

RADAR MIT SYNTHETISCHER APERTUR

GRUNDLAGEN UND SIGNALVERARBEITUNG

Zur Erlangung der

LEHRBERECHTIGUNG (VENIA LEGENDI)

FÜR DAS FACHGEBIET

RADAR MIT SYNTHETISCHER APERTUR

der Fakultät für Elektrotechnik und Informationstechnik
an der Universität Fridericiana zu Karlsruhe (TH)

vorgelegte

HABILITATIONSSCHRIFT

von

ALBERTO MOREIRA

geboren in São José dos Campos

Brasilien

Oktober 2000

Inhaltsverzeichnis

Zusammenfassung	5
Abstract	7
1 Einführung	9
1.1 Grundprinzip	10
2 Abbildung von Punktzielen	17
2.1 Empfangenes SAR-Signal	17
2.2 Doppler(Azimet)-Modulation	19
2.2.1 Dopplerschwerpunkt und Dopplerrate	21
2.3 Impulsmodulation – Das Chirp-Signal	21
2.4 Optimalfilter (Matched Filter)	22
2.5 Impulsantwort	24
2.5.1 Geometrische Auflösung	24
2.5.2 Peak Sidelobe Ratio (<i>PSLR</i>) und Integrated Sidelobe Ratio (<i>ISLR</i>)	25
3 Abbildung verteilter Ziele	27
3.1 Statistische Eigenschaften	27
3.2 Multilook-Verarbeitung	29
3.2.1 Statistische Eigenschaften der Multilook-Verarbeitung	33
3.2.2 Effektive Anzahl von Looks	35
4 Signalverarbeitung	38
4.1 Modellierung des SAR-Systems	38
4.2 Verfahren zur SAR-Datenverarbeitung	38
4.2.1 Verarbeitung im Zeitbereich	40
4.2.2 Verarbeitung im Frequenzbereich (Range-Doppler-Algorithmus)	41
4.2.3 Zweidimensionale Verarbeitung im Frequenzbereich	44
4.2.4 Chirp Scaling-Verfahren	44
4.2.5 Andere Verfahren mit Anwendung der Fourier-Transformation	47
4.2.6 Verarbeitung ohne Fokussierung	49
4.3 Zusätzliche Verarbeitungsschritte	52
4.3.1 Bestimmung des Dopplerschwerpunktes	53
4.3.2 Bestimmung des eindeutigen PRF-Bands des Dopplerschwerpunktes	54

4.3.3	Bestimmung der Dopplerrate	56
4.3.4	Korrektur der Zielentfernungsänderung	58
4.4	Echtzeit-SAR-Verarbeitung	60
5	Spezielle SAR-Verfahren	63
5.1	ScanSAR	63
5.2	Spotlight	65
5.3	Interferometrie	68
5.3.1	Across-Track-Interferometrie	70
5.3.2	Differentielle Interferometrie	76
5.3.3	Polarimetrische SAR-Interferometrie	77
6	Generisches Verfahren zur SAR-Signalverarbeitung	79
6.1	Extended Chirp Scaling-Verfahren	79
6.2	Stripmap-Verarbeitung	80
6.2.1	Modellierung im Range-Doppler-Bereich	83
6.2.2	Chirp Scaling-Funktion	85
6.2.3	Entfernungskompression und Zielentfernungskorrektur	87
6.2.4	Azimutkompression	90
6.2.5	Verarbeitung von E-SAR-Daten mit dem ECS-Algorithmus	91
6.3	ScanSAR-Verarbeitung	92
6.3.1	SPECAN-Verfahren	93
6.3.2	Korrektur des Antennendiagramms in Azimut	95
6.3.3	Azimut-Skalierung	97
6.3.4	Deramping und Azimutkompression	99
6.4	Spotlight-Verarbeitung	100
6.4.1	Subaperturverarbeitung	102
6.4.2	Verarbeitungsablauf	104
6.4.3	Verarbeitung von Spotlight-Daten mit Dechirp-on-Receive	107
6.5	Verarbeitung von anderen SAR-Abbildungsmodi	107
7	Auflistung vorhandener SAR-Systeme	109
	Tabelle der verwendeten Formelzeichen und Abkürzungen	112
	Literaturverzeichnis	114
	Index	120

Zusammenfassung

Radar mit synthetischer Apertur (SAR) hat sich zu einer vielseitig verwendeten Technik für die Fernerkundung unseres Planeten entwickelt. Auch wenn die Erfindung des SAR-Prinzips schon mehr als 40 Jahre zurückliegt, wurde die breite Anwendung der SAR-Technik erst in den achtziger Jahren mit der Einführung der digitalen Technologie für die SAR-Signalverarbeitung ermöglicht. Heutzutage finden flugzeug- und satellitengestützte SAR-Systeme zunehmend Einsatz in einer Vielzahl von Anwendungen in der Fernerkundung. Die Entwicklung von speziellen SAR-Verfahren wie ScanSAR, Spotlight, Polarimetrie, Interferometrie, polarimetrische Interferometrie und Tomographie eröffnet neue Anwendungsgebiete und erfordert die Entwicklung von innovativen Verarbeitungsalgorithmen. Die Verwendung von Inversionsmodellen für die Abschätzung von geophysikalischen Parametern aus SAR-Daten wurde erst in den letzten 15 Jahren mit der Verbesserung der SAR-Hardware und der dazugehörigen Kalibrierungstechniken möglich. SAR-Systeme haben heute einen reifen technologischen Entwicklungsstand erreicht. Es besteht noch großer Forschungsbedarf, um operationelle und zuverlässige Verfahren zur Bildklassifizierung und Abschätzung von geophysikalischen Parametern zu etablieren.

Die vorliegende Habilitationsschrift beschreibt zuerst Grundlagen, Verfahren und Signalverarbeitungsalgorithmen von Radar mit synthetischer Apertur. Danach wird ein generisches Verfahren für die hochgenaue SAR-Verarbeitung, der sogenannte Extended Chirp Scaling-Algorithmus vorgestellt, das für die Verarbeitung von Stripmap-, ScanSAR- und Spotlight-Daten von flugzeug- und satellitengestützten SAR-Systemen geeignet ist.

Kapitel 1 beginnt mit einer Einführung in das Grundprinzip zur Bildung der synthetischen Apertur und zur Erzielung eines hohen Auflösungsvermögens in Azimut. Die SAR-Bildgenerierung besteht grundsätzlich aus einer Kompression des zurückgestreuten Signals in Entfernung, das aufgrund des ausgesendeten Chirp-Signals eine Frequenzmodulation aufweist. Danach wird das SAR-Signal in Azimutrichtung komprimiert, wobei hier die Frequenzmodulation durch die natürliche Bewegung des Trägers gegeben ist. Die Frequenzmodulation in Azimut entspricht dem Doppler-Effekt, und die Signalverarbeitung kann als die Synthese einer langen synthetischen Apertur interpretiert werden. Die kohärente Addition der Amplituden der einzelnen Antennenelemente nach einer entsprechenden Phasenkorrektur führt zu hoher Azimutauflösung. Die theoretische Grenze für die Azimutauflösung beträgt die halbe reale Antennenlänge in Azimut. Da dieser Wert von der Entfernung zum Zielgebiet unabhängig ist, kann eine hohe Azimutauflösung mit flugzeug- und satellitengestützten SAR-Systemen erreicht werden.

Nach der Darstellung der SAR-Abbildungsgeometrie wird im Kapitel 2 die Modellierung des empfangenen SAR-Signals für Punktziele einschließlich der Entfernungs- und Azimutkom-

pression mit Optimalfilter beschrieben. Die Kenngrößen der Punktzielantwort werden dabei definiert. Kapitel 3 zeigt die statistische Modellierung des SAR-Signals für verteilte Ziele bei verschiedenen Schritten der Single- und Multi-Look-Verarbeitung. Die Grundeigenschaften des Speckle-Rauschens werden dabei erläutert, und die Wirkung auf das SAR-Bild wird im Zusammenhang mit Techniken zur Reduktion des Speckle-Rauschens veranschaulicht.

Die SAR-Signalverarbeitung wird detailliert in Kapitel 4 beschrieben. Grundlegende Algorithmen sowie zusätzliche Verarbeitungsschritte, wie die Bestimmung des Dopplerschwerpunktes und der Dopplerrate, Auto-Fokus, Korrektur der Zielentfernungsänderung und Lösung der PRF-Mehrdeutigkeiten, werden erklärt. Die Vorteile der Verarbeitung im Frequenzbereich gegenüber der Verarbeitung im Zeitbereich werden dargestellt. Die Bedeutung der genauen Abschätzung der Doppler-Parameter zur hochpräzisen Bildprozessierung wird an Hand von mehreren Bildbeispielen gezeigt.

Kapitel 5 behandelt spezielle SAR-Verfahren, die spezifische Anforderungen an die Abbildung erfüllen und zunehmend zum Einsatz kommen. Der ScanSAR-Betriebsmodus eignet sich für die großflächige Abbildung mit einer niedrigen oder mittleren geometrischen Auflösung, während beim Spotlight-Modus ein hochauflösendes Bild eines wesentlich kleineren Zielgebietes erzeugt wird. Across-Track-Interferometrie bietet ein großes Potential für die Generierung von hochgenauen, digitalen Geländemodellen. Im Fall der Along-Track- und differentiellen Interferometrie lassen sich langsame Verschiebungen in radialer Richtung in der Größenordnung von Metern bis zu Millimetern messen.

Kapitel 6 stellt die detaillierte Modellierung des Extended Chirp Scaling-Algorithmus für die Verarbeitung von Stripmap-, ScanSAR- und Spotlight-SAR-Daten vor. Dieser Algorithmus weist eine generische Struktur auf und hat eine sehr gute Phasentreue, die für interferometrische und polarimetrische Anwendungen unentbehrlich ist. Keine Interpolationen sind dabei notwendig, und die Grundformulierung wird durch vier Phasenfunktionen für die Stripmap-Abbildung sowie durch sechs Phasenfunktionen für die ScanSAR- und Spotlight-Abbildung gegeben.

Ein Überblick über die wichtigsten flugzeug- und satellitengestützten SAR-Systeme wird im Kapitel 7 gegeben. Zukünftige SAR-Technologieentwicklungen verlangen eine starke Reduktion von Kosten, Gewicht und Komplexität. Neue Techniken, wie die bistatische SAR-Abbildung und „Digital Beam Forming on Receive“, werden eine entscheidende Rolle in der zukünftigen SAR-Entwicklung spielen [26], [30], [40], [61], [86], [90].

Abstract

Synthetic Aperture Radar (SAR) has become a widely used technique for the remote sensing of the earth. Even if its principle has been established for more than 40 years, the wide use of this technique started only in the eighties with the introduction of digital signal processing for the image formation process. Nowadays air- and spaceborne SAR systems show a great potential for a large scope of remote sensing applications. The demonstration of techniques like ScanSAR, Spotlight, polarimetry and interferometry as well as polarimetric interferometry and tomography had a main impact on the development of associated processing techniques and application fields. The development of inversion models for the estimation of geophysical parameters from SAR data has become possible with the improvement of the SAR hardware and calibration techniques in the last 15 years. SAR systems have in fact achieved a mature technological development, but there is still a long way to establish operational and reliable techniques for classification and estimation of geophysical parameters.

This treatise gives first a wide overview of the principles, techniques and signal processing algorithms for Synthetic Aperture Radar. The second part presents a generic approach for high precision SAR processing using the Extended Chirp Scaling algorithm. This algorithm is suitable for the processing of air- and spaceborne SAR data in Stripmap, ScanSAR and Spotlight imaging modes.

Chapter 1 starts with an introduction explaining the basic principle for building a synthetic aperture and achieving a high azimuth resolution. The SAR image generation consists basically of first compressing the backscattered signal in range direction due to the use of a frequency modulated chirp signal for transmission. Then the SAR signal is compressed in the azimuth direction, whereby the frequency modulation is given by the natural movement of the platform. The azimuth modulation is caused by the Doppler effect and its processing can be interpreted as the formation of a long synthetic aperture in the azimuth direction. The coherent addition of the signals of each element of the synthetic aperture after a proper phase correction leads to a high azimuth resolution. The theoretical value for the azimuth resolution equals to the half of the azimuth antenna length. Since this value is independent on the range distance, a high azimuth resolution can be achieved with air- and spaceborne SAR systems.

After showing the basic SAR imaging geometry, the signal modeling for point targets is described in chapter 2 including the range and azimuth compression using matched filtering. The basic properties of the impulse response function are described as well. Chapter 3 shows the statistic modeling for distributed targets in the different processing stages considering single- and multilook-processing. The basic properties of the speckle noise are explained and its effect

in the SAR image are illustrated in connection with techniques like multilook processing to reduce the speckle.

The SAR signal processing is described in detail in chapter 4. The commonly used algorithms as well as the additional processing steps like Doppler centroid and rate estimation, auto-focus, correction of the range cell migration and PRF ambiguity resolving are described. The advantages of frequency domain processing techniques over time domain techniques are shown. The importance of the precise estimation of the Doppler parameters for accurate image focusing are illustrated with several image examples.

Chapter 5 describes special SAR imaging modes which fulfill specific imaging requirements and are increasingly being used. The ScanSAR imaging mode is suitable for the imaging of large areas with low to medium geometric resolution, while the Spotlight mode allows the generation of a very high resolution image of a much smaller target area. Across-track interferometry has a great potential for the generation of high precision digital elevation models. In the case of along-track and differential interferometry, slowly varying displacements in the order of meters up to millimeters can be measured in line-of-sight direction.

Chapter 6 shows the detailed modeling of the Extended Chirp Scaling Algorithm for high precision processing of Stripmap, ScanSAR and Spotlight SAR data. This algorithm has a generic structure and has an excellent phase preservation which is mandatory for polarimetric and interferometric applications. It requires no interpolations for the entire processing and its basic formulation can be described by 4 phase functions for the stripmap case and 6 phase functions for the ScanSAR and Spotlight case.

An overview of past, present and future SAR systems is given in chapter 7. The future technological development of SAR systems requires a strong reduction of the costs, weight and complexity. New techniques like bistatic SAR imaging and digital beam forming on receive will play an important role in the future SAR development [26], [30], [41], [61], [86], [90].

1 Einführung

Abbildende Radarsysteme ermöglichen eine zweidimensionale Abbildung des überflogenen Gebiets. Aus der Rückstreuung des Radarsignals kann man wichtige Informationen über Rauigkeit, geometrische Struktur und elektrische Eigenschaften der Oberfläche und der Bereiche unmittelbar unter der Oberfläche schließen. Die Eindringtiefe der elektromagnetischen Wellen ist von der Wellenlänge und von den elektrischen Eigenschaften des abgebildeten Gebiets abhängig.

In Ergänzung zu den passiven Sensoren liefern abbildende Radarsysteme zusätzliche, teilweise komplementäre Informationen, so daß man ein vielseitiges Sensorkpaket aufbauen kann. Im Gegensatz zu passiven Sensoren hat ein Abbildungsradarsystem seine eigene Beleuchtungsquelle, so daß die Abbildung unabhängig vom Tageslicht erfolgen kann. Darüber hinaus wählt man in der Regel Sendefrequenzen mit einer Wellenlänge größer als 1 cm, wodurch sich eine weitgehende Allwettertauglichkeit ergibt.

Ein Seitensichtradar mit realer Apertur (SLAR: **S**ide **L**ooking **A**irborne **R**adar) wird bei konstanter Fluggeschwindigkeit betrieben. Die Antennenachse steht dabei senkrecht zum Geschwindigkeitsvektor (siehe Abb. 1.1). Die orthogonalen Bildkoordinaten sind Entfernung (engl.: range) und Azimut (Flugrichtung). Die Entfernungsauflösung wird durch die Bandbreite der gesendeten Pulse bestimmt. Die Azimutauflösung wird durch die einsetzbare Antennenlänge auf der Plattform¹ begrenzt und wird mit zunehmender Entfernung schlechter. SLAR-Systeme sind deswegen für große Flughöhe bei sehr vielen Anwendungen nicht mehr nutzbar. Betrachtet man z. B. ein SLAR-System auf einem Satelliten (Bahnhöhe 800 km, Azimutantennenlänge 15 m, C-Band), so beträgt die Azimutauflösung nur etwa 3 km.

Das Abbildungsradarsystem mit synthetischer Apertur (SAR: **S**ynthetic **A**perture **R**adar), das 1951 von *Carl Wiley* zum Patent angemeldet wurde, ermöglicht eine wesentliche Verbesserung der geometrischen Auflösung in Azimutrichtung. SAR-Systeme sind in vielen Bereichen sehr nützlich, wie z. B. in Ozeanographie, Land- und Forstwirtschaft, Geologie, Vulkanologie, Eisbeobachtung, Erkennung von Meeresverschmutzung sowie in sicherheitsrelevanten Aufgaben.

SAR-Systeme besitzen eine Antenne mit einem breiten Richtdiagramm in Azimut. Durch die Vorwärtsbewegung der Plattform und die kohärente Verarbeitung des Rückstreusignals erzeugt man eine lange, synthetische Apertur. Die Länge der synthetischen Apertur ergibt sich aus der Beleuchtungsdauer eines Zieles, welche durch das Richtdiagramm der realen Apertur und die Entfernung zum Ziel bestimmt wird. Da die Länge der synthetischen Apertur sich proportional zur Entfernung vergrößert, kann man schließlich eine entfernungsunabhängige Azimutauf-

¹ In diesem Zusammenhang ist die Plattform ein Träger (z. B. Flugzeug, Satellit), in den das SAR-System eingebaut wird.

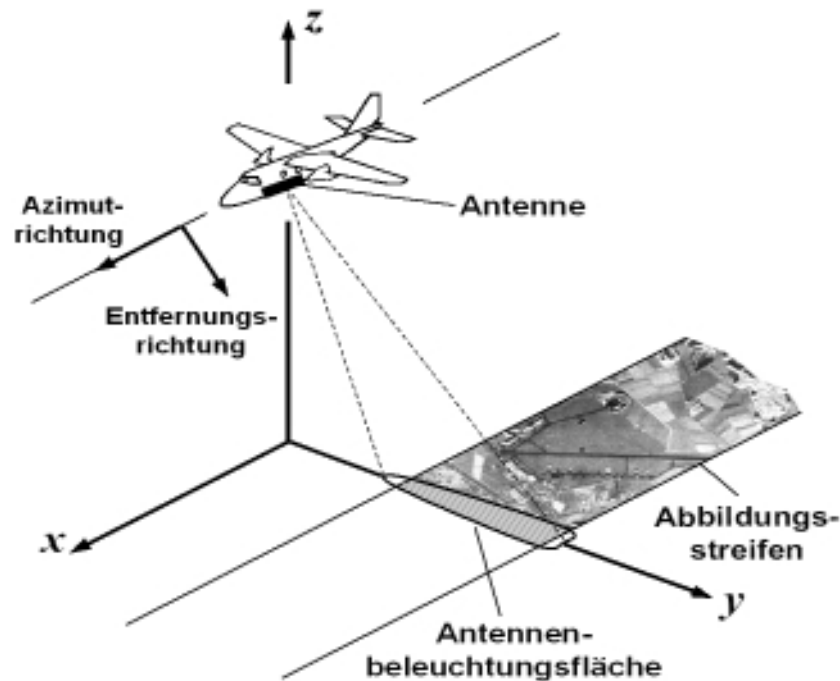


Abb. 1.1: Geometrie eines Seitensichtradars im Streifenmodus. Die Plattform fliegt in x -Richtung und bildet einen Streifen ab, der sich seitlich vom Flugweg befindet.

lösung erzielen.

Abb. 1.2 zeigt ein Bildbeispiel, aufgenommen mit dem experimentellen SAR-System des DLR, E-SAR. Dargestellt ist ein polarimetrisches SAR-Bild im L-Band der Landebahn von Oberpfaffenhofen bei München. Durch Falschfarbenkodierung sind die unterschiedlichen Rückstreuereigenschaften der verschiedenen Polarisierungen deutlicher dargestellt. Die Rückstreuung der Kreuzpolarisationen (HV und VH) ist wegen der symmetrischen Eigenschaften der Polarisationsmatrix gemittelt und um 6 dB verstärkt. Damit ist ein Amplitudenausgleich mit den anderen Polarisierungen bei der Falschfarbendarstellung gegeben. Deutlich zu sehen sind der Waldbereich in Grün, der Stadtbereich in Rot und Weiß und die diversen agrarwirtschaftlich genutzten Felder. Die unterschiedlichen Farben zeigen, daß jede Polarisation andere Informationen liefert. Nur in den weißen Arealen ist der Informationsgehalt der drei betrachteten Polarisierungen gleich.

1.1 Grundprinzip

Das Abbildungsradar mit synthetischer Apertur führt eine zweidimensionale Abbildung des vom Radar beleuchteten Gebiets durch [13], [16], [82]. Eine Dimension in Flugrichtung wird mit Azimut, die andere Dimension mit Entfernung bezeichnet. Die Auflösung in Entfernungsrichtung ist durch Bandbreite bzw. Pulslänge des Sendesignals bestimmt. Die Auflösung in Flugrichtung ist durch die Länge der synthetischen Apertur gegeben.

Die Winkelauflösung Θ_a in Azimut (hier als die 3-dB-Breite der Antennenhauptkeule definiert)



Abb. 1.2: Polarimetrisches SAR-Bild in L-Band mit Falschfarbendarstellung. VV-Polarisation rot, HH-Polarisation blau und Kreuzpolarisationen grün. Die nominalen Sensor- und Verarbeitungsparameter bei dieser Aufnahme sind: Flughöhe: 3830 m, Fluggeschwindigkeit: 81 m/s, Auflösung: $3 \text{ m} \times 3 \text{ m}$, Anzahl der Looks: 4. Die Bilddimensionen betragen 3410 m in Azimut \times 4720 m in Entfernung.

einer realen Antenne mit der Länge d_a bei einer Wellenlänge λ ergibt sich zu

$$\Theta_a = \frac{\lambda}{d_a} . \quad (1.1)$$

Die Winkelauflösung kann nur durch eine Verringerung der Wellenlänge oder durch eine Vergrößerung der Antennenlänge verbessert werden. Durch Bildung der synthetischen Apertur läßt sich aber die Winkelauflösung wesentlich verbessern. Die Winkelauflösung θ_{sa} der synthetischen Apertur kann man bis auf einen Faktor 2 wie bei der realen Apertur darstellen:

$$\Theta_{sa} = \frac{\lambda}{2 \cdot L_{sa}} . \quad (1.2)$$

L_{sa} ist die Länge der synthetischen Apertur. Die synthetische Apertur entsteht erst nach der Aufnahmezeit, nachdem mehrere Radarimpulse gesendet und die einzelnen Antennenelemente künstlich erzeugt worden sind.

Der Faktor 2 in Gl. 1.2 resultiert aus der unterschiedlichen Ansteuerung der Antennenelemente. Im Fall einer realen Antenne wird das Radarsignal von allen Elementen gleichzeitig abgestrahlt. Der Phasengradient des Empfangssignals der realen Antenne entsteht damit nur auf dem Signalarückweg (vom Ziel zum Radar). Bei der synthetischen Apertur senden die einzelnen Elemente getrennt und nacheinander, so daß der Hinweg (vom Radar zum Ziel) des Sendesignals

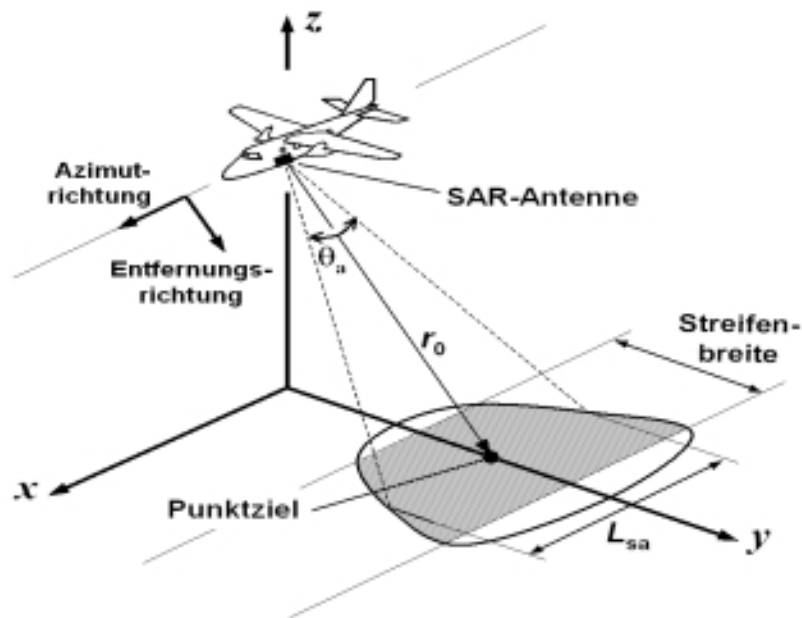


Abb. 1.3: Bestimmung der SAR-Azimutaufösung im Streifenmodus. Das Punktziel wird von der Radarantenne beleuchtet, die eine Winkelaufösung Θ_a in Azimutrichtung (Flugrichtung) hat. L_{sa} entspricht der Länge der synthetischen Apertur und ist die Strecke am Boden, die von der Antenne beleuchtet wird.

ebenso einget wie der gleich lange Rückweg (vom Ziel zum Radar). Die Phasenunterschiede zwischen Sende- und Empfangssignalen sind deswegen im Fall der synthetischen Apertur gerade doppelt so groß wie bei der realen Antenne.

Die maximale Länge L_{sa} der synthetischen Apertur entspricht der Länge, die von der realen Antenne in Azimutrichtung beleuchtet wird (siehe Abb. 1.3). Sie ist gleich dem Produkt aus Winkelaufösung der realen Apertur Θ_a und Entfernung r_0 :

$$L_{sa} = \Theta_a \cdot r_0 = \frac{\lambda}{d_a} \cdot r_0. \quad (1.3)$$

Die maximale Winkelaufösung der synthetischen Apertur erhält man mit Gl. 1.2 und Gl. 1.3:

$$\Theta_{sa} = \frac{d_a}{2 \cdot r_0}. \quad (1.4)$$

Die maximale Auflösung der synthetischen Apertur δ_{sa} ist das Produkt der maximalen Winkelaufösung mit der Entfernung r_0 und ergibt sich zu

$$\delta_{sa} = \frac{d_a}{2}. \quad (1.5)$$

Die maximale Auflösung der synthetischen Apertur δ_{sa} entspricht der maximalen Auflösung in Azimutrichtung δ_a und ist gleich der halben Antennenlänge in Azimut. Sie ist von der Entfernung unabhängig.

Abb. 1.4 veranschaulicht schematisch die Bildung einer synthetischen Apertur mit anschließender Bildrekonstruktion¹. Beim Vorbeifliegen sendet der SAR-Sensor periodisch mehrere Pulse

¹ Die SAR-Bildrekonstruktion nennt man SAR-Verarbeitung. Das Rechnersystem zur SAR-Verarbeitung einschließlich der

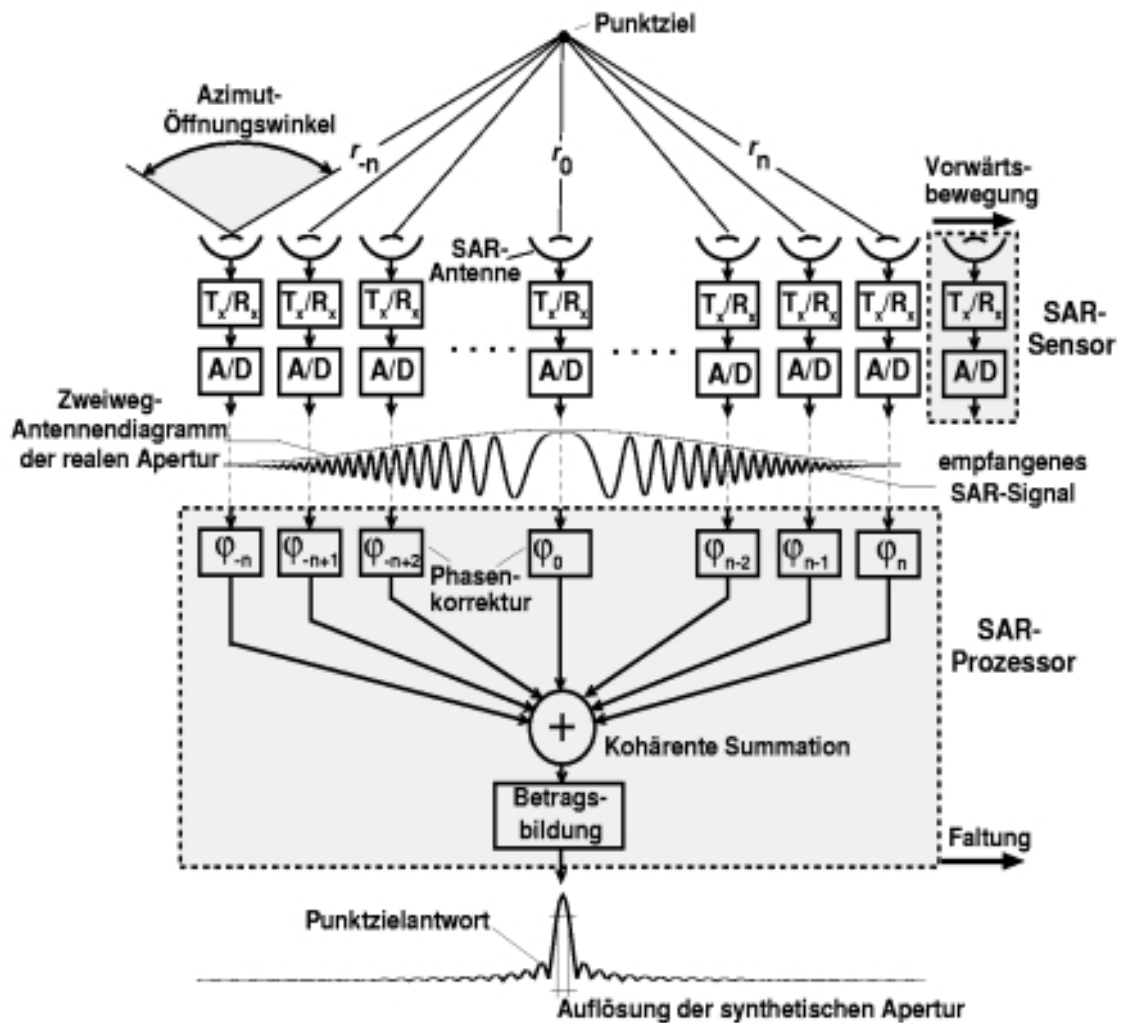


Abb. 1.4: Schematische Darstellung der SAR-Abbildung und -Verarbeitung eines Punktziels. Während des Vorbeiflugs wird die synthetische Antenne gebildet. Die hohe Auflösung erzielt man erst nach der SAR-Verarbeitung.

aus, die von den beleuchteten Zielen unterschiedlich zurückgestreut, wieder empfangen und abgespeichert werden. In der SAR-Verarbeitung korrigiert man den Phasenunterschied entsprechend dem Zweiweg-Entfernungsunterschied zwischen SAR-Antenne und Punktziel. Die nach der Verarbeitung resultierende Impulsantwort eines Punktziels ist um ein Vielfaches höher aufgelöst als die Impulsantwort, welche man mit einer realen Apertur erhalten würde.

Der Unterschied zwischen realer und synthetischer Apertur wird in Abb. 1.4 verdeutlicht. Die reale Apertur ist durch das Zweiweg-Antennendiagramm der verwendeten Antenne im SAR-Sensor bestimmt. Der Betrag des empfangenen Amplitudenverlaufs vor der SAR-Verarbeitung entspricht dem Antennendiagramm der realen Apertur. Die synthetische Apertur besteht aus der Zusammensetzung mehrerer Antennenelemente, die durch das periodische Senden und Empfangen während des Vorbeiflugs des SAR-Sensors künstlich nacheinander gebildet werden. Nach der Verarbeitung erhält man eine hochauflösende Impulsantwort, wobei die Auflösung

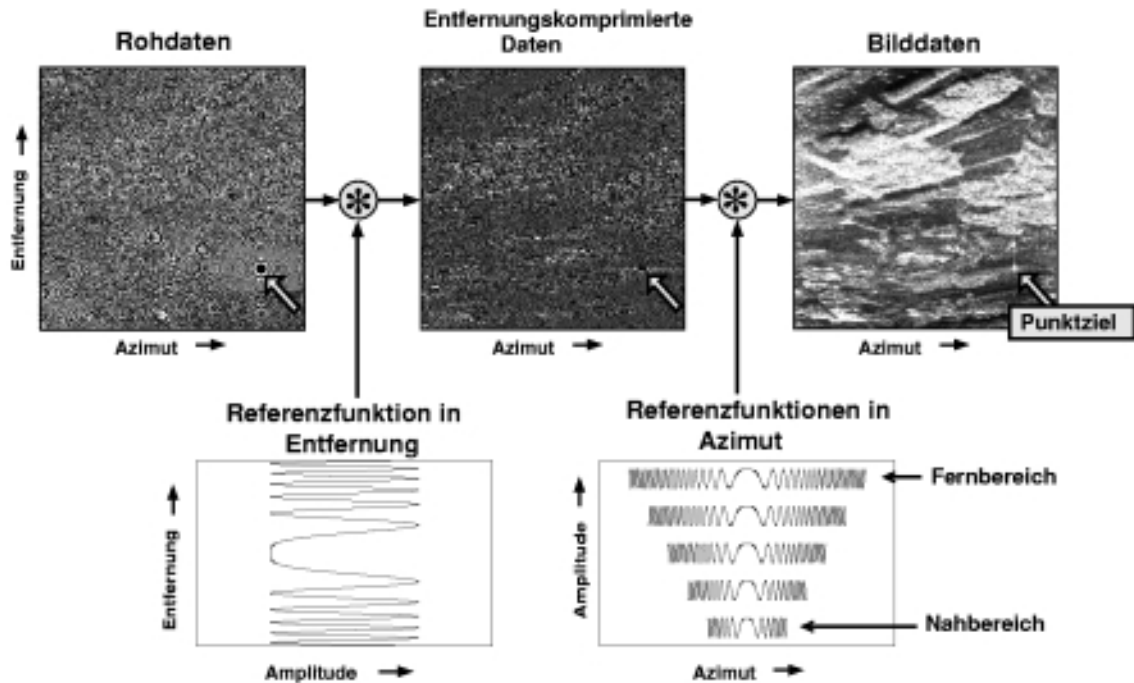


Abb. 1.5: Vereinfachte Darstellung des Signalablaufs zur Generierung eines SAR-Bildes. Die starken Rückstreuungen von Punktzielen sind als schwarze und weiße Ringe (*Fresnel-Zonen*) bei den Rohdaten zu sehen. Die Referenzfunktion in Azimut wird für jeden Entfernungsbereich aktualisiert.

von der Anzahl der aufsummierten Antennenelemente abhängt. Die maximal erzielbare Auflösung ist dabei die halbe Antennenlänge in Azimut (vgl. Gl. 1.5).

Zur Generierung eines SAR-Bildes ist grundsätzlich eine zweidimensionale Verarbeitung des empfangenen Signals notwendig. Abb. 1.5 zeigt eine vereinfachte Darstellung der Verarbeitungsschritte zur SAR-Bildgenerierung. In den meisten Fällen kann diese Verarbeitung in zwei eindimensionale Schritte aufgeteilt werden:

- **Verarbeitung in Entfernungsrichtung**

Meist erfolgt diese Verarbeitung gemäß der Theorie des Optimalfilters mittels Impulskompression, wobei eine Faltung des empfangenen Signals mit der konjugiert komplexen, zeitinvertierten Replik des gesendeten, modulierten Impulses durchgeführt wird. Diese Replik wird als Entfernungreferenzfunktion¹ bezeichnet.

- **Verarbeitung in Azimutrichtung zur Bildung der synthetischen Apertur**

Diesen Verarbeitungsschritt kann man ebenfalls als eine Impulskompression betrachten, wobei die Kodierung des Rückstreusignals durch die natürliche Bewegung der Plattform und den damit verbundenen Dopplereffekt verursacht wird. Die Referenzfunktion wird in diesem Fall aus der Geometrie der Abbildung, den Bewegungsparametern der Plattform und der Wellenlänge des gesendeten Impulses berechnet. Für jede Entfernung ergibt sich somit eine andere Referenzfunktion in Azimut (siehe Abb. 1.5). Für die SAR-Verarbeitung in Azimutrichtung benötigt man allerdings weitere Prozessierungsschritte (z. B. Korrektur

¹ Bei SAR-Systemen benutzt man als Referenzfunktion das von einem Punktziel erwartete Signal.

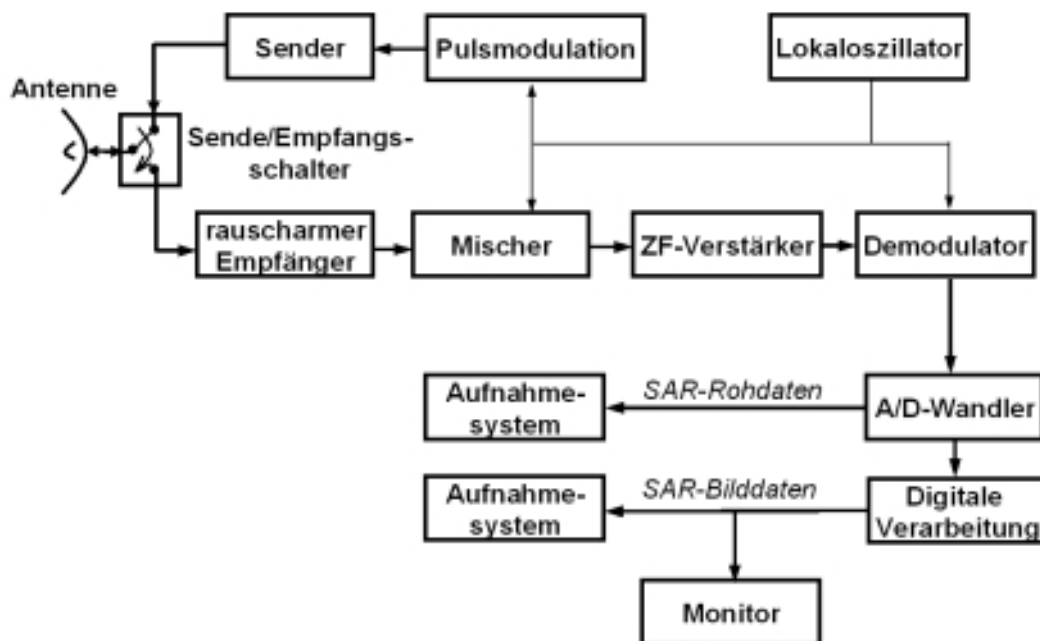


Abb. 1.6: Blockdiagramm eines SAR-Systems. Dieses System arbeitet im Pulsbetrieb. Das Rückstreusignal wird empfangen, heruntergemischt, digitalisiert, digital verarbeitet und gespeichert.

der Zielentfernungsänderung, Bestimmung des Dopplerschwerpunkts und automatische Fokussierung), um eine hohe Bildqualität zu erreichen.

Den hier vorgestellte Abbildungsmodus nennt man auch den Streifenmodus eines SAR (engl.: stripmap mode), weil damit kontinuierlich ein Streifen parallel zur Flugrichtung abgebildet wird. Daneben sind noch andere Abbildungsmodi möglich, mit denen man z. B. die Streifenbreite vergrößern oder die Auflösung verbessern kann. Derzeit haben die größte Bedeutung folgende SAR-Abbildungsmodi:

- **Streifenmodus (engl.: Stripmap)**

Es wird ein Gebiet rechts oder links der Plattform abgebildet. Die Antenne wird häufig senkrecht zur Flugrichtung gerichtet. Das Ergebnis ist ein Bildstreifen, dessen Breite dem abgetasteten Entfernungsbereich und dessen Länge dem überflogenen Meßweg entspricht. Die maximal erzielbare Auflösung in Flugrichtung ist durch die Aperturlänge in Flugrichtung gegeben (vgl. Gl. 1.3). Abb. 1.3 gibt die Beleuchtungsgeometrie des Streifenmodus wieder.

- **ScanSAR-Modus**

Dieser SAR-Modus verwendet eine in Elevation elektronisch schwenkbare Antenne, um die abzubildende Streifenbreite zu erhöhen. Ein sehr breiter Gesamtstreifen wird durch die Zusammenfassung mehrerer Teilstreifen gebildet. Der ScanSAR-Modus wird in Kapitel 5.1 genauer beschrieben.

- **Spotlight-Modus**

Mit diesem Verfahren wird die von der Aperturlänge L_{sa} beschränkte Auflösung in Flugrichtung erhöht. Dies wird durch die Nachführung des Antennendiagramms in Azimut realisiert, was eine größere Integrationszeit bzw. synthetische Apertur bedeutet [8]. Kapitel 5.2 beschreibt den Spotlight-Modus zur hochauflösenden Abbildung näher.

- **Inverser SAR-Modus (ISAR)**

Das Verfahren verwendet ein feststehendes Radargerät, das ein bewegtes Ziel beobachtet. Die Verbesserung der Azimutauflösung resultiert grundsätzlich aus der Zielbewegung [1].

Der Streifenmodus ist der meistbenutzte SAR-Modus. Häufig benutzt man ein kohärentes Pulsradar, dessen Blockdiagramm in Abb. 1.6 dargestellt ist. Ein Pulsradar benötigt grundsätzlich einen Sender, der das Sendesignal mit einer bestimmten Pulsfrequenz (PRF) erzeugt, und einen Sende/Empfangsschalter, falls dieselbe Antenne für Senden und Empfangen benutzt wird. Der Empfangszweig besteht aus einem rauscharmen Verstärker, der das Rückstreusignal verstärkt, einem Mischer, der die Empfangsfrequenz in eine Zwischenfrequenz (ZF) umsetzt, und einem Demodulator, der das Signal in der ZF-Ebene z. B. in Quadratur demoduliert. Das digitale Subsystem schließt eine Analog/Digital-Umsetzung mit der dazugehörigen digitalen Echtzeitverarbeitung und ein Aufnahmesystem mit ein. Ein Lokaloszillator erzeugt kohärent die intern benötigten Frequenzen und Takte. Die Kohärenz ist dabei unabdingbar, da zum Aufbau der synthetischen Apertur die Phase des Empfangssignals ausgewertet wird.

2 Abbildung von Punktzielen

Die Impulsantwort eines SAR-Systems einschließlich der SAR-Verarbeitung wird üblicherweise als Punktzielantwort bezeichnet. Aus der Punktzielantwort lassen sich wichtige Informationen über die Leistungsfähigkeit des SAR-Systems ableiten, wie z. B. geometrische Auflösung und Nebenzipfelunterdrückung. In diesem Kapitel wird die analytische Modellierung des empfangenen Signals, der Signalverarbeitung im Zeitbereich (Optimalfilter) und der Punktzielantwort behandelt. Abschließend werden die Qualitätseigenschaften der Punktzielantwort definiert.

2.1 Empfangenes SAR-Signal

Die Abbildungsgeometrie von Abb. 2.1 wird zur Modellierung des empfangenen Signals eines SAR-Systems benutzt. Das Radarsystem auf der Plattform sendet periodisch Impulse, die von einem einzigen abgebildeten Punktziel in der Position (x_0, r_0) mit der komplexen Reflektivität γ zurückgestreut werden. Es wird gezeigt, daß das empfangene Signal als eine

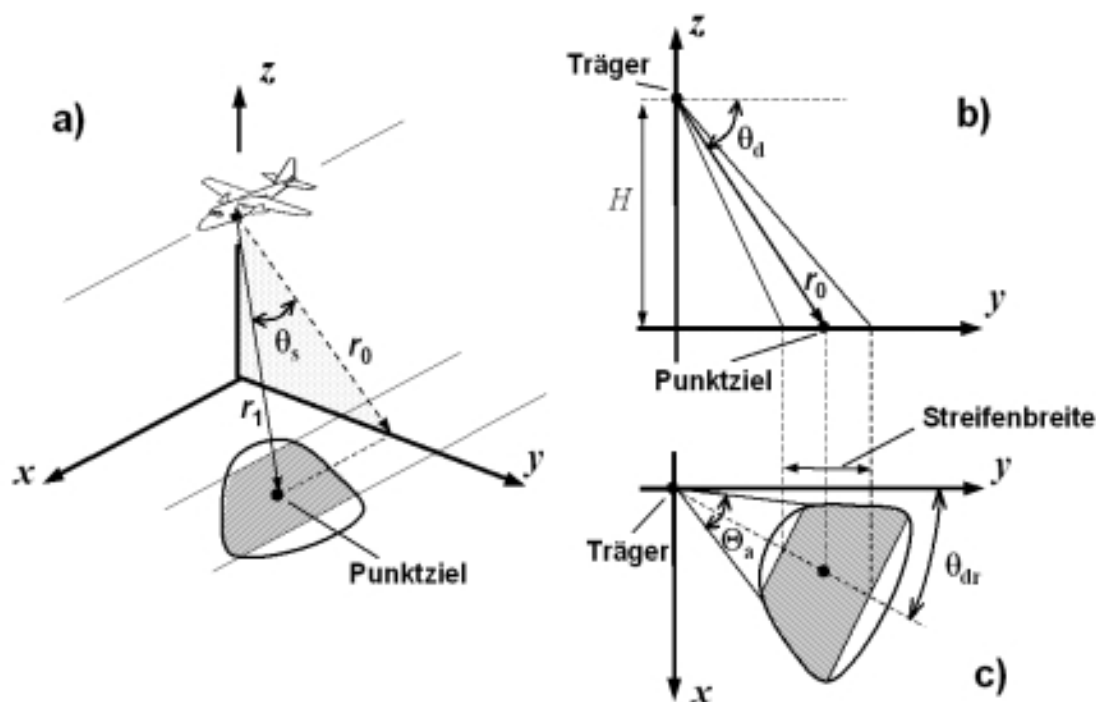


Abb. 2.1: Abbildungsgeometrie mit Berücksichtigung des Squintwinkels (Schielwinkels) θ_s : a) Perspektive, b) Seitensicht und c) Draufsicht. θ_{dr} ist die Projektion des Squintwinkels am Boden und wird als Driftwinkel bezeichnet. θ_d ist der Depressionswinkel.

zweidimensionale Faltung der komplexen Reflektivität mit einer ebenfalls zweidimensionalen Modulationsfunktion dargestellt werden kann [42], [88]. Für die gesendeten Radarimpulse $q_n(t)$ gilt

$$q_n(t) = a_e(t - nT) \cdot \cos[2\pi f_s \cdot (t - nT) + \varphi_e(t - nT)], \quad (2.1)$$

wobei $a_e(t)$ die Hüllkurve des gesendeten Impulses, f_s die Sendefrequenz, $\varphi_e(t)$ die Phasenmodulation des gesendeten Impulses, T die Pulsperiodendauer und n die Pulsnummer ist. Die vom Radarsystem beleuchtete Streifenbreite am Boden definiert man durch den Antennenöffnungswinkel in Entfernungsrichtung, den Depressionswinkel und die Höhe des Trägers (siehe Abb. 2.1). Nach dem Senden werden die elektromagnetischen Wellen von Zielobjekten zurückgestreut und von der Radarantenne empfangen. Die Zeitverzögerung zwischen Senden und Empfangen ist

$$t_d = \frac{2 \cdot r(nT)}{c_0}, \quad (2.2)$$

wobei $r(nT)$ die Entfernung der Plattform zum Ziel ist. Durch das breite Richtdiagramm der SAR-Antenne in Azimut wird jedes Zielobjekt innerhalb der abgebildeten Streifenbreite von mehreren Sendeimpulsen beleuchtet. Nach dem Mischen des empfangenen Signals in die Zwischenfrequenzebene und der Demodulation mit Quadraturkanälen bekommt man das empfangene Signal im Basisband. Die zweidimensionale Formulierung dieses Signals beinhaltet die Impulsmodulation s_e in Entfernung und auch die Dopplermodulation s_a in Azimut. Die zweidimensionale Darstellung des empfangenen Signals läßt sich folgendermaßen beschreiben:

$$s(x, r) = \gamma \cdot s_a(x, r) * s_e(x, r) \quad (2.3a)$$

mit

$$s_e(x, r) = a_e(r) \cdot e^{j \cdot \varphi_e(r)} \cdot \delta(x) \quad (2.3b)$$

und

$$s_a(x, r) = g_a(x) \cdot e^{-j \cdot 4 \cdot \pi \cdot r_1(x) / \lambda} \cdot \delta(r - r_1(x)). \quad (2.3c)$$

γ ist dabei die komplexe Reflektivität¹, δ die Dirac-Funktion, $*$ die zweidimensionale Faltung, g_a das Zweiweg-Antennendiagramm in Azimutrichtung und r_1 die Zielentfernungsänderung. Die Gln. (2.3a) bis (2.3c) stellen die Basis für die Modellierung des empfangenen Radarsignals dar. Die Funktion $s_e(x, r)$ ist gleich dem gesendeten modulierten Impuls ohne die Trägerfrequenz. Diese Modulation ist von der Azimutposition x unabhängig und entspricht einer Modulation der empfangenen Radardaten in Entfernungsrichtung. Die Funktion $s_a(x, r)$ entspricht einer Modulation der empfangenen Radardaten in Azimutrichtung. Die Azimutmodulation ist auf die Entfernungsänderung zwischen Plattform und Ziel während der Zielbeleuchtungszeit zurückzuführen. Der geometrische Ort dieser Modulation ist zweidimensional und wird von der Dirac-Funktion $\delta(r - r_1(x))$ in Gl. 2.3c bestimmt. Die

¹ Die Reflektivität γ ist eine komplexe Funktion, welche die Rückstreuungseigenschaften des Zieles beschreibt. Die Intensitätsdaten des prozessierten SAR-Bildes entsprechen den Werten des Rückstreukoeffizienten σ_0 .

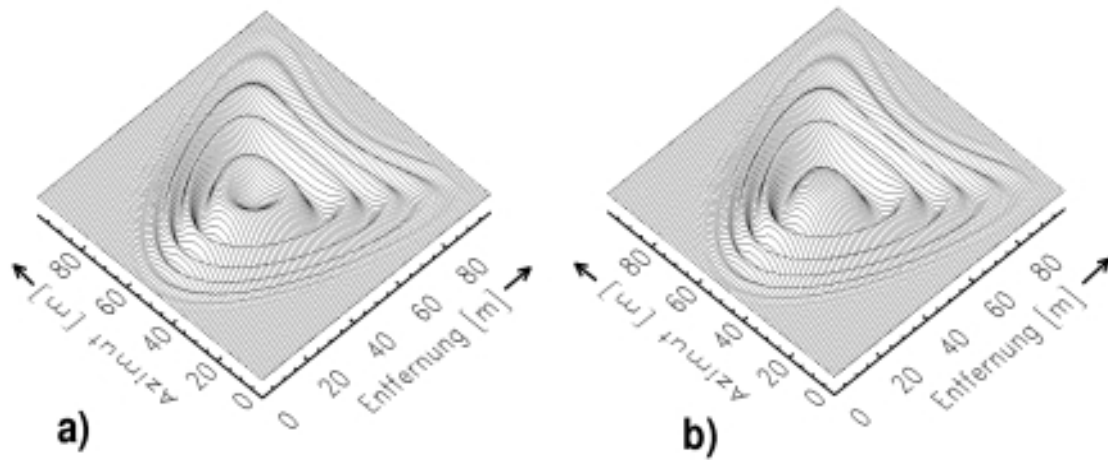


Abb. 2.2: Empfangenes SAR-Signal für ein Punktziel: a) Inphasekomponente und b) Quadraturkomponente

Zielentfernungsänderung (engl.: range migration) entspricht der Wanderung dieser Funktion in Entfernungsrichtung während der Zielbeleuchtung.

Abb. 2.2 zeigt eine zweidimensionale Darstellung des empfangenen Signals $s(x, r)$, wobei die Inphase- und Quadraturkomponenten dargestellt sind (s_i und s_q). Die Darstellung von Abb. 2.2 für $\gamma = 1$ entspricht der SAR-Systemantwort für ein einzelnes Punktziel. Eine natürliche Abbildungsszene besteht aus vielen Streuzentren, wobei jeder Position (x, r) eine komplexe Reflektivität $\gamma(x, r)$ zugeordnet ist. Das empfangene Signal $s(x, r)$ kann dann als eine Faltung jedes Streuzentrums mit der SAR-Systemantwort modelliert werden. Das empfangene SAR-Signal entsteht aus einer zweidimensionalen Faltung der Gelände-Rückstreuung mit der SAR-Systemantwort.

2.2 Doppler(Azimut)-Modulation

Für eine gerade Flugbahn mit konstanter Geschwindigkeit v und für ein nichtbewegtes Punktziel erhält man (siehe Abb. 2.1)

$$r_1(x) = \sqrt{r_0^2 + x^2} . \quad (2.4)$$

Dabei ist r_1 die Entfernungsvariation (Zielentfernungsänderung) in Abhängigkeit von der Azimutposition x , und r_0 ist die minimale Entfernung zwischen Ziel und Plattform. Die Entwicklung von Gl. 2.4 in eine *Taylor*-Reihe unter der Annahme eines Azimutöffnungswinkels $\Theta_a \ll 20^\circ$ führt zu

$$r_1(x) \approx r_0 + \frac{x^2}{2 \cdot r_0} . \quad (2.5)$$

Mit der Bestimmung des Entfernungsverlaufs kann man die Phasenmodulation φ_a in Azimut bestimmen, die eine quadratische Funktion der Zeit ist, nämlich

$$\varphi_a(t) = -\frac{4 \cdot \pi}{\lambda} \cdot \left[r_0 + \frac{v^2 \cdot t^2}{2 \cdot r_0} \right], \quad |t| \leq \frac{r_0 \cdot \Theta_a}{2 \cdot v}, \quad (2.6)$$

wobei $t = x/v$ die Zeitvariable in Azimutrichtung ist. Aus Gl. 2.6 wird der Frequenzverlauf der Azimutmodulation aus der Ableitung von φ_a nach t berechnet:

$$f_a(t) = -\frac{2 \cdot v^2}{\lambda \cdot r_0} \cdot t. \quad (2.7)$$

Gl. 2.7 stellt eine lineare Abhängigkeit der Frequenz von der Zeit dar. Die gesamte Bandbreite wird als Dopplerbandbreite bezeichnet, da die Frequenzvariation auf das Annähern und Entfernen der Plattform in bezug auf das Ziel zurückzuführen ist (Dopplereffekt). Aus Gl. 2.7 folgt die Dopplerbandbreite

$$B_a = \frac{2 \cdot v \cdot \Theta_a}{\lambda} = \frac{2 \cdot v}{d_a}. \quad (2.8)$$

Je kleiner die Antennenlänge ist, desto größer wird die Dopplerbandbreite, da sich bei einem größeren Öffnungswinkel eine höhere Variationsrate der Entfernung ergibt.

Abb. 2.3 zeigt Phasenmodulation, Frequenzmodulation und Amplitudenverlauf des empfangenen SAR-Signals für ein Punktziel. Die angenommenen Flugparameter für diese Simulation sind typisch für ein Flugzeug-SAR-System ($v = 70$ m/s, $\lambda = 0,056$ m und $r_0 = 5000$ m).

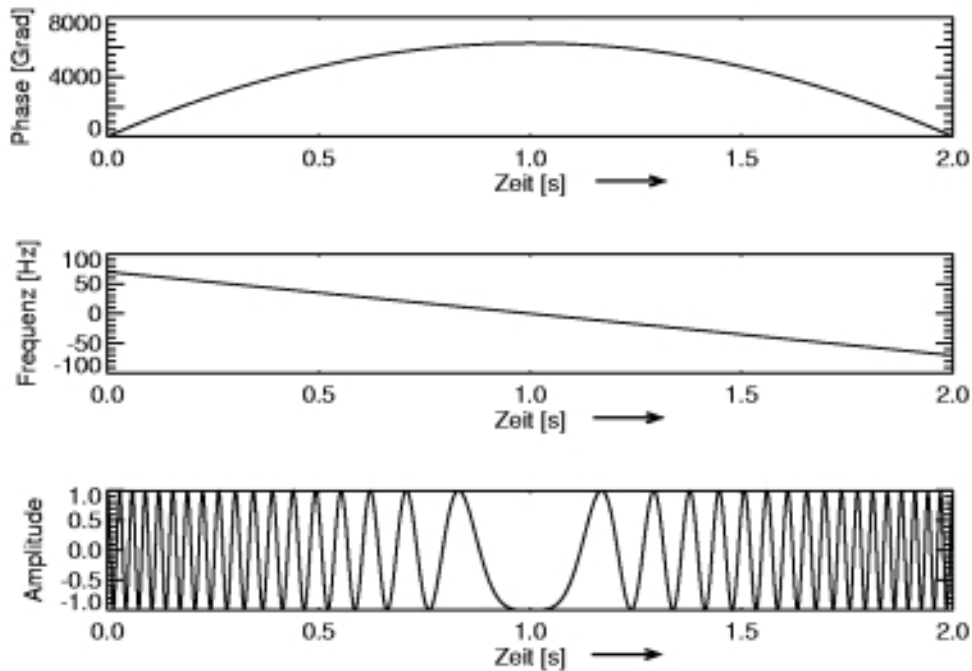


Abb. 2.3: Phasen-, Frequenz- und Amplitudenverlauf des Azimutsignals

2.2.1 Dopplerschwerpunkt und Dopplerrate

Mit Berücksichtigung des Schielwinkels θ_s (engl.: squint angle) erhält man aus Gl. 2.7 für den Frequenzverlauf der Azimutmodulation (siehe Abb. 2.1):

$$f_a(t) = \frac{2 \cdot v \cdot \sin \theta_s}{\lambda} - \frac{2 \cdot v^2}{\lambda \cdot r_0} \cdot t. \quad (2.9)$$

Der Squintwinkel θ_s ist der Winkel zwischen der Senkrechten auf dem Geschwindigkeitsvektor und der Entfernungsrichtung zum Ziel in der Mitte der Beleuchtungszeit. Die Terme in Gl. 2.9 entsprechen der linearen bzw. der quadratischen Komponente der Zielentfernungsänderung.

Der erste Term wird durch den Squintwinkel verursacht; er resultiert aus der linearen Entfernungsänderung. Dieser Term wird als Dopplerschwerpunkt bezeichnet und entspricht dem Wert f_D der Dopplerfrequenz in der mittleren Position der Beleuchtungsgeometrie.

Der lineare Frequenzverlauf (zweiter Term in Gl. 2.9) resultiert aus der quadratischen Entfernungsänderung der Phase. Den Koeffizienten des zweiten Terms bezeichnet man als Dopplerrate k_a . Gl. 2.9 kann als eine Funktion der Parameter f_D und k_a dargestellt werden:

$$f_a(t) = f_D + k_a \cdot t, \quad (2.10)$$

wobei

$$f_D = \frac{2 \cdot v \cdot \sin \theta_s}{\lambda} \quad (2.11)$$

und

$$k_a = -\frac{2 \cdot v^2}{\lambda \cdot r_0} \quad (2.12)$$

ist. Die Gln. (2.10), (2.11) und (2.12) definieren vollständig die Azimutmodulation, die von der Plattformbewegung, der Geometrie zum Ziel (d. h. von r_0 und θ_s) und von der Wellenlänge abhängt.

2.3 Impulsmodulation – Das Chirp-Signal

Bei einem Radarsystem ohne Frequenzmodulation des Sendesignals wird ein Impuls kurzer Dauer periodisch gesendet, das zurückgestreute Signal empfangen und nach seinem Umsetzen in das Basisband digitalisiert. Durch die Verringerung der Impulsdauer T_e erhält man eine hohe Entfernungsauflösung. Durch die Erhöhung der Sendespitzenleistung P werden die Reichweite vergrößert und das Signal/Rausch-Verhältnis verbessert. Die Impulsdauer und die Spitzensendeleistung sind entscheidend für die Leistungsfähigkeit des Radarsystems, stellen aber gegenläufige Anforderungen an das Radarsystem dar, da keine beliebig hohe Spitzensendeleistung in kurzer Zeit aufzubringen ist. Um diese Problematik zu überwinden, wird das Verfahren der Impulskompression angewendet.

Anstelle eines zeitkomprimierten Impulses benutzt man ein zeitgedehntes Signal mit einer Modulation. Häufig wird die lineare Frequenzmodulation verwendet, die mit analogen Bauelementen oder mit einer digitalen Schaltung mit nachfolgendem D/A-Wandler erzeugt werden

kann. Bei Verwendung analoger Bauelemente wird ein Verzögerungsnetzwerk (engl.: Surface Acoustic Wave, SAW) eingesetzt. Das zeitgedehnte, frequenzmodulierte Signal wird als Chirp bezeichnet.

Die Frequenzmodulation eines Signals erweitert dessen Möglichkeit zur Entfernungsauflösung, da diese nur von der Bandbreite der Frequenzmodulation abhängt. Falls die Bandbreite B_e der Frequenzmodulation erhöht wird, so daß die gleiche Bandbreite eines sehr kurzen Signals resultiert, erhält man nach der Impulskompression des zeitgedehnten Signals die gleiche Entfernungsauflösung wie beim Impuls kurzer Dauer.

Die Modulation in der Entfernung $s_e(x, r)$ gemäß Gl. 2.3b wird durch die Impulsmodulation im Radarsystem definiert. In den meisten Fällen verwendet man eine quadratische Phasenmodulation,

$$\varphi_e(t) = \pi \cdot k_e \cdot t^2, \quad -T_e/2 \leq t \leq T_e/2, \quad (2.13)$$

wobei k_e die Modulationsrate und T_e die Dauer des gesendeten Impulses ist. Aus Gl. 2.13 ergibt sich die Frequenzmodulation

$$f_e(t) = k_e \cdot t. \quad (2.14)$$

Die Bandbreite des gesendeten Impulses ist

$$B_e = k_e \cdot T_e. \quad (2.15)$$

Dabei ist erforderlich, daß die Bandbreite des Hochfrequenzteils des Radarsystems größer als B_e ausgelegt ist und daß die Abtastfrequenz der Analog/Digital-Wandlung für ein komplexes Format des demodulierten Signals größer als B_e ist.

Abb. 2.4 zeigt Phasenmodulation, Frequenzmodulation und Amplitudenverlauf des gesendeten Impulses (Chirp-Signal). Die angenommenen Modulationsparameter für diese Simulation sind $B_e = 100 \text{ MHz}$, $T_e = 5 \mu\text{s}$.

2.4 Optimalfilter (Matched Filter)

Bei der SAR-Verarbeitung wird im allgemeinen eine zweidimensionale Verarbeitung der empfangenen, digitalisierten Daten durchgeführt, man wertet dabei die Entfernungs- und Azimutvariationen der Phase aus. Diese Operation entspricht der Impulskompression mit einem Optimalfilter [32], [54]. Nach Impulskompression, Betragsbildung und Kalibrierung [19] der SAR-Daten entspricht die Intensität an der Position (x, r) dem Wert des Rückstreuoeffizienten σ_0 an dieser Stelle.

Die Übertragungsfunktion des Optimalfilters ist gleich der konjugiert komplexen, zeitinvertierten SAR-Systemantwort s_0

$$h_0(x, r) = m \cdot s_0^*(x_0 - x, r_0 - r), \quad (2.16)$$

wobei m eine Konstante zur Normierung und s_0^* die zu s_0 konjugiert komplexe Funktion ist. Gemäß der Theorie des Optimalfilters wird das Signal $s_0(x, r)$ mit der Funktion $h_0(x, r)$ gefal-

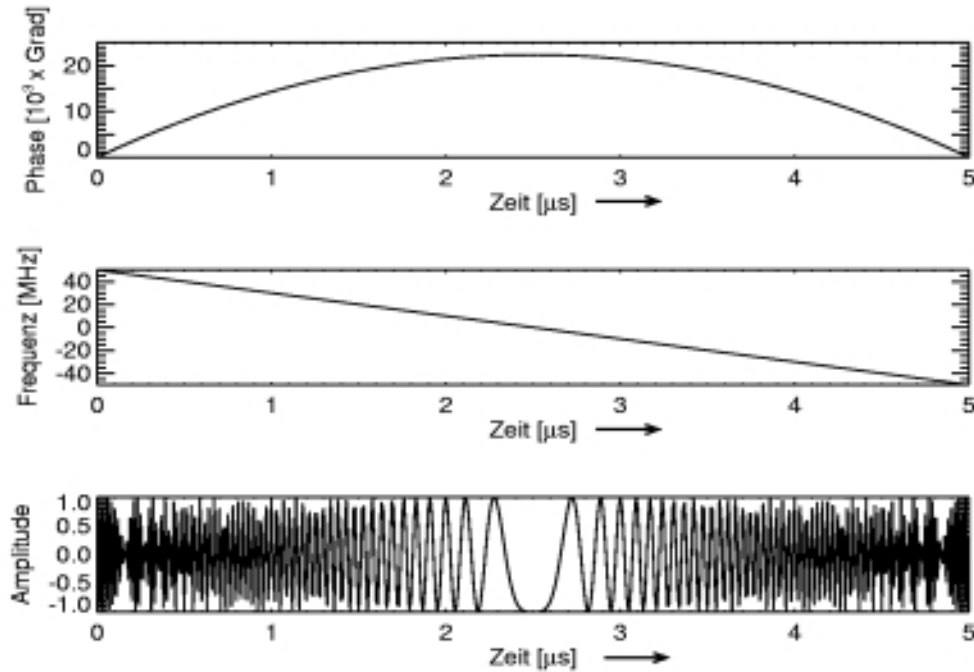


Abb. 2.4: Phasen-, Frequenz- und Amplitudenverlauf des Chirp-Signals

tet, wodurch das maximale Signal/Rausch-Verhältnis für die gefalteten Daten gewährleistet ist. Dabei wird angenommen, daß ein weißes Rauschen mit konstanter Leistungsdichte vorhanden ist. Das Faltungsintegral lautet allgemein

$$u_0(t) = s_0(t) * h_0(t) = \int_{-\infty}^{\infty} s_0(\tau) \cdot h_0(t - \tau) d\tau, \quad (2.17)$$

wobei

$$s_0(t) = w(t) \cdot e^{jbt^2} \quad (2.18)$$

und

$$h_0(t) = m \cdot e^{-jbt^2}, \quad |t'| \leq \frac{T_i}{2}, \quad (2.19)$$

mit $t' = t - t_0$ und T_i als Integrationszeit. Mit Einsetzen der Gln. (2.18) und (2.19) in (2.17) erhält man

$$|u_0(t)| = \left| \sqrt{\frac{B}{T_i}} \cdot \int_{-T_i/2}^{T_i/2} w(\tau) \cdot e^{jbt' \cdot \tau} \cdot d\tau \right|. \quad (2.20)$$

Gl. 2.20 entspricht der *Fourier-Transformation* der Gewichtungsfunktion $w(t)$. Beim Faltungsintegral in Azimut ist die Gewichtungsfunktion $w(t)$ durch das Antennendiagramm $g_a(x)$ gegeben. In Entfernung ist $w(t)$ durch die Hüllkurve $a_r(t)$ des gesendeten Impulses gegeben. Zusätzlich kann man in der Referenzfunktion $h_0(t)$ in Azimut und Entfernung eine Gewichtung einfügen und damit die Nebenzipfel der Impulsantwort stark reduzieren. In der folgenden

Entwicklung wird $w(t) = 1$ angenommen, woraus folgt

$$|u_0(t)| = \left| \sqrt{B \cdot T_i} \cdot \text{sinc} [T_i \cdot b \cdot (t - t_0)] \right|, \quad (2.21)$$

wobei $\text{sinc}(x) = \sin(x)/x$ und $\sqrt{B \cdot T_i}$ der Gewinn der Korrelation ist.

Der Kompressionsfaktor der Korrelation entspricht dem Zeit-Bandbreite-Produkt des modulierten Signals. Für die Kompression in Azimut- und Entfernungsrichtung wird der Korrelationsgewinn (in dB) folgendermaßen definiert:

$$C_a = 10 \cdot \log_{10}(B_a \cdot T_a) \quad (2.22)$$

und

$$C_e = 10 \cdot \log_{10}(B_e \cdot T_e). \quad (2.23)$$

Eine große Signalbandbreite oder eine lange Integrationszeit ist notwendig, falls ein großer Korrelationsgewinn gewünscht wird.

2.5 Impulsantwort

Eine wichtige Funktion für die Charakterisierung eines SAR-Systems ist die Impulsantwort. Sie ist auch in der SAR-Verarbeitung von großer Bedeutung. Aus dieser Antwort können viele Qualitätseigenschaften des Endbildes, wie geometrische Auflösung und Nebenzipfelunterdrückung bestimmt werden. Die Impulsantwort ist die Abbildung eines normierten Punktzieles, d. h. die Impulsantwort $|u_0(x, r)|$ ist die Funktion $|u(x, r)|$ für ein Punktziel mit $\gamma = 1$. Dabei wird zunächst kein Rauschen berücksichtigt, und die Position des Punktzieles ist (x_0, r_0) . Aus Gl. 2.21 ergibt sich für die Impulsantwort in Azimut $|u_a(x, r)|$ und die Impulsantwort in Entfernung $|u_e(x, r)|$

$$|u_a(x, r)| = \left| \sqrt{B_a \cdot T_a} \cdot \text{sinc} \left[\pi \cdot \left(\frac{B_a \cdot (x - x_0)}{v} \right) \right] \right|, \quad (2.24)$$

$$|u_e(x, r)| = \left| \sqrt{B_e \cdot T_e} \cdot \text{sinc} \left[\frac{2\pi \cdot B_e \cdot (r - r_0)}{c_0} \right] \right|. \quad (2.25)$$

Abb. 2.5 veranschaulicht die zweidimensionale Impulsantwort, wobei keine Gewichtung der Antenne oder der Referenzfunktion berücksichtigt wurde. Die Impulsantwort ist in diesem Fall eine zweidimensionale sinc-Funktion, deren höchste Nebenkeule bei 13,2 dB unterhalb des Maximums liegt. In der Praxis wird eine Gewichtung in die Referenzfunktion eingefügt, so daß das Nebenkeulen-Niveau auf mindestens 20 dB unterdrückt wird. In [25] werden verschiedene Gewichtungsfunktionen beschrieben.

2.5.1 Geometrische Auflösung

Die geometrische Auflösung wird als die 3-dB-Breite des Hauptmaximums der Impulsantwort definiert. Für die sinc-Funktion beträgt die 3-dB-Breite ca. 44 % der Hauptkeulenbreite, die

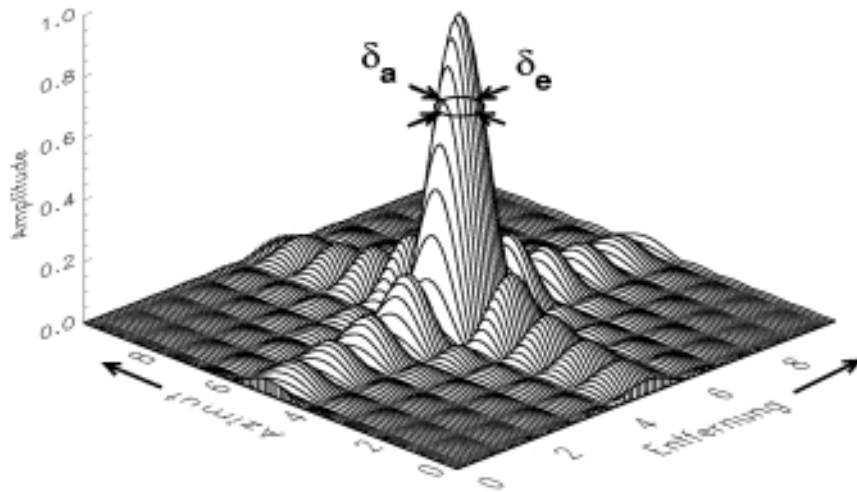


Abb. 2.5: Zweidimensionale Impulsantwort $|u_0(x, r)|$ eines SAR-Systems nach der Datenverarbeitung

durch die erste Nullstelle links und rechts des Maximums der Impulsantwort definiert wird. Die Azimut- und Entfernungsauflösung können folgendermaßen bestimmt werden:

$$\delta_a = k_a \cdot \frac{v}{B_a} = k_a \cdot \frac{d_a}{2} \quad (2.26)$$

und

$$\delta_e = k_e \cdot \frac{c_0}{2 \cdot B_e}, \quad (2.27)$$

wobei k_a und k_e konstant sind. Im Fall der sinc-Impulsantwort sind k_a und k_e gleich 0,89. Für eine Amplitudengewichtung in der Referenzfunktion in Azimut- oder Entfernungsrichtung verschlechtert sich die Auflösung bis zu rund 50 %. Für eine *Hamming*-Gewichtung ist k_e oder k_a gleich 1,30 [25]. Die Gewichtung verursacht aber auch eine Reduktion des Korrelationsgewinns.

Die Gln. (2.26) und (2.27) stellen ein wichtiges Ergebnis der SAR-Theorie dar. Die beste Azimutauflösung entspricht der halben Antennenlänge in Azimut und ist von der Entfernung unabhängig. Die Entfernungsauflösung ist umgekehrt proportional zur Bandbreite des gesendeten Impulses. Gl. 2.27 gilt für die schräge Entfernungsauflösung in Antennenblickrichtung und ist in allen Fällen besser als die Entfernungsauflösung am Boden, δ_{rg} .

$$\delta_{rg} = k_e \cdot \frac{c_0}{2 \cdot B_e \cdot \sin \theta_i}, \quad (2.28)$$

wobei θ_i der Einfallswinkel des gesendeten Signals ist, der von der Höhe, der Entfernung und der Bodenneigung abhängt.

2.5.2 Peak Sidelobe Ratio (*PSLR*) und Integrated Sidelobe Ratio (*ISLR*)

Wichtige Kenngrößen für die SAR-Bildqualität sind *PSLR* und *ISLR*. Sie sind ein Maß für das Verhältnis der Energie in der Hauptkeule zu der Energie der Nebenzipfel. *PSLR* ist definiert

als das Verhältnis der Amplituden des Maximums der Punktzielantwort zur Amplitude des höchsten Nebenzipfels. Im Idealfall ist die Punktzielantwort symmetrisch, und die Nebenzipfel mit der höchsten Amplitude befinden sich als erste direkt links und rechts neben der Hauptkeule. In diesem Fall ist das $PSLR$ gleich dem ersten SLR (engl.: Sidelobe Ratio).

Die Definition der $ISLR$ (in dB) ist

$$ISLR = 10 \cdot \log_{10} \left[\frac{E_1}{E_2} \right]. \quad (2.29)$$

E_1 ist dabei die Energie der Punktzielantwort in einem um das Maximum zentrierten Bereich mit der zweifachen Ausdehnung der 3-dB-Auflösung. E_2 ist die Energie in einem ebenfalls um das Maximum zentrierten Bereich mit zwanzigfacher Ausdehnung der 3-dB-Auflösung abzüglich der Energie E_1 .

$PSLR$ und $ISLR$ sind entscheidend für eine gute Bildqualität. Für Punktziele müssen die Nebenzipfel so weit unterdrückt sein, daß sie für die festgelegte Bilddynamik nicht erscheinen oder eine sehr kleine Amplitude in bezug auf das Maximum der Punktzielantwort haben. Ein schlechtes $ISLR$ führt zu einem Bild mit wenig Kontrast, da ein Großteil der Energie der Punktzielantwort in den Nebenzipfeln verteilt ist.

Für eine $\sin(x)/x$ -Punktzielantwort ohne Gewichtung erhält man $PSLR = 13$ dB und $ISLR = 9,8$ dB. Mit Anwendung einer *Hamming*-Gewichtung erhält man $PSLR = 43$ dB und $ISLR = 21$ dB.

3 Abbildung verteilter Ziele

Aufgrund der kohärenten Verarbeitung tritt in SAR-Bildern das sogenannte Speckle-Rauschen auf. Besonders intensiv tritt es in Erscheinung bei Flächenzielen mit einer Oberflächenrauigkeit in der Größenordnung der Radarwellenlänge [64], [69], [72], [73]. Die Verteilungsdichte der prozessierten Intensitätsdaten gehorcht im allgemeinen einer Exponentialverteilung. Dabei ist die Standardabweichung gleich dem Mittelwert, was eine sehr große Streuung in den Bilddaten bedeutet. Die Bildinterpretation wird beeinträchtigt, da die Wahrscheinlichkeit, Punktziele auf Flächen zu detektieren, reduziert und die Klassifizierung von Flächenzielen sowie die Bestimmung ihrer Grenzen erschwert wird.

Zur Reduktion des Speckle-Rauschens benutzt man oft die sogenannte Multilook-Verarbeitung. Diese Verarbeitung besteht aus einer inkohärenten Addition von statistisch unabhängigen Bildern (Sichten oder Looks) der gleichen Szene. Die verschiedenen Looks gewinnt man z. B. bei der üblichen SAR-Datenverarbeitung durch eine Aufteilung der verfügbaren Signalbandbreite in Bereiche mit gleicher Bandbreite [24], [37], [69]. Die Aufteilung kann sowohl im Azimutspektrum als auch im Entfernungsspektrum erfolgen. Auch durch die Nutzung der Unterschiede in Polarisation, Zeit und Raum können unabhängige Bilder (Looks) generiert werden. Das Ergebnis dieser Verarbeitung sind Bilder der gleichen Szene, die für Flächenziele statistisch voneinander unabhängig sind. Die inkohärente Addition dieser Bilder führt zu einem Endbild mit reduziertem Speckle-Rauschen. Die Standardabweichung der Intensität der Flächenziele im Endbild nimmt dabei mit der Wurzel aus der Anzahl von Looks ab, was zu einer besseren radiometrischen Auflösung führt.

3.1 Statistische Eigenschaften

Im folgenden wird exemplarisch die Abbildung von Flächenzielen zugrundegelegt, deren Oberflächenrauigkeit mit der Wellenlänge des Radarsystems vergleichbar ist. Das empfangene komplexe SAR-Signal hat in diesem Fall eine *Gauß*-verteilte Amplitude mit dem Mittelwert gleich null und eine gleichverteilte Phase im Intervall von $-\pi$ bis π [69], [34]. Die prozessierten SAR-Daten bei der Abbildung eines Flächenzieles mit Reflektivität $\gamma(x, r)$ können mit Hilfe von Gln. (2.3a) und (4.1) bestimmt werden:

$$|u(x, r)| = |g_e(r) \cdot \gamma(x, r) * u_0(x, r)|. \quad (3.1)$$

Gemäß Gl. 3.1 entstehen die prozessierten Daten grundsätzlich durch eine Faltung der Impulsantwort $u_0(x, r)$ mit der Reflektivität $\gamma(x, r)$. Wenn viele Streuzentren mit statistisch unabhängigen Amplituden und Phasen innerhalb einer Auflösungszelle von $u_0(x, r)$ vorhanden sind, dann weist das Ergebnis der Faltung auch eine *Gauß*-verteilte Amplitude mit Mittelwert

null auf, da die Faltung als eine Summierung aller Streuzentren innerhalb der Auflösungszelle interpretiert werden kann. Für die Varianz von $u(x, r)$ gilt deswegen

$$\sigma_u^2 = E[|u|^2] = E[u_i^2] + E[u_q^2] = P, \quad (3.2)$$

wobei $E[|u|^2]$ der erwartete Wert der prozessierten Intensitätsdaten $|u|^2$, u_i und u_q die reelle bzw. imaginäre Komponente von $u(x, r)$ und P die mittlere Rückstreuleistung ist. Aus Gl. 3.2 erhält man für die Varianz $\sigma_{u_i}^2$ und $\sigma_{u_q}^2$ von u_i bzw. u_q

$$\sigma_{u_i}^2 = \sigma_{u_q}^2 = \frac{1}{2} \cdot \sigma_u^2 = \frac{1}{2} \cdot P. \quad (3.3)$$

Damit ergibt sich für die Wahrscheinlichkeitsdichte p von u_i und u_q

$$\begin{aligned} p(u_i, u_q) &= p(u_i) \cdot p(u_q) \\ &= \frac{1}{2\pi \cdot \sigma_{u_i}^2} \cdot e^{-\frac{u_i^2 + u_q^2}{2 \cdot \sigma_{u_i}^2}}. \end{aligned} \quad (3.4)$$

Im Fall der Darstellung des SAR-Bildes mit Intensitätswerten $|u|^2 = u_i^2 + u_q^2$ gilt folgende Wahrscheinlichkeitsdichte:

$$p(|u|^2) = \frac{1}{2 \cdot \sigma_{u_i}^2} \cdot e^{-\frac{|u|^2}{2 \cdot \sigma_{u_i}^2}} = \frac{1}{P} \cdot e^{-\frac{|u|^2}{P}}. \quad (3.5)$$

Die Intensitätsdaten weisen eine Exponentialverteilung auf, wobei die Standardabweichung der Daten gleich dem Erwartungswert und auch gleich der mittleren Rückstreuleistung P ist. Für die Auswertung der SAR-Bilder in vielen wissenschaftlichen Bereichen ist eine hohe radiometrische Auflösung erforderlich, so daß die hohe Varianz der prozessierten Daten unerwünscht ist. Die Intensitätsdaten werden auch als Speckle-Rauschen mit der Varianz σ_u^2 bezeichnet. Aus Gl. 3.5 erhält man für die Intensitätsdaten

$$|u|^2 = P \cdot n_s, \quad (3.6)$$

wobei n_s das Speckle-Rauschen mit der Wahrscheinlichkeitsverteilung

$$p(n_s) = e^{-n_s} \quad (3.7)$$

ist. Das Speckle-Rauschen hat gemäß Gl. 3.6 einen multiplikativen Charakter, da es mit der Rückstreuleistung P multipliziert wird. Das heißt, je höher die Rückstreuleistung ist, desto größer ist die Varianz der Bilddaten.

Für die Amplitudenwerte der Bildpunkte $|u| = \sqrt{u_i^2 + u_q^2}$ erhält man mit Gl. 3.4 eine *Rayleigh-Verteilung*

$$p(|u|) = \frac{2 \cdot |u|}{P} \cdot e^{-\frac{|u|^2}{P}}. \quad (3.8)$$

Der Erwartungswert beträgt in diesem Fall $\sqrt{\pi \cdot P/4}$ und die Standardabweichung $\sqrt{P \cdot (1 - \pi/4)}$, wobei auch hier die multiplikative Charakteristik festzustellen ist. Die Am-

plitudendaten können folgendermaßen dargestellt werden:

$$|u| = \sqrt{\frac{P}{2}} \cdot n_s, \quad (3.9)$$

wobei

$$p(n_s) = n_s \cdot e^{-\frac{n_s^2}{2}}. \quad (3.10)$$

Die Zufallsvariable n_s entspricht in diesem Fall dem Speckle-Rauschen mit einer Gamma-Verteilung, wobei die Standardabweichung der Amplitudendaten mit der Wurzel aus der Rückstreuleistung zunimmt.

3.2 Multilook-Verarbeitung

Die Multilook-Verarbeitung (Verarbeitung mehrfacher Sichten) dient zur Reduktion des Speckle-Rauschens in SAR-Bildern. Sie besteht aus einer inkohärenten Addition von statistisch unabhängigen Bildern (Looks). Falls die Looks völlig unkorreliert sind, wird die Standardabweichung der Intensität für eine homogene Szene mit der Wurzel aus der Anzahl der Looks reduziert. In Kap. 3.2.1 wird eine detaillierte Modellierung mit Berücksichtigung der Korrelation zwischen den Looks durchgeführt. Die Korrelation ist dabei auf die Überlappung von Frequenzbereichen benachbarter Looks zurückzuführen. Durch die Überlappung erreicht man eine bessere Ausnutzung der verfügbaren Bandbreite, da üblicherweise eine Gewichtung zur Reduktion der Nebenkeulen in den einzelnen Frequenzbereichen eingeführt wird [49].

Abb. 3.1 zeigt eine Konfiguration zur Multilook-Verarbeitung in Azimut mit drei Looks, 50 % Überlappung und Gewichtung, wobei die Looks aus drei Aspektwinkelbereichen $\Delta\theta_{a_i}$ des Azimutantennendiagramms gebildet werden. Aus Gl. 2.15 ergibt sich eine direkte Beziehung zwischen der Bandbreite und dem Aspektwinkelbereich eines jeden Looks, nämlich

$$B_{a_i} = \frac{2 \cdot v}{\lambda} \cdot \Delta\theta_{a_i}. \quad (3.11)$$

Hierbei ist $\Delta\theta_{a_i}$ der Aspektwinkelbereich in Azimut des Looks i und B_{a_i} die entsprechende Dopplerbandbreite. Für jeden Aspektwinkelbereich wird eine Referenzfunktion berechnet, die dem Optimalfilter für diesen Bereich entspricht. Für die Impulsantwort $|u_0(x, r)|$ der Multilook-Verarbeitung gilt

$$|u_0(x, r)|^2 = \frac{\sum_{i=1}^L |s_a(x, r) * h_{a_i}(x, r)|^2}{L}, \quad (3.12)$$

$h_{a_i}(x, r)$ ist dabei die Referenzfunktion des i -ten Looks und L die Anzahl von überlappenden Looks. Zwischen der Überlappung ubp und der Anzahl von nicht überlappten Looks L_0 besteht folgender Zusammenhang:

$$L = 1 + \frac{L_0 - 1}{1 - ubp}. \quad (3.13)$$

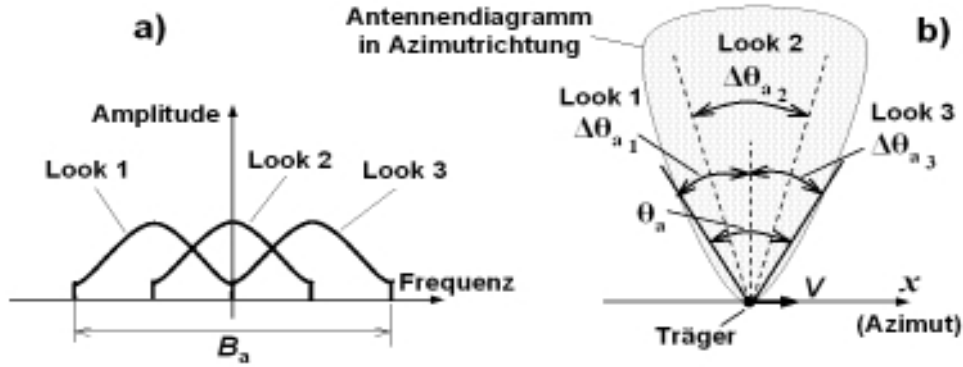


Abb. 3.1: a) Multilook-Verarbeitung mit drei überlappenden Looks im Frequenzbereich, b) entsprechende Aufteilung des Azimutantennendiagramms in Aspektwinkelbereiche

Falls keine Überlappung verwendet wird, entspricht L_0 der Anzahl von Looks L bei der Verarbeitung. Läßt man die Looks sich überlappen, dann ist L immer größer als L_0 . Für das Beispiel von Abb. 3.1 gilt $L_0 = 2$ und $L = 3$. Aus Gl. 2.26 ersieht man, daß die Azimutauflösung durch die Verkleinerung der Bandbreite schlechter wird:

$$\delta_{al} = \delta_a \cdot L_0 = k_a \cdot \frac{v \cdot L_0}{B_a}. \quad (3.14)$$

Die Azimutauflösung δ_{al} wird bei der Multilook-Verarbeitung mit wachsender Anzahl von unabhängigen, nicht überlappenden Looks L_0 schlechter.

Im Fall der Multilook-Verarbeitung mit L überlappenden Looks ist die effektive Anzahl von Looks L_{eff} kleiner als L . Dies ist auf die Korrelation zwischen den Looks zurückzuführen. L_{eff} entspricht der Anzahl von statistisch unabhängigen Looks und wird definiert als

$$L_{\text{eff}} = \frac{\{E[|u|^2]\}^2}{\sigma_u^2}. \quad (3.15)$$

Die radiometrische Auflösung des SAR-Bildes unter Berücksichtigung des Systemrauschens hängt von L_{eff} ab, sie ist definiert als

$$\gamma_a = 10 \cdot \log_{10} \left[\frac{1 + (S/N)^{-1}}{\sqrt{L_{\text{eff}}}} \right]. \quad (3.16)$$

S/N ist dabei das Signal/Rausch-Verhältnis. Für ein $S/N \gg 5$ dB hängt die radiometrische Auflösung nur noch von L_{eff} ab. Deshalb ist die Multilook-Verarbeitung für SAR-Systeme mit hoher Bildqualitätsanforderung unentbehrlich.

Zwischen der radiometrischen Auflösung und der geometrischen Auflösung besteht ein direkter Zusammenhang, wie in Gln. (3.14) und (3.16) dargestellt ist. Die radiometrische Auflösung verbessert sich mit der Anzahl der Looks, während sich die geometrische Auflösung verschlechtert. Für bestimmte Bereiche der Bildanalyse und -auswertung ist oft eine hohe radiometrische Auflösung zu Lasten der geometrischen Auflösung erforderlich. Die Anzahl der Looks sollte daher in der Multilook-Verarbeitung ein flexibler Parameter sein.

Abb. 3.2 zeigt ein Beispiel, das den Effekt des Speckle-Rauschens bzw. der Multilook-Verar-

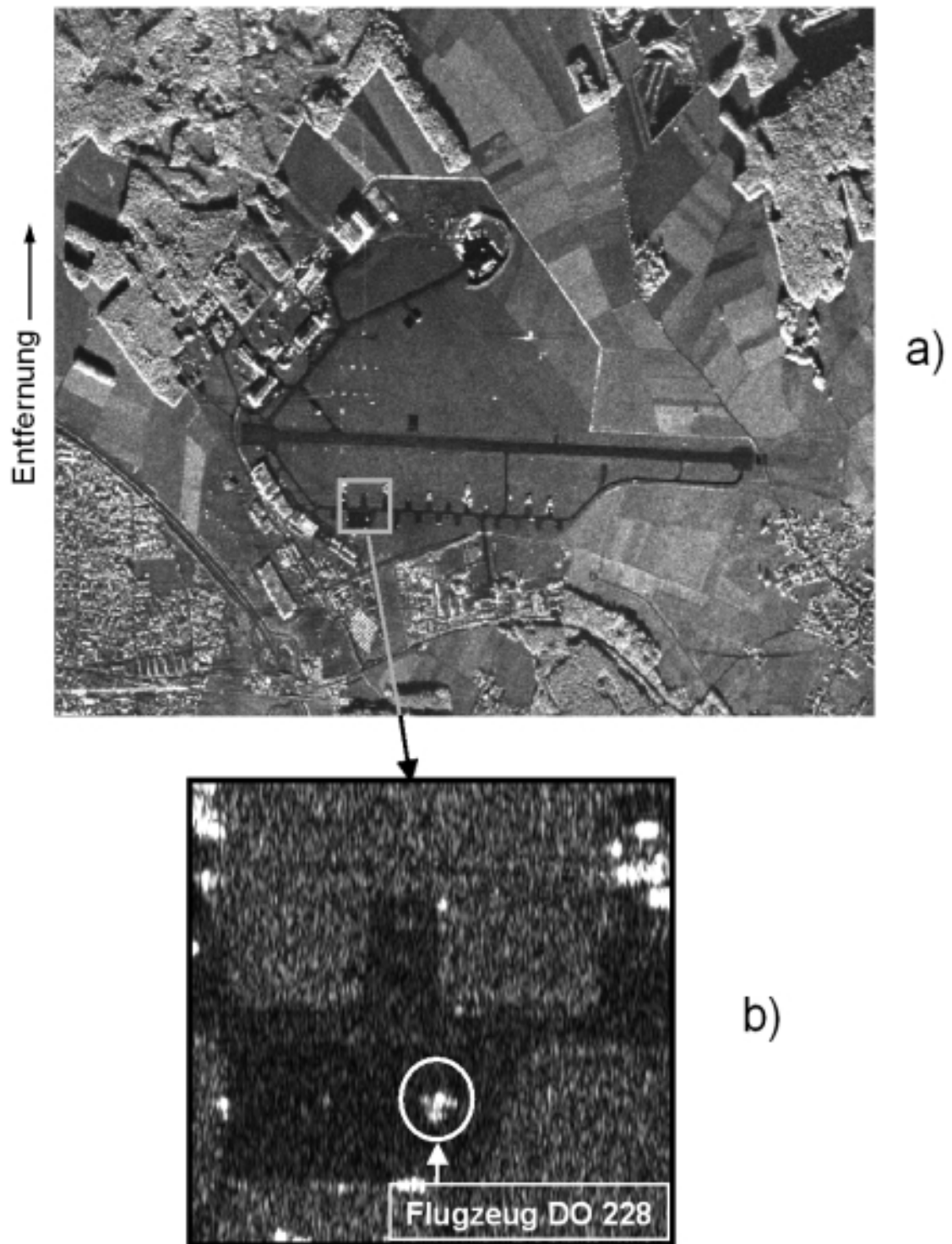


Abb. 3.2: SAR-Bild des experimentellen SAR-Systems des DLR. a) Verarbeitung mit 8 Looks und 3 m Auflösung. Gezeigt wird die Landebahn von Oberpfaffenhofen bei München. b) Verarbeitung eines Teilbereichs mit einem Look und 0.5 m Auflösung.

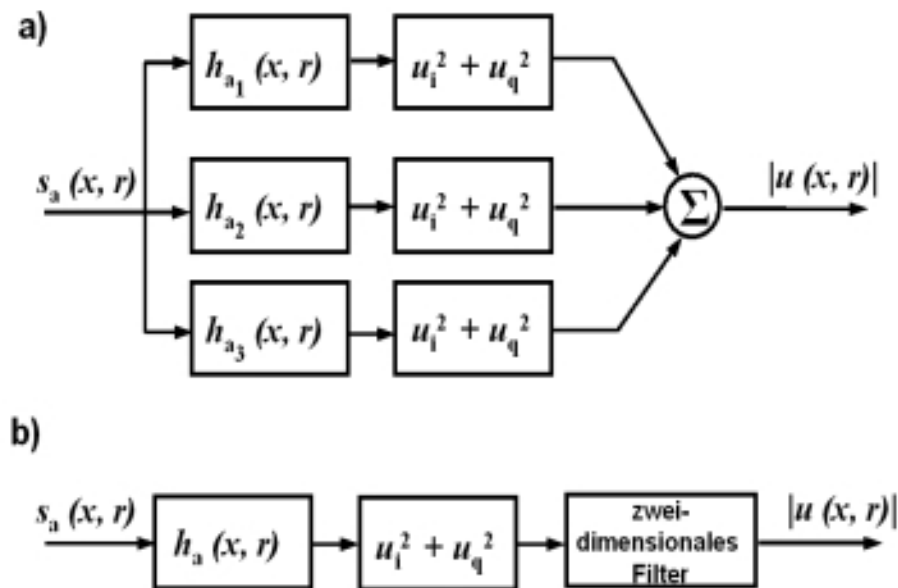


Abb. 3.3: a) Blockdiagramm der Multilook-Verarbeitung; b) Blockdiagramm der Verarbeitung mit Filterung der prozessierten Daten

beitung in SAR-Bildern verdeutlicht. Links wird ein Standard-Bildprodukt des E-SAR-Systems dargestellt, wobei hier die SAR-Verarbeitung mit 8 Looks und 3 m Auflösung in Azimutrichtung durchgeführt wurde. Das Speckle-Rauschen wird durch die große Anzahl von Looks stark unterdrückt. Beim rechten Bild wurde die Verarbeitung mit einem Look und 0,5 m Auflösung durchgeführt. Dies führt zu einem wesentlich stärkeren Speckle-Rauschen; andererseits lassen sich aber die Punktziele durch die Verbesserung der geometrischen Auflösung besser voneinander trennen (siehe Flugzeug in der Mitte des rechten Bildes).

Ähnliche Ergebnisse wie bei der Multilook-Verarbeitung kann man durch eine zweidimensionale Filterung des prozessierten SAR-Bildes erreichen. Durch eine einfache Mittelwertfilterung kann man z. B. die Standardabweichung des Speckle-Rauschens mit der Wurzel aus der Anzahl der summierten Bildpunkte reduzieren. Die Form der so gefilterten Impulsantwort ähnelt der Filter-Impulsantwort. Im Fall der gleitenden Mittelwertfilterung ist die Filter-Impulsantwort ein Rechteck. Die Wirkung verschiedener Filterfunktionen auf die Reduktion des Speckle-Rauschens wird in [37] beschrieben.

Abb. 3.3 zeigt schematisch das Blockdiagramm einer Multilook-Verarbeitung und einer Verarbeitung mit Filterung der prozessierten Daten. Die Multilook-Verarbeitung wird am häufigsten benutzt, da man hierbei die Datenrate unmittelbar nach der Faltung mit der Referenzfunktion eines jeden Looks reduzieren kann (die Bandbreite eines jeden Looks ist kleiner als die gesamte Bandbreite); das führt zu einer Beschleunigung der Verarbeitung. Im Fall der Filterung der prozessierten Daten kann die Reduktion der Datenrate erst nach der zweidimensionalen Filterung erfolgen. In [33] und [15] sind mehrere adaptive Verfahren zur Filterung der prozessierten Daten entwickelt worden, die wesentlich bessere Ergebnisse als die einfache Mittelung der Bilddaten liefern. Diese Verfahren haben in der Regel keinen großen Berechnungsaufwand und können zusätzlich zu der Multilook-Verarbeitung zur weiteren Reduktion des Speckle-Rauschens ver-

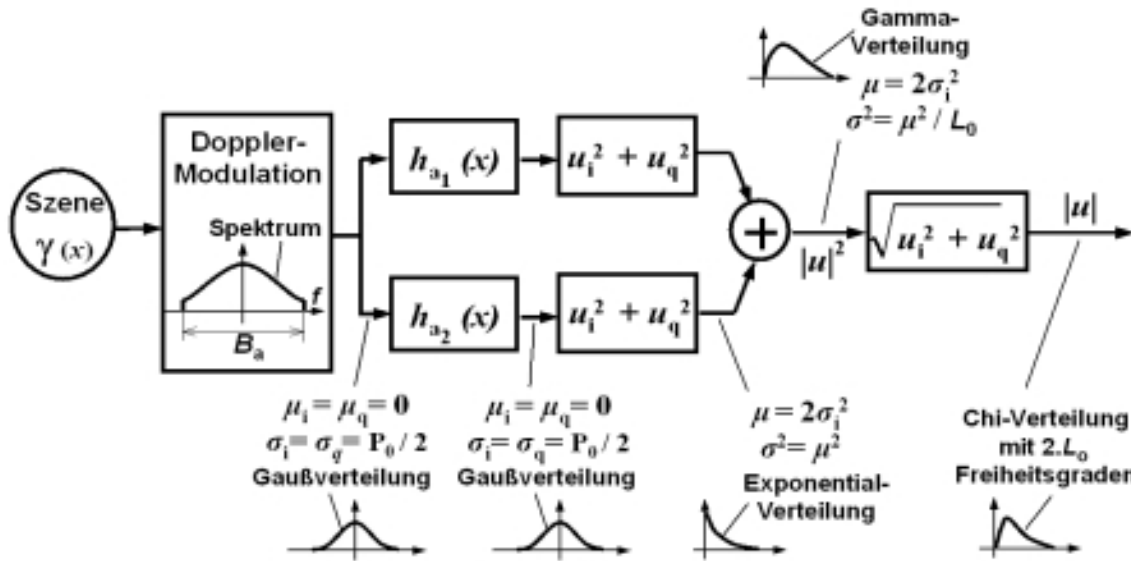


Abb. 3.4: Blockdiagramm für die Modellierung der Multilook-Verarbeitung, wobei nur die Azimutverarbeitung berücksichtigt ist. Für den Erwartungswert ist die Bezeichnung μ eingeführt.

wendet werden.

3.2.1 Statistische Eigenschaften der Multilook-Verarbeitung

Im folgenden wird die statistische Modellierung der Azimutverarbeitung dargestellt [34], [49]. Diese Modellierung ist auch für die Verarbeitung in Entfernungsrichtung gültig. Abb. 3.4 zeigt schematisch die Verarbeitung mit zwei Looks. Nach der Betragsbildung gehorchen die Intensitätsdaten eines jeden Looks einer Exponentialverteilung gemäß Gl. 3.5. Nach der inkohärenten Summierung der L Looks erhält man

$$p(|u|^2) = \frac{|u|^{2 \cdot (L-1)}}{\left(\frac{P}{L}\right)^L \cdot (L-1)!} \cdot e^{-\frac{|u|^2 \cdot L}{P}}, \quad (3.17)$$

wobei p eine Gamma-Verteilung mit dem Erwartungswert P und mit der Standardabweichung P/\sqrt{L} darstellt. Hierbei wurde angenommen, daß die Looks nicht korreliert sind, d. h. sich nicht überlappen. Somit ist die effektive Anzahl von Looks L_{eff} gleich der Anzahl L der gebildeten Looks.

Wegen der Gewichtung der einzelnen Looks zur Unterdrückung der Nebenkeulen der Impulsantwort kann man eine Überlappung der Looks zulassen, um eine bessere Ausnutzung der verfügbaren Bandbreite zu erreichen. Durch die Überlappung sind die Looks aber nicht mehr statistisch voneinander unabhängig. Der Korrelationsfaktor ρ , der von der Gewichtungsfunktion und von der Überlappung ubp der Looks abhängt, ergibt sich zu:

$$\rho(ubp) = \frac{\int_{-T_a/2}^{T_a/2 - (1-ubp) \cdot T_a} w(t) \cdot w(t + (1-ubp) \cdot T_a) dt}{\int_{-T_a/2}^{T_a/2} w^2(t) dt}. \quad (3.18)$$

Falls die Looks voneinander völlig unabhängig sind, hat der Korrelationsfaktor den Wert 0 ($\rho(0) = 0$). Im Falle einer vollständigen Überlappung ergibt sich der Wert 1 ($\rho(1) = 1$).

Für die Summe zweier Looks mit einer mittleren Rückstreuleistung P_1 und P_2 und der Varianz P_1^2 bzw. P_2^2 ergibt sich folgende Varianz und folgender Erwartungswert:

$$\sigma_u^2 = P_1^2 + P_2^2 + \rho_{12}^2(ubp) \cdot P_1 \cdot P_2, \quad (3.19)$$

$$E[|u|^2] = P_1 + P_2. \quad (3.20)$$

Dabei ist ρ_{12} der Korrelationsfaktor des ersten und zweiten Looks. Der dritte Term in Gl. 3.19 führt bei einer zunehmenden Überlappung zu einer Erhöhung der Varianz der Intensitätsdaten. Für die Summierung von L Looks erhält man aus Gl. 3.19

$$\sigma_u^2 = \sum_{i=1}^L \sum_{j=1}^L \rho_{i,j}^2(ubp) \cdot P_i \cdot P_j, \quad (3.21)$$

wobei mit P_i bzw. P_j die mittlere Rückstreuleistung des Looks i bzw. des Looks j bezeichnet ist. Unter der Annahme gleicher mittlerer Rückstreuleistung der Looks ergibt sich

$$\sigma_u^2 = P^2 \cdot \sum_{i=1}^L \sum_{j=1}^L \rho_{i,j}^2(ubp). \quad (3.22)$$

Mit $\rho_{i,j} = 1$ für alle $i = j$ und $\rho_{i,j} = \rho_{j,i}$ kann man die Varianz folgendermaßen darstellen:

$$\sigma_u^2 = P^2 \cdot \left[L + 2 \cdot \sum_{j=1}^{L-1} (L-j) \cdot \rho_{1,j+1}^2(ubp) \right]. \quad (3.23)$$

Mit den Gln. (3.15) und (3.23) folgt für die effektive Anzahl von Looks

$$L_{\text{eff}} = \frac{L}{1 + 2 \cdot \sum_{j=1}^{L-1} \frac{L-j}{L} \cdot \rho_{1,j+1}^2(ubp)}. \quad (3.24)$$

Gl. 3.24 liefert die effektive Anzahl von Looks in Abhängigkeit von der Überlappung. Setzt man anstelle von L L_{eff} in Gl. 3.17 ein, erhält man die Wahrscheinlichkeitsverteilung der Intensitätsdaten bei Überlappung der Looks. Da L_{eff} nicht unbedingt ein ganzzahliger Wert ist, wird die Gammafunktion $\Gamma(L_{\text{eff}})$ eingeführt und Gl. 3.17 folgendermaßen umgeschrieben:

$$p(|u|^2) = \frac{|u|^{2 \cdot (L_{\text{eff}} - 1)}}{\left(\frac{P}{L_{\text{eff}}}\right)^{L_{\text{eff}}} \cdot \Gamma(L_{\text{eff}})} \cdot e^{-\frac{|u|^2 \cdot L_{\text{eff}}}{P}}. \quad (3.25)$$

Die Wahrscheinlichkeitsdichte hat in diesem Fall die Form einer Gamma-Verteilung, wobei der Erwartungswert und die Standardabweichung P bzw. $P/(L_{\text{eff}})^{1/2}$ betragen.

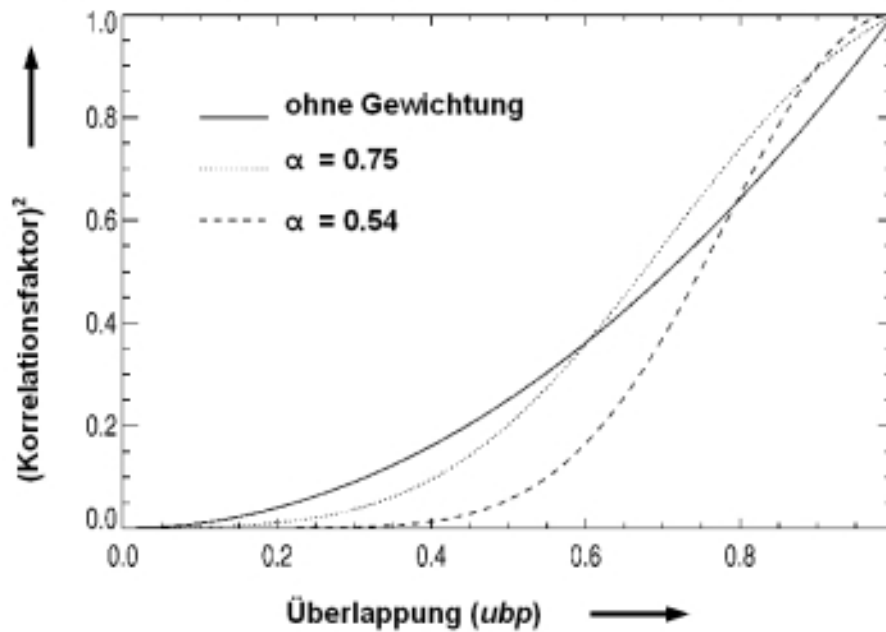


Abb. 3.5: Korrelationsfaktor in Abhängigkeit von der Überlappung bei einer *Hamming*-Gewichtung mit $\alpha = 0.54, 0.75$ und 1

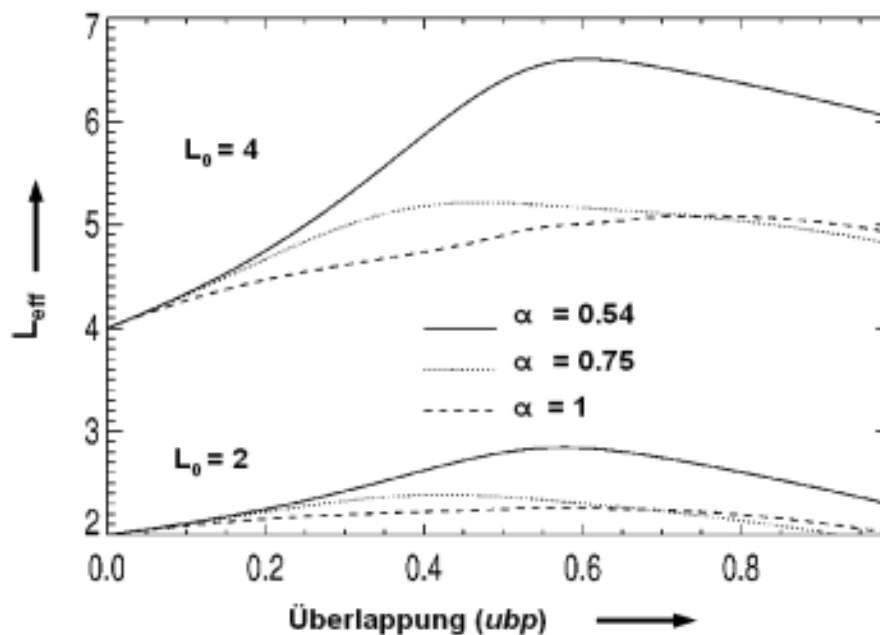


Abb. 3.6: Effektive Anzahl von Looks in Abhängigkeit von der Überlappung ubp

3.2.2 Effektive Anzahl von Looks

Die Gln. (3.22) bis (3.25) stellen die Basis für die weiteren Überlegungen dar. Dabei wurde angenommen, daß die mittleren Rückstreuleistungen in allen Looks gleich sind. Dies bedeutet die Annahme eines in Azimutrichtung konstanten Antennendiagramms.

Abb. 3.5 stellt das Quadrat des Korrelationsfaktors ρ_{12} gemäß Gl. 3.18 in Abhängigkeit von der

Überlappung für drei verschiedene Gewichtungsstärken dar ($\alpha = 0,54$, $\alpha = 0,75$ und $\alpha = 1,0$). Für eine starke *Hamming*-Gewichtung ($\alpha = 0,54$) und für eine Überlappung von 50 % beträgt das Quadrat des Korrelationsfaktors etwa 0,05. Dies bedeutet, daß die Looks fast unkorreliert sind. In diesem Fall entspricht die Anzahl von überlappenden Looks näherungsweise der effektiven Anzahl von Looks. Je kleiner die Stärke der Gewichtungsfunktion ist, desto größer wird der Korrelationsfaktor, was die effektive Anzahl von Looks reduziert.

Mit den Gln. (3.18) und (3.24) erhält man die in Abb. 3.6 dargestellte äquivalente Anzahl von Looks in Abhängigkeit von der Überlappung, wobei zwei Werte für die Anzahl der unabhängigen Looks ($L_0 = 2$ und $L_0 = 4$) angenommen wurden.

In dieser Analyse wird die Signalbandbreite B_a als konstant angenommen. Dies bedeutet, daß hier die geometrische Auflösung von der Überlappung der Looks unabhängig ist. Der maximale Wert von L_{eff} in Abb. 3.6 gibt dann den optimalen Wert für die Überlappung bei der Multilook-Verarbeitung an, da man die beste radiometrische Auflösung bei gleichbleibender geometrischer Auflösung erreicht.

Für $L_0 = 2$, $\alpha = 0,54$ und bei einer Überlappung von 50 % (siehe Abb. 3.6) beträgt die effektive Anzahl L_{eff} 2,81, wobei die gesamte Anzahl von Looks $L = 3$ ist. Dieser Wert von L_{eff} entspricht näherungsweise dem Maximum, das bei einer Überlappung von ca. 58 % erreicht wird. Da die Anzahl L der Looks nur ganzzahlige Werte annehmen kann, ist die Überlappung von 58 % nicht möglich. Für $L = 3$ wird eine Überlappung von 50 % erzielt, während für $L = 4$ die Überlappung 67 % beträgt. In der Regel wird bei der SAR-Verarbeitung eine Überlappung

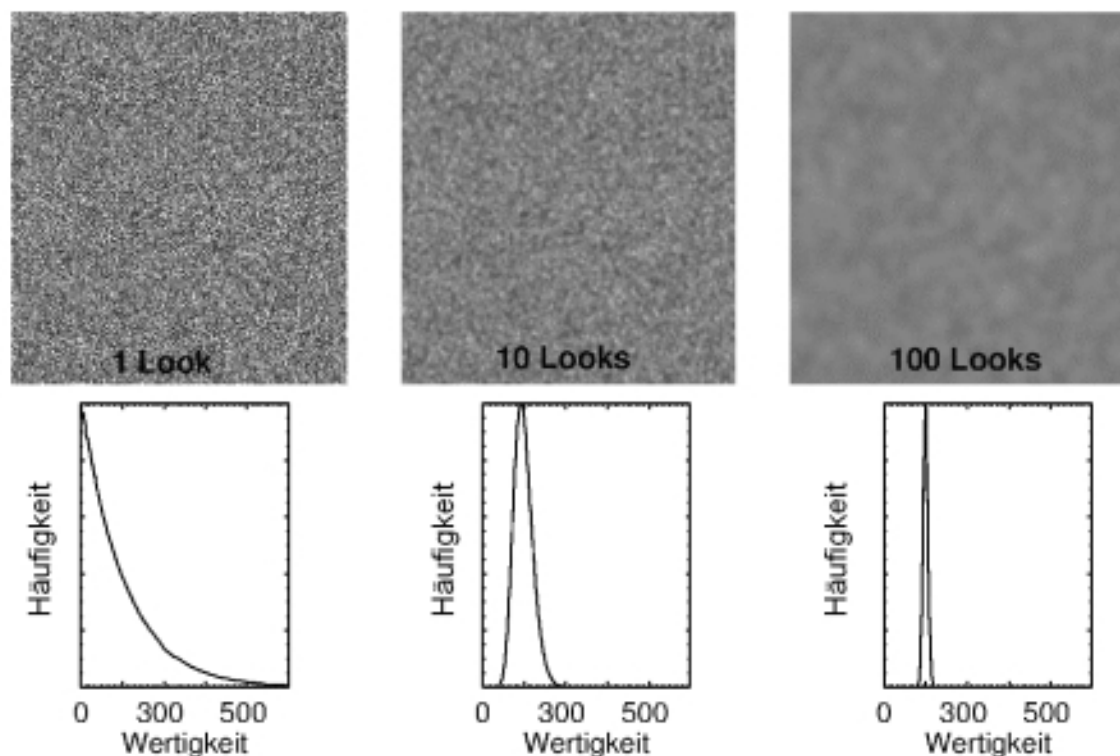


Abb. 3.7: Speckle-Muster und normierte Intensitätsverteilung des prozessierten SAR-Bildes bei der Verarbeitung mit 1, 10 und 100 Looks

von 50 % bevorzugt, da man etwa die gleiche radiometrische Auflösung mit weniger Rechenaufwand erreicht als bei einer Überlappung von 67 % .

Abb. 3.7 zeigt drei Bilder, die mit simuliertem Speckle-Rauschen bei einer Verarbeitung mit 1, 10 und 100 Looks prozessiert wurden, sowie die dazugehörigen Intensitätsverteilungen. Die Intensitätsverteilung bei der Multilook-Verarbeitung hat die Form einer Gamma-Verteilung gemäß Gl. 3.25. Bei der Verarbeitung mit einem Look weisen die Intensitätsdaten eine Exponentialverteilung auf (siehe Gl. 3.5). Deutlich zu sehen ist die Reduktion des Speckle-Rauschens bei Verwendung der Multilook-Verarbeitung sowie die Abnahme der Signalstreuung (Standardabweichung) der gezeigten Verteilungen.

4 Signalverarbeitung

Eine zweidimensionale Verarbeitung der empfangenen und digitalisierten Daten führt man durch, um die Entfernungs- und Azimutvariationen der Phase auszuwerten. Diese Operation entspricht der zweidimensionalen Impulskompression mit Optimalfilterung.

4.1 Modellierung des SAR-Systems

Die Impulsantwort h_0 des Optimalfilters ist gleich der konjugiert komplexen und zeitinvertierten SAR-Systemantwort s_0 (vgl. Gl. 2.16). In der SAR-Verarbeitung wird das empfangene Signal $s(x, r)$ mit der Referenzfunktion $h_0(x, r)$ gefaltet. Der Betrag der gefalteten Daten $|u(x, r)|$ entspricht der Amplitude der Bilddaten. Aus den Gln. (2.16), (2.17) und (3.1) erhält man

$$|u(x, r)| = |g_e(r) \cdot \gamma(x, r) * s_0(x, r) * h_0(x, r)| . \quad (4.1)$$

Zur vollständigen Modellierung wird noch ein additives Rauschen $n(x, r)$ beim Empfang der Daten berücksichtigt:

$$|u(x, r)| = |\{[g_e(r) \cdot \gamma(x, r) * s_0(x, r)] + n(x, r)\} * h_0(x, r)| . \quad (4.2)$$

Das Blockdiagramm in Abb. 4.1 veranschaulicht Gl. 4.2. $h_0(x, r)$ ist die zweidimensionale Impulsantwort der Optimalfilter. Es gilt

$$h_0(x, r) = m \cdot h_e(x, r) * h_a(x, r) , \quad (4.3)$$

wobei $h_e(x, r) = m_e \cdot s_e^*(x_0 - x, r_0 - r)$ und $h_a(x, r) = m_a \cdot s_a^*(x_0 - x, r_0 - r)$ die Impulsantworten der Optimalfilter in Entfernungs- bzw. in Azimutrichtung sind. In der SAR-Datenverarbeitung werden $h_e(x, r)$ und $h_a(x, r)$ als Referenzfunktionen bezeichnet. Das Filter $h_e(x, r)$ komprimiert den gesendeten modulierten Impuls, das Filter $h_a(x, r)$ das Doppler-modulierte Azimutsignal. Die Funktion des Azimutfilters $h_a(x, r)$ kann auch als die Bildung einer synthetischen Apertur interpretiert werden, wobei der quadratische Phasenverlauf (vgl. Gl. 2.6) des Azimutsignals durch die Faltung mit $h_a(x, r)$ kompensiert wird. Die maximale Länge der synthetischen Apertur ist $\theta_a \cdot r_0$ und nimmt mit der Entfernung zu. Die Bilddaten $|u(x, r)|$ sind zweidimensional in einem Streifen in Azimutrichtung x angeordnet.

4.2 Verfahren zur SAR-Datenverarbeitung

SAR-Bilder werden überwiegend durch eine digitale Verarbeitung generiert. Die analoge Verarbeitung der vorgestellten Faltungsintegrale war vor der Einführung der PC- und Workstation-Technologie verbreitet. Sie bietet den Vorteil einer sehr schnellen Verarbeitung in Echtzeit. Für

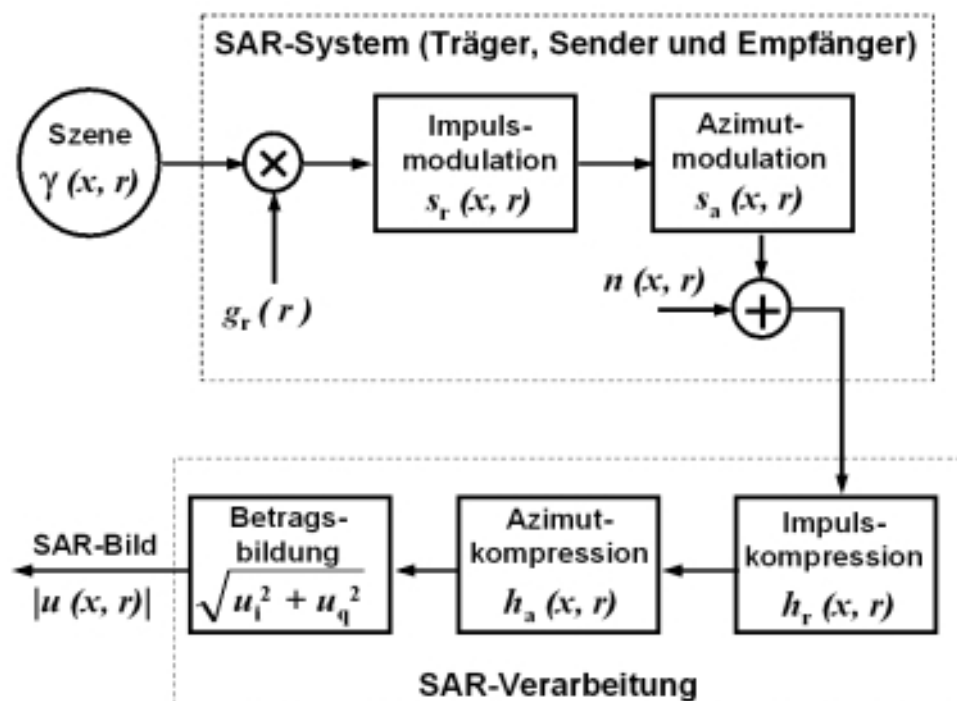


Abb. 4.1: Modell des SAR-Systems mit Verarbeitung zur Bildgenerierung

die Impulskompression in Entfernung kann man z. B. ein Verzögerungsnetzwerk (SAW) benutzen. Die Azimutverarbeitung wird mittels analoger Bauelemente (z. B. CCD: Charge Coupled Devices) implementiert. Dabei muß man aber im Hinblick auf Dynamik, Flexibilität, Kalibrierung und Genauigkeit große Einschränkungen in Kauf nehmen. Bei der optischen Verarbeitung mit Linsen ist außerdem ein hoher Geräteaufwand erforderlich. Die moderne Rechnertechnik gestattet den Aufbau kleiner Prozessoren mit sehr hoher Rechengeschwindigkeit und großem Speicher, welche eine digitale Verarbeitung mit heute vergleichsweise geringem Aufwand ermöglichen.

In der digitalen Verarbeitung werden meistens handelsübliche Rechnersysteme (eventuell mit parallelen Prozessoren) oder spezielle Hardware-Anfertigungen verwendet. Die Verfahren zur SAR-Datenverarbeitung können in zwei Gruppen aufgeteilt werden:

- Optimale Verfahren, d. h. Verfahren gemäß der Theorie des Optimalfilters,
- Nichtoptimale Verfahren, d. h. Verfahren, bei denen Vereinfachungen im Verarbeitungsalgorithmus vorgenommen werden. Dabei werden der Berechnungsaufwand reduziert und die Bildqualität schlechter. Ein Beispiel ist das Verarbeitungsverfahren ohne Fokussierung [52].

Grundsätzlich kann man die Verarbeitung sowohl im Zeitbereich als auch im Frequenzbereich vornehmen, wobei meist die Verarbeitung im Frequenzbereich aufgrund des reduzierten Rechenaufwands benutzt wird. Im folgenden werden einige Verfahren beschrieben, die häufig zur SAR-Datenverarbeitung benutzt werden.

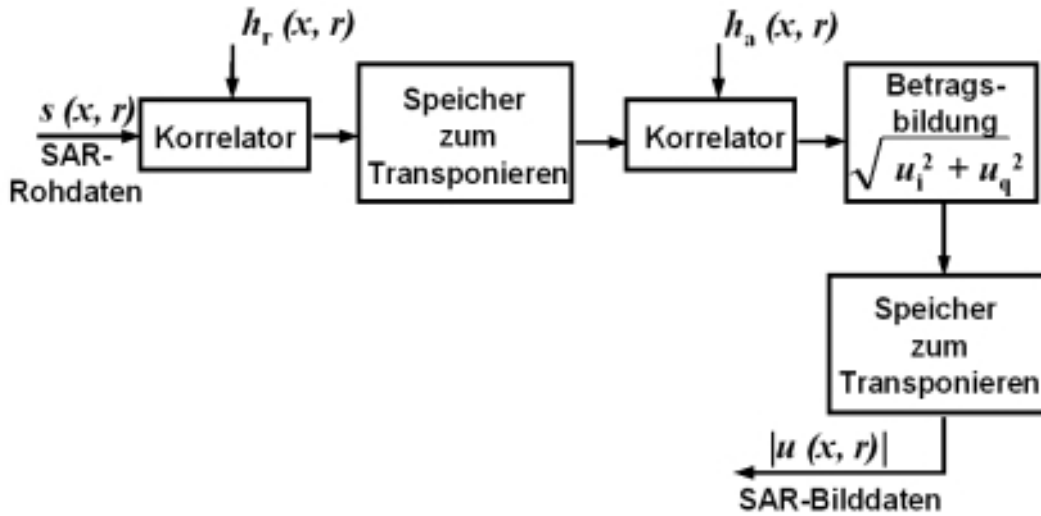


Abb. 4.2: Vereinfachtes Blockdiagramm der Verarbeitung im Zeitbereich

4.2.1 Verarbeitung im Zeitbereich

Die Verarbeitung im Zeitbereich erfolgt nach der Theorie des Optimalfilters. Dabei wird die Faltung gemäß Gl. 2.17 durch eine *diskrete Korrelation* ersetzt. Mit einer diskreten Darstellung der Variablen $x = m_x \cdot d_x$ und $r = m_r \cdot d_r$ (Azimut- bzw. Entfernungsposition), wobei d_x und d_r die Abstände der Abtastwerte in Azimut- bzw. in Entfernungsrichtung sind und m_x und m_r die Nummern der Abtastwerte sind, erhält man für das komprimierte Signal in Entfernungsrichtung

$$u_e(m_x, m_r) = \sum_{k=-\infty}^{+\infty} s(m_x, k) \cdot h_e(m_x, k + m_r). \quad (4.4)$$

Dieser Verarbeitungsschritt benötigt eine zeitlich invariante Referenzfunktion h_e . Das Blockdiagramm dieser Verarbeitung im Zeitbereich ist in Abb. 4.2 schematisch dargestellt (zur Vereinfachung der Darstellung sind hier spezielle Verarbeitungsschritte, wie die Bestimmung des Dopplerschwerpunkts nicht enthalten).

Nach der Kompression in Entfernungsrichtung werden die Daten so transponiert (im Sinne der Matrizenrechnung), daß ein Datenzugriff in Azimutrichtung möglich wird ($u_e(m_x, m_r) \rightarrow u_e(m_r, m_x)$). Dafür ist ein zweidimensionaler Speicher notwendig, der in einer Richtung mindestens die Punktzahl N_{ref} der Referenzfunktion und in der anderen Richtung die Anzahl N_{et} von Entfernungstoren speichern kann. Für die Azimutverarbeitung benötigt man wegen der Zielentfernungsänderung eine zweidimensionale Referenzfunktion zur Korrelation. Den Rechenaufwand kann man reduzieren, wenn man die Zielentfernungsänderung vor der Korrelation korrigiert. Die zweidimensionale Azimutkorrelation lautet

$$u(m_r, m_x) = \sum_{k=-\infty}^{+\infty} \sum_{l=1}^{\frac{\Delta r_q + \Delta r_l}{d_r}} u_e(l, k) \cdot h_a(m_r + l, m_x + k). \quad (4.5)$$

Der Term $\Delta r_q + \Delta r_l$ beschreibt die quadratische bzw. lineare Zielentfernungsänderung. Die Referenzfunktion $h_a(m_r, m_x)$ muß für jeden Tiefenschärfebereich¹ aktualisiert werden. Die Bilddaten werden nach der Betragsbildung transponiert ($|u(m_r, m_x)| \rightarrow |u(m_x, m_r)|$) und sequentiell in Entfernungsrichtung ausgegeben. Der Rechenaufwand der Verarbeitung im Zeitbereich nimmt proportional zur Punktzahl N_{ref} der Referenzfunktion zu, d. h. N_{ref} komplexe Multiplikationen und $(N_{\text{ref}} - 1)$ komplexe Additionen werden für jeden Korrelationswert benötigt. Für ein Zeit-Bandbreite-Produkt $\gg 30$ ist die Verarbeitung im Zeitbereich daher nicht mehr effizient.

4.2.2 Verarbeitung im Frequenzbereich (Range-Doppler-Algorithmus)

Die Verarbeitung im Frequenzbereich basiert auf dem Faltungstheorem der *Fourier*-Transformation, das besagt, daß die Faltung im Zeitbereich einer Multiplikation im Frequenzbereich entspricht [6], [42], [88]. Dabei wird der FFT (Fast *Fourier* Transform)-Algorithmus angewendet, um das SAR-Signal und die Referenzfunktion in den Frequenzbereich zu transformieren. Nach der Multiplikation im Frequenzbereich führt man die inverse Transformation durch:

$$u(t) = s(t) * h(t) = \mathcal{F}^{-1}\{\mathcal{F}\{s(t)\} \cdot \mathcal{F}\{h(t)\}\} , \quad (4.6)$$

$$u(t) = \mathcal{F}^{-1}\{S(f) \cdot H(f)\} . \quad (4.7)$$

\mathcal{F} bzw. \mathcal{F}^{-1} sind die diskrete *Fourier*-Transformation bzw. ihre Inversion, und S und H sind die *Fourier*-Transformierten von s bzw. h . Abb. 4.3 zeigt schematisch das Blockdiagramm der Verarbeitung im Frequenzbereich, die grundsätzlich aus zwei eindimensionalen Faltungen mit Verwendung des Faltungstheorems der *Fourier*-Transformation besteht. Zuerst führt man die Kompression in Entfernungsrichtung durch. Nach dem Transponieren der Daten und der Korrektur der Zielentfernungsänderung komprimiert man die Daten in Azimutrichtung.

Der zweidimensionale Speicher für das Transponieren der Daten muß in diesem Fall in einer Richtung die Punktzahl N_{FFT} der FFT in Azimutrichtung und in der anderen Richtung die Anzahl der Entfernungstore N_{et} aufnehmen können.

Die Korrektur der Zielentfernungsänderung erfolgt nach der *Fourier*-Transformation des Signals während der Azimutverarbeitung. Aufgrund der linearen Dopplermodulation ergibt sich ein direkter Zusammenhang zwischen Zeit- und Frequenzverlauf eines jeden Punktziels, so daß die Zielentfernungsänderung im Frequenzbereich einen ähnlichen Verlauf wie im Zeitbereich hat. Da nach einer FFT in Azimut die Zielentfernungsänderung von allen Zielen in einer Entfernung identisch ist, läßt sich die Zielentfernungsänderung im Frequenzbereich für alle Azimutsignale gleichzeitig korrigieren. Die Korrektur der Zielentfernungsänderung ist somit im Frequenzbereich wesentlich effizienter als im Zeitbereich. Nach der Korrektur der Zielentfernungsänderung liegt der Amplitudenverlauf der jeweiligen Azimutsignale innerhalb eines Entfernungstores und die Azimutverarbeitung kann nunmehr eindimensional durchgeführt werden.

¹ Unter Tiefenschärfe versteht man den maximalen Entfernungsbereich, in dem dieselbe Referenzfunktion für die Azimutverarbeitung verwendet werden kann, ohne daß eine Defokussierung des SAR-Bildes auftritt.

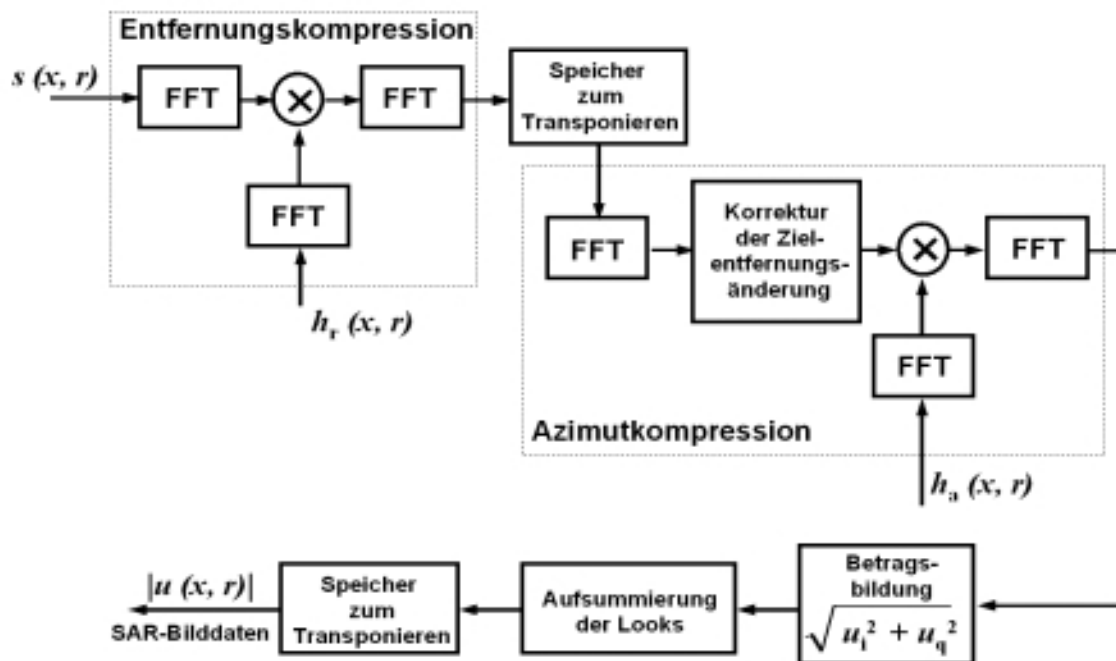


Abb. 4.3: Blockdiagramm der Verarbeitung im Frequenzbereich

Abb. 4.4 veranschaulicht die zweidimensionale Signaldarstellung (Konturplot) in den verschiedenen Schritten der Verarbeitung. Aufgrund der Korrektur der Zielentfernungsänderung im Azimutfrequenzbereich wird dieser Algorithmus als Range-Doppler-Algorithmus bezeichnet.

Da die Verarbeitung im Frequenzbereich einer zyklischen Faltung entspricht, sind jeweils $(N_{\text{ref}} - 1)$ Punkte nach der inversen FFT ungültig und müssen vernachlässigt werden. In Entfernungsrichtung kann der gesamte Entfernungsbereich einer FFT unterworfen werden, während in Azimut die Daten blockweise verarbeitet werden müssen. Dabei sind von jedem verarbeiteten Block $(N_{\text{FFT}} - N_{\text{ref}} + 1)$ Daten gültig. Für eine effiziente Azimutprozessierung wird die Punktzahl N_{FFT} der FFT üblicherweise um mindestens den Faktor 3 größer als N_{ref} gewählt. Zusätzlich wird eine Überlappung benachbarter Azimutblöcke durchgeführt, so daß eine kontinuierliche Ausgabe von gültigen Daten gewährleistet ist.

Für die Korrektur der Zielentfernungsänderung im Frequenzbereich benötigt man zusätzliche Korrekturen, falls die Zielentfernungsänderung extrem groß ist [29]. Wird das Zeit-Bandbreite-Produkt des Azimutverlaufs eines Punktzieles innerhalb eines Entfernungstores kleiner als 2, verbreitert sich das Spektrum in Azimutrichtung bei der Verarbeitung im Frequenzbereich.

In [29] wird gezeigt, daß diese Verbreiterung zu einem Phasenfehler in Entfernungsrichtung führt. Dabei kann sich die Auflösung der Impulsantwort in Entfernung bis um den Faktor 15 verschlechtern. Durch eine Änderung der Modulationsrate des Optimalfilters in Entfernung kann die Verschlechterung der Auflösung vor der Azimutverarbeitung bereits kompensiert werden. Diese zusätzliche Korrektur wird als sekundäre Entfernungskompression bezeichnet und ist für die Verarbeitung von Daten mit hohem Squintwinkel (große lineare Zielentfernungsänderung) notwendig.

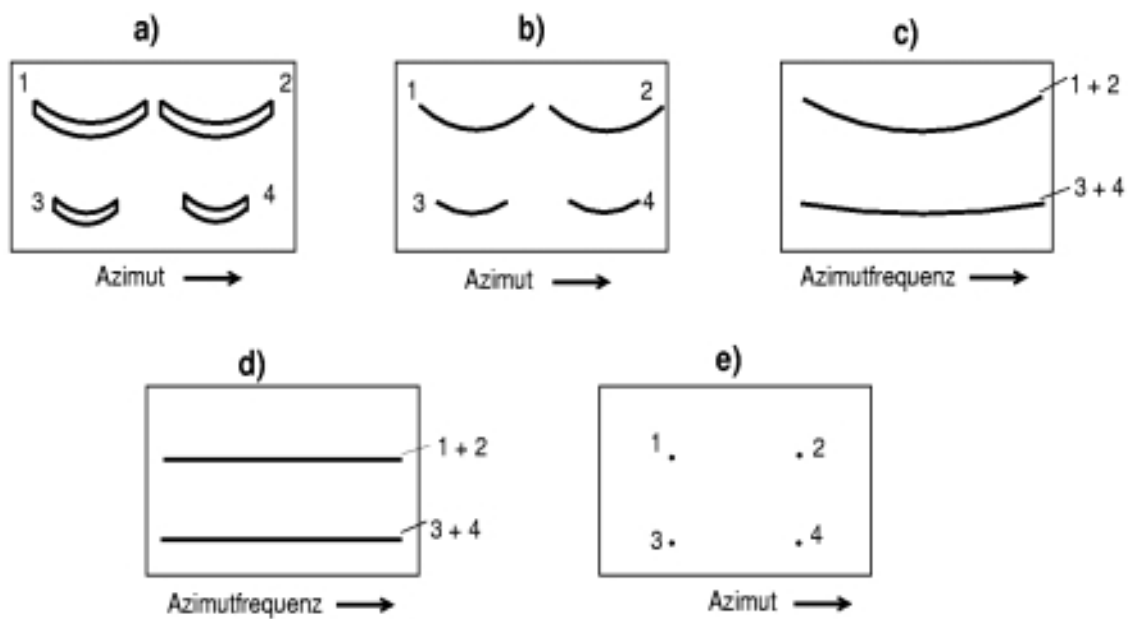


Abb. 4.4: Darstellung der Signalverläufe von 4 Punktzielen in den verschiedenen Schritten der Verarbeitung: a) Zeitbereich, b) nach Impulskompression in Entfernungsrichtung, c) Range-Doppler-Bereich, d) Range-Doppler-Bereich nach Korrektur der Zielentfernungsänderung und e) nach Azimutkompression.

Wenn eine Verarbeitung mit L Looks erfolgen soll, müssen L Referenzfunktionen erzeugt, die entsprechende Verarbeitung im Frequenzbereich durchgeführt und die L Looks nach der Betragsbildung aufsummiert werden. Nach dem Transponieren werden die Bilddaten schließlich ausgegeben.

Bei der Berechnung der Azimutreferenzfunktionen benötigt man eine automatische Fokussierung, wobei die korrekte Dopplerrate k_a für die Verarbeitung bestimmt wird. Aus der Kreuzkorrelation zwischen den unterschiedlichen Looks erhält man die relative Verschiebung Δx der Looks zueinander. Diese wird für die Bestimmung von k_a verwendet.

Mit der Verarbeitung im Frequenzbereich erreicht man eine wesentlich höhere Verarbeitungsgeschwindigkeit als im Zeitbereich, da der FFT-Algorithmus eine reduzierte Anzahl von Multiplikationen und Additionen benötigt. Der Berechnungsaufwand hängt grundsätzlich von der Punktzahl der FFT ab. Für eine direkte oder inverse Transformation benötigt der FFT-Algorithmus $N_{\text{FFT}} \times \log_2(N_{\text{FFT}})$ komplexe Additionen und Multiplikationen bei einer Länge der FFT von N_{FFT} Punkten. Dadurch ergeben sich für die Azimut- oder Entfernungsverarbeitung $3 \cdot \log_2(N_{\text{FFT}}) + 1$ komplexe Additionen und Multiplikationen pro Bildpunkt. Für die Verarbeitung von Satellitendaten wird üblicherweise in Azimut ein Zeit-Bandbreite-Produkt größer als 700 verwendet, was zu einer Punktzahl N_{ref} der Referenzfunktion von mindestens 700 führt. Im Vergleich zur Verarbeitung im Zeitbereich reduziert sich in praktischen Fällen der Berechnungsaufwand bei der Verarbeitung im Frequenzbereich um mindestens den Faktor 10.

4.2.3 Zweidimensionale Verarbeitung im Frequenzbereich

In [9], [17], [18] wird eine zweidimensionale *Fourier*-Transformation und ein zweidimensionales Optimalfilter für die Verarbeitung im Frequenzbereich eingesetzt. Dabei enthält die Referenzfunktion die Modulationen in Entfernung und Azimut sowie die Zielentfernungsänderung. Dieser zweidimensionale Algorithmus ist aber nicht mehr effizient, wenn die Tiefenschärfe des Optimalfilters in Azimut kleiner als die Punktzahl der FFT in Entfernung ist. In diesem Fall ist nur ein Entfernungsbereich der ganzen Streifenbreite optimal fokussiert.

In [70] wird die Anwendung der seismischen Wanderungstechnik (engl.: seismic migration technique) für die SAR-Datenverarbeitung in Azimut vorgeschlagen. Dieser Algorithmus basiert auf einer Aufteilung des empfangenen Signals in monochromatische, ebene Wellen. Die Zusammensetzung dieser Wellen mit der richtigen Zeitverzögerung und Phase führt zum Endbild. Die Implementierung dieses Algorithmus besteht grundsätzlich aus einer zweidimensionalen *Fourier*-Transformation, aus einer Phasenkorrektur und Interpolation im Frequenzbereich, sowie aus einer zweidimensionalen, inversen *Fourier*-Transformation. Aufgrund der Implementierung im zweidimensionalen Frequenzbereich wird dieser Algorithmus oft auch als Wavenumber-Prozessor bezeichnet.

4.2.4 Chirp Scaling-Verfahren

In [74] wird die zweidimensionale Verarbeitung im Frequenzbereich erweitert, um die Interpolation zur Korrektur der Zielentfernungsänderung zu vermeiden. Dadurch erreicht man eine sehr hohe Phasengenauigkeit in der Verarbeitung, so daß der Algorithmus besonders gut für interferometrische Anwendungen geeignet ist. Das sogenannte Chirp Scaling-Verfahren basiert auf einer Verschiebung des Phasenzentrums des Signals in Entfernungsrichtung. Die Verschiebung entspricht dabei einer linearen Skalierung in Entfernungsrichtung. Sie wird im Range-Doppler-Bereich ausgeführt und besteht im wesentlichen aus der Multiplikation mit einer komplexen Funktion. Um eine lineare Skalierung in Entfernung zu erreichen, verwendet man eine komplexe Funktion mit einer quadratischen Phasenmodulation, die eine sehr kleine Modulationsrate aufweist. Abb. 4.5 veranschaulicht das Prinzip des Chirp Scaling-Verfahrens zur geometrischen Skalierung von frequenzmodulierten Signalen.

In [55] wurde das sogenannte Extended Chirp Scaling-Verfahren für die hochgenaue Verarbeitung von flugzeuggetragenen Radardaten vorgeschlagen. Dieses Verfahren basiert auf dem Grundprinzip des Chirp Scaling-Algorithmus, enthält aber folgende zusätzliche Verarbeitungsschritte:

- Hochgenaue Bewegungskompensation
- Aktualisierung des Dopplerschwerpunktes in Azimut- und Entfernungsrichtung
- Korrektur von Squintwinkeln bis zu 30°
- Zusätzliche Operationen für die Verarbeitung von ScanSAR- und Spotlight-Daten

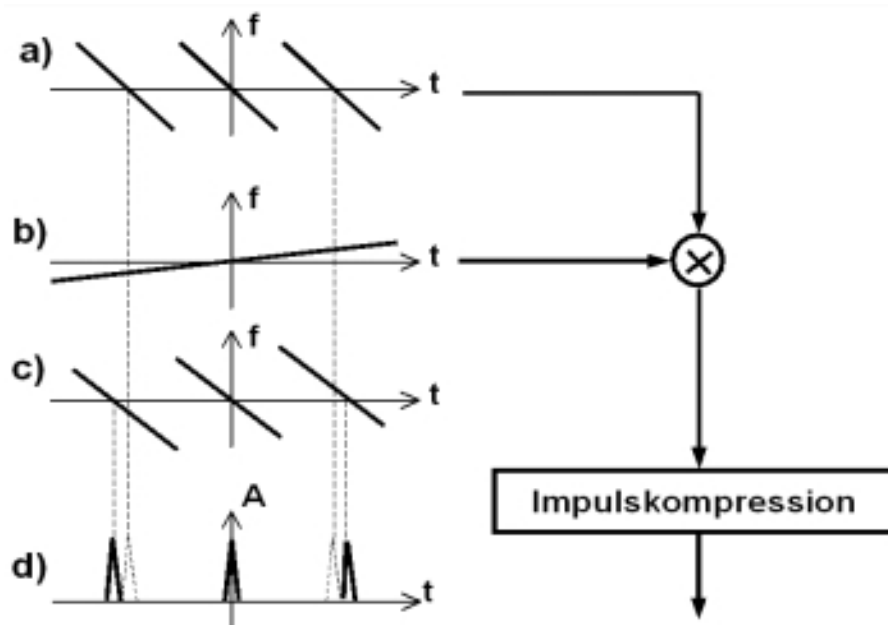


Abb. 4.5: Schematische Darstellung einer geometrischen Skalierung mit Verwendung des Chirp Scaling-Verfahrens: a) Frequenzverlauf von drei Punktzielen, b) Chirp Scaling-Funktion, c) Frequenzverlauf der Punktziele nach Multiplikation mit der Chirp Scaling-Funktion und d) Amplitudenverlauf der Punktzielantworten nach der Impulskompression

Abb. 4.6 zeigt ein Blockdiagramm des Extended Chirp Scaling-Verfahrens mit der entsprechenden Darstellung der Signalform (Konturdarstellung) in den einzelnen Verarbeitungsschritten, die im folgenden zusammengefaßt sind.

- **Bewegungskompensation für Referenzentfernung**

Durch eine Phasenkorrektur bezüglich einer Referenzentfernung (z. B. in der Bildmitte) werden die Abweichungen der Plattform von der Idealbahn zum großen Teil ausgeglichen. Eine vollständige Korrektur läßt sich in diesem Schritt noch nicht ausführen, da die Rohdaten noch die Entfernungsmodulation besitzen und damit nicht eindeutig einer Entfernung zugeordnet werden können.

- **Azimet-FFT und Chirp Scaling**

Mittels Azimet-FFTs werden die SAR-Daten in den Frequenzbereich in Azimutrichtung (Range-Doppler-Bereich) transformiert. Durch die Multiplikation mit einer komplexen Phasenfunktion, die einen quadratischen Verlauf in Abhängigkeit von der Entfernung aufweist, wird das Phasenzentrum der SAR-Daten so verschoben, daß die Zielentfernungsänderung für den gesamten Entfernungsbereich angeglichen wird. Mit diesem Verarbeitungsschritt ist zwar die Zielentfernungsänderung noch nicht vollständig korrigiert, weist aber die gleiche Krümmung für den gesamten Entfernungsbereich auf.

- **Entfernungskompression**

Mittels FFT in Entfernungsrichtung werden die SAR-Daten in den Entfernungs-Frequenzbereich transformiert. Aufgrund der bereits durchgeführten Azimet-FFT befinden sich die SAR-Daten danach im zweidimensionalen Frequenzbereich (Wavenumber-Bereich).

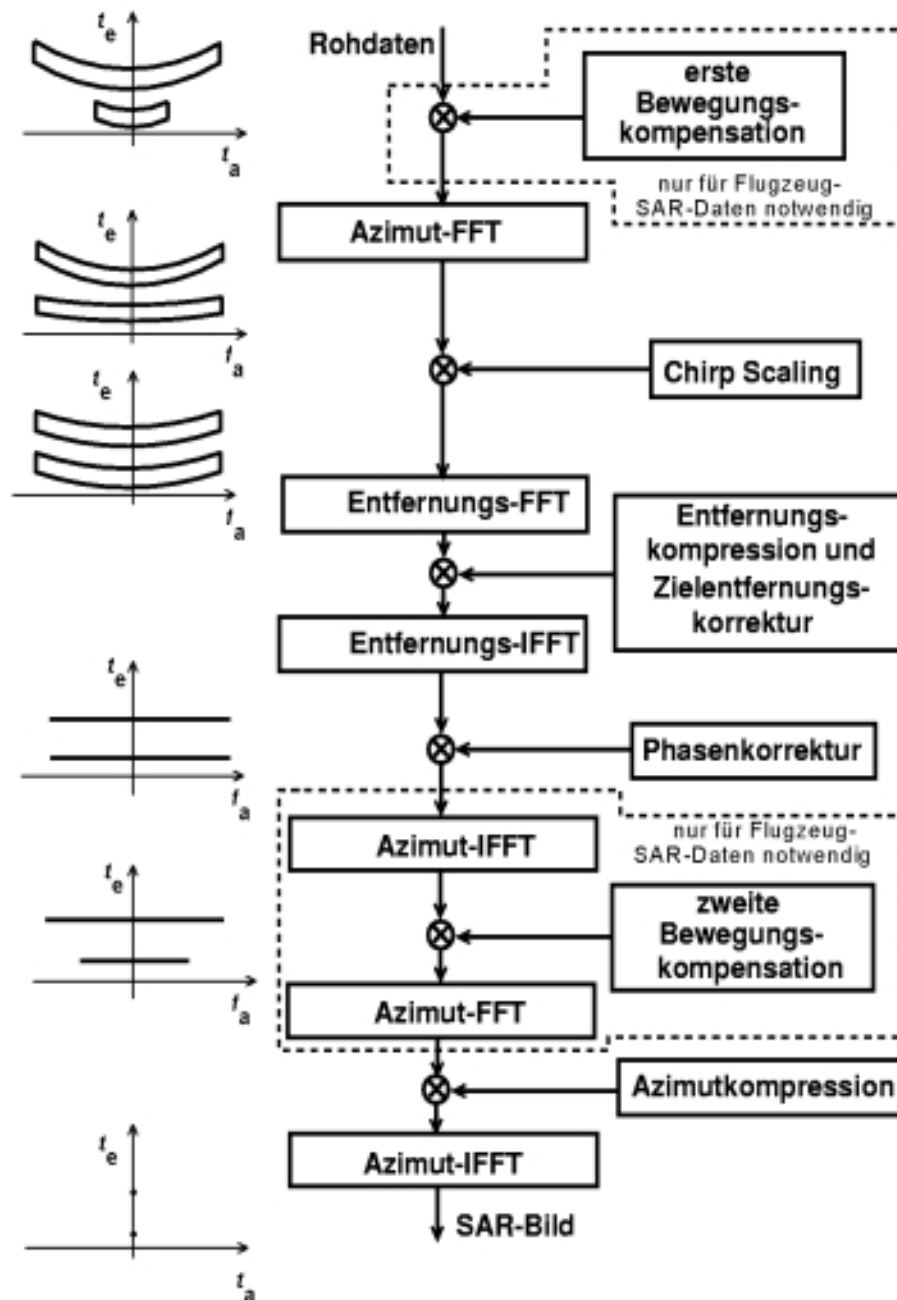


Abb. 4.6: Blockdiagramm des Extended Chirp Scaling-Verfahrens für die Datenverarbeitung mit genauer Bewegungskompensation. Links wird grafisch die Veränderung der Konturdarstellung der SAR-Daten für zwei Punktziele in den verschiedenen Verarbeitungsschritten gezeigt.

Dann werden die SAR-Daten in Entfernungsrichtung komprimiert und die gesamte Zielentfernungsänderung durch die Multiplikation mit einem linearen Phasenterm eliminiert. Die SAR-Daten werden anschließend durch eine inverse FFT in den Range-Doppler-Bereich zurücktransformiert.

- **Phasenkorrektur und Azimut-IFFT**

Der durch die Phasenmultiplikation mit der Chirp Scaling-Funktion entstandene restliche

Phasenfehler wird in diesem Schritt korrigiert. Mittels FFTs werden die SAR-Daten in den Zeitbereich zurücktransformiert.

- **Entfernungsabhängige Bewegungskompensation**

Für die hochauflösende Abbildung bei flugzeuggetragenen SAR-Systemen mit einer instabilen Plattform ist die entfernungsabhängige Bewegungskompensation unentbehrlich. Da am Anfang der Verarbeitung die Bewegungskompensation für eine Referenzentfernung bereits durchgeführt wurde, wird hier nur der restliche Fehler korrigiert.

- **Azimut-Kompression**

Nach Durchführung von Azimut-FFTs werden die SAR-Daten in Azimutrichtung komprimiert. Da die gesamte Zielentfernungsänderung bereits eliminiert wurde, besteht die Azimutreferenzfunktion aus einer eindimensionalen Funktion mit hyperbolischem Phasenverlauf. Anschließend werden die SAR-Daten mittels Azimut-IFFTs in den Zeitbereich zurücktransformiert. Mit der Intensitätsbildung erhält man eine Reflektivitätsdarstellung des abgebildeten Gebiets.

Die Simulationsergebnisse zeigen, daß das Extended Chirp Scaling-Verfahren zu einer fehlerfreien Impulsantwort für Squintwinkel bis zu 30° führt, was für die meisten praktischen Fälle ausreichend ist. Abb. 4.7 zeigt eine zweidimensionale Darstellung der Impulsantwort für 30° Squintwinkel für die Sensor- und Verarbeitungsparameter des E-SAR-Systems im C-Band. Die Verschlechterung der geometrischen Auflösung im Vergleich zum Nominalwert ist in diesem Fall in beiden Richtungen kleiner als 2 %.

4.2.5 Andere Verfahren mit Anwendung der Fourier-Transformation

Grundsätzlich ermöglichen Verfahren zur SAR-Verarbeitung, die auf *Fourier*-Transformationen basieren, eine sehr effiziente Implementierung. Erwähnenswert sind in diesem Zusammenhang noch das **Spectral Analysis**-Verfahren (SPECAN) und das Step Transform-Verfahren.

Das SPECAN-Verfahren erlaubt eine sehr schnelle SAR-Datenverarbeitung mit reduzierter Genauigkeit und Bildqualität [68], [81]. Bei diesem Verfahren wird zuerst eine Mischung des empfangenen Signals in Azimut- oder Entfernungsrichtung mit einer Funktion durchgeführt, die eine entgegengesetzte Frequenzmodulation hat. Im Prinzip erhält man für das Mischprodukt $q(t)$

$$q(t) = s(t) \cdot r(t) = m \cdot e^{j \cdot b \cdot (t-t_0)^2} \cdot e^{-j \cdot b \cdot t^2}$$

$$q(t) = m \cdot e^{j \cdot b \cdot (t_0^2 - 2 \cdot t \cdot t_0)}, \quad |t - t_0| \leq T_i/2. \quad (4.8)$$

Hierbei ist $s(t)$ das empfangene Signal, $r(t)$ das Signal mit entgegengesetzter Modulation, T_i die Integrationszeit und m eine Konstante. Gl. 4.8 zeigt, daß das Ergebnis der Mischung ein Signal mit konstanter Frequenz ist und daß diese Frequenz von der Position des Punktzieles (t_0) abhängt. Eine spektrale Analyse des gemischten Signals führt zu einer fokussierten Impulsantwort. Die normierte Impulsantwort $|U_0(f)|$ nach der *Fourier*-Transformation und

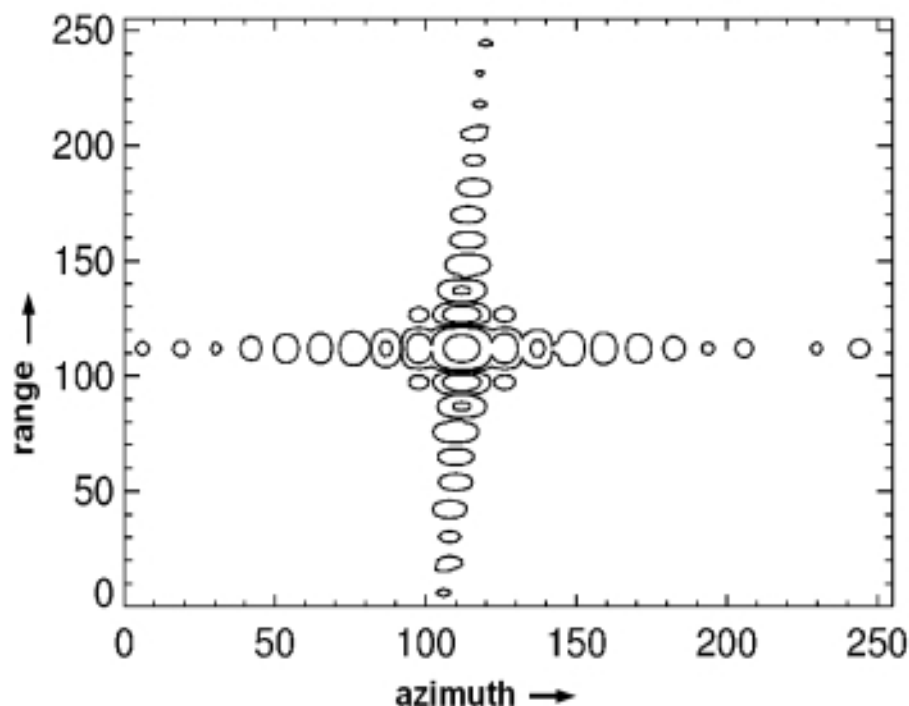


Abb. 4.7: Zweidimensionale Konturdarstellung der Impulsantwort beim Extended Chirp Scaling-Algorithmus. Die wesentlichen Sensor- und Verarbeitungsparameter sind: $\lambda = 0,0566$ m (C-Band), Geschwindigkeit = 75 m/s, $PRF = 1000$ Hz, Azimut- und Entfernungsaufösung: $0,3 \text{ m} \times 2,5 \text{ m}$ (1 Look).

Betragsbildung ist:

$$\begin{aligned}
 |U_0(f)| &= |\mathcal{F} \{m \cdot e^{-j \cdot 2 \cdot b \cdot t_0 \cdot t}\}| \\
 &= |\text{sinc}[T_i \cdot (b \cdot t_0 - \pi \cdot f)]|.
 \end{aligned} \tag{4.9}$$

Da die Frequenzmodulation des Signals $s(t)$ linear ist, gilt

$$\left| U_0 \left(\frac{b}{\pi} \cdot t \right) \right| = |\text{sinc}[T_i \cdot b \cdot (t - t_0)]|. \tag{4.10}$$

Gemäß Gl. 4.10 erhält man grundsätzlich dieselbe sinc-Funktion wie bei der Optimalfilter-Verarbeitung. Das SPECAN-Verfahren hat aber folgende Nachteile:

- Der Punktabstand der Ausgangsdaten $|U(b/\pi \cdot t)|$ hängt vom Modulationsparameter b ab, was dazu führt, daß die Ausgangsdaten bei der Azimutverarbeitung interpoliert werden müssen, damit man den gleichen Punktabstand im gesamten Entfernungsbereich erhält.
- Die Korrektur der linearen und quadratischen Entfernungänderung muß zusätzlich vor der Azimutverarbeitung durchgeführt werden.
- Bei der Mischung wird eine optimale Anpassung des Signalverlaufs nur in der Position t_0 erreicht. Die anderen Signalverläufe werden nur teilweise gemischt, da die Dauer der Mischungsfunktion aufgrund der Abtastung auf T_i beschränkt ist. Damit entstehen Verluste

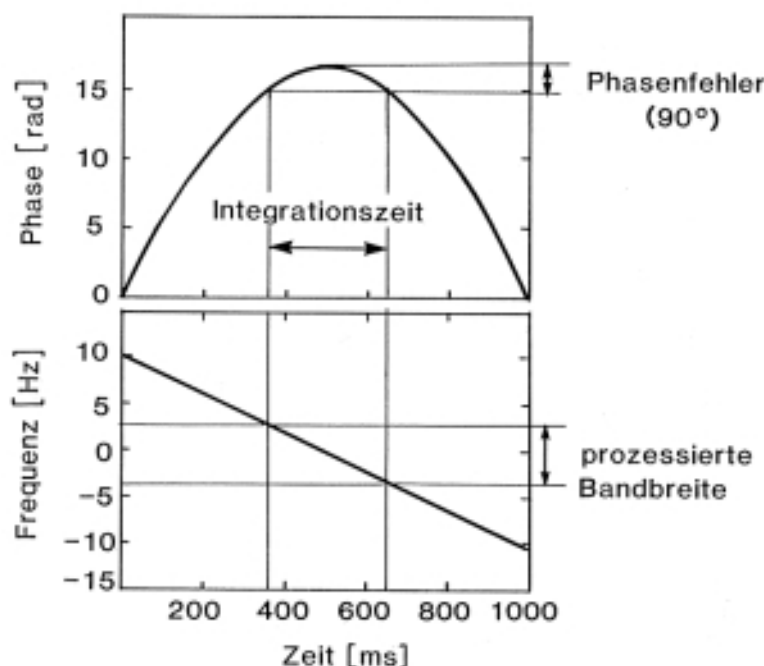


Abb. 4.8: Phasen- und Frequenzverlauf eines Punktziels in Azimut für eine Entfernung von 1500 m (Simulationsparameter des E-SAR-Systems im L-Band)

bei der Verarbeitung, und das Endbild muß mit zusätzlichem Aufwand radiometrisch korrigiert werden.

Zur Behebung der Nachteile des SPECAN-Verfahrens und zur Verbesserung der Bildqualität wurde das Step Transform-Verfahren entwickelt. Dabei teilt man das Mischungssignal in kleine, überlappende Signale auf und ersetzt die direkte *Fourier*-Transformation durch mehrere Transformationen mit kleinerer Punktzahl [68], [81], [89]. Das führt zwar zu hoher Bildqualität, aber der Berechnungsaufwand ist mit der traditionellen Verarbeitung im Frequenzbereich vergleichbar.

4.2.6 Verarbeitung ohne Fokussierung

Reduziert man die Länge der gebildeten synthetischen Apertur so, daß die Fernfeldbedingung gerade noch erfüllt wird, dann ist keine Fokussierung in der Verarbeitung notwendig [52]. Die Verarbeitung erfolgt zwar kohärent, aber nichtfokussierend, das heißt, die Phase des empfangenen Signals wird berücksichtigt, aber nicht korrigiert. Ein Phasenfehler bis zu 90° ($\lambda/4$) wird für das empfangene Signal zugelassen (siehe Abb. 4.8). Der Phasenfehler führt zu einer Impulsantwort mit höheren Nebenkeulen und die begrenzte Länge der synthetischen Apertur führt zu niedrigerer geometrischer Auflösung. Die Länge der synthetischen Apertur x_{unf} hängt mit dem erlaubten Phasenfehler φ_f bei der Verarbeitung zusammen. Aus Gl. 2.6 erhält man

$$x_{\text{unf}} = \sqrt{\frac{2 \cdot \lambda \cdot r_0 \cdot \varphi_f}{\pi}}. \quad (4.11)$$

Mit einem maximal zulässigen Phasenfehler von 90° folgt aus Gl. 4.11 für die maximale Länge der synthetischen Apertur bei einer unfokussierten SAR-Verarbeitung

$$x_{\text{unf}} = \sqrt{\lambda \cdot r_0}. \quad (4.12)$$

Da kein Phasenfehler bei der Verarbeitung zu korrigieren ist, hat die Referenzfunktion hier die Form eines Rechtecks, und das Faltungsintegral besteht einfach aus einer Integration des Azimutsignals, wobei die Integrationszeit durch die Länge der synthetischen Apertur bestimmt wird. Die Impulsantwort lautet damit

$$\begin{aligned} |f_{\text{unf}}(x)| &= \left| s_a(x) * m \cdot \text{rect} \left[\frac{x - x_0}{x_{\text{unf}}} \right] \right| \\ &= \left| m \cdot \int_{-\frac{x_{\text{unf}}}{2} - x_0}^{\frac{x_{\text{unf}}}{2} - x_0} s_a(\chi + x) d\chi \right|. \end{aligned} \quad (4.13)$$

Die weitere Entwicklung von Gl. 4.13 führt zu

$$|f_{\text{unf}}(x)| = \sqrt{\frac{2 \cdot x_{\text{unf}}^2}{\lambda \cdot r_0}} \cdot \{ [C(\varepsilon_1) + C(\varepsilon_2)]^2 + [S(\varepsilon_1) + S(\varepsilon_2)]^2 \}^{\frac{1}{2}}. \quad (4.14)$$

$C(\varepsilon)$ und $S(\varepsilon)$ sind die reelle bzw. imaginäre Komponente des komplexen Fresnel-Integrals, wobei

$$\varepsilon_1 = \frac{x_{\text{unf}}}{\sqrt{\lambda \cdot r}} - \frac{2 \cdot (x - x_0)}{\sqrt{\lambda \cdot r}}$$

und

$$\varepsilon_2 = \frac{x_{\text{unf}}}{\sqrt{\lambda \cdot r}} + \frac{2 \cdot (x - x_0)}{\sqrt{\lambda \cdot r}}.$$

Abb. 4.9 zeigt die Impulsantwort für verschiedene Werte des Phasenfehlers φ_f . Je kleiner der Phasenfehler, desto niedriger sind die Nebenkeulen der Impulsantwort. Kleinere Phasenfehler, die der Verarbeitung von kleineren Signalbandbreiten entsprechen, führen zu reduzierter geometrischer Auflösung.

In [52] sind diesbezüglich die Eigenschaften der Impulsantwort (geometrische Auflösung, *PSLR* und *ISLR*) in Abhängigkeit vom Phasenfehler optimiert. Es stellte sich heraus, daß ein Phasenfehler von ca. 35° zu einem Bild mit bester Qualität führt. Die *PSLR*- und *ISLR*-Werte betragen dabei 12,5 dB bzw. 9,3 dB im Gegensatz zur traditionellen Impulsantwort mit 9 dB bzw. 6,3 dB.

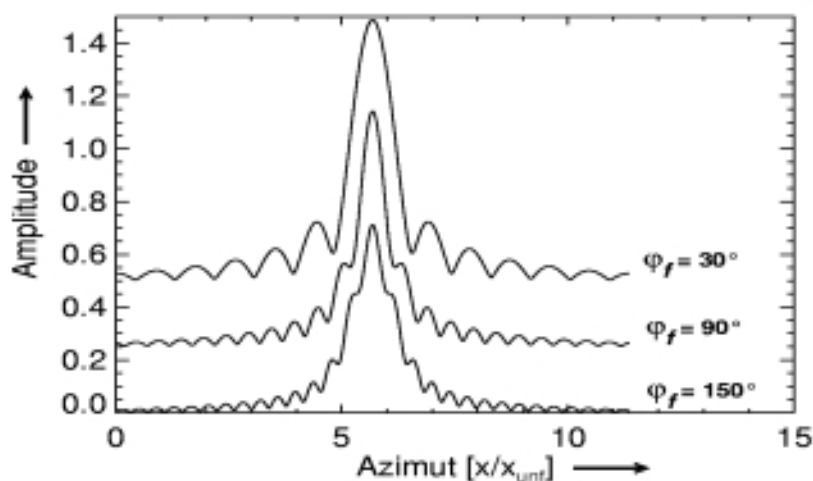


Abb. 4.9: Impulsantwort der Verarbeitung ohne Fokussierung für verschiedene Phasenfehler φ_f

Für die Implementierung der Verarbeitung ohne Fokussierung wird das gleitende Mittelwertverfahren angewendet. Dabei erfordert die Integration gemäß Gl. 4.13 nur geringen Aufwand. Man benötigt nur eine komplexe Addition und eine komplexe Subtraktion pro korreliertem Punkt. Dies reduziert den Verarbeitungsaufwand dramatisch.

Um die Eigenschaften der Impulsantwort weiter zu verbessern, kann man eine Gewichtung mit einer Dreieckfunktion in die Verarbeitung ohne Fokussierung einführen [52]. Dieser Algorithmus nutzt die Tatsache, daß die Faltung zweier Rechteckfunktionen gleicher Länge eine Dreieckfunktion ergibt. Durch zweimalige Anwendung des gleitenden Mittelwertverfahrens wird das Azimutsignal zweimal mit einer Rechteckfunktion gefaltet, was einer einzigen Korrelation mit einer Dreieckfunktion entspricht. Die Eigenschaften der Impulsantwort werden dadurch stark beeinflußt, weil die Gewichtungsfunktion ein kleineres Gewicht für den Bereich mit größerem Phasenfehler einfügt, d. h. an den Grenzen der synthetischen Apertur. Mit dieser Gewichtung kann ein größerer Phasenfehler bei der Verarbeitung zugelassen werden. Die optimierte Impulsantwort hat einen *PSLR*- und *ISLR*-Wert von 28,1 dB bzw. 13,9 dB für einen Phasenfehler von 115° .

Abb. 4.10 zeigt den Vergleich der Azimutprozessierung ohne und mit Fokussierung. Für die unfokussierte Verarbeitung wurde die Korrelation zweier Rechteckfunktionen verwendet, so daß die Nebenzipfel stark unterdrückt werden. Im Fall des ERS-1 verschlechtert sich die Azimutauflösung von 7 m auf 95 m bei der unfokussierten Verarbeitung. Während bei der fokussierten Verarbeitung die SAR-Daten mit einem Look in Azimut- und Entfernungsrichtung verarbeitet wurden, prozessierte man bei der unfokussierten Azimutverarbeitung die SAR-Daten mit vier Looks in Entfernungsrichtung, um einen Ausgleich der Auflösung in beiden Richtungen zu erreichen.

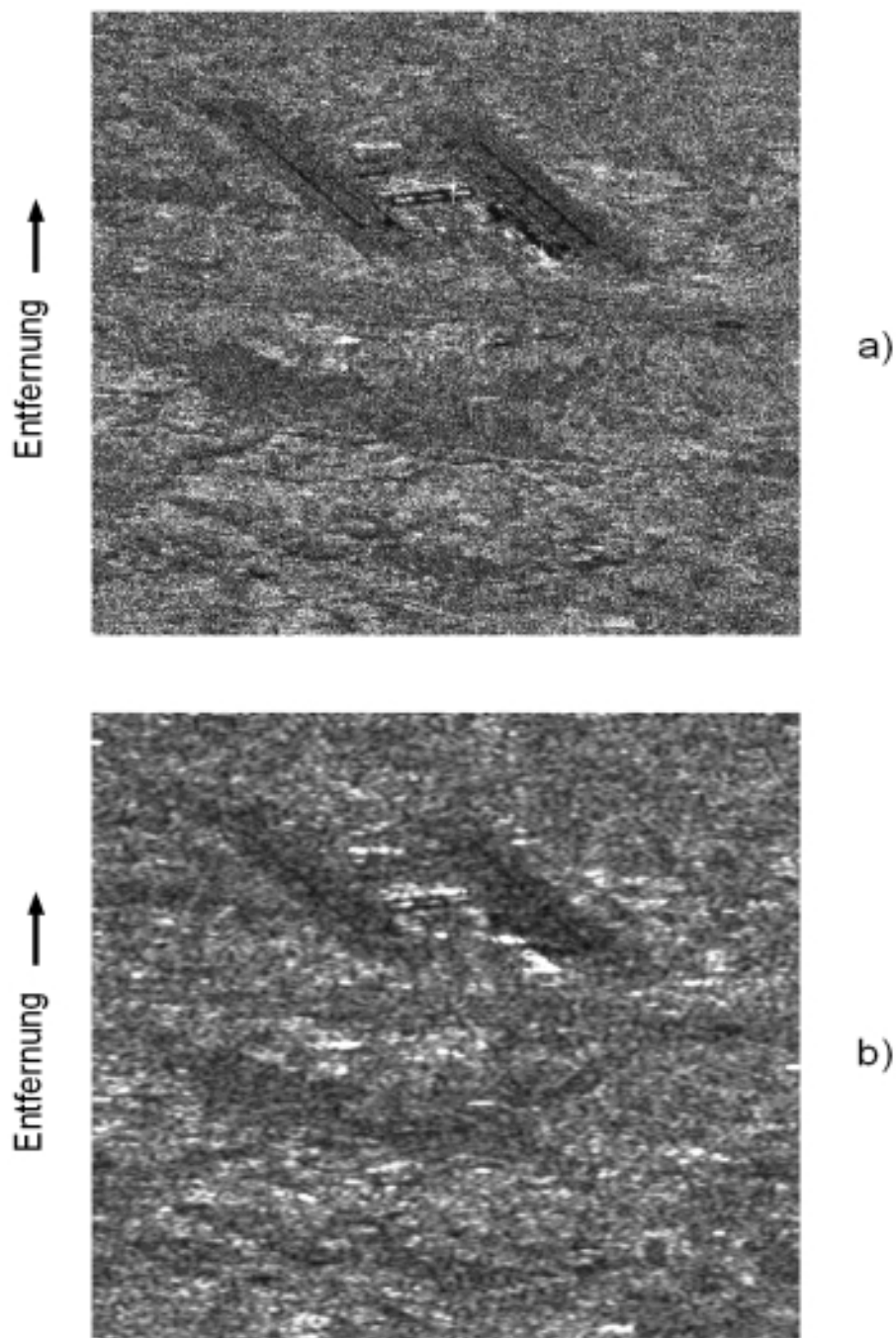


Abb. 4.10: ERS1-Bild des Erdinger Flughafens bei München. a) Fokussierte Verarbeitung mit einem Look. Azimut- und Entfernungsaufösung betragen $7 \text{ m} \times 13 \text{ m}$. b) Unfokussierte Azimutverarbeitung mit vier fokussierten Looks in Entfernungsrichtung. Azimut- und Entfernungsaufösung betragen $95 \text{ m} \times 30 \text{ m}$

4.3 Zusätzliche Verarbeitungsschritte

Bilder mit höchster Qualität benötigen zusätzliche Verarbeitungsschritte, wie z. B. Bestimmung des Dopplerschwerpunktes, des eindeutigen PRF-Bands und der Dopplerrate. Für einige dieser Verarbeitungsschritte ist eine Spektralanalyse des empfangenen Signals notwendig.

Wegen der linearen Frequenzmodulation in Azimutrichtung besitzt das Leistungsspektrum

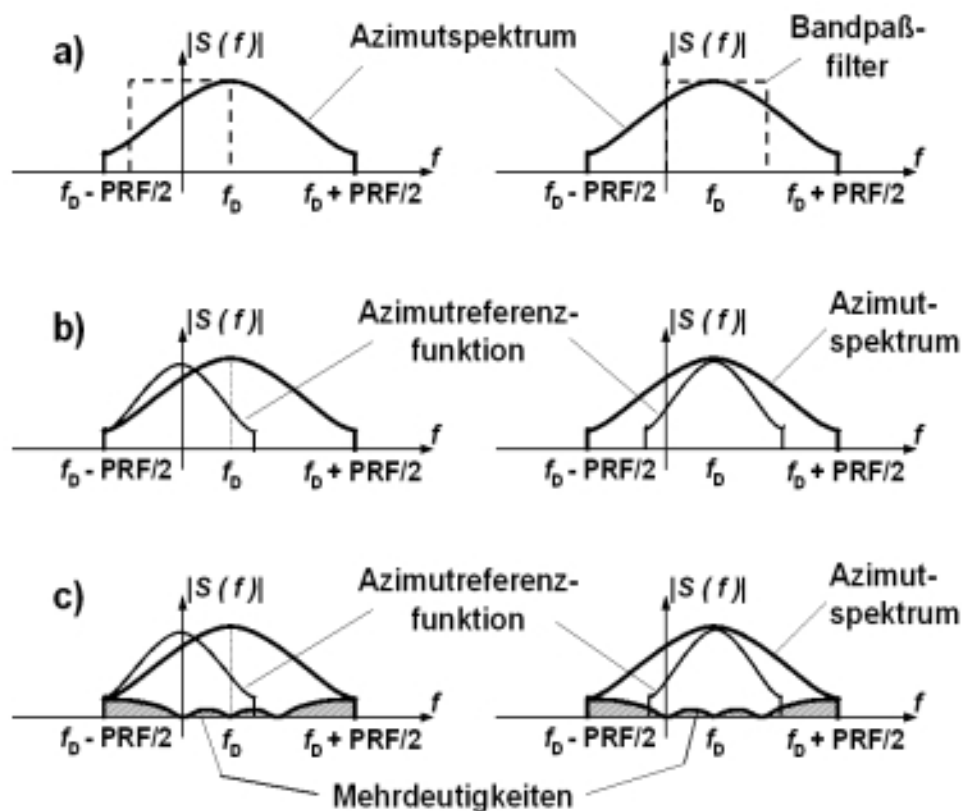


Abb. 4.11: Auswirkungen einer fehlerhaften Bestimmung des Dopplerschwerpunkts: a) Azimutbandpaßfilter, b) Anpassung der Referenzfunktion und c) Störung durch Mehrdeutigkeitsanteil

eines einzelnen abgebildeten Punktziels die Form des Azimut-Antennendiagramms. Für homogene Gebiete erhält man durch ausreichende Mittelung der Spektren auch eine Abschätzung des Azimut-Antennendiagramms.

4.3.1 Bestimmung des Dopplerschwerpunktes

Die Bestimmung des Dopplerschwerpunktes des Azimutspektrums ist ausschlaggebend für die Verarbeitung in Azimut [35], [36], [39], [51]. Falls eine Reduzierung der Azimutbandbreite für die Verarbeitung notwendig ist (zur Reduktion der Datenrate), muß das Bandpaßfilter um den Dopplerschwerpunkt zentriert werden, um eine Verschlechterung des Signal/Rausch-Verhältnisses zu vermeiden.

Abb. 4.11 zeigt das Spektrum des digitalisierten Azimutsignals bei einer Abtastrate, die gleich der Pulsfrequenz¹ (PRF) ist. Dabei ist das Spektrum um den Dopplerschwerpunkt verschoben. Auf der linken Seite von Abb. 4.11a wird die falsche Positionierung des Bandpaßfilters gezeigt, wodurch eine Verschlechterung des Signal/Rausch-Verhältnisses verursacht wird. Mit der Filterung gemäß Abb. 4.11a rechts kann die Abtastung reduziert werden, wobei das Signal/Rausch-Verhältnis für die gefilterten Daten maximiert wird.

¹ In der Praxis muß die PRF um ca. 20 % größer als die Bandbreite des Azimutsignals sein, damit Mehrdeutigkeiten im Endbild vermieden werden. Die Länge der abgebildeten Streifenbreite, d. h. die Dauer des empfangenen Echos, bestimmt die obere Grenze für die PRF-Auswahl, da elektromagnetische Wellen nicht gleichzeitig empfangen und gesendet werden können.

Ein weiterer Grund für die genaue Bestimmung des Dopplerschwerpunkts liegt in der Notwendigkeit der Anpassung der Azimutreferenzfunktion an den Frequenzverlauf der Azimutmodulation, wie Abb. 4.11b veranschaulicht. Falls ein falscher Wert des Dopplerschwerpunkts benutzt wird (Abb. 4.11 links), verschlechtert sich das Signal/Rausch-Verhältnis.

Anschließend wird in Abb. 4.11c links die Erhöhung des Mehrdeutigkeitsanteils bei der Bestimmung eines falschen Dopplerschwerpunkts gezeigt. Die Mehrdeutigkeiten (engl.: ambiguities) bei der Azimutverarbeitung hängen sowohl von den Nebenkeulen der Antenne in Azimutrichtung als auch von der Abtastung durch die Pulsfrequenz ab. Der Dopplerfrequenzbereich außerhalb der PRF-Bandbreite wird bei der Abtastung wieder in der PRF-Bandbreite gefaltet (siehe gestrichelte Fläche in Abb. 4.11c). Dieses gefaltete Signal führt zu Mehrdeutigkeiten im Endbild [35], [51] die wesentlich stärker sind, falls die Azimutreferenzfunktion nicht um den Dopplerschwerpunkt zentriert ist (siehe Abb. 4.11c links).

Abb. 4.12 zeigt ein Beispiel zur Verarbeitung mit einer korrekten und einer fehlerhaften Bestimmung des Dopplerschwerpunktes. Deutlich sind die Mehrdeutigkeiten von starken Zielen zu sehen sowie der Kontrastverlust im Bereich der Landebahn beim Bild mit falschem Wert des Dopplerschwerpunktes.

Der Wert des Dopplerschwerpunkts kann entweder aus der Lageinformation der Plattform entnommen (falls sie genau genug verfügbar ist) oder aus dem Azimutspektrum berechnet werden. Am häufigsten wird das Verfahren des Ausgleichs von Energieanteilen (engl.: energy balance) für das Azimutspektrum [35] oder ein äquivalentes Verfahren im Zeitbereich [39] benutzt.

Das zuerst genannte Verfahren basiert auf der Aufteilung des Azimutspektrums in zwei Teile und auf der Berechnung der Energie eines jeden Teils, wobei die Position der Aufteilung des Spektrums einem geschätzten Wert des Dopplerschwerpunkts entspricht. Sind die Energien in beiden Teilen gleich, d. h. ist die Differenz der Energie beider Teile gleich null, dann entspricht der geschätzte Wert dem Optimalwert des Dopplerschwerpunkts. Vor der Berechnung der Energie in jedem Teil des Spektrums wird üblicherweise eine Mittelung mehrerer Azimutspektren durchgeführt. Dabei berechnet man für jedes Entfernungstor (Range Gate) ein Azimutspektrum. Die Mittelung über N Spektren verbessert die Genauigkeit der Dopplerschwerpunkt-Bestimmung für eine homogene Szene um den Faktor \sqrt{N} . Eine Gewichtung des Azimutspektrums vor der Berechnung der Energie kann die Genauigkeit der Bestimmung des Dopplerschwerpunkts maximieren [35].

4.3.2 Bestimmung des eindeutigen PRF-Bands des Dopplerschwerpunktes

Das Verfahren des Ausgleichs von Energieanteilen oder ein äquivalentes Verfahren gibt immer den Wert des Dopplerschwerpunktes im Basisband an, d. h. der berechnete Wert liegt zwischen $-PRF/2$ und $+PRF/2$. Dies führt dazu, daß der absolute Wert des Dopplerschwerpunkts nicht eindeutig, sondern nur mehrdeutig bestimmt werden kann. Die Mehrdeutigkeiten liegen bei $f_{D,bb} \pm n \cdot PRF$, wobei n eine ganze Zahl (PRF-Bandnummer) und $f_{D,bb}$ der berechnete Wert im Basisband des Dopplerschwerpunkts ist.

Die Verwendung der mehrdeutigen, fehlerhaften Werte für den Dopplerschwerpunkt führt zu

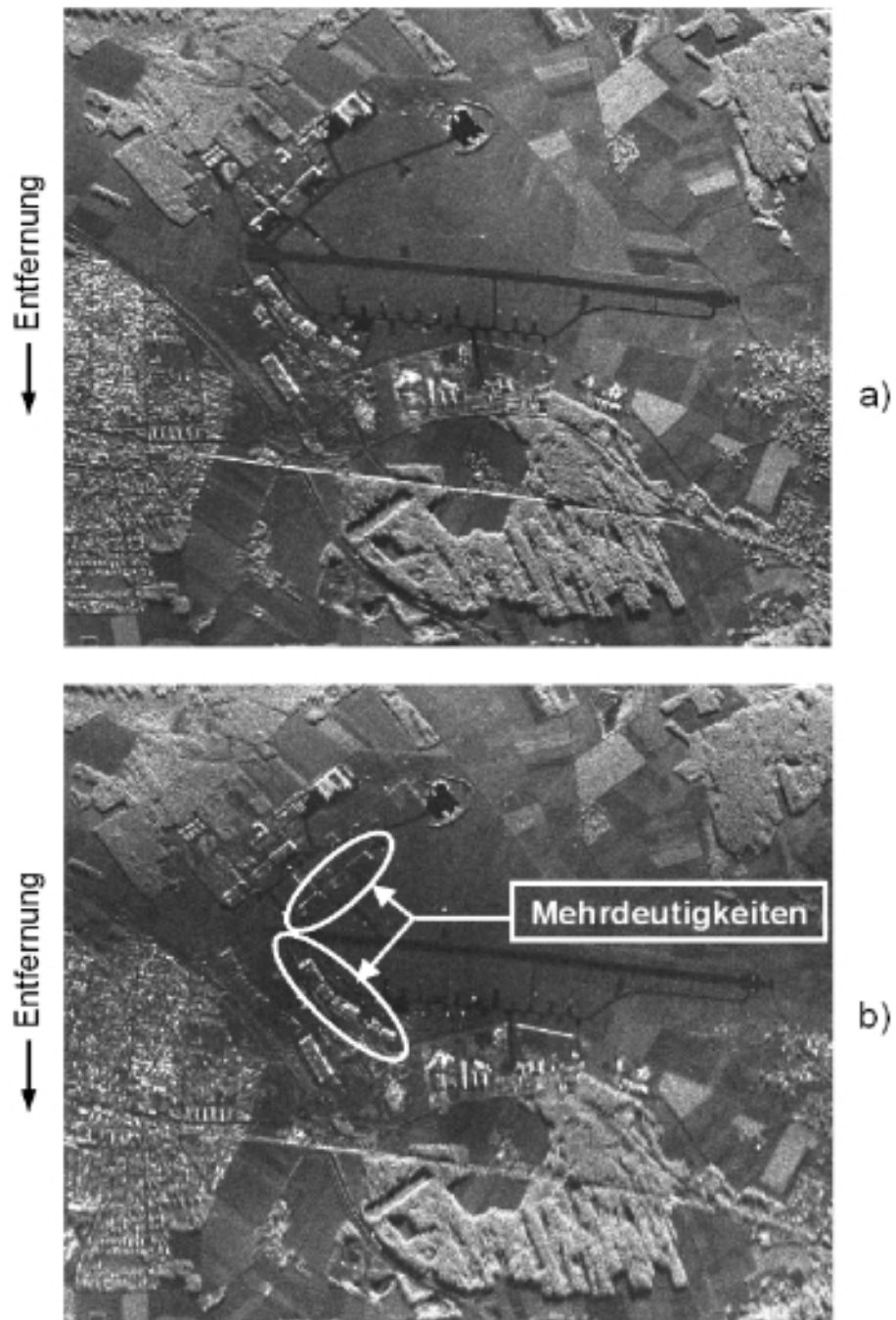


Abb. 4.12: Bild der Landebahn von Oberpfaffenhofen, das mit dem E-SAR System im C-Band aufgenommen wurde: a) Verarbeitung mit korrekter Bestimmung des Dopplerschwerpunktes und b) Verarbeitung mit fehlerhafter Bestimmung des Dopplerschwerpunktes.

einer falschen Kompensation des linearen Terms der Zielentfernungsänderung und zu einer falschen Positionierung der Bildpunkte in Azimut- und Entfernungsrichtung. Darüber hinaus verursacht die falsche Kompensation der Zielentfernungsänderung eine Fehlanpassung des Optimalfilters an das Signal, so daß eine Verschlechterung der Punktzielantwort zu erwarten ist [13]. Zur Lösung der Mehrdeutigkeit des Dopplerschwerpunkts werden in [2] und [13] einige Verfahren vorgeschlagen.

Üblicherweise wird die Mehrfach-PRF-Technik angewendet, die auf der Berechnung des Dopplerschwerpunkts mit drei verschiedenen PRF-Einstellungen basiert. Für jeden Wert der PRF gilt:

$$f_{D1} = n_1 \cdot PRF_1 + f_{D,bb1} , \quad (4.15a)$$

$$f_{D2} = n_2 \cdot PRF_2 + f_{D,bb2} , \quad (4.15b)$$

$$f_{D3} = n_3 \cdot PRF_3 + f_{D,bb3} , \quad (4.15c)$$

wobei n_1, n_2 und n_3 die Mehrdeutigkeitsnummern, PRF_1, PRF_2 und PRF_3 die drei angewendeten PRFs, $f_{D,bb1}, f_{D,bb2}$ und $f_{D,bb3}$ die Werte des Dopplerschwerpunkts im Basisband und f_{D1}, f_{D2} und f_{D3} die eindeutigen Werte des Dopplerschwerpunkts sind. Die drei PRFs werden innerhalb eines kurzen Intervalls (etwa 1 s) umgeschaltet. Zur Bestimmung des eindeutigen Dopplerschwerpunktes werden verschiedene Werte von n_1, n_2 und n_3 in die Gln. (4.15a) bis (4.15c) eingesetzt. Bei einer richtigen Schätzung von n_1, n_2 und n_3 sollten die drei Werte des Dopplerschwerpunkts f_{D1}, f_{D2} und f_{D3} idealerweise gleich sein.

Ein anderes Verfahren zur Lösung der PRF-Mehrdeutigkeit basiert auf der Kreuzkorrelation in Entfernungsrichtung zweier Looks, die bei der Multilook-Verarbeitung in Azimut gewonnen werden. Durch die Kreuzkorrelation kann man eine Verschiebung in Entfernungsrichtung Δr zwischen den Looks bestimmen:

$$\Delta r = \Delta t \cdot v \cdot \sin \theta_s , \quad (4.16)$$

Hierbei ist Δt das Zeitintervall zwischen den Looks. Mit Gl. 2.11 erhält man

$$\Delta r = \frac{\Delta t \cdot \lambda}{2} \cdot (f_{D,bb} + n \cdot PRF) = \frac{\Delta t \cdot \lambda}{2} \cdot f_D . \quad (4.17)$$

Mit Gl. 4.17 kann der eindeutige Wert f_D des Dopplerschwerpunkts bestimmt werden, falls die Genauigkeit von Δr ausreicht. Für das X-SAR-System im Shuttle-Experiment von 1994 muß Δr mit einer Genauigkeit von 5% eines Entfernungstors ermittelt werden, um den Dopplerschwerpunkt eindeutig zu bestimmen. Diese Genauigkeit wird bei Szenen mit niedrigem Kontrast nicht erreicht. Deswegen verwendet man beispielsweise für das X-SAR-System am Anfang und Ende einer Datensatzaufnahme die Mehrfach-PRF-Technik.

4.3.3 Bestimmung der Dopplerrate

Die Bestimmung der Dopplerrate k_a spielt wie die Bestimmung des Dopplerschwerpunkts eine wichtige Rolle in der Azimutverarbeitung. Die Anpassung der Frequenzmodulation der Azimutreferenzfunktion an die des Azimutsignals muß gewährleisten, daß sich die Eigenschaften der Impulsantwort nicht verschlechtern. In [11] wird diese Verschlechterung quantitativ analysiert.

Für eine Plattform mit konstanter Geschwindigkeit und gerader Flugbahn wird die Dopplerrate gemäß Gl. 2.7 berechnet. Falls die Flugparameter genau genug verfügbar sind, wird die Ge-

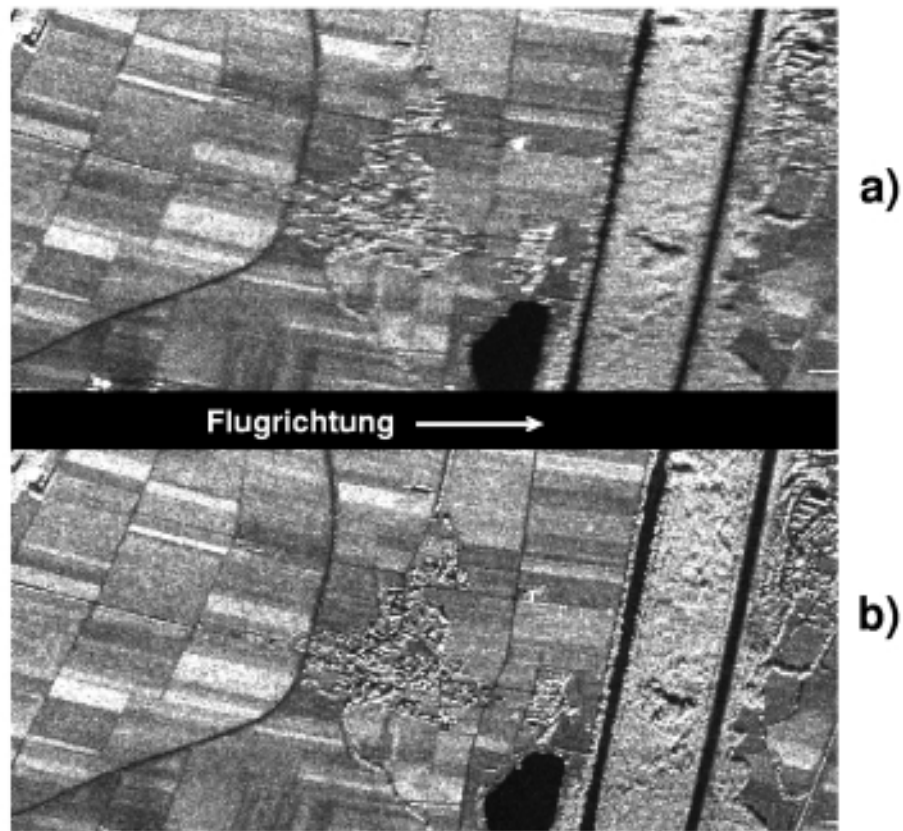


Abb. 4.13: E-SAR-Aufnahme der Iller bei Altenstadt (Bayern) im C-Band: a) ohne Auto-Fokus und b) mit Auto-Fokus

geschwindigkeit v und die Entfernung r_0 zwischen Plattform und Ziel in Gl. 2.7 eingesetzt und daraus die Dopplerrate bestimmt.

Da sich die Bewegungsparameter der Plattform ändern und auch zum Teil ungenau gemessen werden, sind zur Bestimmung der Dopplerrate aus dem Azimutsignal verschiedene Verfahren entwickelt worden [35], [57], [63]. Diese Verfahren werden als Auto-Fokus-Verfahren bezeichnet, weil durch ihre Anwendung eine automatische Fokussierung bei der Verarbeitung der SAR-Bilder erreicht wird.

Abb. 4.13 zeigt ein Beispiel der Verarbeitung ohne und mit Auto-Fokus. Die Geschwindigkeit in diesem Flug änderte sich von 87 m/s am Anfang der Aufnahme (links im Bild) auf 77 m/s am Ende (rechts im Bild). Da man eine konstante Geschwindigkeit von 87 m/s für die Verarbeitung ohne Auto-Fokus gewählt hat, sind beide Bilder am Anfang der Aufnahme gleich gut fokussiert. Das Bild ohne automatische Fokussierung wird im Lauf der Aufnahme immer weniger fokussiert, da der Geschwindigkeitsfehler bei der Verarbeitung größer wird. Am Ende der Aufnahme beträgt der Fehler ca. 10 m/s.

Für die automatische Fokussierung wird am häufigsten das Verfahren der Optimierung des Bildkontrasts sowie das Verfahren der Kreuzkorrelation zweier Looks angewendet.

Beim zuerst genannten Verfahren wird die Azimutverarbeitung mit Referenzfunktionen verschiedener Dopplerraten durchgeführt und der entsprechende Bildkontrast gemessen. Die

Dopplerrate der Referenzfunktion, die zum höchsten Bildkontrast führt, wird dann als die optimale Rate angenommen.

Das zweite Verfahren benutzt bei der Multilook-Verarbeitung in Azimut das Ergebnis der Korrelation zweier Looks, die der gleichen Szene entsprechen. Da die Referenzfunktionen der Looks unterschiedliche Frequenzbereiche der Dopplermodulation umfassen, ist die Position von Look zu Look verschoben. Durch eine Kreuzkorrelation zwischen den Looks kann diese Verschiebung bestimmt werden. Falls die angenommene Dopplerrate für die Berechnung der Referenzfunktion korrekt ist, stimmt das Ergebnis der Kreuzkorrelation mit dem berechneten Wert der Verschiebung überein. Aus Gl. 2.7 erhält man für die räumliche Verschiebung x_{12}

$$x_{12} = \frac{v \cdot f_{12}}{k_a} = v \cdot t_{12} . \quad (4.18)$$

Dabei beschreibt t_{12} die zeitliche Verschiebung der Looks und f_{12} die Frequenzverschiebung der Referenzfunktion. Für eine falsche Dopplerrate k_{af} ändert sich auch die Verschiebung gemäß

$$x_{12f} = \frac{v \cdot f_{12}}{k_{af}} = \frac{v \cdot k_a \cdot t_{12}}{k_{af}} . \quad (4.19)$$

Durch die Kreuzkorrelation der beiden Looks kann die Verschiebung Δx in bezug auf x_{12} bestimmt werden:

$$\Delta x = x_{12f} - x_{12} = v \cdot \frac{(k - k_{af})}{k_{af}} \cdot t_{12} , \quad (4.20)$$

und die geschätzte Dopplerrate ist

$$k_a = k_{af} + \frac{k_{af} \cdot \Delta x}{v \cdot t_{12}} . \quad (4.21)$$

Damit kann man die korrekte Dopplerrate für die Azimutverarbeitung berechnen. Die Genauigkeit dieses Verfahrens reduziert sich, falls die Szene keine kontrastreichen Objekte oder Punktziele enthält. Das Ergebnis der Kreuzkorrelation gibt in diesem Fall keine genaue Information über die Verschiebung Δx an, so daß die Anwendung von Gl. 4.21 nicht möglich ist.

4.3.4 Korrektur der Zielentfernungsänderung

Die Zielentfernungsänderung, bestehend aus den linearen und quadratischen Komponenten, wird durch den Squintwinkel bzw. die Entfernungsvariation zwischen Plattform und Ziel verursacht. Falls sich die Zielentfernungsänderung über mehrere Entfernungstore ausdehnt und nicht korrigiert wird, verschlechtert sich die Impulsantwort in Entfernungsrichtung und auch in Azimutrichtung, da der Ort des Optimalfilters nicht an das Azimutsignal angepaßt ist. Aus Gln. (2.5), (2.11) und (2.12) erhält man die Entfernungsvariation in Abhängigkeit von der Zeit.

$$r(t) = -\frac{\lambda}{2} \cdot \left(f_D \cdot t + \frac{k_a}{2} \cdot t^2 \right) , \quad |t| \leq \frac{r_0 \cdot \Theta_a}{2 \cdot v} . \quad (4.22)$$

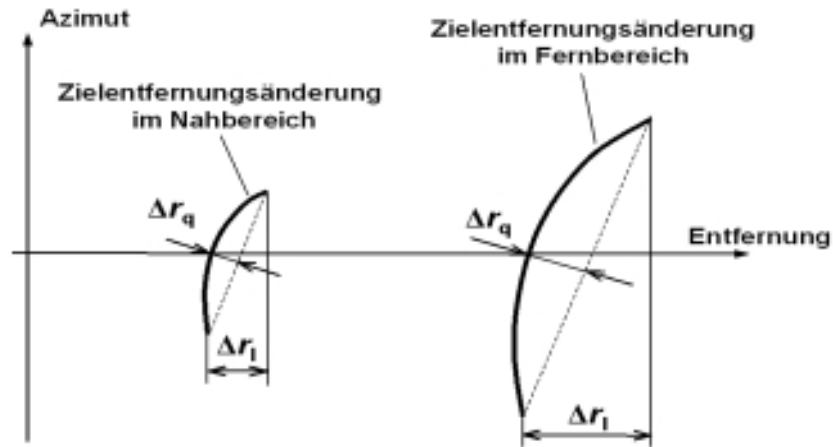


Abb. 4.14: Darstellung der linearen und quadratischen Zielentfernungsänderung für Nah- und Fernbereich

Abb. 4.14 stellt die lineare und quadratische Zielentfernungsänderung gemäß Gl. 4.22 für Nah- und Fernbereich dar. Die Korrektur der Zielentfernungsänderung besteht aus einer Verschiebung der Bildpunkte in Entfernungsrichtung. Da die Verschiebung in der Regel nicht nur aus ganzen Abtastintervallen besteht, muß eine Interpolation durchgeführt werden. Ohne die Interpolation entstehen Amplitudenfehler im Signalverlauf eines Punktziels, die zu erhöhten Nebenkeulen im prozessierten Bild führen.

Der erste Term von Gl. 4.22 stellt die lineare Komponente der Zielentfernungsänderung dar, die eine von der Entfernung unabhängige Variationsrate hat, falls der Dopplerschwerpunkt in Abhängigkeit von der Entfernung als konstant betrachtet werden kann. In Abb. 4.14 ist zwar die gesamte Variation des linearen Anteils in Nah- und Fernbereich unterschiedlich, aber die Variationsrate ist aufgrund der Annahme eines konstanten Dopplerschwerpunkts gleich groß.

Die Korrektur der linearen Komponente ist erforderlich, falls die Zielentfernungsänderung größer als die halbe Auflösungszelle in Entfernungsrichtung ist. Mit Gl. 4.22 ergibt sich die lineare Zielentfernungsänderung innerhalb der Zeit, in der das Ziel beleuchtet wird. Es gilt

$$\Delta r_l = \frac{\lambda \cdot f_D \cdot r_0 \cdot \Theta_a}{2 \cdot v}, \quad (4.23)$$

wobei Δr_l die lineare Zielentfernungsänderung bezeichnet. Mit den Gln. (2.11) und (2.26) erhält man

$$\frac{\theta_s \cdot r_0 \cdot \lambda}{\delta_a} \geq \delta_e. \quad (4.24)$$

Gilt die Bedingung von Gl. 4.24, ist die Korrektur der linearen Zielentfernungsänderung notwendig.

Für den quadratischen Teil der Zielentfernungsänderung wird folgende Voraussetzung in bezug auf die Entfernungsauflösung gemacht:

$$\Delta r_q = \frac{\lambda \cdot k_a \cdot r_0^2 \cdot \Theta_a^2}{16 \cdot v^2} \geq \frac{\delta_e}{2}. \quad (4.25)$$

Aus den Gln. (2.8), (2.12) und (2.26) ergibt sich damit folgende Bedingung zur Notwendigkeit der Durchführung der quadratischen Zielentfernungsänderung:

$$\frac{r_0 \cdot \lambda^2}{16 \cdot \delta_a^2} \geq \delta_e. \quad (4.26)$$

Die Abhängigkeit des Terms Δr_q von der Entfernung führt dazu, daß die Korrektur der quadratischen Zielentfernungsänderung nicht für den ganzen Entfernungsbereich mit gleicher Verschiebung oder Interpolation in Entfernungsrichtung durchgeführt werden kann. Der gesamte Entfernungsbereich muß in Teilbereiche unterteilt werden, in denen dieselbe quadratische Wanderung Δr_q angenommen werden kann. Die Ausdehnung der Bereiche wird so definiert, daß der Fehler der Korrektur der quadratischen Wanderung in jedem Bereich kleiner als $\delta_e/2$ ist.

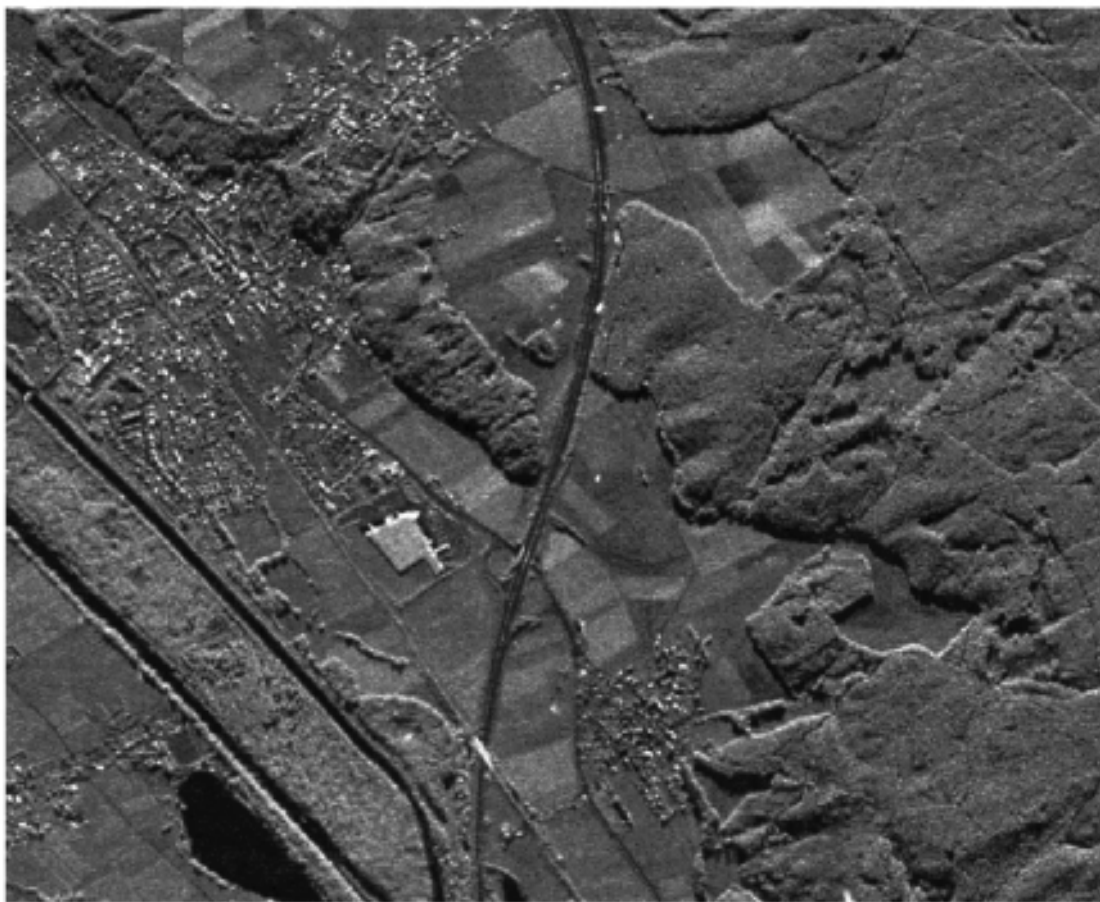
4.4 Echtzeit-SAR-Verarbeitung

Aufgrund der hohen Datenrate des empfangenen Signals (üblicherweise größer als 30 MBit/s) und der aufwendigen Datenverarbeitung zum Generieren eines SAR-Bildes sind häufig mehr als 5×10^9 Operationen/Sekunde notwendig, um eine Echtzeitverarbeitung mit hoher Bildqualität durchzuführen. Trotz des beträchtlichen gerätetechnischen Aufwands bietet die Echtzeitprozessierung wichtige Vorteile:

- Überwachung des SAR-Sensors in Echtzeit bezüglich seiner Funktionstüchtigkeit;
- Die Echtzeit-Abbildung des überflogenen Gebietes ermöglicht eine sofortige Auswertung der Bilder. Dies ist für viele Zwecke, wie z. B. im Sicherheitsbereich oder zur Katastrophenbeobachtung, unabdingbar;
- Die prozessierten Bilddaten haben gegenüber den Rohdaten eine reduzierte Datenrate, wodurch der Datenaufnahmeprozess vereinfacht und die gespeicherte Datenmenge reduziert wird. Die Reduzierung der Datenrate ist auf die Anwendung der Multilook-Verarbeitung oder auf die Nutzung kleinerer Dopplerbandbreiten bei der SAR-Datenprozessierung zurückzuführen;
- Falls die Offline-Verarbeitung eine bessere Bildqualität ermöglicht, können die in Echtzeit prozessierten Bilddaten als Referenz benutzt werden, da für die Offline-Verarbeitung wegen der langen Verarbeitungszeit nur einige Teile des gesamten aufgenommenen Datensatzes ausgewählt werden können.

Diese Argumente sprechen für die Entwicklung eines hochauflösenden Echtzeitprozessors. Am Institut für Hochfrequenztechnik und Radarsysteme des DLR wurde ein hochauflösender Echtzeit-SAR-Prozessor für das E-SAR-System entwickelt, der die Impulskompression in Entfernungs- und Azimutrichtung unter Verwendung eines Subaperturverfahrens durchführt [52].

Es zeigt sich, daß man mit diesem Verfahren den Rechenaufwand für die Bildprozessierung wesentlich reduzieren kann, ohne die Bildqualität zu beeinträchtigen.



Flugrichtung →

Abb. 4.15: In Echtzeit prozessierte E-SAR-Daten mit $3\text{ m} \times 4\text{ m}$ Auflösung in Entfernungs- und Azimutrichtung. Die Streifenbreite in Schrägentfernung beträgt jeweils rund $3\text{ km} \times 4\text{ km}$.

In Abb. 4.15 ist ein in Echtzeit prozessiertes Radarbild für das X-Band dargestellt. Deutlich zu sehen sind der Fluß Iller bei Altenstadt mit seinem Kanal und die Autobahn A7 in der Mitte des Bildes. Tab. 4.1 zeigt die technischen Parameter, die für den Echtzeitprozessor spezifiziert und erzielt wurden.

Der dargestellte Bildausschnitt in Abb. 4.15 entspricht einer Flugzeit von rund einer Minute.

Spezifizierte Parameter	min.	typisch	max.
Plattformgeschwindigkeit [m/s]	50	80	300
Entfernung [m]	1000	4500	40 000
PRF [Hz]	340	1000	2480
Azimutauflösung [m]	16	4	3
Entfernungsauflösung [m]	18	3	2.5
Anzahl von Looks	1	8	16

Tabelle 4.1: Spezifikation des Echtzeit-SAR-Prozessors für das E-SAR-System des DLR

Die Offline-Verarbeitung dieses Bildausschnitts dauert mit einem PC-Rechner vom Typ Pentium III mit 800 MHz Taktfrequenz etwa 4 Stunden. Dies entspricht einer um den Faktor 240 langsameren Verarbeitung gegenüber der Echtzeitverarbeitung.

Die Entwicklung eines Echtzeitprozessors sowohl für Satelliten- als auch Flugzeug-SAR-Daten ist erforderlich, um mit vertretbarem Aufwand die Datenverarbeitung der zunehmenden Anzahl von SAR-Sensoren zu bewältigen.

5 Spezielle SAR-Verfahren

Die bisherigen Ausführungen bezogen sich auf den sogenannten Streifenmodus (Stripmap Mode), bei dem das vom SAR-System abgebildete Gebiet grundsätzlich durch die geradlinige Trägerbewegung bestimmt ist. Um die Streifenbreite zu vergrößern oder die Azimutauflösung über das theoretische Maximum der halben Antennenlänge hinaus zu verbessern, wurden andere SAR-Modi eingeführt, die allgemein durch ein Schwenken der Antennenkeule charakterisiert sind. Der ScanSAR-Betriebsmodus eignet sich für die großflächige Abbildung mit einer niedrigen oder mittleren geometrischen Auflösung. Beim Spotlight-Modus wird dagegen ein hochauflösendes Bild eines kleineren Zielgebietes prozessiert.

Ein abbildendes SAR-System liefert grundsätzlich nur eine zweidimensionale Abbildung der Erdoberfläche. Mit Einsatz der Across-Track-Interferometrie läßt sich der Depressionswinkel bestimmen und eine dreidimensionale Erfassung der Zielobjekte erreichen. Ein großes Potential für die hochgenaue Beobachtung von geometrischen Verschiebungen bietet die differentielle Interferometrie mit SAR [20], [40]. Im Fall der Along-Track- und differentiellen Interferometrie lassen sich langsame Verschiebungen der Erdoberfläche im Zentimeter- und sogar im Millimeterbereich erfassen. Gemessen wird nur die Komponente der Verschiebung in Blickrichtung des Radars, die zu einer Entfernungsänderung in der Größenordnung der Wellenlänge führt.

5.1 ScanSAR

Bei satellitengetragenen SAR-Systemen im Streifenmodus wird die maximale Streifenbreite durch die PRF beschränkt, da die elektromagnetischen Wellen nicht gleichzeitig empfangen und gesendet werden können. Für eine PRF von 1500 Hz kann man eine theoretische Streifenbreite von ungefähr 100 km erreichen. Um diese Einschränkung zu umgehen, wendet man das ScanSAR-Prinzip an, bei dem mit in Entfernungsrichtung versetzten Streifen abgebildet wird.

Abb. 5.1 zeigt die Abbildungsgeometrie eines ScanSAR-Systems, wobei die gesamte Streifenbreite beispielhaft durch die Zusammenfassung dreier Teilstreifen gebildet wird [48], [83]. Die Positionierung der einzelnen Teilstreifen wird meistens durch ein schrittweises elektronisches Schwenken der Antenne in Elevation bestimmt. Die Periode der Auslenkung muß so ausgelegt werden, daß eine kontinuierliche Abbildung eines jeden Teilstreifens erreicht wird. Dies setzt eine Beschränkung der Beleuchtungszeit in Azimut für jeden Teilstreifen voraus und führt dazu, daß die Signalbandbreite jedes Ziels entsprechend der Anzahl von Teilstreifen reduziert wird.

Zur effektiven ScanSAR-Verarbeitung benutzt man häufig das SPECAN-Verfahren. Falls eine hochgenaue Verarbeitung notwendig ist, kann das Extended Chirp Scaling-Verfahren mit Subaperturverarbeitung in Azimut verwendet werden [55]. Abb. 5.2 zeigt ein ScanSAR-Bild

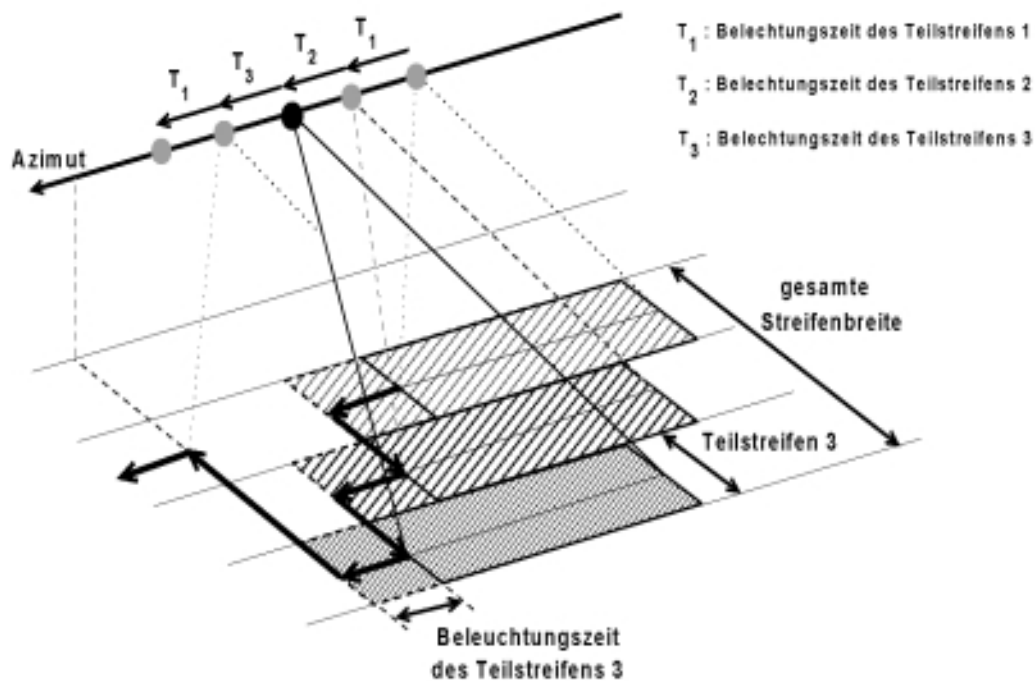


Abb. 5.1: Abbildungsgeometrie eines SAR-Systems im ScanSAR-Betriebsmodus. Die gesamte Streifenbreite setzt sich aus drei kleineren Teilstreifenbreiten zusammen.

des SIR-C-Sensors im L-Band, das während der zweiten X-SAR/SIR-C-Mission aufgenommen wurde. Wichtigste Sensor- und Verarbeitungsparameter sind:

- Flughöhe = 221 km
- Wellenlänge = 0,239 m
- Systembandbreite = 10 MHz
- Sensorgeschwindigkeit = 7200 m/s
- Anzahl der Teilstreifen = 4
- Azimut- und Entfernungsauflösung nach Multilook-Verarbeitung:
180 m × 120 m
- Anzahl von Looks in Azimut und Entfernung: 4 × 6

Zur Zeit ist nur ein satellitengetragener SAR-Sensor (RadarSAT, Kanada) in Betrieb, der unter anderem im ScanSAR-Modus eingesetzt werden kann. Das Advanced SAR-System (ASAR) der ENVISAT-Plattform (voraussichtlicher Start im Jahr 2001), wird auch einen ScanSAR-Modus mit niedriger und mittlerer Auflösung für eine globale Abbildung der Erdoberfläche zur Verfügung stellen.

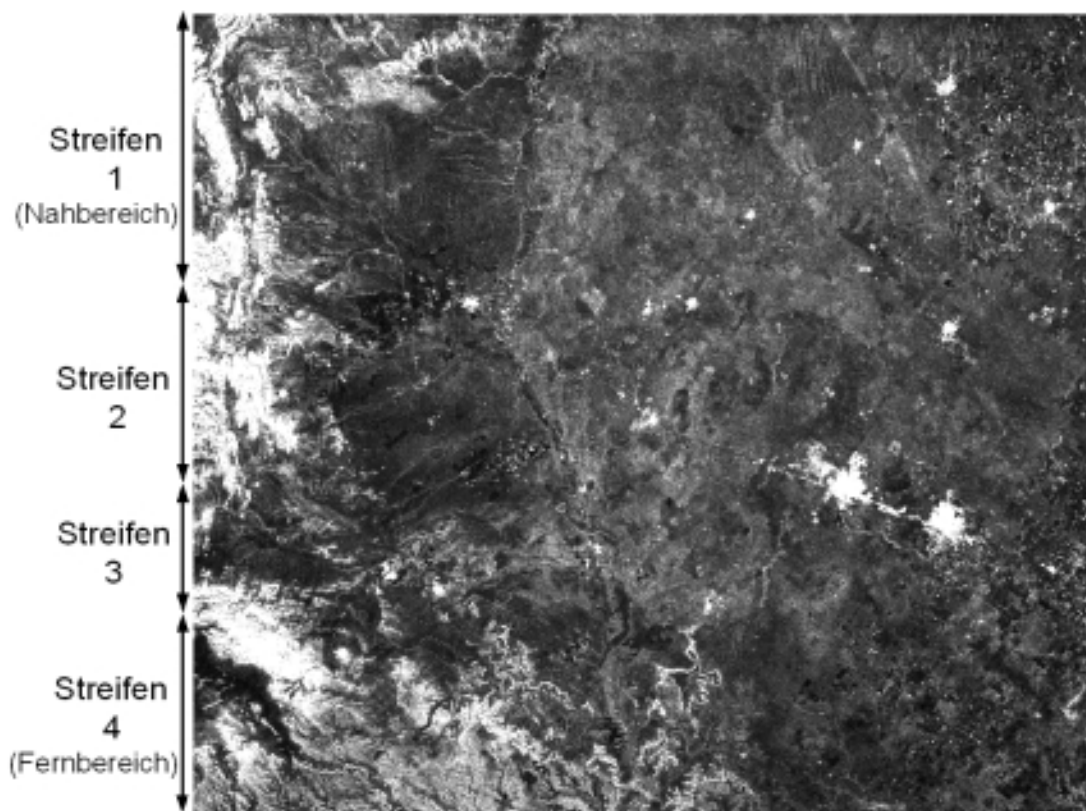


Abb. 5.2: ScanSAR-Bild des SIR-C-Sensors für das L-Band, Polarisation VV. Gezeigt wird das Gebiet von Chickasha, Oklahoma, USA (Datensatz 82.1 der zweiten X-SAR/SIR-C-Mission im Oktober 1994). Die Bilddimensionen betragen $236 \text{ km} \times 252 \text{ km}$ in Entfernungs- und Azimutrichtung. Links vom Bild wird die Ausdehnung jeder Streifenbreite gezeigt.

5.2 Spotlight

Bei der Abbildung im Streifenmodus ist die maximal erreichbare Azimutauflösung durch die Länge der synthetischen Apertur L_{sa} begrenzt. Aus Gln. (1.3) bis (1.5) erhält man:

$$\delta_a = r_0 \cdot \Theta_{\text{sa}} = \frac{r_0 \cdot \lambda}{2 \cdot L_{\text{sa}}} . \quad (5.1)$$

Die Länge der synthetischen Apertur L_{sa} in Gl. 5.1 ist durch die Entfernung und den Azimutöffnungswinkel bestimmt, d. h. $L_{\text{sa}} = r_0 \cdot \Theta_a$. Für eine gegebene Entfernung im Streifenmodus kann man die Länge der synthetischen Apertur nur vergrößern, indem man den Azimutöffnungswinkel vergrößert, d. h. die Azimutdimension der Antenne verkleinert. Dies hat zur Folge, daß die PRF und die gesamte Datenrate entsprechend erhöht werden muß. Um diesen Nachteil zu überwinden, kann das Spotlight-Verfahren angewendet werden. In diesem Betriebsmodus läßt sich durch eine elektronische oder mechanische Azimutnachführung des Antennendiagramms auf das Szenenzentrum eine sehr lange synthetische Apertur bilden (siehe Abb. 5.3). Dadurch erzielt man eine deutliche Verbesserung der Azimutauflösung. Die Größe des abgebildeten Gebietes wird dabei aber stark beschränkt.

Der Spotlight-Betriebsmodus unterscheidet sich gegenüber dem Streifenmodus in mehreren Aspekten. Die Länge der synthetischen Apertur ist nur noch von der Entfernung und dem Win-

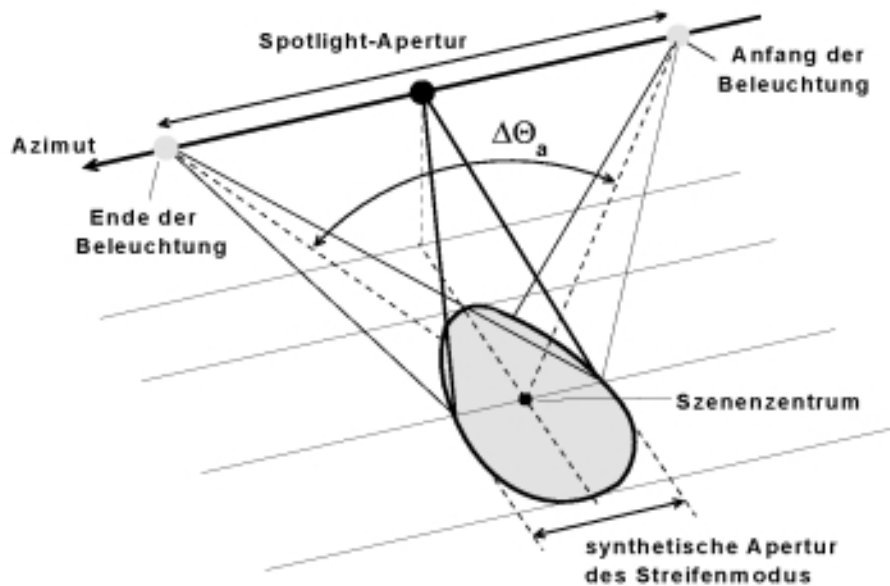


Abb. 5.3: Abbildungsgeometrie eines SAR-Systems im Spotlight-Betriebsmodus

kelbereich entsprechend der Antennennachführung abhängig:

$$L_{sa} = r_0 \cdot \Delta\theta_a . \quad (5.2)$$

Für die Azimutauflösung ergibt sich mit Einsetzen von Gl. 5.2 in Gl. 5.1:

$$\delta_a = \frac{\lambda}{2 \cdot \Delta\theta_a} . \quad (5.3)$$

Je größer der Variationsbereich $\Delta\theta_a$ der Antenne in Azimut, desto besser ist die Azimutauflösung δ_a . Die Nachführung der Antenne beschränkt die Größe des abgebildeten Gebietes, so daß eine kontinuierliche Abbildung der gesamten überflogenen Strecke nicht mehr möglich ist. Falls die Nachführung genau auf das Szenenzentrum ausgerichtet wird, dann ist die Größe des abgebildeten Gebietes durch die Öffnung der realen Antenne bestimmt.

Die PRF und die resultierende Datenrate sind unabhängig vom Variationsbereich der Antennennachführung, da die momentane Dopplerbandbreite durch den Öffnungswinkel der realen Apertur bestimmt wird. Dies bedeutet, daß trotz der Verbesserung der Azimutauflösung die Werte von PRF und Datenrate dieselben sind wie bei der Abbildung im Streifenmodus.

In der Regel wählt man beim Spotlight-Modus die Entfernungsauflösung und Größe des abgebildeten Gebietes in Entfernungsrichtung so aus, daß ähnliche Werte wie in Azimutrichtung resultieren. Um eine entsprechend hohe Auflösung in Entfernungsrichtung zu erzielen, ist aber eine sehr hohe Systembandbreite erforderlich, was zu einer hohen Abtastfrequenz bei der A/D-Wandlung führt. Um die Abtastfrequenz bei der A/D-Wandlung zu reduzieren, verwendet man oft beim Spotlight-Modus das Verfahren vom Dechirp-on-Receive (siehe Abb. 5.4). Dieses Verfahren basiert auf der Verwendung einer linearen Frequenzmodulation (Chirp) als Sendesignal, dessen Länge aber größer als die ausgewählte Abbildungsdimension in Entfernungsrichtung ist. Dies ist beim Spotlight-Modus möglich, da die Szenendimensionen wegen der erhöhten

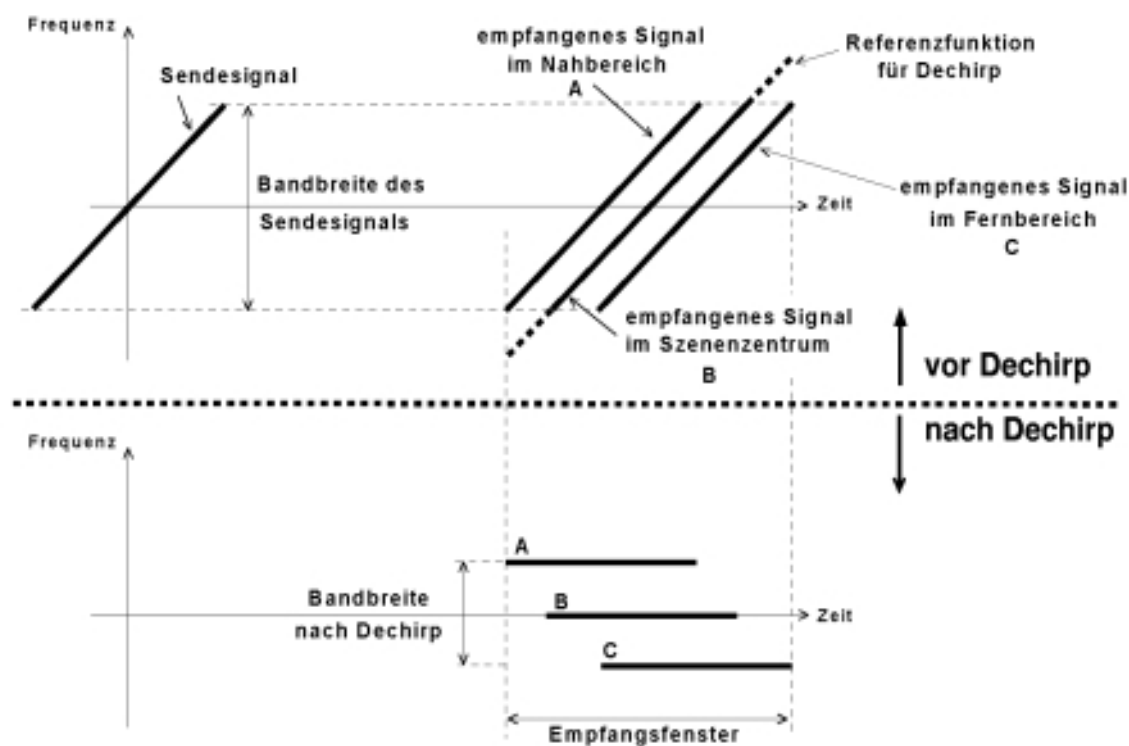


Abb. 5.4: Schematische Darstellung des Prinzips Dechirp-on-Receive zur Reduzierung der Empfangsbandbreite beim Spotlight-Modus

Auflösung reduziert sind.

Das empfangene Signal in Abb. 5.4 mischt man mit einer Referenzfunktion, die die gleiche Frequenzmodulation wie das Sendesignal besitzt. Dadurch kompensiert man die Frequenzmodulation und das resultierende Signal hat nur noch Signalanteile mit konstanter Frequenz. Dies hat zur Folge, daß die resultierende Signalbandbreite reduziert ist, ohne die Auflösung zu verschlechtern. Die A/D-Wandlung kann mit reduzierter Abtastfrequenz erfolgen, was zu einer kleineren Datenrate führt.

Für die Verarbeitung der Spotlight-Daten verwendete man zuerst das sogenannte Polar Format-Verfahren, das auf einer zweidimensionalen Interpolation der Rohdaten zur Korrektur der Zielentfernungsänderung und zum Angleich der Entfernungsabhängigkeit der Azimutmodulation basiert [8]. Dieses Verfahren benötigt aber einen sehr hohen Berechnungsaufwand, so daß man zur Zeit meistens den Wavenumber- oder Chirp Scaling-Algorithmus verwendet. Durch die besondere Betriebsart des Spotlight-Modus benötigt auch der Chirp Scaling-Algorithmus einen Korrelationsschritt vor dem Anfang der Datenverarbeitung, um die Spotlight-Daten prozessieren zu können. Kürzlich wurde das Frequency Scaling-Verfahren zur genauen Spotlight-Verarbeitung vorgeschlagen, das eine effiziente Verarbeitung der Daten ohne Interpolation ermöglicht [43], [47].

5.3 Interferometrie

Interferometer gestatten grundsätzlich Entfernungsmessungen, deren Genauigkeit im Bereich von Bruchteilen der benutzten Wellenlänge liegen kann. Seit Ende der achtziger Jahre kommt die SAR-Interferometrie in vielen Bereichen zur Anwendung. Beim interferometrischen SAR benutzt man, wie bei jeder interferometrischen Messung, einen zweiten Sensor (Antenne A_2), der räumlich vom ersten (Antenne A_1) getrennt ist. Die Distanz zwischen den beiden Antennen bezeichnet man als Basislinie (baseline).

Im Prinzip kann man die SAR-Interferometrie in zwei unterschiedlichen Modi betreiben (siehe Abb. 5.5):

- **Across-Track-Interferometrie**

Die räumliche Anordnung der Antennen wird so gewählt, daß sich eine Basislinienkomponente quer zur Flugrichtung ergibt. Diese Anordnung dient zur Bestimmung der Geländetopographie (Terrainhöhe) des SAR-Bildes [5], [38], [76], [91].

- **Along-Track-Interferometrie**

Die Antennen sind räumlich in Flugrichtung versetzt, d. h. die Basislinie ist parallel zur Flugrichtung ausgerichtet. Die Along-Track-Interferometrie dient zur Bestimmung von langsamen Zielbewegungen (z. B. Fluß- und Meeresströmungen) [22]. Erfasst wird nur die Komponente der Zielbewegung in Blickrichtung der SAR-Antenne.

In beiden Fällen (Along- und Across-Track) kann man die interferometrische Messung durch einen einzigen Überflug (Einpaß) oder durch zwei Überflüge (Zweipaß) durchführen. Bei flugzeuggetragenen Systemen verwendet man sowohl die Einpaß- als auch die Zweipaß-Interferometrie, während bei satellitengestützten SAR-Systemen meistens die Zweipaß-Interferometrie zum Einsatz kommt. Nur bei der SRTM-Mission¹ wurde ein Mast mit einem ausklappbaren Mechanismus im Space Shuttle eingesetzt, um eine Across-Track-Basislinie von ca. 60 m zu erzielen.

Bei der Zweipaß-Interferometrie spielt die Kohärenz zwischen den Bildern beider Überflüge eine wichtige Rolle. Die Kohärenz ist ein Maß der Korrelation beider Bilder. Falls die Kohärenz gleich null ist, besteht keine Korrelation zwischen den Bildern. Eine Kohärenz gleich eins bedeutet eine 100%-ige Korrelation.

Um ein Phaseninterferogramm guter Qualität zu erhalten, ist es erforderlich, daß sich das Rückstreuverhalten bei der ersten und zweiten Aufnahme nicht wesentlich verändert, was eine hohe Kohärenz der Bilder gewährleistet. Die Veränderung des Rückstreuverhaltens kann z. B. aufgrund von Regen, Temperatur- und Feuchtigkeitsänderung oder Pflanzenwachstum auftreten. Falls die Kohärenz sehr niedrig ist, enthält die Phase des Interferogramms einen sehr großen Anteil an nicht korrelierter Information, wodurch die Auswertung der Phase sehr

¹ SRTM steht für Shuttle Radar Topographic Mission. Diese Mission wurde im Februar 2000 im Rahmen einer bilateralen Kooperation zwischen dem USA (NASA/JPL, C-Band interferometrisches SAR) und Deutschland (DLR/Dornier Satellitensysteme, X-Band interferometrisches SAR) durchgeführt.

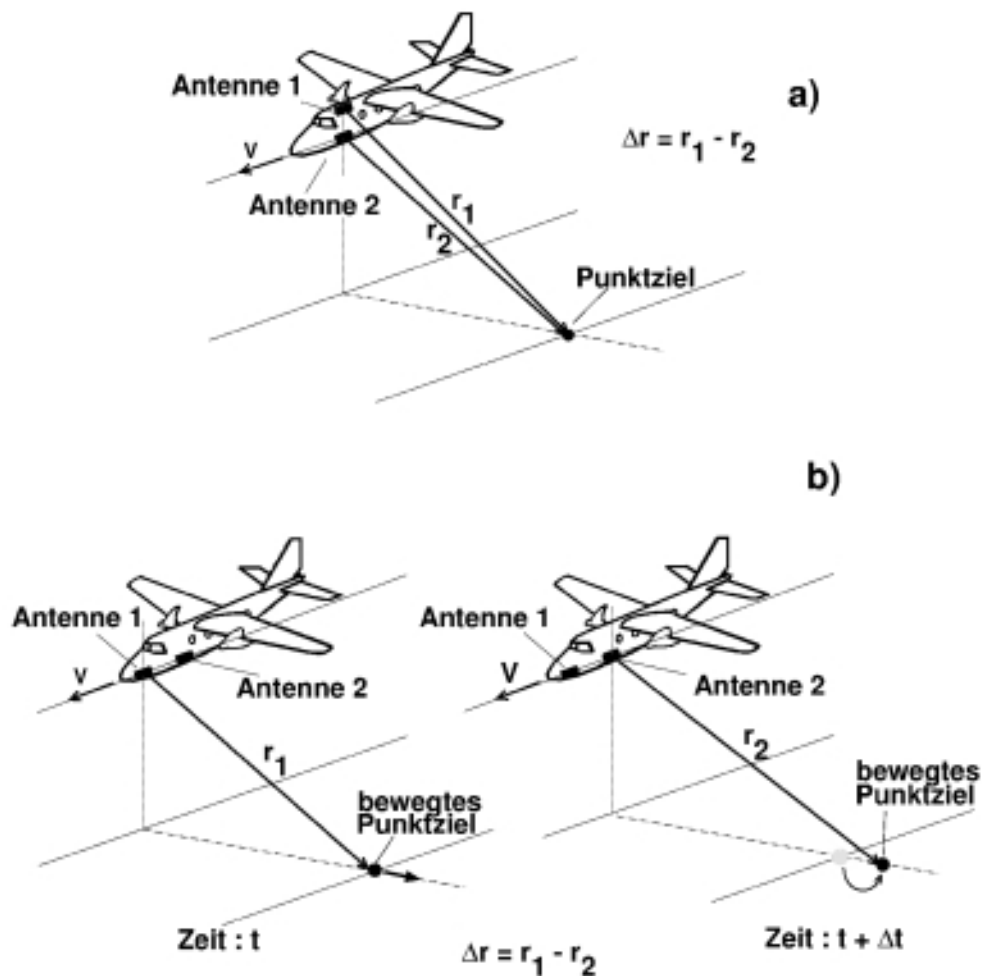


Abb. 5.5: Abbildungsgeometrie bei der SAR-Interferometrie: a) Across-Track-Interferometrie und b) Along-Track-Interferometrie.

erschwert oder sogar verhindert wird. In der Regel benötigt man Kohärenzwerte größer als 0,5, um eine zuverlässige Phasenauswertung durchführen zu können.

Die Auswertung der Kohärenz bei der Zweipaß-Interferometrie bietet ein großes Potential für die Klassifikation des überflogenen Gebiets. Die unterschiedlichen Klassen lassen sich anhand von Erfahrungswerten der Kohärenz identifizieren. Ein Ergebnis dieser Auswertung von der X-SAR/SIR-C-Mission des Gebietes um den Vulkan Ätna zeigt Abb. 5.6. Hier konnte man bis zu sechs Klassen identifizieren, wobei man die Kohärenzwerte für das L-, C- und X-Band verwendete, um die Klassifizierungsgenauigkeit zu erhöhen [12]. Im allgemeinen läßt sich für die Kohärenz bei der Zweipaß-Interferometrie folgende Tendenz feststellen:

- Eine wesentlich höhere Kohärenz erreicht man bei größerer Wellenlänge (L-Band) als bei kleinerer Wellenlänge (X-Band).
- Kleine Kohärenzwerte weisen Gebiete mit Vegetation auf. Insbesondere im X-Band sind die Kohärenzwerte kleiner als 0,3 für bewaldete Gebiete.
- Hohe Kohärenzwerte haben Gebiete mit trockenem und steinigem Boden wie Lava und

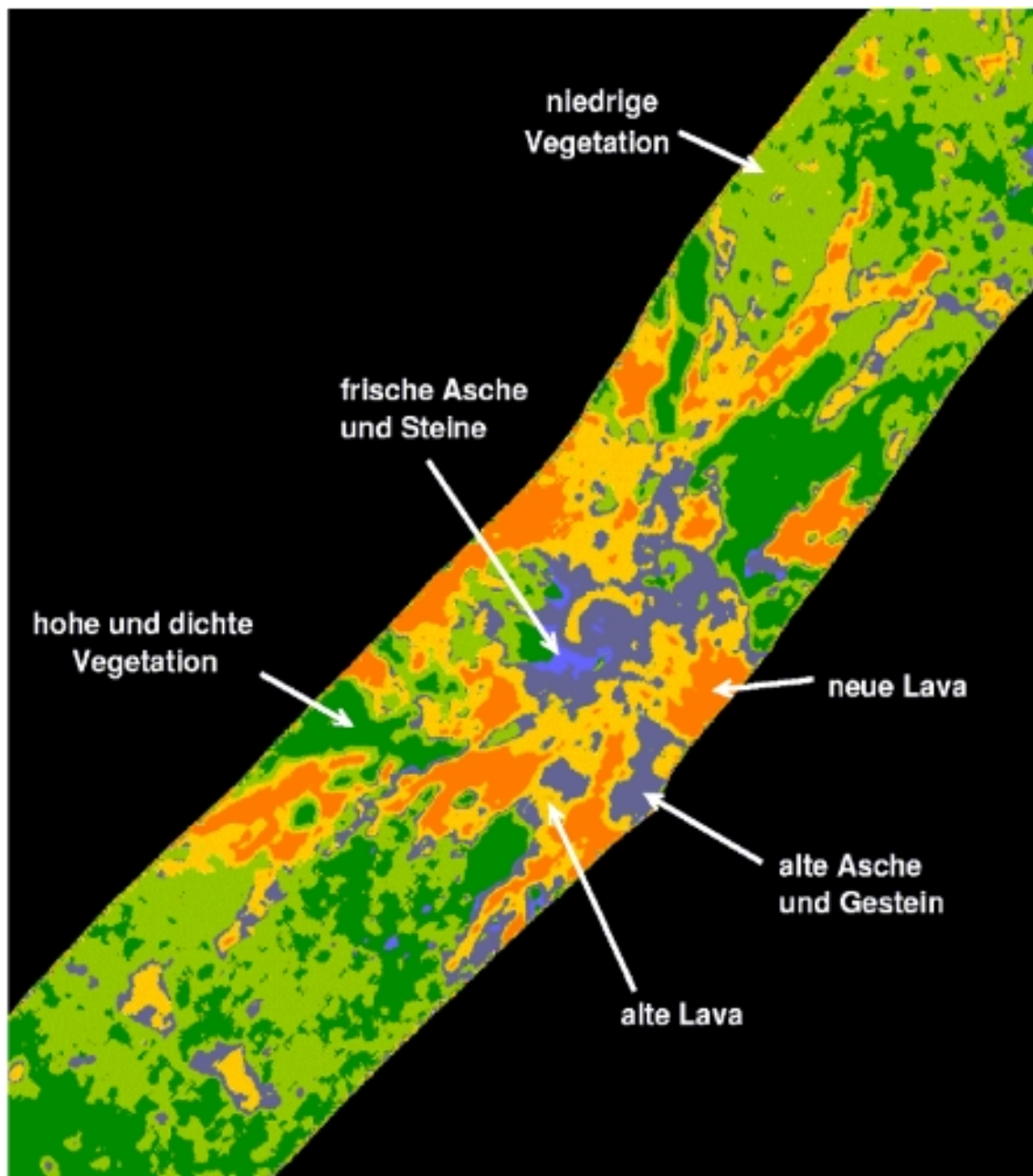


Abb. 5.6: Klassifikation des Gebietes um den Vulkan Ätna mit Verwendung der Kohärenz im L-, C- und X-Band

Asche in Abb. 5.6.

Im nächsten Abschnitt wird die Einpaß-Interferometrie im Across-Track-Modus am Beispiel der Daten des E-SAR-Systems [78] näher behandelt.

5.3.1 Across-Track-Interferometrie

Ein abbildendes SAR-System liefert grundsätzlich nur eine zweidimensionale Abbildung der Erdoberfläche. Die Information bezüglich der Höhe eines Ziels über einer Bezugsebene läßt sich nur anhand der Angaben über den Depressionswinkel θ_d und die Entfernung r gewinnen.

Der Depressionswinkel ist aber mit dem konventionellen SAR-Verfahren nicht mit der erforderlichen Genauigkeit zu bestimmen. Mit Einsatz der Across-Track-Interferometrie läßt sich der Depressionswinkel bestimmen und eine dreidimensionale Erfassung der Zielobjekte erreichen [38], [76], [91].

Bei der Across-Track-Interferometrie ähnelt die Aufnahmegeometrie derjenigen bekannter

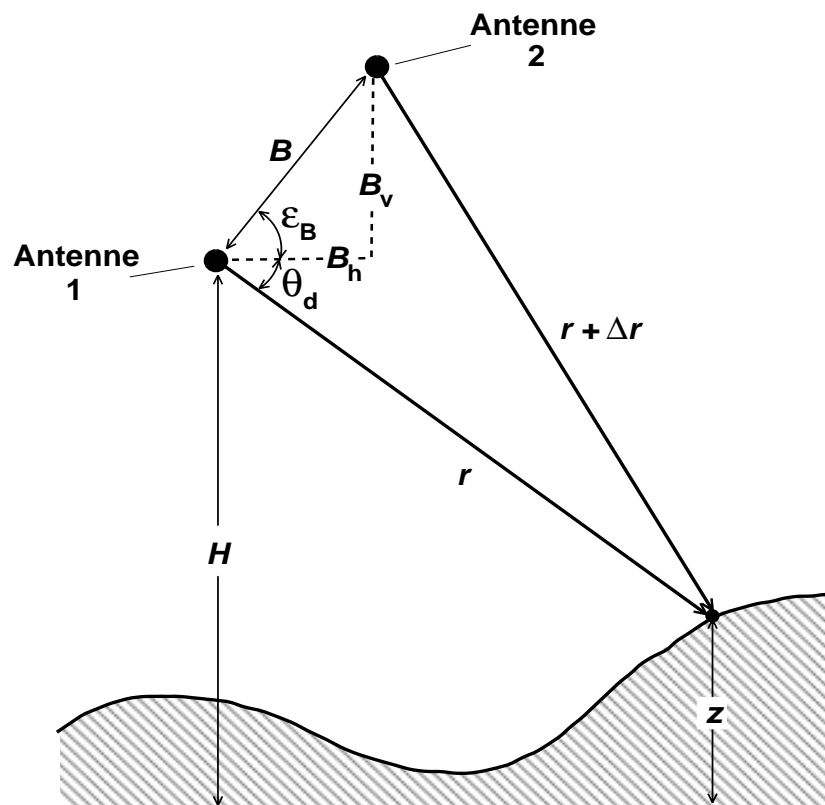


Abb. 5.7: Abbildungsgeometrie eines SAR-Systems mit Across-Track-Interferometrie

stereometrischer Verfahren und hat zur Folge, daß verschiedene Zielpunkte unterschiedliche Weglängendifferenzen zu den Antennenpositionen A_1 und A_2 besitzen. Während man bei stereoskopischen Auswertesystemen die Parallaxe durch direkte Messung der unterschiedlichen Beobachtungswinkel bestimmt, wird beim interferometrischen SAR die Phasendifferenz zwischen den empfangenen Signalen beider Antennen A_1 und A_2 ausgewertet. Diese Phasendifferenz $\Delta\varphi$ entspricht einem Wegunterschied Δr gemäß (siehe Abb. 5.7):

$$\Delta\varphi = \frac{4\pi}{\lambda} \cdot \Delta r . \quad (5.4)$$

Der Faktor 4 in Gl. 5.4 setzt voraus, daß das Sendesignal abwechselnd von Antenne 1 oder 2 ausgestrahlt und das dazugehörige Rückstreusignal von der selben Antenne empfangen wird¹.

¹ Bei einigen SAR-Systemen wird die Einpaß-Interferometrie mit nur einer Sendeantenne durchgeführt, so daß sich ein Faktor 2 in Gl. 5.4 ergibt. Mit nur einer Sendeantenne ist zwar die Hardware-Realisierung einfacher, aber die interferometrische

Für die Geländehöhe z in Abhängigkeit vom Depressionswinkel θ_d gilt

$$z = H - r \cdot \sin \theta_d, \quad (5.5)$$

Mit Verwendung des Kosinussatzes erhält man:

$$\cos(\theta_d + \epsilon_B) = \frac{r^2 + B^2 - (r + \Delta r)^2}{2 \cdot r \cdot B}, \quad (5.6)$$

wobei

$$\epsilon_B = \arctan(B_v/B_h). \quad (5.7)$$

Die Höhe der Antenne A_1 über einer Bezugsebene bezeichnet man mit H , die Entfernung zwischen Antenne A_1 und Ziel mit r . B ist die Basislinie, ϵ_B die Neigung der Basislinie, und B_v und B_h sind ihre Vertikal- und Horizontalkomponenten.

Zur Bestimmung der Geländehöhe z berechnet man den Depressionswinkel anhand von Gl. 5.6 und setzt das Resultat in Gl. 5.5 ein. Da in der Regel die Referenzebene am Boden nicht zur Verfügung steht, benutzt man zusätzlich mindestens einen Referenzpunkt (engl.: tie point), um die Geländehöhe gemäß Gl. 5.5 zu berechnen.

Den Ablauf zur Geländehöhenbestimmung kann man folgendermaßen beschreiben (siehe Abb. 5.8):

- **SAR-Verarbeitung**

Die Radarsignale (Rohdaten) der Antennen A_1 und A_2 werden mit möglichst hoher Entfernungs- und Azimutauflösung prozessiert. Unabdingbar ist die Anwendung einer phasenreinen Verarbeitung, damit die Phase des SAR-Signals nicht verfälscht wird. Das Ergebnis der Verarbeitung sind zwei komplex-wertige Bilder. Abb. 5.9 zeigt eine der beiden SAR-Aufnahmen, die in dem interferometrischen Betriebsmodus des E-SAR-Systems für das X-Band aufgenommen worden sind.

- **Koregistrierung**

Aufgrund der unterschiedlichen Aufnahmepositionen haben beide SAR-Bilder unterschiedliche Bildgeometrien. Die Bilddaten sind gegeneinander verschoben und verzerrt und müssen durch ein Koregistrierungsverfahren aneinander angepaßt werden, um eine möglichst hohe geometrische Übereinstimmung beider SAR-Szenen zu gewährleisten [79], [58].

- **Berechnung des Interferogramms**

Das Interferogramm entsteht durch die Multiplikation des ersten SAR-Bildes mit dem konjugiert komplexen zweiten Bild. Für jeden Bildpunkt entspricht die Phase dieses Interferogramms der Phasendifferenz $\Delta\varphi$. Da die Phase des Interferogramms durch die Berechnung des Arkustangens bestimmt wird, befinden sich die Phasenwerte im Bereich zwischen $-\pi < \Delta\varphi < \pi$; die Messung ist daher im allgemeinen hochgradig mehrdeutig.

Phasenempfindlichkeit reduziert sich um den Faktor 2.

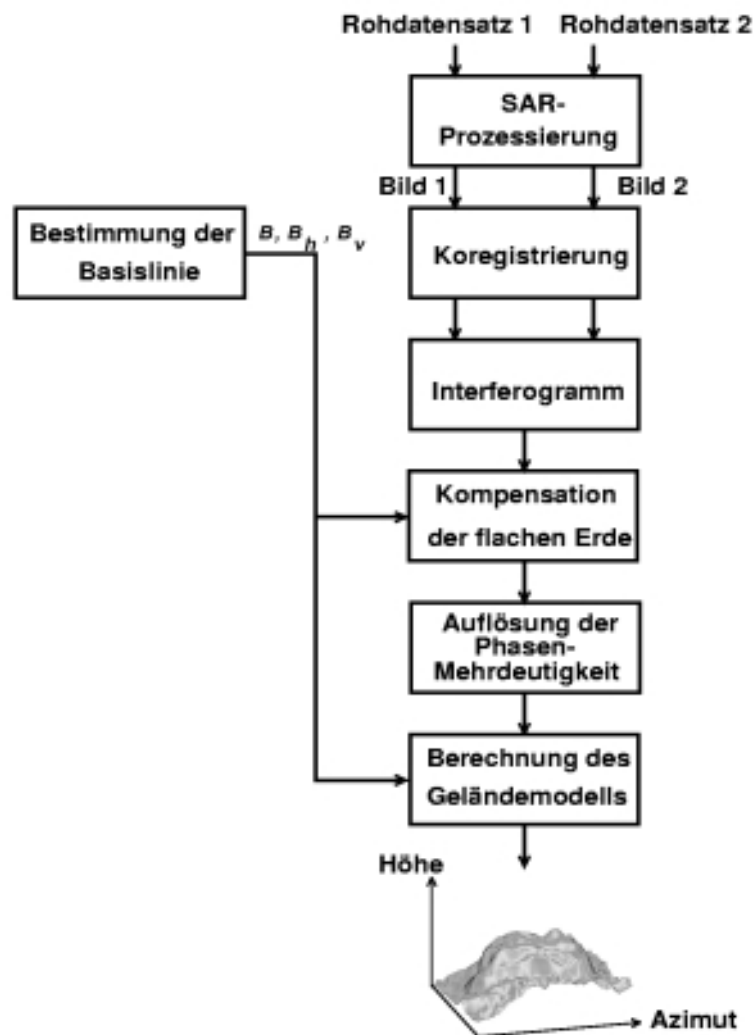


Abb. 5.8: Ablauf der interferometrischen SAR-Datenverarbeitung zur Geländehöhenbestimmung

- Kompensation des Phasenbeitrags der flachen Erde**
 Als Phasenbeitrag der *flachen Erde* bezeichnet man denjenigen Anteil der Interferogrammphase, der nicht durch die Topographie induziert wird. Der Phasenbeitrag der flachen Erde resultiert aus der spezifischen interferometrischen Aufnahmegeometrie, die wegen des Schrägsichtverfahrens unterschiedliche Entfernungsdifferenzen Δr in Abhängigkeit von der Blickrichtung verursacht. Diese Phase lässt sich anhand der Aufnahmegeometrie bestimmen und wird von der Interferogrammphase abgezogen, um ihre Mehrdeutigkeiten zu reduzieren. Abb. 5.10 zeigt die resultierende Phase des Ätna-Gebiets nach dem Abzug des Phasenanteils der flachen Erde.
- Auflösung der Phasenmehrdeutigkeiten (Phase Unwrapping)**
 Die Verfahren zum Eliminieren der Phasenmehrdeutigkeit bestimmen die unbekannt Anzahl der 2π -Phasenzyklen in den verschiedenen Bereichen des Phaseninterferogramms [5], [23], [71]. Nach der Durchführung dieses Verfahrens erhält man eine eindeutige Phasendifferenz $\Delta\varphi$.

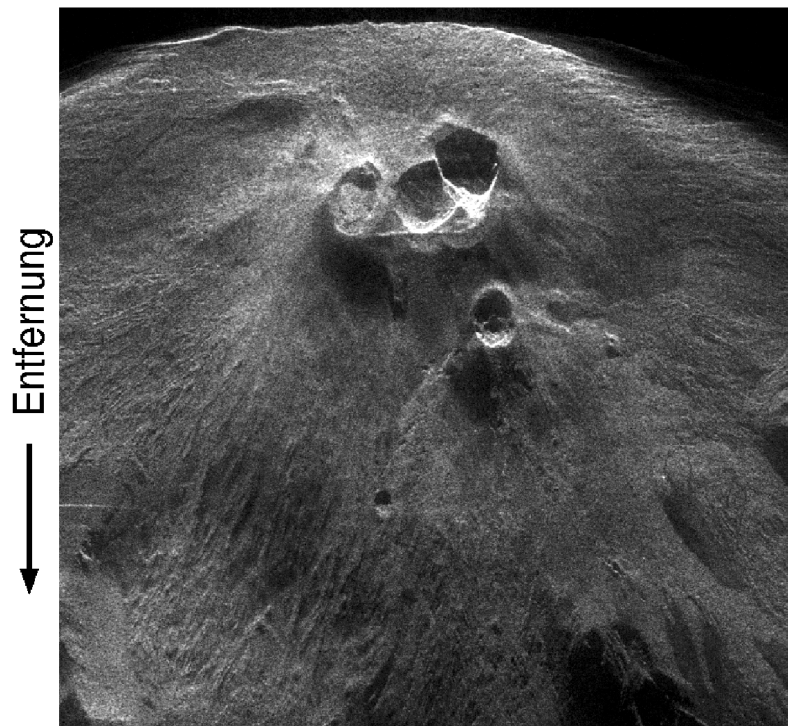


Abb. 5.9: SAR-Bild des Vulkans Ätna auf Sizilien, Italien. Die wichtigsten Sensor- und Verarbeitungsparameter lauten: X-Band, VV-Polarisation, Fluggeschwindigkeit: 89 m/s, Streifenbreite: etwa 3 km, Auflösung: $3\text{ m} \times 3\text{ m}$ und Verarbeitung mit 8 Looks.

- **Berechnung des Geländemodells**

Anhand von $\Delta\varphi$ läßt sich die Geländehöhe anhand der Gln. (5.4) bis (5.7) bestimmen. Man erhält damit ein zweidimensionales Geländemodell in der Schrägentfernungsgeometrie. Abb. 5.11 zeigt das resultierende Geländemodell des Ätna-Gebietes.

Um das SAR-Bild und das Geländemodell für den Anwender nutzbar zu machen, müssen sie auf die Erdoberfläche referenziert werden. Diesen Schritt nennt man Geokodierung [80]. Für eine Geokodierung muß man die genaue Position jedes Bildpunktes im Raum ermitteln, um dessen Lage auf der gewünschten Projektionsfläche bestimmen zu können. Die Geokodierung läßt sich in zwei Schritten durchführen:

- Bestimmung der Funktion zur Transformation der Azimut/Entfernungsgeometrie in das Kartenkoordinatensystem.
- Projektion des Geländemodells, das in Schrägentfernungs-Geometrie vorliegt, in das Kartenkoordinatensystem anhand der zuvor berechneten Transformationsvorschrift. Sowohl das Geländemodell als auch das SAR-Bild werden interpoliert, um beide in geokodierter Form zu erhalten.

Der Anwendungsbereich der geokodierten Produkte ist vielseitig, da sowohl das SAR-Bild als auch das Geländemodell direkt mit einer topographischen Karte verglichen werden können. Abb. 5.12 zeigt ein geokodiertes Bild des Vulkans Ätna. Das Bild ist unter Verwendung

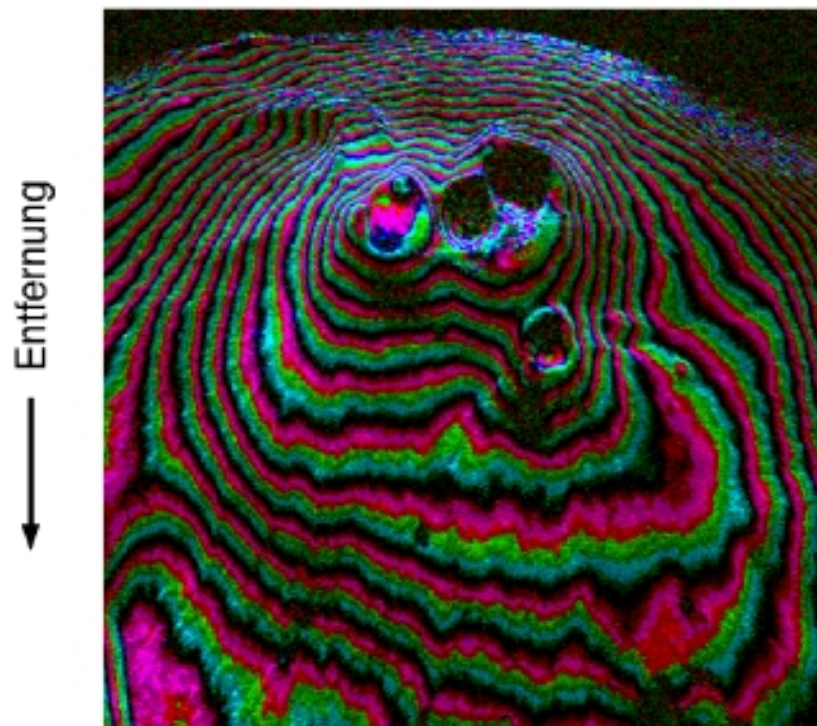


Abb. 5.10: Interferogramm des Vulkans Ätna auf Sizilien, Italien. Jeder Farbzyklus entspricht einer Phasenvariation von 360° .

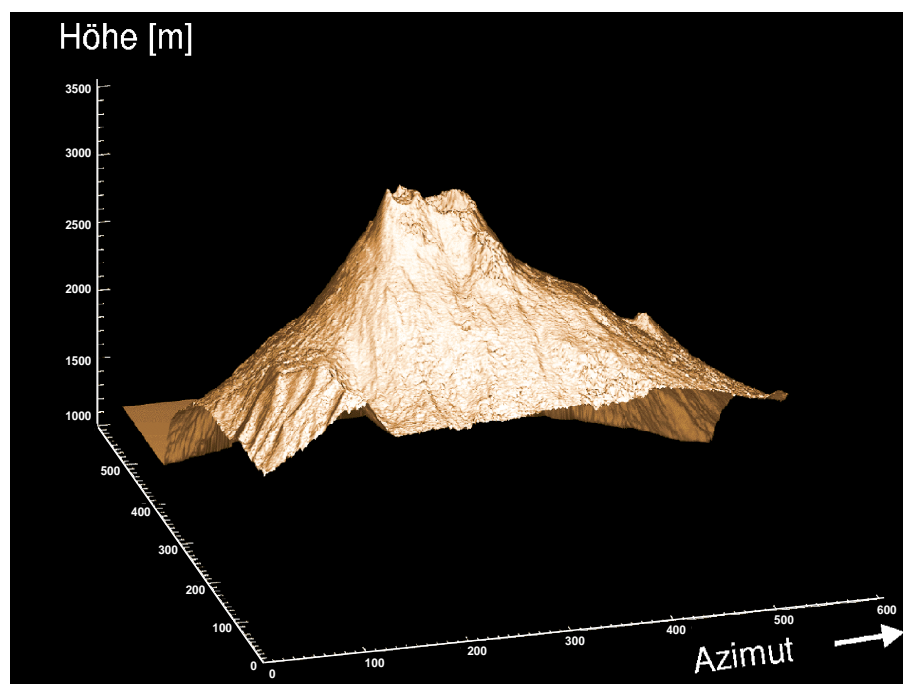


Abb. 5.11: Geländemodell des Vulkans Ätna. Die Höhenunterschiede in diesem Ausschnitt betragen ca. 700 m. Die Höhengenaugigkeit des Geländemodells liegt in der Größenordnung von 4 m. Dieses Bild entstand durch die Zusammenarbeit des DLR mit IRECE (Istituto di Ricerca per l'Elettromagnetismo ed i Componenti Elettronici, Neapel, Italien)

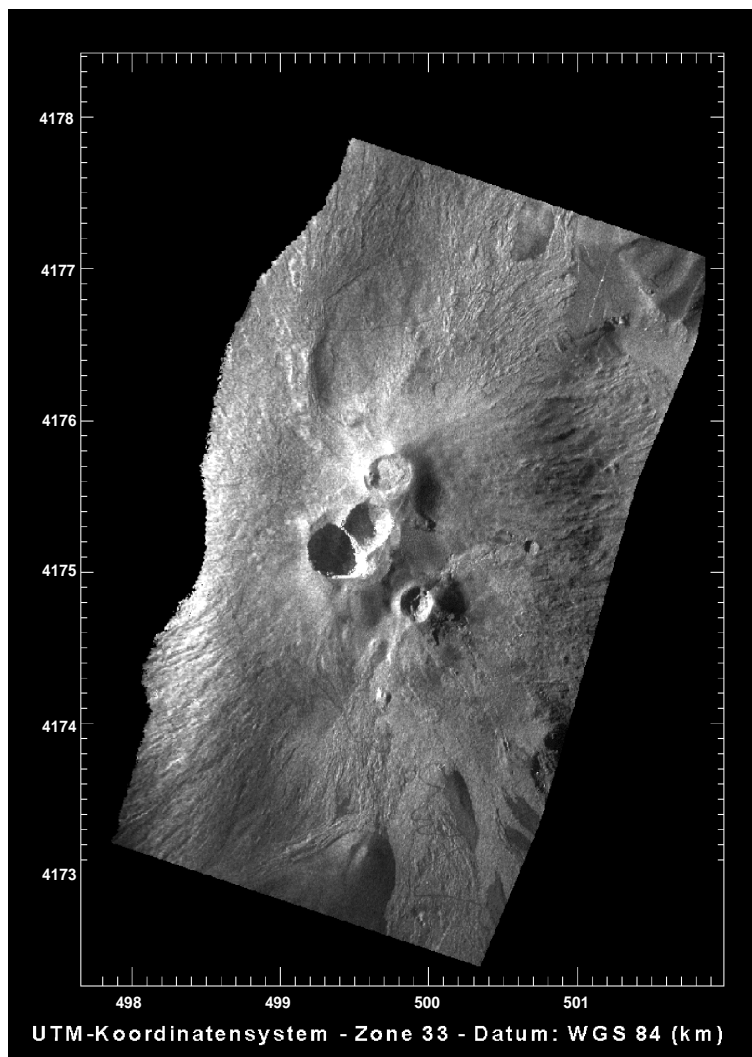


Abb. 5.12: Geokodiertes Bild des Vulkans Ätna mit Verwendung des Referenzsystems WGS84. Dieses Bild entstand durch die Zusammenarbeit des DLR mit IRECE (Istituto di Ricerca per l'Elettromagnetismo ed i Componenti Elettronici, Neapel, Italien).

des WGS84-Referenzsystems in der entsprechenden UTM-Kartenprojektion (engl.: **Universal Transverse Mercator**) dargestellt. Die Positionierungsgenauigkeit beträgt ca. 4 m.

5.3.2 Differentielle Interferometrie

Ein großes Potential für die hochgenaue Beobachtung von geometrischen Verschiebungen bietet die differentielle Interferometrie mit SAR [20], [40]. In diesem Fall lassen sich langsame Verschiebungen der Erdoberfläche im Zentimeter- und sogar im Millimeterbereich erfassen. Gemessen wird nur die Komponente der Verschiebung in Blickrichtung des Radars, die zu einer Entfernungsänderung in der Größenordnung der Wellenlänge führt. Typische Anwendungen sind die Messungen von langsamen Erdverschiebungen aufgrund eines Erdbebens, Bewegungen von Eisblöcken auf dem Meer, Verschmelzungen von Gletschereis und die Wanderung von Sanddünen infolge von Wind.

Bei Satelliten benötigt man mindestens drei Flüge über das gleiche Gebiet, um eine differentielle Interferometrie durchführen zu können. Der erste und zweite Überflug gelten als Referenz und dienen zur Ermittlung des ersten Interferogramms, das die Information der Geländetopographie vor dem Auftreten der Verschiebung enthält. Beim dritten Überflug verwendet man eine möglichst kleine Basislinie zum zweiten Überflug. Das Phaseninterferogramm des zweiten und dritten Überflugs enthält Beiträge der Erdverschiebung wie auch der Geländetopographie. Um die Komponente der Verschiebung in Blickrichtung des Radars von der Komponente der Geländetopographie zu trennen, benutzt man das Phaseninterferogramm zwischen dem ersten und zweiten Überflug.

Aufgrund der unterschiedlichen Basislinien des ersten und zweiten Interferogramms muß man die Phase des ersten Interferogramms mit dem Verhältnis beider Basislinien so skalieren, daß die topographische Komponente beider Interferogramme die gleiche Amplitude erhält. Nach der Multiplikation des ersten Phaseninterferogramms mit dem konjugiert komplexen zweiten Phaseninterferogramm erhält man die Komponente der Verschiebung in Blickrichtung des Radars.

Abb. 5.13 zeigt ein Beispiel der differentiellen Interferometrie aus der zweiten X-SAR/SIR-C-Mission für das L-Band, das aus drei Überflügen am 9., 10. und 11. Oktober 1994 gewonnen wurde. Die Abbildung veranschaulicht das Radarbild des San Rafael-Gletschers, Chile, mit einer farbkodierten Überlagerung der aus der differentiellen Interferometrie ermittelten Eisbewegung. Die erzielte Genauigkeit der Bewegungsmessung liegt in der Größenordnung von 5 mm.

5.3.3 Polarimetrische SAR-Interferometrie

Ein sehr aktuelles Forschungsgebiet ist die polarimetrische Interferometrie, die Möglichkeiten zur Messung der interferometrischen Höhe der Phasenzentren von unterschiedlichen, polarimetrischen Streumechanismen bietet [10], [65]. Darüber hinaus läßt sich die Kohärenz des Interferogramms durch eine Optimierung der Polarisationszustände maximieren. Bis jetzt konnte die polarimetrische Interferometrie nur mit Daten des SIR-C-Sensors und des E-SAR-Systems demonstriert werden. Voraussetzung für eine erfolgreiche Implementierung ist eine phasentreue Prozessierung mit sehr genauer polarimetrischer Kalibrierung [66]. Mit polarimetrischen SAR-Daten des E-SAR-Systems im L-Band konnte man mit einer Baseline von ca. 20 m die Höhe von Nadelwald mit einer Genauigkeit besser als 5 m bestimmen [67]. Dieses Verfahren kann mit Anwendung von polarimetrischen SAR-Daten von zukünftigen SAR-Systemen (z. B. PALSAR des ALOS-Satelliten) u.a. zur Bestimmung von Waldbiomasse auf einer globalen Basis verwendet werden. Zur interferometrischen Auswertung der polarimetrischen Daten ist für dieses Beispiel eine Zweipaß-Interferometrie notwendig, wobei eine geringe temporale Dekorrelation erforderlich ist, um die Information zur Volumendekorrelation im Wald nicht zu verfälschen.

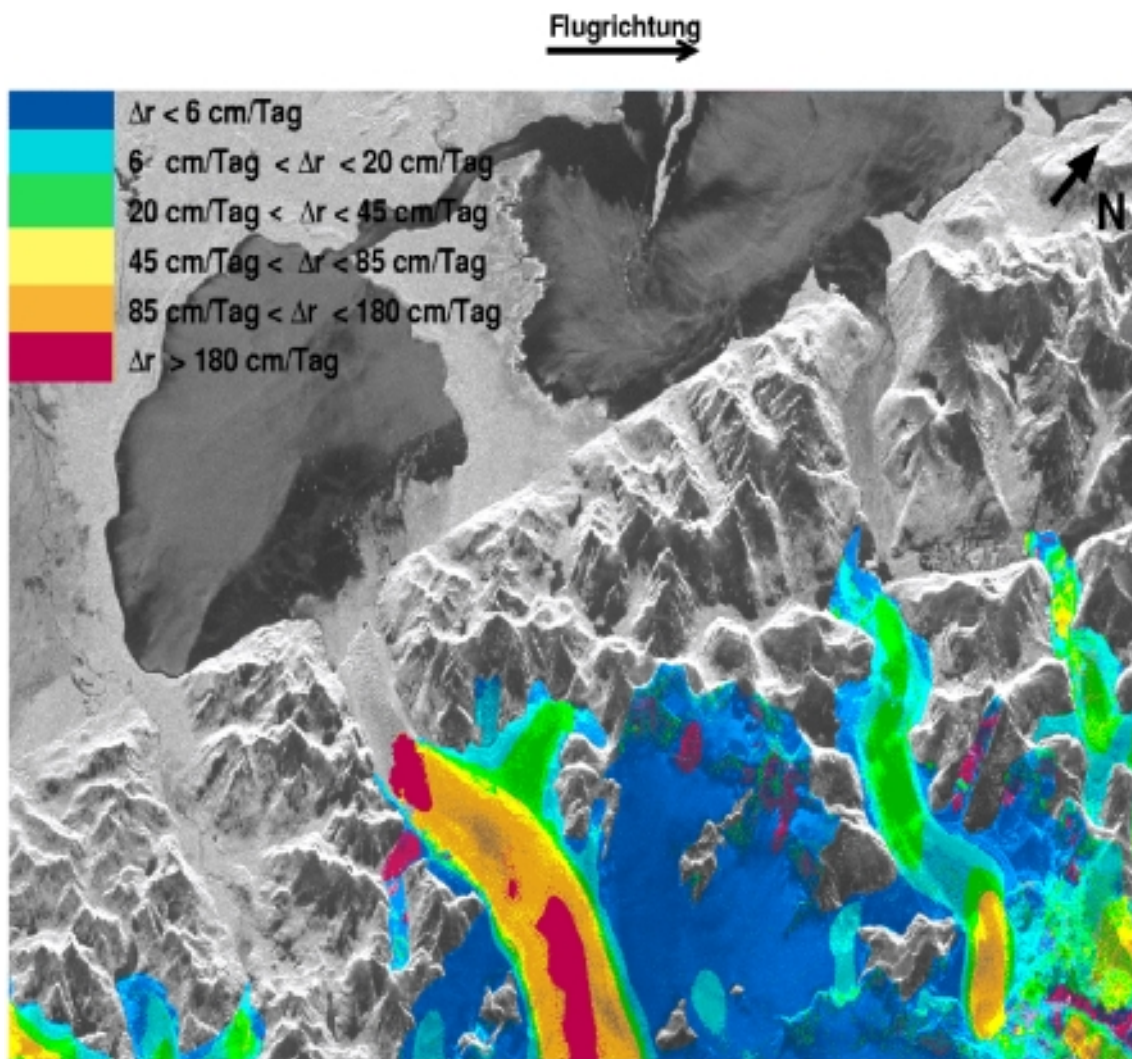


Abb. 5.13: Differentielle Radarinterferometrie: Überlagerung des Schwarz/Weiß-Radarbildes mit der farbkodierten Geschwindigkeitsinformation der Eisbewegung des San Rafael Gletschers, Chile. Die Bilddimensionen betragen $50 \text{ km} \times 30 \text{ km}$ (Verarbeitung von NASA/JPL).

6 Generisches Verfahren zur SAR-Signalverarbeitung

In diesem Kapitel wird ein generisches Verfahren zur hochgenauen SAR-Verarbeitung ohne Interpolation beschrieben. Die generische Struktur dieses Algorithmus erlaubt die Prozessierung von Stripmap-, ScanSAR- und Spotlight-Daten mit Verwendung von modularen Verarbeitungsschritten. Zusätzlich läßt sich eine sehr genaue Bewegungskompensation für die Verarbeitung von Flugzeug-SAR-Daten durchführen.

Die Interpolationsschritte in der Verarbeitung werden vermieden, indem eine Entfernungs- und eine Azimutskalierungsfunktion in bestimmte Schritte der Verarbeitung eingefügt wird. Aufgrund der Verwendung der Chirp Scaling-Funktion zur Korrektur der Zielentfernungsänderung wird dieser generische Algorithmus als Extended Chirp Scaling (*ECS-Algorithmus*) bezeichnet. Im Kapitel 4.2.4 wurde das Grundprinzip für die Verarbeitung von Stripmap-SAR-Daten mit dem ECS-Algorithmus erläutert. In den nächsten Kapiteln wird die detaillierte Formulierung des ECS-Algorithmus zur Verarbeitung von Stripmap-, ScanSAR- und Spotlight-Daten von flugzeug- und satellitengestützten SAR-Systemen vorgestellt.

6.1 Extended Chirp Scaling-Verfahren

Das Chirp Scaling-Verfahren wurde erstmals für die Verarbeitung von satellitengestützten SAR-Daten vorgestellt [74]. Basierend auf der Chirp Scaling-Funktion zur Korrektur der Zielentfernungsänderung wurde der Extended Chirp Scaling-Algorithmus entwickelt, der eine generische Struktur zur Verarbeitung von SAR-Daten in unterschiedlichen Abbildungsmodi aufweist [53], [55], [60], [43], [47]. Darüber hinaus läßt sich mit dem Chirp Scaling- und dem ECS-Algorithmus eine sehr effiziente Verarbeitung ohne Interpolation durchführen. Andere Verfahren, wie das Wavenumber- oder das Range-Doppler-Verfahren eignen sich nicht für die Verarbeitung von ScanSAR-Daten und haben einen wesentlich höheren Berechnungsaufwand als der ECS-Algorithmus im Fall der Spotlight-SAR-Verarbeitung. Zur Zeit ist der ECS-Algorithmus der einzige Algorithmus weltweit, der diese generische Struktur aufweist. Hauptmerkmale des ECS-Algorithmus sind:

- modulare und generische Struktur zur Verarbeitung von Stripmap-, ScanSAR- und Spotlight-Daten
- interpolationsfreie Verarbeitung von SAR-Daten von flugzeug- sowie satellitengestützten Systemen

- Anpassung der Variation des Dopplerschwerpunktes in Entfernungs- und Azimutrichtung ohne Blockverarbeitung
- hochgenaue entfernungsabhängige Bewegungskompensation
- interpolationsfreie Entfernungs- und Azimutskalierung zur automatischen Anpassung des Bildpunktabstands nach der SAR-Verarbeitung
- Verarbeitung von Spotlight-SAR-Daten mit Dechirp-on-Receive
- Verarbeitung von SAR-Daten mit großem Squint-Winkel

Aufgrund seiner modularen und interpolationsfreien Struktur ist der ECS-Algorithmus besonders für die Echtzeit-Verarbeitung geeignet. Alle Grundfunktionen werden mittels komplexer Multiplikationen und FFT- oder IFFT-Operationen implementiert, so daß Hardware-Lösungen mit DSPs (engl.: **D**igital **S**ignal **P**rocessor) zur effizienten Implementierung dieser Operationen eingesetzt werden können.

Im nächsten Kapitel wird die genaue Modellierung der Verarbeitungsschritte im Stripmap-Abbildungsmodus beschrieben. Anschließend wird die Modellierung für die Verarbeitung von ScanSAR- und Spotlight-Daten erweitert.

6.2 Stripmap-Verarbeitung

Die Entfernungsänderung zum Punktziel während des Vorbeiflugs ist die Basis für die Modellierung des empfangenen SAR-Signals. Die Entfernungsänderung hat einen hyperbolischen Verlauf in Abhängigkeit von der Azimutzeit t und wird wie folgt dargestellt:

$$r(t_a) = \sqrt{r_0^2 + v^2 \cdot (t_a - t_c)^2}, \quad (6.1)$$

wobei t_a der langsamen Zeitvariation in Azimutrichtung entspricht und t_c der Zeitpunkt in der Mitte des Beleuchtungsintervalls ist. Während des Vorbeiflugs entspricht dieser Zeitpunkt der Position des Dopplerschwerpunkts der empfangenen SAR-Daten, die gemäß der Formulierung in Gln. 2.3a bis 2.3c im Kapitel 2.1 folgendermaßen beschrieben werden:

$$s(t_e, t_a) = a_e \left(t_e - \frac{2 \cdot r(t_a)}{c_0} \right) \cdot g_a(t_a) \cdot \exp \left[-j \cdot \pi \cdot k_e \cdot \left(t_e - \frac{2 \cdot r(t_a)}{c_0} \right)^2 \right] \cdot \exp \left[-j \cdot \frac{4 \cdot \pi}{\lambda} \cdot r(t_a) \right], \quad (6.2)$$

wobei t_e der schnellen Zeitvariation in Entfernungsrichtung entspricht, a_e die Hüllkurve des gesendeten Impulses, g_a das Zweiweg-Antennendiagramm in Azimutrichtung und k_e die Modulationsrate des ausgesendeten Chirp-Signals ist. In Entfernungsrichtung weisen die empfangenen SAR-Daten je nach Entfernung zum Radar eine Zeitverzögerung von $2 \cdot r/c_0$ beim Empfang auf. Die Entfernungsvariation $r(t_a)$ enthält die Zielentfernungsänderung in Abhängigkeit von der Azimutzeit. Dieser Verlauf wird in Abb. 6.1 für zwei Punktziele im Nah-

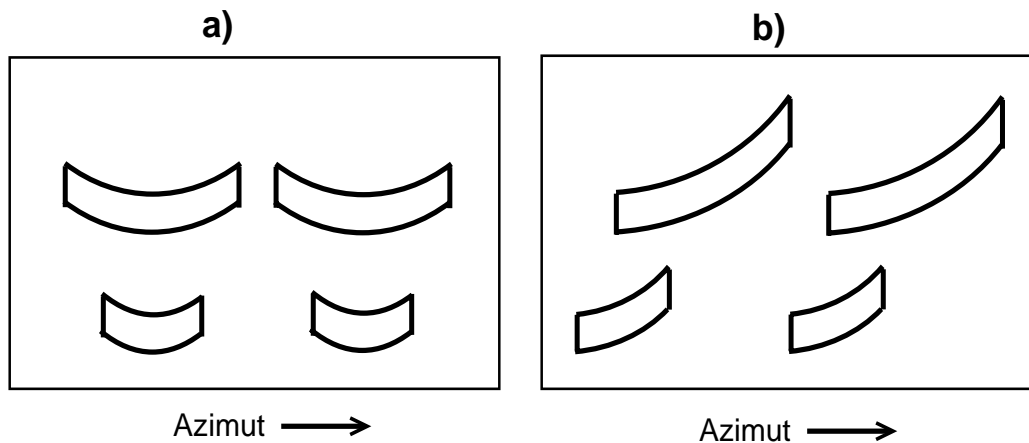


Abb. 6.1: Empfangenes SAR-Signal für vier Punktziele. a) Ohne Squintwinkel und b) mit Squintwinkel. Aufgrund der längeren Beleuchtungszeit weisen die Punktziele im Fernbereich eine größere Zielentfernungsänderung auf.

bereich sowie zwei Punktziele im Fernbereich gezeigt. Aufgrund der kürzeren Beleuchtungszeit der Punktziele im Nahbereich ist ihre Zielentfernungsänderung kleiner als die von Punktzielen im Fernbereich. In Abb. 6.1b wird die Zielentfernungsänderung bei der Aufnahme mit Squintwinkel veranschaulicht. In der Regel muß man in der Prozessierung von SAR-Rohdaten von flugzeug- sowie von satellitengestützten SAR-Systemen den Squintwinkel berücksichtigen, da die Ausstrahlungsrichtung der SAR-Antenne nicht ständig senkrecht zur Bewegungsrichtung der Plattform gehalten werden kann. Zusätzlich zu der nicht idealen Lage der Plattform haben folgende Faktoren Einfluß auf den resultierenden Squintwinkel:

- Für flugzeuggetragene SAR-Systeme wird der Squintwinkel hauptsächlich von der Windkomponente quer zur Flugrichtung bestimmt. Im Fall von kleinen Flugzeugen sind Squintwinkel größer als 10° üblich, so daß die lineare Komponente der Zielentfernungsänderung wesentlich größer als die quadratische ist.
- Im Fall von satellitengestützten SAR-Systemen verursacht die Erddrehung eine lineare Komponente der Zielentfernungsänderung, die den gleichen Effekt auf die empfangenen SAR-Rohdaten wie ein Squintwinkel hat. In der Tat wird im Fall von satellitengestützten SAR-Systemen die Lage der Plattform so gesteuert, daß die lineare Komponente der Erddrehung ausgeglichen wird. Dies führt zu einer Minimierung der resultierenden linearen Zielentfernungsänderung in den empfangenen SAR-Rohdaten und vereinfacht die Korrektur der Zielentfernungsänderung in der Prozessierung.

Der Squintwinkel kann in der Praxis weder in Azimut- noch in Entfernungsrichtung als konstant betrachtet werden. In Azimutrichtung sind die Variationen auf die Änderung in der Lage der Plattform zurückzuführen. In Entfernungsrichtung ist die Änderung des Squintwinkels bedingt durch die Abbildungsgeometrie. Es gilt:

$$\theta_s = \arcsin(\cos \theta_d \cdot \sin \theta_{dr} + \sin \theta_d \cdot \sin \theta_n) , \quad (6.3)$$

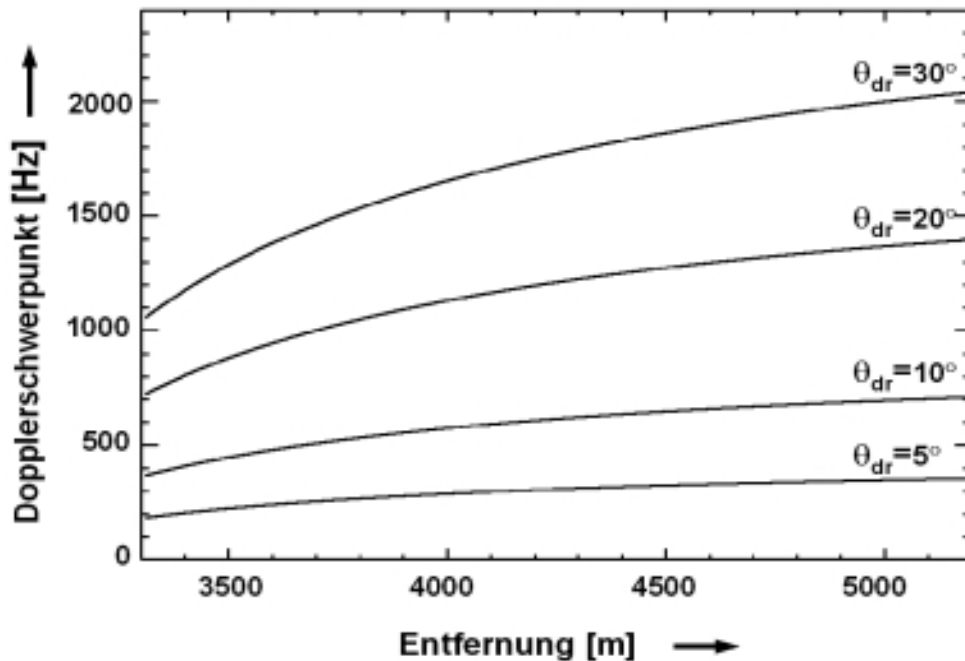


Abb. 6.2: Variation des Dopplerschwerpunktes in Abhängigkeit von der Entfernung und des Driftwinkels θ_{dr} für typische Parameter des E-SAR-Systems im X-Band. Für 20° Driftwinkel beträgt die Windkomponente quer zur Flugrichtung ca. 25 m/s.

wobei θ_d der Depressionswinkel, θ_n der Nickwinkel und θ_{dr} der Driftwinkel ist. Um die Variation des Dopplerschwerpunktes über die Entfernung zu bestimmen, setzt man Gl. 6.3 in Gl. 2.11 ein:

$$f_D = \frac{2 \cdot v}{\lambda} (\cos \theta_d \cdot \sin \theta_{dr} + \sin \theta_d \cdot \sin \theta_n) . \quad (6.4)$$

Abb. 6.2 zeigt die Variation des Dopplerschwerpunktes in Abhängigkeit von der Entfernung und des Driftwinkels für das E-SAR-System mit folgenden Flug- und Systemparametern:

- X-Band (9,6 GHz),
- $v = 75$ m/s, Flughöhe von 3000 m,
- Depressionswinkel von 35° bis 65° und Nickwinkel $\theta_n = 0^\circ$.

Die Variation des Dopplerschwerpunktes muß in der Verarbeitung der SAR-Daten berücksichtigt werden, damit eine korrekte Anpassung der Azimutreferenzfunktion an die Dopplermodulation gewährleistet ist. Der erste Hauptschritt in der Verarbeitung mit dem ECS-Algorithmus ist die Transformation der SAR-Rohdaten mittels Azimut-FFTs in den Range-Doppler-Bereich. Die Anpassung der Azimutreferenzfunktion an die Dopplermodulation der SAR-Daten wird im Range-Doppler-Bereich sichergestellt, indem der Azimutfrequenzbereich wie folgt erweitert wird:

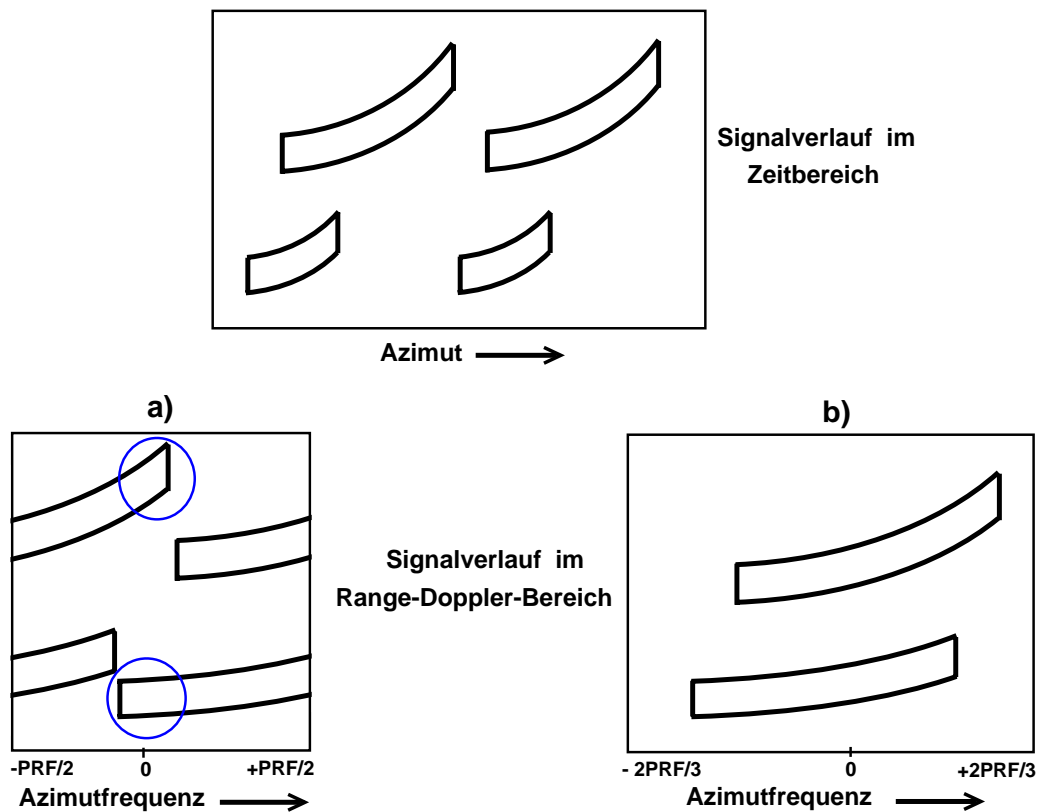


Abb. 6.3: Darstellung des Signalverlaufs von zwei Punktzielen in den Rohdaten sowie nach der Transformation in den Range-Doppler-Bereich: a) ohne Erweiterung des Azimutspektrums, b) mit Erweiterung des Azimutspektrums. Die mit einem Kreis gekennzeichneten Bereiche in Abb. 6.3a zeigen die mehrdeutigen Anteile des Azimutspektrums.

$$\min[f_D] - \frac{PRF}{2} < f_a < \max[f_D] + \frac{PRF}{2} . \quad (6.5)$$

Abb. 6.3 veranschaulicht die Erweiterung des Azimutspektrums. Nach der Transformation in den Range-Doppler-Bereich sind die Azimutsignalverläufe entsprechend der Variation des Dopplerschwerpunkts verschoben. Aufgrund der Anwendung der FFT ist der eindeutige Variationsbereich des Azimutspektrums auf PRF beschränkt. Dies führt dazu, daß die mit einem Kreis gekennzeichneten Bereiche nicht eindeutig im Azimutspektrum dargestellt werden können. Nach der Erweiterung des Azimutspektrums gemäß Abb. 6.3b sind alle Frequenzbereiche eindeutig dargestellt.

6.2.1 Modellierung im Range-Doppler-Bereich

Um die nächsten Verarbeitungsschritte durchführen zu können, wird eine genaue Modellierung der SAR-Daten im Range-Doppler-Bereich benötigt. Die Ableitung der Signaldarstellung in diesem Bereich ist nicht trivial, da aufgrund der Entfernungsänderung die Azimut- und Entfernungsmodulationen nicht orthogonal zueinander sind. Dies führt dazu, daß nach der Durchführung der Azimut-FFTs die Modulationsrate k_e in Entfernung je nach Stärke des

Squintwinkels modifiziert ist [29]. Da der Squintwinkel mit der Entfernung variiert, ist die Änderung der Modulationsrate in Entfernung im Range-Doppler-Bereich auch von der Entfernung abhängig. Wie im Kapitel 4.2.2 dargestellt, gleicht man die Änderung der Modulationsrate des Chirp-Signals durch die sogenannte sekundäre Entfernungskompression (engl.: **Secondary Range Compression** oder SRC) aus.

Die Hauptannäherung in der Verarbeitung mit dem Chirp Scaling-Algorithmus ist die Annahme einer entfernungsunabhängigen SRC [74], [53]. Für hohe Squintwinkel muß aufgrund dieser Näherung eine blockweise Entfernungskompression durchgeführt werden, so daß der während der SRC-Operation konstant gehaltene Entfernungswert für jeden Verarbeitungsblock aktualisiert werden kann. Andere auf dem Chirp Scaling basierende Verfahren enthalten zusätzliche Verarbeitungsschritte zur Prozessierung von Daten mit hohem Squintwinkel, um eine Blockverarbeitung zu vermeiden [14].

Um die Formulierung des SAR-Signals im Range-Doppler-Bereich abzuleiten, wird zuerst die Darstellung der SAR-Rohdaten im Wavenumber-Bereich berechnet. Nach einer Reihenentwicklung und inversen FFTs in Entfernungsrichtung erhält man schließlich die Formulierung des SAR-Signals $S(t_e, f_a)$ im Range-Doppler-Bereich [74], [53]:

$$S(t_e, f_a) = C \cdot a_e \left(t_e - \frac{2 \cdot R(f_a)}{c_0} \right) \cdot g_a \left(-\frac{r_0 \cdot \lambda \cdot f_a}{2 \cdot v^2 \cdot \beta(f_a)} \right) \cdot \exp \left[-j \cdot \pi \cdot K_e(f_a) \cdot \left(t_e - \frac{2 \cdot R(f_a)}{c_0} \right)^2 \right] \cdot \exp \left[-j \cdot \frac{4 \cdot \pi}{\lambda} \cdot r_0 \cdot \beta(f_a) \right], \quad (6.6)$$

wobei C eine komplexe Konstante ist. R und K_e sind die Zielentfernungsänderung bzw. die Modulationsrate im Range-Doppler-Bereich. β ist eine von der Azimutfrequenz abhängige Funktion ($0 \leq \beta \leq 1$). Der erste Exponentialterm in Gl. 6.6 gibt die modifizierte Entfernungsmodulation wieder, der zweite die Azimutmodulation im Range-Doppler-Bereich. Für $f_a = 0$ ist die Azimutmodulation orthogonal zur Entfernungsmodulation, so daß $K_e = k_e$. Für die Darstellung von R , K_e und β im Range-Doppler-Bereich gilt:

$$R(f_a) = \frac{r_0}{\sqrt{1 - \left(\frac{f_a \cdot \lambda}{2 \cdot v} \right)^2}}, \quad (6.7)$$

$$\frac{1}{K_e(f_a)} = \frac{1}{k_e} - \frac{2 \cdot \lambda \cdot r_0 (\beta^2(f_a) - 1)}{c_0^2 \cdot \beta^3(f_a)}, \quad (6.8)$$

$$\beta(f_a) = \sqrt{1 - \left(\frac{f_a \cdot \lambda}{2 \cdot v} \right)^2}. \quad (6.9)$$

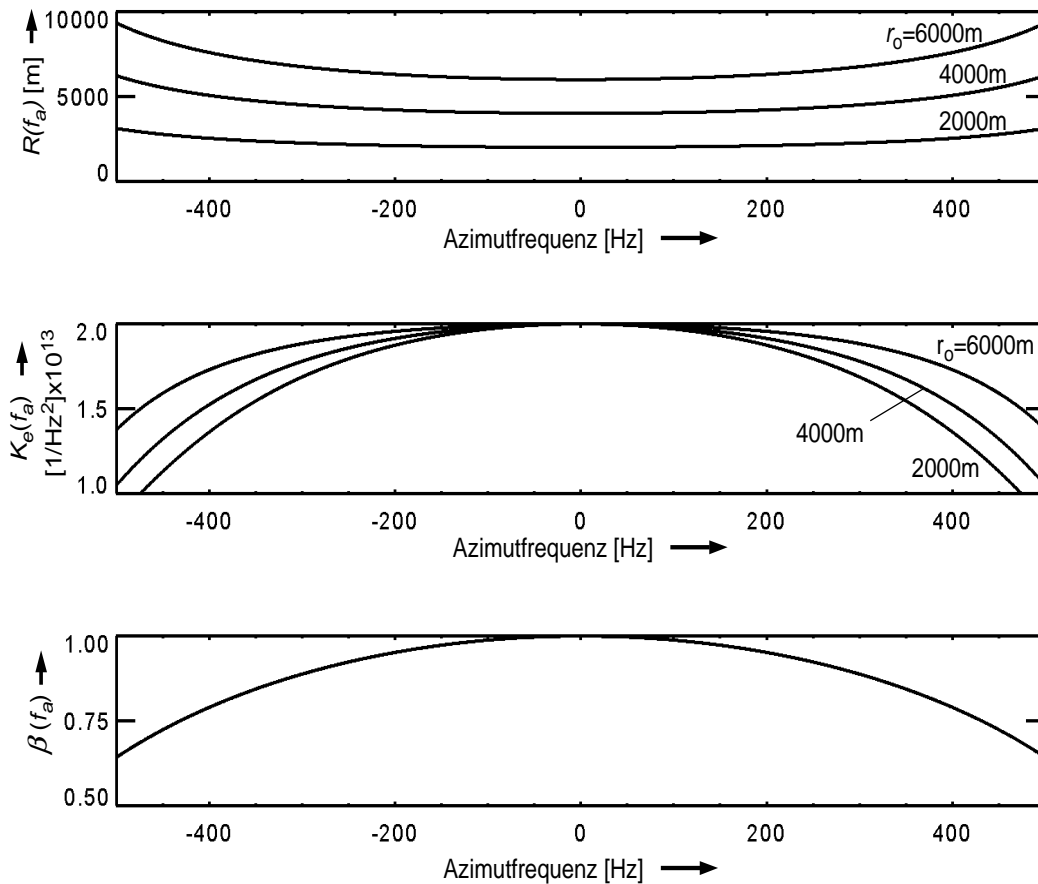


Abb. 6.4: Schematischer Verlauf von wichtigen Kenngrößen für die Darstellung des SAR-Signals im Range-Doppler-Bereich. a) Zielentfernungsänderung R , b) Modulationsrate K_e in Entfernungsrichtung und c) Funktion β .

Der zweite Term rechts in Gl. 6.8 stellt die Änderung der Modulationsrate mit der Entfernung dar und wird durch die sekundäre Entfernungskompression im Wavenumber-Bereich kompensiert. Durch Einsetzen von Gl. 2.11 in Gl. 6.9 erhält man folgende Beziehung für β in Abhängigkeit vom Squintwinkel:

$$\beta(\theta_s) = \sqrt{1 - (\sin \theta_s)^2} = \cos \theta_s . \quad (6.10)$$

Abb. 6.4 zeigt schematisch den Verlauf von R , K_e und β in Abhängigkeit von der Azimutfrequenz. Der Variationsbereich der Azimutfrequenz für diese Kenngrößen ist gemäß Gl. 6.5 definiert. Das Beispiel in Abb. 6.4 gilt für einen Dopplerschwerpunkt f_D gleich null. Im Fall eines Squintwinkels verschiebt sich der Variationsbereich dieser Kenngrößen nach rechts oder links, entsprechend einem positiven bzw. negativen Wert des Dopplerschwerpunkts.

6.2.2 Chirp Scaling-Funktion

Der erste Verarbeitungsschritt im Range-Doppler-Bereich ist der Angleich der Zielentfernungsänderung mittels der Chirp Scaling-Funktion. Wie im Kapitel 4.2.4 dargestellt, führt die Chirp Scaling-Funktion zu einer Verschiebung des Phasenzentrums der Entfernungsmodulation, so daß die Zielentfernungsänderung an die einer Referenzentfernung r_{ref} angeglichen wird.

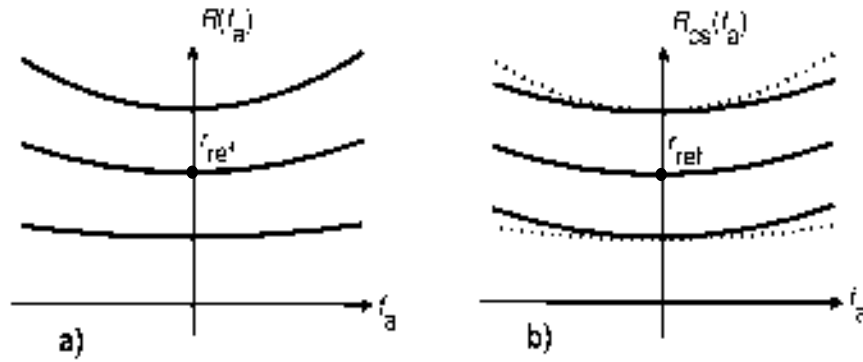


Abb. 6.5: Trajektorie des Phasenzentrums der Zielentfernungsänderung im Range-Doppler-Bereich. a) vor der Chirp Scaling-Operation und b) nach der Chirp Scaling-Operation.

Abb. 6.5 zeigt die Trajektorie der Zielentfernungsänderung R vor und nach der Chirp Scaling-Operation. Nach der Chirp Scaling-Operation gilt folgende Formulierung für die Trajektorie des Phasenzentrums der Zielentfernungsänderung:

$$R_{cs}(f_a) = R(f_a; r_{ref}) + r_0 - r_{ref} = \frac{r_{ref}}{\beta(f_a)} + r_0 - r_{ref}, \quad (6.11)$$

wobei $R(f_a; r_{ref})$ die Zielentfernungsänderung für die Referenzentfernung ist. Vergleicht man Gl. 6.11 mit Gl. 6.7, stellt man fest, daß die Variation der Zielentfernungsänderung in Gl. 6.11 nur noch den Anteil der Variation entsprechend der Referenzentfernung (d. h. $r_{ref}/\beta(f_a)$) enthält. Zusätzlich enthält Gl. 6.11 einen Offset-Term $r_0 - r_{ref}$, so daß sich für Azimutfrequenz gleich null $R_{cs}(f_a) = r_0$ ergibt.

Für die Chirp Scaling-Funktion H_1 zum Angleich der Zielentfernungsänderung im Range-Doppler-Bereich gilt:

$$H_1(t_e, f_a) = \exp \left[-j \cdot \pi \cdot K_e(f_a) \cdot a(f_a) \cdot \left(t_e - \frac{2 \cdot R(f_a)}{c_0} \right)^2 \right], \quad (6.12)$$

wobei der Chirp Scaling-Faktor $a(f_a)$ folgendermaßen definiert ist:

$$a(f_a) = \frac{1}{\beta(f_a)} - 1. \quad (6.13)$$

Für den Skalierungsfaktor gilt, daß $0 \leq a(f_a) \leq 1$. Falls $a(f_a) = 0$, wird die Funktion H_1 zu 1, und es findet keine Skalierung statt.

Die Multiplikation mit der Funktion H_1 führt für $a(f_a) \neq 0$ und $r_0 \neq r_{ref}$ zu einer kleinen Änderung der Modulationsrate und zusätzlich zu einer Frequenzverschiebung des Signals in Entfernungsrichtung (siehe Abb. 4.5). Die kleine Änderung der Modulationsrate kann in den weiteren Schritten der Verarbeitung kompensiert werden. Die Frequenzverschiebung darf nicht so groß werden, daß Frequenzbereiche des Chirp-Signals an den Grenzen der prozessierten Signalbandbreite fehlen. In [55] wurde eine modifizierte Formulierung für den Chirp Scaling-Faktor vorgeschlagen, die folgende Eigenschaften besitzt:

- Minimierung der von der Funktion H_1 verursachten Frequenzverschiebung der Entfernungsmodulation. In diesem Fall lautet die Formulierung des Skalierungsfaktors:

$$a_{\min}(f_a) = \frac{1 + a(f_a)}{1 - a(f_D)} - 1. \quad (6.14)$$

- Zusätzliche geometrische Skalierung in Entfernung, falls eine Änderung des Punktabstands im Endbild gewünscht ist. Unter Annahme eines Skalierungsfaktors α_e ergibt sich folgende Formulierung für den Chirp Scaling-Faktor:

$$a_{\text{scl}}(f_a) = \frac{1 + a(f_a)}{\alpha_e} - 1. \quad (6.15)$$

Gl. 6.15 wird oftmals für die automatische Koregistrierung von interferometrischen Bildern in Entfernung verwendet, wobei der Skalierungsfaktor α_e so gewählt wird, daß die Mißregistrierung zwischen den interferometrischen Bildern ausgeglichen wird. Diese Vorgehensweise zeigt in der Praxis sehr gute Ergebnisse für SAR-Daten sowohl von flugzeug- als auch von satellitengestützten SAR-Sensoren. Die Mißregistrierung, die aufgrund der unterschiedlichen Depressionswinkel eines interferometrischen Aufnahmepaares zustande kommt, kann mit guter Genauigkeit als eine lineare Skalierung modelliert werden.

Abb. 6.6 zeigt eine detaillierte Darstellung der Verarbeitungsschritte gemäß dem ECS-Algorithmus, bei der die genaue Stelle der Multiplikation der Funktion H_1 mit dem SAR-Signal im Range-Doppler-Bereich ersichtlich wird. Nach Angleich der Zielentfernungsänderung durch die Funktion H_1 wird der restliche, entfernungsunabhängige Anteil der Zielentfernungsänderung im Wavenumber-Bereich mit einer linearen Phasenfunktion entfernt.

6.2.3 Entfernungskompression und Zielentfernungskorrektur

Nach der Durchführung von FFTs in Entfernungsrichtung erhält man die Signaldarstellung im Wavenumber-Bereich. In diesem Bereich werden folgende Verarbeitungsschritte vorgenommen:

- Entfernungskompression,
- Sekundäre Entfernungskompression und
- Korrektur des restlichen Anteils der Zielentfernungsänderung.

Die sekundäre Entfernungskompression ist zwar von Azimutfrequenz und Entfernung abhängig, kann aber in der Verarbeitung mit dem Chirp Scaling-Algorithmus nur für eine Referenzentfernung r_{ref} kompensiert werden. Dadurch entsteht für hohe Squintwinkel ein Phasenfehler im Endbild. In der Regel wird die Referenzentfernung r_{ref} in der Mitte des Entfernungsbereichs gesetzt, so daß dieser Phasenfehler im Nah- und Fernbereich größer ist. Je nach Größe des Phasenfehlers muß man auch mit einer deutlichen Verschlechterung der Impulsantwort in Entfernungsrichtung rechnen. Um diese Einschränkung bei hohem Squintwinkel zu umgehen, kann

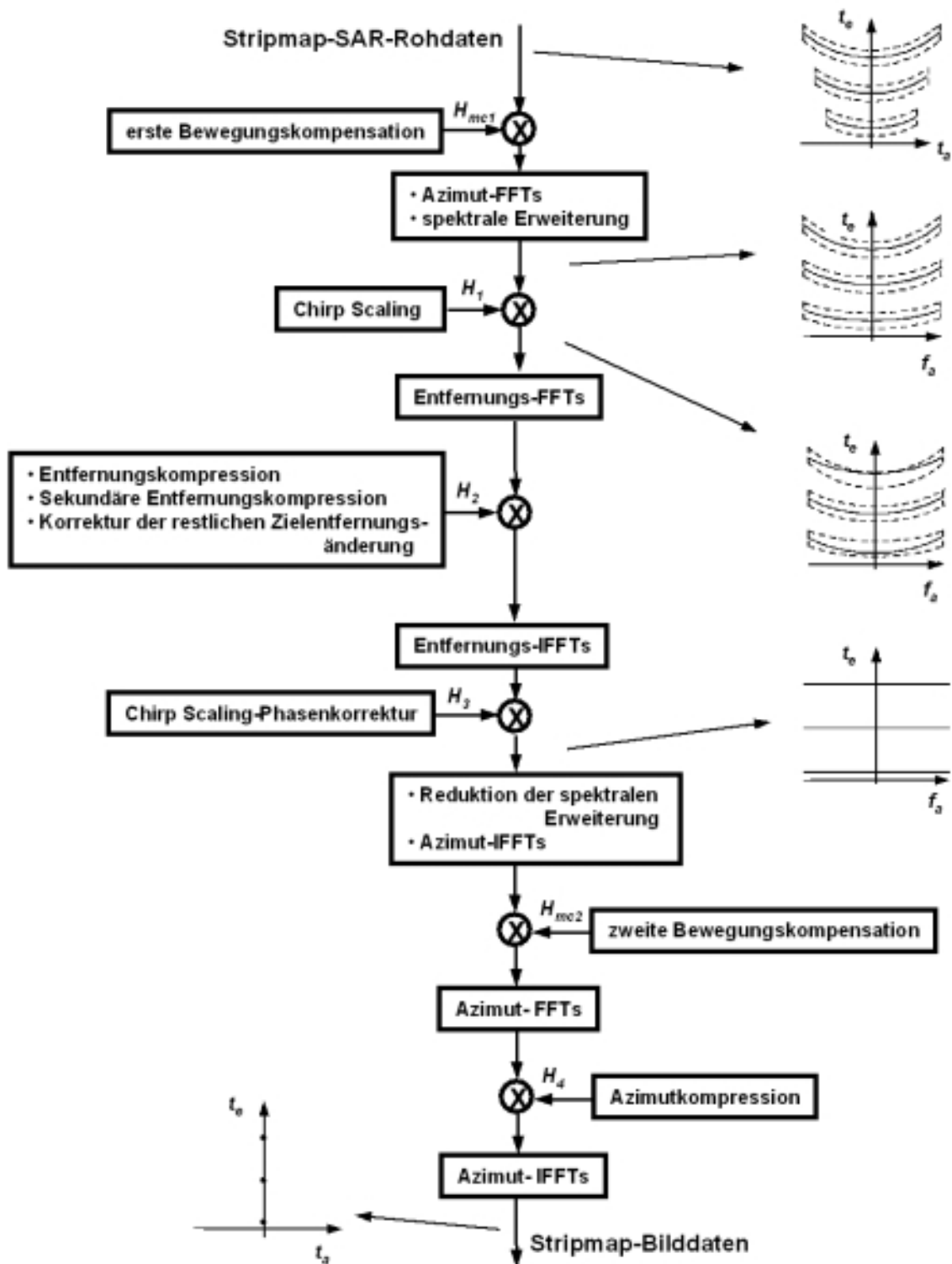


Abb. 6.6: Blockdiagramm des ECS-Algorithmus mit schematischer Signaldarstellung in den verschiedenen Verarbeitungsschritten. Die Funktionen H_1 , H_2 , H_3 und H_4 werden gemäß Gln. 6.12, 6.16, 6.18 bzw. 6.21 definiert. Die Funktionen H_{mc1} und H_{mc2} dienen zur Kompensation der Bewegungsfehler der Plattform und werden in der Regel nur für flugzeuggestützte SAR-Systeme benötigt.

der gesamte Entfernungsbereich in kleinere Blöcke aufgeteilt werden, wobei bei jedem Block eine neue Referenzentfernung in der Mitte des jeweiligen Entfernungsbereichs ausgewählt wird. Diese Vorgehensweise führt in der Praxis zu sehr guten Ergebnissen. Ausnahme sind SAR-Systeme mit sehr niedriger Sendefrequenz und mit hoher Auflösung (z. B. CARABAS-System im VHF-Band [84]).

Die Phasenfunktion zur Durchführung der oben genannten Verarbeitungsschritte im Wavenumber-Bereich lautet [74], [55]:

$$H_2(f_e, f_a) = \exp \left[-j \cdot \pi \cdot \frac{1}{K_e(f_a; r_{\text{ref}}) \cdot (1 + a(f_a))} \cdot f_e^2 \right] \cdot \exp \left[j \cdot \frac{4 \cdot \pi \cdot r_{\text{ref}}}{c_0} \cdot a(f_a) \cdot f_e \right]. \quad (6.16)$$

Der erste Term in Gl. 6.16 führt die Entfernungskompression aus, während der zweite Term den entfernungsunabhängigen Anteil der Zielentfernungsänderung kompensiert und wie folgt auf dem Verschiebungssatz der Fourier-Transformation basiert:

$$s \left(t_e - \frac{2 \cdot (R(f_a; r_{\text{ref}}) - r_{\text{ref}})}{c_0} \right) = S(f_e) \cdot \exp \left[j \cdot \frac{4 \cdot \pi \cdot (R(f_a; r_{\text{ref}}) - r_{\text{ref}})}{c_0} \cdot f_e \right]. \quad (6.17)$$

Mit Einsetzen von Gln. 6.7, 6.9 und 6.13 in Gl. 6.17 erhält man die Formulierung gemäß dem zweiten Term der Funktion H_2 .

Nach den inversen FFTs in Entfernungsrichtung werden die SAR-Daten nochmals in den Range-Doppler-Bereich transformiert. In diesem Bereich sind die SAR-Daten in Entfernungsrichtung komprimiert, und die Zielentfernungsänderung ist vollständig entfernt (siehe Abb. 6.6). Als nächster Verarbeitungsschritt kommt die Multiplikation mit der Funktion H_3 , die einen durch die Chirp Scaling-Operation eingefügten Phasenterm kompensiert:

$$H_3(f_a) = \exp \left[-j \cdot 4 \cdot \pi \cdot K_e(f_a) \cdot a(f_a) \cdot (1 + a(f_a)) \cdot \left(\frac{r_0 - r_{\text{ref}}}{c_0} \right)^2 \right]. \quad (6.18)$$

Falls keine Bewegungskompensation erforderlich ist, wird die Azimutkompression mit diesem Verarbeitungsschritt kombiniert. Für die Bewegungskompensation ist es erforderlich, die SAR-Daten in den Zeitbereich zu transformieren, da die Funktion $H_{\text{mc}2}$ zur entfernungsabhängigen Bewegungskompensation von der Azimutzeit und der Entfernungsposition abhängig ist.

Zur genauen Bewegungskompensation bei der Prozessierung von hochauflösenden Flugzeug-SAR-Daten werden zusätzlich zu den Multiplikationen mit den beiden Phasenfunktionen $H_{\text{mc}1}$ und $H_{\text{mc}2}$ noch folgende Verarbeitungsschritte vorgenommen:

- Ausgleich der Variation der Trägergeschwindigkeit. Vor Beginn der Prozessierung werden die SAR-Rohdaten auf ein konstantes Abtastintervall in Azimutrichtung interpoliert, was die Variationen der Trägergeschwindigkeit kompensiert.

- Kompensation des entfernungsunabhängigen Anteils des Positionsfehlers in Blickrichtung der Antenne. Nach der Multiplikation mit der Funktion H_{mc1} zur Bewegungskompensation auf eine Referenzentfernung wird jede Entfernungszeile um Δr_{mc1} verschoben, wobei Δr_{mc1} aus den Positionsdaten des Bewegungserfassungssystems¹ berechnet wird. Für die Funktion H_{mc1} gilt

$$H_{mc1}(t_a, r_{ref}) = \exp \left[j \cdot \frac{4 \cdot \pi}{\lambda} \cdot \Delta r_{mc1}(t_a, r_{ref}) \right]. \quad (6.19)$$

- Kompensation des entfernungsabhängigen Anteils des Positionsfehlers in Blickrichtung der Antenne. Zusätzlich zu der vorherigen Korrektur muß nach Multiplikation mit der Funktion H_{mc2} eine entfernungsabhängige Neuabtastung der SAR-Daten für jede Entfernungszeile durchgeführt werden. Bei dieser Neuabtastung wird der restlichen Anteil des Bewegungsfehlers in Blickrichtung der Antenne korrigiert.

$$\Delta r_{mc2}(t_a, r_0) = \Delta r_{mc}(t_a, r_0) - \Delta r_{mc1}(t_a, r_{ref}). \quad (6.20)$$

Mit den oben genannten Schritten werden die Abweichungen aus der nominalen Position der Flugbahn kompensiert. Zusätzlich werden die Amplitudenmodulationen, die durch die Variationen der Lage (Roll-, Nick- und Driftwinkel) des Trägers verursacht werden, mit Kenntnissen des Antennendiagramms in Elevation und Azimutrichtung kompensiert. Diese Kompensation findet im Rahmen von weiteren Korrekturen zur genauen Kalibrierung der SAR-Daten statt [19].

6.2.4 Azimutkompression

Nachdem die Zielentfernungsänderung vollständig eliminiert wurde, kann die Azimutkompression eindimensional durchgeführt werden. Für die Referenzfunktion H_4 ergibt sich

$$H_4(f_a) = \exp \left[j \cdot \frac{4 \cdot \pi}{\lambda} \cdot r_0 \cdot (\beta(f_a) - 1) \right]. \quad (6.21)$$

Anschließend werden die SAR-Daten mittels inverser Azimut-FFTs in den Zeitbereich transformiert, und das Ergebnis der Prozessierung sind SAR-Bilder in komplexem Format. Für interferometrische und polarimetrische Anwendungen wird die Phaseninformation weiter ausgewertet. Wird nur die Intensität der Rückstreuung für die weitere Auswertung benötigt, wird abschließend der Betrag der Bilddaten gebildet. In den vorhergehenden Verarbeitungsschritten muß die Phaseninformation für eine kohärente SAR-Verarbeitung unbedingt berücksichtigt werden.

Analog zur Skalierung in Entfernungsrichtung kann eine geometrische Skalierung in Azimutrichtung eingefügt werden, falls eine Anpassung des Punktabstands im Endbild gewünscht wird. Die Azimutskalierung wird in Kapitel 6.3.3 im Zusammenhang mit der ScanSAR-Verarbeitung genauer beschrieben.

¹ Üblicherweise wird zur genauen Erfassung von Positions- und Lagefehlern eine integrierte Lösung mit differentiellem GPS und INS benutzt [7].

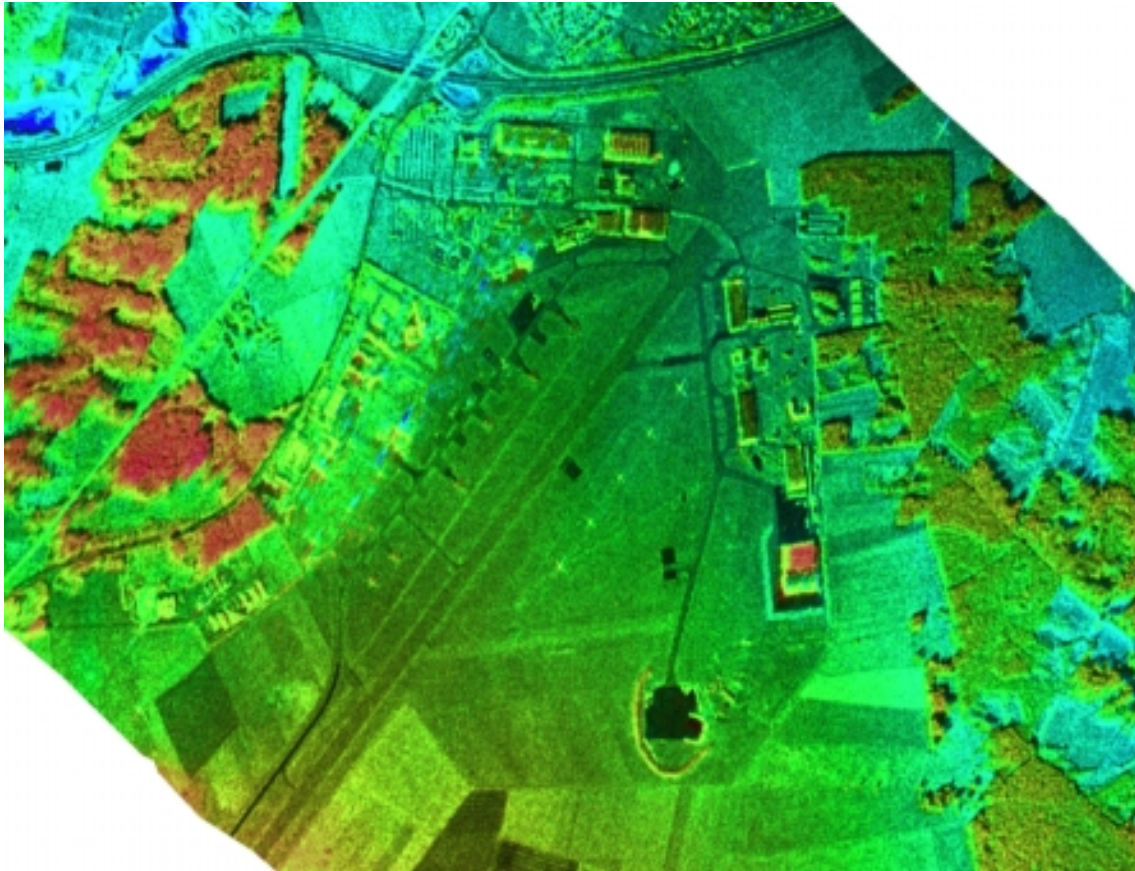


Abb. 6.7: Mit dem ECS-Algorithmus prozessiertes Radarbild des E-SAR-Systems im interferometrischen Abbildungsmodus (X-Band). Gezeigt wird der Landeplatz von Oberpfaffenhofen sowie dessen Umgebung. Die Höhe des Geländes ist mit Falschfarben kodiert und variiert von dunkelblau bis rot um ca. 35 m. Die Punktabstände in Entfernungs- und Azimutrichtung betragen jeweils 3 m.

6.2.5 Verarbeitung von E-SAR-Daten mit dem ECS-Algorithmus

Der ECS-Algorithmus wird seit 1996 für die operationelle Verarbeitung von E-SAR-Daten verwendet. Bereits über 1500 Bilder für mehr als 60 Institutionen weltweit sind inzwischen allein beim DLR prozessiert worden. Die Prozessor-Software wurde in IDL (Interactive Data Language) entwickelt und ist auf sechs PC-Rechnern vom Typ Pentium-III mit 800 MHz Taktfrequenz und jeweils 1 GByte Hauptspeicher installiert. Diese Rechner haben ein Linux-Betriebssystem und sind mit einem schnellen Netz miteinander verbunden. Bildprodukte werden auf EXAByte-Kassetten oder CD-ROMs abgespeichert.

Oftmals werden die E-SAR-Flugkampagnen im Auftrag von externen Firmen durchgeführt. Ein Beispiel dafür sind die Flugkampagnen ProSmart-I und ProSmart-II im Auftrag von Astrium GmbH zur Entwicklung neuer Fernerkundungsprodukte mit SAR-Daten [77].

Abb. 6.7 zeigt ein Bildbeispiel des E-SAR-Systems im X-Band, das mit dem ECS-Algorithmus prozessiert wurde. Parallel zur Landebahn sind fünf Corner Reflektoren (helle Punkte) zu sehen, die zur Kalibrierung der Radarrückstreuung dienen. In der Regel erreicht man mit dem E-SAR-System eine absolute und relative Kalibrierungsgenauigkeit der Rückstreuung von ca. 1 bzw. 0.5 dB. Die Höhe des Geländes in Abb. 6.7 wurde mit dem interferometrischen Ab-

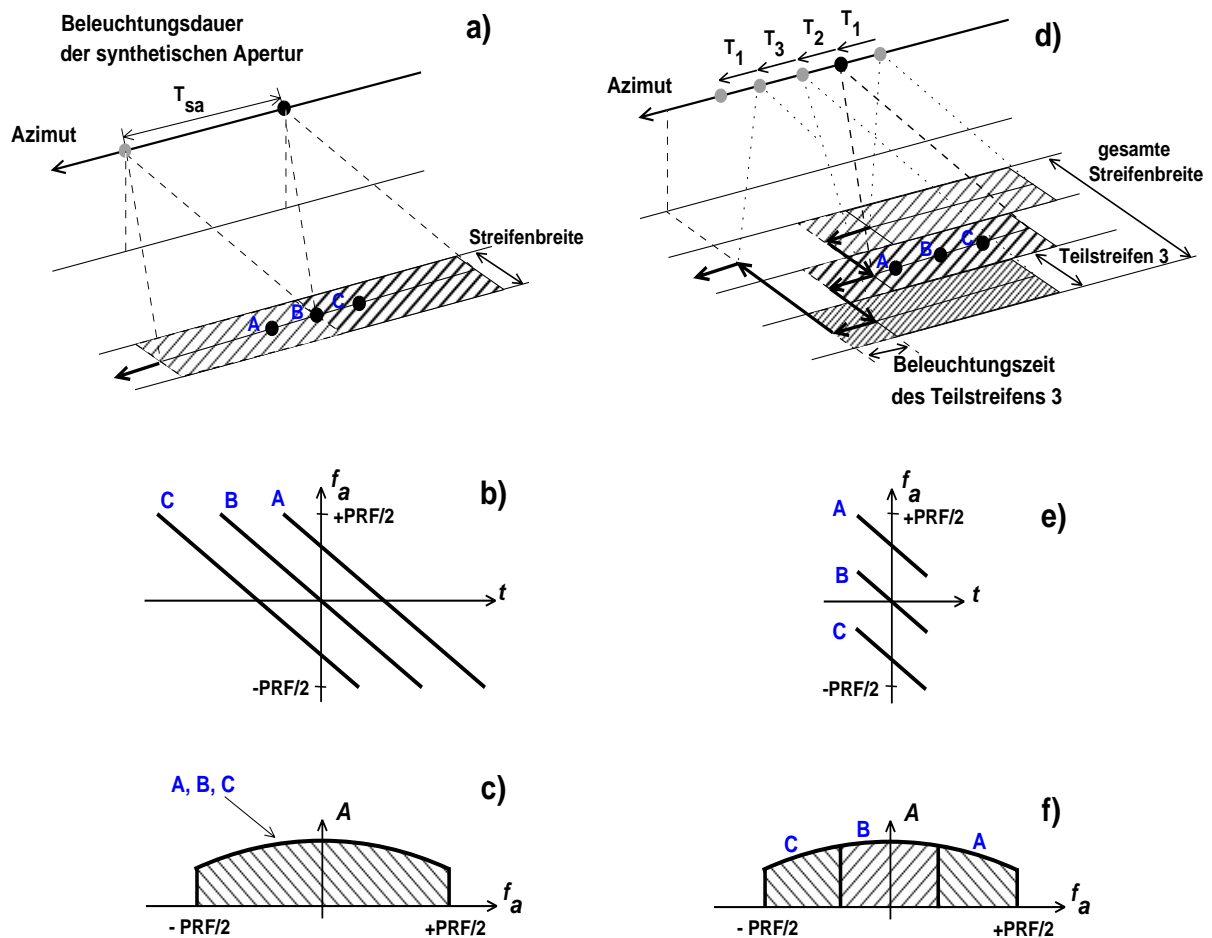


Abb. 6.8: Abbildungsgeometrie und Frequenzverlauf von drei Punktzielen in Stripmap- und ScanSAR-Abbildungsgeometrie: a) Stripmap-Geometrie, b) Frequenzverlauf der Ziele, c) spektrale Darstellung, d) ScanSAR-Geometrie, e) Frequenzverlauf und f) spektrale Darstellung.

bildungsmodus des E-SAR-Systems im X-Band ermittelt und ist in Falschfarben kodiert. Die Standardabweichung der Höhengenaugigkeit beträgt ca. 1 m. Dieser Wert ist durch die Genauigkeit des Erfassungssystems zur Bewegungskompensation bedingt. Eine bessere Genauigkeit kann beispielsweise mit Verwendung eines empfindlicheren INS erreicht werden [87].

6.3 ScanSAR-Verarbeitung

Wie im Kapitel 5.1 dargestellt, wendet man das ScanSAR-Prinzip an, um die gesamte Breite des abgebildeten Streifens zu erweitern. Aufgrund des schrittweisen Schwenkens des Antennendiagramms in Elevation ist die Abbildung in Azimutrichtung nicht mehr kontinuierlich. Die synthetische Apertur besteht aus einzelnen „Paketen“ von Radarechos (engl.: Bursts).

Abb. 6.8 zeigt die Abbildungsgeometrie und den Frequenzverlauf für drei Punktzeile im zweiten Teilstreifen eines ScanSAR-Systems sowie in der Streifenmitte für ein Stripmap-SAR. Der Frequenzverlauf in Abb. 6.8b und die spektrale Darstellung in Abb. 6.8c zeigen, daß die Dopplermodulation für die drei Ziele unterschiedliche Frequenzbereiche aufweist. Für Stripmap-SAR sind zwar die Frequenzverläufe in Azimutrichtung entsprechend der Position

der Ziele zeitlich versetzt, aber der Variationsbereich der Dopplermodulation ist für alle Ziele identisch (siehe Abb. 6.8d bis 6.8f).

Für die Azimutverarbeitung von ScanSAR-Daten kann man für jeden Burst eine Referenzfunktion identisch der Stripmap-Verarbeitung verwenden. Dies führt aber zu einer sehr ineffizienten Verarbeitung. Grund dafür ist, daß die Bursts in der Regel weniger als 100 Echos enthalten, während die Stripmap-Referenzfunktion über 1000 Abtastwerte aufweist. Da für die Azimutkorrelation im Frequenzbereich die Fourier-Transformation des SAR-Signals und der Referenzfunktion die gleiche Punktzahl haben muß, wird jedes Burst-Signal vor der Azimut-FFT mit Nullen auf die Länge der Referenzfunktion erweitert. Für das SIR-C-Beispiel von Kapitel 5.1, bei dem die Burst-Länge in Azimut je nach Teilstreifen zwischen 33 und 48 Abtastwerten variiert und die Azimutreferenzfunktion ca. 1200 Punkte aufweist, benötigt man für die Fourier-Transformation von jedem Burst eine Azimut-FFT mit 2048 Punkten. In diesem Fall sind die meisten Abtastwerte (ca. 2000) bei der Fourier-Transformation gleich null, so daß sich die Verarbeitung als sehr ineffektiv erweist. Als wesentlich effektiver zeigt sich das SPECAN-Verfahren zur Verarbeitung von ScanSAR-Daten.

6.3.1 SPECAN-Verfahren

Das SPECAN-Verfahren (engl.: **S**pectral **A**nalysis) wird oft für eine effektive ScanSAR-Verarbeitung benutzt [68]. Dabei ersetzt eine kurze Fourier-Transformation die zwei langen FFT-Transformationen, welche bei der Faltungsoperation im Frequenzbereich benötigt werden.

Abb. 6.9 veranschaulicht das Prinzip des SPECAN-Verfahrens. Zuerst werden die SAR-Daten in Azimut mit einer sogenannten Deramping-Funktion multipliziert, die die quadratische Phasenmodulation entfernt. Nach diesem Verarbeitungsschritt besteht die Azimutmodulation für jedes Punktziel aus einem Signal konstanter Frequenz. Der nächste Schritt in der SPECAN-Verarbeitung ist eine Fourier-Transformation, wobei die Abtastwerte der einzelnen Bursts mit Nullen so ergänzt werden, daß die Zahl der Abtastwerte für die FFT aus einer n -fachen Zweier-Potenz bestehen. Im Fall der ScanSAR-Verarbeitung des SIR-C-Sensors im Kapitel 5.1 ist eine Erweiterung auf 64 Punkte notwendig, damit die Durchführung der Fourier-Transformation mit einem FFT-Algorithmus effizient ist. Im Vergleich zur Verarbeitung mit Korrelation im Frequenzbereich ist der SPECAN-Algorithmus um ein Vielfaches schneller.

Da das Azimutsignal nach der Deramping-Operation gemäß Gl. 4.8 als eine Rechteckfunktion mit einer Offset-Frequenz modelliert werden kann, ergeben sich nach der Azimut-FFT bereits die komprimierten Punktzielantworten, obwohl die Signaldarstellung im Frequenzbereich erfolgt. Je höher die Offset-Frequenz nach der Deramping-Operation, desto entfernter ist die Position der Punktzielantwort von der Frequenz null. Für diese Positionierung der Punktziele im Frequenzbereich $f_a(t_0)$ läßt sich aus Gln. 2.7, 6.1 und 6.10 folgende Beziehung ableiten:

$$f_a(t_0) = -\frac{2 \cdot v^2}{\lambda \cdot r_0} \cdot \beta \cdot t_0, \quad (6.22)$$

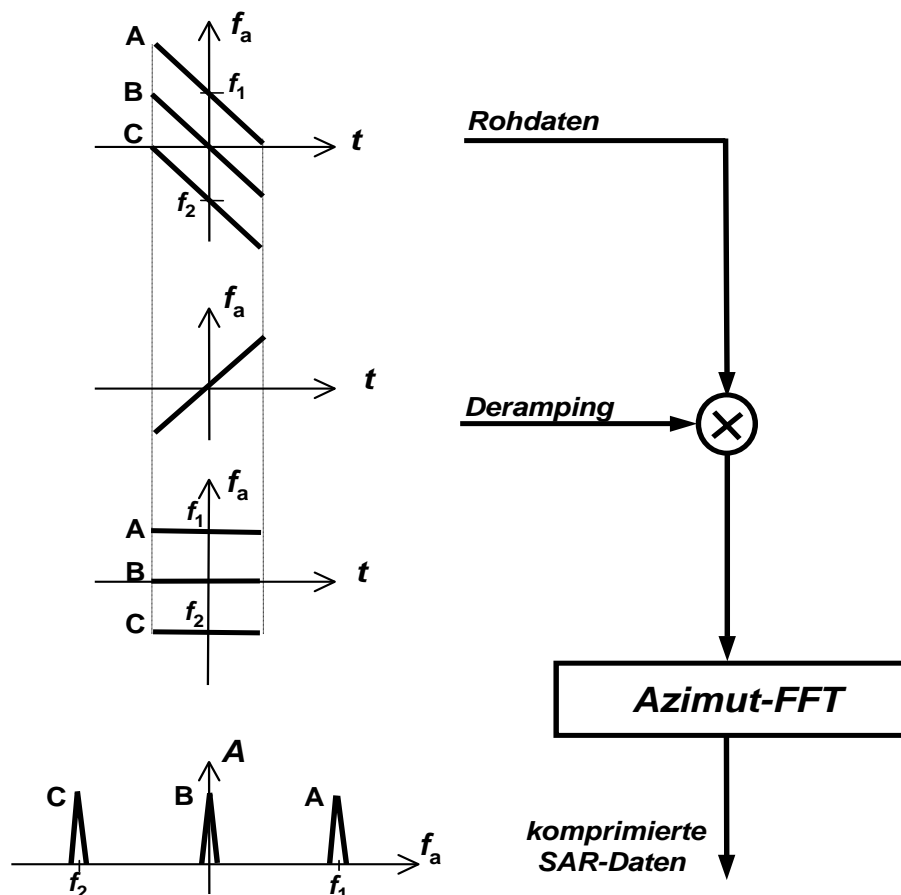


Abb. 6.9: Schematische Darstellung der ScanSAR-Verarbeitung in Azimut mit dem SPECAN-Algorithmus. Der Punktabstand nach der FFT ist von der Dopplerrate k_a abhängig.

wobei t_0 die Position des Punktzieles im Zeitbereich ist. Näherungsweise gilt für Gl. 6.22

$$f_a \approx -\frac{2 \cdot v^2}{\lambda \cdot r_0} \cdot t_0 = k_a \cdot t_0 . \quad (6.23)$$

Die Positionierung der Punktziele nach der SPECAN-Verarbeitung variiert also mit der Dopplerrate k_a , d.h. im Nahbereich wird die Positionierung der Ziele wegen der höheren Dopplerrate gestreckt, während im Fernbereich eine Stauchung erfolgt. Diese geometrische Skalierung der Bilddaten in Abhängigkeit von der Dopplerrate ist einer der Hauptnachteile des SPECAN-Verfahrens. Im Endbild muß zusätzlich eine Interpolation für jede Azimutzeile durchgeführt werden, um den Punktabstand in Azimutrichtung auf einen Referenzwert anzugleichen. Der ECS-Algorithmus enthält daher eine Funktion zur Azimutskalierung während der ScanSAR-Verarbeitung, welche die korrekte geometrische Skalierung sicherstellt und jegliche Interpolation vermeidet [55].

Ein weiterer Nachteil des SPECAN-Verfahrens liegt in der Deramping-Funktion, die nur den quadratischen Term der Phasenmodulation in Azimutrichtung enthält. Phasenterme höherer Ordnung werden nicht kompensiert, so daß sich das SPECAN-Verfahren für die phasentreue SAR-Verarbeitung als ungeeignet erweist.

Um diesen Nachteil des SPECAN-Verfahrens zu umgehen, wird bei der Azimutskalierung die hyperbolische Phasenmodulation so kompensiert, daß alle Phasenterme höherer Ordnung entfernt werden und nur eine quadratische Phasenmodulation erhalten bleibt [55].

6.3.2 Korrektur des Antennendiagramms in Azimut

Abb. 6.10 veranschaulicht die ScanSAR-Verarbeitung mit dem ECS-Algorithmus. Links wird die Signaldarstellung bei verschiedenen Verarbeitungsschritten gezeigt. Aufgrund der SPECAN-Verarbeitung in Azimutrichtung wird die Gewichtung zur Unterdrückung der Nebenzipfel in Azimut vor Beginn der Verarbeitung eingefügt.

Die weiteren Operationen bis zu der Multiplikation mit der Funktion H_3 sind identisch mit denen der Stripmap-Verarbeitung von Kapitel 6.2. Die Azimut-FFTs haben aber eine wesentlich kürzere Länge, wie im vorherigen Kapitel erläutert wurde. Die Korrektur des Antennendiagramms in der ScanSAR-Verarbeitung ist sehr wichtig, um Amplitudenmodulationen im Endbild zu vermeiden. In Abb. 6.10 hätten beispielsweise die Punkte A und C eine kleinere Amplitude als das Punktziel B, falls das Antennendiagramm in Azimut nicht kompensiert wäre. Die Amplitudenkompensation ergibt sich aus Gl. 6.6 wie folgt:

$$g_{a, \text{ komp}}(f_a) = \frac{1}{g_a \left(-\frac{r_0 \cdot \lambda \cdot f_a}{2 \cdot v^2 \cdot \beta(f_a)} \right)}. \quad (6.24)$$

Das Antennendiagramm g_a und der Dopplerschwerpunkt f_D müssen sehr genau bekannt sein, um die Amplitudenmodulation im Endbild auf weniger als 0.5 dB zu reduzieren. Diese Amplitudenmodulation wird in der SAR-Literatur als Scalloping bezeichnet, und sie wiederholt sich für jeden Burst entlang der Azimutrichtung, so daß ein periodisches Streifenmuster im Endbild zu sehen ist. Abb. 6.11 zeigt einen solchen Scalloping-Effekt mit einer Amplitudenmodulation von ca. 3 dB.

Die Stärke des Scalloping-Effekts hängt unter anderem auch von der Zykluszeit der ScanSAR-Abbildung ab. Die Zykluszeit T_z im ScanSAR-Betriebsmodus entspricht der Zeitdauer zur einmaligen Beleuchtung aller Teilstreifen und bestimmt die Anzahl von Azimut-Looks im Endbild. Für die Anzahl von möglichen Azimut-Looks L_{scan} in der ScanSAR-Verarbeitung gilt

$$L_{\text{scan}} = \frac{T_{\text{sa}} - T_{\text{b}}}{T_z} \approx \frac{T_{\text{sa}}}{T_z}, \quad (6.25)$$

wobei T_{sa} die Beleuchtungsdauer der synthetischen Apertur im Stripmap-Fall und T_{b} die Beleuchtungsdauer eines jeden Bursts ist.

Falls die Zykluszeit mehr als um einen Faktor 2 kleiner als die gesamte Beleuchtungszeit der synthetischen Apertur im Stripmap-Fall ist, können mehrere Azimut-Looks gebildet werden. Diese Looks werden nach der Verarbeitung inkohärent aufsummiert. Da die einzelnen Ziele in jedem Beleuchtungszyklus aus unterschiedlichen Blickwinkeln abgebildet werden, sind die Frequenzbereiche der Ziele entsprechend unterschiedlich. Dies führt dazu, daß die Amplitudenmodulationen bei der Aufsummierung der Looks teilweise kompensiert werden. Je größer die

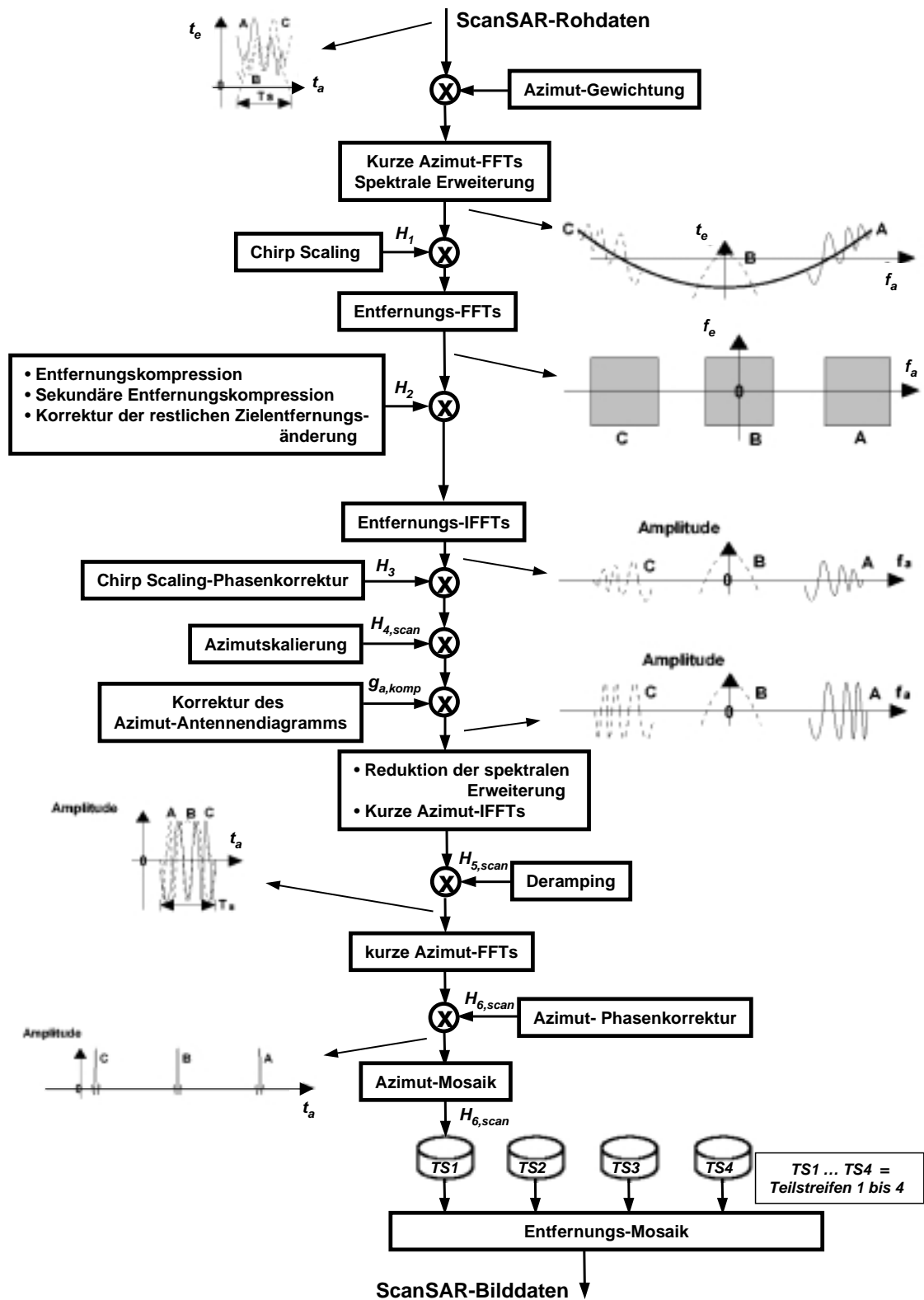


Abb. 6.10: Blockdiagramm des ECS-Algorithmus mit schematischer Darstellung von verschiedenen Verarbeitungsschritten. Die Funktionen H_1 , H_2 , H_3 , $H_{4,scan}$, $H_{5,scan}$ und $H_{6,scan}$ sind gemäß den Gln. 6.12, 6.16, 6.18, 6.26, 6.31 und 6.32 definiert. Das ScanSAR-Bild entsteht als Mosaik aus allen Bursts und Teilstreifen.

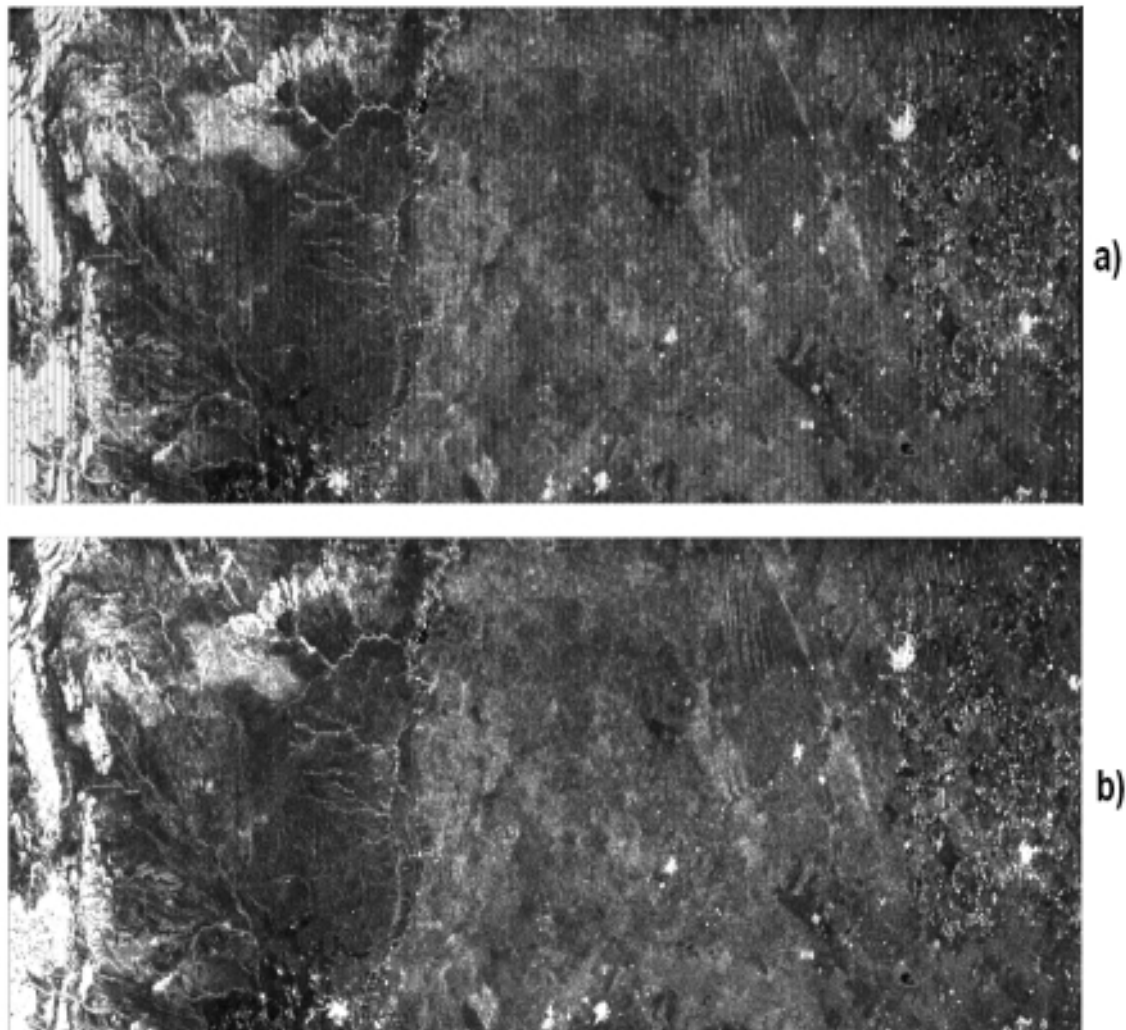


Abb. 6.11: ScanSAR-Bild des SIR-C-Sensors (Chickasha, Oklahoma, USA). Gezeigt wird der erste Teilstreifen mit 47 km x 232 km in Entfernung bzw. Azimut. a) Ohne Korrektur des Scalloping-Effekts und b) mit Korrektur des Scalloping-Effekts gemäß Gl. 6.24.

Anzahl von Looks, desto effektiver ist die Reduktion des Scalloping-Effekts.

6.3.3 Azimut-Skalierung

Die Azimut-Skalierung wird in die ScanSAR-Verarbeitung mit dem ECS-Algorithmus eingefügt, um die Nachteile des SPECAN-Algorithmus aufzuheben. Die Azimut-Skalierung erfolgt durch Multiplikation der Phasenfunktion $H_{4, \text{scan}}$ mit dem SAR-Signal im Range-Doppler-Bereich und bewirkt folgende Änderungen der Phasenmodulation in Azimut:

- Kompensation des hyperbolischen Phasenverlaufs im Azimut. Die Operation enthält die Multiplikation mit der Azimutreferenzfunktion, die die Azimutmodulation vollständig ausgleicht. Für jede Azimutzeile wird dazu eine neue Referenzfunktion entsprechend der Entfernung r_0 berechnet.

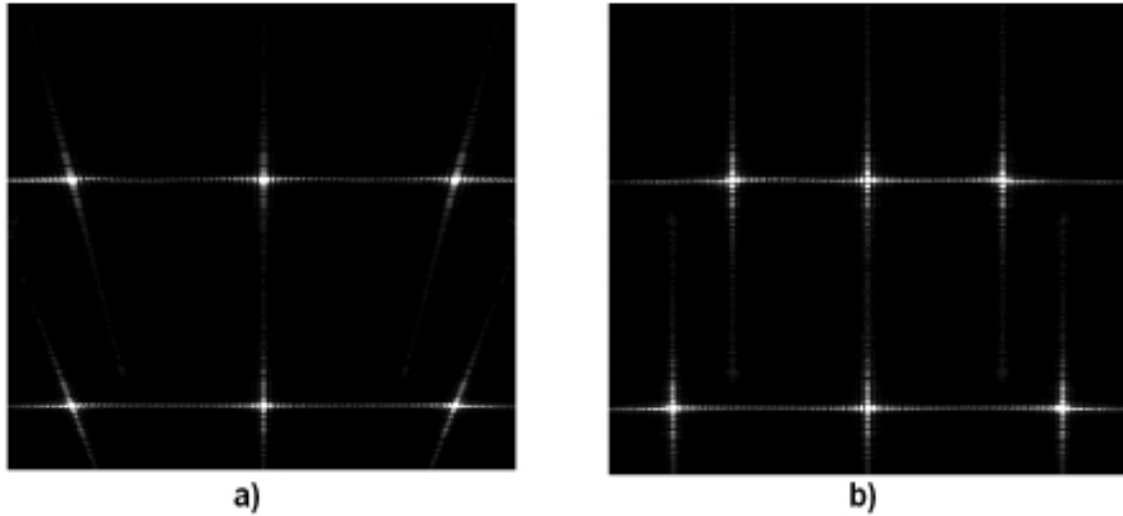


Abb. 6.12: Prozessiertes Bild von sechs Punktzielen mit dem SPECAN-Verfahren. Die tatsächliche Positionierung der simulierten Punktziele bei der ScanSAR-Abbildung entspricht einer rechtwinkligen Konstellation. a) Mit Azimutskalierung und b) ohne Azimutskalierung. Falls keine Azimutskalierung verwendet wird, muß die Geometrie des Endbildes mit einer zusätzlichen Interpolation korrigiert werden.

- Einfügung einer rein quadratischen Phasenmodulation. Die quadratische Phasenmodulation wird eingefügt, so daß später die Deramping-Operation ohne Approximation durchgeführt werden kann. Um den Interpolationsschritt des SPECAN-Verfahrens zu vermeiden, wird eine entfernungsunabhängige Phasenmodulation so eingefügt, daß die resultierende Doppellerrate für den gesamten Entfernungsbereich konstant ist. Bei der Referenzentfernung der Azimutskalierung bleibt die Dopplerrate des Azimutsignals unverändert, und die Phasenmodulation wird von einer hyperbolischen in eine quadratische Funktion umgewandelt.

Die Azimutskalierung ermöglicht die Verwendung des SPECAN-Verfahrens für die hochgenaue, phasentreue ScanSAR-Verarbeitung ohne Interpolation. Die Verarbeitung mit dem ECS-Algorithmus in Kombination mit dem SPECAN-Verfahren ist sehr effizient, da nur Fourier-Transformationen kurzer Länge für die Azimut-Verarbeitung benötigt werden. Abb. 6.12 zeigt ein mit dem SPECAN-Verfahren prozessiertes Bild von sechs Punktzielen mit und ohne Azimutskalierung.

Aus Gl. 6.21 ergibt sich folgende Formulierung für die Azimutskalierung:

$$H_{4, \text{scan}}(f_a) = \exp \left[j \cdot \frac{4 \cdot \pi}{\lambda} \cdot r_0 \cdot (\beta(f_a) - 1) \right] \cdot \exp \left[j \cdot \frac{\pi}{k_{a, \text{scl}}} \cdot f_a^2 \right] \cdot \exp [j \cdot 2 \cdot \pi \cdot (t_c(r_{\text{scl}}) - t_c(r_0)) \cdot f_a] \quad (6.26)$$

wobei $k_{a, \text{scl}}$ die Dopplerrate der eingefügten, quadratischen Phasenmodulation und r_{scl} die Referenzentfernung für die Azimutskalierung ist. $t_c(r_{\text{scl}})$ und $t_c(r_0)$ entsprechen dem Zeitpunkt in der Mitte der Beleuchtungszeit in der Entfernung r_{scl} bzw. r_0 . Der erste Term in Gl. 6.26 kompensiert den hyperbolischen Phasenverlauf, während der zweite Term eine konstante quadratische Phasenmodulation einfügt. Der dritte Term gleicht eine Zeitverschiebung aus, die

von den ersten und zweiten Termen verursacht wird. Mit den Gln. 6.22 und 6.23 lassen sich die Zeitverschiebungen $t_c(r_0)$ und $t_c(r_{\text{scl}})$ wie folgt bestimmen:

$$t_c(r_0) = -\frac{\lambda \cdot r_0}{2 \cdot v^2 \cdot \beta(f_D)} \cdot f_D \quad (6.27)$$

und

$$t_c(r_{\text{scl}}) = -\frac{\lambda \cdot r_{\text{scl}}}{2 \cdot v^2} \cdot f_D. \quad (6.28)$$

Da sich die Zeitverschiebung $t_c(r_{\text{scl}})$ auf den zweiten Term in Gl. 6.26 bezieht, wird ihre Berechnung ohne den Faktor β durchgeführt. Mit den beiden Zeitverschiebungen ist die Geometrie des Endbildes nach der Azimut-FFT immer um die Frequenz null zentriert, was die Zusammenfügung (engl.: Mosaicking) der Bursts wesentlich vereinfacht. Nach dem vollständigen Zusammenfügen der Bursts wird die Zeitverschiebung gemäß dem dritten Term von Gl. 6.26 rückgängig gemacht, um die korrekte Geometrie im Endbild zu erhalten.

Die Azimutskalierung bietet zusätzlich die Möglichkeit, einen fast beliebigen Punktabstand im Endbild zu wählen. Es gilt folgender Zusammenhang zwischen der Dopplerrate $k_{a, \text{scl}}$ und der Referenzentfernung r_{scl} zur Azimutskalierung:

$$k_{a, \text{scl}} = \frac{2 \cdot v^2}{\lambda \cdot r_{\text{scl}}}. \quad (6.29)$$

Die Referenzentfernung r_{scl} kann so ausgewählt werden, daß sich eine Dopplerrate $k_{a, \text{scl}}$ ergibt, die zum gewünschten Punktabstand d_{scl} im Endbild führt.

$$d_{\text{scl}} = \frac{PRF}{k_{a, \text{scl}} \cdot N_{\text{FFT}}} = \frac{\lambda \cdot r_{\text{scl}} \cdot PRF}{2 \cdot v^2 \cdot N_{\text{FFT}}}, \quad (6.30)$$

wobei N_{FFT} die Punktzahl der Fourier-Transformation der SPECAN-Verarbeitung ist. In der Praxis sollte r_{scl} innerhalb des Entfernungsbereichs des jeweiligen Teilstreifens liegen, damit der Grad an Skalierung nicht zu groß wird. Die Azimutskalierung kann als eine Faltung des Azimutsignals mit einem Chirp-Signal interpretiert werden, wobei die Länge und die Frequenzmodulation des Chirp-Signals von der Stärke der Skalierung abhängig ist. Da die Multiplikation im Frequenzbereich einer zyklischen Faltung im Zeitbereich entspricht, muß die Punktzahl für die Azimut-FFT um die Länge des der Azimutskalierung entsprechenden Chirp-Signals im Zeitbereich erweitert werden. In der Praxis ist eine Erweiterung um den Faktor 2 ausreichend, falls die Referenzentfernung r_{scl} innerhalb des Entfernungsbereichs liegt [55].

6.3.4 Deramping und Azimutkompression

Nachdem das SAR-Signal mit Azimutskalierung mittels inverser Azimut-FFTs in den Zeitbereich transformiert wurde, läßt sich die Deramping-Funktion ohne Näherung durchführen. In diesem Verarbeitungsschritt sind die SAR-Daten in Entfernungsrichtung bereits komprimiert, und die gesamte Zielentfernungsänderung ist kompensiert, so daß das Azimutsignal nur noch eine eindimensionale Trajektorie aufweist. Die Phasenmodulation des Azimutsignals ist aufgrund der Azimutskalierung rein quadratisch und entfernungsunabhängig, so daß die Deramping-

Funktion $H_{5, \text{scan}}$ folgendermaßen formuliert wird:

$$H_{5, \text{scan}} = \exp \left[-j \cdot k_{a, \text{scl}} \cdot t^2 \right] . \quad (6.31)$$

Nach der Deramping-Operation besteht das Azimutsignal aus einer Überlagerung von Modulationen konstanter Frequenz. Eine Frequenzanalyse mittels Azimut-FFTs führt dann zum Endbild.

Das SPECAN-Verfahren benötigt allerdings eine zusätzliche Phasenkorrektur im Endbild, damit die Verarbeitung phasentreu wird. Diese Phasenkorrektur kompensiert die von der Deramping-Operation eingefügte quadratische Phasenmodulation. Um eine phasentreue Verarbeitung wie bei der Faltungsoperation zu erzielen, wird folgende Phasenkorrektur in den letzten Schritt der Verarbeitung eingefügt [47], [79]:

$$H_{6, \text{scan}} = \exp \left[-j \cdot \frac{\pi}{k_{a, \text{scl}}} \cdot f_a^2 \right] . \quad (6.32)$$

Nachdem alle Bursts eines jeden Teilstreifens verarbeitet wurden, findet die Zusammenfügung der Teilstreifen statt. Das Antennendiagramm in Entfernungsrichtung muß vor der Zusammenfügung für jeden Teilstreifen kompensiert werden. Dafür ist das genaue Antennendiagramm in Elevation für jeden Teilstreifen sowie der jeweilige Off-Nadir-Winkel¹ erforderlich. Der Überlappungsbereich zwischen den Teilstreifen kann zur genaueren Abschätzung des Off-Nadir-Winkels verwendet werden [44].

Abb. 6.13 zeigt das Ergebnis der phasentreuen Verarbeitung von RadarSAT-Daten im ScanSAR-Abbildungsmodus. Dieses Bild zeigt die Insel Barthust in Kanada sowie das umliegende Meeresgebiet, dessen Oberfläche zum großen Teil vereist ist [4], [45]. Da das Zeitintervall zwischen den beiden interferometrischen Radaraufnahmen 25 Tage betragen hat, ist die Kohärenz gemäß Abb. 6.13c nur noch im Festland vorhanden. Für Meeresgebiet enthält das Interferogramm in Bild 6.13b nur Phasenrauschen. Der SIR-C-Sensor der SRTM-Mission arbeitete ebenfalls im ScanSAR-Modus. Da bei dieser Mission eine zweite Empfangsantenne mit ca. 60 m Basislinie eingesetzt wurde, um den Betrieb mit Einpaß-Interferometrie zu ermöglichen, ist die Kohärenz bei ausreichendem S/R-Verhältnis auch in Wassergebieten vorhanden.

6.4 Spotlight-Verarbeitung

Wie im Kapitel 5.2 dargestellt, erreicht man im Spotlight-Betriebsmodus durch Nachführung der Antenne in Azimutrichtung eine sehr hohe Auflösung. Je länger die Beleuchtung dauert, desto besser wird die Azimutauflösung. Die PRF und die resultierende Datenrate bleiben unabhängig von der Dauer der Beleuchtung. Dies ist zwar ein großer Vorteil für die Datenaufnahme, führt aber zu einer mehrdeutigen Darstellung des Azimutsignals im Frequenzbereich.

Abb. 6.14 zeigt den Frequenzverlauf von drei Punktzielen im Stripmap- und im Spotlight-

¹ Unter Off-Nadir-Winkel versteht man den Winkel zwischen dem Nadir und der Hauptstrahlungsrichtung der SAR-Antenne. Der Off-Nadir-Winkel wird oft als „Look-Angle“ bezeichnet.

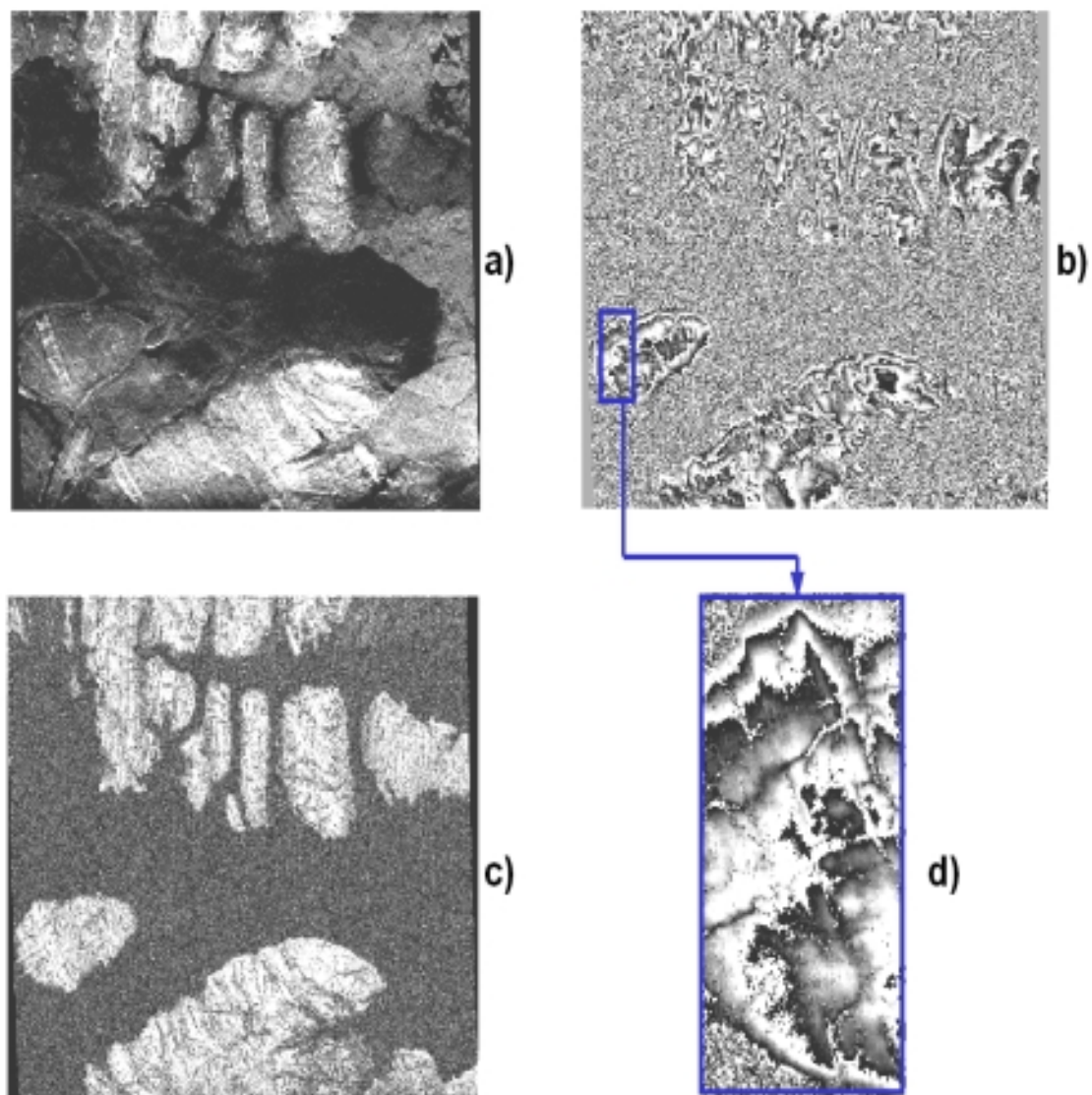


Abb. 6.13: ScanSAR-Interferometrie mit SAR-Daten des RadarSAT-Sensors: a) SAR-Bild der Insel Barthust in Kanada sowie des umliegenden Meeresgebietes, b) Phaseninterferogramm von zwei Aufnahmen mit einem Zeitabstand von 25 Tagen, c) Kohärenz des interferometrischen Paares und d) Vergrößerung eines Ausschnitts aus dem Phaseninterferogramm vom Festland. Die SAR-Rohdaten wurden von CSA (Canadian Space Agency) im Rahmen des CCRS/ADRO-Antrages zur Verfügung gestellt. Die Grauskala des Kohärenzbildes entspricht dem Variationsbereich von 0 (schwarz) bis 1 (weiß).

Modus. Im Spotlight-Modus ist der Signalverlauf im Zeitbereich für jedes Punktziel eindeutig. Im Range-Doppler-Bereich kann aber die Signaldarstellung eines jeden Zieles aufgrund der Begrenzung des Frequenzbereichs auf $\pm\text{PRF}/2$ nicht mehr eindeutig erfolgen. Dies führt dazu, daß für die herkömmliche Verarbeitung mit Wavenumber- oder Range-Doppler-Verfahren eine Erhöhung der Abtastung in Azimutrichtung durchgeführt werden muß, bevor die Prozessierung gestartet wird [8]. Für das Beispiel in Abb. 6.14c muß die Abtastung um den Faktor 3 erhöht werden, um die Mehrdeutigkeit der Azimutsignale zu entfernen. Dadurch wird die Verarbeitung sehr aufwendig, da die Datenmenge für die gesamte Verarbeitung ebenfalls um den Faktor 3 erhöht wird. Der Polar-Format-Algorithmus benötigt zwar keine Erhöhung der Abtastung in Azimutrichtung, erlaubt aber keine hochgenaue, phasentreue Verarbeitung [8].

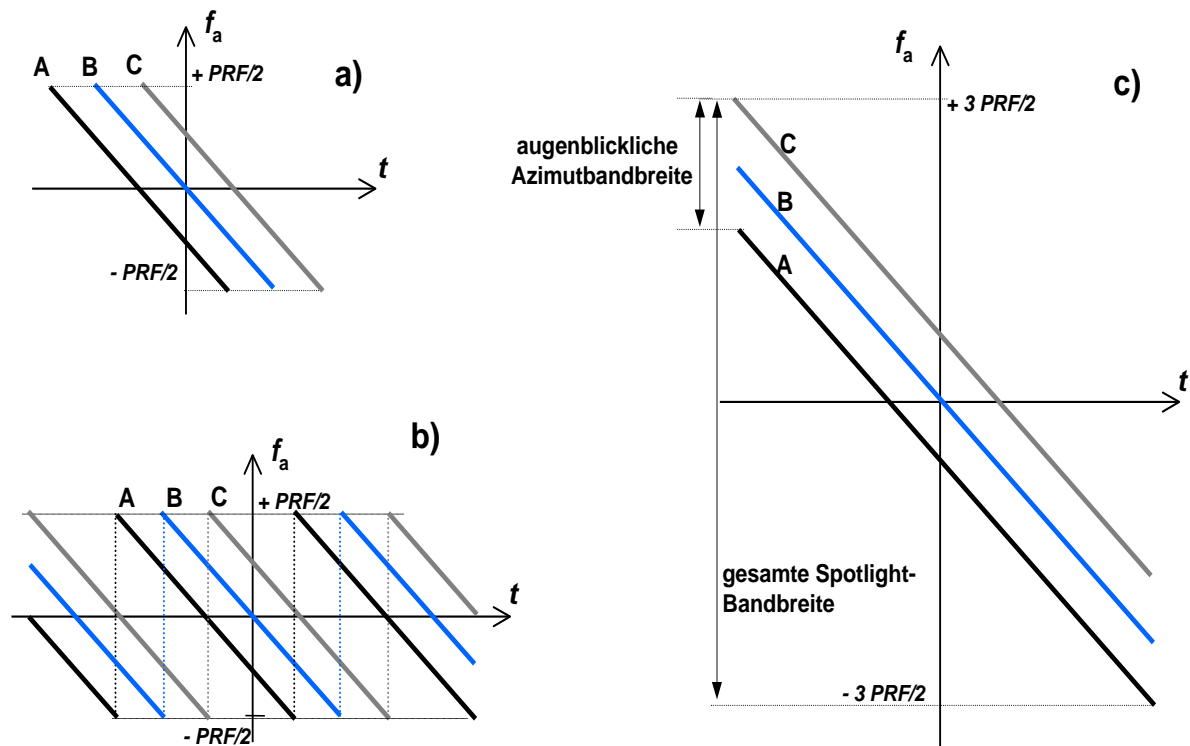


Abb. 6.14: Frequenzverlauf von drei Punktzielen: a) Stripmap-Abbildungsmodus, b) Spotlight-Abbildungsmodus und c) Spotlight-Abbildungsmodus nach Erhöhung der Bandbreite. Die augenblickliche Spotlight-Bandbreite ergibt sich aus der 3-dB-Breite des Azimutantennendiagramms, während die gesamte Spotlight-Bandbreite vorwiegend durch die Zeitdauer der Antennennachführung in Azimut bestimmt wird.

Der ECS-Algorithmus erlaubt eine hochgenaue, phasentreue Spotlight-Verarbeitung, ohne daß die Abtastung erhöht wird [43], [47], [60]. Die eindeutige Darstellung der Azimutfrequenz wird durch die Anwendung der Subaperturverarbeitung erreicht, während die Kombination von SPECAN mit Azimut-Skalierung eine interpolationsfreie und effiziente Azimutverarbeitung ermöglicht.

6.4.1 Subaperturverarbeitung

Das Subaperturprinzip basiert auf der kohärenten Addition von Subaperturen, die durch eine Aufteilung der Rohdaten im Zeitbereich gebildet werden; die Aufteilung im Zeitbereich führt zu einer Aufteilung der Signalbandbreite. Die SAR-Verarbeitung nach dem Subaperturprinzip für Spotlight-Daten besteht grundsätzlich aus folgenden Schritten [43], [47], [52], [56]:

- Die gesamte Spotlight-Apertur wird in Subaperturen aufgeteilt, wobei die Aufteilung im Zeitbereich vor Beginn der Prozessierung vorgenommen wird.
- Für jede Subapertur wird die Entfernungskompression und die Korrektur der Zielentfernungsänderung gemäß den Verarbeitungsschritten des ECS-Algorithmus durchgeführt.
- Die Subaperturen werden vor der Azimutkompression kohärent rekombiniert.

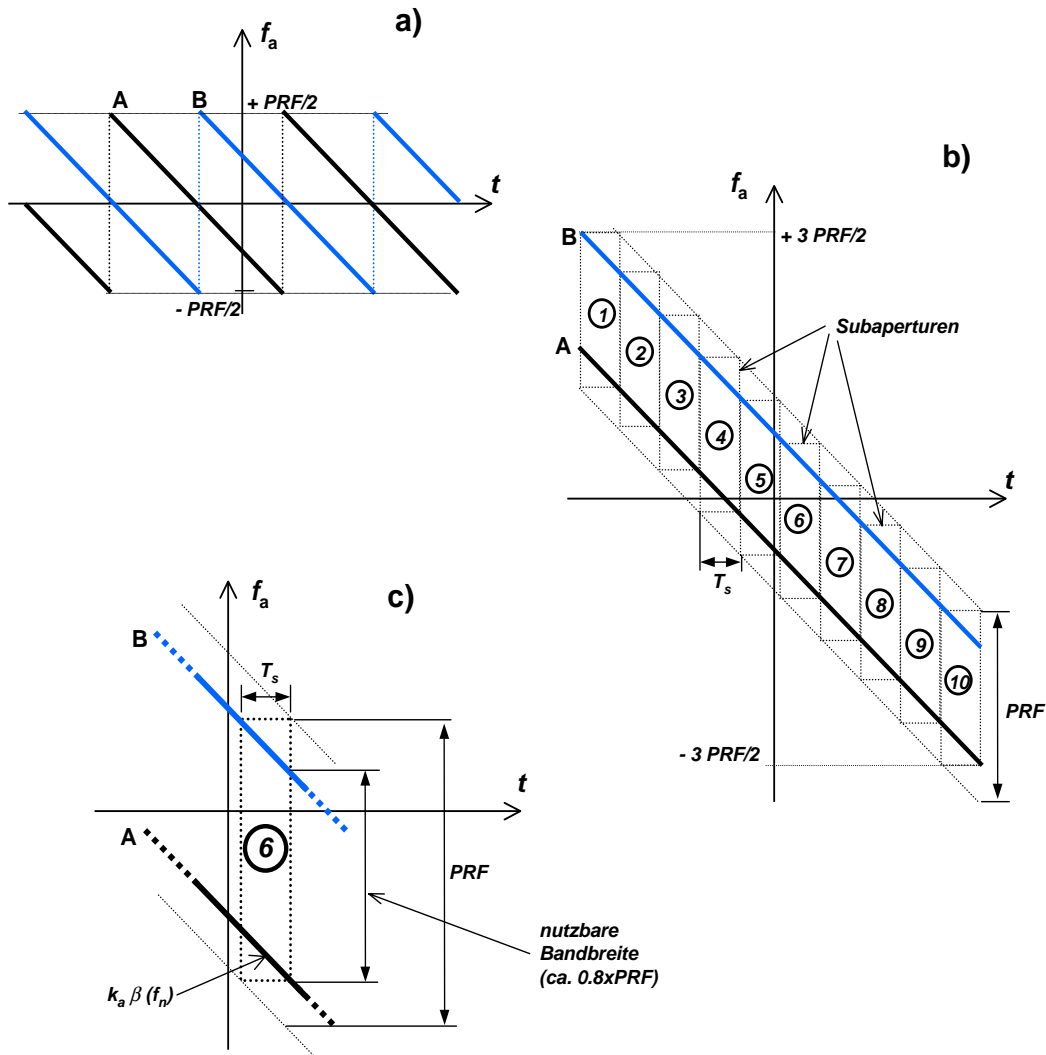


Abb. 6.15: Frequenzverlauf von zwei Punktzielen für den Spotlight-Abbildungsmodus: a) vor der Bildung der Subaperturen, b) nach der Bildung der Subaperturen und c) Darstellung der nutzbaren Bandbreite in der Subaperturverarbeitung. Mit der Subaperturverarbeitung wird die Erhöhung der Abtastung in Azimut vermieden und damit eine sehr effiziente Verarbeitung erzielt.

Bei der Stripmap-SAR-Verarbeitung muß zur Bildung der Subaperturen ein Bandpaßfilter verwendet werden. Im Fall von Spotlight-Daten ist ein Bandpaßfilter nicht notwendig, da die Aufteilung bereits im Zeitbereich vorgenommen wird. Für das Signal s_n der Subapertur n gilt

$$s_n(t) = s(t) \cdot \text{rect} \left[\frac{t - n \cdot T_s}{T_s} \right], \quad -N_s \leq n \leq N_s, \quad (6.33)$$

wobei T_s die Zeitdauer der Subapertur und $2 \cdot N_s + 1$ die Anzahl von Subaperturen ist.

Abb. 6.15 zeigt eine schematische Darstellung des Frequenzverlaufs vor und nach der Bildung der Subaperturen. Für jede Subapertur wird im Range-Doppler-Bereich die Azimutfrequenz f_a

so definiert, daß sich wie in Abb. 6.15b ein eindeutiger Variationsbereich ergibt.

$$f_n - \frac{PRF}{2} < f_a < f_n + \frac{PRF}{2}, \quad (6.34)$$

wobei f_n der Dopplerschwerpunkt der Subapertur n ist. Die nutzbare Azimutbandbreite für die Subaperturverarbeitung ist etwas kleiner als die PRF, da an den Rändern der Subaperturbandbreite ein kleiner Frequenzbereich nicht eindeutig dargestellt wird (siehe Abb. 6.15c). Um eine Einschränkung in der Verarbeitung zu vermeiden, wird die Dauer T_s der Subaperturen so gewählt, daß die nutzbare Azimutbandbreite in den Subaperturen gleich der prozessierten Bandbreite B_a in Azimut ist. In der Praxis ist die prozessierte Bandbreite ca. 80 % der PRF (siehe Kapitel 4.3.1). Unter dieser Annahme erhält man mit Gl. 6.22 folgende Formulierung für die Dauer der Subaperturen:

$$T_s = \frac{0.1 \cdot PRF}{\beta(f_n) \cdot k_a}. \quad (6.35)$$

Zusätzlich wird eine kleine zeitliche Überlappung von ca. 3 % der Subaperturen verwendet, um einen kontinuierlichen Phasenübergang der Subaperturen zu gewährleisten [43], [47].

6.4.2 Verarbeitungsablauf

Durch Bildung der Subaperturen ist der Ablauf der Spotlight-Verarbeitung in den Subaperturen eng verwandt zur ScanSAR-Verarbeitung. Die einzelnen Subaperturen bei der Spotlight-Abbildung bestehen zwar aus kleinen Bursts, besitzen aber dennoch einige Unterschiede zu den ScanSAR-Bursts. Die wichtigsten Unterschiede sind:

- Die Subaperturen bilden einen kontinuierlichen Phasenverlauf, und die kohärente Aufsummierung führt zur Verbesserung der Azimutauflösung. In der ScanSAR-Verarbeitung können die Bursts nur inkohärent addiert werden. Diese Addition trägt zur Reduktion des Speckle-Rauschens bei. Dabei wird die maximale Anzahl von Azimut-Looks in der ScanSAR-Verarbeitung maßgeblich von der Zykluszeit bestimmt.
- Der Variationsbereich der Azimutfrequenz in jeder Subapertur entspricht zwar der PRF, ist aber um den Dopplerschwerpunkt der jeweiligen Subapertur zentriert. In der ScanSAR-Verarbeitung ist der Variationsbereich für alle Bursts gleich.
- Für die Spotlight-Verarbeitung von Flugzeug-SAR-Daten muß zusätzlich eine Bewegungskompensation eingefügt werden.

Die oben genannten Unterschiede führen zu einigen Modifikationen für die Spotlight-Verarbeitung. Abb. 6.16 zeigt das Blockdiagramm der Spotlight-Verarbeitung mit dem ECS-Algorithmus.

Die Verarbeitung beginnt mit einer entfernungsunabhängigen Bewegungskompensation für eine Referenzentfernung. In diesem Schritt werden ein Phasenfehler und ein Positionsfehler in Blickrichtung der Antenne mit einer Phasenfunktion H_{mc1} bzw. einer Neuabtastung Δr_{mc1} kompensiert. Vor der Transformation der SAR-Rohdaten in den Range-Doppler-Bereich wer-

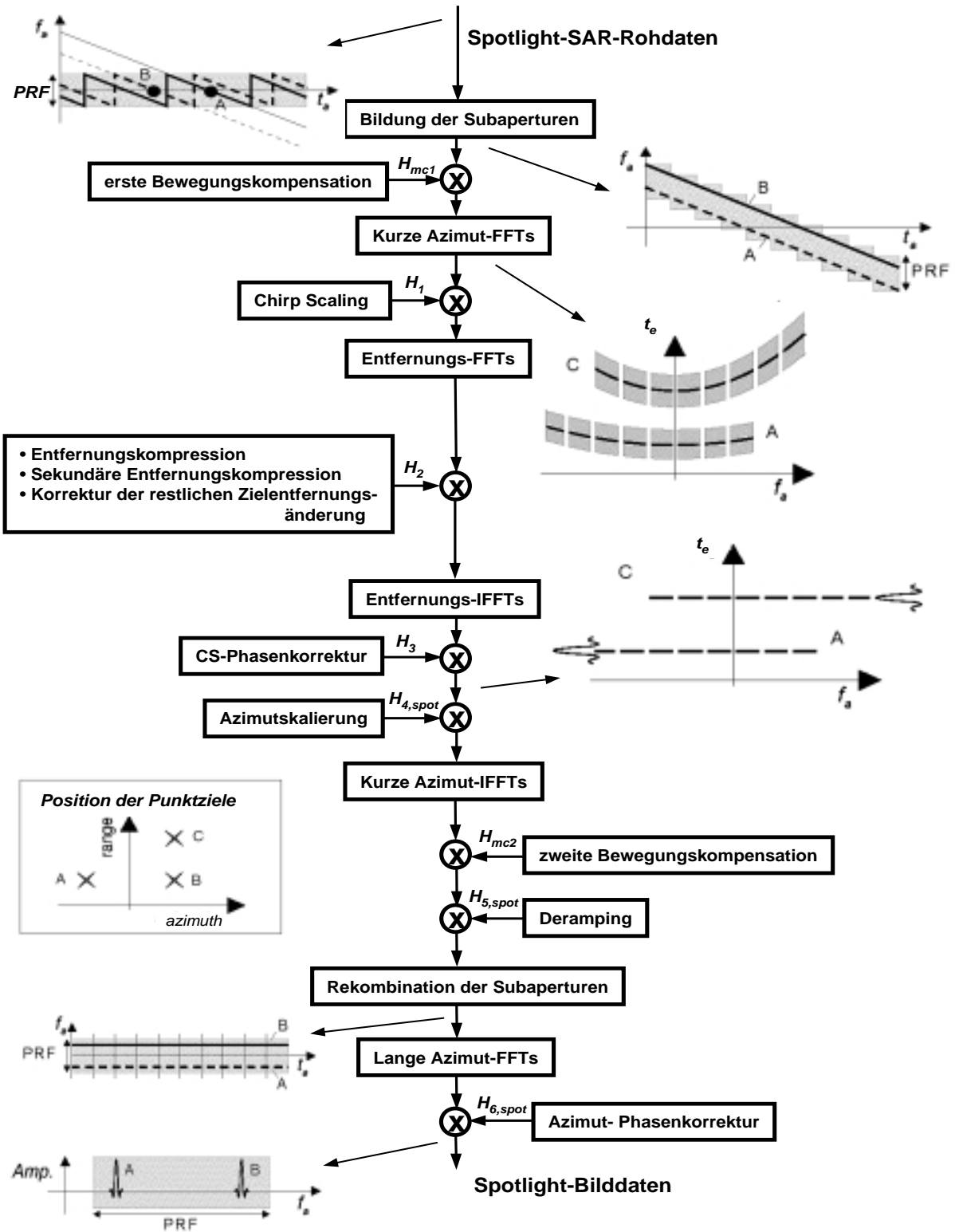


Abb. 6.16: Blockdiagramm des ECS-Algorithmus für die Spotlight-SAR-Verarbeitung. Die Funktionen H_1 , H_2 , H_3 , $H_{4,spot}$, $H_{5,spot}$ und $H_{6,spot}$ werden gemäß den Gln. 6.12, 6.16, 6.18, 6.26, 6.31 und 6.32 definiert. Die Funktionen H_{mc1} und H_{mc2} dienen zur Kompensation der Bewegungsfehler der Plattform und werden in der Regel nur für flugzeuggestützte SAR-Systeme benötigt.

den die Subaperturen in Azimutrichtung gebildet, wobei die Zeitdauer gemäß Gl. 6.35 bestimmt wird. Aus dieser Zeitdauer wird die Anzahl von Punkten für die Azimut-FFTs berechnet, die zur Steigerung der Effizienz der FFT-Operation auf eine Zweier-Potenz erweitert wird.

Die einzelnen Subaperturen werden mittels kleiner Azimut-FFTs in den Range-Doppler-Bereich transformiert, und die weitere Verarbeitung wird bis zur Multiplikation mit der Funktion H_3 analog zur ScanSAR-Verarbeitung durchgeführt. Nach diesem Verarbeitungsschritt sind die SAR-Daten in Entfernung komprimiert, und die Zielentfernungsänderung ist vollständig korrigiert. Dann werden die SAR-Daten mit der Phasenfunktion $H_{4, \text{spot}}$ zur Azimutskalierung multipliziert, um die Verwendung des SPECAN-Verfahrens für die hochgenaue Spotlight-Verarbeitung zu ermöglichen. Ohne Verwendung der Azimutskalierung würde das SPECAN-Verfahren die gleichen Nachteile wie die Stripmap-Verarbeitung aufweisen.

Nach der Transformation in den Zeitbereich mittels kleiner inverser Azimut-IFFTs findet die entfernungsabhängige Bewegungskompensation statt. Zusätzlich zu der Multiplikation mit der Phase $H_{\text{mc}2}$ wird eine entfernungsabhängige Neuabtastung der SAR-Daten gemäß Gl. 6.20 durchgeführt. Damit wird der restliche Anteil des Positionsfehlers in Blickrichtung der Antenne korrigiert.

Der nächste Verarbeitungsschritt ist die Deramping-Operation, die aufgrund der Azimutskalierung ohne Näherung stattfinden kann. Nach der Multiplikation mit der Deramping-Funktion $H_{5, \text{spot}}$ bestehen die SAR-Daten aus einer Überlagerung von Signalen mit konstanten Frequenzen. Eine Frequenzanalyse der einzelnen Subaperturen mittels Azimut-FFTs würde zu einem Endbild führen, das aus vielen Looks besteht und keine hohe Azimutauflösung besitzt. Deshalb werden die Subaperturen vor den Azimut-FFTs zusammengesetzt, um die gesamte Apertur vor der Azimutkompression zu rekonstruieren. Damit erhält man ein hochauflösendes SAR-Bild mit einem Look.

Anschließend wird eine Phasenkorrektur $H_{6, \text{spot}}$ in den letzten Schritt der Verarbeitung eingefügt und damit eine phasentreue Verarbeitung wie bei der Faltungsoperation erzielt. Diese Phasenkorrektur wird gemäß Gl. 6.31 berechnet und kompensiert die von der Deramping-Operation eingefügte quadratische Phasenmodulation.

Abb. 6.17 zeigt ein Bildbeispiel des E-SAR-Systems im X-Band mit einer Azimutauflösung von 0.46 m. Da das E-SAR-System keinen Spotlight-Abbildungsmodus besitzt, wurde der Spotlight-Betrieb mit Stripmap-SAR-Rohdaten simuliert. Dies ist mit dem E-SAR-System möglich, da das Antennendiagramm in Azimut sehr breit ist und nur ein kleiner Teil der gesamten Azimutbandbreite im Stripmap-Modus prozessiert wird. Ein zusätzlicher Verarbeitungsschritt wird dazu vor Beginn der Prozessierung eingefügt, bei dem ein Bandpaß-Filter mit einer zeitabhängigen Variation der Mittenfrequenz einen Frequenzverlauf entsprechend dem Spotlight-Abbildungsmodus erzeugt. Die um etwa den Faktor 6 bessere Azimutauflösung im Spotlight-Bild führt zu einer deutlich verbesserten Bildqualität und -interpretation.

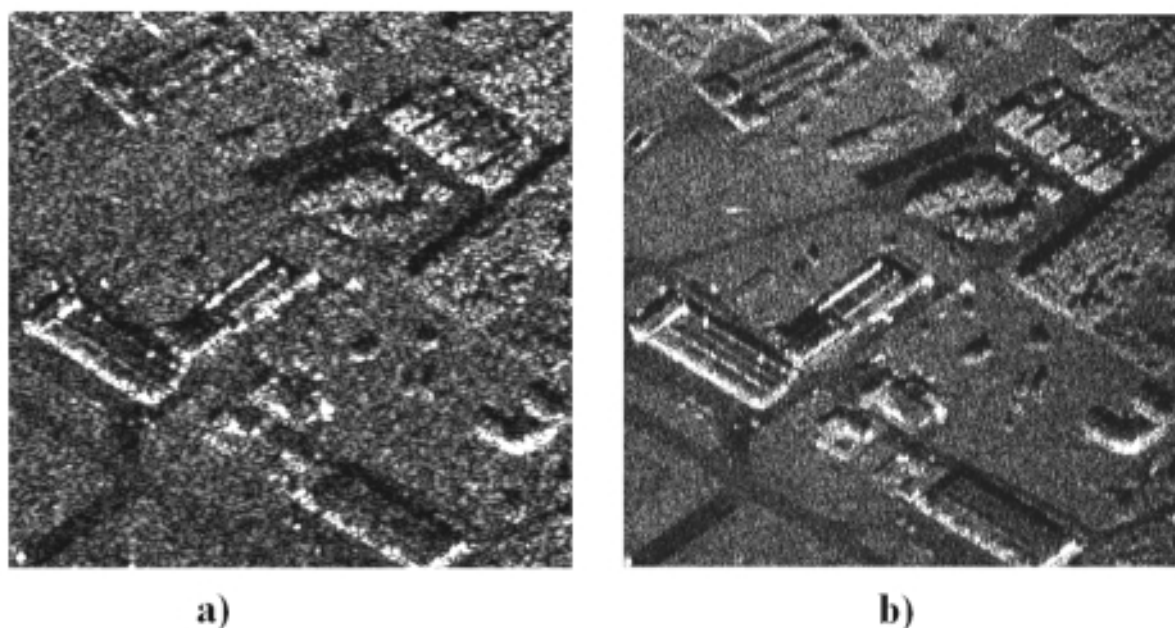


Abb. 6.17: E-SAR-Bildausschnitt im X-Band der Landebahn in Oberpfaffenhofen. a) Standard-Prozessierung im Stripmap-Modus mit 3 m Azimutaufösung. b) Prozessierung im simulierten Spotlight-Modus mit 0.46 m Azimutaufösung. Die Bildgröße beträgt ca. 478 m \times 535 m in Entfernung bzw. in Azimut. Die Azimut-Prozessierung wurde in beiden Fällen mit einem Look vorgenommen. Die Entfernungsauösung ist durch die Chirp-Bandbreite gegeben und beträgt 2.2 m.

6.4.3 Verarbeitung von Spotlight-Daten mit Dechirp-on-Receive

Der Chirp Scaling-Algorithmus geht von der Annahme aus, daß die empfangenen SAR-Rohdaten eine Frequenzmodulation in Entfernung aufweisen, d. h. ein Chirp-Signal wird vom Radarsystem ausgesendet. Die große Mehrheit von modernen SAR-Systemen arbeiten mit einem Chirp-Signal, so daß die Anwendung des Chirp Scaling-Algorithmus ohne weiteres möglich ist.

Im Spotlight-Modus wird oft das Verfahren Dechirp-on-Receive verwendet, um die Abtastfrequenz für die A/D-Wandlung zu reduzieren (siehe Kapitel 5.2). Die Verwendung des Dechirp-on-Receive-Verfahrens führt dazu, daß die Rohdaten nur noch aus Signalen konstanter Frequenz bestehen. Das Chirp Scaling-Verfahren kann daher nicht mehr verwendet werden.

In [43], [47] wurde das Frequency Scaling-Verfahren entwickelt, das eine interpolationsfreie Korrektur der Zielentfernungsänderung für Spotlight-Daten ermöglicht, die aus Signalen konstanter Frequenz bestehen. Die Chirp Scaling-Funktion H_1 wird durch eine Frequency Scaling-Funktion ausgetauscht und der erste Teil der Verarbeitung bis zur Multiplikation mit der Funktion H_3 durch eine neue Formulierung ersetzt. Die Azimutskalierung und die restlichen Operationen gemäß Abb. 6.16 bleiben unverändert.

6.5 Verarbeitung von anderen SAR-Abbildungsmodi

Die vorgestellte SAR-Verarbeitung mit dem ECS-Algorithmus erlaubt eine hochgenaue SAR-Prozessierung von flugzeug- und satellitengestützten SAR-Systemen im Stripmap-, ScanSAR-

und Spotlight-Modus. Die generische Struktur besteht aus modularen Verarbeitungsschritten, die eine sehr effiziente Prozessierung ohne Interpolation ermöglichen.

Der ECS-Algorithmus wurde bereits für die Datenverarbeitung eines flugzeuggetragenen Radarsystems mit Vorwärtssicht erweitert [46], wobei es sich hier um ein neues Radarkonzept mit der Bezeichnung SIREV (engl.: **S**ector **I**maging **R**adar for **E**nhanced **V**ision) handelt. Weitere Entwicklungen des ECS-Algorithmus sind für die Datenverarbeitung von SAR-Systemen mit großen Wellenlängen wie P-Band sowie für die Datenverarbeitung von bistatischen SAR-Konstellationen geplant.

7 Auflistung vorhandener SAR-Systeme

In den beiden nachfolgenden Tabellen wird ein Überblick über einige flugzeug- und satelliten-gestützte SAR-Systeme gegeben. Eine detaillierte Beschreibung von vorhandenen und sich in der Entwicklung befindenden SAR-Systemen wird in [31] dargestellt.

Ein aktuelles Beispiel einer erfolgreichen SAR-Mission zur dreidimensionalen Abbildung der Erboberfläche ist die SRTM-Mission (siehe Abb. 7.1). Im Februar 2000 umkreiste das Shuttle Endeavour elf Tage lang die Erde mit zwei SAR-Systemen im C- und X-Band [85]. Bei beiden SAR-Systemen wurde das Verfahren der Einpaß-SAR-Interferometrie verwendet, wobei die Primärantennen im C- und X-Band in der Ladebucht des Shuttle und die Sekundärantennen am Ende eines 60 m langen Mastes montiert waren. Die Radarsignale wurden von den Primärantennen ausgesendet und die zurückgestreuten Signale von den Primär- und Sekundärantennen empfangen. Mehr als 15×10^{12} Bytes an Rohdaten wurden während der Mission aufgenommen. Die hochgenaue Prozessierung mit Erstellung des Geländemodells wird voraussichtlich zwei Jahre dauern. Das resultierende Geländemodell wird nicht nur aktuell und hochgenau sein, sondern erstmals auch global und homogen.

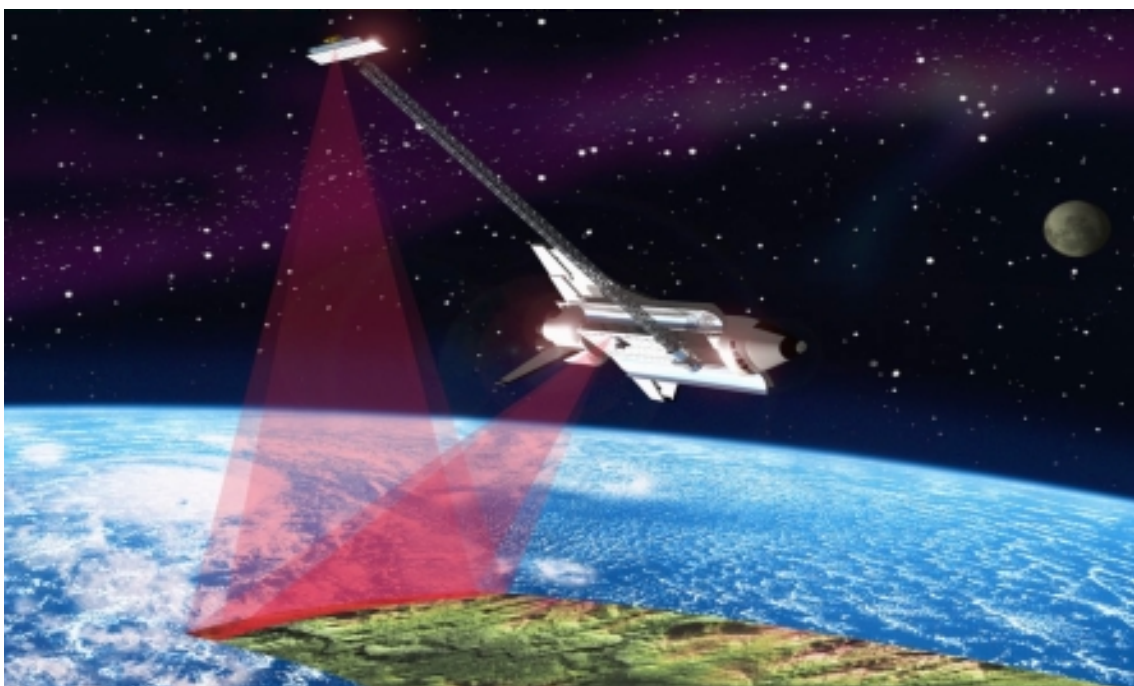


Abb. 7.1: Schematische Darstellung der interferometrischen SAR-Abbildung bei der SRTM-Mission (engl.: Shuttle Radar Topography Mission). Das C-Band-SAR wurde von NASA/JPL entwickelt und hat ca. 80 % der Landoberfläche abgebildet, während das X-Band-SAR, das von DLR und ASI (Italienische Raumfahrtagentur) entwickelt wurde, ca. 40 % der Landoberfläche mit einer deutlich besseren Höhenauflösung abgebildet hat.

System	Institution / Land	Träger	Band / Polarisation	Start / Betrieb	Kommentare
SEASAT	NASA/USA	Satellit	L-Band/HH	1978	erstes satellitengestütztes SAR-System, Betriebszeit von nur 3 Monaten wegen Ausfall der Senderöhre
ALMAZ-1	NPO/Rußland	Satellit	S-Band/HH	1991-1992	40 km Streifenbreite, niedriges SNR
ERS-1	ESA/Europa	Satellit	C-Band/VV	1991-2000	100 km Streifenbreite, 23° Einfallswinkel, sehr genauer Orbit
ERS-2	ESA/Europa	Satellit	C-Band/VV	1995-heute	wie ERS-1, Betrieb in Tandem Modus zwischen 1995 und 1996 zur Interferometrie (Orbit von ERS-2 wurde um 24 Stunden gegenüber ERS-1 versetzt)
J-ERS-1	NASDA/Japan	Satellit	L-Band/HH	1992-heute	100 km Streifenbreite, 35° Einfallswinkel, niedriges SNR
RadarSAT	CSA/Kanada	Satellit	C-Band/HH	1995-heute	Streifenbreite bis 500 km im ScanSAR-Betriebsmodus, variabler Einfallswinkel (20° bis 50°)
SIR-C/ X-SAR	NASA-JPL/USA, DLR/Deutschland, ASI/Italien	Shuttle	L-Band, C-Band / vollpolarimetrisch, X-Band / VV	1994 (April und Oktober)	erstes weltraumgestütztes, vollpolarimetrisches SAR-System mit mehreren Frequenzbändern
SRTM	NASA-JPL/USA, DLR/Deutschland	Shuttle	C-Band/VV+HH, X-Band/VV	Februar 2000	erstes weltraumgestütztes SAR-System mit Einpaß- Interferometrie
ENVISAT/ ASAR	ESA/Europa	Satellit	C-Band/ (VV+HH)	2001	variabler Einfallswinkel, Streifenbreite bis 450 km in ScanSAR-Modus
PALSAR	NASDA/Japan	Satellit	L-Band/ (VV+HH oder HV+VH)	2004	variabler Einfallswinkel, Streifenbreite bis 360 km in ScanSAR-Modus
TerraSAR (X-Band)	Astrium-DLR/ Deutschland	Satellit	X-Band/ (VV+HH)	2005	variabler Einfallswinkel, Stripmap-, ScanSAR- und Spotlight-Modus mit einem Auflösungsvermögen bis zu 1 m x 1 m

Tabelle 7.1: Zusammenstellung einiger satellitengestützter SAR-Systeme

System	Institution / Land	Träger	Band / Polarisation	Kommentare
AirSAR	NASA-JPL/USA	DC-8	P-, L, C-Band/ vollpolarimetrisch	Einfallswinkel von 10° bis 65°, Interferometrie möglich mit TOPSAR
NAVY/ ERIM	ERIM/USA	P-3	UHF, L-, C-, X-Band/ vollpolarimetrisch	Nachweist die Zweipaß-Interferometrie im UHF-Bereich mit einer Höhengauflösung von 1 Meter
EMISAR	TUD/ Dänemark	Gulfstream G-3	L-, C-Band/ vollpolarimetrisch	Einfallswinkel von 20° bis 85°, 2 m × 2 m Auflösung, Einpaß-Interferometrie im C-Band
E-SAR	DLR/ Deutschland	DO 228	P-, L-, S-, C-, X-Band, polarimetrisch	Einpaß-Interferometrie im X-Band (Along- und Across-Track), polarimetrische Multipaß-Interferometrie im L- und P-Band.
AeS-1	AeroSensing/ Deutschland	Aero Commander	X-Band (HH), P-Band (HH)	Einpaß-Interferometrie im X-Band (400 MHz Bandbreite) und Zweipaß-Interferometrie im P-Band
PHARUS	TNO-FEL/ Holland	Cessna Citation	C-Band, vollpolarimetrisch	4m × 1m Auflösung (Entfernung × Azimut), 20 km Streifenbreite, Phased Array Antenne mit polarimetrischen T/R-Modulen
IFSARE	TEC, DARPA/ USA	Learjet 36a	X-Band VV-Polarisation	Einpaß-Interferometrie, 10 km Streifenbreite, ca. 3 m laterale Auflösung, 3 m Höhengenaugigkeit
Do-SAR	Dornier/ Deutschland	Transall C-160	S-, C-, X- und Ka-Band/ vollpolarimetrisch	Einpaß-Interferometrie im C- und X-Band (wahlweise)
GeoSAR	DARPA, JPL, Calgis/ USA	Gulfstream II	X-Band (VV), P-Band (HH+HV oder VV+VH)	Einpaß-Interferometrie im X- und P-Band mit 2,6 bzw. 20 m Basislinie, 20 km Streifenbreite, Betrieb ab Jahr 2000
CARABAS	FOA/ Schweden	Sabreliner	VHF (20-90 MHz), HH-Polarisation	Sehr große Eindringtiefe, geeignet z. B. für die Detektion von getarnten Zielen im Wald, 2,5 × 2,5 Auflösung

Tabelle 7.2: Zusammenstellung einiger flugzeuggetragener SAR-Systeme

Tabelle der verwendeten Formelzeichen und Abkürzungen

a_e	Hüllkurve des gesendeten Impulses
B	interferometrische Basislinie
B_a	Bandbreite des SAR-Signals in Azimutrichtung
B_e	Bandbreite des SAR-Signals in Entfernungsrichtung
c_0	Lichtgeschwindigkeit ($= 2.998 \cdot 10^8$ ms)
d_a	Antennenlänge in Azimut
ECS	Extended Chirp Scaling
f_a	Azimutfrequenz
f_e	Entfernungsfrequenz
f_D	Dopplerschwerpunkt
f_s	Sendefrequenz des Radarsystems
FFT	Fast Fourier Transform
g_a	Zweiweg-Antennendiagramm in Elevation
g_e	Zweiweg-Antennendiagramm in Azimutrichtung
GPS	Global Positioning System
H	Höhe des Sensors
h_0	zweidimensionale Referenzfunktion
h_a	Referenzfunktion in Azimutrichtung
h_e	Referenzfunktion in Entfernungsrichtung
INS	Inertial Navigation System
ISLR	Integrated Sidelobe Ratio
k_a	Dopplerrate
k_e	Modulationsrate des gesendeten Pulses
K_e	Modulationsrate des gesendeten Pulses im Range Doppler-Bereich
L	Anzahl von überlappenden Looks
L_0	Anzahl von unabhängigen, nicht überlappenden Looks
L_{eff}	äquivalente Anzahl von Looks
L_{sa}	Länge der synthetischen Apertur
N_{FFT}	Punktanzahl der Fourier-Transformation
p	Wahrscheinlichkeitsdichte
P	mittlere Rückstreuleistung
PSLR	Peak Sidelobe Ratio

PRF	Pulsfrequenz
r	Entfernung
r_0	minimale Entfernung zwischen Antenne und Punktziel
r_{ref}	Referenzentfernung
R	Zielentfernungsänderung im Range Doppler-Bereich
s	empfangenes, demoduliertes SAR-Signal
s_a	empfangenes, demoduliertes SAR-Signal in Azimutrichtung
s_e	empfangenes, demoduliertes SAR-Signal in Entfernungsrichtung
S/R	Signal/Rausch-Verhältnis
SAR	Radar mit synthetischer Apertur (engl.: S ynthetic A perture R adar)
SPECAN	S pectral A nalysis
SRC	Secondary Range Compression
T	Pulsperiodendauer ($1/\text{PRF}$)
T_a	prozessierte Aperturdauer in Azimutrichtung
T_e	Dauer des gesendeten Impulses
t	Zeit
t_a	Zeitvariable in Azimutrichtung (x/v)
t_e	Zeitvariable in Entfernungsrichtung ($2 \cdot r/c_0$)
u_0	zweidimensionale Impulsantwort
u_a	Impulsantwort in Azimutrichtung
u_e	Impulsantwort in Entfernungsrichtung
ubp	Überlappung zwischen den Looks
v	Geschwindigkeit
x	Azimutposition
w	Gewichtungsfunktion
α	Koeffizient der Hamming-Gewichtung
δ_a	Auflösung in Azimutrichtung
δ_e	Auflösung in Entfernungsrichtung
γ	komplexe Reflektivität
λ	Wellenlänge
ω	Kreisfrequenz
φ	Phase
σ_u	Standardabweichung von $u(t)$
θ_d	Depressionswinkel
θ_{dr}	Driftwinkel
θ_s	Squintwinkel (Schielwinkel)
Θ_a	Antennenöffnungswinkel in Azimutrichtung
Θ_e	Antennenöffnungswinkel in Elevation
Θ_{sa}	Winkelauflösung der synthetischen Apertur

Literaturverzeichnis

- [1] Ausherman, D.A.: *SAR Digital Image-Formation Processing*. In: Proc. SPIE Int. Soc. Opt. Eng., Vol. 528, Jan. 1985, S. 118-133.
- [2] Bamler, R., Runge, H.: *PRF-Ambiguity Resolving by Wavelength Diversity*. In: IEEE Trans. Geoscience and Remote Sensing, Vol. 29, 1991, S. 997-1003.
- [3] Bamler, R.: *A Comparison of Range-Doppler and Wavenumber Domain SAR Focusing Algorithms*. In: IEEE Trans. Geoscience and Remote Sensing, Vol. 30, Juli 1992, S. 706-713.
- [4] Bamler, R. et al.: *RADARSAT ScanSAR Interferometry*. Proc. der IGARSS-Konferenz, Hamburg, 28 Juni - 2 Juli, 1999.
- [5] Bamler, R. und P. Hartl: *Synthetic Aperture Radar Interferometry*. In: Inverse Problems, Vol.14, No.4, 1998, S. 1-54.
- [6] Bennett, J.R., Cumming, I., Deane, R.: *The Digital Processing of SEASAT Synthetic Radar Data*. In: Proc. IEEE Int. Radar Conf., April 1980, S. 168-175.
- [7] Buckreuz, S.: *Bewegungskompensation für flugzeuggetragene SAR-Systeme*. DLR-Forschungsbericht, FB 94-17, 1994.
- [8] Carrara, W. et al: *Spotlight Synthetic Aperture Radar: Signal Processing Algorithms*. Boston: Artech, 1995.
- [9] Cenzo, A.D.: *A New Look at Nonseparable Synthetic Aperture Radar Processing*. In: IEEE Trans. Aerosp. Electr. Syst., Vol. 24, No. 3, Mai 1988, S. 218-224.
- [10] Cloude, S.R., Papathanassiou, K.: *Polarimetric SAR Interferometry*. In: IEEE Trans. Geoscience and Remote Sensing, Vol. 36, No. 5, Sept. 1998.
- [11] Cook, C., Bernfeld, M.: *Radar Signals, An Introduction to Theory and Applications*. New York: Academic Press, 1977.
- [12] Coltelli, M. et al: *SIR-C/X-SAR Interferometry over Mt. Etna: DEM Generation, Accuracy Assessment and Data Interpretation*. DLR-Forschungsbericht, FB 95-48, Feb. 1996.
- [13] Curlander, J.C., McDonough, R.N.: *Synthetic Aperture Radar: Systems and Signal Processing*. New York: Wiley, 1991.
- [14] Davidson, G.W.: *A Chirp Scaling Approach for Processing High Squint Mode SAR Data*. In: IEEE Trans. Aerospace and Electronic Systems, Vol. 32, No. 1, 1996, S. 121-133.
- [15] Durand, J. M. et al: *SAR Data Filtering for Classification*. In: IEEE Trans. Geoscience

- and Remote Sensing, Vol. 25, 1987, S. 629-637.
- [16] Elachi, C.: *Spaceborne Radar Remote Sensing: Applications and Technology*. New York: IEEE Press, 1988.
- [17] Franceschetti, G., Schirinzi, G.: *A SAR Processor Based on Two-Dimensional FFT Codes*. In: IEEE Trans. Aerosp. Electr. Syst., Vol. 26, No. 2, March 1990, S. 356-366.
- [18] Franceschetti G. und R. Lanari.: *Synthetic Aperture Radar Processing*. CRC Press, USA, 1999.
- [19] Freeman, A.: *SAR Calibration: An Overview*. In: IEEE Trans. Geoscience and Remote Sensing, Vol. 30, No. 6, Nov. 1992, S. 1107-1121.
- [20] Gabriel, A.K. et al: *Mapping Small Elevation Changes Over Large Areas: Differential Radar Interferometry*. J. Geophysical Research, Vol. 94, 1989, S. 9183-9191.
- [21] Ghiglia, D.C und L.A. Romero. Robust Two-Dimensional Weighted and Unweighted Phase Unwrapping That Uses Fast Transforms and Iterative Methods. In: J. Opt. Soc. Am., vol. 11, 1994, S. 107-117.
- [22] Goldstein, R. M., Zebker, H.A.: *Interferometric Radar Measurement of Ocean Surface Current*. In: Nature, Vol. 328, 1987, S. 707-709.
- [23] Goldstein, R. M. et al: *Satellite Radar Interferometry: Two-dimensional Phase Unwrapping*. In: Radio Science, Vol. 5, 1988, S. 416-425.
- [24] Goodman, J. W.: *Some Fundamental Properties of Speckle*. In: J. Opt. Soc. Am., Vol. 66, No. 11, Nov. 1976, S. 1145-1150.
- [25] Harris, F. J.: *On the Use of Windows for Harmonic Analysis with the Discret Fourier Transform*. In: IEEE Proc., Vol. 66, No. 1, Jan. 1978, S. 51-83.
- [26] Hartl, P. und H.M. Braun: *A Bistatic Parasitical Radar (BIPAR)*, In: Proc. des ISPRS-Symposiums, Kyoto, Japan, 1988.
- [27] Henderson, F. und Lewis, A.: *Manual of Remote Sensing: Principles and Applications of Imaging Radar*. New York: John Wiley & Sons, 1998.
- [28] Horn, R.: *DLR Airborne SAR Project, Objectives and Status*. In: Proc. First International Airborne Remote Sensing Conference and Exhibition, Straßburg, Sept. 1994.
- [29] Jin, M. Y. und Wu, C.: *A SAR Correlation Algorithm which Accommodates Large Range Migration*. In: IEEE Trans. Geoscience and Remote Sensing, Vol. 22, No. 6, Nov. 84, S. 592-597.
- [30] Keydel, W.: *Future Radar Systems for Remote Sensing*. In: Proc. des PIERS-Workshops, Baveno, Italien, Juli 1998.
- [31] Kramer, H.J.: *Observation of the Earth and its Environment - Survey of Missions and Sensors*, Springer, 1996.
- [32] Klauder, J.R. et al: *The Theory and Design of Chirp Radars*. The Bell System Technical Journal, Juli 1960, S. 745-808.

- [33] Lee, J.S.: *Speckle Suppression and Analysis for Synthetic Aperture Radar Images*. In: J. Opt. Eng., Vol. 25, No.5, Mai 1986, S. 636-643.
- [34] Lee, J.S. et al: *Intensity and Phase Statistics of Multilook Polarimetric and Interferometric SAR Imagery*. In: IEEE Trans. Geoscience and Remote Sensing, Vol. 32, No. 5, 1994, S. 1017-1028.
- [35] Li, F.K., Held, D.N., Curlander, J.C., Wu,C.: *Doppler Parameter Estimation for Spaceborne Synthetic-Aperture Radars*. In: IEEE Trans. Geoscience and Remote Sensing, Vol. 23, No. 1, Jan. 1985.
- [36] Li, F.K., Jonson, T.K.: *Ambiguities in Spaceborne Synthetic Aperture Radar Systems*. In: IEEE Trans. Aerosp. Electron. Syst., Vol. 19, No. 3, Mai 1983, S. 389-397.
- [37] Li, F.K., Croft, C., Held,D.: *Comparison of Several Techniques to Obtain Multiple-Look SAR Imagery*. In: IEEE Trans. Geoscience and Remote Sensing, Vol. 21, No. 3, Juli 1983.
- [38] Li, F.K., Goldstein, R.M.: *Studies of Multibaseline Spaceborne Interferometric Synthetic Aperture Radars*. In: IEEE Trans. Geoscience and Remote Sensing, Vol. 28, 1990, S. 88-96.
- [39] Madsen, S.N.: *Estimating the Doppler Centroid of SAR Data*. In: IEEE Trans. Aerosp. Electron. Syst., Vol. 25, No.2, März 1989.
- [40] Massonnet, D. und Rabaute, T.: *Radar Interferometry: Limits and Potential*. In: IEEE Trans. Geoscience and Remote Sensing, Vol. 31, 1993, S. 455-464.
- [41] Massonnet, D.: *Capabilities And Limitations Of The Interferometric Cartwheel*. In: Proc. of the CEOS Workshop, Toulouse, Frankreich, Oct. 1999.
- [42] McDonough, R.N. et al: *Image Formation from Spaceborne Synthetic Aperture Radar Signals*. Johns Hopkins APL Technical Digest, Vol. 6, No. 4, 1985, S. 300-312.
- [43] Mittermayer, J., A. Moreira und O. Loffeld: *Spotlight SAR Data Processing Using the Frequency Scaling Algorithm*. In: IEEE Trans. Geoscience and Remote Sensing, Vol. 37, 1999, S. 2198-2214.
- [44] Mittermayer, J., A. Moreira, G. Davidson und R. Bamler: *SIR-C ScanSAR Processing*. DLR-Forschungsbericht, FB 96-25, Juli 1996.
- [45] Mittermayer, J. und A. Moreira: *A Generic Formulation of the Extended Chirp Scaling Algorithm (ECS) for Phase Preserving ScanSAR and SpotSAR Processing*. In: Proc. der IGARSS-Konferenz, Honolulu, USA, 24-28 Juli, 2000.
- [46] Mittermayer, J., M. Wendler, G. Krieger, A. Moreira, T. Sutor und S. Buckreuz: *Data Processing of an Innovative Forward Looking SAR System for Enhanced Vision*. In: Proc. der EUSAR-Konferenz, München, 23-23 Mai, 2000.
- [47] Mittermayer, J.: *Hochauflösende Verarbeitung von Radardaten mit synthetischer Apertur*. Dissertation, Universität-Gesamthochschule Siegen, 2000.
- [48] Moore, R.K., Classen, Lin, Y.H.: *Scanning Spaceborne Synthetic Aperture Radar with*

- Integrated Radiometer*. In: IEEE Trans. Aerosp. Electr. Syst., Vol. 17, 1981, S. 410-420.
- [49] Moreira, A.: *Improved Multilook Techniques Applied to SAR and ScanSAR Imagery*. In: IEEE Trans. Geoscience and Remote Sensing, Vol. 29, No. 4, 1991.
- [50] Moreira, A.: *Real-Time Synthetic Aperture Radar (SAR) Processing with a New Subaperture Approach*. In: IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing, Vol. 30, No. 4, 1992.
- [51] Moreira, A.: *Suppressing the Azimuth Ambiguities in Synthetic Aperture Radar Images*. IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing, Vol. 31, No. 4, 1993.
- [52] Moreira, A.: *Ein Echtzeit-Subaperturverfahren zur digitalen Verarbeitung von SAR-Daten*. DLR-Forschungsbericht, FB 93-22, Juni 1993.
- [53] Moreira, A. und Huang, Y.: *Airborne SAR Processing of Highly Squinted Data Using a Chirp Scaling Approach with Integrated Motion Compensation*. IEEE Trans. Geosc. Remote Sensing, Vol. 32, No. 5, 1994.
- [54] Moreira, A. und Misra, T.: *On the Use of the Ideal Filter Concept for Improving SAR Image Quality*. In: Journal of Electromagnetic Waves and Applications, Vol. 9, No. 3, 1995, S. 407-420.
- [55] Moreira, A., Mittermayer, J., Scheiber, R.: *Extended Chirp Scaling Algorithm for Air- and Spaceborne SAR Data Processing in Stripmap and ScanSAR Imaging Modes*. In: IEEE Trans. Geoscience and Remote Sensing, Vol. 34, No. 5, 1996.
- [56] Moreira, A. und Spielbauer, R.: *Combining a Subaperture and Chirp Scaling Approach for Real-Time SAR Processing*. In: International Journal of Electronics and Communications, Vol. 50, No. 2, März 1996, S. 139-144.
- [57] Moreira, A., Mittermayer, J. und Scheiber, R.: *A SAR Auto-Focus Technique Based on Azimuth Scaling*. In: Proc. der IGARSS-Konferenz, Singapur, 3-8 August 1997, S. 2028-2030.
- [58] Moreira, A., Mittermayer, J. und R. Scheiber: *A New Co-Registration Technique Based on the Properties of Azimuth Scaling*. In: Proc. der EUSAR-Konferenz, Friedrichshafen, 25-27 Mai, 1998.
- [59] Moreira, A.: *Radar mit synthetischer Apertur*. In: Radar mit realer und synthetischer Apertur, Kapitel 8, München: Oldenbourg Verlag, 1999.
- [60] Moreira, A., Mittermayer, J., Scheiber, R.: *Extended Chirp Scaling SAR Data Processing in Stripmap, ScanSAR and Spotlight Imaging Modes*. In: Proc. der EUSAR-Konferenz, München, 23-25 Mai, 2000.
- [61] Moreira, A.: *SAR Remote Sensing Using new Techniques and Technology - Strategy Discussion*. Interner DLR-Bericht, Oberpfaffenhofen, Juni, 2000.
- [62] Moreira, J.R.: *A New Method of Aircraft Motion Error Extraction from Radar Raw Data for Real-Time Motion Compensation*. In: IEEE Trans. Geoscience and Remote Sensing, Vol. 28, No. 4, 1990.
- [63] Moreira, J.R.: *Bewegungsextraktionsverfahren für Radar mit Synthetischer Apertur*.

- DLR-Forschungsbericht, FB 92-31, 1992.
- [64] Oliver, C. und S. Quegan. *Understanding Synthetic Aperture Radar Images*. Artech House, 1998.
- [65] Papathanassiou, K.P.: *Polarimetric SAR Interferometry*. DLR-Forschungsbericht, FB 99-07, 1999.
- [66] Papathanassiou, K.P., A. Reigber, R. Scheiber, R. Horn, A. Moreira und S.R. Cloude: *Airborne Polarimetric SAR Interferometry*. In: Proc. der IGARSS-Konferenz, 6-10 Juli, Seattle, USA, 1998.
- [67] K.P. Papathanassiou, S.R. Cloude, A. Reigber und W.M. Boerner: *Multi-baseline Polarimetric SAR Interferometry for Vegetation Parameters Estimation*. Proc. der IGARSS-Konferenz, 24-28 Juli, Honolulu, USA, 2000.
- [68] Perry, R.P., Martinson, L.W.: *Radar Matched Filtering in Radar Technology*, Kapitel 11, Artech House, 1978.
- [69] Porcello, L.J. et al: *Speckle Reduction in Synthetic Aperture Radars*. In: Int. Opt. Soc. Amer., Vol. 66, No. 2, 1976, S. 1305-1311.
- [70] Prati, C. et al: *Seismic Migration for SAR Focusing: Interferometric Applications*. In: IEEE Trans. Geoscience and Remote Sensing, Vol. 28, No. 4, 1990, S. 627-639.
- [71] Pritt, M. D., Shipman, J.S.: *Least Square two-dimensional phase-unwrapping using FFT's*. In: IEEE Trans. Geoscience and Remote Sensing, Vol. 32, No. 3, 1994, S. 706-708.
- [72] Raney, R. K.: *Theory and Measure of Certain Image Norms in SAR*. IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing, Vol. 23, No.3, Mai 1985.
- [73] Raney, R. K. und Wessels, G. J.: *Spatial Considerations in SAR Speckle Simulation*. IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing, Vol. 26, No. 5, Sept. 1988, S. 666-672.
- [74] Raney, K. Runge, H., Bamler, R., Cumming, I.: *Precision SAR Processing without Interpolation for Range Cell Migration Correction*. In: IEEE Trans. Geoscience and Remote Sensing, Vol. 32, 1994, S.786-799.
- [75] Reigber, A. und A. Moreira: *First Demonstration of Airborne SAR Tomography Using Multibaseline L-Band Data*. In: IEEE Trans. Geoscience and Remote Sensing, Vol. 38, No. 5, Sept., 2000.
- [76] Rodrigues, E., Martin, J.M.: *Theory and Design of Interferometric Synthetic Aperture Radars*, In: IEE Proceedings-F, Vol.139, 1992, S. 147-159.
- [77] Ritter, P. und H. Ricken: *ProSmart: German Preparatory Programme for the Industrial Utilization of Next-Generation Satellite Remote Sensing Data*. In: Proceedings der IGARSS-Konferenz, Hamburg, 28-2 Juli, 1999.
- [78] Scheiber, R.: *Single-Pass Interferometry with the E-SAR System of DLR*. In: Proc. EUSAR-Konferenz, Friedrichshafen, Mai 1998.

- [79] Scheiber, R und A. Moreira.: *Co-Registration of Interferometric SAR Images Using Spectral Diversity*. In: IEEE Trans. Geoscience and Remote Sensing, Vol. 38, No. 5, Sept. 2000.
- [80] Schreier, G. Ed.: *SAR Geocoding: Data and Systems*. Karlsruhe: Wishmann, 1993.
- [81] Sack, M., Ito, M. R., Cumming, I. G.: *Application of Efficient Linear FM Matched Filtering Algorithms to Synthetic Aperture Radar Processing*. In: IEE Proc., Vol. 132, No. 1, Febr. 1985, S. 45-57.
- [82] Tomiyasu, K.: *Tutorial Review of Synthetic-Aperture Radar (SAR) with Applications to Imaging of the Ocean Surface*. In: IEEE Proc., Vol. 66, No. 5, Mai 1978.
- [83] Tomiyasu, K.: *Conceptual Performance of a Satellite Borne, Wide Swath Synthetic Aperture Radar*. In: IEEE Trans. Geoscience and Remote Sensing, Vol. 19, No. 2, April 1981, S. 108-116.
- [84] Ulander, L.M.H., H. Hellsten und G. Stenström: *Synthetic Aperture Radar Processing Using Fast Factorised Backprojection*. In: Proceedings der EUSAR-Konferenz, München, 23-25 Mai, 2000, S. 753-756.
- [85] Werner, M.: *Shuttle Radar Topography Mission (SRTM) - Mission Overview*. In: Proc. der EUSAR-Konferenz, München, 23-25 Mai, 2000.
- [86] Wiesbeck, W.: *Future SAR Remote Sensing Systems*. In: Proc. des PIERS-Workshops, Baveno, Italien, Juli 1998.
- [87] Wimmer, C., R. Siegmund und J. Moreira: *Derivation and Validation of High Precision Topography Models in the Waddensea with Airborne SAR-Interferometry* In: Proceedings der IGARSS-Konferenz, Hamburg, 28 Juni - 02 Juli, 1999.
- [88] Wu, C., Liu, K.Y., Jin, M.: *Modeling and a Correlation Algorithm for Spaceborne SAR Signals*. In: IEEE Trans. Aerosp. Electron. Syst., Vol. 18, Sept. 1982, S. 563-575.
- [89] Wu, K.H., Vant, M.R.: *Extensions to the Step Transform SAR Processing Technique*. In: IEEE Trans. Aerosp. Electron. Syst., Vol. 21, No. 3, Mai 1985, S. 338-344.
- [90] Younis, M. und W. Wiesbeck: *Antenna System for a Forward Looking SAR using Digital Beamforming On-Receive-Only*. In: Proc. der IGARSS-Konferenz, Honolulu, USA, 24-28 Juli, 2000.
- [91] Zebker, H.A., Goldstein, R.M.: *Topographic Mapping from Interferometric Synthetic Aperture Radar Observations*. In: J. of Geophysical Research, Vol. 9, 1986, S. 4993-4999.

Index

- Übertragungsfunktion, 22
- A/D-Wandlung, 15, 21, 64, 65, 104
- Abbildende Radarsysteme, 8, 106
- Antennendiagramm, 17, 22, 28, 29, 78, 88, 89, 92, 94, 98, 104
- Auflösung, 8, 9, 11, 15, 24, 29
- Auto-Fokus, 55, 56
- Azimutkompression, 13, 42, 46, 87, 88, 97
- Basisband, 17, 20, 53, 54
- Bewegungskompensation, 43, 45, 87, 89, 102, 104
- CCD, 38
- Chirp-Signal, 20, 21
- Demodulation, 17
- Depressionswinkel, 16, 17, 68–70, 80
- Digitaler Signalprozessor, 78
- Doppler, 13, 18
 - Bandbreite, 19, 28
 - Rate, 19, 20, 50, 55–57
 - Schwerpunkt, 19, 20, 50–55, 80, 83, 101
- Driftwinkel, 16, 80, 88
- E-SAR, 9, 29, 54, 59, 60, 70, 76, 80, 88
- ECS-Algorithmus, 43, 46, 77–95, 97–105
 - Azimutkompression, 88
 - Azimutskalierung, 91, 92, 95–97, 102, 104
 - Chirp Scaling-Funktion, 44, 83–85, 93, 103, 104
 - Entfernungskompensation, 85
 - Frequency Scaling, 65, 104
 - ScanSAR-Verarbeitung, 89
 - Sekundäre Entfernungskompensation, 81, 82, 85
 - Spotlight-Verarbeitung, 98
 - Stripmap-Verarbeitung, 78
- Empfänger, 15
- Entfernungskompensation, 13, 41, 42, 44, 85
- Exponentialverteilung, 26, 27, 32
- Faltung, 17, 18, 22, 26, 39, 40
- Gamma-Verteilung, 28, 32, 33, 36
- Gaus-Verteilung, 26
- Geländemodell, 72, 106
- Gewichtung, 22–24, 28, 32, 92
- GPS, 87
- Hamming-Gewichtung, 24, 25, 34
- Impulsantwort, 22, 23, 28, 37, 46, 49
- inertiales Navigationssystem, 87, 89
- Interferometrie, 66
 - Across-Track, 66, 68, 69, 88
 - Along-Track, 66
 - Basislinie, 66, 70
 - Differentielle Interferometrie, 74, 76
 - Geokodierung, 72
 - Kohärenz, 66–68
 - Kompensation der flachen Erde, 70
 - Koregistrierung, 70
 - Phasenmehrdeutigkeit, 71
 - Polarimetrische Interferometrie, 76
- Inverses SAR, ISAR, 15
- Kalibrierung, 22
 - Corner Reflektor, 88
- Klassifikation, 67, 68
- Kohärenz, 15, 98
- Kompressionsfaktor, 22
- Korrelationsfaktor, 32
- Kreuzkorrelation, 42, 55–57
- Kreuzpolarisationen, 9

- Multilook-Verarbeitung, 26, 28–35
 Effektive Anzahl von Looks, 29, 34
- Nickwinkel, 80
- Optimalfilter, 13, 22, 28, 37, 39, 43
- Phase Unwrapping, 71
- Phasenfehler, 41, 48, 49, 85, 102
- Polarimetrie, 10, 76
- PRF, 15, 51, 52
 Bestimmung des eindeutigen PRF-Bandes,
 50, 53, 55
- Rückstreukoeffizient, 17, 22
- Rückstreuleistung, 27, 28, 33
- radiometrische Auflösung, 29, 35
- Rauschen, 37
- Rayleigh-Verteilung, 27
- SAR, 8
 Auflösung, 8, 9, 11, 15, 24, 29
 Blockdiagramm, 15
 empfangenes Signal, 17, 78
 Interferometrie, 66
 Kalibrierung, 22
 Mehrdeutigkeit, 51–53
 Modellierung, 16, 37
 Prinzip, 9
 statistische Eigenschaften, 26–28, 32,
 33
 synthetische Apertur, 10, 12, 63
- SAR-Signalverarbeitung, 13, 22, 37
 Chirp Scaling-Algorithmus, 43, 83
 Echtzeit-SAR-Verarbeitung, 40, 41,
 58–60
 ECS-Algorithmus, 43, 45, 46, 77
 Frequenzbereich, 40–42
 Range-Doppler-Algorithmus, 40–42
 SPECAN-Algorithmus, 46–48, 62, 91
 unfokussierte Verarbeitung, 48–50
 Wavenumber-Algorithmus, 43
 Zeitbereich, 37, 39, 40
- ScanSAR, 14, 61–63, 89–95, 97, 98
- Sekundäre Entfernungskompression, 41, 81
- Sendefrequenz, 17
- Sender, 15
- Signal/Rausch-Verhältnis, 20, 22, 29, 52
- SLAR, 8
- Speckle, 26, 27, 29–31, 35, 36
- Spotlight, 14, 63–65, 78, 98–100, 102–104
 Dechirp-on-Receive, 64, 65, 104
- Squintwinkel, 16, 20, 41, 43, 46, 57, 79, 81,
 82, 85
- SRTM, 66, 98, 106, 107
- Standardabweichung, 26, 28, 32, 33
- Streifenbreite, 14, 17, 61, 62
- Streifenmodus, 9, 11, 14, 15, 77
- Varianz, 27, 33
- X-SAR/SIR-C-Mission, 62, 63, 67, 75, 94,
 107
- Zeit-Bandbreite-Produkt, 22, 41, 42
- Zielentfernungsänderung, 17, 18, 20, 39–
 42, 57, 58
- Zwischenfrequenz, 15, 17
- SAW, 20, 38