(19) **Bundesrepublik Deutschland**
Deutsches Patent- und Markenamt

(10) **DE 698 31 723 T2** 2006.07.06

(12) # Übersetzung der europäischen Patentschrift

(97) **EP 0 929 118 B1**
(21) Deutsches Aktenzeichen: **698 31 723.8**
(96) Europäisches Aktenzeichen: **98 124 575.6**
(96) Europäischer Anmeldetag: **23.12.1998**
(97) Erstveröffentlichung durch das EPA: **14.07.1999**
(97) Veröffentlichungstag der Patenterteilung beim EPA: **28.09.2005**
(47) Veröffentlichungstag im Patentblatt: **06.07.2006**

(51) Int Cl.[8]: ***H01Q 3/26*** (2006.01)

(30) Unionspriorität:
997078 **23.12.1997** **US**

(84) Benannte Vertragsstaaten:
DE, FR, GB, IT

(73) Patentinhaber:
Hughes Electronics Corp., El Segundo, Calif., US

(74) Vertreter:
Witte, Weller & Partner, 70178 Stuttgart

(72) Erfinder:
Sorace, Ronald E., Torrance, CA 90503, US; Reinhardt, Victor S., Rancho Palos verde, CA 90275, US; Chan, Clinton, Chino Hills, CA 91709, US

(54) Bezeichnung: **Kalibrierung einer phasengesteuerten Gruppenantenne durch orthogonale Phasenfolge**

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

TECHNISCHES GEBIET

[0001] Die vorliegende Erfindung betrifft allgemein phasengesteuerte Gruppenantennen bzw. Antennenarrays und insbesondere ein Verfahren zum Kalibrieren einer phasengesteuerten Gruppenantenne.

HINTERGRUNDTECHNOLOGIE

[0002] Eine phasengesteuerte Gruppenantenne mit einer Temperaturkompensationsmöglichkeit ist beispielsweise aus EP-A-0 417 689 bekannt. JP 62 001 303 A offenbart ein Eigenschaftsmesssystem für ein Antennenstrahlerelement.

[0003] Allgemein umfasst eine Gruppenantenne eine Gruppe bzw. ein Array von Antennenelementen zur Übertragung oder zum Empfang elektromagnetischer Signale. Die Antennenelemente werden gespeist mit einem oder mehreren Signalen, deren Amplituden und Phasen so festgelegt werden, um einen Strahl zu bilden, d.h. ein Gruppenantennensignal in eine spezifische Richtung. Typischerweise werden die relativen Amplituden jedes Elementsignals über Dämpfungsglieder festgelegt, die auf geeignete Pegel gesetzt sind, um den Strahl zu formen, während Phasenverschiebungsglieder mit den Elementen verbunden sind und zur Veränderung der Phasen der Signale eingestellt werden, um den Strahl zu lenken.

[0004] Um den Strahl präzise zu steuern, muss die aktuelle Phasenantwort jedes Phasenverschiebungsglieds bekannt sein. Die Phasenantwort bzw. das Phasenansprechverhalten eines Phasenschiebers ist unvermeidbaren Fehlern und Variationen aufgrund von Herstellungstoleranzen und verschiedenen Veränderung unterworfen, die als Funktion der Zeit und der Temperatur auftreten. Somit wird eine Kalibrierung benötigt, um die Phasenkorrektur jedes Phasenverschiebungsglieds bzw. Phasenschiebers bereitzustellen. Die Phasenkalibrierungsdaten können gespeichert werden und während des Ausrichtungsbetriebs verwendet werden, um die Phasenantwortfehler zu korrigieren.

[0005] Die Amplituden der Signale, die den Elementen zugeführt werden, werden mit Dämpfungsgliedern eingestellt, die mit den Elementen verbunden sind. Die Dämpfungsglieder sind auch Fehlern und Veränderungen unterworfen. Somit wird eine Kalibrierung benötigt, um Dämpfungsglieder-Kalibrierungsdaten für jedes Dämpfungsglied bereitzustellen. Die Dämpfungsglieder-Kalibrierungsdaten können gespeichert werden und benutzt werden während des Ausrichtungsbetriebs, um die Dämpfungsglied-Antwortfehler zu korrigieren.

[0006] Frühere Verfahren der Kalibrierung phasengesteuerter Gruppen basierten auf dem Abtasten jedes Elements der Gruppe durch alle ihre Phasenwerte relativ zu den anderen Elementen und dem Messen der Leistung jedes Gruppenantennensignals für jeden Phasenwert. Der gemessene Phasenwert, der der maximalen Leistung entsprach, wurde mit dem idealen Phasenwert verglichen.

[0007] Der ideale Phasenwert ist der Phasenwert, der der maximalen Leistung entspricht, wenn es keine Phasenfehler oder Variationen gibt. Die Differenz zwischen dem gemessenen Phasenwert entsprechend der maximalen Leistung und dem idealen Phasenwert ist somit der Phasenfehler, oder der Phasenoffset für das Element.

[0008] Diese Prozedur wird zumindest einmal für jedes Element der Gruppe wiederholt. Nachdem die Phasenoffsets für jedes Element bestimmt sind, werden die Phasen der Elementsignale mit ihren jeweiligen Phasenoffsets verändert, um die Kalibrierung zu bewirken. Folglich werden die Fehler zumindest momentan berücksichtigt.

[0009] Ein Problem beim Abtasten jedes Elements durch all seine Phasenwerte besteht darin, dass dies eine große Anzahl von Messungen erfordert. Beispielsweise fallen die Phasenwerte in einen Bereich von 0° bis 360°. Falls somit die Phaseneinstellung für jedes Element in Inkrementen von 1° quantifiziert würde, müssten dann 360 Phasenwerte abgetastet werden. Falls die Gruppe eine große Anzahl von Elementen aufweist, beispielsweise 100, müssten dann zumindest 3600 Messungen zum Kalibrieren der Gruppe ausgeführt werden, und eine Iteration wäre erforderlich, um die Genauigkeit zu verbessern. Das Abtasten jedes Elements durch all seine Phasenwerte ist nur teilweise optimal in rauschbehafteten Umgebungen und besitzt den Nachteil möglicherweise langer Unterbrechungen für den Service.

[0010] Demgemäß ist ein Bedarf für ein schnelleres und effizienteres Verfahren entstanden, das weniger

Messungen zur Kalibrierung einer Gruppenantenne benötigt.

ZUSAMMENFASSUNG DER ERFINDUNG

[0011] Es ist eine Aufgabe der vorliegenden Erfindung, ein orthogonales Phasenkalibrierungsverfahren für eine Gruppenantenne bereitzustellen.

[0012] Es ist eine weitere Aufgabe der vorliegenden Erfindung, ein Kalibrierungsverfahren für eine Gruppenantenne bereitzustellen, das die Phasenfehler basierend auf Leistungsmessungen bestimmt, die bei orthogonalen Phasenzuständen gemacht werden.

[0013] Es ist eine weitere Aufgabe der vorliegenden Erfindung, ein Kalibrierungsverfahren für eine Gruppenantenne bereitzustellen, das die Amplitudenfehler basierend auf Leistungsmessungen bestimmt, die bei orthogonalen Phasenzuständen gemacht werden.

[0014] Beim Ausführen der oben genannten Aufgaben und anderer Aufgaben wird ein Verfahren zum Kalibrieren eines Gruppenantennenelements bereitgestellt, das ein Signal mit einer Phase und einer Amplitude aufweist, wie es in Anspruch 1 definiert ist. Das Verfahren umfasst das sequentielle Schalten der Phase des Antennenelementsignals durch vier orthogonale Phasenzustände. Bei jedem der vier orthogonalen Phasenzustände wird die Leistung des Gruppenantennensignals gemessen. Ein Phasenfehler für das Antennenelementsignal wird bestimmt als Funktion der Leistung des Gruppenantennensignals für jeden der vier orthogonalen Phasenzustände. Die Phase des Antennenelementsignals wird dann durch den Phasenfehler eingestellt.

[0015] Beim Ausführen der vorgenannten Aufgaben und anderer Aufgaben wird ebenfalls ein Verfahren zum Kalibrieren einer Gruppenantenne bereitgestellt, die eine Vielzahl von Antennenelementen aufweist, deren jedes ein Signal mit einer Phase und einer Amplitude besitzt, die ein Gruppenantennensignal bilden. Das Verfahren umfasst das sequentielle Schalten der Phase jedes Antennenelementsignals durch vier orthogonale Phasenzustände jedes einzelnen Antennenelements. Für jeden orthogonalen Phasenzustand wird die Leistung des Gruppenantennensignals gemessen. Ein Phasenfehler für jedes der Antennenelementsignale wird dann bestimmt. Der Phasenfehler für Antennenelementsignal ist eine Funktion der Leistung des Gruppenantennensignals an jedem der vier orthogonalen Phasenzustände. Die Phase jedes Antennenelementsignals wird dann durch den entsprechenden Phasenfehler eingestellt.

[0016] Beim Ausführen der vorgenannten Aufgaben und anderer Aufgaben stellt die vorliegende Erfindung ein Gruppenantennensystem bereit, wie es in Anspruch 3 definiert ist. Das Gruppenantennensystem umfasst eine Gruppenantenne, die mit einer Vielzahl von Antennenelementen ausgerüstet ist, deren jedes ein Signal mit einer Phase und einer Amplitude besitzt, die ein Gruppenantennensignal bilden. Ein Kalibrierungsprozessor ist bei der Gruppenantenne betriebsbereit, um das sequentielle Schalten der Phase jedes Antennenelementsignals durch vier orthogonale Phasenzustände jeweils einzeln zu schalten und an jedem der orthogonalen Phasenzustände die Leistung des Gruppenantennensignals zu messen. Der Kalibrierungsprozessor arbeitet ferner, um einen Phasenfehler für jedes der Antennenelementsignale zu bestimmen. Der Phasenfehler für ein Antennenelementsignal ist eine Funktion der Leistung des Gruppenantennensignals an jedem der vier orthogonalen Phasenzustände. Der Kalibrierungsprozessor arbeitet ferner, um die Phase jedes der Antennenelementsignale über den entsprechenden Phasenfehler einzustellen.

[0017] Die bereitgestellten Verfahren und das System der vorliegenden Erfindung bestimmten ferner einen Amplitudenfehler für ein Antennenelementsignal als eine Funktion der Leistung des Gruppenantennensignals an jedem der vier orthogonalen Phasenzustände. Die Amplitude des Antennenelementsignals kann dann durch den Amplitudenfehler eingestellt werden.

[0018] Die Vorteile, die die vorliegende Erfindung liefert, sind zahlreich. Die vorliegende Erfindung umgeht die Notwendigkeit, jedes Element durch alle Phasenzustände bei der Suche von Extremen abzutasten. Die Verwendung von vier Phaseneinstellungen im Gegensatz zum Abtasten aller möglichen Phasenzustände reduziert die Zeit, die zum Kalibrieren erforderlich ist, und damit einen möglichen Einschlag in das Gruppenantennensystem. Die Messung der Leistung bei den vier orthogonalen Phasenzuständen liefert eine adäquate Information für eine maximale Wahrscheinlichkeitsabschätzung der Fehler. Eine solche Abschätzung ist optimal in einer widrigen Umgebung.

[0019] Diese und andere Merkmale, Gesichtspunkte und Ausführungsformen der vorliegenden Erfindung werden besser mit Bezug auf die nachfolgende Beschreibung, die angehängten Ansprüche und die begleiten-

den Zeichnungen verstanden.

KURZE BESCHREIBUNG DER ZEICHNUNGEN

[0020] Fig. 1 ist ein schematisches Blockdiagramm einer Gruppenantenne zur Verwendung mit der vorliegenden Erfindung;

[0021] Fig. 2 ist ein Diagramm einer Mehrfachstrahlgruppenantenne zur Verwendung bei der vorliegenden Erfindung;

[0022] Fig. 3 ist ein Flussdiagramm, das den Betrieb eines Gruppenantennenkalibrierungsverfahrens entsprechend der vorliegenden Erfindung darstellt;

[0023] Fig. 4 ist ein Blockdiagramm eines Gruppenantennensignal-Leistungsmessungssystems zur Verwendung bei dem Kalibrierungsverfahren der vorliegenden Erfindung;

[0024] Fig. 5 ist ein Diagramm der Standardabweichung der Phasenkorrektur;

[0025] **Fig.** 6(a–d) zeigen die Konvergenz eines Abschätzvorgangs des Kalibrierungsverfahrens der vorliegenden Erfindung;

[0026] Fig. 7 ist ein Blockdiagramm, das Gruppenantennensystemverbindungen zur Sende-Kalibrierung für eine satellitenbasierte Gruppe zeigt; und

[0027] Fig. 8 ist ein Blockdiagramm, das Gruppenantennensystemverbindungen zur Empfangs-Kalibrierung für eine satellitenbasierte Gruppe darstellt.

DIE BESTEN MODI ZUR AUSFÜHRUNG DER ERFINDUNG

[0028] Es wird nun auf Fig. 1 Bezug genommen, in der eine beispielhafte phasengesteuerte Gruppenantenne **10** gezeigt ist. Eine phasengesteuerte Gruppenantenne **10** umfasst eine Vielzahl von Antennenelementen **12**. Jedes Antennenelement **12** ist mit einem entsprechenden Phasenschieber bzw. Phasenverschiebungsglied **14** und einem entsprechenden Dämpfungsglied **16** verbunden. Jedes Antennenelement **12** kann elektromagnetische Signale, wie beispielsweise Hochfrequenz-(RF)Signale senden und empfangen.

[0029] Im Sendemodus speist eine Leistungs- bzw. Energiequelle **18** Signale über jeweilige Dämpfungsglieder **16** und Phasenschieber **14** in jedes Antennenelement **12** zum Senden eines Gruppenantennensignals. Die Leistungsquelle **18** kann einen Splitter (nicht speziell gezeigt) zum Auftrennen eines einzelnen Signals in die Signale umfassen, die den Antennenelementen **12** zugeführt werden. Ein Controller **20** arbeitet mit jedem Phasenschieber **14** und Dämpfungsglied **16**, um die Phasen und Amplituden der Signale zu verändern, die den Antennenelementen **12** zugeführt werden. Der Controller **20** setzt die Phasen und Amplituden der Signale, um ein Sendestrahl zu bilden, der ein vorgegebenes Strahlungsmuster in einer bestimmten Richtung besitzt. Der Controller **20** ändert dann die Phasen und Amplituden, um den Strahl zu lenken, einen unterschiedlichen Strahl zu bilden, oder ähnliches. Typischerweise wird jedes der Dämpfungsglieder **16** etwa auf einen gemeinsamen Pegel gesetzt derart, dass jedes der Antennenelemente **12** durch die Energiequelle **18** gleich angesteuert wird. Diese Pegel können jedoch für die Strahlformung variiert werden.

[0030] Im Empfangsmodus liefern die Antennenelemente **12** Signale, die von einer externen Quelle empfangen werden über jeweilige Phasenschieber **14** und Dämpfungsglieder **16** zu einer Leistungslast **22**. Die Leistungslast **22** kann einen Kombinierer (nicht speziell gezeigt) zum Kombinieren der empfangenen Signale in ein einzelnes Signal umfassen. Der Controller **20** arbeitet mit den Phasenschiebern **14** und Dämpfungsgliedern **16**, um die Phase und die Amplitude der Signale zu verändern, die von den Antennenelementen **12** empfangen werden. Der Controller **20** setzt die Phasen und die Amplituden, um ein Empfangsmuster in einer bestimmten Richtung zu bilden. Der Controller **20** ändert dann die Phasen und die Amplituden, um das Empfangsmuster zu lenken, ein unterschiedliches Empfangsmuster zu bilden oder ähnlichem. Typischerweise wird jedes der Dämpfungsglieder **16** auf etwa einen gemeinsamen Pegel gesetzt, derart, dass jedes der Antennenelemente **12** die Leistungslast **22** gleich speist. Diese Pegel können aber für die Strahlformung variiert werden.

[0031] Es wird nun auf die Fig. 2 Bezug genommen, in der eine beispielhafte phasengesteuerte Gruppenantenne **30** gezeigt ist. Die phasengesteuerte Gruppenantenne **30** besitzt eine Vielzahl von Antennenelementen

32, die in einem M × N Array angeordnet sind. Jedes Antennenelement **32** ist mit einer Vielzahl von Phasenschiebern **34** und einer Vielzahl von Dämpfungsglieder **36** verbunden. Jeder Phasenschieber **34** ist in Reihe mit einem jeweiligen Dämpfungsglied **36** angeordnet. Jedes seriell angeordnete Phasenschieber- **34** und Dämpfungsglied- **36** Paar ist parallel zu zwei anderen seriell angeordneten Phasenschiebern und Dämpfungsgliedern angeordnet. Alle Phasenschieber- **34** und Dämpfungsglied- **36** Paare sind an einem Ende **38** mit einem jeweiligen Antennenelement **32** verbunden.

[0032] Die Antennenelemente **32** werden mit einem oder mehreren Signalen gespeist oder empfangen ein oder mehrere Signale, deren Phasen und Amplituden bestimmt werden, um einen Strahl in eine bestimmte Richtung zu formen. In Fig. 2 werden als Beispiel drei Signale eingespeist oder von jedem Antennenelement **32** empfangen. Das Signal, das jedem Antennenelement **32** eingespeist wird, ist die Summe aus drei Signalen, deren Phasenverschiebung und Dämpfung durch die gewünschte Richtung des Strahls für jedes der ausgestrahlten Signale bestimmt wird. Somit kann die phasengesteuerte Gruppenantenne **30** drei unterschiedliche Strahlen haben. Das Signal, das von jedem Antennenelement **32** empfangen wird, wird in drei Signale aufgeteilt, deren jedes Signal phasenverschoben und gedämpft wird, wie gewünscht.

[0033] Da eine genaue Ausrichtung eines Strahls einer phasengesteuerten Gruppenantenne eine präzise Steuerung der Phase und der Amplitude benötigt, ist eine exakte Kenntnis des Phasen- und Verstärkungsansprechverhaltens der Phasenverschiebungs- und Dämpfungsgliedelektronik wesentlich. Wie jedoch unter dem Abschnitt „Hintergrundtechnologie" ausgeführt wurde, variieren die Parameter der Phasenverschiebungs- und Dämpfungselektronik mit der Temperatur und driften mit der Zeit. Eine periodische Kalibrierung der phasengesteuerten Gruppenantenne ist deshalb notwendig, um Phasen- und Amplitudenkorrekturen für jedes Antennenelement zu gewährleisten.

[0034] Es wird nun auf die Fig. 3 Bezug genommen, in der ein Flussdiagramm **40** das Verfahren der vorliegenden Erfindung zur Kalibrierung einer phasengesteuerten Gruppenantenne zeigt, wie beipielsweise Gruppenantenne **10** mit einer Vielzahl von Antennenelementen. Jedes der Antennenelemente hat ein Signal mit einer Phase und einer Amplitude. Die Antennenelementsignale bilden ein Gruppenantennensignal. Das Flussdiagramm **40** beginnt mit Block **42**, der die Phase und die Amplitude für jedes Antennenelementsignal setzt, um einen Teststrahl zu bilden. Die Phasenwerte der Antennenelementsignale sind typischerweise unterschiedlich. Unabhängig von dem aktuellen Phasenwert werden jedoch die Phasenwerte jedes der Antennenelementsignale für die Teststrahlposition als 0° Phasenzustand betrachtet. In der Teststrahlposition ist der 0° Phasenzustand der Referenz- oder Sollphasenzustand.

[0035] Die Amplituden der Antennenelementsignale sind typischerweise die gleichen. Somit werden die Dämpfungsglieder, die mit den Antennenelementen verbunden sind etwa auf einen gemeinsamen Pegel gesetzt.

[0036] Nachfolgend durchläuft der Block **44** die Phase eines Antennenelementsignals durch vier orthogonale Phasenzustände. Die vier orthogonalen Phasenzustände bestehen aus dem Referenzphasenzustand (0°) und den Phasenzuständen entsprechend 180°, 90° und 270° relativ zu dem Referenzphasenzustand. Die Phasen und Amplituden all der anderen Antennenelementsignale bleiben konstant, während die Phase des einen Antennenelementsignals die Reihe durchläuft.

[0037] Bei jedem der vier orthogonalen Phasenzustände (0°, 90°, 180° und 270°) misst Block **46** die Leistung des Gruppenantennensignals. Die Leistungsmessungen P_0, P_{180}, P_{90}, und P_{270} entsprechen den Phasenzuständen Φ_0, Φ_{180}, Φ_{90} und Φ_{270}. Block **48** bestimmt dann einen Phasenfehler für das Antennenelementsignal basierend auf den Leistungsmessungen, die von Block **46** gemacht werden. Block **50** bestimmt dann einen Amplitudenfehler für das Antennenelementsignal basierend auf den Leistungsmessungen, die von Block **46** durchgeführt werden. Die Blöcke **44** und **46** können wiederholt werden, wie dies durch die gestrichelte Linie angezeigt ist, um mehrere Messungen der empfangenen Leistung zu integrieren und das Signalrauschverhältnis der Messung zu verbessern. Entscheidungsblock **52** bestimmt dann, ob jedes der Antennenelemente seine vier orthogonalen Phasezustände durchlaufen hat. Falls nicht, wiederholt dann der Vorgang Block **44**, um die Phase eines unterschiedlichen Antennenelementsignals zu durchlaufen, so dass die Phase und der Amplitudenfehler für das unterschiedliche Antennenelementsignal bestimmt werden kann.

[0038] Nachdem die Phasen- und Amplitudenfehler für alle Antennenelementsignale bestimmt sind, stellt Block **54** die Phase jedes Antennenelementsignals durch den entsprechenden Phasenfehler ein. Block **56** stellt dann die Amplitude jedes Antennenelementsignals durch den entsprechenden Amplitudenfehler ein. Die zuvor erwähnte Prozedur kann wiederholt werden, bis die Phasen- und Amplitudenkalibrierungsfehler inner-

halb eines akzeptablen Pegels konvergieren.

[0039] Bezugnehmend auf Fig. 4 ist ein Messsystem **60** zum Messen der Leistung eines Kalibrierungssignal **62** gezeigt, das von einem Empfangsantennenanschluss **64** empfangen wird. Die Gruppenantenne **10**, die auf einem Satelliten in dem gezeigten Beispiel ist, sendet das Kalibrierungssignal **62** zu dem Anschluss **64** zur Kalibrierung. Es sei angemerkt, dass das Ausrichten eines Strahls auf eine feste Station (Anschluss **64**) von der Annahme ausgeht, dass die Abhängigkeit der Kalibrierung auf die Richtung vernachlässigbar ist. Falls Parameter bezüglich der Ausrichtungsrichtung empfindlich sind, muss dann eine Alternative, wie beispielsweise mehrere Empfangsstationen, implementiert werden.

[0040] Wie mit Bezug auf Fig. 3 beschrieben, umfasst das Kalibrierungssignal **62** eine Reihe von Phasenübergängen Φ_0, Φ_{180}, Φ_{90} und Φ_{270} mit Gruppenantennensignalleistungsmessungen P_0, P_{180}, P_{90} und P_{270}, die in jedem Zustand ausgeführt werden. Das Messsystem **60** besteht aus dem Anschluss **64** und einem schmalbandigen Filter **66**, gefolgt von einem Leistungsdetektor **68**. Der Leistungsdetektor **68** ist vorzugsweise ein quadratischer Detektor. Das Eingangssignal des Leistungsdetektors **68** ist ein RF-Signal mit einer RF-Leistung. Das Ausgangssignal des Leistungsdetektors **68** ist eine Spannung proportional zu der RF-Leistung.

[0041] Ein Analog-Digital-(A/D)Wandler **70** folgt dem Leistungsdetektor **68**. Der A/D-Wandler **70** wandelt die analoge Spannung des Ausgangs von dem Leistungsdetektor **68** für den Empfang durch einen Kalibrierungsprozessor **72** in ein digitales Signal um. Der Kalibrierungsprozessor **72** verarbeitet das digitale Signal, um den Phasen- und Amplitudenfehler und die Korrektur zu bestimmen.

[0042] Der Kalibrierungsprozessor **72** bestimmt die Korrekturdaten entsprechend den nachfolgenden Herleitungen. Es wird angenommen, dass alle Antennenelemente der Gruppenantenne **10** etwa gleich angesteuert werden.

[0043] Die empfangene Spannung am Eingang des Leistungsdetektors **68**, wenn alle Antennenelemente **12** der Gruppenantenne **10** auf ihre Referenzphasenwerte gesetzt wurden, beträgt:

$$r(t) = \sum_{m=1}^{M} a_m \cos(\omega t + \delta_m) + n(t) \qquad (1)$$

wobei,

ω die gesendete Frequenz ist,
δ_m der Phasenoffset des m-ten Elements relativ zu dem Sollwert ist,
a_m die RF-Spannung des m-ten Elements ist, und
n(t) das schmalbandige thermische Rauschen ist, das zwischen den Abtastungen unkorreliert ist.

[0044] Das Schmalbandrauschen ist:

$n(t) = n_c(t)\cos\omega t - n_s(t)\sin\omega t$

wobei $n_c(t)$ und $n_s(t)$ die Inphasen- und die Quadratur-Komponente sind. Diese Komponenten sind unabhängige und gleich verteilte Gauß'sche Prozesse mit einem Null-Mittelwert und einer Varianz $\sigma^2 = N_0B$, wobei $N_0/2$ die Rauschleistungsverteilung und 2B die Bandbreite des Filters sind.

[0045] Wird eine Phase von θ bei dem k-ten Element eingeführt, ergibt dies:

$$r(t) = \sum_{\substack{m=1 \\ m \neq k}}^{M} a_m \cos(\omega t + \delta_m) + a_k \cos(\omega t + \theta + \delta_k) + n(t) \qquad (2)$$

$$= \left[\sum_{\substack{m=1 \\ m \neq k}}^{M} a_m \cos\delta_m + a_k \cos(\theta + \delta_k) + n_c(t) \right] \cos \omega t -$$

$$\left[\sum_{\substack{m=1 \\ m \neq k}}^{M} a_m \sin\delta_m + a_k \sin(\theta + \delta_k) + n_s(t) \right] \sin \omega t$$

am Eingang des Leistungsdetektors **68**. Das Ausgangssignal des Leistungsdetektors **68** ist das Quadrat der Umhüllenden seines Eingangssignals: wobei,

$$q = (A_c + v_c + n_c)^2 + (A_s + v_s + n_s)^2 \qquad (3)$$

$$A_c = \sum_{\substack{m=1 \\ m \neq k}}^{M} a_m \cos\delta_m, \quad A_s = \sum_{\substack{m=1 \\ m \neq k}}^{M} a_m \sin\delta_m,$$

$$v_c = a_k \cos(\theta + \delta_k), \text{ and } v_s = a_k \sin(\theta + \delta_k).$$

[0046] Das Ausgangssignal des Leistungsdetektors **68** wird an einem Zeitintervall $T_s >> 1/B$ abgetastet, so dass die Abtastungen unkorreliert sind. Der abgetastete Ausgang des Leistungsdetektors **68** beträgt:

$$q_l = (A_c + v_c + n_{ct})^2 + (A_s + v_s + n_{st})^2 \qquad (4)$$

wobei n_{ct} und n_{st} die Gauß'schen Variablen sind, wie zuvor beschrieben.

[0047] Für jedes Antennenelement ist das statistische q_l eine nicht zentrale Chi-Quadrat Zufallsvariable mit zwei Freiheitsgraden und der Dichte:

$$p(q_l) = (2\sigma^2)^{-1} \exp\left[-(q_l + \lambda)/2\sigma^2\right] I_0\left(\frac{\sqrt{q_l \lambda}}{\sigma^2}\right) \qquad (5)$$

$I_0(\cdot)$ in Gleichung (5) bezeichnet die modifizierte Besselfunktion der ersten Art der null-ten Ordnung. Der nicht-zentrale Parameter (λ) beträgt:

$$\lambda = (A_c + v_c)^2 + (A_s + v_s)^2. \qquad (6)$$

[0048] Das Mittel (μ) und die Varianz (σ^2_q) des statistischen q_L sind:

$$\mu = E\{q_l\} - \lambda + 2\sigma^2 \qquad (7)$$

und

$$\sigma_q^2 = \mathrm{Var}\{q_l\} - 4\sigma^2\lambda + 4\sigma^4 \qquad (8)$$

[0049] Es sei angenommen, dass L Abtastungen des Ausgangs des Leistungsdetektors gemittelt werden, um die Statistik zu bilden:

$$\bar{q} = \frac{1}{L}\sum_{l=1}^{L} q_l \qquad (9)$$

wobei die Abtastungen q_L von q unabhängig sind. Das statistische $\bar{q}$ ist nicht-zentrale Chi-Quadrat-Zufallsvariable mit 2L Freiheitsgraden mit einem nicht-zentralen Parameter:

$$\bar{\lambda} = \frac{1}{L}\sum_{l=1}^{L}\left[(A_c+v_c)^2 + (A_s+v_s)^2\right] = \lambda, \qquad (10)$$

einer Dichte:

$$p(\bar{q}) = \left(\frac{2\sigma^2}{L}\right)^{-1}\left(\frac{\bar{q}}{\lambda}\right)^{\frac{L-1}{2}}\exp\left[-\frac{\bar{q}+\lambda}{2\sigma^2/L}\right]I_{L-1}\left(\frac{\sqrt{q\lambda}}{\sigma^2/L}\right), \qquad (11)$$

einem Mittelwert:

$$\bar{\mu} = E\{\bar{q}\} = \mu = E\{q\} = \lambda + 2\sigma^2, \qquad (12)$$

und einer Varianz

$$\bar{\sigma}^2 = Var\{\bar{q}\} = (4\sigma^2\lambda + 4\sigma^4)/L. \qquad (13)$$

[0050] Das statistische $\bar{q}$ ist eine unvoreingenommene Abschätzung von μ, da

$$E\{\bar{q}\} = \frac{1}{L}\sum_{l=1}^{L} E\{q_l\} = E\{q\} = \lambda + 2\sigma^2, \qquad (14)$$

und sie ist asymptotisch wirksam. Da die Chi-Quadrat-Verteilung etwa die Gauß'sche Verteilung ist um den Mittelwert für große Freiheitsgrade, besteht die intuitive Tendenz, die maximale Wahrscheinlichkeitsabschätzungen für die Phasenvariation δ_k und die Amplitudenvariationen a_k zu wählen. Man kann den Gradienten der Wahrscheinlichkeitsfunktion (11) für das Maximum auflösen. Allerdings entwickeln sich diese Abschätzungen natürlich von der Differenzen $q_{270} - q_{90}$ und $q_{90} - q_{180}$, die unvoreingenommene Abschätzungen sind:

$$E\{q_{270} - q_{90}\} = 4a_k(A_c\sin\delta_k - A_s\cos\delta_k) \qquad (15)$$

und

$$E\{q_0 - q_{180}\} = 4a_k(A_c\cos\delta_k + A_s\sin\delta_k). \qquad (16)$$

[0051] Es sei angemerkt, dass der Elementindex k für die Statistiken $\bar{q}$ verstanden wird, und die Gruppenantennensignalleistung für jede Phaseneinstellung jedes Elements gemessen wird. Da nur die Phase des k-ten Elements variiert, bildet die Summe der anderen Elementspannungen die Referenz, d.h. $A_s \cong 0$ (unter der Annahme, dass δ_m klein ist, so dass $A_c >> A_g$), was ergibt:

$$\bar{q}_{270} - \bar{q}_{90} \cong 4a_kA_c\sin\delta_k \qquad (17)$$

und

$$\bar{q}_0 - \bar{q}_{180} \cong 4a_kA_c\cos\delta_k. \qquad (18)$$

[0052] Folglich werden die Schätzungen der Phase $\bar{\delta}_k$ und die Amplituden $\bar{a}_k$-Variationen:

$$\delta_k = \tan^{-1}\left[\left(\frac{\bar{q}_{270}-\bar{q}_{90}}{\bar{q}_0-\bar{q}_{180}}\right]\right) \qquad (19)$$

und

(20)

$$\hat{a}_k = \frac{\sqrt{(\bar{q}_{270}-\bar{q}_{90})^2 + (\bar{q}_0-\bar{q}_{180})^2}}{4A_c}$$

[0053] Die Abweichungen dieser Abschätzungen werden leicht aus den Differenzialen erster Ordnung erhalten:

$$\hat{\sigma}_\delta^2 = Var\{\hat{\delta}_k\} \cong \sum_\theta \left(\frac{\partial \hat{\delta}_k}{\partial \bar{q}_\theta}\right)^2 \sigma_\theta^2 = \frac{\sigma^2/L}{2a_k^2A_c^2}\left(\sigma^2+A_c^2+A_s^2+a_k^2\right) \qquad (21)$$

und

$$\hat{\sigma}_a^2 = Var\{\hat{a}_k\} \cong \sum_\theta \left(\frac{\partial \hat{a}_k}{\partial \bar{q}_\theta}\right)^2 \sigma_\theta^2 = \frac{\sigma^2/L}{2A_c^2}\left(\sigma^2+A_c^2+A_s^2+a_k^2\right). \qquad (22)$$

[0054] Da die Elemente etwa gleich angesteuert werden, ist $a_m \cong a_k$ für alle m und $A_c \cong (M-1)a_k$. Indem die Annäherung $a_s \cong 0$ verwendet wird, sind die Fehler gegeben durch:

$$\hat{\sigma}_\delta^2 \cong \frac{N_0B}{4LP_k}\left[1+\frac{N_0B}{2P_k(M-1)^2}\right] \quad and \quad \hat{\sigma}_a^2 \cong \frac{N_0B}{2L}\left[1+\frac{N_0B}{2P_k(M-1)^2}\right] \qquad (23)$$

wobei; $P_k = a^2_k/2$ die Leistung des k-ten Elements bezeichnet.

[0055] Die Abweichungen der Phasefehlerschätzung $\bar{\sigma}_b$ aus (23) ist in Fig. 5 gezeichnet und zeigt, dass eine Genauigkeit von 2° etwa zwölf Iterationen bei einem Signalrausch-Leistungsverhältnis von etwa 13 dB pro Element erfordert.

[0056] Da die Restphasen aller Elemente mit Ausnahme des k-ten Elements unberücksichtigt in (17) und (18) und der nachfolgenden Analyse blieben, sind die Abschätzungen von δ_k und a_k relativ zu der Summe der anderen Elemente.

[0057] Es sei darauf hingewiesen, dass diese Referenz abhängig davon variiert, welches Element getestet wird. Folglich muss man Vorsicht walten lassen beim Aktualisieren der Elementkorrekturen nur nach der Kalibrierung der gesamten Gruppe.

[0058] Die Abweichung der Phasen- und Amplitudenabschätzungen (19) und (20) geht von einer perfekten Amplituden- und Phasensteuerung des Elementsignals aus. Die Inphasen- und Quadratur-Komponenten dieses Signals wurden durch $v_c(\theta)$ und $v_s(\theta)$ nachfolgend (3) bezeichnet. Die aktuellen Phasenschieber werden wahrscheinlich keine exakte Phaseneinstellungen von 0°, 90°, 180° und 270° erlauben und echte Dämpfungsglieder können nicht eine exakte Steuerung der Amplitude a_k durchführen. Fehler in den Einstellungen sind jedoch deterministisch und können gemessen werden. Die Phaseneinstellungen des k-ten Elements sind bezeichnet durch $\theta_m = m\pi/2$, m = 0, 1, 2, 3 mit entsprechenden Signalkomponenten $v_c = a_{km}\cos(\theta_m + \xi_{km} + \delta_k)$ und $v_s = a_{km}\sin(\theta_m + \xi_{km} + \delta_k)$, mit Amplituden a_{km} und Phasenoffsets ξ_{km}, die Störungen und Amplitudenfehler enthalten. Folgt man dem gleichen Grundprinzip, das zu (17) und (18) geführt hat, ergibt sich:

$$E\{q_m - q_n\} = a_{km}^2 - a_{kn}^2 + 2A_c[a_{km}\cos(\theta_m + \xi_{km} + \delta_k) - a_{kn}\cos(\theta_n + \xi_{kn} + \delta_k)] + 2A_s[a_{km}\sin(\theta_m + \xi_{km} + \delta_k) - a_{kn}\sin(\theta_n + \xi_{kn} + \delta_k)] \qquad (24)$$

wobei,

$$A_c = \sum_{\substack{l=1 \\ l \neq k}}^{M} a_{l,0} \cos(\xi_{l,0} + \delta_c) \quad \text{und}$$

$$A_s = \sum_{\substack{l=1 \\ l \neq k}}^{M} a_{l,0} \sin(\xi_{l,0} + \delta_c).$$

[0059] Eine Berechnung der Gleichung (24) mit $\theta_m = 270°$ und $\theta_n = 90°$ ergibt:

$$\begin{aligned}\bar{q}_{270} - \bar{q}_{90} &= a_{270}^2 - a_{90}^2 + [2A_c(a_{270}\sin\xi_{270} + a_{90}\sin\xi_{90}) \\ &- 2A_s(a_{270}\cos\xi_{270} + a_{90}\cos\xi_{90})]\cos\delta_k \\ &+ [2A_c(a_{270}\cos\xi_{270} + a_{90}\cos\xi_{90}) \\ &+ 2A_s(a_{270}\sin\xi_{270} + a_{90}\sin\xi_{90})]\sin\delta_k \end{aligned} \quad (25)$$

und in gleicher Weise für $\theta_m = 0°$ und $\theta_n = 180°$

$$\begin{aligned}\bar{q}_0 - \bar{g}_{180} &= a_0^2 - a_{180}^2 + [2A_c(a_0\cos\xi_0 + a_{180}\cos\xi_{180}) \\ &+ 2A_s(a_0\sin\xi_0 + a_{180}\sin\xi_{180})]\cos\delta_k \\ &- [2A_c(a_0\sin\xi_0 + a_{180}\sin\xi_{180}) \\ &- 2A_s(a_0\cos\xi_0 + a_{180}\cos\xi_{180})]\sin\delta_k. \end{aligned} \quad (26)$$

[0060] Der Index k, das das Element bezeichnet, wurde bei den Amplituden und Phasenvariationen und bei den Leistungsmessungen $\bar{q}$ aus Einfachheitsgründen in (25) und (26) weggelassen, da diese Abhängigkeit klar ist. Diese Ausdrücke können geschrieben werden:

$$\begin{aligned}(\bar{q}_{270} - a_{270}^2) - (\bar{q}_{90} - a_{90}^2) &= C_{11}\cos\delta_k + C_{12}\sin\delta_k \\ (q_0 - a_0^2) - (q_{180} - a_{180}^2) &= C_{21}\cos\delta_k + C_{22}\sin\delta_k \end{aligned} \quad (27)$$

mit

$$C_{11} = 2A_c(a_{270}\sin\xi_{270} + a_{90}\sin\xi_{90}) - 2A_s(a_{270}\cos\xi_{270} + a_{90}\cos\xi_{90}),$$

$$C_{12} = 2A_c(a_{270}\cos\xi_{270} + a_{90}\cos\xi_{90}) + 2A_s(a_{270}\sin\xi_{270} + a_{90}\sin\xi_{90}),$$

$$C_{21} = 2A_c(a_0\cos\xi_0 + a_{180}\cos\xi_{180}) + 2A_s(a_0\sin\xi_0 + a_{180}\sin\xi_{180}),$$

und

$$C_{22} = -2A_c(a_0\sin\xi_0 + a_{180}\sin\xi_{180}) + 2A_s(a_0\cos\xi_0 + a_{180}\cos\xi_{180}).$$

[0061] Die Gleichungen in (27) werden einfach nach δ_k aufgelöst, um die Abschätzung zu erhalten:

$$\delta_k = \tan^{-1}\left(\frac{C_{11}\left[(\bar{q}_0 - a_0^2) - (\bar{q}_{180} - a_{180}^2)\right] - C_{21}\left[(\bar{q}_{270} - a_{270}^2) - (\bar{q}_{90} - a_{90}^2)\right]}{C_{22}\left[(\bar{q}_{270} - a_{270}^2) - (\bar{q}_{90} - a_{90}^2)\right] - C_{12}\left[(\bar{q}_0 - a_0^2) - (\bar{q}_{180} - a_{180}^2)\right]}\right) \quad (28)$$

wobei die Amplituden a_m und die Phasenoffsets ξ_m aus den Messungen stammen. Die Auflösung der linearen Gleichungen folgend (27) für die Amplitudenschätzungen ergibt:

$$\begin{aligned}\hat{a}_0 &= [C_{22}(A_c\cos\xi_{180} + A_s\sin\xi_{180}) + C_{21}(A_c\sin\xi_{180} - A_s\cos\xi_{180})]/2[(A_c\cos\xi_0 + A_s\sin\xi_0)(A_c\sin\xi_{180} - A_s\cos_{180}) \\ &- (A_c\sin\xi_0 - A_s\cos\xi_0)(A_c\cos\xi_{180} + A_s\sin\xi_{180})], \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\hat{a}_{180} &= -[C_{22}(A_c\cos\xi_0 + A_s\sin\xi_0) + C_{21}(A_c\sin\xi_0 - A_s\cos\xi_0)]/2[(A_c\cos\xi_0 + A_s\sin\xi_0)(A_c\sin\xi_{180} - A_s\cos\xi180) \\ &- (A_c\sin\xi_0 - A_s\cos\xi_0)(A_c\cos\xi_{180} + A_s\sin\xi_{180})], \end{aligned}$$

$$\hat{a}_{90} = [C_{11}(A_c\cos\xi_{270} + A_s\sin\xi_{270}) - C_{12}(A_c\sin\xi_{270} - A_s\cos\xi_{270})]/2[(A_c\sin\xi_{90} - A_s\cos\xi_{90})(A_c\cos\xi_{270} + A_s\sin\xi_{270}) - (A_c\cos\xi_{90} + A_s\sin\xi_{90})(A_c\sin\xi_{270} - A_s\cos\xi_{270})],$$

und

$$\hat{a}_{270} = -[C_{11}(A_c\cos\xi_{90} + A_s\sin\xi_{90}) - C_{12}(A_c\sin\xi_{90} - A_s\cos\xi_{90})]/2[(A_c\sin\xi_{90} - A_s\cos\xi_{90})(A_c\cos\xi_{270} + A_s\sin\xi_{270}) - (A_c\cos\xi_{90} + A_s\sin\xi_{90})(A_c\sin\xi_{270} - A_s\cos\xi_{270})]. \quad (29)$$

[0062] Es muss betont werden, dass die Abschätzungen (28) und (29) für die Phasen und Amplitudenvariationen geschlossene Ausdrücke sind, da die Koeffizienten C_{11}, C_{12}, C_{21}, C_{22}, A_c und A_s von diesen Variationen abhängen. Folglich müssen diese Abschätzungen durch einen iterativen Vorgang aufgelöst werden, der nachfolgend beschrieben wird. Ferner sei bemerkt, dass es, da es Gruppenantennensignalleistungsmessungen $\bar{q}$ bei Vierphaseneinstellung für jedes Element gibt, 4 M Datenmessungen gibt. Da die Abschätzungen $\hat{\delta}_k$ und $\hat{a}_{km}$ eine Menge von 5 M Variablen bilden, sind die Abschätzungsgleichungen, die durch (28) und (29) gegeben sind, abhängig. Dieses Problem wird durch Verwendung der Gleichung (20) für anfängliche Amplitudenabschätzungen umgangen. Die Gleichung (19) kann verwendet werden zur anfänglichen Phasenfehlerabschätzung mit Gleichung (27) und Gleichung (28), die zur Iteration des Phasenfehlers verwendet werden.

[0063] Um diese Ergebnisse in (27) bis (29) zu bestätigen, sollten diese Verallgemeinerungen auf die vorhergehenden Ausdrücke (19) und (20) unter der Annahme kleiner oder vernachlässigbarer Fehler reduziert werden. Eine Vereinfachung des Ausdrucks in (24) wie in dem vorhergehenden Abschnitt ergibt:

$$\bar{q}_m - \bar{q}_n \cong a_{km}^2 - a_{kn}^2 + 2A_c[a_{km}\cos(\theta_m + \xi_m)\cos\delta_k - a_{km}\sin(\theta_m + \xi_m)\sin\delta_k - a_{kn}\cos(\theta_n + \xi_n)\cos\delta_k + a_{kn}\sin(\theta_n + \xi_n)\sin\delta_k] \quad (30)$$

mit der Annahme, dass $A_s \cong 0$. Schreibt man die Amplitudenvariationen der Phase als $a_{km} - a_{kn} = \varepsilon_{mn}$, notiert man $\theta_n = \theta_m + \pi$ und ignoriert man Therme größer als die erste Ordnung, d.h. ε^2, $\varepsilon\cos\xi$, $\varepsilon\sin\xi$, etc. erhält man:

$$\bar{q}_m - \bar{q}_n \cong 2a_k\varepsilon_{mn} + 2a_kA_c[\cos\delta_k\{\cos(\theta_m + \xi_m) - \cos(\theta_n + \xi_n)\} - \sin\delta_k\{\sin(\theta_m + \xi_m) - \sin(\theta_n + \xi_n)\}] - 2a_k\{\varepsilon_{mn} + A_c[\cos\delta_k\{\cos(\theta + \xi_m) + \cos(\theta + \xi_n)\} - \sin\delta_k\{\sin(\theta + \xi_m) + \sin(\theta + \xi_n)\}]\}. \quad (31)$$

[0064] Für $\theta = \theta_0 = 0$ oder $\theta = \theta_{\pi/2} = \pi/2$ sind die analogen Ergebnisse zu (17) und (18):

$$\bar{q}_{270} - \bar{q}_{90} \cong 2a_k[2A_c\sin(\xi + \delta_k) - \varepsilon] \quad (32)$$

$$\bar{q}_0 - \bar{q}_{180} \cong 2a_k[\varepsilon + 2A_c\cos(\xi + \delta_k)] \quad (33)$$

mit $\xi \cong \xi_m \cong \xi_n$ als nominale Phase, a_k als nominale Amplitude und $\sin\xi_m \cong 0$ und $\sin\xi_n \cong 0$. Diese Vereinfachung ist gleichbedeutend mit der Annahme, dass die Störungen für jedes Element über die verschiedenen Phaseneinstellungen gleichförmig sind. Mit dieser Annahme reduzieren sich die Abschätzungen von (27) und (28) auf:

$$\hat{\delta}_k = \tan^{-1}\left[\left(\frac{\bar{q}_{270} - \bar{q}_{90} + 2a_k\varepsilon_{270}}{\bar{q}_0 - \bar{q}_{180} - 2a_k\varepsilon_0}\right)\right] - \xi \quad (34)$$

und

$$\hat{a}_k = \frac{\sqrt{(\bar{q}_{270} - \bar{q}_{90} + 2a_k\varepsilon_{270})^2 + (\bar{q}_0 - \bar{q}_{180} - 2a_k\varepsilon_0)^2}}{4A_c} \quad (35)$$

[0065] Diese Ergebnisse (34) und (35), die Störungen in der Phasen- und Amplitudensteuerung enthalten, werden leicht erkannt, um sie auf die Ergebnisse für eine exakte Steuerung vorgegeben in (19) und (20) zu reduzieren, wenn es keine Fehler gibt, d.h. $\varepsilon = 0$ und $\xi = 0$.

[0066] Indem ein Leistungsmesssystem, wie jenes, das in Fig. 4 gezeigt ist, eingesetzt wird, werden Messungen der empfangenen Leistung $\bar{q}_{km}$ für jede Phaseneinstellung $\theta_m = m\pi/2$, m = 0, 1, 2, 3 für jedes Element k = 1, 2, ..., M ausgeführt. Diese Daten werden benutzt, um die Abschätzungen des Phasenfehlers $\hat{\delta}_k$ und des Amplitudenfehlers $\hat{a}_k$ für jedes Element aufzulösen. Da die Gleichungen (28) und (29) für diese Parameter nicht in

geschlossenen Formen vorliegen und leicht auflösbar sind, wird eine iterative Prozedur angewendet. Diese Prozedur ist wie folgt:

(1) Indem die Leistungsmessungen $\bar{q}_{km}$ für jedes Element und der Ausdruck (19) verwendet wird, werden die anfänglichen Phasenfehlerschätzungen berechnet:

$$\delta_k^{(0)} = \tan^{-1}\left(\frac{\bar{q}_{k,270} - \bar{q}_{k,90}}{\bar{q}_{k,0} - \bar{q}_{k,180}}\right);$$

(2) Für jedes Element werden bekannte Werte für die Phasenoffsets ξ_{km} und die idealen Werte $\hat{a}_{k'} = 1$ für die anfänglichen Amplitudenabschätzungen benutzt, um anfängliche Werte für die Signalsummen für jedes Element aus den Ausdrücken folgend (24) zu erzeugen:

$$A_{c,k}^{(0)} = \sum_{\substack{l=1 \\ l \neq k}}^{M} \hat{a}_l \cos\left(\xi_{l,0} + \delta_l^{(0)}\right) \text{ und}$$

$$A_{s,k}^{(0)} = \sum_{\substack{l=1 \\ l \neq k}}^{M} \hat{a}_l \sin\left(\xi_{l,0} + \delta_l^{(0)}\right);$$

(3) Berechne Amplitudenschätzungen, indem Ausdruck (20) verwendet wird:

$$\hat{a}_k = \frac{\sqrt{(\bar{q}_{k,270} - \bar{q}_{k,90})^2 + (\bar{q}_{k,0} - \bar{q}_{k,180})^2}}{4A_{c,k}^{(0)}};$$

(4) Erzeuge für jedes Element die nächsten Werte der Signalsummen:

$$A_{c,k}^{(i+1)} = \sum_{\substack{l=1 \\ l \neq k}}^{M} \hat{a}_l \cos\left(\xi_{l,0} + \delta_l^{(i)}\right) \text{ und}$$

$$A_{s,k}^{(i+1)} = \sum_{\substack{l=1 \\ l \neq k}}^{M} \hat{a}_l \sin\left(\xi_{l,0} + \delta_l^{(i)}\right);$$

(5) Berechne Werte für die Koeffizienten aus (27), indem die Phasenoffsets ξ_{km} und die letzten Amplitudensummen $A_{c,k}^{(i)}$ und $A_{s,k}^{(i)}$ aus Schritt (4), wobei die Amplituden auf die Schätzung $\hat{a}_k$ gesetzt sind:

$C_{k,11}^{(i)} = 2\hat{a}_k[a_{c,k}^{(i)}(\sin\xi_{k,270} + \sin\xi_{k,90}) - A_{s,k}^{(i)}(\cos\xi_{k,270} + \cos\xi_{k,90})]$,

$C_{k,12}^{(i)} = 2\hat{a}_k[A_{c,k}^{(i)}(\cos\xi_{k,270} + \cos\xi_{k,90}) + A_{s,k}^{(i)}(\sin\xi_{k,270} + \sin\xi_{k,90})]$,

$C_{k,21}^{(i)} = 2\hat{a}_k[A_{c,k}^{(i)}(\cos\xi_{k,0} + \cos\xi_{k,180}) + A_{s,k}^{i}(\sin\xi_{k,0} + \sin\xi_{k,180})]$,

und

$C_{k,22}^{(i)} = 2\hat{a}_k[-A_{c,k}^{(i)}(\sin\xi_{k,0} + \sin\xi_{k,180}) + A_{s,k}^{(i)}(\cos\xi_{k,0} + \cos\xi_{k,180})]$.

(6) Berechne für jedes Element die nächsten Schätzungen der Phasenfehler aus (28), wobei die Amplituden auf die Schätzung $\hat{a}_k$ gesetzt sind:

$\delta_k^{(i)} = \tan^{-1}(\{C_{k,11}^{(i)}[\bar{q}_{k,0} - \bar{q}_{k,180}] - C_{k,21}^{(i)}[\bar{q}_{k,270} - \bar{q}_{k,90}]\}/\{C_{k,22}^{(i)}[\bar{q}_{k,270} - \bar{q}_{k,90}] - C_{k,12}^{(i)}[\bar{q}_{k,0} - \bar{q}_{k,180}]\})$.

(7) Falls die aktualisierten Abschätzungen $\hat{\delta}_k^{(i)}$ nicht innerhalb der Konvergenzschranken der vorherigen Abschätzungen $\delta_k^{(i-1)}$ liegen, dann soll die Iteration von Schritt (4) weitergeführt werden; andernfalls soll mit den vorgegebenen Werten abgeschlossen werden. Diese Prozedur sollte konvergieren, da die Ableitung des Arctangens kleiner ist als eins. Darüber hinaus sollte der Prozess leicht konvergieren, da erwartet wird, dass die Gruppe und die Elektronik eine kleine Variation aufweisen. Es ist jedoch Vorsicht angebracht, da die Berechnungsgenauigkeit die Konvergenz beeinflussen kann.

[0067] **Fig.** 6(a–d) zeigen die Rate der Konvergenz für verschiedene Werte des Signalrausch-Verhältnisses und die Anzahl der Abtastungen. Es ist zu beobachten, dass die Konvergenz der Prozedur eine vernünftige Leistung darstellt.

[0068] Der Phasenfehler $\hat{\delta}_k$ und der Amplitudenfehler $\hat{a}_k$ für jedes Element von (34) und (35) enthält nicht nur die Fehler, die der Elektronik zuzuschreiben sind, sondern auch jegliche Fehler, die durch Lagesteuerung oder Ausrichtung der Antennenplattform hervorgerufen werden. Eine Prüfung des Gruppenfaktors der Antenne ergibt:

$$f(\theta,\varphi) = \sum_{m,n} S_{mn} e^{jk\hat{r}\cdot\bar{d}_{mn}} = \sum_{m=0}^{M-1}\sum_{n=0}^{N-1} \alpha_{mn} e^{jk(\hat{r}-\hat{r}_0)\cdot\bar{d}_{mn}} = \sum_{m=0}^{M-1}\sum_{n=0}^{N-1} \alpha_{mn} e^{jk(d_{x,m}\gamma+d_{y,n}\chi)} \quad (36)$$

mit $\gamma = \sin\theta\cos\varphi - \sin\theta_0\cos\varphi_0$ und $\chi = \sin\theta\sin\varphi - \sin\theta_0 - \sin\varphi_0$ zeigt, dass jeder Phasenfehler, der die Phasen aller Elemente gleich beeinflusst, nicht das Richtvermögen der Gruppenantenne beeinflusst. Zusätzlich sind zufällige Fehler bei Korrelationszeiten größer als die Zeit für die Kalibrierung und systematische Fehler, die über die Kalibrierungsperiode invariant sind, belanglos. Systematische und zufällige Ausrichtungsfehler von ausreichend kurzer Dauer, um die Kalibrierung zu beeinflussen, müssen jedoch angesprochen werden, falls sie einzelne Elemente unterschiedlich beeinflussen. In dem Maße, dass die systematischen Fehler oder die Mittel der zufälligen Fehler bestimmt werden können, müssen diese von den gemessenen Fehlern $\bar{\delta}_k$ und $\hat{a}_k$ abgezogen werden, um korrekte Abschätzungen $\tilde{\delta}_k$ und $\tilde{a}_k$ zu liefern. Jegliche Restausrichtungsfehler, die nicht geschätzt werden können, müssen durch Iteration des Kalibrierungsprozesses aufgelöst werden.

[0069] Für eine vorgegebene Kalibrierungsmessung wird der Strahl der Gruppenantenne ausgerichtet, indem die vorherbestimmten Korrekturen C_ξ für die Phase und C_a für die Amplitude verwendet werden. Sind die korrigierten Abschätzungen $\tilde{\delta}_k$ und $\tilde{a}_k$ des Phasen- und des Amplitudenfehlers korrigiert, kann die Phasenkorrektur C'_δ und eine Amplitudenkorrektur C'_s rekursiv aus den vorherigen Korrekturen berechnet werden durchs

$$C'_\delta = C_\delta - \mu_\delta\delta_k \quad (37)$$

und

$$C'_a = C_a - \mu_a\alpha_k \quad (38)$$

[0070] Es wird nun auf die Fig. 7 und Fig. 8 Bezug genommen. Das Kalibrierungsverfahren der vorliegenden Erfindung ist so einfach wie es durch ein Beispiel angegeben wird, wobei eine Gruppenantenne **10** auf einem Kommunikationssatelliten **80** involviert ist. Die Kalibrierung kann als Diagnosemaßnahme aufgerufen werden, entweder in Antwort auf eine reduzierte oder anormale Leistung oder als periodische Komponente des Satellitenbetriebs. Fig. 7 zeigt Systemverbindungen für die Sende(vorwärtsverbindung)kalibrierung. Das nachfolgende fasst die Basissequenz des Betriebs zur Sendekalibrierung zusammen.

[0071] Zuerst bereitet ein Bodenantennenanschluss **82** die Kalibrierung vor, indem ein Vorwärtsstrahl von einem Benutzerservice genommen wird, dieser zu einem Leistungstestgeräte (PTE) Anschluss **84** auf der Erde gerichtet wird und ein Kalibrierungssignal **86** über die Vorwärtsverbindung gesendet wird. Das Kalibrierungssignal ist sinusförmig, wie zuvor beschrieben.

[0072] Als zweites wird ein PTE-Anschluss **84** zur Kalibrierung vorbereitet, indem sein emulierter Benutzerempfangs(rück)strahl auf den Satelliten **80** gerichtet wird. Der Kanalautomatikverstärkungscontroller (AGC) wird auf einen festen Wert (gesperrt) gesetzt.

[0073] Als nächstes sendet der Kalibrierungsprozessor **72** einen Kalibrierungsbefehl **88** über den Bodenantennenanschluss **82** zu der Gruppenantenne **10**. Beim Empfang des Kalibrierungsbefehls **88** lassen die ASICs der Gruppenantenne **10** die Phasen jedes Antennenelements **12** durch die vier orthogonalen Phasezustände laufen. Wenn der Kalibrierungsprozessor **72** einen Kalibrierungssynchronisationsimpuls beim Start der Kalibrierungssequenz erfasst, beginnt der Kalibrierungsprozessor mit dem Abtasten des erfassten Kalibrierungssignals **86** von dem Satelliten **80** und nimmt die Abtastungen auf.

[0074] Vorzugsweise wird der Kalibrierungssynchronisationsimpuls durch Umschalten der Phase jedes unge-

radzahligen Antennenelements um 180° erzeugt, um ein Kalibrierungssignal Null zu erzeugen. Der Null folgt eine Ruhezeit, während der alle Antennenelemente in ihrem 0° Referenzphasenzustand bleiben.

[0075] Die einzelne Antennenelementphasensequenz startet mit dem Durchlaufen der Phase eines einzelnen Antennenelementsignals von dem 0° Referenzphasenzustand zu dem 180° Phasenzustand. Der 180° Phasenzustand wird für eine Synchronisationszeit gehalten, um den Beginn der Antennenelementübertragung zu kennzeichnen, und um eine eindeutige Synchronisations- und Leistungsmessung P_{180} des Kalibrierungssignals **86** bereitzustellen. Dem folgt das Umschalten der Phase des Antennenelements von 90°, 270° und 0° zwischen den Zuständen Φ_{90}, Φ_{270} und Φ_0, wobei die entsprechenden Leistungsmessungen P_{90}, P_{270} und P_0 des Kalibrierungssignals **86** ausgeführt werden.

[0076] Der Kalibrierungsprozessor **72** verarbeitet nachfolgend die aufgezeichneten Abtastungen, um die Phasen und Amplitudenfehler der Antennenelementsignale abzuschätzen, indem die Gleichungen (34) und (35) verwendet werden. Diese Werte werden für Ausrichtungsfehler korrigiert und werden für die mögliche Verwendung zum Einstellen der Phasen und Amplitudenkorrekturkoeffizienten (37) und (38) der Gruppenelemente gespeichert. Diese Kalibrierungsprozedur wird wiederholt, bis die Phasen und Amplitudenfehler innerhalb akzeptabler Schranken konvergieren.

[0077] Fig. 8 zeigt die Systemverbindungen für die Empfangs(rückverbindung)kalibrierung. Das nachfolgende fasst die Basissequenz des Betriebs für die Empfangskalibrierung zusammen. Zuerst bereitet der Bodenantennenanschluss **82** die Kalibrierung vor, indem ein Strahl von einem Benutzerservice genommen wird und auf den PTE-Anschluss **84** auf der Erde gerichtet wird. Die Kanal-AGC wird auf einen festen Wert (gesperrt) gesetzt. Als zweites wird der PTE-Anschluss **84** zur Kalibrierung vorbereitet, indem sein emulierter Benutzersende(vorwärts)strahl auf den Satelliten **80** gerichtet wird und ein Kalibrierungssignal über die Vorwärtsverbindung gesendet wird.

[0078] Als nächstes sendet der Kalibrierungsprozessor **72** einen Kalibrierungsbefehl **92** über den Bodenanschluss **82** zu der Gruppenantenne **10**. Beim Empfang des Kalibrierungsbefehls **92** lassen die ASICs der Gruppenantenne **10** die Phasen jedes Antennenelements **12** durch die vier orthogonalen Phasezustände laufen. Wenn der Kalibrierungsprozessor **72** einen Kalibrierungssynchronisationsimpuls beim Start der Kalibrierungssequenz erfasst, beginnt der Kalibrierungsprozessor mit dem Abtasten des erfassten Kalibrierungssignals **90** von dem Satelliten **80** und nimmt die Abtastungen auf.

[0079] Der Kalibrierungsprozessor **72** verarbeitet die aufgezeichneten Abtastungen nacheinander, um die Phasen und Amplitudenfehler der Antennenelemente abzuschätzen, indem die Gleichungen (34) und (35) verwendet werden. Diese Werte werden für Ausrichtungsfehler korrigiert, wie zuvor beschrieben, und werden wiederholt, bis die Fehler innerhalb akzeptabler Grenzen konvergieren.

[0080] Das orthogonale Phasenkalibrierungsverfahren der vorliegenden Erfindung kann auf jedes Gebiet angewendet werden, das eine phasengesteuerte Gruppenantennentechnologie erfordert.

[0081] Dies umfasst jegliche Kommunikationsverbindung militärisch oder kommerziell, die ein schnelles Abtasten einer oder mehrerer hochverstärkter Hochfrequenzstrahlen erfordert. Diese Anwendungen hängen von Gruppenantennen ab, die periodische Kalibrierung erfordern.

[0082] Es ist festzuhalten, dass die vorliegende Erfindung in einem breiten Gebiet unterschiedlicher Konstruktionen eingesetzt werden kann, die viele Alternativen, Modifikationen und Variationen umfassen, die sich für einen Fachmann ergeben.

Patentansprüche

1. Verfahren zum Kalibrieren einer Gruppenantenne (**10**), die mit einer Vielzahl von Antennenelementen (**12**) versehen ist, wobei jedes ein Signal mit einer Phase und einer Amplitude besitzt, die ein Gruppenantennensignal bilden, wobei das Verfahren aufweist:
aufeinander folgendes einzelnes Schalten der Phase jedes Antennenelementsignals über vier orthogonale Phasenzustände (Schritt **44**);
Messen der Leistung des Gruppenantennensignals für jeden orthogonalen Phasenzustand (**46**);
Bestimmen eines Phasenfehlers für jedes der Antennenelementsignale, wobei der Phasenfehler eines Antennenelementsignals bestimmt wird durch die Gleichung:

$$\delta_k = \tan^{-1}\left[\left(\frac{\overline{q}_{270} - \overline{q}_{90}}{\overline{q}_0 - \overline{q}_{180}}\right)\right]$$

wobei δ_k der Phasenfehler für das Antennenelementsignal ist und
q_0, q_{90}, q_{180} und q_{270} die Leistung des Gruppenantennensignals für jeden der vier orthogonalen Phasenzustände ist (Schritt **48**);
Einstellen der Phase jedes der Antennenelementsignale mittels des entsprechenden Phasenfehlers (Schritt **54**);
Bestimmen eines Amplitudenfehlers für jedes der Antennenelementsignale (Schritt **50**), wobei der Amplitudenfehler für ein Antennenelementsignal bestimmt wird durch die Gleichung:

$$a_k = \frac{\sqrt{(\overline{q}_{270} - \overline{q}_{90})^2 + (\overline{q}_0 - \overline{q}_{180})^2}}{4A_c}$$

wobei a_k der Amplitudenfehler für das Antennenelementsignal ist,
q_{270}, q_{90}, q_0 und q_{180} die Leistung des Gruppenantennensignals bei jedem der vier orthogonalen Phasenzustände ist, und
A_c die Leistung all der anderen Signale der Antennenelemente der Gruppenantenne ist, die durch die Phasenfehler dieser Signale erzeugt werden; und
Einstellen der Amplitude für jedes der Antennenelementsignale durch den jeweiligen Amplitudenfehler (Schritt **56**).

2. Verfahren nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, dass:
zumindest ein aktualisierter Phasenfehler für das Antennenelementsignal bestimmt wird und die Phase des Antennenelementsignals eingestellt wird, bis der eine aktualisierte Phasenfehler innerhalb eines akzeptablen Werts konvergiert.

3. Gruppenantennensystem mit:
einer Gruppenantenne (**10**), die eine Vielzahl von Antennenelementen (**12**) aufweist, deren jedes ein Signal mit einer Phase und einer Amplitude hat, die ein Gruppenantennensignal bilden; und
einem Kalibrierungsprozessor (**72**), der mit der Gruppenantenne (**10**) arbeitet, um die Phase jedes Antennenelementsignals einzeln der Reihe nach durch vier orthogonale Phasenzustände zu schalten und bei jedem orthogonalen Phasenzustand die Leistung des Gruppenantennensignals zu messen, wobei der Kalibrierungsprozessor (**72**) ferner arbeitet, um einen Phasenfehler für jedes der Antennenelementsignale zu bestimmen, wobei der Phasenfehler für ein Antennenelementsignal eine Funktion der Leistung des Gruppenantennensignals für jeden der vier orthogonalen Phasenzustände ist, wobei der Kalibrierungsprozessor (**72**) ferner arbeitet, um die Phase jedes der Antennenelementsignale durch den entsprechenden Phasenfehler einzustellen, wobei der Kalibrierungsprozessor (**72**) ferner arbeitet, um einen Amplitudenfehler für jedes der Antennenelementsignale zu bestimmen, wobei der Amplitudenfehler für ein Antennenelementsignal eine Funktion der Leistung des Gruppenantennensignals für jeden der vier orthogonalen Phasenzustände ist, und der Kalibrierungsprozessor (**72**) ferner arbeitet, um die Amplitude jedes der Antennenelementsignale durch den entsprechenden Amplitudenfehler einzustellen.

4. System nach Anspruch 3, gekennzeichnet durch:
eine Referenzantenne (**84**), die mit der Gruppenantenne (**10**) zur Übertragung und zum Empfang von Signalen ausgelegt ist.

5. System nach Anspruch 4, dadurch gekennzeichnet, dass die Gruppenantenne (**10**) ein Gruppenantennensignal (**86**) an die Referenzantenne (**84**) sendet und der Kalibrierungsprozessor (**72**) mit der Referenzantenne (**84**) zusammenarbeitet, um das Signal, das von der Referenzantenne (**84**) empfangen wird, zu messen, um die Leistung des Gruppenantennensignals (**86**) zu bestimmen, das von der Gruppenantenne (**10**) für jeden orthogonalen Phasenzustand gesendet wurde.

6. System nach Anspruch 4 oder 5, dadurch gekennzeichnet, dass die Referenzantenne (**84**) ein Signal (**90**) an die Gruppenantenne (**10**) sendet und der Kalibrierungsprozessor (**72**) mit der Gruppenantenne (**10**) arbeitet, um das von der Gruppenantenne (**10**) empfangene Signal zu messen, um die Leistung des Signals (**90**), das von der Gruppenantenne (**10**) empfangen wurde, für jeden orthogonalen Phasenzustand zu bestimmen.

Es folgen 4 Blatt Zeichnungen

Anhängende Zeichnungen

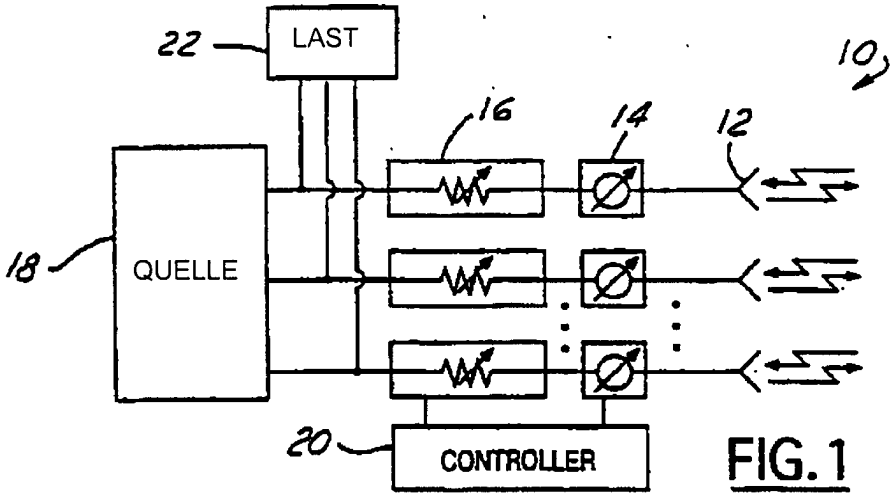


FIG. 1

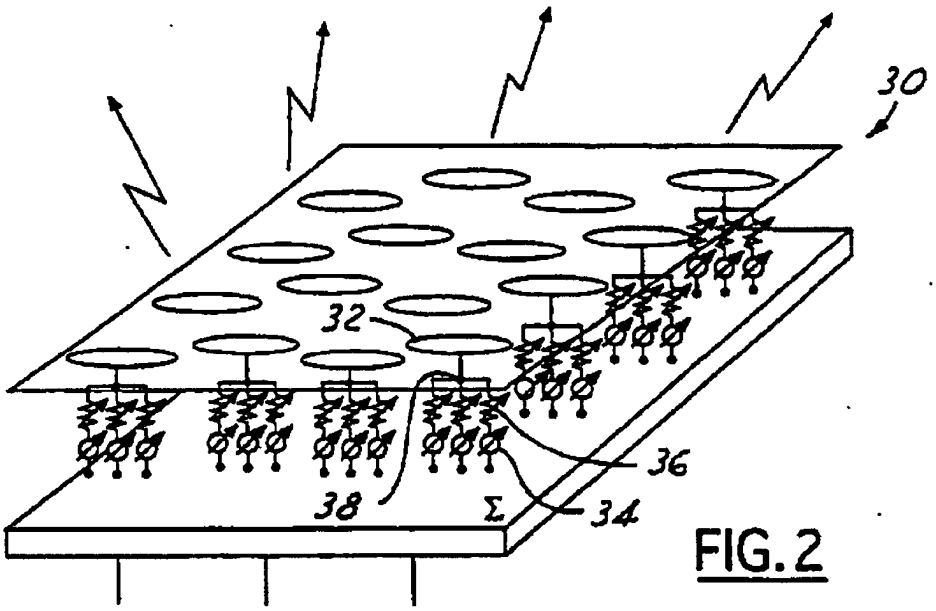


FIG. 2

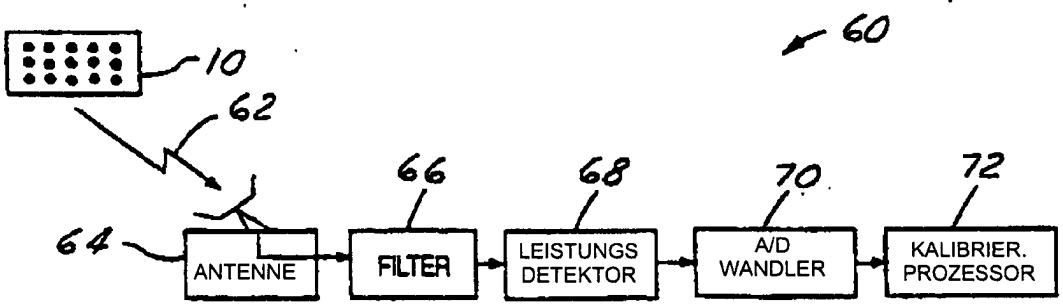


FIG. 4

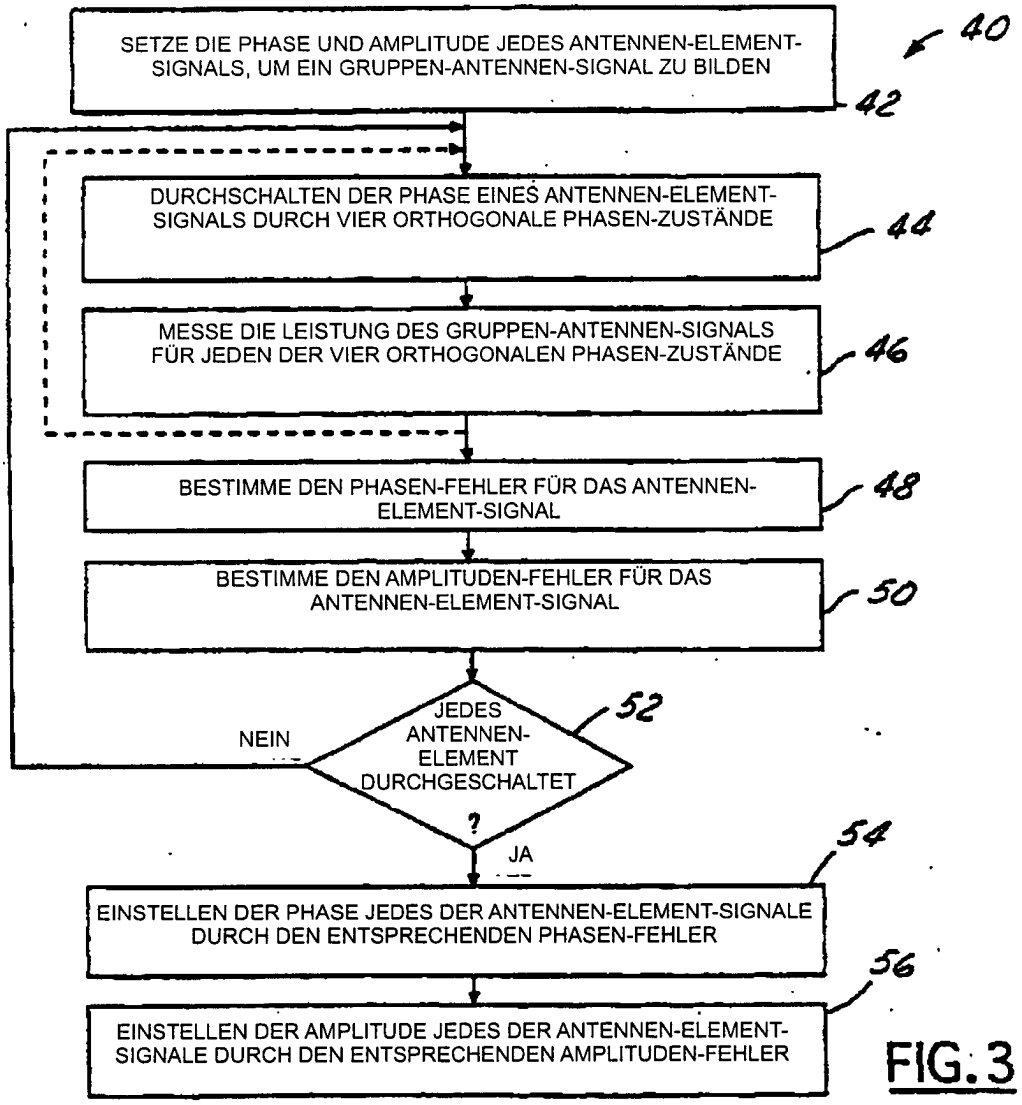

SETZE DIE PHASE UND AMPLITUDE JEDES ANTENNEN-ELEMENT-SIGNALS, UM EIN GRUPPEN-ANTENNEN-SIGNAL ZU BILDEN
40
42
DURCHSCHALTEN DER PHASE EINES ANTENNEN-ELEMENT-SIGNALS DURCH VIER ORTHOGONALE PHASEN-ZUSTÄNDE
44
MESSE DIE LEISTUNG DES GRUPPEN-ANTENNEN-SIGNALS FÜR JEDEN DER VIER ORTHOGONALEN PHASEN-ZUSTÄNDE
46
BESTIMME DEN PHASEN-FEHLER FÜR DAS ANTENNEN-ELEMENT-SIGNAL
48
BESTIMME DEN AMPLITUDEN-FEHLER FÜR DAS ANTENNEN-ELEMENT-SIGNAL
50
JEDES ANTENNEN-ELEMENT DURCHGESCHALTET ?
52
NEIN
JA
EINSTELLEN DER PHASE JEDES DER ANTENNEN-ELEMENT-SIGNALE DURCH DEN ENTSPRECHENDEN PHASEN-FEHLER
54
EINSTELLEN DER AMPLITUDE JEDES DER ANTENNEN-ELEMENT-SIGNALE DURCH DEN ENTSPRECHENDEN AMPLITUDEN-FEHLER
56

FIG. 3

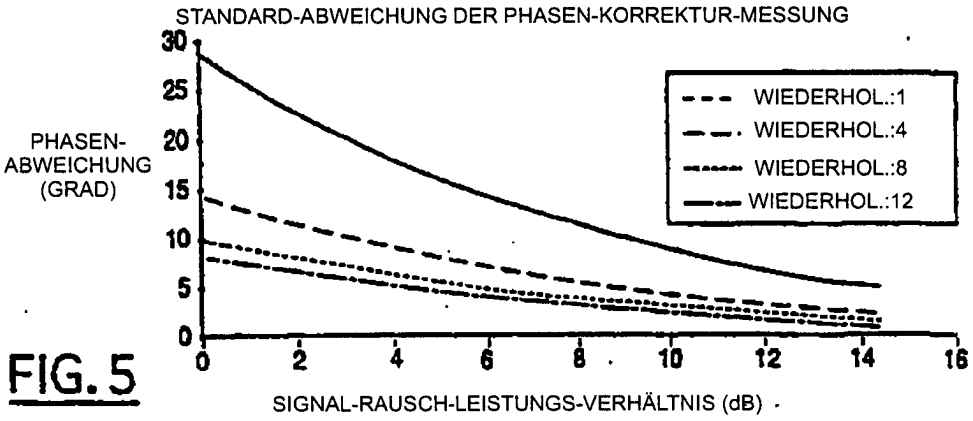

STANDARD-ABWEICHUNG DER PHASEN-KORREKTUR-MESSUNG
PHASEN-ABWEICHUNG (GRAD)
30
25
20
15
10
5
0
0
2
4
6
8
10
12
14
16
WIEDERHOL.:1
WIEDERHOL.:4
WIEDERHOL.:8
WIEDERHOL.:12
SIGNAL-RAUSCH-LEISTUNGS-VERHÄLTNIS (dB)

FIG. 5

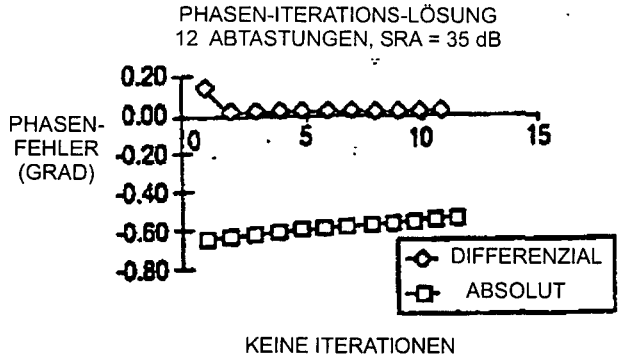


FIG. 6A

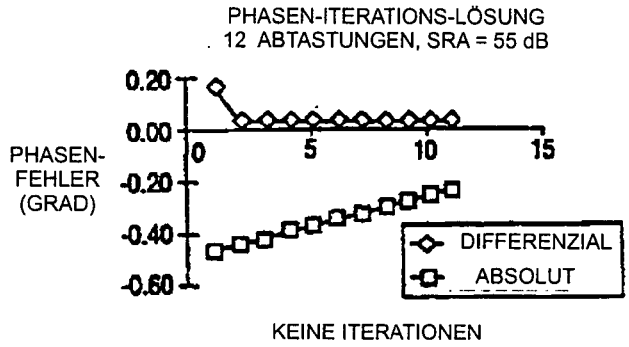


FIG. 6B

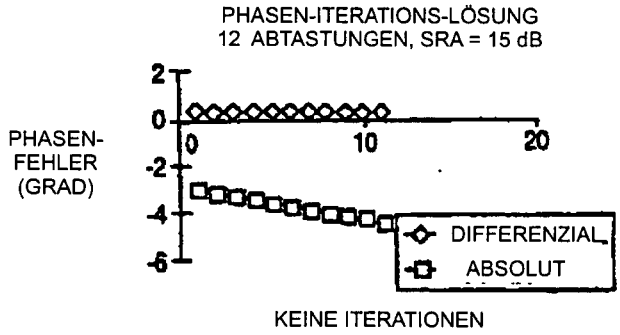


FIG. 6C

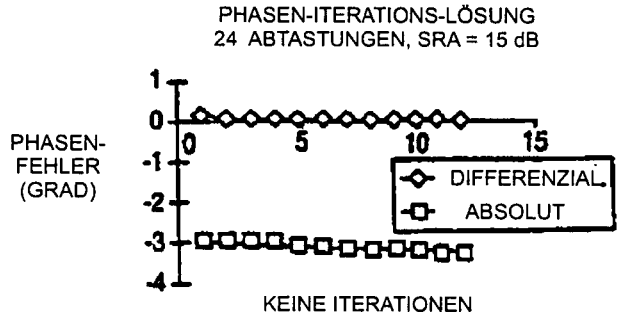


FIG. 6D

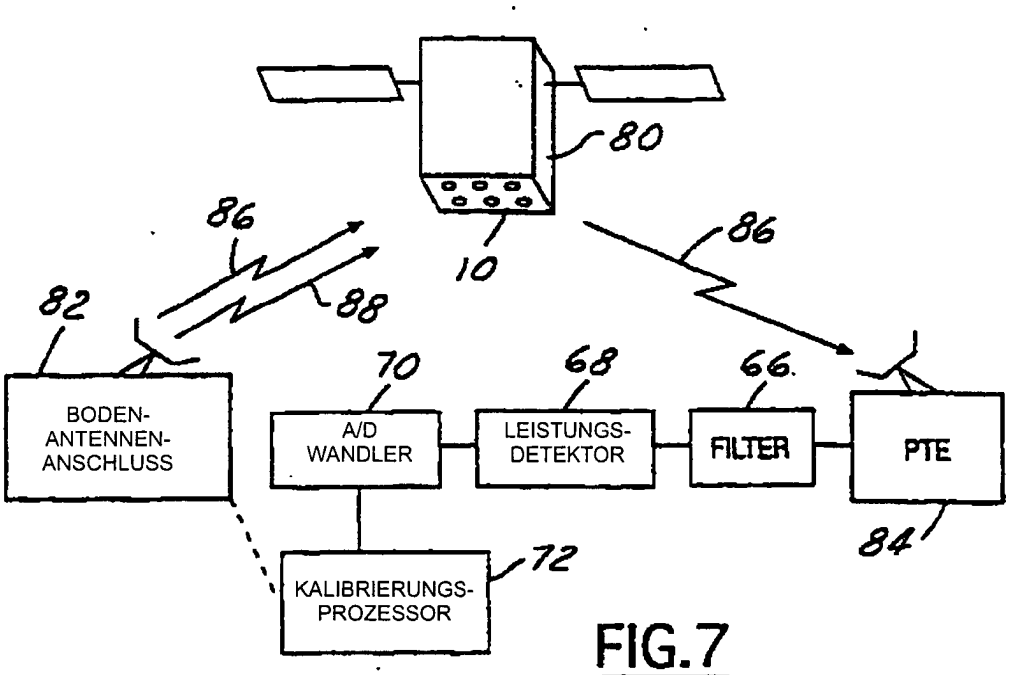

80
86
86
10
88
82
70
68
66
BODEN-
ANTENNEN-
ANSCHLUSS
A/D
WANDLER
LEISTUNGS-
DETEKTOR
FILTER
PTE
84
72
KALIBRIERUNGS-
PROZESSOR

FIG.7

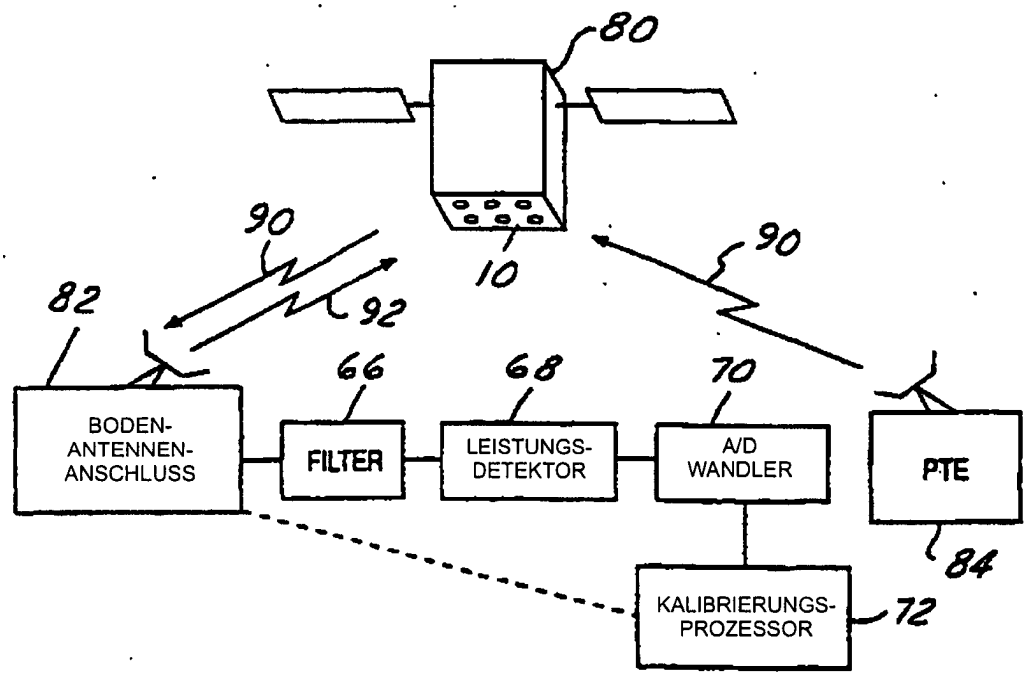

80
90
90
10
92
82
66
68
70
BODEN-
ANTENNEN-
ANSCHLUSS
FILTER
LEISTUNGS-
DETEKTOR
A/D
WANDLER
PTE
84
72
KALIBRIERUNGS-
PROZESSOR

FIG.8