



(19)
Bundesrepublik Deutschland
Deutsches Patent- und Markenamt

(10) **DE 696 30 816 T2 2004.09.23**

(12)

Übersetzung der europäischen Patentschrift

(97) **EP 0 929 824 B1**

(51) Int Cl.⁷: **G01S 13/90**

(21) Deutsches Aktenzeichen: **696 30 816.9**

(86) PCT-Aktenzeichen: **PCT/US96/15678**

(96) Europäisches Aktenzeichen: **96 933 969.6**

(87) PCT-Veröffentlichungs-Nr.: **WO 98/014799**

(86) PCT-Anmeldetag: **30.09.1996**

(87) Veröffentlichungstag

der PCT-Anmeldung: **09.04.1998**

(97) Erstveröffentlichung durch das EPA: **21.07.1999**

(97) Veröffentlichungstag

der Patenterteilung beim EPA: **19.11.2003**

(47) Veröffentlichungstag im Patentblatt: **23.09.2004**

(73) Patentinhaber:

The Johns Hopkins University, Baltimore, Md., US

(84) Benannte Vertragsstaaten:

DE, DK, ES, FR, GB, IT, NL, SE

(74) Vertreter:

Wenzel & Kalkoff, 22143 Hamburg

(72) Erfinder:

RANEY, Keith, Russell, Arnold, US

(54) Bezeichnung: **DOPPLER-RADARHÖHENMESSER MIT KOMPENSIERTER VERZÖGERUNG**

Anmerkung: Innerhalb von neun Monaten nach der Bekanntmachung des Hinweises auf die Erteilung des europäischen Patents kann jedermann beim Europäischen Patentamt gegen das erteilte europäische Patent Einspruch einlegen. Der Einspruch ist schriftlich einzureichen und zu begründen. Er gilt erst als eingelegt, wenn die Einspruchsgebühr entrichtet worden ist (Art. 99 (1) Europäisches Patentübereinkommen).

Die Übersetzung ist gemäß Artikel II § 3 Abs. 1 IntPatÜG 1991 vom Patentinhaber eingereicht worden. Sie wurde vom Deutschen Patent- und Markenamt inhaltlich nicht geprüft.

Beschreibung

ERKLÄRUNG DES REGIERUNGSINTERESSES

[0001] Die Regierung hat Rechte an dieser Erfindung gemäß dem vom Marineministerium zuerkannten Kontrakt Nr. N00039-94-00001.

HINTERGRUND DER ERFINDUNG

Gebiet der Erfindung

[0002] Die vorliegende Erfindung betrifft Radarhöhenmeßgeräte und insbesondere ein Radarhöhenmeßgerät, das beim topographischen Vermessen von darunter liegendem Gelände einen sehr hohen Genauigkeitsgrad erreicht. Durch die Anwendung eines Verzögerungs- Doppler-Verarbeitungsalgorithmus können beim Abschätzen der Höhe jedes aufgelösten Stücks der unter dem Satelliten befindlichen Gelände alle Daten in der gesamten Ausleuchtzone einer topographischen Bahn verarbeitet werden.

Beschreibung des Standes der Technik

[0003] Beim Beobachten von polarer Eisdecke und Oberflächenwellen ist es zum Beispiel bekannt, auf Satelliten basierende Beobachtungen zu verwenden, die deutlich zwischen solchen topographischen Oberflächen unterscheiden können, die eben, mit Gefälle oder sogar hügelig sein können. Prinzipiell könnten herkömmliche Radarhöhenmeßgeräte diese Anforderungen erfüllen, aber nur, wenn bei Eis- oder Wellenbeobachtungen mehrere wohlbekannt Nachteile überwunden werden könnten. Satellitenlaser sind ein weiterer potentieller Kandidat, aber auch diese haben mehrere hinderliche Eigenschaften auf.

[0004] Wie gerade erwähnt, gibt es derzeit zwei Herangehensweisen an Eisdeckenhöhenmessung von Satelliten aus: Radar und Laser. Die Nachteile dieser beiden scheinen ihre Vorteile zu überwiegen. Idealerweise würde man vorziehen, die Vorteile sowohl von Lasern als auch von Radar zu behalten, während man gleichzeitig ihre jeweiligen Schwächen umgeht.

[0005] Vor beinahe 30 Jahren erstmalig zum Beobachten von Eisdecken vorgeschlagen [Robin 1966], genießen Radarhöhenmeßgeräte die Vorteile der Wolkendurchdringung und umfassendes Mitteln über Hunderte von Proben für jede Höhenschätzung. Obwohl Satellitenradarhöhenmeßdaten seit 1978 wesentlich zu unserem Wissen der relativ glatten und ebenen inneren Plateaus der Grönlandeiskappe beigetragen haben, weisen Instrumente, die für den Ozean optimiert wurden, mehrere Mängel auf, wenn sie über Oberflächen mit weniger günstigen Charakteristika verwendet werden [Thomas et al. 1985, Zwally et al. 1987, Partington et al. 1989]. Höhenmeßgeräte, die für die ozeanographische Anwendung konstruiert sind, sind zu einer Höhengenaugkeit in der Größenordnung von einigen Zentimetern fähig, aber nur nach umfassendem Mitteln über die Rücksendung von nominal horizontalen und relativ flachen Oberflächen. Ihre räumliche Zone und ihre differentielle Höhendiskriminierung werden durch eine Faltung des (komprimierten) Bereichspulses mit der Oberfläche bestimmt [Moore und Williams 1957, Brown 1977, McArthur et al. 1989]. Effektive pulsbegrenzte Fußabdrücke, die über ruhigem Wasser in der Größenordnung von 1–2 km liegen können, erstrecken sich über typischen Eisdecken über mehrere Kilometer und zeigen ungewollte (und allgemein unbestimmte) Verschlechterung in der Antwort auf Geländeneigung und Topographie. Selbst für kontinentale Eisdeckenoberflächen, von denen 85% durchschnittliche Neigungen von weniger als etwa 1 Grad aufweisen [Thomas 1990], verfälschen Höhen- und Zonenfehler die Daten. Für ein herkömmliches Radarhöhenmeßgerät entspricht die Höhenmarke Merkmalen, die dem Instrument am nächsten sind. Allgemein deutet dies darauf hin, daß ein hervorstechendes Geländemerkmal, das mehrere Kilometer vom Subsatellitenpunkt entfernt liegt, die Rücksendung dominieren kann, was zu einem Fehler in der Höheneinschätzung und, was noch störender ist, zu einer Unsicherheit in der Örtlichkeit der Zone führt. In unebenem Gelände neigt die Höhenschätzung dazu, diskontinuierlich von Gipfel zu Gipfel zu springen.

[0006] Auf Satelliten basierende Laserhöhenmessung ist mit der Aussicht gefördert worden, diese wesentlichen Nachteile zu überwinden. Das Geoscience Laser Altimeter System (GLAS) ist zum Beispiel konstruiert, um eine effektive Zone von 70 m im Durchmesser für jeden Puls zu erreichen, die 188 m entlang der Spur bzw. Bewegungsrichtung beabstandet sind [GLAS 1992]. Jede Laserzonengröße ist von Geländemerkmalen relativ unabhängig, und ihre Örtlichkeit ist auf etwa ± 150 m bekannt. Diese und verwandte Spezifikationen werden beim Vergleich mit herkömmlicher Radarhöhenmessung als Vorteile genannt und werden als Rechtfertigung der Laserhöhenmessung gegenüber Radarhöhenmessung für die Globalveränderungs-Eisdeckenanwendung verteidigt. Es gibt beim Laseransatz jedoch wesentliche Nachteile. Die hauptsächlichsten Schwächen werden als Anfälligkeit gegenüber Wolkendecke, ungenügende Daten für stabile Höhenstatistiken und Verlust von Datenkontinuität zusammengefaßt.

[0007] Wolkendeckenstatistiken für Grönland; die Arktis und insbesondere die Antarktis sind unvollständig und wechselhaft. Aufzeichnungen wurden für die kanadische Beaufortsee gesammelt, die Wolkenverdunkelung oder schwere Bewölkung im Bereich von 25% bis 50% über Küstenregionen mit Zunahmen in den Sommermonaten bis zu 75% bis 100% zeigen [Agnew 1987]. Andere Aufzeichnungen, wie z.B. die, die vom International Satellite Cloud Climatology Project gesammelt werden, zeigen ähnlich erhöhte Wolkendeckenstatistiken [Rossow 1992]. Im Durchschnitt ist die Wolkenverhangenheit für die Antarktis weniger stark, obwohl bekannt ist, daß Wolken über den seeseitigen Rändern der Eisbänke und kontinentalen Decken üblich sind [Rossow 1992]. Wolkigkeit kann sehr wohl zunehmen, wenn die globale Erwärmung voranschreitet. Sollte dies auftreten, würde die Eisdeckenbeobachtung gesteigerte Bedeutung gewinnen, doch die Laserhöhenmessung wäre in weiterer Gefahr. Basierend auf den verfügbaren Anhaltspunkten ist es unmöglich, über die nächsten mehreren Dekaden eine angemessene Sichtbarkeit von Eisdecken von einem Satelliten bei der 1,064 µm-Infrarotwellenlänge von GLAS zu sichern.

[0008] Selbst ohne Wolken und mit einem Laser, der zu einer willkürlichen Feinbereichspräzision fähig ist, kann ein System wie GLAS keine stabilen Schätzungen der Eisdeckenhöhe bereitstellen. Der Hauptgrund dafür ist, daß ein Laser so wenige Bereichsproben sammelt. Obwohl die von GLAS zu erwartende statistische Leistungsfähigkeit unter Verwendung eines relativ detaillierten Modells der Oberfläche quantifiziert werden könnte, dient ein einfaches Beispiel dazu, das Problem zu illustrieren. Das Gelände habe eine variierende Höhe mit einer Standardabweichung von 5 Metern (bezogen auf eine horizontale Ebene mit geringstem quadratischen Mittel) über einen Bereich von 1 Quadratkilometer. Nach zwei wiederholten Umlaufbahnzyklen, die nach einem Jahr parallele, etwa 2 km voneinander beabstandete Spuren bei 83° N/S-Breite niederlegen würden, würden etwa 11 Höhenproben pro Quadratkilometer gesammelt. Wenn alle Proben statistisch unabhängig (und Gauss-verteilt) wären, würde die Standardabweichung der Höhenabschätzung für diesen Bereich $5/\sqrt{11} \approx 1,5$ Meter betragen. Wenn die ursprüngliche Höhenstandardabweichung über den gesamten Quadratkilometer nur 1 Meter wäre, was unter dem Durchschnitt für die meisten Eisdecken liegt [Brooks et al. 1978, Robin, Drewry und Squire 1983, Zwally 1984, Thomas 1990], wäre die Standardabweichung der GLAS-abgeleiteten Höhe für diesen Bereich etwa 30 cm. Südlich von 83° N, wo die Umlaufbahn weniger Proben pro Quadratkilometer erlaubt, wird der statische Datenbestand noch geringer. Wolkenverhangenheit würde die Angelegenheit verschlimmern. Daraus folgt, daß für realistische Eisdeckensituationen die Messungsvarianz von GLAS für jeden jährlichen Zyklus deutlich größer als die wissenschaftliche Anforderung von $\pm 0,1$ m wäre [Robin 1984]. Daher wäre die statistische Stabilität von Höhenschätzungen von GLAS für Globalveränderungs-Eisbeobachtung nicht zufriedenstellend.

[0009] Wolkendecke und unverlässliche Oberflächenprobenstatistiken sind die beiden Hauptgründe dafür, daß das Canadian Ice Centre die Verwendung von Laserhöhenmessung für ihr Unternehmen Eisvermessung in der Arktis aufgegeben hat.

[0010] Es gibt einen dritten deutlichen Nachteil, einen, der sich auf jegliches optisches Höhenschätzverfahren verallgemeinern läßt. Die Kontinuität der Datenaufzeichnung ist wesentlich [Robin 1984, Thomas et al. 1985, Zwally et al. 1987, Partington et al. 1989, van der Veen 1991, Davis 1994, EOS 1994]. Laserhöhenmessung mißt die Höhe der reflektierenden Oberfläche, die in den meisten Fällen von Eisdeckenbeobachtung Schnee ist. Im Gegensatz dazu reflektiert Radarahöhenmessung vor allem von der ersten Oberfläche einer dielektrischen Diskontinuität, die einen Meter oder mehr unter einer Schneeschicht liegen kann. Daraus folgt, daß Laser und Radar unterschiedliche Höhen wahrnehmen. Das bedeutet, daß, wenn die Mission to Planet Earth sich auf Lasertechnologie verlassen würde, um Polareis zu beobachten, beginnend zum Beispiel 2003, dann wäre das Erbe der Radarahöhenmeßdaten verloren, das seit Seasat 25 Jahre umfaßt. Darüber hinaus wäre eine Aufzeichnung von Laserhöhendaten als Archiv zum Vergleich mit zukünftigen Radardaten nicht nützlich. Selbst wenn optische Höhenmessung derzeit bevorzugt wird, könnte in Zukunft durchaus Radar vorgezogen werden, vielleicht motiviert durch erhöhte Wolkenbedeckung, die Laserhöhenmessung beendigen könnte. Allein aus Sicht der Datenkontinuität scheint ein ausschließliches Verlassen auf Laserhöhenmeßdaten zu Zwecken der globalen Veränderung nicht ratsam.

ZUSAMMENFASSUNG DER ERFINDUNG

[0011] Um solche Nachteile auszuschließen, stellt die vorliegende Erfindung ein neues Konzept in der Radarahöhenmessung vor, das hauptsächlich durch eine viel kleinere und verlässlichere Zone gekennzeichnet ist, als von jeglichem bisherigen Satellitenradarahöhenmeßgerät gezeigt wurde.

[0012] Weiterhin wird die Radarahöhenmessung nicht durch Wolken behindert, stellt Datenkontinuität sicher und schafft einen statistisch stabilen Datenbestand. Gemäß der Erfindung arbeitet ein Verzögerungs-/Dopperradarhöhenmeßgerät kohärent, um die relative Phasenstruktur in jeder Gruppe von Pulsen zu erhalten, die von jedem Bodensteuer empfangen werden, so daß die Spur-Puls-zu-Puls-Phase ausgenutzt werden kann. Verzögerungskompensation als eine Doppler-Funktion ist ein Schlüsselmerkmal, das erstmalig in einer Höhenmeßgerätenwendung angewandt wird. Eine Sequenz von vielen Pulsen wird gesammelt und im Speicher ge-

speichert, und die Zeitverzögerungshistorie von jedem individuellen Streuer verfolgt einen hyperbolischen Ort über das Datenfeld. Eine Fast-Fouriertransformation (FFT) wird in der Spurrichtung auf die Daten im Speicher angewendet, um in die Verzögerungs-/Dopplerdomäne zu transformieren. In dieser Domäne beschreibt die Bereichskrümmung die relative Verzögerung, die alle Signalorte mit Bezug auf den minimalen Radarbereich an Spurpunkten erleiden, das heißt den äquivalenten Abstand vom Radar zum Streuer, wie er bei null Doppler erscheint, was am Nadir auftritt. Wenn man die Tatsache ausnutzt, daß die Krümmung der ausleuchtenden Wellenfront eines Höhenmeßgeräts in seiner Spurrichtung eine bekannte Funktion der Dopplerfrequenz ist, kann diese Krümmung vollständig kompensiert werden. Wenn die vollständige Kompensation einmal erreicht ist, werden alle Teile der Spurhistorie von jeder Reflexion für die Höhenabschätzung verwendet.

[0013] Krümmungskompensation kann auf mehrere verschiedene Arten angewandt werden, einschließlich Interpolation oder Bereichsbinäradressesteuerung. Ein effektives Mittel zur Verzögerungskompensation ist durch Multiplikation mit einer bekannten Phasenfunktion aller Daten in der Verzögerungs-/Dopplerdomäne. Die Auswirkung der Verzögerungskompensation nach der bereichsinversen Fast-Fouriertransformation ist, die Bereichsposition absolut jedes Streuers zu verschieben, um seinem minimalen Bereich (den man bei Positionierung direkt über einem solchen Streuer erhält) gleich zu sein, an welchem Punkt die Dopplerfrequenz effektiv null ist.

[0014] Die Bedeutung der effektiven Transformation des hyperbolischen Orts entlang dem Datenfeld in eine Oberfläche ohne Spurkrümmung ist, daß Integration über die gesamte Spurdauer der Signalhistorie stattfinden kann. Eine solche vollständige Integration bedeutet, im Gegensatz zum Analysieren einer einzelnen Kreiszone, daß die Leistungsfähigkeit des Höhenmeßgeräts wesentlich verbessert ist, während gleichzeitig die Effizienz des Radars selbst erhöht wird. Die Verbesserung der Leistungsfähigkeit wird in einer kleineren Zonengröße (um etwa einen Faktor von 10) gegenüber anderen Systemen ausgedrückt, während gleichzeitig die effektive Menge des Mittels erhöht wird, was zu verlässlicheren Höhenabschätzungen führt. Die Verbesserung der Effizienz ist eine Konsequenz aus der Addition von Pulsen aus der gesamten Breite des Spur-Antennenmusters anstatt nur aus der kleinen Kreiszone im Zentrum. Aus der Realisierung einer zehnfachen Erhöhung (in etwa) des Betrags der reflektierten Signalenergie, die zur Nutzung durch das Höhenmeßgerät verfügbar ist, kann Kapital geschlagen werden, indem die Energieanforderungen des Radars verringert werden.

[0015] Verzögerungs-/Dopplerradarkompensationseinrichtungen sind dem Stand der Technik nicht unbekannt. US-Patent Nr. 3,768,096 lehrt eine Bereichskrümmungskompensation für ein synthetisches Aperturradarbildgebungsprozeßsystem (SAR). US-Patent Nr. 5,179,383, bei dem der Anmelder der vorliegenden Erfindung als ein Erfinder auftritt, lehrt ein SAR-System, bei dem Bereichskrümmungskorrektur erreicht wird. US-Patent Nr. 4,594,593 lehrt ein SAR-System sowohl mit Bereichskrümmungskompensation als auch mit Azimutkompensation. US-Patent Nr. 5,323,162 lehrt ebenfalls ein SAR-System mit Kompensation der Dopplerfrequenz. Raney, R. K., "A delay/Doppler Radar Altimeter for Ice Sheet Monitoring" ("Ein Verzögerungs-/Dopplerradarhöhenmeßgerät zur Eisdeckenbeobachtung"), International Geoscience and Remote Sensing Symposium, US, New York, IEEE, 1995, Seiten 862–864, offenbart das Thema der Dopplerkompensation, wenn sie in einem Radarhöhenmeßgerät implementiert ist.

[0016] Entsprechend ist es ein Ziel der Erfindung, die Nachteile zu eliminieren, die puls begrenzte Höhenmeßgeräte zum Abtasten von Ozeanen plagen, wenn Polareisfeld- und ozeanographische Beobachtungen gemacht werden.

[0017] Es ist ein weiteres Ziel, die Krümmung der Ausleuchtungswellenfront eines Höhenmeßgeräts in der Spurrichtung vollständig zu kompensieren.

[0018] Es ist ein weiteres Ziel der Erfindung, den effektiven Betrag der Signalintegration in einem Radarhöhenmeßgerät zu maximieren, wodurch die Energieanforderung des Radars verringert werden kann.

[0019] Noch ein weiteres Ziel ist es, auf Satelliten basierende Höhenmessung über die derzeit verwendeten Methoden, Laser und herkömmliche Radarhöhenmeßgeräte, hinaus weiterzuentwickeln.

[0020] Diese Ziele wurden durch die verzögerungskompensierte Dopplerradarhöhenmeßgerätvorrichtung und das Verfahren, die in den angefügten Ansprüchen definiert sind, erreicht.

[0021] Andere Ziele der Erfindung werden aus der folgenden detaillierten Beschreibung der Ausführungsform der vorliegenden Erfindung im Zusammenhang mit den beigefügten Zeichnungen ersichtlich.

KURZBESCHREIBUNG DER ZEICHNUNGEN

[0022] **Fig. 1** ist eine diagrammhafte Wiedergabe einer Antennenplattform, die über ein bestimmtes Gelände fliegt;

[0023] **Fig. 2** ist eine Ansicht der Bereichs(Verzögerungs)historie eines Streuers an Spurposition x_n , während er von einem darüber hinweg fliegenden Radarhöhenmeßgerät abgetastet wird;

[0024] **Fig. 3** ist ein Diagramm, das die Transformation vom Beobachtungsraum zum Speicherraum für mehrere Streuer zeigt, die gleichzeitig von einem Radarhöhenmeßgerät ausgeleuchtet werden;

[0025] **Fig. 4** ist eine graphische Darstellung von Spur (Speicher) über der Verzögerungsachse, die die Ver-

zögerungshistorien der in **Fig. 3** gezeigten Streuer an verschiedenen Spurpositionen und Höhen zeigt, die gleichzeitig im Sichtfeld des Höhenmeßgeräts liegen;

[0026] **Fig. 5** ist ein funktionelles Blockdiagramm der Verarbeitungsschaltung des verzögerungskompensierten Dopplerradarhöhenmeßgeräts, das die vorliegende Erfindung verkörpert;

[0027] **Fig. 6** ist ein Diagramm, das die Auswirkungen der Verzögerungskompensation zeigt, nachdem die Bereichsposition aller Streuer verschoben wurde, um dem Minimalbereich gleich zu sein, wie er bei einer Dopplerfrequenz von null erscheint;

[0028] **Fig. 7a** und **7b** veranschaulichen gemeinsam puls begrenzte und Verzögerungs-/Dopplerhöhenmeßgeräte, verglichen hinsichtlich jeweiliger Integrationsflächen;

[0029] **Fig. 8** ist ein Diagramm, das die Impulsantwort des Verzögerungs-/Dopplerhöhenmeßgeräts in Übereinstimmung mit der Erfindung zeigt, normalisiert durch Antwort eines puls begrenzten Höhenmeßgeräts, das TOPEX-Parameterwerte verwendet; und

[0030] **Fig. 9** ist ein Diagramm, das die relativen radiometrischen Integrationsflächen von zwei Arten von Radarhöhenmeßgeräten zeigt, wobei die in der Figur gezeigte rechteckige Fläche die größere Integrationsfläche für das Verzögerungs-/Dopplerhöhenmeßgerät der Erfindung darstellt.

DETAILLIERTE BESCHREIBUNG DER BEVORZUGTEN AUSFÜHRUNGSFORM

[0031] Mit Bezug auf **Fig. 1** ist eine Ansicht einer Antennenplattform **10** dargestellt, wie z. B. ein Satellit oder ein Flugzeug in großer Höhe, die über ein Gelände **12** mit einer reflektierenden Oberfläche **13** fliegt, dessen topographische Merkmale bestimmt werden sollen. Die Plattform **10** ist mit einer Antenne **14** versehen, die wiederum mit den Sender- und Empfängerschaltungen eines Radarhöhenmeßgeräts (nicht gezeigt) an Bord der Plattform verbunden sind. Teile des gesendeten Strahls sind in **Fig. 1** durch die Bezugszeichen **17, 18, 19** identifiziert, wohingegen die zur Empfangsantenne **16** zurückgesandten Strahlen durch die Bezugszeichen **21, 22, 23** identifiziert sind. Die Radarenergie wird in alle Richtungen gestreut, sobald sie einmal auf der Oberfläche **13** eingefallen ist. Um den Einfall der gesendeten Strahlen **17, 18** und **19** auf der Oberfläche **13** wiederzugeben, ist eine Mehrzahl Streuer oder Punkte x_n , x_2 und x_3 gezeigt, die innerhalb der Strahlbreite der Strahlung von Antenne **14** liegen und weiterhin als innerhalb der Spur der Plattform **10** liegend aufgefaßt werden. Solche Streuerpositionen x_n , x_2 und x_3 sollen einen Bruchteil der vielen hundert, wenn nicht gar vielen tausend, Streuern zeigen, die sich an verschiedenen Spurpositionen und Höhen befinden, die gleichzeitig innerhalb des Sichtfeldes des Höhenmeßgeräts liegen.

[0032] Aus der Geometrie in **Fig. 1** ist verständlich, daß sich die Streuer x_n , x_2 und x_3 die gezeigte Position der Plattform alle an leicht unterschiedlichen Bereichen von der Plattform befinden, mit dem weiteren Vorbehalt, daß sich der Streuer x_n an einem Punkt direkt unter der Plattform befindet. Es ist daher verständlich, daß sich die Streuer x_n , x_2 und x_3 voneinander durch die Dopplerverschiebungsdifferenz zwischen ihren Echorücksendungen voneinander unterscheiden lassen. Unter Berücksichtigung der Tatsache, daß am Nadir eine Null-Dopplerverschiebung auftritt, zeigen Beobachtungen der Rücksendung von Streuer x_n keine Dopplerschwankung, wohingegen mit Bezug auf die Streuer x_2 und x_3 eine Beobachtung für jeden eine Dopplerverschiebung in Übereinstimmung mit ihren Verzögerungszeiten relativ zur Plattform zeigt, weil sich der Radarbereich zu den Streuern ändert.

[0033] Die von der in **Fig. 1** dargestellten Konfiguration repräsentierten Hauptideen werden durch Betrachtung der in **Fig. 2** gezeigten Illustrationsgeometrie vorgestellt.

[0034] Mit Bezug auf **Fig. 2** ist eine Ansicht der Verzögerungshistorie eines Streuers an der Spurposition x_n dargestellt, während er von einem darüber hinwegziehenden Höhenmeßgerät abgetastet wird. Die Aufgabe eines Höhenmeßgeräts ist, die Höhe von reflektierenden Facetten entlang der Bodenspur zu schätzen, während sie durch das Vorbeiziehen des darüber befindlichen Instruments abgetastet wird. Allgemein wird die geophysikalische Höhe aus einer Aufzeichnung von Radarbereichsmessungen abgeleitet. Die Höhenpräzision wird durch die Radarpulslänge und durch den für jede Abschätzung verfügbaren Betrag des Mittels festgesetzt. Im Zusammenhang der Parameter des Verzögerungs-/Dopplerhöhenmeßgeräts, das die Erfindung verkörpert, ist die Höhe als der minimale Bereich zwischen dem Radar und dem Streuer definiert.

[0035] Die in **Fig. 2** gezeigte Signalgeometrie zeigt die relative Verzögerung, die jedem Signalort an allen Punkten weg vom minimalen Radarbereich, x_n , als eine Funktion der Bereichsverzögerung und der relativen Spurposition x widerfährt. Per Definition verwendet ein puls begrenztes Höhenmeßgerät nur die Echowverzögerungen innerhalb der puls begrenzten Zone, um den minimalen Radarbereich abzuschätzen. Sowohl vor als auch nach der puls begrenzten Zone erscheint das Echo von jedem Streuer bei einer relativ größeren Verzögerung, so daß in herkömmlichen Radarhöhenmeßgeräten die meisten Echos, die außerhalb der puls begrenzten Zone fallen, nicht zur Höhenschätzung verwendet werden können. Da ein Ziel der Erfindung ein Verzögerungs-/Dopplerradarhöhenmeßgerät ist, das effizienter arbeitet, wird das Ziel durch Kompensieren jedes Signals erreicht, so daß seine gesamte Spurhistorie zur Höhenschätzung verwendet werden kann. Verbesserte geometrische Stabilität über topographisch interessanten Oberflächen ist ein weiteres erwünschtes Merkmal

der Erfindung, und dieses Ziel wird dadurch erreicht, daß man sich auf das Wissen um die Null-Dopplergeometrie verläßt, deren Spurposition ungeachtet der Oberflächentopographie immer am Nadir ist.

[0036] Es ist verständlich, daß die in **Fig. 2** gezeigte relative Verzögerungskrümmung **24** den Radarbereich repräsentiert und nicht die Umhüllende des gesendeten Radarpulses. Man möge sich ebenfalls erinnern, daß es notwendig ist, die relative Verzögerungskrümmung **24** zu eliminieren, um eine Verzögerungskompensation zu erreichen. Nur mit der Eliminierung dieser Krümmung ist der äquivalente Abstand vom Radar zum Streuer über seine gesamte Ausleuchthistorie gleich dem minimalen Bereich. Die relative Verzögerung δr_n für den n-ten Streuer mit der Position des Streuers x_n und (minimalem) Bereich R_n ist

$$\delta r(x - x_n) = R_n \sqrt{1 + \alpha_R \frac{(x - x_n)^2}{R_n^2}} - R_n \quad (1)$$

$$\approx \frac{\alpha_R}{2R_n} (x - x_n)^2 \quad (2)$$

wobei

$$\alpha_R \approx \frac{R_E}{R_E + R_n} \approx \frac{V_B}{V_{S/C}}, \quad (3)$$

worin R_E der Erdradius, V_B die Geschwindigkeit der Antennenausleuchtung des Höhenmeßgeräts entlang dem Gelände und $V_{S/C}$ die Umlaufgeschwindigkeit des Raumfahrzeugs ist. Für typische Werte ($R_n \sim 800$ km, $\alpha_R \sim 0,89$ und $(x - x_n) < 8$ km) läuft die relative Bereichsverzögerung δr_n von null bis etwa 40 m. Obwohl dies nicht viel erschienen mag, ist sie verglichen mit einer typischen (komprimierten) Bereichspulslänge von 0,5 m groß. Es ist wesentlich, daß diese Verzögerung kompensiert wird, wenn das gesamte Spursignal mit akzeptabler Genauigkeit zur Höhenschätzung verwendet werden soll.

[0037] Die Änderung der relativen Verzögerung als eine Funktion des Bereichs ist vergleichsweise klein. Um dies zu beweisen, kann die Sensitivität der relativen Verzögerung auf eine Änderung der Höhe aus

$$\frac{\partial \delta r_n}{\partial R_n} = -\frac{\alpha_R (x - x_n)^2}{2} \frac{1}{R_n^2} \Rightarrow \partial \delta r_n = -\delta r_n \frac{\partial R_n}{R_n} \quad (4)$$

geschätzt werden. Unter Verwendung der gleichen Zahlen wie zuvor beträgt die Differenz der Bereichsverzögerung für eine Änderung der Höhe R_n von 1 km, sagen wir von 800 km zu 801 km, nur $40 \times 1/800 = 0,5$ cm. Auf ähnliche Weise kann man zeigen, daß die Änderung der relativen Verzögerung aufgrund des Umlaufverstärkungsterms α_R viel kleiner als 1 mm ist. Daraus folgt, daß eine akzeptable Bereichsverzögerungsschätzung mit lediglich einem ungefähren Wissen um die Höhe des Streuers abgeleitet werden kann, und daß dieser Wert während der Datenverarbeitung konstant gehalten werden kann.

[0038] Verzögerungskompensation impliziert, daß die relative Verzögerung aus dem Signal über seine Historie entfernt wird. Das Konzept ist in **Fig. 2** angedeutet. Unter der Voraussetzung, daß der Betrag der relativen Verzögerung bekannt ist und daß der Signalort bekannt ist, kann die relative Verzögerung vollständig kompensiert werden, indem an allen Punkten auf der Spurbereichshistorie ein äquivalenter Betrag vom angegebenen Bereich subtrahiert wird. Dies würde dazu führen, daß der Bereichsort bei allen Beobachtungsgelegenheiten einen konstanten effektiven Bereich R_n aufweist. Mit anderen Worten wird die Krümmung der ausleuchtenden Wellenfront des Höhenmeßgeräts in seiner Spurrichtung dann vollständig kompensiert.

[0039] Leider ist es nicht möglich, das Verzögerungskompensationsschema direkt auf die empfangenen Daten anzuwenden, weil dies die Kenntnis der Spurposition x_n jedes Streuers erfordern würde. Noch frustrierender ist, daß die Signalorte von mehr als einem Streuer gleichzeitig in jedem beobachteten Echo vorhanden sind. Die Situation für mehrere Streuer x_4 , x_5 und x_6 , die gleichzeitig durch Antenne **14** ausgeleuchtet werden, um räumliche Positionen aufzuweisen, die durch die rechtwinkligen Koordination (x_4, R_4) , (x_5, R_5) bzw. (x_6, R_6) identifiziert werden, ist in **Fig. 3** umrissen. Wie in **Fig. 3** gezeigt, werden Echos gleichzeitig von allen einzelnen Streuern innerhalb der ausgeleuchteten Strahlbreite der Antenne zurückgesandt, die der Beobachtungsraum des Systems ist. Für jeden Puls werden diese Echos gemeinsam in einen Speicher **26** geschrieben. Nach ihrer Beobachtung und Aufzeichnung erscheinen die Bereichsorte im Speicher **26** wie in **Fig. 4** gezeigt. An jeglicher Position im Datenfeld ist das Problem der Verzögerungskompensation offensichtlich mehrwertig, wofür eine einzige Verzögerungskompensation nicht ausreicht. Glücklicherweise können diese Probleme durch die Anwendung einer geeigneten Datentransformation gemäß der Erfindung überwunden werden.

[0040] Um die Lösung des mehrwertigen Verzögerungskompensationsproblems zu verstehen, wird auf **Fig. 5**

Bezug genommen. In **Fig. 5** beinhaltet das Blockdiagramm der Hauptsignalverarbeitungsstufen eine Anordnung, die einen Bereichsderamp **28**, einen Datenspeicher **30**, eine Spur-FFT **32**, einen Dopplerbereichsgate-tracker **33**, der zwischen FFT **32** und Deramp **28** angeschlossen ist, einen Modulator **34**, dessen Eingaben die Ausgaben von der FFT **32** und einer Verzögerungsphasenkoeffizientenquelle **36** umfaßt, eine Verzögerungs-IFFT **38**, die die Ausgabe vom Modulator **34** erhält, und ein Aufzeichnungsgerät oder eine Multi-Look-Integrationseinrichtung **40** zum Doppler-/Positionsvermessen.

[0041] Es ist wohlbekannt (Woodward 1953), daß die Anwendung einer Fouriertransformation F auf eine Funktion p mit Positionsverschiebung Δx zur Fouriertransformation P der Funktion führt, multipliziert mit einem CW-Phasenterm, dessen Frequenz proportional zu Δ ist. Dieses Fourierverschiebungstheorem ist auf das vorliegende Problem anwendbar. Die Spursignalhistorie für jeden Streuer sei $p(x - x_n)$, wobei x_n die Spurposition des minimalen Bereichs ist. Dann ist die Fouriertransformation $P(f)$, bezogen auf Position x_0 für den n -ten Streuer,

$$F[p(x - x_n + x_0)] = P(f)\exp\{-j2\pi f(x_n - x_0)\} \quad (5)$$

wobei f die Frequenz in der Spurrichtung ist. Daher ergibt eine Fouriertransformation über das Ensemble der Signalhistorien einen Satz von Signalorten, für die die relative Spurposition aller Streuer als CW-Phasenterme eingestuft worden ist. Für Höhenmeßdaten folgt, daß die Bereichsorte für alle Signale in der Bereichs-/Dopplerdomäne einzelwertig sind.

[0042] Für einen sich bewegenden kohärenten Radar, der einen isolierten Streuer ausleuchtet, sind der Winkel α_n zwischen dem relativen Radargeschwindigkeitsvektor und der Dopplerverschiebung, die entlang dem Bereichsvektor zum Streuer beobachtet wird, proportional. Dies ist wichtig, weil Doppler die Frequenz ist, die durch die Spurfouriertransformation aufgedeckt wird. Der Doppler ist durch

$$f = \frac{2}{\lambda} \bar{r}(t - t_n) \cdot \bar{V} \Rightarrow f = \frac{2|\bar{V}| \cos \alpha_{rV}}{\lambda} \quad (6)$$

gegeben. In der für Satellitenhöhenmessung geeigneten Geometrie wird der Dopplerskalierungsfaktor sehr gut durch

$$f = \frac{2V_{SIC}}{\lambda} \frac{x - x_x}{R_n} \quad [\text{Hz}] \quad (7)$$

angenähert. Daher besteht eine eins-zu-eins-Korrespondenz zwischen der beobachteten Dopplerfrequenz (relativ zu null) und einer Spurposition eines individuellen Streuers (relativ zur Position des Höhenmeßgeräts) an allen Punkten entlang der Spur.

[0043] Diese beiden Prinzipien eröffnen neue Möglichkeiten für die Radarhöhenmessung. Ebenso wie **Fig. 2** die Dopplerfrequenzachse umfaßt, die durch eine Fouriertransformation mit der Spurdatenachse zusammenhängt, ist relatives Skalieren zwischen diesen beiden Achsen bekannt (das Doppleräquivalenztheorem). Es folgt, daß die erforderliche Verzögerungskompensation eine bekannte und einzelwertige Funktion über den Bereichs-/Dopplerraum ist (Bamler 1992). Weiterhin kann eine solche Kompensation gleichzeitig auf alle Echos angewandt werden, die in der Fouriertransformation enthalten waren (das Fourierverschiebungstheorem). Schließlich kann die räumlich Position aller Streuer aus ihren Dopplerhistorien abgeleitet werden, da ihre Lage entlang der Spur $x_n - x_0$ relativ zu null Doppler, berechnet an Position x_0 für den n -ten Streuer, in einem Spurphasenterm behalten wird. Dies kann benutzt werden, um eine relative Spurstreuerposition in einer Weise analog zur Bereichspulskomprimierung zu vermessen, und die IFFT **38** wird verwendet, um CW in eine Position zu transformieren.

[0044] Das Verzögerungsinkrement, ausgedrückt durch die Dopplerfrequenz als ihre unabhängige Variable (Raney et al. 1994), ist

$$\delta r(f) \approx \alpha_R \frac{\lambda^2 R_n}{8V_{SIC}^2} f^2 \quad (8)$$

[0045] Diese Verzögerung könnte durch Brute-Force-Operationen an den Daten in der Bereichs-/Dopplerdomäne entfernt werden, indem Integerverschiebungen und ein Interpolator verwendet werden. Es gibt jedoch eine bessere Art. Man erinnere sich, daß die deramped Daten in der Bereichsrichtung als konstante Frequenzen erscheinen. Diese können ausgenutzt werden, indem eine konstante Frequenz angelegt wird, um die zusätzliche Frequenzverschiebung die durch das Verzögerungsinkrement erzeugt wird, wettzumachen. Dies wird realisiert, indem das Datenfeld vor der Bereichs-IFFT mit den geeigneten CW-Signalen in der Bereichsrichtung multipliziert wird. Der Kompensationsphasenmultiplikator ist

$$\Phi(f, t) = \exp\left\{+2\pi j k_R \frac{2}{c} \delta r(f) t\right\} \quad (9)$$

wobei k_R die lineare FM-Rate der gesendeten Signale ist. Der Effekt dieser Phasenmultiplikation ist, die Bereichsfrequenz von jedem Streuer auf CW-Signale zu korrigieren, die bei allen Doppler(Spur-)Positionen die gleiche (Bereichs-)Frequenz aufweisen.

[0046] In dieser Phase bestehen die Daten aus einem Ensemble zweidimensionaler CW-Signale. Für jedes Element ist die Frequenz in der Bereichsrichtung proportional zur (minimalen) Verzögerung relativ zum Bereichstrackpunkt, und die Frequenz in der Spurrichtung ist proportional zur Spurposition des Streuers relativ zur null-Dopplerposition.

[0047] Die verbleibende Datenverarbeitung für jeden Block besteht aus einer Verzögerungs-IFFT und einer Spur-IFFT, um diese räumlich liegenden Daten zurückzugewinnen. Der Vorgang wird über nachfolgende Datenblöcke wiederholt, von denen mehrfache Ansichten verfügbar sind. Wenn das Höhenmeßgerät jeden Streuer passiert, bewegen sich die entsprechenden Höhenschätzungen der Reihe nach vom höchsten Dopplerfilter zu jedem niedrigeren Frequenzfilter, bis der Streuer außer Sichtweite ist. Daher wird auf **Fig. 6** Bezug genommen, die zeigt, daß es der Effekt der Verzögerungskompensation ist, die Bereichsverzögerungsposition jedes Streuers in ihre minimale Verzögerung bei null-Dopplerfrequenz umzuwandeln. Wie in **Fig. 6** gezeigt, werden Bereichsschätzungen von allen Spurbeobachtungen von den Dopplerfiltern df_1 bis df_n im Summierer **42** nichtkohärent addiert, um die Höhenschätzung für jeden Streuer zu vervollständigen. Daher ist die endgültige Höhenschätzung an jeder Spurposition das Ergebnis von Schätzungen, die der Reihe nach von allen Dopplerfiltern akkumuliert werden. Wenn die Dopplerfilter konstruiert sind, um die Strahlbreite der Spurantenne zu umspannen, tragen alle Daten zu den Höhenschätzungen jeder aufgelösten Spurposition bei. Die Spurimpulsantwort wird durch die Dopplerfilterwichtungen bestimmt. Die Spurimpulsposition wird durch die null-Dopplerposition bestimmt, die am Nadir des Raumfahrzeuges vermessen wird.

[0048] Um die vorangegangene Beschreibung der vom Anmelder bevorzugten Ausführungsform der Erfindung zusammenzufassen, repräsentiert das Verzögerungs-/Dopplerhöhenmeßgerät der Erfindung eine neue Klasse der Radarhöhenmessung, vor allem aufgrund des Verzögerungskompensationsalgorithmus. Dieser Algorithmus kompensiert die Spurkomponente der inkremental größeren Bereichsverzögerung, die alle Streuer durchlaufen, wenn sie nicht innerhalb der strahlbegrenzten minimalen Bereichszone liegen. Die Implementierung hängt vom Zugriff auf die Verzögerungs-/Dopplerdomäne ab. Dies wiederum läßt darauf schließen, daß die Puls-zu-Puls-Datensequenz kohärent sein muß, so daß eine Fouriertransformation verwendet werden kann, um die Spur(Doppler)-Frequenzen aufzudecken. In dieser Domäne sind die Verzögerungskrümmungen bekannt und können durch Phasenmultiplikation vollständig kompensiert werden.

[0049] Direkte Ergebnisse der Verzögerungs-/Dopplerkompensierung umfassen (1) einen erhöhten Anteil der für die Höhenschätzung verwendeten gesendeten Leistung, (2) eine erhöhte geometrische Präzision und Stabilität der Höhenschätzungszone, und (3) ein erhöhtes Ausmaß des Mittels für jede Höhenschätzung, was zu einer verringerten Schätzungsvarianz führt.

[0050] In **Fig. 7a–7b, 8** und **9** sind vorteilhafte Einrichtungen zur klareren Darstellung der direkten Ergebnisse des Verzögerungs-/Dopplerhöhenmeßgeräts der Erfindung gezeigt.

[0051] Wie vorstehend erklärt wurde, verwendet das Verzögerungs-/Dopplerradarhöhenmeßgerät der vorliegenden Erfindung Signaldaten aus der gesamten Länge des Antennenausleuchtmuster in der Spurrichtung, um die Höhe jedes aufgelösten Stücks des Subsatellitengeländes zu schätzen. Dies läßt darauf schließen, daß im Verzögerungs-/Dopplerhöhenmeßgerät wesentlich mehr Integration benutzt wird als in einem pulsbegrenzten Höhenmeßgerät. Unter der Annahme, daß der dominante Streumechanismus nicht spiegelnd ist, ist die Integrationszunahme in der Leistung linear. Daraus folgt, daß die nachverarbeitete Leistung für jedes aufgelöste Geländestück proportional zur Fläche der effektiven Zone ist, die in die Integration eingeht. Aufgrund der von Satellitenhöhenmeßgeräten verwendeten Orbitalgeometrie geht ein zusätzlicher günstiger Faktor ein.

[0052] Die klassische Radargleichung (Purcell 1947, S. 21), einschließlich des auf Pulskompressionssysteme anwendbaren Bereichszeit-Bandbreiteproduktes $T_R B_R$, kann als

$$P_R = \frac{P_T G^2(\theta) \lambda^2 (T_R B_R) \sigma}{(4\pi)^3 h^4} \quad (10)$$

geschrieben werden, wobei

P_R = empfangene Leistung

P_T = gesendete Leistung

$G(\theta)$ = Antennenmuster als eine Funktion des Winkels θ von der Zielrichtung entfernt

λ = Radarwellenlänge (m)

h = Höhe des Höhenmeßgeräts (m)

δ = effektiver Radarquerschnitt des aufgelösten Geländestücks (m^2)

[0053] Für die Höhenmessung (Moore und Williams 1957, Marth et al. 1993) wird der Radarquerschnitt normalerweise als

$$\sigma = \sigma^0 A_\sigma \quad (11)$$

interpretiert, wobei

σ^0 = normalisierter Streukoeffizient des Geländes (dimensionslos)

A_σ = Äquivalentfläche der begrenzenden Zone (m^2)

[0054] Zum Beispiel ist der Radius r_{PL} des begrenzenden Kreises für die flache Oberflächenantwortfunktion, wenn das Höhenmeßgerät puls begrenzt ist,

$$r_{PL} = \sqrt{c\tau h} \quad (12)$$

wobei

c = Lichtgeschwindigkeit ($\sim 3 \times 10^8 \text{ ms}^{-1}$)

τ = Länge des Nachverarbeitungsbereichspulses

[0055] Die Fläche der Zone für das puls begrenzte Höhenmeßgerät ist

$$A_{PL} = \pi c\tau h \quad (13)$$

[0056] Daher ist die effektive empfangene Leistung für ein puls begrenztes Höhenmeßgerät

$$P_{PL} = \frac{P_T G^2 \lambda^2 (T_R B_R) \pi c \tau \sigma^0}{(4\pi)^3 h^3} \quad (14)$$

wobei G die Spitzenleistungsverstärkung der Antenne ist.

[0057] Eine vergleichbare Vorgehensweise kann darauf erstreckt werden, den Fall des Verzögerungs-/Dopplerhöhenmeßgeräts der vorliegenden Erfindung wiederzugeben. Um dies zu tun, ist es hilfreich, sich die in **Fig. 7a** und **7b** gezeigte Ausleuchtgeometrie bildlich vorzustellen. **Fig. 7a** zeigt den zentralen Lobus des Leistungsmusters einer typischen Höhenmeßgerätantenne, eine gleichförmig ausgeleuchtete kreisförmige Apertur vom Radius a . Das Fernfeldmuster ist von der Form

$$G(\theta) = G \left[2 \frac{J_1(ak \sin(\theta))}{ak \sin(\theta)} \right]^2 \quad (15)$$

wobei k die Wellenzahl $2\pi/\lambda$ und $J_1(\cdot)$ die Besselfunktion der ersten Art ist (Ulaby, Moore und Fung 1981, S. 130). In **Fig. 7a** ist die puls begrenzte Fläche als dunkel schattierter Kreis **44** an der Spitze des Verstärkungsmusters gezeigt. Der Bereich der Integration für das Verzögerungs-/Dopplerhöhenmeßgeräts der vorliegenden Erfindung ist als hell schattierte Spur, die über das Antennenmuster gehüllt ist, gezeigt, die eine rechtwinklige Fläche **46** ist, wenn sie auf die Oberfläche projiziert wird. Ihre Breite in der Bereichs(Verzögerungs)-Dimension ist durch $2r_{PL}$ gegeben. Ihre Länge kann in relativ einfacher Form ausgedrückt werden, wie unten beschrieben.

[0058] Das innovative Merkmal des Verzögerungs-/Dopplerhöhenmeßgeräts des vorliegenden Merkmals ist, daß nach der Verzögerungskompensation alle Reflexionen von einer gegebenen Streufläche an jedem Punkt in der akkumulierten Signalhistorie den gleichen Radarbereich aufweisen. Die erforderliche Kompensation ist in **Fig. 7b** skizziert. Als Konsequenz kann sich die Höhenschätzung für jede Streufläche die Integration über die gesamte Breite des Antennenmusters zunutze machen. Die zu integrierenden Daten können als ein erweitertes frequenzmoduliertes Signal in der Spurrichtung betrachtet werden, direkt analog dem erweiterten Bereichspuls, der auf die Transmission hin verwendet wird. Daher führt die Verzögerungs-/Dopplerverarbeitung ein Spur-Zeit-Bandbreitenprodukt $T_A B_A$ ein, das in der Höhenmeßgerät-Radargleichung als ein Verstärkungsfaktor erscheint. Dieser Verstärkungsfaktor arbeitet in Verbindung mit der räumlichen Spurauflösung, die in der Figur gezeigt ist, die durch die Verarbeitung über die gleiche Doppler-Bandbreite B_A abgeleitet wird. Aus der Energieerhaltung folgt, daß in dieser Situation zeitliche Integration und räumliche Integration logisch vertauschbar sind. Daher ist die äquivalente Spur-Integrationslänge L_A proportional zur Breite $h\beta$ der Antennenzone, wobei β die äquivalente Rechteckbreite des Antennenmusters ist. Darüber hinaus ist die äquivalente Fläche A_{dD} , die zur empfangenen Signalleistung für ein Verzögerungs-/Dopplerhöhenmeßgerät beiträgt

$$A_{dD} = 2r_{PL} L_A = 2h/3\sqrt{c\tau h} \quad (16)$$

Zusätzlich wird die Integrationszeit für ein Orbitalsystem um das Verhältnis des Satellitenradius ($h + R_E$) zum Erdradius R_E erweitert (Raney 1991). Die entsprechende integrierte empfangene Leistung für das Verzöge-

rungs-/Dopplerhöhenmeßgerät ist

$$P_{dD} = \frac{P_T G^2(\theta) \lambda^2 (T_R B_R) \sigma^0}{(4\pi)^3 h^{5/2}} 2\beta \sqrt{c\tau} \left(\frac{h + R_E}{R_E} \right) \quad (17)$$

was eine $h^{-5/2}$ -Höhen(Bereichs-)Abhängigkeit zeigt.

[0059] Man kann dieses Ergebnis zumindest bezogen auf die Höhenabhängigkeit erwarten, da es das geometrische Mittel zwischen dem pulsbegrenzten Fall (h^{-3}) und dem strahlbegrenzten Fall (h^{-2}) ist (Moore und Williams 1957). Weiterhin profitiert die Integration entlang der Spur für Orbitalsysteme von den relativen Radien der Orbitalbahn und des Integrationswegs.

[0060] Darüber hinaus zeigt das Ergebnis jedoch noch einen anderen Effekt, der subtil ist, aber bei der Systemoptimierung hilfreich sein kann, nämlich verringerte Empfindlichkeit gegenüber komprimierter Pulslänge τ .

[0061] Die relative radiometrische Antwort des Verzögerungs-/Dopplerradarhöhenmeßgeräts und eines pulsbegrenzten Höhenmeßgeräts wird durch das Verhältnis

$$\frac{P_{dD}}{P_{PL}} = \left(\frac{h + R_E}{R_E} \right) \frac{A_{dD}}{A_{PL}} \quad (18)$$

gegeben, wobei angenommen wird, daß alle anderen Faktoren in beiden Fällen gleich sind. Der relative radiometrische Vorteil des Verzögerungs-/Dopplerhöhenmeßgeräts gegenüber dem pulsbegrenzten Höhenmeßgerät ist einfach durch das Verhältnis der anwendbaren Zonenbereiche gegeben, über die die Signale integriert werden. Das Verzögerungs-/Dopplerhöhenmeßgerät nutzt die übertragene Leistung besser, was durch den größeren anwendbaren Integrationsbereich ausgedrückt wird.

[0062] Für ein deutlicheres Verständnis der Größe der Verstärkungsverbesserung, die verfügbar ist, wenn eine Vorrichtung gemäß der vorliegenden Erfindung verwendet wird, wird auf **Fig. 8** Bezug genommen. Zur weiteren Illustration wird ein Vergleich mit einem herkömmlichen Radarhöhenmeßgerät vom Typ des TOPEX/Poseidon-Raumfahrzeugs angestellt. Das TOPEX/Poseidon-Raumfahrzeug trägt ein Radarhöhenmeßgerät TOPEX, das zur Messung von Erd- und Meeresoberflächentopographie von The Johns Hopkins University/Labor für Angewandte Physik entwickelt wurde [Marth et al. 1993].

[0063] Unter Bezug auf **Fig. 8** ist verständlich, daß der Radius des in **Fig. 7a** gezeigten pulsbegrenzten Kreises **44** etwa ein Zehntel der Antennenbandbreite beträgt, was dem Maßstab der **Fig. 7a** und **7b** entspricht. Die Antwortfunktionen des Höhenmeßgeräts sind in **Fig. 8** gezeigt, jeweils bezogen auf ihren Spitzenwert normalisiert. Die relative radiometrische Leistung als Funktion der Verzögerungszeit wird durch das Verhältnis der beiden Antwortfunktionen gegeben. Die beiden Antwortfunktionen sind durch den in **Fig. 8** gezeigten Plot dargestellt. Die Ergebnisse zeigen, daß die radiometrische Antwort des Verzögerungs-/Dopplerradarhöhenmeßgeräts der vorliegenden Erfindung an der gewünschten Höhenmarke über zehn mal größer als die Antwort eines herkömmlichen Radarhöhenmeßgeräts ist. Darüber hinaus werden diese Schlußfolgerungen aus der Analyse der relativen radiometrischen Antwort durch die Beobachtung bestätigt, daß in **Fig. 9** der relative Verstärkungsvorteil des Verzögerungs-/Dopplerradarhöhenmeßgeräts direkt proportional zum Verhältnis der effektiven Fläche A_{dD} zur Fläche A_{PL} der jeweiligen Signalintegrationen ist.

[0064] Obwohl die Erfindung ausführlich beschrieben und illustriert worden ist, ist es klar verständlich, daß selbiges nur zur Veranschaulichung und als Beispiel dient.

Patentansprüche

1. Ein verzögerungskompensiertes Doppler-Radar-Höhenmeßgerät zum Bestimmen der Höhe von aufeinanderfolgenden Bodenstreuern (x_1, x_2, x_3), die von einer sich über dem Boden bewegenden Plattform (**10**) abgetastet werden, die in Bewegung eine Spur-Richtung relativ zu den Streuern aufweist, wobei das Höhenmeßgerät umfaßt:

Mittel (**14**) zum Bereitstellen einer nach unten gerichteten ausleuchtenden Wellenfront;

Mittel (**14**) zum Empfangen reflektierter Signale von den Streuern, die zum Höhenmeßgerät zurückgesandt werden;

Mittel (**32**) zum Anwenden einer Fast-Fourier-Transformation in der Spur-Richtung, um in eine Verzögerungs-Doppler-Domäne zu transformieren;

Mittel (**34, 36**), zum Einführen einer Bereichskrümmungskorrektur in die Verzögerungs-Doppler-Domäne;

Invers-Fast-Fourier-Transformationsmittel (**38**) zum Konvertieren des Radarbereichs in eine Höhe für die Streuer, die sich in der Region unter Ausleuchtung befinden; und Mittel (**40**) zum Kombinieren der Bereiche, die für jeden der Streuer über eine Ausleuchtungshistorie gemessen werden,

dadurch gekennzeichnet, daß die Bereichskrümmungskorrekturmittel (**34, 36**) zum Multiplizieren aller Daten in der Verzögerungs-Doppler-Domäne mit der Phasenfunktion

$$\Phi(f, t) = \exp\left\{+2\pi j k_R \frac{2}{c} \delta r(f) t\right\}$$

angepaßt sind, wobei t die Zeitvariable bezeichnet, f die Dopplerfrequenz ist, k_R die lineare FM-Rate ist und $\delta r(f)$ die Verzögerung im Bereich relativ zum Minimumbereich am Nadir ist.

2. Das Höhenmeßgerät des Anspruchs 1, wobei die Plattform (10) ein Satellit ist.

3. Das Höhenmeßgerät des Anspruchs 1, wobei das Bereichskrümmungskorrekturmittel (34, 36) einen Algorithmus verwendet, der von einem bezeichneten Bereich aller Streuer an allen Punkten auf seiner Spur-Bereichshistorie einen Betrag subtrahiert, der einem Extrabereich äquivalent ist, der durch Off-Nadir-Betrachtung in der Spur-Richtung verursacht wird.

4. Das Höhenmeßgerät des Anspruchs 1, wobei der äquivalente Abstand von der sich bewegenden Plattform (10) zu jedem der Streuer einem Minimalbereich am Nadir gleich gemacht wird, wodurch die Bereichskrümmung eines Profils jedes der Streuer über eine gesamte Ausleuchtungshistorie eliminiert wird.

5. Das Höhenmeßgerät des Anspruchs 1, wobei die Mittel (40) zum Kombinieren mehrerer Bereichsmessungen für jeden der Streuer über die Ausleuchtungshistorie eine zusammengesetzte Bereichsmessung bilden.

6. Das Höhenmeßgerät des Anspruchs 4, umfassend Mittel (34, 36) zum Kompensieren für die Krümmung einer Wellenfront, die jeden der Streuer ausleuchtet, wodurch die gesamte Spur-Historie von jeder Reflexion zur Höhenschätzung verwendet werden kann.

7. Das Höhenmeßgerät nach Anspruch 1, wobei die Mittel (40) zum Kombinieren Speichermittel umfassen.

8. Ein Verfahren in einem Verzögerungs-Doppler-Radar-Höhenmeßgerät zum Bestimmen der Höhe von aufeinanderfolgenden Bodenstreuern, die von einer sich bewegenden Antennenplattform abgetastet werden, die in Bewegung eine Spur-Ausdehnung relativ zu den Streuern aufweist, wobei das Verfahren folgende Schritte umfaßt:

- Richten einer ausleuchtenden Wellenfront mit Ausdehnung ungleich null in einer Spur-Richtung zum Ausleuchten einer Oberfläche von der sich bewegenden Antennenplattform nach unten;
- Ausstrahlen einer Wellenfront, die sich auf die Streuer auf der ausgeleuchteten Oberfläche auswirkt, wodurch reflektierte Signale erzeugt werden, die an das Verzögerungs-Doppler-Radar-Höhenmeßgerät zurückgesandt und von ihm empfangen werden;
- Verarbeiten der zurückgesandten Signale von jedem der Streuer durch Anwenden einer Fast-Fourier-Transformation in der Spur-Richtung, um in eine Verzögerungs-Doppler-Domäne zu transformieren;
- Einführen einer Bereichskrümmungskorrektur in die Verzögerungs-Doppler-Domäne;
- Konvertieren des Radarbereichs in eine Höhe für die Streuer, die sich in der Region unter Ausleuchtung befinden, indem eine inverse Fast-Fourier-Transformation durchgeführt wird; und
- Kombinieren der Bereiche, die für jeden der Streuer über die gesamte Ausleuchtungshistorie gemessen wurden,

dadurch gekennzeichnet, daß die Bereichskrümmungskorrektur in Schritt d. umfaßt:

Multiplizieren aller Daten in der Verzögerungs-Doppler-Domäne durch die Phasenfunktion

$$\Phi(f, t) = \exp\left\{+2\pi j k_R \frac{2}{c} \delta r(f) t\right\}$$

, wobei t die Zeitvariable bezeichnet, f die Dopplerfrequenz ist, k_R die lineare FM-Rate ist und $\delta r(f)$ die Verzögerung im Bereich relativ zum Minimumbereich am Nadir ist.

9. Das Verfahren des Anspruchs 8, wobei die sich bewegende Antennenplattform ein Satellit ist.

10. Das Verfahren des Anspruchs 8, wobei Schritt d. das Verschieben einer Bereichsposition eines jeden der Streuer umfaßt, um gleich einem minimalen Bereich von Null-Doppler-Frequenz zu sein.

11. Das Verfahren des Anspruchs 10, wobei der minimale Bereich erhalten wird, wenn sich die sich bewegende Antennenplattform direkt über jedem der Streuer befindet.

12. Das Verfahren des Anspruchs 8, wobei Schritt e. das Kombinieren der Bereiche, die für jeden der Streuer bei allen Dopplerfrequenzen gemessen werden, umfaßt, um eine Mehrfach-sicht-Bereichsabschätzung zum Bestimmen eines Nadirbereichs zu bilden.

13. Das Verfahren des Anspruchs 8, weiterhin umfassend den Schritt des Bereitstellens von zusätzlicher Dopplerfrequenzverschiebung, um einen Unterschied zwischen Nadirrichtung und Null-Dopplerrichtung zu eliminieren, der durch vertikale Geschwindigkeit des Radarhöhenmeßgerätes verursacht wird.

Es folgen 10 Blatt Zeichnungen

FIG.1

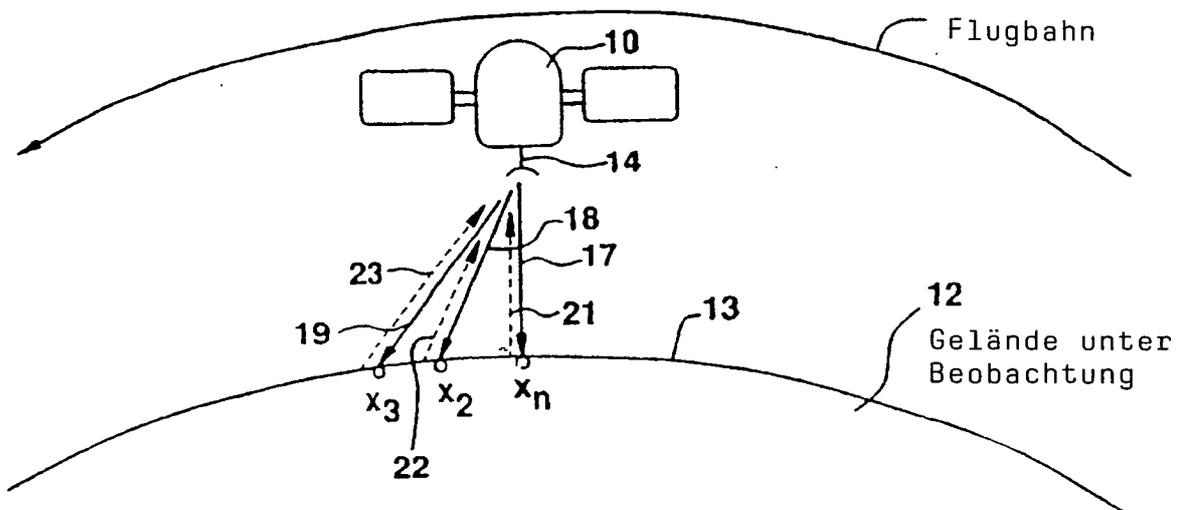


FIG.2

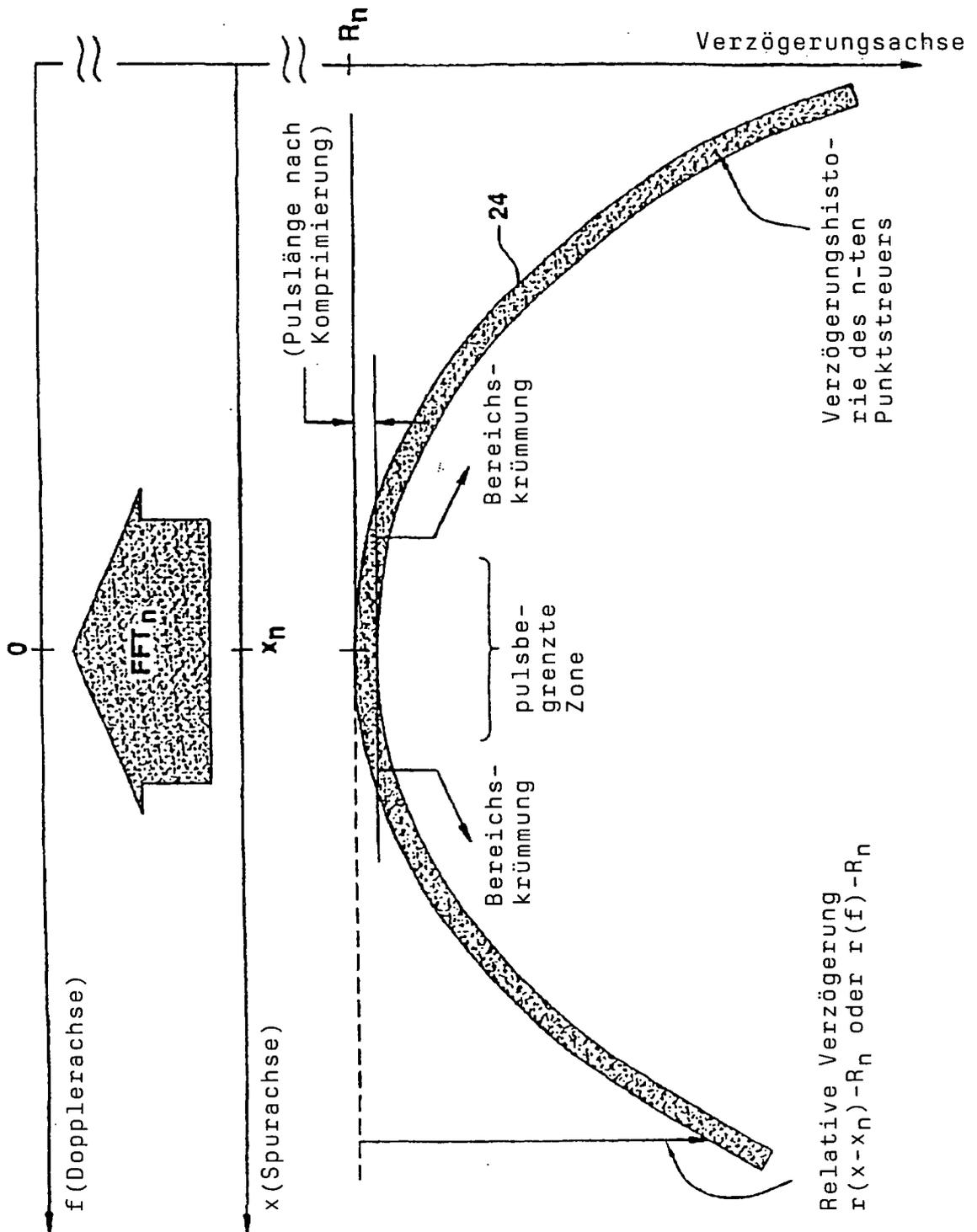


FIG.3

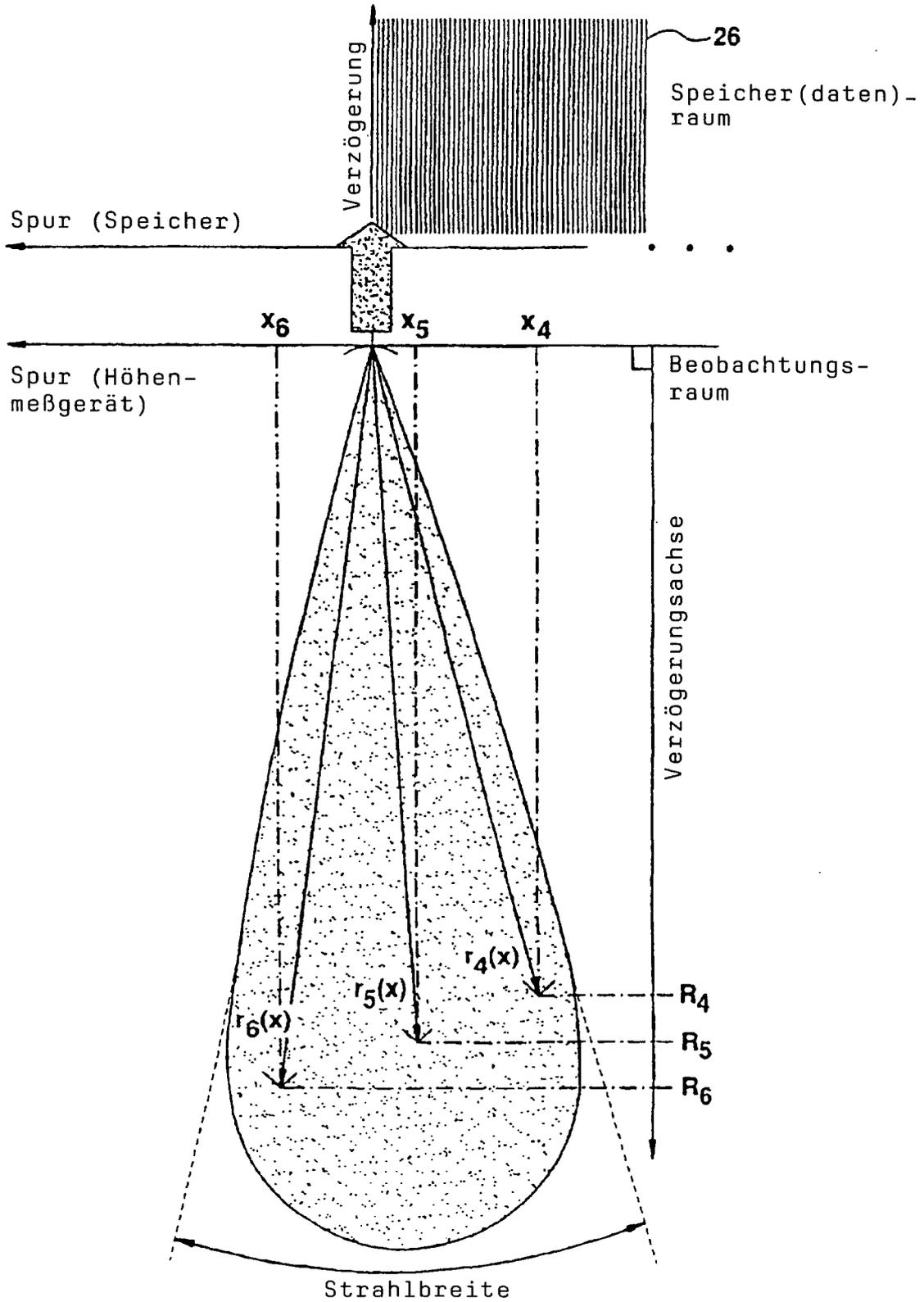


FIG.4

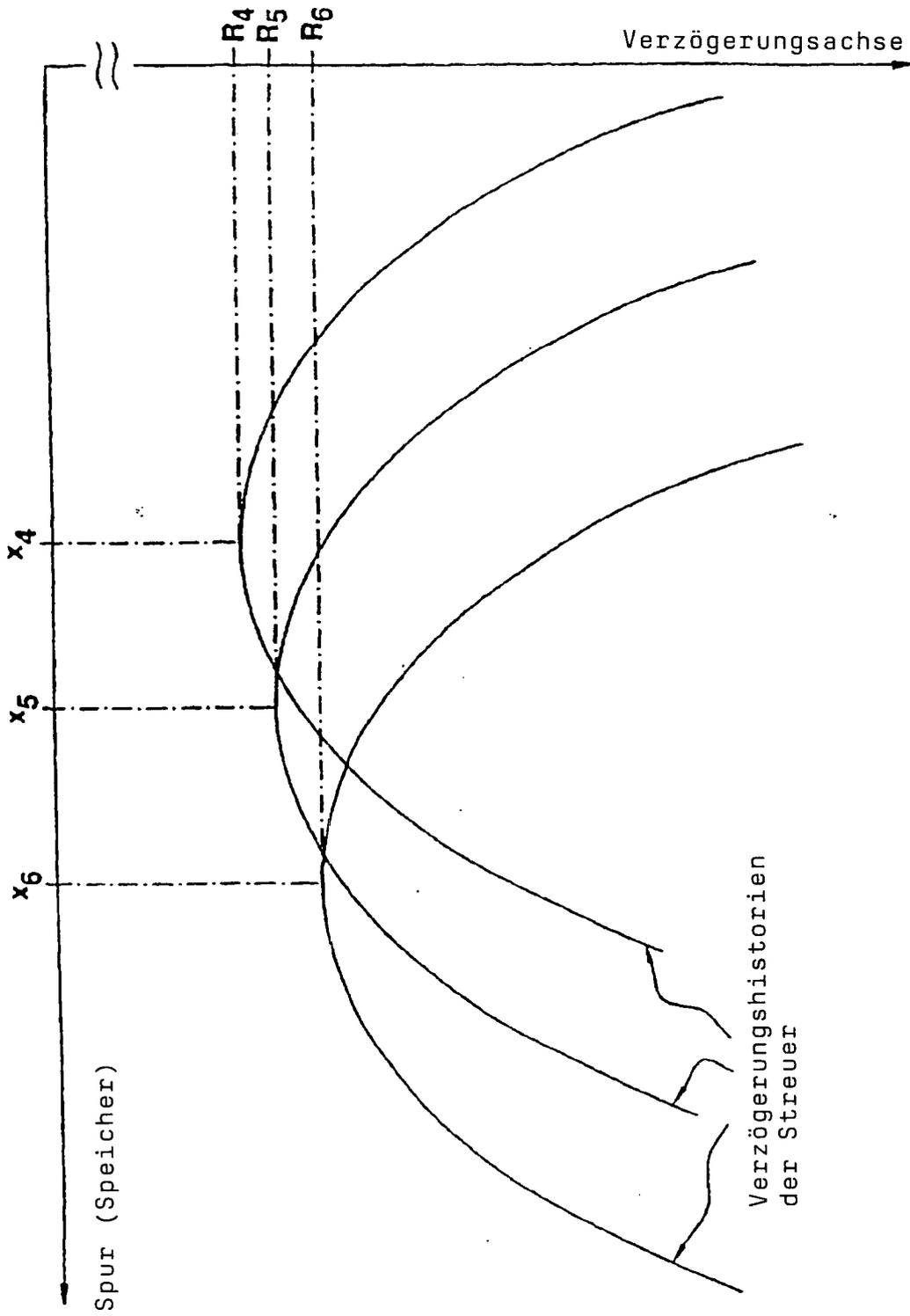


FIG.5

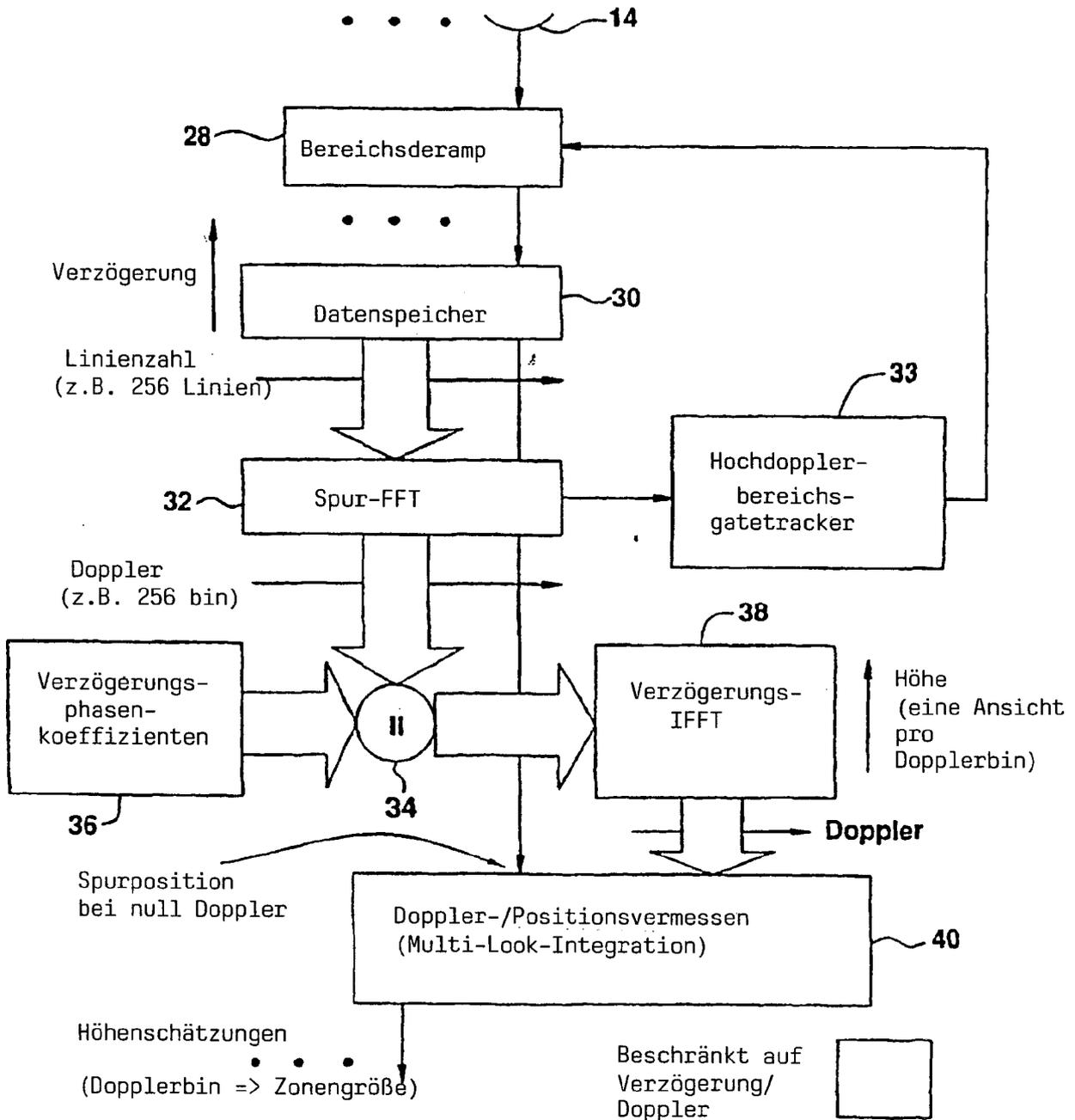


FIG.6

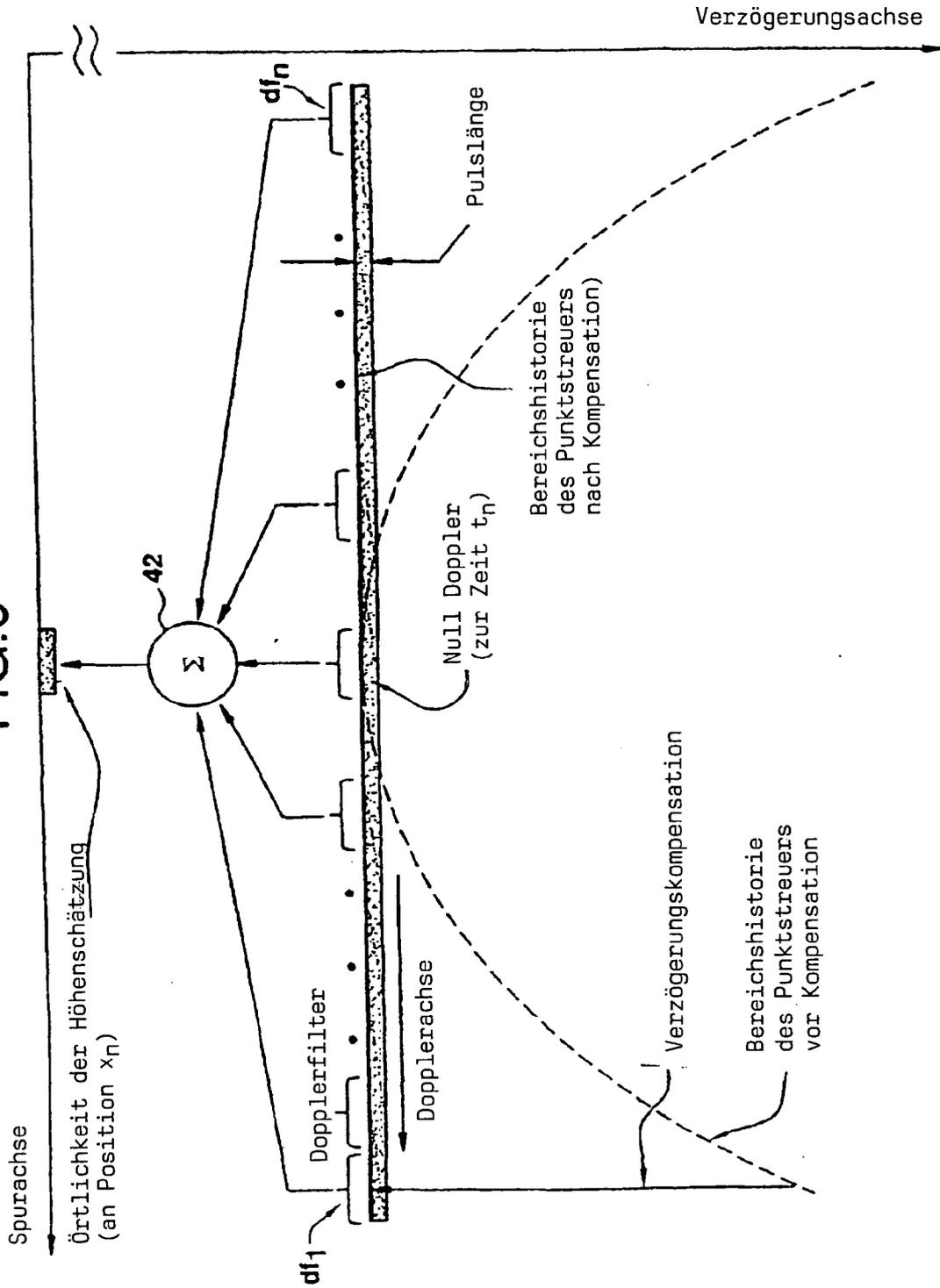
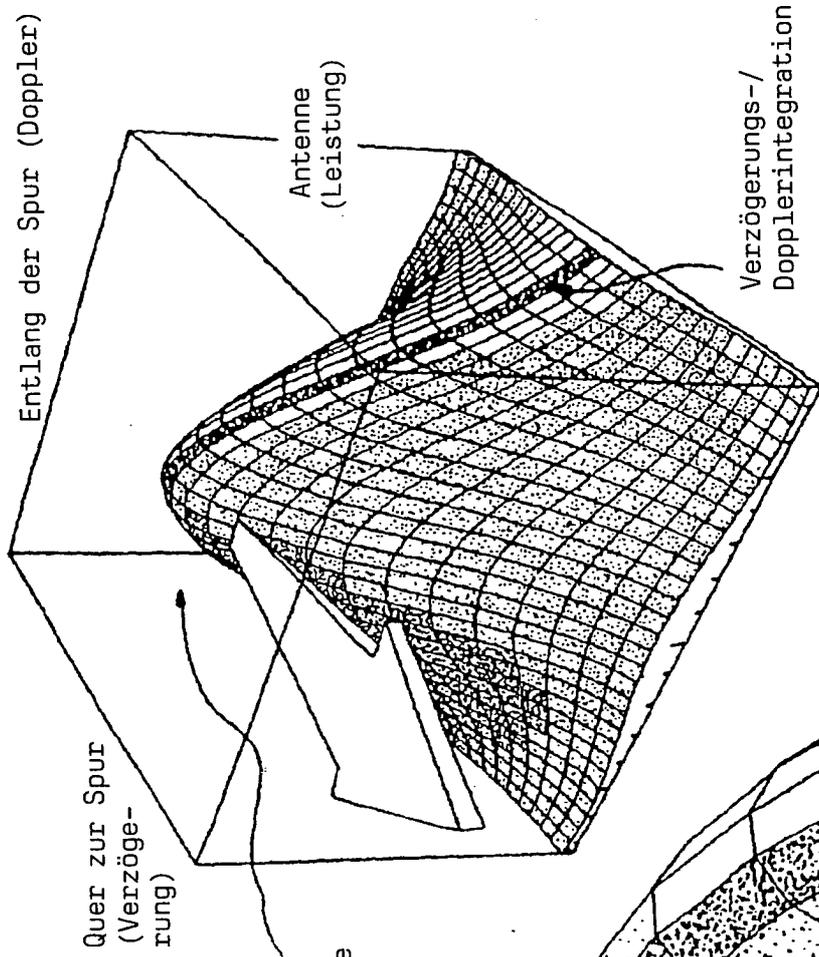


FIG. 7A



pulsbegrenzte Integration

44

FIG. 7A(1)

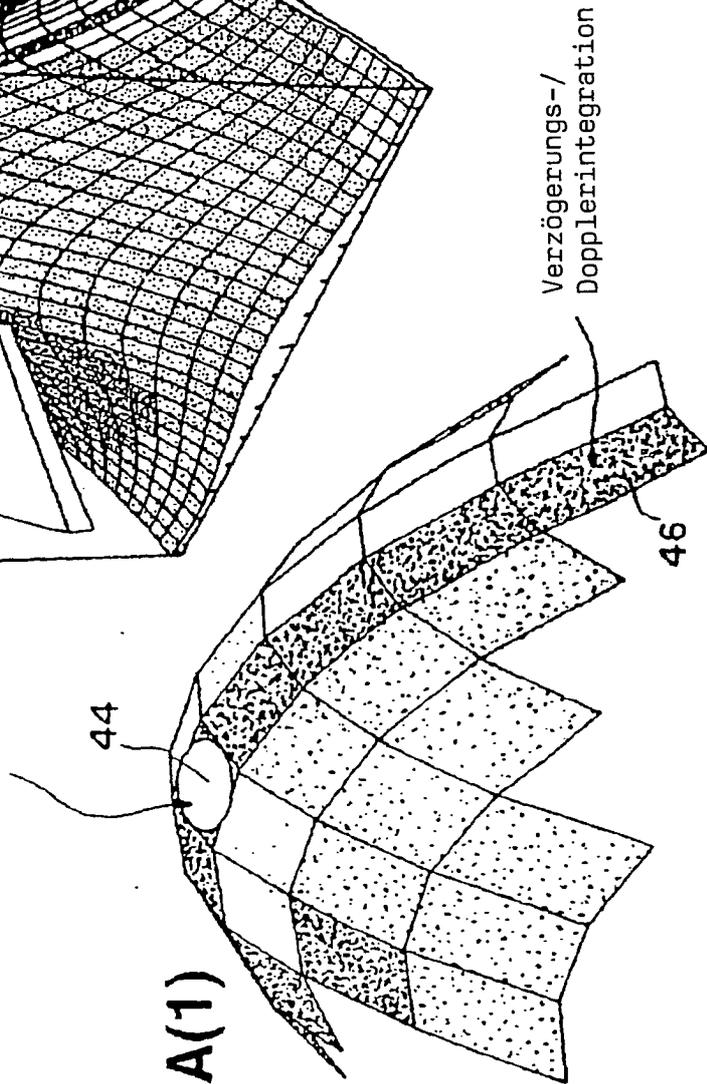


FIG.7B

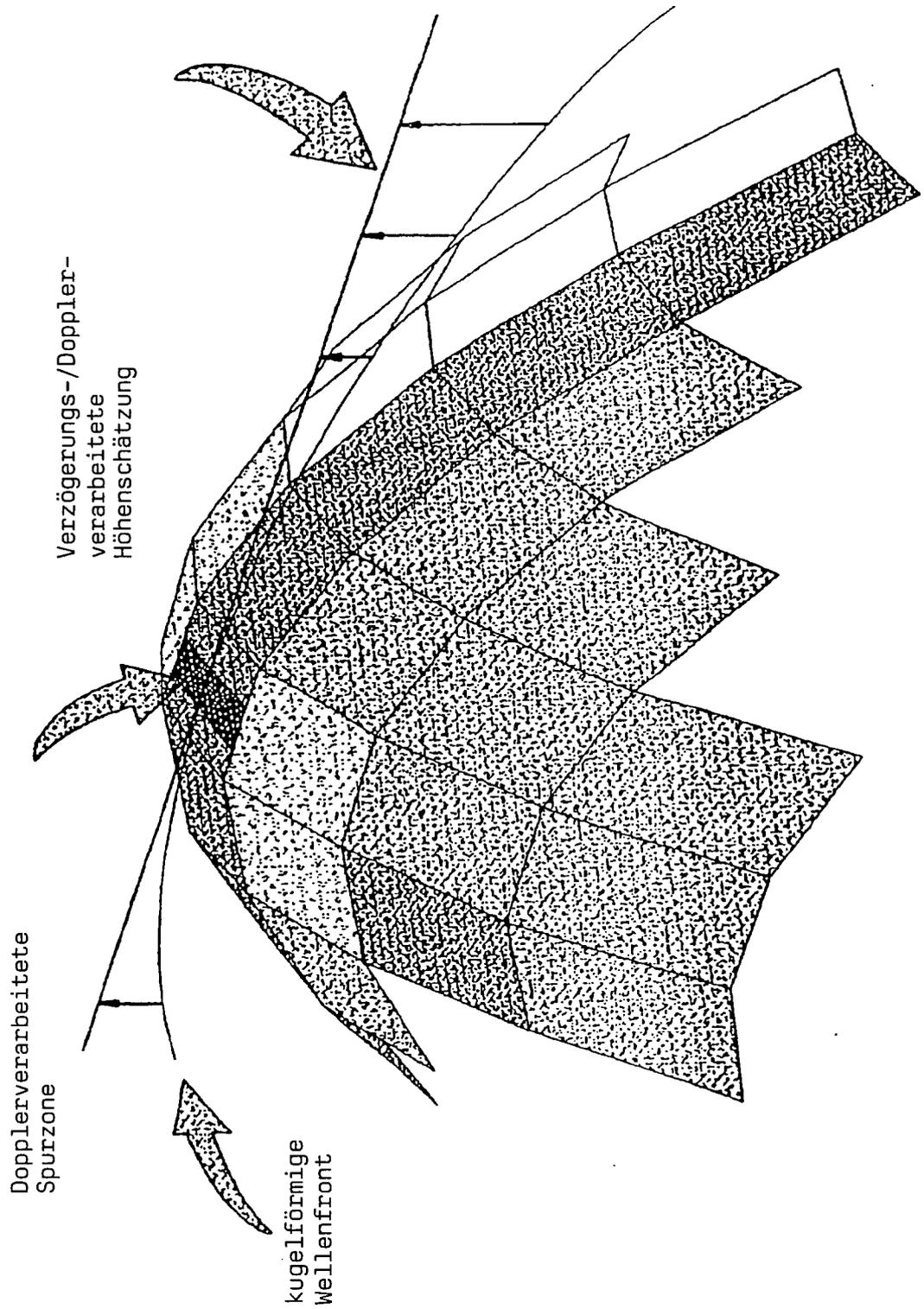


FIG.8

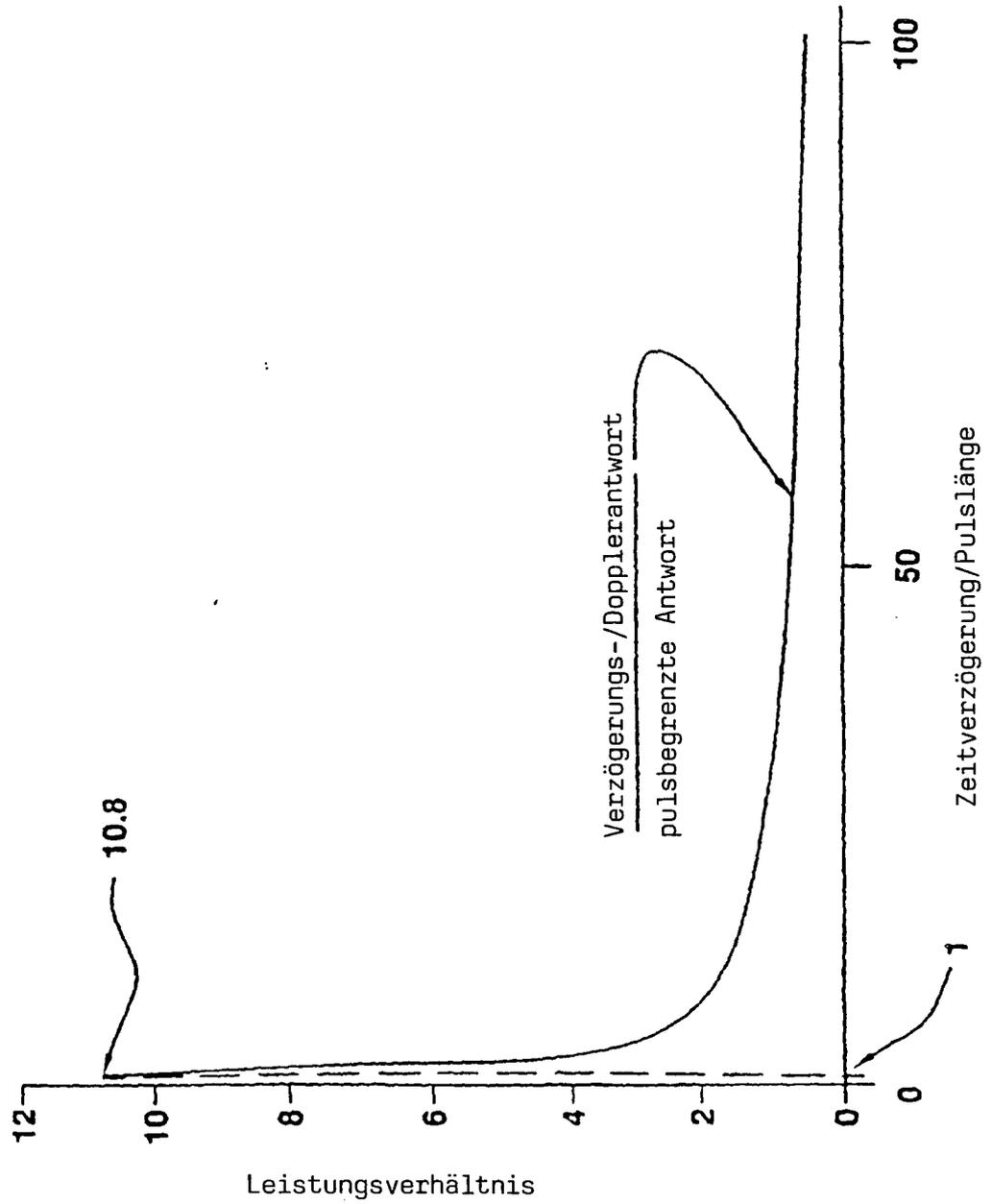


FIG.9

Die relative radiometrische Antwort der beiden Arten von Höhenmeßgeräten wird durch das Verhältnis

$$\frac{P_{dD}}{P_{PL}} = \left(\frac{h + RE}{RE} \right) \frac{A_{dD}}{A_{PL}}$$

gegeben, wobei angenommen wird, daß alle anderen Faktoren in den beiden Fällen gleich sind.

