFUNKTIONEN	105
5.1.5 SIGNAL NACH FREQUENZ-SKALIERUNG	106
5.1.6 DIE SEKUNDÄRE ENTFERNUNGSKOMPRESSION	107
5.1.7 VOLLSTÄNDIGE KORREKTUR DER ZIELENTFERNUNGSÄNDERUNG	108
5.1.8 PHASEN- UND AMPLITUDENKORREKTUR	109
5.1.9 VERANSCHAULICHUNG DER FREQUENZ-SKALIERUNG	110
5.1.10 BLOCKDIAGRAMM DER ENTFERNUNGSVERARBEITUNG	113
5.2 VERARBEITUNG IN AZIMUT	115
5.2.1 BLOCKDIAGRAMM UND GLEICHUNGEN DER AZIMUTVERARBEITUNG.....	115
5.2.2 VERSCHIEBUNG DER AZIMUTZEIT	119
5.2.2.1 Azimutzeit-Verschiebung der Signale einzelner Punktziele	119
5.2.2.2 Beispiel zur Zeitverschiebung der Signale einzelner Punktziele	122
5.2.2.3 Azimutzeit-Verschiebung für eine ganze Szene	124

5.2.2.4 Beispiel zur Verschiebung der Azimutzeit für eine ganze Szene	125
5.2.2.5 Optimale Skalierungsentfernung für die Azimut-Skalierung.....	127
5.2.3 VERSCHIEBUNG DER AZIMUTFREQUENZ	129
5.3 SUBAPERTUR-VERARBEITUNG IN AZIMUT.....	133
5.3.1 BLOCKSCHALTBILD DES KOMPLETTEN FREQUENZ-SKALIERUNGS-VERFAHRENS	133
5.3.1.1 Nebenzipfelunterdrückung und Beschränkung der Bandbreite.....	135
5.3.2 DEFINITION WICHTIGER BANDBREITEN IN AZIMUT	136
5.3.3 AUFTEILUNG IN SUBAPERTUREN	139
5.3.4 AZIMUT-SKALIERUNG FÜR DIE SUBAPERTUR-VERARBEITUNG.....	142
5.3.5 REKOMBINATION DER SUBAPERTUREN UND <i>DERAMPING</i>	144
5.3.6 BEISPIEL ZUR SUBAPERTUR-VERARBEITUNG	146
5.3.7 ERGEBNISSE DER PUNKTZIELANALYSE	148
5.3.8 BERECHNUNG GÜLTIGER SZENENGRÖßE	155
<u>6 SIMULATION EINES SPOTLIGHT-BILDES AUS STRIPMAP-ROHDATEN.....</u>	<u>157</u>
6.1 AZIMUTZEIT-/FREQUENZDARSTELLUNG VON STRIPMAP- UND SPOTLIGHT- ROHDATEN.....	158
6.2 PROZESSIERUNG EINES SPOTLIGHT-BILDES.....	159
6.2.1 DIE <i>DECHIRP ON RECEIVE</i> -OPERATION	160
6.2.2 BERECHNUNG DER <i>SPOTLIGHT</i> -ABBILDUNGSPARAMETER	162
6.2.3 PROZESSIERUNG MIT DEM FREQUENZ-SKALIERUNGS-VERFAHREN.....	166
6.2.4 AUSWAHL DES BEREICHS GÜLTIGER ZIELE	169
<u>7 NACHWEIS DER PHASENTREUE.....</u>	<u>175</u>
7.1 PHASENMESSUNG VON PROZESSIERTEN PUNKTZIELEN	175
7.2 PHASENMESSUNG DURCH EIGENINTERFEROGRAMM	176
<u>8 VERGLEICH VON STRIPMAP- UND SPOTLIGHT- ABBILDUNG.....</u>	<u>182</u>
8.1 GENERIERUNG EINES <i>SPOTLIGHT</i> -INTERFEROGRAMMS	182
8.2 PROZESSIERUNG IM <i>STRIPMAP</i> -MODUS.....	186
8.3 VERGLEICH DER AMPLITUDENBILDER.....	186
8.4 KOHÄRENZ DER <i>STRIPMAP</i> -UND <i>SPOTLIGHT</i> -ABBILDUNG.....	188
8.5 INTERFEROGRAMME VON <i>SPOTLIGHT</i> -UND <i>STRIPMAP-MODE</i>	194
<u>9 ZUSAMMENFASSUNG UND WEITERFÜHRENDE AKTIVITÄTEN.....</u>	<u>196</u>
<u>SUMMARY AND FOLLOW-ON ACTIVITIES</u>	<u>199</u>
<u>ANHANG A - DARSTELLUNG DES RVP-TERMS.....</u>	<u>202</u>
<u>ANHANG B - SZENENAUSDEHNUNG DES <i>CHIRP SCALING</i>-ALGORITHMUS</u>	<u>205</u>
<u>ANHANG C - SZENENAUSDEHNUNG DES FREQUENZ-SKALIERUNGS-VERFAHRENS.</u>	<u>207</u>
<u>LITERATUR.....</u>	<u>209</u>
<u>VERZEICHNIS WICHTIGER VARIABLEN UND SYMBOLE</u>	<u>214</u>

1 EINFÜHRUNG

Radar mit synthetischer Apertur (englisch: **S**ynthetic **A**perture **R**adar -SAR) ist ein Instrument zur Fernerkundung, welches immer mehr Einsatz bei der Abbildung, Überwachung und Erforschung der Erdoberfläche findet [14], [68]. Ein großer Vorteil gegenüber optischen Sensoren ist die weitgehende Unabhängigkeit von Wittereinflüssen und von der Tageszeit. Das Spektrum der Anwendungen beinhaltet zum Beispiel Forst- und Agrarwirtschaft, Kartographie, Ozeanographie oder Eisbeobachtung. Im Bereich des Umweltschutzes können Ölverschmutzungen des Meeres sowie illegale Waldrodungen aufgespürt werden. Von einigen, ständig durch Nebel verhangenen Regenwaldgebieten konnten durch den Einsatz von SAR-Systemen erstmals genaue kartographische Daten gewonnen werden.

Mit Einführung der SAR-Interferometrie wurde die Höhenbestimmung der Erdoberfläche möglich. Mit Hilfe der SAR-Interferometrie erstellte digitale Geländemodelle werden bereits in vielen Bereichen eingesetzt. Ein Beispiel ist der Einsatz in der mobilen Telekommunikation zum Auffinden von geeigneten Standorten für Sendestationen.

Ein weiteres, sich sehr rasch entwickelndes Gebiet ist die SAR-Polarimetrie. Durch das Kombinieren der gemessenen Rückstreuung verschiedener Polarisierungen wird die Informationsmenge gesteigert, welche aus SAR-Daten gewonnen werden kann. So bezieht beispielsweise die SAR-Klassifikation polarimetrische SAR-Daten zur Erhöhung der Klassifizierungsgenauigkeit mit ein [6].

Die Kombination von SAR-Interferometrie und SAR-Polarimetrie ermöglicht zum Beispiel die genaue Bestimmung von Baumhöhen [12] aus SAR-Daten. Sowohl die SAR-Interferometrie als auch die SAR-Polarimetrie stellen hohe Anforderungen an eine phasentreue SAR-Datenverarbeitung, welche dadurch ein wesentliches Kriterium für die Entwicklung von neuen SAR-Prozessierungsalgorithmen ist.

Das SAR-Prinzip wurde 1951 von Carl Wiley zum ersten Mal vorgeschlagen, indem er durch eine aus der relativen Bewegung zwischen Radarantenne und Ziel abgeleiteten Phasenkorrektur für aufeinanderfolgende Radarpulse eines kohärenten Radarsystems die Auflösung in Azimutrichtung wesentlich verbesserte [80]. Anfangs war die Verarbeitung von SAR-Rohdaten nur mit Hilfe von optischen

Anlagen möglich. Mit der fortschreitenden Verbesserung der Rechnerleistung wurde die Verarbeitung von SAR-Rohdaten mit digitaler Signalverarbeitung ermöglicht.

Der herkömmliche Betriebsmodus von SAR-Systemen ist der Streifenmodus (englisch: *Stripmap Mode*). In diesem Modus bewegt sich ein Träger mit einem SAR-System auf einer Flugbahn, wobei die Antenne starr an den Träger gekoppelt ist und ein Zielgebiet schräg nach unten beleuchtet. Es wird ein Streifen (englisch: *Strip*) abgebildet, dessen Länge der überflogenen Strecke entspricht. Andere wichtige SAR-Betriebsmodi sind der *ScanSAR*- und der *Spotlight*-Modus.

Der *ScanSAR*-Modus wird in weltraumgestützten SAR-Systemen angewendet, um die dort existierende Beschränkung der maximal bei einem Überflug abzubildenden Streifenbreite durch alternierendes Abtasten (englisch: *Scanning*) mehrerer Teilstreifen zu überwinden. Dazu wird die Antenne in Elevationsrichtung geschwenkt.

Der *Spotlight*-Modus kommt sowohl in satellitengestützten als auch in flugzeuggetragenen SAR-Systemen zum Einsatz und ermöglicht eine sehr hohe geometrische Auflösung in Flugrichtung. Bei diesem Modus wird die Antenne in Azimutrichtung so gesteuert, daß während der gesamten Rohdatenaufzeichnung das gleiche Zielgebiet (englisch: *Spot*) beleuchtet wird. Dadurch werden während einer sehr langen Beleuchtungszeit Informationen über das Zielgebiet aufgezeichnet, und so die hohe Auflösung ermöglicht.

Ein Prozessierungsverfahren, welches sehr gut für die effiziente und phasentreue Prozessierung von SAR-Daten im *Stripmap*-Modus geeignet ist, ist das *Chirp Scaling*-Verfahren [64]. Dieses Verfahren benötigt während der gesamten Prozessierung keine Interpolation, und erreicht auf diese Weise eine hohe Effizienz und Phasentreue. Eine Methode, welche eine sehr hohe Effizienz in der *ScanSAR*- und *Spotlight*-Prozessierung zur Verfügung stellt, ist die *SPECAN*-Methode [69] (englisch: *SPECTral ANalysis*). Diese Methode benötigt allerdings Interpolationen und ist nur für niedrige geometrische Auflösungen geeignet. Das spricht gegen einem Einsatz in der *Spotlight*-Verarbeitung.

Das *Extended Chirp Scaling*-Verfahren (ECS) [55] [56] ermöglicht eine hochgenaue Verarbeitung von Flugzeug- und Satelliten-SAR-Daten im *Stripmap*- und *ScanSAR*-Modus ohne Interpolationen. Die Azimutverarbeitung des ECS für *ScanSAR* ist im Rahmen dieser Arbeit entstanden. Beim ECS werden sowohl

Bewegungsfehler als auch Variationen des Dopplerzentroiden durch zusätzliche Verarbeitungsschritte kompensiert.

Das Ziel dieser Arbeit ist die Entwicklung eines effizienten und phasentreuen Verfahrens zur Prozessierung von SAR-Daten im *Spotlight*-Modus, das keine Interpolationen benötigt. Das entwickelte Frequenz-Skalierungs-Verfahren führt die Korrektur der Zielentfernungsänderung mit einer neuartigen Frequenz-Skalierung durch. Motiviert wurde die Entwicklung der Frequenz-Skalierung durch das *Chirp Scaling*-Verfahren, das im *Spotlight*-Modus auf Grund der normalerweise fehlenden linearen Frequenzmodulation in den Rohdaten nicht direkt angewendet werden kann.

Die Azimutverarbeitung wird mit einem durch eine neuartige Azimut-Skalierung verbesserten, interpolationsfreien und damit hochgenauen SPECAN-Ansatz durchgeführt. Zusätzlich vermeidet eine Subapertur-Verarbeitung eine Erhöhung der Signalabtastung in Azimutrichtung. Die Validierung für das neu entwickelte Frequenz-Skalierungs-Verfahren wurde anhand von simulierten Punktzielen und mit Radardaten des experimentellen SAR-Systems (E-SAR) des DLR durchgeführt.

2 SAR GRUNDLAGEN

In diesem Kapitel erfolgt die Darstellung der Grundlagen der SAR-Verarbeitung anhand des *Stripmap*-Modus. Die Abbildungsgeometrie des *Stripmap*-Modus wird unter Berücksichtigung des Squintwinkels für den Fall eines flugzeuggetragenen SAR-Systems modelliert. Der Squintwinkel entsteht durch eine Abweichung des Trägers von der idealen Fluglage und korrespondiert zu einer bestimmten Dopplerfrequenz, dem Dopplerzentroiden. Auch bei hohen Squintwinkeln liefert die vorgestellte Modellierung der Geometrie genaue Werte für die in der Prozessierung benötigten Parameter. Für satellitengestützte SAR-Systeme kann diese Modellierung ebenfalls angewendet werden. Bei satellitengestützten Systemen fließen die Lage der Plattform, die Erdrotation und die Geländehöhe in die Berechnung des Dopplerzentroiden mit ein [66]. Aus dem Dopplerzentroiden kann wieder ein effektiver Squintwinkel [1] berechnet werden.

Eine wichtige Kenngröße in Radarbildern ist die geometrische Auflösung. Bei SAR-Systemen wird eine hohe Auflösung quer zur Flugrichtung durch das Senden von breitbandigen Signalen erreicht, welche entweder durch Pulse sehr kurzer Dauer oder durch Pulse längerer Dauer mit zusätzlicher Modulation zur Erhöhung der Bandbreite erzeugt werden. In Flugrichtung wird aus vielen empfangenen Echos eine lange, virtuelle Antenne gebildet. Diese synthetische Apertur bietet wegen ihrer großen Länge eine hohe Auflösung.

Die Modulation der empfangenen Echos in Flugrichtung ist eine Folge der Geometrie. Bei entsprechender Quadratur-Demodulation bewirkt diese Modulation eine Verschiebung von positiven Frequenzen bei der Annäherung des Trägers an das Ziel, hin zu negativen Frequenzen bei der Entfernung des Trägers. Die Demodulation während der Verarbeitung erfolgt durch die Bildung der synthetischen Apertur. Eine weitere Folge der Bewegung zwischen Antenne und Ziel ist die Zielentfernungsänderung, welche die Variation der Entfernung zwischen Antenne und Ziel beim Vorbeiflug des Trägers beschreibt. Die Modulationsart der gesendeten Radarimpulse zur Erhöhung der Entfernungsauflösung ist häufig eine lineare Frequenzmodulation. Entfernungs- und Azimutmodulation sind durch die Zielentfernungsänderung miteinander verkoppelt und die in den Rohdaten enthaltene Systemantwort auf ein Punktziel ist ein zweidimensionales Signal. Auf Grund der Zielentfernungsänderung kann die SAR-Datenverarbeitung nicht trivial in zwei eindimensionale Filteroperationen in Azimut und Entfernung zerlegt werden.

Die gesendeten und wieder empfangenen Radarimpulse werden nach Umsetzung in das Basisband digitalisiert, und als Rohdaten abgespeichert. Durch eine geeignete Prozessierung erhält man aus den Rohdaten ein Radarbild, welches ein Abbild der Reflektivität der beleuchteten Szene ist. Wird ein SAR-System im Streifenmodus betrieben, so ist die Auflösung in Flugrichtung von der Entfernung zwischen Antenne und Ziel unabhängig. Die Breite des Streifens, senkrecht zur Flugrichtung gemessen, hängt unter anderem von der Größe des Zeitfensters ab, in dem die Echos eines zuvor gesendeten Impulses wieder empfangen werden.

2.1 Definition der *Stripmap*-Abbildungsgeometrie

Das in Bild 2.1 dargestellte *Stripmap*-SAR-System besteht aus einem sich mit konstanter Geschwindigkeit V bewegenden Träger in der Höhe h , einer orthogonal zur Bewegungsrichtung blickenden Antenne und einem kohärenten Radarsystem. Die Bewegungsrichtung des Trägers wird als Azimutrichtung bezeichnet, die dazu orthogonale, schräg nach unten weisende, als Entfernungsrichtung.

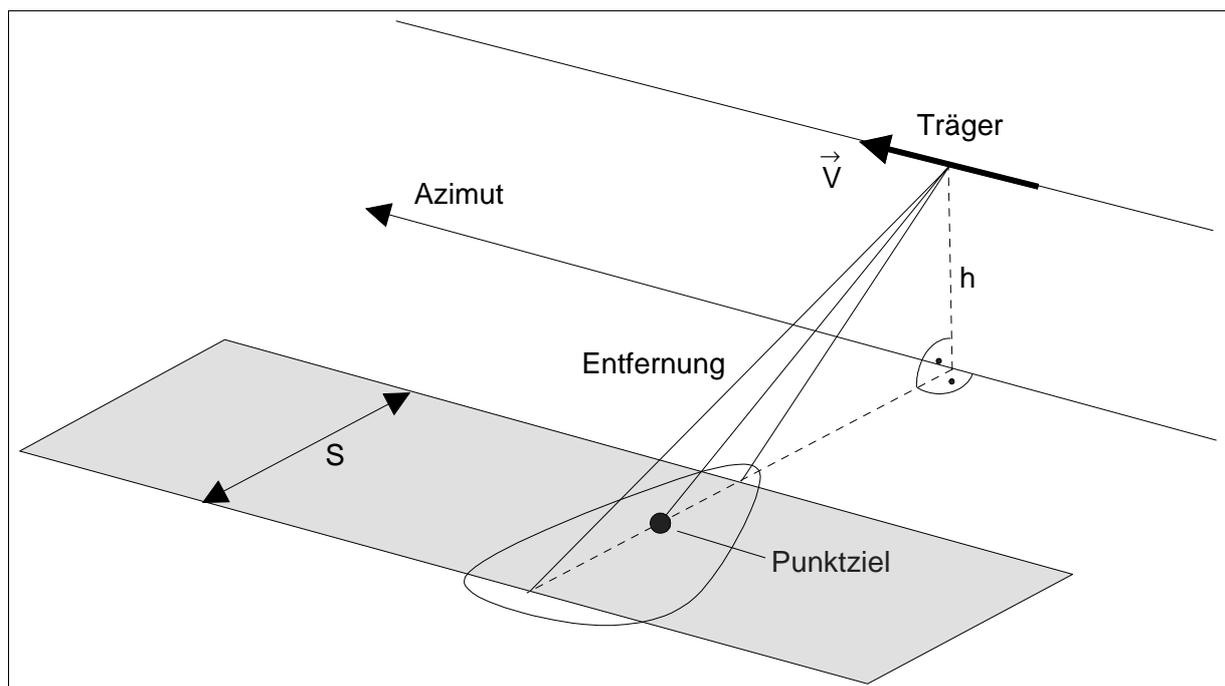


Bild 2.1: Abbildungsgeometrie eines SAR-Systems im Stripmap-Modus

Während des Vorbeiflugs an einem zu beobachtenden Gebiet wird ein Streifen abgebildet. Die Streifenbreite S wird unter anderem durch das Zeitfenster festgelegt, in dem die empfangenen Echos auf einen Impuls in Entfernungsrichtung digitalisiert und abgespeichert werden. Die überflogene Strecke während der Datenaufzeichnung bestimmt die Streifenlänge in Azimutrichtung.

In Bild 2.2 ist die maximale Länge der synthetischen Apertur L_{\max} bei einem Azimutöffnungswinkel θ_a der realen Apertur dargestellt. Nach Gleichung (2.1) berechnet sich der Öffnungswinkel näherungsweise aus der Wellenlänge λ und der Länge d der Antenne in Azimutrichtung. Die maximale Länge der synthetischen Apertur ergibt sich in Gleichung (2.2) aus dem Öffnungswinkel und der kürzesten Entfernung zwischen Antenne und Ziel r_o .

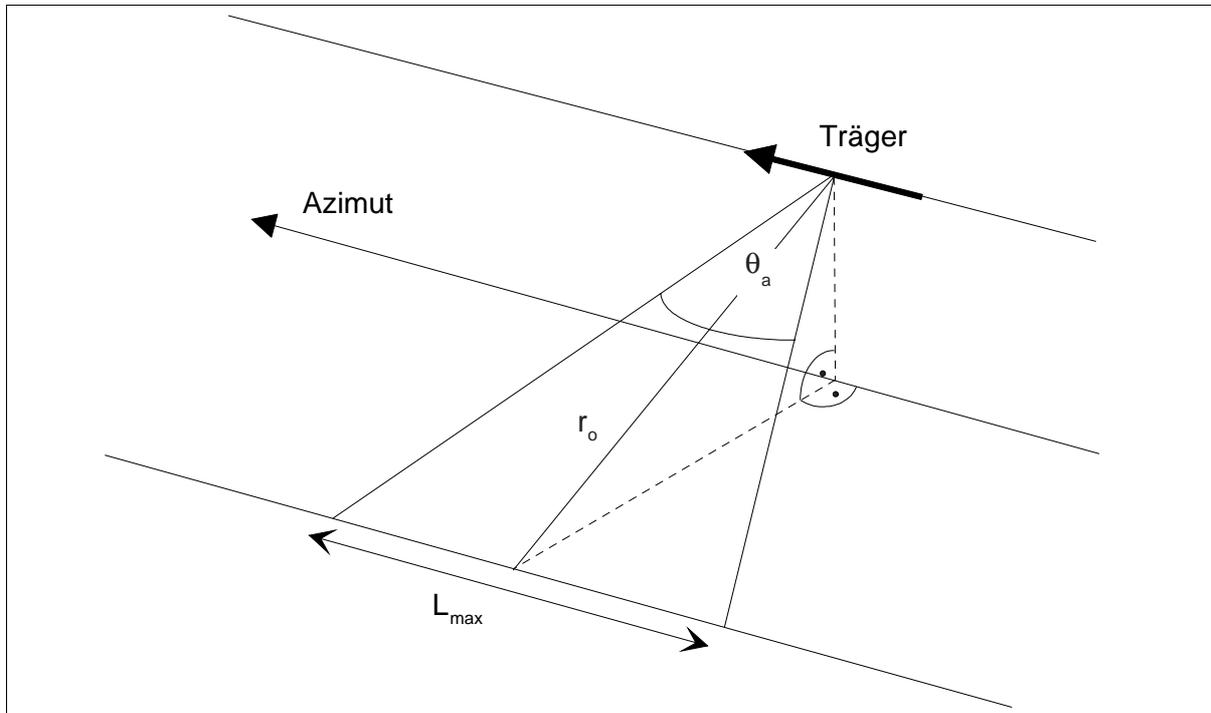


Bild 2.2: Maximale Länge der synthetischen Apertur

$$\theta_a \approx \frac{\lambda}{d} \quad (2.1)$$

$$L_{\max} \approx \theta_a \cdot r_o \quad (2.2)$$

2.2 Der Squintwinkel

Die in Bild 2.1 gezeigte Fluggeometrie entspricht dem idealen Fall mit der Hauptstrahlrichtung der Antenne senkrecht zum Geschwindigkeitsvektor des Trägers. Der Squintwinkel Ψ beschreibt die Abweichung von diesem idealen Fall. Wie in Bild 2.3 gezeigt, liegt dieser Winkel zwischen der Senkrechten zum Geschwindigkeitsvektor und der Verbindungslinie zwischen Träger und Punktziel. In diesem Abschnitt wird eine anschauliche, für kleine Squintwinkel gültige Berechnung dieses Winkels durchgeführt. Dabei werden zwei getrennte Beiträge zum Squintwinkel aus Gierwinkel θ_d und Nickwinkel θ_p berechnet. Für die Berechnung wird der Lookwinkel $\theta_{l,s}$ benötigt,

welcher in Bild 2.3 zwischen dem Lot der Antennenposition zum Boden und der Verbindungslinie Antenne Punktziel liegt. Der Lookwinkel $\theta_{l,s}$ kann für kleine Squintwinkel als unabhängig von diesem angenommen werden. Letzteres bedeutet in Bild 2.3 die Näherung $\theta_l \approx \theta_{l,s}$, wobei θ_l der Lookwinkel für einen Squintwinkel $\Psi=0^\circ$ ist. Eine auch für sehr hohen Squintwinkel gültige Berechnung findet sich in [18].

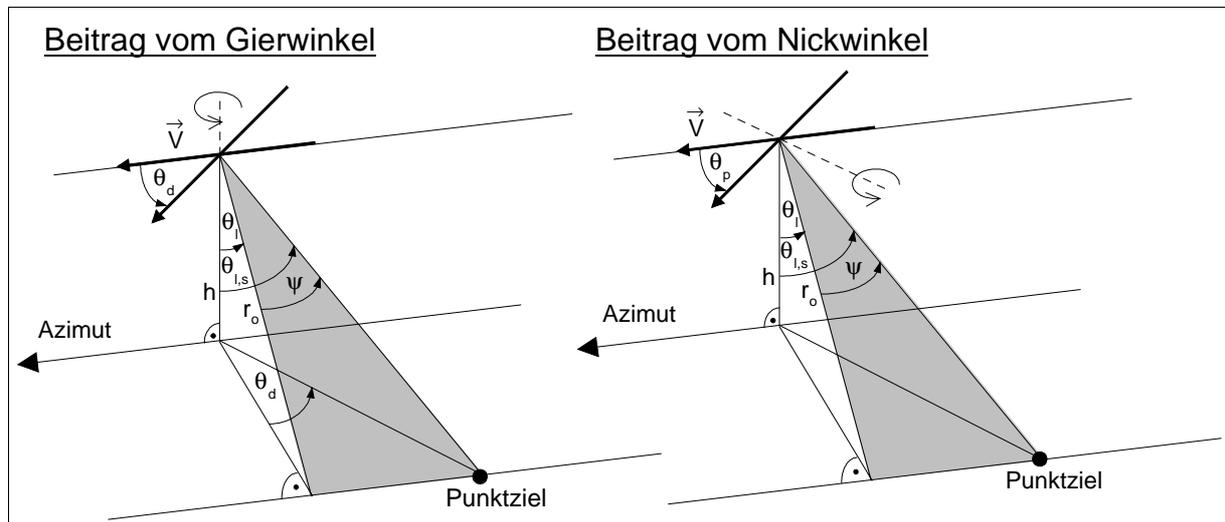


Bild 2.3: Beiträge zum Squintwinkel von Gierwinkel (links) und Nickwinkel (rechts)

Mit der Näherung und Bild 2.3 ergibt sich der Lookwinkel $\theta_{l,s}$ aus der Flughöhe h über Grund und der kürzesten, beim Vorbeiflug des Trägers auftretenden Entfernung r_o zu Gleichung (2.3).

$$\theta_{l,s} \approx \theta_l = \arccos\left(\frac{h}{r_o}\right) \quad (2.3)$$

Auf Grund von Seitenwinden kann es zu einem Gierwinkel θ_d zwischen dem Geschwindigkeitsvektor und der Trägerachse durch Bug und Heck kommen. Der Beitrag des Gierwinkels zum Squintwinkel Ψ_d bei einem Nickwinkel $\theta_p = 0^\circ$ ergibt sich zu Gleichung (2.4).

$$\Psi_d = \arcsin(\sin \theta_l \cdot \tan \theta_d) \quad (2.4)$$

Ein Nickwinkel entsteht, wenn sich der Träger in Flugrichtung aus der waagrechten Lage über dem Boden herausdreht. Der Beitrag des Nickwinkels zum Squintwinkel Ψ_p bei einem Gierwinkel $\theta_d = 0^\circ$ ist in Gleichung (2.5) gegeben.

$$\Psi_p = \arcsin(\cos \theta_l \cdot \tan \theta_p) \quad (2.5)$$

Mit (2.3) (2.4) und (2.5) kann der Squintwinkel als Funktion der Entfernung r_o mit Hilfe der Parameter Gierwinkel, Nickwinkel und Flughöhe mit Gleichung (2.6) angegeben werden [81].

$$\Psi \approx \arcsin(\sin \theta_l \cdot \tan \theta_d + \cos \theta_l \cdot \tan \theta_p) \quad (2.6)$$

2.3 Die Entfernungsvariation

Die Entfernungsvariation beschreibt die Änderung der Entfernung zwischen der Antenne und einem Punktziel während des Vorbeiflugs des Trägers. Sie ist Ursache für zwei wesentliche Merkmale eines SAR-Signals. Sie definiert die Azimutmodulation und bewirkt den Effekt der *Range Migration*, welcher das entfernungszeitversetzte Ablegen der zu einem Punktziel gehörenden Echos in der Rohdatenmatrix ist.

In Bild 2.4 bewegt sich ein Träger in die positive Azimutrichtung. Dabei befindet sich ein Punktziel zwischen den Zeitpunkten t_{a1} und t_{a2} im Beleuchtungskegel der realen Apertur. Der Beleuchtungskegel ist in Wirklichkeit nicht so scharf begrenzt wie im Bild dargestellt. In dieser Arbeit werden die Grenzen der Antennenbeleuchtung in Azimut aber als durch den 3dB-Öffnungswinkel gegeben angenommen. Diese Annahme wird auch häufig in der Praxis getroffen.

Zur Zeit t_{DC} befindet sich das Punktziel in der Hauptstrahlrichtung der Antenne. Aus der Geometrie können die Ausdrücke für t_{a1} , t_{a2} und t_{DC} in den Gleichungen (2.7), (2.8) und (2.9) abgeleitet werden.

$$t_{a1} = -\frac{r_o}{V} \cdot \tan\left(\frac{\theta_a}{2} - \Psi\right) \quad (2.7)$$

$$t_{a2} = \frac{r_o}{V} \cdot \tan\left(\frac{\theta_a}{2} + \Psi\right) \quad (2.8)$$

$$t_{DC} = \frac{r_o}{V} \cdot \tan(\Psi) \quad (2.9)$$

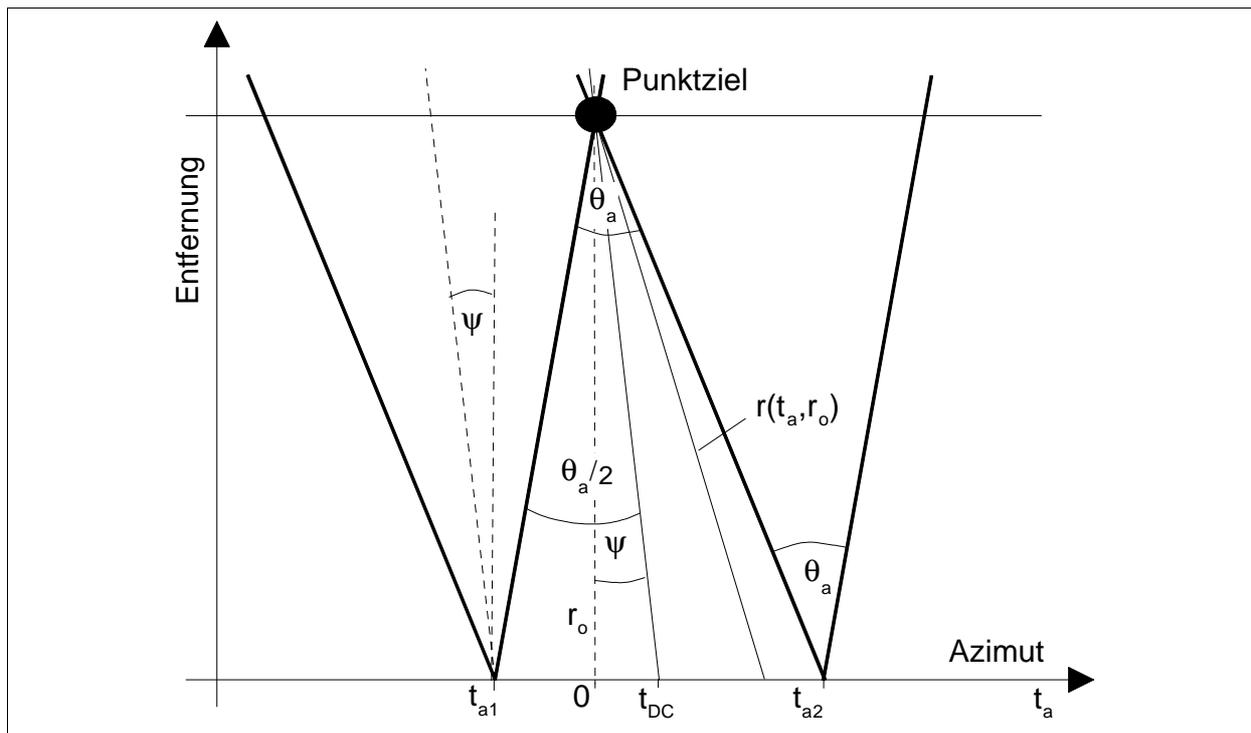


Bild 2.4: Entfernungsvariation beim Vorbeiflug des Trägers an einem Punktziel

Während der Beleuchtung eines Punktziels bewirkt die in Gleichung (2.10) beschriebene Entfernungsvariation $r(t_a, r_0)$ eine Azimutphasenmodulation. Die Azimutmodulation wird in Bild 2.5 anhand eines Beispiels veranschaulicht. Im ersten Diagramm ist eine sich aus einer Abbildungsgeometrie ergebende Entfernungsvariation $r(t_a, r_0)$ über der Azimutzeit t_a dargestellt. Zur Verdeutlichung wurde für den Plot die konstante Punktzielentfernung r_0 von der Entfernungsvariation abgezogen. Der Definitionsbereich der Azimutzeit in Gleichung (2.11) ist die Zeit, in der sich das Ziel in der Beleuchtung der Antenne befindet.

$$r(t_a, r_0) = \sqrt{r_0^2 + V^2 \cdot t_a^2} \quad (2.10)$$

$$-\frac{r_0}{V} \cdot \tan\left(\frac{\theta_a}{2} - \Psi\right) = t_{a1} \leq t_a \leq t_{a2} = \frac{r_0}{V} \cdot \tan\left(\frac{\theta_a}{2} + \Psi\right) \quad (2.11)$$

Für kleine Squintwinkel enthält der Definitionsbereich der Azimutzeit den Ursprung und mit einem als klein angenommenen Öffnungswinkel θ_a ist der zweite Summand im Wurzelausdruck von Gleichung (2.10) wesentlich kleiner als der erste Summand. In diesem Fall kann für die Entfernungsvariation in Gleichung (2.10) die Näherung von Gleichung (2.12) verwendet werden.

$$r(t_a, r_o) \approx r_o + \frac{V^2 \cdot t_a^2}{2 \cdot r_o} \quad (2.12)$$

Die gesamte Beleuchtungsdauer T_{ia} eines Punktziels in der Entfernung r_o ist die Differenz aus t_{a1} und t_{a2} und entspricht der maximalen synthetischen Apertur L_{max} , die auf Grund des Azimutöffnungswinkels der realen Apertur θ_a gebildet werden kann. Wichtig für die später erfolgende Berechnung der geometrischen Auflösung ist, daß die Beleuchtungsdauer eines Punktziels linear mit der Entfernung r_o zunimmt.

$$T_{ia} = \frac{r_o}{V} \cdot \left(\tan\left(\frac{\theta_a}{2} - \Psi\right) + \tan\left(\frac{\theta_a}{2} + \Psi\right) \right) \quad (2.13)$$

Der im zweiten Diagramm von Bild 2.5 dargestellte Phasenverlauf $\Phi_a(t_a, r_o)$ der Azimutmodulation ergibt sich wegen des zweifachen Weges, den die Radarpulse zwischen Antenne und einem rückstreuenden Objekt zurücklegen, zu Gleichung (2.14). Für den Plot wurde der konstante Anteil $-4\pi \cdot \lambda / r_o$ von der Phasenfunktion abgezogen und im Plot ergibt sich damit an der Stelle $t_a = 0$ s die Phase 0° . Das negative Vorzeichen in Gleichung (2.14) ist gesetzt, damit sich eine Analogie zum bekannten Dopplereffekt ergibt, bei dem die an einem ruhenden Empfänger auftretende Frequenz bei der Annäherung eines Senders größer als die Sendefrequenz ist. Das Vorzeichen in Gleichung (2.14) kann bei der Quadratur-Demodulation der empfangenen Radardaten eingestellt werden.

$$\Phi(t_a, r_o) = -\frac{4\pi}{\lambda} \cdot r(t_a, r_o) = -\frac{4\pi}{\lambda} \sqrt{r_o^2 + V^2 \cdot t_a^2} \quad (2.14)$$

Mit der Ableitung des Phasenverlaufs nach der Azimutzeit erhält man den Azimutfrequenzverlauf im dritten Diagramm, welcher durch Gleichung (2.15) beschrieben ist. Dieser genaue Zusammenhang zwischen Azimutfrequenz und Azimutzeit wird in dieser Arbeit noch häufig benutzt. Durch Bildung der Umkehrfunktion von Gleichung (2.15) gelangt man zu Gleichung (2.16), welche die Azimutzeit in Abhängigkeit von der Azimutfrequenz ausdrückt.

$$f_a(t_a, r_o) = \frac{1}{2\pi} \cdot \frac{d\Phi_a}{dt_a} = -\frac{2 \cdot V^2 \cdot t_a}{\lambda \cdot \sqrt{r_o^2 + V^2 \cdot t_a^2}} \quad (2.15)$$

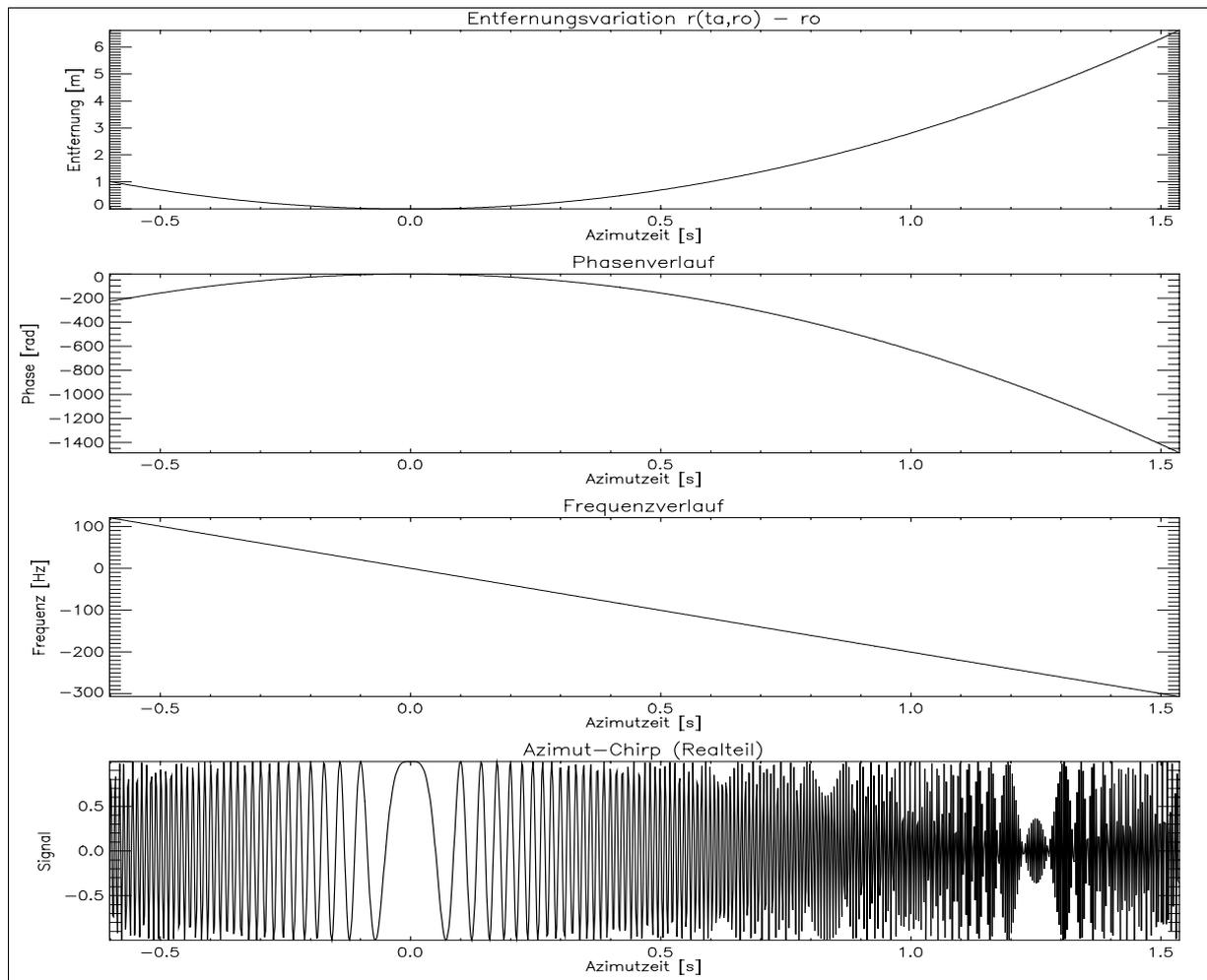


Bild 2.5: Azimutmodulation als Folge der Entfernungsvariation, Simulationsparameter: $r_0=1000$ m, $V=75$ m/s, $\theta_a=9.2^\circ$, $\lambda=0.056$ m, $\Psi=2^\circ$, $PRF=500$ Hz

$$t_a(f_a, r_0) = \frac{-f_a \cdot \lambda \cdot r_0}{2 \cdot V^2 \cdot \sqrt{1 - \left(\frac{\lambda \cdot f_a}{2 \cdot V}\right)^2}} \quad (2.16)$$

Der Realteil des Azimut-Chirps, der sich im Beispiel von Bild 2.5 durch die Azimutmodulation ergibt, ist im unteren Diagramm dargestellt. Da die Ursache für die Azimutmodulation die Bewegung des Trägers ist, wird diese häufig auch als Dopplermodulation bezeichnet. Dasselbe gilt für die Azimutfrequenz, welche auch Dopplerfrequenz heißt.

An dieser Stelle wird die Azimutfrequenz als Augenblicksfrequenz definiert, da der Begriff der Augenblicksfrequenz in dieser Arbeit noch häufig verwendet wird. Für SAR-Signale mit hohem Zeit-Bandbreite-Produkt kann mit dem Prinzip der stationären Phase [10] [60] [61] das Azimutpektrum der Signale berechnet

werden. *Spotlight*-SAR-Signale besitzen definitionsgemäß immer ein hohes Zeit-Bandbreite-Produkt. Das berechnete Azimutspektrum wird auch über eine FFT-Operation erhalten, wobei für näherungsweise linear frequenzmodulierte Signale, wie zum Beispiel das *Spotlight*-SAR-Signal in Azimut, das über der Azimutzeit belegte Frequenzband auch im Azimutspektrum durchlaufen wird. Somit ist jedem Azimutzeitpunkt eine Azimutfrequenz zugeordnet, welche als Augenblicksfrequenz bezeichnet wird.

Die Dopplerbandbreite B_a ergibt sich in guter Näherung aus der Differenz der höchsten und der niedrigsten Dopplerfrequenz. Die höchste Dopplerfrequenz f_{a1} tritt bei Beleuchtungsbeginn auf, wenn das Ziel in den Beleuchtungskegel der Antenne eintritt. In diesem Fall bewegt sich der Träger auf das Ziel zu. Die niedrigste Dopplerfrequenz f_{a2} erscheint am Ende der Beleuchtung, wenn sich der Träger vom Ziel entfernt. Die Dopplerbandbreite in (2.17) ergibt sich durch Einsetzen von (2.7) und (2.8) in (2.15).

$$\begin{aligned} B_a &= f_a(t_{a1}) - f_a(t_{a2}) = f_{a1} - f_{a2} \\ &= \frac{2 \cdot V}{\lambda} \cdot \left[\sin\left(\frac{\theta_a}{2} - \Psi\right) + \sin\left(\frac{\theta_a}{2} + \Psi\right) \right] = \frac{4 \cdot V}{\lambda} \cdot \sin\left(\frac{\theta_a}{2}\right) \cdot \cos(\Psi) \end{aligned} \quad (2.17)$$

Mit Dopplerzentroid f_{DC} wird die Mittenfrequenz des Azimutspektrums bezeichnet. Für kleine Squintwinkel tritt diese Frequenz in Strahlmitte, also zum Zeitpunkt t_{DC} auf. Damit gibt t_{DC} die Verschiebung des *Doppler-Null*-Punkts aus der Hauptstrahlrichtung der Antenne heraus an. Setzt man t_{DC} in Gleichung (2.15) ein, so erhält man den Dopplerzentroid f_{DC} in Gleichung (2.18).

$$f_{DC} = -\frac{2 \cdot V}{\lambda} \cdot \frac{\tan(\Psi)}{\sqrt{1 + \tan^2(\Psi)}} = -\frac{2 \cdot V}{\lambda} \cdot \sin(\Psi) \Rightarrow f_a(\alpha) = -\frac{2 \cdot V}{\lambda} \cdot \sin(\alpha) \quad (2.18)$$

Gleichung (2.18) gibt auch den Zusammenhang zwischen dem Winkel α , unter dem ein Ziel zu einem bestimmten Zeitpunkt von der Antenne beleuchtet wird, und der entsprechenden Azimutfrequenz f_a an. Der Winkel α wird zwischen der Orthogonalen zur Flugrichtung und der augenblicklichen Verbindungslinie zwischen Antenne und Ziel gemessen und ist eine Funktion der Azimutzeit. Zum Zeitpunkt $t_a = t_{DC}$ ist α gleich dem Squintwinkel Ψ .

In Bild 2.6 ist die für die Beispielgeometrie von Bild 2.15 nach Gleichung (2.15) berechnete Dopplerfrequenz über der Azimutzeit aufgetragen. Mit den Parametern von Bild 2.5 ergibt sich eine Beleuchtungsdauer von ungefähr 2 s. Die während der Beleuchtung auftretenden Dopplerfrequenzen bilden einen Ausschnitt aus der in Bild 2.6 dargestellten Kurve. Je nach Squintwinkel bzw. Dopplerzentroid verschiebt sich der Frequenzbereich des Ausschnitts. Bei 0 Hz Dopplerzentroid ist der Ausschnitt zum Beispiel um die Azimutzeit $t_a = 0$ s zentriert. Mit zunehmendem Dopplerzentroid findet eine immer größere Verschiebung aus dieser Position heraus statt.

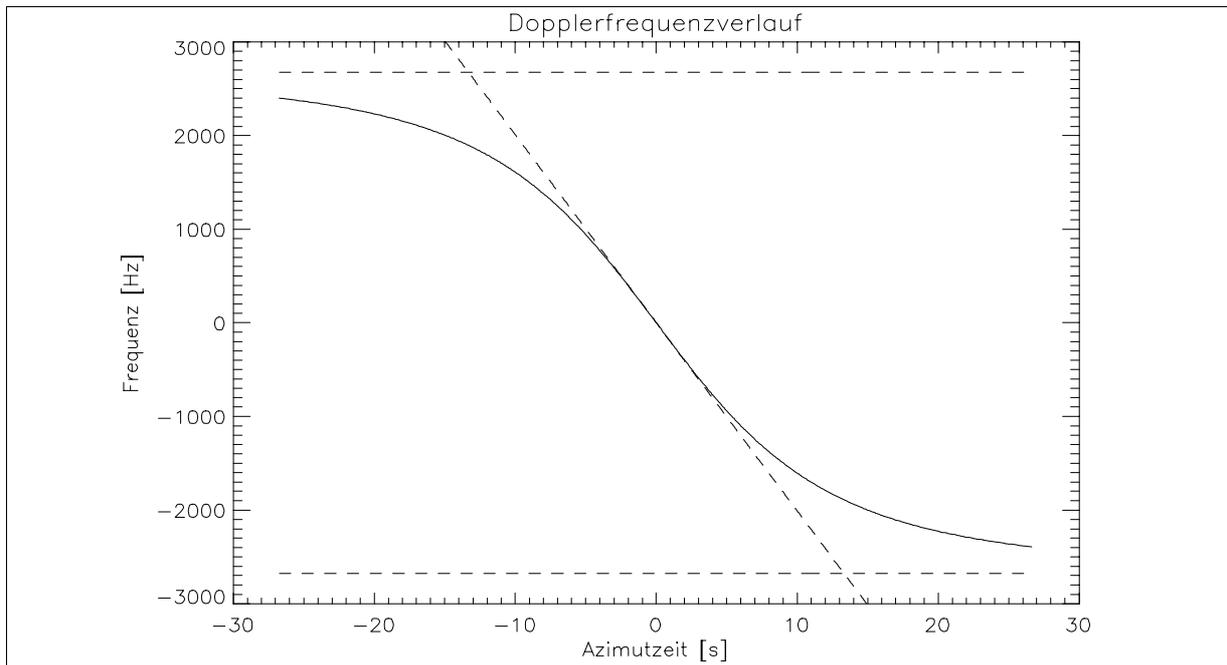


Bild 2.6: Dopplerfrequenzverlauf über der Azimutzeit

Bei einem kleinen Dopplerzentroid kann man als gute Näherung für den Kurvenverlauf die schräge, gestrichelte Asymptote in Bild 2.6 verwenden. Die Gleichung dieser Asymptote $y(t_a)$ in (2.19) ergibt sich, wenn die Ableitung des Dopplerfrequenzverlaufs aus der genäherten Entfernungsvariation von Gleichung (2.12) erfolgt.

$$y(t_a) = -\frac{2 \cdot V^2}{\lambda \cdot r_0} \cdot t_a = k_a \cdot t_a \quad (2.19)$$

Der Proportionalitätsfaktor k_a zwischen Dopplerfrequenz und Azimutzeit in Gleichung (2.19) wird als Dopplerrate bezeichnet. Unter Berücksichtigung des Dopplerzentroiden f_{DC} ist damit für kleine Squintwinkel die Approximation von Gleichung (2.15) durch Gleichung (2.20) möglich.

$$f_a(t_a) \approx f_{DC} + k_a \cdot t_a \quad (2.20)$$

Die waagrechten, gestrichelten Asymptoten oben und unten in Bild 2.6 ergeben sich für einen Squintwinkel von $\pm 90^\circ$, was eine Bewegung des Trägers direkt auf das Ziel zu oder vom Ziel weg bedeutet. Diese Asymptoten liegen bei den Frequenzen $f_{w1/2}$, welche in Gleichung (2.21) gegeben sind.

$$f_{w1/2} = \mp \frac{2 \cdot V}{\lambda} \quad (2.21)$$

2.4 Bildung der synthetischen Apertur

Eine synthetische Apertur kann man als eine sehr lange, aus lauter einzelnen realen Antennenelementen zusammengesetzte Antenne auffassen [22]. Ein Antennenelement entspricht dabei einem an einer bestimmten Azimutposition gesendeten und wieder empfangenen Impuls (Echo). Dabei werden die Impulse periodisch mit der Pulswiederholfrequenz PRF gesendet. Alle Echos, bei denen ein bestimmtes Punktziel von der Antenne beleuchtet wird, können zur Bildung der synthetischen Apertur für dieses Ziel herangezogen werden. Werden alle diese Echos verwendet, erhält man eine synthetische Apertur der Länge L_{max} . Die synthetische Apertur entsteht durch kohärentes Aufsummieren der Echos von verschiedenen Azimutpositionen. In Bild 2.7 ist dieser Vorgang dargestellt.

Beim Vorbeiflug des durch die Quadrate symbolisierten Trägers am Punktziel wird an jeder Position ein Impuls ausgesendet und das vom Punktziel reflektierte Echo empfangen. Wegen der kleinen Trägergeschwindigkeit im Verhältnis zur Lichtgeschwindigkeit gilt die Annahme, daß sich der Träger zwischen Senden und Empfangen eines Radarpulses nur um eine vernachlässigbar kleine Strecke weiterbewegt [9]. Auf Grund der unterschiedlichen Entfernungen r_i zwischen Träger und Punktziel treten Laufzeitunterschiede und damit Phasenunterschiede zwischen den einzelnen Echos E_i auf. Dabei ist $\Delta\Phi_i$ die Phasendifferenz eines Einzelechos E_i zum Echo E_o .

$$\Delta\Phi_i = \frac{-4\pi}{\lambda} \cdot (r_i - r_o) \quad (2.22)$$

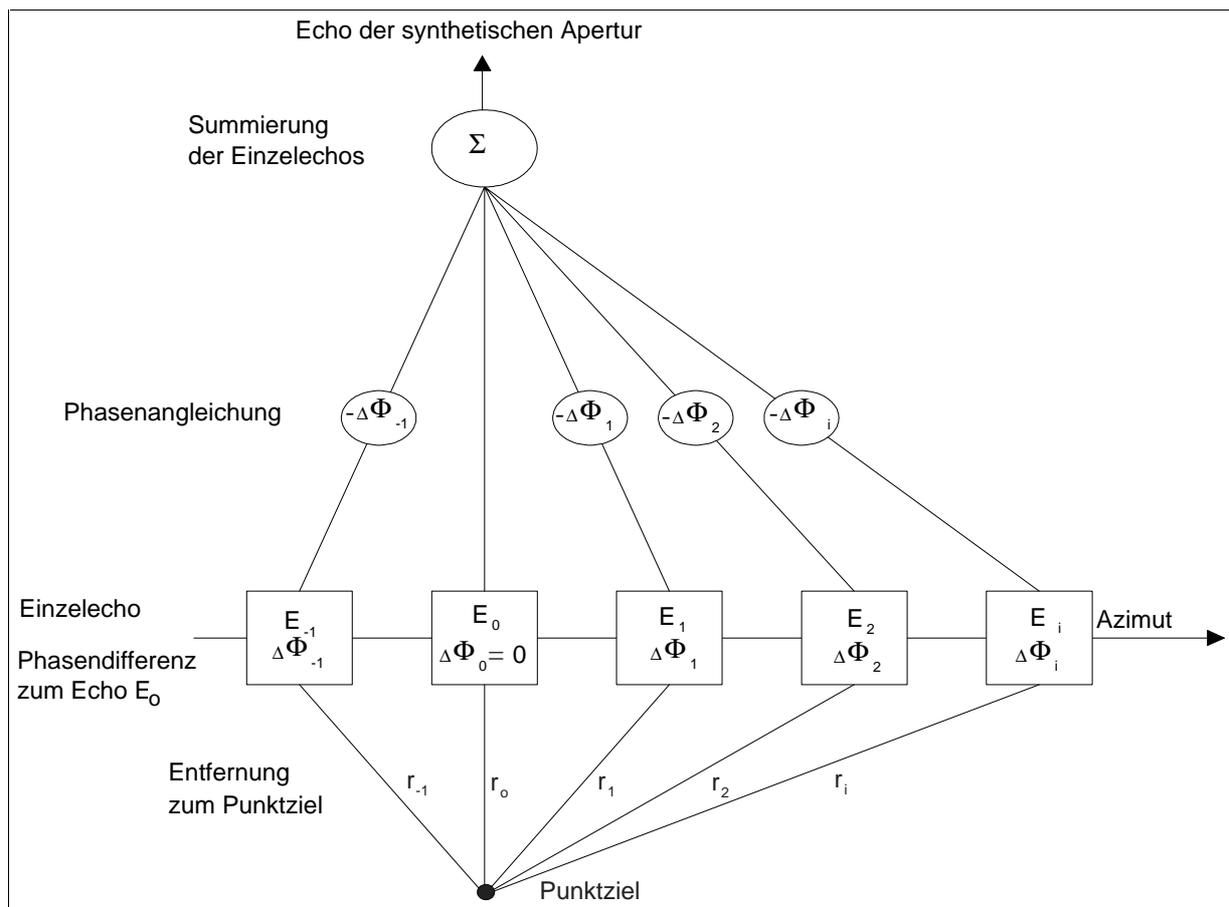


Bild 2.7: Bildung der synthetischen Apertur durch kohärente Aufsummierung von Einzelechos nach einer Phasenangleichung

Um die gleiche Phasenlage der Einzelechos für die kohärente Addition zu erreichen, ist eine Phasenkorrektur der Echos um $-\Delta\Phi_i$ nötig. Die Impulskompression in Azimut ist die kohärente Aufsummierung der phasenkorrigierten Einzelechos, also die Bildung der synthetischen Apertur.

2.5 Maximale geometrische Auflösung in Azimut

Der Öffnungswinkel θ_s einer synthetischen Apertur ergibt sich in Näherung aus deren Länge L und der verwendeten Wellenlänge λ [22].

$$\theta_s = \frac{\lambda}{2 \cdot L} \quad (2.23)$$

Die Auflösung in Azimut ρ_a ergibt sich durch Multiplikation des Öffnungswinkels mit der Entfernung r_o .

$$\rho_a \approx \theta_s \cdot r_o = \frac{r_o \cdot \lambda}{2 \cdot L} \quad (2.24)$$

Setzt man in Gleichung (2.24) die maximale Länge der synthetischen Apertur aus Gleichung (2.2) ein, so erhält man die maximal mögliche Azimutauflösung, welche nur noch von der Länge der realen Antenne abhängt. Es besteht keine Entfernungsabhängigkeit. Dies ist ein wesentlicher Vorteil des Radars mit synthetischer Apertur.

$$\rho_{a,\max} = \frac{r_o \cdot \lambda}{2 \cdot L_{\max}} = \frac{d}{2} \quad (2.25)$$

2.6 Geometrische Auflösung in Entfernungsrichtung

Die geometrische Auflösung in Entfernungsrichtung wird durch die Entfernungsbandbreite der Signale B_e bestimmt. Eine hohe Entfernungsbandbreite kann zum Beispiel durch eine sehr kurze Dauer T_p' der gesendeten Impulse erreicht werden, wobei der Zusammenhang zwischen T_p' und B_e in Gleichung (2.26) gegeben ist. Die Lichtgeschwindigkeit ist mit c_o bezeichnet.

$$\rho_e = \frac{c_o \cdot T_p'}{2} = \frac{c_o}{2 \cdot B_e} \quad (2.26)$$

Eine bessere Entfernungsauflösung erreicht man auch durch Modulation der gesendeten Radarpulse, weil dieses zu einer Vergrößerung der Systembandbreite und/oder Sendeleistung führt. Für SAR-Systeme wird fast immer eine lineare Frequenzmodulation verwendet. Aus der Pulsdauer des modulierten Pulses T_p und der gewünschten Bandbreite ergibt sich die Modulationsrate k_e des linear frequenzmodulierten Signals oder *Chirp*-Signals in Entfernung. Die Entfernung wird in dieser Arbeit als eine Variable des Ortes betrachtet.

$$k_e = -\frac{B_e}{T_p} \quad (2.27)$$

Der Verlauf der Phase, der Frequenz und des Realteils der Amplitude eines *Chirp*-Signals in Entfernung ist in Bild 2.8 dargestellt. Der Frequenzverlauf oben im Bild wird durch Gleichung (2.28) beschrieben. Die lineare Frequenzmodulation bedeutet eine quadratische Phasenmodulation. Gleichung (2.29) beschreibt diesen, in der Mitte des Bildes dargestellten, Phasenverlauf.

$$f_e(t_e) = k_e \cdot t_e \quad ; \quad -\frac{T_p}{2} \leq t_e \leq \frac{T_p}{2} \quad (2.28)$$

$$\Phi_e(t_e) = \pi \cdot k_e \cdot t_e^2 \quad ; -\frac{T_p}{2} \leq t_e \leq \frac{T_p}{2} \quad (2.29)$$

Je nach Vorzeichen der Modulationsrate k_e ergibt sich ein Signal mit über der Entfernungszeit steigender oder fallender Entfernungsfrequenz, wobei ersteres als *Up-Chirp* und letzteres als *Down-Chirp* bezeichnet wird. In Bild 2.8 ist ein *Down-Chirp* dargestellt.

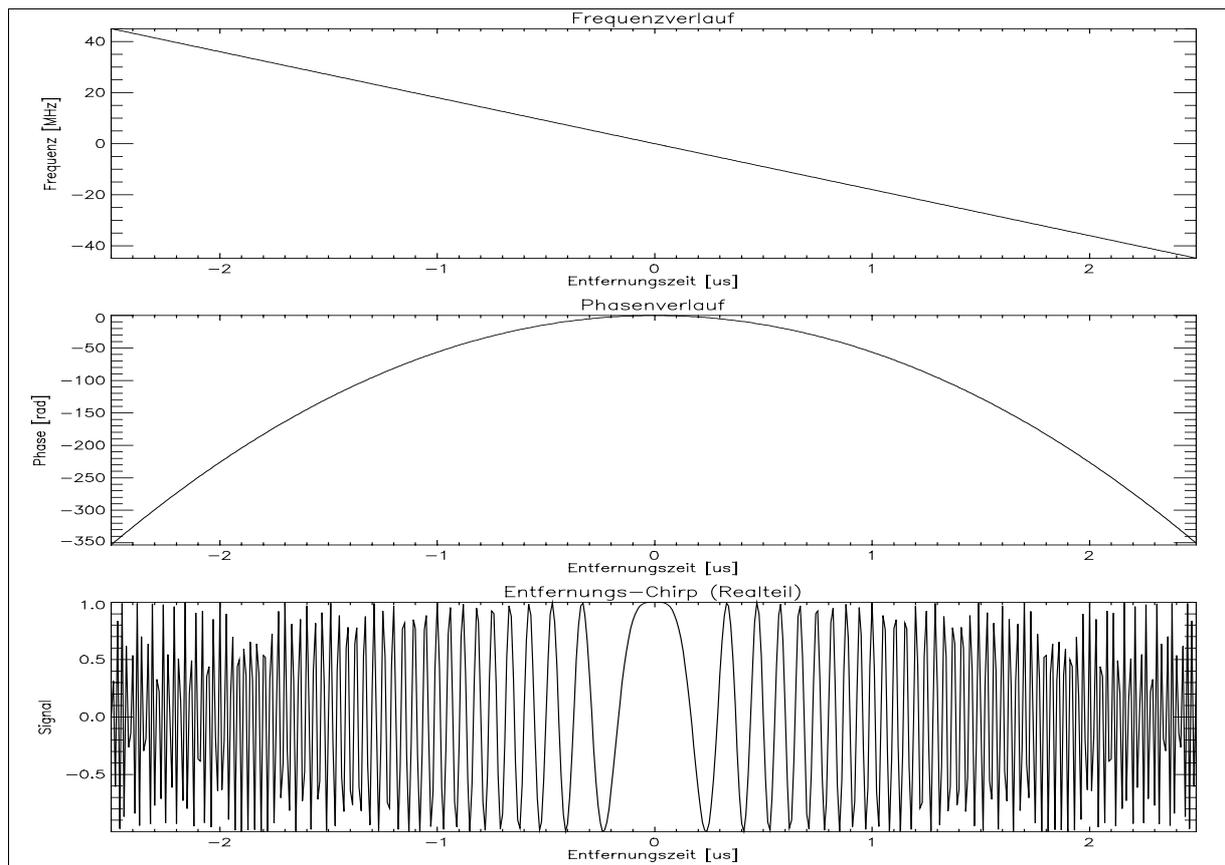


Bild 2.8: Lineare Frequenzmodulation in Entfernung, Simulationsparameter: $T_p=5 \mu\text{s}$, $B_e=90 \text{ MHz}$, Abtastfrequenz $f_s=100 \text{ MHz}$

2.7 Die SAR-Systemantwort

Durch die Überlagerung von Azimut- und Entfernungsmodulation ergibt sich als Systemantwort eines SAR-Systems ein zweidimensionales *Chirp*-Signal. Der Realteil eines solchen Signals ist in Bild 2.9 gezeigt, wobei die horizontale Richtung die Azimutrichtung und die vertikale Richtung die Entfernungsrichtung ist. Für das Beispiel im Bild wurde in Entfernungs- und Azimutrichtung ein *Down-Chirp* verwendet. Die Zielentfernungsänderung als Funktion der Azimutposition ist deutlich zu erkennen.

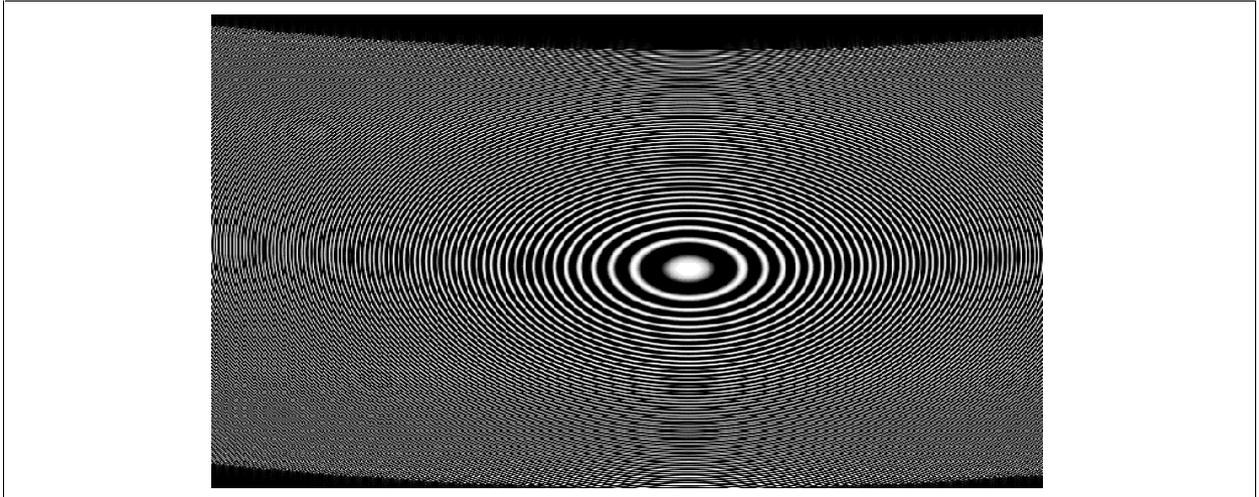


Bild 2.9: Realteil einer zweidimensionalen SAR-Systemantwort bei einem Down-Chirp in Entfernung und Azimut

Als Systemantwort bezeichnet man die empfangenen, quadratur-demodulierten und digitalisierten Echos eines Punktziels mit einem Rückstreukoeffizienten von $\sigma_0=1$. Für ein Punktziel in der Entfernung r_0 und der Azimutposition $t_a = 0$ s ergibt sich die SAR-Systemantwort in Gleichung (2.30).

In Gleichung (2.30) stellt C eine komplexe Konstante dar. Die Ausdrücke für das Antennendiagramm in Azimut und für die Hüllkurve des gesendeten Radarimpulses sind durch *rect*-Funktionen genähert. Diese Näherung ist für die Ableitungen der für die Prozessierung wesentlichen Phasenfunktionen ausreichend. Der erste Exponentialausdruck beschreibt den Entfernungs-*Chirp*, der zweite den Azimut-*Chirp*. Durch die Verschiebung der Entfernungszeit in der ersten *rect*-Funktion und im Entfernungs-*Chirp* wird die Zielentfernungsänderung beschrieben. Dabei ist $r(t_a, r_0)$ die Entfernungsvariation im Zeitbereich aus Gleichung (2.10).

$$s(t_a, t_e, r_0) = \sigma_0 \cdot C \cdot \text{rect} \left[\frac{t_e - \frac{2 \cdot r(t_a; r_0)}{c_0}}{T_p} \right] \cdot \text{rect} \left[\frac{t_a - \frac{t_{a1} + t_{a2}}{2}}{T_{ia}} \right] \cdot \exp \left[j \cdot \pi \cdot k_e \cdot \left(t_e - \frac{2 \cdot r(t_a; r_0)}{c_0} \right)^2 \right] \cdot \exp \left[-j \frac{4\pi}{\lambda} r(t_a; r_0) \right] \quad (2.30)$$

Eine natürliche Abbildungsszene besitzt an jeder Position eine komplexe Reflektivität $\sigma(t_a, t_e)$. Das empfangene Signal einer ganzen Szene $s_{\text{Szene}}(t_a, t_e)$ ergibt sich aus der zweidimensionalen Faltung der komplexen Reflektivität $\sigma(t_a, t_e)$ der Szene mit der Systemantwort $s(t_a, t_e)$. In Gleichung (2.31) stellt * den Faltungsoperator dar.

$$s_{\text{szene}}(t_a, t_e) = s(t_a, t_e) * \sigma(t_a, t_e) \quad (2.31)$$

Das Ziel einer jeden SAR-Prozessierung ist es, aus den Rohdaten die Reflektivität $\sigma(t_a, t_e)$ zurückzurechnen.

2.8 Weitere SAR-Betriebsmodi

Der Standardmodus sowohl für flugzeuggetragene als auch für satellitengestützte SAR-Systeme ist der *Stripmap*-Modus. Wie bereits in Kapitel 2.1 dargestellt, ist in diesem Modus die Antenne starr mit dem Träger verbunden, was zur Abbildung eines Streifens mit konstanter Breite und der Länge der überflogenen Strecke führt. Wegen der längeren Beleuchtung von Zielen im Fernbereich und der mit der Entfernung abnehmenden Dopplerrate aus Gleichung (2.19) ergibt sich eine von der Entfernung unabhängige Auflösung in Azimut. Vorteile dieses Modus sind die konstante Azimutauflösung und die starre und damit einfache Kopplung zwischen Träger und Antenne.

2.8.1 Der ScanSAR-Modus

Der *ScanSAR*-Modus wird hier ausführlich dargestellt. Er hat viele Gemeinsamkeiten mit dem *Spotlight*-Modus und erleichtert dessen Verständnis.

Bei allen SAR-Systemen ist die maximale Streifenbreite in Entfernung durch die Pulswiederholfrequenz PRF begrenzt, da die Radarechos nur in der Sendepause zwischen zwei ausgesendeten Radarpulsen empfangen werden können. Die Länge des maximal nutzbaren Zeitfensters für den Empfang ist $1/\text{PRF}$ minus die Länge eines gesendeten Impulses. In der Praxis ergeben sich strengere Beschränkungen der Streifenbreite durch Mehrdeutigkeiten (englisch: *Ambiguities*) [37]. Ein typischer Wert für die maximale Streifenbreite ist 100 km in Entfernung am Boden. Für flugzeuggetragene SAR-Systeme stellt dieser Wert keine Einschränkung dar, da die maximale Streifenbreite von der kleineren Entfernung zum Zielgebiet in Verbindung mit dem Antennendiagramm in Elevation begrenzt wird. Typische Streifenbreiten bei flugzeuggetragenen Systemen liegen in der Größenordnung von 10 km.

Bei satellitengestützten SAR-Systemen ist die Entfernung zum Zielgebiet in der Größenordnung von einigen 100 km. Für viele Anwendungen wird eine größere Streifenbreite als 100 km gewünscht, um schneller Informationen über ein größeres

Gebiet zu erhalten. Bei satellitengestützten SAR-Systemen ist es im *ScanSAR*-Modus [3] [44] [45] möglich, bei einem Überflug eine wesentlich größere Streifenbreite abzubilden. In Bild 2.10 ist die Abbildungsgeometrie für ein SAR-System im *ScanSAR*-Modus dargestellt.

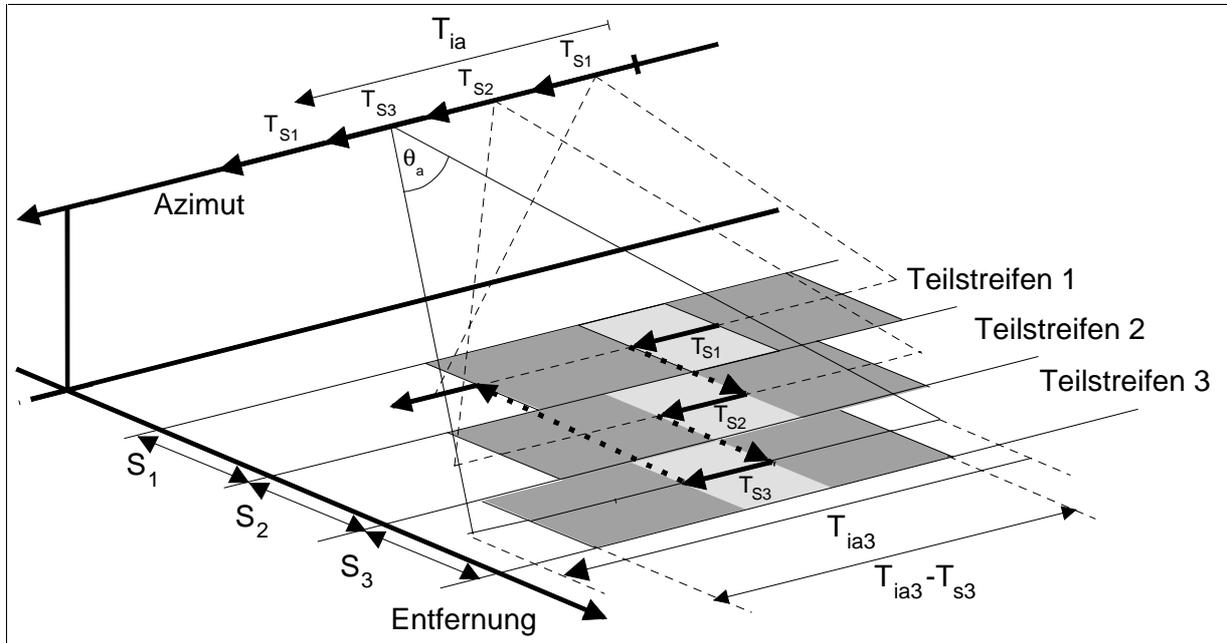


Bild 2.10: *ScanSAR* Geometrie: von der Antenne werden nacheinander die Teilstreifen 1, 2 und 3 beleuchtet

Im *ScanSAR*-Modus wird die zur Verfügung stehende synthetische Apertur in mehrere Teilaperturen aufgeteilt. Während jeder Teilapertur beleuchtet die Antenne einen anderen Winkelbereich in Elevation. Dadurch werden mehrere, parallel zueinander liegende Teilstreifen abgebildet, und so die Gesamtstreifenbreite wesentlich erweitert. Erkauft wird diese Erweiterung durch die Aufteilung der synthetischen Apertur, was die Verminderung der erzielbaren Auflösung in Azimut bedeutet. In Bild 2.10 ist über der Azimutachse die synthetische Apertur im Nahbereich mit T_{ia} bezeichnet, die n -te Teilapertur mit T_{sn} . Nach der Beleuchtung des ersten Teilstreifens der Breite S_1 wird die Antenne auf den zweiten Teilstreifen der Breite S_2 gerichtet, was im Bild durch den gestrichelten, dicken Pfeil von Teilapertur 1 zu Teilapertur 2 gezeigt ist. Nach der Beleuchtung von Teilstreifen 2 wird die Antenne auf Teilstreifen 3 und anschließend wieder auf Teilstreifen 1 gerichtet.

Um eine lückenlose Abbildung aller Streifen in Azimutrichtung zu gewährleisten, muß die Summe der Teilaperturen kleiner als die zum Öffnungswinkel θ_a korrespondierende synthetische Apertur im Nahbereich sein. Daneben muß spätestens nach der Zeit $T_{ian} - T_{sn}$ zur n -ten Teilapertur zurückgekehrt werden, da dies die maximale

Ausdehnung in Azimut ist, welche mit einer Teilapertur der Länge T_{SN} prozessiert werden kann. Für den dritten Teilstreifen ist diese maximale Ausdehnung durch einen Pfeil markiert. Die hellgrauen Bereiche geben die Längen der Teilaperturen an, während jeweils die hell- und dunkelgrauen Abschnitte zusammen die maximale Ausdehnung in Azimut angeben, welche mit einer Teilapertur prozessiert werden kann. Die Länge einer Teilapertur entspricht der Länge eines Rohdaten-Bursts, wobei dieser Begriff nachfolgend erklärt wird.

Wie Bild 2.11 zeigt, stellen SAR-Rohdaten eine kontinuierliche Aneinanderreihung von Echos in Azimutrichtung dar. Im Gegensatz dazu sind *ScanSAR*-Rohdaten Blöcke von aneinandergereihten Echos. Sie stellen Ausschnitte aus den kontinuierlichen *Stripmap*-Rohdaten dar und werden auch als *Burst*-Rohdaten bezeichnet.

Im Falle von *Stripmap*-Rohdaten besitzt jedes Punktziel in Azimutrichtung einen kompletten Azimut-*Chirp* mit der vollen Dopplerbandbreite, da es von der kompletten synthetischen Apertur beleuchtet wird. Bei *ScanSAR*-Rohdaten besitzt jedes Punktziel in einem Burst nur einen Teil-*Chirp* der Länge der Teilapertur T_s . Die Teil-*Chirps* von Zielen an verschiedenen Azimutpositionen kann man als unterschiedliche Ausschnitte eines kompletten Azimut-*Chirps* darstellen, welche im *ScanSAR*-Rohdatenblock übereinander zu liegen kommen. Bild 2.12 zeigt diese Darstellung.

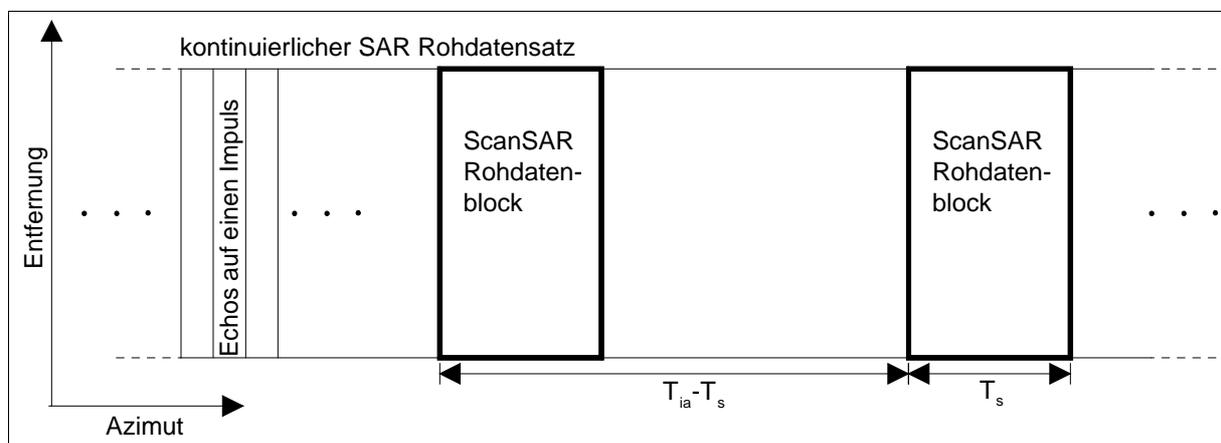


Bild 2.11: *ScanSAR*-Rohdaten als Ausschnitt von *Stripmap*-Rohdaten

Oben im *Bild 2.12* befindet sich der von der synthetischen Apertur T_{ia} beleuchtete Ausschnitt eines Teilstreifens am Beginn und am Ende der Teilapertur T_s . Der Ausschnitt am Beginn ist mit durchgezogenen Linien, der Ausschnitt am Ende mit strichlierten Linien gezeichnet. Grau unterlegt ist der gültige Bereich der Länge $T_{ia}-T_s$, welcher aus einem *ScanSAR* Rohdatenblock der Länge T_s prozessiert werden kann.

Am linken und rechten Ende dieses Bereichs liegen die gerade noch gültigen Punkte A und C, welche noch von der kompletten Teilapertur überstrichen werden. T_{ia} bezeichnet dabei die Zeit der kompletten synthetischen Apertur für die kleinste Entfernung in einem Teilstreifen.

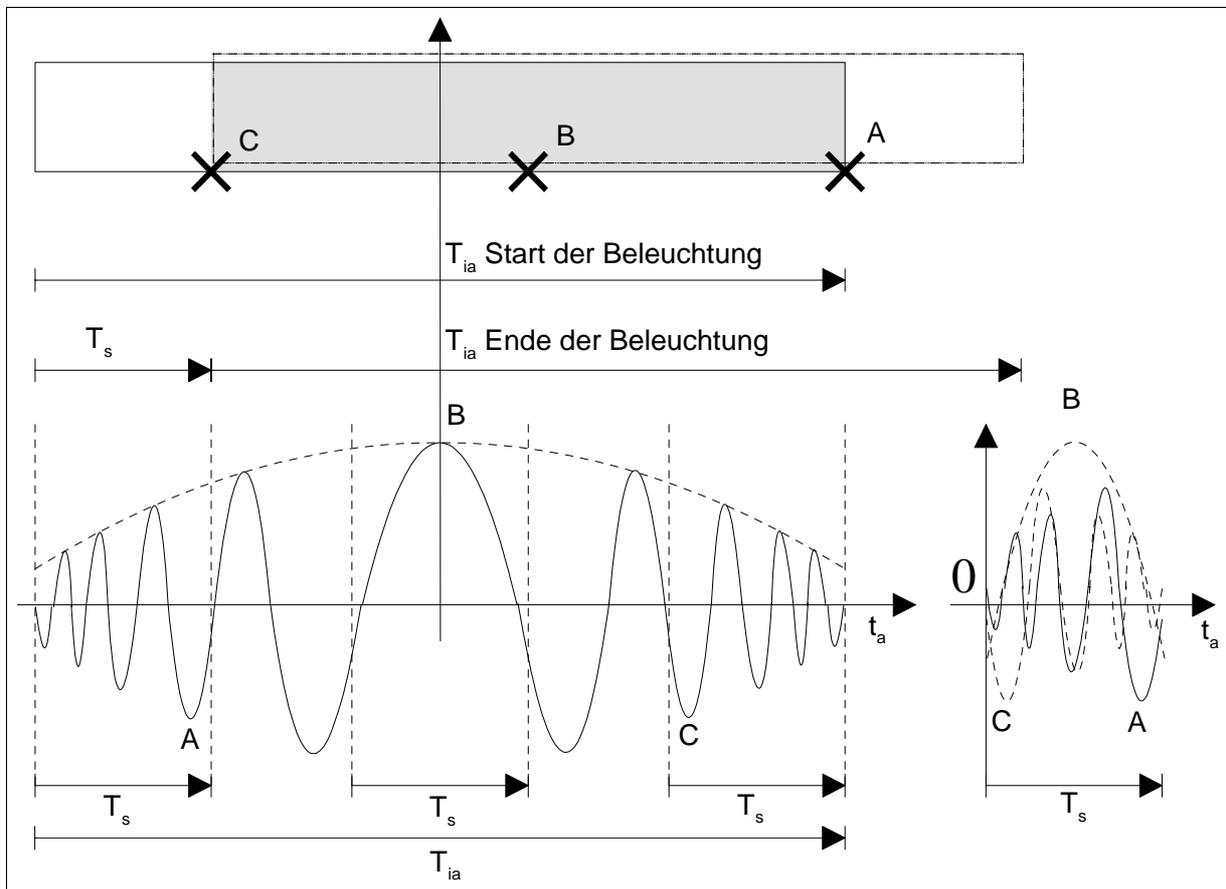


Bild 2.12: Teil-Chirps in ScanSAR Rohdaten: Die Teil-Chirps zu den Punkten A, B und C sind als Ausschnitte aus einem kompletten Azimut-Chirp dargestellt

Auf Grund der mit der Entfernung größer werdenden synthetischen Apertur, vergrößert sich in Entfernung der gültige Bereich in Azimutrichtung. Für eine lückenlose Abbildung des Teilstreifens in jeder Entfernung wird daher der gültige Bereich durch den Nahbereich bestimmt, also von den Zielen A und C begrenzt. Diese Ziele besitzen gerade noch einen kompletten Teil-Chirp in Azimut.

Unten links in Bild 2.12 sind die Teil-Chirps als Ausschnitte eines kompletten Azimut-Chirps dargestellt. Der Träger bewegt sich von links nach rechts. Dabei werden die Ziele A, B und C von der Teilapertur überstrichen. Über der Zeitachse ergeben sich dabei die Teil-Chirps zu den markierten Ausschnitten. Alle Teil-Chirps besitzen die Länge der Teilapertur T_s . Die Grenzen der Teil-Chirps ergeben sich aus der Position

der entsprechenden Punktziele relativ zum Beleuchtungsbeginn bzw. Beleuchtungs-ende. Rechts ist die Überlagerung dieser Teil-Chirps im *ScanSAR*-Rohdatenblock gezeigt.

Durch die mit der Entfernung konstante Länge der Teilapertur ist im *ScanSAR*-Modus die Azimutauflösung von der Entfernung abhängig. Auf Grund der im Nahbereich höheren Dopplerrate ist die Azimutauflösung im Nahbereich besser als im Fernbereich.

2.8.2 Der *Spotlight*-Modus

Der *Spotlight*-Modus ermöglicht durch verlängertes Beleuchten des gleichen Zielgebietes eine sehr hohe geometrische Auflösung in Azimut. In Bild 2.13 ist die Abbildungsgeometrie eines SAR-Systems im *Spotlight*-Modus dargestellt.

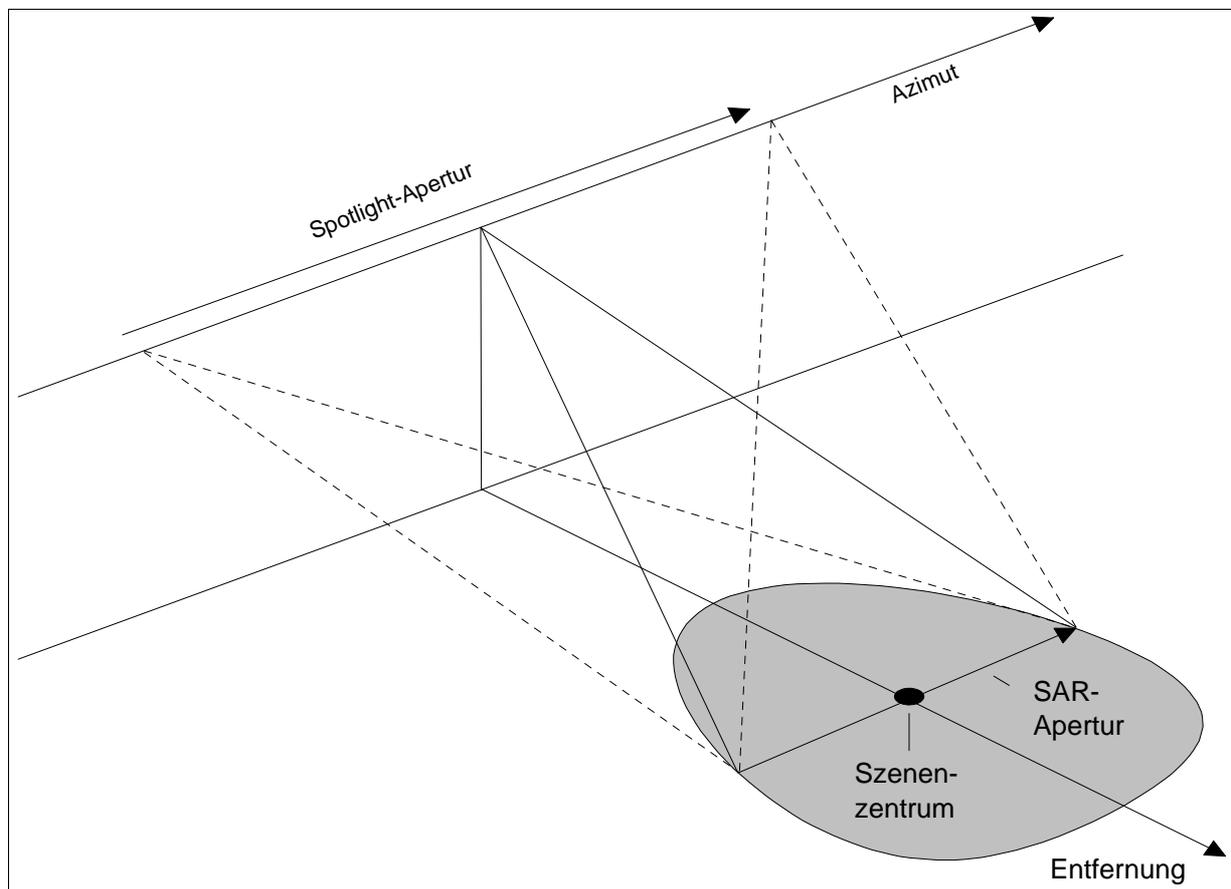


Bild 2.13: Abbildungsgeometrie im *Spotlight* Modus: Die Antenne wird während der Datenaufzeichnung permanent auf das Szenenzentrum gerichtet

Im *Spotlight*-Modus wird die Antenne während des gesamten Vorbeiflugs auf das Zentrum der abzubildenden Szene gerichtet. Durch dieses Nachführen der Antenne wird die Szene viel länger beleuchtet, als es im normalen Streifenmodus mit unbeweglicher Antenne der Fall wäre. Die längere Beleuchtungszeit ermöglicht die

Bildung einer längeren synthetischen Apertur oder *Spotlight*-Apertur. In Bild 2.13 ist die synthetische Apertur für den Streifenmodus als SAR-Apertur im Szenenzentrum sowie die längere *Spotlight*-Apertur über der Azimutachse dargestellt. Die lange *Spotlight*-Apertur liefert Azimutsignale mit großer Bandbreite und damit eine hohe geometrische Auflösung in Azimutrichtung. Im *Spotlight*-Modus wird wegen der Nachführung der Antenne eine in Azimut und Entfernung begrenzte Szene abgebildet, während im Streifenmodus und im *ScanSAR*-Modus eine Szene mit theoretisch unbegrenzter Azimutausdehnung abgebildet werden kann.

Genauso wie der *ScanSAR*-Modus ist auch der *Spotlight*-Modus ein Modus mit nicht kontinuierlicher Abbildung in Azimut. Der Start- und Endzeitpunkt der Beleuchtung ist für alle Ziele gleich. Dadurch ergibt sich im Prinzip für die Azimutsignale im *Spotlight*-Modus die gleiche Überlagerung, wie sie in *Bild 2.12* unten rechts für den *ScanSAR*-Modus gezeigt ist. Es werden aber, anstatt der Teil-*Chirps* des *ScanSAR*-Modus, *Spotlight*-Azimut-*Chirps* mit wesentlich längerer Dauer aufgezeichnet.

Die geometrische Azimutauflösung im *Spotlight*-Modus ist, ebenso wie im *ScanSAR*-Modus, von der Entfernung abhängig. Auf Grund der üblicherweise geringeren Szenenausdehnung in Entfernungsrichtung, ist die Variation der Azimutauflösung aber gering. Ab Kapitel 4 wird der *Spotlight*-Modus genauer behandelt.

2.8.3 Der Hybrid-Modus

Ein weiterer SAR-Betriebsmodus ist der Hybrid-Modus, welcher oft auch als *Sliding-Spotlight*-Modus bezeichnet wird. In diesem Modus wird die Antenne wie im *Spotlight*-Modus nachgeführt. Die Nachführung erfolgt aber langsamer, als es für eine *Spotlight*-Abbildung erforderlich wäre. Dadurch erreicht man eine Azimutauflösung, welche zwischen der Azimutauflösung des *Stripmap*- und des *Spotlight*-Modus liegt. Gegenüber einer *Spotlight*-Abbildung vergrößert sich die Szenenausdehnung in Azimut.

Eine genauere Beschreibung des Hybrid-Modus findet sich in [7]. Dort wird auch die Klassifizierung von *Spotlight*-, Hybrid- und *Stripmap*-Modus durch die Lage eines Drehzentrums verwendet. Diese Klassifizierung ist in Bild 2.14 gezeigt. Das Drehzentrum ist dabei der Punkt, auf den die Hauptstrahlrichtung der Antenne bei der Abbildung ständig gerichtet ist. Im *Spotlight*-Modus ist dieser Punkt im Zentrum der abgebildeten Szene und heißt Szenenzentrum. Im *Hybrid*-Modus liegt dieser Punkt außerhalb der Szene auf der dem Träger abgewandten Seite. Bei der *Stripmap*-Abbildung geht die Position des Drehzentrums gegen unendlich.

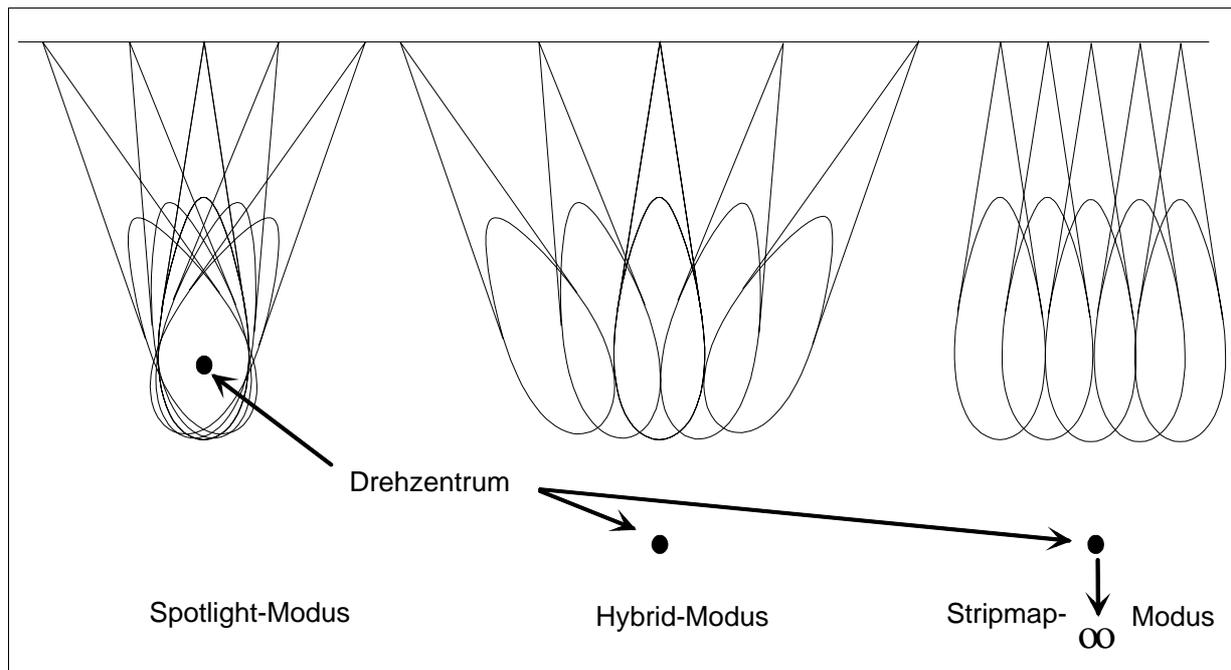


Bild 2.14: Klassifizierung von Spotlight-, Hybrid-, und Stripmap-Modus durch die Lage des Drehzentrums

Der Vorteil des Hybrid-Modus ist die Flexibilität bei der Wahl der gewünschten Auflösung und Szenenausdehnung in Azimut. Je höher die Azimutauflösung desto kleiner die Szenenausdehnung und umgekehrt.

2.9 Die Impulskompression

Dieser Abschnitt behandelt zwei Methoden zur Impulskompression von SAR-Daten. Die Optimalfilterung, wie zum Beispiel in [13] beschrieben, eignet sich sehr gut zur Verarbeitung von *Stripmap*-Daten, während das *SPECAN*-Verfahren [69] sehr oft zur *ScanSAR*-Datenprozessierung eingesetzt wird. Die Anwendung eines Optimalfilters, welches als sogenanntes *Matched*- oder Korrelationsfilter realisiert wird, resultiert immer in einem maximalen Signal/Rausch-Verhältnis. Ein verbessertes *SPECAN*-Verfahren stellt einen wichtigen Teil des in dieser Arbeit entwickelten *Spotlight*-Prozessierungsverfahrens dar. In der Praxis wird die Optimalfilterung oft nicht im Zeitbereich durch Faltung mit einer Optimalfilterfunktion, sondern im Spektralbereich durch eine schnellere Multiplikation mit der Fourier-Transformierten der Optimalfilterfunktion durchgeführt.

Sowohl *Spotlight*- als auch *ScanSAR*-Rohdaten sind Rohdaten mit nicht kontinuierlicher Azimutabbildung, da eine durch einen bestimmten Start- und Endzeitpunkt begrenzte Datenaufzeichnung erfolgt. Optimalfilterung und *SPECAN*-Verfahren werden nachfolgend für *Stripmap*- und für SAR-Daten mit nicht kontinuierlicher

Azimutabbildung dargestellt. *Stripmap*-SAR-Daten besitzen eine kontinuierliche Azimutabbildung. Die Länge der Rohdaten in Azimut ist durch die während der Aufzeichnung überflogenen Strecke gegeben und die Azimutsignale aller Punktziele einer Entfernung sind bis auf eine Zeitverschiebung identisch.

Falls in der SAR-Datenverarbeitung die Zielentfernungsänderung vor der Azimutkompression korrigiert wird, stellt die Entfernungszeit bei der Azimutkompression nur noch einen Parameter und keine Variable mehr dar. In diesem Fall ist es möglich, eine eindimensionale Kompression in Entfernung und in Azimut durchzuführen.

2.9.1 Die Optimalfilterung

Um aus einem empfangenen Signal ein Abbild der Reflektivität $\sigma(t_a, t_e)$ einer Szene zu erhalten, muß die Phasenvariation in Azimut und Entfernung ausgeglichen werden. Diese Korrektur kann durch Filterung des empfangenen Signals mit einem *Matched*-Filter nach der Optimalfilter-Theorie [13] durchgeführt werden. Die Referenzfunktion des *Matched*-Filter entspricht dabei der konjugiert komplexen, zeitinvertierten SAR-Systemantwort.

2.9.1.1 *Stripmap*-Modus und Entfernungsverarbeitung

Das SAR-Signal in Azimutrichtung kann in erster Näherung als ein linear frequenzmoduliertes Signal verstanden werden. In Entfernungsrichtung wird oft auch ein linear frequenzmoduliertes Signal zur Erweiterung der Bandbreite verwendet. Mit diesen Annahmen ist das SAR-Signal in Azimutrichtung im *Stripmap*-Modus von gleicher Art wie das Entfernungssignal. In diesem Abschnitt werden diese beiden Signale einheitlich als Signal bezeichnet. Bild 2.15 zeigt oben das empfangene Signal von zwei Punktzielen an den Positionen t_0 und $t_{0,1}$, welche zugleich die Positionen der Phasenzentren der Punktziele sind.

Der Abstand zwischen der Mitte der Beleuchtung und dem Phasenzentrum ist mit t_c bezeichnet. Im Fall der Entfernungskompression ist $t_c = 0$. Für die Impulskompression in Azimut gilt für kleine Squintwinkel in guter Näherung, daß sich das Azimutsignal und die Filterfunktion symmetrisch um t_c ausdehnen, wobei t_c gleich t_{DC} aus Gleichung (2.9) ist. Das Filter zur Optimalfilterung ist in Bild 2.15 unten gezeigt. Für eine bessere Darstellung wurde die Filterfunktion gespiegelt dargestellt. Das eindimensionale *Chirp*-Signal eines Punktziels mit der Bandbreite B und der Dauer T an der Stelle t_0 ist in Gleichung (2.32) beschrieben, wobei die Rechteckfunktion mit *rect* und der Dirac-Impuls mit $\delta(t)$ bezeichnet ist.

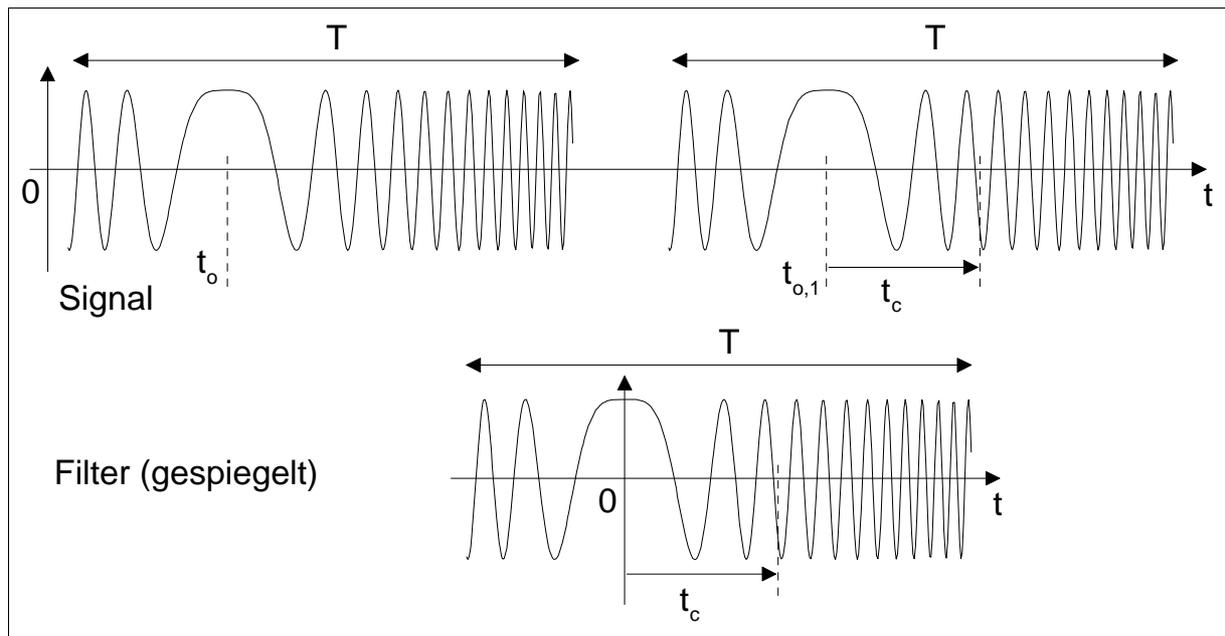


Bild 2.15: Impulskompensation durch Optimalfilterung im Stripmap-Modus

$$s(t) = \exp \left[-j \cdot \pi \cdot \frac{B}{T} \cdot t^2 \right] \cdot \text{rect} \left[\frac{t - t_c}{T} \right] * \delta(t - t_0) \quad (2.32)$$

Die Filterfunktion des *Matched-Filter* zeigt Gleichung (2.33). Dabei stellen die Konstante C und die Wurzel eine Normierung für das Faltungsintegral dar.

$$h(t) = C \cdot s(-t)^* = \sqrt{\frac{B}{T}} \cdot \exp \left[j \cdot \pi \cdot \frac{B}{T} \cdot t^2 \right] \cdot \text{rect} \left[\frac{-t - t_c}{T} \right] \quad (2.33)$$

Das Ergebnis der Faltung des Signals $s(t)$ mit dem Filter $h(t)$ ohne zusätzliche Gewichtung oder Bandbreitebeschränkung ist die Impulsantwort IRF in Gleichung (2.34). Die Dreiecksfunktion ist mit $\Lambda(t)$ bezeichnet.

$$\begin{aligned} \text{IRF}(t) &= \sqrt{\frac{B}{T}} \cdot \int_{-\infty}^{\infty} s(\tau) \cdot h(t - \tau) d\tau \\ &= \sqrt{B \cdot T} \cdot \exp \left[-j \cdot 2\pi \cdot \frac{B}{T} \cdot t \cdot t_c \right] \cdot \Lambda \left[\frac{t}{T} \right] \cdot \text{si} \left[\pi \cdot B \cdot t \cdot \Lambda \left[\frac{t}{T} \right] \right] * \delta(t - t_0) \end{aligned}$$

mit $\Lambda \left[\frac{t}{T} \right] = \begin{cases} \left(1 - \frac{|t|}{T} \right) & \text{für } |t| \leq T \\ 0 & \text{für } |t| > T \end{cases} \quad (2.34)$

Die $\sin(x)/x$ -Funktion ist mit $\text{si}(x)$ bezeichnet. Die Wurzel aus Bandbreite mal Impulsdauer in (2.34) stellt den Gewinn der Optimalfilterung dar. Für eine phasen-

treue Prozessierung ist die Exponentialfunktion vor der si-Funktion von Bedeutung. Das Maximum der Impulsantwort und somit die Position des Punktziels nach der Kompression befindet sich an der Stelle t_0 . An dieser Stelle gilt $t = t_0$ und die Phase der Exponentialfunktion vor der si-Funktion in Gleichung (2.34) wird zu null.

2.9.1.2 Verarbeitung für Rohdaten mit nicht kontinuierlicher Azimutabbildung

Die Verarbeitung von nicht kontinuierlichen SAR-Daten kann mit Optimalfilterung durchgeführt werden. Auf Grund der großen Länge der benötigten Filterfunktion wird aber häufiger das SPECAN-Verfahren angewendet. Nicht kontinuierliche Rohdaten ergeben sich im *ScanSAR*- oder *Spotlight*-Modus in Azimutrichtung und sind identisch mit *Stripmap*-Rohdaten multipliziert mit Fensterfunktionen. Im *ScanSAR* ist dies eine Folge von kurzen Fensterfunktionen und im *Spotlight*-Modus eine sehr lange Fensterfunktion (bei Annahme einer ausreichend langen *Stripmap*-Apertur). Dadurch ergeben sich zeitvariante Impulsantworten.

In Bild 2.16 ist oben das Signal von zwei Punktzielen bei den Azimutpositionen t_0 und $t_{0,1}$ gezeigt. Zum leichteren Verständnis sind hier *ScanSAR*-Azimutsignale angenommen. Gestrichelt gezeichnet ist das ganze Signal der Punktziele, wie es sich für die komplette synthetische Apertur der Länge T ergeben würde. Auf Grund der nicht kontinuierlichen Abbildung wird nur jeweils ein Teil der synthetischen Apertur der Länge T_B aufgezeichnet. Der aufgezeichnete Anteil entspricht einem Ausschnitt aus dem, der ganzen synthetischen Apertur entsprechenden, Signal der Länge T . Für jede Punktzielposition ergibt sich ein anderer Ausschnitt aus dem Signal der kompletten synthetischen Apertur. Im Bild befinden sich die aufgezeichneten Ausschnitte zwischen den dicken schwarzen Linien.

Für Azimutsignale im *Spotlight*-Modus ist Bild 2.16 genauso gültig, wenn die komplette synthetische Apertur der Länge L , welche zum Öffnungswinkel der realen Antenne in Azimut korrespondiert, ersetzt wird durch eine gedachte, viel längere synthetische Apertur, welche zu einem künstlich vergrößerten Öffnungswinkel korrespondiert. Dabei setzt sich dieser künstlich vergrößerte Öffnungswinkel aus dem Öffnungswinkel der realen Antenne plus dem Schwenkbereich der Antenne in Azimut zusammen.

Da, wie in Bild 2.16 gezeigt, für nicht kontinuierliche Rohdaten der Zeitpunkt der Beleuchtung für alle Ziele gleich ist, ergibt sich für jede Azimutposition eine unterschiedliche Zeit $t_c(t_0)$, welche die Verschiebung des Phasenzentrums des *Chirp*-Signals zur Mitte der Beleuchtung t_x angibt. Die Filterfunktion ist unten im Bild

gespiegelt dargestellt. Sie besitzt die Länge der kompletten synthetischen Apertur T und eine Verschiebung $t_{c,filter}$, wie sie sich als t_c für jedes Ziel einer *Stripmap*-Abbildung ergeben würde.

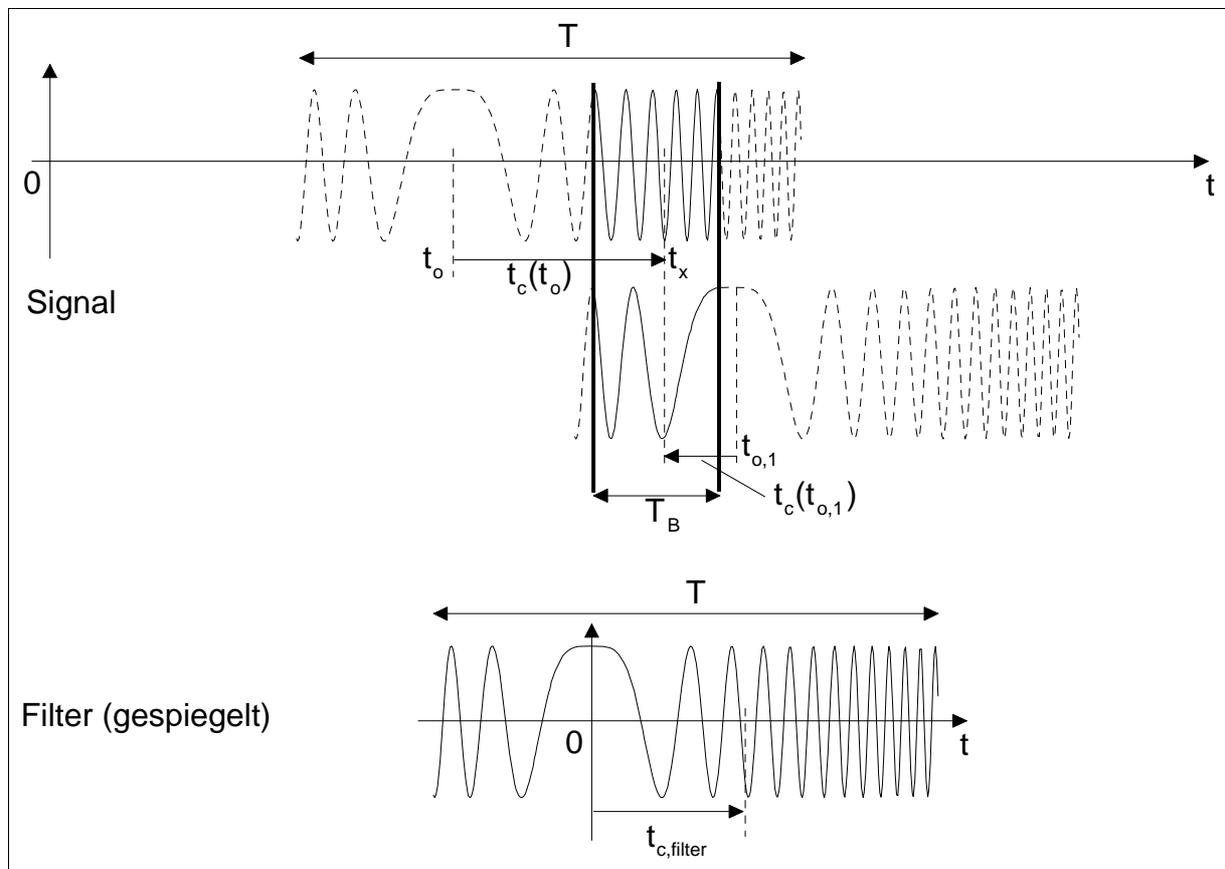


Bild 2.16: Impulskompensation mit Optimalfilter für nicht kontinuierliche SAR-Daten

Das Signal eines Punktziels an der Stelle t_o ist in Gleichung (2.35) angegeben, das zugehörige *Matched*-Filter befindet sich in Gleichung (2.36). Die Normierung wurde durch Ersetzen von T durch T_B geändert.

$$s(t) = \exp\left[-j \cdot \pi \cdot \frac{B}{T} \cdot (t - t_o)^2\right] \cdot \text{rect}\left[\frac{t - t_x}{T_B}\right] \quad (2.35)$$

$$h(t) = c \cdot s(-t)^* \Big|_{t_o=0} = \sqrt{\frac{B}{T_B}} \cdot \exp\left[j \cdot \pi \cdot \frac{B}{T} \cdot t^2\right] \cdot \text{rect}\left[\frac{-t - t_{c,Filter}}{T}\right] \quad (2.36)$$

Das Ergebnis der Faltung ohne zusätzliche Gewichtung oder Bandbreitebeschränkung ist die Impulsantwort IRF in Gleichung (2.37). Da nach der Verarbeitung nur das Ergebnis für den gültigen Zielbereich interessiert, gibt Gleichung (2.37) nur das Ergebnis für diesen Bereich an. Gültige Ziele besitzen eine Integrationszeit gleich der vollen Aperturlänge (Teilapertur-Länge bei ScanSAR oder *Spotlight*-Aperturlänge).

$$\begin{aligned}
 \text{IRF}(t) &= \sqrt{\frac{B}{T_B}} \cdot \int_{t_x - \frac{T_B}{2}}^{t_x + \frac{T_B}{2}} \exp\left[-j \cdot \pi \cdot \frac{B}{T} \cdot (\tau - t_0)^2\right] \cdot \exp\left[j \cdot \pi \cdot \frac{B}{T} \cdot (t - \tau)^2\right] d\tau \\
 &= \sqrt{B \cdot T_B} \cdot \exp\left[j \cdot \pi \cdot \frac{B}{T} \cdot (t^2 - t_0^2)\right] \cdot \exp\left[-j \cdot 2\pi \cdot \frac{B}{T} \cdot (t - t_0) \cdot t_x\right] \cdot \text{si}\left[\pi \cdot \frac{B \cdot T_B}{T} \cdot (t - t_0)\right] \\
 &\text{für } t_x - t_{c,\text{Filter}} - \frac{T - T_B}{2} \leq t \leq t_x - t_{c,\text{Filter}} + \frac{T - T_B}{2} \quad (2.37)
 \end{aligned}$$

Der gültige Zielbereich ist in Gleichung (2.37) angegeben. Die Bestimmung dieses gültigen Bereichs kann mit Bild 2.17 erfolgen.

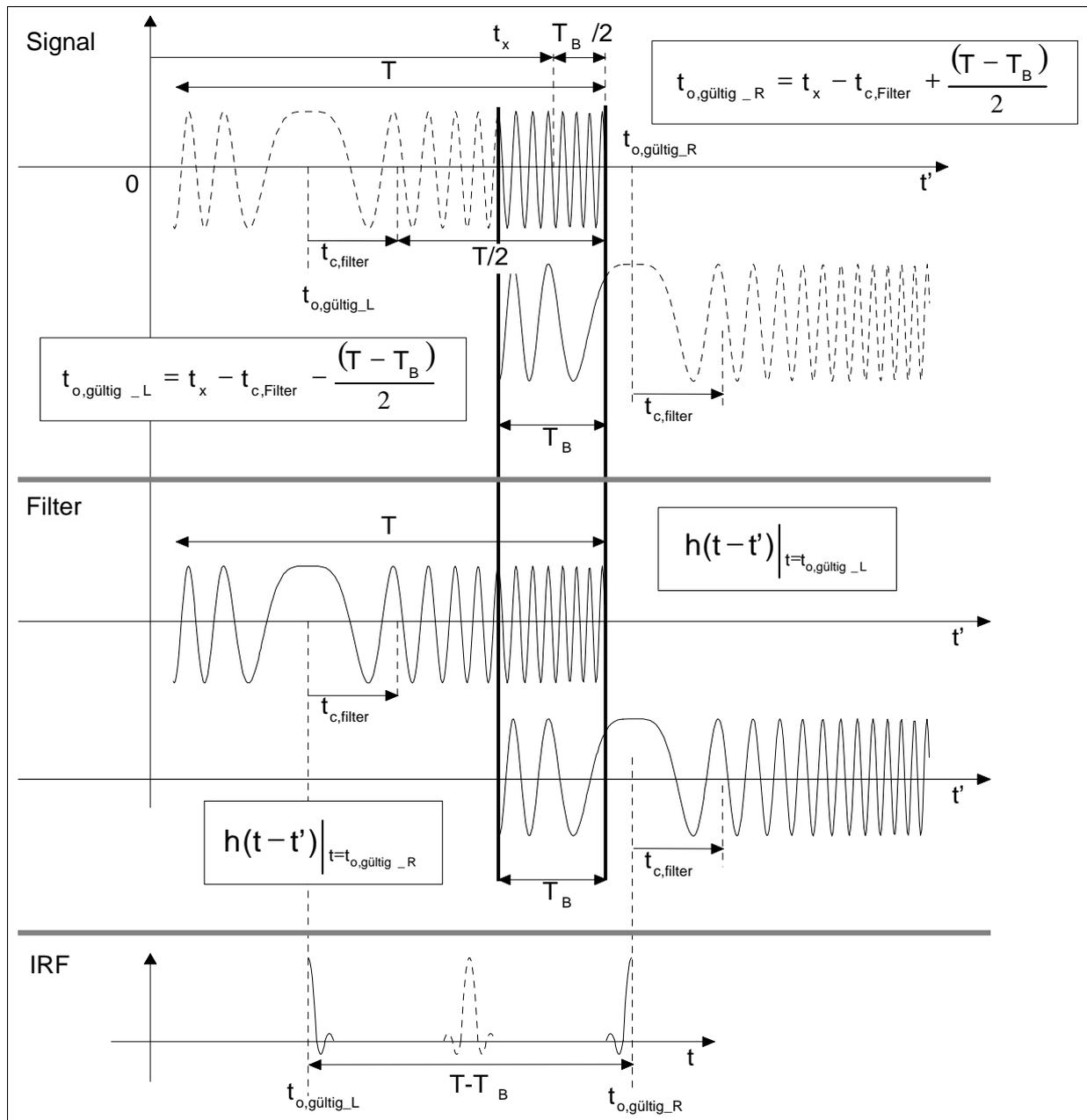


Bild 2.17: Bestimmung des gültigen Bereichs für t bei der Faltungsoperation

Da gültige Ziele eine volle Integrationszeit des Faltungsintegrals von T_B besitzen müssen, ergibt sich das erste gültige Ziel an der Position $t_{o,gültig_L}$ im oberen Diagramm des Bildes. Die Position und das Phasenzentrum des letzten gültigen Ziels befinden sich bei $t_{o,gültig_R}$. Im mittleren Abschnitt des Bildes ist die Filterposition am Anfang und Ende der Faltung im gültigen Bereich gezeigt. Das Ergebnis der Faltung sind si-Funktionen, wie in Gleichung (2.37) angegeben. Vom ersten und letzten gültigen Ziel ist das Maximum der Impulsantwort gerade noch im gültigen Bereich enthalten.

Wichtig für die phasentreue Verarbeitung ist, daß sich in Gleichung (2.37) die beiden Exponentialfunktionen vor der si-Funktion an der Stelle des komprimierten Punktziels $t = t_o$ zu 1 ergeben.

2.9.2 Das SPECAN-Verfahren

Eine weitere Möglichkeit zur Impulskompression stellt das SPECAN-Verfahren dar (englisch: SPECTral ANALysis) [69]. Dieses Verfahren eignet sich sehr gut zur effizienten Prozessierung von *ScanSAR*- oder *Spotlight*-Daten, wobei eine ausreichend genaue *Spotlight*-Verarbeitung nur durch die Kombination mit der später beschriebenen Azimut-Skalierung möglich ist. Es besteht aus einer *Deramping*-Funktion, welche die lineare Frequenzmodulation der empfangenen Signale entfernt, und aus einer sich anschließenden spektralen Analyse, welche als Fourier-Transformation durchgeführt wird. Nach dem *Deramping* ergeben sich sinusförmige Signale, deren Frequenzen von der Position der Ziele relativ zu einer Referenzposition abhängen. Die Fourier-Transformation komprimiert die sinusförmigen Signale zu Impulsen.

2.9.2.1 Stripmap- und Entfernungsverarbeitung

Die Azimutkompression von *Stripmap*-Daten und die Entfernungsverarbeitung mit der SPECAN-Methode erscheint wegen der großen Länge und der damit hohen Bandbreite der benötigten *Deramping*-Funktion wenig vorteilhaft. Wegen der zeitlichen Versetzung der Signale von Zielen an verschiedenen Positionen ist es aber möglich, mit geringer Bandbreite auszukommen. Für die Entfernungsverarbeitung ist diese Methode in [78] und [79] beschrieben.

Das *Stripmap*-Signal von zwei Punktzielen und die *Deramping*-Funktion für die SPECAN-Verarbeitung von *Stripmap*-Daten in Azimut oder von SAR-Daten in Entfernungsrichtung sind in Bild 2.18 dargestellt. Die zwei Punktziele stellen das

erste und letzte gültige Ziel mit voller Aperturlänge dar. Die *Deramping-Funktion* muß mindestens die Signale aller gültigen Ziele abdecken. Diese Mindestlänge ist in Bild 2.18 und in der Gleichung der *Deramping-Funktion* (2.38) angenommen.

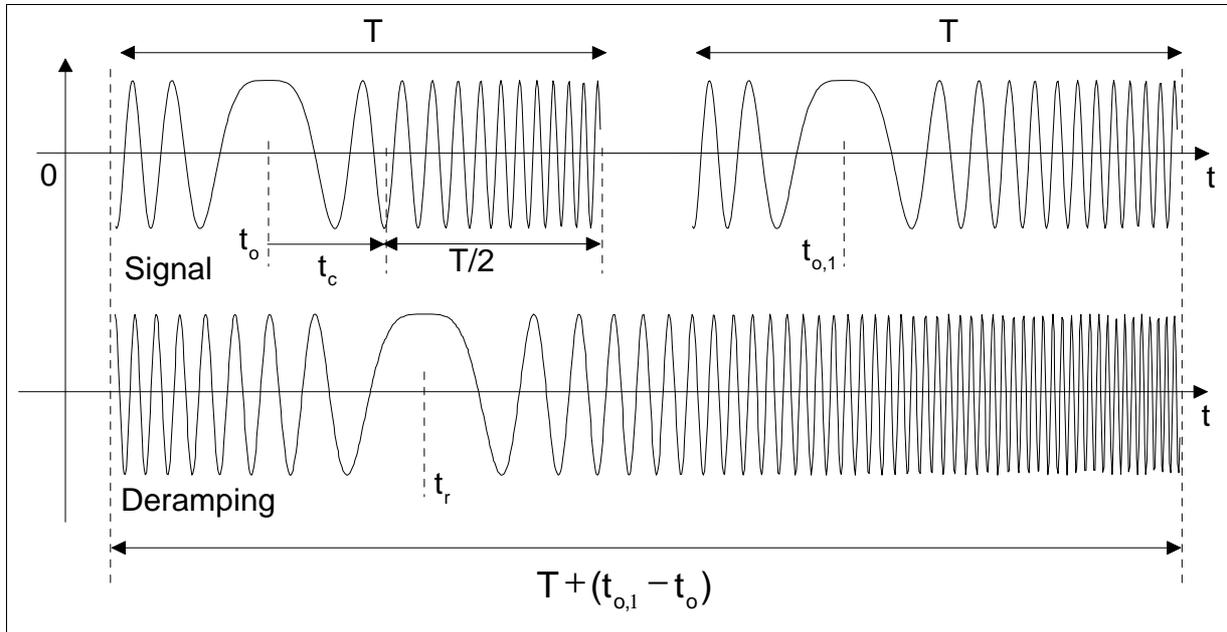


Bild 2.18: Signal und Deramping-Funktion zur Stripmap-SPECAN-Verarbeitung

Die Formulierung des Signals eines Punktziels an der Stelle t_0 ist bei der Optimalfilterung in Gleichung (2.32) gegeben. Die Phase der *Deramping-Funktion* $d(t)$ ist durch die Position des Phasenzentrums t_r definiert und in Gleichung (2.38) angegeben.

$$d(t) = \exp \left[+j \cdot \pi \cdot \frac{B}{T} \cdot (t - t_r)^2 \right] \cdot \text{rect} \left[\frac{t - \left(t_c + \frac{t_{o,1} + t_0}{2} \right)}{T + (t_{o,1} - t_0)} \right] \quad (2.38)$$

Nach der Multiplikation des Signals mit der *Deramping-Funktion* und einer Fourier-Transformation ergibt sich die Impulsantwort in Gleichung (2.39). Die Frequenzvariable ist mit f bezeichnet. Das Fourier-Integral ist analog zur Verarbeitung mit Optimalfilter normiert.

$$\begin{aligned} \text{IRF}(f) &= \sqrt{\frac{B}{T}} \cdot \int_{t_0 + t_c - \frac{T}{2}}^{t_0 + t_c + \frac{T}{2}} \exp \left[-j \cdot \pi \cdot \frac{B}{T} \cdot (t - t_0)^2 \right] \cdot \exp \left[j \cdot \pi \cdot \frac{B}{T} \cdot (t - t_r)^2 \right] \cdot \exp [-j \cdot 2\pi \cdot t \cdot f] dt \\ &= \sqrt{B \cdot T} \cdot \exp \left[-j \cdot \pi \cdot \frac{B}{T} \cdot (t_0^2 - t_r^2) \right] \cdot \exp \left[-j \cdot 2\pi \cdot \left(f + \frac{B}{T} \cdot (t_r - t_0) \right) \cdot (t_0 + t_c) \right] \\ &\quad \cdot \text{si} \left[\pi \cdot T \cdot \left(f + \frac{B}{T} \cdot (t_r - t_0) \right) \right] \end{aligned} \quad (2.39)$$

Das Ergebnis der Impulskompression mit SPECAN in (2.39) ergibt sich im Frequenzbereich als Funktion der Frequenzvariable f . Wegen des linearen Zusammenhangs zwischen Zeit und Frequenz, welcher eine Folge der ursprünglichen linearen Frequenzmodulation des Chirp-Signals ist, kann man durch Skalieren der Frequenzvariable f mit T/B den entsprechenden Ausdruck als Funktion der Zeitvariable t erhalten. Für eine phasentreue Verarbeitung müssen sich die Phasen der beiden Exponentialterme vor der si -Funktion in (2.39) zu Null ergeben. An der Stelle des Maximums der Hauptkeule gilt Gleichung (2.40) und der erste Exponentialterm kann so umgeschrieben werden, daß sich die Impulsantwort in der Form von Gleichung (2.41) ergibt.

$$f_p = -\frac{B}{T} \cdot (t_r - t_o) \Leftrightarrow t_o^2 = \left(t_r + f_p \cdot \frac{T}{B} \right)^2 \quad (2.40)$$

$$\begin{aligned} \text{IRF}(f) = & \sqrt{B \cdot T} \cdot \exp \left[-j \cdot 2\pi \cdot t_r \cdot f_p \right] \cdot \exp \left[-j \cdot \pi \cdot \frac{T}{B} \cdot f_p^2 \right] \\ & \cdot \exp \left[-j \cdot 2\pi \cdot \left(f + \frac{B}{T} \cdot (t_r - t_o) \right) \cdot (t_o + t_c) \right] \cdot \text{si} \left[\pi \cdot T \cdot \left(f + \frac{B}{T} \cdot (t_r - t_o) \right) \right] \end{aligned} \quad (2.41)$$

An der Stelle des Maximums der Hauptkeule wird nur die dritte Exponentialfunktion in (2.41) zu 1. Die ersten beiden Exponentialfunktionen müssen für eine phasentreue Verarbeitung zusätzlich korrigiert werden. Für ein an der Stelle f_p fokussiertes Punktziel kann die Korrektur durch zwei Phasenkonstanten erfolgen, welche invertiert zu den konstanten Werten der ersten beiden Exponentialfunktionen in (2.41) sind. Werden alle möglichen Punktzielpositionen berücksichtigt, so kann die erste Exponentialfunktion durch eine in der Frequenz f lineare Phasenfunktion und die zweite Exponentialfunktion durch eine in der Frequenz f quadratische Phasenfunktion korrigiert werden. Dabei entspricht die lineare Phasenfunktion der Verschiebung des Phasenzentrums der *Deramping*-Funktion aus dem Ursprung der Zeitvariable t . Eine zur quadratischen Phasenfunktion ähnliche Korrekturfunktion wird für *Spotlight*-Daten mit *Dechirp*-Operation in Entfernung angewendet und wird dort als *Residual Video Phase*-Korrektur bezeichnet. Der *Residual Video Phase*-Term [10] wird in Kapitel 4.3 genauer behandelt.

2.9.2.2 Verarbeitung für Rohdaten mit nicht kontinuierlicher Azimutabbildung

Für Rohdaten mit nicht kontinuierlicher Azimutabbildung ist die SPECAN-Methode sehr gut geeignet, da die Länge der *Deramping*-Funktion der Länge des Rohdatensignals entspricht. In Bild 2.19 ist oben das Signal von zwei Punktzielen bei den

Azimutpositionen t_0 und $t_{0,1}$ gezeigt. Wie bereits bei Bild 2.16 erklärt, ist das ganze Signal der Punktziele, wie es sich für die komplette synthetische Apertur der Länge T ergeben würde, gestrichelt gezeichnet. Bei nicht kontinuierlicher Azimutabbildung wird für jedes Punktziel nur ein Teil der synthetischen Apertur der Länge T_B aufgezeichnet. Im unteren Teil von Bild 2.19 befindet sich die *Deramping*-Funktion.

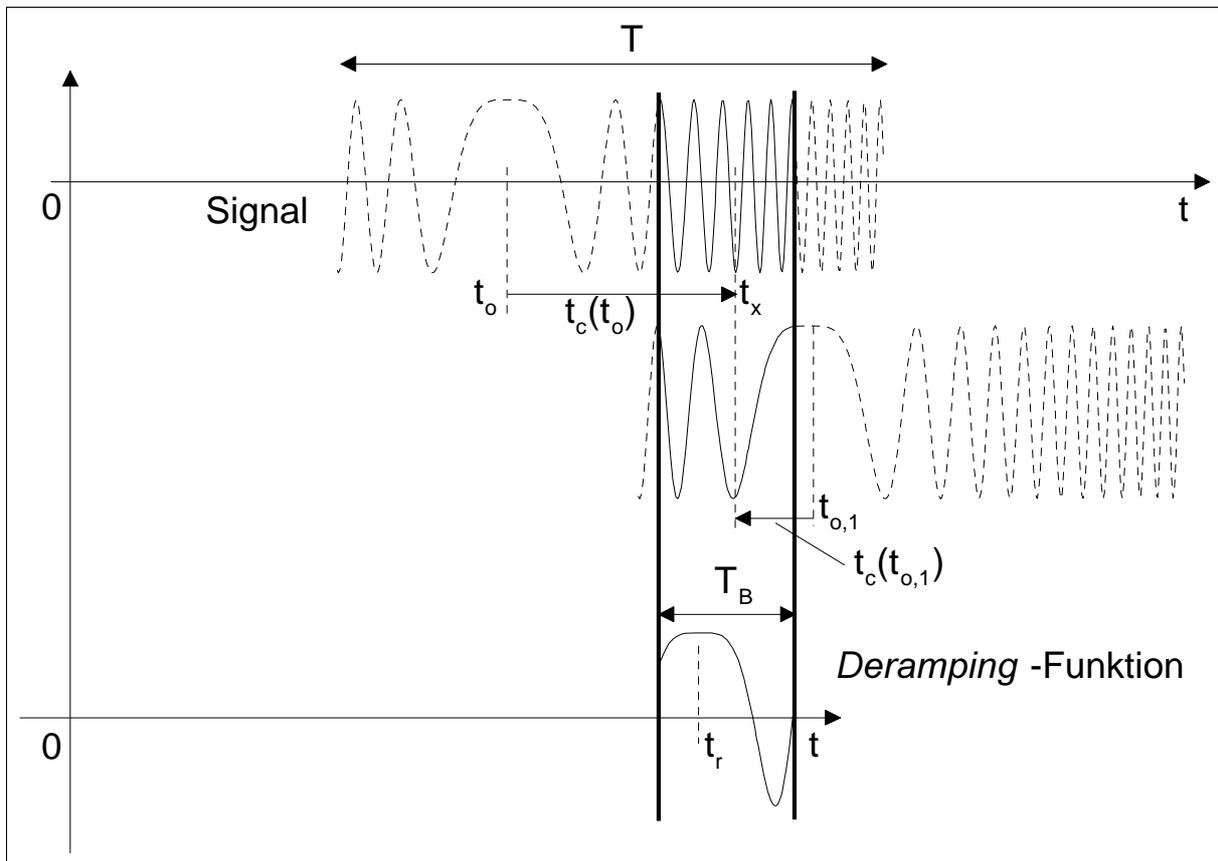


Bild 2.19: Impulskompression mit der SPECAN-Methode von SAR-Rohdaten mit nicht kontinuierlicher Abbildung

Das Signal eines Punktziels an der Position t_0 wurde bereits in Gleichung (2.35) angegeben. Die zugehörige *Deramping*-Funktion ist in (2.42) gegeben.

$$d(t) = \exp\left[+j \cdot \pi \cdot \frac{B}{T} \cdot (t - t_r)^2\right] \cdot \text{rect}\left[\frac{t - t_x}{T_B}\right] \quad (2.42)$$

Die Impulsantwort nach der *Deramping*-Multiplikation und der Fourier-Transformation zeigt Gleichung (2.43). Dabei wurde das Integral wie im vorigen Abschnitt, aber unter Berücksichtigung der Integrationszeit gleich der Dauer der nicht kontinuierlichen Abbildung T_B normiert. Unter Verwendung von Gleichung (2.40), welche an der Stelle des Maximums der Hauptkeule gilt, kann das Ergebnis umgeschrieben werden und es ergibt sich die Impulsantwort in (2.44).

$$\begin{aligned}
 \text{IRF}(f) &= \sqrt{\frac{B}{T_B}} \cdot \int_{\frac{t_x - T_B}{2}}^{\frac{t_x + T_B}{2}} \exp\left[-j \cdot \pi \cdot \frac{B}{T} \cdot (t - t_o)^2\right] \cdot \exp\left[j \cdot \pi \cdot \frac{B}{T} \cdot (t - t_r)^2\right] \cdot \exp[-j \cdot 2\pi \cdot t \cdot f] dt \\
 &= \sqrt{B \cdot T_B} \cdot \exp\left[-j \cdot \pi \cdot \frac{B}{T} \cdot (t_o^2 - t_r^2)\right] \cdot \exp\left[-j \cdot 2\pi \cdot \left(f + \frac{B}{T} \cdot (t_r - t_o)\right) \cdot t_x\right] \\
 &\quad \cdot \text{si}\left[\pi \cdot T_B \cdot \left(f + \frac{B}{T} \cdot (t_r - t_o)\right)\right]
 \end{aligned} \tag{2.43}$$

Wie bereits bei Gleichung (2.41) ausgeführt, wird an der Stelle des Maximums der Hauptkeule die dritte Exponentialfunktion zu 1 und eine Korrektur der ersten beiden Exponentialfunktionen ist für eine phasentreue Verarbeitung notwendig.

$$\begin{aligned}
 \text{IRF}(f) &= \sqrt{B \cdot T_B} \cdot \exp[-j \cdot 2\pi \cdot t_r \cdot f_p] \cdot \exp\left[-j \cdot \pi \cdot \frac{T}{B} \cdot f_p^2\right] \\
 &\quad \cdot \exp\left[-j \cdot 2\pi \cdot \left(f + \frac{B}{T} \cdot (t_r - t_o)\right) \cdot t_x\right] \cdot \text{si}\left[\pi \cdot T_B \cdot \left(f + \frac{B}{T} \cdot (t_r - t_o)\right)\right]
 \end{aligned} \tag{2.44}$$

2.9.3 Beispiel einer zweidimensionalen Impulsantwort

Wichtige Systemkenngrößen, wie zum Beispiel die geometrische Auflösung oder die Höhe der Nebenzipfel, können aus der Impulsantwort ermittelt werden. Bild 2.20 zeigt den Betrag einer zweidimensionalen Impulsantwort, wie sie bei Verwendung von nicht gewichteten Referenzfunktionen entsteht. Die später auch als Punktzielantwort bezeichnete Impulsantwort ist in diesem Fall in guter Näherung eine zweidimensionale si-Funktion.

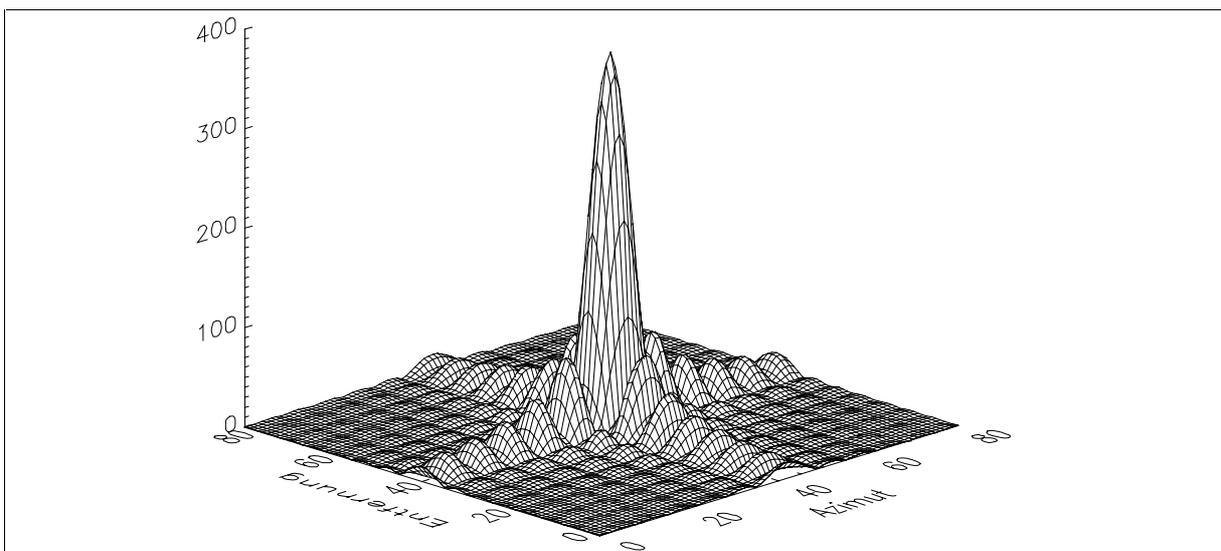


Bild 2.20: Zweidimensionale Impulsantwort ohne Gewichtung zur Nebenzipfelunterdrückung (ist in guter Näherung eine zweidimensionale si-Funktion)

2.10 Analyse der Punktzielantwort

Bei der in dieser Arbeit verwendeten Punktzielanalyse werden Auflösung in Azimut und Entfernung, Nebenzipfelverhältnis (SLR), Höchstes Nebenzipfelverhältnis (PSLR) und Integriertes Nebenzipfelverhältnis (ISLR) bestimmt. Ein weiterer Analyseparameter ist die Phase an der Position des Maximums der Impulsantwort. Mit Hilfe der Punktzielanalyse wird die Qualität eines Prozessierungsverfahrens ermittelt.

2.10.1 Die geometrische Auflösung

Die geometrische Auflösung wird zum Beispiel über die 3dB-Breite der Hauptkeule der Impulsantwort ermittelt. Dazu werden die Positionen links und rechts vom Maximum des Betrags der interpolierten Impulsantwort bestimmt, an denen die Leistung auf die Hälfte gefallen ist. Die Anzahl der dazwischenliegenden Punkte multipliziert mit dem Punktabstand in Metern ergibt die geometrische Auflösung. Der Punktabstand in Entfernung dx_e und Azimut dx_a ergibt sich für den Fall einer Verarbeitung nach der Optimalfilter-Theorie zu (2.45) und (2.46). Dabei wurde eine Interpolation bei der Punktzielanalyse um den Faktor f_{int} angenommen. Die Abtastfrequenz bei der Analog/Digital-Wandlung ist mit S_f bezeichnet.

$$dx_e = \frac{c_o}{2 \cdot S_f} \cdot \frac{1}{f_{int}} \quad (2.45)$$

$$dx_a = \frac{V}{PRF} \cdot \frac{1}{f_{int}} \quad (2.46)$$

Für den Fall einer *SPECAN*-Verarbeitung ergeben sich die Punktabstände in (2.47) und (2.48). Mit $N_{FFT,a}$ und $N_{FFT,e}$ ist die Länge der Fourier-Transformation der *SPECAN*-Verarbeitung in Azimut und Entfernung bezeichnet. In (2.48) bezeichnet k_a die Dopplerrate.

$$dx_e = \frac{S_f \cdot c_o}{2 \cdot N_{FFT,e} \cdot k_e \cdot f_{int}} \quad (2.47)$$

$$dx_a = \frac{PRF \cdot V}{N_{FFT,a} \cdot k_a \cdot f_{int}} \quad (2.48)$$

Zur Nebenzipfelunterdrückung wird oft eine Gewichtungsfunktion verwendet, welche im Fall der Optimalfilterung im Frequenzbereich auf das Signal multipliziert wird. Dabei wird in der Praxis auch die prozessierte Bandbreite oft auf ungefähr 90% der Signalbandbreite beschränkt. Das Gewichten der Signalspektren in Azimut und Entfernung und das Beschränken der prozessierten Bandbreite verringert die geometrischen Auflösungen, welche sich nach den Gleichungen (2.25) und (2.26) ergeben.

Für eine prozessierte Bandbreite in Azimut PBB_a und Entfernung PBB_e ergeben sich folgende geometrische Auflösungen in Azimut ρ_a und Entfernung ρ_e . Diese Auflösungen werden nachfolgend als ideale Auflösungen bezeichnet, da sie sich für eine ideale, fehlerfreie Prozessierung ergeben.

$$\rho_a = k_{ga} \cdot \frac{V}{PBB_a} \quad (2.49)$$

$$\rho_e = k_{ge} \cdot \frac{c_0}{2 \cdot PBB_e} \quad (2.50)$$

Ist keine Gewichtung vorhanden, so ist die Punktzielantwort eine zweidimensionale si-Funktion und die Konstanten k_{ga} und k_{ge} besitzen den Wert 0.89. Für eine Hamminggewichtung mit dem Hammingfaktor $HG=0.54$ beträgt die Konstante 1.3 [26].

Im Falle der *SPECAN*-Verarbeitung ersetzt man die prozessierte Bandbreite durch das Produkt aus Modulationsrate bzw. Dopplerrate und der prozessierten Integrationszeit. Für eine prozessierte Integrationszeit PT_e in Entfernung und PT_a in Azimut ergeben sich die idealen Auflösungen in Entfernung und Azimut in den Gleichungen (2.51) und (2.52). Die prozessierte Integrationszeit in Azimut entspricht der Dauer der nicht kontinuierlichen Abbildung, um eine möglichst große Auflösung zu erreichen.

$$\rho_a = k_{ga} \cdot \frac{V}{PT_a \cdot k_a} \quad (2.51)$$

$$\rho_e = k_{ge} \cdot \frac{c_0}{2 \cdot PT_e \cdot k_e} \quad (2.52)$$

2.10.2 Nebenzipfelverhältnisse

Das Nebenzipfelverhältnis (englisch: *Sidelobe Ratio*) SLR beschreibt das Amplitudenverhältnis eines Nebenmaximums zum Maximum der Impulsantwort in dB und ist in Gleichung (2.53) gegeben.

$$\text{SLR} = 20 \log_{10} \left(\frac{\text{Amplitude Nebenmaximum}}{\text{Amplitude Hauptmaximum}} \right) \quad (2.53)$$

Das Amplitudenverhältnis des höchsten Nebenzipfels zum Maximum der Impulsantwort ist das höchste Nebenzipfelverhältnis (englisch: *Peak Sidelobe Ratio*) PSLR von Gleichung (2.54).

$$\text{PSLR} = 20 \log_{10} \left(\frac{\text{Amplitude höchstes Nebenmaximum}}{\text{Amplitude Hauptmaximum}} \right) \quad (2.54)$$

Die Definition für das Integrierte Nebenzipfelverhältnis (englisch: *Integrated Sidelobe Ratio*) ISLR steht in Gleichung (2.55). Es beschreibt das Verhältnis der um das Maximum der Impulsantwort konzentrierten Energie zu der Energie, welche außerhalb des Gebietes der Hauptkeule vorhanden ist. Das Maximum der Impulsantwort befindet sich an der Stelle ξ_0 . Mit ρ ist die Auflösung bezeichnet, welche die gleiche Einheit wie ξ besitzt. Typische Werte für die Faktoren K_1 und K_2 sind 2.2756 und 22.756. Diese Werte wurden auch in dieser Arbeit verwendet.

$$\text{ISLR} = 10 \cdot \log_{10} \left[\frac{\int_{-K_1 \rho}^{K_1 \rho} \text{irf}^2(\xi - \xi_0) d\xi}{\int_{-K_2 \rho}^{K_2 \rho} \text{irf}^2(\xi - \xi_0) d\xi - \int_{-K_1 \rho}^{K_1 \rho} \text{irf}^2(\xi - \xi_0) d\xi} \right] \quad (2.55)$$

Ist das Integrierte Nebenzipfelverhältnis groß, so ergibt sich ein guter Kontrast im Bild, da ein Großteil der Energie um das Maximum der Impulsantwort zentriert ist.

3 VERFAHREN ZUR SAR-VERARBEITUNG

Dieses Kapitel behandelt zunächst Verfahren zur *Stripmap*-Verarbeitung. Anhand des ersten Verfahrens, eines einfachen *Range Doppler*-Verfahrens, werden wesentliche Grundelemente behandelt, so wie sie in jeder SAR-Verarbeitung notwendig sind. Viele Verfahren zur *Spotlight*-Verarbeitung sind modifizierte Verfahren aus der *Stripmap*-Verarbeitung. Verfahren für die Verarbeitung von *ScanSAR*-Daten werden ebenfalls dargestellt. Dabei wird für das *Extended Chirp Scaling*-Verfahren für *ScanSAR* eine Azimut-Skalierung entwickelt, welche später in Kapitel 5.2 für die *Spotlight*-Verarbeitung erweitert wird. Schließlich werden die wichtigsten bekannten Algorithmen für die *Spotlight*-Verarbeitung einander gegenüber gestellt.

3.1 Datenverarbeitung im *Stripmap*-Modus

Die *Range-Doppler*-Verarbeitung ist an den Anfang gestellt, da bei diesem Verfahren die Grundelemente der SAR-Verarbeitung gut herausgestellt werden können. Anschließend werden der *Wavenumber-Domain*-, der *Chirp Scaling*- und der *Inverse Scaled Fourier Transform*-Algorithmus behandelt, wobei die letzten beiden stark miteinander verwandt sind und keine Interpolationen benötigen. Der *Inverse Scaled Fourier Transform*-Algorithmus kann als eine duale Form des *Chirp Scaling*-Algorithmus verstanden werden [38]. Der *Chirp Scaling*-Algorithmus ist genauer beschrieben, da zum einen die elegante Korrektur der Zielentfernungsänderung bei diesem Verfahren die Motivation für die in Kapitel 5.1 entwickelte Frequenz-Skalierung darstellt. Zum anderen wird in Kapitel 5 ein neues Verfahren zur Verarbeitung von *Spotlight*-Daten vorgestellt, welches zum *Extended Chirp Scaling*-Verfahren für *ScanSAR* und *Stripmap* korrespondiert. Das entwickelte Frequenz-Skalierungs-Verfahren für *Spotlight* bildet mit dem *Extended Chirp Scaling*-Verfahren für *Stripmap* und *ScanSAR* eine Familie von ähnlichen Algorithmen, welche aus gleichen oder ähnlichen Modulen aufgebaut werden können.

3.1.1 Das *Range Doppler*-Verfahren

Die wichtigsten Verarbeitungsschritte einer SAR-Prozessierung sind im Blockdiagramm von Bild 3.1 aufgeführt. Der dargestellte Verarbeitungsablauf entspricht im wesentlichen der *Range Doppler*-Prozessierung [1] [32] [74].

Nach dem Heruntermischen und der Digitalisierung des empfangenen Radarsignals liegen die einzelnen, in der Entfernungsrichtung ausgedehnten Echos in der Azimut-

dimension nebeneinander im Echospeicher. Dadurch ergibt sich für ein Punktziel der in Kapitel 2.7 in Bild 2.9 dargestellte Speicherinhalt. Die Überlagerung der Echos aller Ziele ergibt die Rohdaten, welche den Ausgangspunkt für die SAR-Datenverarbeitung darstellen.

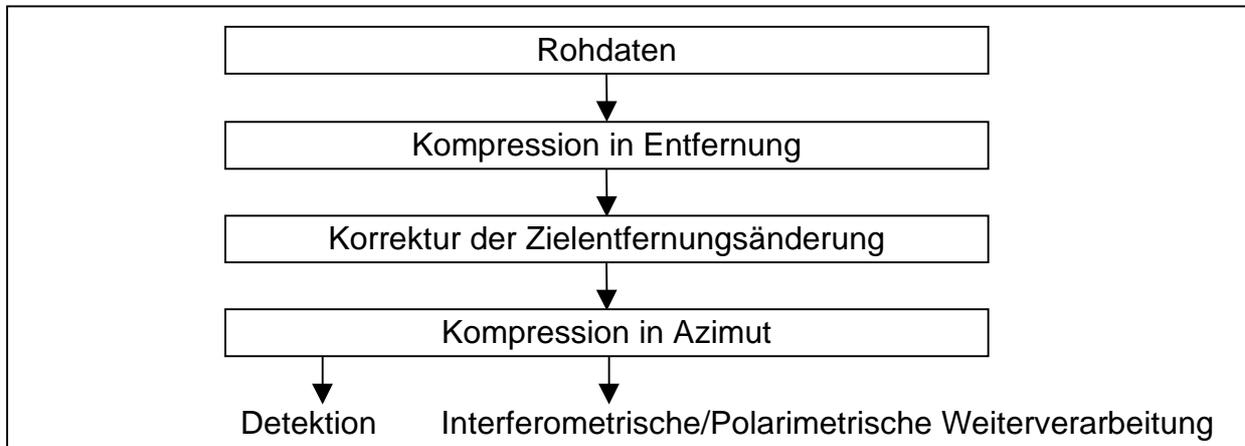


Bild 3.1: Wesentliche Elemente einer SAR-Prozessierung

Der erste Verarbeitungsschritt im Blockschaltbild von Bild 3.1 ist die Kompression in Entfernungsrichtung. Dabei werden nacheinander alle Entfernungszeilen komprimiert zum Beispiel durch Optimalfilterung. Die Referenzfunktion dazu wird direkt aus den gesendeten Impulsen abgeleitet. Das Ergebnis der Entfernungskompression auf die Rohdaten des Punktziels von Bild 2.9 ist in Bild 3.2 dargestellt. Die Azimutrichtung im Bild verläuft horizontal.

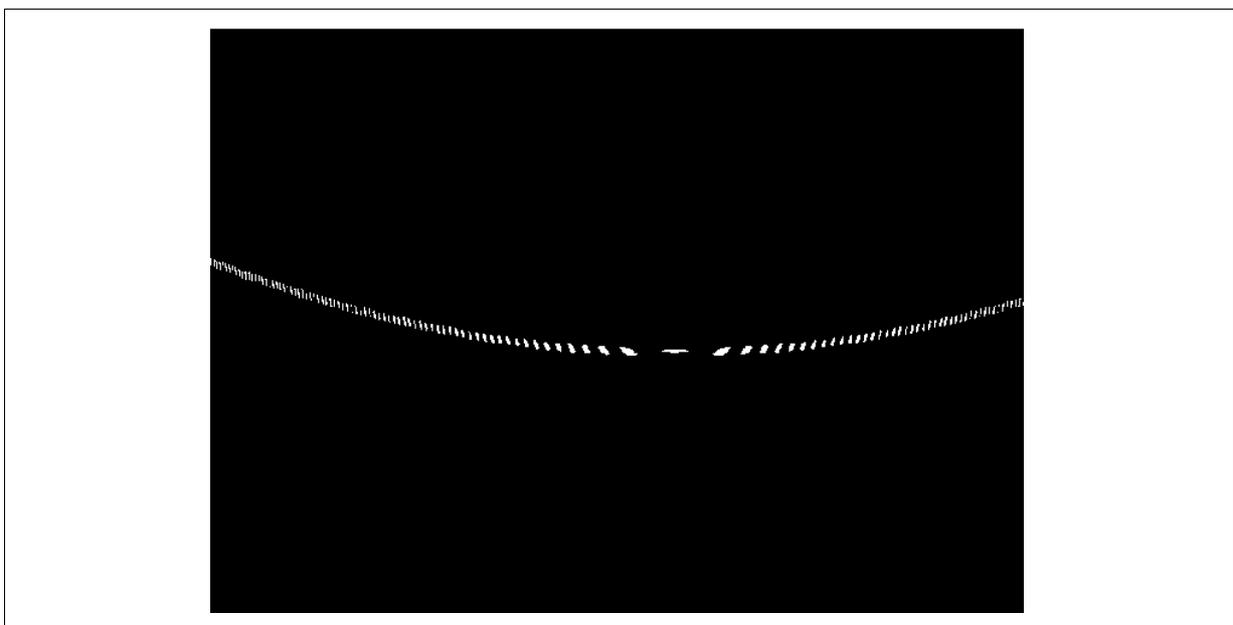


Bild 3.2: Speicherinhalt für ein Punktziel nach der Entfernungskompression

Man erkennt deutlich die Krümmung der Trajektorie, welche den geometrischen Ort der Azimutmodulation darstellt und der Zielentfernungsänderung folgt. Die Korrektur der Zielentfernungsänderung wird oft im Azimutfrequenzbereich durchgeführt, da in diesem Bereich die Signale von allen Zielen einer Entfernung übereinander liegen und somit effizient korrigiert werden können. Wegen der Abhängigkeit der Zielentfernungsänderung von der Entfernung werden für die Korrektur Datenblöcke in Entfernungsrichtung gebildet. Die Größe der Blöcke wird so gewählt, daß sich die Zielentfernungsänderung innerhalb des Blocks nur um einen tolerierbaren Wert ändert. Die Korrektur erfolgt dann durch Interpolation in Entfernung und die Neuordnung der Abtastwerte für jede Entfernung zu geraden Linien in Azimut. Bild 3.3 zeigt den Speicherinhalt für ein Punktziel nach der Zielentfernungskorrektur.

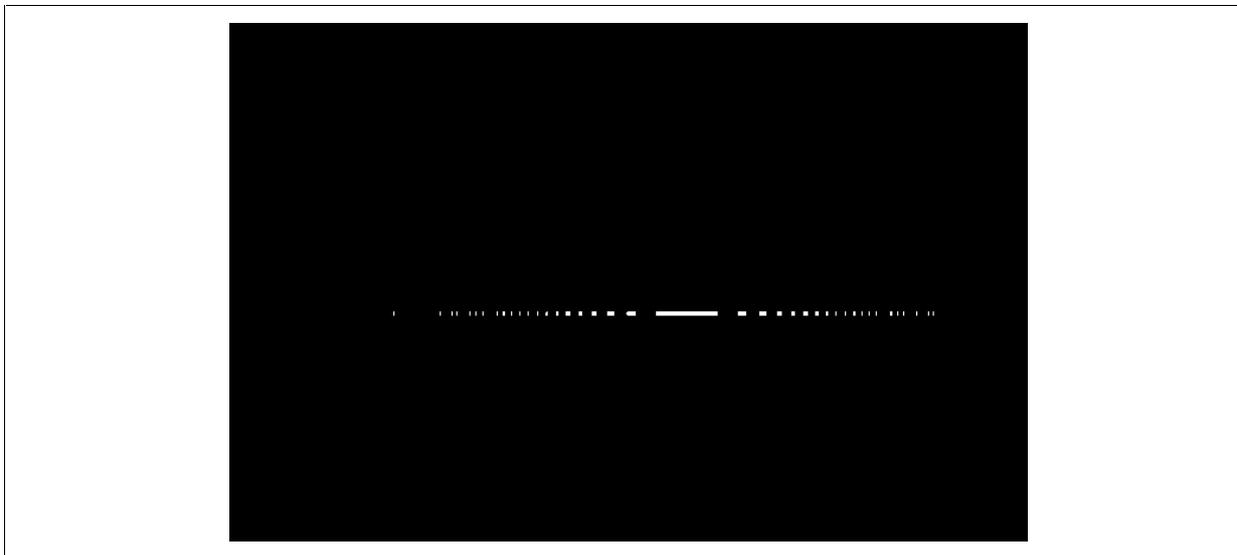


Bild 3.3: Speicherinhalt eines Punktziels nach der Zielentfernungskorrektur

Die hier beschriebene, sehr einfache Form der Korrektur der Zielentfernungsänderung besitzt mehrere Nachteile. Die Interpolation ist ein sehr kritischer Punkt in Bezug auf Bildqualität und phasentreue Verarbeitung. Daneben muß die Blockgröße mit größer werdender Zielentfernungsänderung kleiner und die Überlappung der Blöcke muß erhöht werden.

Nach der Korrektur der Zielentfernungsänderung liegt der zu einem Punktziel gehörende geometrische Ort der Azimutmodulation bei einer konstanten Entfernung. Die eindimensionale Filterfunktion für die Azimutkompression kann aus Geometriedaten gewonnen werden. Nach der Azimutkompression erhält man für ein Punktziel eine zweidimensionale si -Funktion. Bild 3.4 zeigt die Amplitude des Speicherinhalts von Bild 3.3 nach der Azimutkompression.

Nach der Prozessierung können die komplexen Daten zur Detektion einer Betragsbildung unterzogen werden, wodurch sich ein Abbild des Betrags der Rückstreuung der Szene ergibt. Das komplexe Ergebnis der Azimutkompression stellt den Ausgangspunkt für eine interferometrische oder polarimetrische Weiterverarbeitung dar.

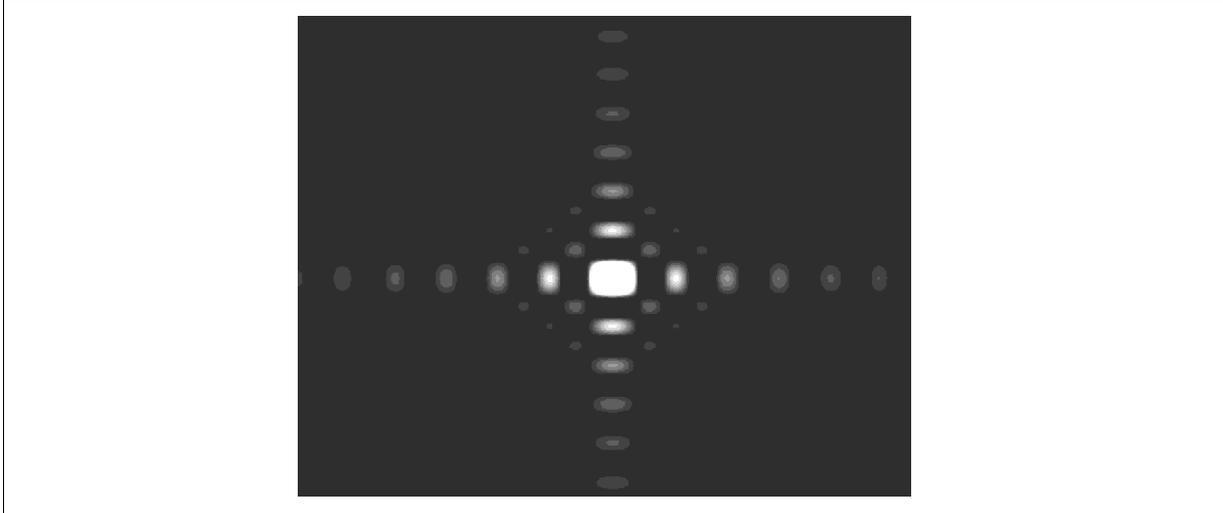


Bild 3.4: Betrag der Punktzielantwort in Graustufendarstellung

3.1.2 Der Wavenumber-Algorithmus

Dieses Verfahren hat verschiedene Bezeichnungen, je nachdem aus welcher Richtung das Verfahren abgeleitet wurde. Cafforio, Prati und Rocca übertrugen seismische Verfahren auf SAR und dieser Ansatz ist mit *Frequency-Wavenumber* (ω/k)-*Approach* bezeichnet. Das Verfahren ist aber auch als *Range Migration-Algorithmus* [10] oder als *Wavenumber Domain-Algorithmus* [1] bekannt. Gute Darstellungen des *Wavenumber-Algorithmus* aus dem SAR-Blickwinkel finden sich in [1] und [16]. Die Darstellung des *Wavenumber-Algorithmus* erfolgt vorteilhaft mit *Wavenumber-Variablen*, wie zum Beispiel k_x und k_{rg} , welche zum Beispiel zu den Ortsvariablen x in Azimut und r in Entfernung korrespondieren. Zur besseren Übereinstimmung der Variablenkonvention mit dem Frequenz-Skalierungs-Verfahren wird hier anstatt der Ortsvariablen x und der Wavenumber-Variablen k_x die Azimutzeitvariable t_a und die Azimutfrequenz f_a verwendet. Den Zusammenhang zeigt Gleichung (3.1). Darin bezeichnet der Doppelpfeil mit der Beschriftung FT die Fourier-Transformation.

$$\frac{x}{V} = t_a \xleftrightarrow{\text{FT}} f_a = \frac{V \cdot k_x}{2\pi} \quad (3.1)$$

Das Blockdiagramm des *Wavenumber-Algorithmus* ist in Bild 3.5 gezeigt. Nach der SAR-Datenaufzeichnung befinden sich die Rohdaten im zweidimensionalen Zeitbe-

reich (t_a, t_e) . Nach einer beliebig ausgeführten eindimensionalen Kompression in Entfernungsrichtung erfolgt eine zweidimensionale (2D) Fourier-Transformation in Entfernungs- und Azimutzeitrichtung, wodurch man die Daten im zweidimensionalen Frequenzbereich (f_a, f_e) erhält.

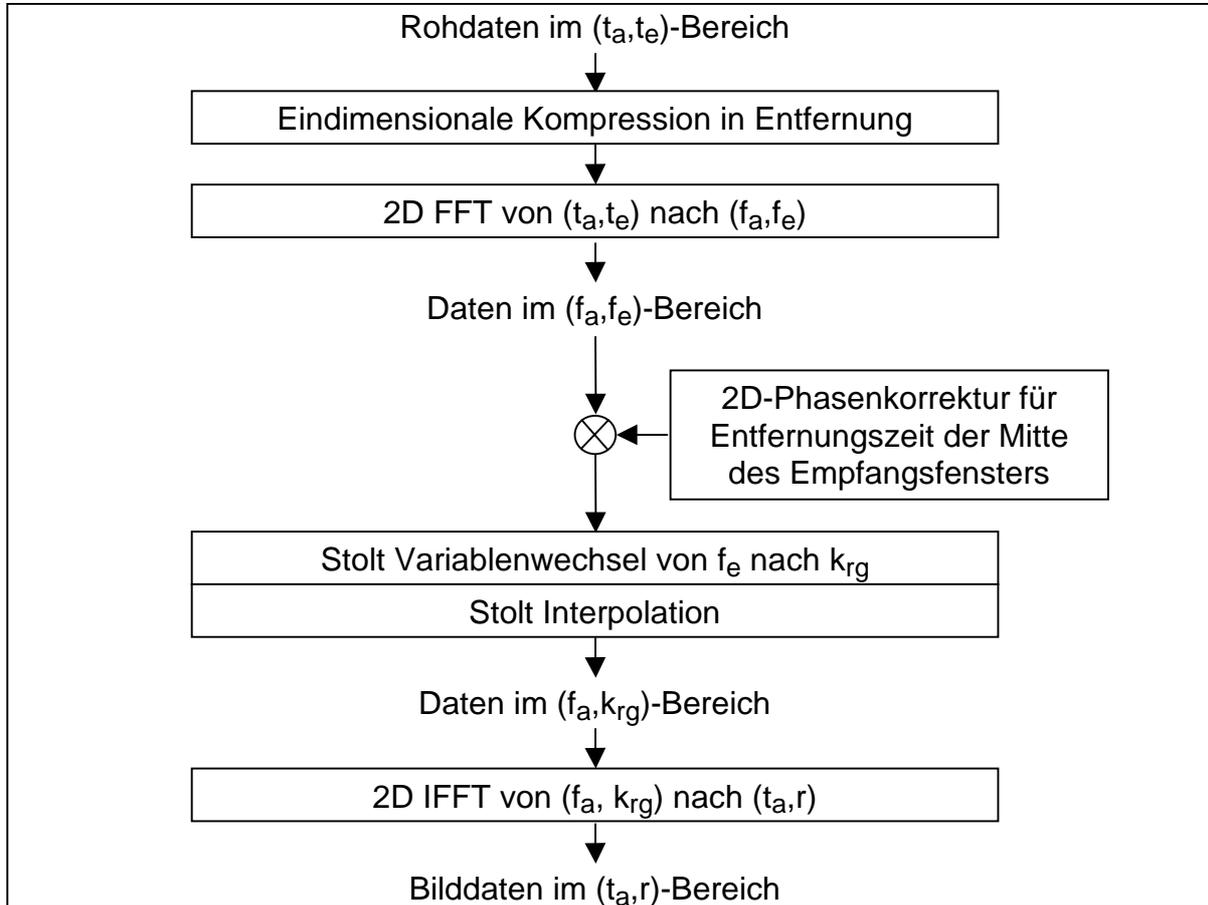


Bild 3.5: Blockdiagramm des Wavenumber-Algorithmus

Wie in [1] und [16] beschrieben, erfolgt im nächsten Schritt eine 2D-Phasenkorrektur, die auf Grund des großen Abstands der Mitte des Empfangsfensters zum Ursprung der Entfernung r beim Senden des Radarpulses nötig ist. Die der Mitte des Empfangsfensters entsprechende Entfernung wird im folgenden mit r_{ref} bezeichnet. Die Phasenkorrektur P_{WN} ergibt sich zu Gleichung (3.2), wobei die Wellenlänge λ für große Trägerfrequenzen f_0 im Verhältnis zur ausgesendeten Pulsbandbreite mit Gleichung (3.3) genähert werden kann.

$$\begin{aligned}
 P_{WN} &= \exp \left[j \cdot \frac{4\pi \cdot r_{ref}}{\lambda(f_e)} \cdot \left(\sqrt{\left(\frac{f_e \cdot \lambda(f_e)}{c_0} + 1 \right)^2} - \left(\frac{f_a \cdot \lambda(f_e)}{2 \cdot V} \right)^2 - \left(\frac{f_e \cdot \lambda(f_e)}{c_0} + 1 \right) \right) \right] \\
 &\approx \exp \left[j \cdot \frac{4\pi \cdot r_{ref}}{\lambda} \cdot \left(\sqrt{\left(\frac{f_e \cdot \lambda}{c_0} + 1 \right)^2} - \left(\frac{f_a \cdot \lambda}{2 \cdot V} \right)^2 - 1 \right) \right] \quad (3.2)
 \end{aligned}$$

$$\lambda = \frac{c_o}{f_e + f_o} \approx \frac{c_o}{f_o} \quad \text{mit } f_o \gg f_e \quad (3.3)$$

Die Phasenkorrektur P_{WN} fokussiert alle Ziele bei der Entfernung r_{ref} exakt. Der sich anschließende *Stolt*-Wechsel der Variablen und die *Stolt*-Interpolation [75] korrigieren die noch vorhandene Defokussierung für Entfernungen ungleich r_{ref} . Der nächste Schritt im Blockdiagramm von Bild 3.5 ist dieser *Stolt*-Wechsel der Variablen von der Entfernungsfrequenz f_e zur Entfernungs-Wavenumber k_{rg} . Der Bezug zwischen den Variablen kann über die Wellenlänge hergestellt werden [9] und ist in Gleichung (3.4) gegeben. Eine Herleitung des Zusammenhangs ist auch direkt aus der zweidimensionalen Filterfunktion für eine Verarbeitung im Zeitbereich möglich [1].

$$f_e = \frac{c_o}{4\pi} \cdot \sqrt{\left(k_{rg} + \frac{4\pi \cdot f_o}{c_o}\right)^2 + \frac{4\pi^2 \cdot f_a^2}{V^2}} - f_o$$

$$\Leftrightarrow \frac{4\pi \cdot (f_e + f_o)}{c_o} = \sqrt{\left(k_{rg} + \frac{4\pi \cdot f_o}{c_o}\right)^2 + \frac{4\pi^2 \cdot f_a^2}{V^2}} \quad (3.4)$$

Die Darstellung der ursprünglichen Daten des (f_a, f_e) -Bereichs im (f_a, k_{rg}) -Bereich bedeutet ein kreisförmiges Verbiegen der ursprünglichen Daten, wie es in Bild 3.6 gezeigt ist [1] [10]. Im Bild auf der linken Seite sind die Daten eines Punktziels im (f_a, f_e) -Bereich dargestellt, wobei die Achse der Azimutfrequenz mit $2\pi/V$ skaliert ist und die Abtastpositionen durch Punkte markiert sind.

Die Daten des Punktziels sind für den Fall dargestellt, daß die Näherung für die Wellenlänge von Gleichung (3.3) nicht verwendet werden kann. Durch Einsetzen von Gleichung (3.3) ohne Näherung in Gleichung (2.18), welche den Zusammenhang zwischen Blickwinkel der Antenne zum Ziel und Azimutfrequenz angibt, erhält man Gleichung (3.5). Aus dieser Gleichung geht hervor, daß der Azimutfrequenzbereich der von einem Punktziel erhaltenen Daten mit zunehmender Entfernungsfrequenz größer wird.

$$f_a(\alpha) = -\frac{2 \cdot V}{\lambda} \cdot \sin(\alpha) = -2 \cdot V \cdot \frac{f_e + f_o}{c_o} \cdot \sin(\alpha) \quad (3.5)$$

Ein Wechsel der Variablen von f_e zu k_{rg} laut Gleichung (3.4) bedeutet die Darstellung von Linien konstanter Entfernungsfrequenz f_e im linken Diagramm als Kreissegmente mit unterschiedlicher Krümmung im (f_a, k_{rg}) -Bereich im mittleren Diagramm.

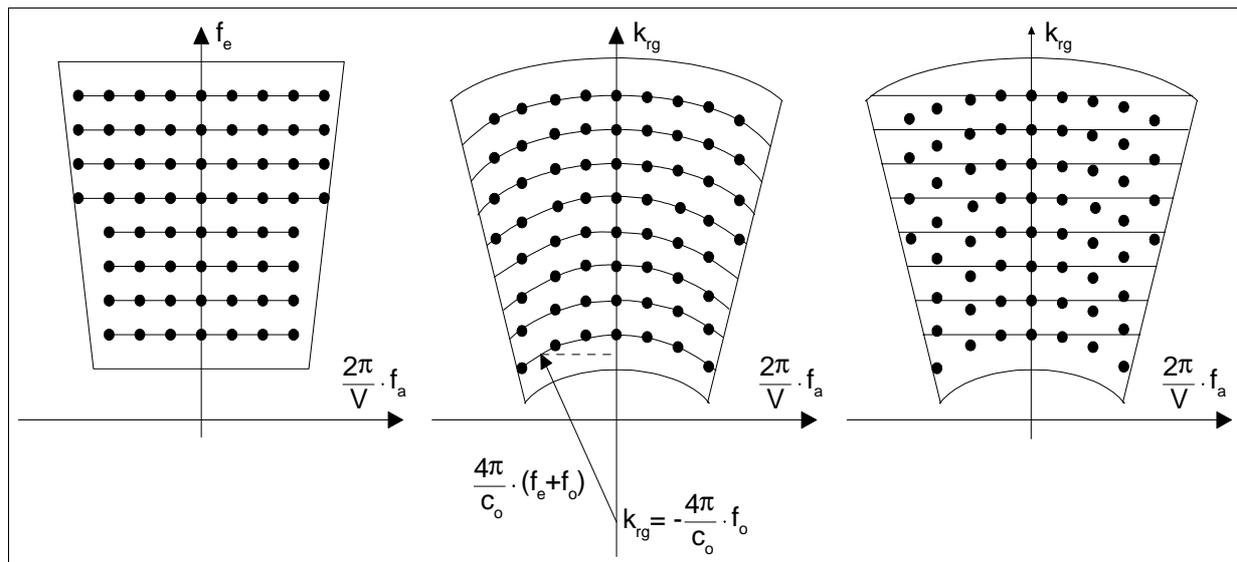


Bild 3.6: Stolt-Wechsel der Variablen (Übergang vom linken zum mittleren Diagramm) und Stolt-Interpolation (Übergang vom mittleren zum rechten Diagramm)

Der Mittelpunkt ($f_a=0$, $k_{rg}=-4\pi \cdot (f_e+f_o)/c_o$) und der Radius aller Kreissegmente gehen direkt aus der unteren Zeile von Gleichung (3.4), welche eine Kreisgleichung ist, hervor [1].

Die Stolt-Interpolation bedeutet den Übergang vom mittleren Diagramm in Bild 3.6 zum rechten Diagramm. Für die sich anschließende zweidimensionale Fourier-Transformation vom (f_a, k_{rg}) -Bereich in den (t_a, r) -Bereich, werden Abtastwerte entlang der im rechten Diagramm gezeichneten Linien konstanter Wavenumber k_{rg} benötigt. Diese Abtastwerte werden durch Interpolation der vorhandenen, sich auf Kreissegmenten befindenden Abtastwerte in k_{rg} -Richtung ermittelt.

Der letzte Schritt in der Wavenumber-Verarbeitung ist die 2D-Rücktransformation in den (t_a, r) -Bereich durch inverse Fourier-Transformationen entlang von k_{rg} und f_a .

3.1.3 Das Chirp Scaling-Verfahren

Das *Chirp Scaling*-Verfahren eignet sich hervorragend für die effiziente und phasentreue Verarbeitung von *Stripmap*-SAR-Daten, da in der gesamten Verarbeitungskette keine Interpolationen benötigt werden. Gute Darstellungen dieses Verfahrens finden sich in [1] [56] [67] und [64]. Der *Chirp Scaling*-Algorithmus besteht nur aus komplexen Multiplikationen und Fourier-Transformationen. Insbesondere die Korrektur der Zielentfernungsänderung erfolgt ohne zeit- und rechenaufwendige Interpolation. Bild 3.7 zeigt das Blockschaltbild des *Chirp Scaling*-Verfahrens.

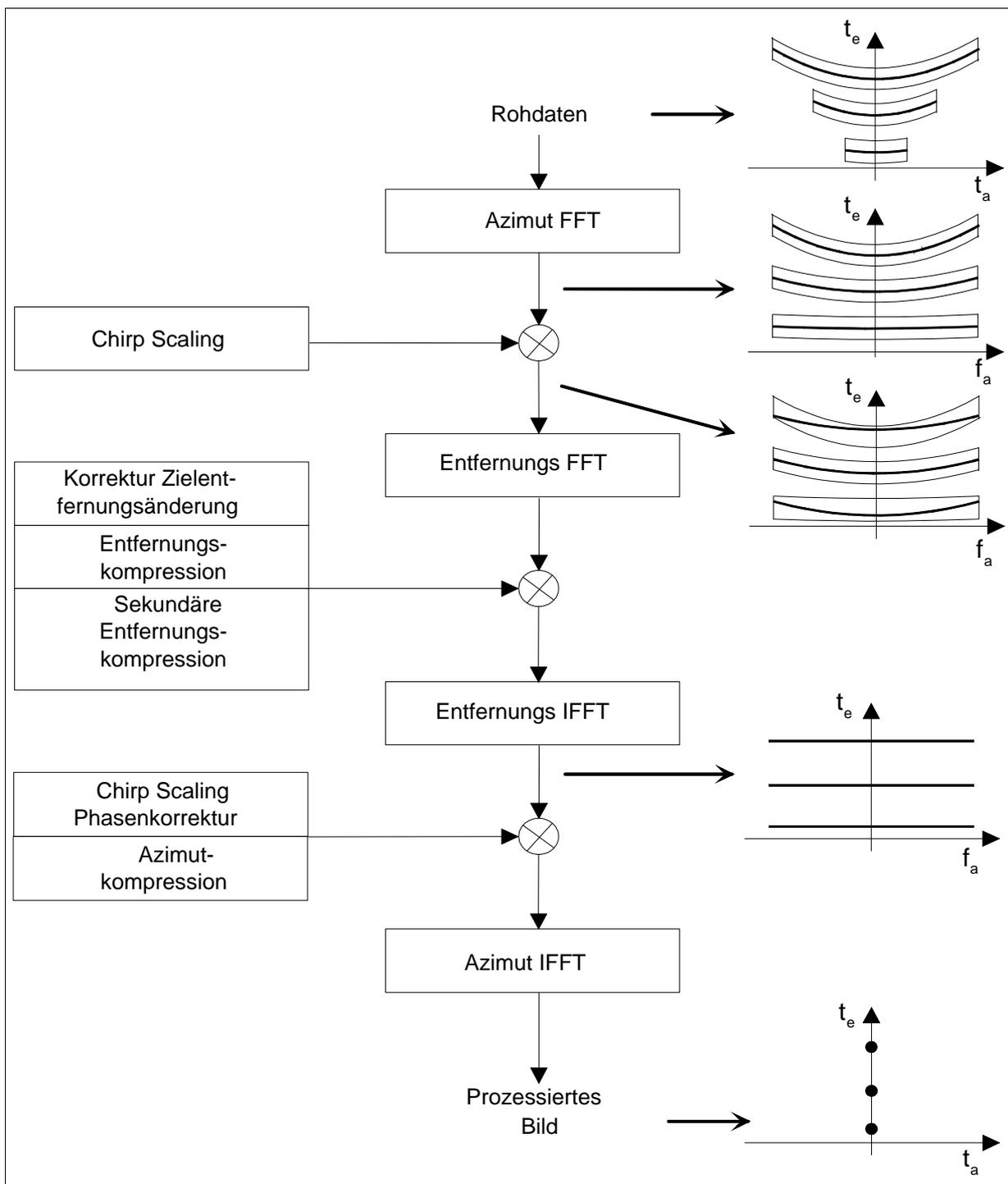


Bild 3.7: Blockschaltbild des Chirp Scaling-Verfahrens (links) mit symbolischer Darstellung der Signale von drei Punktzielen (rechts) während der Verarbeitung

Im Blockschaltbild von Bild 3.7 ist zusätzlich der prinzipielle Verarbeitungsablauf für eine Szene mit drei Punktzielen dargestellt. Die Ziele befinden sich an derselben Azimutposition, aber bei den verschiedenen Entfernungen Nahbereich, Referenzentfernung für die *Chirp Scaling*-Operation und Fernbereich. Oben rechts im Bild ist eine Darstellung der Rohdaten im Zeitbereich. Die Beleuchtungsdauer nimmt mit der Entfernung zu, während die Krümmung der Zielentfernungsänderung mit der Ent-

fernung abnimmt. Die Signale zeigen in Entfernungsrichtung eine der gesendeten Pulslänge entsprechende Ausdehnung. Die Phasenzentren der *Chirp*-Signale sind in dicker Linie gezeichnet.

Die Rohdaten werden im ersten Schritt durch eine FFT in Azimut in den Entfernungs-Dopplerbereich transformiert. Da die Beleuchtungsdauer mit der Entfernung zunimmt, die Dopplerrate aber mit der Entfernung abnimmt, besitzen alle Signale im Entfernungs-Dopplerbereich die gleiche Dopplerbandbreite. Dies ist rechts im Bild, im zweiten Diagramm, an der identischen Frequenzausdehnung der Signale zu erkennen. Signale von Punktzielen gleicher Entfernung aber unterschiedlicher Azimutposition besitzen dieselben Dopplerfrequenzen und liegen im Echospeicher an derselben Stelle. Daher kann die Korrektur der Zielentfernungsänderung sehr effizient im Entfernungs-Dopplerbereich durchgeführt werden. Die Information über die Azimutposition der Ziele bleibt in den Phasen erhalten.

Der Kern des *Chirp Scaling*-Verfahrens ist die Darstellung der Rohdaten im Entfernungs-Dopplerbereich [63] [64]. Dabei wird zuerst zweimal das Prinzip der stationären Phase [10] [60] [61] angewendet, um die Rohdaten in den zweidimensionalen Frequenzbereich zu transformieren. Der sich dort ergebende Ausdruck wird so genähert, daß sich nach der mit Hilfe des Prinzips der stationären Phase durchgeführten Rücktransformation in Entfernung eine lineare Abhängigkeit der Zielentfernungsänderung von der Entfernung r_o ergibt. Für die Rohdaten des Punktziels aus Gleichung (2.30) ergibt sich damit die Darstellung im Entfernungs-Dopplerbereich in Gleichung (3.6).

$$S(f_a, t_e, r_o) \approx \sigma_o \cdot C \cdot \text{rect} \left[\frac{t_e - \frac{2 \cdot R(f_a; r_o)}{c_o}}{T_p} \right] \cdot \text{rect} \left[\frac{f_a - \frac{f_{a1} + f_{a2}}{2}}{f_{a1} - f_{a2}} \right] \quad (3.6)$$

$$\cdot \exp \left[-j \cdot \frac{4\pi}{\lambda} \cdot r_o \cdot \sqrt{1 - \left(\frac{f_a \cdot \lambda}{2 \cdot V} \right)^2} \right] \cdot \exp \left[-j \cdot \pi \cdot k_{\text{eff}}(f_a; r_o) \cdot \left(t_e - \frac{2 \cdot R(f_a; r_o)}{c_o} \right)^2 \right]$$

Die erste *rect*-Funktion beschreibt den Ort des Entfernungssignals, wobei die Zielentfernungsänderung im Entfernungs-Dopplerbereich durch $R(f_a, r_o)$ ausgedrückt ist. Dieser Ausdruck für die Zielentfernungsänderung ergibt sich durch die Näherung bei der oben beschriebenen Herleitung des Signals im Entfernungs-Dopplerbereich.

Den Ausdruck $R(f_a, r_o)$ in Gleichung (3.7) erhält man auch durch Einsetzen von (2.10) in (2.15).

$$R(f_a, r_o) = \sqrt{r_o^2 + V^2 \cdot \left[\frac{f_a \cdot \lambda \cdot r_o}{2 \cdot V^2 \cdot \sqrt{1 - \left(\frac{f_a \cdot \lambda}{2 \cdot V} \right)^2}} \right]^2} = \frac{r_o}{\sqrt{1 - \left(\frac{f_a \cdot \lambda}{2 \cdot V} \right)^2}} = r_o \cdot (1 + a(f_a)) \quad (3.7)$$

Den Faktor $a(f_a)$ bezeichnet man als linearen *Chirp Scaling*-Faktor. Er drückt die Frequenzabhängigkeit der Entfernungsvariation aus. Die Entfernungsvariation im Entfernungs- Dopplerbereich ist beschrieben durch eine frequenzabhängige lineare Skalierung der Entfernung mit dem *Chirp Scaling*-Faktor.

Der Bereich der auftretenden Azimutfrequenzen ist durch die zweite *rect*-Funktion gegeben. Dabei wurde ein sich auf Grund des Prinzips der stationären Phase ergebender konstanter Ausdruck vernachlässigt bzw. in die Konstante C gezogen. Die höchste auftretende Frequenz ist f_{a1} , welche sich durch Einsetzen von t_{a1} aus Gleichung (2.7) in Gleichung (2.15) ergibt. Die niedrigste auftretende Frequenz f_{a2} erhält man aus den Gleichungen (2.8) und (2.15).

$$f_{a1} = f(t_{a1}) = -\frac{2 \cdot V}{\lambda} \cdot \sin\left(\Psi - \frac{\theta_a}{2}\right) \quad (3.8)$$

$$f_{a2} = f(t_{a2}) = -\frac{2 \cdot V}{\lambda} \cdot \sin\left(\Psi + \frac{\theta_a}{2}\right) \quad (3.9)$$

Der Bereich der eindeutig dargestellten Azimutfrequenzen ist durch die PRF gegeben, welcher in der Praxis um den Dopplerzentroiden zentriert wird. Der Dopplerzentroid stimmt im *Stripmap*-Modus und für kleine bis mittlere Squintwinkel in guter Näherung mit der mittleren Frequenz zwischen f_{a1} und f_{a2} überein.

$$-\frac{\text{PRF}}{2} + f_{\text{DC}} \leq f_a \leq \frac{\text{PRF}}{2} + f_{\text{DC}} \quad (3.10)$$

Der erste Exponentialterm in Gleichung (3.6) beschreibt die Azimutmodulation und der zweite die Entfernungsmodulation, welche die Zielentfernungsänderung im

Entfernungs-Dopplerbereich berücksichtigt. Die effektive *Chirp*-Rate k_{eff} im Entfernungs-*Chirp* ist in Gleichung (3.11) definiert.

$$k_{\text{eff}}(f_a, r_o) = \left[\frac{1}{k_e} - \frac{2 \cdot r_o \cdot \lambda}{c_o^2} \frac{\left(\frac{\lambda \cdot f_a}{2 \cdot V} \right)^2}{\left(1 - \left(\frac{\lambda \cdot f_a}{2 \cdot V} \right)^2 \right)^{\frac{3}{2}}} \right]^{-1} \stackrel{!}{=} \left[\frac{1}{k_e} - \frac{1}{k_{\text{SRC}}} \right]^{-1} \quad (3.11)$$

Der Anteil k_{SRC} an der effektiven *Chirp*-Rate entsteht durch die Verkopplung der Signale in Entfernungs- und Azimutrichtung. Wird dieser Anteil bei der Entfernungskompression nicht berücksichtigt, so kommt es zu einer Defokussierung der Impulsantwort. Die Korrektur von k_{SRC} wird als sekundäre Entfernungskompression (englisch: *Secondary Range Compression* – SRC) bezeichnet.

Als nächster Schritt im Blockschaltbild von Bild 3.7 erfolgt die *Chirp Scaling*-Operation. Dabei werden die Krümmungen der Trajektorien aller Punktziele an die Krümmung einer Trajektorie angepaßt. Diese Referenztrajektorie ist die Trajektorie eines Punktziels bei Referenzentfernung $r_{\text{ref,cs}}$. Die Referenzentfernung ist im Prinzip frei wählbar, wird aber in der Praxis oft in die Mitte des abgebildeten Streifens gelegt. Die Trajektorie, also der Ort der Phasenzentren der *Chirp*-Signale in Entfernung, eines Punktziels bei r_o kann nach der *Chirp Scaling*-Operation durch $t_{e,cs}$ ausgedrückt werden.

$$t_{e,cs}(f_a, r_o) = \frac{2}{c_o} \cdot [R(f_a; r_{\text{ref,cs}}) + r_o - r_{\text{ref}}] \quad (3.12)$$

Zusätzlich zur Skalierung der Phasenzentren für die Zielentfernungskorrektur kann eine lineare Skalierung in Entfernungsrichtung (englisch: *Range Scaling*) um einen Faktor f_{rs} erfolgen [70] [52] [55]. Mit dieser zusätzlichen Skalierung kann das Bild in Entfernungsrichtung gestaucht oder gestreckt werden, was zum Beispiel für die Koregistrierung von zwei Bildern in der Interferometrie benötigt wird. Die Trajektorie eines Punktziels bei r_o soll nach der *Chirp Scaling*- und *Range Scaling*-Operation mit Gleichung (3.13) ausgedrückt sein:

$$t_{e,scl}(f_a, r_o) = \frac{2}{c_o} \cdot [R(f_a; r_{\text{ref,cs}}) + f_{rs} \cdot (r_o - r_{\text{ref}})] \quad (3.13)$$

Um die zusätzliche *Range Scaling*-Operation gemeinsam mit der *Chirp Scaling*-Operation durchzuführen, wird mit Gleichung (3.14) ein modifizierter *Chirp Scaling*-Faktor $a_{scl}(f_a)$ in die Gleichungen des *Chirp Scaling*-Verfahrens eingeführt [55]. Die daraus resultierenden Gleichungen des *Chirp Scaling*-Verfahrens sind nachfolgend dargestellt.

$$a_{scl}(f_a) = a(f_a) + (1 - f_{rs}) \cdot \frac{1 + a(f_a)}{f_{rs}} \quad (3.14)$$

Die *Chirp Scaling*-Operation wird durch Multiplikation der *Chirp*-Signale in Entfernung mit dem Skalierungs-*Chirp* $H_1(f_a, t_a, r_o)$ von Gleichung (3.15) durchgeführt. Da die Zielentfernungsänderung in (3.6) linear mit der Entfernung zunimmt, wird eine quadratische Phasenfunktion, also ein *Chirp*, benötigt. Der Skalierungs-*Chirp* bewirkt eine Verschiebung der Phasenzentren der Entfernung-*Chirps* durch eine Veränderung der *Chirp*-Rate. Die *Chirp*-Rate des Skalierungs-*Chirps* entspricht der effektiven *Chirp*-Rate der ausgesendeten Entfernungssignale multipliziert mit dem modifizierten *Chirp Scaling*-Faktor $a_{scl}(f_a)$, und ist wesentlich niedriger als diejenige der ausgesendeten Radarimpulse.

$$H_1(f_a, t_e, r_o) = \exp \left[-j \cdot \pi \cdot k_{eff}(f_a, r_{ref,cs}) \cdot a(f_a) \cdot \left(t_e - \frac{2 \cdot R(f_a, r_{ref,cs})}{c_o} \right)^2 \right] \quad (3.15)$$

Die effektive *Chirp*-Rate wird dabei in Gleichung (3.16) durch die effektive *Chirp*-Rate bei Referenzentfernung genähert. Die sekundäre Entfernungskompression wird dadurch nur für die Referenzentfernung exakt durchgeführt.

$$k_{eff}(f_a, r_o) \approx k_{eff}(f_a, r_{ref,cs}) \quad (3.16)$$

Für sehr hohe Squintwinkel kann diese Näherung zu Verschlechterungen der Bildqualität führen. Auch die Näherung im zweidimensionalen Frequenzbereich zur Herleitung von Gleichung (3.6) führt zu Problemen für sehr hohe Squintwinkel. Modifikationen des *Chirp Scaling*-Verfahrens zur Minderung dieser Verschlechterungen für sehr hohe Squintwinkel sind in [17] und [47] gezeigt.

Die Signale der Punktziele nach der *Chirp Scaling*-Operation sind in Bild 3.7 im dritten Diagramm gezeigt. Der Ort der Signale im Entfernungs-Dopplerbereich bleibt unverändert, aber die Phasenzentren der *Chirp*-Signale, welche durch die dicken Linien angedeutet sind, sind so skaliert, daß sie dieselbe Krümmung aufweisen. Die Skalierung der Phasenzentren ist in Bild 3.8 genauer gezeigt.

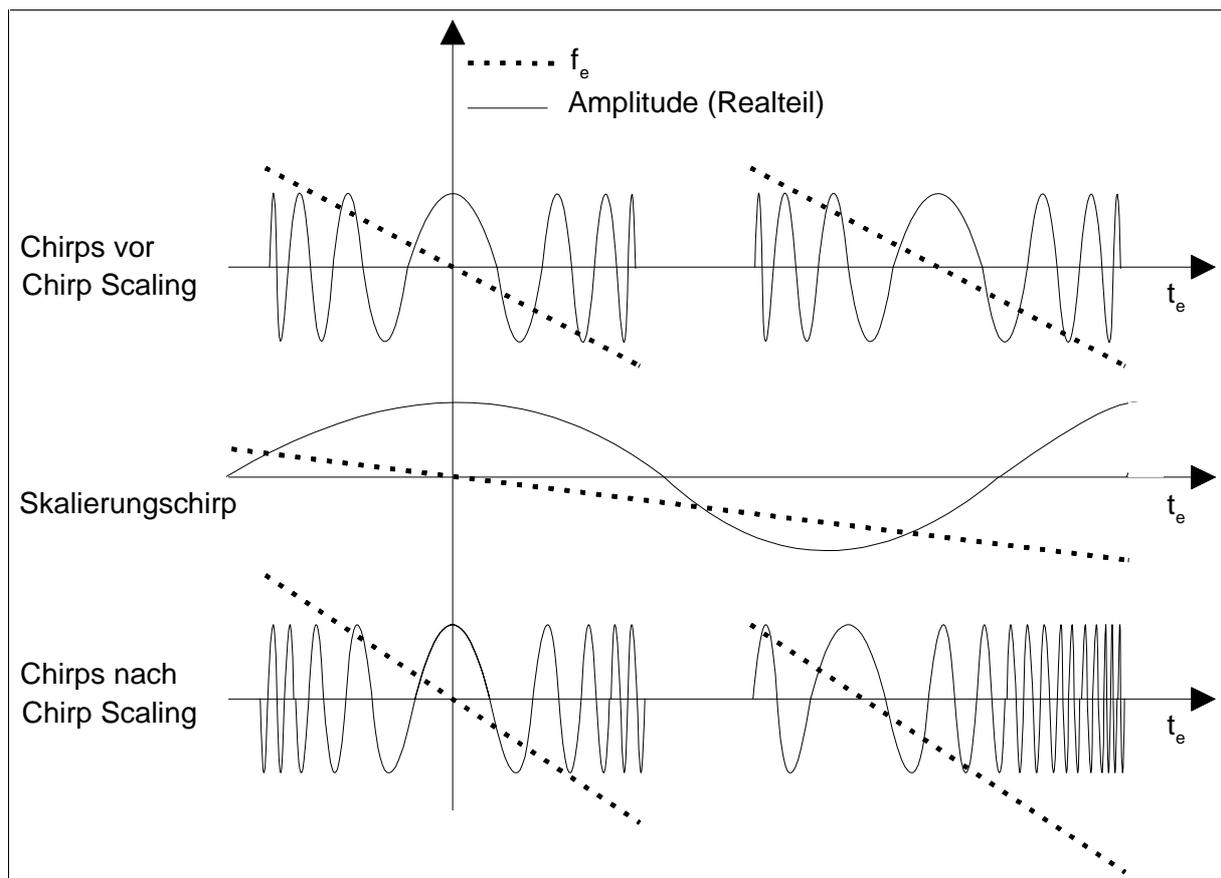


Bild 3.8: Verschiebung der Phasenzentren bei der Chirp Scaling-Operation: Entfernung-Chirps in durchgezogener Linie und Frequenzverlauf in gestrichelter Linie

Im oberen Teil von Bild 3.8 sind zwei *Chirp*-Signale vor der *Chirp Scaling*-Operation gezeigt. Der linke *Chirp* stammt von einem Punktziel genau bei Referenzentfernung, der rechte von einem weiter entfernten Punktziel. Der lineare Frequenzzeitverlauf der *Chirp*-Signale ist gestrichelt dargestellt. Die Steigung des Frequenzzeitverlaufs entspricht der Modulationsrate k_e . Die Modulationsrate des Skalierungschirps in der Mitte des Bildes addiert sich zur Modulationsrate der Signale vor der *Chirp Scaling*-Operation. Dadurch ergeben sich die höheren Modulationsraten der *Chirp*-Signale nach der *Chirp Scaling*-Operation im unteren Teil des Bildes. Auf Grund der Änderung der Modulationsrate erfolgt die beabsichtigte Verschiebung des Phasenzentrums beim rechten unteren Chirp.

Die Frequenzen der *Chirp*-Signale von Zielen, deren Entfernung größer als die Referenzentfernung ist, werden zu geringeren Frequenzen verschoben. Umgekehrt werden Signale von näherliegenden Zielen in der Frequenz zu größeren Werten verschoben. Dadurch ergibt sich die zur Angleichung der Trajektorien gewünschte Verschiebung der Phasenzentren.

Bild 3.9 zeigt eine Szene mit zwei Punktzielen links vor und rechts nach der Verschiebung. Links unten befinden sich die zu einem Punktziel bei Referenzentfernung gehörenden *Chirp*-Signale, während links oben die Signale eines Punktziels in einer größeren Entfernung dargestellt sind. Die Trajektorien sind jeweils gestrichelt gezeichnet. Bei der *Chirp Scaling*-Operation wird die linke obere Trajektorie an die Krümmung der Referenztrajektorie unten links angeglichen. Die Referenztrajektorie erfährt dabei keine Veränderung. Ohne Veränderung der *Chirp*-Rate bleiben auch *Chirp*-Signale, die bei der Dopplerfrequenz Null liegen, da bei dieser Frequenz der *Chirp Scaling*-Faktor Null ist. Die veränderten *Chirp*-Raten werden später bei der Entfernungskompression berücksichtigt.

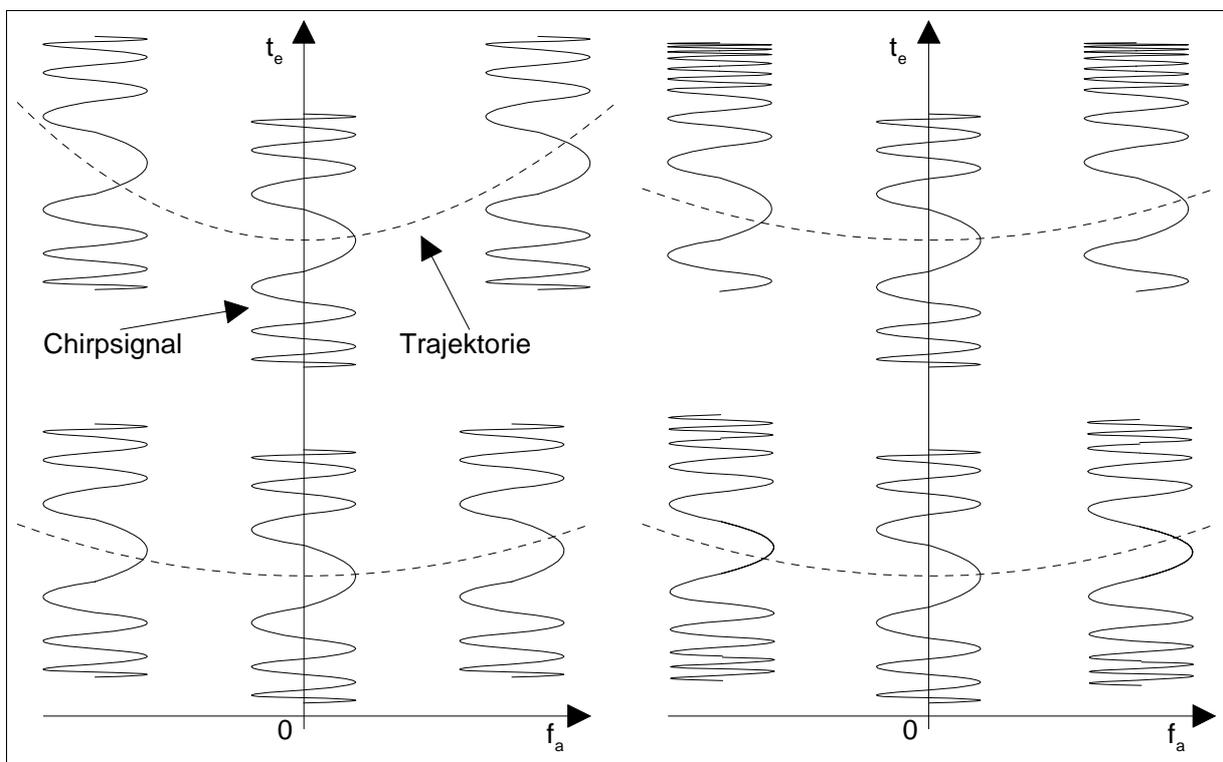


Bild 3.9: *Chirp*-Signale vor (links) und nach (rechts) der Angleichung der Trajektorien

Durch eine FFT in Entfernungsrichtung werden die Daten in Bild 3.7 als nächstes in den zweidimensionalen Frequenzbereich transformiert. Hier wird die Korrektur der Zielentfernungsänderung und die Entfernungskompression durch eine Phasemultiplikation mit $H_2(f_a, f_e, r_{ref,cs})$ durchgeführt [55].

$$H_2(f_a, f_e, r_{ref,cs}) = \exp\left[\frac{-j \cdot \pi \cdot f_e^2}{k_{eff}(f_a, r_{ref,cs}) \cdot (1 + a_{scl}(f_a))}\right] \cdot \exp\left[+j \cdot 2\pi \cdot \frac{2 \cdot r_{ref,cs} \cdot a(f_a)}{c_o} \cdot f_e\right] \quad (3.17)$$

Der erste Exponentialausdruck in (3.17) entfernt die Modulation in Entfernungsrichtung. Dabei wird durch die effektive Modulationsrate k_{eff} die sekundäre Entfernungskompression durchgeführt und durch $a_{\text{scl}}(f_a)$ die Änderung der effektiven Modulationsrate bei der *Chirp Scaling*-Operation berücksichtigt.

Wegen der durch die *Chirp Scaling*-Operation durchgeführten Krümmungsan-gleichung, kann die Korrektur der Zielentfernungsänderung für alle Entfernungen gleichzeitig durch eine von der Dopplerfrequenz abhängige Zeitverschiebung in Entfernung durchgeführt werden. Diese Korrektur erfolgt durch den zweiten Exponentialausdruck in (3.17), welcher eine lineare Phasenfunktion in der Entfer-nungsfrequenz ist. Nach der Rücktransformation in den Entfernung-Dopplerbereich erkennt man in Bild 3.7 im vierten Diagramm das Ergebnis der Korrektur der Zielentfernungsänderung und der Entfernungskompression.

Im nächsten Schritt wird die auf Grund der *Chirp Scaling*-Operation notwendige Phasenkorrektur $H_{K,CS}(f_a, r_o)$ von Gleichung (3.18) durchgeführt [55]. Wegen der bereits erfolgten Korrektur der Zielentfernungsänderung kann die im gleichen Schritt erfolgende Azimutkompression durch eine Optimalfilterung mit einer eindimensiona-len Filterfunktion durchgeführt werden. Die Filterfunktion ist in Gleichung (3.19) gegeben.

$$H_{K,CS}(f_a, r_o) = \exp \left[j \cdot \pi \cdot k_{\text{eff}}(f_a, r_{\text{ref,cs}}) \cdot \frac{(1 + a(f_a))^2}{1 + a_{\text{scl}}(f_a)} \cdot a_{\text{scl}}(f_a) \cdot \left(\frac{2}{c_o} \cdot (r_o - r_{\text{ref,cs}}) \right)^2 \right] \quad (3.18)$$

$$H_3(f_a, r_o) = \exp \left[j \cdot \frac{4\pi}{\lambda} \cdot r_{o,\text{scl}} \cdot \left(\sqrt{1 - \left(\frac{f_a \cdot \lambda}{2 \cdot V} \right)^2} - 1 \right) \right] \quad (3.19)$$

Dabei müssen auf Grund der zusätzlich durchgeführten *Range Scaling*-Operation die Entfernungen für die Azimutkompression an die Skalierung angepaßt werden, was zu $r_{o,\text{scl}}$ in Gleichung (3.19) führt.

$$r_{o,\text{scl}} = r_{\text{ref,cs}} + \frac{r_o - r_{\text{ref,cs}}}{f_{rs}} \quad (3.20)$$

Nach der Phasenmultiplikation H_3 und einer IFFT in Azimut zurück in den Zeitbereich erhält man die fokussierten Punktziele im letzten Diagramm von Bild 3.7.

3.1.4 Der *Inverse Scaled Fourier-Transform-Algorithmus (ISFT)*

Der Algorithmus ist in [36] und [38] beschrieben. Im folgenden werden die wesentlichen Grundzüge der Darstellung in [38] zusammengefaßt. Das Antennen-
diagramm in Azimut und die Hüllkurve in Entfernung gehen dabei in einer komplexen
Konstante C auf und Integrationsgrenzen werden nicht explizit berücksichtigt. Der
Ausgangspunkt für die Herleitung des Algorithmus ist die in Gleichung (3.21)
gegebene Darstellung des zweidimensionalen Spektrums einer kompletten Szene,
welches durch die Integration des Spektrums eines Punktziels ausgedrückt ist. Ein
beliebiges Punktziel an der Position $(r_o, t_{a,o})$ besitzt die Reflektivität $\sigma(r_o, t_{a,o})$. Der
zweite Exponentialausdruck in Gleichung (3.21) kann aus der Azimutmodulation
des empfangenen Signals eines Punktziels von Gleichung (2.30) durch zweimaliges
Anwenden des Prinzips der stationären Phase [10] [60] [61] gewonnen werden,
wenn die Näherung für die Wellenlänge von Gleichung (3.3) nicht durchgeführt
wird. Mit $FT\{p(t_e)\}$ ist die Fourier-Transformierte des ausgesendeten Pulses $p(t_e)$
bezeichnet. Für die Darstellung von (3.21) ist eine geringfügige Variation der
komplexen Amplitude mit der Entfernung vernachlässigt [38].

$$\begin{aligned}
 S_{sz}(f_a, f_e) &\approx C \cdot \iint FT\{p(t_e)\} \cdot \sigma(r_o, t_{a,o}) \cdot \exp[-j \cdot 2\pi \cdot f_a \cdot t_{a,o}] \cdot \\
 &\quad \exp\left[-j \cdot 2\pi \cdot r_o \cdot \left[\frac{2}{c_o} \cdot \sqrt{(f_o + f_e)^2 - \frac{f_a^2 \cdot c_o^2}{4 \cdot V^2}}\right]\right] \cdot dr_o \cdot dt_{a,o} \\
 &\approx C \cdot FT\{p(t_e)\} \cdot \sigma\left(f_a, f_r = \frac{2}{c_o} \cdot \sqrt{(f_o + f_e)^2 - \frac{f_a^2 \cdot c_o^2}{4 \cdot V^2}}\right) \quad (3.21)
 \end{aligned}$$

Die oberen beiden Zeilen in (3.21) stellen die zweidimensionale Fourier-Trans-
formation des Signals $\sigma(r_o, t_{a,o})$ dar und somit kann direkt die dritte Zeile geschrieben
werden, wobei mit f_r die zur Entfernung korrespondierende Frequenzvariable be-
zeichnet ist. Die erste Operation des ISFT-Algorithmus ist die Multiplikation des
empfangenen Signals im zweidimensionalen Frequenzbereich mit dem konjugiert
komplexen Signal zu $FT\{p(t_e)\}$, was die Entfernungskompression bedeutet. Im glei-
chen Schritt wird noch eine Korrektur der Amplitude durchgeführt. Entfernungskom-
pression und Amplitudenkorrektur sind im Blockschaltbild von Bild 3.10 in der kom-
plexen Funktion $H_{ISFT1}(f_a, f_e)$ zusammengefaßt. Damit ergibt sich das zweidimen-
sionale entfernungskomprimierte Spektrum $S_{SZ,RC}$ der Szene in Gleichung (3.22).

$$S_{SZ,RC}(f_a, f_e) \approx \sigma\left(f_a, f_r = \frac{2}{c_o} \cdot \sqrt{(f_o + f_e)^2 - \frac{f_a^2 \cdot c_o^2}{4 \cdot V^2}} \approx a_1(f_a) \cdot f_e + a_2(f_a) \cdot f_o\right) \quad (3.22)$$

Der nächste wesentliche Schritt ist die Approximation des Wurzelausdrucks in Gleichung (3.22) für die Frequenz f_r durch zwei Terme, welche linear von der Entfernungsfrequenz f_e beziehungsweise von der Trägerfrequenz f_o abhängen. Schließlich wird noch die Laufzeit der Signale mit einer für alle Ziele gleichen Verschiebung r_d durch eine lineare Phasenmultiplikation berücksichtigt und es ergibt sich das Spektrum in Gleichung (3.23).

$$S_{SZ,RC,OFF}(f_a, f_e) \approx \sigma[f_a, f_r \approx a_1(f_a) \cdot f_e + a_2(f_a) \cdot f_o] \cdot \exp\left[j \cdot 2\pi(f_e + f_o) \cdot \frac{2 \cdot r_d}{c_o}\right] \quad (3.23)$$

Die inverse Fourier-Transformation der Reflektivität $\sigma(f_a, f_r)$ kann mit der Substitution der Integrationsvariable f_r durch f_e und durch Ersetzen von r_o durch $r'+r_d$ in der Form von Gleichung (3.24) geschrieben werden, wobei r' die Entfernung relativ zur Verschiebung r_d ist.

$$\begin{aligned} \sigma(f_a, r'+r_d) &= |a| \cdot \exp[j \cdot 2\pi \cdot (r'+r_d) \cdot a_2(f_a) \cdot f_o] \cdot \\ &\int \sigma(f_a, a_1(f_a) \cdot f_e + a_2(f_a) \cdot f_o) \cdot \exp[j \cdot 2\pi \cdot (r'+r_d) \cdot a_1(f_a) \cdot f_e] \cdot df_e \end{aligned} \quad (3.24)$$

Durch Einsetzen von Gleichung (3.23) in Gleichung (3.24) ergibt sich für die Reflektivität der Szene $\sigma(f_a, r'+r_d)$ der Ausdruck in Gleichung (3.25).

$$\begin{aligned} \sigma(f_a, r'+r_d) &= |a| \cdot \exp\left[j \cdot 2\pi \cdot r_d \cdot \left(a_2(f_a) - \frac{2}{c_o}\right) \cdot f_o\right] \cdot \exp[j \cdot 2\pi \cdot r' \cdot a_2(f_a) \cdot f_o] \cdot \\ &\int S_{SZ,RC,OFF}(f_a, f_e) \cdot \exp\left[-j \cdot 2\pi \cdot \left(\frac{2 \cdot r_d}{c_o} - a_1(f_a) \cdot r_d\right) \cdot f_e\right] \cdot \\ &\exp[j \cdot 2\pi \cdot a_1(f_a) \cdot r' \cdot f_e] \cdot df_e \quad (3.25) \\ &= H_{ISFT3}(f_a, r') \cdot \int S_{SZ,RC,OFF}(f_a, f_e) \cdot H_{ISFT2}(f_a, f_e) \cdot \exp[j \cdot 2\pi \cdot a_1(f_a) \cdot r' \cdot f_e] \cdot df_e \end{aligned}$$

Zur Berechnung der Reflektivität von Gleichung (3.25) wird das empfangene und entfernungskomprimierte Spektrum mit der zweidimensionalen Phasenfunktion $H_{ISFT2}(f_a, f_e)$ multipliziert und der entstehende Ausdruck einer inversen, mit $a_1(f_a)$ skalierten Fourier-Transformation unterzogen. Dann wird im Entfernung-Dopplerbereich mit der zweidimensionalen komplexen Funktion $H_{ISFT3}(f_a, f_e)$ multipliziert.

Wie im Blockschaltbild von Bild 3.10 gezeigt, wird die inverse, skalierte Fourier-Transformation durch drei *Chirp*-Multiplikationen realisiert [38]. Das Endbild erhält man nach einer abschließenden FFT in Azimutrichtung.

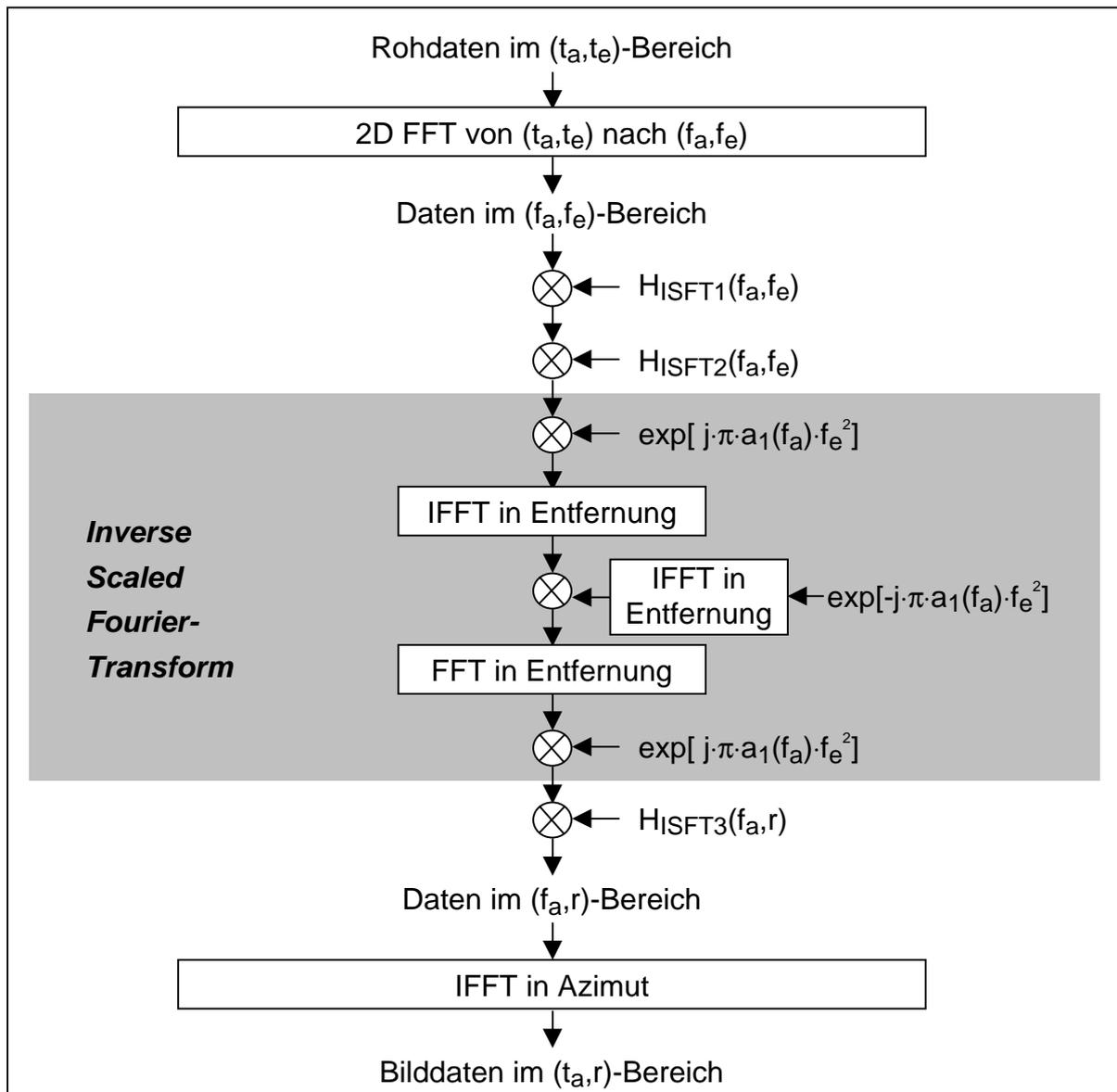


Bild 3.10: Blockdiagramm des Inverse Scaled Fourier-Transform-Algorithmus

3.2 Methoden zur ScanSAR-Verarbeitung

In diesem Kapitel werden die gebräuchlichsten Methoden zur ScanSAR-Verarbeitung kurz zusammengefaßt. Der *Extended Chirp Scaling*-Algorithmus [55] für ScanSAR wird ausführlicher beschrieben, insbesondere die Azimut-Skalierung wird genau entwickelt. Die Azimut-Skalierung wird in Kapitel 5.2 für die *Spotlight*-Verarbeitung erweitert.

Die Verarbeitung in Entfernungsrichtung ist prinzipiell gleich für ScanSAR- und *Stripmap*-Daten. Für die Azimutverarbeitung muß aber die besondere Struktur der Rohdaten mit nicht kontinuierlicher Abbildung beachtet werden.

3.2.1 Verwendung von *Stripmap*-Verfahren

Wie in Kapitel 2.9 beschrieben, können alle Verfahren, welche auf einer Korrelation des Signals in Azimut mit einer Referenzfunktion beruhen, auch für die *ScanSAR*-Verarbeitung eingesetzt werden. Dabei müssen aber die Rohdaten vor der Prozessierung in Azimut extrem erweitert werden. Die Erweiterung muß mindestens der maximalen Länge der synthetischen Apertur L_{\max} aus Gleichung (2.2) entsprechen, welche eine Funktion der Entfernung ist. Daher bestimmt die größte Entfernung der Szene die notwendige Erweiterung. Da die *Burst*-Länge typischerweise in der Größenordnung von 10^2 s liegt und L_{\max} bei satellitengestützten Systemen im Bereich von Sekunden, bedeutet die Erweiterung der Azimutdimension eine sehr uneffiziente Prozessierung.

Eine Methode zur Verringerung der Azimuterweiterung ist in [3] beschrieben. Durch eine Tiefpaßfilterung der prozessierten *ScanSAR*-Szene kann die Erweiterung vor der Verarbeitung auf die Zykluszeit minus der *Burst*-Länge verringert werden. Die Zykluszeit ist das Zeitintervall, welches zwischen der Aufzeichnung der *Burst*-Signale des gleichen Teilstreifens liegt [45] [44].

3.2.2 SPECAN-Verarbeitung von *ScanSAR*-Daten

Das SPECAN-Verfahren [69] wird oft für die Azimutverarbeitung von *ScanSAR*-Daten eingesetzt. In Kapitel 2.9.2.2 wurde diese Verarbeitung bereits für SAR-Daten mit nicht kontinuierlicher Abbildung formuliert. Die entfernungskomprimierten Daten werden mit einer *Dechirp*-Funktion multipliziert und anschließend durch eine FFT in Azimut komprimiert.

Der Vorteil dieses Verfahren ist, daß für die Azimutkompression nur eine Multiplikation und eine FFT notwendig ist. Daneben muß die Dimension der Rohdaten nicht, wie etwa bei der Verwendung von *Stripmap*-Verfahren, extrem erweitert werden. Die wesentlichen Nachteile des Verfahrens sind die Approximation der Azimutmodulation als rein quadratische Phasenfunktion und die notwendige Interpolation zur geometrisch richtigen Darstellung der Bilddaten in Azimut. Die geometrische Korrektur ist notwendig, da die Bilddaten nach der SPECAN-Verarbeitung in der Azimutfrequenz dargestellt sind und der Zusammenhang zur Punktzielposition in der Azimutzeit über die Dopplerrate gegeben ist, welche eine Funktion von der Entfernung ist. Dieser Zusammenhang ist im folgenden Kapitel bei der Azimut-Skalierung genauer dargestellt.

3.2.3 Das *Extended Chirp Scaling*-Verfahren (ECS) für *ScanSAR*

Das *Extended Chirp Scaling*-Verfahren für *ScanSAR* ist eine Kombination aus *Chirp Scaling* für die Entfernungsverarbeitung und SPECAN mit Azimut-Skalierung für die Azimutverarbeitung. Die Azimut-Skalierung verbindet die Vorteile des SPECAN-Verfahrens mit der hohen Genauigkeit der Azimutverarbeitung im *Chirp Scaling*-Verfahren und erreicht eine geometrisch richtige Bilddarstellung ohne Interpolation. Die Azimut-Skalierung kompensiert vollständig die Nachteile, welche sich bei Verwendung der SPECAN-Methode zur Azimutkompression ergeben. Die ungenaue Azimutverarbeitung wird sehr genau, weil anstatt des genäherten quadratischen der genaue, durch eine Wurzelfunktion beschriebene Phasenverlauf in Azimut berücksichtigt wird. Es ist keine Neuabtastung mit inhärenter Interpolation zur geometrische Korrektur in Azimutrichtung erforderlich. Darüber hinaus kann bei der Azimut-Skalierung der Abtastabstand im prozessierten Bild bei der Azimut-Skalierung eingestellt werden. Das vereinfachte Blockschaltbild des *Extended Chirp Scaling*-Verfahrens für *ScanSAR* ist in Bild 3.11 gezeigt. Die Korrektur des Antennendiagramms in Azimut ist nicht enthalten. Diese wird im Entfernung-Dopplerbereich an der gleichen Stelle wie die Azimut-Skalierung durchgeführt.

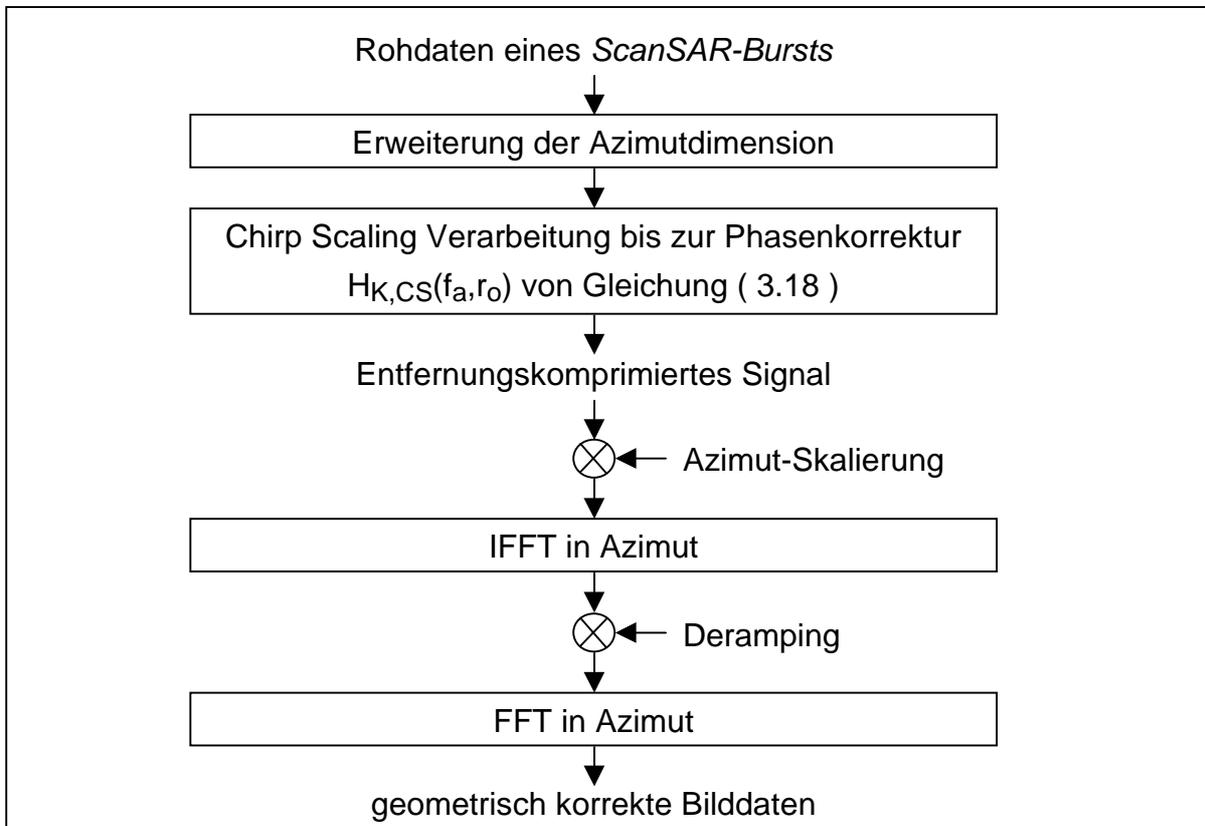


Bild 3.11: Vereinfachtes Blockdiagramm des ECS für *ScanSAR*

Vor Beginn der Verarbeitung wird die Entfernungsdimension auf Grund der Azimut-Skalierung geringfügig erweitert. Die Entfernungsverarbeitung wird bis einschließlich der Phasenkorrektur $H_{K,CS}(f_a, r_o)$ von Gleichung (3.18) mit dem *Chirp Scaling*-Verfahren durchgeführt. Danach liegen die entfernungskomprimierten Daten im Entfernungs-Dopplerbereich vor. Im nächsten Schritt erfolgt die Azimut-Skalierung, die das nächste Kapitel genauer beschreibt. Daran schließt sich die SPECAN-Verarbeitung mit *Deramping*-Multiplikation und FFT in Azimut an, wobei die *Deramping*-Funktion unabhängig von der Entfernung ist. Nach der FFT in Azimut erhält man die geometrisch korrekten Bilddaten.

3.2.3.1 Azimut-Skalierung für die *ScanSAR*-Verarbeitung

Die Phasenfunktion H_{AS} zur Azimut-Skalierung ist in Gleichung (3.26) gegeben. Der erste Exponentialausdruck ist identisch mit der Phasenfunktion zur Azimut-kompression H_3 des *Chirp Scaling*-Verfahrens aus Gleichung (3.19) und entfernt den durch eine Wurzelfunktion beschriebenen Phasenverlauf in Azimut.

$$H_{AS}(f_a, r_o, r_{scl}) = \exp \left[j \cdot \frac{4\pi}{\lambda} \cdot r_o \cdot (\beta(f_a) - 1) \right] \cdot \exp \left[-j \cdot \frac{\pi}{k_{a,scl}} \cdot f_a^2 \right] \quad (3.26)$$

Der zweite Exponentialterm in (3.19) fügt eine rein quadratische Phasenmodulation mit der konstanten Dopplerrate $k_{a,scl}$ ein, welche die Dopplerrate für Entfernung r_{scl} ist. Signale der Entfernung r_{scl} werden bei der Azimut-Skalierung nicht verändert und r_{scl} kann auch als Referenzentfernung der Azimut-Skalierung bezeichnet werden. Die Transformation der Phasenhistorie ist in Bild 3.12 durch die vertikalen Pfeile angedeutet. Dabei ist die quadratische Phasenfunktion in der Azimutzeit-Azimutfrequenzebene als lineare Frequenzmodulation dargestellt. Durch die Berücksichtigung der durch eine Wurzelfunktion beschriebenen Azimutmodulation wird die aus *Deramping*-Operation und Azimut-FFT bestehende SPECAN-Verarbeitung mit der hohen Genauigkeit der Azimutverarbeitung des *Chirp Scaling*-Verfahrens durchgeführt. Die *Deramping*-Funktion ist in Bild 3.12 gestrichelt eingezeichnet.

Die SPECAN-Verarbeitung ohne Azimut-Skalierung benötigt eine Neuabtastung der komprimierten Signale in Azimut, da die Verarbeitung im Azimut-Frequenzbereich endet und die Dopplerrate über Entfernung variiert. Das bedeutet einen unterschiedlichen Abtastabstand in jeder Entfernung, welcher durch eine mit der Entfernung variierende Neuabtastung ausgeglichen werden muß.

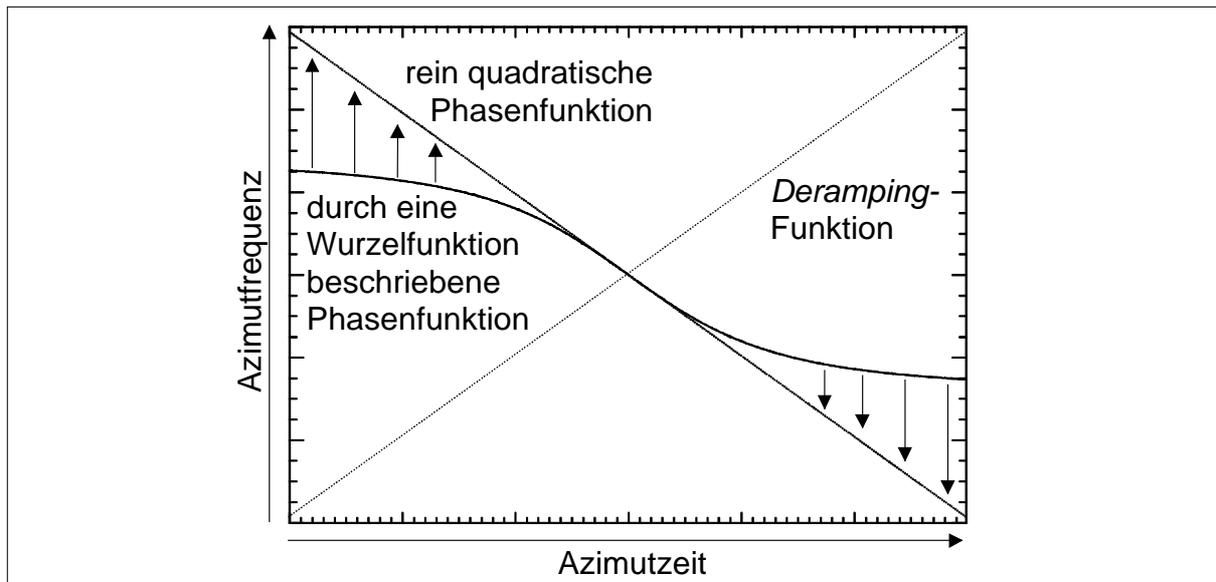


Bild 3.12: Transformation der von einer Wurzelfunktion bestimmten Phasenmodulation in eine rein quadratische Phasenmodulation in Azimutfrequenz /Azimutzeitdarstellung

Ein Beispiel für eine SPECAN-Verarbeitung ohne Azimut-Skalierung ist links in Bild 3.13 gezeigt. Rohdaten einer Szene mit sechs rechteckförmig angeordneten Punktzielen wurden prozessiert. Die unterschiedliche Skalierung der Azimutdimension in horizontaler Richtung erkennt man an der trapezförmigen Positionierung der Punktziele nach der Verarbeitung. Um auf die geometrisch richtige Darstellung im rechten Bild zu kommen, ist eine aufwendige Neuabtastung mit Interpolationen erforderlich.

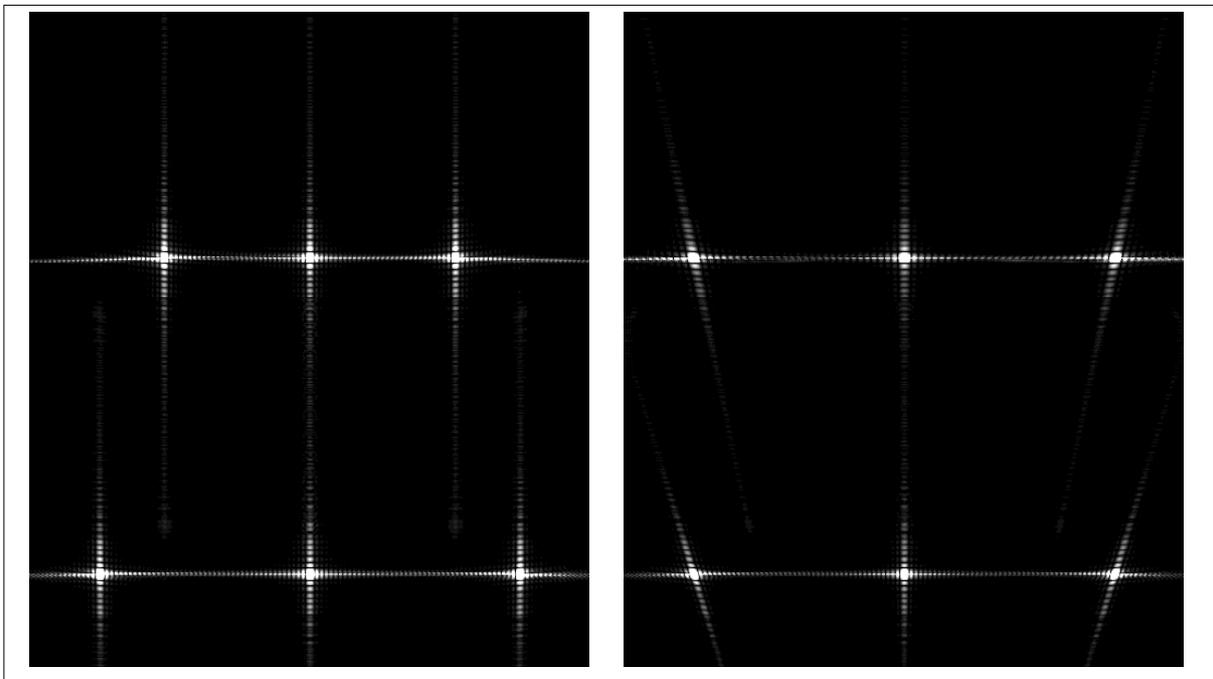


Bild 3.13: Ergebnis der SPECAN-Verarbeitung ohne (links) und mit (rechts) Azimut-Skalierung - ohne Azimut-Skalierung muß durch Neuabtastung die in Entfernung unterschiedliche Azimutabtastung korrigiert werden

von Zielen im Fernbereich und eine Streckung der Signale von Zielen im Nahbereich auf. Die Signale A',B' und C' nach der Azimut-Skalierung sind gepunktet dargestellt. Die benötigte Erweiterung ist mit T_{Ext} bezeichnet.

Für jede Entfernung ist eine andere Erweiterung der Azimutdimension erforderlich. Für eine blockweise Verarbeitung muß die größte auftretende Erweiterung gewählt werden. In vielen Fällen ist die benötigte Erweiterung kleiner als die Erweiterung, welche normalerweise für das Erreichen der nächsten Zweierpotenz durchgeführt wird.

Die Erweiterung setzt sich aus der Stauchung oder Streckung der Azimutsignale der Länge T_B selbst sowie aus der Verschiebung der Signale zusammen. Für kleine Squintwinkel kann die benötigte Erweiterung für eine Entfernung r_o mit Bild 3.14 zu Gleichung (3.27) genähert werden.

$$T_{Ext} = (T_{ia} - T_B) \cdot \left| \frac{r_{scl}}{r_o} - 1 \right| + T_B \cdot \left(\frac{r_{scl}}{r_o} - 1 \right) \quad (3.27)$$

Um die Näherung auch für höhere Squintwinkel verwenden zu können, muß eine Verschiebung der Azimutzeit vor der Azimut-Skalierung durchgeführt werden [55]. Diese wird für die *Spotlight*-Verarbeitung in Kapitel 5.2.2 genau hergeleitet.

3.2.3.2 Einstellen des Abtastabstandes in Azimut durch die Azimut-Skalierung

Die Azimut-Skalierung bietet die Möglichkeit der Einstellung des Abtastabstandes Δx in Azimut im prozessierten Bild durch die Wahl der Skalierungsentfernung r_{scl} . Dabei berechnet sich die Skalierungsentfernung r_{scl} in Abhängigkeit vom gewünschten Abtastabstand mit Gleichung (3.28).

$$r_{scl} = \frac{2 \cdot V \cdot \Delta x \cdot N_{FFT,a}}{PRF \cdot \lambda} \quad (3.28)$$

In der Gleichung bezeichnet $N_{FFT,a}$ die Anzahl der Abtastwerte in Azimut vor der letzten Azimut-FFT. Diese Möglichkeit der Einstellung des Abtastabstandes ist besonders vorteilhaft bei der Prozessierung von *ScanSAR*-Daten, da vor dem Zusammenfügen der Teilstreifen die unterschiedlichen Abtastraten in Azimut ausgeglichen werden müssen. Dies kann durch die Azimut-Skalierung ohne Interpolation geschehen.

3.3 Verfahren zur *Spotlight*-Prozessierung

Wegen der in Kapitel 4.3 genauer beschriebenen Vorteile der *Dechirp on Receive*-Operation in Entfernung für den *Spotlight*-Modus, werden Rohdaten mit *Dechirp*-Operation in Entfernungsrichtung vorausgesetzt. Dies bedeutet die Verwendung von gesendeten Radarpulsen mit linearer Frequenzmodulation, also *Chirp*-Signalen, und die Multiplikation der empfangenen Radarechos mit einem linear frequenzmodulierten Signal invertierter Modulationsrate vor der Analog/Digital-Wandlung. Für *Spotlight*-Daten kann durch *Dechirp* in Entfernung die Abtastfrequenz bei der Analog/Digital-Wandlung wesentlich verringert werden.

Je nachdem, ob zusätzlich eine *Dechirp*-Operation in Azimutrichtung durchgeführt wird, können die Verfahren zur *Spotlight*-Verarbeitung eingeteilt werden in eine Gruppe mit *Dechirp*-Operation in Entfernung und eine Gruppe mit zweidimensionaler *Dechirp*-Operation in Entfernung und Azimut. Eine *Dechirp*-Operation in Azimut bedeutet das Zentrieren des in Entfernungsrichtung verwendeten *Dechirp*-Signals um die von der Azimutposition abhängige Entfernung zwischen Antenne und Szenenzentrum. Wird eine *Dechirp*-Operation in Entfernung durchgeführt, so ist das *Dechirp*-Signal in Entfernungsrichtung um eine Referenzentfernung zwischen Antenne und Szenenzentrum zentriert, welche unabhängig von der Azimutposition ist. In [10] werden Rohdaten mit zweidimensionaler *Dechirp*-Operation auch als Rohdaten mit Bewegungskompensation auf einen Punkt und Rohdaten mit *Dechirp*-Operation in Entfernung als Rohdaten mit Bewegungskompensation auf eine Linie bezeichnet.

3.3.1 Verfahren für Rohdaten mit *Dechirp*-Operation in Entfernung

Spotlight-Verfahren für Rohdaten mit *Dechirp*-Operation in Entfernung sind oft von *Stripmap*-Algorithmen abgeleitet. In diesem Abschnitt werden der *Wavenumber*- und der *Chirp Scaling*-Algorithmus für die *Spotlight*-Verarbeitung behandelt.

3.3.1.1 *Wavenumber*-Algorithmus für die Verarbeitung von *Spotlight*-Daten

In [10] wird der *Wavenumber*-Algorithmus für die Verarbeitung von *Spotlight*-Rohdaten mit *Dechirp*-Operation in Entfernung beschrieben. Dabei ersetzt die *Dechirp*-Operation in Entfernung zusammen mit der Korrektur des *Residual Video Phase*-Terms die Entfernungs-FFT und die Pulskompression in Entfernungsrichtung. Wie im Blockschaltbild von Bild 3.15 gezeigt, erfolgt nach der Korrektur des *Residual Video Phase*-Terms nur noch eine eindimensionale FFT in Azimutrichtung. Der *Residual Video Phase*-Term ist in Kapitel 4.4 näher erklärt.

Die Korrektur des *Residual Video Phase*-Terms kann durch eine FFT in Entfernungsrichtung gefolgt von einer Multiplikation mit einem Chirp-Signal und einer sich anschließenden inversen FFT durchgeführt werden [10] [57].

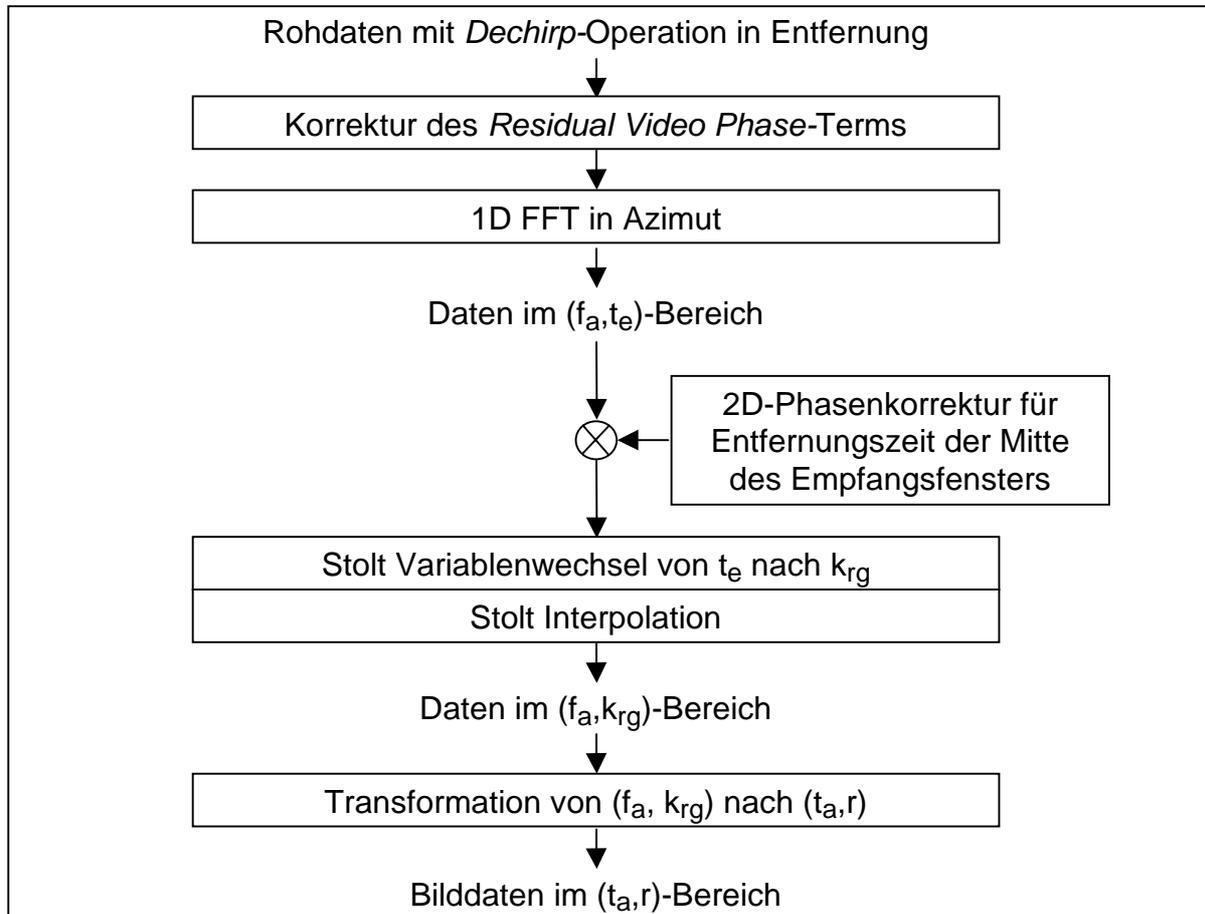


Bild 3.15: Blockdiagramm des Wavenumber-Algorithmus zur Spotlight-Verarbeitung

In Azimutrichtung muß die gesamte Azimutbandbreite der *Spotlight*-Szene vor der Prozessierung ausreichend abgetastet sein. Während der Datenaufzeichnung ist es ausreichend, die augenblickliche Bandbreite der Azimutsignale, welche zum Öffnungswinkel der Antenne in Azimut korrespondiert, durch die Pulswiederholfrequenz PRF genügend hoch abzutasten. Vor der Verarbeitung muß dann die Azimutabtastung so erhöht werden, daß die gesamte Azimutbandbreite der *Spotlight*-Szene ausreichend abgetastet ist. Eine elegante Methode zur Erhöhung der Azimutabtastung nach der FFT in Azimut von Bild 3.15 durch mehrfaches Wiederholen des Azimutpektrums der augenblicklichen Azimutbandbreite ist in [62] beschrieben.

3.3.1.2 Chirp Scaling-Verarbeitung im Spotlight-Modus

Das *Chirp Scaling*-Verfahren ist eigentlich ein *Stripmap*-Verfahren, es kann aber fast unverändert auf die *Spotlight*-Verarbeitung angewendet werden. Dabei ergeben sich allerdings wesentliche Nachteile. Rohdaten müssen in Azimutrichtung so hoch abge-

tastet sein, daß die gesamte Azimutbandbreite der Szene eindeutig dargestellt werden kann. Die Azimutabtastung kann, wie oben beim *Wavenumber*-Algorithmus beschrieben, vor der Datenverarbeitung ausreichend für die gesamte Szene erhöht werden.

Ein weiterer Nachteil des *Chirp Scaling*-Algorithmus ist die Notwendigkeit eines linear frequenzmodulierten Signals in Entfernung. Dies bedeutet, daß auf das *Spotlight*-Signal mit *Dechirp* in Entfernung vor der Verarbeitung wieder eine lineare Frequenzmodulation eingefügt werden muß, was eine Erhöhung der Abtastfrequenz in Entfernung notwendig macht.

Vor kurzem wurde eine Methode vorgestellt, welche als *Accelerated Chirp Scaling*-Algorithmus [27] bezeichnet wird, welche eine *Chirp Scaling*-Operation für Daten mit *Dechirp* in Entfernung ermöglicht. Dabei wird die geringe quadratische Phase, welche normalerweise als *Secondary Range Compression*-Phase bezeichnet wird, für die *Chirp Scaling*-Operation verwendet. Für den Fall, daß diese Phase für die *Chirp Scaling*-Operation nicht ausreicht, muß aber wieder eine lineare Frequenzmodulation in Entfernung vor der Verarbeitung auf die Rohdaten gegeben werden.

3.3.2 Verfahren für Rohdaten mit zweidimensionaler *Dechirp*-Operation

Spotlight-Verfahren mit *Dechirp* in Azimut kommen häufig aus der Tomographie. Zuerst wird die tomographische Verarbeitung dargestellt. Der *Polar Format*-Algorithmus kann dann aus der tomographischen Verarbeitung abgeleitet werden. Schließlich wird der *Convolution Backprojection*-Algorithmus als eine andere Realisierung des *Polar Format*-Algorithmus betrachtet. Das tomographische Verfahren ist hier mit angeführt, um den *Polar Format*- und den *Convolution Backprojection*-Algorithmus abzuleiten. Für das tomographische Verfahren ist aber keine zweidimensionale *Dechirp*-Operation erforderlich.

3.3.2.1 Tomographische Verarbeitung von *Spotlight*-SAR

Das empfangene *Spotlight*-SAR-Signal eines Abtastpunktes in Entfernung an einer Sensorposition, also bei einem bestimmten Squintwinkel, kann als Projektion der Szene orthogonal zur Hauptstrahlrichtung der Antenne betrachtet werden und somit kann das *Projection Slice*-Theorem der Tomographie angewendet werden.

Das *Projection Slice*-Theorem wird in [57] wie folgt dargestellt. In Bild 3.16 rechts wird eine grau dargestellte unbekannte Dämpfungsverteilung $g(x,y)$ unter einem Squintwinkel Ψ von äquidistanten, auf einer Parallelen zur u -Achse angeordneten

Röntgenstrahlenquellen beleuchtet. Die Intensität der Röntgenstrahlen wird nach Durchlaufen der Dämpfungverteilung mit Sensoren gemessen, die den Strahlenquellen gegenüberliegen. Die Messung gibt die aufintegrierte Dämpfung $p(\Psi, u)$ entlang von Parallelen zur v -Achse, also in Abhängigkeit von u an, und kann mit Gleichung (3.29) beschrieben werden.

$$p(\Psi, u) = \int g(-u \cdot \sin(\Psi) - v \cdot \cos(\Psi), u \cdot \cos(\Psi) - v \cdot \sin(\Psi)) dv \quad (3.29)$$

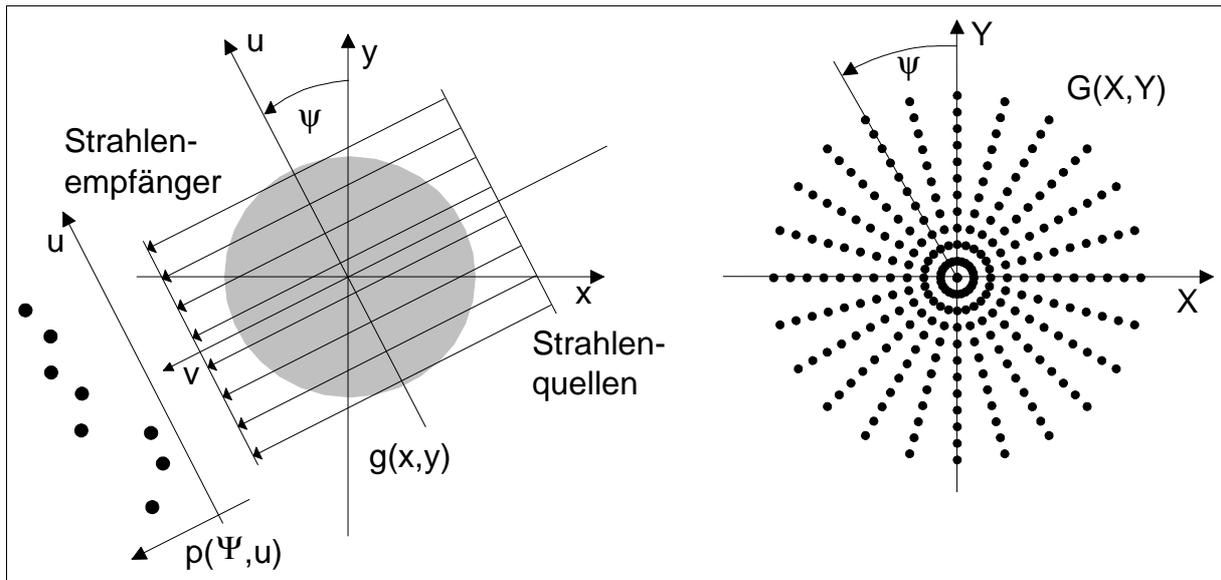


Bild 3.16: Geometrie eines tomographischen Systems (links) und den Projektionen unter den Squintwinkeln Ψ entsprechende Schnitte der zweidimensionalen Fourier-Transformierten der Dämpfungverteilung $G(X,Y)$ (rechts)

Das *Projection Slice*-Theorem besagt, daß die eindimensionale Fourier-Transformation $P(\Psi, U)$ bezüglich der Variablen u einer Projektion $p(\Psi, u)$, welche sich unter einem Squintwinkel Ψ zur y -Achse ergibt, dem Schnitt der zweidimensionalen Fourier-Transformierten $G(X,Y)$ der Dämpfungverteilung $g(x,y)$ unter dem Squintwinkel Ψ in Bezug auf die Y -Achse entspricht.

Eine Möglichkeit der Prozessierung der Dämpfungverteilung $g(x,y)$ aus den, über den gesamten Squintwinkelbereich von 180° ermittelten Projektionen ist die Fourier-Transformation der Projektionen und die Anordnung dieser in der (X,Y) -Ebene, was die Darstellung in Bild 3.16 rechts ergibt. Für einen Squintwinkel gleich 0° entspricht dabei die U -Achse genau der Y -Achse. Nach einer Transformation der polaren Darstellung in eine kartesische, ergibt sich durch zweidimensionale inverse Fourier-Transformation die Dämpfungverteilung $g(x,y)$.

empfangene Signal $s_v(\Psi, t_e)$ die Aufsummierung der Signale aller Ziele, welche entlang der v -Achse bei einer bestimmten Position $t_e = 2 \cdot (R_c + u_0) / c_0$ liegen und die infinitesimale Ausdehnung du besitzen. Mit R_c ist dabei der vom Squintwinkel Ψ abhängige Abstand zwischen Szenenzentrum und Antenne bezeichnet. Die Näherung der ebenen Welle bewirkt eine Vernachlässigung der Zielentfernungsänderung. Daraus resultierende Fehler können nur teilweise korrigiert werden und daraus folgt eine Beschränkung der möglichen Szenengröße. In Tabelle 3.4 sind mögliche Szenengrößen für einige Beispiele angegeben.

Das gesamte von der Szene empfangene Signal in Gleichung (3.31) ergibt sich bei einem Durchmesser der Szene von $2L$ durch Aufintegrieren entlang der u -Achse.

$$s(\Psi, t_e) = \int_{-L}^L p(\Psi, u) \cdot b\left(t_e - \frac{2 \cdot (R_c + u)}{c_0}\right) \cdot du \quad (3.31)$$

Gleichung (3.31) weist die Form einer Faltung auf und daher ist es möglich, die Fourier-Transformierte $P(\Psi, U)$ der Projektion $p(\Psi, u)$ nach einer Fourier-Transformation in Entfernungsrichtung zu ermitteln [57]. Anschließend kann die Transformation von Polarkoordinaten nach kartesischen Koordinaten erfolgen und eine zweidimensionale inverse Fourier-Transformation liefert die Verteilung der Rückstreukoefizienten $g(x, y)$. Die tomographische Verarbeitung von *Spotlight*-Daten ist im Blockschaltbild von Bild 3.18 zusammengefaßt.

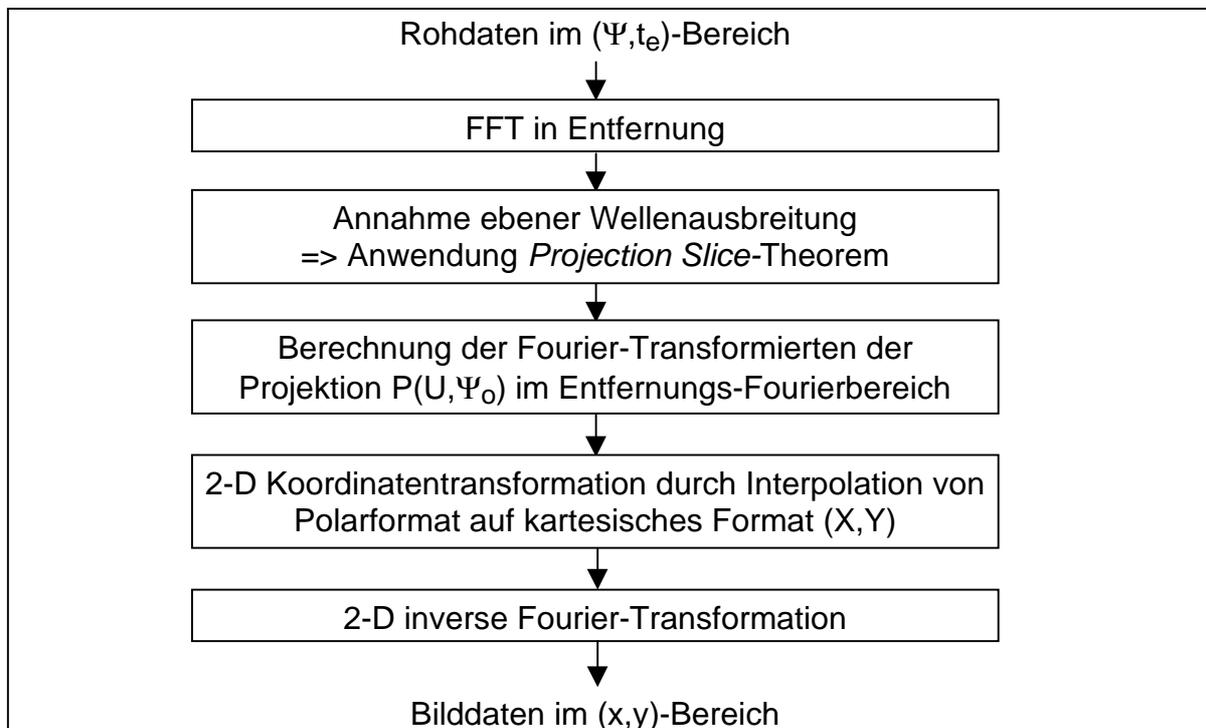


Bild 3.18: Blockdiagramm der tomographischen Verarbeitung von Spotlight-Daten

Im Gegensatz zur Tomographie wird beim *Spotlight-SAR* nur ein kleiner Winkelbereich zur Generierung eines Abbildes der Szene genutzt. Die hohe Auflösung wird möglich durch die kohärente Verarbeitung und die hohe Trägerfrequenz der komplexen Radarechos. In der Tomographie werden nur reelle Dämpfungswerte aufgezeichnet. Durch den hohen Winkelbereich von 180° wird dort die hohe Bildqualität erreicht [20].

3.3.2.2 Der *Polar Format-Algorithmus*

Der *Polar Format-Algorithmus* kann für den Fall einer linearen Frequenzmodulation der ausgesendeten Radarpulse aus der tomographischen Verarbeitung abgeleitet werden [16] [57]. Der wesentliche Schritt ist, daß eine zweidimensionale *Dechirp*-Operation die FFT in Entfernung im Blockschaltbild der tomographischen Verarbeitung von Bild 3.18 ersetzt.

Die gesendeten Radarpulse $b(t_e)$ müssen linear frequenzmoduliert sein. In der Gleichung eines linear frequenzmodulierten Sendepulses $b(t_e)$ von (3.32) bezeichnet T_p dessen Dauer und k_e die Modulationsrate. Die Trägerfrequenz ist mit f_0 bezeichnet.

$$b(t_e) = \exp[j \cdot 2\pi \cdot f_0 \cdot t_e] \cdot \exp[j \cdot \pi \cdot k_e \cdot t_e^2] \cdot \text{rect}\left[\frac{t_e}{T_p}\right] \quad (3.32)$$

Für die *Dechirp*-Operation wird die zweidimensionale *Dechirp*-Funktion d_{2D} von Gleichung (3.33) auf das empfangene Signal gemischt. Diese Funktion entfernt die lineare Frequenzmodulation in Entfernungsrichtung und wegen der Azimutabhängigkeit der Entfernung R_c zwischen Antenne und Szenenzentrum auch die Azimutmodulation genau für das Szenenzentrum.

$$d_{2D}(R_c(\Psi), t_e) = \exp\left[-j \cdot 2\pi \cdot f_0 \cdot \left(t_e - \frac{2 \cdot R_c}{c_0}\right)\right] \cdot \exp\left[-j \cdot \pi \cdot k_e \cdot \left(t_e - \frac{2 \cdot R_c}{c_0}\right)^2\right] \quad (3.33)$$

Nach Einsetzen von $b(t_e)$ in das Signal $s(\Psi, t_e)$ aus Gleichung (3.31) und der Multiplikation mit der *Dechirp*-Funktion d_{2D} ergibt sich nach einigen Umformungen das Signal $s'(\Psi, t_e)$ in Gleichung (3.34).

$$\begin{aligned} s'(\Psi, t_e) &= \int_{-L}^L p(\Psi, t_e) \cdot \exp\left[-j \cdot \frac{4\pi}{c_0} \cdot \left(f_0 + k_e \cdot \left(t_e - \frac{2 \cdot R_c}{c_0}\right)\right) \cdot u\right] \cdot \exp\left[j \cdot \frac{4\pi}{c_0^2} \cdot k_e \cdot u^2\right] \cdot du \\ &\approx P\left(\Psi, U = \frac{4\pi}{c_0} \cdot \left(f_0 + k_e \cdot \left(t_e - \frac{2 \cdot R_c}{c_0}\right)\right)\right) \end{aligned} \quad (3.34)$$

Der zweite Exponentialterm in der oberen Zeile von Gleichung (3.34) ist der *Residual Video Phase*-Term. In Kapitel 4.3 wird dieser Term für eine *Dechirp*-Operation in Entfernungsrichtung näher betrachtet. In [10] und [57] wird eine Korrektur des *Residual Video Phase*-Terms vorgeschlagen. Für den *Polar Format*-Algorithmus wird dieser Term aber vernachlässigt, womit die rechte Seite der ersten Zeile von Gleichung (3.34) der Fourier-Transformation entlang der u-Achse entspricht und die zweite Zeile von Gleichung (3.34) geschrieben werden kann. Das unter einem bestimmten Squintwinkel Ψ empfangene und mit der zweidimensionalen *Dechirp*-Funktion multiplizierte SAR-Signal entspricht der Fourier-Transformierten der Projektion, also $P(\Psi,U)$.

Abtastwerte von $P(\Psi,U)$ für alle Punkte der Szene mit der Ausdehnung $2L$ stehen nur im Entfernungszeitintervall von Gleichung (3.35) zur Verfügung, wobei aber wegen der Annahme einer kleinen Szene bei großer Auflösung, also $T_P \gg 2 \cdot L/c_0$, die Näherung in Gleichung (3.36) gilt.

$$\frac{2 \cdot R_c}{c_0} + \frac{2 \cdot L}{c_0} - \frac{T_P}{2} \leq t_e \leq \frac{2 \cdot R_c}{c_0} - \frac{2 \cdot L}{c_0} + \frac{T_P}{2} \quad (3.35)$$

$$\frac{2 \cdot R_c}{c_0} - \frac{T_P}{2} \leq t_e \leq \frac{2 \cdot R_c}{c_0} + \frac{T_P}{2} \quad (3.36)$$

Mit Gleichung (3.34) entspricht dem bekannten Abtastbereich der Entfernungszeit von Gleichung (3.36) ein bekannter Abtastbereich der Fourier-Transformierten der Projektion $P(\Psi,U)$ mit U_0 und ΔU aus Gleichung (3.37).

$$\begin{aligned} U_{\min} &= \frac{4\pi}{c_0} \cdot (f_0 - k_e \cdot T_p) \quad ; \quad U_{\max} = \frac{4\pi}{c_0} \cdot (f_0 + k_e \cdot T_p) \\ U_0 &= \frac{4\pi}{c_0} \cdot f_0 \quad ; \quad \Delta U = U_{\max} - U_{\min} = \frac{8\pi}{c_0} \cdot k_e \cdot T_p \end{aligned} \quad (3.37)$$

Wie in Bild 3.19 gezeigt, entspricht für $\Psi = 0^\circ$ die U-Achse genau der Y-Achse, wobei Y die Ortsfrequenz zu y von Bild 3.17 ist. Im zweidimensionalen Ortsfrequenzbereich $G(X,Y)$ der Verteilung der Rückstreuoeffizienten $g(x,y)$ bezeichnet ΔU die Differenz der Radien der Kreissegmente, welche die bekannten Abtastwerte der Fourier-Transformierten $P(\Psi,U)$ der Projektion $p(\Psi,u)$ begrenzen. U_0 bezeichnet den Mittelwert der Radien der Kreissegmente. Der Winkelbereich der bekannten Abtastwerte entspricht direkt dem während der Aufzeichnung der *Spotlight*-Daten überstrichenen Winkelbereich Ψ_{spot} .

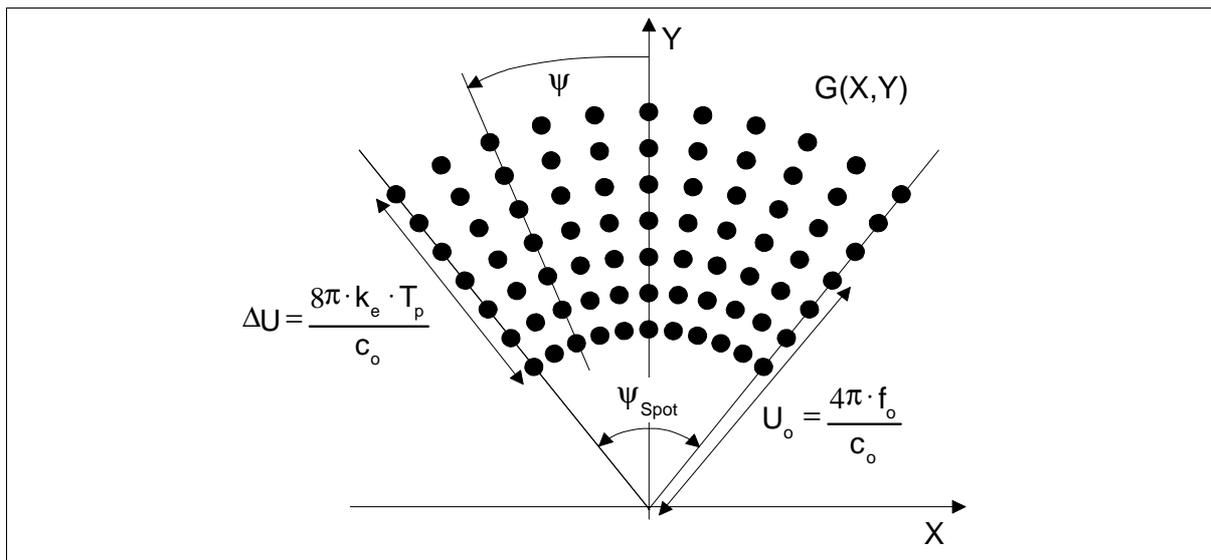


Bild 3.19: Anordnung der Fourier-Transformierten $P(\Psi, U)$ im zweidimensionalen Ortsfrequenzspektrum $G(X, Y)$ für die Verarbeitung von Spotlight-Daten mit dem Polar Format-Algorithmus

Genauso wie bei der tomographischen Verarbeitung, erfolgt im nächsten Schritt die Transformation der Polarkoordinatendarstellung nach kartesischen Koordinaten. Abschließend liefert eine zweidimensionale inverse Fourier-Transformation die Verteilung der Rückstreukoeffizienten $g(x, y)$. Das Blockschaltbild von Bild 3.20 faßt die einzelnen Schritte des *Polar Format-Algorithmus* zusammen und ist dem der tomographischen Verarbeitung von Bild 3.18 sehr ähnlich.

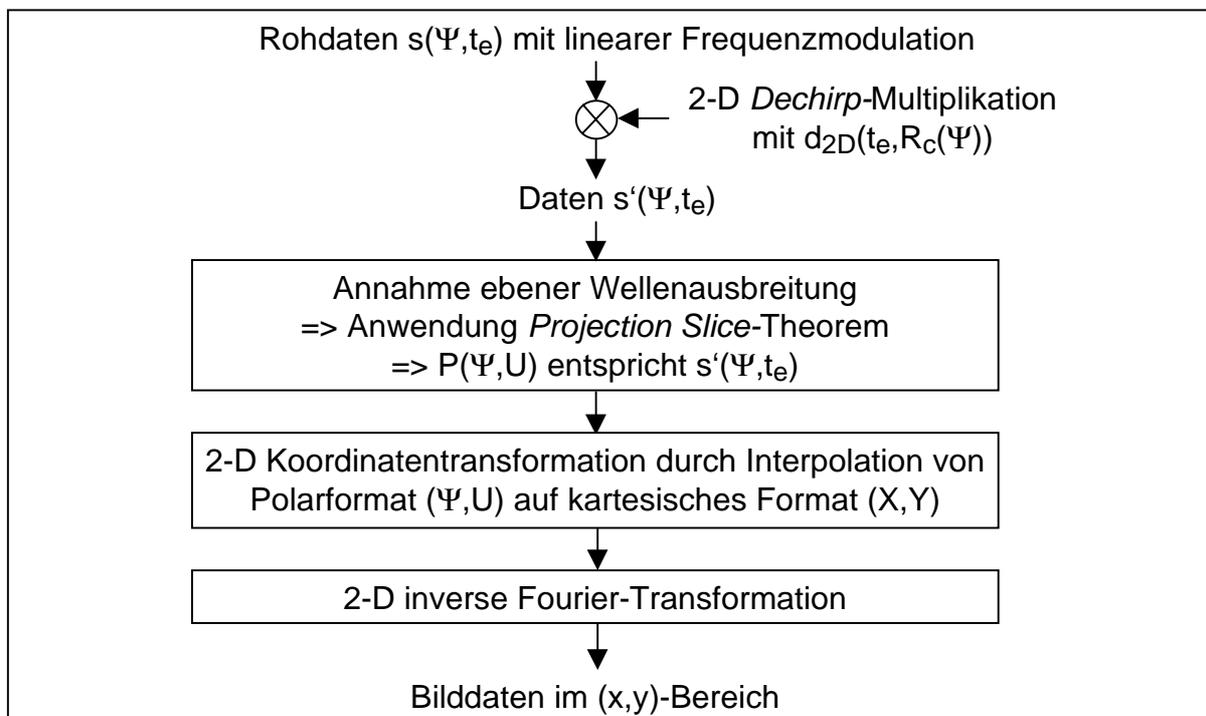


Bild 3.20: Blockschaltbild des Polar Format-Algorithmus

3.3.2.3 Der Convolution Backprojection-Algorithmus

Dieser Algorithmus ist eine andere Implementierung des *Polar Format*-Algorithmus. Mit der Geometrie von Bild 3.17 und Bild 3.19 ergeben sich die in Bild 3.21 gezeigten Polardarstellungen für den Zielbereich (x,y) und den Fourierbereich des Zielbereichs (X,Y).

Für die hier gezeigte Darstellung des *Convolution Backprojection*-Algorithmus wurden die Referenzen [20] [57] [29] und [43] verwendet. Die inverse Fourier-Transformation vom Fourierbereich zum Bildbereich von Gleichung (3.38) kann in Polardarstellung durch die erste Zeile von Gleichung (3.39) ausgedrückt werden.

$$g(x,y) = \frac{1}{4\pi^2} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} G(X,Y) \cdot \exp [j \cdot (x \cdot X + y \cdot Y)] \cdot dX \cdot dY \quad (3.38)$$

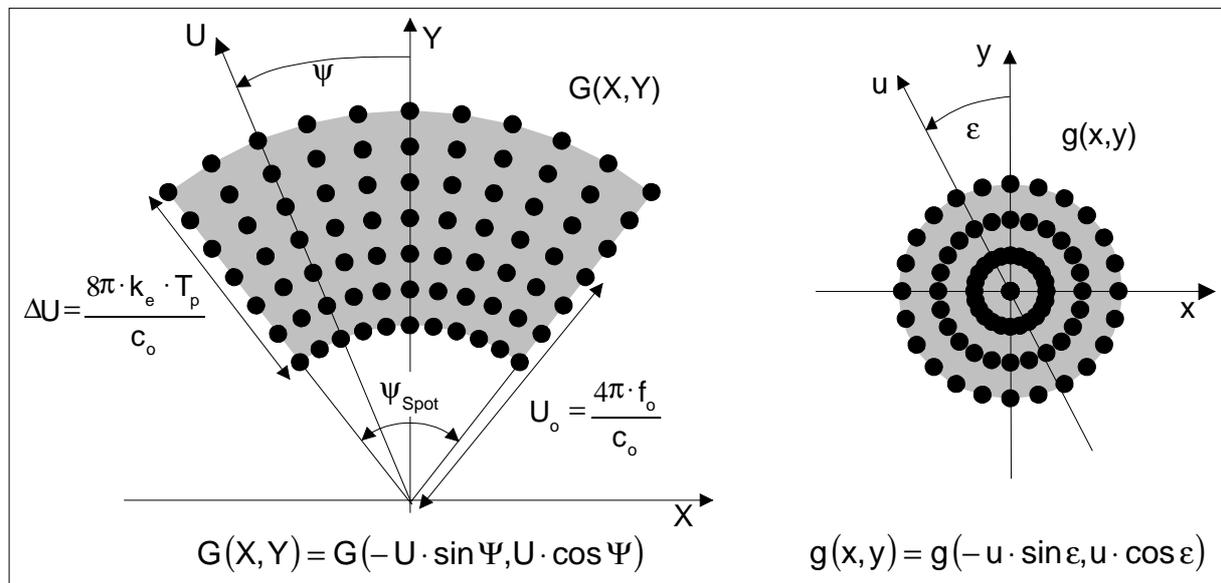


Bild 3.21: Polardarstellungen von Fourierbereich (links) und Zielbereich (rechts) zur Ableitung des Convolution Backprojection-Algorithmus

Bei der Transformation der Integrationsvariablen X und Y in die Polardarstellung ergibt sich die Jaccobi-Matrix zu U. Der Betrag von U wird wegen der symmetrischen Grenzen der Integrationsvariable U geschrieben [29]. Die Grenzen der Integration über Psi sind durch den überstrichenen Squintwinkelbereich Psi_spot gegeben. Laut Gleichung (3.34) ist die Fourier-Transformierte der Projektion, also P(Psi,U) durch das empfangene SAR-Signal mit zweidimensionaler *Dechirp*-Operation gegeben und auf Grund des *Projection Slice*-Theorems kann G(Psi,U) durch P(Psi,U) in der zweiten Zeile von (3.39) ersetzt werden. Um eine nachfolgende inverse Fourier-Transformation ausführen zu können, muß die durch U_o aus Gleichung (3.37) beschriebene

Verschiebung von U ausgeglichen werden. Dadurch ergeben sich die Integrationsgrenzen für das innere Integral und die Rückverschiebung in $P(\Psi, U)$ und in $|U|$. Damit entspricht das innere Integral der inversen Fourier-Transformation in den Variablen U und $u \cdot \cos(\varepsilon - \Psi)$ und somit kann die dritte Zeile von (3.39) geschrieben werden. $\text{IFT}\{ \}$ bezeichnet die inverse Fourier-Transformation.

$$\begin{aligned}
 g(u, \varepsilon) &= \frac{1}{4\pi^2} \cdot \int_{-\frac{\Psi_{\text{spot}}}{2}}^{+\frac{\Psi_{\text{spot}}}{2}} \int_{-\infty}^{\infty} G(\Psi, U) \cdot \exp [j \cdot U \cdot u \cdot (\sin \varepsilon \cdot \sin \Psi + \cos \varepsilon \cdot \cos \Psi)] \cdot |U| \cdot dU \cdot d\Psi \\
 &= \frac{1}{4\pi^2} \cdot \int_{-\frac{\Psi_{\text{spot}}}{2}}^{+\frac{\Psi_{\text{spot}}}{2}} \int_{-\frac{\Delta U}{2}}^{+\frac{\Delta U}{2}} P(\Psi, U + U_o) \cdot \exp [j \cdot U \cdot u \cdot \cos(\varepsilon - \Psi)] \cdot |U + U_o| \cdot dU \cdot d\Psi \\
 &= \frac{1}{4\pi^2} \cdot \int_{-\frac{\Psi_{\text{spot}}}{2}}^{+\frac{\Psi_{\text{spot}}}{2}} \text{IFT}\{ P(\Psi, U + U_o) \cdot |U + U_o| \} \cdot \exp[-j \cdot U_o \cdot u \cdot \cos(\varepsilon - \Psi)] \cdot d\Psi \\
 &= \frac{1}{4\pi^2} \cdot \int_{-\frac{\Psi_{\text{spot}}}{2}}^{+\frac{\Psi_{\text{spot}}}{2}} p'(\Psi, u \cdot \cos(\varepsilon - \Psi)) \cdot \exp[-j \cdot U_o \cdot u \cdot \cos(\varepsilon - \Psi)] \cdot d\Psi \quad (3.39)
 \end{aligned}$$

Das empfangene SAR-Signal mit zweidimensionaler *Dechirp*-Operation entspricht laut Gleichung (3.34) der Fourier-Transformierten der Projektion. Dieses Signal, um U_o verschoben, wird mit einem durch die Übertragungsfunktion $|U|$ beschriebenen und ebenfalls verschobenen Filter multipliziert. In der Tomographie steht die Projektion $p(\Psi, u)$ und nicht die Fourier-Transformierte der Projektion, also $P(\Psi, U)$, zur Verfügung und die Multiplikation mit der Übertragungsfunktion des Filters wird zu einer Faltung mit dessen Impulsantwort. Daher stammt der Ausdruck *Convolution* im Namen des *Convolution Backprojection*-Algorithmus.

In der letzten Zeile von Gleichung (3.39) ist das Ergebnis der inversen Fourier-Transformation des Produkts von $P(\Psi, U)$ und dem Filter mit $p'(\Psi, u \cdot \cos(\varepsilon - \Psi))$ bezeichnet. Vor der abschließenden Aufsummierung über Ψ muß noch eine ein-dimensionale Interpolation entlang der u -Achse durchgeführt werden. Das Ergebnis der Aufsummierung ist eine Rückprojektion (englisch: *Backprojection*) aus dem Fourier-Bereich in den Zielbereich für einen bestimmten Winkel ε . Für viele Winkel ε ergibt sich ein Abbild des Zielbereichs in Polardarstellung, wie in Bild 3.21 rechts gezeigt. Das Blockschaltbild von Bild 3.22 faßt den *Convolution Backprojection*-Algorithmus in den wichtigsten Schritten zusammen.

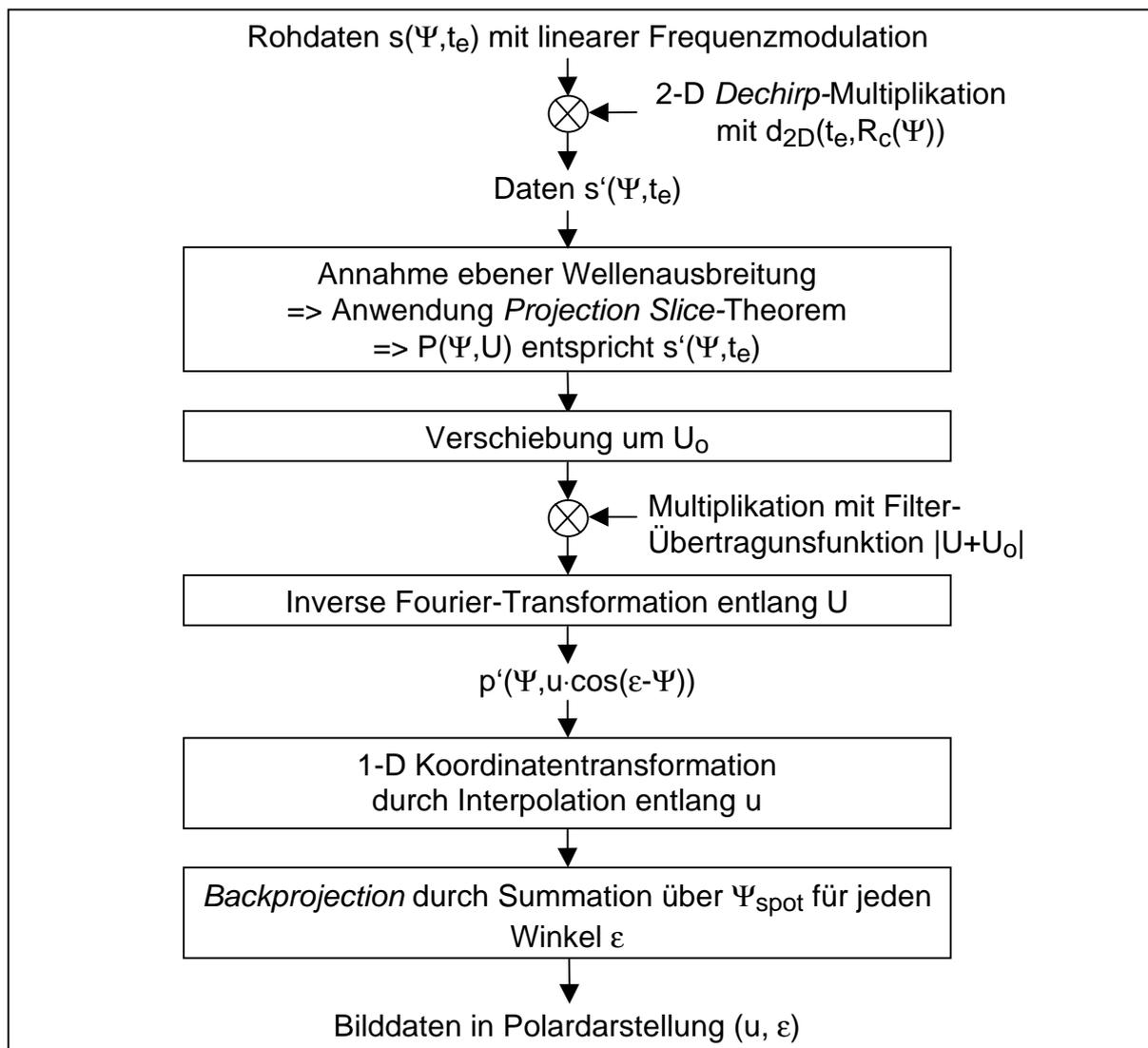


Bild 3.22: Blockschaltbild des Convolution Backprojection-Algorithmus

3.3.3 Vergleich der Algorithmen zur *Spotlight*-Verarbeitung

Die wesentlichen Verarbeitungsschritte der vorgestellten *Spotlight*-Algorithmen sind in Tabelle 3.1 zusammengefaßt. Es sind Rohdaten mit *Dechirp*-Operation in Entfernung oder zweidimensionaler *Dechirp*-Operation angenommen. Die tomographische Verarbeitung ist unabhängig von der Form der Rohdaten, für dieses Verfahren wurden aber auch Rohdaten mit zweidimensionaler *Dechirp*-Operation angenommen. Ein wesentliches Unterscheidungsmerkmal ist die Anzahl der benötigten Interpolationen. Tomographische Verarbeitung und *Polar Format*-Algorithmus benötigen zwei, *Convolution Backprojection*- und *Wavenumber*-Algorithmus je eine und der *Chirp Scaling*-Algorithmus keine Interpolation.

	<i>Wavenumber</i>	<i>Chirp Scaling</i>	Tomogra- phische Verarbeitung	<i>Polar Format</i>	<i>Convolution Backprojection</i>
Rohdaten	<ul style="list-style-type: none"> • <i>Dechirp</i>-Operation in Entfernung 	<ul style="list-style-type: none"> • <i>Dechirp</i>-Operation in Entfernung 	<ul style="list-style-type: none"> • zwei-dimensionale <i>Dechirp</i>-Operation 	<ul style="list-style-type: none"> • zwei-dimensionale <i>Dechirp</i>-Operation 	<ul style="list-style-type: none"> • zwei-dimensionale <i>Dechirp</i>-Operation
Vorverarbeitung	<ul style="list-style-type: none"> • <i>RVP</i>-Korrektur durch FFT, Phasenmultiplikation und IFFT in Entfernung • Erhöhung der Abtastung in Azimut 	<ul style="list-style-type: none"> • Erhöhung der Abtastung in Entfernung • Einfügen linearer Frequenzmodulation • Erhöhung der Abtastung in Azimut 	<ul style="list-style-type: none"> • <i>RVP</i>-Korrektur durch FFT, Phasenmultiplikation und IFFT in Entfernung 	<ul style="list-style-type: none"> • <i>RVP</i>-Korrektur durch FFT, Phasenmultiplikation und IFFT in Entfernung 	<ul style="list-style-type: none"> • <i>RVP</i>-Korrektur durch FFT, Phasenmultiplikation und IFFT in Entfernung
wesentliche Verarbeitungsschritte	<ul style="list-style-type: none"> • FFT in Azimut • 2D Phasenmultiplikation • 1D Interpolation (Stolt) • IFFT in Entfernung • IFFT in Azimut 	<ul style="list-style-type: none"> • FFT in Azimut • <i>Chirp Scaling</i> • 1D FFT in Entfernung • 2D Phasenmultiplikation • 1D IFFT in Entfernung • 2D Phasenmultiplikation • IFFT in Azimut 	<ul style="list-style-type: none"> • FFT in Entfernung • Berechnung der FT der Projection mit Phasenmultiplikation • 2D Interpolation • IFFT in Entfernung • IFFT in Azimut 	<ul style="list-style-type: none"> • 2D Interpolation • IFFT in Entfernung • IFFT in Azimut 	<ul style="list-style-type: none"> • Multiplikation mit 1D Filterfunktion • 1D IFFT in Entfernung • 1D Interpolation • 1D Summation über Squintwinkelbereich
Format Bilddaten	<ul style="list-style-type: none"> • kartesische Abtastwerte 	<ul style="list-style-type: none"> • kartesische Abtastwerte 	<ul style="list-style-type: none"> • kartesische Abtastwerte 	<ul style="list-style-type: none"> • kartesische Abtastwerte 	<ul style="list-style-type: none"> • Abtastwerte in Polarformat

Tabelle 3.1: Verarbeitungsübersicht der untersuchten *Spotlight*-Algorithmen

Die wichtigsten Vor- und Nachteile der untersuchten *Spotlight*-Verfahren sind in Tabelle 3.2 aufgeführt. *Wavenumber*- und *Chirp Scaling*-Algorithmus zeigen eine genauere Verarbeitung, da sie nicht von der Näherung einer planaren Wellenausbreitung ausgehen. Der größte Vorteil des *Chirp Scaling*-Verfahrens ist, daß keinerlei Interpolation benötigt wird. Allerdings ist beim *Chirp Scaling*-Verfahren in der Vorverarbeitung eine Erhöhung der Abtastung in Azimut und Entfernung erforderlich.

	<i>Wavenumber</i>	<i>Chirp Scaling</i>	Tomographische Verarbeitung	<i>Polar Format</i>	<i>Convolution Backprojection</i>
Vorteile	<ul style="list-style-type: none"> • exakte Korrektur Zielentfernungsänderung • exakte Transferfunktion 	<ul style="list-style-type: none"> • genaue Korrektur Zielentfernungsänderung • keine Interpolationen 	<ul style="list-style-type: none"> • weitgehend gleiche Verarbeitung für Rohdaten mit oder ohne <i>Dechirp</i> 	<ul style="list-style-type: none"> • nur Interpolation und 2D FFT 	<ul style="list-style-type: none"> • im Vergleich zu <i>Polar Format</i> nur 1D Interpolation und anstatt Azimut IFFT nur Summation
Nachteile	<ul style="list-style-type: none"> • RVP-Korrektur vor Verarbeitung • Erhöhung der Abtastung in Azimut • 1D Interpolation 	<ul style="list-style-type: none"> • Erhöhung der Abtastung in Azimut • Erhöhung der Abtastung in Entfernung • Einfügen einer linearen FM vor der Verarbeitung 	<ul style="list-style-type: none"> • RVP-Korrektur vor Verarbeitung • Annahme ebener Wellenausbreitung • 2D Interpolation • Bereich guter Fokussierung begrenzt um das Szenenzentrum 	<ul style="list-style-type: none"> • RVP-Korrektur vor Verarbeitung • Annahme ebener Wellenausbreitung • 2D Interpolation • Bereich guter Fokussierung begrenzt um das Szenenzentrum 	<ul style="list-style-type: none"> • RVP-Korrektur vernachlässigt; kann aber wie bei <i>Wavenumber</i> vor Verarbeitung durchgeführt werden • Annahme ebener Wellenausbreitung • 1D Interpolation • Darstellung der prozessierten Bilddaten in Polar-Koordinaten • Bereich guter Fokussierung begrenzt um das Szenenzentrum

Tabelle 3.2: Vor- und Nachteile der untersuchten Spotlight-Algorithmen

Anhand der zwei Beispiel-Parametersätze von Tabelle 3.3 werden nachfolgend der *Polar Format*-Algorithmus, der *Wavenumber*-Algorithmus und der *Chirp Scaling*-Algorithmus miteinander verglichen. Der Vergleich beschränkt sich auf diese Algorithmen, da die tomographische Verarbeitung und der *Convolution Backprojektion*-Algorithmus als andere Implementierungen des *Polar Format*-Algorithmus verstanden werden können und somit ähnlichen Beschränkungen unterliegen. Es gibt auch genauere Implementierungen der tomographischen Verarbeitung und des *Convolution Backprojektion*-Algorithmus, welche aber auf Grund des hohen Berechnungsaufwandes für SAR nicht eingesetzt werden. Der *Wavenumber*-Algorithmus wird auf Grund der Anwendung der idealen SAR-Transferfunktion [1] als fehlerfrei betrachtet.

Für den *Polar Format*-Algorithmus wird eine Vorverarbeitung zur vollständigen Korrektur des RVP-Ausdrucks angenommen, auch wenn diese sehr aufwendig ist [10]. Die Anwendung des Prinzips der stationären Phase für den *Chirp Scaling*- und den *Wavenumber*-Algorithmus wird als fehlerfrei betrachtet, da *Spotlight*-Daten in der Praxis immer ein sehr hohes Zeit-Bandbreite-Produkt aufweisen. Die fehlerfreie Anwendung des Prinzips der stationären Phase wird später auch bei der Ableitung des Frequenz-Skalierungs-Verfahrens mit der gleichen Begründung angenommen. Zusätzliche Fehler auf Grund der Interpolationen bei allen Algorithmen mit Ausnahme des *Chirp Scaling*-Algorithmus werden nicht berücksichtigt, da die Interpolationsgenauigkeit sehr stark von der Implementierung abhängt, die sehr unterschiedlich sein kann. In der Praxis treten aber immer Ungenauigkeiten auf Grund von Interpolationen auf.

Beispiel-Parametersatz	Flugzeug-SAR	Satelliten-SAR
Entfernung Szenenzentrum r_c	4000 m	800 km
mittlerer Squintwinkel Ψ_m	0°	0°
Azimutauflösung ρ_a	0.3 m	1 m
Entfernungsauflösung ρ_e	0.3 m	1 m
Geschwindigkeit V	70 m/s	6700 m/s
Wellenlänge λ	0.03 m	0.03 m
Faktor aus Gewichtung zur Nebenzipfelunterdrückung in Azimut k_{ga} und Entfernung k_{ge}	0.89	0.89
Entfernungsbandbreite	445 MHz	133.5 MHz
Variation des Squintwinkels	2.55°	0.765°

Tabelle 3.3: Beispiel-Parameter zum Algorithmenvergleich

Die Entfernungsbandbreite und die Variation des Squintwinkels in Tabelle 3.3 korrespondieren zu den Auflösungen in Entfernung und Azimut. Die Berechnung ist in Anhang B dargestellt.

Das Vergleichskriterium ist die maximale Szenenausdehnung für einen Phasenfehler kleiner $\pi/2$ am Rand des verarbeiteten Spektrums. Die sich daraus ergebenden maximalen Szenenausdehnungen sind in Tabelle 3.4 gezeigt. Die Formel für den *Polar Format*-Algorithmus [10] berücksichtigt die Fehler wegen der nicht vollständigen Korrektur der Zielentfernungsänderung, welche auf die Näherung durch eine ebene Welle zurückgeführt werden können.

Die Berechnung der maximalen Szenengröße beim *Chirp Scaling*-Algorithmus mit den Formeln der beiden Phasenfehler von Tabelle 3.4 ist in Anhang B dargestellt. Dabei ist $\Phi_{err,Taylor}$ der Phasenfehler auf Grund der nach dem quadratischen Glied abgebrochenen Taylor-Approximation des zweidimensionalen Spektrums [1] [64] [67]. Der zweite Phasenfehler entsteht durch die Näherung bei der sekundären Entfernungskompression, welche nur für eine Referenzentfernung und nicht für alle Punktzielentfernungen angepaßt durchgeführt wird.

Szenengröße für Phasenfehler kleiner $\pi/2$ am Rand der prozessierten Bandbreite			
Algo- rithmus	Grundlegende Formeln zur Berechnung maximalen Szenengröße	Flug- zeug- SAR	Sa- telliten -SAR
<i>Polar Format</i>	$r_{rad} \leq \frac{2 \cdot \rho_a}{k_{ga}} \cdot \sqrt{\frac{r_c}{\lambda \cdot \cos(\Psi_m)}}$	Radius $r_{rad} =$ 246m	Radius $r_{rad} =$ 3481 m
<i>Wave- number</i>	keine Beschränkung der Szenengröße auf Grund des Algorithmus bei Annahme einer fehlerfreien Interpolation		
<i>Chirp Scaling</i>	$\Phi_{err,Taylor}(f_a, f_e) = \frac{4\pi \cdot r_o}{\lambda} \left[\sqrt{\left(\frac{f_e \cdot \lambda}{c_o} + 1\right)^2 - \left(\frac{f_a \cdot \lambda}{2 \cdot V}\right)^2} - \left(\beta + \frac{f_e \cdot \lambda}{c_o \cdot \beta} + \frac{\beta^2 - 1}{2 \cdot \beta^3} \cdot \frac{f_e^2 \cdot \lambda^2}{c_o^2}\right) \right]$ mit $\beta = \sqrt{1 - \left(\frac{f_a \cdot \lambda}{2 \cdot V}\right)^2}$ Phasenfehler wegen Taylor-Approximation (siehe Anhang B)	4438 m in Azimut	754 km in Azimut
	$\Phi_{err,SRC}(f_a, f_e) = 2\pi \cdot \frac{\beta^2 - 1}{\beta^3} \cdot \frac{\lambda}{c_o^2} \cdot (r_c - r_o) \cdot f_e^2$ Phasenfehler in sekundärer Entfernungskompression (siehe Anhang B)	970 m x 970 m	72 km x 72 km

Tabelle 3.4: Maximale Szenengröße bei verschiedenen Spotlight-Algorithmen

Auf Grund der wesentlich höheren Genauigkeit kann der *Chirp Scaling*-Algorithmus für bessere Auflösungen und für wesentlich größere Szenen als der *Polar Format*-Algorithmus eingesetzt werden. In den nachfolgenden Kapiteln wird gezeigt, daß das dort entwickelte Frequenz-Skalierungs-Verfahren die Genauigkeit des *Chirp Scaling*-Algorithmus erreicht, aber nicht die Nachteile dieses Verfahrens für *Spotlight*-SAR aufweist, wie die Erhöhung der Abtastung in Azimut und Entfernung sowie das Einfügen einer linearen Frequenzmodulation in Entfernung vor der eigentlichen Verarbeitung.

4 GENAUE MODELLIERUNG DER SPOTLIGHT-GEOMETRIE UND -ROHDATEN

In diesem Kapitel wird die für die Entwicklung des Frequenz-Skalierungs-Verfahrens benötigte Abbildungsgeometrie modelliert. Aus dieser Modellierung werden wichtige Kenngrößen, wie zum Beispiel der gültige und der beleuchtete Zielbereich, abgeleitet. Für die Prozessierung wichtige Bandbreiten werden definiert. Die *Dechirp on Receive*-Operation in Entfernung wird untersucht und ein analytischer Ausdruck für die Rohdaten eines Punktziels mit *Dechirp on Receive*-Operation in Entfernung abgeleitet. Dieser Ausdruck stellt den Ausgangspunkt für das Frequenz-Skalierungs-Verfahren in Kapitel 5 dar.

4.1 Modellierung der Beleuchtungsgeometrie

Die in diesem Kapitel eingeführte Modellierung der Beleuchtungsgeometrie geht von folgenden, die *Spotlight*-Geometrie betreffenden Definitionen aus:

- Die Antenne wird in Azimutrichtung dem Szenenzentrum nachgeführt. Es wird vom Idealfall ausgegangen, daß sich das Szenenzentrum immer in der Hauptstrahlrichtung der Antenne befindet.
- Der Squintwinkel Ψ ist definiert als der Winkel zwischen der Senkrechten zur Flugrichtung und der Hauptstrahlrichtung der Antenne in Azimut.
- Die abgebildete Szene ist komplett bestimmt durch den Squintwinkel am Anfang der Beleuchtung Ψ_{start} , den Squintwinkel am Ende der Beleuchtung Ψ_{ende} , durch die Position des Szenenzentrums und durch den Öffnungswinkel in Azimut θ_a . Anstatt von Ψ_{start} und Ψ_{ende} kann auch der Startzeitpunkt $t_{a,\text{start}}$ und Endzeitpunkt $t_{a,\text{ende}}$ der *Spotlight*-Beleuchtung verwendet werden.
- Das Szenenzentrum legt den Ursprung der Azimutzeit $t_a=0\text{s}$ fest und befindet sich definitionsgemäß bei der Schrägentfernung r_c .

In Bild 4.1 ist die Definition der Beleuchtungsgeometrie dargestellt. Die Squintwinkel Ψ_{start} und Ψ_{ende} markieren Start und Ende der Datenaufzeichnung. Mit der Entfernung des Szenenzentrums r_c ergeben sich Startzeitpunkt $t_{a,\text{start}}$ und Endzeitpunkt $t_{a,\text{ende}}$ der Beleuchtung zu den Gleichungen (4.1) und (4.2). Die Länge der synthetischen *Spotlight*-Apertur T_{spot} in (4.3) entspricht der Zeitdifferenz zwischen Start- und Endzeitpunkt.

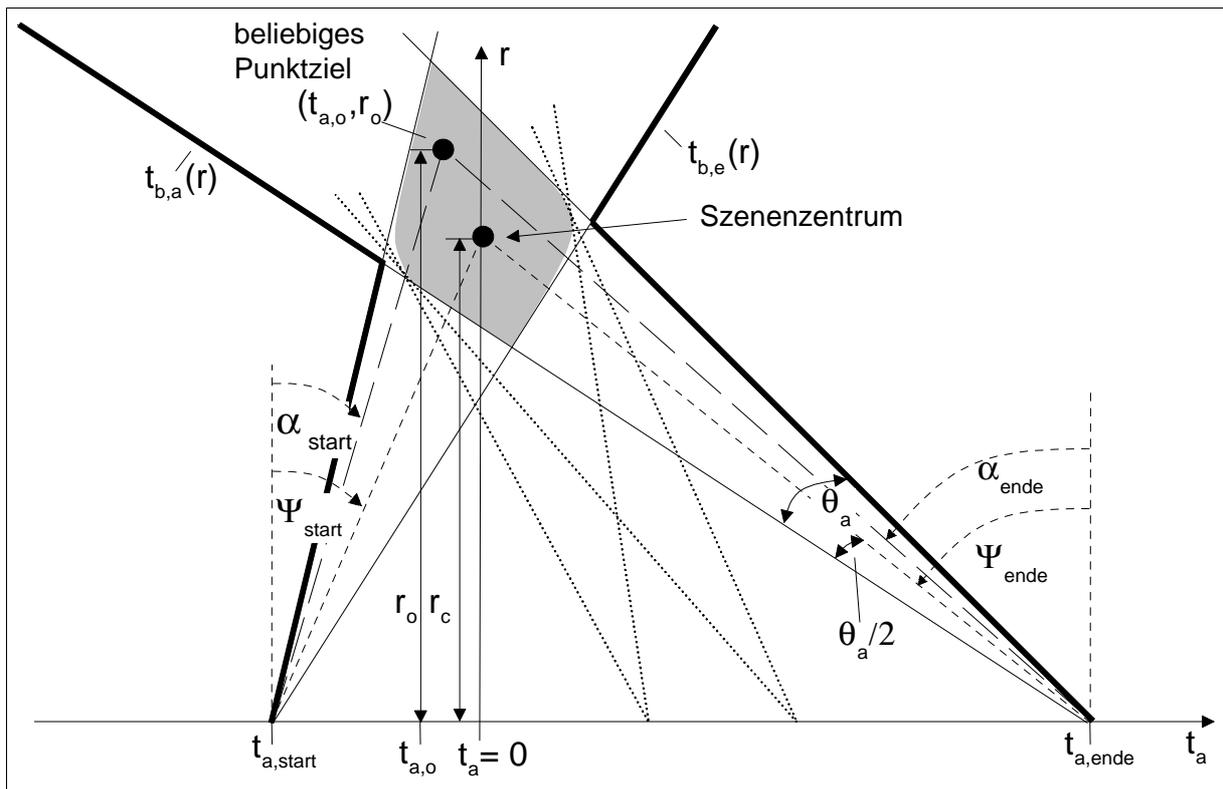


Bild 4.1: Definition der Spotlight-Beleuchtungsgeometrie durch Anfang und Ende der Beleuchtung, die Lage des Szenezentrums und den Azimutöffnungswinkel

$$t_{a,start} = \frac{r_c}{V} \tan(\Psi_{start}) \quad (4.1)$$

$$t_{a,ende} = \frac{r_c}{V} \tan(\Psi_{ende}) \quad (4.2)$$

$$T_{Spot} = t_{a,ende} - t_{a,start} \quad (4.3)$$

4.1.1 Die Augenblicksbandbreite

Die Augenblicksbandbreite B_{IFOV} (englisch: Instantaneous **F**ield **O**f **V**iew) ist die Bandbreite in Azimut, welche zu einem bestimmten Augenblick der Beleuchtung auftritt. Sie korrespondiert zur gültigen Azimutausdehnung einer Szene und ist hauptsächlich vom Öffnungswinkel der realen Apertur abhängig; für höhere Squintwinkel aber auch vom Squintwinkel. Die Augenblicksbandbreite muß bei der Datenaufzeichnung durch eine genügend hohe PRF ausreichend abgetastet sein.

Für ein beliebiges Ziel an der Position $(t_{a,o}, r_o)$ ist der Augenblicksabstand in Azimut $t_{a,dist}$ zwischen der Antenne und einem Punktziel laut Gleichung (4.4) gegeben durch den Blickwinkel α , unter dem die Antenne das Ziel sieht. Im Gegensatz zu α bezieht sich der Squintwinkel Ψ auf die Hauptstrahlrichtung der Antenne.

$$t_{a,dist} = \frac{r_o}{V} \tan(\alpha) \quad (4.4)$$

Die zum Augenblicksabstand $t_{a,dist}$ korrespondierende Augenblicksfrequenz f_a ist nur vom Blickwinkel α abhängig. Dabei werden die Geschwindigkeit V und die Wellenlänge λ als konstante Systemparameter angesehen. In (4.5) ist der Zusammenhang zwischen Azimutzeit und -frequenz aus Gleichung (2.15) verwendet.

$$f_a(\alpha) = \frac{-2 \cdot V^2}{\lambda \cdot r_o} \cdot \frac{t_{a,dist}}{\sqrt{1 + \frac{V^2 \cdot t_{a,dist}^2}{r_o^2}}} = \frac{-2 \cdot V}{\lambda} \cdot \frac{\tan(\alpha)}{\sqrt{1 + \tan^2(\alpha)}} = \frac{-2 \cdot V}{\lambda} \cdot \sin(\alpha) \quad (4.5)$$

Aus Bild 4.1 geht hervor, daß minimale und maximale Augenblicksfrequenz für Blickwinkel gleich dem augenblicklichen Squintwinkel \pm dem halben Öffnungswinkel auftreten. Die Augenblicksbandbreite B_{IFOV} ist damit eine Funktion von augenblicklichem Squintwinkel Ψ und Azimut-Öffnungswinkel der realen Apertur θ_a .

$$B_{IFOV} = \frac{2 \cdot V}{\lambda} \cdot \left(\sin\left(\Psi + \frac{\theta_a}{2}\right) - \sin\left(\Psi - \frac{\theta_a}{2}\right) \right) \quad (4.6)$$

4.1.2 Die *Spotlight*-Bandbreite

Mit *Spotlight*-Bandbreite B_{spot} ist die zur Azimutauflösung eines Punktziels korrespondierende Bandbreite bezeichnet. Sie ist eine Folge der Variation des Blickwinkels α während des Vorbeiflugs des Trägers am Ziel.

Der Blickwinkel α_{ende} zum Zeitpunkt $t_{a,ende}$ für ein Ziel an der Position $(t_{a,o}, r_o)$ bestimmt laut Gleichung (4.5) die Augenblicksfrequenz des Punktziels zum Zeitpunkt $t_{a,ende}$. Der Winkel α_{ende} kann aus der in Bild 4.1 gezeigten Geometrie laut Gleichung (4.7) berechnet werden. Gleichung (4.8) zeigt analog dazu die Berechnung des Winkels α_{start} .

$$\tan(\alpha_{ende}) = \frac{(t_{a,ende} - t_{a,o}) \cdot V}{r_o} \quad (4.7)$$

$$\tan(\alpha_{start}) = \frac{(t_{a,start} - t_{a,o}) \cdot V}{r_o} \quad (4.8)$$

Damit kann die Augenblicksfrequenz am Anfang $f_{a,start}$ und am Ende $f_{a,ende}$ der Beleuchtung für ein Ziel an der Position $(t_{a,o}, r_o)$ mit den Gleichungen (4.9) und (4.10) berechnet werden. Die *Spotlight*-Bandbreite B_{spot} in Gleichung (4.11) ergibt sich aus der Differenz der Augenblicksfrequenz am Anfang und Ende der Beleuchtung.

$$\begin{aligned} f_{a,start}(t_{a,o}, r_o) &= \frac{-2 \cdot V}{\lambda} \cdot \sin(\alpha_{start}) \\ &= \frac{-2 \cdot V}{\lambda} \cdot \frac{\tan(\alpha_{start})}{\sqrt{1 + \tan^2(\alpha_{start})}} = \frac{-2 \cdot V^2}{\lambda} \cdot \frac{t_{a,start} - t_{a,o}}{\sqrt{r_o^2 + V^2 \cdot (t_{a,start} - t_{a,o})^2}} \end{aligned} \quad (4.9)$$

$$\begin{aligned} f_{a,ende}(t_{a,o}, r_o) &= \frac{-2 \cdot V}{\lambda} \cdot \sin(\alpha_{ende}) \\ &= \frac{-2 \cdot V}{\lambda} \cdot \frac{\tan(\alpha_{ende})}{\sqrt{1 + \tan^2(\alpha_{ende})}} = \frac{-2 \cdot V^2}{\lambda} \cdot \frac{t_{a,ende} - t_{a,o}}{\sqrt{r_o^2 + V^2 \cdot (t_{a,ende} - t_{a,o})^2}} \end{aligned} \quad (4.10)$$

$$\begin{aligned} B_{spot}(t_{a,o}, r_o) &= f_{a,start}(t_{a,o}, r_o) - f_{a,ende}(t_{a,o}, r_o) \\ &= -\frac{2 \cdot V^2}{\lambda} \cdot \left(\frac{t_{a,start} - t_{a,o}}{\sqrt{r_o^2 + V^2 \cdot (t_{a,start} - t_{a,o})^2}} - \frac{t_{a,ende} - t_{a,o}}{\sqrt{r_o^2 + V^2 \cdot (t_{a,ende} - t_{a,o})^2}} \right) \end{aligned} \quad (4.11)$$

4.1.3 Gültiger Zielbereich

Der Bereich gültiger Ziele wird definiert als die Menge der Ziele, welche von der kompletten *Spotlight*-Apertur, also während der gesamten *Spotlight*-Datenaufzeichnung beleuchtet wird. Nicht vollständig beleuchtete Ziele zeigen eine mit zunehmendem Azimutabstand vom gültigen Bereich rasch abnehmende *Spotlight*-Bandbreite und damit eine schlechtere Azimutauflösung. In Bild 4.1 ist der gültige Bereich grau dargestellt. Die Zeitpunkte $t_{v,a}$ und $t_{v,e}$ in Gleichung (4.12) begrenzen den gültigen Bereich und sind entfernungsabhängig.

$$\begin{aligned} t_{v,a}(r_o) &= \max \left[-\frac{r_o}{V} \cdot \tan \left(\Psi + \frac{\theta_a}{2} \right) + \frac{r_c}{V} \tan(\Psi) \right] \\ t_{v,e}(r_o) &= \min \left[-\frac{r_o}{V} \cdot \tan \left(\Psi - \frac{\theta_a}{2} \right) + \frac{r_c}{V} \tan(\Psi) \right] \\ \text{mit } \Psi_{start} &\leq \Psi \leq \Psi_{ende} \quad \text{und} \quad t_{v,a}(r_o) \leq t_{v,e}(r_o) \end{aligned} \quad (4.12)$$

Die Azimutzeitpositionen in der eckigen Klammer der ersten Zeile von Gleichung (4.12) beschreiben Schnittpunkte, welche sich in Bild 4.1 zwischen der linken Begrenzung der Antennenbeleuchtung und einer gedachten horizontalen Linie bei einer Entfernung r_o ergeben. Für jeden augenblicklichen Squintwinkel ergibt sich ein Schnittpunkt und $t_{v,a}(r_o)$ ist das Maximum aller dieser Schnittpunkte. In Bild 4.1 stellen die Zeitpunkte $t_{v,a}(r)$ die linke Grenze des grauen gültigen Bereichs dar. Analog dazu bilden die Zeitpunkte $t_{v,e}(r)$ die rechte Grenze des gültigen Bereichs.

4.1.4 Bereich beleuchteter Ziele

Der Bereich aller, auch nur teilweise beleuchteter Ziele wird begrenzt durch die Zeitpunkte $t_{b,a}(r)$ und $t_{b,e}(r)$. Für eine Entfernung r_o können diese Zeitpunkte durch die Gleichungen (4.13) und (4.14) beschrieben werden. Der Bereich aller beleuchteten Ziele wird später für die *Azimut-Skalierung* benötigt.

$$t_{b,a}(r_o) = \min \left[-\frac{r_o}{V} \cdot \tan \left(\Psi_{\text{start}} + \frac{\theta_a}{2} \right) + t_{a,\text{start}} ; -\frac{r_o}{V} \cdot \tan \left(\Psi_{\text{ende}} + \frac{\theta_a}{2} \right) + t_{a,\text{ende}} \right] \quad (4.13)$$

$$t_{b,e}(r_o) = \max \left[-\frac{r_o}{V} \cdot \tan \left(\Psi_{\text{start}} - \frac{\theta_a}{2} \right) + t_{a,\text{start}} ; -\frac{r_o}{V} \cdot \tan \left(\Psi_{\text{ende}} - \frac{\theta_a}{2} \right) + t_{a,\text{ende}} \right] \quad (4.14)$$

In Bild 4.1 sind die Zeitpunkte $t_{b,a}(r)$ bzw. $t_{b,e}(r)$ durch den linken bzw. rechten fetten Linienzug dargestellt. Wie im Bild zu erkennen ist, brauchen für die Berechnung des Bereichs aller beleuchteten Ziele nur der minimale und der maximale Squintwinkel am Anfang und am Ende der *Spotlight*-Apertur betrachtet werden.

Bild 4.2 zeigt ein Simulationsbeispiel zum gültigen und beleuchteten Bereich. Die Parameter Squintwinkel am Anfang und Squintwinkel am Ende liegen sehr weit auseinander. Auch die Entfernungsvariation zwischen Nah- und Fernbereich ist sehr groß gewählt, um ein anschauliches Beispiel zu erzeugen. Der gültige Bereich liegt zwischen den durchgezogenen Linien $t_{v,a}$ und $t_{v,e}$. Der beleuchtete Bereich befindet sich zwischen den gestrichelten Linien $t_{b,a}$ und $t_{b,e}$.

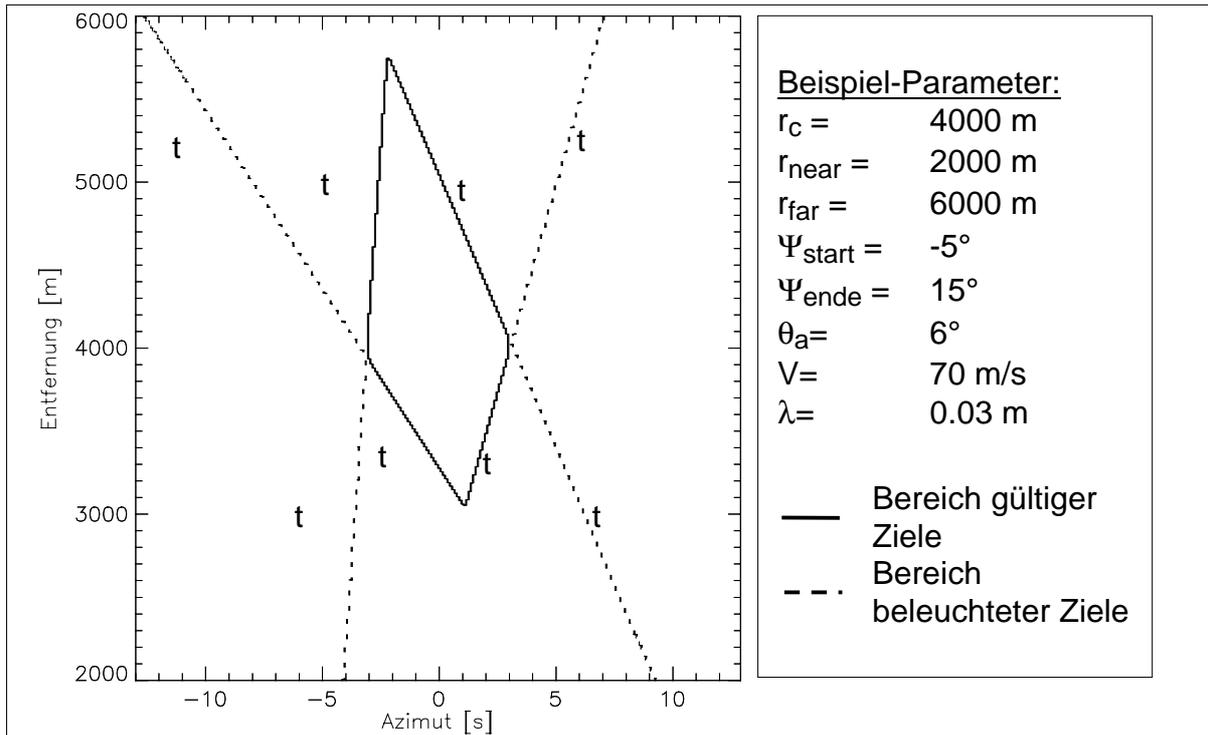


Bild 4.2: Simulation zu den Bereichen gültiger und beleuchteter Ziele (links) mit den verwendeten Simulationsparametern (rechts)

4.1.5 Durch Beleuchtungsgeometrie erzeugte Azimutmodulation

Bild 4.3 zeigt in der unteren Hälfte beispielhaft die Azimutsignale von drei Punktzielen im Fernbereich (A), bei der Entfernung des Szenenzentrums (B) und im Nahbereich (C). Alle drei Punktziele befinden sich an der Azimutposition $t_a=0$ s. Damit stellt das Ziel B das Szenenzentrum dar. Die dazugehörige Abbildungsgeometrie ist in der oberen Bildhälfte gezeigt.

Die *Spotlight*-Apertur ist für alle Entfernungen gleich lang. Die Variable t_c bezeichnet die Verschiebung der Mitte der *Spotlight*-Apertur gegenüber Phasenzentren von Azimutsignalen von Punktzielen bei $t_a = 0$ s. Mit Gleichung (4.15) kann t_c aus dem Start- und dem Endzeitpunkt der Beleuchtung berechnet werden. Zum Zeitpunkt t_c korrespondiert in Bild 4.3 ein Squintwinkel Ψ_c .

$$t_c = \frac{t_{a,start} + t_{a,ende}}{2} \tag{ 4.15 }$$

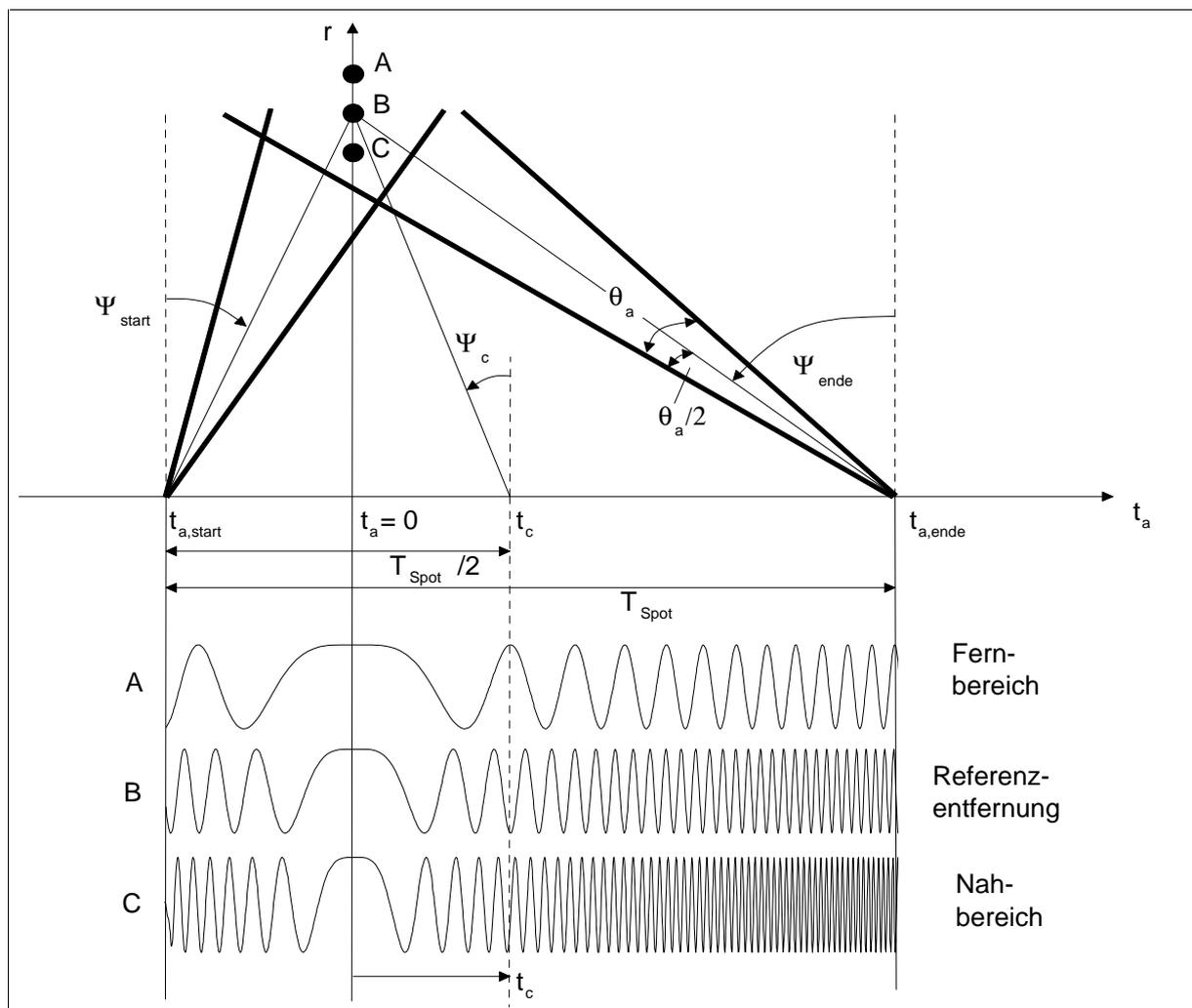


Bild 4.3: Beispiel zur Azimutmodulation mit drei Punktzielen: Positionierung und Beleuchtung der Punktziele (oben) und Azimutsignale der Punktziele (unten)

4.2 Modellierung der Rohdaten eines Punktziels

Für den Fall einer geraden Flugbahn des Trägers und ohne *Dechirp*-Operation lassen sich die SAR-Rohdaten eines Punktziels im *Spotlight*-Modus durch die gleichen Phasenfunktionen wie SAR-Rohdaten im *Stripmap*-Modus von Gleichung (2.30) in Kapitel 2.7 beschreiben. In Gleichung (4.16) ist diese Beschreibung in Abhängigkeit von der Azimutzeit t_a und der Entfernungszeit t_e für ein Punktziel in der Entfernung r_0 und an der Azimutzeitposition $t_a = 0$ s gegeben.

In der Gleichung stellt C eine komplexe Konstante dar. Die Entfernung r_0 ist die Entfernung zwischen Träger und Ziel für den Moment, in dem sich das Ziel genau senkrecht zum Flugpfad befindet. Die Ausdrücke für die Hüllkurve des gesendeten Radarimpulses und das Antennendiagramm in Azimut sind durch die beiden

Rechteckfunktionen angenähert. Mit k_e ist die Modulationsrate des linear frequenzmodulierten Radarimpulses, mit c_o die Lichtgeschwindigkeit und mit λ die Wellenlänge bezeichnet. Der Ausdruck $r(t_a, r_o)$ beschreibt die Entfernungsvariation zwischen Antenne und Punktziel beim Vorbeiflug des Trägers aus Gleichung (2.10).

$$s(t_a, t_e, r_o) = C \cdot \text{rect} \left[\frac{t_e - \frac{2 \cdot r(t_a, r_o)}{c_o}}{T_p} \right] \cdot \text{rect} \left[\frac{t_a - \frac{t_{a, \text{start}} + t_{a, \text{ende}}}{2}}{T_{\text{Spot}}} \right] \quad (4.16)$$

$$\cdot \exp \left[j \cdot \pi \cdot k_e \cdot \left(t_e - \frac{2 \cdot r(t_a, r_o)}{c_o} \right)^2 \right] \cdot \exp \left[-j \frac{4\pi}{\lambda} r(t_a, r_o) \right] \quad \text{mit } T_{\text{Spot}} = t_{a, \text{ende}} - t_{a, \text{start}}$$

Der erste Exponentialausdruck in (4.16) stellt die Entfernungsmodulation dar. Die Doppler- oder Azimutmodulation ist mit dem zweiten Exponentialausdruck beschrieben. Die Länge der *Spotlight*-Apertur T_{Spot} wurde in Gleichung (4.3) definiert.

4.3 Die *Dechirp on Receive*-Operation in Entfernung

Im *Spotlight*-Modus bewirkt das Nachführen der Antenne eine hohe Azimutauflösung. Um in Entfernungsrichtung eine ebenso hohe Auflösung zu erhalten, wird ein linear frequenzmoduliertes Radarsignal mit sehr hoher Bandbreite ausgesendet. Um die Signalverarbeitung, insbesondere die Anforderungen an die A/D-Wandlung, zu reduzieren, wird häufig ein Ausgleich der *Chirp*-Modulation beim Empfang durchgeführt [10], welcher als *Dechirp on Receive*-Operation bezeichnet wird.

Die empfangenen Echos werden vor der A/D-Wandlung mit einem linear frequenzmodulierten, um das Szenenzentrum zentrierten Signal mit der invertierten Modulationsrate des ausgesendeten Signals multipliziert. Daraus resultiert eine Überlagerung von sinusförmigen Signalen mit Frequenzen, welche linear von der Entfernungsdifferenz zwischen Punktziel und Zentrum abhängen. Die Bandbreite dieses Signals ist wesentlich geringer als die Bandbreite der empfangenen Echos für den Fall einer geringen Ausdehnung der Szene in Entfernungsrichtung. Die *Dechirp*-Operation in Entfernung beim Empfang ist in Bild 4.4 gezeigt.

Die Achsen sind mit Entfernungszeit t_e und Entfernungsfrequenz f_e bezeichnet. Die Signale von Zielen im Nahbereich (A), von Zielen bei der Entfernung des Szenenzentrums (B) und von Zielen im Fernbereich (C) besitzen die Modulationsrate k_e , während die *Dechirp*-Funktion die Modulationsrate $-k_e$ besitzt.

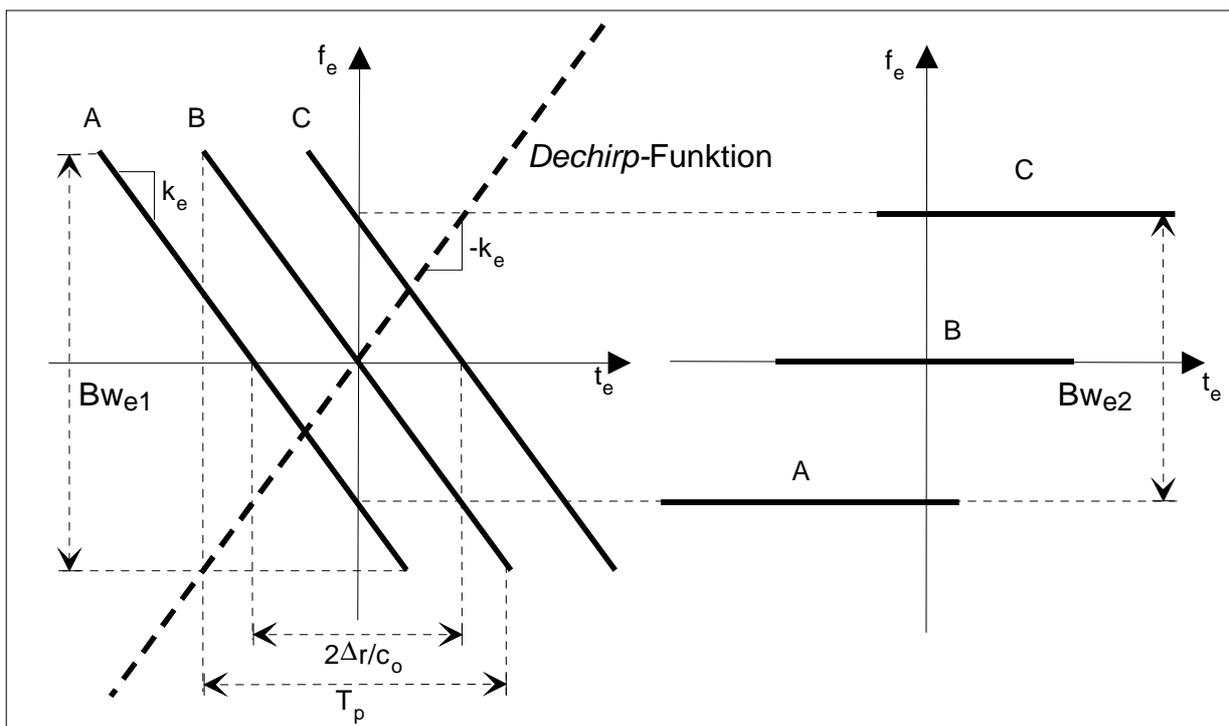


Bild 4.4: Dechirp-Operation in Entfernung beim Empfang: Signale von drei Punktzielen A, B und C vor (links) und nach (rechts) der Multiplikation mit der gestrichelt gezeichneten Dechirp-Funktion

Die reduzierte Bandbreite Bw_{e2} in Gleichung (4.17), welche sich nach der *Dechirp*-Operation ergibt, ist von der Entfernungsausdehnung der Szene Δr , der Pulsdauer T_p und der Bandbreite des ausgesendeten Signals Bw_{e1} abhängig.

$$Bw_{e2} = Bw_{e1} \frac{2 \cdot \Delta r}{c_0 \cdot T_p} \quad (4.17)$$

Eine Reduktion der Bandbreite wird erreicht, wenn T_p länger als die zeitliche Ausdehnung der Szene in Schrägentfernung ist. Für eine Szenenausdehnung von 1000 m, eine Entfernungsauflösung von 0.3 m und eine Modulationsrate von $2 \cdot 10^{13} \text{ s}^{-2}$ ergibt sich zum Beispiel eine Reduktion der Bandbreite von 500 MHz zu 133 MHz.

4.4 Signal nach *Dechirp*-Operation in Entfernung

Das *Dechirp*-Signal ist in Gleichung (4.18) im Basisband um die Entfernung r_{ref} zentriert beschrieben. Die Referenzentfernung r_{ref} für die *Dechirp*-Operation ist sinnvollerweise gleich der Entfernung des Szenenzentrums r_c , wird zur Unterscheidung im weiteren aber mit r_{ref} bezeichnet. Nach der Mischung des Signals $s(t_a, t_e, r_o)$ aus Gleichung (4.16) mit dem Demodulationssignal aus (4.18) und dem Herunterschieben in das Basisband lässt sich das Signal eines Punktziels durch (4.19) beschreiben.

$$H_D(t_e, r_o) = \exp \left[-j \cdot \pi \cdot k_e \cdot \left(t_e - \frac{2 \cdot r_{\text{ref}}}{c_o} \right)^2 \right] \quad \text{mit } r_{\text{ref}} = r_c \quad (4.18)$$

In Gleichung (4.19) sind zwei Darstellungen für das Signal eines Punktziels mit *Dechirp*-Operation in Entfernung gegeben, welche sich nur durch die Schreibweise unterscheiden. Der zweite Exponentialausdruck in der unteren Darstellung von (4.19) ist der *Residual Video Phase*-Term (RVP-Term) [10]. Er beschreibt die durch die *Dechirp*-Operation auftretende Zeitverschiebung der Entfernungssignale in Entfernungsrichtung, welche in Bild 4.4 auf der rechten Seite angedeutet ist.

$$\begin{aligned} s(t_a, t_e, r_o) &= C \cdot \text{rect} \left[\frac{t_e - \frac{2 \cdot r(t_a, r_o)}{c_o}}{T_p} \right] \cdot \text{rect} \left[\frac{t_a - \frac{t_{a,\text{start}} + t_{a,\text{ende}}}{2}}{T_{\text{Spot}}} \right] \\ &\cdot \exp \left[-j \cdot \frac{4\pi \cdot k_e}{c_o} \cdot (r(t_a, r_o) - r_{\text{ref}}) \cdot t_e \right] \cdot \exp \left[j \cdot \frac{4\pi \cdot k_e}{c_o^2} \cdot (r^2(t_a, r_o) - r_{\text{ref}}^2) \right] \\ &\cdot \exp \left[-j \frac{4\pi}{\lambda} r(t_a, r_o) \right] \\ &= C \cdot \text{rect} \left[\frac{t_e - \frac{2 \cdot r(t_a, r_o)}{c_o}}{T_p} \right] \cdot \text{rect} \left[\frac{t_a - \frac{t_{a,\text{start}} + t_{a,\text{ende}}}{2}}{T_{\text{Spot}}} \right] \\ &\cdot \exp \left[-j \cdot \frac{4\pi \cdot k_e}{c_o} (r(t_a, r_o) - r_{\text{ref}}) \cdot \left(t_e - \frac{2 \cdot r_{\text{ref}}}{c_o} \right) \right] \cdot \exp \left[j \cdot \frac{4\pi \cdot k_e}{c_o^2} (r(t_a, r_o) - r_{\text{ref}})^2 \right] \\ &\cdot \exp \left[-j \frac{4\pi}{\lambda} r(t_a, r_o) \right] \end{aligned} \quad (4.19)$$

5 EIN NEUES VERFAHREN ZUR VERARBEITUNG VON *SPOTLIGHT-SAR*-DATEN

Mit dem *Extended Chirp Scaling*-Verfahren für *Stripmap* aus Kapitel 3.1.3 und dem *Extended Chirp Scaling*-Verfahren für *ScanSAR* von Kapitel 3.2.3 ist ein generischer Algorithmus für *Stripmap* und *ScanSAR* verfügbar, welcher unter anderem auf Grund der Interpolationsfreiheit sehr gute Ergebnisse in der SAR-Datenverarbeitung liefert. Das in dieser Arbeit entwickelte Frequenz-Skalierungs-Verfahren zur Verarbeitung von *Spotlight*-Daten ist eine Ergänzung zum *Extended Chirp Scaling*-Algorithmus für *Stripmap* und *ScanSAR*. Die Azimutverarbeitung besteht wie beim *Extended Chirp Scaling*-Algorithmus für *ScanSAR* aus einer Kombination von SPECAN und Azimut-Skalierung. Wegen der Besonderheiten des *Spotlight*-Modus, wurden für das Frequenz-Skalierungs-Verfahren mehrere Weiterentwicklungen durchgeführt.

Da, wie in Kapitel 3.3.1.2 beschrieben, für die *Chirp Scaling*-Operation eine lineare Frequenzmodulation in Entfernung notwendig ist, diese aber auf Grund der beim Empfang durchgeführten *Dechirp*-Operation nicht mehr vorhanden ist, wurde eine neuartige Frequenz-Skalierung entwickelt, welche der *Chirp Scaling*-Formulierung ähnlich ist, keine linear frequenzmodulierten Rohdaten benötigt und ohne Interpolation arbeitet. Bei der Frequenz-Skalierung werden die Entfernungsfrequenzen skaliert und nicht wie beim *Chirp Scaling* die Phasenzentren der Entfernungssignale. Aus diesem Grund wird das in dieser Arbeit entwickelte Verfahren zur *Spotlight*-Verarbeitung als Frequenz-Skalierungs-Verfahren bezeichnet.

Das *Inverse Scaled Fourier Transform*-Verfahren [38] arbeitet ebenfalls ganz ohne Interpolation und ist dem *Chirp Scaling* Verfahren ähnlich. Für die Verarbeitung wird eine FFT-Operation in Entfernungsrichtung mehr als beim *Chirp Scaling*-Verfahren benötigt. Dafür ist es unabhängig von der Signalform der ausgesendeten Radarpulse. Vergleiche zwischen *Chirp Scaling*- und *Inverse Scaled Fourier Transform*-Verfahren finden sich in [36] und [39]. Eine alternative Möglichkeit zur Frequenz-Skalierung würde wegen der Unabhängigkeit von der gesendeten Signalform der *Inverse Scaled Fourier Transform*-Algorithmus darstellen. Wegen der gewünschten Ähnlichkeit der Formulierung zum *Extended Chirp Scaling*-Algorithmus ist aber die Frequenz-Skalierung für das neue Verfahren entwickelt worden.

Die *Spotlight*-Abbildung erfordert eine genauere Formulierung der Azimut-Skalierung, wie sie beim *Extended Chirp Scaling* für *ScanSAR* von Kapitel 3.2.3 eingeführt wurde. Insbesondere die benötigte Erweiterung der Azimutdimension wird genau abgeleitet. Um eine, wie in Kapitel 3.3.1.2 beschriebene, Erhöhung der Azimutabtastung vor der Verarbeitung zu vermeiden, wurde ein Subapertur-Verfahren für die Azimutverarbeitung entwickelt.

Das neue Verfahren besteht aus einer Frequenz-Skalierung für die Entfernungverarbeitung mit Korrektur der Zielentfernungsänderung und einer für *Spotlight*-SAR weiterentwickelten Kombination von SPECAN und Azimut-Skalierung in Verbindung mit Subaperturen für die Azimutverarbeitung.

5.1 Die Frequenz-Skalierung

Die in dieser Arbeit entstandene Frequenz-Skalierung [46] [48] ist zur Korrektur der Zielentfernungsänderung speziell für Rohdaten mit *Dechirp*-Operation in Entfernung entwickelt worden, so wie sie in Kapitel 4 beschrieben sind. Als Ausgangspunkt für die Frequenz-Skalierung wird zuerst eine Darstellung der Rohdaten eines Punktziels abgeleitet, bei welcher der *Residual Video Phase* (RVP)-Term durch eine Faltung mit einem *Chirp*-Signal dargestellt ist. Anschließend wird die benötigte Skalierung zur Zielentfernungskorrektur im Entfernung-Dopplerbereich abgeleitet und die Frequenz-Skalierung nur durch Multiplikationen und Fourier-Transformationen realisiert. Die Frequenz-Skalierung wird anschaulich interpretiert und ein Simulationsbeispiel verdeutlicht einzelne Zwischenschritte der Frequenz-Skalierung.

5.1.1 Rohdaten eines Punktziels im Entfernung-Dopplerbereich

Der erste Schritt zur Ableitung der Frequenz-Skalierung ist die Herleitung einer Darstellung des SAR-Signals eines Punktziels im Entfernung-Dopplerbereich, bei welcher der RVP-Term aus (4.19) durch die Faltung mit einem *Chirp*-Signal ausgedrückt ist. Diese Herleitung baut auf dem in [10] beschriebenen Verfahren zur Korrektur des RVP-Terms auf.

Wird das Signal mit *Dechirp*-Operation in Entfernung aus Gleichung (4.19) Puls für Puls in Entfernungsrichtung einer Fourier-Transformation unterzogen, so läßt sich ein zum Zeitpunkt $t_{a,n}$ empfangener Puls durch Gleichung (5.1) darstellen. Die Zeitpunkte $t_{a,n}$ sind in (5.2) durch Start- und Endzeitpunkt der *Spotlight*-Abbildung festgelegt. Die Entfernungsfrequenz f_e ist in (5.3) definiert, wobei f_s die Abtastfrequenz der Signale bei der A/D-Wandlung ist.

$$\begin{aligned}
 s(t_{a,n}, f_e, r_o) = & C \cdot \exp\left[-j \cdot \frac{4\pi}{\lambda} r\right] \cdot \\
 & \exp\left[j \cdot \frac{4\pi \cdot k_e}{c_o^2} (r - r_{ref})^2\right] \cdot \exp\left[j \cdot \frac{4\pi \cdot k_e}{c_o} (r - r_{ref}) \cdot \frac{2 \cdot r_{ref}}{c_o}\right] \cdot \\
 & \int_{\frac{2r - T_P}{c_o} - \frac{T_P}{2}}^{\frac{2r + T_P}{c_o} + \frac{T_P}{2}} \exp\left[-j \cdot \frac{4\pi \cdot k_e}{c_o} (r - r_{ref}) \cdot t_e - j \cdot 2\pi \cdot f_e \cdot t_e\right] dt_e
 \end{aligned} \quad (5.1)$$

$$t_{a,start} \leq t_{a,n} \leq t_{a,ende} \quad (5.2)$$

$$-\frac{f_s}{2} \leq f_e \leq \frac{f_s}{2} \quad (5.3)$$

Nach Lösung des Integrals und durch Erweitern des Ausdrucks um vier Exponentialterme, welche sich gegenseitig aufheben, ergibt sich (5.1) zu Gleichung (5.4).

$$\begin{aligned}
 s(t_{a,n}, f_e, r_o) = & C \cdot \exp\left[-j \frac{4\pi}{\lambda} r\right] \cdot \exp\left[-j \cdot \frac{4\pi \cdot k_e}{c_o^2} (r - r_{ref})^2\right] \cdot \exp\left[-j \cdot \frac{4\pi \cdot r}{c_o} \cdot f_e\right] \\
 & \cdot \exp\left[j \cdot \frac{4\pi \cdot r_{ref}}{c_o} \cdot f_e\right] \cdot \exp\left[-j \cdot \frac{4\pi \cdot r_{ref}}{c_o} \cdot f_e\right] \cdot \exp\left[j \cdot \frac{\pi}{k_e} \cdot f_e^2\right] \cdot \exp\left[-j \cdot \frac{\pi}{k_e} \cdot f_e^2\right] \\
 & \cdot T_P \cdot \text{si}\left[\pi \cdot T_P \cdot \left(f_e + \frac{2 \cdot k_e}{c_o} (r - r_{ref})\right)\right]
 \end{aligned} \quad (5.4)$$

Durch die Anwendung der Substitution von Gleichung (5.5) auf Gleichung (5.4) und auf das Fourierintegral der inversen Fourier-Transformation bezüglich der Entfernungsfrequenz f_e in Gleichung (5.6), ergibt sich Gleichung (5.4) nach der Puls für Puls durchgeführten inversen Fourier-Transformation zu Gleichung (5.7).

$$F = f_e + \frac{2 \cdot k_e}{c_o} \cdot (r - r_{ref}) \quad (5.5)$$

$$\begin{aligned}
 \int_{-\infty}^{+\infty} \exp[+j \cdot 2\pi \cdot f_e \cdot t_e] df_e = & \int_{-\infty}^{+\infty} \exp\left[+j \cdot 2\pi \cdot \left(F - \frac{2 \cdot k_e}{c_o} \cdot (r - r_{ref})\right) \cdot t_e\right] dF \\
 = & \exp\left[-j \cdot \frac{4\pi \cdot k_e}{c_o} \cdot (r - r_{ref}) \cdot t_e\right] \cdot \int_{-\infty}^{+\infty} \exp[+j \cdot 2\pi \cdot F \cdot t_e] dF
 \end{aligned} \quad (5.6)$$

$$\begin{aligned}
 s(t_{a,n}, t_e, r_o) = C \cdot & \left\{ \exp \left[-j \cdot \frac{4\pi}{\lambda} \cdot r \right] \cdot \exp \left[-j \cdot \frac{4\pi \cdot k_e}{c_o} \cdot (r - r_{ref}) \cdot t_e \right] \cdot \exp \left[j \cdot \frac{8\pi \cdot k_e}{c_o^2} \cdot r_{ref} \cdot (r - r_{ref}) \right] \right. \\
 & \cdot T_p \cdot \int_{-\infty}^{+\infty} \text{si} \left[\pi \cdot T_p \cdot F \right] \cdot \exp \left[-j \frac{\pi}{k_e} \cdot F^2 \right] \cdot \exp \left[j \cdot 2\pi \cdot F \cdot \left(t_e - \frac{2 \cdot r_{ref}}{c_o} \right) \right] dF \left. \right\} \\
 & * \exp \left[-j \cdot \pi \cdot k_e \cdot t_e^2 \right] \cdot \sqrt{k_e} \cdot \exp \left[j \cdot \frac{\pi}{4} \right]
 \end{aligned} \quad (5.7)$$

Dabei wurde für die Fourier-Transformation des letzten Exponentialausdrucks in (5.4), welcher als die Fourier-Transformation eines *Chirp*-Signals interpretiert werden kann, die in [65] beschriebene Fourier-Korrespondenz für *Chirp*-Signale (5.8) verwendet, welche über das Prinzip der stationären Phase [10] [59] [60] abgeleitet werden kann.

$$\sqrt{k_e} \cdot \exp \left[j \cdot \frac{\pi}{4} \right] \cdot \exp \left[-j \cdot \pi \cdot k_e \cdot t^2 \right] \xrightarrow{\text{FT}} \exp \left[+j \frac{\pi}{k_e} \cdot f^2 \right] \quad (5.8)$$

Das Integral in (5.7) kann durch die folgende Näherung gelöst werden [10]. Das Integral besitzt signifikante Anteile nur für den Bereich von Gleichung (5.9).

$$-\frac{1}{T_p} < F < \frac{1}{T_p} \quad (5.9)$$

Der in F quadratische Exponentialterm im Integral kann vernachlässigt werden, wenn Gleichung (5.10) gilt.

$$\exp \left[-j \frac{\pi}{k_e \cdot T_p^2} \right] \approx 1 \quad (5.10)$$

Da $k_e \cdot T_p^2$ das Zeit-Bandbreite-Produkt in Entfernungsrichtung ist, und dieses für normales oder hochauflösendes SAR mindestens einige tausend beträgt, kann (5.10) in sehr guter Näherung angenommen werden. Nach der Lösung des Integrals mit der Näherung ergibt sich (5.7) zu Gleichung (5.11).

$$\begin{aligned}
 s(t_{a,n}, t_e, r_o) = C \cdot & \left\{ \exp \left[-j \frac{4\pi}{\lambda} r \right] \cdot \exp \left[-j \cdot \frac{4\pi \cdot k_e}{c_o} \cdot (r - r_{ref}) \cdot t_e \right] \cdot \exp \left[j \cdot \frac{8\pi \cdot k_e}{c_o^2} \cdot r_{ref} \cdot (r - r_{ref}) \right] \right. \\
 & \cdot \text{rect} \left[\frac{t_e - \frac{2 \cdot r_{ref}}{c_o}}{T_p} \right] \left. \right\} * \exp \left[-j \cdot \pi \cdot k_e \cdot t_e^2 \right] \cdot \sqrt{k_e} \cdot \exp \left[j \cdot \frac{\pi}{4} \right]
 \end{aligned} \quad (5.11)$$

Betrachtet man die Formulierung der Rohdaten eines Punktziels in (4.16), so erkennt man in der ersten rect-Funktion die Abhängigkeit des Ortes der einzelnen Impulsechos von der Azimutzeit t_a und der Punktzielentfernung r_o . Diese Abhängigkeit ist die Zielentfernungsänderung. Im Gegensatz dazu ist das Signal in der geschweiften Klammer von (5.11) unabhängig von der Zielentfernungsänderung. Die Entfernungsvariation ist jetzt ausgedrückt durch die Abhängigkeit der durch die zweite Exponentialfunktion beschriebenen Phasenfunktion von $r(t_a, r_o)$. Eine alternative Herleitung für Gleichung (5.11) ist in Anhang A beschrieben.

Durch die Darstellung der Rohdaten eines Punktziels in (5.11) kann für jede Abtastposition in Entfernung eine Fourier-Transformation der Rohdaten in Azimutrichtung durchgeführt werden. Die Fourier-Transformation wird dabei mit Hilfe des Prinzips der stationären Phase durchgeführt [60]. Das Ergebnis der Transformation ist die Darstellung der Rohdaten eines Punktziels im Entfernungs-Dopplerbereich in Gleichung (5.12). Diese Darstellung, beziehungsweise eine Näherung dieser Darstellung, ist der Ausgangspunkt für die Frequenz-Skalierung zur Korrektur der Zielentfernungsänderung.

$$s(f_a, t_e, r_o) = C \cdot C_{PSP}(f_a, t_e; r_o) \cdot \left\{ \text{rect} \left[\frac{t_e - \frac{2 \cdot r_{ref}}{c_o}}{T_p} \right] \cdot \exp \left[j \cdot \frac{4\pi \cdot k_e}{c_o} \cdot r_{ref} \cdot \left(t_e - \frac{2 \cdot r_{ref}}{c_o} \right) \right] \right. \quad (5.12)$$

$$\left. \cdot \exp \left[-j \frac{4\pi \cdot r_o}{\lambda} \cdot \sqrt{\left[\left(1 + \frac{k_e \cdot \lambda}{c_o} \cdot \left(t_e - \frac{2 \cdot r_{ref}}{c_o} \right) \right)^2 - \left(\frac{f_a \cdot \lambda}{2 \cdot V} \right)^2 \right]} \right] \right\} * \exp \left[-j \cdot \pi \cdot k_e \cdot t_e^2 \right] \cdot \sqrt{k_e} \cdot \exp \left[j \cdot \frac{\pi}{4} \right]$$

Der Azimutfrequenzbereich f_a ist durch die Pulswiederholfrequenz PRF und den Dopplerzentroiden f_{DC} in Gleichung (3.10) definiert. Die PRF bei der Datenaufzeichnung muß dabei gleich oder größer der Augenblicksbandbreite von Gleichung (4.6) sein.

Bei der Ableitung des Ausdrucks in (5.12) mit dem Prinzip der stationären Phase ergibt sich der komplexe Ausdruck C_{PSP} von Gleichung (5.13), welcher neben einer Phasenkonstanten auch einen über Entfernungszeit und Azimutfrequenz variierenden Amplitudenausdruck enthält.

$$C_{\text{PSP}}(f_a, t_e, r_o) = \exp\left[-j \cdot \frac{\pi}{4}\right] \cdot \sqrt{\frac{\lambda}{8 \cdot V^2}} \cdot \sqrt{r_o} \cdot \frac{1 + \frac{k_e \cdot \lambda}{c_o} \cdot \left(t_e - \frac{2 \cdot r_{\text{ref}}}{c_o}\right)}{\left[\left(1 + \frac{k_e \cdot \lambda}{c_o} \cdot \left(t_e - \frac{2 \cdot r_{\text{ref}}}{c_o}\right)\right)^2 - \left(\frac{f_a \cdot \lambda}{2 \cdot V}\right)^2\right]^{3/4}} \quad (5.13)$$

Der erste Exponentialausdruck hebt sich mit dem letzten Exponentialausdruck von Gleichung (5.12) auf. Die erste Wurzel von (5.13) wird zusammen mit dem Faktor $\sqrt{k_e}$ aus Gleichung (5.12) in die Konstante C gezogen. Der Bruchterm kann nach der ersten Azimut FFT in der Verarbeitung korrigiert werden und wird daher im folgenden nicht mehr berücksichtigt. Die Korrektur des Amplitudenfaktors mit der Wurzel aus r_o kann erst nach der Korrektur der Zielentfernungsänderung erfolgen.

Der Wurzelausdruck in Gleichung (5.12) kann durch eine Näherung, welche in ähnlicher Weise auch bei der Herleitung des *Chirp Scaling* Verfahrens verwendet wird [64], in eine Taylorreihe entwickelt werden. Mit den Substitutionen

$$\beta = \sqrt{1 - \frac{f_a^2 \cdot \lambda^2}{4 \cdot V^2}} \quad ; \quad x = \frac{k_e \cdot \lambda}{c_o} \cdot \left(t_e - \frac{2 \cdot r_{\text{ref}}}{c_o}\right) \quad (5.14)$$

und der bis zum kubischen Glied durchgeführten Taylorentwicklung

$$\beta \cdot \sqrt{1 + \frac{2 \cdot x + x^2}{\beta^2}} \approx \beta + \frac{x}{\beta} + \frac{\beta^2 - 1}{2 \cdot \beta^3} \cdot x^2 - \frac{\beta^2 - 1}{2 \cdot \beta^5} \cdot x^3 + \dots \quad (5.15)$$

ergibt sich Gleichung (5.12) zu

$$\begin{aligned} s(f_a, t_e, r_o) = & C \cdot \sqrt{r_o} \cdot \left\{ \text{rect} \left[\frac{t_e - \frac{2 \cdot r_{\text{ref}}}{c_o}}{T_p} \right] \cdot \exp \left[j \cdot \frac{4\pi \cdot k_e}{c_o} \cdot r_{\text{ref}} \cdot \left(t_e - \frac{2 \cdot r_{\text{ref}}}{c_o}\right) \right] \cdot \exp \left[-j \frac{4\pi \cdot r_o \cdot \beta}{\lambda} \right] \right. \\ & \cdot \exp \left[-j \cdot \frac{2\pi \cdot r_o \cdot k_e^2 \cdot \lambda}{c_o^2} \cdot \frac{(\beta^2 - 1)}{\beta^3} \cdot \left(t_e - \frac{2 \cdot r_{\text{ref}}}{c_o}\right)^2 + j \cdot \frac{2\pi \cdot r_o \cdot k_e^3 \cdot \lambda^2}{c_o^3} \cdot \frac{(\beta^2 - 1)}{\beta^5} \cdot \left(t_e - \frac{2 \cdot r_{\text{ref}}}{c_o}\right)^3 \right] \\ & \left. \cdot \exp \left[-j \cdot \frac{4\pi \cdot r_o \cdot k_e}{c_o \cdot \beta} \cdot \left(t_e - \frac{2 \cdot r_{\text{ref}}}{c_o}\right) \right] \right\} * \exp \left[-j \cdot \pi \cdot k_e \cdot t_e^2 \right] \quad (5.16) \end{aligned}$$

Die Durchführung der Taylorentwicklung bis zum kubischen Glied bedeutet keine wesentliche Erhöhung des Rechenaufwands, aber eine Verringerung des durch die Näherung eingeführten Phasenfehlers. Dieser Phasenfehler ist in Anhang C beschrieben und seine Auswirkung auf die maximale Szenenausdehnung ist in Tabelle 5.9 für einige Beispiel-Parametersätze quantifiziert.

In der Darstellung der Rohdaten im Entfernung-Dopplerbereich von (5.16) repräsentiert der Exponentialterm in der zweiten Zeile den Ausdruck für die sekundäre Entfernungskompression (englisch: *Secondary Range Compression*). Im folgenden wird dieser Term im Entfernung-Zeitbereich mit *src* und im Entfernung-Frequenzbereich mit *SRC* bezeichnet. Gleichung (5.16) kann damit durch Gleichung (5.17) ausgedrückt werden.

$$s(f_a, t_e, r_o) = C \cdot \sqrt{r_o} \cdot \left\{ \text{rect} \left[\frac{t_e - \frac{2 \cdot r_{\text{ref}}}{c_o}}{T_P} \right] \cdot \exp \left[j \cdot \frac{4\pi \cdot k_e}{c_o} \cdot r_{\text{ref}} \cdot \left(t_e - \frac{2 \cdot r_{\text{ref}}}{c_o} \right) \right] \cdot \exp \left[-j \frac{4\pi \cdot r_o \cdot \beta}{\lambda} \right] \right. \\ \left. \cdot \exp \left[-j \cdot \frac{4\pi \cdot r_o \cdot k_e}{c_o \cdot \beta} \cdot \left(t_e - \frac{2 \cdot r_{\text{ref}}}{c_o} \right) \right] \cdot \text{src} \left(f_a, t_e - \frac{2 \cdot r_{\text{ref}}}{c_o}; r_o \right) \right\} * \exp \left[-j \cdot \pi \cdot k_e \cdot t_e^2 \right] \quad (5.17)$$

5.1.2 Korrektur der Zielentfernungsänderung

Für die Berechnung der zur Frequenz-Skalierung benötigten Funktionen wird das Signal in den zweidimensionalen Frequenzbereich transformiert. Dabei bedeutet die Fourier-Transformation in Entfernung die Kompression der Rohdaten in Entfernungsrichtung. Die Fourier-Transformation von Gleichung (5.17) in Entfernung kann unter Verwendung des Verschiebungssatzes der Fourier-Transformation berechnet werden und ergibt sich zu Gleichung (5.18). Die Multiplikation des *src*-Ausdrucks von Gleichung (5.17) wird zur Faltung mit der Fourier-Transformierten *SRC*, und die Faltung mit dem den RVP-Term beschreibenden *Chirp*-Signal wird zur Multiplikation mit der Fourier-Transformierten des *Chirp*-Signals.

Die Trajektorie der zu einem Punktziel gehörenden Signalanteile ist durch die Frequenzverschiebung in der *si*-Funktion gegeben. Durch die Frequenz-Skalierung soll die Zielentfernungsänderung korrigiert werden. Die Zielentfernungsänderung ist

durch den Term $r_0/\beta(f_a)$ in der si-Funktion beschrieben und ist eine Funktion der Punktzielentfernung r_0 und der Azimutfrequenz f_a . Die Korrektur der Zielentfernungsänderung erfolgt in zwei Schritten. Im ersten Schritt wird die Entfernungsfrequenz f_e mit dem Kehrwert von $\beta(f_a)$ skaliert. Danach ergibt sich die si-Funktion aus Gleichung (5.18) zu Gleichung (5.19).

$$S(f_a, f_e, r_0) = C \cdot \sqrt{r_0} \cdot \left\{ \exp \left[-j \cdot \frac{4\pi \cdot r_{ref}}{c_0} \cdot f_e \right] \cdot \left(\left\{ \exp \left[-j \cdot \frac{4\pi \cdot r_0 \cdot \beta}{\lambda} \right] \cdot T_P \cdot \text{si} \left[\pi \cdot T_P \cdot \left(f_e + \frac{1}{\beta} \cdot \frac{2 \cdot k_e}{c_0} \cdot (r_0 - r_{ref} \cdot \beta) \right) \right] \right\} * \text{SRC}(f_a, f_e; r_0) \right) \right\} \cdot \exp \left[j \cdot \frac{\pi}{k_e} \cdot f_e^2 \right] \quad (5.18)$$

$$\text{si} \left[\pi \cdot T_P \cdot \left(\frac{1}{\beta} \cdot f_e + \frac{1}{\beta} \cdot \frac{2 \cdot k_e}{c_0} \cdot (r_0 - r_{ref} \cdot \beta) \right) \right] = \text{si} \left[\pi \cdot \frac{T_P}{\beta} \cdot \left(f_e + \frac{2 \cdot k_e}{c_0} \cdot (r_0 - r_{ref} \cdot \beta) \right) \right] \quad (5.19)$$

In Gleichung (5.19) ist die Zielentfernungsänderung beschrieben durch den Term $r_{ref} \cdot \beta(f_a)$, welcher anstatt von r_0 nur noch von der Referenzentfernung r_{ref} der *Dechirp*-Operation abhängig ist. Somit ist nach dem ersten Schritt die Zielentfernungsänderung für alle Entfernungen gleich und kann im zweiten Schritt durch eine für alle Entfernungen gleiche, und nur von der Azimutfrequenz abhängige Verschiebung der Entfernungsfrequenz durchgeführt werden.

Die si-Funktion in Gleichung (5.19) hat sich gegenüber der si-Funktion von Gleichung (5.18) folgendermaßen geändert:

- Die si-Funktion ist in der Frequenz f_e so verschoben, daß ihr Maximum auf einer um $k_e \cdot 2 \cdot r_0 / c_0$ verschobenen Trajektorie der zur Referenzentfernung gehörenden Zielentfernungsänderung $r_{ref} \cdot \beta$ liegt.
- Zusätzlich zur Verschiebung ist die si-Funktion in (5.19) bezüglich der Abszisse skaliert. Damit hat sich die Position der Nullstellen von $\pm n \cdot T_P / 2$ auf $\pm n \cdot T_P / (2 \cdot \beta)$ geändert ($n=1,2,3,\dots$).
- Die Funktionswerte der si-Funktion in (5.19) sind aber nicht skaliert. Insbesondere der Funktionswert des Maximums ist unverändert. Die Korrektur der Zielentfernungsänderung hat also keinen Einfluß auf die Signalamplitude.

5.1.3 Skalierung einer Funktion im Frequenzbereich

In [61] ist die Skalierung einer Zeitfunktion $f(t)$ auf $f(-c \cdot t/a)$ durch zwei Filter und zwei *Chirp*-Multiplikationen hergeleitet. Der dazu benötigte Aufbau ist in Bild 5.1 dargestellt.

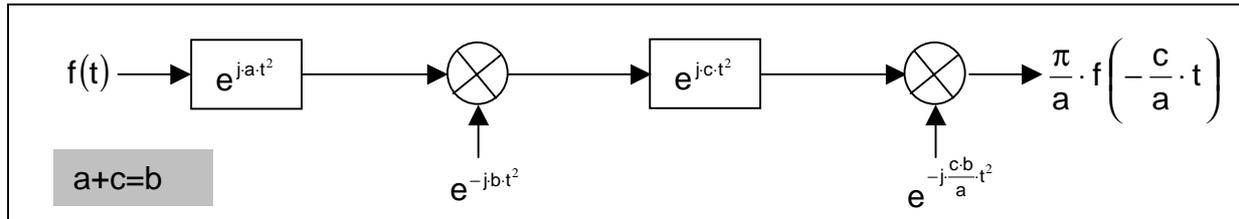


Bild 5.1: Skalierung einer Zeitfunktion durch Filter und Chirpmultiplikationen

Durch die Bedingung im grauen Feld von Bild 5.1 ergeben sich zwei unabhängige Variablen. Die ganze Skalierungsoperation kann somit durch zwei Variablen beschrieben werden. Mit der Definition $d=-c/a$ und der Bedingung von Bild 5.1 kommt man zu den Substitutionen in Gleichung (5.20).

$$\begin{aligned} c &= -d \cdot a \\ b &= c + a = -a \cdot d + a = a \cdot (1 - d) \\ \frac{c \cdot b}{a} &= \frac{(-d \cdot a) \cdot (a - d \cdot a)}{a} = a \cdot (d^2 - d) \end{aligned} \quad (5.20)$$

Nach Durchführung der Substitutionen lässt sich die Skalierungsoperation einer Zeitfunktion durch Gleichung (5.21) beschreiben.

$$f(d \cdot t) = \frac{a}{\pi} \cdot \left(\left[f(t) * e^{j t^2 \cdot a} \right] \cdot e^{-j t^2 \cdot a \cdot (1-d)} \right) * e^{-j t^2 \cdot d \cdot a} \cdot e^{-j t^2 \cdot a \cdot (d^2-d)} \quad (5.21)$$

Durch die Fourier-Transformation von Gleichung (5.21) erhält man unter Verwendung des Ähnlichkeitssatzes der Fourier-Transformation und der Korrespondenz von Gleichung (5.8) den Ausdruck für die Skalierung einer Funktion der Frequenz f in Gleichung (5.22). Die Konstante C in der Korrespondenz (5.8) wurde dabei vernachlässigt.

$$F\left(\frac{1}{d} \cdot f\right) = \frac{a}{\pi \cdot |d|} \cdot \left(\left[\left[F(f) \cdot e^{-j \pi^2 \frac{f^2}{a}} \right] * e^{j \pi^2 \frac{f^2}{a \cdot (1-d)}} \right] \cdot e^{j \pi^2 \frac{f^2}{d \cdot a}} \right) * e^{j \pi^2 \frac{f^2}{a \cdot (d^2-d)}} \quad (5.22)$$

Ersetzt man die Faltungsoperationen im Frequenzbereich von Gleichung (5.22) durch Multiplikationen im Zeitbereich, so erhält man unter Verwendung der Korrespondenz von (5.8) die Darstellung der Skalierung einer Funktion im Frequenzbereich durch vier *Chirp*-Signale von Bild 5.2.

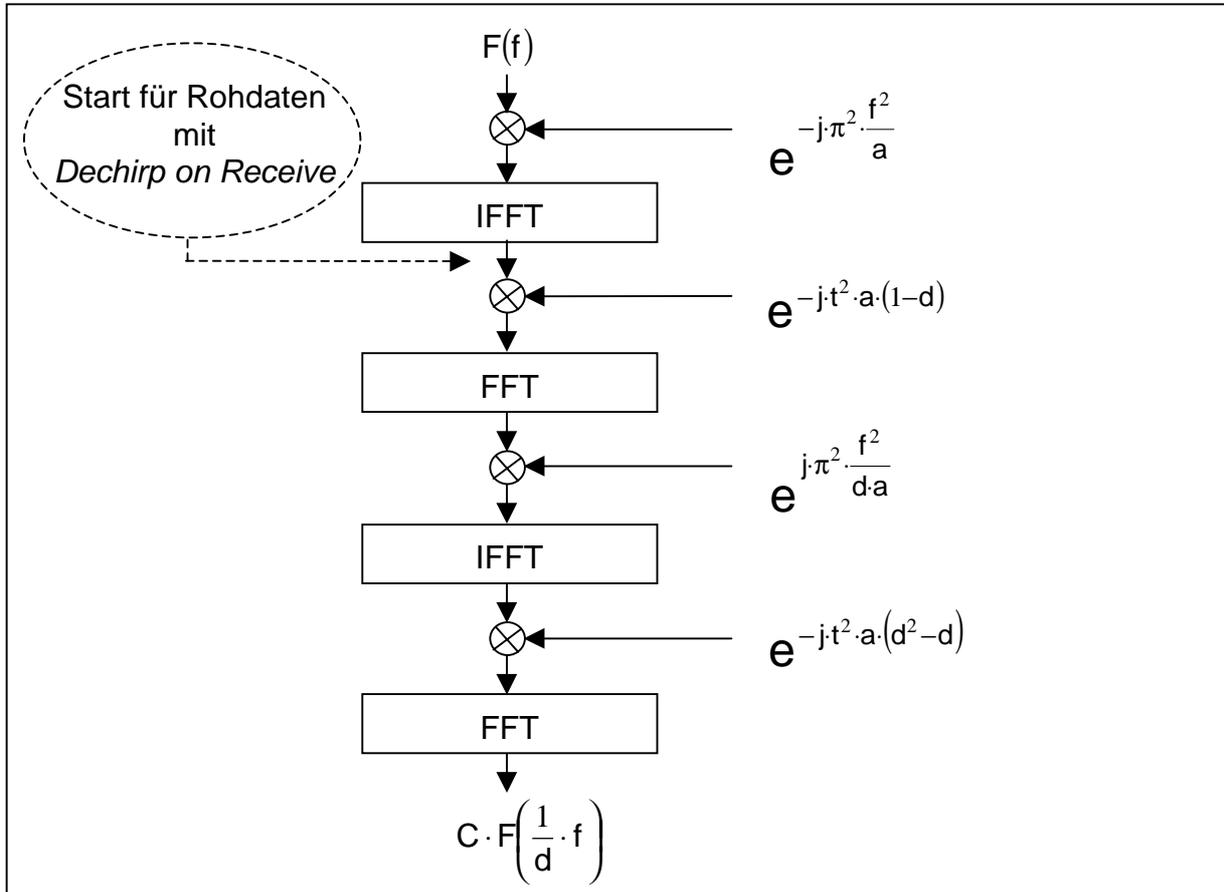


Bild 5.2: Skalierung einer Funktion im Frequenzbereich durch vier Chirp-Signale

5.1.4 Ableitung der Frequenz-Skalierungsfunktionen

Die zur Korrektur der Zielentfernungsänderung verwendete Frequenz-Skalierung aus dem vorigen Kapitel wird hergeleitet durch die Definition zweier Variablen für die in Bild 5.2 dargestellte Skalierung einer Funktion im Frequenzbereich. Die erste Variablendefinition wird in Gleichung (5.23) durchgeführt.

$$\frac{1}{\beta(f_a)} = \frac{1}{d} \tag{ 5.23 }$$

Diese Definition bedeutet die Skalierung des Signals $S(f_a, f_e, r_0)$ aus Gleichung (5.18) auf das Signal $S(f_a, f_e/\beta, r_0)$, wodurch laut Gleichung (5.19) die Zielentfernungsänderung in allen Entfernungen an die Zielentfernungsänderung der Referenzentfernung angeglichen wird.

In der zweiten Definition wird in Gleichung (5.24) der letzte Exponentialausdruck aus Gleichung (5.18), welcher den RVP-Term beschreibt, gleich der ersten *Chirp*-Funktion von Bild 5.2 gesetzt. Damit wird der RVP-Term als die erste Phasenfunktion zur Frequenz-Skalierung interpretiert. Da die Rohdaten eines SAR-Systems im Zeitbereich vorliegen, wird die erste Phasenmultiplikation und die erste inverse Fourier-Transformation von Bild 5.2 eingespart und es ergibt sich der im Bild angegebene Startpunkt für die Frequenz-Skalierung bei Rohdaten mit *Dechirp*-Operation in Entfernung.

$$\exp\left[-j \cdot \frac{\pi^2 \cdot f_e^2}{a}\right] = \exp\left[j \cdot \frac{\pi}{k_e} \cdot f_e^2\right] \Rightarrow a = -\pi \cdot k_e \quad (5.24)$$

Mit den beiden Variablendefinitionen werden die unteren drei Chirpfunktionen aus Bild 5.2 abgeleitet. Die erste dieser drei Chirpfunktionen ergibt sich zum Ausdruck in Gleichung (5.25) und wird im folgenden als Frequenz-Skalierungsfunktion H_{FS} bezeichnet. Die Bedeutung dieser sowie der nachfolgend eingeführten Bezeichnungen wird in Kapitel 5.1.9 anschaulich dargestellt.

$$H_{FS}(f_a, t_e) = \exp[-j \cdot t_e^2 \cdot a \cdot (1-d)] = \exp[+j \cdot \pi \cdot k_e \cdot t_e^2 \cdot (1-\beta)] \quad (5.25)$$

Die zweite Chirpfunktion, als RVP-Korrekturfunktion H_{RVPK} bezeichnet, ergibt sich zum Ausdruck in Gleichung (5.26), während Gleichung (5.27) den Ausdruck für die dritte Chirpfunktion enthält, welche mit inverse Frequenz-Skalierungsfunktion H_{IFS} bezeichnet wird.

$$H_{RVPK}(f_a, f_e) = \exp\left[j \cdot \frac{\pi^2 \cdot f_e^2}{a \cdot d}\right] = \exp\left[-j \cdot \frac{\pi \cdot f_e^2}{k_e \cdot \beta}\right] \quad (5.26)$$

$$H_{IFS}(f_a, t_e) = \exp[-j \cdot t_e^2 \cdot a \cdot (d^2 - d)] = \exp[j \cdot \pi \cdot k_e \cdot t_e^2 \cdot (\beta^2 - \beta)] \quad (5.27)$$

5.1.5 Signal nach Frequenz-Skalierung

Nach der Frequenz-Skalierung ergibt sich das SAR-Signal eines Punktziels im zweidimensionalen Frequenzbereich zu Gleichung (5.28). Die Veränderung in der *si*-Funktion wurde bereits bei Gleichung (5.19) besprochen. Die wichtigste Ver-

änderung ist, daß die Frequenz, bei welcher ein Punktziel der Entfernung r_o fokussiert ist, nunmehr keine Funktion der Azimutfrequenz ist.

$$S\left(f_a, \frac{f_e}{\beta}, r_o\right) = C \cdot \sqrt{r_o} \cdot \frac{1}{|\beta|} \cdot \left\{ \exp\left[-j \cdot \frac{4\pi \cdot r_{ref}}{c_o} \cdot \left(\frac{f_e}{\beta}\right)\right] \cdot \left\{ \exp\left[-j \cdot \frac{4\pi \cdot r_o \cdot \beta}{\lambda}\right] \cdot T_p \cdot \text{si}\left[\pi \cdot \frac{T_p}{\beta} \cdot \left(f_e + \frac{2 \cdot k_e}{c_o} \cdot (r_o - r_{ref} \cdot \beta)\right)\right]\right\} * \text{SRC}\left(\frac{f_e}{\beta}\right) \right\} \quad (5.28)$$

Der in Gleichung (5.18) noch vorhandene RVP-Term wurde, wie im vorigen Kapitel beschrieben, für die Frequenz-Skalierung verwendet und ist daher in Gleichung (5.28) nicht mehr vorhanden. Wird das Signal aus Gleichung (5.28) einer inversen Fourier-Transformation in Entfernung unterzogen, so ergibt sich das Signal an der Stelle vor der letzten Fourier-Transformation und nach der Phasenmultiplikation zur inversen Frequenz-Skalierung zu Gleichung (5.29). Für die Transformation wurden der Verschiebungssatz für die Zeit und die Frequenz sowie der Ähnlichkeitssatz der Fourier-Transformation verwendet.

$$S(f_a, t_e \cdot \beta, r_o) = C \cdot \sqrt{r_o} \cdot \frac{1}{|\beta|^2} \cdot \text{rect}\left[\frac{t_e \cdot \beta - \frac{2 \cdot r_{ref}}{c_o}}{T_p}\right] \cdot \exp\left[-j \cdot \frac{4\pi \cdot k_e}{c_o \cdot \beta} (r_o - r_{ref} \cdot \beta) \cdot \left(t_e \cdot \beta - 2 \cdot \frac{r_{ref}}{c_o}\right)\right] \cdot \text{src}\left(f_a, t_e \cdot \beta - 2 \cdot \frac{r_{ref}}{c_o}\right) \cdot \exp\left[-j \cdot \frac{4\pi \cdot r_o}{\lambda} \cdot \beta\right] \quad (5.29)$$

5.1.6 Die sekundäre Entfernungskompression

Die Korrektur der sekundären Entfernungskompression kann an der Stelle vor der letzten Fourier-Transformation und nach der inversen Frequenz-Skalierung von Bild 5.2 durch den konjugiert komplexen Ausdruck für den *Secondary Range Compression*-Term erfolgen. Durch Skalieren entsprechend Gleichung (5.29) ergibt sich der Phasenterm zur Korrektur des *Secondary Range Compression*-Terms aus Gleichung (5.16) zu Gleichung (5.30).

$$H_{\text{SRC}}(f_a, t_e, r_o) = \text{src}\left(t_e \cdot \beta - \frac{2 \cdot r_{ref}}{c_o}\right)^* \quad (5.30)$$

$$= \exp\left[+j \cdot \frac{2\pi \cdot r_o \cdot k_e^2 \cdot \lambda}{c_o^2} \cdot \frac{(\beta^2 - 1)}{\beta^3} \cdot \left(t_e - \frac{2 \cdot r_{ref}}{c_o}\right)^2 - j \cdot \frac{2\pi \cdot r_o \cdot k_e^3 \cdot \lambda^2}{c_o^3} \cdot \frac{(\beta^2 - 1)}{\beta^5} \cdot \left(t_e - \frac{2 \cdot r_{ref}}{c_o}\right)^3\right]$$

Wegen der Abhängigkeit von der Punktzielentfernung r_0 und der gleichzeitigen Abhängigkeit von der Entfernungszeit t_e wird die sekundäre Entfernungskompression nur für die Referenzentfernung der *Dechirp*-Operation in Entfernung durchgeführt, was die in Gleichung (5.31) gegebene Näherung bedeutet.

$$H_{\text{SRC}}(f_a, t_e, r_0) \approx H_{\text{SRC}}(f_a, t_e, r_{\text{ref}}) \quad (5.31)$$

Trotz der Näherung durch die konstante Referenzentfernung erfolgt die Korrektur der sekundären Entfernungskompression genau, da die Variation über die Azimutfrequenz berücksichtigt wird. Die *Secondary Range Compression* wird beim *Chirp Scaling*-Verfahren ebenso nur für eine Referenzentfernung, aber in Abhängigkeit von der Azimutfrequenz durchgeführt [64]. Der durch die Näherung verursachte Phasenfehler ist in Anhang C beschrieben und seine Auswirkung auf die maximale Szenenausdehnung ist in Tabelle 5.9 für einige Beispiel-Parametersätze quantifiziert.

5.1.7 Vollständige Korrektur der Zielentfernungsänderung

In der *si*-Funktion von Gleichung (5.28) ist die Zielentfernungsänderung keine Funktion der Punktzielentfernung r_0 und ist beschrieben durch $r_{\text{ref}}\beta$. Zur vollständigen Korrektur wird die mit der Entfernung konstante Zielentfernungsänderung durch Verschieben der Entfernungsfrequenzen eliminiert. Diese Verschiebung wird nachfolgend mit Zeilen-Verschiebung bezeichnet, da sie komplette Entfernungszeilen um dieselbe Frequenz verschiebt.

Die Zeilen-Verschiebung wird wegen der größeren Genauigkeit im Entfernungszeitbereich durchgeführt. Die dazu eingesetzte Zeilen-Verschiebungsfunktion $H_{\text{BV}}(f_a, t_e)$ im Entfernungs-Dopplerbereich ist die lineare Phasenfunktion von Gleichung (5.32).

$$H_{\text{BV}}(f_a, t_e) = \exp \left[j \cdot \frac{4\pi \cdot k_e}{c_0} \cdot r_{\text{ref}} \left(\frac{1}{\beta} - 1 \right) \cdot \left(t_e \cdot \beta - \frac{2 \cdot r_{\text{ref}}}{c_0} \right) \right] \quad (5.32)$$

Die -1 in der Klammer mit $1/\beta$ wird gesetzt, um nicht den gesamten Ausdruck $r_{\text{ref}}\beta$ von Gleichung (5.28) zu entfernen, was eine Verschiebung der dem Szenenzentrum entsprechenden Frequenz zu einer sehr hohen Frequenz hin entsprechen würde.

Als Ergebnis der Verschiebung ergibt sich die *si*-Funktion aus Gleichung (5.19) zu Gleichung (5.33), welche die Entfernungsfrequenz angibt, bei der sich alle zu einem Punktziel der Entfernung r_0 gehörenden Signalanteile befinden. Diese Entfernungs-

frequenz ist nur abhängig vom Abstand des Punktziels zur Referenzentfernung. Somit ist die Zielentfernungsänderung korrigiert.

$$\text{si} \left[\pi \cdot \frac{T_p}{\beta} \cdot \left(f_e + \frac{2 \cdot k_e}{c_o} \cdot (r_o - r_{\text{ref}}) \right) \right] \quad (5.33)$$

Die Zeilen-Verschiebungsfunktion $H_{BV}(f_a, t_e)$ wird im Entfernung-Dopplerbereich an der gleichen Stelle wie die sekundäre Entfernungskompression durchgeführt, also vor der letzten Entfernung-FFT und nach der Multiplikation mit der inversen Frequenz-Skalierung. An dieser Stelle ist die Frequenz-Skalierung abgeschlossen, das Signal liegt aber noch im Entfernung-Dopplerbereich vor.

5.1.8 Phasen- und Amplitudenkorrektur

Nach der Zeilen-Verschiebung zur vollständigen Korrektur der Zielentfernungsänderung und der sekundären Entfernungskompression ergibt sich das Signal eines Punktziels im zweidimensionalen Frequenzbereich zu Gleichung (5.34).

$$\begin{aligned} S \left(f_a, \frac{f_e}{\beta}, r_o \right) = & C \cdot \sqrt{r_o} \cdot \frac{1}{|\beta|} \cdot \exp \left[-j \cdot \frac{4\pi \cdot r_{\text{ref}}}{c_o} \cdot \frac{f_e}{\beta} \right] \cdot \\ & \cdot \text{si} \left[\pi \cdot \frac{T_p}{\beta} \cdot \left(f_e + \frac{2 \cdot k_e}{c_o} \cdot (r_o - r_{\text{ref}}) \right) \right] \cdot \exp \left[-j \cdot \frac{4\pi \cdot r_o \cdot \beta}{\lambda} \right] \end{aligned} \quad (5.34)$$

Der letzte Exponentialausdruck, welcher die Azimutmodulation beschreibt, ist gegenüber Gleichung (5.18) unverändert. Die si-Funktion beschreibt das komprimierte Entfernungssignal nach der Korrektur der Zielentfernungsänderung. Die Konstante T_p wurde in die Konstante C gezogen.

Der Exponentialausdruck in der ersten Zeile von (5.34) ist eine von Entfernung- sowie Azimutfrequenz abhängige Phasenfunktion, welche nach der Korrektur der Zielentfernungsänderung korrigiert wird. Neben dem azimutfrequenzabhängigen Bruchterm wird gleichzeitig die Amplitudenkorrektur abgeschlossen durch die Eliminierung der Wurzel der Punktzielentfernung r_o . Die Wurzel kann korrigiert werden, da nach der Zielentfernungskorrektur der lineare Zusammenhang von Gleichung (5.35) zwischen der Punktzielentfernung r_o und der Entfernungsfrequenz f_{ep} gilt, bei welcher das Punktziel fokussiert ist. Der Zusammenhang ergibt sich aus der Position des Maximums in der Impulsantwort in Entfernung von Gleichung (5.34).

$$r_o = r_{ref} - \frac{f_{ep} \cdot c_o}{2 \cdot k_e} \quad (5.35)$$

Wird nicht nur eine Punktzielentfernung, sondern werden alle Punktzielentfernungen berücksichtigt, so kann f_{ep} durch f_e ersetzt werden.

Die Korrekturfunktion $H_{kor}(f_a, f_e)$ für die Phasenkorrektur mit gleichzeitiger Amplitudenkorrektur im zweidimensionalen Frequenzbereich ist in (5.36) gegeben, wobei der letzte Exponentialausdruck für eine phasentreue Verarbeitung noch zusätzlich eingefügt wurde.

$$H_{kor}(f_a, f_e, r_o) = \frac{|\beta|}{\sqrt{r_{ref} - \frac{f_e \cdot c_o}{2 \cdot k_e}}} \cdot \exp\left[j \cdot \frac{4\pi \cdot r_{ref}}{c_o} \cdot \frac{f_e}{\beta}\right] \cdot \exp[-2 \cdot \pi \cdot t_r \cdot f_e] \quad (5.36)$$

Die zusätzliche Phasenkorrektur ist notwendig auf Grund der *Dechirp*-Operation und der Fokussierung im (Entfernungs-)Frequenzbereich, wie dies auch bei einer SPECAN-Verarbeitung der Fall ist. Die *Dechirp*-Operation entspricht dabei der *Deramping*-Operation des SPECAN-Verfahrens. In Gleichung (2.41) in Kapitel 2.9.2 wurde dieser Phasenterm für das SPECAN-Verfahren hergeleitet. Mit t_r ist die Verschiebung des Phasenzentrums der *Deramping*-(*Dechirp*)-Funktion aus dem Ursprung der Entfernungszeit bezeichnet. Die für Gleichung (2.41) notwendige quadratische Phasenkorrektur wurde bereits bei der RVP-Korrektur durchgeführt. Das Signal nach der kompletten Entfernungsverarbeitung ergibt sich abschließend zu Gleichung (5.37).

$$S\left(f_a, \frac{f_e}{\beta}, r_o\right) = C \cdot \exp\left[-j \cdot \frac{4\pi \cdot r_o \cdot \beta}{\lambda}\right] \cdot \text{si}\left[\pi \cdot \frac{T_p}{\beta} \cdot \left(f_e + \frac{2 \cdot k_e}{c_o} \cdot (r_o - r_{ref})\right)\right] \quad (5.37)$$

Die si-Funktion in (5.37) stellt das Ergebnis der Entfernungsverarbeitung dar und wurde bereits bei Gleichung (5.33) beschrieben. Die Azimutmodulation in der ersten Exponentialfunktion stellt den Ausgangspunkt für die Azimutverarbeitung dar.

5.1.9 Veranschaulichung der Frequenz-Skalierung

In Bild 5.3 ist die Wirkung der Phasenfunktionen bei der Durchführung der Frequenz-Skalierung zur Korrektur der Zielentfernungsänderung am Beispiel von drei Punktzielen gezeigt. Alle Abszissen in Bild 5.3 bezeichnen die Entfernungszeit t_e und alle Ordinaten die Entfernungsfrequenz f_e .

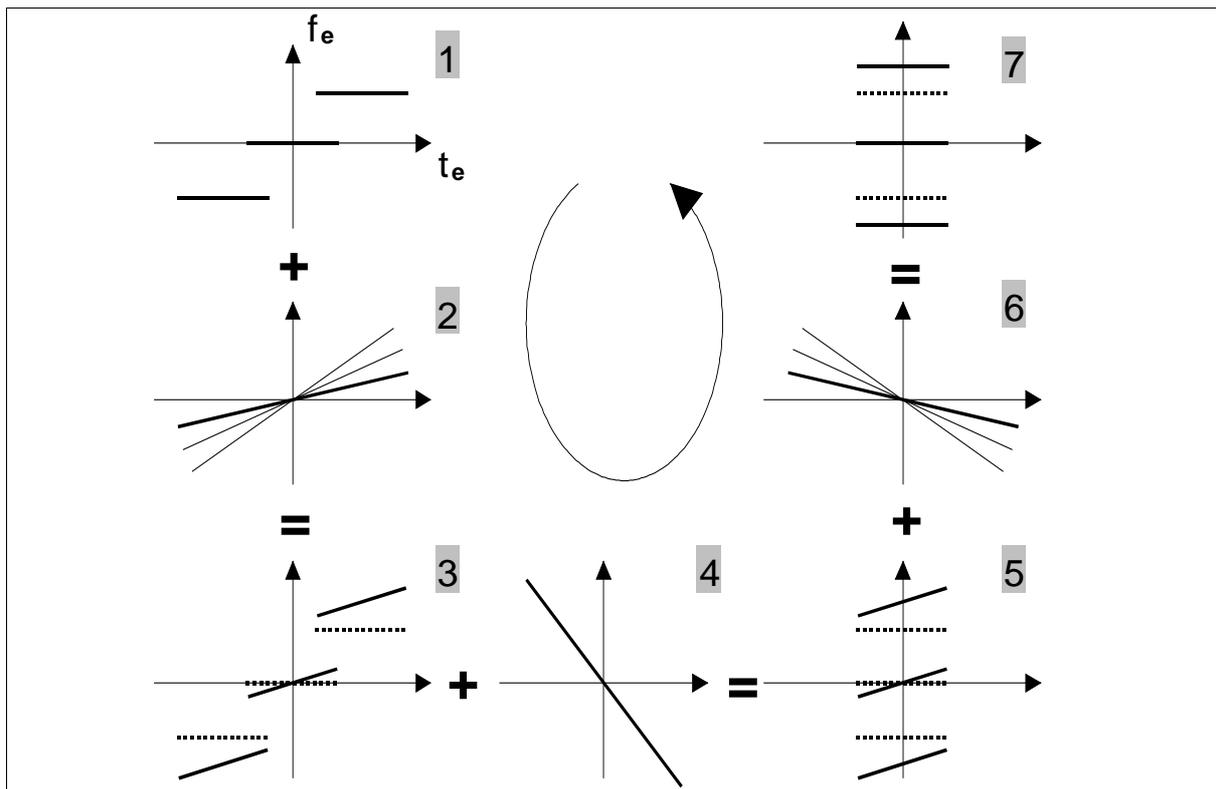


Bild 5.3: Veranschaulichung der Frequenz-Skalierung: 1) Signale von drei Punktzielen bei Rohdaten mit *Dechirp-on-Receive*, 2) Frequenz-Skalierungsfunktion, 3) Signale der Punktziele nach der Multiplikation mit der Frequenz-Skalierungsfunktion, 4) RVP-Korrekturfunktion, 5) Signale nach der RVP-Korrektur, 6) inverse Frequenz-Skalierungsfunktion, 7) Signale nach kompletter Frequenz-Skalierungs-Operation

Die Frequenz-Skalierung wird im Entfernung-Dopplerbereich durchgeführt. Das erste Diagramm zeigt Entfernungssignale von drei Punktzielen mit *Dechirp*-Operation in Entfernung. Die Ziele befinden sich an der gleichen Azimut-, aber bei verschiedenen Entfernungspositionen. Die dargestellte Entfernungszeitverschiebung zeigt das Vorhandensein des RVP-Ausdrucks an. Das zweite Diagramm enthält die Funktion zur Frequenz-Skalierung, welche in Näherung als eine lineare Funktion der Entfernungszeit gezeichnet werden kann. Die unterschiedlichen Steigungen deuten die Variation der Frequenz-Skalierungsfunktion mit der Azimutfrequenz an. Zur Skalierung der Signale in Diagramm 1 wird die dick gezeichnete Funktion verwendet.

Das Ergebnis der Frequenz-Skalierung ist im dritten Diagramm gezeigt. Die Mittenfrequenzen der Entfernungssignale sind skaliert, abhängig von der Entfernungsposition des jeweiligen Ziels und der Azimutfrequenz. Die Skalierung verschiebt die Mittenfrequenzen von Zielen im Fernbereich hin zu höheren Frequenzen und die Mittenfrequenzen von Zielen im Nahbereich hin zu niedrigeren Frequenzen. Die Mittenfrequenzen von Zielen bei der Skalierungsentfernung werden nicht verschoben. Neben der gewünschten Verschiebung der Mittenfrequenzen wird

zusätzlich eine kleine lineare Frequenzmodulation eingefügt, welche nachfolgend wieder entfernt werden muß, um eine Defokussierung in Entfernung zu vermeiden. Im Diagramm sind die Signale nach der Frequenz-Skalierung durchgezogen dargestellt, während die Signale vor der Skalierung gestrichelt gezeichnet sind.

Im nächsten Schritt wird die RVP entfernt, was als Skalierung der Entfernungszeit interpretiert werden kann. Im Diagramm 4 ist die dazu benötigte Funktion gezeigt. Als Ergebnis der RVP-Korrektur in Diagramm 5 treten alle Entfernungssignale an derselben Entfernungszeitposition auf. Durch Multiplikation mit der inversen Frequenz-Skalierungsfunktion von Diagramm 6 wird die kleine lineare Frequenzmodulation, welche durch die Frequenz-Skalierung eingefügt wurde, wieder entfernt. Auf Grund der durchgeführten RVP-Korrektur erfolgt dadurch kein erneutes Einfügen der Zielentfernungsvariation.

Das siebte Diagramm zeigt das Ergebnis nach Frequenz-Skalierung, RVP-Korrektur und inverser Frequenz-Skalierung. Die konstante Frequenz des Signals im Fernbereich ist erhöht, die Frequenz im Nahbereich ist verringert und die Frequenz bei Skalierungsentfernung ist unverändert.

Ein Simulationsbeispiel soll die Zielentfernungskorrektur weiter verdeutlichen. Dazu sind in Bild 5.4 die Signale von neun Punktzielen bei verschiedenen Zwischenstufen der Frequenz-Skalierung gezeigt. Für eine bessere Darstellung zeigen alle Plots die Signale im zweidimensionalen Frequenzbereich, unabhängig vom wirklichen Signalbereich. Der erste Plot zeigt die Rohdaten, welche einen hohen Dopplercentroid aufweisen. Wegen der *Dechirp*-Operation in Entfernung sind die Daten im Entfernungs-Frequenzbereich komprimiert. Die Zielentfernungsänderung ist deutlich zu erkennen. Der zweite Plot zeigt die Signale nach der Multiplikation mit der Frequenz-Skalierungs-Phasenfunktion. Die Zielentfernungsänderung ist komplett korrigiert für die Mittenentfernungsfrequenzen aller Punktziele, aber wegen der kleinen linearen Frequenzmodulation, welche bei der Frequenz-Skalierung eingefügt wurde, sind die Signale defokussiert.

Der dritte Plot zeigt die Signale nach der vollständigen Frequenz-Skalierungs-Operation, also nach Frequenz-Skalierung, Korrektur des RVP-Terms und inverser Frequenz-Skalierung. Die Zielentfernungsänderung ist wieder eingefügt, aber wegen der erfolgten Korrektur des RVP-Terms ist die eingefügte Zielentfernungsänderung in allen Entfernungen gleich der Zielentfernungsänderung der Referenzentfernung.

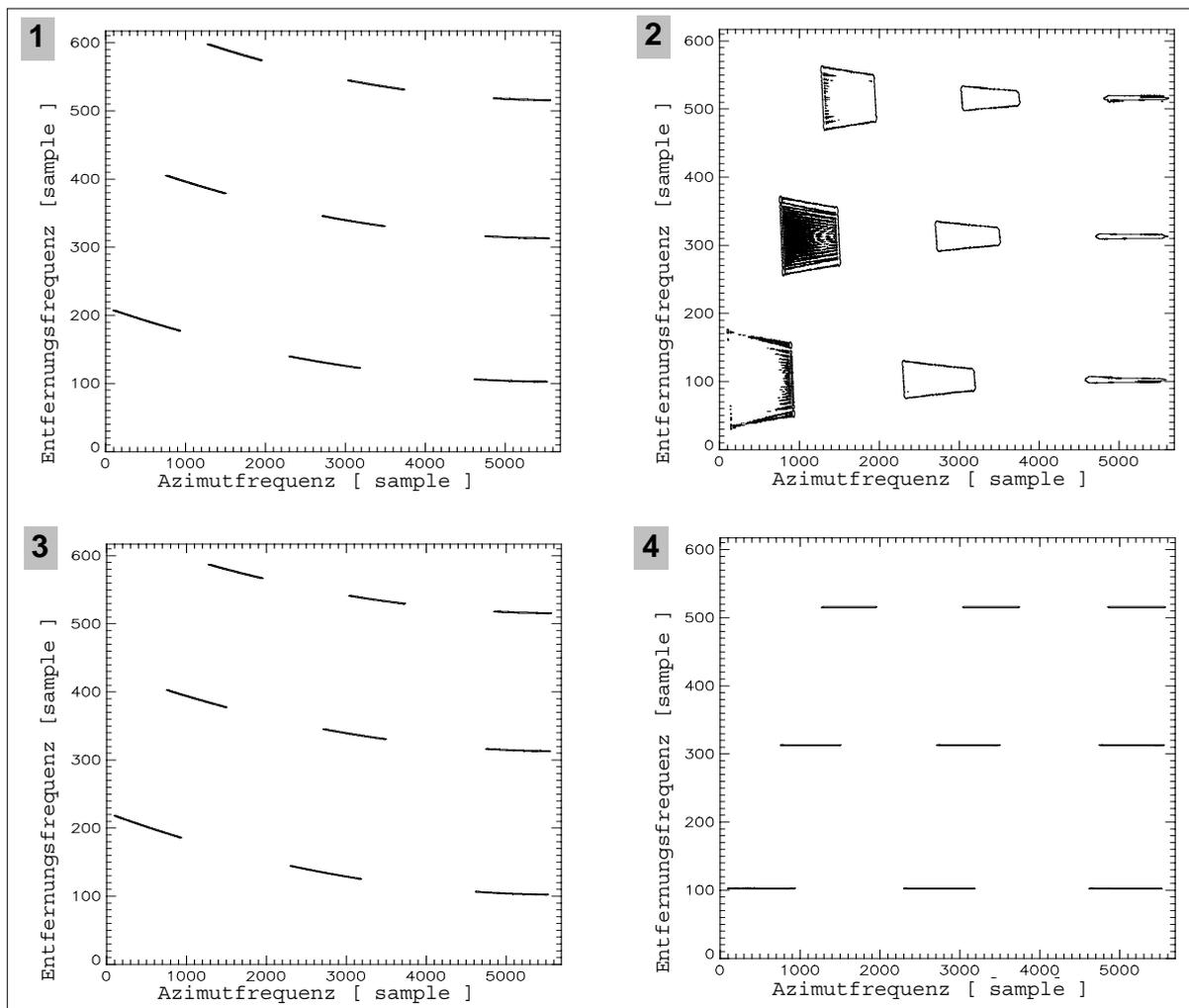


Bild 5.4: Simulationsbeispiel zur Zielentfernungskorrektur durch Frequenz-Skalierung: 1) Signale in den Rohdaten, 2) Signale nach der Multiplikation mit der Frequenz-Skalierungsfunktion, 3) Signale nach kompletter Frequenz-Skalierungs-Operation, 4) Signale nach Zeilenverschiebung zur vollständigen Korrektur der Zielentfernungsänderung

Im vierten Plot sind die Signale nach der Zeilen-Verschiebung zur vollständigen Korrektur der Zielentfernungsänderung gezeigt. Diese ist vollständig korrigiert und es ist keine Defokussierung mehr vorhanden.

5.1.10 Blockdiagramm der Entfernungsverarbeitung

Die Verarbeitung in Entfernung beim Frequenz-Skalierungs-Verfahren ist im Blockschaltbild von Bild 5.5 zusammengefasst, wobei die weniger wichtigen Funktionen zur Amplitudenkorrektur nicht explizit enthalten sind. Die Verarbeitung beginnt mit einer Transformation der Rohdaten in den Entfernungs-Dopplerbereich. Dort beginnt die Frequenz-Skalierung durch Multiplikation mit der Frequenz-Skalierungsfunktion aus Gleichung (5.25). An dieser Stelle wird auch eine erste Amplitudenkorrektur durchgeführt. Nach einer FFT in Entfernung erfolgt die RVP-Korrektur aus Gleichung

(5.26), bei welcher die entfernungsabhängige Zeitverschiebung in Entfernung ausgeglichen wird. Nach einer inversen FFT in Entfernung erfolgt die inverse Frequenz-Skalierung durch Gleichung (5.27), welche den ersten Schritt der Zielentfernungsänderung abschließt.

Die sekundäre Entfernungskompression wird im Anschluß an die inverse Frequenz-Skalierung durchgeführt, da das Signal an dieser Stelle bereits in der Entfernungsfrequenz vollständig skaliert ist, sich aber noch im Entfernungs-Dopplerbereich befindet. Als nächstes erfolgt der zweite Schritt der Zielentfernungskorrektur, die Zeilen-Verschiebung in Entfernungsrichtung durch die Phasenmultiplikation aus Gleichung (5.32). Nach einer weiteren Entfernungs-FFT erfolgt die abschließende Phasenkorrektur durch die Phasenfunktion von Gleichung (5.36), welche auch eine Amplitudenkorrektur mit einschließt. Am Ende der Entfernungsverarbeitung liegt das entfernungskomprimierte Signal ohne Zielentfernungsänderung in der Form von Gleichung (5.37) vor und stellt den Ausgangspunkt für die Verarbeitung in Azimut dar.

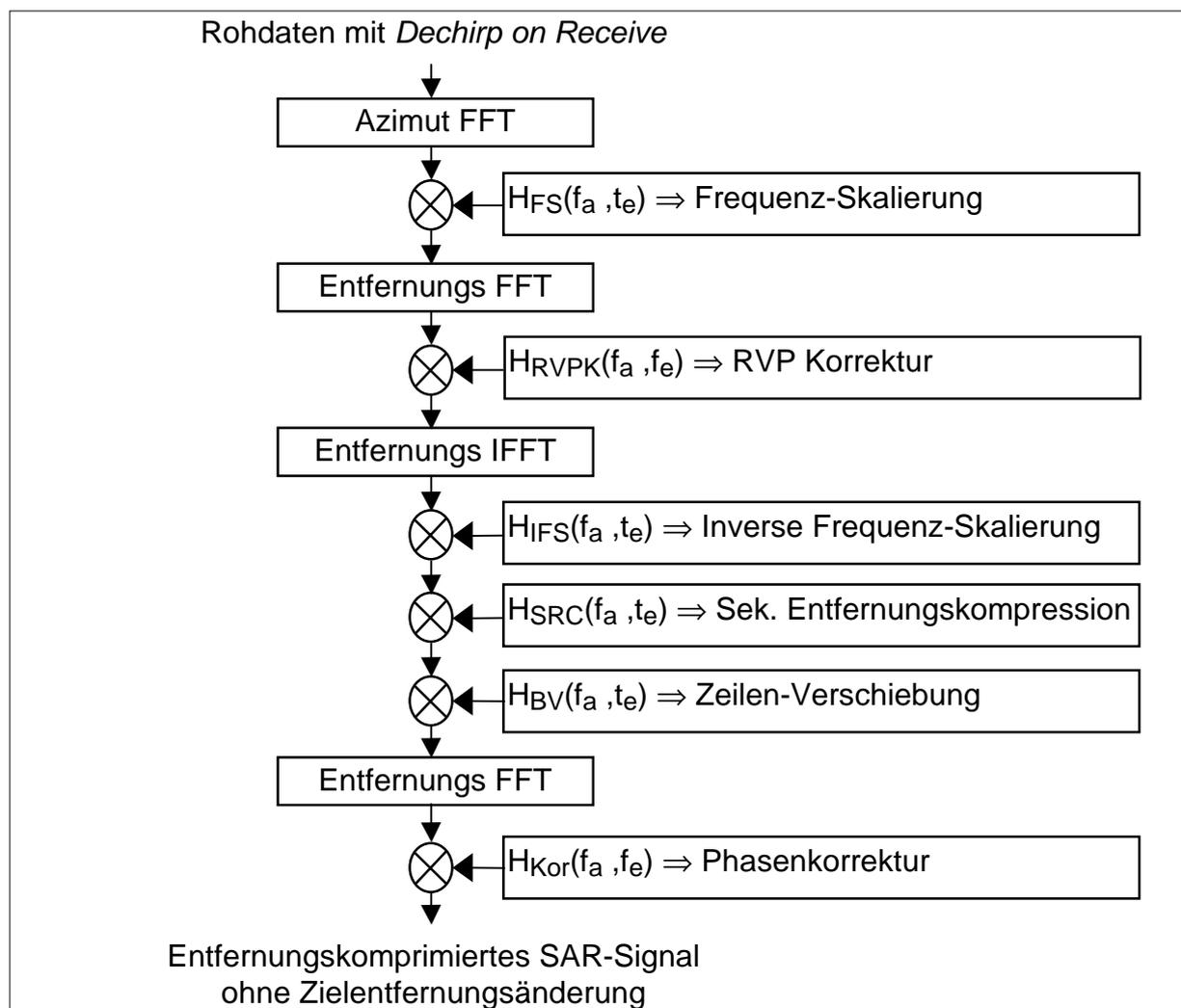


Bild 5.5: Blockdiagramm der Entfernungsverarbeitung

5.2 Verarbeitung in Azimut

Die Azimutverarbeitung wird zunächst ohne die Anwendung von Subaperturen entwickelt. Kapitel 5.3 erweitert die Verarbeitung dann auf Subaperturen. Am Anfang dieses Kapitels findet sich ein Überblick über die Azimutverarbeitung. Aufbauend auf den Ergebnissen von Kapitel 3.2.3.1 wird das SPECAN-Verfahren in Kombination mit der Azimut-Skalierung für *Spotlight*-Daten entwickelt. Dabei erfolgt die genaue Beschreibung einer Verschiebung der Azimutzeit zur Minimierung der, für die Azimut-Skalierung notwendigen, Erweiterung der Azimutdimension. Zur eindeutigen Darstellung der Bilddaten in Azimut ohne Erhöhung der Abtastfrequenz auch für hohe Squintwinkel erfolgt die Definition einer Verschiebung der Azimutfrequenz.

5.2.1 Blockdiagramm und Gleichungen der Azimutverarbeitung

Dieses Kapitel gibt einen Überblick über die Azimutverarbeitung ohne Subaperturen. In Bild 5.6 ist das Blockdiagramm der Azimutverarbeitung ohne Subaperturen gezeigt.

Ausgangspunkt ist das Signal eines Punktziels nach der Entfernungsverarbeitung von Gleichung (5.37). In der bisherigen Arbeit wurde das Signal eines Punktziels bei der Entfernung r_o und an der Azimutposition $t_a=0$ betrachtet, da dies zur Ableitung der Entfernungsverarbeitung ausreichend war. Für die Ableitung der Azimutverarbeitung wird im folgenden ein allgemeineres Punktziel an der Azimutposition $t_a=t_{a,o}$ angenommen. Damit wird Gleichung (2.10), welche die Entfernungsvariation beschreibt zu Gleichung (5.38) und die Gleichung für ein Punktziel in der Entfernung r_o und an der Azimutposition $t_a=t_{a,o}$ nach der Entfernungsverarbeitung wird zu Gleichung (5.39). In Gleichung (5.38) wurde die Verschiebung auf die Punktzielposition $t_a=t_{a,o}$ eingefügt und in Gleichung (5.39) ist die dazu korrespondierende lineare Phasenfunktion der Azimutfrequenz eingefügt.

$$r(t_a, r_o) = \sqrt{r_o^2 + V^2 \cdot (t_a - t_{a,o})^2} \quad (5.38)$$

$$S\left(f_a, \frac{f_e}{\beta}, r_o\right) = C \cdot \exp\left[-j \cdot \frac{4\pi \cdot r_o \cdot \beta}{\lambda}\right] \cdot \exp[-j \cdot 2\pi \cdot f_a \cdot t_{a,o}] \cdot \text{si}\left[\pi \cdot \frac{T_P}{\beta} \cdot \left(f_e + \frac{2 \cdot k_e}{c_o} \cdot (r_o - r_{ref})\right)\right] \quad (5.39)$$

Die Phasenfunktion zur Azimut-Skalierung $H_{AS}(f_a, r_o, r_{scl})$ wurde bereits in Gleichung (3.26) beim *Extended Chirp Scaling*-Verfahren für *ScanSAR* entwickelt. Die Gleichung ist hier zur Vollständigkeit nochmals in (5.40) angegeben. Wie in Kapitel 3.2.3 beschrieben, transformiert die Azimut-Skalierung die mit der Entfernung variierende, durch eine Wurzelfunktion beschriebene Phasenhistorie in eine mit der Entfernung konstante, rein quadratische Phasenhistorie.

$$H_{AS}(f_a, r_o, r_{scl}) = \exp\left[j \cdot \frac{4\pi}{\lambda} \cdot r_o \cdot (\beta(f_a) - 1)\right] \cdot \exp\left[-\frac{j \cdot \pi}{k_{a,scl}} f_a^2\right] \quad (5.40)$$

In Gleichung (5.40) bezeichnet $k_{a,scl}$ die Skalierungs-Dopplerrate, welche eine entfernungsunabhängige, lineare Frequenzmodulation beschreibt. Dabei ist r_{scl} die zur Skalierungs-Dopplerrate aus Gleichung (5.41) korrespondierende Entfernung.

$$k_{a,scl} = -\frac{2 \cdot V^2}{\lambda \cdot r_{scl}} \quad (5.41)$$

Um die für die Azimut-Skalierung erforderliche Erweiterung der Azimutdimension im Zeitbereich möglichst gering zu halten, wird im nächsten Schritt eine von der Entfernung abhängige Verschiebung in Azimut $t_v(r_o)$ durchgeführt. Die Verschiebung bewirkt eine symmetrische Anordnung der benötigten Erweiterung um den Datenblock.

Die Verschiebung der Azimutzeit wird durch lineare Phasenmultiplikation mit $H_{AZV}(f_a, r_o, r_{scl})$ im Azimutfrequenzbereich erreicht. Die Herleitung der Verschiebung t_v befindet sich in Kapitel 5.2.2.

$$H_{AZV}(f_a, r_o, r_{scl}) = \exp[-j \cdot 2\pi \cdot t_v(r_o, r_{scl}) \cdot f_a] \quad (5.42)$$

Nach der inversen Fourier-Transformation in Azimut von Bild 5.6 ergibt sich das Signal eines Punktziels an der Position $(t_{a,o}, r_o)$ zu Gleichung (5.43).

$$S(t_a, f_e, t_{a,o}, r_o) = C \cdot \exp\left[-j \cdot \frac{4\pi}{\lambda} \cdot r_o\right] \cdot \left\{ \text{si}\left[\pi \cdot \frac{T_p}{\beta} \cdot \left(f_e + \frac{2 \cdot k_e}{c_o} \cdot (r_o - r_{ref})\right)\right] \cdot \exp\left[j \cdot \pi \cdot k_{a,scl} \cdot (t_a - t_{a,o})^2\right] \right\} * \delta(t_a - t_v(r_o)) \quad (5.43)$$

Im nächsten Schritt erfolgt im Azimutzeitbereich die *Deramping*-Operation. Mit *Deramping* wird das Entfernen der nach der Azimut-Skalierung exakt linearen und mit Entfernung konstanten Frequenzmodulation bezeichnet. *Deramping* und *Dechirp on Receive* in Entfernungsrichtung sind im Prinzip gleiche Operationen. Beim *Deramping* wird das Signal mit der linear frequenzmodulierten Phasenfunktion aus Gleichung (5.44) mit inverser Skalierungs-Dopplerrate multipliziert. Wegen der erfolgten Azimut-Skalierung ist diese Dopplerrate keine Funktion der Entfernung.

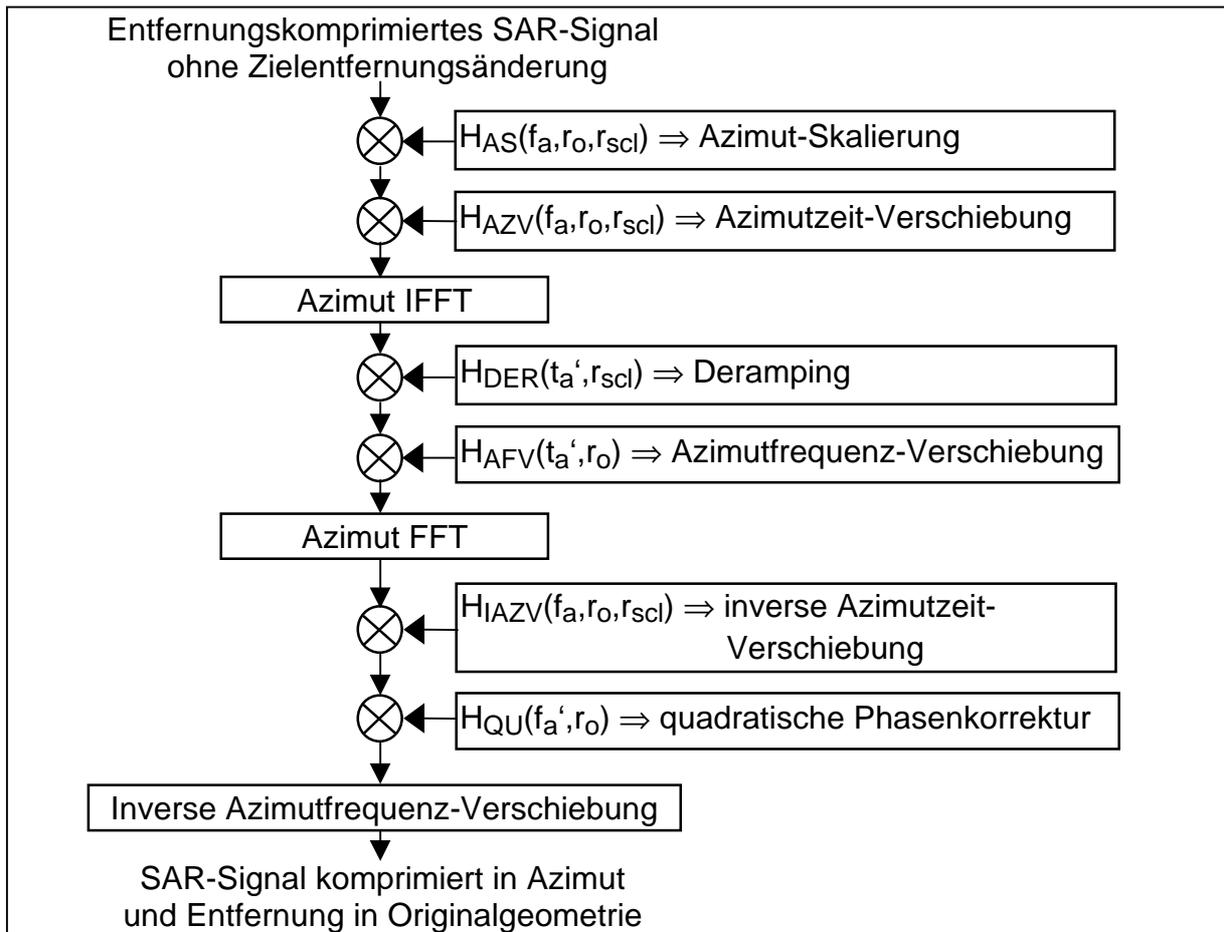


Bild 5.6: Blockdiagramm der Azimutverarbeitung ohne Subaperturen

$$H_{\text{DER}}(t'_a, r_{\text{scl}}) = \exp[-j \cdot \pi \cdot k_{\text{a,scl}} \cdot t_a'^2] \quad (5.44)$$

Die zusammen mit der Azimut-Skalierung erfolgende entfernungsabhängige Azimutzeit-Verschiebung durch die Funktion $H_{\text{AZV}}(f_a, r_o, r_{\text{scl}})$ aus Gleichung (5.42) wird bei der Generierung der Azimutzeit t'_a für das *Deramping* in Gleichung (5.45) berücksichtigt. Die Herleitung der benötigten Erweiterung der Azimutzeitdimension T_{ext} erfolgt in Kapitel 5.2.2.3.

$$t'_a(r_o) = t_a - t_v(r_o) \quad ; \quad t_{a,start} - \frac{T_{ext}}{2} \leq t_a \leq t_{a,ende} + \frac{T_{ext}}{2} \quad (5.45)$$

Zur eindeutigen Darstellung der Bilddaten in der Azimutdimension ohne Erhöhung der Abtastfrequenz auch für hohe Squintwinkel wird zusammen mit der *Deramping*-Multiplikation eine Verschiebung der Azimutfrequenz durchgeführt. Die Notwendigkeit und die Berechnung der Frequenzverschiebung $F_v(r_o)$ werden in Kapitel 5.2.3 gezeigt. Die Phasenummultiplikation zur Frequenzverschiebung ist in Gleichung (5.46) gegeben.

$$H_{AFV}(r_o) = \exp[j \cdot 2\pi \cdot F_v(r_o) \cdot t'_a] \quad (5.46)$$

Nach der letzten Azimut-FFT erfolgt die Korrektur des durch die Azimutzeit-Verschiebung von Gleichung (5.42) eingefügten Phasenterms. Die dazu benötigte Phasenummultiplikation H_{IAZV} ist konjugiert komplex zur Phasenfunktion H_{AZV} und in Gleichung (5.47) gegeben. Auf Grund der SPECAN-Verarbeitung in Azimut ist auch noch eine quadratische Phasenkorrektur notwendig. Dies wurde bereits in Kapitel 2.9.2 allgemein für eine SPECAN-Verarbeitung hergeleitet. Dem ebenfalls in Kapitel 2.9.2 abgeleiteten linearen Phasenterm entspricht Gleichung (5.47). Die quadratische Phasenkorrektur H_{QU} ist mit Gleichung (5.48) gegeben und stellt eine RVP-Korrektur in Azimutrichtung dar. In den beiden Ausdrücken für H_{IAZV} und H_{QU} muß die vorher durchgeführte Azimutfrequenzverschiebung um $F_v(r_o)$ berücksichtigt werden.

$$H_{IAZV}(f_a, r_o, r_{scl}) = \exp [+ j \cdot 2\pi \cdot t_v(r_o) \cdot (f_a - F_v(r_o))] \quad (5.47)$$

$$H_{QU}(f_a, r_o) = \exp \left[- j \cdot 2\pi \cdot \frac{(f_a - F_v(r_o))^2}{k_{a,scl}} \right] \quad (5.48)$$

Im letzten Schritt im Blockschaltbild von Bild 5.6 wird die frequenzverschobene Geometrie durch eine inverse Azimutfrequenz-Verschiebung wieder auf die Originalgeometrie gebracht. Dies erfolgt durch Verschieben von ganzen Abtastwerten der Azimutfrequenz. Die Azimutdimension des Datenblocks muß dabei vor der Verschiebungsoperation durch Anfügen von Nullen so vergrößert werden, daß eine zyklische Verschiebung vermieden wird. Um keinen Fehler durch die nur um ganze Abtastwerte mögliche Verschiebungsoperation einzufügen, wird die Frequenzverschiebung $F_v(r_o)$ in Gleichung (5.46) auf ganze Abtastwerte der Azimutfrequenz

($\text{PRF}/N_{\text{FFT},a}$) gerundet. Dabei ist $N_{\text{FFT},a}$ die Punktzahl in Azimut vor der letzten Azimut-FFT. Nach der kompletten Verarbeitung in Entfernung und Azimut stellt sich das vollständig verarbeitete Punktziel durch Gleichung (5.49) dar.

$$S(f_a, f_e, t_{a,o}, r_o) = C \cdot \exp \left[-j \cdot \frac{4\pi}{\lambda} \cdot r_o \right] \cdot \text{si} \left[\pi \cdot \frac{T_P}{\beta} \cdot \left(f_e + \frac{2 \cdot k_e}{c_o} \cdot (r_o - r_{\text{ref}}) \right) \right] \cdot \text{si} \left[\pi \cdot T_{\text{Spot}} \cdot (f_a + k_{a,\text{scl}} \cdot t_{a,o}) \right] \quad (5.49)$$

5.2.2 Verschiebung der Azimutzeit

Die Grundzüge der Azimut-Skalierung wurden in Kapitel 3.2.3 entwickelt. Für die *Spotlight*-Verarbeitung zeigt dieses Kapitel die genaue Herleitung der Verschiebung der Azimutzeit. Dazu wird zuerst die Azimutzeitausdehnung der Signale einzelner Punktziele und dann die Ausdehnung einer ganzen Szene bei der Azimut-Skalierung untersucht. Daraus läßt sich der Ausdruck für die Azimutzeit-Verschiebung zur Minimierung der Erweiterung der Azimutzeitdimension entwickeln. Schließlich wird eine weitere Verringerung der Azimutzeitdimension durch eine optimierte Wahl der Skalierungsentfernung bei der Azimut-Skalierung durchgeführt.

5.2.2.1 Azimutzeit-Verschiebung der Signale einzelner Punktziele

In Bild 5.7 ist ein einführendes Beispiel zur Ableitung der Azimutzeit-Verschiebung $t_v(r_o)$ aus Gleichung (5.42) gegeben. Das obere Diagramm zeigt das Signal eines Punktziels im Fernbereich und das untere das Signal eines Punktziels im Nahbereich. Die Skalierungsentfernung r_{scl} befindet sich zwischen Fern- und Nahbereich.

Das obere Diagramm zeigt das Azimutsignal des Punktziels bei $t_{a,o}=0$ s im Fernbereich als dicke, durchgezogene Linie. Das Azimutsignal hat die Dauer der *Spotlight*-Apertur T_{spot} und die Zeit t_c bezeichnet die Verschiebung des Phasenzentrums des Signals gegenüber der Mitte der *Spotlight*-Apertur. Diese Verschiebung wurde in Gleichung (4.15) definiert. Über den in den Gleichungen (4.9) und (4.10) durch eine Wurzelfunktion beschriebenen Zusammenhang zwischen Azimutzeit und –frequenz entspricht der Zeitdauer T_{spot} eine Bandbreite B_a des Azimutsignals.

Da die Azimut-Skalierung durch eine Phasenmultiplikation im Azimutfrequenzbereich durchgeführt wird, bleibt die Bandbreite B_a unverändert. Die Positionen der Phasenzentren der Azimutsignale entsprechen den Punktzielpositionen in Azimut und bleiben ebenfalls unverändert, da zu diesen Positionen die Azimutfrequenz $f_a = 0$ Hz

korrespondiert, und die Azimut-Skalierungsfunktion von Gleichung (5.40) für diese Frequenz zu 1 wird. Die zeitliche Mittenposition des Azimutsignals nach der Azimut-Skalierung t_c' ist gegenüber t_c verschoben.

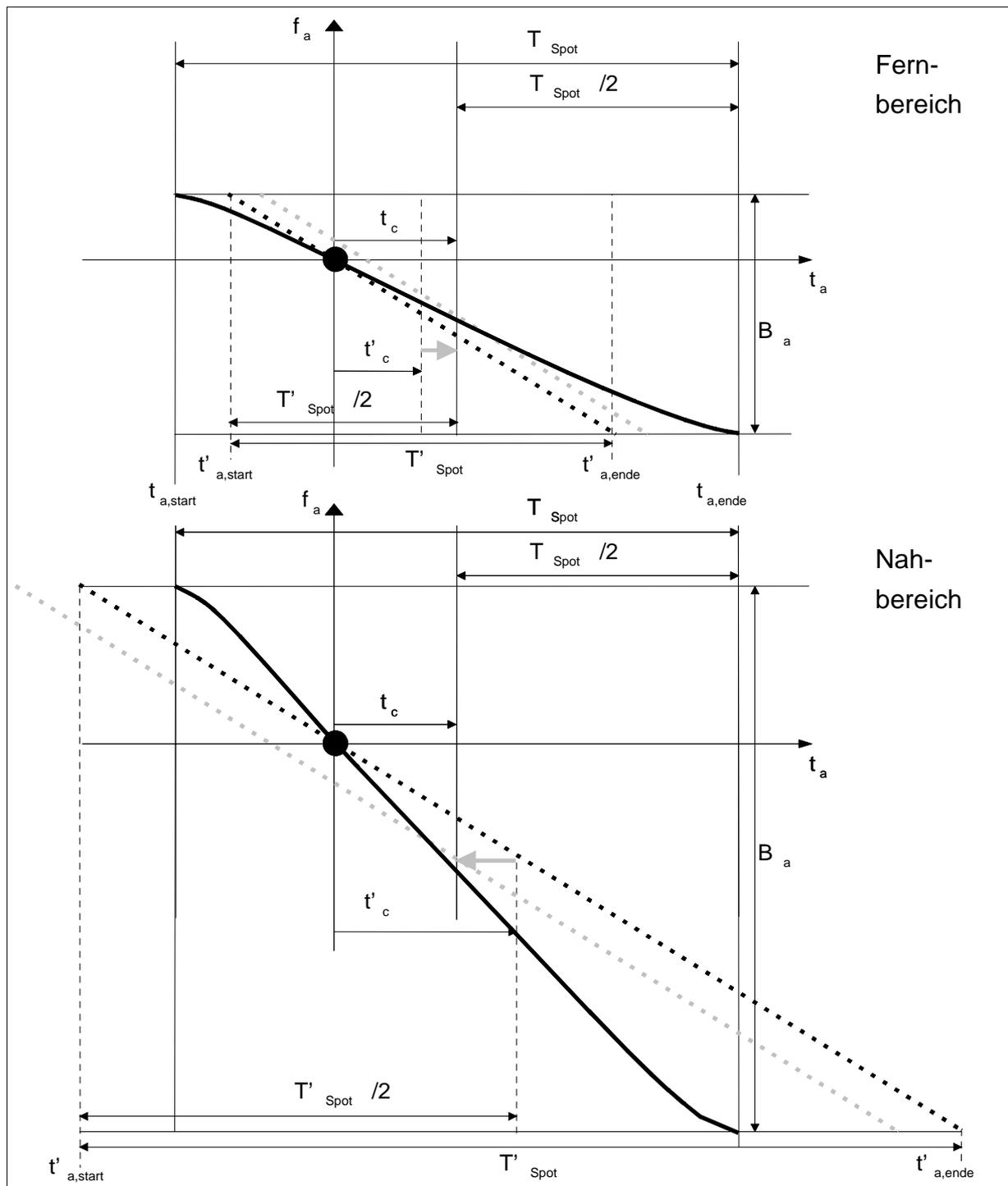


Bild 5.7: Azimutzeit-Verschiebung der Signale einzelner Punktziele im Fernbereich (oben) und im Nahbereich (unten): die Signale vor der Azimut-Skalierung sind durchgezogen dargestellt, die Signale nach Azimut-Skalierung ohne Azimutzeitverschiebung sind gepunktet und die Signale nach Azimut-Skalierung mit Azimutzeitverschiebung sind grau gepunktet dargestellt

Mit einer durch den grauen Pfeil angedeuteten Verschiebung um die Differenz zwischen t_c und t'_c , kann das Signal nach der Skalierung wieder um die Mittenposition des Signals vor der Skalierung zentriert werden. Die Zentrierung erlaubt eine symmetrische Erweiterung der Azimutdimension für die Azimut-Skalierung. Das Azimutsignal nach der Azimut-Skalierung ist schwarz gepunktet ohne Verschiebung gezeichnet, während das verschobene Signal grau gepunktet gezeichnet ist. Die Dopplerrate hat sich erhöht und das Azimutsignal erscheint gestaucht, da das Ziel im Fernbereich liegt. Der Zusammenhang zwischen Azimutfrequenz und -zeit ist jetzt exakt linear, auf Grund der eingefügten, exakt quadratischen Phasenmodulation.

In der unteren Hälfte von Bild 5.7 ist das Azimutsignal eines Punktziels im Nahbereich bei $t_{a,0} = 0$ s dargestellt. Das Signal nach der Azimut-Skalierung ist zeitlich ausgedehnt und die neue Mittenposition t'_c ist ebenfalls verschoben. Wieder kann durch die mit dem grauen Pfeil angedeutete Verschiebung um die Differenz zwischen t_c und t'_c das Signal um die Mittenposition vor der Skalierung zentriert werden. Die Mittenposition des Azimutsignals eines Zieles nach der Azimut-Skalierung kann mit Gleichung (5.50) berechnet werden.

$$t'_c = \frac{t'_{a,start} + t'_{a,ende}}{2} \quad (5.50)$$

Die Ableitung der Formeln zur Berechnung der Zeitpunkte $t'_{a,start}$ und $t'_{a,ende}$ ist in Bild 5.8 gezeigt. Für ein Ziel an der Position $(t_{a,0}, r_0)$ gilt der Zusammenhang zwischen Azimutzeit und -frequenz aus Gleichung (5.51), welcher entweder durch eine Verschiebung des Ausdrucks von Gleichung (2.15) um die Azimutzeitposition des Ziels $t_{a,0}$ oder aus Gleichung (4.9) durch Ersetzen von $t_{a,start}$ durch t_a erhalten werden kann.

$$f_a(t_a, t_{a,0}, r_0) = g(t_a) = -\frac{2 \cdot V^2}{\lambda} \cdot \frac{(t_a - t_{a,0})}{\sqrt{r_0^2 + V^2 \cdot (t_a - t_{a,0})^2}} \quad (5.51)$$

Für eine beliebige Azimutzeitposition t_a zwischen $t_{a,start}$ und $t_{a,ende}$ kann mit Gleichung (5.51) die dazugehörige Azimutfrequenz f_a berechnet werden. Dies ist in Bild 5.8 durch den nach unten weisenden Pfeil an der Position t_a gezeigt. Da sich der Bereich der Azimutfrequenzen bei der Azimut-Skalierung nicht verschiebt, kann durch Einsetzen von f_a in Gleichung (5.52), welche den Zusammenhang zwischen Azimutfrequenz und -zeit nach der Azimut-Skalierung beschreibt, die neue Azimut-

zeitposition t_a' nach der Skalierung berechnet werden. Dies ist in Bild 5.8 durch den nach oben weisenden Pfeil an der Position t_a' gezeigt. Der Zusammenhang zwischen einer beliebigen Azimutzeit t_a vor und t_a' nach der Skalierung für ein Punktziel $(t_{a,o}, r_o)$ ergibt sich damit zu Gleichung (5.53).

$$t_a'(f_a, t_{a,o}, r_{scl}) = h(f_a) = t_{a,o} - \frac{\lambda \cdot r_{scl}}{2 \cdot V^2} \cdot f_a \quad (5.52)$$

$$t_a'(t_{a,o}, r_o) = t_{a,o} + \frac{r_{scl} \cdot (t_a - t_{a,o})}{\sqrt{r_o^2 + V^2 \cdot (t_a - t_{a,o})^2}} \quad (5.53)$$

Die Azimutzeitpositionen $t_{a,start}$ und $t_{a,ende}$ für ein bestimmtes Punktziel $(t_{a,o}, r_o)$ können somit durch Einsetzen von $t_{a,start}$ und $t_{a,ende}$ für t_a in Gleichung (5.53) berechnet werden.

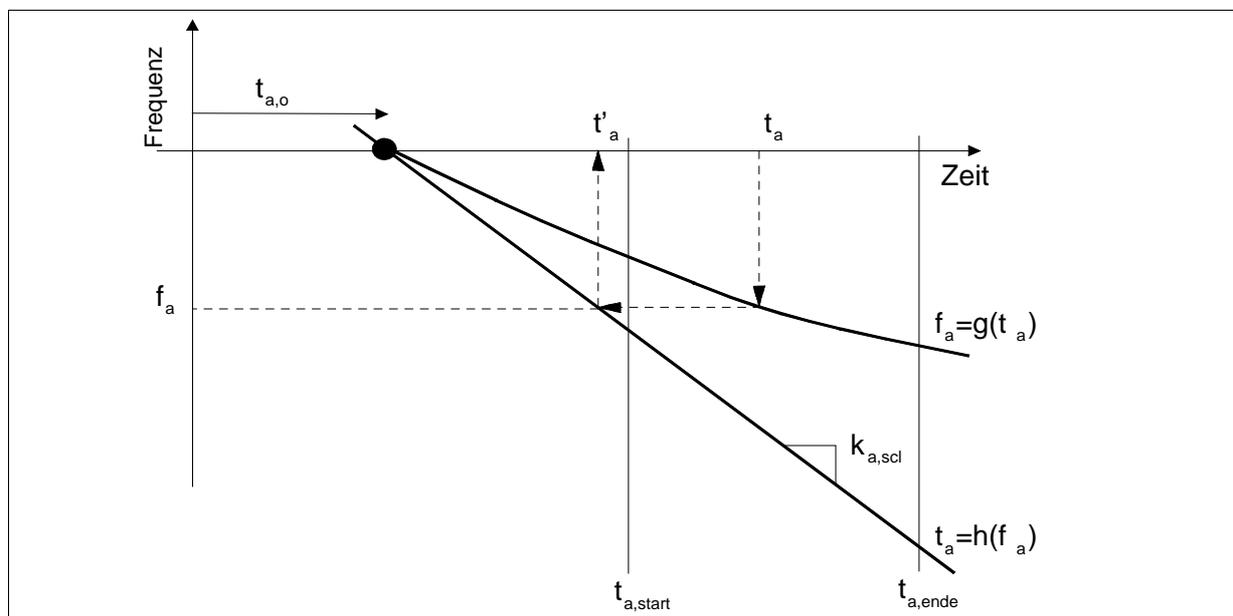


Bild 5.8: Graphische Darstellung des Zusammenhangs von Gleichung (5.53) zwischen einer beliebigen Azimutzeitposition t_a vor und t_a' nach der Azimut-Skalierung

5.2.2.2 Beispiel zur Zeitverschiebung der Signale einzelner Punktziele

Das folgende Simulationsbeispiel zeigt die in Entfernungsrichtung komprimierten Azimutsignale von drei Punktzielen im Entfernungsfrequenz-Azimutzeitbereich vor einer Azimut-Skalierung in Bild 5.9 links sowie nach einer Azimut-Skalierung ohne die Verschiebung der Azimutzeit aus Gleichung (5.42) in Bild 5.9 rechts. Die gleichen Signale nach einer Azimut-Skalierung mit Verschiebung der Azimutzeit sind in Bild 5.10 gezeigt. Die Ziele befinden sich im Fernbereich bei 4500 m, bei der Skalierungsentfernung von 4000 m und im Nahbereich bei 3500 m. Die wichtigsten Simulationsparameter sind in Tabelle 5.1 gegeben.

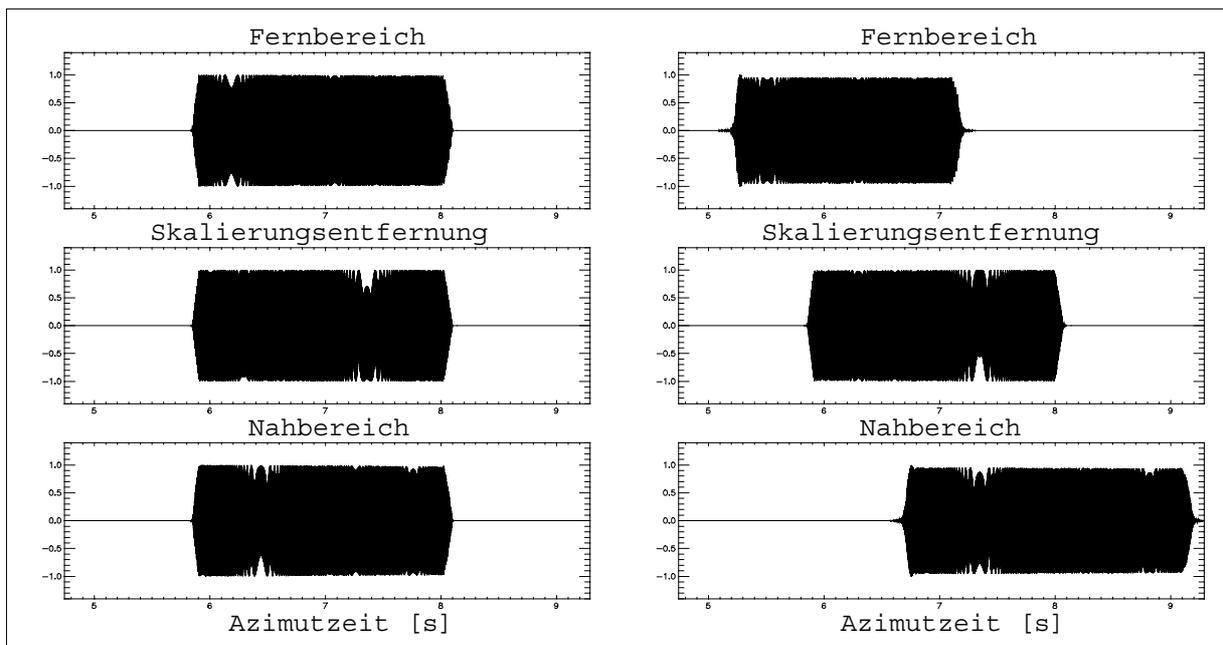


Bild 5.9: Signale vor (links) und nach (rechts) Azimut-Skalierung ohne Azimutzeit-Verschiebung mit deutlich erkennbarem großen Azimutzeitbedarf der Signale im rechten Bild

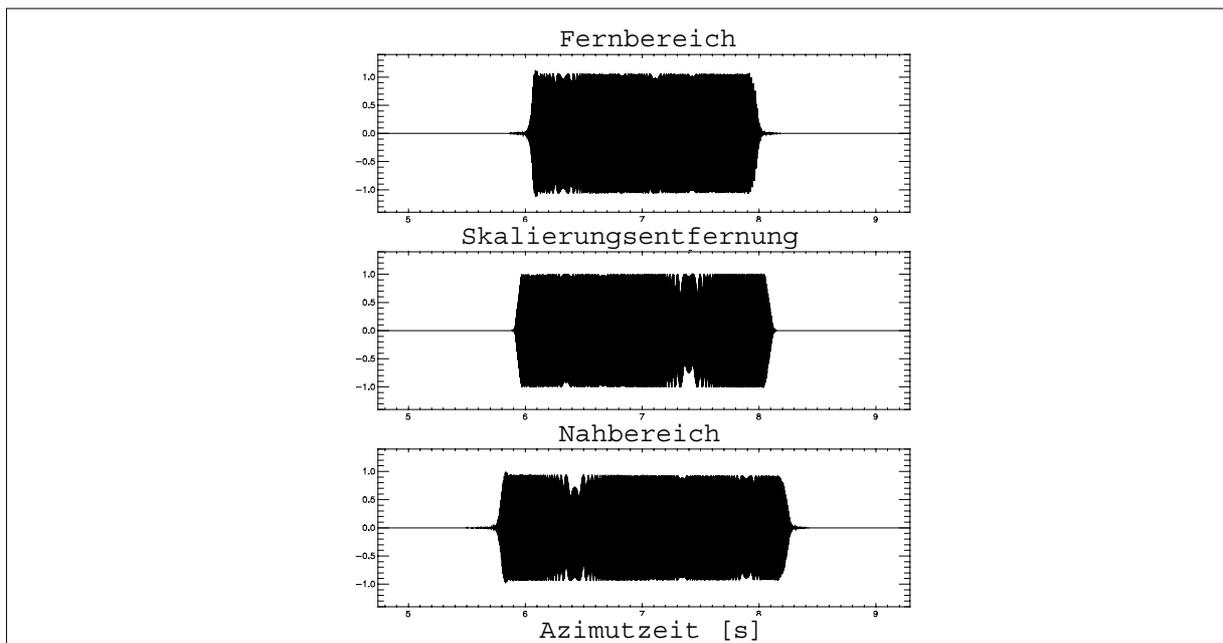


Bild 5.10: Signale nach Azimut-Skalierung mit Azimutzeit-Verschiebung, wodurch die mittlere Azimutzeitposition der Signale durch die Azimut-Skalierung nicht verändert wird

Skalierungsentfernung	4000m
Geschwindigkeit des Trägers	70 m/s
Wellenlänge	0.03 m
Länge der <i>Spotlight</i> -Apertur	2.2 s

Tabelle 5.1: Wichtige Simulationsparameter des Beispiels zur Azimutzeit-Verschiebung

Beim Vergleich der Bilder mit den skalierten Signalen ohne und mit Azimutzeit-Verschiebung erkennt man, daß für die Signale ohne Azimutzeit-Verschiebung eine wesentlich größere Erweiterung der Azimutdimension notwendig ist.

5.2.2.3 Azimutzeit-Verschiebung für eine ganze Szene

Um Rückfaltungseffekte zu vermeiden, muß die Azimutzeit vor der Azimut-Skalierung so ausgedehnt werden, daß das Signal im Azimutzeitbereich nach der Azimut-Skalierung immer noch eindeutig dargestellt ist. Um eine minimale Erweiterung der Azimutdimension zu erreichen, ist es erforderlich, das skalierte Signal so zu verschieben, daß es wieder symmetrisch zur Mitte des unskalierten Signals, also zu t_c ist. Dabei müssen alle unterschiedlichen Verschiebungen für alle beleuchteten Punktziele berücksichtigt werden.

Die Azimutposition der ersten $t_{b,a}(r_o)$ und der letzten $t_{b,e}(r_o)$, auch nur teilweise beleuchteten Ziele sind in Gleichung (4.13) und (4.14) gegeben. Mit (5.53) kann daraus die minimale Azimutzeitposition $t'_{a,min}$ aller Azimutsignale einer Entfernung nach der Azimut-Skalierung mit Gleichung (5.54) berechnet werden. Die maximale Azimutzeitposition der Azimutsignale aller beleuchteten Ziele nach der Azimut-Skalierung ergibt sich analog dazu aus Gleichung (5.55).

$$t'_{a,min}(r_o) = \text{MIN} \left[t_{b,a}(r_o) + \frac{r_{scl} \cdot (t_{a,start} - t_{b,a}(r_o))}{\sqrt{r_o^2 + V^2 \cdot (t_{a,start} - t_{b,a}(r_o))^2}}; t_{b,e}(r_o) + \frac{r_{scl} \cdot (t_{a,start} - t_{b,e}(r_o))}{\sqrt{r_o^2 + V^2 \cdot (t_{a,start} - t_{b,e}(r_o))^2}} \right] \quad (5.54)$$

$$t'_{a,max}(r_o) = \text{MAX} \left[t_{b,a}(r_o) + \frac{r_{scl} \cdot (t_{a,ende} - t_{b,a}(r_o))}{\sqrt{r_o^2 + V^2 \cdot (t_{a,ende} - t_{b,a}(r_o))^2}}; t_{b,e}(r_o) + \frac{r_{scl} \cdot (t_{a,ende} - t_{b,e}(r_o))}{\sqrt{r_o^2 + V^2 \cdot (t_{a,ende} - t_{b,e}(r_o))^2}} \right] \quad (5.55)$$

Die benötigte Verschiebung der Azimutzeit $t_v(r_o)$ für Gleichung (5.42) ergibt sich schließlich zu Gleichung (5.56).

$$t_v(r_o) = \frac{t'_{a,max}(r_o) + t'_{a,min}(r_o)}{2} - \frac{t_{a,start} + t_{a,ende}}{2} \quad (5.56)$$

Nach dieser Verschiebung kann die Erweiterung der Azimutdimension symmetrisch zum Datenblock erfolgen. Die mindestens benötigte Erweiterung für eine Entfernung

r_0 ergibt sich aus Gleichung (5.57). Wegen der Blockprozessierung muß der ganze prozessierte Datenblock um den größten Wert von $T_{\text{ext}}(r_0)$ erweitert werden.

$$T_{\text{ext}}(r_0) = (t'_{a,\text{max}}(r_0) - t'_{a,\text{min}}(r_0)) - (t_{a,\text{ende}} - t_{a,\text{start}}) \quad (5.57)$$

Durch das Einsetzen des ersten $t_{b,a}(r_0)$ und des letzten $t_{b,e}(r_0)$, auch nur teilweise beleuchteten Ziels in Gleichung (5.53), ist die Erweiterung $T_{\text{ext}}(r_0)$ auf jeden Fall ausreichend, da alle beleuchteten, auch die nur teilweise beleuchteten Ziele als vollständig beleuchtet angenommen werden.

5.2.2.4 Beispiel zur Verschiebung der Azimutzeit für eine ganze Szene

Das hier angeführte Simulationsbeispiel besteht aus den Punktzielen von Bild 5.11 links. Beide Bilder zeigen für die in Tabelle 5.2 angegebenen Parameter den Bereich gültiger Ziele zwischen den beiden durchgezogenen Linien sowie den Bereich aller beleuchteten Ziele zwischen den beiden gepunkteten Linien.

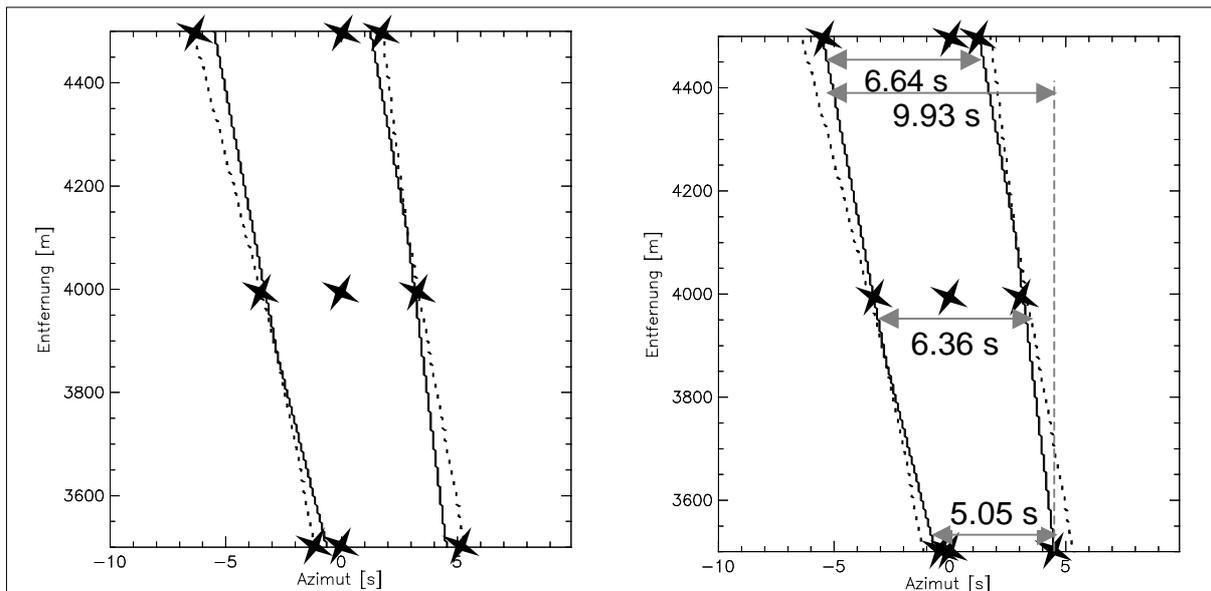


Bild 5.11: Beispielszene mit neun simulierten Punktzielen innerhalb des beleuchteten Bereichs (links) und innerhalb des gültigen Bereichs (rechts)

Nahbereich	3500 m
Skalierungsentfernung/Entfernung Szenenzentrum	4000 m
Fernbereich	4500 m
Squintwinkel am Beleuchtungsanfang Ψ_{start}	14°
Squintwinkel am Beleuchtungsende Ψ_{ende}	19°
Azimutöffnungswinkel θ_a	6°
Geschwindigkeit	70 m/s
Wellenlänge	0.03 m

Tabelle 5.2: Parameter für Beispielszene mit neuen simulierten Punktzielen

Die Ziele im linken Bild sind so angeordnet, daß je ein Ziel am Anfang und am Ende des beleuchteten Bereichs und an der Azimutzeitposition $t_a=0$ s des Szenenzentrums liegt, im Nah- und Fernbereich sowie bei der Entfernung des Szenenzentrums.

Für die in Bild 5.11 links beschriebene Beispielgeometrie zeigt Bild 5.12 die Azimutzeit-Verschiebung und die benötigte Erweiterung der Azimutdimension in Abhängigkeit von der Entfernung. Die Skalierungsentfernung wurde zur Entfernung des Zentrums, also zu 4000 m gewählt. In allen Diagrammen ist nach rechts die Entfernung und nach oben die Azimutzeit aufgetragen.

Im linken oberen Diagramm befinden sich zwischen den beiden klein gestrichelten, horizontalen Linien die Positionen aller Azimutsignale vor der Azimut-Skalierung. Die Position der Signale nach der Azimut-Skalierung ist durch die schrägen Linien beschrieben. Dabei befinden sich die Signale der Ziele am Anfang des beleuchteten Bereichs innerhalb der durchgezogenen Linien und die Signale von Zielen am Ende des beleuchteten Bereichs zwischen den groß gestrichelten Linien. Ohne Azimutzeit-Verschiebung müßte eine Erweiterung auf das Zeitintervall [11 s, 21 s] erfolgen.

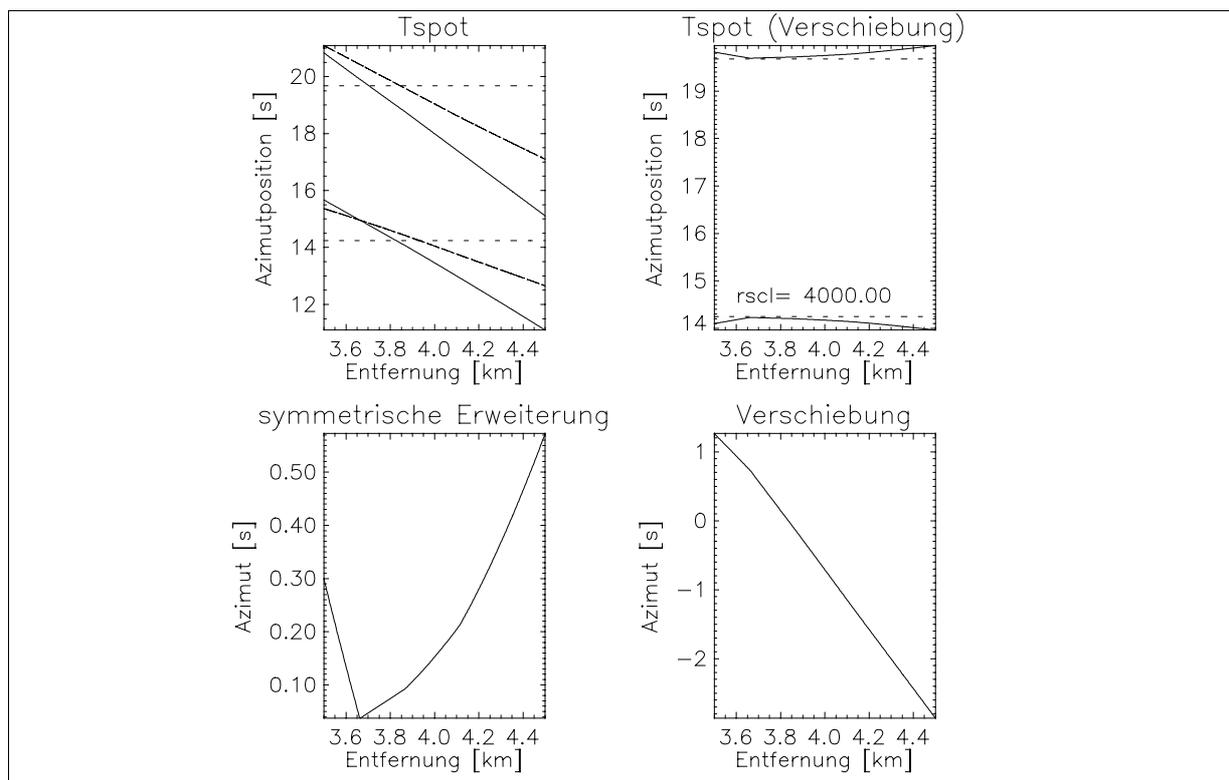


Bild 5.12: Azimutzeit-Verschiebung für Beispielgeometrie

Wird die mit Gleichung (5.56) beschriebene und im rechten unteren Diagramm gezeigte Azimutzeit-Verschiebung durchgeführt, so ergeben sich nach der Azimut-Skalierung die Signalpositionen im rechten oberen Diagramm. Zum Vergleich ist

noch einmal die Position aller Signale vor der Skalierung zwischen den klein gestrichelten Linien angegeben. Die untere durchgezogene Linie zeigt laut Gleichung (5.54) die minimale Azimutzeitposition aller Signale nach der Skalierung. Der maximalen Azimutzeitposition nach der Skalierung entspricht nach Gleichung (5.55) die obere durchgezogene Linie.

Die Differenz der Ausdehnung der Azimutsignale vor und nach der Skalierung im rechten oberen Diagramm ergibt mit Gleichung (5.57) die benötigte Erweiterung bei der Azimut-Skalierung mit Azimutzeit-Verschiebung im linken unteren Diagramm.

5.2.2.5 Optimale Skalierungsentfernung für die Azimut-Skalierung

Im Beispiel von Bild 5.12 ist die Skalierungsentfernung gleich der Entfernung des Szenenzentrums von 4000 m. Wegen der Blockprozessierung muß die maximale Erweiterung aller Entfernungen gewählt werden. In Bild 5.12 tritt die maximale Erweiterung bei der Entfernung von 4500m auf.

Wird die maximale Erweiterung numerisch für alle möglichen Skalierungsentfernungen berechnet, so kann die Skalierungsentfernung mit der kleinsten maximalen Erweiterung bestimmt werden. In Bild 5.13 ist für die Beispielgeometrie von Bild 5.11 links die Erweiterung der Azimutzeitdimension für eine optimale Skalierungsentfernung gezeigt. Die optimale Skalierungsentfernung wurde zu $r_{scl} = 4140.24$ m berechnet. Im Diagramm links unten von Bild 5.13 ergibt sich eine gleich große Erweiterung der Azimutzeitdimension im Nah- und im Fernbereich.

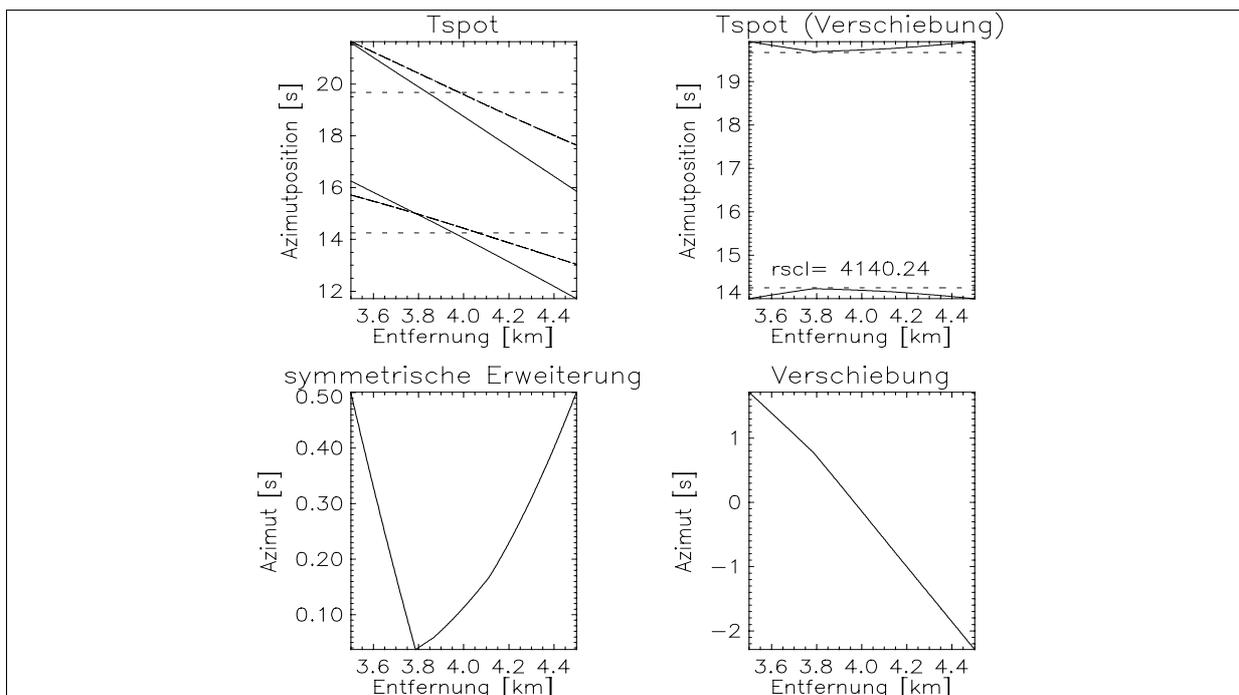


Bild 5.13: Azimutzeit-Verschiebung für optimale Skalierungsentfernung

Für das Beispiel von Bild 5.11 links mit den neun Punktzielen sind in Bild 5.14 links die Amplituden der Azimutsignale vor der Azimut-Skalierung im Azimutzeitbereich dargestellt. Durch die Überlagerung der Signale von je drei Punktzielen im Fernbereich, bei der Skalierungsentfernung und im Nahbereich kommt es zu Amplitudenschwankungen. In allen Entfernungen zeigen die Signale die Dauer der *Spotlight*-Apertur von 5.43 s, was bei der gewählten PRF von 1100 Hz 5973 Abtastwerten entspricht.

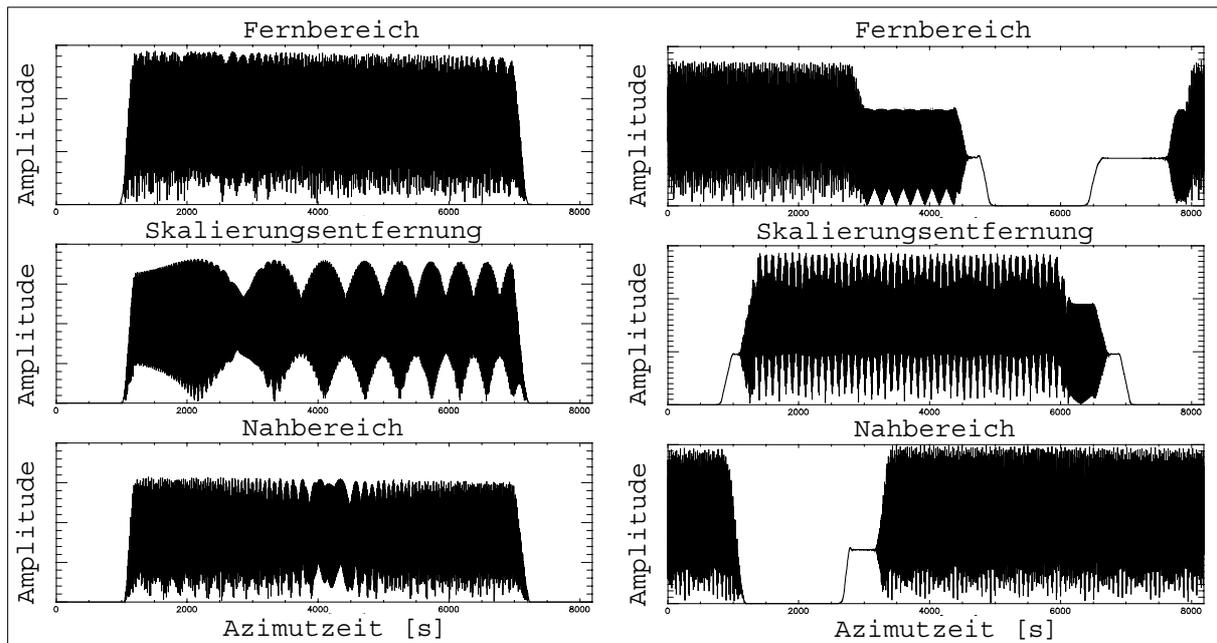


Bild 5.14: Beispiel mit 9 Zielen bei Azimut-Skalierung ohne Azimutzeit-Verschiebung: Signale im Azimutzeitbereich bei verschiedenen Entfernungen vor (links) und nach (rechts) der Azimut-Skalierung ohne Azimutzeitverschiebung

Die Signale nach der Azimut-Skalierung ohne Azimutzeit-Verschiebung sind in Bild 5.14 rechts gezeigt. Die Erweiterung der Azimutdimension nur auf die nächste Zweierpotenz ist nicht ausreichend und zyklische Verschiebungen treten auf. Es muß also eine wesentlich größere Erweiterung erfolgen. Die Position der Azimutsignale nach Azimut-Skalierung mit Azimutzeit-Verschiebung sind dagegen in Bild 5.15 gezeigt.

In Bild 5.13 beträgt die maximale Erweiterung im Nah- und Fernbereich je 0.5 s, was 550 Abtastwerten entspricht. Die Erweiterung für die Entfernung des Zentrums beträgt 132 Abtastwerte. Diese Werte ergeben sich auch beim Vergleich von Bild 5.14 links vor der Azimut-Skalierung mit Bild 5.15 nach der Azimut-Skalierung mit Azimutzeit-Verschiebung.

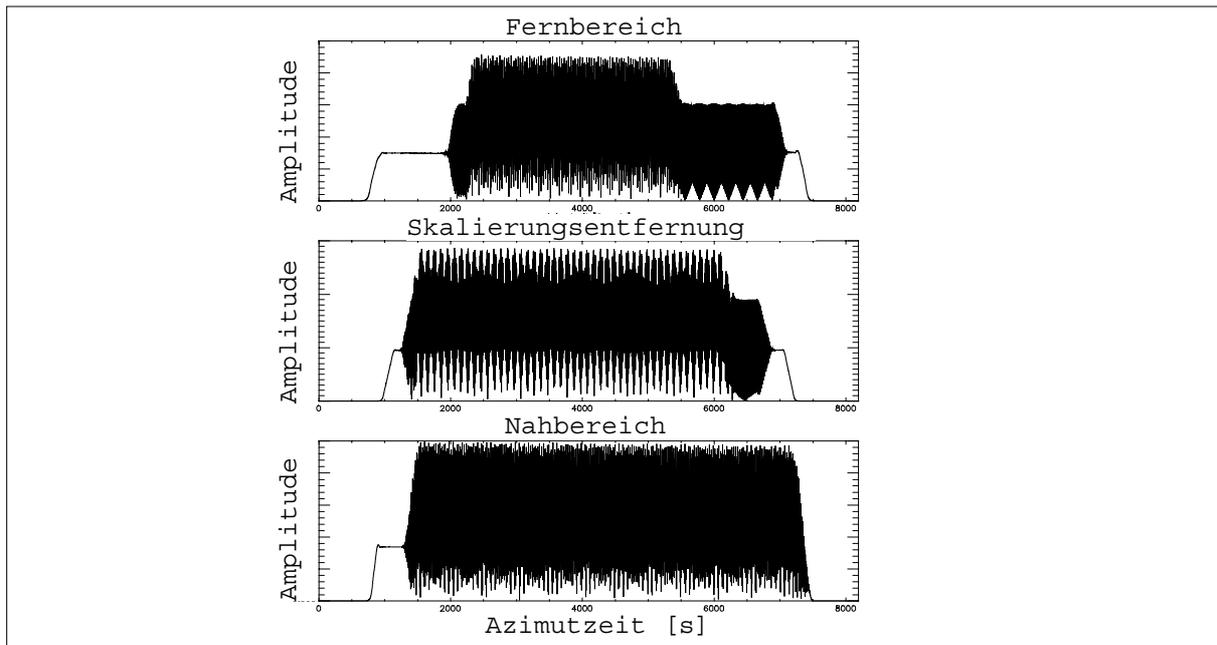


Bild 5.15: Signale nach Azimut-Skalierung mit Verschiebung der Azimutzeit

In Bild 5.14 und Bild 5.15 ist die unterschiedliche Verschiebung der Azimutsignale von Zielen an unterschiedlichen Azimutpositionen gut zu beobachten am Heraus-treten einzelner Signale, welche an dem konstanten Amplitudenbetrag zu erkennen sind, aus dem Bereich von mehreren überlagerten Signalen.

5.2.3 Verschiebung der Azimutfrequenz

Da sich die Punktzielposition in Azimut auf eine Azimutfrequenz abbildet, muß die Abtastfrequenz in Azimut groß genug sein, um alle beleuchteten Ziele eindeutig darstellen zu können. Sind diese Azimut-Zielpositionen in unterschiedlichen Entfernungen gegeneinander versetzt, wie dies für den Fall eines mittleren Squintwinkels ungleich Null auftritt, dann erhöht sich die benötigte Abtastfrequenz. Im Beispiel von Bild 5.11 zeigt der Bereich aller beleuchteten Ziele eine solche Versetzung. Wird diese Versetzung entfernt, so kann die Abtastfrequenz niedrig gehalten werden. Die mindestens erforderliche Abtastfrequenz F_{ab} für die Entfernung r_o ergibt sich mit (4.13) und (4.14) zu Gleichung (5.58). Dazu ist die in Gleichung (5.59) gegebene Verschiebung der Azimutfrequenz notwendig.

$$F_{ab}(r_o) = (t_{b,e}(r_o) - t_{b,a}(r_o)) \cdot k_{a,scl} \quad (5.58)$$

$$F_v(r_o) = \frac{t_{b,a}(r_o) + t_{b,e}(r_o)}{2} \cdot k_{a,scl} \quad (5.59)$$

Die erste $t_{b,a}(r_0)$ und letzte $t_{b,e}(r_0)$ auch nur teilweise beleuchtete Azimutposition in einer Entfernung muß ausgewählt werden, da sich alle beleuchteten Ziele auf eine ihrer Azimutposition entsprechenden Azimutfrequenz abbilden. Nur teilbeleuchtete Ziele zeigen dabei natürlich eine geringere Auflösung und Intensität und werden am Ende der Verarbeitung als ungültige Ziele entfernt.

Die PRF muß für die maximale Abtastfrequenz F_{ab} aller verarbeiteten Entfernungen r_0 ausreichen. Falls die PRF kleiner als diese maximal benötigte Abtastfrequenz ist, so muß die PRF erhöht werden. Dies kann durch Einfügen von Nullen nach der Azimut-Skalierung und vor der sich anschließenden inversen Azimut-IFFT im Blockschaltbild von Bild 5.6 durchgeführt werden.

Die Parameter des Beispiels von Bild 5.11 werden wieder verwendet, um die Notwendigkeit der Frequenzverschiebung zu zeigen. Um nur Azimutsignale mit kompletter *Spotlight*-Apertur verwenden zu können, wurden die neun simulierten Punktziele von Bild 5.11 rechts verwendet. Sie befinden sich innerhalb oder an den Grenzen des gültigen Bereichs. Der maximale Azimutzeitabstand in den drei betrachteten Entfernungen und für die ganze Szene ist in Bild 5.11 rechts angegeben. Daraus ist durch Multiplikation mit der zur verwendeten Skalierungs-entfernung von 4447.75 m korrespondierenden Skalierungs-Dopplerrate die jeweils benötigte Frequenzbandbreite berechnet worden. Das Ergebnis enthält Tabelle 5.3.

	Benötigte Frequenzbandbreite
Fernbereich	488 Hz
Entfernung Szenenzentrum	467 Hz
Nahbereich	371 Hz
Ganze Szene	729 HZ

Tabelle 5.3: Benötigte Frequenzbandbreiten der Beispielszene

Die PRF wurde zu 600 Hz gesetzt und eine Subapertur-Verarbeitung der simulierten Rohdaten wurde durchgeführt. Die Subapertur-Verarbeitung wird später in Kapitel 5.3 eingeführt und erlaubt eine Verringerung der PRF. Durch die geringe PRF kann hier die Notwendigkeit der Frequenzverschiebung besser gezeigt werden.

Bild 5.16 zeigt die verarbeitete Szene ohne Anwendung der Frequenzverschiebung von Gleichung (5.46). Zum leichteren Vergleich der Geometrie der verarbeiteten Szene mit der generierten Geometrie aus Bild 5.11 rechts wurde die Amplitude der

Signale bei $t_a = 0$ s um den Faktor 2 reduziert. In Bild 5.16 erscheint das Ziel im Fernbereich links von der Position $t_a = 0$ s bei falschen Frequenzen und ist rechts von der Position $t_a = 0$ s dargestellt. In gleicher Weise erscheint im Nahbereich das Ziel rechts von der Position $t_a = 0$ s bei falschen Frequenzen, was an der Positionierung links von $t_a = 0$ s zu sehen ist. Die falsche Frequenzdarstellung resultiert aus der zu geringen PRF von 600 Hz bei der benötigten Frequenzbandbreite von 729 Hz für die ganze Szene.

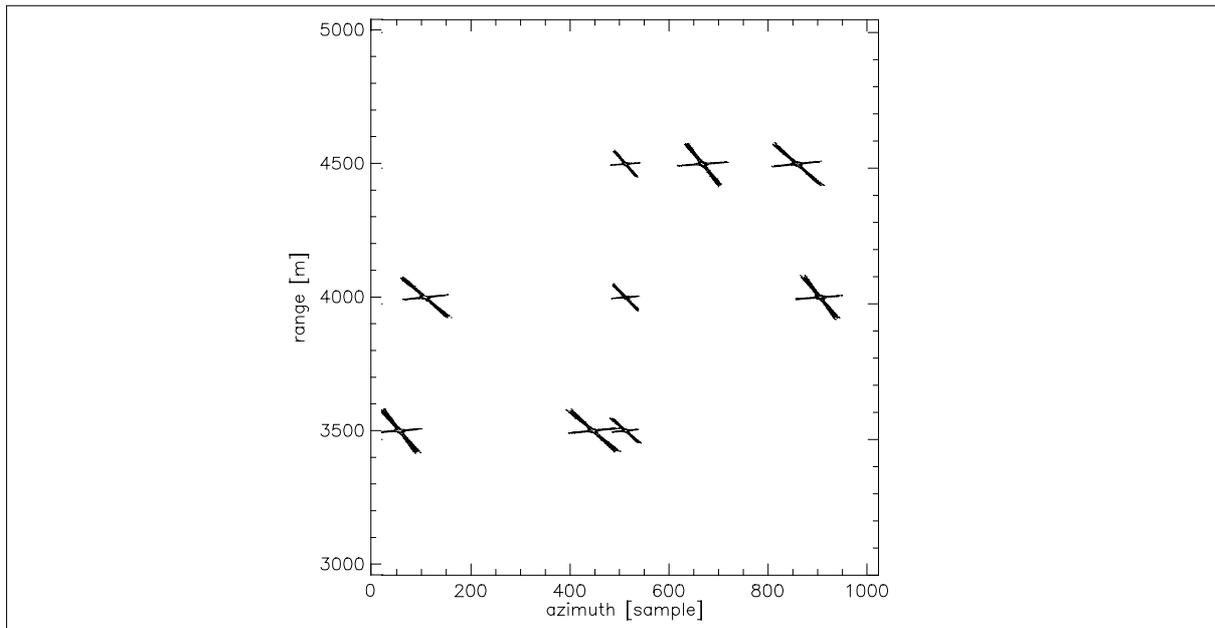


Bild 5.16: Verarbeitete Szene ohne Frequenzverschiebung mit falscher Positionierung der Punktziele

In Bild 5.17 links ist die Szene nach der Verarbeitung mit Frequenzverschiebung gezeigt. Betrachtet man die Entfernungen voneinander getrennt, so zeigen die Ziele in jeder Entfernung die richtige Azimutpositionierung zueinander. Die verschiedenen Entfernungen sind aber zueinander bezüglich Azimut verschoben. In Bild 5.17 rechts ist die originale Geometrie durch Erweiterung der Azimutpunktanzahl und Rückverschiebung der Frequenz-Abtastwerte wieder hergestellt. Die Rückverschiebung ist der letzte Verarbeitungsschritt im Blockdiagramm von Bild 5.6.

Zur Darstellung der Szene wurde die Azimutpunktzahl für alle Plots in Bild 5.16 und Bild 5.17 auf 1024 reduziert. Daher ist die Achsenbeschriftung links und rechts in Bild 5.17 gleich. Die in Wirklichkeit höhere Abtastpunktanzahl im rechten Plot kann aber an der Stauchung der einzelnen Signale erkannt werden.

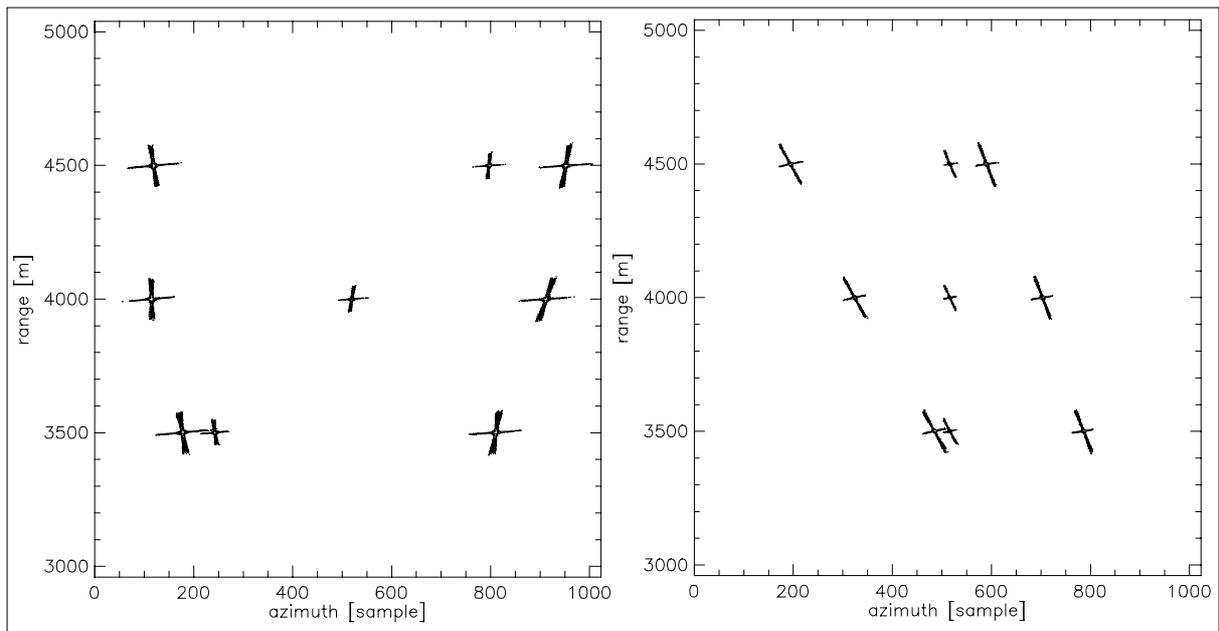


Bild 5.17: Szene nach der Verarbeitung mit Frequenzverschiebung ohne (links) und mit (rechts) Rückverschiebung der Frequenz-Abtastwerte, wobei im rechten Bild die Punktziele korrekt und in Übereinstimmung mit Bild 5.11 positioniert sind

5.3 Subapertur-Verarbeitung in Azimut

Die Aufzeichnung von SAR-Rohdaten im *Spotlight*-Modus erfolgt vorteilhaft mit einer PRF, welche für den Öffnungswinkel der realen Apertur, also für die Augenblicksfrequenz, ausreichend ist. Wird keine Subapertur-Verarbeitung durchgeführt, so muß bei Verfahren mit *Dechirp*-Operation in Entfernung, wie zum Beispiel beim Frequenz-Skalierungs-Verfahren, die Azimutabtastung ausreichen für die Azimutgesamtbandbreite der Szene. Diese ist erheblich höher als die Augenblicksbandbreite der Szene und die Azimutabtastung muß daher vor der Verarbeitung erhöht werden. Eine höhere PRF bereits bei der Datenaufzeichnung ist prinzipiell möglich, ist aber unnötig und hat zwei wesentliche Nachteile. Erstens erhöht sich der Hardwareaufwand und die benötigte Speicherkapazität, und zweitens verringert sich der Spielraum für die Auswahl der PRF unter Berücksichtigung der Mehrdeutigkeiten (englisch: *Ambiguities*) in Entfernung und Azimut [37]. Besser ist eine Erhöhung der Azimutabtastung erst vor der Datenverarbeitung, wie zum Beispiel in [62] beschrieben.

Das Ziel der Subapertur-Verarbeitung ist die Reduktion der für die Verarbeitung benötigten Pulswiederholfrequenz PRF bei Verfahren mit *Dechirp*-Operation in Entfernung. Bei Anwendung der Subapertur-Verarbeitung ist es ausreichend, die während der Dauer der Subapertur auftretende Augenblicksbandbreite zu berücksichtigen und eine Erhöhung der Azimutabtastung vor der Verarbeitung kann vermieden werden. Dabei wird die geringe Überabtastung der Augenblicksfrequenz ausgenutzt, welche in einem SAR-System normalerweise vorhanden ist. Die Augenblicksbandbreite, die *Spotlight*-Bandbreite und die Gesamtbandbreite werden am Anfang dieses Kapitels genau untersucht.

5.3.1 Blockschaltbild des kompletten Frequenz-Skalierungs-Verfahrens

Das Blockschaltbild des kompletten Frequenz-Skalierungs-Verfahrens mit Subapertur-Verarbeitung ist in Bild 5.18 gezeigt. Die Aufteilung in Subaperturen wird direkt auf die Rohdaten nach der Gewichtung zur Nebenzipfelunterdrückung in Azimut angewendet. Die Rekombination der einzelnen Subaperturen erfolgt nach Deramping und Azimutfrequenz-Verschiebung auf symmetrische Geometrie. Die Azimutzeit-Verschiebung ist unterschiedlich in jeder Subapertur und daher muß der Unterschied in der Zeitverschiebung beim Zusammenfügen der Subaperturen ausgeglichen werden. Um den Ausgleich dieses Unterschiedes nur durch Verschieben von Abtastpositionen genau durchführen zu können, wird dabei die Azimutzeit-Verschiebung auf ganze Abtastwerte der Azimutzeit ($1/PRF$) gerundet. Der vollständige Ausgleich der Azimutzeit-Verschiebung erfolgt dann an der gleichen Stelle wie bei der Verarbeitung ohne Subaperturen im Anschluß an die letzte FFT in Azimut.

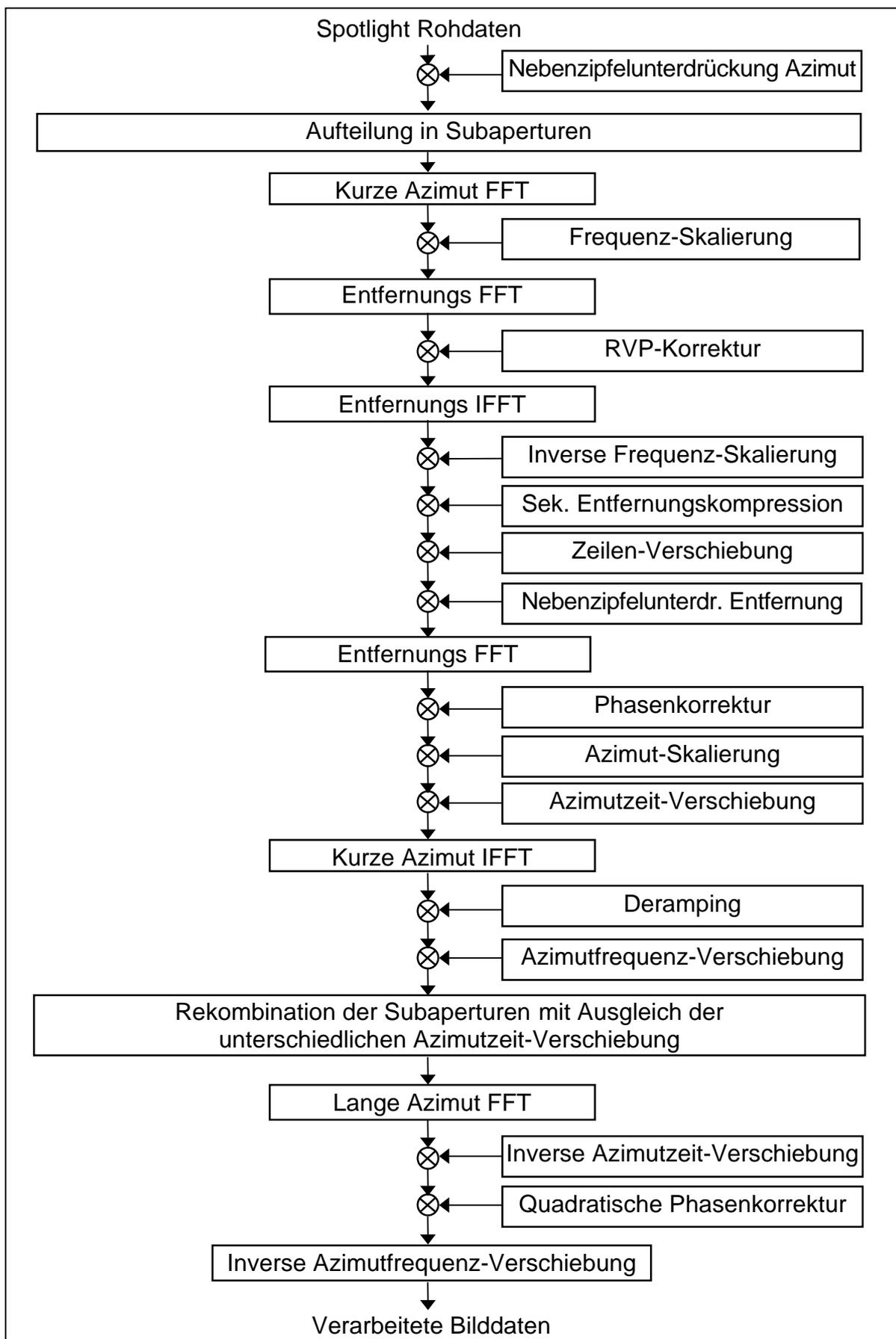


Bild 5.18: Blockschalbild der gesamten Verarbeitung mit Subaperturen

Auf Grund der Subapertur-Verarbeitung sind die benötigten FFT-Operationen in Azimut auf Signale mit wenigen Abtastwerten anzuwenden und werden daher mit „kurze“ FFT bezeichnet. Die Länge dieser FFT-Operationen entspricht der auf die nächste Zweierpotenz erweiterten Länge der Subaperturen. Nur die letzte FFT in Azimut muß die zur Azimutauflösung korrespondierende volle Länge besitzen. Die inverse Azimutfrequenz-Verschiebung zur Darstellung der verarbeiteten Szene in Originalgeometrie ist der letzte Schritt in der Verarbeitung.

Die Verarbeitung in Entfernungs- und Azimutrichtung in den einzelnen Subaperturen ist bis auf die geringere Ausdehnung der Azimutdimension im wesentlichen unverändert. Es müssen aber der Start- und Endzeitpunkt der Beleuchtung $t_{a,start}$ und $t_{a,ende}$ auf die Werte der jeweiligen Subapertur $t_{a,start,\#n}$ und $t_{a,ende,\#n}$ gesetzt werden. Mit $\#n$ ist die Nummer der Subapertur bezeichnet. Daneben muß für jede Subapertur der Dopplercentroid angepaßt werden.

5.3.1.1 Nebenzipfelunterdrückung und Beschränkung der Bandbreite

Dieses Kapitel ist hier eingeschoben, da die Positionierung von Nebenzipfelunterdrückung und Beschränkung der prozessierten Bandbreite am besten mit dem Blockschaltbild von Bild 5.18 erklärt werden kann.

In der Verarbeitung von SAR-Daten ist die Unterdrückung von Nebenzipfeln sehr wichtig, um eine gute Bildqualität zu erhalten. Die Nebenzipfel werden durch die Anwendung einer Gewichtungsfunktion, wie zum Beispiel einer Hamming-Gewichtung, unterdrückt. Da die Bilddaten nach einer Verarbeitung mit dem Frequenz-Skalierungs-Verfahren im zweidimensionalen Frequenzbereich fokussiert sind, muß anstatt der Bandbreite die prozessierte Integrationszeit beschränkt und gewichtet werden. Dies wurde bereits in Kapitel 2.10.1 dargestellt.

In Entfernungsrichtung kann die Beschränkung der prozessierten Integrationszeit PT_e und die Gewichtung zur Nebenzipfelunterdrückung nach der Korrektur der RVP-Phase im Entfernungszeitbereich durchgeführt werden, da alle Signale von Punktzielen in beliebigen Entfernungen symmetrisch um die Referenzentfernung der *Dechirp*-Operation liegen. Dies ist zum Beispiel aus Bild 5.3 ersichtlich, in welchem das Diagramm Nummer 5 die Entfernungssignale von Punktzielen bei verschiedenen Entfernungen nach der Korrektur des RVP-Terms zeigt. Der Ort der Entfernungssignale ist unabhängig von der Punktzielentfernung.

In Azimutrichtung erfolgt keine Beschränkung der prozessierten Länge, da die Länge der *Spotlight*-Apertur von der Beleuchtungsdauer bestimmt ist und eine Beschränkung nur eine kürzere Beleuchtungsdauer bedeuten würde. Die analoge Operation zur Beschränkung der Bandbreite in Azimut ist vielmehr die Auswahl des gültigen Bereichs nach der Verarbeitung, da diese Auswahl auf die zu verwendende Azimutbandbreite oder den Öffnungswinkel der realen Antenne aufbaut.

Eine Gewichtung zur Nebenzipfelunterdrückung in Azimut muß am Anfang der Verarbeitung auf die Rohdaten im Zeitbereich durchgeführt werden. Nach der Azimut-Skalierung ist die Gewichtung auf Grund der unterschiedlichen Azimutpositionierung der Signale in unterschiedlichen Entfernungen nicht mehr durchführbar.

5.3.2 Definition wichtiger Bandbreiten in Azimut

Laut Gleichung (4.6) ist die Augenblicksbandbreite nur eine Funktion von Squintwinkel, Öffnungswinkel, Geschwindigkeit und Wellenlänge. Für die in Tabelle 5.4 beschriebene Geometrie zeigt Bild 5.19 die maximale und minimale Augenblicksfrequenz sowie die Augenblicksbandbreite als Funktion der Azimutzeit. Die Korrespondenz zwischen Squintwinkel und Azimutzeit ist in Gleichung (5.60) gegeben.

r_c	4000 m
r_{near}	3500 m
r_{far}	4500 m
Ψ_{start}	14°
Ψ_{ende}	19°
θ_a	6°
V	70 m/s
λ	0.03 m

Tabelle 5.4: Beispielgeometrie zur Augenblicksbandbreite

Die maximale Augenblicksfrequenz $f_{a,Aug,max}$ ist durch Gleichung (5.61), die minimale Augenblicksfrequenz $f_{a,Aug,min}$ durch Gleichung (5.62) gegeben. Die Augenblicksbandbreite im unteren Diagramm ist die Differenz dieser beiden Frequenzen.

$$t_a = \frac{r_c}{V} \cdot \tan(\Psi) \quad (5.60)$$

$$f_{a, \text{Aug, max}}(t_a) = -\frac{2 \cdot V}{\lambda} \cdot \sin\left(\Psi - \frac{\theta}{2}\right) = -\frac{2 \cdot V}{\lambda} \cdot \sin\left(\text{atan}\left(\frac{t_a \cdot V}{r_c}\right) - \frac{\theta}{2}\right) \quad (5.61)$$

$$f_{a, \text{Aug, min}}(t_a) = -\frac{2 \cdot V}{\lambda} \cdot \sin\left(\Psi + \frac{\theta}{2}\right) = -\frac{2 \cdot V}{\lambda} \cdot \sin\left(\text{atan}\left(\frac{t_a \cdot V}{r_c}\right) + \frac{\theta}{2}\right) \quad (5.62)$$

Die Gesamtbandbreite der Szene ist die Differenz aus maximaler Augenblicksfrequenz am Beginn der Beleuchtung und minimaler Augenblicksfrequenz am Ende der Beleuchtung. Die Gesamtbandbreite für das Beispiel beträgt 858 Hz.

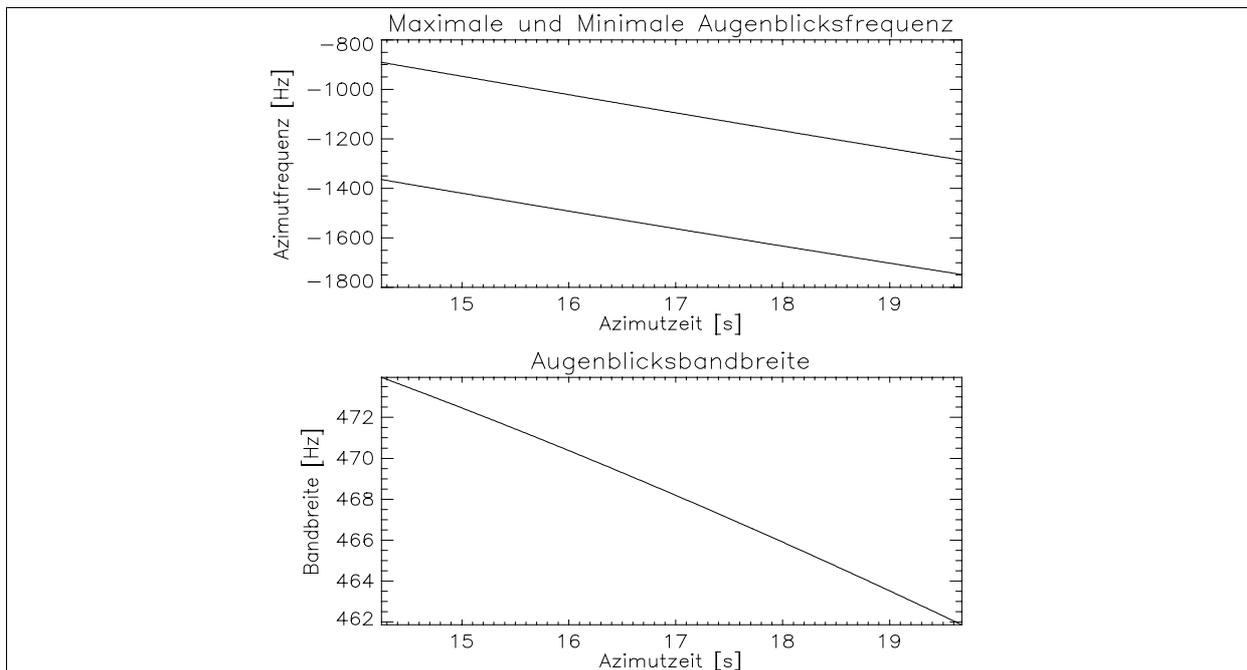


Bild 5.19: Minimale und Maximale Augenblicksfrequenz (oben) und resultierende Augenblicksbandbreite (unten) für die Beispielparameter von Tabelle 5.4

Bild 5.20 zeigt nochmals die maximale und minimale Augenblicksfrequenz der Beispielgeometrie in dicker, durchgezogener Linie. Zusätzlich ist der Azimutfrequenzverlauf von Zielen rechts und links an der Grenze des gültigen Bereichs eingetragen. Der Frequenzverlauf von Zielen im Nahbereich ist gestrichelt, und der Frequenzverlauf von Zielen im Fernbereich ist in dünner, durchgezogener Linie dargestellt.

In Bild 5.20 ist die höhere Dopplerrate von Zielen im Nahbereich deutlich zu erkennen. Die Simulation bestätigt auch, daß alle Signalfrequenzen innerhalb der minimalen und maximalen Augenblicksfrequenzen liegen. Die *Spotlight*-Bandbreite des ersten gültigen Ziels im Fernbereich und die Gesamtbandbreite der Beispielszene sind rechts in Bild 5.20 angegeben.

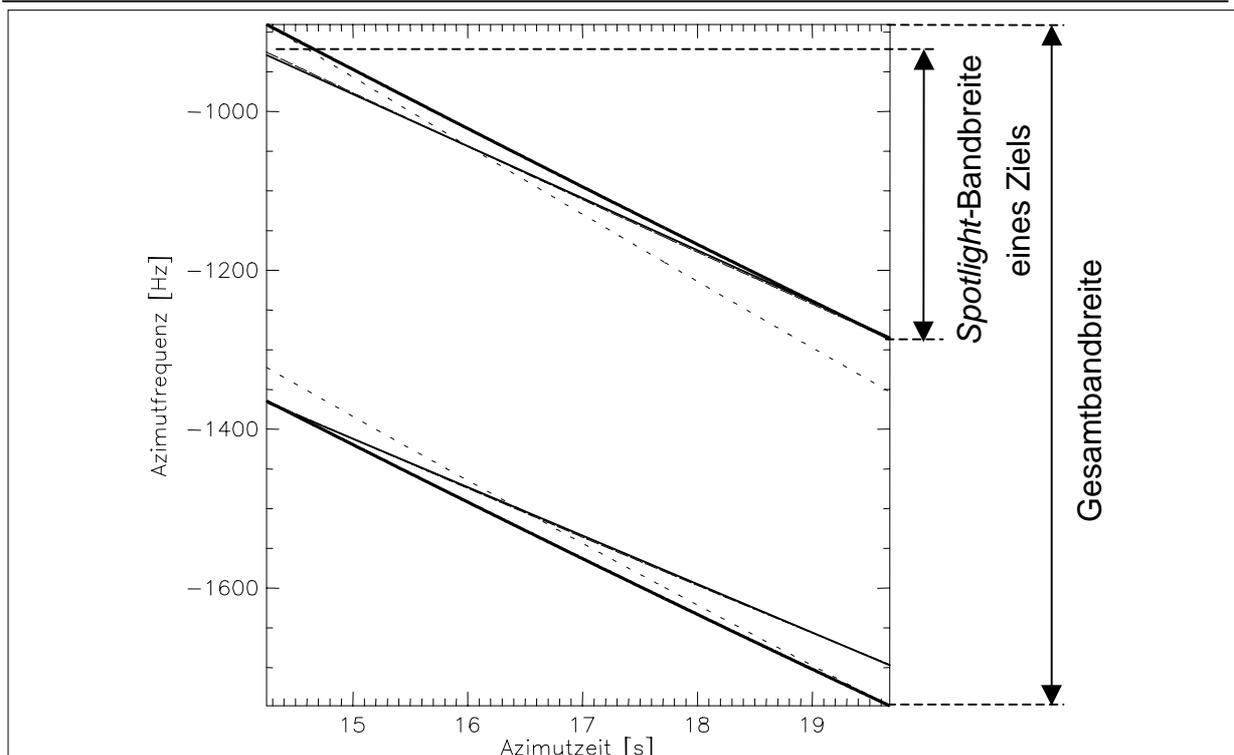


Bild 5.20: Augenblicksfrequenzen: die maximale und minimale Augenblicksfrequenz der Beispielgeometrie ist in dicker, durchgezogener Linie dargestellt, der Frequenzverlauf von Zielen an der Grenze des gültigen Bereichs im Nahbereich ist gestrichelt, von Zielen im Fernbereich in dünner, durchgezogener Linie gezeichnet

Zur weiteren Verdeutlichung der Zusammenhänge zeigt Bild 5.21 ein ähnliches Beispiel wie Bild 5.20, aber für einen extrem großen Schwenkbereich der Antenne bei der Nachführung in Azimut von $\Psi_{\text{start}} = 0^\circ$ bis zu $\Psi_{\text{ende}} = 50^\circ$.

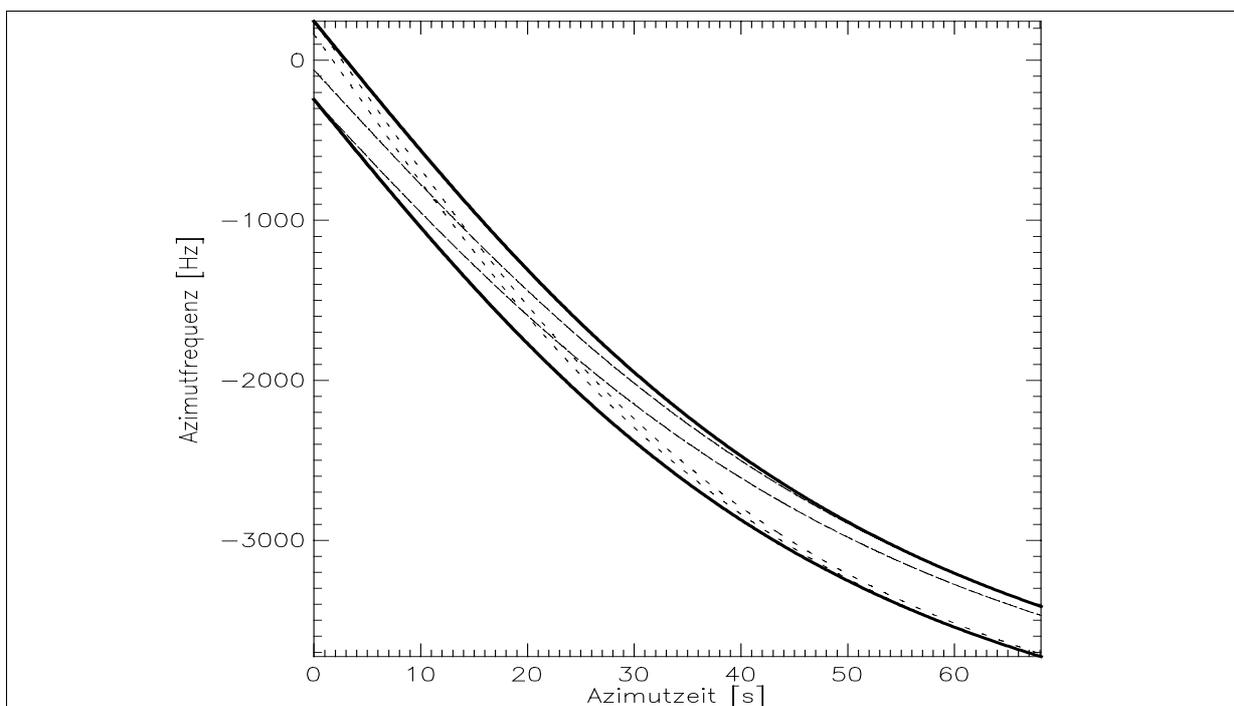


Bild 5.21: Augenblicksfrequenzen für extrem hohen Schwenkbereich der Antenne

Dieses Beispiel verdeutlicht den prinzipiellen durch eine Wurzelfunktion beschriebenen Frequenzverlauf. Die Entfernungen der Ziele sowie die Liniendarstellung sind analog zu Bild 5.20. Die Positionen der gerade noch gültigen Ziele unterscheiden sich aber auf Grund des höheren Schwenkbereichs der Antenne.

5.3.3 Aufteilung in Subaperturen

Die während der Verarbeitung auftretende Bandbreite, also die Differenz aus maximaler und minimaler Augenblicksfrequenz aller beleuchteten Ziele, muß jederzeit ausreichend abgetastet sein. Für eine Verarbeitung ohne Subaperturen ist diese Bandbreite gleich der Gesamtbandbreite der Szene. Werden Subaperturen gebildet, muß nur die in den Subaperturen auftretende Bandbreite berücksichtigt werden.

Die maximale Länge der Subaperturen ist bestimmt durch die in den Subaperturen auftretende Bandbreite und die Pulswiederholfrequenz PRF der Datenaufzeichnung. Eine kleine Überlappung der Subaperturen ist nötig, um Unstetigkeiten beim Wiederzusammenfügen der Subaperturen zu vermeiden. Die Berechnung der maximalen Dauer der einzelnen Subaperturen ist in Bild 5.22 gezeigt.

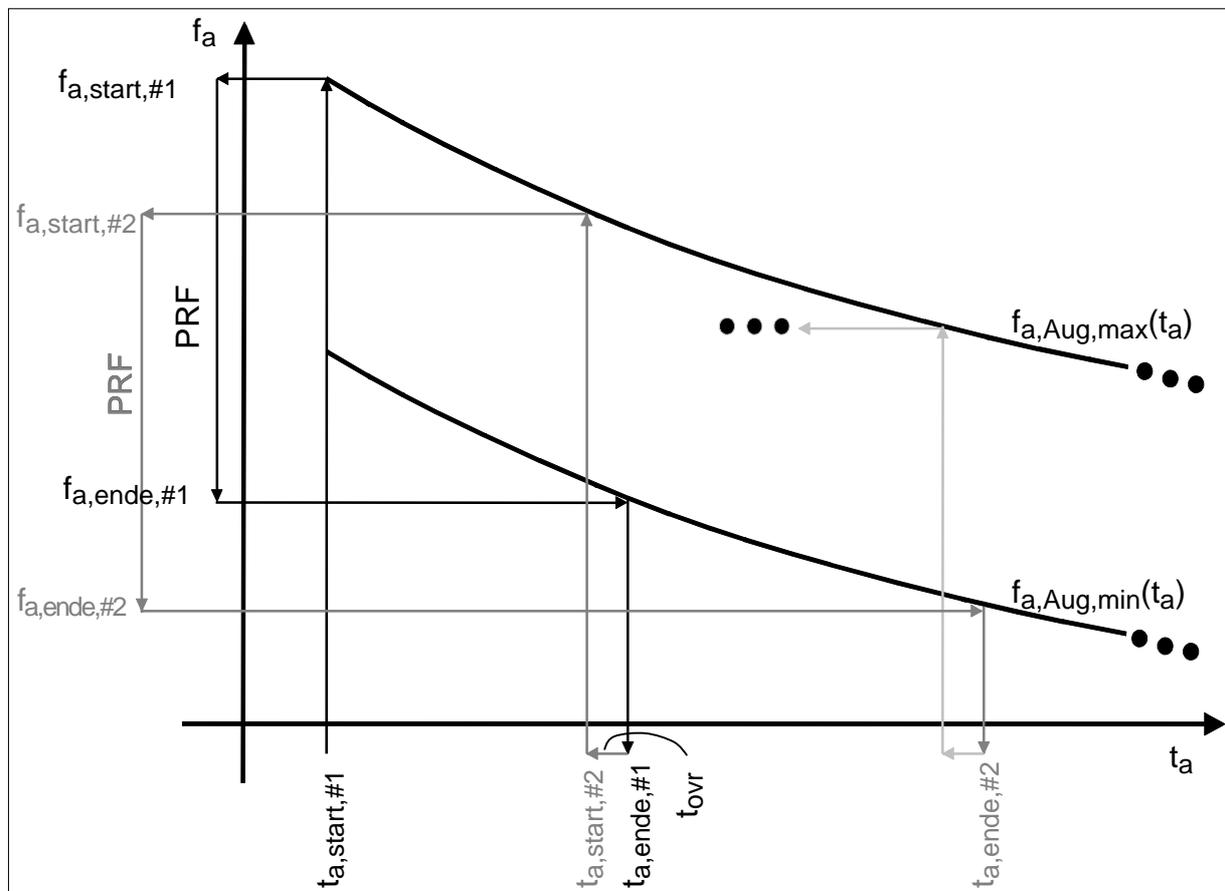


Bild 5.22: Berechnung der maximalen Dauer der Subaperturen: die Berechnung beginnt am Anfang der Beleuchtung bei $t_{a,start,#1}$ und wird in der durch die Pfeile markierten Reihenfolge durchgeführt

Die maximale Augenblicksfrequenz $f_{a, \text{Aug}, \text{max}}(t_a)$ und die minimale Augenblicksfrequenz $f_{a, \text{Aug}, \text{min}}(t_a)$ als Funktionen von der Azimutzeit t_a sind in Bild 5.22 aufgetragen. Sie können durch Einsetzen der Umkehrfunktion von Gleichung (5.60) in die Gleichungen (5.61) und (5.62) berechnet werden und ergeben sich zu den Gleichungen (5.63) und (5.64). Die Umkehrfunktionen der letzten beiden Gleichungen werden für die Berechnung ebenfalls benötigt und sind in den Gleichungen (5.65) und (5.66) angegeben.

$$f_{a, \text{Aug}, \text{max}} = -\frac{2 \cdot V}{\lambda} \cdot \sin\left(\text{atan}\left(\frac{t_a \cdot V}{r_c}\right) - \frac{\theta}{2}\right) \quad (5.63)$$

$$f_{a, \text{Aug}, \text{min}} = -\frac{2 \cdot V}{\lambda} \cdot \sin\left(\text{atan}\left(\frac{t_a \cdot V}{r_c}\right) + \frac{\theta}{2}\right) \quad (5.64)$$

$$t_a = \frac{r_c}{V} \cdot \tan\left(\frac{\theta}{2} - \text{asin}\left(\frac{f_{a, \text{Aug}, \text{max}} \cdot \lambda}{2 \cdot V}\right)\right) \quad (5.65)$$

$$t_a = \frac{r_c}{V} \cdot \tan\left(-\frac{\theta}{2} - \text{asin}\left(\frac{f_{a, \text{Aug}, \text{min}} \cdot \lambda}{2 \cdot V}\right)\right) \quad (5.66)$$

Der Start der Beleuchtung der kompletten *Spotlight*-Apertur $t_{a, \text{start}}$ ist auch der Startzeitpunkt der ersten Subapertur $t_{a, \text{start}, \#1}$. Mit Gleichung (5.63) kann die korrespondierende maximale Augenblicksfrequenz $f_{a, \text{start}, \#1}$ berechnet werden. Die minimale erlaubte Augenblicksfrequenz der ersten Subapertur $f_{a, \text{ende}, \#1}$ ergibt sich durch Abzug der PRF von $f_{a, \text{start}, \#1}$. Durch Einsetzen dieser minimalen Augenblicksfrequenz in Gleichung (5.66) ergibt sich der maximale Endzeitpunkt der ersten Subapertur $t_{a, \text{ende}, \#1}$. Diese Berechnungskette ist in Bild 5.22 durch die Pfeilkette in schwarzer Farbe dargestellt.

Den Startzeitpunkt der zweiten Subapertur erhält man durch die Subtraktion der Überlappungszeit T_{OVR} vom Endzeitpunkt der ersten Subapertur. Die Pfeilkette zur Berechnung des Endzeitpunktes der zweiten Subapertur ist in dunkelgrauer Farbe dargestellt. Die Berechnung der Start- und Endzeitpunkte der Subaperturen setzt sich analog fort, bis das Ende der *Spotlight*-Apertur erreicht ist.

Die soeben beschriebene Berechnung liefert die Start- und Endzeitpunkte für die maximal mögliche Dauer der Subaperturen. Bei der Implementierung der Sub-

apertur-Verarbeitung ist es vorteilhaft, gleiche Subaperturlängen zu verwenden. In einem solchen Fall wird die maximal mögliche Länge aller Subaperturen durch die kleinste maximale Dauer aller Subaperturen bestimmt.

Für die Beispielgeometrie von Bild 5.20 ergeben sich die Start- und Endzeitpunkte der einzelnen Subaperturen zu den Werten in Tabelle 5.5. Dazu wurden die Parameterwerte aus Tabelle 5.6 verwendet.

	Start [s]	Ende [s]	Dauer [s]
<i>Spotlight</i> -Apertur	14.2473	19.6759	5.42855
Subapertur #1	14.2473	15.2888	max. 1.04148
Subapertur #2	15.2488	16.3332	max. 1.08440
Subapertur #3	16.2932	17.4260	max. 1.13284
Subapertur #4	17.3860	18.5737	max. 1.18766
Subapertur #5	18.5337	19.7837	max. 1.25000

Tabelle 5.5: Maximale Dauer der Subaperturen für das Beispiel von Bild 5.20

r_c	4000 m
r_{near}	3500 m
r_{far}	4500 m
Ψ_{start}	14°
Ψ_{ende}	19°
θ_a	6°
V	70 m/s
λ	0.03 m
PRF	550 Hz
T_{ovr}	0.04 s

Tabelle 5.6: Parameter zur Berechnung der Dauer der Subaperturen in Tabelle 5.5

Wird in der Implementierung die Dauer der Subaperturen konstant gehalten, so dürfen im Beispiel von Tabelle 5.5 alle Subaperturen nicht länger als 1.04148 s sein.

Der jeweilige Dopplerezentroid für die Subaperturen ist die Mittenfrequenz von minimaler und maximaler auftretender Augenblicksfrequenz in der jeweiligen Subapertur und kann mit Gleichung (5.67) berechnet werden.

$$f_{DC, \#n} = \frac{f_{a,Aug,max}(t_{a,start,\#n}) + f_{a,Aug,min}(t_{a,ende,\#n})}{2} \quad (5.67)$$

5.3.4 Azimut-Skalierung für die Subapertur-Verarbeitung

Alle Gleichungen der Azimut-Skalierung für die Verarbeitung ohne Subaperturen können auch auf die Verarbeitung mit Subaperturen angewendet werden. Es müssen nur die jeweiligen Anfangs- und Endzeiten der Subaperturen berücksichtigt werden. Ein Unterschied ergibt sich aber bei der Wahl der optimalen Skalierungsentfernung zur Verringerung der benötigten Erweiterung der Azimutzeitdimension.

Um in jeder Subapertur den gleichen Abtastabstand in Azimut zu erhalten, muß die Skalierungsentfernung in allen Subaperturen gleich gewählt werden. Eine gute Wahl zur Minimierung der Azimuterweiterung ist die optimale Skalierungsentfernung einer mittleren Subapertur. Die Auswahl der optimalen Skalierungsentfernung erfolgt in den folgenden fünf Schritten:

- 1) Die optimale Skalierungsentfernung wird für eine mittlere Subapertur laut Kapitel 5.2.2.5 bestimmt. Bei einer ungeraden Anzahl von Subaperturen wird die optimale Skalierungsentfernung der mittleren Subapertur verwendet. Bei einer geraden Anzahl wird der Mittelwert der beiden mittleren Subaperturen verwendet.
- 2) Diese optimale Skalierungsentfernung wird für alle Subaperturen verwendet.
- 3) Die benötigten Erweiterungen der Azimutdimension für alle Subaperturen werden nach Gleichung (5.57) berechnet.
- 4) Die größte benötigte Erweiterung wird für alle Subaperturen verwendet.
- 5) Die Verschiebung der Azimutzeit wird für jede Subapertur nach Gleichung (5.56) getrennt berechnet und in der jeweiligen Subapertur angewendet.

Für das Beispiel aus Tabelle 5.5 sind die sich mit der obigen Strategie ergebenden Erweiterungen und Verschiebungen nachfolgend dargestellt. Die Dauer aller Subaperturen ist zu 1 s und die Überlappung zu 0.04 s gewählt. Damit ergeben sich sechs Subaperturen. Die optimale Skalierungsentfernung zur Minimierung der Erweiterung ist 4442.69 m für die dritte und 4473.95 m für die vierte Subapertur. Damit wurde für alle Subaperturen die Skalierungsentfernung zu 4473.95 m gewählt. In Bild 5.23 bis Bild 5.25 ist die berechnete Erweiterung und Verschiebung der Azimutzeit dargestellt. Die Bedeutung der einzelnen Diagramme ist gleich zu Bild 5.12 in Kapitel 5.2.2.4.

Die symmetrische Erweiterung ist für die äußeren Subaperturen am größten. Die maximale Erweiterung wird für alle Subaperturen verwendet. Der Vergleich der

benötigten Erweiterungen für die Verarbeitung mit und ohne Subapertur ergibt eine größere Erweiterung im Fall der Subapertur-Verarbeitung. Berücksichtigt man allerdings die geringere PRF für die Subapertur-Verarbeitung, so reduziert sich die Anzahl der für die Erweiterung benötigten Abtastwerte wieder. Für das Beispiel muß die PRF für die Verarbeitung ohne Subaperturen mindestens 900 Hz betragen. Die benötigte Erweiterung von 0.5 s bedeutet 450 zusätzliche Abtastwerte. Für die Subapertur-Verarbeitung muß die Erweiterung 1.1 s betragen, was mit der PRF von 550 Hz 605 zusätzliche Abtastwerte bedeutet.

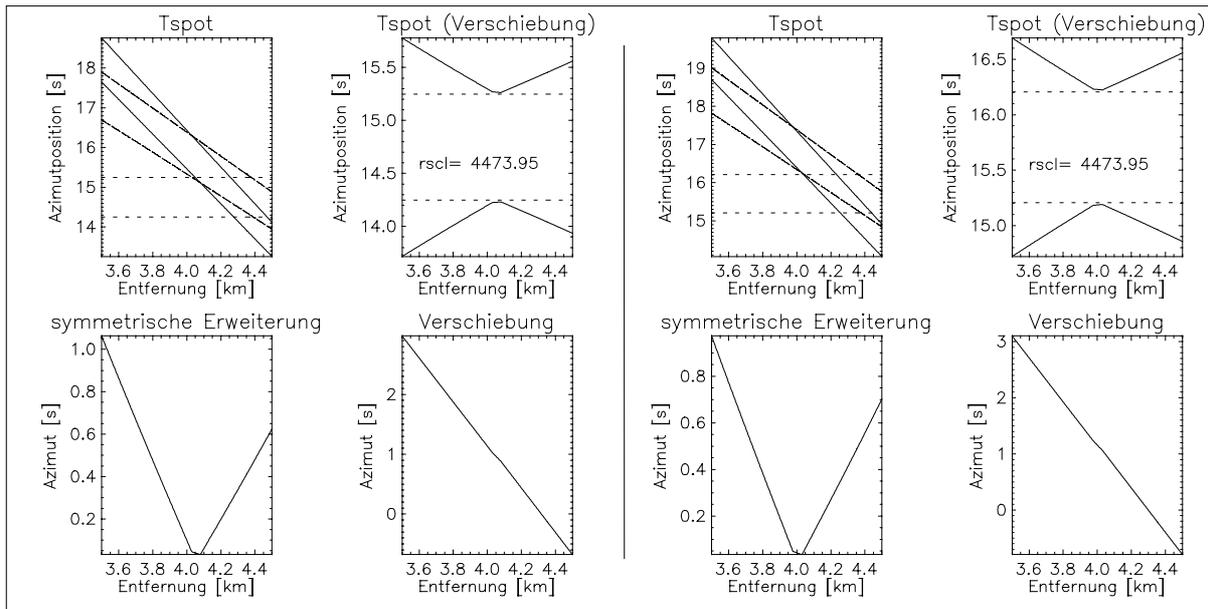


Bild 5.23: Erweiterung und Verschiebung bei der Azimut-Skalierung für Subapertur 1 (links) und für Subapertur 2 (rechts)

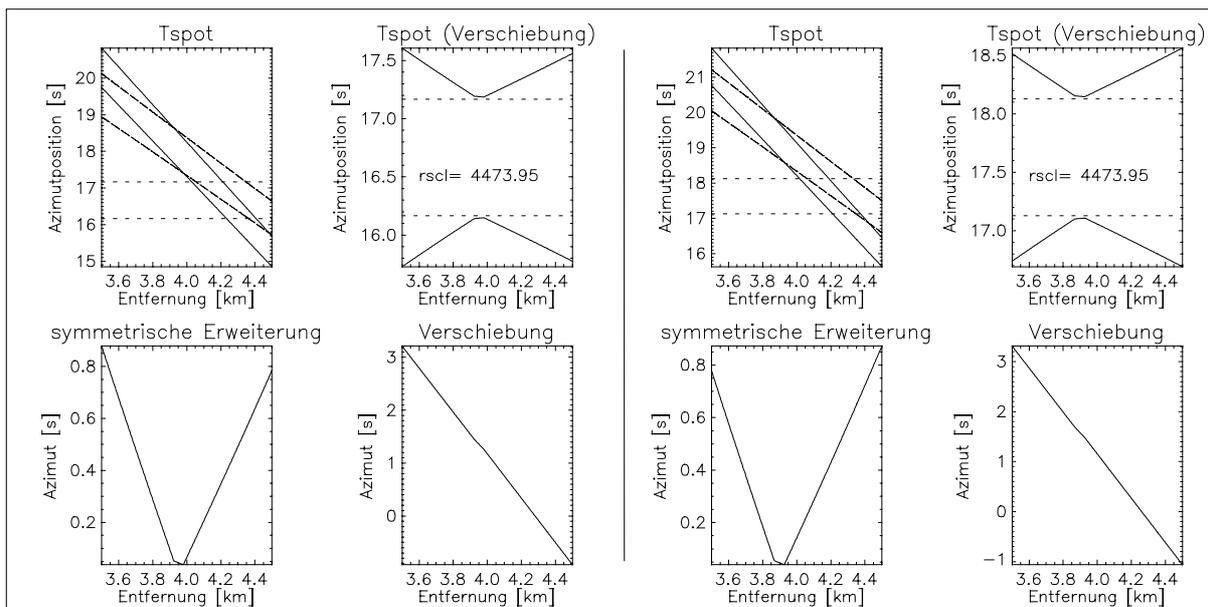


Bild 5.24: Erweiterung und Verschiebung bei der Azimut-Skalierung für Subapertur 3 (links) und für Subapertur 4 (rechts)

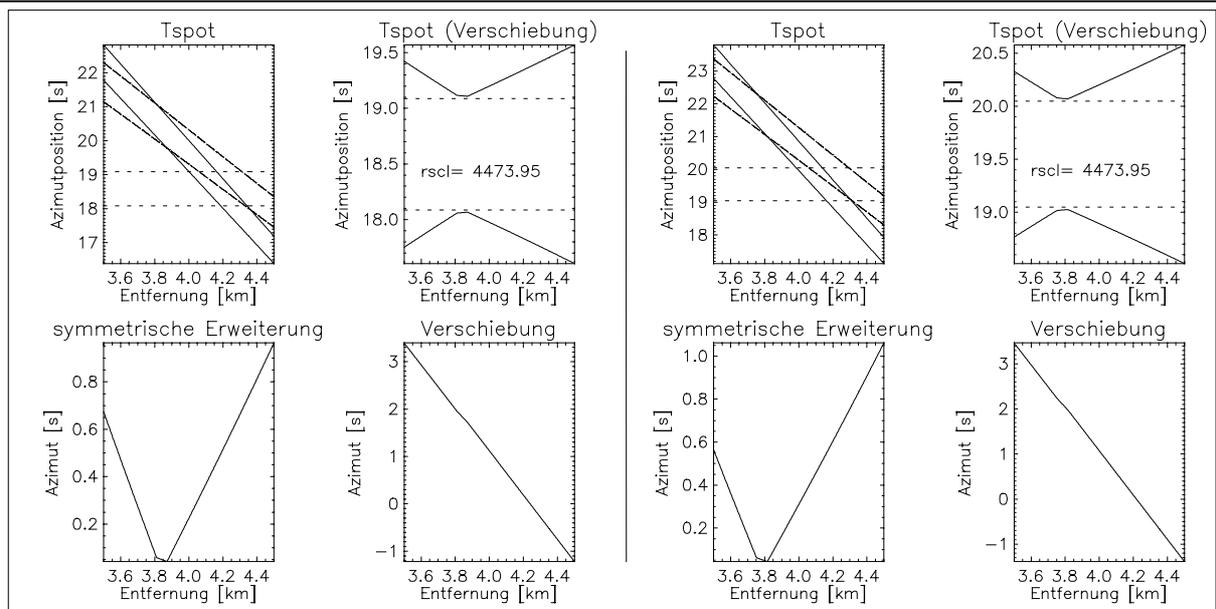


Bild 5.25: Erweiterung und Verschiebung bei der Azimut-Skalierung für Subapertur 5 (links) und für Subapertur 6 (rechts)

5.3.5 Rekombination der Subaperturen und *Deramping*

Die Azimut-Skalierung und die *Deramping*-Operation verkomplizieren die Rekombination der Subaperturen. Die Rekombination ist anhand von Bild 5.26 verdeutlicht.

Im Diagramm mit der Nummer 1 von Bild 5.26 ist ein Teil A des Augenblicks-frequenzverlaufs des Azimutsignals eines Punktziels bei $t_{a,0}$ vor der Azimut-Skalierung gezeigt. Von diesem Azimutsignal fällt ein rot gezeichneter Anteil in die Subapertur n und ein blau gezeichneter Anteil in die Subapertur $\#n+1$. Die beiden Subaperturen überlappen sich.

Das Azimutsignal B ergibt sich durch Azimut-Skalierung des Signals A. Auf Grund der Azimut-Skalierung sind die Signalanteile in den beiden Subaperturen verschoben. Alle Signale in Bild 5.26 sind ohne Azimutzeit-Verschiebung zur Minimierung der Azimuterweiterung dargestellt.

Das Diagramm Nummer 2 zeigt die *Deramping*-Funktion für die Subapertur n durch die rote, schräg nach unten weisende Linie. Die *Deramping*-Funktion deckt das ganze Azimutzeitintervall der Subapertur plus die Azimutzeiterweiterung für die Azimut-Skalierung ab. Das Signal nach dem *Deramping* ist im gleichen Diagramm durch die dicke rote Linie dargestellt. Im Diagramm Nummer 3 ist die *Deramping*-Funktion für die Subapertur $\#n+1$ analog zum zweiten Diagramm, aber in blauer Farbe dargestellt. Das Ergebnis des *Deramping* der Subapertur $\#n+1$ ist das dicke blaue Signal.

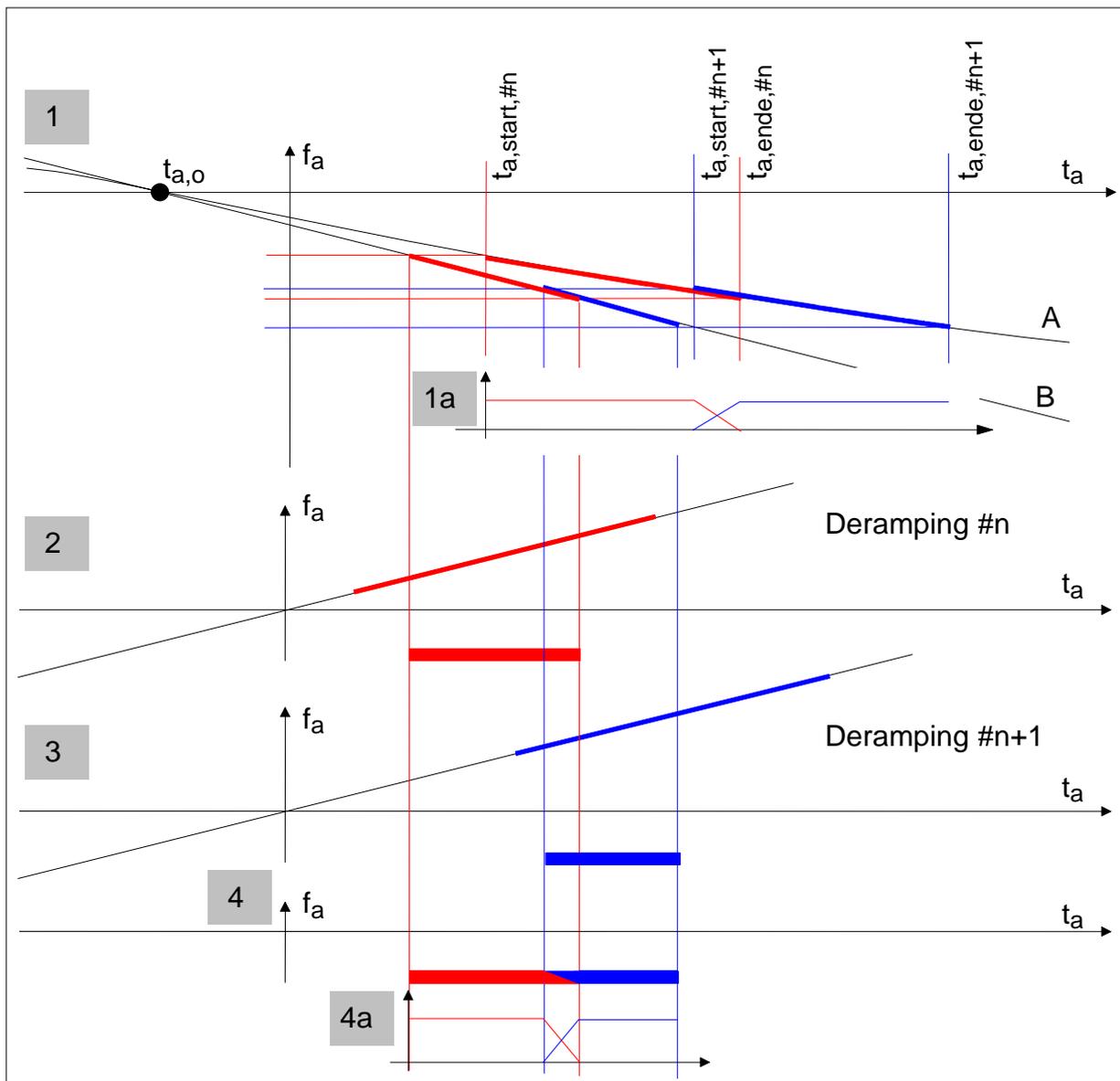


Bild 5.26: Rekombination der Subaperturen: 1) Teil A des Azimutsignals eines Punktziels vor der Azimut-Skalierung mit einem rot gezeichneten Anteil in der Subapertur n und einem blau gezeichneten Anteil in der Subapertur $\#n+1$, das Signal nach der Azimut-Skalierung ist mit B bezeichnet, 2) Deramping-Funktion für Subapertur $\#n$, 3) Deramping-Funktion für Subapertur $\#n+1$, 4) Zusammenfügen der Subaperturen, 4a) Gewichtung beim Zusammenfügen, 1a) Durchführen der Gewichtung für das Zusammenfügen bereits vor der Azimut-Skalierung

Das vierte Diagramm zeigt das Zusammenfügen der beiden Subaperturen. Da das Azimutsignal bei der Azimut-Skalierung eine von der Azimutposition abhängige Verschiebung der Azimutzeit erhält, müssen im Fall von Überlappung die Azimutsignale in den Subaperturen noch vor der Azimut-Skalierung gewichtet werden. Die Gewichtung muß im Überlappungsgebiet so stattfinden, daß die Summe der Gewichtungsfunktion am Ende einer Subapertur und der Gewichtungsfunktion am Anfang der nächsten Subapertur genau 1 für jede Azimutposition ergibt. Ein Beispiel für eine

solche Gewichtungsfunktion ist im Diagramm 1a gezeigt. Nach der Azimut-Skalierung hat sich die Ausdehnung des Überlappungsgebietes verändert, aber die Summe der Gewichtungsfunktionen im Überlappungsgebiet bleibt 1 für jede Azimutposition. Dies ist im Diagramm 4a gezeigt.

Wird die Verschiebung der Azimutzeit zur Minimierung der Erweiterung der Azimutzeitdimension bei der Azimut-Skalierung berücksichtigt, so muß der Zeitvektor zur Generierung der *Deramping*-Funktion in jeder Subapertur angepaßt werden. Wird die benötigte Zeitverschiebung in einer Subapertur #n mit $t_{v,\#n}(r_o)$ bezeichnet, so ergibt sich der Azimutzeitvektor für die Subapertur #n zu Gleichung (5.68).

$$t_{a,start,\#n} - \frac{T_{ext}}{2} - t_{v,\#n}(r_o) \leq t'_{a,\#n}(r_o) \leq t_{a,ende,\#n} + \frac{T_{ext}}{2} - t_{v,\#n}(r_o) \quad (5.68)$$

Dabei ist wegen der Blockprozessierung T_{ext} die maximale Erweiterung von $T_{ext}(r_o)$ aus Gleichung (5.57) von allen verarbeiteten Entfernungen. Vor dem Zusammenfügen der einzelnen Subaperturen muß natürlich die in jeder Subapertur und in jeder Entfernung unterschiedliche Verschiebung $t_{v,\#n}(r_o)$ ausgeglichen werden. Dies ist im Blockdiagramm von Bild 5.18 beim Zusammenfügen der Subaperturen mit angeführt. Der vollständige Ausgleich der Azimutzeit-Verschiebung erfolgt dann nach der letzten FFT in Azimut, wie ebenfalls in Bild 5.18 gezeigt.

5.3.6 Beispiel zur Subapertur-Verarbeitung

In diesem Kapitel werden einige Zwischenergebnisse der Frequenz-Skalierungs-Verarbeitung mit Subaperturen behandelt. Die Rohdaten wurden wieder für das Beispiel von Bild 5.11 rechts generiert. In Kapitel 5.3.7 werden dann die Ergebnisse nach der kompletten Verarbeitung mit und ohne Subapertur verglichen. Die Subapertur-Verarbeitung wurde mit 600 Hz PRF durchgeführt, um für die maximale Augenblicksbandbreite von ca. 550 Hz bei einer Subaperturlänge von 1s (siehe Kapitel 5.3.3) eine Überabtastung von etwa 10% zu erreichen. In Bild 5.27 sind die Amplitudenbeträge der ersten beiden Subaperturen der linken Ziele der rechten Szene in Bild 5.11 nach der Aufteilung in Subaperturen mit Gewichtung im Überlappungsgebiet gezeigt.

Die wieder zusammengefügte Subaperturen im Fall einer Überlappung von 0.04 s sind in Bild 5.28 dargestellt. Zum Vergleich ist das Ergebnis der Rekombination für den Fall ohne Überlappung in Bild 5.29 gezeigt.

5 Ein neues Verfahren zur Verarbeitung von Spotlight-SAR-Daten

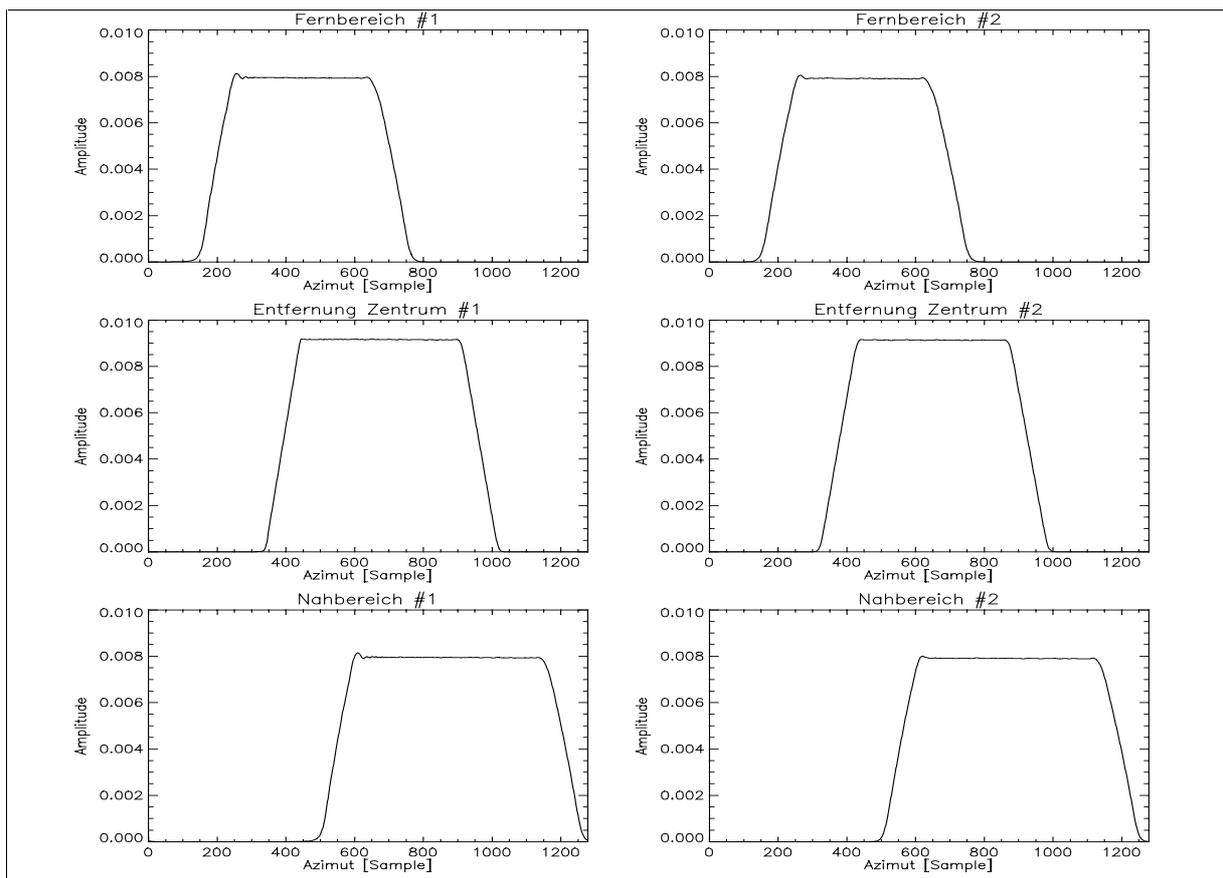


Bild 5.27: Erste (links) und zweite (rechts) Subapertur von drei Punktzielen

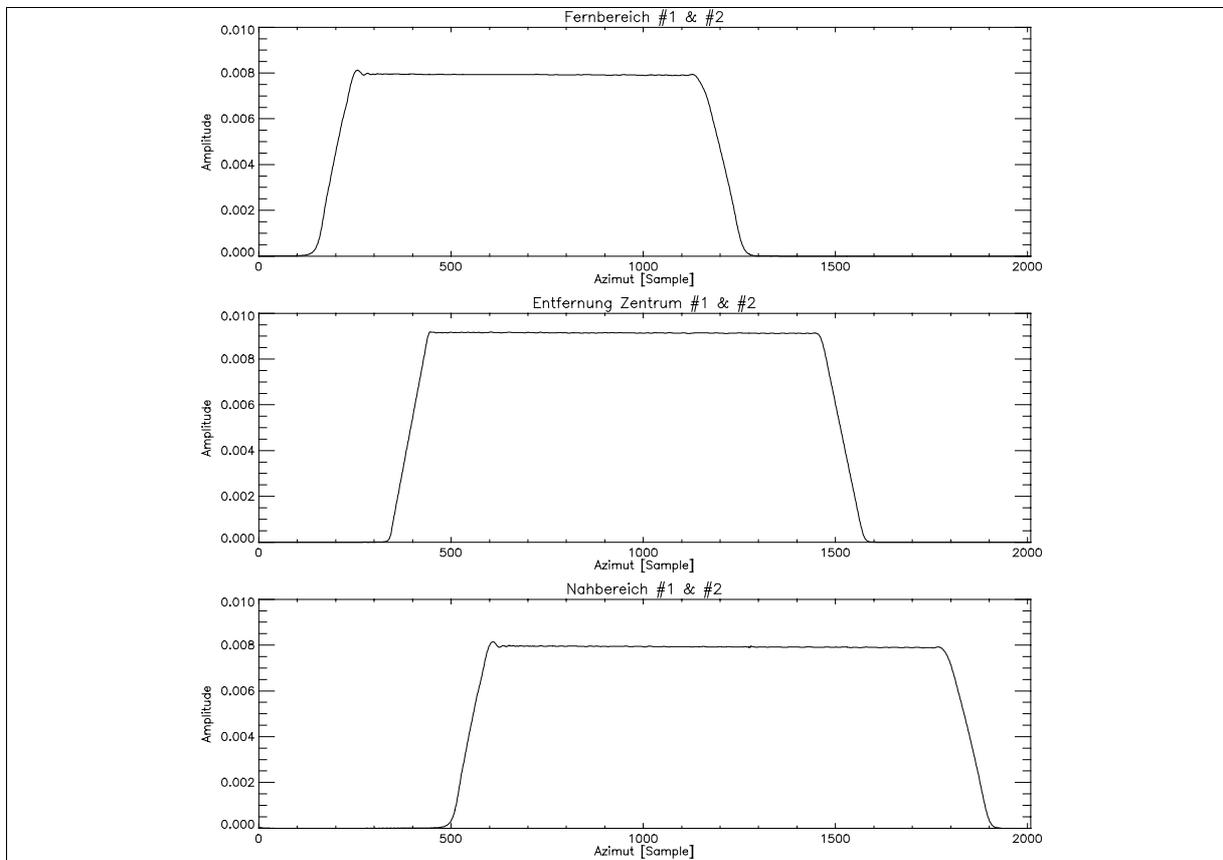


Bild 5.28: Nach Bild 5.26 (4a) mit Überlappung rekombinierte Subaperturen

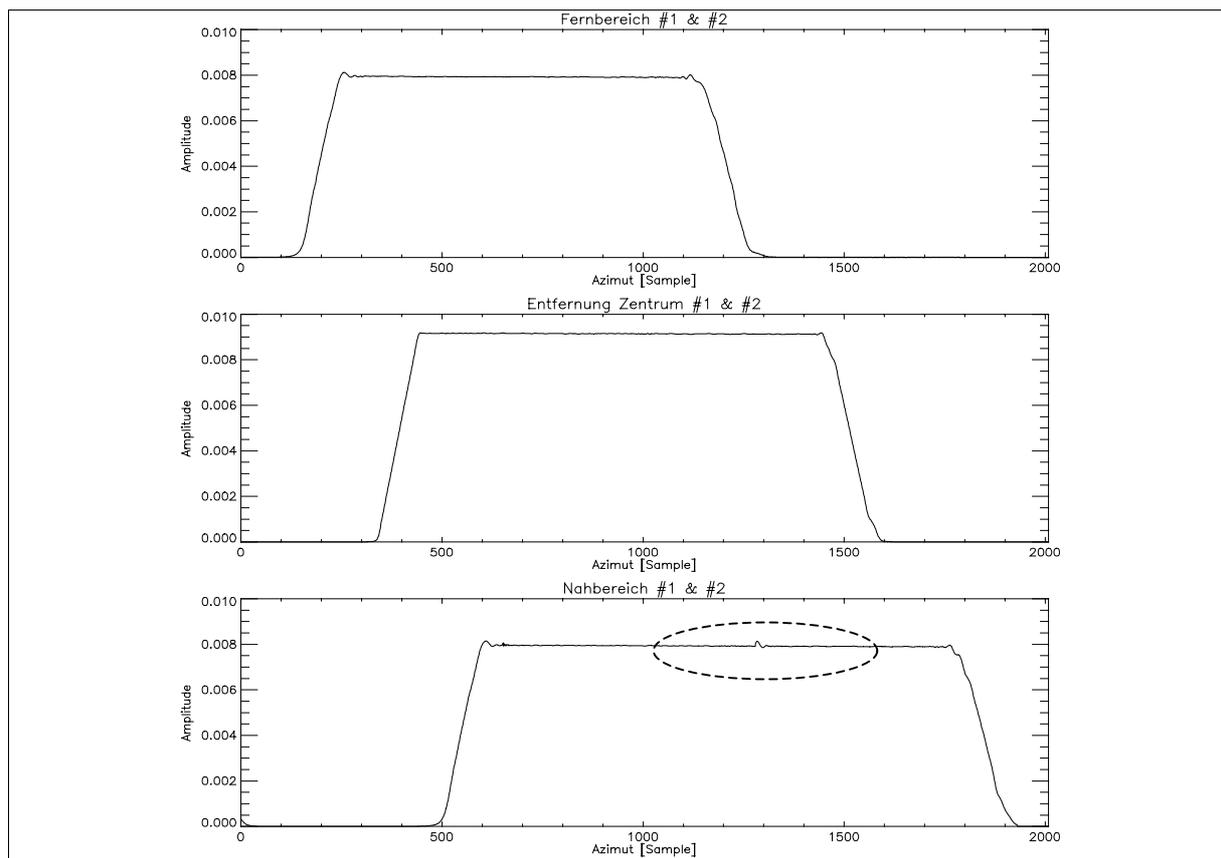


Bild 5.29: Rekombinierte Subaperturen ohne Überlappung im Zeitbereich: im Nahbereich ist eine kleine Unstetigkeit auf Grund der fehlenden Überlappung zu erkennen

Bei einer fehlenden Überlappung tritt eine kleine Amplitudenschwankung im Bereich des Übergangs zwischen den einzelnen Subaperturen auf. Diese Schwankung entsteht durch Überschwinger am Rand der Subaperturen und ist in Bild 5.29 am besten im Nahbereich an der markierten Stelle zu beobachten. Eine kleine Überlappung sollte deshalb immer vorhanden sein, auch um einen kontinuierlichen Phasenübergang zwischen den einzelnen Subaperturen zu gewährleisten. Für die durchgeführten Simulationen war eine Überlappung von unter 5% immer ausreichend.

5.3.7 Ergebnisse der Punktzielanalyse

Die ganze verarbeitete Beispielszene mit neun Punktzielen von Bild 5.11 rechts ist für den Fall der Subapertur-Verarbeitung in Bild 5.30 in Originalgeometrie gezeigt. Zur Unterscheidung wurden die Rohdaten der Ziele bei $t_a = 0$ s wieder mit einer kleineren Amplitude generiert. Die PRF ist 600 Hz. Die Länge der Subaperturen ist zu 1 s gesetzt und es wurde eine Überlappung von 0.04 s verwendet. Die Verarbeitung wurde ohne Gewichtung zur Nebenzipfelunterdrückung durchgeführt, da so eventuelle Fehler in der Verarbeitung besser erkannt werden können. Die Ergebnisse der Punktzielanalyse des linken oberen Ziels werden exemplarisch dargestellt.

Eine Konturliniendarstellung der interpolierten Amplitude der zweidimensionalen Impulsantwort ist in Bild 5.31 zu sehen. In diesem Bild sind auch die Nebenzipfelverhältnisse in roter Farbe in dB eingetragen. Die Defokussierung der Nebenzipfel in Entfernung nimmt mit zunehmendem Abstand zur Hauptkeule zu und ist eine Folge des großen Unterschieds zwischen Azimut- und Entfernungsauflösung. Die vergleichsweise sehr geringe Auflösung in Entfernungsrichtung verursacht die Defokussierung der Entfernungsnebenzipfel in Azimutrichtung. Eine höhere Entfernungsauflösung war auf Grund des begrenzten Arbeitsspeichers des Simulationsrechners nicht möglich. Berücksichtigt man die geringe Entfernungsauflösung, so zeigt das Höhenlinienbild eine sehr gut fokussierte Impulsantwort.

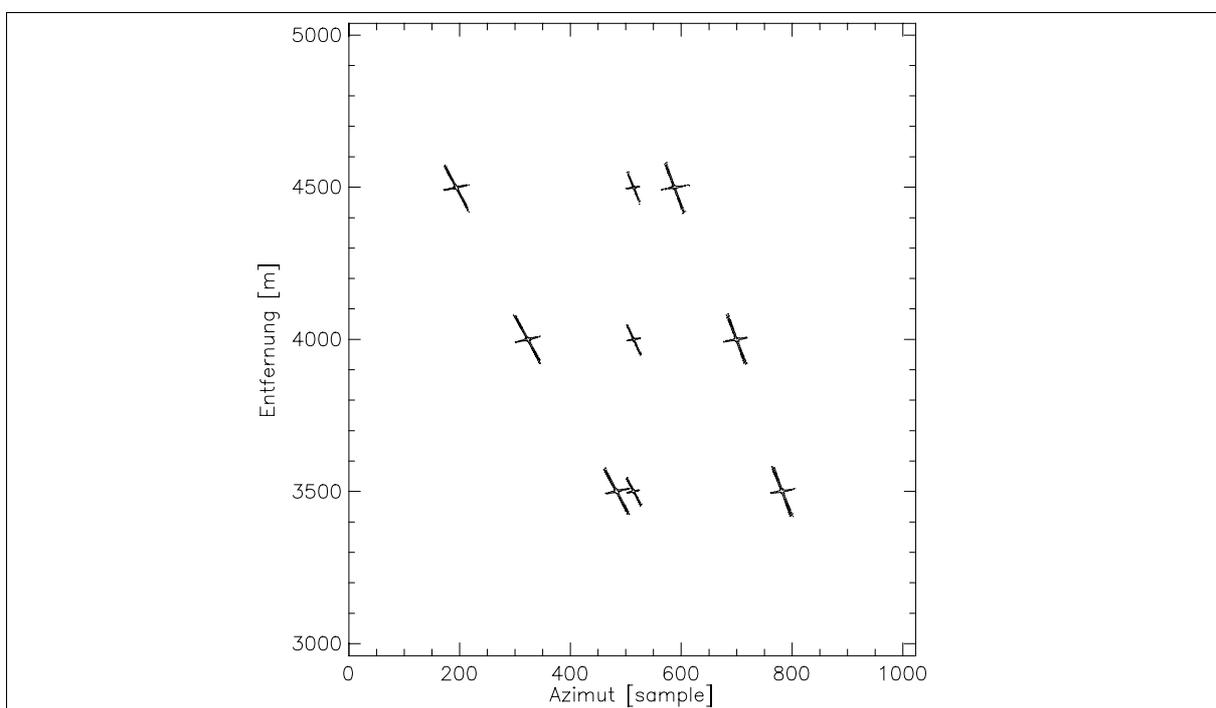


Bild 5.30: Szene mit neuen Punktzielen nach Frequenz-Skalierungs-Verarbeitung mit Subaperturen

Durch Schnitte in Richtung der Azimut- und Entfernungsnebenmaxima ergeben sich die eindimensionalen Impulsantworten in Azimut und Entfernung. In Bild 5.32 sind links diese Impulsantworten in Azimut und in Entfernung für das linke obere Ziel gezeigt. Die Azimutimpulsantwort zeigt einen idealen Verlauf. In Entfernungsrichtung ist die Defokussierung der Nebenzipfel auf Grund der vergleichsweise geringen Auflösung in Entfernung zu beobachten. Daneben ist an den in der Mitte leicht angehobenen Minima ein kleiner Phasenfehler zu erkennen, der von der angenäherten Korrektur der sekundären Entfernungskompression verursacht wird. Mit Gleichung (C. 2) und der prozessierten Entfernungsbandbreite von 93.1 MHz ergibt sich der Phasenfehler $\Phi_{\text{err,SRC}}$ zu 12.6° am Rand der prozessierten Bandbreite.

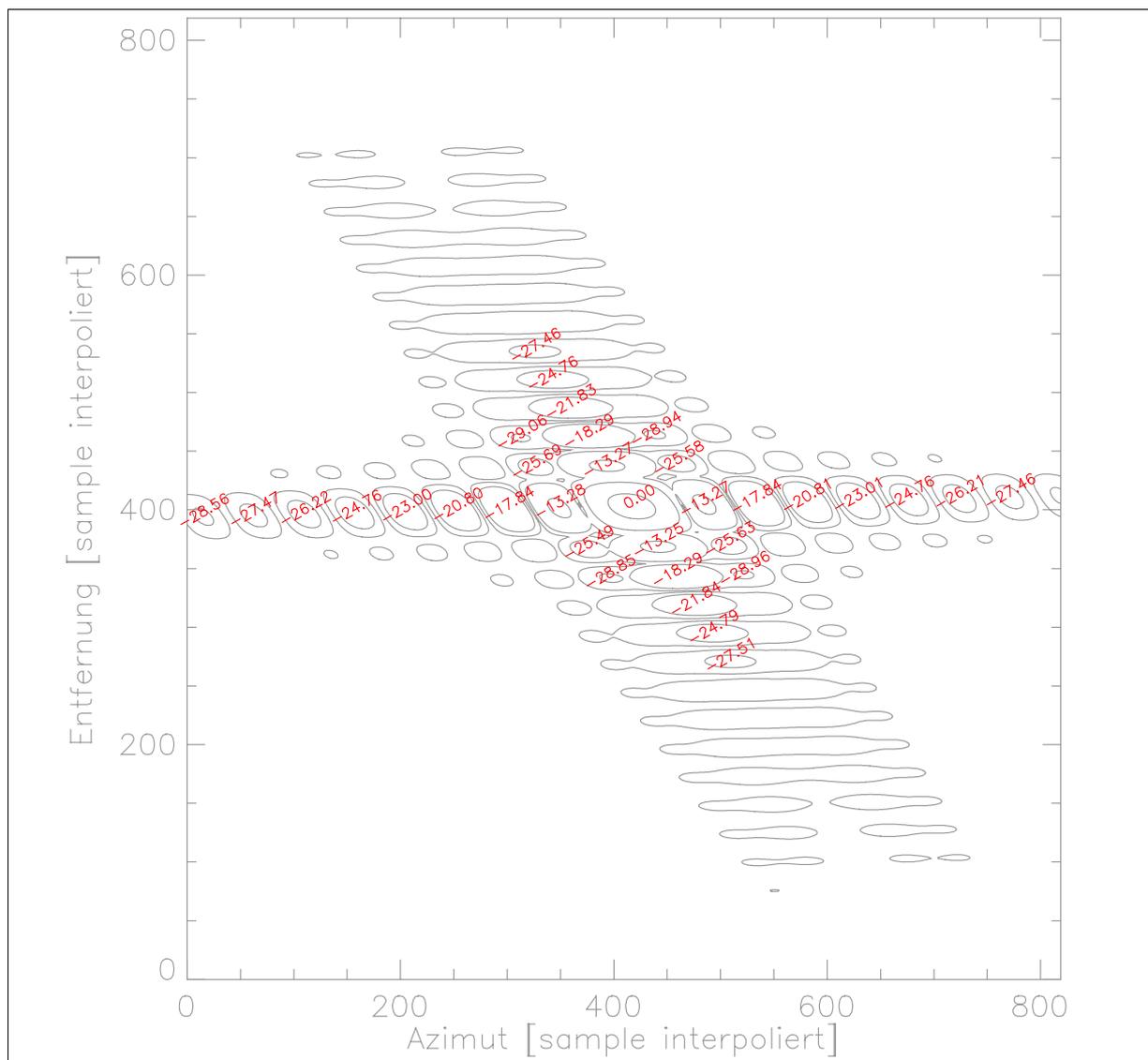


Bild 5.31: Interpolierte zweidimensionale IRF als Ergebnis der Subapertur-Verarbeitung: die Nebenzipfelverhältnisse sind in roter Farbe eingetragen

Ein Punktziel bei der Entfernung des Zentrums zeigt in Azimut und Entfernung einen idealen Verlauf der Impulsantwort ohne Phasenfehler. Dazu ist in Bild 5.32 rechts die interpolierte Impulsantwort in Azimut und Entfernung für das linke Ziel bei Referenzentfernung gezeigt.

Die Zahlenwerte der Punktzielanalyse für das linke obere Ziel bei der Verarbeitung mit Subaperturen sind in Tabelle 5.7 zusammengefaßt. Die Ergebnisse in Azimut sind als optimal zu bezeichnen. In Entfernungsrichtung entsprechen die Ergebnisse den Erwartungen durch die begrenzte Auflösung in Entfernungsrichtung.

In der Praxis wird die in diesem Simulationsbeispiel auftretende Defokussierung der Entfernungsnebenzipfel aus zwei Gründen nicht von Bedeutung sein. Erstens wer-

den sich Azimut- und Entfernungsaufösung in der gleichen Größenordnung bewegen und zweitens verwendet man dort eine Gewichtung zur Unterdrückung der Nebenzipfel.

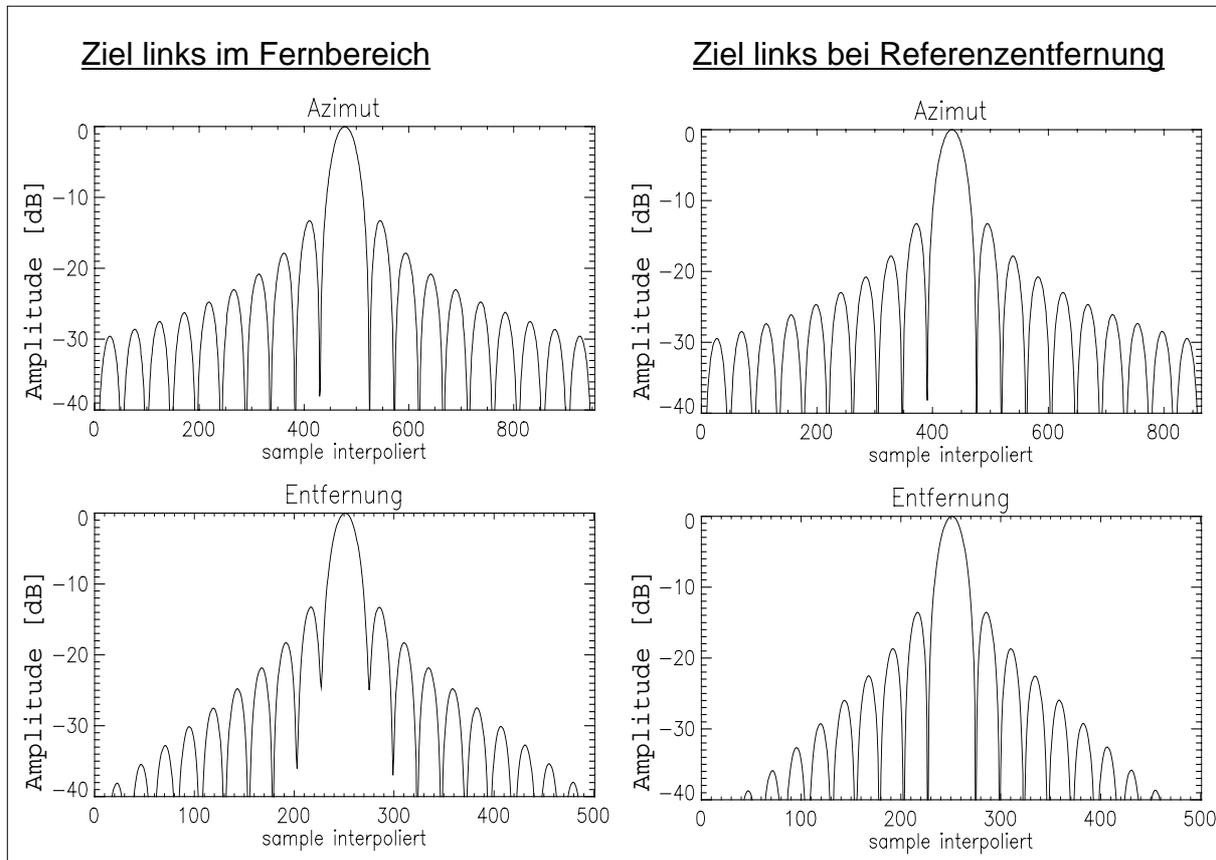


Bild 5.32: Interpolierte Impulsantwort in Azimut und Entfernung bei der Subapertur-Verarbeitung für die linken Ziele im Fernbereich (rechts) und bei der Referenzentfernung (links)

	Azimut	Entfernung
Auflösung theoretisch	0.1866 m	1.434 m
Auflösung gemessen	0.1843 m	1.396 m
Abweichung	-1.25 %	-2.64 %
ISLR [dB]	-10.18	-10.75
SLR links [dB]	-13.28 -17.84 -20.80	-13.26 -18.29 -21.84
SLR rechts [dB]	-13.27 -17.84 -20.81	-13.27 -18.29 -21.83
PSLR [dB]	-13.27	-13.26

Tabelle 5.7: Ergebnisse der Subapertur-Verarbeitung

Zur Kontrolle der Subapertur-Verarbeitung wurde die gleiche Szene einer Verarbeitung ohne Subaperturen unterzogen. Dabei wurde eine ausreichend hohe PRF von 900 Hz gewählt. Die Gesamtbandbreite der Szene beträgt 858 Hz (siehe Kapitel

5.3.2). Die benötigte Frequenzbandbreite zur Darstellung der gesamten Szene ohne Azimutfrequenz-Verschiebung beträgt 729 Hz laut Tabelle 5.3. Es müsste also in diesem Beispiel keine Azimutfrequenz-Verschiebung durchgeführt werden. Die Verschiebung wurde aber dennoch angewendet, da eine allgemein gültige Implementierung der Verarbeitung ohne Subaperturen verwendet wurde. In Bild 5.33 ist die Beispielszene nach der Verarbeitung ohne Subaperturen in Originalgeometrie gezeigt. Eine Punktzielanalyse wurde wieder für das linke obere Ziel durchgeführt.

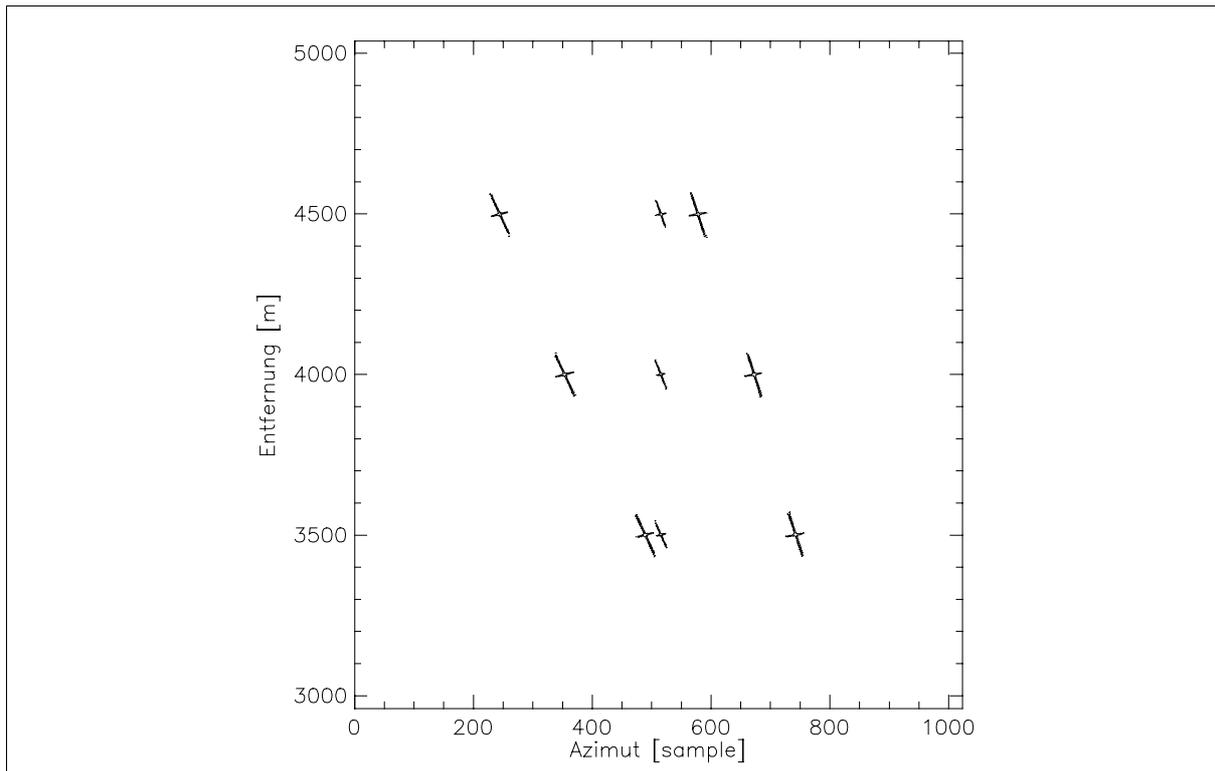


Bild 5.33: Szene nach Verarbeitung ohne Subaperturen mit 900 Hz PRF

Das Höhenlinienbild der interpolierten Amplitude der zweidimensionalen Impulsantwort ist in Bild 5.34 enthalten. Die Nebenzipfelverhältnisse sind wieder in roter Farbe eingetragen. Das Höhenlinienbild zeigt praktisch keine Unterschiede zum Ergebnis der Verarbeitung mit Subaperturen von Bild 5.31.

In Bild 5.35 ist die eindimensionale Impulsantwort in Azimut und Entfernung des linken oberen Ziels dargestellt. Die Impulsantworten in Azimut- und Entfernungsrichtung sind praktisch identisch zu den Ergebnissen der Verarbeitung mit Subaperturen von Bild 5.32.

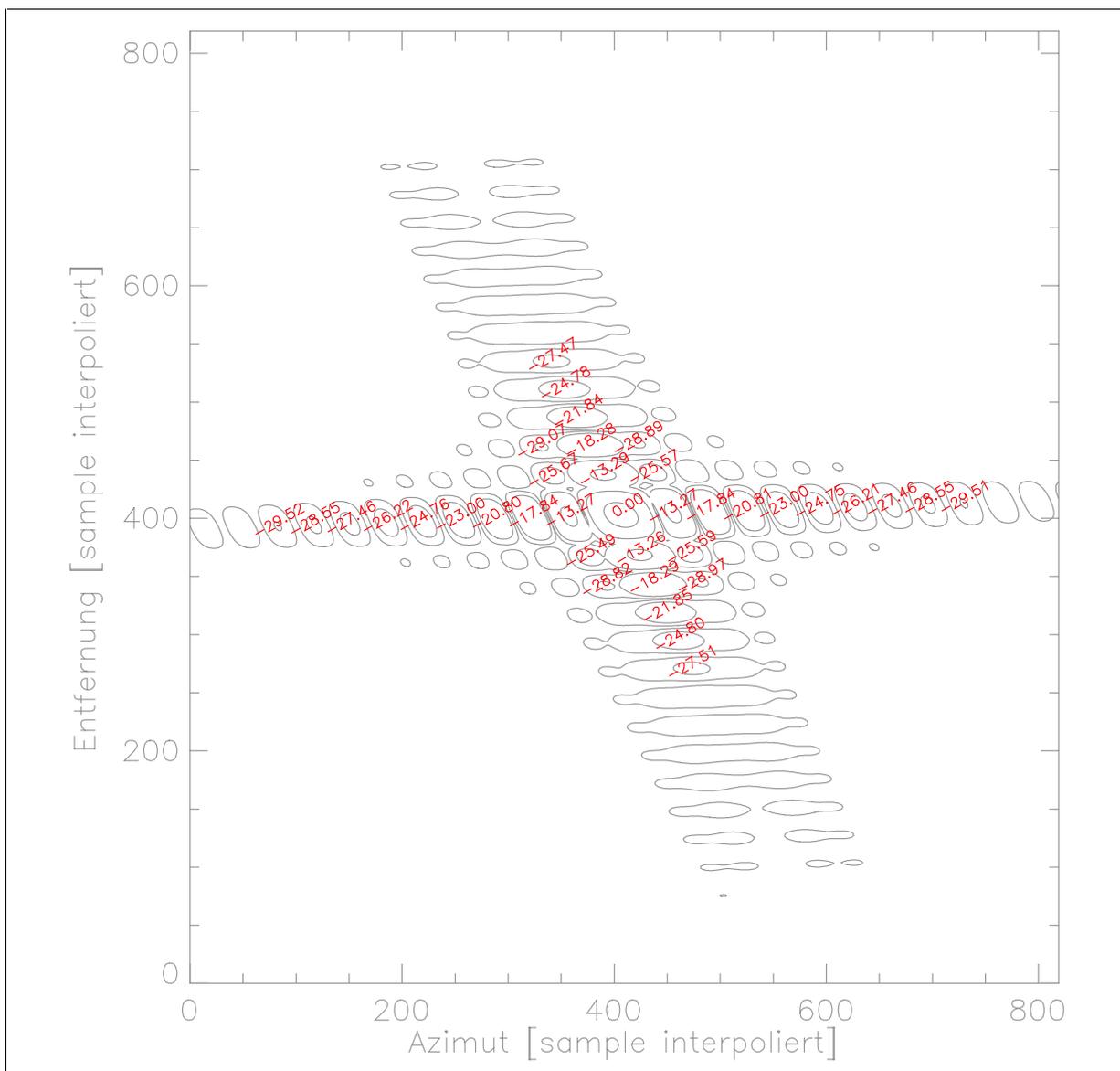


Bild 5.34: Interpolierte 2-D IRF bei Verarbeitung ohne Subaperturen: die Nebenzipfelverhältnisse sind in roter Farbe eingetragen

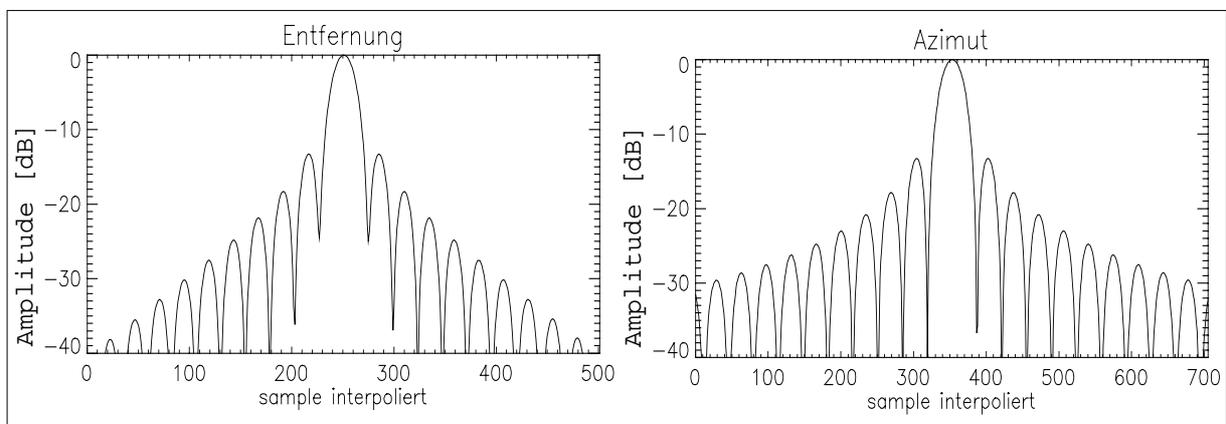


Bild 5.35: Interpolierte Impulsantwort in Azimut und Entfernung bei Verarbeitung ohne Subaperturen: bei der Impulsantwort in Entfernung erkennt man einen kleinen Phasenfehler auf Grund der Näherung bei der sekundären Entfernungskompression

Die Ergebnisse der Punktzielanalyse des linken oberen Ziels für die Verarbeitung ohne Subaperturen sind in Tabelle 5.8 gezeigt. Die Ergebnisse in Azimut und Entfernung zeigen praktisch keine Abweichungen von den Ergebnissen der Verarbeitung mit Subaperturen von Tabelle 5.7.

	Azimut	Entfernung
Auflösung theoretisch	0.1866 m	1.434 m
Auflösung gemessen	0.1888 m	1.396 m
Abweichung	1.18%	-2.64 %
ISLR [dB]	-10.17	-10.77
SLR links [dB]	-13.27 -17.84 -20.80	-13.26 -18.29 -21.85
SLR rechts [dB]	-13.27 -17.84 -20.81	-13.29 -18.28 -21.84
PSLR [dB]	-13.27	-13.26

Tabelle 5.8: Ergebnisse der Verarbeitung ohne Subaperturen

Um die bei einer Verarbeitung ohne Subaperturen auftretenden Fehler für den Fall einer Unterabtastung zu verdeutlichen, wurde die Beispielszene noch einmal ohne Subaperturen verarbeitet. Dabei wurde allerdings die PRF von 600 Hz der oben durchgeführten Subapertur-Verarbeitung verwendet. Das Ergebnis ist in Bild 5.36 gezeigt. Durch die Unterabtastung treten mehrdeutige Azimutfrequenzen auf, welche zu sogenannten „Geisterbildern“ führen. Die mehrdeutigen Signalanteile werden an falschen Positionen fokussiert und erfahren eine falsche Korrektur der Zielentfernungsänderung. „Geisterbilder“ sind in Bild 5.36 grau umrandet.

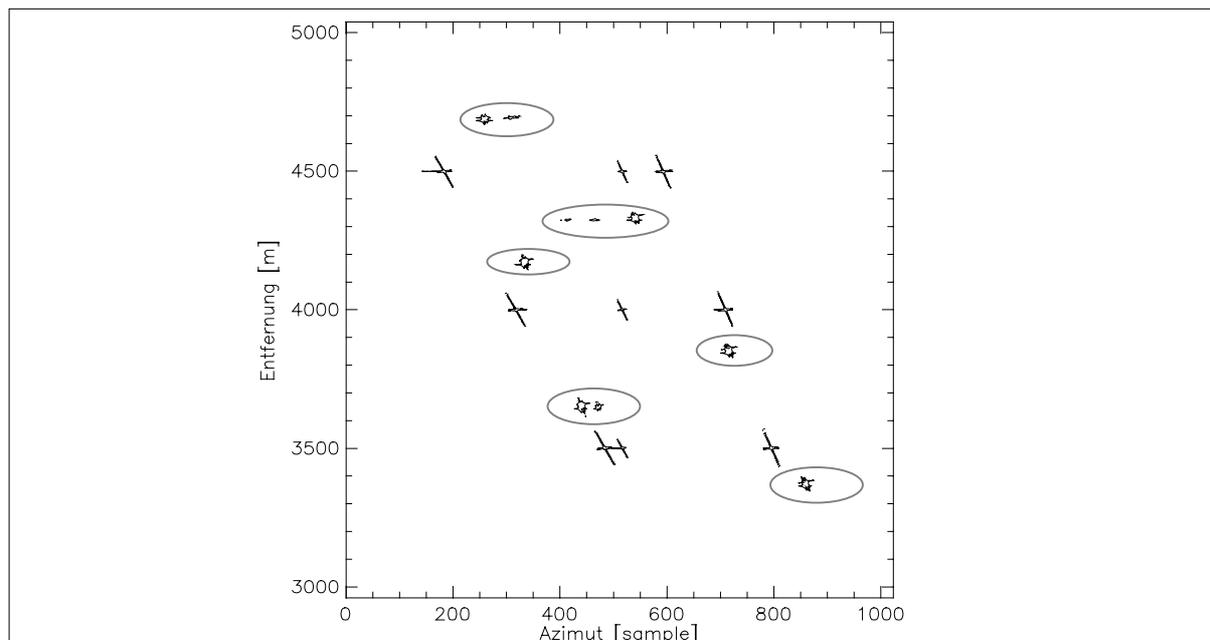


Bild 5.36: Szene nach Verarbeitung ohne Subaperturen mit einer PRF kleiner der Gesamtbandbreite der Szene: Es treten Geisterbilder auf, die im Plot eingekreist sind

5.3.8 Berechnung gültiger Szenengröße

Tabelle 5.9 zeigt gültige Szenengrößen für das Frequenz-Skalierungs-Verfahren und für andere Algorithmen zur *Spotlight*-Verarbeitung.

Szenengröße für Phasenfehler kleiner $\pi/2$ am Rand der prozessierten Bandbreite			
Algo- rithmus	grundlegende Formeln zur Berechnung maximalen Szenengröße	Flug- zeug- SAR	Sa- telliten -SAR
<i>Polar Format</i>	$r_{\text{rad}} \leq \frac{2 \cdot \rho_a}{k_{\text{ga}}} \cdot \sqrt{\frac{r_c}{\lambda \cdot \cos(\Psi_m)}}$	Radius $r_{\text{rad}} =$ 246m	Radius $r_{\text{rad}} =$ 3481 m
<i>Wave- number</i>	keine Beschränkung der Szenengröße auf Grund des Algorithmus bei Annahme einer fehlerfreien Interpolation		
<i>Chirp Scaling</i>	$\Phi_{\text{err,Taylor}}(f_a, f_e) = \frac{4\pi \cdot r_o}{\lambda} \left[\sqrt{\left(\frac{f_e \cdot \lambda}{c_o} + 1\right)^2 - \left(\frac{f_a \cdot \lambda}{2 \cdot V}\right)^2} - \left(\beta + \frac{f_e \cdot \lambda}{c_o \cdot \beta} + \frac{\beta^2 - 1}{2 \cdot \beta^3} \cdot \frac{f_e^2 \cdot \lambda^2}{c_o^2}\right) \right]$ mit $\beta = \sqrt{1 - \left(\frac{f_a \cdot \lambda}{2 \cdot V}\right)^2}$ Phasenfehler Taylor-Approximation (Anhang B)	4438 m in Azimut	754 km in Azimut
	$\Phi_{\text{err,SRC}}(f_a, f_e) = 2\pi \cdot \frac{\beta^2 - 1}{\beta^3} \cdot \frac{\lambda}{c_o^2} \cdot (r_c - r_o) \cdot f_e^2$ Phasenfehler sek. Entfernungskompression (Anhang B)	970 m x 970 m	72 km x 72 km
<i>Fre- quenz- Skalie- rungs- Ver- fahren</i>	$\Phi_{\text{err,Taylor}}(f_a, f_e) = -\frac{4\pi \cdot r_o}{\lambda} \cdot \sqrt{\left(1 + \frac{k_e \cdot \lambda}{c_o} \cdot \left(t_e - \frac{2 \cdot r_{\text{ref}}}{c_o}\right)\right)^2 - \left(\frac{f_a \cdot \lambda}{2 \cdot V}\right)^2}$ $+ \frac{4\pi \cdot r_o}{\lambda} \cdot \left(\beta + k_e \cdot \left(t_e - \frac{2 \cdot r_{\text{ref}}}{c_o}\right) \cdot \frac{\lambda}{c_o} \cdot \frac{1}{\beta} + \frac{\beta^2 - 1}{2 \cdot \beta^3} \cdot \left[k_e \cdot \left(t_e - \frac{2 \cdot r_{\text{ref}}}{c_o}\right) \cdot \frac{\lambda}{c_o} \right]^2 - \frac{\beta^2 - 1}{2 \cdot \beta^5} \cdot \left[k_e \cdot \left(t_e - \frac{2 \cdot r_{\text{ref}}}{c_o}\right) \cdot \frac{\lambda}{c_o} \right]^3 \right)$ Phasenfehler Taylor-Approximation (Anhang C)	7114 m in Azimut	1512 km in Azimut
	$\Phi_{\text{err,SRC}}(f_a, f_e) = \left[\frac{\beta^2 - 1}{\beta^3} \cdot \frac{\lambda}{c_o^2} \cdot k_e^2 \cdot \left(t_e - \frac{2 \cdot r_{\text{ref}}}{c_o}\right)^2 - \frac{r_o \cdot \lambda^2}{c_o^3} \cdot \frac{(\beta^2 - 1)}{\beta^5} \cdot k_e^3 \cdot \left(t_e - \frac{2 \cdot r_{\text{ref}}}{c_o}\right)^3 \right] \cdot 2\pi \cdot (r_c - r_o)$ Phasenfehler sek. Entfernungskompression (Anhang C)	976 m x 976 m	73 km x 73 km

Tabelle 5.9: Maximale Szenengröße beim Frequenz-Skalierungs-Verfahren im Vergleich zu anderen Algorithmen für Spotlight

Für die Berechnung wurden wieder die Beispiel-Parametersätze von Tabelle 3.3 und das Kriterium eines Phasenfehlers kleiner $\pi/2$ am Rand der prozessierten Bandbreite verwendet. Die Berechnung ist in Anhang C beschrieben. Tabelle 5.9 stellt eine Erweiterung von Tabelle 3.4 um das Frequenz-Skalierungs-Verfahren dar.

Wegen der ähnlichen Näherungen durch die Taylor-Approximation und bei der sekundären Entfernungskompression sind die maximalen Szenengrößen von Frequenz-Skalierungs-Verfahren und *Chirp Scaling*-Algorithmus fast identisch.

Wegen der weniger starken Begrenzung durch den Phasenfehler der Taylor-Approximation kann beim Frequenz-Skalierungs-Verfahren durch eine Aufteilung der verarbeiteten Szene in Entfernung und die Verwendung von mehreren Referenzentfernungen für die sekundäre Entfernungskompression die maximale Szenengröße wesentlich gesteigert werden. Eine Erweiterung der maximalen Szenengröße durch die Verwendung von mehreren Referenzentfernungen ist auch beim *Chirp-Scaling*-Algorithmus möglich.

6 SIMULATION EINES SPOTLIGHT-BILDES AUS STRIPMAP-ROHDATEN

Die Grundidee der Extraktion eines *Spotlight*-Bildes aus *Stripmap*-Rohdaten ist in Bild 6.1 gezeigt. Die dicken Linien stellen eine *Stripmap*-Abbildung mit einer sich entlang der Azimutachse bewegenden Antenne dar. Der Squintwinkel Ψ_{Strip} ist während der gesamten Abbildung konstant. Für die Extraktion eines *Spotlight*-Bildes müssen die hellgrauen Sektoren aus der *Stripmap*-Beleuchtung ausgewählt werden. Für jeden Azimutzeitpunkt muß ein anderer Sektor gewählt werden, da der *Spotlight*-Squintwinkel Ψ durch das Nachführen der Antenne zwischen Ψ_{start} und Ψ_{ende} über Azimut variiert.

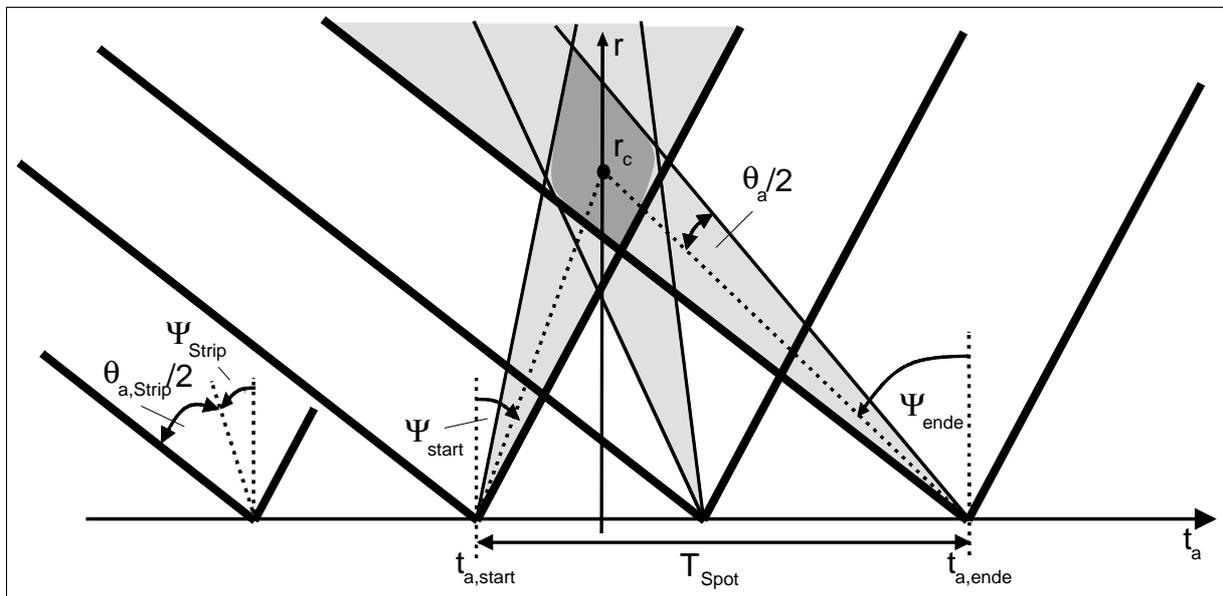


Bild 6.1: Prinzip der Extraktion eines Spotlight-Bildes aus Stripmap-Rohdaten: die Antennenbeleuchtung des Stripmap-Modus ist in dicker Linie dargestellt, die Antennenbeleuchtung im Spotlight-Modus durch die grauen Flächen

Stripmap-Rohdaten des flugzeuggetragenen E-SAR-Systems des DLR [30] [31] im X-Band wurden für die *Spotlight*-Prozessierung verwendet. Das E-SAR liefert auf Grund seiner hohen PRF von 1000 Hz und seines großen Öffnungswinkels der realen Apertur sehr gute Rohdaten für diese Art der Prozessierung.

Das E-SAR-System arbeitet mit hoher Auflösung im P-, L-, S-, C- und X-Band und wird von einem kleinen Flugzeug, einer Dornier 228, getragen. Es ermöglicht eine *Along*- und *Across-track* interferometrische Abbildung im X-Band sowie polarimetrische Abbildung in allen seinen Frequenzbändern, wobei P- und L-Band vollpolari-

metrisch eingesetzt werden können. Auch die polarimetrische *Multi-Pass-Interferometrie* ist für P- und L-Band realisiert [59].

Natürlich kann die maximal mögliche *Stripmap*-Azimutauflösung nicht durch eine *Spotlight*-Verarbeitung der *Stripmap*-Rohdaten verbessert werden. Für eine in Azimut ausgedehnte Szene muß die *Spotlight*-Auflösung sogar schlechter sein als die maximal mögliche *Stripmap*-Auflösung. Diese Art der *Spotlight*-Prozessierung ermöglicht es aber, die Gültigkeit des entwickelten Frequenz-Skalierungs-Verfahrens zu zeigen. Darüber hinaus besitzen die nach dieser Methode prozessierten *Spotlight*-Bilder viele physikalischen Eigenschaften des *Spotlight*-Modus und somit wird ein Vergleich zwischen *Stripmap*- und *Spotlight*-Abbildung möglich. Die E-SAR Parameter der nachfolgend verwendeten X-Band *Stripmap*-Rohdaten sind in Tabelle 6.1 angeführt.

T_p	Pulslänge	5 μ s
B_p	Pulsbandbreite	100 MHz
S_f	Abtastfrequenz	100 MHz
λ	Wellenlänge	0.03125 m
V	Geschwindigkeit	86.7 m/s
PRF	Pulswiederholfrequenz	1000 Hz
Ψ_{Strip}	<i>Stripmap</i> Squintwinkel (offset)	-0.3°
$\theta_{a,Strip}$	<i>Stripmap</i> realer Öffnungswinkel	8°

Tabelle 6.1: Parameter der verwendeten E-SAR-Rohdaten

6.1 Azimutzeit-/Frequenzdarstellung von *Stripmap*- und *Spotlight*- Rohdaten

Stripmap-Rohdaten sind in Azimutrichtung ein kontinuierlicher Strom von Daten. In Bild 6.2 ist links mit dicker Linie das Azimutsignal eines Punktziels bei *Stripmap*-Beleuchtung dargestellt. Rechts daneben schließen sich die Azimutsignale von vielen anderen Punktzielen bei derselben Entfernung an. Alle diese *Stripmap*-Azimutsignale besitzen auf Grund des konstanten Squintwinkels eine gleich lange *Stripmap*-Apertur und eine gleich hohe *Stripmap*-Bandbreite, welche in (2.17) definiert ist.

Für die *Spotlight*-Prozessierung dieser *Stripmap*-Rohdaten wird ein Rohdatenblock mit der Azimutausdehnung der gewünschten Länge der *Spotlight*-Apertur ausgeschnitten. Der ausgeschnittene Rohdatenblock entspricht in Bild 6.2 dem hell- und dunkelgrauen Bereich. Der hellgraue Bereich beinhaltet die Azimutsignale von gültigen Zielen, welche eine vollständige *Spotlight*-Apertur besitzen. Dieser Bereich wurde in Kapitel 4.1.3 eingeführt. Im dunkelgrauen Bereich sind Signale von Zielen enthalten, welche nur teilweise beleuchtet sind, also keine vollständige *Spotlight*-Apertur besitzen. Der Bereich aller, auch nur teilweise beleuchteter Ziele ist in Kapitel 4.1.4 definiert.

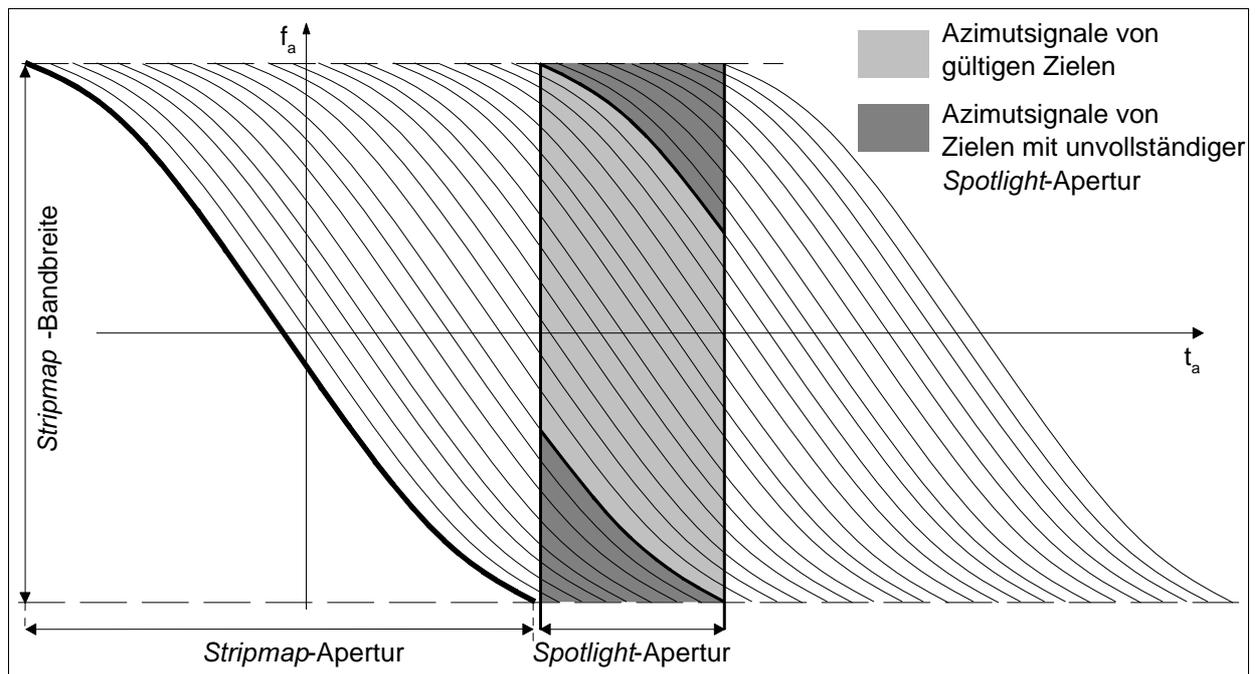


Bild 6.2: Azimutsignale von vielen Punktzielen einer Entfernung in Stripmap-Rohdaten und für die Spotlight-Verarbeitung ausgeschnittener Bereich in grauer Farbe

6.2 Prozessierung eines Spotlight-Bildes

Das Blockdiagramm in Bild 6.3 gibt einen Überblick über die zur Generierung eines *Spotlight*-Bildes aus *Stripmap*-Rohdaten notwendigen Schritte.

Bei der Auswahl des Rohdatenblocks mit der Azimutlänge T_{spot} wird auch die Entfernungsdimension des Datenblocks beschränkt, um auf ungefähr gleiche Azimut- und Entfernungsdimensionen der Szene zu kommen. Für die Prozessierung der E-SAR-Daten wurde die Entfernung des Szenenzentrums r_c zu 5251 m und die Szenenausdehnung in Entfernung zu 535 m gewählt. Auf Grund der Korrektur der

Zielentfernungsänderung muß der Rohdatenblock in Entfernung noch um die maximale Zielentfernungsänderung erweitert werden. Mit den Gleichungen (2.7) (2.8) (2.10) und (2.11) ergibt sich die maximale Zielentfernungsänderung für das Szenezentrum in der *Stripmap*-Abbildung zu 15 m. Damit wurde die Szenenausdehnung in Entfernung, welche ausgeschnitten wird und auf welche die *Dechirp*-Operation angewendet werden muß, zu $\Delta r = 550$ m gesetzt.

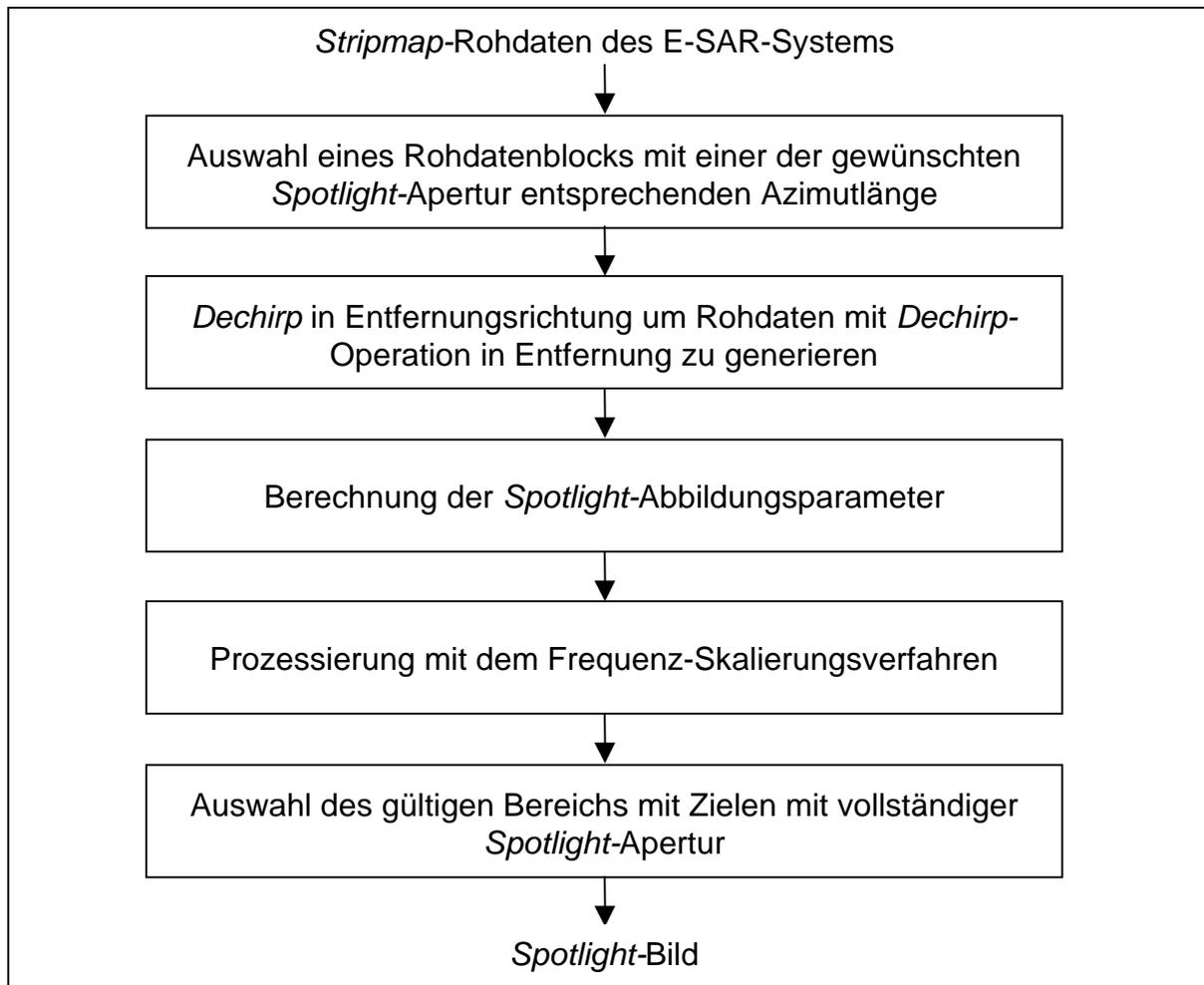


Bild 6.3: Blockdiagramm der *Spotlight*-Verarbeitung von E-SAR *Stripmap*-Daten

6.2.1 Die *Dechirp on Receive*-Operation

Um Rohdaten mit *Dechirp*-Operation in Entfernung zu simulieren, wird eine *Dechirp*-Operation vor der eigentlichen Verarbeitung mit dem Frequenz-Skalierungs-Verfahren auf die E-SAR-Rohdaten angewendet. Vor der *Dechirp*-Operation muß die benötigte Länge bzw. der Bandbreitebedarf B_{dech} bei der *Dechirp*-Operation bestimmt werden. Die benötigte Bandbreite ist von der Szenenausdehnung Δr und der ausgesendeten Pulslänge T_p abhängig, und ist in (6.1) gegeben, wobei T_w die Dauer des Empfangsfensters ist.

$$B_{\text{dech}} = k_e \cdot \left(\frac{2 \cdot \Delta r}{c_0} + T_p \right) = k_e \cdot T_w \quad (6.1)$$

Für die Parameter der E-SAR-Daten aus Tabelle 6.1 und die ausgewählte Szenengröße in Entfernung ergibt sich ein Bandbreitebedarf von 133 MHz. Daher müssen die Rohdaten, welche mit einer Abtastrate von 100 MHz aufgezeichnet wurden, vor der *Dechirp*-Operation auf die benötigte Abtastfrequenz gebracht werden. Anschließend kann die Multiplikation mit der *Dechirp*-Funktion aus Gleichung (4.18) erfolgen. Dabei wird die Referenzentfernung r_{ref} gleich der Entfernung des Szenenzentrums r_c gesetzt. Anschließend erfolgt eine Bandpaß-Filterung des komplexen Signals, symmetrisch um die Frequenz 0 Hz mit der Bandbreite $B_{\Delta r}$. Die Frequenz 0 Hz entspricht der Entfernung r_c und die Bandbreite $B_{\Delta r}$ hängt laut Gleichung (6.2) nur von der Szenenausdehnung in Entfernung Δr ab.

$$B_{\Delta r} = k_e \cdot \frac{2 \cdot \Delta r}{c_0} \quad (6.2)$$

Für die E-SAR-Parameter ergibt sich eine Bandbreite von 73.3 MHz. Die Bandpaß-Filterung entfernt alle ungültigen Ziele, also solche Ziele, die eine Integrationszeit kürzer als die Pulslänge T_p besitzen. Dies ist in Bild 6.4 veranschaulicht. Auf der linken Seite sind die Signale vor der *Dechirp*-Operation gezeigt. Die Signale A, B und C sind gültig bzw. gerade noch gültig, da sie die volle ausgesendete Integrationszeit T_p besitzen. Der Bereich aller gültigen Signale ist dunkelgrau dargestellt. Im hellgrauen Bereich befinden sich Signale, welche eine kürzere Integrationszeit als T_p besitzen. Mit T_w ist die Länge des Empfangsfensters bezeichnet, während Δr die Entfernungsausdehnung der Szene bezeichnet.

Die rechte Seite von Bild 6.4 zeigt die Signale nach der *Dechirp*-Multiplikation mit der gestrichelt gezeichneten *Dechirp*-Funktion links im Bild. Die Bandbreite B_{r1} der linear frequenzmodulierten Signale hat sich für den gültigen Bereich auf B_{r2} verringert, wie durch Gleichung (4.17) beschrieben. Daneben sind aber noch ungültige Signale vorhanden, deren Frequenzen außerhalb der gültigen Bandbreite liegen. Diese müssen vor der Prozessierung durch eine Filterung entfernt werden. Abschließend wird die Abtastfrequenz an die neue Bandbreite der Signale angepaßt. Für die E-SAR-Parameter wurde ein Wert von 80 MHz gewählt.

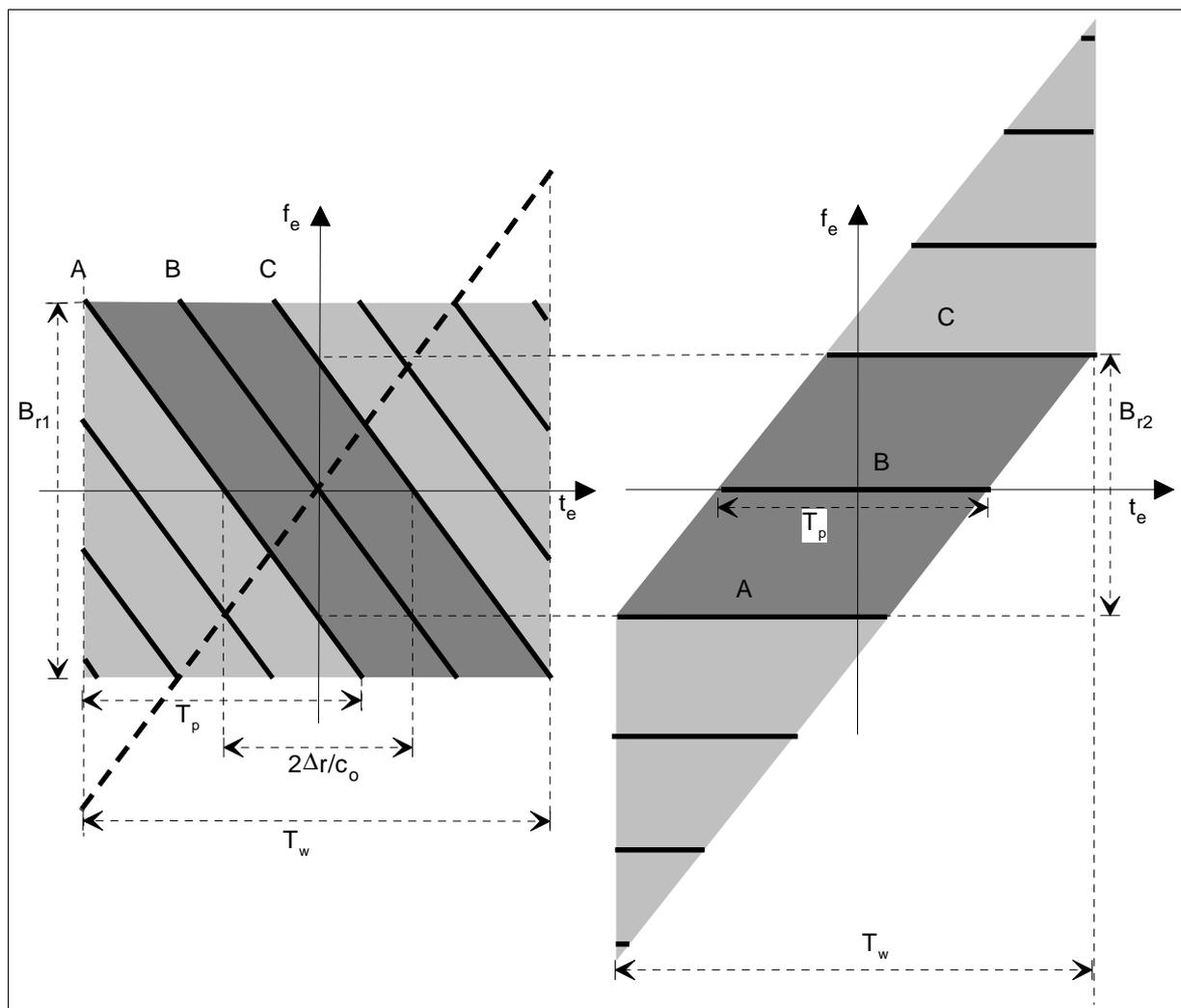


Bild 6.4: Tiefpaß-Filterung nach der Dechirp-Operation: die ungültigen Entfernungssignale (in hellgrauer Farbe) mit einer Dauer kürzer als T_p werden entfernt

Bei Rohdaten, welche direkt mit *Dechirp*-Operation in Entfernung aufgezeichnet werden, wird die beschriebene Bandpaß-Filterung kurz vor der A/D-Wandlung durchgeführt.

6.2.2 Berechnung der *Spotlight*-Abbildungsparameter

Wie in Kapitel 4.1 beschrieben, ist die *Spotlight*-Abbildung vollständig bestimmt durch den Squintwinkel am Anfang der Beleuchtung Ψ_{start} , den Squintwinkel am Ende der Beleuchtung Ψ_{ende} , die Position des Szenenzentrums r_c und den Öffnungswinkel in Azimut θ_a .

Als Eingangsgrößen für die Berechnung der *Spotlight*-Abbildungsparameter stehen die Länge der *Spotlight*-Apertur T_{spot} , der *Stripmap*-Squintwinkel Ψ_{Strip} , die Entfernung des Szenenzentrums r_c und der Azimut-Öffnungswinkel $\theta_{a,\text{Strip}}$ der realen

Stripmap-Apertur zur Verfügung. Dabei wurden T_{spot} und r_c durch die Auswahl des Spotlight-Rohdatenblocks aus dem Stripmap-Datensatz festgelegt.

Aus Bild 6.1 kann man die Zusammenhänge für die Squint- und Öffnungswinkel der Stripmap- und Spotlight-Abbildung in den Gleichungen (6.3) und (6.4) herleiten.

$$\Psi_{\text{start}} - \frac{\theta_a}{2} = \Psi_{\text{Strip}} - \frac{\theta_{a,\text{Strip}}}{2} \quad (6.3)$$

$$\Psi_{\text{ende}} + \frac{\theta_a}{2} = \Psi_{\text{Strip}} + \frac{\theta_{a,\text{Strip}}}{2} \quad (6.4)$$

Unter Verwendung der Gleichungen (6.3) und (6.4) sowie von (4.1), (4.2) und (4.3) kann die Beziehung zwischen T_{spot} und θ_a in Gleichung (6.5) hergeleitet werden.

$$T_{\text{spot}} = \frac{r_c}{V} \cdot \left[\tan\left(\Psi_{\text{Strip}} + \frac{\theta_{a,\text{Strip}}}{2} - \frac{\theta_a}{2} \right) - \tan\left(\Psi_{\text{Strip}} - \frac{\theta_{a,\text{Strip}}}{2} + \frac{\theta_a}{2} \right) \right] \quad (6.5)$$

Diese Gleichung kann numerisch nach θ_a aufgelöst werden. Aus Gleichung (6.3) und (6.4) ergeben sich dann Start- und Endsquintwinkel der Spotlight-Abbildung, welchen über die Gleichungen (4.1) und (4.2) der Start- und der Endzeitpunkt der Spotlight-Beleuchtung entsprechen. Für die in Tabelle 6.1 gegebenen Parameter der Stripmap-Rohdaten Geschwindigkeit V , Stripmap-Squintwinkel Ψ_{Strip} und realer Öffnungswinkel der Stripmap-Apertur $\theta_{a,\text{Strip}}$ sowie mit dem durch die Auswahl des Stripmap-Rohdatenblocks festgelegten Parametern der Spotlight-Abbildung Entfernung des Szenenzentrums $r_c = 5251$ m und Länge der Spotlight-Apertur $T_{\text{spot}} = 2.88$ s ergeben sich die noch fehlenden Parameter der Spotlight-Abbildung zu den Werten in Tabelle 6.2.

θ_a	Spotlight Öffnungswinkel	5.23°
Ψ_{start}	Startsquintwinkel der Spotlight-Beleuchtung	-1.69°
Ψ_{ende}	Endsquintwinkel der Spotlight-Beleuchtung	1.09°
$t_{a,\text{start}}$	Startzeitpunkt der Spotlight-Beleuchtung	-1.75 s
$t_{a,\text{ende}}$	Endzeitpunkt der Spotlight-Beleuchtung	1.13 s

Tabelle 6.2: Parameter der Spotlight-Abbildung berechnet aus Stripmap-Parametern

Für die ermittelten Spotlight-Parameter ergeben sich aus Gleichung (5.61) und (5.62) die in Bild 6.5 links gezeigte minimale und maximale Augenblicksfrequenz

der *Spotlight*-Abbildung in Abhängigkeit von der Azimutzeit. Gestrichelt eingezeichnet ist die Augenblicksfrequenz der *Stripmap*-Abbildung, welche auf Grund des konstanten Squintwinkels mit der Azimutzeit konstant und gleich der Azimutbandbreite aller Ziele ist. Anhand von Bild 6.5 links läßt sich gut erkennen, daß ein aus *Stripmap*-Rohdaten prozessiertes *Spotlight*-Bild einen Ausschnitt aus dem kompletten *Stripmap*-Azimutspektrum darstellt. Rechts in Bild 6.5 ist die resultierende Augenblicksbandbreite als Funktion des Squintwinkels dargestellt. Azimutzeit und Squintwinkel können mit Gleichung (5.60) ineinander umgerechnet werden.

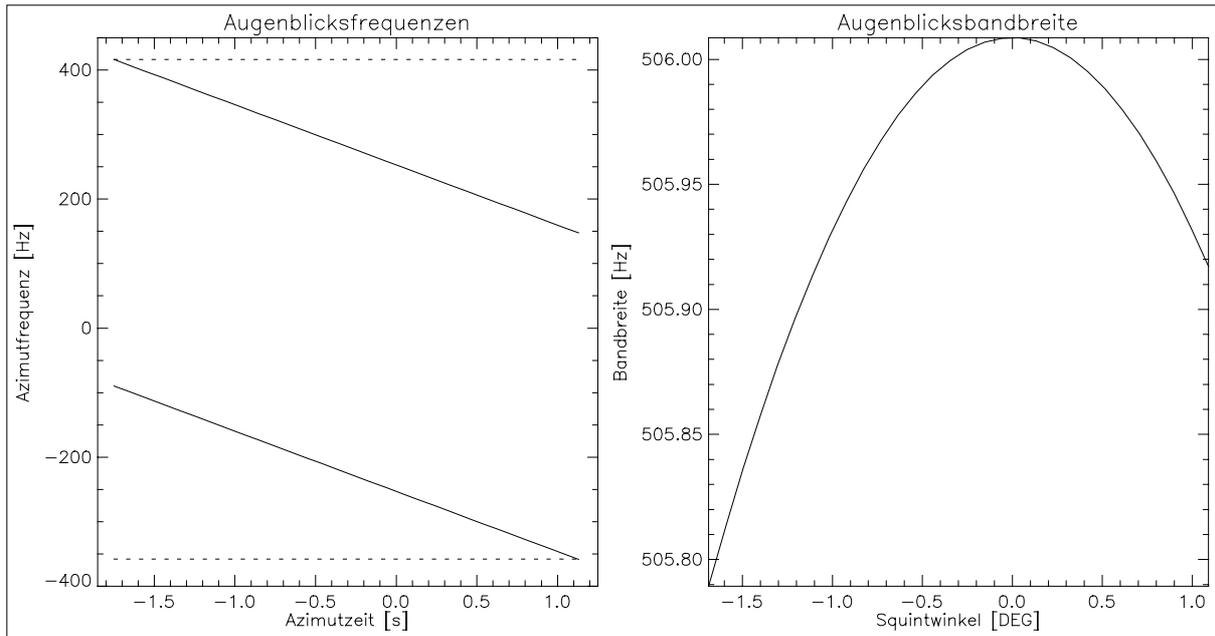


Bild 6.5: Augenblicksfrequenzen (links) und Augenblicksbandbreite mit vernachlässigbarer Variation (rechts)

Der Bereich gültiger Ziele, welcher alle Ziele mit kompletter *Spotlight*-Apertur enthält, ergibt sich aus Gleichung (4.12) und ist in Bild 6.6 als schraffierter Bereich innerhalb der durchgezogenen schwarzen Linien dargestellt. Auf Grund der Verwendung von *Stripmap*-Rohdaten müssen die für die Berechnung des beleuchteten Bereichs verwendeten Gleichungen (4.13) und (4.14) angepaßt werden. Dadurch werden Rückfaltungen bei der Azimut-Skalierung vermieden. Aus Bild 6.1 können die Gleichungen für die modifizierten Zeitpunkte $t_{b,a,mod}(r_o)$ und $t_{b,e,mod}(r_o)$ in (6.6) und (6.7), welche den beleuchteten Bereich in der Entfernung r_o begrenzen, abgeleitet werden.

$$t_{b,a,mod}(r_o) = t_{a,start} - \frac{r_o}{V} \cdot \tan\left(\Psi_{Strip} + \frac{\theta_{a,Strip}}{2}\right) \quad (6.6)$$

$$t_{b,e,mod}(r_o) = t_{a,ende} - \frac{r_o}{V} \cdot \tan\left(\Psi_{Strip} - \frac{\theta_{a,Strip}}{2}\right) \quad (6.7)$$

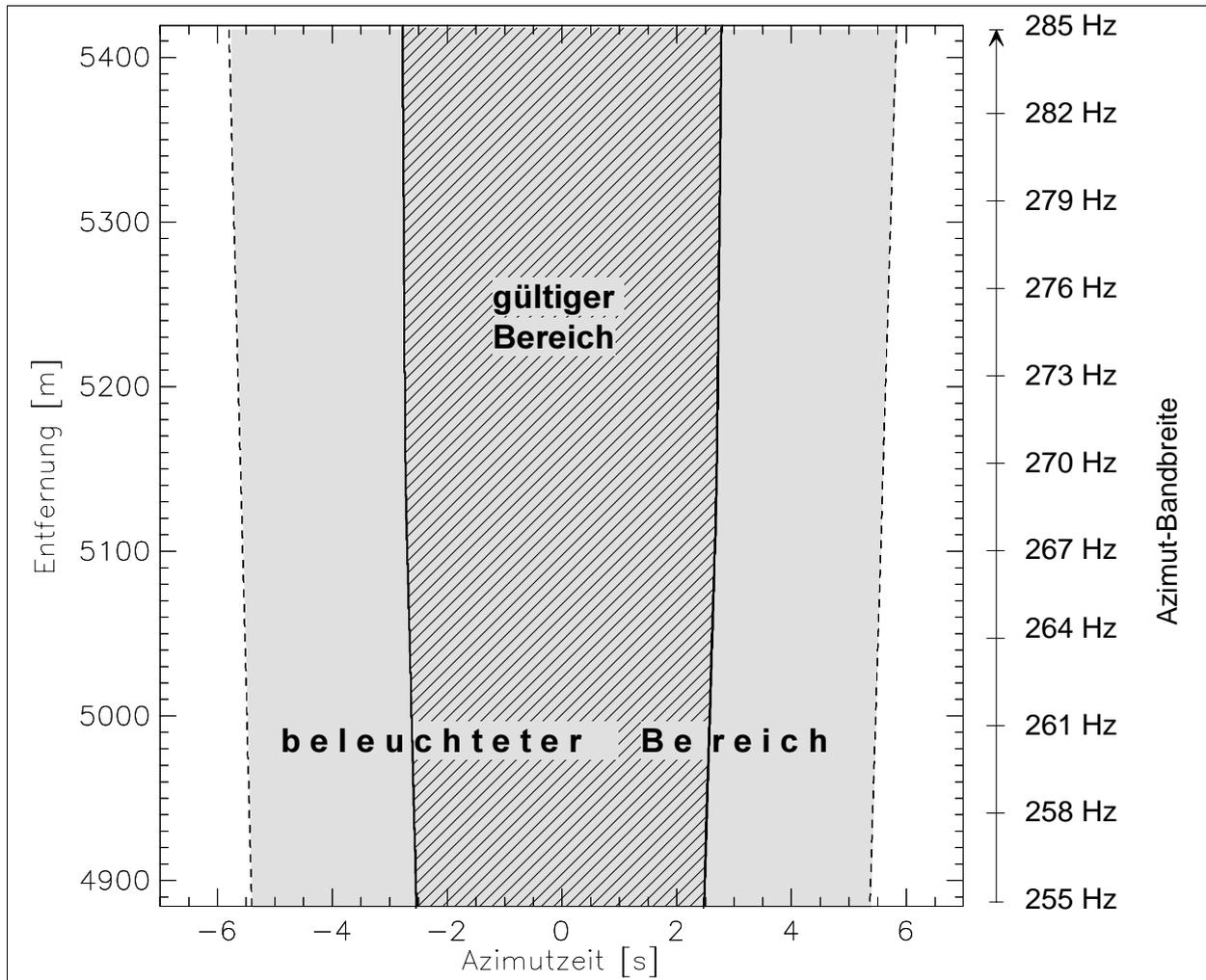


Bild 6.6: Bereich gültiger Ziele in schraffierter Darstellung und Bereich beleuchteter Ziele innerhalb der gestrichelten Linien in grau

Der Bereich aller beleuchteten Ziele befindet sich in Bild 6.6 innerhalb der gestrichelten Linien und ist grau dargestellt. Für den Bereich der gültigen Ziele ist in Bild 6.6 außerdem rechts neben dem Plot die *Spotlight*-Bandbreite angegeben, welche die Azimutauflösung bestimmt. Diese ist in Gleichung (4.11) definiert und eine Funktion der Entfernungs- und Azimutposition. Die Variation über Azimut ist wesentlich geringer als die Variation mit Entfernung und kann vernachlässigt werden.

Für die Azimut-Skalierung bei der Prozessierung muß noch die benötigte Erweiterung der Azimutdimension sowie die Azimutzeit-Verschiebung zur Minimierung dieser Erweiterung berechnet werden. Die Berechnung wird wie in Kapitel 5.2.2 beschrieben durchgeführt, wobei die Gleichungen für die Definition des beleuchteten Bereichs (4.13) und (4.14) durch die modifizierten Gleichungen (6.6) und (6.7) ersetzt werden. Das Ergebnis für eine Verarbeitung ohne Subaperturen ist in Bild 6.7 gezeigt. Die Erklärung aller Einzelheiten der in Bild 6.7 gezeigten Diagramme ist gleich zu den Erklärungen für Bild 5.12 und Bild 5.13.

Die wesentlichen Ergebnisse der Berechnung stellen die beiden unteren Diagramme in Bild 6.7 dar. Die Azimutausdehnung der Rohdaten entspricht der Länge der *Spotlight*-Apertur von 2.2 s und muß nach beiden Seiten symmetrisch um ca. 0.5 s erweitert werden, also ungefähr je 0.25 s nach beiden Seiten. Die für symmetrische Erweiterung notwendige Verschiebung der Azimutzeit als Funktion der Entfernung ist im rechten unteren Diagramm gegeben und variiert zwischen -0.006 s und 0.021 s.

Die Berechnung der Erweiterung für die durchgeführte Subapertur-Verarbeitung erfolgte analog zu Kapitel 5.3.4 und ist nicht explizit dargestellt.

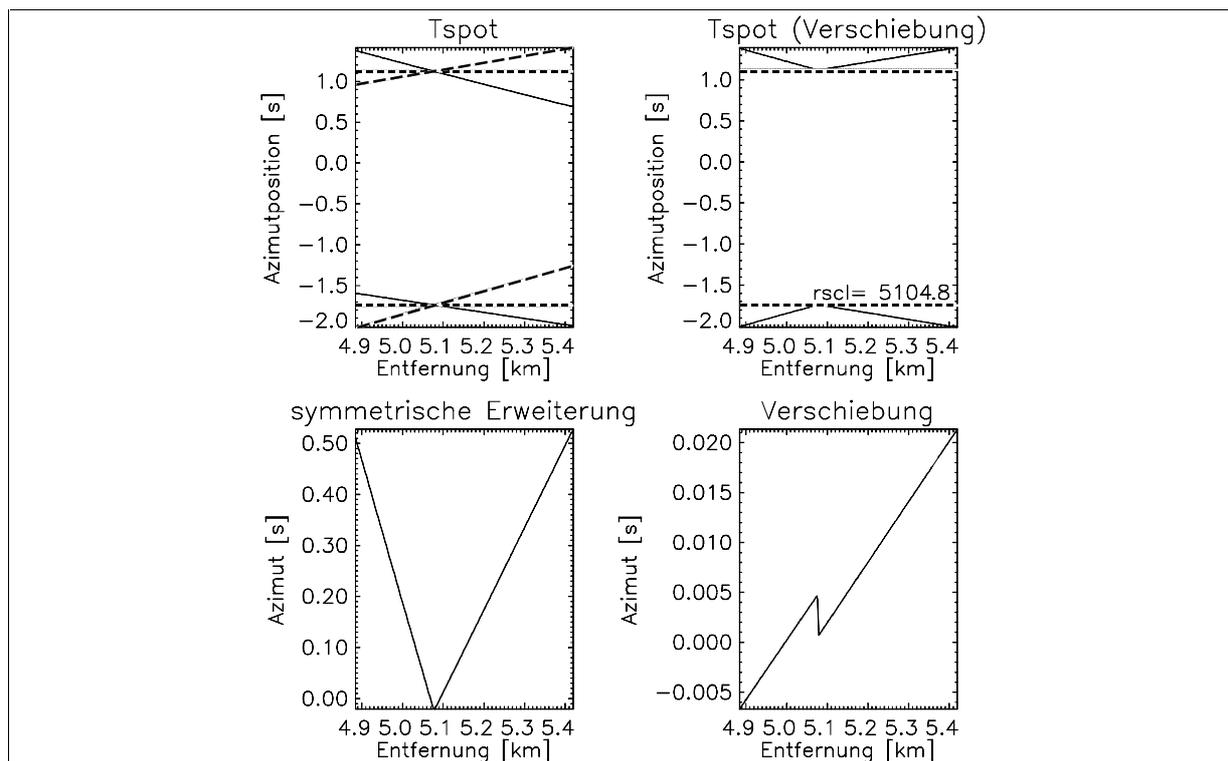


Bild 6.7: Minimierung der Azimuterweiterung für die Bildprozessierung

6.2.3 Prozessierung mit dem Frequenz-Skalierungs-Verfahren

Die Verarbeitung erfolgt nach dem Blockschaltbild von Bild 5.18. Bei der Aufteilung in Subaperturen wurden Subaperturen der Länge von 0.5 s mit einer Überlappung von 0.04 s verwendet. Mit der Länge der *Spotlight*-Apertur von 2.88 s ergeben sich sieben Subaperturen. Da die Rohdaten eine PRF von 1000 Hz aufweisen und die Auswahl des gültigen *Spotlight*-Bildes erst nach der Frequenz-Skalierungs-Verarbeitung durchgeführt wird, wird diese PRF auch in der Prozessierung verwendet.

Der erste Verarbeitungsschritt im Blockdiagramm von Bild 5.18 ist die Aufteilung in Subaperturen. In Bild 6.8 sind links die Rohdaten der ersten Subapertur im Zeitbereich gezeigt. Man erkennt die Erweiterung auf die nächste Zweierpotenz in Azimut symmetrisch um den Rohdatenblock und in Entfernung über dem Rohdatenblock.

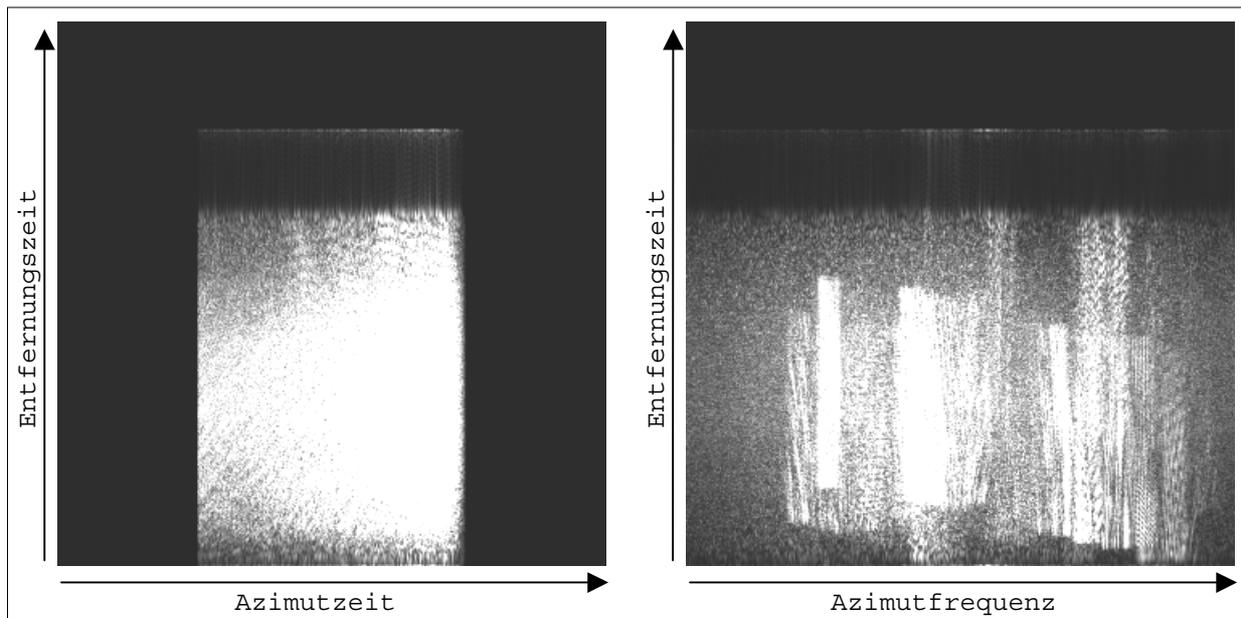


Bild 6.8: Rohdaten der ersten Subapertur links vor und rechts nach erster Azimut-FFT

Das Ergebnis der ersten FFT in Azimut ist rechts in Bild 6.8 abgebildet. Die Daten sind in Azimutrichtung etwas fokussiert, weil wegen der kurzen Länge der Subapertur von 0.5 s die Frequenzvariation der Azimutsignale nur noch ca. 50 Hz beträgt. Dies kann aus dem Augenblicksfrequenzverlauf von Bild 6.5 geschlossen werden. Die Azimut-FFT komprimiert die Azimutsignale zu Impulsen, welche aber eine Breite von 50 Hz aufweisen, und daher nicht scharf fokussiert sind. Eine ähnliche Situation ist bei der Frequenz-Skalierung zur Korrektur der Zielentfernungsänderung beschrieben, nach der Multiplikation mit der Frequenz-Skalierungsfunktion.

Führt man an dieser Stelle eine FFT-Operation in Entfernungsrichtung aus, so erhält man auf Grund der *Dechirp*-Operation auch in Entfernungsrichtung komprimierte Daten. Die Rohdaten nach einer FFT in Azimut und Entfernung sind in Bild 6.9 links dargestellt. Diese Operation ist hier nur zur Veranschaulichung gezeigt und nicht Element des Frequenz-Skalierungs-Verfahrens. Auf der rechten Seite von Bild 6.9 sind die Daten nach der kompletten Korrektur der Zielentfernungsänderung, also nach der letzten FFT in Entfernungsrichtung dargestellt. In Bild 6.9 rechts erkennt man deutlich die Zeilen-Verschiebung, welche die vorher bei der Frequenz-Skalierung angegliche Zielentfernungsänderung korrigiert.

Wie in Kapitel 5.3.1.1 dargestellt, kann die Nebenzipfelunterdrückung sowie die Beschränkung der prozessierten Bandbreite in Entfernung gleichzeitig mit der inversen Frequenz-Skalierung im Entfernungszeitbereich durchgeführt werden, weil nach der Korrektur des RVP-Terms alle Entfernungssignale im gleichen Entfernungszeitintervall von Gleichung (6.8) auftreten.

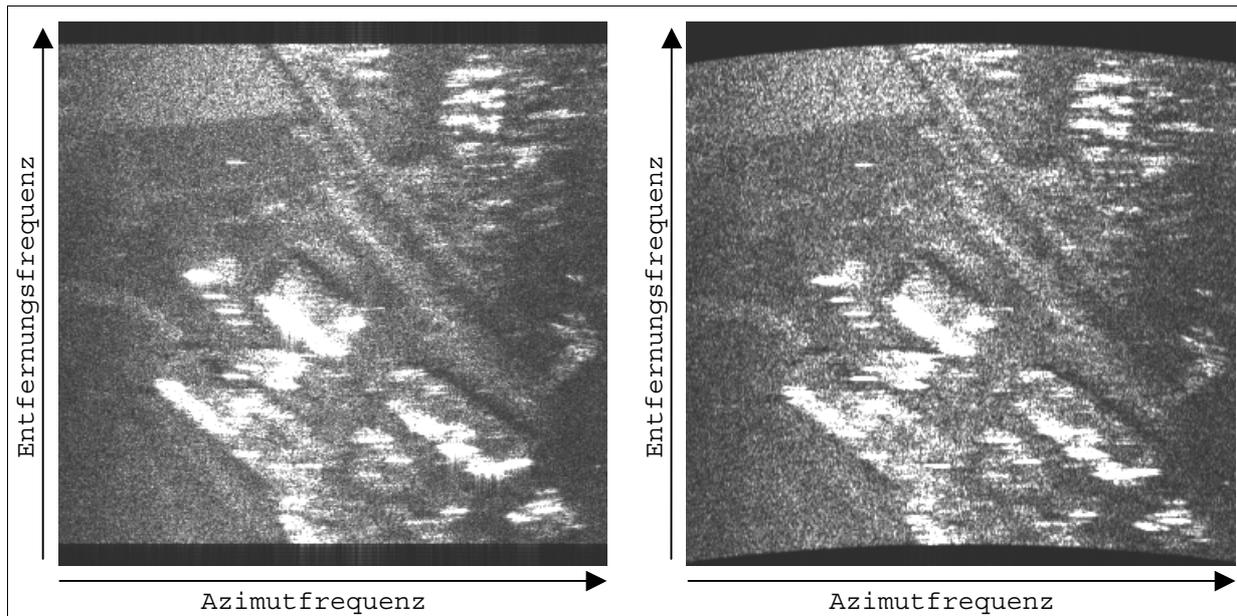


Bild 6.9: Daten im zweidimensionalen Frequenzbereich vor (links) und nach (rechts) der kompletten Frequenz-Skalierungs-Operation zur Zielentfernungskorrektur

$$\frac{2 \cdot r_c}{c_0} - T_p \leq t_e \leq \frac{2 \cdot r_c}{c_0} + T_p \quad (6.8)$$

In Bild 6.10 auf der linken Seite befinden sich die Daten nach der Azimut-Skalierung und der sich anschließenden inversen Azimut-FFT im Azimutzeit-Entfernungsfrequenzbereich. Die Ausdehnung der Azimutdimension wird beim Vergleich mit den Rohdaten von Bild 6.8 links deutlich. Das Ergebnis der Prozessierung einer einzelnen Subapertur ist in Bild 6.10 auf der rechten Seite zu sehen. Für die Visualisierung wurde die letzte FFT-Operation in Azimut, welche normalerweise für alle Subaperturen gemeinsam nach deren Rekombination erfolgt, nur für die einzelne Subapertur durchgeführt.

Am linken und rechten Rand des rechten Bildes von Bild 6.10 befinden sich ungültige Bereiche mit Signalen mit unvollständiger Subapertur. Außerdem ist die Azimutdimension die Azimutfrequenz und daher spiegelt sich das Antennendiagramm im Bild wider. Wegen des Antennendiagramms nimmt sowohl die Signalleistung im ungültigen Bereich ab, als auch die Leistung der Azimutmehrdeutigkeiten zu. Das Ergebnis nach der Verarbeitung von allen Subaperturen ist in Bild 6.11 dargestellt, wobei die ungültigen Bereiche in Azimut noch enthalten sind. Die Auswahl des gültigen Bereichs in Azimut ist im nächsten Kapitel beschrieben.

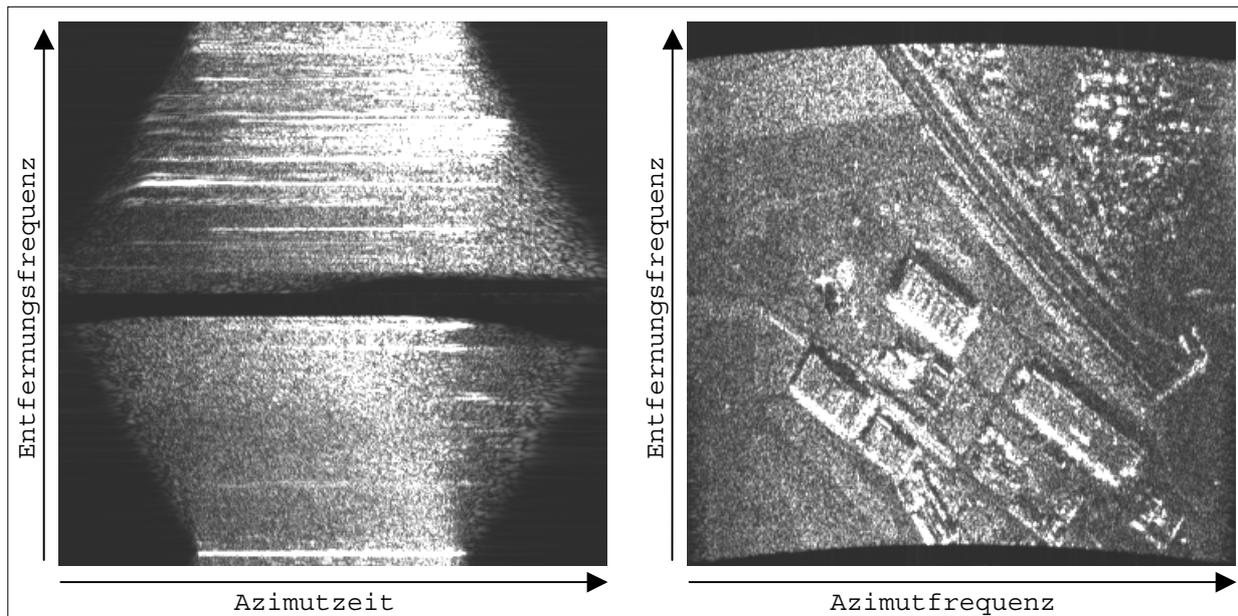


Bild 6.10: Daten nach der Azimut-Skalierung im Azimutzeitbereich (links) und Ergebnis der Verarbeitung einer einzelnen Subapertur (rechts)

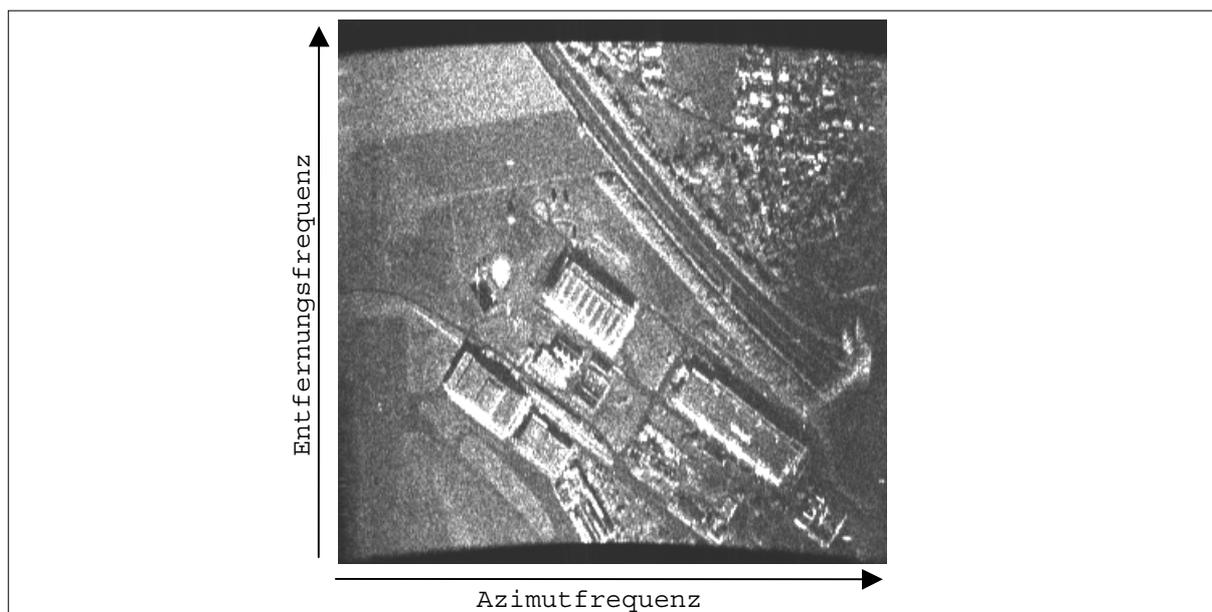


Bild 6.11: Bild nach der Verarbeitung von allen Subaperturen

6.2.4 Auswahl des Bereichs gültiger Ziele

Die Auswahl des gültigen Bereichs erfolgt durch Anwendung von Gleichung (4.12) auf die in Kapitel 6.2.2 berechneten *Spotlight*-Abbildungsparameter. Daraus ergibt sich der in Bild 6.6 gezeigte gültige Bereich. Wegen der Verwendung von *Stripmap*-Rohdaten wurden zur Berechnung des beleuchteten Bereichs die modifizierten Zeitpunkte $t_{b,a,mod}(r_0)$ und $t_{b,e,mod}(r_0)$ aus den Gleichungen (6.6) und (6.7) verwendet. Damit ist der beleuchtete Bereich von Bild 6.6 wesentlich größer, als es

für *Spotlight*-Rohdaten eigentlich der Fall wäre. Zum Vergleich ist in Bild 6.12 der gültige und der beleuchtete Bereich mit den gleichen Parametern wie für Bild 6.6, aber für *Spotlight*-Rohdaten berechnet. Der gültige Bereich ist wieder innerhalb der durchgezogenen Linien, während sich der beleuchtete Bereich innerhalb der gestrichelten Linien befindet. Der in Bild 6.6 gezeigte beleuchtete Bereich für die aus *Stripmap*-Rohdaten simulierten Rohdaten ist größer als der beleuchtete Bereich für originale *Spotlight*-Rohdaten in Bild 6.12.

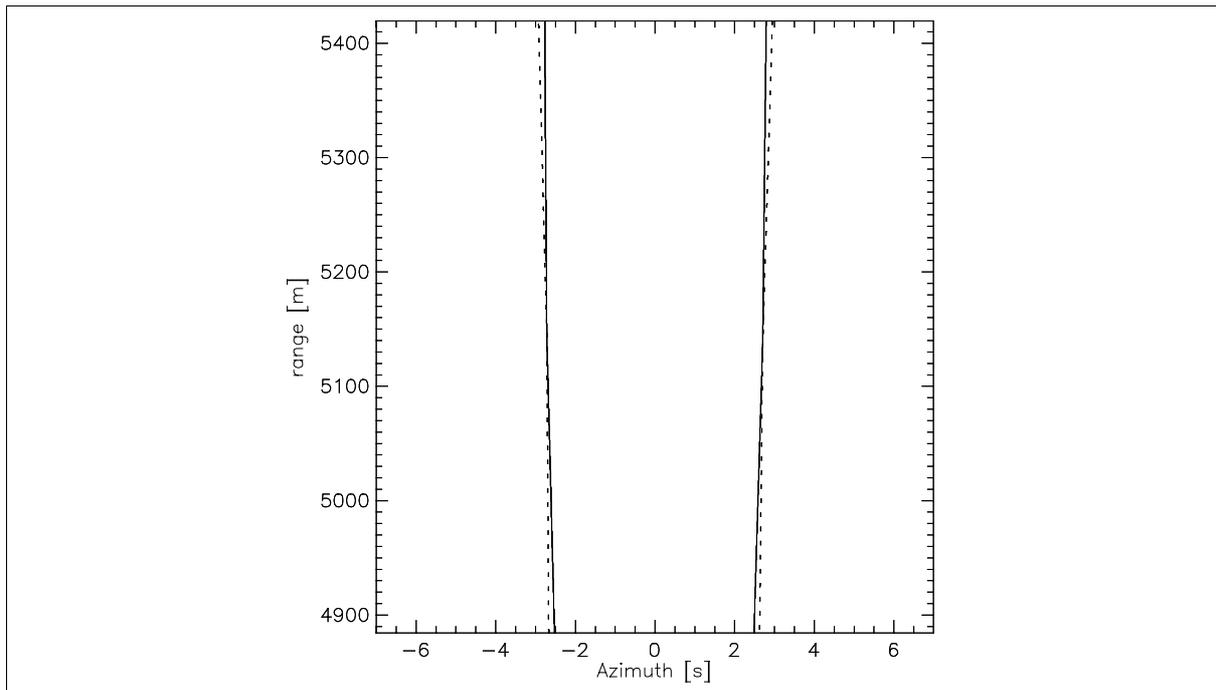


Bild 6.12: Gültiger und beleuchteter Bereich für die Parameter von Bild 6.6 und für *Spotlight*-Rohdaten

Auf Grund der großen Ausdehnung des beleuchteten Bereichs für die verwendeten *Stripmap*-Rohdaten muß sichergestellt werden, daß die Abtastfrequenz in Azimut hoch genug ist, um den gültigen Bereich nach der *Deramping*-Operation eindeutig darstellen zu können. Beginnend mit Bild 6.2 wird nachfolgend die Abtastfrequenz für eine eindeutige Darstellung berechnet.

Die Signale von Bild 6.2 nach der Azimut-Skalierung sind in Bild 6.13 gezeigt. Die in Bild 6.2 gezeichneten, durch eine Wurzelfunktion beschriebenen Azimutsignale der *Stripmap*-Rohdaten einer Entfernung r_0 sind in Bild 6.13 gestrichelt gezeichnet. Die dickeren, durchgezogenen Linien stellen die Signale nach der Azimut-Skalierung dar. Man erkennt, daß sich der Ort des Phasenzentrums der Signale, welcher identisch mit der Position der zugehörigen Punktziele ist, nicht verändert. Ebenso bleibt der Frequenzbereich der Signale unverändert. Die Phasenzentren der vier Punktziele

A,B,C und D sind durch schwarze Punkte markiert. Wie in Kapitel 5.2.2 beschrieben, erfolgt bei der Azimut-Skalierung eine Verschiebung der Signale in der Azimutzeit. Die Verschiebung wurde in Bild 6.13 graphisch durchgeführt. Dabei wurde das Phasenzentrum der Ziele sowie die Azimutbandbreite der Ziele konstant gehalten und das hell- oder dunkelgraue Azimutsignal so verschoben, daß es zu der bei der Azimut-Skalierung eingefügten linearen Frequenzmodulation in Azimut paßt. Das Ergebnis der Azimut-Skalierung sind die Signale in den hell- und dunkelgrauen Bereichen. Wichtig ist, daß sich die Phasenzentren der Signale nicht verschieben.

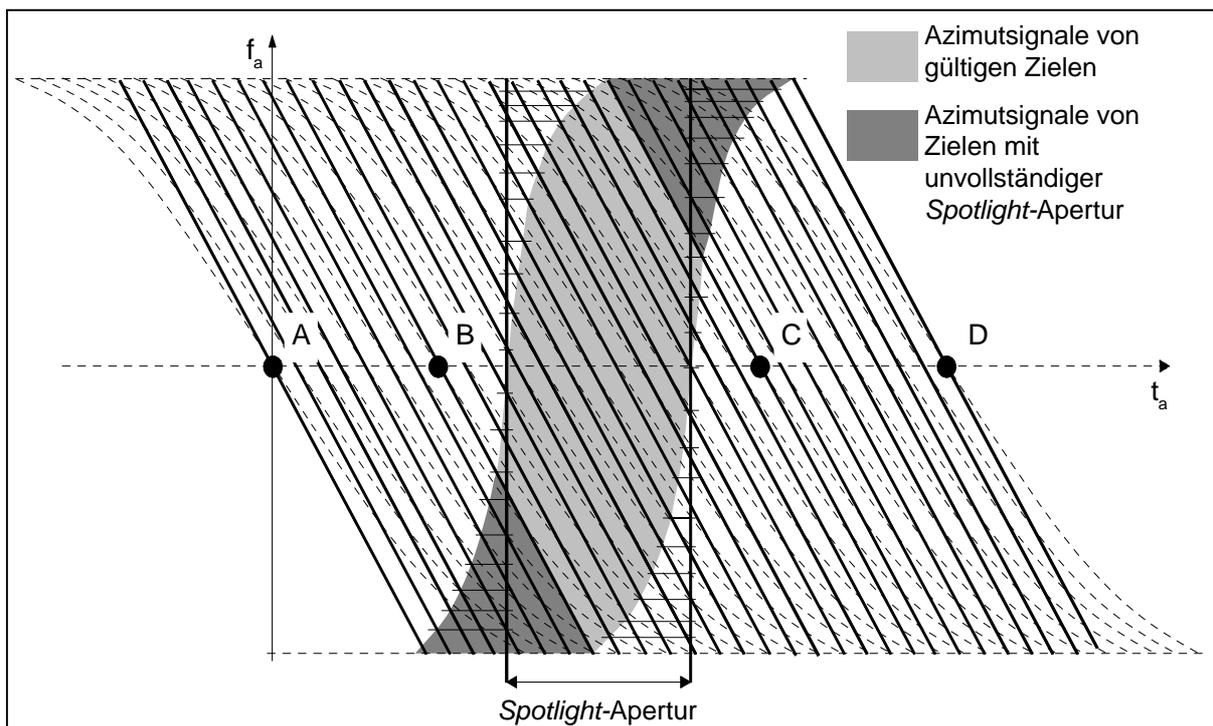


Bild 6.13: Azimutsignale aus Bild 6.2 nach der Azimut-Skalierung: die aus den Stripmap-Rohdaten ausgeschnittenen Signale (in grauer Farbe) sind in der Azimutzeit verschoben

Nach der Azimut-Skalierung erfolgt das *Deramping*. Dabei wird das Azimutsignal eines jeden beleuchteten Punktziels auf eine konstante Azimutfrequenz abgebildet. Wegen der nach der Azimut-Skalierung konstanten Skalierungs-Dopplerrate über der Entfernung ergeben sich die konstanten Frequenzen in jeder Entfernung aus der Multiplikation der Skalierungs-Dopplerrate mit dem Abstand des Phasenzentrums eines Punktziels zum Mittelpunkt der Deramping-Funktion. Das Ergebnis der *Deramping*-Operation angewendet auf die Signale von Bild 6.13 ist in Bild 6.14 gezeigt.

Die nach der Azimut-Skalierung linear frequenzmodulierten Signale sind innerhalb des grauen Bereichs erneut eingezeichnet. Damit ist die graphische Ermittlung des

Ergebnisses der *Deramping*-Operation mit der von links unten nach rechts oben in dicker Linie eingezeichneten *Deramping*-Funktion möglich. Im Bild ist die *Deramping*-Funktion um die Achse der Azimutfrequenz zentriert. Da die Dopplerrate der Azimutsignale und der *Deramping*-Funktion bis auf das Vorzeichen genau gleich sind, ergeben sich durch das *Deramping* konstante Frequenzen, welche durch die waagerechten, dicken Linien dargestellt sind. Dabei bildet sich ein Azimutsignal vor dem *Deramping* so auf das zugehörige Signal nach dem *Deramping* ab, daß die Azimutzeitposition des Signals erhalten bleibt und die konstante Frequenz des Signals nach dem *Deramping* dem Schnittpunkt des Signals vor dem *Deramping* mit der Achse der Azimutfrequenz entspricht.

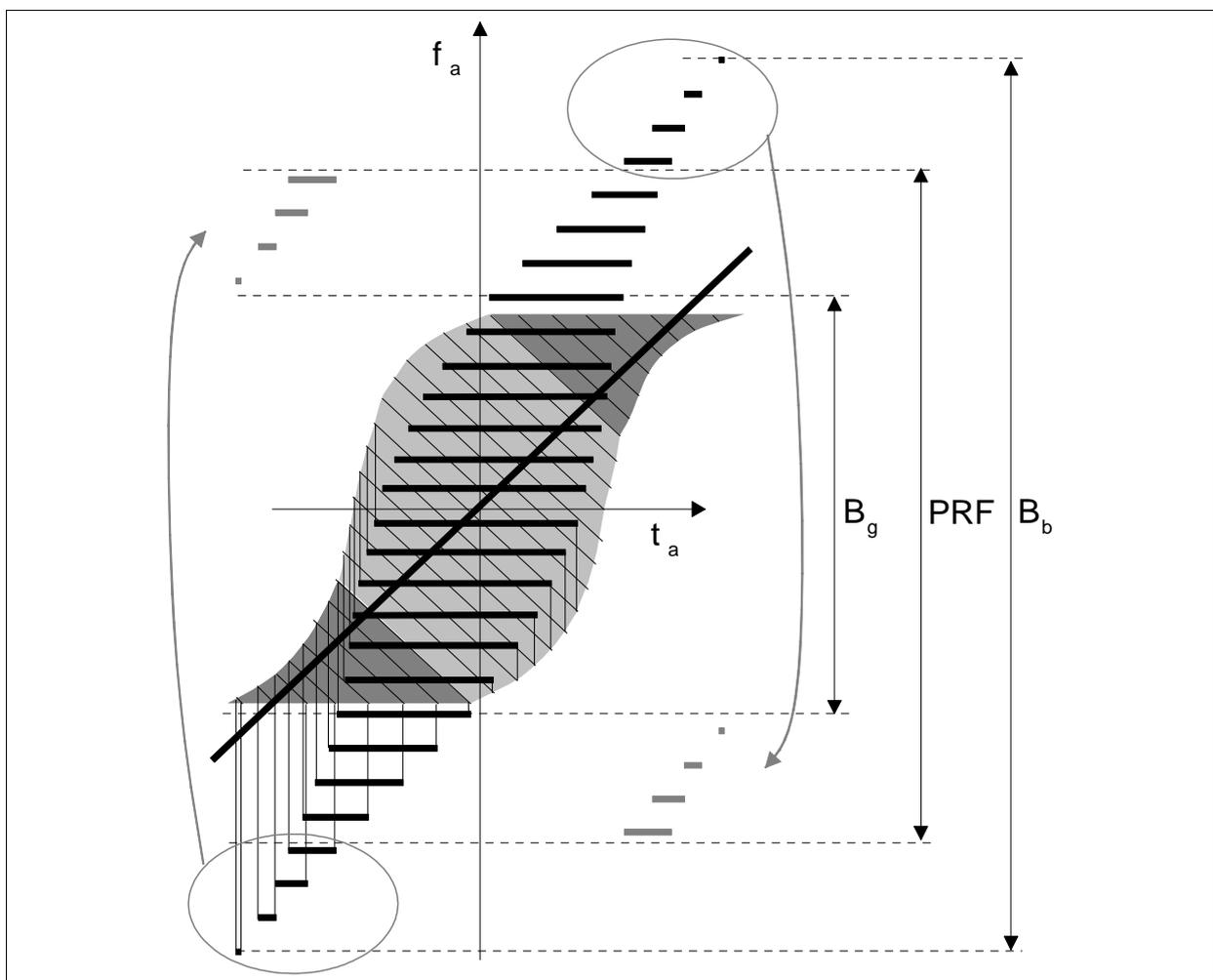


Bild 6.14: Azimutsignale von Bild 6.13 nach der *Deramping*-Operation: die ungültigen Signale außerhalb von B_g können nach dem *Deramping* und nach einer Azimut-FFT einfach entfernt werden

Für die Darstellung des gültigen, hellgrauen Bereichs ist eine Azimutbandbreite B_g erforderlich, welche sich mit Gleichung (4.12) ergibt und in Gleichung (6.9) angegeben ist. Die Darstellung der Signale aller beleuchteten Ziele würde eine

Bandbreite B_b erfordern. Für den Fall von *Stripmap*-Rohdaten kann B_g mit Hilfe der Gleichungen (6.6) und (6.7) berechnet werden und ergibt sich zu Gleichung (6.10). Im Fall von *Spotlight*-Rohdaten müssen die Grenzen des beleuchteten Bereichs $t_{b,e,mod}(r_o)$ und $t_{b,a,mod}(r_o)$ durch die Grenzen $t_{b,e}(r_o)$ und $t_{b,a}(r_o)$ aus den Gleichungen (4.13) und (4.14) ersetzt werden.

$$B_g(r_o) = [t_{v,e}(r_o) - t_{v,a}(r_o)] \cdot k_{scl} \quad (6.9)$$

$$B_b(r_o) = [t_{b,e,mod}(r_o) - t_{b,a,mod}(r_o)] \cdot k_{scl} \quad (6.10)$$

Aus Bild 6.14 ergibt sich die Bedingung von (6.11) für die minimale $PRF_{min}(r_o)$, welche für eine eindeutige Darstellung des gültigen Bereiches notwendig ist.

$$B_b(r_o) \leq B_g(r_o) + 2 \cdot (PRF_{min}(r_o) - B_g(r_o)) \quad \Rightarrow \quad PRF_{min}(r_o) \geq \frac{B_g(r_o) + B_b(r_o)}{2} \quad (6.11)$$

Dabei wird ausgenutzt, daß Rückfaltungen die Bildqualität nicht verschlechtern, solange sie außerhalb des gültigen Bereiches bleiben. In Bild 6.14 sind die Rückfaltungen durch die Verschiebung der eingekreisten Signale angedeutet. Durch Einsetzen der Gleichungen (4.12), (6.6) und (6.7) in Gleichung (6.11) ergibt sich der Ausdruck für die minimale Abtastfrequenz der ganzen Szene $PRF_{min,Szene}$ zu Gleichung (6.12).

$$PRF_{min,Szene} \geq \text{Max} \left[\left([t_{v,e}(r_o) - t_{v,a}(r_o)] + [t_{b,e,mod}(r_o) - t_{b,a,mod}(r_o)] \right) \cdot \frac{k_{scl}}{2} \right] \quad (6.12)$$

Bei der Herleitung von (6.12) wird davon ausgegangen, daß die in Kapitel 5.2.3 beschriebene Verschiebung der Azimutfrequenz durchgeführt wird. Ohne diese Verschiebung müßte das Maximum nicht aus den jeweiligen Differenzen zwischen Anfang und Ende des beleuchteten und gültigen Bereiches ermittelt werden, sondern aus den absoluten Minima und Maxima des beleuchteten und gültigen Bereiches. Dies würde für mittlere Squintwinkel ungleich Null zu höheren Werten für $PRF_{min,Szene}$ führen. Das in Kapitel 5.2.3 behandelte Prozessierungsbeispiel zeigt deutlich die Notwendigkeit der Frequenzverschiebung in Azimut.

Für die prozessierte Szene ergibt sich mit den obigen Parametern über der Entfernung eine maximale Ausdehnung des gültigen Bereiches von 5.55 s. Die maximale Ausdehnung des beleuchteten Bereiches ist für *Stripmap*-Rohdaten 11.62 s und für

Spotlight-Rohdaten 5.86 s. Damit ergibt sich für die eindeutige Darstellung des gültigen Bereichs eine notwendige $PRF_{\min, Szene}$ von 809 Hz im Falle der vorliegenden *Stripmap*-Rohdaten. Falls die tatsächliche PRF für eine eindeutige Darstellung nicht ausreicht, so muß die Azimutfrequenz vor der *Deramping*-Operation erhöht werden.

Im Fall von *Spotlight*-Rohdaten ist eine Erhöhung wegen des in der Praxis geringen Unterschieds zwischen beleuchtetem und gültigem Bereich sehr unwahrscheinlich. Für die prozessierte Szene war die Augenblicksbandbreite 506 Hz und für die eindeutige Darstellung des gültigen Bereichs im Fall von *Spotlight*-Rohdaten wären 547 Hz notwendig.

In Bild 6.15 ist das Ergebnis der *Spotlight*-Verarbeitung der E-SAR *Stripmap*-Rohdaten nach der Auswahl des gültigen Bereichs gezeigt. Für die Prozessierung dieses Bildes wurde in Azimutrichtung keine Gewichtung zur Unterdrückung der Nebenzipfel durchgeführt. In Entfernungsrichtung wurden die Nebenzipfel durch eine Hamminggewichtung mit Hammingfaktor 0.54 unterdrückt. Das Bild ist gegenüber Bild 6.11 gekippt, damit die Beleuchtung von oben kommt der Eindruck entsteht, daß Erhebungen aus dem Bild heraustreten.

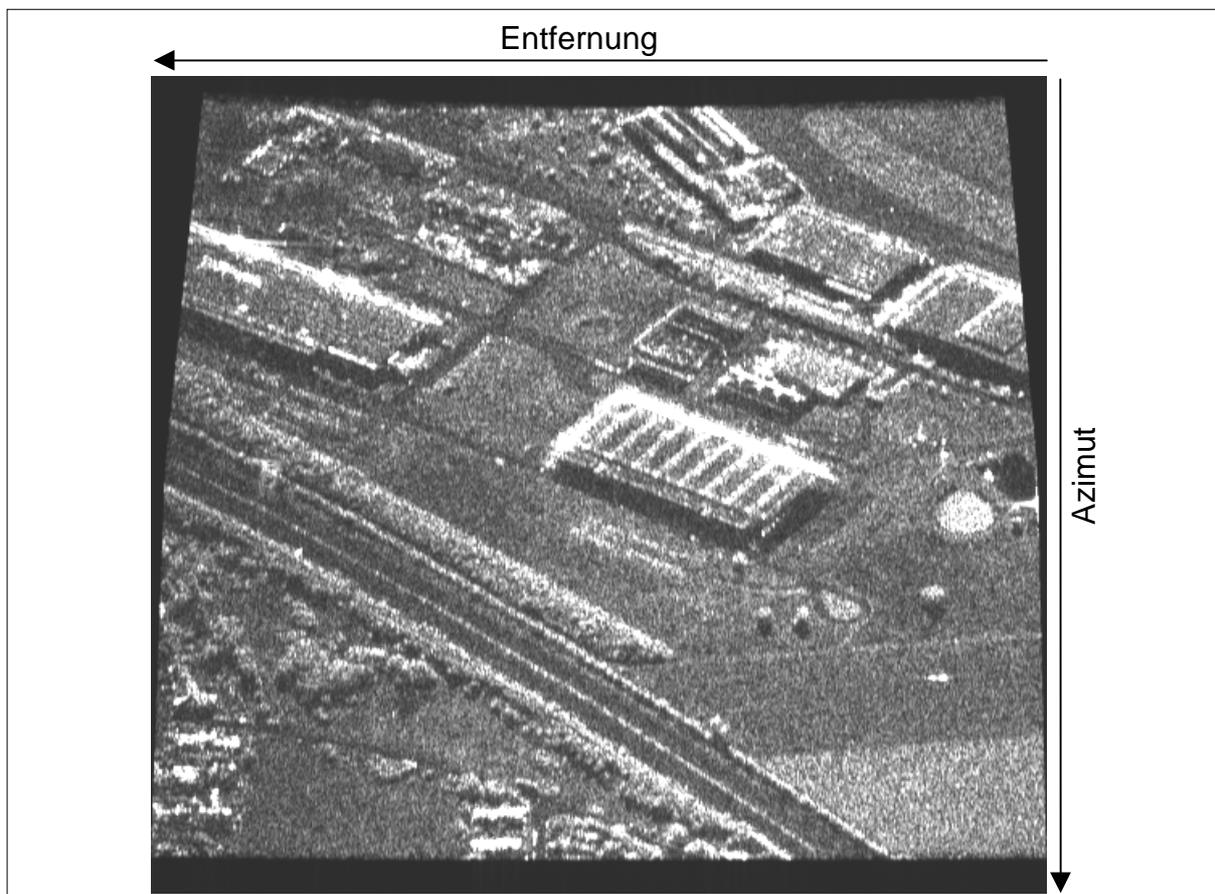


Bild 6.15: Bild nach der Auswahl des gültigen Bereiches in Azimut

7 NACHWEIS DER PHASENTREUE

Für eine interferometrische oder polarimetrische Weiterverarbeitung der prozessierten *Spotlight*-Bilder ist die Phasentreue die wesentliche Voraussetzung. Mit zwei Methoden wird die Phasentreue des Frequenz-Skalierungs-Verfahrens nachgewiesen. Zum einen durch Phasenmessung bei simulierten und prozessierten Punktzielen und zum anderen durch das Eigeninterferogramm¹ einer E-SAR-Szene.

7.1 Phasenmessung von prozessierten Punktzielen

Eine Szene mit drei Punktzielen, welche eine unterschiedliche Position in Bezug auf das Szenenzentrum besitzen, wurde mit dem Frequenz-Skalierungs-Verfahren verarbeitet. Die Punktziele wurden mit der Phase 0° im Phasenzentrum generiert. Anschließend wurde die *Dechirp*-Operation zur Generierung von Rohdaten mit *Dechirp*-Operation in Entfernung durchgeführt. Im Amplitudenbild der prozessierten Szene von Bild 7.1 sind die Positionen der Punktziele in Bezug auf das Szenenzentrum angegeben. Das Szenenzentrum ist durch einen Stern markiert.

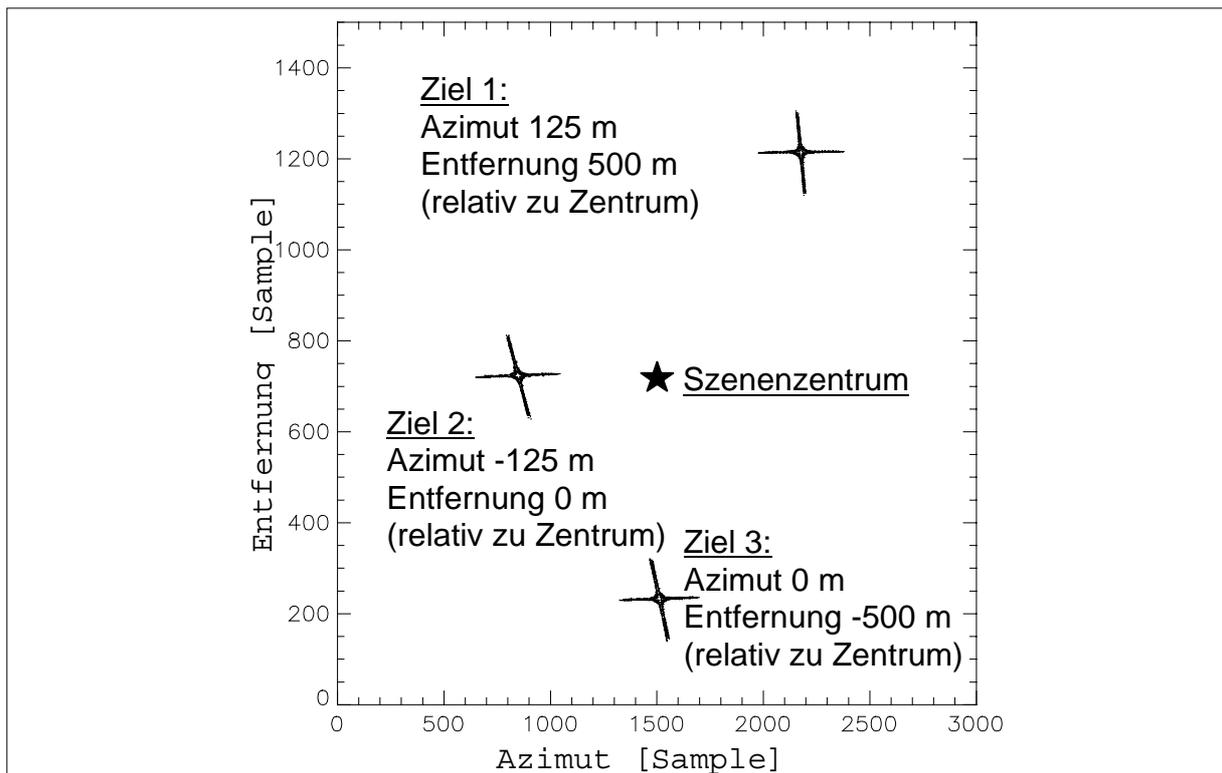


Bild 7.1: Amplitudenbild der prozessierten Punktzielszene: die Positionen der Punktziele sind relativ zum Szenenzentrum angegeben

¹ In dieser Arbeit wird das Interferogramm eines komplexen Bildpaares als Eigeninterferogramm bezeichnet, wenn die Rohdaten der beiden Bilder bis auf eine Verschiebung der Rohdaten identisch sind.

Die Simulation wurde mit den bereits in den vorangegangenen Kapiteln bei den Punktzielsimulationen verwendeten Parametern durchgeführt. Um eine genauere Messung der Phase an der Position des Maximums der zweidimensionalen Impulsantwort zu erreichen, wurde der Squintwinkelbereich näher an 0° gelegt und die in Tabelle 7.1 angegebene Geometrie wurde verwendet. Ein hoher Squintwinkel bedeutet laut den Gleichungen (2.34) und (2.39) einen hohen Wert für t_c und damit eine große lineare Phase im Maximum der Impulsantwort. Wegen der großen Steigung, die eine große lineare Phase bedeutet, wird die Messung der Phase mit zunehmendem Squintwinkel ungenauer.

Ψ_{Start}	Start-Squintwinkel	3°
Ψ_{Ende}	End-Squintwinkel	5.4°
θ_a	Azimet Öffnungswinkel	8°
T_{spot}	Länge der <i>Spotlight</i> -Apertur	2.88 s
r_c	Entfernung Szenenzentrum	4000 m.

Tabelle 7.1: Geometrie für die Punktzielsimulation zur Phasenmessung

Die gemessene Phase an der Position des Maximums der zweidimensionalen Impulsantwort für die drei Ziele ist in Tabelle 7.2 angegeben. Bei der Generierung der Punktziele wurde die Phase im Phasenzentrum des zweidimensionalen *Chirp*-Signals auf 0° gesetzt. Die Phasenmessung von simulierten Punktzielen zeigt die Phasentreue des Frequenz-Skalierungs-Verfahrens.

Ziel 1	0.068°
Ziel 2	0.019°
Ziel 3	0.278° .

Tabelle 7.2: Ergebnisse der Phasenmessung im Maximum der Punktziele

7.2 Phasenmessung durch Eigeninterferogramm

Bei dieser Methode werden die gleichen Rohdaten zweimal prozessiert. Bei der zweiten Prozessierung werden die Rohdaten in Azimet- und Entfernungsrichtung verschoben und das Bild nach der Prozessierung zur Bildung eines Eigeninterferogramms zurückgeschoben. Für den Fall einer phasentreuen Verarbeitung muß sich die Phasendifferenz des originalen und des verschobenen Bildes bei allen Positionen zu 0° ergeben.

Die Verschiebung der Rohdaten wurde vor der *Dechirp*-Operation durchgeführt. In beiden Prozessierungen wurde jeweils eine unterschiedliche Entfernung für das Szenenzentrum gewählt. In Entfernungsrichtung sind die Rohdaten um $N_{t,e} = 33$ Abtastwerte verschoben, was 49.47 m, oder 23 mal der Entfernungsauflösung von 2.16 m entspricht. Mit Gleichung (7.1) kann die entsprechende Verschiebung im prozessierten Bild in Abtastwerten der Entfernungsfrequenz $N_{f,e}$ berechnet werden. Mit $f_{s,1}$ ist dabei die Abtastfrequenz der Rohdaten vor der *Dechirp*-Operation bezeichnet, während $f_{s,2}$ die Abtastfrequenz nach dieser Operation ist. Für die obigen Parameter ergibt sich mit Gleichung (7.1) eine Verschiebung von $N_{f,e} = 84.3976$ Abtastwerten der Entfernungsfrequenz. Um eine genaue Koregistrierung durch Verschiebung um 84 ganze Abtastwerte der Entfernungsfrequenz zu erreichen, wird das Bild, welches sich aus der Verarbeitung der verschobenen Rohdaten ergibt, während der Prozessierung durch eine lineare Phasenmultiplikation im Entfernungszeitbereich um 0.3976 Abtastwerte der Entfernungsfrequenz verschoben.

$$N_{f,e} = \frac{N_{t,e}}{f_{s,1}} \cdot \frac{N_{\text{FFT},e} \cdot k_e}{f_{s,2}} \quad (7.1)$$

Um für die Koregistrierung in Azimut eine gleiche Azimut-Skalierung in beiden Bildern zu erhalten, wurde die Skalierungsentfernung bei der Azimut-Skalierung gleich gewählt. Dabei wurde die Skalierungsentfernung r_{scl,N_f} verwendet, bei der eine Verschiebung der Rohdaten um eine Anzahl ganzer Abtastpunkte $N_{t,a}$ einer ganzzahligen Anzahl von Abtastpunkten $N_{f,a}$ im prozessierten Bild entspricht. Die dazu notwendige Berechnung für r_{scl,N_f} ist in Gleichung (7.2) enthalten. Darin bezeichnet $\langle \rangle$ den Operator für die ganzzahlige Rundung.

$$N_{f,a} = \left\langle \frac{N_{t,a} \cdot N_{\text{FFT},a}}{\text{PRF}^2} \cdot \frac{2 \cdot V^2}{\lambda \cdot r_{\text{scl}}} \right\rangle ; \quad r_{\text{scl},N_f} = \frac{N_t \cdot N_{\text{FFT},a} \cdot 2 \cdot V^2}{\text{PRF}^2 \cdot N_{f,a} \cdot \lambda} \quad (7.2)$$

Die Verschiebung der Rohdaten in Azimutrichtung beträgt $N_{t,a} = 84$ Abtastwerte, oder 7.36 m, was 33 mal der Azimutauflösung von 0.22 m entspricht. Die entsprechende Verschiebung der prozessierten Bilddaten ist genau $N_{f,a} = 64$ Abtastwerte der Azimutfrequenz.

Die in Bild 7.2 gezeigte Szene wurde für das Eigeninterferogramm verwendet. Vor der Bildung des Eigeninterferogramms wurde die Koregistrierung in Azimut und Entfernung überprüft. Die Koregistrierung wurde für jede Azimut- und Entfernungszeile

nach einer Interpolation um Faktor 16 durch Korrelation bestimmt. Die gemessene Fehlregistrierung ist für jede Azimut- und Entfernungsposition null interpolierte Abtastabstände. Das bedeutet, die Genauigkeit der Koregistrierung ist besser als 1/16 des Abtastabstands im prozessierten Bild sowohl in Azimut als auch in Entfernung.

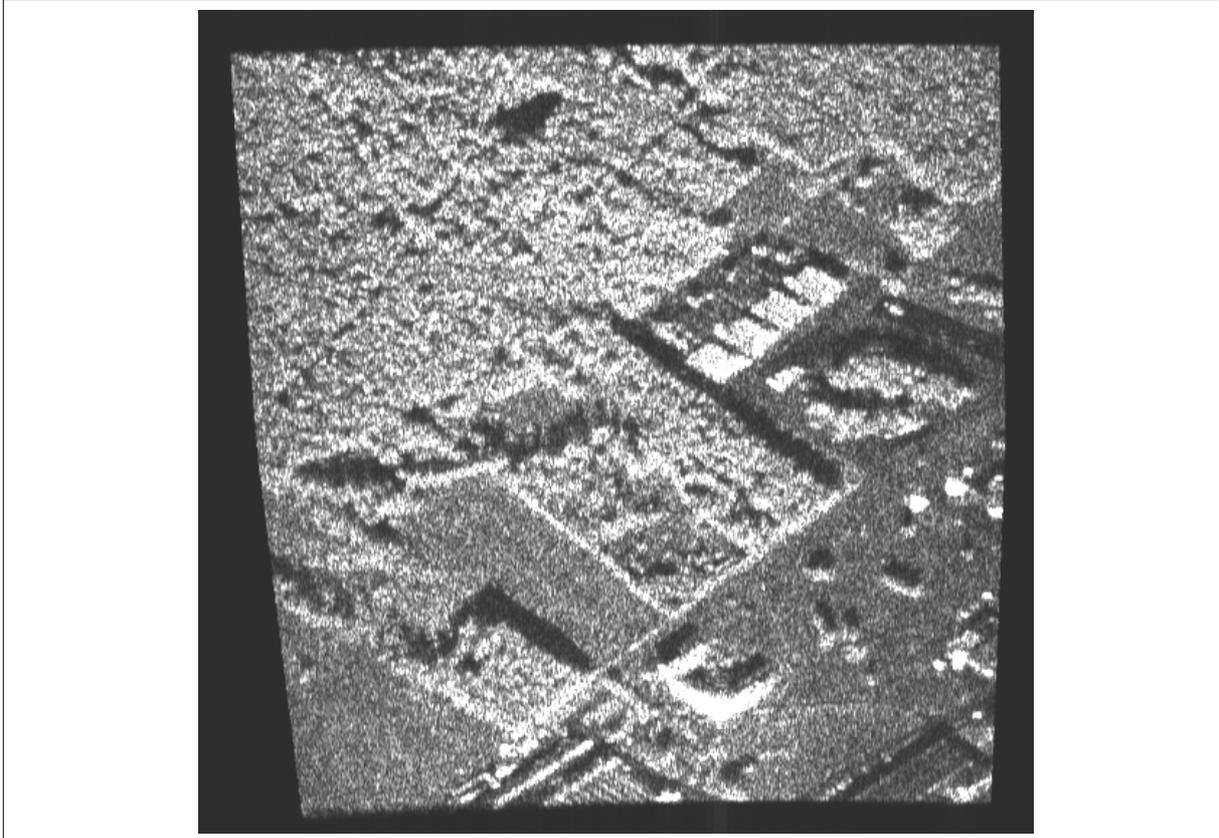


Bild 7.2: Verwendete Szene zur Bildung des Eigeninterferogramms

Das Eigeninterferogramm wird gebildet durch konjugiert komplexe Multiplikation des originalen Bildes mit dem koregistrierten verschobenen Bild. Das Eigeninterferogramm ist in Bild 7.3 gezeigt. Die Skalierung der Grauwerte reicht von weiß für $-\pi$ bis schwarz für π . Der Grauwert innerhalb des weißen Rechtecks entspricht der Phase 0° . Am linken und am oberen Rand des Interferogramms ist die Verschiebung in Azimut- und Entfernungsrichtung angedeutet. Der gemeinsame gültige Bereich des originalen und verschobenen Bildes, welcher für die Berechnung des Phasenprofils in Azimut und Entfernung verwendet wurde, befindet sich innerhalb des weißen Rechtecks. Azimut- und das Entfernungsprofil zeigen eine konstante Phase von 0° , was die Phasentreue des Frequenz-Skalierungs-Verfahrens nachweist. Die Mittelung über den gesamten weiß umrandeten Bereich des Eigeninterferogramms von Bild 7.3 ergibt eine Phase von 0.00038° . Die gemessene Standardabweichung der Phase ist 1.22° . Dabei ist zu beachten, daß viele abgeschattete Bereiche mit hohem Phasenrauschen in Bild 7.2 vorhanden sind.

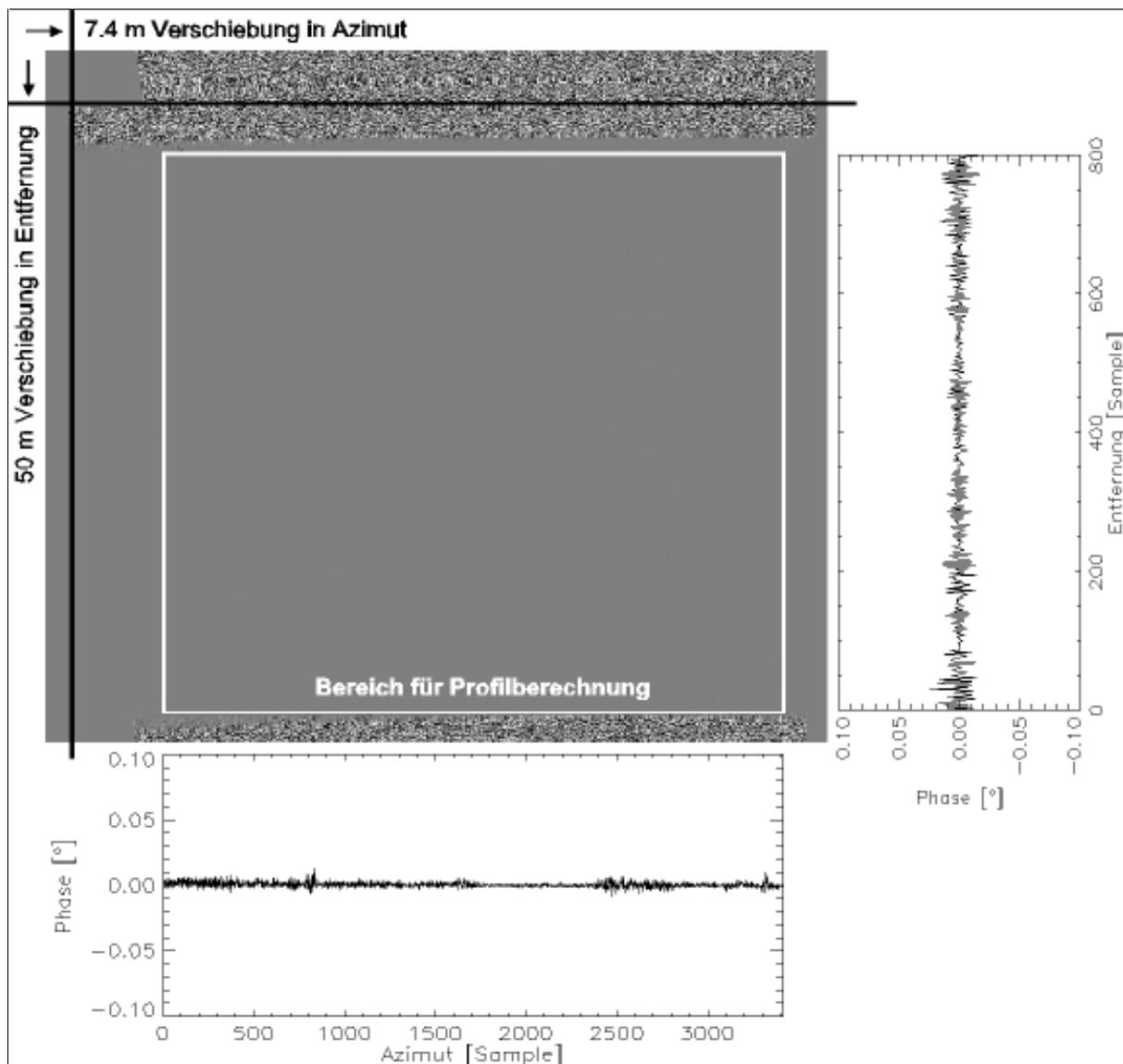


Bild 7.3: Eigeninterferogramm einer E-SAR-Szene mit Azimut- und Entfernungsprofil zum Nachweis der Phasentreue

Die Verschiebung der Rohdaten in Azimutrichtung bewirkt ein Phasenrauschen, falls nicht die Teile des Azimutzeitsignals gefiltert werden, welche unterschiedliche Frequenzanteile im originalen und verschobenen Bild darstellen. In Bild 7.4 auf der linken Seite ist die *Spotlight*-Apertur für die originalen und die verschobenen Rohdaten gezeigt. Nur der gemeinsame Teil der *Spotlight*-Aperturen trägt zum Eigeninterferogramm bei. Die grau gezeichneten Bereiche fügen Rauschen ein. Der prinzipiell gleiche Effekt tritt in der SAR-Interferometrie auf und wird dort als *Wavenumber Shift* bezeichnet [23].

Bei einer Gewichtung zur Nebenzipfelunterdrückung in Azimut werden die zur Bildung der *Spotlight*-Apertur verwendeten Signalanteile im originalen und verschobenen Bild unterschiedlich gewichtet. Dadurch wird weiteres Rauschen eingefügt.

Bei dem hier gezeigten Eigeninterferogramm ist der Rauschanteil, welcher durch die unterschiedliche Gewichtung eingefügt wird, am größten. In Bild 7.4 rechts ist die unterschiedliche Gewichtung des originalen und verschobenen Azimutsignals dargestellt.

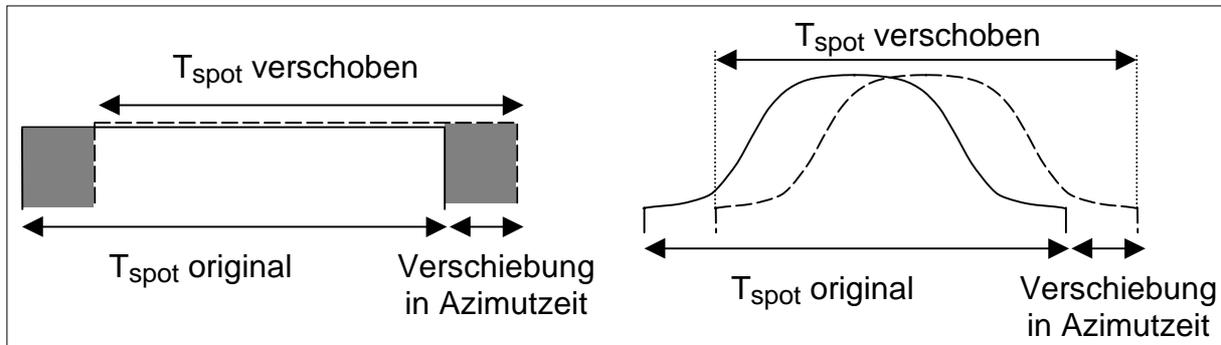


Bild 7.4: Wegen der Verschiebung der Rohdaten tragen unterschiedliche Zeitintervalle zum fokussierten Bild bei

In Entfernungsrichtung wurde die Verschiebung der Rohdaten vor der *Dechirp*-Operation durchgeführt. Es wird kein zusätzliches Rauschen eingefügt, da das Entfernungszeitintervall für die Kompression der gemeinsamen Ziele nicht verändert wird. Auch die Gewichtung zur Nebenzipfelunterdrückung fügt kein Rauschen ein, da sich nach der RVP-Korrektur im Entfernungszeitbereich alle Entfernungssignale an derselben zeitlichen Position befinden. Die Gewichtung wird also im originalen und im verschobenen Bild jeweils gleich zentriert um die Referenzentfernung der *Dechirp*-Operation durchgeführt.

Für das Eigeninterferogramm von Bild 7.3 wurde zur Verminderung des oben beschriebenen Phasenrauschens eine Filterung der nicht in beiden Bildern enthaltenen Azimutsignalanteile durchgeführt. Dabei wurden in den Rohdaten die in Bild 7.4 grau gezeichneten Bereiche zu Null gesetzt. Auch die Gewichtung zur Nebenzipfelunterdrückung in Azimut wurde nicht durchgeführt. Der Test der Phasentreue mit dem Eigeninterferogramm ist aber trotzdem gültig, da sich das „gleiche“ Azimutsignal in der Prozessierung des originalen und des verschobenen Bildes an verschiedenen Azimutzeitpositionen befindet. Dies ist in Bild 7.5 dargestellt.

Die „gefilterten“ Bereiche sind grau dargestellt und mit Nullen gefüllt. Die zusätzlichen Nullen links und rechts des Datenblocks mit der Länge der *Spotlight*-Apertur werden bei der Erweiterung auf eine Zweierpotenz eingefügt. Diese Erweiterung ist für die Durchführung der Azimut-FFT-Operationen vorteilhaft.

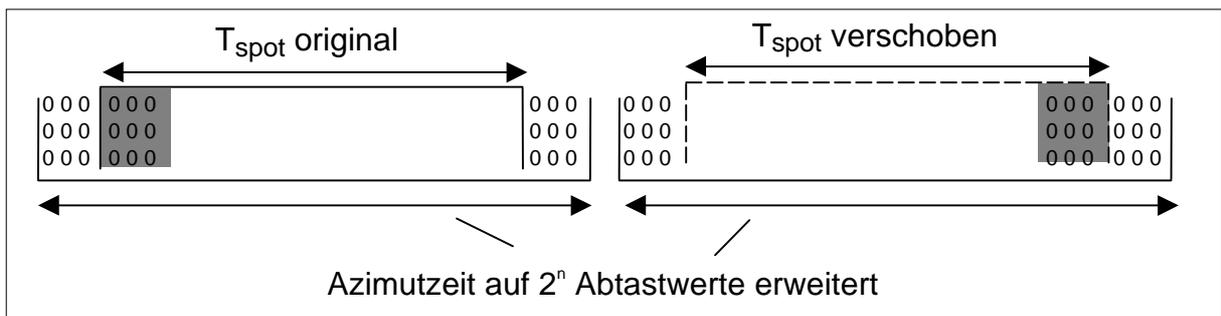


Bild 7.5: Positionierung von T_{spot} direkt vor der Prozessierung

Um die Größenordnung des Phasenrauschens für den Fall ohne Filterung und mit einer Hamminggewichtung in Azimut von 0.54 zu zeigen, ist das Azimutprofil des Eigeninterferogramms für diesen Fall in Bild 7.6 gezeigt. Der Vergleich mit dem Azimutprofil aus Bild 7.3 zeigt deutlich das höhere Phasenrauschen im Fall von Gewichtung und fehlender Filterung.

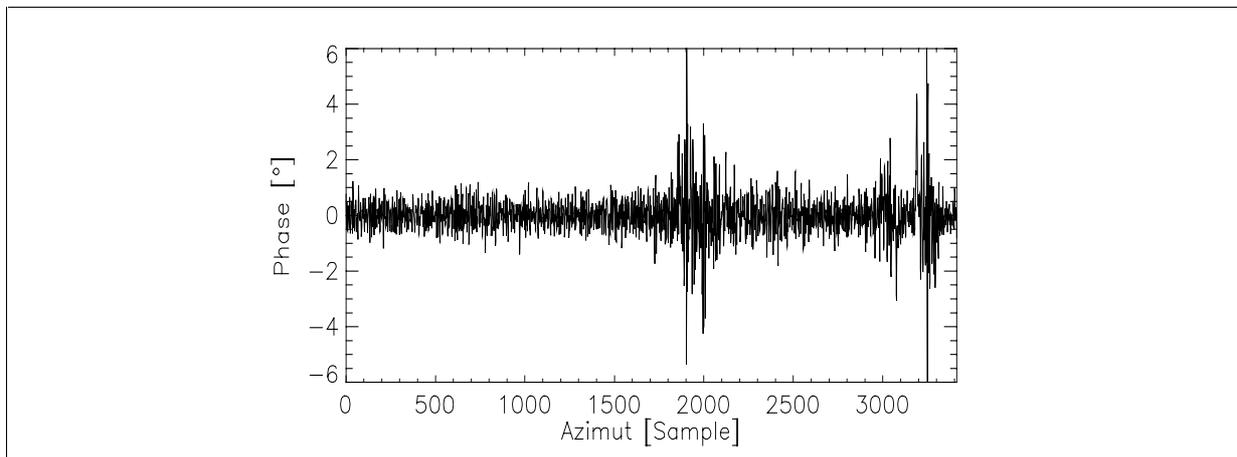


Bild 7.6: Azimutprofil des Eigeninterferogramms bei Gewichtung und ohne Filterung

8 VERGLEICH VON *STRIPMAP*- UND *SPOTLIGHT*-ABBILDUNG

Auf Grund der *Stripmap*-Rohdaten, welche der Ausgangspunkt für die Generierung des *Spotlight*-Bildes mit dem Frequenz-Skalierungs-Verfahren waren, kann ein Vergleich mit einem aus diesen Rohdaten prozessierten *Stripmap*-Bild erfolgen. Der Vergleich bezieht sich auf die unterschiedlichen Squintwinkel und wird nicht von Fehlern beeinflusst, wie sie bei der Verwendung von zwei unterschiedlichen Rohdatensätzen auftreten. Solche Fehler sind zum Beispiel eine ungenaue Bewegungskompensation [8] bei unterschiedlichen Flugbahnen beim Überflug.

Das nächste Kapitel zeigt einige Zwischenstufen der Interferometrischen Verarbeitung. Eine gute Einführung in die Grundlagen der SAR-Interferometrie wird in [11] gegeben. Ausführliche Darstellungen der SAR-Interferometrie finden sich in [2] und [28]. Die Verarbeitung der E-SAR-Rohdaten im *Stripmap*-Modus mit dem *Extended Chirp Scaling*-Algorithmus wird kurz beschrieben. Anschließend werden sowohl die Amplitudenbilder als auch die Interferogramme der *Stripmap*- und der *Spotlight*-Abbildung miteinander verglichen.

8.1 Generierung eines *Spotlight*-Interferogramms

Die notwendigen Schritte zur Generierung eines *Spotlight*-SAR-Interferogramms aus E-SAR-*Stripmap*-Rohdaten sind im Blockdiagramm von Bild 8.1 dargestellt. Ausgangspunkt ist ein interferometrischer Datensatz des E-SAR im X-Band, wobei beide Kanäle beim gleichen Überflug aufgezeichnet wurden. Für beide Kanäle wird die *Dechirp*-Operation und anschließend die Prozessierung mit dem Frequenz-Skalierungs-Verfahren durchgeführt. Das Ergebnis dieser Verarbeitung sind zwei komplexe *Single-Look*-Bilder, welche im nächsten Schritt koregistriert werden. Das Amplitudenbild des ersten Kanals wurde bereits in Bild 6.15 gezeigt.

Die Fehlregistrierung wurde, wie in Kapitel 7.2, für jede Azimut- und Entfernungszeile nach einer Interpolation um den Faktor 16 durch Korrelation bestimmt. Danach wurde das Bild des zweiten Kanals erneut prozessiert und dabei eine Verschiebung des Bildes zur Korrektur der Fehlregistrierung durchgeführt. In Entfernungsrichtung ist die Verschiebung durch eine lineare Phasenmultiplikation an der Stelle der inversen Frequenz-Skalierungs-Operation im Entfernungszeitbereich realisiert. In Azimutrichtung ist die Verschiebung durch eine Verschiebung der *Deramping*-Funktion

realisiert. Das Ergebnis der erneuten Messung der Fehlregistrierung ist in Bild 8.2 gezeigt. Die Mittelwerte über alle Azimut- bzw. Entfernungspositionen ergeben sich zu einer mittleren Fehlregistrierung von 0.014 bzw. -0.011 Abtastwerten in Azimut und Entfernung. Diese Fehlregistrierungen sind kleiner als die Meßgenauigkeit bei einer Interpolation auf 1/16 Abtastwerte.

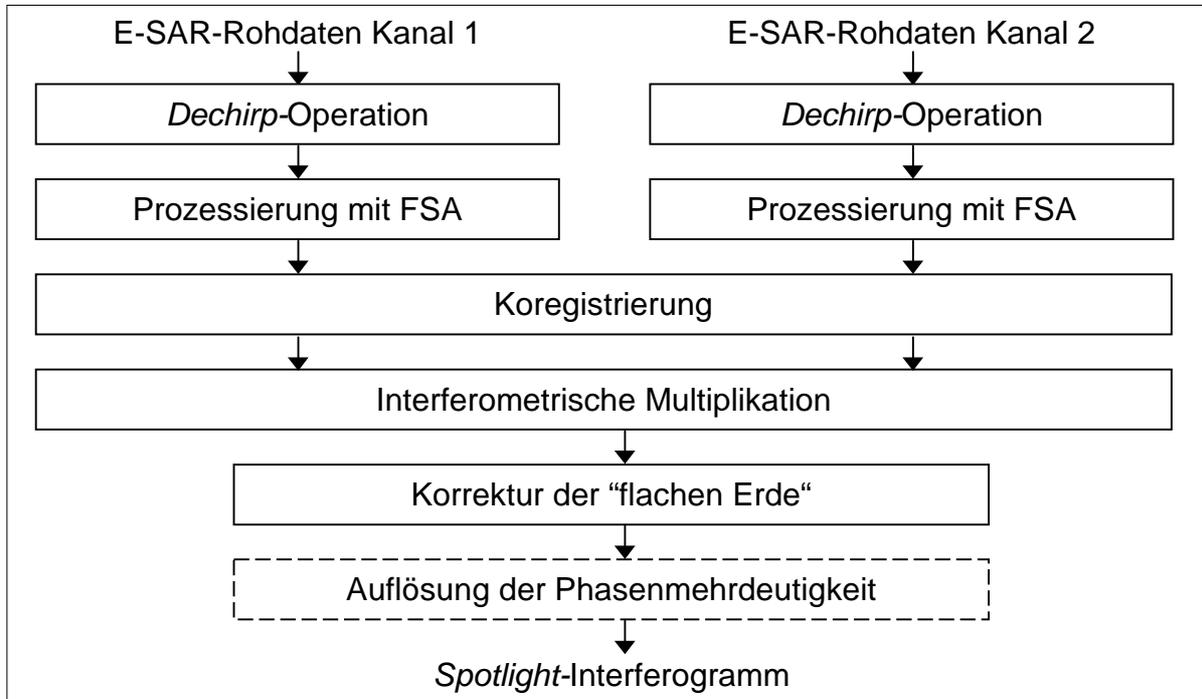


Bild 8.1: Schritte zur Generierung eines Spotlight-Interferogramms aus E-SAR Daten

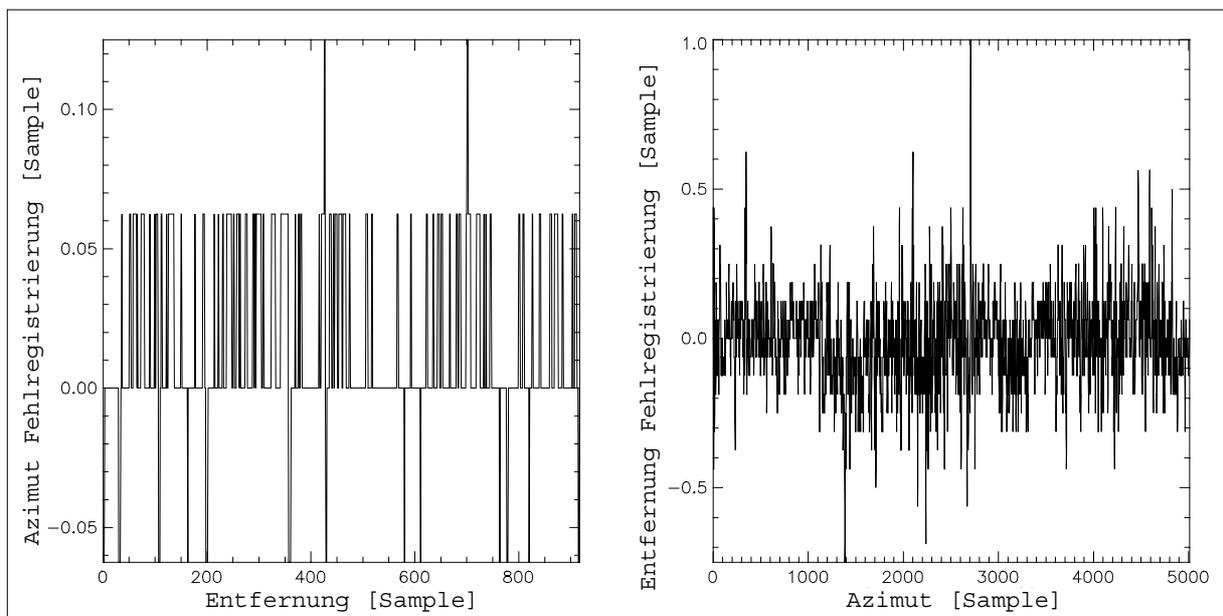


Bild 8.2: Gemessene Fehlregistrierung in Azimut (links) und Entfernung (rechts)

Der nächste Schritt im Blockdiagramm von Bild 8.1 ist die interferometrische Multiplikation, wobei die Phasendifferenz für jeden Bildpunkt durch konjugiert komplexe Multiplikation der entsprechenden Bildpunkte in den Bildern von Kanal 1 und Kanal 2 gebildet wird. Das Ergebnis dieser Multiplikation ist das in Bild 8.3 gezeigte Interferogramm. Das Interferogramm beinhaltet noch die Phase der flachen Erde [11].

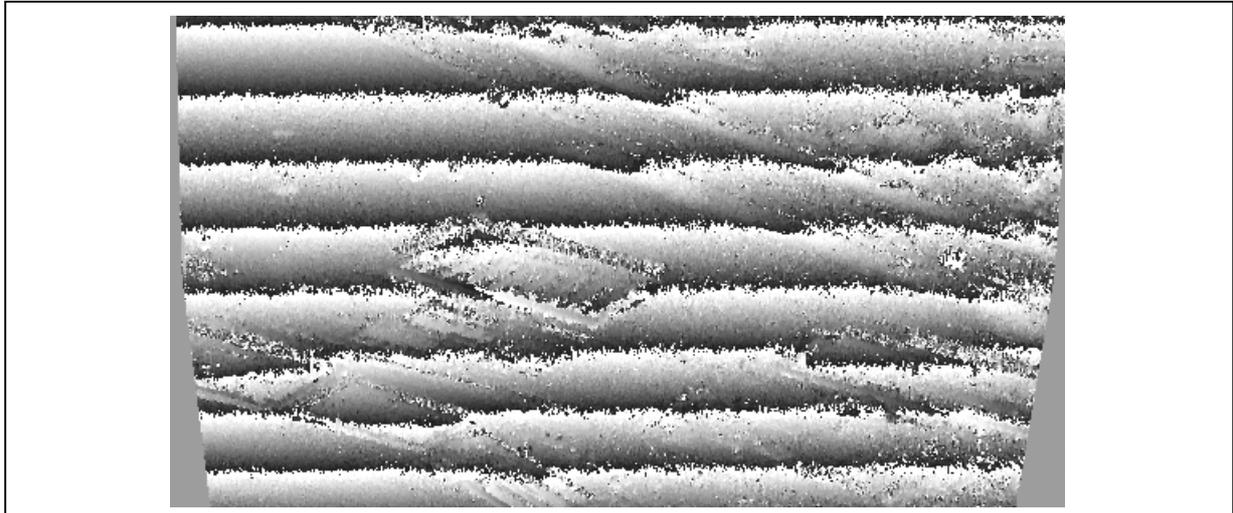


Bild 8.3: Interferogramm ohne Korrektur der Phase der flachen Erde

Nach Abzug des Phasenterms der flachen Erde ergibt sich das Interferogramm in Bild 8.4, das ein ungefähres Höhenmodell darstellt. Bei diesem Interferogramm wurde keine Mittelung zur Verringerung des Phasenrauschens durchgeführt. Bild 8.16 zeigt das *Spotlight*-Interferogramm nach einer Mittelung zur Reduktion des Phasenrauschens.

Der maximale Phasenunterschied in Bild 8.4 ist ungefähr 180° , was mit den interferometrischen Parametern des E-SAR-Systems [72] für X-Band mit einer Basislinie von 1.62 m zwischen den beiden X-Band Antennen und einem Neigungswinkel von 12° der Basislinie zur Senkrechten ungefähr 20 m Höhenvariation entspricht. Da die Phasenvariation kleiner als ein 2π -Phasenzyklus ist, ist keine Auflösung der Mehrdeutigkeit (englisch: *Phase Unwrapping*) [2] [11] [28] [40] der Phaseninformation notwendig. Ein umfassender Überblick über das interferometrische E-SAR-System wird in [73] gegeben.



Bild 8.4: Interferogramm nach Abzug der Phase der flachen Erde

Eine andere Darstellungsform von Interferogrammen ergibt sich durch die Überlagerung der interferometrischen Phase mit dem Amplitudenbild der Rückstreuung. Um die perspektivische Wirkung zu verstärken, ist bei der in Bild 8.5 dargestellten Überlagerung der gezeigte Bildbereich mit zunehmender Entfernung verkleinert.

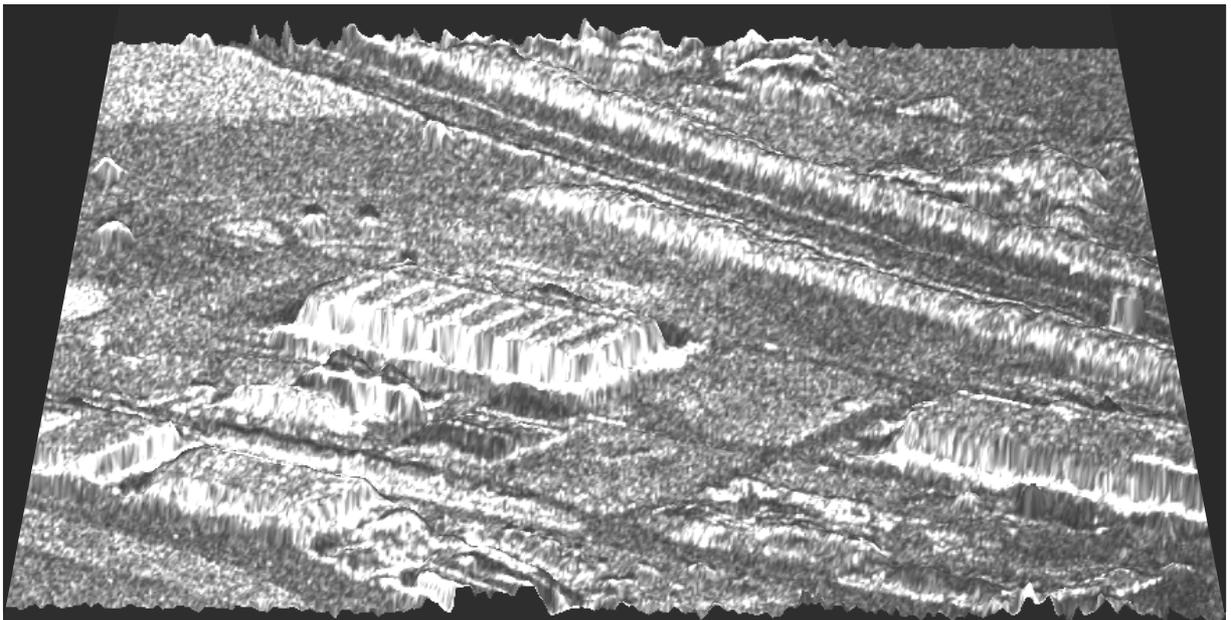


Bild 8.5: Überlagerung der interferometrischen Höhe mit der Rückstreuung: in der Mitte des Bildes erkennt man eine Werkshalle, von links oben nach rechts unten verläuft eine Autobahn mit deutlich erkennbarem Mittelstreifen

8.2 Prozessierung im *Stripmap*-Modus

Die *Stripmap*-Rohdaten des E-SAR-Systems, welche zur Prozessierung des *Spotlight*-Bildes von Bild 6.15 und des *Spotlight*-Interferogramms von Bild 8.4 verwendet wurden, werden auch im *Stripmap*-Modus prozessiert. Anschließend erfolgt ein Vergleich der daraus entstehenden *Stripmap*-Ergebnisse mit den Ergebnissen der *Spotlight*-Verarbeitung. Die *Stripmap*-Verarbeitung erfolgte mit dem in Kapitel 3.1.3 beschriebenen *Extended Chirp Scaling*-Verfahren.

Um den Abtastabstand der prozessierten *Stripmap*- und *Spotlight*-Bilder anzugleichen, wurde in Entfernungsrichtung die *Range Scaling*-Operation des *Extended Chirp Scaling*-Verfahrens angewendet und somit der Abtastabstand im prozessierten *Stripmap*-Bild an den Abtastabstand im prozessierten *Spotlight*-Bild angeglichen. In Azimutrichtung erfolgte die Anpassung des Abtastabstands im prozessierten Bild bei der *Spotlight*-Verarbeitung, durch die Wahl der Skalierungsentfernung r_{sc1} laut Gleichung (3.28).

8.3 Vergleich der Amplitudenbilder

Das Amplitudenbild der *Stripmap*-Verarbeitung ist in Bild 8.6 gezeigt. Dem Azimut-Öffnungswinkel von 8° entspricht eine Augenblicksbandbreite von 780 Hz. Die prozessierte Azimutbandbreite beträgt 270 Hz, was einer Azimutauflösung von 0.42 m entspricht. In Entfernungsrichtung beträgt die Auflösung 2.16 m, was eine prozessierte Bandbreite von 90 MHz bedeutet.

Das entsprechende Amplitudenbild der *Spotlight*-Verarbeitung ist in Bild 8.7 enthalten. Die nachfolgend genannten *Spotlight*-Abbildungsparameter wurden wie in Kapitel 6.2.2 beschrieben ermittelt. Der Öffnungswinkel der *Spotlight*-Antenne wurde zu 5.23° gesetzt, woraus sich eine Augenblicksbandbreite von 506 Hz ergibt. Die realisierte Variation des Squintwinkels ergab sich damit zu 2.77° . Das bedeutet eine *Spotlight*-Bandbreite von 283 Hz im Nah- und 257 Hz im Fernbereich. Die *Spotlight*-Bandbreite ist für die Prozessierung eines *Spotlight*-Bildes aus E-SAR-*Stripmap*-Rohdaten kleiner als die Augenblicksbandbreite. Dies war nötig, um eine gewisse minimale Szenenausdehnung in Azimut zu ermöglichen. Die Azimutauflösung berechnet sich aus der *Spotlight*-Bandbreite zu 0.40 m im Nah- und zu 0.44 m im Fernbereich. Die prozessierte Entfernungsbandbreite und somit auch die Entfernungsauflösung ist exakt gleich der *Stripmap*-Verarbeitung.

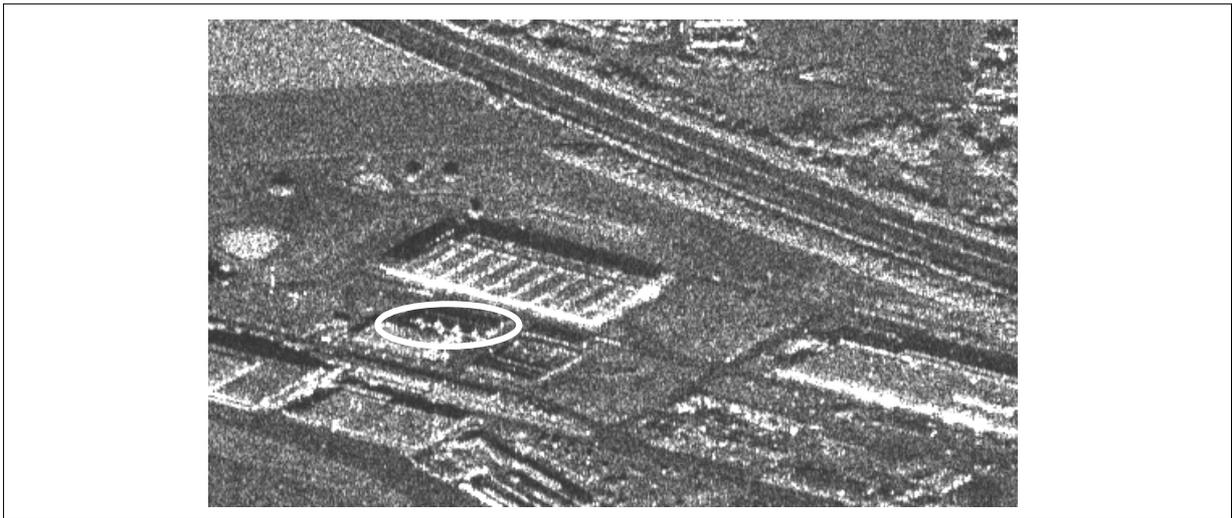


Bild 8.6: Amplitudenbild der Stripmap-Verarbeitung

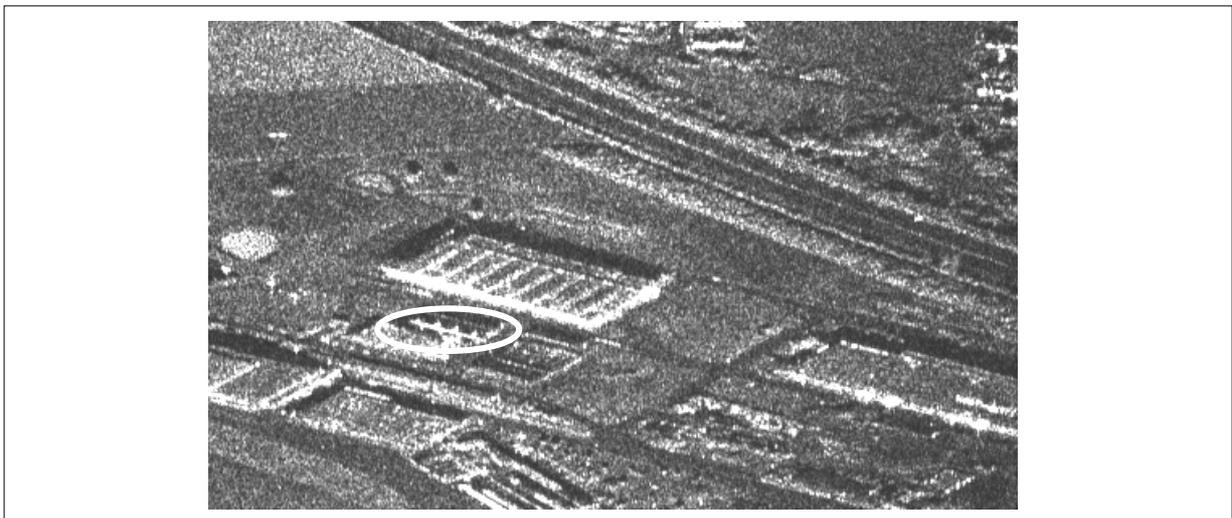


Bild 8.7: Amplitudenbild der Spotlight-Verarbeitung

Auf den ersten Blick sind die Amplitudenbilder der *Stripmap*- und der *Spotlight*-Verarbeitung gleich. Bei genauerem Betrachten fallen allerdings am linken und am rechten Bildrand einige Unterschiede auf. Ein markanter Unterschied ist halblinks im Bild weiß eingekreist. Die Vorderkante eines Gebäudes ist in der *Stripmap*-Abbildung im wesentlichen an einzelnen Streuzentren zu erkennen, während in der *Spotlight*-Abbildung die ganze Vorderkante des Gebäudes sichtbar wird. Die Vorderkante des Gebäudes reflektiert unter dem Squintwinkel der *Stripmap*-Abbildung schlecht. Bei dem an dieser Stelle auftretenden *Spotlight*-Squintwinkelbereich ist die Reflektivität wesentlich höher.

Das Differenzbild aus den Amplitudenbildern der *Stripmap*- und *Spotlight*-Verarbeitung befindet sich in Bild 8.8. Man erkennt in der Mitte des Differenzbildes fast keinen Unterschied zwischen *Stripmap*- und *Spotlight*-Bild. Der mittlere Bereich der

Bilder wurde weitgehend über den gleichen Squintwinkelbereich fokussiert. Je weiter man im Differenzbild nach außen geht, um so mehr Unterschiede werden deutlich. Die Unterschiede sind eine Folge des unterschiedlichen Squintwinkelbereichs.

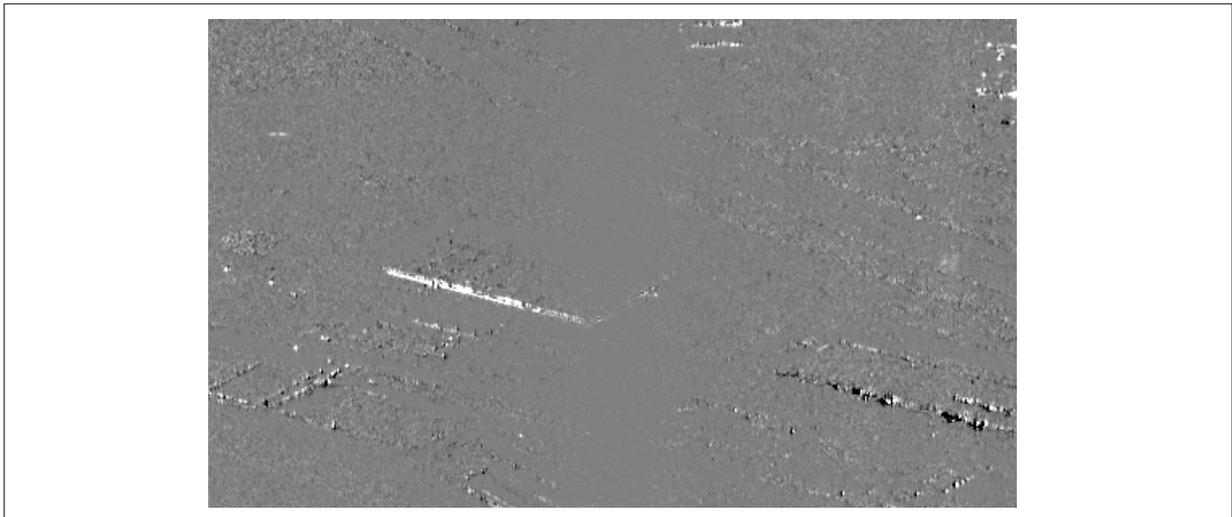


Bild 8.8: Differenz der Amplitudenbilder aus Stripmap- und Spotlight-Verarbeitung

Für die hier angewendete Prozessierung eines *Spotlight*-Bildes aus *Stripmap*-Rohdaten hat wegen des von der Azimutposition der Ziele abhängigen Squintwinkelbereichs das Antennendiagramm in Azimut Einfluß auf die Intensität im *Spotlight*-Bild. Die Intensität fällt von der Mitte her nach links und rechts ab. In der *Stripmap*-Verarbeitung wird jeder Bildpunkt unter Verwendung des gleichen Squintwinkelbereichs fokussiert und somit ist der Einfluß des Azimutantennendiagramms über Azimut konstant. Zur Bildung des Differenzbildes von Bild 8.8 wurde daher vorher im *Spotlight*-Bild das Azimutantennendiagramm ausgeglichen. Die Unterschiede im Differenzbild sind daher im wesentlichen durch den unterschiedlichen Squintwinkelbereich verursacht. Der Einfluß des auf Grund des Azimutantennendiagramms schlechteren Signal/Rausch-Verhältnis links und rechts im *Spotlight*-Bild ist wesentlich geringer als der Einfluß des unterschiedlichen Winkelbereichs. Dies wird nachfolgend mit Hilfe der Kohärenz gezeigt.

8.4 Kohärenz der *Stripmap*- und *Spotlight*-Abbildung

Eine wichtige Kenngröße in der Interferometrie und allgemein zum Bildvergleich ist die Kohärenz [2] [11] [24]. Mit der Kohärenz kann die Qualität eines Interferogramms beurteilt werden. Je höher die Kohärenz, um so geringer das Phasenrauschen und desto besser ist die interferometrische Phaseninformation. Die Kohärenz ist in Gleichung (8.1) definiert.

$$\rho = \frac{E\langle p_1 \cdot p_2^* \rangle}{\sqrt{E\langle |p_1|^2 \rangle \cdot E\langle |p_2|^2 \rangle}} \quad (8.1)$$

In (8.1) bezeichnet p_1 einen komplexen Bildpunkt des Bildes von Kanal 1, während p_2 ein Bildpunkt des Bildes von Kanal 2 an der zu p_1 korrespondierenden Stelle ist. Der Betrag der Kohärenz kann Werte zwischen 0 und 1 annehmen, wobei eine Kohärenz nahe bei 1 ein sehr rauscharmes und daher scharfes Interferogramm bedeutet. Je mehr sich die Kohärenz dem Wert Null nähert, um so mehr sind die Bilder dekorreliert und das Phasenrauschen nimmt zu.

Die Dekorrelation in einem SAR-Interferogramm setzt sich aus mehreren Anteilen zusammen [11]. Mit zeitlicher Dekorrelation bezeichnet man Änderungen der Szene zwischen der Aufnahme der beiden Bilder. Eine örtliche Dekorrelation ist die Folge einer Fehlregistrierung des interferometrischen Bildpaares.

Der für das Entstehen der interferometrischen Phase notwendige Unterschied des Einfallswinkels der Radarstrahlung in beiden Bildern verursacht eine Verschiebung der Entfernungsspektren. Dieser Effekt wird in der Literatur als *Wavenumber Shift* [23] bezeichnet. Auch ein unterschiedlicher Bereich von Squintwinkeln und somit unterschiedliche Azimutspektren führen zu einer Dekorrelation [76]. Durch das Radarsystem eingefügtes Rauschen verschlechtert zusätzlich die Kohärenz. Eine genaue SAR-Prozessierung ist für gute Kohärenz notwendig und Interpolationen sollten für eine phasengenaue Prozessierung vermieden werden. Bildbereiche, von denen wenig oder gar kein Nutzsignal zur Verfügung steht, wie zum Beispiel abgeschattete Bereiche, tragen auch zur Erhöhung des Phasenrauschens und damit zur Verschlechterung der Kohärenz bei.

In der Praxis muß der Erwartungswert $E\langle \rangle$ durch eine örtliche Mittelung entlang Azimut und Entfernung ersetzt werden [24]. Einen Beitrag zur Dekorrelation stellt auch die interferometrische Phase selbst dar, besonders wenn sich die Phase innerhalb des für die Mittelung verwendeten Fensters schnell ändert.

Die Kohärenz der *Stripmap*-Bilder der beiden Kanäle ist in Bild 8.9 gezeigt. Die mittlere Kohärenz wurde zu 0.82 bestimmt. Das Kohärenzbild zum *Spotlight*-Interferogramm von Bild 8.4 ist in Bild 8.10 gezeigt. Die mittlere Kohärenz im Bild beträgt 0.81. Die Abweichung vom idealen Wert 1 entsteht sowohl im Fall der

Stripmap- als auch im Fall der *Spotlight*-Verarbeitung hauptsächlich durch Phasenrauschen. Das Phasenrauschen entsteht im wesentlichen durch die abgeschatteten Bereiche an der Rückseite der Gebäude und Bäume. Im Interferogramm von Bild 8.4 zeichnen sich solche Bereiche durch ein sogenanntes „Pfeffer und Salz“-Muster ab.

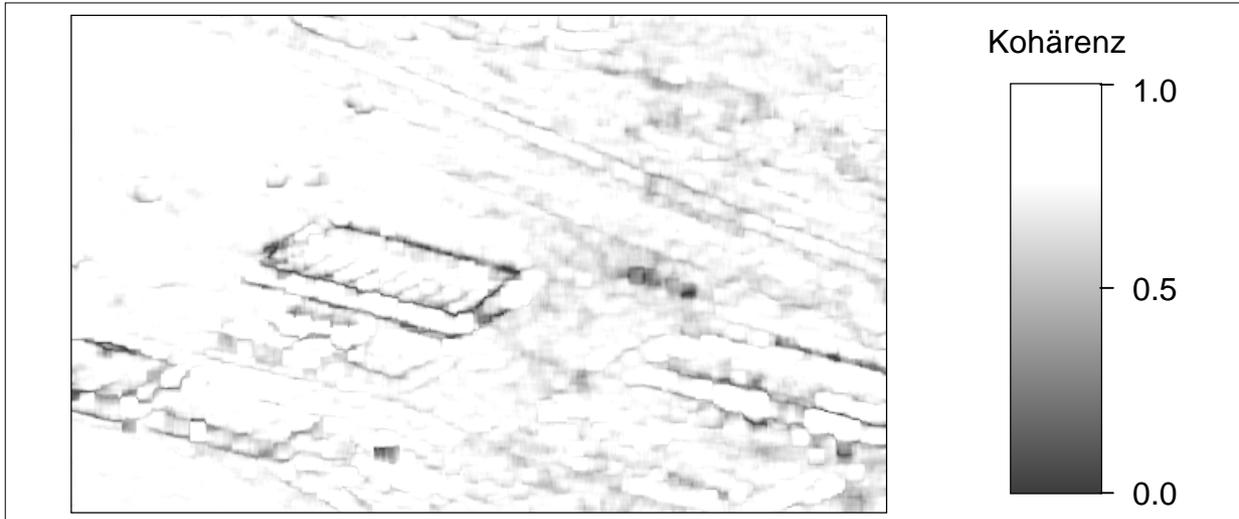


Bild 8.9: Kohärenzkarte der Bilder beider Kanäle nach der *Stripmap*-Verarbeitung mit schwarz für Kohärenz 0 und weiß für Kohärenz 1

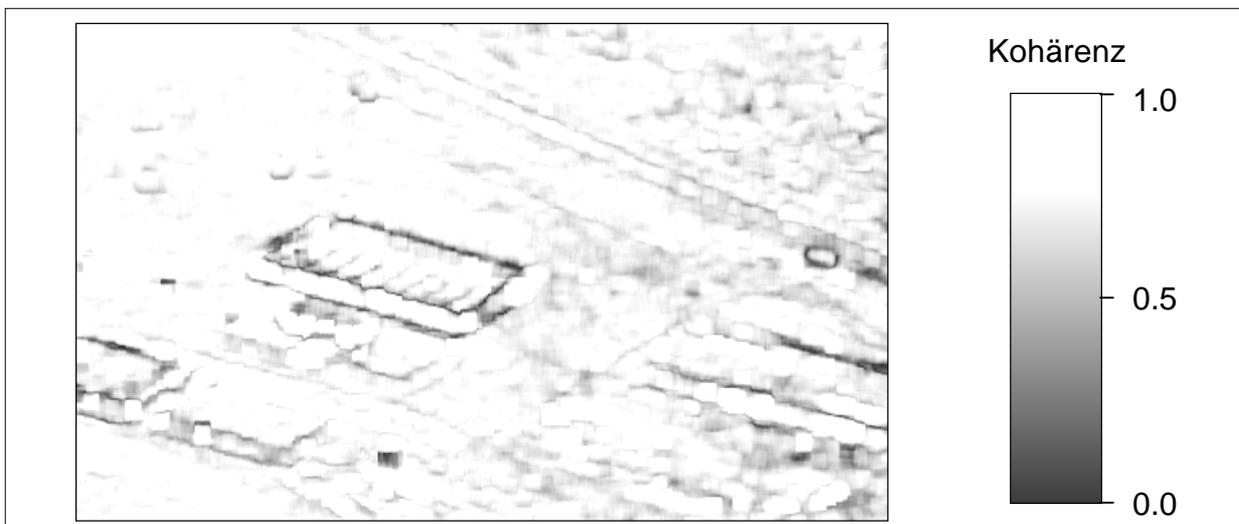


Bild 8.10: Kohärenzkarte der Bilder beider Kanäle nach der *Spotlight*-Verarbeitung mit schwarz für Kohärenz 0 und weiß für Kohärenz 1

Das im vorigen Kapitel erwähnte schlechtere Signal/Rausch-Verhältnis am linken und rechten Rand der aus den *Stripmap*-Rohdaten prozessierten *Spotlight*-Bilder wird beim Vergleich der mittleren Kohärenz deutlich. Bild 8.11 zeigt in durchgezogener Linie die mittlere Kohärenz für das *Stripmap*-Bildpaar, abhängig von der Azimutposition. Die gestrichelte Linie zeigt die mittlere Kohärenz für das *Spotlight*-Bildpaar.

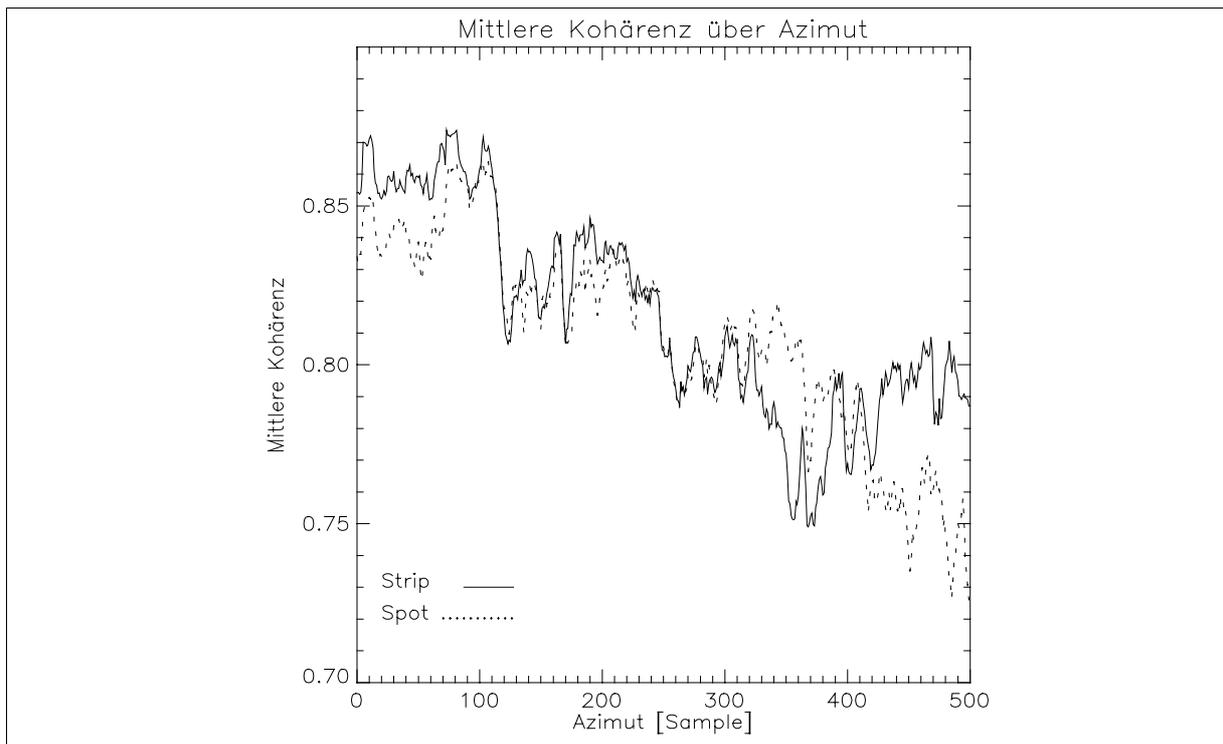


Bild 8.11: Mittlere Kohärenz über Azimut im Stripmap- und Spotlight-Bildpaar

Man erkennt die etwas niedrigere Kohärenz der *Spotlight*-Abbildung am linken und rechten Bildrand, wo das Signal/Rauschverhältnis schlechter ist. In der Mitte der Azimutpositionen, also dort, wo die verarbeiteten Squintwinkelbereiche sehr ähnlich sind, ist die mittlere Kohärenz in Bild 8.11 gleich.

Untersucht man die Kohärenz zwischen *Spotlight*- und *Stripmap*-Bild des gleichen Kanals, so kann man daraus eine Aussage über den Einfluß des Signal/Rauschverhältnisses im Vergleich zum Einfluß des unterschiedlichen Squintwinkelbereichs der *Spotlight*- und *Stripmap*- Verarbeitung ableiten. Die Kohärenzkarte zwischen *Spotlight*- und *Stripmap*-Bild von Kanal 1 ist in Bild 8.12 gezeigt. Im mittleren Bereich sind *Spotlight*- und *Stripmap*-Bild nahezu identisch, während linker und rechter Bereich große Unterschiede aufweisen. Die zu Bild 8.12 gehörende mittlere Kohärenz über Azimut ist in Bild 8.13 in durchgezogener Linie dargestellt. Die Kohärenz am linken und rechten Rand ist mit 0.15 wesentlich geringer als der Wert von 0.84 bzw. 0.74 bei der mittleren Kohärenz des *Spotlight*-Bildpaares von Bild 8.11.

Somit kann für die verwendeten E-SAR-*Stripmap*-Rohdaten die Aussage gemacht werden, daß der Einfluß des geringeren Signal/Rausch-Verhältnisses in der *Spotlight*-Verarbeitung, welcher bei der Prozessierung von *Spotlight*-Bildern aus *Stripmap*-Rohdaten eine Folge des Azimutantennendiagramms ist, gegenüber dem Einfluß der unterschiedlichen, zur Azimutfokussierung benutzten Squintwinkelbereiche vernachlässigt werden kann.

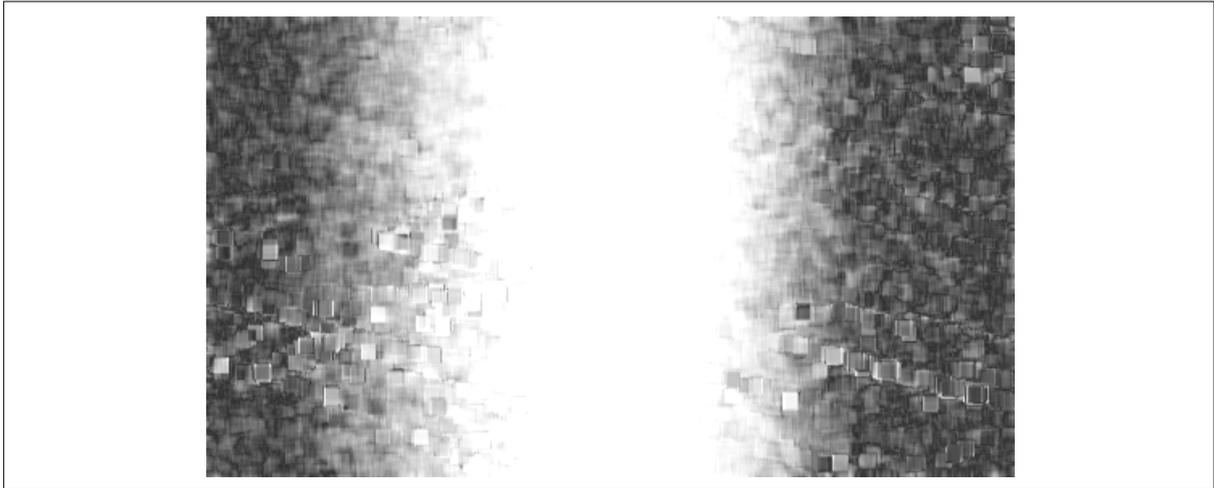


Bild 8.12: Kohärenzkarte zwischen Stripmap- und Spotlight-Bild von Kanal 1

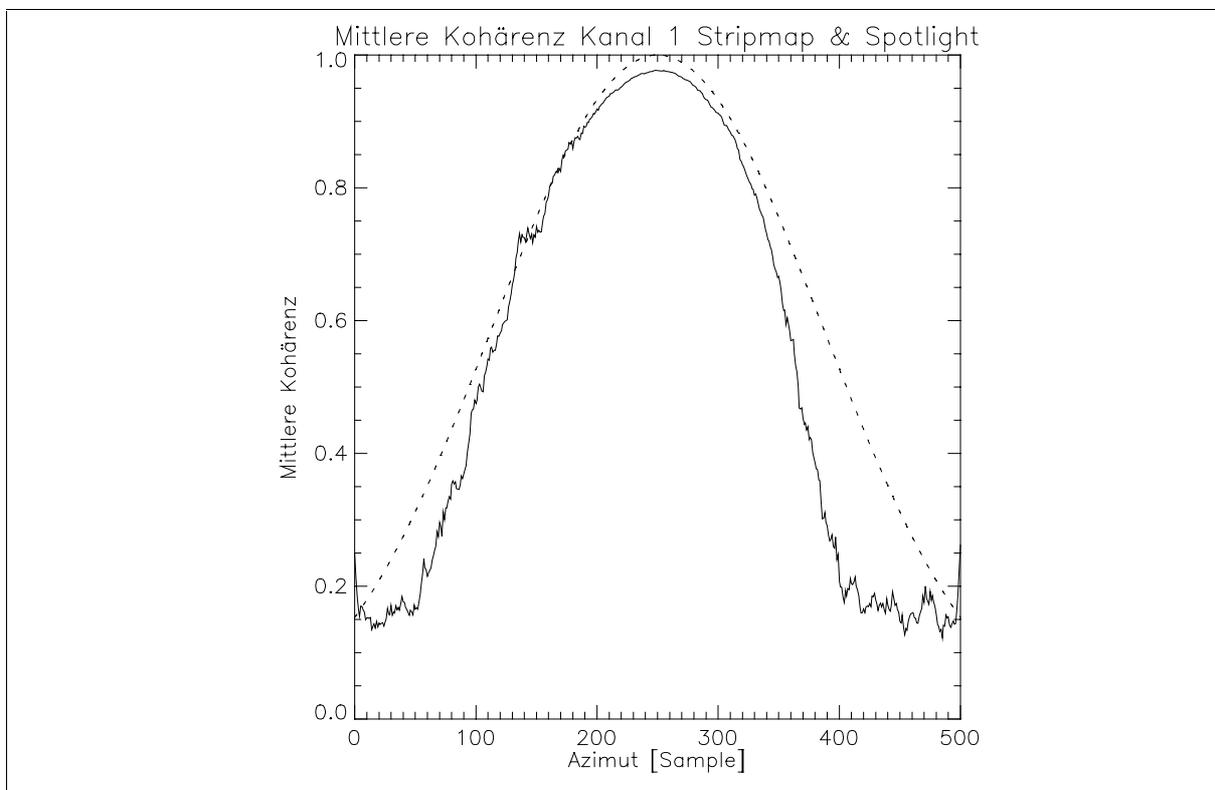


Bild 8.13: Mittlere Kohärenz über Azimut zwischen Stripmap- und Spotlight-Bild in durchgezogener und theoretische Kurve in gestrichelter Linie

Die mittlere Kohärenz in Bild 8.13 geht am linken und rechten Rand nicht gegen Null, weil sich die zur Azimutfokussierung verwendeten Squintwinkelbereiche, und damit auch Azimutfrequenzbereiche, an diesen Rändern immer noch überlappen. Dies ist in Bild 8.14 verdeutlicht, wobei Bild 8.14 nur eine andere Darstellung von Bild 6.5 ist.

Oben in Bild 8.14 ist die prozessierte *Stripmap*-Bandbreite gezeigt, welche unabhängig von der Azimutposition ist. Die *Spotlight*-Augenblicksbandbreite darunter

korrespondiert zur Azimutausdehnung der gültigen Szene. Für die gerade noch gültigen Ziele auf der linken und rechten Seite ist die prozessierte *Spotlight*-Bandbreite unten im Bild eingezeichnet. Die Überlappung der prozessierten Bandbreite dieser Ziele mit der prozessierten Bandbreite der *Stripmap*-Verarbeitung ist durch die grauen Bereiche angedeutet. Je näher die Position eines Zieles sich zur Mitte hin verschiebt, um so größer wird die Überlappung und um so höher wird der Korrelationskoeffizient. Die Abhängigkeit der Gesamtbandbreite und der *Spotlight*-Bandbreite von der Entfernung wurde für Bild 8.14 vernachlässigt.

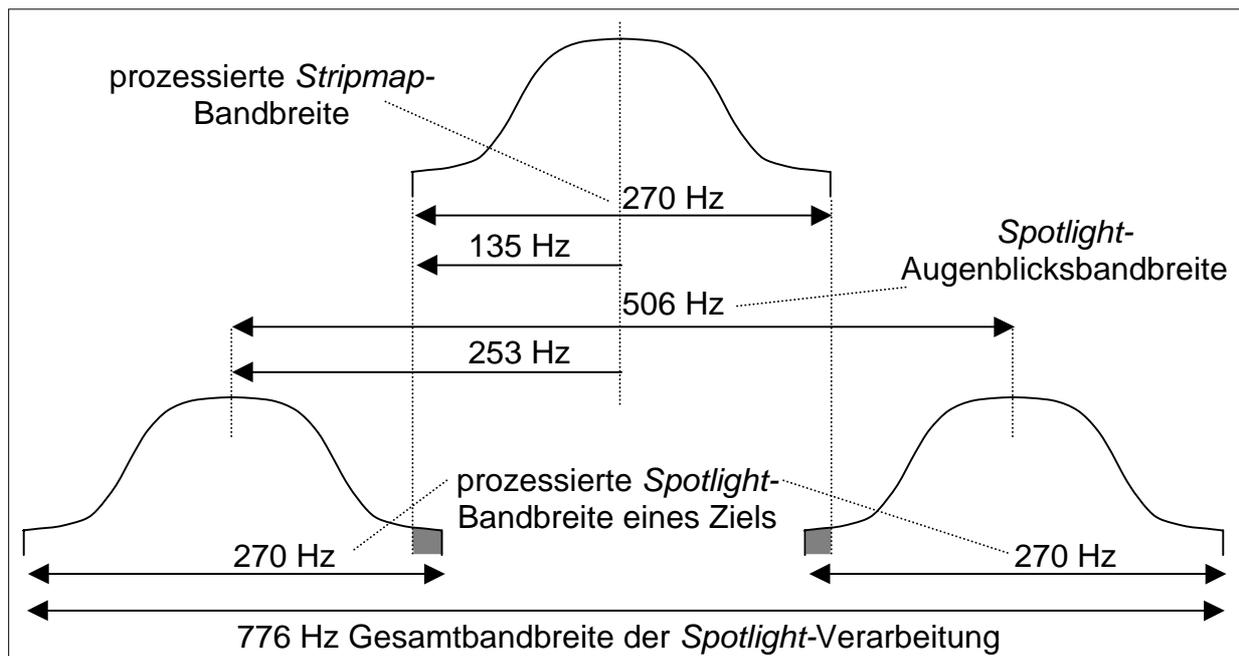


Bild 8.14: Spektrale Überlappung prozessierter Stripmap- und Spotlight-Bandbreite

Aus der verwendeten Hamming-Gewichtung mit Hamming-Faktor 0.54 in Azimut und der in Bild 8.14 gezeigten minimalen Überlappung wurde ein theoretischer Verlauf der mittleren Kohärenz zwischen *Stripmap*- und *Spotlight*-Bild von Bild 8.13 ermittelt. Dazu wurde die normierte Autokorrelationsfunktion (AKF) der Gewichtungsfunktion berechnet und der Abschnitt der AKF gestrichelt in Bild 8.13 geplottet, welcher sich von der minimalen Überlappung links in Bild 8.14 bis zur vollen Deckung und wieder bis zur minimalen Überlappung rechts in Bild 8.14 ergibt.

Für Bild 8.13 ist angenommen, daß sich das verarbeitete *Spotlight*-Azimutpektrum gleichmäßig über das *Stripmap*-Azimutpektrum verschiebt, was ein lineares Ansteigen des mittleren Squintwinkels über der Azimutachse von Bild 8.14 bedeutet. Man erkennt, daß die Kohärenz zwischen *Stripmap*- und *Spotlight*-Bild unter der Kurve der AKF liegt. Dies ist auf den Einfluß des höheren Rauschanteils am Rand des Azi-

mutantennendiagramms zurückzuführen, welcher bei der Berechnung der AKF nicht berücksichtigt wurde.

8.5 Interferogramme von *Spotlight*- und *Stripmap*-Mode

Das Ergebnis der interferometrischen *Stripmap*-Verarbeitung ist in Bild 8.15 gezeigt. Zum Vergleich ist in Bild 8.16 nochmals das Ergebnis der interferometrischen *Spotlight*-Verarbeitung dargestellt. Bei beiden Interferogrammen wurde eine Mittelung zur Reduzierung des Phasenrauschens durchgeführt, welche aber für die Bildung des Differenz-Interferogramms in Bild 8.17 nicht verwendet wurde.

Das *Stripmap*- und das *Spotlight*-Interferogramm beinhalten prinzipiell die gleiche Höheninformation. Kleinere Unterschiede ergeben sich für Ziele, welche je nach Beobachtungswinkel eine unterschiedliche Rückstreuung besitzen. Weitere Unterschiede zwischen *Stripmap*- und *Spotlight*-Interferogramm ergeben sich in abgeschatteten Bereichen mit starkem Phasenrauschen. Für die verwendeten E-SAR-*Stripmap*-Rohdaten sind *Stripmap*- und *Spotlight*-Interferogramm in der Mitte identisch. Für diesen Bereich wurde in der Azimutfokussierung der gleiche Squintwinkelbereich verwendet und somit das gleiche Phasenrauschen eingefügt.

Der zum Rand hin zunehmende Unterschied der verrauschten Phase in der *Stripmap*- und *Spotlight*-Beleuchtung ist sehr deutlich aus dem Differenzinterferogramm von Bild 8.17 ersichtlich. Auf der linken und rechten Seite werden die Unterschiede zunehmend größer, da der Anteil unterschiedlicher spektraler Anteile in der *Stripmap*- und *Spotlight*-Beleuchtung größer wird.



Bild 8.15: Stripmap-Interferogramm



Bild 8.16: Spotlight-Interferogramm

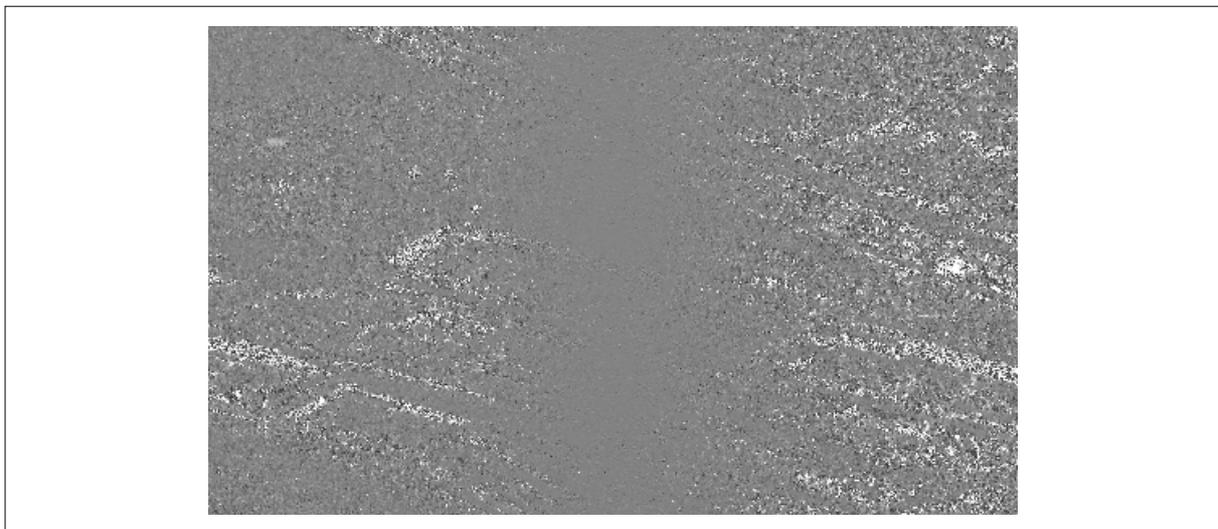


Bild 8.17: Differenzinterferogramm von Spotlight- und Stripmap-Interferogramm

9 ZUSAMMENFASSUNG UND WEITERFÜHRENDE AKTIVITÄTEN

In dieser Arbeit wurde ein neues Verfahren zur Verarbeitung von *Spotlight*-SAR-Rohdaten mit *Dechirp on Receive*-Operation in Entfernung entwickelt. Das Verfahren wird als Frequenz-Skalierungs-Verfahren bezeichnet.

Die Abbildungsgeometrie für ein SAR-System im *Spotlight*-Modus mit *Dechirp*-Operation in Entfernung wurde für einen geraden Vorbeiflug des Trägers an einem Zielgebiet exakt modelliert. Dabei wurde ein gültiger und ein beleuchteter Zielbereich definiert, welche wichtige Eingangsgrößen für die Verarbeitung mit dem Frequenz-Skalierungs-Verfahren darstellen. Grundlegende Bandbreiten der Azimutfrequenz wurden aus der Modellierung der Geometrie abgeleitet. Die *Spotlight*-Bandbreite korrespondiert zur Azimutauflösung und ist von der Größe der Variation des Squintwinkels, also vom Schwenkbereich der Antenne abhängig. Daneben hängt diese Bandbreite auch von der Entfernung und in geringem Maß von der Azimutposition eines Ziels ab. Die augenblickliche Bandbreite ergibt sich aus dem Öffnungswinkel der realen Antenne und bestimmt die Größe der abgebildeten Szene in Azimut. Sie ist auch die untere Grenze für die Wahl der Pulswiederholfrequenz PRF. Die Gesamtbandbreite einer Szene ergibt sich aus der Differenz des absoluten Minimums und Maximums der Augenblicksfrequenz. Die Gesamtbandbreite ist wesentlich größer als die PRF und muß für eine Verarbeitung mit herkömmlichen *Stripmap*-Verfahren ausreichend abgetastet sein.

Ausgehend von der Abbildungsgeometrie wurde eine neue analytische Beschreibung der Rohdaten eines Punktziels nach einer *Dechirp*-Operation in Entfernung abgeleitet. Dabei wird der *Residual Video Phase*-Term durch die Faltung mit einem linear frequenzmodulierten Signal dargestellt. Diese analytische Beschreibung war der Ausgangspunkt für die Entwicklung der Frequenz-Skalierungs-Operation, welche eine interpolationsfreie Korrektur der Zielentfernungsänderung für SAR-Signale mit *Dechirp*-Operation in Entfernung ermöglicht.

Auf Grund der nicht kontinuierlichen Abbildung von *Spotlight*-SAR wurde das SPECAN-Verfahren für die Azimutverarbeitung eingesetzt, was eine sehr effiziente Verarbeitung ermöglicht. Wegen dieses Vorteils wird das SPECAN-Verfahren oft für die Verarbeitung von *ScanSAR*-Daten, welche ebenfalls eine nicht kontinuierliche

Abbildung aufweisen, eingesetzt. Die Nachteile des SPECAN-Verfahrens sind eine ungenaue Verarbeitung sowie die Notwendigkeit einer Interpolation zur geometrischen Korrektur in Azimutrichtung. Diese Nachteile wurden vollständig ausgeglichen durch eine Azimut-Skalierung, welche zuerst für die *ScanSAR*-Datenverarbeitung formuliert und dann für die Verarbeitung von *Spotlight*-Daten erweitert und genau modelliert wurde. Insbesondere die für die Azimut-Skalierung benötigte Erweiterung der Azimutdimension wurde eingehend untersucht.

Ein weiteres Problem der Verarbeitung von *Spotlight*-Rohdaten mit *Dechirp*-Operation in Entfernung ist die Notwendigkeit einer für die Gesamtbandbreite ausreichenden Abtastung in Azimut, welche wesentlich höher als die PRF ist. Dieses Problem wurde durch eine *Subapertur*-Verarbeitung gelöst, für welche die bei der Datenaufzeichnung verwendete PRF ausreicht.

Durch Punktzielsimulationen wurde die Prozessierung mit dem Frequenz-Skalierungs-Verfahren überprüft und eine genaue Verarbeitung nachgewiesen. Zur Überprüfung des Verfahrens sind auch reale Rohdaten des E-SAR-Systems des DLR verwendet worden. Dazu wurde zuerst eine Strategie entwickelt, um Rohdaten, welche im *Stripmap*-Modus aufgezeichnet wurden, im *Spotlight*-Modus zu verarbeiten. Die Phasentreue des Frequenz-Skalierungs-Verfahrens ist durch Punktzielsimulationen sowie durch die Bildung eines Eigeninterferogramms einer E-SAR-Szene gezeigt worden.

Eine E-SAR-Szene wurde sowohl im *Stripmap*- als auch im *Spotlight*-Modus verarbeitet. Die Azimut-Skalierung des Frequenz-Skalierungs-Verfahrens sowie die Entfernungs-Skalierung des *Extended-Chirp-Scaling*-Verfahrens wurden verwendet, um eine genaue Koregistrierung der Amplitudenbilder sowie der Interferogramme im *Stripmap*- und *Spotlight*-Modus durchzuführen. Der Vergleich zeigt einen Unterschied im Amplitudenbild für Bildbereiche, welche aus unterschiedlichen Squintwinkelbereichen prozessiert wurden. Der Grund für den Unterschied ist die Abhängigkeit der Rückstreuungseigenschaften von der Beobachtungsrichtung. Die aus der *Spotlight*- und *Stripmap*-Verarbeitung gewonnenen Interferogramme enthalten die gleiche Höheninformation. Geringe Unterschiede gibt es bei Zielen, welche je nach Beobachtungswinkel eine unterschiedliche Rückstreuung besitzen sowie für abgeschattete Bereiche mit hohem Phasenrauschen.

Das in dieser Arbeit entwickelte Frequenz-Skalierungs-Verfahren für die *Spotlight*-Verarbeitung bildet zusammen mit dem *Extended Chirp Scaling*-Verfahren für

Stripmap und *ScanSAR* einen Satz von verwandten Algorithmen, welche durch gleiche oder ähnliche Hard- oder Softwaremodule implementiert werden können.

Eine weiterführende Aktivität ist die genaue Herleitung der Bewegungskompensation für den *Spotlight*-Modus. In dieser Arbeit wurde die für die *Stripmap*-Verarbeitung optimierte Bewegungskompensation verwendet, welche nur näherungsweise auf die *Spotlight*-Verarbeitung angewendet werden kann.

Beim Vergleich von *Stripmap*- und *Spotlight*-Interferogramm ergab sich im Differenzinterferogramm eine lineare Phasenrampe über Azimut für den Fall einer Fehlregistrierung der interferometrischen Kanäle in Azimut. Für eine Fehlregistrierung in Entfernung ergab sich ein näherungsweise quadratischer Phasenverlauf über Azimut. Eine Ausnutzung dieser Effekte zur Messung der Fehlregistrierung wird im Rahmen der weiterführenden Aktivitäten untersucht.

Eine Anwendung des Frequenz-Skalierungs-Verfahrens für *Spotlight*-Rohdaten mit zweidimensionaler *Dechirp on Receive*-Operation ist ohne größeren Aufwand möglich. Dazu muß die Azimutmodulation angepaßt sowie eine zusätzliche mit der Entfernung konstante Zeilen-Verschiebung eingefügt werden.

Für den Fall von Rohdaten ganz ohne *Dechirp*-Operation ist es ausreichend, die Entfernungsverarbeitung des Frequenz-Skalierungs-Verfahrens durch die Entfernungsverarbeitung des *Extended Chirp Scaling*-Verfahrens zu ersetzen. Die Vorteile der Azimutverarbeitung des Frequenz-Skalierungs-Verfahrens mit SPECAN, Azimut-Skalierung und Subaperturverarbeitung bleiben dabei erhalten.

Mit dem SIR-C Sensor wurden erstmals weltraumgestützte SAR-Daten im *Spotlight*-Modus aufgezeichnet (*SRL-2, Datatake 110.30 over Sydney, Australia*). Bei Verfügbarkeit dieses Datensatzes wird die Verarbeitung mit dem Frequenz-Skalierungs-Verfahren durchgeführt werden.

Die Implementierung einer in Azimutrichtung schwenkbaren Antenne in das E-SAR-System des DLR stellt ebenfalls eine weiterführende Aktivität im Zusammenhang mit dieser Arbeit dar. Für die Verarbeitung der mit der schwenkbaren Antenne gewonnenen Rohdaten wird das Frequenz-Skalierungs-Verfahren verwendet werden. Mit der schwenkbaren Antenne wird eine Azimutauflösung im Bereich von ca. 10 cm bei gleichbleibender Datenrate der Rohdatenaufzeichnung ermöglicht.

SUMMARY AND FOLLOW-ON ACTIVITIES

In this thesis, a new method for processing Spotlight SAR data with one-dimensional *Dechirp on Receive* has been developed. The method is called *Frequency Scaling Algorithm*.

The illumination of a SAR system in the Spotlight mode of operation with one-dimensional *Dechirp on Receive* is accurately modeled for a straight flight path of the carrier. Valid and illuminated target areas were defined, which are important input parameters for the Frequency Scaling processing. Fundamental bandwidths in azimuth were derived from the geometrical modelling. The spotlight bandwidth corresponds to the azimuth resolution and is dependent on the variation of the squint angle caused by the antenna steering in azimuth. Also, this bandwidth is dependent on the target range and slightly from the target position in azimuth. The instantaneous bandwidth results from the azimuth opening angle of the real aperture and defines the scene-extension in azimuth. The instantaneous bandwidth is the lower boundary for the selection of the pulse repetition frequency PRF. The total azimuth bandwidth of a scene is dependent on the absolute minimal and maximal of the instantaneous azimuth frequency and has to be sufficiently sampled in case of no subaperture processing.

Starting from the illumination geometry, a novel analytical formulation of raw data with one-dimensional *Dechirp on Receive* operation was derived. In this formulation, the *Residual Video Phase Term* is expressed by the convolution with a linear frequency modulated signal. This analytical formulation is the basis for the development of the Frequency Scaling operation, which allows an interpolation-free correction of the range cell migration for SAR raw data with one-dimensional *Dechirp on Receive*.

Due to the constant target illumination start and end times in Spotlight SAR data, the SPECAN approach was selected for efficient azimuth processing. Due to the efficiency this method is often used for the processing of ScanSAR data. The drawbacks of this method are an inaccurate processing and the necessity of an interpolation operation for geometric correction in azimuth after the compression. All these drawbacks of the SPECAN approach have been fully eliminated by a new azimuth scaling operation, which had been first formulated for ScanSAR processing and then was extended for the Spotlight azimuth processing in the frame of the

Frequency Scaling algorithm. For the application of azimuth scaling to Spotlight, detailed modelling was performed, especially for the required extension of the azimuth dimension.

Another problem in the Spotlight processing of raw data with one-dimensional *Dechirp on Receive* operation is the need of an azimuth sampling frequency, sufficient for the total scene bandwidth. To overcome this constraint, a subaperture approach was introduced. Using this approach, the pulse repetition frequency PRF inherent in the SAR raw data is sufficient. Usually, the PRF of the raw data is slightly higher than the instantaneous bandwidth.

The Frequency Scaling Spotlight processing was applied to simulated raw data of point targets and an accurate processing was proved. Another proof is the successfully processing of E-SAR raw data from DLR. For this raw data processing, a strategy for processing stripmap raw data in the spotlight mode of operation was developed. The phase fidelity of the Frequency Scaling Algorithm was proved by point target processing and by the generation of an Eigen-interferogram of a E-SAR scene.

The same E-SAR scene was processed twice, in the Stripmap and in the Spotlight mode. The azimuth scaling operation of the Frequency Scaling Algorithm as well as the range scaling of the Extended Chirp Scaling Algorithm were used to obtain accurate co-registration of the detected images and of the interferograms. The comparison shows differences in the detected images for areas, which are processed from different squint angles. The reason for the differences is the dependency of the backscattering properties on the direction of observation. The interferograms generated by stripmap and by Spotlight processing contain basically the same height information. Small differences arise for targets, which show a significant backscattering only under certain observation angles, and for shaded areas, which contain a high phase noise.

The developed Frequency Scaling Algorithm for Spotlight data processing together with the Extended Chirp Scaling Algorithm for Stripmap and ScanSAR forms an algorithm package, which can be implemented by using identical or similar hard- or software modules.

One follow-on activity is the accurate derivation of the motion compensation for airborne Spotlight SAR. The motion compensation used in this thesis is optimized for the stripmap processing, which means an approximation in the Spotlight processing.

By comparing the stripmap and Spotlight interferograms, a linear phase ramp in azimuth was detected for a miss-registration between master and slave image in azimuth. For a miss-registration in range, an almost quadratic phase function was found. An exploitation of these effects for high accurate co-registration of interferometric image pairs will be investigated.

An application of the Frequency Scaling Algorithm to Spotlight raw data with two-dimensional *Dechirp on Receive* operation is possible without much additional effort. Only the azimuth modulation has to be adapted and an additional bulk range cell migration correction has to be introduced.

In the case of Spotlight raw data without *Dechirp on Receive* Operation, the range processing of the Frequency Scaling Algorithm can be substituted by the range processing of the *Extended Chirp Scaling* Algorithm. The advantages of the azimuth processing by the Frequency Scaling Algorithm with SPECAN, azimuth scaling and subaperture processing are not affected by the substitution.

The first orbit-based spotlight SAR data have been acquired by the SIR-C sensor (*SRL-2, Datatake 110.30 over Sydney, Australia*). When this data take is available, it will be processed by the Frequency Scaling Algorithm.

The integration of a steerable antenna in the E-SAR system of DLR is another follow-on activity of this thesis. For the data processing of the acquired spotlight data, the Frequency Scaling Algorithm will be used. The expected azimuth resolution after the E-SAR system update is expected to be of the order of 10 cm, without increasing the PRF of the data acquisition.

ANHANG A - DARSTELLUNG DES RVP-TERMS

Der Anhang zeigt eine alternative Herleitung [41] des Ausdrucks in Gleichung (5.11) aus Gleichung (5.4). Diese Herleitung führt zum gleichen Ergebnis wie die Herleitung von Kapitel 5.1.1.

Gleichung (5.4) ist ohne die Erweiterung um die vier Exponentialterme in der zweiten Zeile von Gleichung (5.4) in Gleichung (A. 1) nochmals angegeben.

$$s(t_{a,n}, f_e, r_o) = C \cdot \exp \left[-j \frac{4\pi}{\lambda} r \right] \cdot \exp \left[-j \cdot \frac{4\pi \cdot k_e}{c_o^2} (r - r_{ref})^2 \right] \cdot \exp \left[-j \cdot \frac{4\pi \cdot r}{c_o} \cdot f_e \right] \\ \cdot T_p \cdot \text{si} \left[\pi \cdot T_p \cdot \left(f_e + \frac{2 \cdot k_e}{c_o} (r - r_{ref}) \right) \right] \quad (\text{A. 1})$$

In Gleichung (A. 2) ist ein *Chirp*-Signal $a(t)$ gegeben, zu welchem mit dem Prinzip der stationären Phase [10] [60] [61] die Fourier-Korrespondenz in Gleichung (A. 3) berechnet werden kann. Dabei bezeichnet $\text{FT}\{\}$ die Fourier-Transformation.

$$a(t) = \text{rect} \left[\frac{t - t_o}{T_p} \right] \cdot \exp [j \cdot \pi \cdot k_e \cdot t^2] \quad (\text{A. 2})$$

$$A(f) = \text{FT}\{a(t)\} = \frac{1}{\sqrt{k_e}} \cdot \exp \left[j \cdot \frac{\pi}{4} \right] \cdot \text{rect} \left[\frac{f - k_e \cdot t_o}{k_e \cdot T_p} \right] \cdot \exp \left[-j \cdot \pi \cdot \frac{f^2}{k_e} \right] \quad (\text{A. 3})$$

Die Berechnung der Fourier-Transformation von Gleichung (A. 2) kann durch Anwendung der Gesetze der Fourier-Transformation, aber auch durch den Ansatz in Gleichung (A. 4) erfolgen.

$$A(f) = \text{FT}\{a(t)\} = T_p \cdot \text{si} [\pi \cdot T_p \cdot f] \cdot \exp [-j \cdot 2\pi \cdot f \cdot t_o] * \text{FT} \left\{ \exp [j \cdot \pi \cdot k_e \cdot t^2] \right\} \quad (\text{A. 4}) \\ = T_p \cdot \text{si} [\pi \cdot T_p \cdot f] \cdot \exp [-j \cdot 2\pi \cdot f \cdot t_o] * \left\{ \frac{1}{\sqrt{k_e}} \cdot \exp \left[j \cdot \frac{\pi}{4} \right] \cdot \exp \left[-j \cdot \pi \cdot \frac{f^2}{k_e} \right] \right\} \\ = \frac{1}{\sqrt{k_e}} \cdot \exp \left[j \cdot \frac{\pi}{4} \right] \cdot \int_{-\infty}^{\infty} \exp \left[-j \cdot \pi \cdot \frac{u^2}{k_e} \right] \cdot T_p \cdot \text{si} [\pi \cdot T_p \cdot (f - u)] \cdot \exp [-j \cdot 2\pi \cdot (f - u) \cdot t_o] du$$

Durch Gleichsetzen von (A. 3) mit (A. 4) ergibt sich für das Integral aus Gleichung (A. 4) die in Gleichung (A. 5) angegebene Identität.

$$\begin{aligned} & \int_{-\infty}^{\infty} \exp\left[-j \cdot \pi \cdot \frac{u^2}{k_e}\right] \cdot T_p \cdot \text{si}\left[\pi \cdot T_p \cdot (f - u)\right] \cdot \exp\left[j \cdot 2\pi \cdot u \cdot t_o\right] du \\ &= \text{rect}\left[\frac{f - k_e \cdot t_o}{k_e \cdot T_p}\right] \cdot \exp\left[-j \cdot \pi \cdot \frac{f^2}{k_e}\right] \cdot \exp\left[j \cdot 2\pi \cdot f \cdot t_o\right] \end{aligned} \quad (\text{A. 5})$$

Auf Grund der Symmetrie der si-Funktion kann die Identität auch mit Gleichung (A. 6) angegeben werden, wobei in der si-Funktion (f-u) durch (u-f) ersetzt wurde.

$$\begin{aligned} & \int_{-\infty}^{\infty} \exp\left[-j \cdot \pi \cdot \frac{u^2}{k_e}\right] \cdot T_p \cdot \text{si}\left[\pi \cdot T_p \cdot (u - f)\right] \cdot \exp\left[j \cdot 2\pi \cdot u \cdot t_o\right] du \\ &= \text{rect}\left[\frac{f - k_e \cdot t_o}{k_e \cdot T_p}\right] \cdot \exp\left[-j \cdot \pi \cdot \frac{f^2}{k_e}\right] \cdot \exp\left[j \cdot 2\pi \cdot f \cdot t_o\right] \end{aligned} \quad (\text{A. 6})$$

Vor der inversen Fourier-Transformation wird Gleichung (A. 1) zu Gleichung (A. 7) umgeschrieben, wobei die in der Gleichung angegebene Substitution mit $f_{e,s}$ und eine Erweiterung des Ausdrucks um zwei Exponentialterme erfolgt. Die beiden Exponentialterme heben sich gegenseitig auf.

$$\begin{aligned} s(t_{a,n}, f_e, r_o) &= C \cdot \exp\left[-j \frac{4\pi}{\lambda} r\right] \cdot \exp\left[-j \cdot \frac{4\pi \cdot k_e}{c_o^2} (r - r_{\text{ref}})^2\right] \cdot \exp\left[-j \cdot \frac{4\pi \cdot r}{c_o} \cdot f_e\right] \\ &\quad \cdot \exp\left[-j \cdot \pi \cdot \frac{f_e^2}{k_e}\right] \cdot \exp\left[+j \cdot \pi \cdot \frac{f_e^2}{k_e}\right] \\ &\quad \cdot T_p \cdot \text{si}\left[\pi \cdot T_p \cdot (f_e - f_{e,s})\right] \quad \text{mit } f_{e,s} = -\frac{2 \cdot k_e}{c_o} (r - r_{\text{ref}}) \end{aligned} \quad (\text{A. 7})$$

Nach der Rücktransformation ergibt sich das Signal im Zeitbereich zu Gleichung (A. 8). Die inverse Fourier-Transformation ist dabei mit $FT^{-1}\{\}$ bezeichnet.

$$\begin{aligned} s(t_{a,n}, t_e, r_o) &= C \cdot \exp\left[-j \frac{4\pi}{\lambda} r\right] \cdot \exp\left[-j \cdot \frac{4\pi \cdot k_e}{c_o^2} (r - r_{\text{ref}})^2\right] \cdot FT^{-1}\left\{\exp\left[+j \cdot \pi \cdot \frac{f_e^2}{k_e}\right]\right\} \\ & * \int_{-\infty}^{\infty} T_p \cdot \text{si}\left[\pi \cdot T_p \cdot (f_e - f_{e,s})\right] \cdot \exp\left[-j \cdot \pi \cdot \frac{f_e^2}{k_e}\right] \cdot \exp\left[+j \cdot 2\pi \cdot f_e \cdot \left(t_e - \frac{2 \cdot r}{c_o}\right)\right] df_e \end{aligned} \quad (\text{A. 8})$$

Das Integral in (A. 8) kann mit Hilfe der Identität von Gleichung (A. 6) gelöst werden. Dabei gelten die in Tabelle A.1 angegebenen Entsprechungen der Variablen.

Integral in Gleichung (A. 8)	Identität von Gleichung (A. 6)
$t_e - 2 \cdot r / c_0$	t_0
f_e	u
$f_{e,s} = -\frac{2 \cdot k_e}{c_0} (r - r_{ref})$	f

Tabelle A.1: Entsprechungen in den Gleichungen (A. 8) und (A. 6)

Nach dem Lösen des Integrals mit Hilfe der Identität ergibt sich das Signal im Zeitbereich zu Gleichung (A. 9).

$$\begin{aligned}
 s(t_{a,n}, t_e, r_0) &= C \cdot \exp \left[-j \frac{4\pi}{\lambda} r \right] \cdot \exp \left[-j \cdot \frac{4\pi \cdot k_e}{c_0^2} (r - r_{ref})^2 \right] \cdot \text{FT}^{-1} \left\{ \exp \left[+j \cdot \pi \cdot \frac{f_e^2}{k_e} \right] \right\} \\
 &\quad * \text{rect} \left[\frac{\left(-\frac{2 \cdot k_e}{c_0} (r - r_{ref}) \right) - k_e \cdot \left(t_e - \frac{2 \cdot r}{c_0} \right)}{k_e \cdot T_p} \right] \cdot \exp \left[-j \cdot \pi \cdot \frac{\left(-\frac{2 \cdot k_e}{c_0} (r - r_{ref}) \right)^2}{k_e} \right] \\
 &\quad \cdot \exp \left[j \cdot 2\pi \cdot \left(-\frac{2 \cdot k_e}{c_0} (r - r_{ref}) \right) \cdot \left(t_e - \frac{2 \cdot r}{c_0} \right) \right] \\
 &= C \cdot \exp \left[-j \frac{4\pi}{\lambda} r \right] \cdot \exp \left[j \cdot \frac{8\pi \cdot k_e}{c_0^2} (r - r_{ref}) \cdot r_{ref} \right] \cdot \exp \left[-j \cdot \frac{4\pi \cdot k_e}{c_0} (r - r_{ref}) \cdot t_e \right] \\
 &\quad \cdot \text{rect} \left[\frac{t_e - \frac{2 \cdot r_{ref}}{c_0}}{T_p} \right] * \text{FT}^{-1} \left\{ \exp \left[+j \cdot \pi \cdot \frac{f_e^2}{k_e} \right] \right\} \quad (A. 9)
 \end{aligned}$$

Nach der Berechnung der in Gleichung (A. 9) noch enthaltenen inversen Fourier-Transformation ergibt sich das Signal abschließend zu Gleichung (A. 10). Dabei wurde erneut das Prinzip der stationären Phase angewendet. Gleichung (A. 10) ist identisch mit Gleichung (5.11).

$$\begin{aligned}
 s(t_{a,n}, t_e, r_0) &= C \cdot \sqrt{k_e} \cdot \exp \left[j \cdot \frac{\pi}{4} \right] \cdot \left\{ \exp \left[-j \frac{4\pi}{\lambda} r \right] \cdot \exp \left[-j \cdot \frac{4\pi \cdot k_e}{c_0} (r - r_{ref}) \cdot t_e \right] \right. \\
 &\quad \left. \cdot \exp \left[j \cdot \frac{8\pi \cdot k_e}{c_0^2} r_{ref} \cdot (r - r_{ref}) \right] \cdot \text{rect} \left[\frac{t_e - \frac{2 \cdot r_{ref}}{c_0}}{T_p} \right] \right\} * \exp \left[-j \cdot \pi \cdot k_e \cdot t_e^2 \right] \quad (A. 10)
 \end{aligned}$$

ANHANG B - SZENENAUSDEHNUNG DES CHIRP SCALING-ALGORITHMUS

Bei der Ableitung des Chirp Scaling Algorithmus [1] [64] [67] werden zwei Näherungen durchgeführt [71], welche für eine Abschätzung der Grenzen der Szenenausdehnung für diesen Algorithmus benötigt werden. Die erste Näherung ist die nach dem quadratischen Glied abgebrochene Taylor-Approximation des zweidimensionalen Spektrums. Der sich daraus ergebende Phasenfehler $\Phi_{\text{err,Taylor}}(f_a, f_e)$ ist in Gleichung (B. 1) angegeben.

$$\begin{aligned} \Phi_{\text{err,Taylor}}(f_a, f_e) &= -\frac{4\pi \cdot r_o}{\lambda} \cdot \left(\sqrt{\left(\frac{f_e \cdot \lambda}{c_o} + 1 \right)^2} - \left(\frac{f_a \cdot \lambda}{2 \cdot V} \right)^2 - 1 \right) \\ &\quad + \frac{4\pi \cdot r_o}{\lambda} \cdot \left(\beta + \frac{f_e \cdot \lambda}{c_o \cdot \beta} + \frac{\beta^2 - 1}{2 \cdot \beta^3} \cdot \frac{f_e^2 \cdot \lambda^2}{c_o^2} - 1 \right) \\ &= \frac{4\pi \cdot r_o}{\lambda} \left[\sqrt{\left(\frac{f_e \cdot \lambda}{c_o} + 1 \right)^2} - \left(\frac{f_a \cdot \lambda}{2 \cdot V} \right)^2 - \left(\beta + \frac{f_e \cdot \lambda}{c_o \cdot \beta} + \frac{\beta^2 - 1}{2 \cdot \beta^3} \cdot \frac{f_e^2 \cdot \lambda^2}{c_o^2} \right) \right] \\ \text{mit } \beta &= \sqrt{1 - \left(\frac{f_a \cdot \lambda}{2 \cdot V} \right)^2} \end{aligned} \quad (\text{B. 1})$$

Die zweite Näherung besteht darin, daß die sekundäre Entfernungskompression nur für eine Referenzentfernung und nicht für alle Punktzielentfernungen r_o angepaßt durchgeführt wird. Die Referenzentfernung wird hier gleich der Entfernung des Szenenzentrums r_c gesetzt. Der aus der zweiten Näherung resultierende Phasenfehler $\Phi_{\text{err,SRC}}(f_a, f_e)$ ist durch Gleichung (B. 2) beschrieben.

$$\Phi_{\text{err,SRC}}(f_a, f_e) = 2\pi \cdot \frac{\beta^2 - 1}{\beta^3} \cdot \frac{\lambda^2}{c_o^2} \cdot (r_c - r_o) \cdot f_e^2 \quad (\text{B. 2})$$

Die Abschätzung der gültigen Szenenausdehnung kann wie folgt durchgeführt werden. Es wird ein maximal zulässiger Phasenfehler am Rand der prozessierten Bandbreite von $\pi/2$ angenommen. Für eine Entfernungsauflösung ρ_e wird laut Gleichung (2.50) eine prozessierte Bandbreite PBB_e benötigt. In die Gleichungen (B. 1) und (B. 2) wird $PBB_e/2$ als Wert für die Entfernungsfrequenz f_e eingesetzt. Der Azimutauflösung ρ_a entspricht laut Gleichung (2.49) eine prozessierte Azimut-

bandbreite PBB_a , der mit Gleichung (B. 3) eine Squintwinkelvariation Ψ_{var} durch die Antennennachführung zugeordnet werden kann.

$$\frac{PBB_a}{2} \approx \frac{2 \cdot V}{\lambda} \cdot \sin\left(\frac{\Psi_{var}}{2}\right) \quad (B. 3)$$

Die maximale Azimutfrequenz $f_{a,max}$ am Rand des prozessierten Spektrums unter Berücksichtigung von allen gültigen Zielen ergibt sich aus Gleichung (B. 4), worin θ_a den realen Öffnungswinkel in Azimut bezeichnet. Die Azimutfrequenz f_a in den Gleichungen (B. 1) und (B. 2) wird zu $f_{a,max}$ gesetzt.

$$f_{a,max} \approx \frac{2 \cdot V}{\lambda} \cdot \sin\left(\frac{\Psi_{var}}{2} + \frac{\theta_a}{2}\right) \quad (B. 4)$$

Aus Gleichung (B. 1) kann mit Gleichung (B. 4) numerisch ein maximaler Öffnungswinkel θ_a berechnet werden, für den der Phasenfehler $\Phi_{err,Taylor}$ gleich $\pi/2$ ist. Der maximale Öffnungswinkel multipliziert mit der Entfernung des Szenenzentrums gibt die maximale Szenenausdehnung in Azimut auf Grund des Phasenfehlers $\Phi_{err,Taylor}$ in Tabelle 3.4 von Kapitel 3.3.3. Die Berechnung wird für die Entfernung des Szenenzentrums durchgeführt. Es wird also in Gleichung (B. 1) r_o gleich r_c gesetzt.

Die maximale Szenenausdehnung in Entfernung geht aus Gleichung (B. 2) hervor. Dabei wird der maximale Phasenfehler $\Phi_{err,SRC}$ zu $\pi/2$ gesetzt und nach (r_c-r_o) aufgelöst.

Die Analyse der Gleichungen (B. 1) und (B. 2) hat gezeigt, daß die Szenenausdehnung in Entfernung für die maximal mögliche Szenenausdehnung in Azimut um eine Größenordnung kleiner als die maximale Szenenausdehnung in Azimut ist. Für eine realistische Abschätzung der maximalen Szenengröße soll die Azimut- und Entfernungsausdehnung in etwa gleich sein. Darum wurde in einer weiteren numerischen Berechnung schrittweise die Szenenausdehnung in Azimut verringert, was einer Verringerung des Öffnungswinkels θ_a und mit Gleichung (B. 4) einer Reduzierung der maximalen Azimutfrequenz f_a entspricht. Die Reduzierung der maximalen Azimutfrequenz in Gleichung (B. 2) führt zu einer Erhöhung der maximalen Szenenausdehnung in Entfernung. Auf diese Weise wurden die Werte für die maximale Szenenausdehnung in Azimut und Entfernung für den Phasenfehler $\Phi_{err,SRC}$ in Tabelle 3.4 in Kapitel 3.3.3 ermittelt.

ANHANG C - SZENENAUSDEHNUNG DES FREQUENZ-SKALIERUNGS-VERFAHRENS

Beim Frequenz-Skalierungs-Verfahren werden ähnliche Näherungen wie beim *Chirp Scaling*-Verfahren durchgeführt. Die mögliche Szenengröße für einen maximalen Phasenfehler von $\pi/2$ ist daher fast identisch. Wegen der bis zum kubischen Glied durchgeführten Taylor-Approximation ist aber die Beschränkung auf Grund dieser Approximation wesentlich geringer. Da aber die Beschränkung durch die Näherung der sekundären Entfernungskompression strenger ist, ist die maximale Szenengröße nur geringfügig größer als beim *Chirp Scaling*-Algorithmus. Die Taylor-Approximation bis zum kubischen Glied ist aber aufgrund der möglichen großen Szenenausdehnung in Azimut von Vorteil für eine etwaige Unterteilung der Szene in Entfernungsrichtung und die Verwendung von mehreren Referenzentfernungen für die sekundäre Entfernungskompression. Auf diese Weise kann die mögliche Szenenausdehnung beim Frequenz-Skalierungs-Verfahren wesentlich gesteigert werden.

Der Phasenfehler auf Grund der Taylor-Approximation ist in Gleichung (C. 1) und der Phasenfehler wegen der näherungsweise durchgeführten sekundären Entfernungskompression ist in Gleichung (C. 2) gegeben.

$$\begin{aligned} \Phi_{\text{err,Taylor}}(f_a, f_e) = & -\frac{4\pi \cdot r_o}{\lambda} \cdot \sqrt{\left(1 + \frac{k_e \cdot \lambda}{c_o} \cdot \left(t_e - \frac{2 \cdot r_{\text{ref}}}{c_o}\right)\right)^2 - \left(\frac{f_a \cdot \lambda}{2 \cdot V}\right)^2} \\ & + \frac{4\pi \cdot r_o}{\lambda} \cdot \left(\beta + k_e \cdot \left(t_e - \frac{2 \cdot r_{\text{ref}}}{c_o}\right) \cdot \frac{\lambda}{c_o} \cdot \frac{1}{\beta} + \frac{\beta^2 - 1}{2 \cdot \beta^3} \cdot \left[k_e \cdot \left(t_e - \frac{2 \cdot r_{\text{ref}}}{c_o}\right) \cdot \frac{\lambda}{c_o} \right]^2 \right. \\ & \left. - \frac{\beta^2 - 1}{2 \cdot \beta^5} \cdot \left[k_e \cdot \left(t_e - \frac{2 \cdot r_{\text{ref}}}{c_o}\right) \cdot \frac{\lambda}{c_o} \right]^3 \right) \end{aligned} \quad (\text{C. 1})$$

$$\begin{aligned} \Phi_{\text{err,SRC}}(f_a, f_e) = & \left[\frac{\beta^2 - 1}{\beta^3} \cdot \frac{\lambda}{c_o^2} \cdot k_e^2 \cdot \left(t_e - \frac{2 \cdot r_{\text{ref}}}{c_o}\right)^2 \right. \\ & \left. - \frac{r_o \cdot \lambda^2}{c_o^3} \cdot \frac{(\beta^2 - 1)}{\beta^5} \cdot k_e^3 \cdot \left(t_e - \frac{2 \cdot r_{\text{ref}}}{c_o}\right)^3 \right] \cdot 2\pi \cdot (r_c - r_o) \end{aligned} \quad (\text{C. 2})$$

Die Bestimmung der maximalen Szenengröße wird analog zu Anhang B durchgeführt. Für die Bestimmung kann

$$k_e \cdot \left(t_e - \frac{2 \cdot r_{\text{ref}}}{c_0} \right) = f_e \quad (\text{C. 3})$$

gesetzt werden und f_e wie im Anhang A zur halben prozessierten Bandbreite in Entfernung angenommen werden, welche aus der Entfernungsauflösung berechnet werden kann. Das Ergebnis der Bestimmung der maximalen Szenengröße für die Beispielparameter von Tabelle 3.3 ist in Kapitel 5.3.8 in Tabelle 5.9 angegeben.

LITERATUR

- [1] R. Bamler: "A Comparison of Range-Doppler and Wavenumber Domain SAR Focussing Algorithms", IEEE Trans. Geosci. and Remote Sensing, Vol. 30, No. 4, July 1992. pp. 706-713.
- [2] R. Bamler and Philip Hartl, "Synthetic aperture radar interferometry", Inverse Problems 14, 1998, pp. R1-R54.
- [3] R. Bamler and M. Eineder: "ScanSAR Processing Using Standard High Precision SAR Algorithms". IEEE Trans. Geosci. and Remote Sensing, Vol. 34, No. 1, January 1996, pp. 212-218.
- [4] R. Bamler: "Mehrdimensionale lineare Systeme", Springer Verlag, Berlin, 1989.
- [5] R. Bamler, D. Geudtner, B. Schättler, P.W. Vachon , U. Steinbrecher, J. Holzner, J. Mittermayer, H. Breit, and A. Moreira: "RADARSAT ScanSAR Interferometry", Proceedings of IGARSS '99 Hamburg, 1999.
- [6] U. Benz: "Supervised Fuzzy Analysis of Single and Multi-Channel SAR Data", Transactions on Geoscience and Remote Sensing, Vol. 37, No. 2, pp. 1023-1037, March 99.
- [7] D.P. Blecher, C. J. Baker, "High resolution processing of hybrid strip-map/spotlight mode SAR", IEE Proc. on Radar, Sonar and Navigation, Vol. 143, No. 6. December 1996.
- [8] S. Buckreuß: "Bewegungskompensation für flugzeuggetragene SAR-Systeme", Forschungsbericht 94-17 des DLR, 1994.
- [9] C. Cafforio, C. Prati, and R. Rocca, "SAR Data Focusing Using Seismic Migration Techniques", IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, Vol. 27, No. 2, March 1991, pp. 194-206.
- [10] G. Carrara, R. S. Goodman, R. M. Majewski, "Spotlight Synthetic Aperture Radar", Artech House Boston, London, 1995.
- [11] D. Carrasco Diaz, "SAR Interferometry for Digital Elevation Model Generation and Differential Applications", Ph. D. Thesis, Universitat Politecnica de Catalunya, Barcelona, March 1998.
- [12] S. R. Cloude and K. P. Papathanassiou, "Polarimetric SAR Interferometry", IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, Vol. 36, No. 5, pp. 1551-1565, 1998.
- [13] C. Cook and Marvin Bernfeld: "Radar Signals – An Introduction to Theory and Application", Academic Press Inc., New York, 1967.
- [14] J. C. Curlander and R.N. McDonough: "Synthetic Aperture Radar: Systems and Signal Processing", New York, Wiley, 1991.
- [15] A. Currie and M. Brown: "Wide-Swath SAR", IEE Proceedings-F, Vol. 139, No. 2, April 1992, pp. 122-135.
- [16] G. W. Davidson: "Some General Properties of SAR Signals and Processing Algorithms", AEÜ Int. J. Electron. Commun. 50, no. 2, 122-126, 1996.

- [17] G. W. Davidson, I. G. Cumming and M. R. Ito: "A Chirp Scaling Approach for Processing Squint Mode SAR Data", IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, Vol. 32, No.1, January 1996.
- [18] G.W. Davidson and I. Cumming: "Signal Properties of Spaceborne Squint-Mode SAR", IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing. Vol. 35, No. 3, May 1997.
- [19] G.W. Davidson: "Image Formation from Squint Mode Synthetic Aperture Radar Data", Ph. D. Thesis, University of British Columbia, Canada, September 1994.
- [20] M. Desai and W. Jenkins: "Convolution Backprojection Image Reconstruction for Spotlight Mode Synthetic Aperture Radar", IEEE Transactions on Image Processing, Vol. 1, No. 4, October 1992, pp. 505-517.
- [21] K. Eldhuset and P. Valand: "ScanSAR Processing and Simulation for ASAR using ERS-1 raw data". Int. J. Remote Sensing, Vol. 16, No. 14, 1995, pp. 2657-2674.
- [22] A. Freeman: SAR Theory I,II, CCG-Course SE 2.06 "SAR Principles and Applications". Carl-Cranz-Gesellschaft e.V., Manuscript-No 1, Oberpfaffenhofen, 1993.
- [23] F. Gatelli, A. M. Guarnieri, F. Parizzi, P. Pasquali, C. Prati and F. Roca: "The Wavenumber Shift in SAR Interferometry", IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, Vol. 32, No. 4, July 1994, pp.855-865.
- [24] A. Guarnieri and Claudio Prati: "SAR Interferometry: A Quick and Dirty Coherence Estimator for Data Browsing", IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, Vol. 35, No. 2, May 1997, pp. 660-669.
- [25] A. Guarnieri and Claudio Prati: "ScanSAR Focusing and Interferometry", IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, Vol. 34, No. 4, July 1996, pp. 1029-1038.
- [26] F. J. Harris: "On the Use of Windows for Harmonic Analysis with the Discrete Fourier Transform", Proceedings of the IEEE, Vol. 66, No.1, January 1978.
- [27] D. W. Hawkins and P. T. Gough, "An accelerated Chirp scaling algorithm for synthetic aperture imaging", Proc. of IGARSS, pp. 471-473, Singapore, 1997.
- [28] F. Henderson and A. Lewis: "Principles and Applications of Imaging Radar", Manual of Remote Sensing, Third Edition, Volume 2, John Wiley & Sons, New York, 1998, pp. 359-380.
- [29] G.T. Herman, P.C. Sabatier: "Basic Methods of Tomography and Inverse Problems", Adam Hilger, Bristol and Philadelphia, 1987.
- [30] R. Horn: "DLR Airborne SAR Project, Objectives and Status", Proceedings of the First International Airborne Remote Sensing Conference, Strasbourg, France, 11-15 September 1994.
- [31] R. Horn: "The DLR Airborne SAR Project E-SAR", Proc. of IGARSS, May 1996.
- [32] M.Y. Jin and C. Wu: "A SAR Correlation Algorithm which Accommodates Large Range Migration". IEEE Trans. on Geosci. and Remote Sensing, Vol. 22, No. 6, 1984, pp. 592-597.

-
- [33] M.Y. Jin: "High Quality Spotlight SAR Processing Algorithm Designed for LightSAR Mission", Proceedings of IGARSS '97 Singapore, 1997.
- [34] R. Lanari, P. Franceschetti, M. Tesauro and E. Sansosti: "Spotlight SAR Image Generation Based on Strip Mode Focusing Techniques", Proceedings of IGARSS '99 Hamburg.
- [35] R. Lanari: "A New Method for the Compensation of the SAR Range Cell Migration Based on the *Chirp* Z-Transform", IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, Vol. 33, No. 5, September 1995.
- [36] R. Lanari and G. Fornaro: "A Short Discussion on the Exact Compensation of the SAR Range-Dependent Range Cell Migration Effect", IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, Vol. 35, No. 6, November 1997.
- [37] F. K. Li and T. Johnson: "Ambiguities in Spaceborne Synthetic Aperture Radar Systems", IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, Vol. AES-19, No. 3 May 1983, pp. 389-396.
- [38] O. Loffeld and A. Hein: "SAR Processing by Inverse Scaled Fourier Transformation", Proc. of EUSAR Königswinter, 1996, pp. 143-146.
- [39] O. Loffeld, A. Hein and F. Schneider: "SAR Focusing: Scaled Inverse Fourier Transformation and Chirp Scaling", Proc. of IGARSS '98, Seattle, 1998.
- [40] O. Loffeld and R. Krämer: "Phase Unwrapping for SAR Interferometry - A Data Fusion Approach by Kalman Filtering", Proceedings of IGARSS '99 Hamburg, 1999.
- [41] O. Loffeld: Persönliche Aufzeichnungen, April 2000.
- [42] H. Marko: "Methoden der Systemtheorie", Springer Verlag, Berlin, 1986.
- [43] D. Mensa, S. Halevy and G. Wade: "Coherent Doppler Tomography for Microwave Imaging", Proceedings of the IEEE, Vol. 71, No. 2, February 1983, pp. 254-261.
- [44] J. Mittermayer, R. Scheiber and A. Moreira: "The Extended Chirp Scaling Algorithm for *ScanSAR* Data Processing", Proceedings of EUSAR, 26-28 März in Königswinter, 1996.
- [45] J. Mittermayer, A. Moreira, G. Davidson, R. Bamler, "SIR-C ScanSAR Processing", DLR Forschungsbericht 96-25, 1996.
- [46] J. Mittermayer, A. Moreira and R. Scheiber: "Spotlight SAR Processing using the Extended Chirp Scaling Algorithm", Proceedings of the Third International Airborne Remote Sensing Conference and Exhibition, 7-10 July in Copenhagen, Denmark, 1997, Vol. II, pp. 60-67.
- [47] J. Mittermayer, A. Moreira and R. Scheiber: "Reduction of Phase Errors Arising from the Approximations in the Chirp Scaling Algorithm", Proceedings of IGARSS '98, Seattle, 1998.
- [48] J. Mittermayer, A. Moreira and O. Loffeld: "Spotlight SAR Data Processing using the Frequency Scaling Algorithm", IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, Vol. 37, No. 5, September 1999.
- [49] R. Moore, J. Claassen and Y. Lin: "Scanning Spaceborne Synthetic Aperture Radar with Integrated Radiometer". IEEE Trans. Aerosp. Electron. Syst., Vol. 17, No. 3, 1981. pp. 410-420.

- [50] A. Moreira: "Ein Echtzeit-Subaperturverfahren zur digitalen Verarbeitung von SAR-Daten", DLR Forschungsbericht 93-22, 1993.
- [51] A. Moreira and R. Spielbauer: "Combining a Subaperture and Chirp Scaling Approach for Real-Time SAR Processing", Submitted to Special Issue of German Int. J. Electronics and Communication, 1996.
- [52] A. Moreira, R. Scheiber and J. Mittermayer: "Azimuth and Range Scaling for SAR and ScanSAR Processing", Proc. of IGARSS '96, 27-31 May, Lincoln, USA, 1996.
- [53] A. Moreira: "Real-Time Synthetic Aperture Radar Processing with a New Subaperture Approach", IEEE Trans. on Geosci. and Remote Sensing, Vol. 30, No. 4, July 1992.
- [54] A. Moreira: "Suppressing the Azimuth Ambiguities in Synthetic Aperture Radar Images", IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, Vol. 31, No. 4, July 1993.
- [55] A. Moreira, J. Mittermayer and R. Scheiber, "Extended Chirp Scaling Algorithm for Air- and Spaceborne SAR Data Processing in Stripmap and ScanSAR Imaging Modes", IEEE Trans. on Geosci. and Remote Sensing, Vol. 34, NO. 5, September 1996.
- [56] A. Moreira and Y. Huang: "Airborne SAR Processing of Highly Squinted Data Using a *Chirp* Scaling Algorithm with Integrated Motion Compensation", IEEE Trans. on Geosci. and Remote Sensing, Vol. 32, No.5, September 1994.
- [57] D. Munson, J. O'Brien and W. Jenkins: "A Tomographic Formulation of Spotlight-Mode Synthetic Aperture Radar", Proceedings of the IEEE, Vol. 71, No. 8, August 1983, pp. 917-925.
- [58] A. Oppenheim und A. Willsky: "Signale und Systeme", VCH Verlagsgesellschaft, Weinheim, 1989.
- [59] K.P. Papathanassiou, A. Reigber, R. Scheiber, R. Horn, A. Moreira, and S.R. Cloude: "Airborne Polarimetric SAR Interferometry", Proc. of IGARSS '98, Seattle.
- [60] A. Papoulis: "The Fourier Integral and its Applications", McGraw-Hill, pp.139-143, New York, 1962.
- [61] A. Papoulis: "Systems and Transforms with Applications in Optics", McGraw-Hill, pp. 203-204, New York, 1968.
- [62] C. Prati, A.M. Guarnieri and F. Rocca, "Spot Modus SAR Focusing with the ω -k Technique", Proceedings of the 1991 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS), Espoo, Finland, 3-6 June 1991, pp. 631-634.
- [63] R.K. Raney: "A New and Fundamental Fourier Transform Pair", Proc. of IGARSS 1992, pp.106-107.
- [64] R. K. Raney, Runge, H., Bamler, R. Cumming, I. and Wong, F.: "Precision SAR Processing without Interpolation for Range Cell Migration Correction". IEEE Trans. on Geosci. and Remote Sensing, Vol.32, No.4, July 1994.
- [65] Rihaczek A.W.: "Principles of high resolution radar", McGraw-Hill, 1969.

-
- [66] H. Runge: "Benefits of Antenna Yaw Steering for SAR", Proceedings of IGARSS '91, 1991, pp. 257-261.
- [67] H. Runge and R. Bamler: "A novel high precision SAR focusing algorithm based on *Chirp* scaling", IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing, Vol. 32, pp. 786-799, July 1994.
- [68] Robert A. Ryerson: "Manual of Remote Sensing – Third Edition", John Wiley & Sons, Inc., New York, 1998.
- [69] M. Sack, M. R. Ito and I.G. Cumming: "Application of Efficient Linear FM Matched Filtering Algorithms to SAR Processing". IEE Proc.-F, Vol.132, No.1, 1985. pp. 45-57.
- [70] R. Scheiber, J. Mittermayer and A. Moreira: "On the use of azimuth and range scaling for *Stripmap ScanSAR* and Spotlight SAR Data Processing", Proc. of PIERS, 8-12 July, Innsbruck, 1996.
- [71] R. Scheiber, J. Mittermayer, U. Benz, M. Brandfaß and W. Cöster: "On-board SAR Processing - Pre-selection of Processing and Data Compression Algorithms", Technical Note TN-OSP-WP13200-DLR/01, 04.02.1997.
- [72] R. Scheiber: "Single-Pass Interferometry with the E-SAR-System of DLR", Proc. of EUSAR '98 in Fridrichshafen, Germany, pp. 47-50, 1998.
- [73] R. Scheiber, A. Reigber, A. Ulbricht, K.P. Papathanassiou, R. Horn, S. Buckreuß and A. Moreira: "Overview of Interferometric Data Acquisition and Processing Modes of the Experimental Airborne SAR System of DLR", Proc. of IGARSS '99, Hamburg, 1999.
- [74] Smith, A.M.: "A New Approach to Range-Doppler SAR Processing", Int. J. Remote Sensing, vol. 12, 1991, pp. 235-251.
- [75] R. Stolt: "Migration by Fourier transform", Geophysics, Vol. 43, no. 1, 1978.
- [76] M. Schwäbisch and D. Geudtner: "Improvement of Phase and Coherence Map Quality Using Azimuth Prefiltering: Examples from ERS-1 and X-SAR", Proceedings of IGARSS'95, Florence, 1995, pp. 205-207.
- [77] K. Tomiyasu: "Conceptual Performance of a Satellite Borne, Wide Swath Synthetic Aperture Radar". IEEE Trans. Geosci. and Remote Sensing, Vol. 19, No. 2, 1981. pp. 108-116.
- [78] Ana Vidal-Pantaleoni and Miguel Ferrando: "A New Spectral Analysis Algorithm for SAR Data Processing of *ScanSAR* Data and Medium Resolution Data without Interpolation", Proc. of IGARSS '98 Seattle, 1998.
- [79] D. Wenzel, J. Mittermayer and A. Moreira: "Analysis of Two Different Implementations of the SPECAN Algorithm for Real-Time Range Compression of SAR Data", Proc. of IGARSS '99 Hamburg, 1999.
- [80] C. Wiley, "Synthetic Aperture Radars – A Paradigm for Technology Evolution", IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, Vol. AES-21, No. 3, May 1985, pp. 440-443.
- [81] C. Wu, J. C. Curlander and A. Di Cenzo: "Determination of Spacecraft Attitude using Synthetic Aperture Radar Data", Proc. of AIAA, 1980, pp. 57-60.

VERZEICHNIS WICHTIGER VARIABLEN UND SYMBOLE

Symbol	Einheit	Bedeutung
α	°	Winkel zwischen der Senkrechten zur Flugrichtung und der Verbindungslinie zwischen Antenne und Ziel
α_{start}	°	Blickwinkel auf ein Ziel am Anfang der <i>Spotlight</i> -Beleuchtung
α_{ende}	°	Blickwinkel auf ein Ziel am Ende der <i>Spotlight</i> -Beleuchtung
λ	m	Wellenlänge
θ_a	°	Azimutöffnungswinkel der realen Apertur
$\theta_{a,\text{strip}}$	°	Azimutöffnungswinkel der realen Apertur im <i>Stripmap</i> -Modus
θ_d	°	Gierwinkel
$\theta_{l,s}$	°	Lookwinkel
θ_l	°	Lookwinkel für Hauptantennenrichtung senkrecht zur Flugrichtung
θ_p	°	Nickwinkel
Ψ	°	Squintwinkel
Ψ_d	°	Beitrag des Gierwinkels zum Squintwinkel bei Nickwinkel $\theta_p=0^\circ$
Ψ_p	°	Beitrag des Nickwinkels zum Squintwinkel bei Gierwinkel $\theta_d=0^\circ$
Ψ_{start}	°	Squintwinkel am Anfang der Beleuchtung
Ψ_{ende}	°	Squintwinkel am Ende der Beleuchtung
Ψ_{strip}	°	konstanter Squintwinkel bei der <i>Stripmap</i> -Abbildung
Ψ_{spot}	°	überstrichener Squintwinkelbereich bei der <i>Spotlight</i> -Abbildung
σ_o	m ²	komplexer Rückstreuoeffizient
ρ_a	m	geometrische Auflösung in Azimut
ρ_e	m	geometrische Auflösung in Entfernung
$a(f_a)$	1	linearer <i>Chirp Scaling</i> -Faktor beim <i>Chirp Scaling</i> -Verfahren
$a_{\text{scl}}(f_a)$	1	linearer <i>Chirp Scaling</i> -Faktor beim <i>Extended Chirp Scaling</i> -Verfahren
B_a	Hz	Dopplerbandbreite
B_b	Hz	zur Darstellung aller beleuchteten Ziele notwendige Azimut-Bandbreite
B_e	Hz	Bandbreite eines ausgesendeten Radarpulses (in Entfernung)
B_g	Hz	zur Darstellung aller gültigen Ziele notwendige Azimut-Bandbreite
B_{IFOV}	Hz	Augenblicksbandbreite
B_{spot}	Hz	<i>Spotlight</i> -Bandbreite
$B_{W_{e1}}$	Hz	Signalbandbreite vor der <i>Dechirp</i> -Operation
$B_{W_{e12}}$	Hz	Signalbandbreite nach der <i>Dechirp</i> -Operation
c_o	m/s	Lichtgeschwindigkeit
d	m	Länge der realen Apertur in Azimut
dx_a	m	Punktabstand in Azimut
dx_e	m	Punktabstand in Entfernung
f_a	Hz	zur Azimutzeit t_a korrespondierende Azimutfrequenz f_a

Verzeichnis wichtiger Variablen und Symbole

f_{a1}	Hz	Azimutfrequenz am Anfang der Beleuchtung für den <i>Stripmap</i> -Modus
f_{a2}	Hz	Azimutfrequenz am Ende der Beleuchtung für den <i>Stripmap</i> -Modus
$f_{a,start}$	Hz	Augenblicksfrequenz am Anfang der Beleuchtung eines Ziels für den <i>Spotlight</i> -Modus
$f_{a,ende}$	Hz	Augenblicksfrequenz am Ende der Beleuchtung eines Ziels für den <i>Spotlight</i> -Modus
f_e	Hz	Entfernungsfrequenz f_e
f_{rs}	1	Faktor der Entfernung-Skalierung beim <i>Extended Chirp Scaling</i> -Verfahren
f_s	Hz	Abtastfrequenz in Entfernung
f_{s1}	Hz	Abtastfrequenz in Entfernung vor <i>Dechirp</i> -Operation
f_{s2}	Hz	Abtastfrequenz in Entfernung nach <i>Dechirp</i> -Operation
f_{DC}	Hz	Dopplerezentroid
f_o	Hz	Trägerfrequenz
F_{ab}	Hz	zur eindeutigen Darstellung der Szene benötigte Frequenzbandbreite in Azimut
F_v	Hz	Frequenzverschiebung zur eindeutigen Darstellung der prozessierten Bilddaten in Azimut
h	m	Höhe des Trägers über Grund
ISLR	dB	integriertes Nebenzipfelverhältnis
k_a	s^{-2}	Dopplerrate
$k_{a,scl}$	s^{-2}	Dopplerrate der Skalierungsentfernung r_{scl} bei der Azimut-Skalierung
k_e	s^{-2}	Modulationsrate in Entfernung
k_{eff}	s^{-2}	effektive Modulationsrate in Entfernung beim <i>Chirp Scaling</i> -Verfahren
k_{SRC}	s^{-2}	Anteil der effektiven Modulationsrate in Entfernung beim <i>Chirp Scaling</i> -Verfahren zur sekundären Entfernungskompression
k_{rg}	m^{-1}	<i>Wavenumber</i> -Variable in Schrägentfernung
k_x	m^{-1}	<i>Wavenumber</i> -Variable in Azimut
L	m	Länge der synthetischen Apertur
L_{max}	m	maximale Länge der synthetischen Apertur
$N_{FFT,a}$	1	Länge einer FFT in Azimut in Sample
$N_{FFT,e}$	1	Länge einer FFT in Entfernung in Sample
PBB_a	Hz	prozessierte Bandbreite in Azimut
PBB_e	Hz	prozessierte Bandbreite in Entfernung
PRF	Hz	Pulswiederholfrequenz
PSLR	dB	höchstes Nebenzipfelverhältnis
PT_a	s	prozessierte Integrationszeit in Azimut
PT_e	s	prozessierte Integrationszeit in Entfernung
$p(u, \Psi)$		Projektion einer Dämpfungs/Rückstreuverteilung
r'	m	Entfernung bezogen auf <i>Delay</i> -Entfernung
$r(t_a)$	m	Entfernung Antenne Punktziel als Funktion der Azimutzeit t_a

r_c	m	Entfernung des Szenenzentrums
Δr	m	Entfernungsausdehnung einer <i>Spotlight</i> -Szene
r_d	m	<i>Delay</i> -Entfernung, korrespondiert zur <i>Delay</i> -Zeit, welche das erste empfangene Entfernungstor bestimmt
r_o	m	kürzeste Entfernung zwischen Antenne und Punktziel
$r_{ref,cs}$	m	Referenzentfernung für <i>Chirp Scaling</i> -Operation
r_{ref}	m	Referenzentfernung für <i>Dechirp</i> in Entfernung
r_{scl}	m	Referenzentfernung für die Azimut-Skalierung
$R(f_a)$	m	Entfernungsvariation als Funktion der Azimutfrequenz
R_c	m	Abstand Antenne Szenenzentrum als Funktion von Azimut
S	m	Streifenbreite im <i>Stripmap</i> - oder <i>ScanSAR</i> -Modus
SLR	dB	Nebenzipfelverhältnis
T_B	s	Länge eines Signals mit nicht kontinuierlicher Abbildung
t_a	s	Azimutzeit
$t_{a,o}$	s	Azimutposition eines Punktziels bezogen auf das Szenenzentrum und/oder den Ursprung der Azimutzeit
t_{a1}	s	Azimutzeit am Anfang der <i>Stripmap</i> -Beleuchtung eines Ziels
t_{a2}	s	Azimutzeit am Ende der <i>Stripmap</i> -Beleuchtung eines Ziels
$t_{a,start}$	s	Azimutzeit am Anfang der <i>Spotlight</i> -Beleuchtung
$t_{a,ende}$	s	Azimutzeit am Ende der <i>Spotlight</i> -Beleuchtung
$t_{b,a}$	s	Anfang des Bereichs beleuchteter Ziele
$t_{b,e}$	s	Ende des Bereichs beleuchteter Ziele
t_c	s	Abstand zwischen der Mitte der Beleuchtung und dem Phasenzentrum eines Punktziels bei $t_a = 0$ s
$t_{c,filter}$	s	Abstand zwischen der Signalmitte und dem Phasenzentrum für eine Filterfunktion bei nicht kontinuierlicher Abbildung
t_e	s	Entfernungszeit
t_r	s	Phasenzentrum einer <i>Deramping</i> -Funktion
$t_{a,dist}$	s	Augenblicksabstand in Azimut zwischen Antenne und der senkrechten Seitensichtposition eines Punktziels unter dem Blickwinkel α
t_v	s	Signalverschiebung in Azimutzeit zur Minimierung der Erweiterung der Azimutdimension bei der Azimut-Skalierung
$t_{v,a}$	s	Beginn des gültigen Bereichs
$t_{v,e}$	s	Ende des gültigen Bereichs
t_x	s	Mitte der Beleuchtung bei Signalen mit nicht kontinuierlicher Abbildung
T_{ia}	s	maximale Beleuchtungsdauer eines Punktziels; entspricht der maximalen Länge der synthetischen Apertur L_{max}
T_{Ext}	s	benötigte Erweiterung der Azimutzeit für die Azimut-Skalierung
T_{ovr}	s	Überlappung von Subaperturen
T_p	s	Länge eines ausgesendeten Radarpulses
T_s	s	Länge der Subapertur im <i>ScanSAR</i> -Modus
T_{spot}	s	Dauer der synthetischen <i>Spotlight</i> -Apertur
V	m/s	Geschwindigkeit des Trägers