



(19)
Bundesrepublik Deutschland
Deutsches Patent- und Markenamt

(10) **DE 603 13 166 T2 2007.12.20**

(12) **Übersetzung der europäischen Patentschrift**

(97) **EP 1 514 393 B1**

(51) Int Cl.⁸: **H04L 27/36 (2006.01)**

(21) Deutsches Aktenzeichen: **603 13 166.2**

(86) PCT-Aktenzeichen: **PCT/FI03/00474**

(96) Europäisches Aktenzeichen: **03 730 275.9**

(87) PCT-Veröffentlichungs-Nr.: **WO 2003/107615**

(86) PCT-Anmeldetag: **13.06.2003**

(87) Veröffentlichungstag
der PCT-Anmeldung: **24.12.2003**

(97) Erstveröffentlichung durch das EPA: **16.03.2005**

(97) Veröffentlichungstag
der Patenterteilung beim EPA: **11.04.2007**

(47) Veröffentlichungstag im Patentblatt: **20.12.2007**

(30) Unionspriorität:
173574 18.06.2002 US

(84) Benannte Vertragsstaaten:
**AT, BE, BG, CH, CY, CZ, DE, DK, EE, ES, FI, FR, GB,
GR, HU, IE, IT, LI, LU, MC, NL, PT, RO, SE, SI, SK,
TR**

(73) Patentinhaber:
Nokia Corp., Espoo, FI

(72) Erfinder:
**HEISKALA, Juha, 00140 Helsinki, FI; KURU, Lauri,
FIN-02270 Espoo, FI**

(74) Vertreter:
Eisenführ, Speiser & Partner, 80335 München

(54) Bezeichnung: **AMPLITUDENUNGLEICHGEWICHTSKOMPENSATION EINES QUADRATURMODULATORS**

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

GEBIET DER ERFINDUNG

[0001] Die Erfindung betrifft Quadraturmodulatoren, insbesondere die Kompensation eines Amplitudenungleichgewichts eines Quadraturmodulators.

HINTERGRUND DER ERFINDUNG

[0002] Sender mit Quadraturträger verwenden sowohl Inphase-(I) als auch Quadratur-(Q) Träger zum Übertragen von Informationen. Quadraturmodulation wird benötigt, um die Informationen, die I- und Q-Signale tragen, auf eine Zwischenfrequenz (IF) oder direkt auf die Trägerfrequenz (direkte Konvertierung bzw. Umsetzung) in Abhängigkeit von der Struktur der Hochfrequenz-(HF)-Kette des Senders hochzusetzen. Ein Quadraturmodulator arbeitet basierend auf einer Quadraturmodulation. Dies ermöglicht die Kombination zweier unabhängiger Signalen im Sender und das Übertragen der zwei unabhängigen Signale im selben Übertragungsbereich, sowie das Trennen der Signale am Empfänger. Das Prinzip der Quadraturmodulation besteht darin, dass zwei separate Signale, I und Q (Inphase und Quadratur), unter Verwendung derselben Trägerwellenfrequenz moduliert werden, wobei sich die Phasen der Trägerwellen voneinander unterscheiden, indem die Trägerwelle des Q-Signals um 90° hinter der Trägerwelle des I-Signals liegt. Nach der Modulation werden die Signale summiert. Wegen des Phasenunterschieds können die I- und Q-Signale voneinander getrennt werden, wenn das summierte Signal demoduliert wird. Die häufigsten Verzerrungen werden allgemein als Schwund des lokalen Oszillators oder Trägers, Quadraturphasenfehler und Amplitudenungleichgewicht beschrieben. Die Verzerrungen verursachen zum Beispiel Fehler in der Gegenphase und im Amplitudenausgleich der I- und Q-Signale.

[0003] Herstellungsverfahren für Halbleiter erzeugen keine perfekten analogen Komponenten. Wenn eine große Produktmenge hergestellt wird, gibt es immer gewisse Variationen bzw. Streuungen bei den Bauteilwerten. Wenn diese Streuungen unberichtigt bleiben, wird die Qualität des übertragenen Signals abgeschwächt und erreicht möglicherweise nicht einen gemäß der Standards benötigten Pegel. Diese Abschwächung kann auf zwei Weisen gemildert werden, entweder durch Verbessern des Herstellungsprozesses oder durch Kompensieren der Abschwächung bei jedem einzelnen Produkt unter Verwendung von Signalbearbeitungsverfahren. Verbessern eines Herstellungsprozesses ist für große Produktmengen teuer, allgemein führen lockerere Herstellungsspezifikationen zu einer Kostenreduzierung und somit zu einem kostengünstigeren Produkt. Daher werden Signalbearbeitungsverfahren als ein Verfahren zum Kompensieren von Streuung von Bauteilwerten vorgezogen. Zusätzlich sind Quadraturmodulatorfehler von der Temperatur, Alterung und Trägerfrequenz abhängig. Diese Effekte sind mit dem analogen Design des Quadraturmodulators sehr schwer zu kompensieren.

[0004] Korrekturschaltkreise mit darin eingestellten Korrekturparametern wurden zur Korrektur der durch den Quadraturmodulator verursachten Verzerrungen verwendet. Das Problem besteht dann in der Herstellbarkeit, da jeder Quadraturmodulator eindeutige Parameter benötigt, die so früh wie möglich während der Herstellung eingestellt werden müssen. Zusätzlich, wie bereits oben dargestellt, ist das Ausmaß des Amplitudenungleichgewichts, das durch den Quadraturmodulator verursacht wurde, von der Frequenz abhängig, wobei, wenn die Frequenz geändert wird, die fest eingestellte Korrektur nicht notwendigerweise weiter funktioniert. Daher sind adaptive Signalbearbeitungstechniken sehr wünschenswerte Techniken, um die Verzerrungen zu korrigieren. Es sind verschiedene adaptive Techniken zum Kompensieren des Amplitudengleichgewichts, das durch den Quadraturmodulator verursacht wird, bekannt. Oft benötigen diese Techniken jedoch das Verwenden eines speziellen Trainingssignals und/oder sind von der Kenntnis der Verstärkung der Quadratursenderkette abhängig, wobei deren exakter Wert in Abhängigkeit von Besonderheiten der Vorrichtung schwanken kann.

[0005] US 6,208,698 und US 5,663,691 zeigen Beispiele für Schätzer für das Quadraturmodulatorungleichgewicht.

KURZE BESCHREIBUNG DER ERFINDUNG

[0006] Somit ist eine Aufgabe der Erfindung, ein Verfahren und eine Anordnung zum Kompensieren eines Amplitudengleichgewichts eines Quadraturmodulators bereitzustellen, sodass kein spezielles Trainingssignal benötigt wird. Eine andere Aufgabe der Erfindung ist es, ein Verfahren und eine Anordnung zum Kompensieren eines Amplitudengleichgewichts eines Quadraturmodulators bereitzustellen, sodass diese von der Verstärkung der Senderkette unabhängig sind.

[0007] Die Aufgaben der Erfindung werden durch ein Verfahren zum Kompensieren eines Amplitudenungleichgewichts eines Quadraturmodulators gelöst, wobei das Verfahren umfasst: Bestimmen einer ersten Korrelation basierend auf einem ersten Modulationssignal und einem Ausgangssignal des Quadraturmodulators; Bestimmen einer zweiten Korrelation basierend auf einem zweiten Modulationssignal und dem Ausgangssignal des Quadraturmodulators; Erzeugen eines Kompensationssignals proportional zu dem Amplitudenungleichgewicht basierend auf einem Verhältnis der bestimmten Korrelationen und dem ersten und zweiten Modulationssignal; und Bearbeiten zumindest eines der Modulationssignale des Quadraturmodulators mit dem Kompensationssignal; wobei die Korrelationen basierend auf unbearbeiteten Modulationssignalen des Quadraturmodulators bestimmt werden.

[0008] Die Aufgaben der Erfindung werden ferner durch eine Anordnung zum Kompensieren eines Amplitudenungleichgewichts eines Quadraturmodulators gelöst, wobei die Anordnung umfasst: Mittel (**51A**) zum Bestimmen einer ersten Korrelation basierend auf einem ersten Modulationssignal und einem Ausgangssignal des Quadraturmodulators (**10**); Mittel zum Bestimmen einer zweiten Korrelation basierend auf einem zweiten Modulationssignal und dem Ausgangssignal des Quadraturmodulators; Mittel zum Erzeugen eines Kompensationssignals proportional zu dem Amplitudenungleichgewicht basierend auf einem Verhältnis der bestimmten Korrelationen und dem ersten und zweiten Modulationssignal; und Mittel zum Bearbeiten zumindest eines der Modulationssignale des Quadraturmodulators mit dem Kompensationssignal; wobei die Mittel zum Bestimmen der Korrelationen eingerichtet sind, unbearbeitete Modulationssignale des Quadraturmodulators zum Bestimmen der Korrelationen zu verwenden.

[0009] Die Aufgaben der Erfindung werden ferner durch eine Anordnung zum Kompensieren eines Amplitudenungleichgewichts eines Quadraturmodulators gelöst, wobei die Anordnung umfasst: einen ersten Korrelator, der eingerichtet ist, eine erste Korrelation basierend auf einem ersten Modulationssignal und einem Ausgangssignal des Quadraturmodulators zu bestimmen; einen zweiten Korrelator, der eingerichtet ist, eine zweite Korrelation basierend auf einem zweiten Modulationssignal und dem Ausgangssignal des Quadraturmodulators zu bestimmen; Mittel, die eingerichtet sind, ein Kompensationssignal proportional zu dem Amplitudenungleichgewicht basierend auf einem Verhältnis der bestimmten Korrelationen und dem ersten und zweiten Modulationssignal zu erzeugen; und Mittel, die eingerichtet sind, zumindest eines der Modulationssignale des Quadraturmodulators mit dem Kompensationssignal zu bearbeiten; wobei der erste und der zweite Korrelator eingerichtet sind, unbearbeitete Modulationssignale des Quadraturmodulators zum Bestimmen der Korrelationen zu verwenden.

[0010] Weitere Anwendungsbereiche der vorliegenden Erfindung werden aus der nachfolgend aufgeführten detaillierten Beschreibung ersichtlich. Es versteht sich jedoch, dass die detaillierte Beschreibung und die spezifischen Beispiele, die bevorzugte Ausführungsbeispiele der Erfindung angeben, zur Veranschaulichung angegeben werden, da einem Fachmann verschiedene Änderungen und Modifikationen im Rahmen der Erfindung aus der detaillierten Beschreibung ersichtlich werden.

KURZE BESCHREIBUNG DER ZEICHNUNGEN

[0011] Im Folgenden wird die Erfindung ausführlicher mittels bevorzugter Ausführungsbeispielen beschrieben, die sich auf die beigefügten Zeichnungen beziehen, in denen:

[0012] [Fig. 1](#) ein Blockdiagramm der grundlegenden Struktur eines Quadraturmodulators ist, das auch ein Modell der durch das Amplitude- und Phasenungleichgewicht verursachten Verzerrungen zeigt;

[0013] [Fig. 2](#) ein Blockdiagramm einer Amplitudenungleichgewichtskorrekturanordnung gemäß einem Ausführungsbeispiel der Erfindung ist;

[0014] [Fig. 3](#) ein Simulationsbeispiel der Konvergenz der Amplitudenungleichgewichtsschleife zeigt; und

[0015] [Fig. 4](#) ein Blockdiagramm der Struktur des Fehlerdetektors gemäß einem Ausführungsbeispiel der Erfindung ist.

DETAILLIERTE BESCHREIBUNG DER ERFINDUNG

[0016] [Fig. 1](#) zeigt ein Basisbandmodell der Verzerrung, die durch das Amplitude- und Phasenungleichgewicht in einem Quadraturmodulator **10** verursacht wird, und den Grundaufbau des Quadraturmodulators. Der Modulator **10** umfasst zwei Mischer **12A** und **12B**, wobei die beiden einen Modulationseingang, einen lokalen

Oszillatoreingang und einen Hochfrequenzausgang umfassen. In den Mischer **12A** wird ein Modulationssignal S_I' , sowie ein Signal des lokalen Oszillators von einem lokalen Oszillator **11** eingespeist. Ein Modulationssignal S_V' wird in den Mixer **12B** auf eine entsprechende Weise eingespeist, aber ein Signal des lokalen Oszillators wird in den Mischer **12B** durch einen Phasenverschiebungsmittel **13** in einer Phasenverschiebung von 90 Grad in Bezug auf das in den Mischer **12A** eingespeiste Signal des lokalen Oszillators eingespeist. Die Hochfrequenzgänge der Mischer **12A** und **12B** werden mit einem Addiererelement **14** verbunden, das die modulierten Hochfrequenzsignale in ein weiter zu sendendes Hochfrequenzsignal kombiniert, wobei dieses Signal in den Ausgang des Addiererelements **14** eingespeist wird. QPSK-Modulation ist ein typisches Modulationsverfahren, das mittels eines Quadraturmodulators dieser Art durchgeführt wird. Es sei angemerkt, dass die vorliegende Erfindung nicht auf ein bestimmtes System oder Modulationsverfahren beschränkt ist, sondern in verschiedenen Systemen verwendet werden kann, die nicht nur einen einzelnen Träger sondern auch Multiträgersysteme, solche wie orthogonales frequenzgeteiltes Multiplexen (Orthogonal Frequency Division Multiplexing, OFDM), umfassen. Es sei auch angemerkt, dass die Figuren nur Bauteile darstellen, die für das Verstehen der Erfindung notwendig sind.

[0017] **Fig. 2** zeigt die Grundstruktur einer Amplitudenungleichgewichtskorrekturschleife gemäß einem Ausführungsbeispiel der Erfindung. In der Figur werden I- und Q-Modulationssignale S_I und S_Q in den Quadraturmodulator **10** eingespeist. Das Kompensieren des Amplitudenungleichgewichts gemäß dem Kompensationssignal COMP wird an einer Signalbearbeitungseinheit **80** durchgeführt, in diesem Beispiel an einem Teiler, der vor einem Eingang des Modulationssignals S_Q der Quadraturmodulators **10** angeschlossen ist. Es sei angemerkt, dass die Amplitudenungleichgewichtskompensation alternativ durch Bearbeiten des Modulationssignals S_I oder der beiden Modulationssignale S_Q und S_I implementiert werden kann. Die Modulationssignale werden dann dem Quadraturmodulator **10** zugeführt. Das modulierte Signal wird typischer Weise in einen oder in mehrere Leistungsverstärker eingespeist, die eine Verstärkung G haben, um weiter HF OUT zu übertragen. Gleichzeitig wird eine Rückkopplung mittels einer Abtastungsanordnung **30** gebildet, welche die Leistung des Ausgangssignals HF OUT misst und ein Rückkopplungssignal P_{HF} , wie zum Beispiel eine Spannung, proportional zur Leistung des Ausgangssignals erzeugt. Der Leistungsmessschaltkreis **30** kann zum Beispiel auf einem einfachen Dioden-HF-Hüllkurvendetektor basieren.

[0018] Das Rückkopplungssignal P_{HF} wird bevorzugt in eine digitale Form durch einen A/D-Wandler **40** für eine digitale Bearbeitung gewandelt. Es sei angemerkt, dass auch eine analoge Bearbeitung verwendet werden kann. Das Rückkopplungssignal P_{HF} wird dann an einen Block **90** übertragen, der das Kompensationssignal COMP zur weiteren Bearbeitung erzeugt. Auch die Modulationssignale S_I und S_Q (die nicht durch die Signalbearbeitungseinheit **80** bearbeitet worden sind) werden an den Kompensationssignalerzeugungsblock **90** zur weiteren Bearbeitung übertragen. Das Betreiben des Kompensationssignalerzeugungsblocks **90** wird im Folgenden detaillierter erläutert. Gemäß dem in **Fig. 2** dargestellten Beispiel umfasst der Kompensationssignalerzeugungsblock **90** eine Fehlerdetektoreinheit **50**, einen Schleifenfilter **60** und einen Integrator **70**. Sowohl die Fehlerdetektoreinheit **50** als auch der Schleifenfilter **60**, der Integrator **70** und die Signalbearbeitungseinheit **80** können zum Beispiel entweder mittels Software in einer geeigneten Signalbearbeitungsvorrichtung, wie zum Beispiel einem für allgemeine Zwecke geeigneten digitalen Signalprozessor (oder verschiedenen Prozessoren), oder mittels Hardware unter Verwendung eines spezifischen integrierten Schaltkreises (oder Schaltkreise) implementiert werden.

[0019] Es wird angenommen, dass der Quadraturmodulator **10** in **Fig. 2** sowohl Phasen- als auch Amplitudenungleichgewicht aufweist. Ein allgemeiner Quadraturmodulator würde auch Trägerverlust oder systematische DC-Messabweichungen aufweisen. Diese Beeinträchtigungen können unabhängig von dem Quadraturphasen- und/oder Amplitudenungleichgewicht korrigiert werden, zum Beispiel mit dem in US 5,012,208 präsentierten Verfahren, hier als Bezugnahme aufgenommen, und daher wird angenommen, dass der Quadraturmodulator **10** keine Trägerverlustfehler aufweist.

[0020] Wenn der Quadraturmodulator **10** perfekt arbeiten würde, wäre das HF-Ausgangssignal S_{HF} :

$$S_{HF} = g_L S_I \cos(\omega_{LO}t) - S_Q \sin(\omega_{LO}t) \quad (1)$$

[0021] Wenn der Quadraturmodulator **10** sowohl Phasen- als auch Amplitudenungleichgewicht aufweist, ist das HF-Signal (siehe **Fig. 1**):

$$S_{HF} = g_L (S_I - \epsilon \sin(\alpha) S_Q) \cos(\omega_{LO}t) - \epsilon \cos(\alpha) S_Q \sin(\omega_{LO}t) \quad (2)$$

wobei:

S_I = Basisband-I-Modulationssignal;
 S_Q = Basisband-Q-Modulationssignal;
 ε = Amplitudenungleichgewicht;
 α = Phasenungleichgewicht;
 g = Senderkettenverstärkung; und
 ω_{Lo} = Trägerfrequenz.

[0022] Die Gleichung (2) zeigt, wie Phasenungleichgewicht Kreuzstörung zwischen dem I- und Q-Modulationssignal einführt und zusätzlich die Amplitude des Q-Signals verzerrt. Das Amplitudenungleichgewicht verzerrt die Amplitude des Q-Signals.

[0023] Die Fehler des Quadraturmodulators manifestieren sich nur nachdem das Basisbandsignal zu der Trägerfrequenz hochgesetzt wurde. Da es schwierig sein kann, die exakten Werte des HF-Signals HF OUT zu messen, wird bevorzugt die Leistung, die relativ einfach gemessen werden kann, des HF-Signals als ein Indikator für die Fehler des Quadraturmodulators **10** verwendet. Der Schaltkreis **30** zum Messen der Leistung kann mit einem einfachen Diodenbauteil aufgebaut werden, dadurch kann die Anordnung kostengünstig implementiert werden. Die Gleichung (3) zeigt die Leistung des HF-Signals mit dem Phasen- und mit dem Amplitudenungleichgewicht.

$$P_{HF} = g^2[S_I^2 - 2\varepsilon \sin(\alpha)S_I S_Q + \varepsilon^2 S_Q^2] \quad (3)$$

[0024] Gemäß der Erfindung erzeugt der Kompensationssignalerzeugungsblock **90** ein Kompensationssignal COMP, das proportional zum Amplitudenungleichgewicht ist. Zusätzlich wird bevorzugt, dass das Betreiben der Kompensationssignalerzeugungsblocks **90** nicht von dem Senderverstärkung g und dem Phasenungleichgewicht α abhängig ist, um ein robustes Betreiben zu erreichen.

[0025] Gemäß einem Ausführungsbeispiel der Erfindung umfasst der Kompensationssignalerzeugungsblock **90** eine Fehlerdetektoreinheit **50**, die ein Fehlersignal $error_\varepsilon$ erzeugt. Bevorzugt ist der Wert des Fehlersignals $error_\varepsilon$ gleich Null, wenn kein Amplitudenungleichgewicht vorhanden ist, das heißt das Amplitudenungleichgewicht des Quadraturmodulators **10** ist perfekt kompensiert (oder der Quadraturmodulator **10** hat kein Amplitudenungleichgewicht). Entwickeln eines Fehlerdetektors, der nur auf HF-Signalhüllkurvenleistungsmessung beruht und keine bekannte Testsignale benötigt, ist eine anspruchsvolle Aufgabe. Dieses kann der Gleichung (3) entnommen werden, die drei unbekannte Variablen g , α und ε aufweist. Es ist unmöglich, die Gleichung mit drei unbekannt Variablen aus nur einer Messung direkt zu lösen. Es ist möglich, verschiedene Messungen zu verschiedenen Zeitmomenten für verschiedene Werte der Basisbandsignale vorzunehmen und ein System aus Gleichungen zu bilden, um die Parameter zu lösen. Die Ausführbarkeit dieser Vorgehensweise ist jedoch von den Basisbandsignalwerten abhängig, und es ist nicht sichergestellt, dass das System aus Gleichungen lösbar ist. Daher wird als Nächstes ein indirektes Verfahren vorgestellt.

[0026] Die Steuerungsschleife in [Fig. 2](#) arbeitet als ein Tiefpassfilter, und daher ist es möglich, erwartete Werte von Signalen im Fehlerdetektor **50** zu verwenden. Obwohl exakte Werte der erwarteten Werte der Signale bestimmt werden könnten, wird in der Praxis eine adäquate Genauigkeit durch Bestimmen von Mittelwerten der Signale und deren Verwendung statt dessen erreicht. Die Struktur des Fehlerdetektors **50** wird detaillierter in [Fig. 4](#) dargestellt. Der Fehlerdetektor **50** verwendet zwei Korrelatoren **51A** und **51B**, um den Effekt des Phasenungleichgewichts und der Senderverstärkung aus dem geschätzten Fehler zu entfernen. Der erste Korrelator ist bevorzugt definiert als:

$$C_{1,\varepsilon} = E[P_{HF} S_I^2] = g^2 E[S_I^2 S_I^2 - 2\varepsilon \sin(\alpha) S_I S_Q S_I^2 + \varepsilon^2 S_Q^2 S_I^2] \quad (4)$$

und der zweite Korrelator ist bevorzugt definiert als:

$$C_{2,\varepsilon} = E[P_{HF} S_Q^2] = g^2 E[S_I^2 S_Q^2 - 2\varepsilon \sin(\alpha) S_I S_Q S_Q^2 + \varepsilon^2 S_Q^2 S_Q^2] \quad (5)$$

[0027] Somit werden bevorzugt eine Korrelation zwischen der Leistung des Ausgangssignals und dem Quadrat des ersten Modulationssignals und eine Korrelation zwischen der Leistung des Ausgangssignals und Quadrat des zweiten Modulationssignals in der Implementierung der Erfindung verwendet. Es können jedoch auch andere Korrelationen, die basierend auf dem ersten Modulationssignal und dem Ausgangssignal und basierend auf dem zweiten Modulationssignal und dem Ausgangssignal bestimmt werden und die Korrelation zwischen dem Ausgangssignal und der entsprechenden Modulationssignale anzeigen, verwendet werden, ohne von der grundlegenden Idee der Erfindung abzuweichen. Als Nächstes wird angenommen, dass die erwarteten

Werte von ungerade angetriebenen Bedingungen der Basisbandsignale S_I und S_Q gleich Null sind. Diese Annahme ist durch die Feststellung gerechtfertigt, dass Basisbandsignale gleich Zufallsvariablen mit Mittelwert Null sind. Eine zweite Annahme ist, dass die Basisbandsignale unabhängige Zufallsvariablen sind, dies ist üblicherweise für praktische Kommunikationssysteme richtig. Mit diesen Annahmen lassen sich die Gleichungen (4) und (5) vereinfachen zu:

$$C_{1,\varepsilon} = E[P_{HF} S_I^2] = g^2(E[S_I^4] + \varepsilon^2 E[S_I^2] E[S_Q^2]) \quad (6)$$

und beziehungsweise auf:

$$C_{2,\varepsilon} = E[P_{HF} S_Q^2] = g^2(E[S_I^2] E[S_Q^2] + \varepsilon^2 E[S_Q^4]) \quad (7)$$

[0028] Den Effekt des Phasenungleichgewichts α wurde aus den Gleichungen (6) und (7) beseitigt. Der nächste Schritt ist, den Effekt der Senderverstärkung g zu beseitigen. Dieses wird durch Berechnen des Verhältnisses R der Werte der zwei Korrelatoren erreicht.

$$R = \frac{C_{1,\varepsilon}}{C_{2,\varepsilon}} = \frac{g^2 [E[S_I^4] + \varepsilon^2 E[S_I^2] E[S_Q^2]]}{g^2 [E[S_I^2] E[S_Q^2] + \varepsilon^2 E[S_Q^4]]} = \frac{E[S_I^4] + \varepsilon^2 E[S_I^2] E[S_Q^2]}{E[S_I^2] E[S_Q^2] + \varepsilon^2 E[S_Q^4]} \quad (8)$$

[0029] Der Wert des Amplitudenungleichgewichts ε kann aus der Gleichung (8) bestimmt werden.

$$\varepsilon^2 = \frac{R E[S_I^2] E[S_Q^2] - E[S_I^4]}{E[S_I^2] E[S_Q^2] - R E[S_Q^4]} \quad (9)$$

[0030] Der endgültige Schritt ist, den Ausgangswert des Fehlerdetektors **50** $error_\varepsilon$ zu berechnen, der proportional zum Amplitudenungleichgewicht und gleich Null ist, wenn kein Amplitudenungleichgewicht vorhanden ist, das heißt $\varepsilon = 1$.

$$error_\varepsilon = \sqrt{\varepsilon^2} - 1 = \sqrt{\frac{R E[S_I^2] E[S_Q^2] - E[S_I^4]}{E[S_I^2] E[S_Q^2] - R E[S_Q^4]}} - 1 \quad (10)$$

[0031] Die Gleichung (10) ist die Ausgabe des Fehlerdetektors in **Fig. 2**. Zusammenfassend und unter Bezug auf **Fig. 4** arbeitet der Fehlerdetektor **50** bevorzugt wie folgt: Korrelatoren **51A** und **51B** berechnen die Korrelationen zwischen dem Rückkopplungssignal P_{HF} und den Quadraten der Modulationssignale S_I^2 und beziehungsweise S_Q^2 . Sowohl die Korrelationsergebnisse $C_{1,\varepsilon}$ und $C_{2,\varepsilon}$ als auch die Modulationssignale S_I und S_Q werden an den Fehlerberechnungsblock **52** übertragen, der das Fehlersignal $error_\varepsilon$ basierend auf den Korrelationsergebnissen $C_{1,\varepsilon}$ und $C_{2,\varepsilon}$ und den Modulationssignalen S_I und S_Q berechnet, zum Beispiel gemäß der Gleichung (10).

[0032] Dieser Fehlerdetektor **50** arbeitet korrekt so lange der Nenner in Gleichung (10) nicht gleich Null ist. Dieses würde auftreten, sobald der erwartete Wert der vierten Potenz des Basisbandsignals gleich dem Quadrat des erwarteten Werts des Quadrats des Basisbandsignals wäre, wie in der Gleichung (11) gezeigt.

$$\begin{aligned} E[S_I^2]^2 &= E[S_I^4] \\ E[S_Q^2]^2 &= E[S_Q^4] \end{aligned} \quad (11)$$

[0033] Diese Bedingung ist üblicherweise für ein angewandtes Kommunikationssignal nicht wahr. Statistiken einer Zufallsvariable ändern sich, wenn diese in verschiedene Potenzen erhoben werden, solange die Zufallsvariable Amplitudenstreuungen aufweist, insbesondere Multiträgersysteme weisen große Amplitudenstreuungen in den Basisbandsignalen auf.

[0034] Das Fehlersignal $error_\varepsilon$ wird dann bevorzugt in einem Schleifenfilterblock **60** gefiltert. Nach der Filterung wird das Fehlersignal $error_\varepsilon$ über der Zeit in einen Integratorblock **70** integriert. Das Integrationsergebnis des Fehlersignals $error_\varepsilon$ ist das Kompensationssignal COMP.

[0035] Die tatsächliche Korrektur des Amplitudenungleichgewichts wird durch Teilen des Basisband-Q-Modulationssignals durch das Kompensationssignal COMP vor dessen Übertragung an den Quadraturmodulator **10** (oder durch Multiplizieren mit einem inversen Wert von COMP) in der Signalbearbeitungseinheit **80** durchgeführt.

[0036] Somit wird die in [Fig. 2](#) dargestellte Amplitudenungleichgewichtskorrekturschleife iterativ das Amplitudenungleichgewicht des Quadraturmodulators **10** durch ein graduelles Heraufsetzen oder Herabsetzen des Werts des Kompensationssignals COMP basierend auf dem Fehlersignal error_ε finden, solange das Kompensationssignal COMP dem Amplitudenungleichgewicht ε entspricht. Wenn das Amplitudenungleichgewicht perfekt kompensiert wird und der Wert des Fehlersignals gleich Null ist, ändert sich der Wert des Kompensationssignals COMP nicht mehr, ausgenommen wenn das Amplitudenungleichgewicht des Quadraturmodulators **10** sich ändert. In einer perfekten Ausgleichssituation, wenn der Wert des Kompensationssignals COMP dem Amplitudenungleichgewicht ε gleicht, wird das Amplitudenungleichgewicht perfekt kompensiert, das heißt die Division des Modulationssignals S_Q durch COMP ($=\varepsilon$) ergibt (mit Bezug auf [Fig. 1](#)): $S'_Q = \cos(\alpha)S_Q$ und $S'_I = S_I - \sin(\alpha)S_Q$. Die Ausdrücke $\cos(\alpha)$ und $\sin(\alpha)$ hängen vom Phasenungleichgewicht ab, das nicht korrigiert ist. Nach dem Korrigieren des Phasenungleichgewichts ist das Eingangssignal des Modulators fehlerfrei, das heißt $S'_Q = S_Q$ und $S'_I = S_I$. In der Praxis wird nicht unbedingt ein perfektes Gleichgewicht erreicht, sondern es kann eine kleine Welligkeit um den korrekten Wert des Kompensationssignals COMP auftreten. Dies ist jedoch üblicherweise vernachlässigbar. [Fig. 3](#) zeigt ein Simulationsbeispiel der Konvergenz der Amplitudenungleichgewichtsschleife und das Kompensieren des Signals COMP zu dem korrekten Wert 1.2, wenn der Wert des Amplitudenungleichgewichts ε gleich 1.2 ist. Das System hat somit ein Phasenungleichgewicht von 10 Grad, das nicht korrigiert ist, die Simulation bestätigt so die theoretische Unabhängigkeit der Amplitudenungleichgewichtsfehlerkompensation des Phasenungleichgewichts, die gemäß der Erfindung durchgeführt wird.

[0037] Das Ausmaß der Welligkeit im geschätzten Fehler um den korrekten Wert kann mit einem Schleifenfilter **60** gesteuert werden; ein Schmalschleifenfilter verringert Welligkeit, aber verlangsamt die Konvergenz und umgekehrt. Es ist möglich, den Schleifenfilter **60** adaptiv zu steuern, wenn das Amplitudenungleichgewicht groß ist, um die Konvergenz zu beschleunigen und dann die Wellen zu reduzieren, sobald die Schleife nahe an den korrekten Wert konvergiert ist. Gemäß einem Ausführungsbeispiel der Erfindung wird der Verstärkungsfaktor des Filters **60** entsprechend dem Ausmaß des Amplitudenungleichgewichts eingestellt.

[0038] Jedes der individuellen Blöcke in dem System der [Fig. 2](#) kann für eine Hardwareimplementierung optimiert werden. Der Leistungsmessschaltkreis **30** kann mit einer einfachen Diodenbauteil implementiert werden. Der Analog-Digital-Wandler **40** hat keine besonderen Erfordernisse, andere als genügend schnelle Abtastgeschwindigkeit im Verhältnis zu der Bandbreite des HF-Signals.

[0039] Der Fehlerdetektor **50** kann entweder in Software oder in Hardware implementiert werden. Für eine Hardwareimplementierung ist es vorzuziehen, die Quadratwurzel und Divisionsoperationen zu entfernen. Die Quadratwurzel kann einfach gestrichen werden, da der Fehlerwert gegen Eins konvergiert, und die Quadratwurzel von Eins ist gleich Eins. Daher konvergiert die Schleife ohne die Quadratwurzeloperation in Gleichung (10) gegen den korrekten Wert:

$$\text{error}_\varepsilon = \varepsilon^2 - 1 = \frac{R E[S_I^2] E[S_Q^2] - E[S_I^4]}{E[S_I^2] E[S_Q^2] - R E[S_Q^4]} - 1 \quad (12)$$

[0040] Die Divisionsoperationen in der Berechnung des Verhältnisses R der zwei Korrelatoren, Gleichung (8), und der Fehlerwert, Gleichungen (10) und (12), kann durch die folgenden Änderungen der Auswertung entfernt werden. Die Fehlerberechnung ist gleich der Gleichung (12), und ε^2 ist eine positive Zahl, daher können wir absolute Werte nehmen:

$$\text{error}_\varepsilon = \frac{|R E[S_I^2] E[S_Q^2] - E[S_I^4]|}{|E[S_I^2] E[S_Q^2] - R E[S_Q^4]|} - 1 \quad (13)$$

und dann multiplizieren mit dem Nenner:

$$|E[S_I^2] E[S_Q^2] - R E[S_Q^4]| \cdot \text{error}_\varepsilon = |R E[S_I^2] E[S_Q^2] - E[S_I^4]| - |E[S_I^2] E[S_Q^2] - R E[S_Q^4]| \quad (14)$$

[0041] Als Nächstes ersetze $R = C_1/C_2$ und multipliziere mit C_2 :

$$|C_2 E[S_I^2]E[S_Q^2] - C_1 E[S_Q^4] \cdot \text{error}_\epsilon = |C_1 E[S_I^2]E[S_Q^2] - C_2 E[S_I^4] - |C_2 E[S_I^2]E[S_Q^2] - C_1 E[S_Q^4] \quad (15)$$

[0042] Jetzt hat der Fehler auf der linken Seite einen variablen Verstärkungsterm, dieser ändert effektiv nur die Verstärkung des Schleifenfilters **60**. Falls der Schleifenfilter **60** ausgestaltet ist, korrekt mit der maximal möglichen Verstärkung zu arbeiten, wird das allgemeine Betreiben der Schleife nicht unannehmbar beeinträchtigt. Daher können wir den Multiplikator des Fehlerausdrucks durch die Verstärkung G_F ändern:

$$G_F \cdot \text{error}_\epsilon = |C_1 E[S_I^2]E[S_Q^2] - C_2 E[S_I^4] - |C_2 E[S_I^2]E[S_Q^2] - C_1 E[S_Q^4] \quad (16)$$

[0043] Mit diesen Einstellungen kann der Fehlerdetektor **50** ohne Quadratwurzel- oder Divisionsoperationen implementiert werden.

[0044] Die nächste Komponente in dem System ist der Schleifenfilter **60**. Das einfachste Verfahren ist es, einen bloßen Verstärkungsfaktor (Verstärkung < 1) als den Schleifenfilter **60** zu verwenden. Dieser ergibt eine einfache Tiefpassfunktion, wenn die Steuerungsschleife geschlossen ist. In Hardware kann der Verstärkungsfaktor als Leistung von zwei $G_F = 2^{-n}$ implementiert werden, wobei n die tatsächliche Verstärkung definiert. Das Verwenden von Leistungen stellt den Vorteil bereit, dass die Multiplikation als eine einfache Verschiebung der binären Darstellung des Eingangswerts implementiert werden kann.

[0045] Die Integratorkomponente **70** ist ein idealer Integrator, da diese einfach in Software oder in Hardware zu implementieren ist. Der Ausgangswert des Integrators ist gleich dem mit dem aktuellen Eingangswert addierten vorherigen Ausgang.

[0046] Die letzte Operation ist das tatsächliche Korrigieren des Amplitudenungleichgewichts durch Dividieren des Q-Basisbandsignals mit dem Kompensierungssignal COMP. Diese letzte Division kann durch eine Näherung ersetzt werden, wenn der Amplitudenungleichgewicht nahe an Eins ist:

$$\frac{1}{COMP} \approx 2 - COMP$$

[0047] Somit wird das Q-Signal statt der Division durch den Kompensationssignalwert mit 2 minus des Kompensationssignalwerts multipliziert. Diese Näherung ist besser je näher der Kompensationssignalwert der Eins ist.

[0048] In dem oben beschriebenen Beispiel wird angenommen, dass das I-Modulationssignal S_I perfekt hochgesetzt wird und dass das Q-Modulationssignal S_Q das Ungleichgewicht trägt. Konsequenter Weise wird nur das Signal S_Q kompensiert. Die Amplitudenungleichgewichtskompensation kann jedoch auch durch Wechseln der Rollen der Modulationssignale S_I und S_Q in dem obigen Beispiel implementiert werden und das Signal S_I kompensieren, wobei die Signalbearbeitungseinheit **80** vor dem Eingang des I-Modulationssignals SI in dem Quadraturmodulator **10** platziert wäre. Es ist auch möglich, symmetrische Kompensation zu verwenden, wobei beide Modulationssignale SI und SQ kompensiert werden, ohne von der Grundidee der Erfindung abzuweichen.

[0049] Da die Technologie sich weiterentwickelt, wird einem Fachmann klar sein, dass das erfinderische Konzept auf verschiedene Weisen implementiert werden kann. Die Erfindung und ihre Ausführungsbeispiele sind nicht auf die oben beschriebenen Beispiele beschränkt, sondern kann innerhalb des Rahmens der Ansprüche variieren.

Patentansprüche

1. Verfahren zum Kompensieren eines Amplitudenungleichgewichts eines Quadraturmodulators, wobei das Verfahren umfasst:

Bestimmen einer ersten Korrelation ($C_{1,\epsilon}$) basierend auf einem ersten Modulationssignal (S_I) und einem Ausgangssignal des Quadraturmodulators (**10**);

Bestimmen einer zweiten Korrelation ($C_{2,\epsilon}$) basierend auf einem zweiten Modulationssignal (S_Q) und dem Ausgangssignal des Quadraturmodulators (**10**);

Erzeugen eines Kompensationssignals (Comp) proportional zu dem Amplitudenungleichgewicht basierend auf dem ersten und zweiten Modulationssignal und einem Verhältnis der bestimmten Korrelationen; und Bearbeiten zumindest eines der Modulationssignale des Quadraturmodulators (**10**) mit dem Kompensationssignal;

- wobei die Korrelationen basierend auf unbearbeiteten Modulationssignalen des Quadraturmodulators (**10**) bestimmt werden.
2. Verfahren nach Anspruch 1, wobei das zum Bestimmen der Korrelationen verwendete Ausgangssignal des Quadraturmodulators (**10**) ein verstärktes Ausgangssignal ist.
 3. Verfahren nach Anspruch 1 oder 2, wobei die erste Korrelation eine Korrelation zwischen der Leistung des Ausgangssignals und dem Quadrat des ersten Modulationssignals ist und die zweite Korrelation eine Korrelation zwischen der Leistung des Ausgangssignals und dem Quadrat des zweiten Modulationssignals ist.
 4. Verfahren nach Anspruch 1, 2 oder 3, wobei das Erzeugen des Kompensationssignals umfasst:
Erzeugen eines Fehlersignals proportional zu dem Amplitudenungleichgewicht basierend auf einem Verhältnis der bestimmten Korrelationen und des ersten und zweiten Modulationssignals; und
Erzeugen des Kompensationssignals basierend auf dem Fehlersignal.
 5. Verfahren nach Anspruch 4, wobei das Fehlersignal so eingestellt wird, dass es gleich Null ist, wenn kein Amplitudenungleichgewicht vorhanden ist.
 6. Verfahren nach Anspruch 4 oder 5, wobei das Kompensationssignal durch Integrieren des Fehlersignals über der Zeit erzeugt wird.
 7. Verfahren nach Anspruch 6, wobei das Fehlersignal vor dem Integrieren tiefpassgefiltert wird.
 8. Verfahren nach Anspruch 7, wobei das Fehlersignal mit einem Filter gefiltert wird, der einen Verstärkungsfaktor kleiner als Eins aufweist.
 9. Verfahren nach Anspruch 8, wobei der Verstärkungsfaktor des Filters entsprechend der Größe des Amplitudenungleichgewichts angepasst wird.
 10. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 9, wobei das Bearbeiten von zumindest einem der Modulationssignale mit dem Kompensationssignal durch Teilen oder Multiplizieren zumindest eines der Modulationssignale mit dem Kompensationssignal durchgeführt wird.
 11. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 9, wobei das Bearbeiten von zumindest einem der Modulationssignale mit dem Kompensationssignal durch Teilen oder Multiplizieren zumindest eines der Modulationssignale mit einer Näherung des Kompensationssignals durchgeführt wird.
 12. Anordnung zum Kompensieren eines Amplitudenungleichgewichts eines Quadraturmodulators, wobei die Anordnung umfasst:
Mittel (**51A**) zum Bestimmen einer ersten Korrelation basierend auf einem ersten Modulationssignal und einem Ausgangssignal des Quadraturmodulators (**10**);
Mittel (**51B**) zum Bestimmen einer zweiten Korrelation basierend auf einem zweiten Modulationssignal und dem Ausgangssignal des Quadraturmodulators (**10**);
Mittel (**90**) zum Erzeugen eines Kompensationssignals proportional zu dem Amplitudenungleichgewicht basierend auf dem ersten und zweiten Modulationssignal und einem Verhältnis der bestimmten Korrelationen; und
Mittel (**80**) zum Bearbeiten zumindest eines der Modulationssignale des Quadraturmodulators (**10**) mit dem Kompensationssignal;
wobei die Mittel (**51A**, **51B**) zum Bestimmen der Korrelationen eingerichtet sind, unbearbeitete Modulationssignale des Quadraturmodulators (**10**) zum Bestimmen der Korrelationen zu verwenden.
 13. Anordnung nach Anspruch 12, wobei das Ausgangssignal des Quadraturmodulators (**10**) ein verstärktes Ausgangssignal ist.
 14. Anordnung nach Anspruch 12 oder 13, wobei die erste Korrelation eine Korrelation zwischen der Leistung des Ausgangssignals und dem Quadrat des ersten Modulationssignals ist und die zweite Korrelation eine Korrelation zwischen der Leistung des Ausgangssignals und dem Quadrat des zweiten Modulationssignals ist.
 15. Anordnung nach Anspruch 12, 13 oder 14, wobei die Mittel (**90**) zum Erzeugen des Kompensationssignals umfassen:

Mittel **(52)** zum Erzeugen eines Fehlersignals proportional zu dem Amplitudenungleichgewicht basierend auf einem Verhältnis der bestimmten Korrelationen und des ersten und zweiten Modulationssignals; und Mittel **(70)** zum Erzeugen des Kompensationssignals basierend auf dem Fehlersignal.

16. Anordnung nach Anspruch 15, wobei die Mittel **(52)** zum Erzeugen des Fehlersignals eingerichtet sind, das Fehlersignal so einzustellen, dass es gleich Null ist, wenn kein Amplitudenungleichgewicht vorhanden ist.

17. Anordnung nach Anspruch 15 oder 16, wobei die Mittel **(70)** zum Erzeugen des Kompensationssignals basierend auf dem Fehlersignal eingerichtet sind, das Kompensationssignal durch Integrieren des Fehlersignals über der Zeit zu erzeugen.

18. Anordnung nach Anspruch 17, wobei die Anordnung Mittel **(60)** zum Filtern des Fehlersignals umfasst, die zwischen die Mittel **(52)** zum Erzeugen des Fehlersignals und die Mittel **(70)** zum Erzeugen des Kompensationssignals basierend auf dem Fehlersignal geschaltet sind.

19. Anordnung nach Anspruch 18, wobei die Mittel **(60)** zum Filtern des Fehlersignals einen Verstärkungsfaktor kleiner als Eins aufweisen.

20. Anordnung nach Anspruch 19, wobei die Anordnung eingerichtet ist, den Verstärkungsfaktor der Mittel **(60)** zum Filtern des Fehlersignals entsprechend der Größe des Amplitudenungleichgewichts anzupassen.

21. Anordnung nach einem der Ansprüche 12 bis 20, wobei die Mittel **(80)** zum Bearbeiten zumindest eines der Modulationssignale eingerichtet sind, zumindest eines der Modulationssignale durch das Kompensationssignal zu teilen oder mit dem Kompensationssignal zu multiplizieren.

22. Anordnung nach einem der Ansprüche 12 bis 20, wobei die Mittel **(80)** zum Bearbeiten zumindest eines der Modulationssignale eingerichtet sind, zumindest eines der Modulationssignale durch eine Näherung des Kompensationssignals zu teilen oder mit einer Näherung des Kompensationssignals zu multiplizieren.

23. Eine Anordnung zum Kompensieren eines Amplitudenungleichgewichts eines Quadraturmodulators, wobei die Anordnung umfasst:
einen ersten Korrelator **(51A)**, der eingerichtet ist, eine erste Korrelation basierend auf einem ersten Modulationssignal und einem Ausgangssignal des Quadraturmodulators **(10)** zu bestimmen;
einen zweiten Korrelator **(51B)**, der eingerichtet ist, eine zweite Korrelation basierend auf einem zweiten Modulationssignal und dem Ausgangssignal des Quadraturmodulators **(10)** zu bestimmen;
Mittel **(90)**, die eingerichtet sind, ein Kompensationssignal proportional zu dem Amplitudenungleichgewicht basierend auf dem ersten und zweiten Modulationssignal und einem Verhältnis der bestimmten Korrelationen zu erzeugen; und
Mittel **(80)**, die eingerichtet sind, zumindest eines der Modulationssignale des Quadraturmodulators **(10)** mit dem Kompensationssignal zu bearbeiten;
wobei der erste und der zweite Korrelator **(51A, 51B)** eingerichtet sind, unbearbeitete Modulationssignale des Quadraturmodulators **(10)** zum Bestimmen der Korrelationen zu verwenden.

Es folgt ein Blatt Zeichnungen

Anhängende Zeichnungen

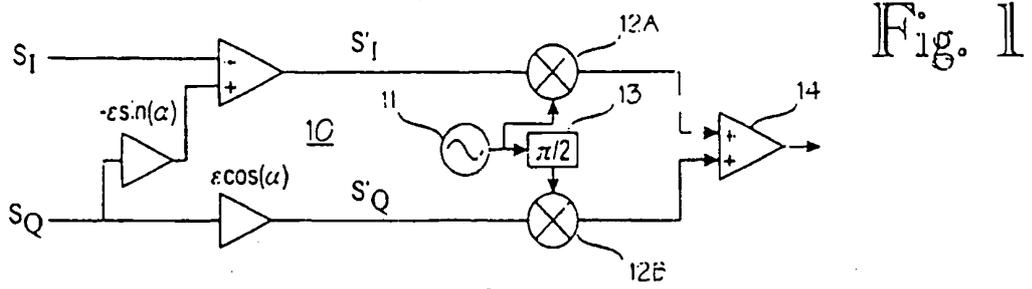


Fig. 1

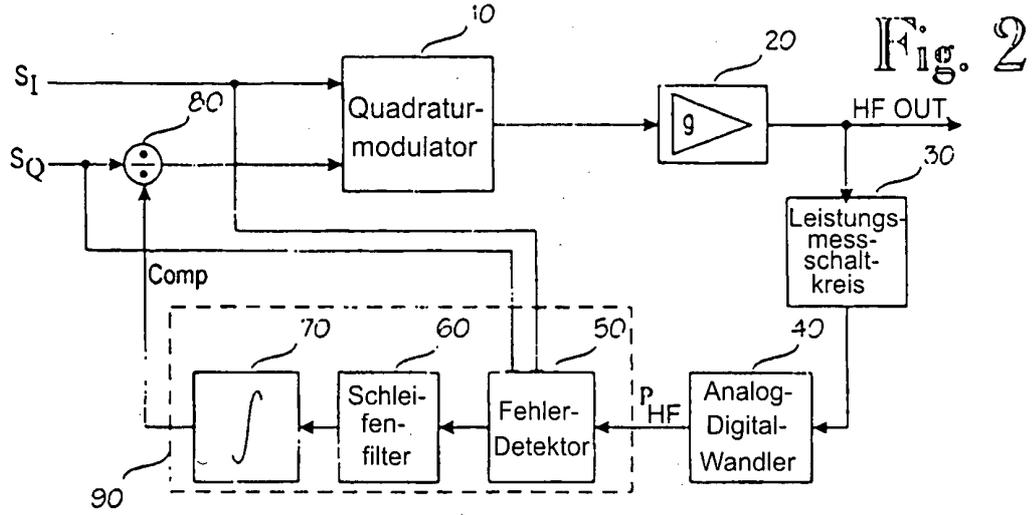


Fig. 2

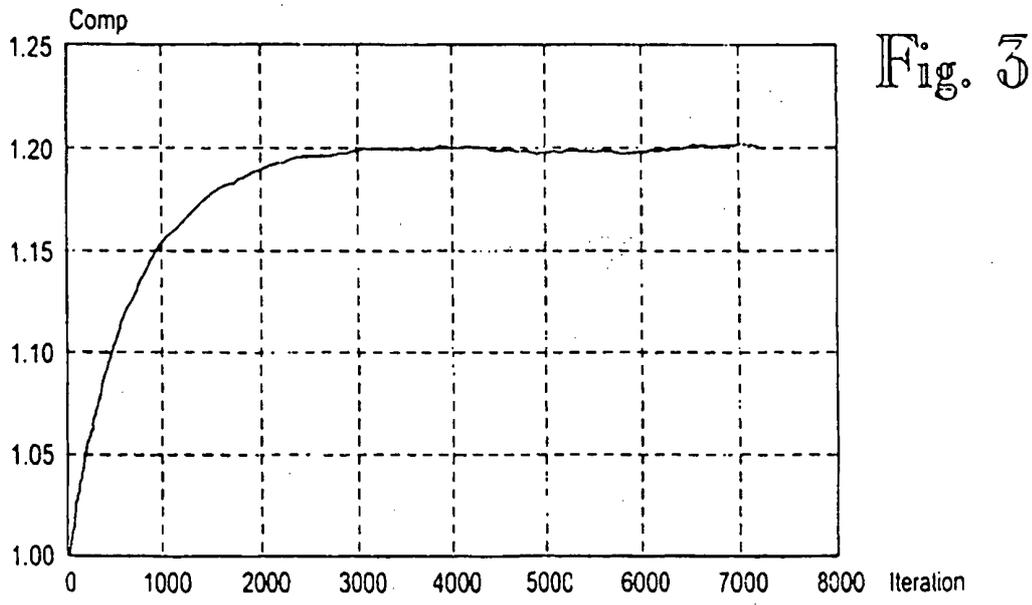


Fig. 3

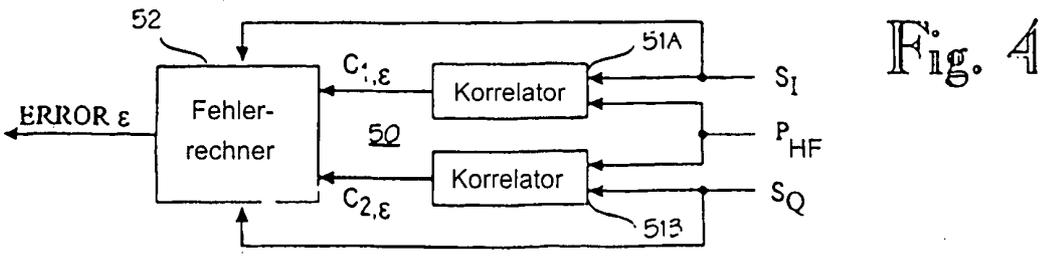


Fig. 4