

(19) BUNDESREPUBLIK DEUTSCHLAND

PATENTSCHRIFT



(12) Ausschließungspatent

(11) **DD 292 789 A5**

Erteilt gemäß § 17 Absatz 1
Patentgesetz der DDR
vom 27.10.1983
in Übereinstimmung mit den entsprechenden
Festlegungen im Einigungsvertrag

5(51) H 03 J 7/18

DEUTSCHES PATENTAMT

In der vom Anmelder eingereichten Fassung veröffentlicht

(21)	DD H 03 J / 335 741 3	(22)	15.12.89	(44)	08.08.91
(31)	285147	(32)	16.12.88	(33)	US

(71) siehe (73)

(72) Borth, David E.; Kepler, James F. M., US

(73) MOTOROLA, INC., 1303 East Algonquin Road, Schaumburg, Illinois 60196, US

(54) **Verfahren und Einrichtung zur digitalen automatischen Frequenzregelung**

(55) Frequenzregelung; Sinuswellen; Frequenzunterschied; Vergleichsfrequenz; Diskriminierung; Digitalisierung; Quadraturfilterung; Mittelwertbildung; Oszillatoreinstellung

(57) Die Erfindung betrifft ein Verfahren und eine Vorrichtung zur digitalen automatischen Frequenzregelung mit reinen Sinuswellen. Um mit kostengünstigen Mitteln die Rauschwirkungen insbesondere im beweglichen Funkbetrieb weiter zu reduzieren, erfolgt erfindungsgemäß eine Diskriminierung mit Bezug auf eine Vergleichsfrequenz zur Ermittlung von Frequenzunterschieden zwischen einer empfangenen reinen Sinuswelle und einer Vergleichswellenform, eine Integration der Frequenzunterschiede zur Mittelwertbildung der Unterschiede und die Einstellung der Bezugsfrequenz zur Beseitigung des Frequenzunterschieds. Es ist weiter gekennzeichnet durch Digitalisierung, bei einer Phasenverschiebung von 90°, der empfangenen reinen Sinuswelle, durch die Mischung der empfangenen reinen Sinuswelle mit einer komplexen Sinuskurve zur Umsetzung der reinen Sinuswelle in das Basisband, durch Quadraturfilterung der gemischten Sinuswelle, Kreuzprodukt-Diskriminierung zur Ermittlung der Frequenzunterschiede zwischen einer empfangenen reinen Sinuswelle und einer Vergleichsfrequenz, durch Integration der Frequenzunterschiede zur Mittelung der Unterschiede, selektive Berechnung des Mittelwertes/Varianz zwischen der reinen Sinuswelle und der Vergleichsfrequenz, und Einstellung der Vergleichsfrequenz eines spannungsgesteuerten Oszillators zur Beseitigung des Frequenzunterschieds.

ISSN 0433-6461

6 Seiten

Patentansprüche:

1. Verfahren zur digitalen automatischen Frequenzregelung (AFC) reiner Sinuswellen (PSW), **gekennzeichnet durch:**
Diskriminierung mit Bezug auf eine Vergleichsfrequenz zur Ermittlung von Frequenzunterschieden zwischen einer empfangenen reinen Sinuswelle und einer Vergleichswellenform, Integration der Frequenzunterschiede zur Mittelwertbildung der Unterschiede, und Einstellung der Bezugsfrequenz zur Beseitigung des Frequenzunterschieds.
2. Verfahren nach Anspruch 1, **dadurch gekennzeichnet**, daß der Unterscheidungsschritt durch Kreuzprodukt-Unterscheidung durchgeführt wird.
3. Verfahren nach Anspruch 1 oder 2, **dadurch gekennzeichnet**, daß die Unterscheidung durch Mischen der empfangenen reinen Sinuswelle mit einer komplexen sinusförmigen Vergleichswellenform eingeleitet wird, um sie in 0 Hz (50) umzusetzen.
4. Verfahren nach Anspruch 3, **gekennzeichnet durch** Quadraturfilterung der gemischten Sinuswelle, die zwischen die Misch- und Unterscheidungsschritte gestellt ist.
5. Verfahren nach Anspruch 3 oder 4, **dadurch gekennzeichnet**, daß das Mischen durch Digitalisierung, bei einer Phasenverschiebung um 90°, der empfangenen reinen Sinuswelle eingeleitet wird.
6. Verfahren nach irgendeinem der Ansprüche 1 bis 5, **gekennzeichnet durch** Einstellen der Frequenz eines spannungsgesteuerten Oszillators (80), zur Beseitigung des Frequenzunterschieds.
7. Verfahren nach irgendeinem der Ansprüche 1 bis 6, **dadurch gekennzeichnet**, daß die Varianz zwischen der reinen Sinuswelle und der Vergleichswellenform dazu verwendet wird, die Frequenzeinstellung selektiv durchzuführen.
8. Verfahren nach Anspruch 7, **dadurch gekennzeichnet**, daß die Randvarianzen zwischen der reinen Sinuswelle und der Vergleichswellenform dazu verwendet werden, die Frequenzeinstellung durchzuführen.
9. Verfahren nach Anspruch 7 oder 8, **dadurch gekennzeichnet**, daß die wesentlichen Varianzen zwischen der reinen Sinuswelle und der Vergleichswellenform dazu verwendet werden, die Frequenzeinstellung einzustellen.
10. Verfahren nach Anspruch 1 zur digitalen automatischen Frequenzregelung (AFC) gebündelter (bursted) reiner Sinuswellen (PSW), **gekennzeichnet durch** folgende Schritte:
Digitalisierung, bei 90° Phasenverschiebung, der empfangenen reinen Sinuswelle, Mischen der empfangenen reinen Sinuswelle mit einer komplexen sinusförmigen Vergleichswellenform, um sie in 0 Hz umzusetzen, Quadraturfilterung der gemischten Sinuswelle, Kreuzprodukt-Diskriminierung zur Ermittlung der Frequenzunterschiede zwischen einer empfangenen reinen Sinuswelle und der Vergleichswellenform, Integration der Frequenzunterschiede zur Mittelung der Unterschiede, und Einstellung der Frequenz eines spannungsgesteuerten Oszillatorvergleichs zur Beseitigung des Frequenzunterschieds.
11. Verfahren nach Anspruch 10, **gekennzeichnet durch** die Schritte der selektiven erwünschten Frequenzeinstellung, die auf den Varianzen zwischen der reinen Sinuswelle und der Vergleichswellenform basiert.
12. Vorrichtung zur digitalen automatischen Frequenzregelung (AFC) reiner Sinuswellen (PSW), **gekennzeichnet durch** und in Reihe geschaltet:
eine Einrichtung (20) zur Diskriminierung mit Bezug auf eine Vergleichsfrequenz, um Frequenzunterschiede zwischen einer empfangenen reinen Sinuswelle und einer Vergleichswellenform zu ermitteln, und eine Einrichtung (30) zur Integration der Frequenzunterschiede zur Mittelung der Unterschiede und zur Einstellung der Vergleichsfrequenz, um einen Frequenzunterschied zu beseitigen.
13. Vorrichtung nach Anspruch 12 zur digitalen automatischen Frequenzregelung (AFC) reiner Sinuswellen (PSW), **gekennzeichnet durch** und in Serie geschaltet:
eine Einrichtung (15) zur Digitalisierung, bei 90° Phasenverschiebung, der empfangenen reinen Sinuswelle,
eine Einrichtung (50) zum Mischen der empfangenen reinen Sinuswelle mit einer komplexen sinusförmigen Vergleichswellenform, um sie bei 0 Hz umzusetzen,
eine Einrichtung (60, 61) zur Quadraturfilterung der gemischten Sinuswelle,

eine Einrichtung (20) zur Kreuzprodukt-Diskriminierung, um die Frequenzunterschiede zwischen einer empfangenen reinen Sinuswelle und der Vergleichswellenform zu ermitteln, und eine Einrichtung (30) zur Integration der Frequenzunterschiede zur Mittelung der Unterschiede, und zur Einstellung der Frequenz eines spannungsgesteuerten Oszillator (80)-Vergleichs zur Beseitigung des Frequenzunterschieds.

14. Vorrichtung nach Anspruch 13, **gekennzeichnet durch** eine Einrichtung (90, 110) zur selektiven erwünschten Frequenzeinstellung, die auf den Varianzen zwischen der reinen Sinuswelle und der Vergleichswellenform basiert.

Hierzu 1 Seite Zeichnung

Anwendungsgebiet der Erfindung

Die Erfindung betrifft eine automatische Frequenzregelung (AFC). Insbesondere betrifft die Erfindung ein Verfahren und eine Einrichtung zur digitalen automatischen Frequenzregelung (AFC) mit reinen Sinuswellen (PSW).

Charakteristik des bekannten Standes der Technik

Die Notwendigkeit für eine automatische Frequenzregelung bei einer kohärenten Ermittlung phasenmodulierter Signale rührt daher, weil sogar kleine Frequenzverschiebungen zwischen dem Sender und den Bezugsfrequenzen des Empfängers zu einer beträchtlichen Anzahl ermittelter Datenfehler führen können. Um dieses Problem zu verdeutlichen, wird das nachfolgende Beispiel betrachtet. Angenommen, es werden Daten mit einer Datengeschwindigkeit von 300 Kb/s unter Verwendung einer minimalen Verschiebungstastung (MSK) gesendet (oder eine Veränderung dieses Modulationsformats, beispielsweise eine Gaußsche Minimalverschiebungstastung-GMSK; eine verallgemeinerte, geeignete [tamed] Frequenzmodulation; GTFM; usw.) in einem Zeitmultiplexsystem mit Vielfachzugriff, in dem Zeitschlitz von 0,5ms Dauer verwendet werden. Daher besteht ein Zeitschlitz aus $(300\text{Kb/s}) \times (0,5\text{ms}) = 150\text{ Bit}$.

Es wird weiterhin angenommen, daß die Phasenverschiebung zwischen dem Sender und dem Empfänger zu Beginn jedes empfangenen Zeitschlitzes durch die Verwendung einer Synchronisationseinleitung usw. auf Null eingestellt wird. Unter rauchsfreien Bedingungen kann gezeigt werden, daß für ein MSK-Modulationsformat im Empfänger Bits ohne Fehler ermittelt werden können, vorausgesetzt, daß die Phasenverschiebung zwischen dem Sender und dem Empfänger geringer als $\pi/2$ Radiant ist. Da die Augenblicksfrequenz die zeitliche Ableitung der Phase in der Reihenfolge für den ohne Fehler zu empfangenden Zeitschlitz ist, ist es notwendig, daß die Phasenverschiebung am Ende des Schlitzes $\pi/2$ Radiant ist, d. h. daß die Frequenzverschiebung zwischen dem Sender und dem Empfänger die folgende Gleichung befriedigt:

$$f_{\text{versatz}} \frac{1}{2\pi} \frac{\pi/2}{0,5\text{msec}} = 500\text{Hz.}$$

Um die Rauschwirkungen in der Praxis anzugleichen, ist es notwendig, daß die Frequenzverschiebung etwas kleiner als dieser Wert ist, typischerweise 200Hz.

Bei einem beweglichen Funkbetrieb mit 900MHz bedeutet eine maximale Frequenzverschiebung von 200Hz zwischen dem übertragenen Träger und der Vergleichsfrequenz des Empfängers, daß sowohl der Sender als auch der Empfänger Oszillatoren mit einer Gesamtstabilität (über die Zeit, Temperatur usw.) aufweisen müssen, die besser als 0,1 Millionstel (ppm) ist, eine Stabilitätsanforderung, die im allgemeinen nur bei Zäsium- oder Rubidium-Frequenzstandards und bei im Ofen erzeugten Kristalloszillatoren eingehalten wird. Alle diese Oszillatoren sind für kommerzielle bewegliche Funkanwendungen zu voluminös. Stattdessen muß die automatische Frequenzregelung (AFC) bei einer kleineren, noch geringeren Stabilität angewendet werden, bei einem Oszillator, dessen Frequenzstabilität gefährdet ist. Es müssen Verfahren zur Regelung der Frequenzstabilität in anderer Weise gefunden werden. AFC-Schaltungen sind ein üblicher Weg.

Herkömmliche AFC-Schaltungen, die beispielsweise in J. C. Samuels' „Theory of the Band-Centering AFC-System“, IRE Transactions on Circuit Theory, Seiten 324 bis 330, Dezember 1957 (s. auch die Referenzen, die in dieser Beschreibung enthalten sind) beschrieben sind, sind dazu bestimmt, große Frequenzverschiebungen zwischen dem Sender und dem Empfänger zu kompensieren, um das Signal innerhalb der Bandbreite des IF-Filters des Empfängers zu halten. Dies erfolgt üblicherweise über einen Frequenzmodulationsdetektor, dessen Ausgangssignal tiefpaßgefiltert wird, um beliebige Datenstörungen aus dem empfangenen Mittenfrequenzsignal zu entfernen. Eine solche Annäherung ist bei Erreichung von Frequenzverschiebungen von annähernd $\pm 1\text{ kHz}$ bei 900MHz vorteilhaft. Es gibt keine annehmbare Annäherung zur Erreichung einer Frequenzverschiebung von weniger als 200Hz, wenn nicht die übertragene Signalbandbreite geringer als 200Hz ist (z. B. eine Sinuskurve). Um jedoch selbst für ein sinusförmiges Signal eine Frequenzsperrung zu erreichen, ist es notwendig, das empfangene Signal sorgfältig weiter zu verarbeiten.

In der Praxis wird zur Erlangung einer Anfangsfrequenzsperrung für ein empfangenes GMSK-Signal ein sinusförmiger Burst in periodischen Intervallen zwischen den Datenbursts durch Übertragung eines langen Bursts logischer Nullen oder Einsen unter Verwendung des GMSK-Modulationsformats gesendet. Wie allgemein bekannt ist, ist das aus einem solchen Dateneingangssignal resultierende Signal ein sinusförmiges Signal mit einer Frequenz, die gleich der Trägerfrequenz plus oder minus einem Viertel der Bitrate $1/4 T$ ist, d. h.

$$f = f_{\text{Träger}} \pm \frac{1}{4T}$$

wobei die Wahl des Vorzeichens davon abhängt, ob alle Einsen oder Nullen übertragen werden.

Bei dieser sinusförmigen Burstübertragung erfordert die Verriegelung mit dem empfangenen Träger sowohl die Ermittlung des sinusförmigen Bursts als auch die Frequenzverriegelung mit dem sinusförmigen Burst.

Das Ziel der Erfindung besteht nun darin, diese Herausforderungen zu überwinden und bestimmte Vorteile, die unten dargestellt sind, zu verwirklichen.

Darlegung des Wesens der Erfindung

Es wird daher ein Verfahren und eine Vorrichtung zur automatischen Frequenzregelung (AFC) reiner Sinuswellen (PSW) geschaffen. Sie umfaßt einen Diskriminierungsvorgang zur Ermittlung von Frequenzunterschieden zwischen einer empfangenen reinen Sinuswelle und einer Vergleichsfrequenz bei Integration der Frequenzunterschiede zur Mittelung der Unterschiede, und eine Einstellung der Vergleichsfrequenz zur Eliminierung des Frequenzunterschiedes.

Sie ist weiter gekennzeichnet durch Digitalisierung, um 90° phasenverschoben, der empfangenen reinen Sinuswelle, Mischen der empfangenen reinen Sinuswelle mit einem Komplex von Sinuskurven zur Umwandlung der Sinuswelle in 0Hz, Quadraturfilterung der gemischten Sinuswelle, Kreuzproduktdiskriminierung zur Ermittlung von Frequenzunterschieden zwischen einer empfangenen reinen Sinuswelle und einer Vergleichsfrequenz bei Integration der Frequenzunterschiede zur Mittelung der Unterschiede, selektive Berechnung des Mittelwertes/Varianz zwischen der reinen Sinuswelle und der Vergleichsfrequenz, und Einstellung der Vergleichsfrequenz eines spannungsgesteuerten Oszillators, um den Frequenzunterschied zu eliminieren.

Ausführungsbeispiele

Zusätzliche Ziele, Merkmale und Vorteile der Erfindung werden besser verständlich, ebenso die beste Art und Weise, die für deren praktische Durchführung in einem bevorzugten Ausführungsbeispiel betrachtet wird, an Hand der nachfolgenden detaillierten Beschreibung (über ein uneingeschränktes Beispiel), die im Zusammenhang mit den beigefügten Zeichnungen zu sehen ist. Darin zeigen:

Die einzige Figur ist ein funktionelles Blockdiagramm der bevorzugten Ausführungsform der Erfindung. Nachfolgend wird auf das Blockdiagramm der bevorzugten Ausführungsform der Erfindung Bezug genommen.

Ein herkömmlicher Quadraturdemodulator 15 wird dazu verwendet, das empfangene Zwischenfrequenz(IF)-Signal auf das in Phase befindliche Basisbandsignal (I) und das Quadratursignal (Q) herunterzumischen. Es werden zwei Analog-Digital-Wandler (A/D) 70, die mit einem Vielfachen der Bitrate arbeiten, verwendet, um die Quadratur-Basisbandsignale abzutasten und diese Signale in ein digitales Format umzuwandeln. Es ist festzustellen, daß diese gesamte Schaltung auch für die digitale Demodulation der GMSK-Datensignale erforderlich ist.

Die Ausgangssignale der Analog-Digital-Wandler 70 werden anschließend durch Multiplikation des empfangenen Signals mit $e^{+j\omega_0 t}$ frequenzmäßig umgesetzt, wobei $\omega_0 = 2\pi\left(\frac{1}{4T}\right)$ rad/s in dem Mischer 50 ist. Die Wirkung dieser Umsetzung während des

Empfangs des reinen Sinuswellenbursts ohne irgendeinen Frequenzfehler besteht darin, daß die Sinuswelle auf 0Hz gemischt wird. Bei einer vorliegenden Frequenzverschiebung bestehen die frequenzmäßig umgesetzten Signale I und Q aus einer Sinuskurve bzw. einer Kosinuskurve, und zwar bei einer Frequenz, die gleich der Frequenz des Versatzfehlers ist.

Die frequenzmäßig umgesetzten Signale I und Q werden anschließend in zwei Tiefpaßfilterblöcken 60 einer Tiefpaßfilterung unterzogen, um übermäßiges Rauschen zu beseitigen, und dann mit Hilfe von zwei Dezimatorblöcken abwärts abgetastet.

Während des Empfangs der reinen Sinuswelle ist die Bandbreite des empfangenen Signals gleich dem Frequenzfehler zwischen dem empfangenen Trägersignal und dem spannungsgesteuerten Oszillator (VCO) 80. Nach der Frequenzumsetzung werden deshalb die Signale I und Q jeweils auf den Frequenzbereich

$$(0, f(\text{max}) \text{ Frequenzverschiebung})$$

bandbegrenzt.

Folglich kann das Signal nach dem Tiefpaßfilter mit

$$2 \times f(\text{max}) \text{ Frequenzverschiebung} = \frac{1}{T\epsilon} \text{ ohne}$$

Verletzung des Nyquist-Kriteriums für abgetastete Datensignale abwärts abgetastet werden.

Die dezimierten, tiefpaßgefilterten, frequenzmäßig umgesetzten Quadratursignale werden dann einem Basisbanddiskriminator zugeführt, welcher mittels eines Kreuzproduktdiskriminators realisiert wird. Das Ausgangssignal eines derartigen Diskriminators 20 für um 90° phasenverschobene sinusförmige Eingangssignale mit einer Winkelfrequenz von DW rad/s kann dargestellt werden mit

$$V_{\text{Disc}} = A \sin(DWT\epsilon),$$

worin $T\epsilon$ wie oben definiert und A eine Proportionalitätskonstante ist. Folglich ist für ein reines Sinuswelleneingangssignal für den Empfänger das Ausgangssignal des Diskriminators ein Gleichstromsignal, dessen Amplitude zur Frequenzverschiebung zwischen der empfangenen Trägerfrequenz und der VCO-Frequenz proportional ist.

Das Ausgangssignal des Kreuzprodukt-Diskriminators 20 wird dann an zwei getrennte Blöcke gelegt. Der erste Block, ein Tiefpaßfilter 21, ist als ein IIR-Filter erster Ordnung ausgeführt, was dazu verwendet wird, das Ausgangssignal des Kreuzprodukt-Diskriminators 20 zu glätten, um die Wirkungen des Eingangsrauschens zu beseitigen. Der zweite Block, ein reiner Sinuswellendetektor 22, wird zur Ermittlung der Anwesenheit einer reinen Sinuswelle verwendet, und folglich wird das Ausgangssignal des ersten Blocks dazu gebracht, diesen mit dem Rest der AFC-Schleifenschaltung zu verbinden. Der Detektor der reinen Sinuswelle besteht aus einem Mittelwert- und Varianzrechner 90 und einem Komparator 110. Der Mittelwert- und Varianzrechner 90 berechnet den Mittelwert

$$M = \frac{1}{N} \sum V$$

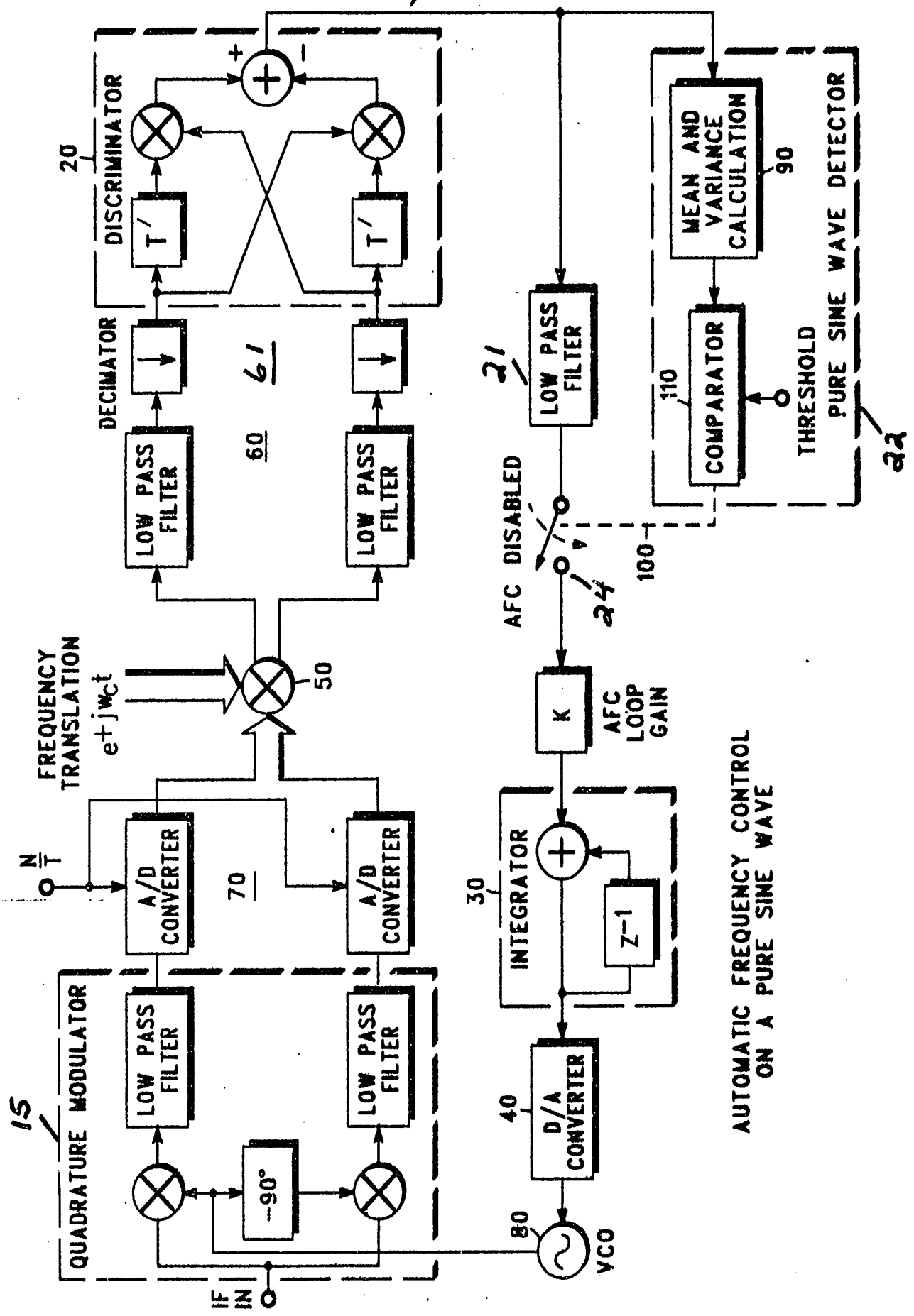
und die Varianz

$$s^2 = \left| \frac{1}{N} \sum V^2 - M^2 \right|$$

des Ausgangssignals des Diskriminators 20. Für ein reines Sinuswelleneingangssignal ist der Mittelwert M gleich dem Frequenzfehler, während die Varianz s^2 klein ist. Für Datensignale oder Rauschen ist die Varianz jedoch groß. Die Varianz s^2 wird deshalb an einen Komparator 110 gelegt, welcher die Varianz mit einem Schwellen-Varianzwert vergleicht und den AFC-Sperrschalter am Ausgang des Diskriminator-Tiefpaßfilters schließt, wenn die Varianz kleiner als der Schwellenwert ist. Das Ausgangssignal des AFC-Sperrschalter am Ausgang des Diskriminator-Tiefpaßfilters schließt, wenn die Varianz kleiner als der Schwellenwert ist.

Das Ausgangssignal des AFC-Sperrschalters 24 wird anschließend an die AFC-Rückkopplungsschleifenverstärkung K25 gelegt (welche die AFC-Schleifendynamik bestimmt), des weiteren an einen Integrator 30 und einen Digital-Analog-Wandler (D/A) 40. Das Ausgangssignal des D-A-Wandlers 40 wird dann einem spannungsgesteuerten Oszillator (VCO) 80 zugeführt, um irgendeine Frequenzverschiebung zwischen dem übertragenen Träger und der VCO-Vergleichsfrequenz des Empfängers zu beseitigen. Während die bevorzugte Ausführungsform der Erfindung beschrieben und dargestellt wurde, kann der Fachmann auf diesem Gebiet einschätzen, daß andere Variationen und Modifikationen dieser Erfindung durchgeführt werden können. Beispielsweise kann das IIR-Filter durch ein äquivalentes FIR-Filter ersetzt werden; die Dezimatoren können durch eine einfache Ausführung ausgetauscht werden (die jedoch mehr Berechnungen/s erforderlich machen); oder der Kreuzprodukt-Diskriminator kann durch eine andere Diskriminatorstruktur ersetzt werden. Außerdem kann der Digitalteil der Hardware entweder in einem IC eines Digitalsignalprozessors oder in diskreter Hardware realisiert sein. Diese und andere Variationen und Adaptionen sind möglich und liegen innerhalb des Geltungsbereiches der beigefügten Ansprüche.

1/1



AUTOMATIC FREQUENCY CONTROL ON A PURE SINE WAVE