

Beschreibung

[0001] Die Erfindung betrifft ein Betriebsverfahren für einen Corioliskreisel und eine dafür geeignete Auswerte-/Regelelektronik.

Stand der Technik

[0002] Corioliskreisel (auch Vibrationskreisel genannt) werden in zunehmendem Umfang zu Navigationszwecken eingesetzt; sie weisen ein Massensystem auf, das in Schwingungen versetzt wird. Diese Schwingung ist in der Regel eine Überlagerung einer Vielzahl von Einzelschwingungen. Diese Einzelschwingungen des Massensystems sind zunächst voneinander unabhängig und lassen sich jeweils abstrakt als "Resonatoren" auffassen. Zum Betrieb eines Vibrationskreisels sind wenigstens zwei Resonatoren erforderlich: einer dieser Resonatoren (erster Resonator) wird künstlich zu Schwingungen angeregt, die im Folgenden als "Anregungsschwingung" bezeichnet wird. Der andere Resonator (zweiter Resonator) wird nur dann zu Schwingungen angeregt, wenn der Vibrationskreisel bewegt/gedreht wird. In diesem Fall treten nämlich Corioliskräfte auf, die den ersten Resonator mit dem zweiten Resonator koppeln, der Anregungsschwingung des ersten Resonators Energie entnehmen und diese auf die Ausleseschwingung des zweiten Resonators übertragen. Die Schwingung des zweiten Resonators wird im Folgenden als "Ausleseschwingung" bezeichnet. Um Bewegungen (insbesondere Drehungen) des Corioliskreisels zu ermitteln, wird die Ausleseschwingung abgegriffen und ein entsprechendes Auslesesignal (z. B. das Ausleseschwingungs-Abgriffsignal) daraufhin untersucht, ob Änderungen in der Amplitude der Ausleseschwingung, die ein Maß für die Drehung des Corioliskreisels darstellen, aufgetreten sind. Corioliskreisel können sowohl als Open-Loop-System als auch als Closed-Loop-System realisiert werden. In einem Closed-Loop-System wird über jeweilige Regelkreise die Amplitude der Ausleseschwingung fortlaufend auf einen festen Wert – vorzugsweise null – rückgestellt.

[0003] Im Folgenden wird zur weiteren Verdeutlichung der Funktionsweise eines Corioliskreisels unter Bezugnahme auf **Fig. 2** ein Beispiel eines Corioliskreisels in Closed-Loop-Ausführung beschrieben.

[0004] Ein solcher Corioliskreisel **1** weist ein in Schwingungen versetzbares Massensystem **2** auf, das im Folgenden auch als "Resonator" bezeichnet wird. Diese Bezeichnung ist zu unterscheiden von den oben erwähnten "abstrakten" Resonatoren, die Einzelschwingungen des "echten" Resonators darstellen. Wie bereits erwähnt, kann der Resonator **2** als System aus zwei "Resonatoren" (erster Resonator **3** und zweiter Resonator **4**) aufgefasst werden. Sowohl der erste als auch der zweite Resonator **3, 4** sind jeweils an einen Kraftgeber (nicht gezeigt) und an ein Abgriffssystem (nicht gezeigt) gekoppelt. Das Rauschen, das durch die Kraftgeber und die Abgriffssysteme erzeugt wird, ist hier durch Noise 1 (Bezugszeichen **5**) und Noise 2 (Bezugszeichen **6**) schematisch angedeutet.

[0005] Der Corioliskreisel **1** weist des Weiteren vier Regelkreise auf:
Ein erster Regelkreis dient zur Regelung der Anregungsschwingung (d.h. der Frequenz des ersten Resonators **3**) auf eine feste Frequenz (Resonanzfrequenz). Der erste Regelkreis weist einen ersten Demodulator **7**, ein erstes Tiefpassfilter **8**, einen Frequenzregler **9**, einen VCO ("Voltage Controlled Oscillator") **10** und einen ersten Modulator **11** auf.

[0006] Ein zweiter Regelkreis dient zur Regelung der Anregungsschwingung auf eine konstante Amplitude und weist einen zweiten Demodulator **12**, ein zweites Tiefpassfilter **13** und einen Amplitudenregler **14** auf.

[0007] Ein dritter und ein vierter Regelkreis dienen zur Rückstellung derjenigen Kräfte, die die Ausleseschwingung anregen. Dabei weist der dritte Regelkreis einen dritten Demodulator **15**, ein drittes Tiefpassfilter **16**, einen Quadraturregler **17** und einen zweiten Modulator **18** auf. Der vierte Regelkreis enthält einen vierten Demodulator **19**, ein viertes Tiefpassfilter **20**, einen Drehratenregler **21** und einen dritten Modulator **22**.

[0008] Der erste Resonator **3** wird mit dessen Resonanzfrequenz ω_1 angeregt. Die resultierende Anregungsschwingung wird abgegriffen, mittels des ersten Demodulators **7** in Phase demoduliert, und ein demoduliertes Signalanteil wird dem ersten Tiefpassfilter **8** zugeführt, der daraus die Summenfrequenzen entfernt. Das abgegriffene Signal wird im Folgenden auch als Anregungsschwingungs-Abgriffsignal bezeichnet. Ein Ausgangssignal des ersten Tiefpassfilters **8** beaufschlagt einen Frequenzregler **9**, der in Abhängigkeit des ihm zugeführten Signals den VCO **10** so regelt, dass die In-Phase-Komponente im Wesentlichen zu Null wird. Dazu gibt der VCO **10** ein Signal an den ersten Modulator **11**, der seinerseits einen Kraftgeber so steuert, dass der erste Resonator **3** mit einer Anregungskraft beaufschlagt wird. Ist die In-Phase-Komponente Null, so schwingt der erste Resonator **3** auf seiner Resonanzfrequenz ω_1 . Es sei erwähnt, dass sämtliche Modulatoren und Demodulato-

ren auf Basis dieser Resonanzfrequenz ω_1 betrieben werden.

[0009] Das Anregungsschwingungs-Abgriffsignal wird des Weiteren dem zweiten Regelkreis zugeführt und durch den zweiten Demodulator **12** demoduliert, dessen Ausgabe das zweite Tiefpassfilter **13** passiert, dessen Ausgangssignal wiederum dem Amplitudenregler **14** zugeführt wird. In Abhängigkeit dieses Signals und eines Soll-Amplitudengebers **23** regelt der Amplitudenregler **14** den ersten Modulator **11** so, dass der erste Resonator **3** mit einer konstanten Amplitude schwingt (d.h. die Anregungsschwingung weist eine konstante Amplitude auf).

[0010] Wie bereits erwähnt wurde, treten bei Bewegung/Drehungen des Corioliskreisels **1** Corioliskräfte – in der Zeichnung durch den Term $FC \cdot \cos(\omega_1 \cdot t)$ angedeutet – auf, die den ersten Resonator **3** mit dem zweiten Resonator **4** koppeln und damit den zweiten Resonator **4** zum Schwingen anregen. Eine resultierende Ausleseschwingung der Frequenz ω_1 wird abgegriffen, sodass ein entsprechendes Ausleseschwingungs-Abgriffsignal (Auslesesignal) sowohl dem dritten als auch dem vierten Regelkreis zugeführt wird. Im dritten Regelkreis wird dieses Signal durch den dritten Demodulator **15** demoduliert, Summenfrequenzen durch das dritte Tiefpassfilter **16** entfernt und das tiefpassgefilterte Signal dem Quadraturregler **17** zugeführt, dessen Ausgangssignal den dritten Modulator **22** so beaufschlagt, dass entsprechende Quadraturanteile der Ausleseschwingung rückgestellt werden. Analog hierzu wird im vierten Regelkreis das Ausleseschwingungs-Abgriffsignal durch den vierten Demodulator **19** demoduliert, durchläuft das vierte Tiefpassfilter **20**, und ein entsprechend tiefpassgefiltertes Signal beaufschlagt einerseits den Drehratenregler **21**, dessen Ausgangssignal proportional zur momentanen Drehrate ist und als Drehraten-Messergebnis auf einen Drehratenausgang **24** gegeben wird, und andererseits den zweiten Modulator **18**, der entsprechende Drehratenanteile der Ausleseschwingung rückstellt.

[0011] Ein Corioliskreisels **1** wie oben beschrieben kann sowohl doppelresonant als auch nichtdoppelresonant betrieben werden. Wird der Corioliskreisels **1** doppelresonant betrieben, so ist die Frequenz ω_2 der Ausleseschwingung annähernd gleich der Frequenz ω_1 der Anregungsschwingung, wohingegen im nichtdoppelresonanten Fall die Frequenz ω_2 der Ausleseschwingung verschieden von der Frequenz ω_1 der Anregungsschwingung ist. Im Fall der Doppelresonanz beinhaltet das Ausgangssignal des vierten Tiefpassfilters **20** entsprechende Information über die Drehrate, im nichtdoppelresonanten Fall dagegen das Ausgangssignal des dritten Tiefpassfilters **16**. Um zwischen den unterschiedlichen Betriebsarten doppelresonant/nichtdoppelresonant umzuschalten, ist ein Doppelschalter **25** vorgesehen, der die Ausgänge des dritten und vierten Tiefpassfilters **16**, **20** wahlweise mit dem Drehratenregler **21** und dem Quadraturregler **17** verbindet.

[0012] Der oben beschriebene Aufbau des Corioliskreisels, insbesondere der Aufbau der Auswerte-/Regelelektronik bietet den Vorteil einer relativ hohen Drehratenempfindlichkeit bei gleichzeitig einfacher mechanischer Struktur des Resonators **2**. Nachteilig ist jedoch, dass ein hoher Aufwand hinsichtlich der elektronischen Komponenten der Auswerte-/Regelelektronik besteht. So müssen in der in **Fig. 2** gezeigten Ausführungsform des Corioliskreisels mehrere Digital-Analog-Wandler verwendet werden (z. B. an den mit Bezugsziffern **26**, **27** und **28** bezeichneten Stellen), die teuer sind und viel elektrische Leistung benötigen. Ferner ist zu erwähnen, dass die Digital-Analog-Wandler häufig mehrere Versorgungsspannungen benötigen und sich nur schlecht zusammen mit anderen elektronischen Bauteilen, insbesondere digitalen Bauteilen, integrieren lassen, was der Miniaturisierung Grenzen setzt. Weiterhin müssen in der in **Fig. 2** gezeigten Ausführungsform des Corioliskreisels wenigstens zwei Analog-Digital-Wandler verwendet werden (an den mit Bezugsziffern **29₁** und **29₂** bezeichneten Stellen).

Aufgabenstellung

[0013] Die der Erfindung zugrundeliegende Aufgabe ist es, ein Betriebsverfahren für einen doppelresonanten Corioliskreisels anzugeben, das mit möglichst wenig elektronischen Komponenten, insbesondere Analog-Digital-Wandlern und Digital-Analog-Wandlern auskommt, so dass Corioliskreisels mit einer kostengünstigen und hochminiaturisierten Auswerte-/Regelelektronik realisiert werden können.

[0014] Diese Aufgabe wird durch ein Verfahren gemäß den Merkmalen des Patentanspruchs 1 gelöst. Ferner stellt die Erfindung eine Auswerte-/Regelelektronik gemäß Patentanspruch 7 bereit. Schließlich stellt die Erfindung einen Pulsmodulator zur Ausführung des erfindungsgemäßen Verfahrens gemäß Patentanspruch 8 bereit. Vorteilhafte Ausgestaltungen und Weiterbildungen des Erfindungsgedankens finden sich in jeweiligen Unteransprüchen.

[0015] Erfindungsgemäß werden bei einem Betriebsverfahren eines Corioliskreisels digitale Auslesesignale

erzeugt, die ein Maß für die momentanen Amplituden/Frequenzen der Anregungsschwingung/Ausleseschwingung des Resonators des Corioliskreisels oder für andere Parameter der Anregungsschwingung/Ausleseschwingung darstellen. Der Resonator des Corioliskreisels wird mit Kraftsignalen beaufschlagt, wobei die Kraftsignale in Abhängigkeit der digitalen Auslesesignale so geregelt werden, dass die Anregungsschwingung/Ausleseschwingung bestimmte Amplituden/Frequenzen oder andere gewünschte Parameterwerte annehmen. Beispielsweise wird in einem Closed-Loop-System die Amplitude der Ausleseschwingung auf den Wert Null geregelt, und die Amplitude der Anregungsschwingung auf einen konstanten, von Null verschiedenen Wert eingestellt. Ein wesentlicher Aspekt der Erfindung ist, dass die Kraftsignale aus quantisierten Ausgangssignalen eines Pulsmodulators erzeugt werden, der mit digitalen Anregungs-/Kompensationssignalen, die aus den digitalen Auslesesignalen abgeleitet werden, gespeist wird.

[0016] Das erfindungsgemäße Verfahren kann gleichermaßen auf Corioliskreisel angewandt werden, die doppelresonant, nicht-doppelresonant, als Open-Loop-System oder als Closed-Loop-System realisiert sind.

[0017] Erfindungsgemäß werden also die Digital-Analog-Wandler durch einen Pulsmodulator ersetzt. Die Ausgangssignale des Pulsmodulators sind vorzugsweise ternär quantisiert, da für eine Doppelektrodenarchitektur elektrostatischer Kraftgeber, wie sie bei einem doppelresonanten Corioliskreisel zum Einsatz kommen, eine ternäre Quantisierung besonders vorteilhaft ist.

[0018] In einer bevorzugten Ausführungsform wird durch den Pulsmodulator ein erstes und ein zweites jeweils ternär quantisiertes Ausgangssignal erzeugt, wobei das erste Ausgangssignal in eine erste Folge von ternär quantisierten Kraftimpulsen transformiert wird, und das zweite Ausgangssignal in eine zweite Folge von ternär quantisierten Kraftimpulsen umgewandelt wird. Die erste Folge von Kraftimpulsen stellt hierbei denjenigen Teil der Kraftsignale dar, der zur Einstellung gewünschter Amplituden/Frequenzen oder anderer Parameter der Anregungsschwingung dient, wobei die zweite Folge von Kraftimpulsen denjenigen Teil der Kraftsignale darstellt, der zur Einstellung gewünschter Amplituden/Frequenzen oder anderer Parameter der Ausleseschwingung dient.

[0019] Der Pulsmodulator kann beispielsweise so ausgelegt werden, dass die beiden ternär quantisierten Ausgangssignale S_1 , S_2 des Pulsmodulators jeweils die Werte $\{-1, 0, +1\}$ annehmen können, die in geeigneter Weise digital kodiert sind. Die Ausgangssignale werden in geeignete elektrische Spannungsimpulse umgewandelt und an entsprechende stationäre Elektroden angelegt, so dass auf das bewegliche Elektrodengebilde des Corioliskreisels (bewegliche Massen und Rückstellfedern) entweder eine "negative" ($S_1 = -1$), keine ($S_1 = 0$) oder eine "positive" ($S_1 = +1$) Kraft ausgeübt wird. Dies gilt analog für das Ausgangssignal S_2 .

[0020] Die Erzeugung der digitalen Auslesesignale erfolgt vorzugsweise dadurch, dass eine Menge an elektrischer Ladung, die aufgrund der Schwingung des Resonators auf eine bewegliche Elektrode (Mittielektrode) fließt, mittels eines Ladungsverstärkers gemessen wird, ein entsprechendes analoges Ausgangssignal des Ladungsverstärkers in ein digitales Ausgangssignal umgewandelt wird, und über eine Signaltrennung in Abhängigkeit momentaner und/oder zeitlich älterer, ternär quantisierter Ausgangssignalwerte des Pulsmodulators aus dem digitalen Ausgangssignal des Ladungsverstärkers die digitalen Auslesesignale ermittelt werden. Die digitalen Auslesesignale können also nicht allein aus dem digitalen Ausgangssignal des Ladungsverstärkers gewonnen werden, es ist zusätzlich die Information notwendig, die in den ternär quantisierten Ausgangssignalen des Pulsmodulators enthalten ist. Der Begriff "Mittielektrode" bedeutet hier das innere, bewegliche Elektrodengebilde des Corioliskreisels, bestehend aus den beweglichen, in Schwingung versetzbaren Massen und entsprechenden Rückstellfedern, oder zumindest Teile davon.

[0021] Die digitalen Auslesesignale werden in üblicher Weise mittels eines Demodulationsprozesses jeweils in eine Normal- und eine Quadraturkomponente zerlegt. Dann werden mittels eines Regelungsprozesses aus den Normal- und Quadraturkomponenten der digitalen Auslesesignale Normal- und Quadraturkomponenten der digitalen Anregungs-/Kompensationssignale erzeugt, die den Pulsmodulator speisen. Die digitalen Anregungs-/Kompensationssignale werden so geregelt, dass sich die gewünschten Parameterwerte der Anregungsschwingung/Ausleseschwingung einstellen.

[0022] Zur Realisierung des oben beschriebenen Verfahrens stellt die Erfindung eine Auswerte-/Regelelektronik zur Verwendung in einem Corioliskreisel bereit, die folgende Komponenten aufweist:

- eine Einheit zur Erzeugung von Auslesesignalen, die ein Maß für die momentanen Amplituden/Frequenzen oder anderer Parameter der Anregungsschwingung/Ausleseschwingung des Resonators des Corioliskreisels darstellen,
- wenigstens einen Regelkreis, durch den in Abhängigkeit der digitalen Auslesesignale Kraftsignale erzeugt

und auf den Resonator gegeben werden, wobei die Kraftsignale so geregelt werden, dass die Anregungsschwingungs/Ausleseschwingung gewünschte Amplituden/Frequenzen oder andere Parameterwerte annehmen,

– einen Pulsmodulator, der ein Teil des Regelkreises ist, und der mit digitalen Anregungs-/Kompensationssignalen, die aus den digitalen Auslesesignalen abgeleitet werden, gespeist wird, wobei aus quantisierten Ausgangssignalen des Pulsmodulators die Kraftsignale erzeugbar sind.

[0023] Die erfindungsgemäße Auswerte-/Regelelektronik bietet die Vorteile, dass sie kostengünstig und hochminiaturisiert hergestellt werden kann.

[0024] Der erfindungsgemäße Pulsmodulator zur Umwandlung eines komplexen Eingangssignals in ein Pulssignal umfasst eine Subtrahiererstufe, die aus der Differenz des komplexen Eingangssignals und eines Rückkopplungssignals ein Regelabweichungssignal erzeugt. Des Weiteren umfasst der Pulsmodulator eine Signalumwandlungsstufe, die das Regelabweichungssignal in ein Regelsignal umwandelt. In einer ersten Multipliziererstufe wird das Regelsignal mit einem mit der Frequenz ω_0 oszillierenden komplexen Mischsignal multipliziert und so mindestens einer von Realteil und Imaginärteil eines um ω_0 heraufgemischten Regelsignals erzeugt. Darüber hinaus umfasst der Pulsmodulator eine Quantisierungsstufe, die mindestens einen von Realteil und Imaginärteil des um ω_0 heraufgemischten Regelsignals quantisiert und das Pulssignal erzeugt, sowie eine Rückkopplungseinheit, welche ausgehend von dem Pulssignal das Rückkopplungssignal für die Subtrahiererstufe erzeugt.

[0025] Die Funktionsweise des erfindungsgemäßen Pulsmodulators, welcher eine vorteilhafte Modifikation eines klassischen Sigma-Delta-Wandlers darstellt, soll im Folgenden ohne Beschränkung der Allgemeinheit für den Beispielfall eines konstant gehaltenen Eingangssignals erläutert werden. Durch die Subtrahiererstufe und die Signalumwandlungsstufe wird dieses Eingangssignal in ein ebenfalls nur schwach zeitveränderliches Regelsignal umgewandelt. Im Unterschied zu klassischen Sigma-Delta-Wandlern wird dieses Regelsignal aber nun durch die erste Multipliziererstufe mit einem komplexen Mischsignal der Frequenz ω_0 multipliziert, um so ein auf die Frequenz ω_0 heraufgemischtes Regelsignal zu erzeugen. Der Realteil oder der Imaginärteil dieses mit der Frequenz ω_0 oszillierenden Regelsignals wird anschließend durch die Quantisierungsstufe quantisiert, so dass man am Ausgang der Quantisierungsstufe ein reellwertiges Pulssignal mit einer dominanten Frequenzkomponente bei der Frequenz ω_0 erhält. Dieses reellwertige Pulssignal bildet mit Hilfe von positiven oder negativen Pulsen ein sinusoidales Signal der Frequenz ω_0 nach. Dieses Pulssignal stellt gleichzeitig den Ausgangspunkt für die Berechnung des Rückkopplungssignals dar, welches zur Subtrahiererstufe rückgekoppelt wird und dort vom Eingangssignal abgezogen wird, um die Regelabweichung zu ermitteln.

[0026] Zur Erzeugung des Pulssignals ist nicht zwingend erforderlich, sowohl den Realteil als auch den Imaginärteil des um ω_0 heraufgemischten Regelsignals zu berechnen. Wenn das Pulssignal aus dem Realteil des heraufgemischten Regelsignals abgeleitet werden soll, dann muss der Imaginärteil des heraufgemischten Regelsignals nicht zwingend erzeugt werden.

[0027] Der wesentliche Vorteil des erfindungsgemäßen Pulsmodulators gegenüber herkömmlichen Sigma-Delta-Modulatoren ist, dass der Bereich des niedrigen Quantisierungsrauschens von dem Niederfrequenzbereich in der Umgebung von $\omega_0 = 0$ zur Arbeitsfrequenz ω_0 hin verschoben wird. Dies wird durch komplexes Heraufmischen des Regelsignals in der ersten Multipliziererstufe erreicht. Damit erhält man ein Pulssignal, das gerade im relevanten Spektralbereich um ω_0 herum einen niedrigen Rauschpegel aufweist.

[0028] Ausgangspunkt für das Verständnis der Rauschcharakteristik ist, dass die Signalumwandlungsstufe, welche beispielsweise mit Hilfe eines Integrators realisiert werden kann, eine Tiefpass-Charakteristik aufweist. Dies bedeutet, dass höherfrequente Komponenten durch die Signalumwandlungsstufe teilweise unterdrückt werden. Bei klassischen Sigma-Delta-Wandlern verursacht diese Unterdrückung der höherfrequenten Anteile im Regelkreis einen Anstieg des Quantisierungsrauschens bei diesen höheren Frequenzen. Im niederfrequenten Bereich ist das Quantisierungsrauschen dagegen gering. Bei dem erfindungsgemäßen Pulsmodulator wird das am Ausgang der Signalumwandlungsstufe abgreifbare Regelsignal durch eine Multiplikation mit dem komplexen Mischsignal der Frequenz ω_0 auf die Frequenz ω_0 hochgemischt. Damit wird auch der Bereich niedrigen Quantisierungsrauschens von der Frequenz $\omega_0 = 0$ zur Mischfrequenz ω_0 hin verlagert, obwohl die eingangsseitige Signalumwandlungsstufe weiterhin ein nicht hochgemischtes Signal verarbeitet. Auf diese Weise erhält man ein Pulssignal mit einem Rauschpegel, der in der Umgebung von ω_0 gering ist.

[0029] Der erfindungsgemäße Pulsmodulator lässt sich kostengünstig implementieren, benötigt relativ wenig elektrische Leistung und lässt sich auf einfache Weise zusammen mit der digitalen Elektronik integrieren.

[0030] Es ist von Vorteil, wenn der Pulsmodulator einen Inphase-Signalpfad zur Verarbeitung des Realteils des Eingangssignals sowie einen Quadratur-Signalpfad zur Verarbeitung des Imaginärteils des Eingangssignals umfasst. Weiterhin ist es von Vorteil, wenn es sich bei dem Regelabweichungssignal, dem Regelsignal und dem Rückkopplungssignal jeweils um komplexe Signale handelt, die jeweils einen reellen Signalanteil sowie einen imaginären Signalanteil umfassen. Um zu erreichen, dass das reellwertige Pulssignal den Realteil oder Imaginärteil des um ω_0 heraufgemischten Regelsignals phasenrichtig wiedergibt, werden die Subtrahierstufe, die Signalumwandlungsstufe, die erste Multiplizierstufe und die Rückkopplungseinheit als komplexe Signalverarbeitungseinheiten ausgelegt, die jeweils einen Inphase- sowie einen Quadratur-Signalpfad aufweisen. Vom Ausgangssignal der ersten Multiplizierstufe wird aber lediglich der Realteil (oder aber der Imaginärteil) benötigt, um daraus mit Hilfe der Quantisierungsstufe das reellwertige Pulssignal abzuleiten. Die Quantisierungsstufe kann daher als reelle Verarbeitungsstufe ausgelegt sein. In der Rückkopplungseinheit wird das reellwertige Pulssignal dann allerdings wieder in ein komplexes Rückkopplungssignal übersetzt. Mit Hilfe dieser Auslegung des Pulsmodulators kann ein reellwertiges Pulssignal synthetisiert werden, das eine harmonische Schwingung der Frequenz ω_0 mit geringem Phasen- und Amplitudenrauschen phasenrichtig wiedergibt.

[0031] Gemäß einer vorteilhaften Ausführungsform der Erfindung umfasst die Signalumwandlungsstufe eine Integratorstufe, die das Regelabweichungssignal aufsummiert und als Regelsignal ein integriertes Signal erzeugt. Durch Aufintegrieren des Regelabweichungssignals kann erreicht werden, dass das (komplexe) integrierte Signal ständig dem komplexen Eingangssignal nachgeführt wird. Da eine Integratorstufe eine Tiefpasscharakteristik aufweist, erhält man am Ausgang der Integratorstufe ein Regelsignal mit vermindertem Rauschpegel im Bereich um $\omega_0 = 0$. Wenn dieses Regelsignal dann durch die erste Multiplizierstufe heraufgemischt und anschließend quantisiert wird, erhält man ein Pulssignal mit der gewünschten Rauschcharakteristik.

[0032] Es ist von Vorteil, wenn die Integratorstufe einen ersten Integrator für den Inphase-Signalpfad und einen zweiten Integrator für den Quadratur-Signalpfad umfasst, wobei der erste Integrator den Realteil des Regelabweichungssignals aufsummiert, und wobei der zweite Integrator den Imaginärteil des Regelabweichungssignals aufsummiert. Eine komplexe Integratorstufe für das komplexe Regelabweichungssignal kann auf diese Weise mit Hilfe von zwei separaten Integratoren realisiert werden.

[0033] Es ist von Vorteil, wenn die Signalumwandlungsstufe eine Verstärkerstufe umfasst. Der Verstärkungsfaktor wird dabei so gewählt, dass der Quantisierer den richtigen Eingangssignalpegel erhält.

[0034] Gemäß einer weiteren vorteilhaften Ausführungsform der Erfindung umfasst die erste Multiplizierstufe einen ersten Multiplizierer für den Inphase-Signalpfad und einen zweiten Multiplizierer für den Quadratur-Signalpfad. Der erste Multiplizierer multipliziert den Realteil des Regelsignals mit dem Realteil des mit der Frequenz ω_0 oszillierenden komplexen Mischsignals und erzeugt so ein erstes Ergebnissignal. Der zweite Multiplizierer multipliziert den Imaginärteil des Regelsignals mit dem Imaginärteil des mit der Frequenz ω_0 oszillierenden komplexen Mischsignals und erzeugt so ein zweites Ergebnissignal. Gemäß einer weiteren vorteilhaften Ausführungsform umfasst der Pulsmodulator einen Addierer, welcher zur Bestimmung des Realteils des heraufgemischten Regelsignals das erste Ergebnissignal des ersten Multiplizierers und das zweite Ergebnissignal des zweiten Multiplizierers zu einem Summensignal addiert.

[0035] Wenn man annimmt, dass das komplexe Regelsignal die Form $R + j \cdot I$ besitzt, und man das komplexe Mischsignal beispielsweise in der Form $e^{-j\omega_0 t}$ darstellt, dann ergibt sich das erste Ergebnissignal des ersten Multiplizierers zu $R \cdot \cos(\omega_0 t)$. Das zweite Ergebnissignal des zweiten Multiplizierers nimmt die Form $I \cdot \sin(\omega_0 t)$ an, und als Summensignal liefert der Addierer das Signal $R \cdot \cos(\omega_0 t) + I \cdot \sin(\omega_0 t)$. Dieses Signal entspricht aber genau dem Realteil von

$$(R + j \cdot I) \cdot e^{-j\omega_0 t} .$$

Mittels des ersten Multiplizierers, des zweiten Multiplizierers und des Addierers kann so der Realteil der komplexen Multiplikation von Regelsignal und Mischsignal ermittelt werden.

[0036] Gemäß einer vorteilhaften Ausführungsform der Erfindung wird das vom Addierer gelieferte Summensignal dann von der Quantisierungsstufe quantisiert, um so das reellwertige Pulssignal zu erzeugen.

[0037] Dabei ist es von Vorteil, wenn zum Eingangssignal der Quantisierungsstufe ein Rauschpegel addiert wird. Der Pulsmodulator wird mit einer Abtastfrequenz ω_A getaktet, die deutlich höher sein muss als die Mischfrequenz ω_0 . Bei bestimmten Verhältnissen von ω_0 zu ω_A bilden sich im Pulsmodulator Kippschwingungen, die

als zusätzliche Peaks im Frequenzspektrum des Pulssignals erkennbar sind. Indem man zum Eingangssignal des Quantisierers ein Rauschsignal addiert, wird das Ergebnis der Quantisierung statistisch gerundet. Mit Hilfe dieses Tricks kann die Ausbildung von Kippschwingungen verhindert werden.

[0038] Die Quantisierungsstufe führt vorzugsweise eine binäre Quantisierung oder eine ternäre Quantisierung ihres jeweiligen Eingangssignals durch. Bei der binären Quantisierung kann das Pulssignal lediglich die Werte 0 und 1 annehmen. Man erhält daher ein Pulssignal, das lediglich positive Spannungspulse enthält. Ein ternär quantisiertes Pulssignal kann die Werte -1 , 0 , 1 annehmen. Ein derartiges Pulssignal umfasst daher sowohl positive als auch negative Spannungspulse. Eine ternäre Quantisierung wird daher immer dann durchgeführt, wenn ein Pulssignal mit sowohl positiven als auch negativen Pulsen benötigt wird.

[0039] Vorzugsweise umfasst die Rückkopplungseinheit eine zweite Multipliziererstufe, die das Pulssignal mit einem mit der Frequenz ω_0 oszillierenden konjugiert komplexen Mischsignal multipliziert und so das um ω_0 heruntergemischte Rückkopplungssignal für den Subtrahierer erzeugt. Das Pulssignal wurde durch Quantisierung des Realteils des heraufgemischten Regelsignals erzeugt und besitzt daher bei der Frequenz ω_0 seine dominierende Frequenzkomponente. Bevor das Pulssignal als Rückkopplungssignal verwendet werden kann, muss es daher wieder ins Basisband heruntergemischt werden. Zu diesem Zweck wird das Pulssignal mit einem konjugiert komplexen Mischsignal der Frequenz ω_0 multipliziert, um so ein heruntergemischtes komplexes Rückkopplungssignal zu erhalten.

[0040] Vorzugsweise umfasst die zweite Multipliziererstufe einen dritten Multiplizierer zur Erzeugung des Realteils des Rückkopplungssignals und einen vierten Multiplizierer zur Erzeugung des Imaginärteils des Rückkopplungssignals. Der dritte Multiplizierer multipliziert das Pulssignal mit dem Realteil des mit der Frequenz ω_0 oszillierenden konjugiert komplexen Mischsignals, und der vierte Multiplizierer multipliziert das Pulssignal mit dem Imaginärteil des konjugiert komplexen Mischsignals der Frequenz ω_0 . Um die bei der Frequenz ω_0 befindliche Frequenzkomponente des Pulssignals in die richtige Richtung zu verschieben, muss die Multiplikation des Pulssignals mit dem Mischsignal im Komplexen durchgeführt werden. Bei dem Pulssignal $y(t)$ handelt es sich um ein reelles Signal, während das konjugiert komplexe Mischsignal in der Form $e^{+j\omega_0 t}$ dargestellt werden kann. Die komplexe Multiplikation liefert daher ein komplexes Rückkopplungssignal mit dem Realteil $y(t) \cdot \cos(\omega_0 t)$ und dem Imaginärteil $y(t) \cdot \sin(\omega_0 t)$.

[0041] Vorzugsweise wird der Pulsmodulator mit einer Abtastfrequenz ω_A betrieben, welche 2 bis 1000 mal höher ist als die Mischfrequenz ω_0 . Dies ist notwendig, um hinsichtlich der heraufgemischten Signale die Nyquist-Bedingung zu erfüllen.

[0042] Gemäß einer weiteren vorteilhaften Ausführungsform ist der Pulsmodulator mit Hilfe eines digitalen Signalprozessors (DSP) implementiert. Sämtliche für den Betrieb des Pulsmodulators erforderlichen Operationen lassen sich mit Hilfe von Signalverarbeitungsroutinen programmieren.

[0043] Die erfindungsgemäße Ansteuerschaltung für einen mikromechanischen Resonator umfasst mindestens einen Pulsmodulator der oben beschriebenen Art. Vorzugsweise wird das von dem mindestens einen Pulsmodulator erzeugte Pulssignal zur elektrostatischen Schwingungsanregung des Resonators verwendet. Das erzeugte Pulssignal kann direkt mit den Anregungselektroden des Resonators verbunden werden. Dabei ist es von Vorteil, wenn die Mischfrequenz ω_0 des Pulsmodulators einer Resonanzfrequenz des Resonators entspricht, denn dann ist eine effektive Anregung des Schwingers gewährleistet.

[0044] Ein erfindungsgemäßer Frequenzgenerator zur Synthese eines Pulssignals mit vorgegebener Frequenz und Phase umfasst mindestens einen Pulsmodulator der oben beschriebenen Art. Mit dem erfindungsgemäßen Pulsmodulator kann zu einer vorgegebenen Frequenz und Phase ein entsprechendes Pulssignal $y(t)$ erzeugt werden. Dabei kann die Phasenlage des erzeugten Pulssignals über das Verhältnis von Realteil und Imaginärteil des Eingangssignals $x(t)$ sehr genau vorgegeben werden. Das erzeugte Pulssignal weist in der Umgebung von ω_0 einen geringen Rauschpegel auf.

[0045] Gemäß einer weiteren vorteilhaften Ausführungsform ist dem Pulsmodulator ein Bandpassfilter nachgeschaltet. Mit diesem nachgeschalteten Bandpass lassen sich die weiter von ω_0 entfernten Frequenzanteile wegfiltren, in denen der Rauschpegel hoch ist.

Ausführungsbeispiel

[0046] Die Erfindung und weitere vorteilhafte Einzelheiten werden nachfolgend unter Bezug auf die Zeichnun-

gen in beispielhaften Ausführungsformen näher erläutert. Es zeigen:

[0047] **Fig. 1** die erfindungsgemäße Auswerte-/Regelelektronik und das erfindungsgemäße Verfahren in einer bevorzugten Ausführungsform.

[0048] **Fig. 2** den schematischen Aufbau eines herkömmlichen Corioliskreisels.

[0049] **Fig. 3** ein komplexes Blockschaltbild des erfindungsgemäßen Pulsmodulators;

[0050] **Fig. 4** ein Blockdiagramm des Pulsmodulators, in dem der Inphase- und der Quadraturpfad separat eingezeichnet sind;

[0051] **Fig. 5** ein ternär quantisiertes Pulssignal $y(t)$;

[0052] **Fig. 6** ein Frequenzspektrum des am Ausgang des Quantisierers erhaltenen Pulssignals $y(t)$;

[0053] **Fig. 7** das Frequenzspektrum von **Fig. 6** nach einer Filterung durch einen mikromechanischen Schwinger;

[0054] **Fig. 8** ein Frequenzspektrum eines Pulssignals $y(t)$, das für ein Verhältnis von Mischfrequenz zu Abtastfrequenz von $\omega_0/\omega_A = 0,25$ aufgezeichnet wurde;

[0055] **Fig. 9** einen Pulsmodulator mit statistischer Rundung;

[0056] **Fig. 10** das Frequenzspektrum von **Fig. 8** bei Durchführung einer statistischen Rundung; und

[0057] **Fig. 11** ein Blockdiagramm eines zweidimensionalen Pulsmodulators.

[0058] **Fig. 1** zeigt eine Auswerte-/Regelelektronik **30**, die einen Ladungsverstärker **31**, einen Analog-Digital-Wandler **32**, eine Signaltrennung **33**, einen ersten Demodulator **34**, einen zweiten Demodulator **35**, ein Regelsystem **36**, einen zweidimensionalen Pulsmodulator **37**, eine erste und zweite Kraftimpuls-Umwandlungseinheit **38**, **39**, und eine erste bis vierte Kraftgeberelektrode **40₁** bis **40₄** aufweist.

[0059] Die Gesamtheit der mit Bezugsziffern **31** bis **40** gekennzeichneten Bauteile bildet zwei Regelkreise: Einen Regelkreis zur Einstellung der Amplituden/Frequenzen der Anregungsschwingung und einen weiteren Regelkreis zur Einstellung der Amplituden/Frequenzen der Ausleseschwingung.

[0060] Wie **Fig. 1** zeigt, weist die erfindungsgemäße Schaltung lediglich einen Analog-Digital-Wandler **32** und keine Digital-Analog-Wandler auf. Die Digital-Analog-Wandler sind hier durch den zweidimensionalen Pulsmodulator **37** sowie die beiden Kraftimpuls-Umwandlungseinheiten **38**, **39** ersetzt.

[0061] Im Folgenden soll die Funktionsweise der erfindungsgemäßen Auswerte-/Regelelektronik näher erläutert werden.

[0062] Um die Amplituden/Frequenzen der Anregungsschwingung/Ausleseschwingung des Resonators **2** einzustellen, erzeugt der zweidimensionale Pulsmodulator **37** ein erstes und ein zweites ternär quantisiertes Ausgangssignal S_1 , S_2 , wobei das erste ternär quantisierte Ausgangssignal S_1 in der ersten Kraftimpuls-Umwandlungseinheit **38** in Kraftimpulssignale (Spannungssignale) S_3 und S_4 umgewandelt wird. Entsprechend wird das zweite ternär quantisierte Ausgangssignal S_2 durch die zweite Kraftimpuls-Umwandlungseinheit **39** in Kraftimpulssignale (Spannungssignale) S_5 , S_6 umgewandelt. Vorzugsweise können die ternär quantisierten Ausgangssignale S_1 , S_2 jeweils die Werte 1, 0 und -1 annehmen. Hat das Signal S_1 beispielsweise den Wert $+1$ so erzeugt die erste Kraftimpuls-Umwandlungseinheit aus dem Signal S_1 zwei Kraftimpulssignale S_3 und S_4 , die einen Kraftimpuls hervorrufen. Diese Kraftimpulssignale S_3 und S_4 erzeugen zwischen der zweiten und vierten der Kraftgeberelektrode **40₂**, **40₄** bzw. zwischen den Kraftgeberelektroden **40₂**, **40₄** und dem Resonator **2** elektromagnetische Felder, über die die Kraftimpulse bewirkt werden. Hat das Signal S_1 den Wert -1 , so werden die Kraftimpulssignale S_3 und S_4 so erzeugt, dass die Feldlinien der resultierenden elektromagnetischen Felder entgegengesetzt zu den Feldlinien im Fall $S_1 = 1$ verlaufen. Hat das Signal S_1 den Wert 0, liegt zwischen der zweiten und vierten Kraftgeberelektrode **40₂**, **40₄** bzw. zwischen den Kraftgeberelektroden **40₂**, **40₄** und dem Resonator **2** kein elektrisches Feld an.

[0063] Entsprechend der folgenden Tabelle werden also beispielsweise folgende Potenziale (0 bzw. U_0) an die zweite und vierte Kraftgeberelektrode **40₂**, **40₄** angelegt:

S_1	40₄	40₂
-1	0	U_0
0	0	0
1	U_0	0

[0064] Entsprechende Überlegungen gelten auch für das zweite ternär quantisierte Ausgangssignal S_2 , das durch die zweite Kraftimpulsumwandlungseinheit **39** in ein fünftes und sechstes Kraftimpulssignal S_5 , S_6 umgewandelt wird, die an die erste und dritte Kraftgeberelektrode **40₁**, **40₃** angelegt werden. Beispielsweise werden über die Kraftgeberelektroden **40₂**, **40₄** die Parameter der Anregungsschwingung, und über die Kraftgeberelektroden **40₁**, **40₃** die Parameter der Ausleseschwingung eingestellt/geregelt.

[0065] Durch das Anlegen elektrischer Felder an die Kraftgeberelektroden **40₁**, **40₄** wird zusätzlich zur Anregung des Resonators **2** auch bewirkt, dass elektrische Ladung auf eine bewegliche Mittelelektrode fließt. Diese Ladung wird über den Ladungsverstärker **31** gemessen, ein entsprechendes analoges Ausgangssignal S_7 durch den Analog-Digital-Wandler **32** in ein entsprechendes digitales Signal S_8 umgewandelt, aus dem durch die Signaltrennung **33** ein erstes digitales Auslesesignal S_9 und ein zweites digitales Auslesesignal S_{10} erzeugt wird. Da die auf die Mittelelektrode geflossene Ladung von den Kapazitäten derjenigen Kraftgeberelektroden **40₁**, **40₄** abhängig ist, an denen momentan ein elektrisches Feld anliegt, ist die geflossene Ladung ein Maß für die Amplituden/Frequenzen/sonstige Parameter der Anregungsschwingung/Ausleseschwingung des Resonators **2**. Daher kann durch die Signaltrennung **33** in Abhängigkeit momentaner und/oder zeitlich älterer Ausgangssignalwerte der ternär quantisierten Ausgangssignale S_1 , S_2 die momentane Bewegung/Änderung der Bewegung des Resonators **2** rekonstruiert werden.

[0066] Vorteilhafterweise ist der zweidimensionale Pulsmodulator **37** so ausgelegt, dass sich die ternär quantisierten Ausgangssignale S_1 und S_2 niemals gleichzeitig ändern, da in der Regel die auf die Mittelelektrode fließende Ladung summarisch gemessen wird, d. h., dass Ladungsverschiebungen, die aus einer Überlagerung von zwei elektrischen Feldern resultieren, nur als Ganzes gemessen werden können, also nicht Teilen der Ladungsverschiebung einzelner elektrischer Felder zugeordnet werden kann. Die Zusatzbedingung zwischen den ternär quantisierten Ausgangssignalen S_1 und S_2 erlaubt es dann, eine eindeutige Zuordnung der geflossenen Ladung zu einem bestimmten elektrischen Feld zu erhalten, so dass genau zwischen Anregungsschwingung und Ausleseschwingung unterschieden werden kann. Eine weitere mögliche Bedingung in diesem Zusammenhang ist, festzulegen, dass zu einem bestimmten Zeitpunkt nur eines der beiden Signale S_1 und S_2 von Null verschiedene Werte annehmen darf.

[0067] Das erste digitale Auslesesignal S_9 wird durch den ersten Demodulator **34** in einen Realteil S_{11} und einen Imaginärteil S_{12} demoduliert. Analog hierzu wird das zweite digitale Auslesesignal S_{10} durch den zweiten Demodulator **35** in einen Realteil S_{13} und einen Imaginärteil S_{14} demoduliert. Beispielsweise beinhaltet das erste digitale Auslesesignal S_9 Information über die Anregungsschwingung und das zweite digitale Auslesesignal S_{10} Information über die Ausleseschwingung. Die Real- und Imaginärteile S_{11} bis S_{14} des ersten und zweiten digitalen Auslesesignals S_9 , S_{10} beaufschlagen das Regelsystem **36**, das in Abhängigkeit dieser Signale Anregungs-/Kompensationssignale S_{15} bis S_{18} erzeugt. Beispielsweise stellt das Signal S_{15} den Realteil und das Signal S_{16} den Imaginärteil des digitalen Anregungs-/Kompensationssignals für die Anregungsschwingung dar, wohingegen das Signal S_{17} den Realteil und das Signal S_{18} den Imaginärteil eines digitalen Anregungs-/Kompensationssignals für die Ausleseschwingung darstellt.

[0068] Die digitalen Anregungs-/Kompensationssignale S_{15} bis S_{18} werden dem zweidimensionalen Pulsmodulator **37** zugeführt, der daraus die ternär quantisierten Ausgangssignale S_1 , S_2 erzeugt.

[0069] Fig. 3 zeigt ein Blockschaltbild des erfindungsgemäßen Pulsmodulators in komplexer Darstellung. Das komplexe Eingangssignal $x(t)$ umfasst einen Realteil sowie einen Imaginärteil, welche beide als digitale Werte repräsentiert werden. Im Addiererknoten **51** wird von dem komplexen Eingangssignal $x(t)$ das komplexe Rückkopplungssignal **52** subtrahiert, wobei die Differenz dieser beiden komplexen Signale die Regelabweichung darstellt. Außerdem wird im Addiererknoten **51** der (ebenfalls komplexe) Inhalt des Verzögerungsglieds **53** zu dieser Differenz dazu addiert. Der Inhalt des Verzögerungsglieds **53** wird über die Signalleitung **54** zum Addiererknoten **51** geführt. Das Verzögerungsglied **53** bildet mit der Signalleitung **54** zusammen eine komplexe Integratorstufe, welche die komplexe Regelabweichung, also die Differenz von Eingangssignal und Rück-

kopplungssignal aufintegriert. Das aufintegrierte Signal **55** wird in der Verstärkerstufe **56** entsprechend dem Faktor „a“ verstärkt, und das verstärkte Signal **57** wird der ersten Multipliziererstufe **58** zugeführt. Dort wird das verstärkte Signal **57** mit dem komplexen Mischsignal $e^{-j\omega_0 t}$ multipliziert, um so das auf die Frequenz ω_0 heraufgemischte Signal **59** zu erhalten. Der Block **60** ermittelt den Realteil des komplexen heraufgemischten Signals **59**, und der so erhaltene Realteil **61** des heraufgemischten Signals wird dem Quantisierer **62** zur Verfügung gestellt.

[0070] Bei der in **Fig. 3** gezeigten Ausführungsform ist der Quantisierer **62** als ternärer Quantisierer ausgeführt, welcher das jeweilige Eingangssignal mit Hilfe von Komparatoren in die drei möglichen Werte $-1, 0, +1$ eines Pulssignals umsetzt. Das auf diese Weise erzeugte quantisierte Pulssignal $y(t)$ kann am Ausgang des Quantisierers **62** abgegriffen werden. Zur Erzeugung des komplexen Rückkopplungssignals **52** wird das reellwertige Pulssignal $y(t)$ in der zweiten Multipliziererstufe **63** mit dem konjugiert komplexen Mischsignal $e^{+j\omega_0 t}$ multipliziert. Das auf diese Weise durch Multiplikation einer reellen und einer komplexen Zahl erhaltene komplexe Rückkopplungssignal **52** wird dem Addierer **51** am Eingang der Schaltung zugeführt.

[0071] Die in **Fig. 3** dargestellte Abfolge von funktionalen Einheiten lässt sich mittels eines digitalen Signalprozessors (DSP) oder aber mittels einer speziell hierfür vorgesehenen Hardware implementieren. Die digitale Signalverarbeitung muss dabei mit einer Abtastfrequenz ω_A durchgeführt werden, welche deutlich höher ist als die Frequenz ω_0 des komplexen Mischsignals. Beispielsweise kann als Abtastfrequenz ω_A das 2- bis 1000-fache der Mischfrequenz ω_0 verwendet werden.

[0072] In **Fig. 4** ist der Pulsmodulator von **Fig. 3** noch einmal dargestellt, wobei hier der Inphase-Signalfad und der Quadratur-Signalfad separat eingezeichnet sind. Die obere Hälfte von **Fig. 4** stellt den Inphase-Signalfad **64** dar, der den Realteil R des Eingangssignals $x(t)$ verarbeitet. Die untere Hälfte von **Fig. 4** zeigt den Quadratur-Signalfad **65** zur Verarbeitung des Imaginärteils I des Eingangssignals. Im Addierer **66** des Inphase-Signalfads wird der Realteil der Regelabweichung als Differenz des Realteils R des Eingangssignals und des Realteils **67** des Rückkopplungssignals ermittelt. Zu dieser Regelabweichung wird der bisher im Verzögerungsglied **68** gespeicherte Integratorwert addiert, der über die Signalleitung **69** dem Addierer **66** zugeführt wird. Das Verzögerungsglied **68** bildet zusammen mit der Signalleitung **69** einen Integrator mit der Übertragungsfunktion

$$H(z) = \frac{1}{1 - z^{-1}}.$$

Durch Addition des Realteils der Regelabweichung zu dem bisherigen Integratorwert wird ein neuer Integratorwert erhalten, der wiederum im Verzögerungsglied **68** gespeichert wird. Das aufintegrierte Signal **70** des Inphase-Signalfads wird durch den Verstärker **71** mit dem Faktor „a“ skaliert, und gelangt, als verstärktes Signal **72**, zum ersten Multiplizierer **73**. Der erste Multiplizierer **73** multipliziert das reellwertige verstärkte Signal **72** mit dem reellen Signal $\cos(\omega_0 t)$, also mit dem Realteil von $e^{-j\omega_0 t}$. Der erste Multiplizierer **73** ermittelt das Produkt $R \cdot \cos(\omega_0 t)$, welches als Signal **74** dem Addierer **75** zugeführt wird.

[0073] Der Quadratur-Signalfad **65** des Pulsmodulators umfasst einen Addierer **76**, in dem die Differenz des Imaginärteils I des Eingangssignals und des Imaginärteils **77** des Rückkopplungssignals berechnet wird. Diese Differenz, die dem Imaginärteil der Regelabweichung entspricht, wird zu dem bisherigen Inhalt des Verzögerungsglieds **78** addiert, der dem Addierer **76** über die Signalleitung **79** zugeführt wird. Der als Summe des bisherigen Werts und des Imaginärteils der Regelabweichung erhaltene neue Wert wird in das Verzögerungsglied **78** eingeschrieben. Das Verzögerungsglied **78** bildet zusammen mit der Signalleitung **79** einen Integrator mit der Übertragungsfunktion

$$H(z) = \frac{1}{1 - z^{-1}}.$$

Am Ausgang dieses Integrators erhält man das aufintegrierte Signal **80** des Quadratur-Signalfads, welches durch den Verstärker **81** mit dem Faktor „a“ skaliert wird. Das so erhaltene verstärkte Signal **82** des Quadratur-Signalfads wird anschließend im zweiten Multiplizierer **83** mit dem Signal $\sin(\omega_0 t)$ multipliziert. Das so erhaltene Produkt $I \cdot \sin(\omega_0 t)$ wird, als Signal **84**, dem Addierer **75** zugeführt. Der Addierer **75** addiert die Signale $R \cdot \cos(\omega_0 t)$ und $I \cdot \sin(\omega_0 t)$ und erzeugt an seinem Ausgang das Signal $R \cdot \cos(\omega_0 t) + I \cdot \sin(\omega_0 t)$ als Signal **85**. Dieses Signal **85** entspricht aber genau dem Realteil des heraufgemischten Signals, denn die komplexe Multiplikation von $x(t)$ und $e^{-j\omega_0 t}$ liefert:

$$\begin{aligned}
 x(t) \cdot e^{-j\omega_0 t} &= \\
 &= (R + j \cdot I) \cdot (\cos(\omega_0 t) - j \cdot \sin(\omega_0 t)) = \\
 &= [R \cdot \cos(\omega_0 t) + I \cdot \sin(\omega_0 t)] + j \cdot [I \cdot \cos(\omega_0 t) - R \cdot \sin(\omega_0 t)]
 \end{aligned}$$

und der Realteil dieses Signals ergibt sich zu $R \cdot \cos(\omega_0 t) + I \cdot \sin(\omega_0 t)$. Daher stellt das Signal **85** den Realteil des komplexwertigen heraufgemischten Signals dar und entspricht insofern dem in **Fig. 3** dargestellten Signal **61**.

[0074] Das digitale reellwertige Signal **85** wird dem Quantisierer **86** zugeführt, der dieses Eingangssignal in das quantisierte Pulssignal $y(t)$ umsetzt. Der im Beispiel von **Fig. 3** und **Fig. 4** gezeigte dreistufige (ternäre) Quantisierer quantisiert das Eingangssignal entsprechend $y(t) \in \{-1; 0; +1\}$. Hierzu weist der Quantisierer **86** Komparatoren auf, die den Signalpegel des Signals **85** ständig mit vorgegebenen Schwellwerten vergleichen. Entsprechend dem Ergebnis dieser Vergleiche wird dem Ausgangssignal $y(t)$ jeweils einer der Werte -1 ; 0 ; $+1$ als aktueller Signalwert zugewiesen. Anstelle der dreistufigen (ternären) Quantisierung können in Abhängigkeit vom Einsatzzweck beliebige andere Quantisierungen zum Einsatz kommen, z. B. zweistufige (binäre) oder mehrstufige Quantisierungen.

[0075] Aus dem quantisierten Pulssignal $y(t)$ werden der Realteil **67** sowie der Imaginärteil **77** des komplexwertigen Rückkopplungssignals abgeleitet. Dazu wird das Pulssignal $y(t)$ mit dem konjugiert komplexen Mischsignal $e^{+j\omega_0 t}$ multipliziert:

$$y(t) \cdot e^{j\omega_0 t} = y(t) \cdot \cos(\omega_0 t) + j \cdot y(t) \cdot \sin(\omega_0 t)$$

[0076] Der Realteil $y(t) \cdot \cos(\omega_0 t)$ des komplexwertigen Rückkopplungssignals wird vom dritten Multiplizierer **87** erzeugt, der das Pulssignal $y(t)$ mit dem $\cos(\omega_0 t)$ multipliziert. Am Ausgang des dritten Multiplizierers **87** erhält man daher den Realteil **67** des Rückkopplungssignals, der zum Addiererknotten **66** zurückgeführt wird. Um den Imaginärteil $y(t) \cdot \sin(\omega_0 t)$ des komplexen Rückkopplungssignals zu erzeugen, wird im vierten Multiplizierer **88** das Pulssignal $y(t)$ mit $\sin(\omega_0 t)$ multipliziert. Am Ausgang des vierten Multiplizierers **88** erhält man den Imaginärteil **77** des Rückkopplungssignals, der zum Addiererknotten **76** zurückgeführt wird.

[0077] In den Ausführungsbeispielen der **Fig. 3** und **4** sind eingangsseitig Integratoren vorgesehen, die die Regelabweichung zwischen Eingangssignal und Rückkopplungssignal aufsummieren und so ein aufintegriertes Signal erzeugen. Die Übertragungsfunktion $H(z)$ eines Integrators kann geschrieben werden als

$$H(z) = \frac{1}{1 - z^{-1}}$$

Anstelle der Integratoren können eingangsseitig auch andere Signalumformungsstufen mit anderen Übertragungsfunktionen $H(z)$ eingesetzt werden. Beispielsweise könnten Übertragungsfunktionen $H(z)$ von höherer Ordnung verwendet werden, wobei jedoch

$$\lim_{z \rightarrow 1} H(z) = \infty$$

gelten sollte. Die Übertragungsfunktion $H(z)$ sollte also für den Fall, dass sich die Frequenz ω dem Wert Null ($z \rightarrow 1$) annähert, gegen Unendlich gehen. Die zusätzlichen freien Parameter von $H(z)$ können dazu verwendet werden, bestimmte Eigenschaften des Modulators (z. B. das Signal-Rausch-Verhältnis) oder des Gesamtsystems zu optimieren.

[0078] In **Fig. 5** ist der zeitliche Verlauf des am Ausgang des Quantisierers abgreifbaren Pulssignals $y(t)$ für den Fall einer ternären Quantisierung mit $y(t) \in \{-1; 0; +1\}$ dargestellt, welcher mit Hilfe einer Computersimulation ermittelt wurde. Dabei wurde der Realteil R des komplexen Eingangssignals auf $0,3$ gesetzt, während der Imaginärteil I des Eingangssignals gleich Null gesetzt wurde. Das Eingangssignal $x(t)$ ist daher konstant und variiert nicht als Funktion der Zeit. Die Abtastfrequenz ω_A ist fünfmal so hoch wie die Mischfrequenz, $\omega_0/\omega_A = 0,2$. Auf der Abszisse sind die Takte der Abtastfrequenz ω_A dargestellt, die von 5000 bis 5100 durchnummeriert sind. Während jedes Takts nimmt das Pulssignal $y(t)$ einen der drei möglichen Werte -1 ; 0 ; $+1$ an. Der jeweilige Wert von $y(t)$ während eines bestimmten Takts der Abtastfrequenz ist in Richtung der Ordinate aufgetragen.

[0079] Wenn man eine Spektralanalyse (FFT) des in **Fig. 5** dargestellten Pulssignals durchführt, erhält man das in **Fig. 6** gezeigte Spektrum. Auf der Abszisse ist die Frequenz der jeweiligen spektralen Komponenten in willkürlichen FFT-Einheiten angegeben, während in Richtung der Ordinate die Signalintensität in dB aufgetra-

gen ist. Bei der Frequenz ω_0 ist ein Peak der spektralen Verteilung zu erkennen. Außerdem lässt sich feststellen, dass der Rauschpegel in der Umgebung der Frequenz ω_0 deutlich niedriger ist als im restlichen Teil des Spektrums. Bei einem klassischen Sigma-Delta-Modulator wäre der Rauschpegel dagegen bei niedrigen Frequenzen deutlich vermindert, also in der Nähe der Frequenz $\omega = 0$. Bei dem erfindungsgemäßen Pulsmodulator wird das aufintegrierte und verstärkte Signal mittels einer komplexen Multiplikation auf die Mischfrequenz ω_0 heraufgemischt. Dadurch wird auch der Spektralbereich, in dem das Rauschen verringert ist, zur Mischfrequenz ω_0 hin verlagert, und deshalb erhält man die in **Fig. 6** gezeigte Rauschcharakteristik.

[0080] Der erfindungsgemäße Pulsmodulator kann zur digitalen Synthese eines Pulssignals verwendet werden, wobei die spektrale Hauptkomponente des Impulssignals durch die Mischfrequenz ω_0 vorgegeben werden kann. Über das Verhältnis von Realteil zu Imaginärteil des Eingangssignals kann die Phasenlage des erzeugten Pulssignals exakt eingestellt werden, und man erhält ein phasenstabiles Pulssignal. Bei Verwendung des erfindungsgemäßen Pulsmodulators zur Frequenzsynthese sollte das Pulssignal $y(t)$ mittels eines elektrischen Bandfilters gefiltert werden, dessen Durchlassbereich um die Frequenz ω_0 zentriert ist. Mit Hilfe dieses Bandpasses, der beispielsweise als Quarz- bzw. Keramikfilter ausgeführt sein kann, können weiter von ω_0 entfernte Spektralbereiche unterdrückt werden, in denen der Rauschpegel unerwünscht hoch ist. Mittels eines derartigen Bandpasses lässt sich das Signal-Rausch-Verhältnis signifikant verbessern.

[0081] Der erfindungsgemäße Pulsmodulator eignet sich unter anderem dazu, elektromechanische Schwinger zu harmonischen Schwingungen anzuregen. Insbesondere mittels eines ternär quantisierten Pulssignals, welches an die Anregungselektroden eines mikromechanischen Resonators angelegt wird, können die für die Schwingungsanregung erforderlichen elektrostatischen Kräfte erzeugt werden. Die Frequenz ω_0 des Pulssignals $y(t)$ wird dabei bevorzugterweise gleich der Resonanzfrequenz des mikromechanischen Schwingers gewählt. Wenn das in **Fig. 5** und **Fig. 6** dargestellte Pulssignal zur harmonischen Anregung eines Schwingers hoher Güte (beispielsweise der Güte 10^4) verwendet wird, dessen Resonanzfrequenz der Anregungsfrequenz ω_0 entspricht, dann wird der überwiegende Teil des Quantisierungsrauschens vom Schwinger selbst weggefiltert. Insbesondere das Quantisierungsrauschen in weiter von der Resonanzfrequenz ω_0 entfernten Spektralbereichen wird durch den Schwinger selbst unterdrückt. Das so erhaltene gefilterte Spektrum ist in **Fig. 7** gezeigt.

[0082] Es gibt bestimmte Verhältnisse der Frequenzen ω_0/ω_A , bei denen sich das rauschartige Quantisierungsprodukt in $y(t)$ in eine Reihe von mehr oder weniger periodischen Funktionen wandelt. Als Beispiel hierzu ist in **Fig. 8** ein Frequenzspektrum gezeigt, welches für das Verhältnis $\omega_0/\omega_A = 0,25$ erhalten wurde. Neben dem Peak bei der Frequenz ω_0 sind eine Reihe von Spektrallinien **89**, **90**, **91**, etc. erkennbar. Die Ursache für das Entstehen dieser Spektrallinien ist, dass der Quantisierer ein stark nicht-lineares Glied des Regelkreises ist, denn dadurch werden im Regelkreis bei bestimmten Frequenzverhältnissen Kippschwingungen angeregt. Dieses Verhalten des Regelkreises ist von klassischen Delta-Sigma-Wandlern her bekannt.

[0083] Um das Entstehen der Kippschwingungen zu verhindern, kann man die mittlere Linearität des Quantisierers verbessern, indem ein Rauschsignal zum Eingangssignal des Quantisierers addiert wird. Vorzugsweise wird hierzu ein spektral gleichverteiltes Rauschsignal verwendet. **Fig. 9** zeigt das Blockschaltbild eines entsprechend modifizierten Pulsmodulators. Gegenüber dem in **Fig. 4** gezeigten Blockschaltbild umfasst der in **Fig. 9** gezeigte Pulsmodulator zusätzlich einen Rauschgenerator **92**, der ein Rauschsignal **93** erzeugt. Außerdem sind die in **Fig. 4** gezeigten Integratoren verallgemeinert als Signalumwandlungsstufen **94**, **95** mit der Überfunktion $H(z)$ dargestellt. Ansonsten stimmen die in **Fig. 9** gezeigten Baugruppen mit den Elementen des Blockschaltbilds von **Fig. 4** überein. Das Rauschsignal **93** wird dem Addierer **75** zugeführt und dort zu den Signalen **74** und **84** addiert. Das Signal **85** am Eingang des Quantisierers **86** ist deshalb von einem Rauschsignal überlagert, und dies führt letztlich zu einer statistischen Rundung bei der Quantisierung. In **Fig. 10** ist das Frequenzspektrum eines Pulssignals $y(t)$ gezeigt, das mit Hilfe eines gemäß **Fig. 9** modifizierten Pulsmodulators erzeugt wurde. Obwohl das Frequenzverhältnis ω_0/ω_A wieder gleich 0,25 ist, kommt es nicht zur Ausbildung von Kippschwingungen.

[0084] Der erfindungsgemäße Pulsmodulator lässt sich insbesondere zur elektrostatischen Anregung von mikromechanischen Schwingern verwenden. Hierzu kann beispielsweise ein ternär quantisiertes Pulssignal der in **Fig. 5** gezeigten Art mit den Anregungselektroden eines mikromechanischen Resonators verbunden werden. Das in **Fig. 5** gezeigte Pulssignal repräsentiert ein sinusoidales Signal der Frequenz ω_0 . Mit einem derartigen Pulssignal kann daher ein mikromechanischer Resonator zu harmonischen Schwingungen der Frequenz ω_0 angeregt werden, und zwar insbesondere dann, wenn die Frequenz ω_0 des Pulssignals zumindest ungefähr der Resonanzfrequenz des Schwingers entspricht.

[0085] Für die Anwendung in Drehratensensoren bzw. Coriolis-Kreiseln werden Resonatoren verwendet, die in zwei zueinander senkrechten Richtungen y_1 und y_2 schwingen können. Zur elektrostatischen Anregung eines Resonators mit zwei Freiheitsgraden kann vorzugsweise der in **Fig. 11** gezeigte zweidimensionale Pulsmodulator verwendet werden. Der zweidimensionale Pulsmodulator umfasst einen ersten Pulsmodulator **96**, der aus dem komplexen Eingangssignal R_1, I_1 das Pulssignal $y_1(t)$ erzeugt, das zur Anregung des Resonators in y_1 -Richtung dient. Mit dem zweiten Pulsmodulator **97** wird aus dem komplexen Eingangssignal R_2, I_2 das Pulssignal $y_2(t)$ erzeugt, mit dem der Schwinger zu Schwingungen in y_2 -Richtung angeregt wird. Sowohl beim ersten Pulsmodulator **96** als auch beim zweiten Pulsmodulator **97** handelt es sich um einen Pulsmodulator mit statistischer Rundung gemäß **Fig. 9**. Eine Darstellung des Aufbaus und der Funktionsweise des ersten und des zweiten Pulsmodulators **96, 97** kann deshalb der Figurenbeschreibung zu den **Fig. 4** und **9** entnommen werden. Allerdings weist der in **Fig. 11** gezeigte zweidimensionale Pulsmodulator einen für beide Kanäle gemeinsamen 2D-Quantisierer **98** auf, der das Signal **99** des ersten Pulsmodulators **96** in das quantisierte Pulssignal $y_1(t)$ umwandelt, und der das Signal **100** des zweiten Pulsmodulators **97** in das quantisierte Pulssignal $y_2(t)$ transformiert. Der Einsatz eines für beide Kanäle gemeinsamen 2D-Quantisierers **98** gestattet es, bei der Quantisierung der Signale **99, 100** Zusatzbedingungen zu berücksichtigen, die für den Betrieb des mikromechanischen Sensors von Vorteil sind. Eine derartige Zusatzbedingung ist beispielsweise, dass jeweils nur einer der Kanäle von Null verschiedene Impulse liefern darf. Eine andere denkbare Zusatzbedingung ist, dass sich zu einem gegebenen Zeitpunkt jeweils nur eines der Ausgangssignale $y_1(t), y_2(t)$ ändern darf. Derartige Zusatzbedingungen können dann sinnvoll sein, wenn die auf die Elektroden eines Doppelresonators aufgebrachten Verschiebungsströme summarisch gemessen werden, um auf die Auslenkung des Schwingers rückschließen zu können. Mit Hilfe der Zusatzbedingungen wird eine eindeutige Zuordnung eines Verschiebungsstroms zu einer bestimmten Elektrode ermöglicht. Dadurch lässt sich eine Signaltrennung der von der y_1 -Auslenkung und der y_2 -Auslenkung des Schwingers verursachten Signale durchführen.

[0086] Alle oben beschriebenen Ausführungsformen des erfindungsgemäßen Pulsmodulators lassen sich zur Realisierung des erfindungsgemäßen Verfahrens verwenden. Eventuell müssen diese miteinander kombiniert werden. Der in **Fig. 11** beschriebene Pulsmodulator (2-dimensional) kann „direkt“ übernommen werden, es lassen sich auch Kombinationen aus zwei eindimensionalen Pulsmodulatoren verwenden. Auch ist es möglich, auf die Addition des zusätzlichen Rauschsignals zu verzichten.

Patentansprüche

1. Betriebsverfahren für einen Corioliskreisel (**1**), bei dem
 - digitale Auslesesignale (S_9, S_{10}) erzeugt werden, die ein Maß für die momentanen Amplituden/Frequenzen der Anregungsschwingung/Ausleseschwingung des Resonators (**2**) des Corioliskreisels (**1**) darstellen, und
 - der Resonator (**2**) mit Kraftsignalen (S_3-S_6) beaufschlagt wird, wobei die Kraftsignale (S_3-S_6) in Abhängigkeit der digitalen Auslesesignale (S_9, S_{10}) so geregelt werden, dass die Anregungsschwingung/Ausleseschwingung bestimmte Amplituden/Frequenzen annehmen, **dadurch gekennzeichnet**, dass die Kraftsignale (S_3-S_6) aus quantisierten Ausgangssignalen (S_1-S_2) eines Pulsmodulators (**37**) erzeugt werden, der mit digitalen Anregungs-/Kompensationssignalen ($S_{15}-S_{18}$), die aus den digitalen Auslesesignalen (S_9, S_{10}) abgeleitet werden, gespeist wird.
2. Verfahren nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, dass die Ausgangssignale (S_1-S_2) des Pulsmodulators (**37**) ternär quantisiert sind.
3. Verfahren nach Anspruch 2, dadurch gekennzeichnet, dass durch den Pulsmodulator (**37**) ein erstes und ein zweites jeweils ternär quantisiertes Ausgangssignal (S_1-S_2) erzeugt wird, wobei das erste Ausgangssignal (S_1) in eine erste Folge von ternär quantisierten Kraftimpulsen (S_3, S_4) transformiert wird, und das zweite Ausgangssignal (S_2) in eine zweite Folge von ternär quantisierten Kraftimpulsen (S_5, S_6) transformiert wird, wobei die erste Folge von Kraftimpulsen derjenige Teil der Kraftsignale ist, der zur Einstellung gewünschter Amplituden/Frequenzen der Anregungsschwingung dient, und die zweite Folge von Kraftimpulsen derjenige Teil der Kraftsignale ist, der zur Einstellung gewünschter Amplituden/Frequenzen der Ausleseschwingung dient.
4. Verfahren nach einem der vorstehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, dass die Erzeugung der digitalen Auslesesignale (S_9, S_{10}) dadurch erfolgt, indem
 - eine Menge an elektrischer Ladung, die aufgrund elektrischer Felder, die durch die Kraftsignale erzeugt werden, auf eine bewegliche Mittelelektrode fließt, mittels eines Ladungsverstärkers (**31**) gemessen wird,
 - ein entsprechendes analoges Ausgangssignal (S_7) des Ladungsverstärkers (**31**) in ein digitales Ausgangssignal (S_8) umgewandelt wird, und

– über eine Signaltrennung (**33**) in Abhängigkeit momentaner und/oder zeitlich älterer Ausgangssignalwerte (S_1, S_2) des Pulsmodulators (**37**) aus dem Ausgangssignal des Ladungsverstärkers (**38**) die digitalen Auslesesignale (S_9, S_{10}) ermittelt werden.

5. Verfahren nach einem der vorstehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, dass die digitalen Auslesesignale (S_9, S_{10}) mittels eines Demodulationsprozesses jeweils in eine Normal- und eine Quadraturkomponente (S_{11} – S_{14}) zerlegt werden.

6. Verfahren nach Anspruch 5, dadurch gekennzeichnet, dass mittels eines Regelungsprozesses (**36**) aus den Normal- und Quadraturkomponenten (S_{11} – S_{14}) der digitalen Auslesesignale Normal- und Quadraturkomponenten der digitalen Anregungs-/Kompensationssignale (S_{15} – S_{18}) erzeugt werden, die den Pulsmodulator (**37**) speisen.

7. Auswerte-/Regelelektronik (**30**) zur Verwendung in einem Corioliskreis (1), mit:

– einer Einheit (**31, 32, 33**) zur Erzeugung von digitalen Auslesesignalen (S_9, S_{10}), die ein Maß für die momentanen Amplituden/Frequenzen der Anregungsschwingung/Ausleseschwingung des Resonators (**2**) des Corioliskreisels (**1**) darstellen,

– wenigstens einem Regelkreis (**31–37**), durch den in Abhängigkeit der digitalen Auslesesignale (S_9, S_{10}) Kraftsignale (S_3 – S_6) erzeugt und auf den Resonator (**2**) gegeben werden, wobei die Kraftsignale (S_3 – S_6) so geregelt werden, dass die Anregungsschwingung/Ausleseschwingung bestimmte Amplituden/Frequenzen annehmen, gekennzeichnet durch

– einen Pulsmodulator (**37**), der ein Teil des Regelkreises (**31–37**) ist, und der mit digitalen Anregungs-/Kompensationssignalen (S_{15} – S_{18}), die aus den digitalen Auslesesignalen (S_9, S_{10}) abgeleitet werden, gespeist wird, wobei aus quantisierten Ausgangssignalen (S_1, S_2) des Pulsmodulators (**37**) die Kraftsignale erzeugbar sind.

8. Pulsmodulator zur Umwandlung eines komplexen Eingangssignals ($x(t)$) in ein Pulssignal ($y(t)$), gekennzeichnet durch

– eine Subtrahierstufe (**51**), die aus der Differenz des komplexen Eingangssignals ($x(t)$) und eines Rückkopplungssignals (**52**) ein Regelabweichungssignal erzeugt;

– eine Signalumwandlungsstufe, die das Regelabweichungssignal in ein Regelsignal (**57**) umwandelt;

– eine erste Multiplizierstufe (**8**), die das Regelsignal (**57**) mit einem mit der Frequenz ω_0 oszillierenden komplexen Mischsignal multipliziert und so mindestens einen von Realteil (**61**) und Imaginärteil eines um ω_0 heraufgemischten Regelsignals erzeugt;

– eine Quantisierungsstufe (**62**), die mindestens einen von Realteil und Imaginärteil des um ω_0 heraufgemischten Regelsignals quantisiert und so das Pulssignal ($y(t)$) erzeugt;

– eine Rückkopplungseinheit, welche ausgehend von dem Pulssignal ($y(t)$) das Rückkopplungssignal (**52**) für die Subtrahierstufe erzeugt.

Es folgen 9 Blatt Zeichnungen

Anhängende Zeichnungen

Fig. 1

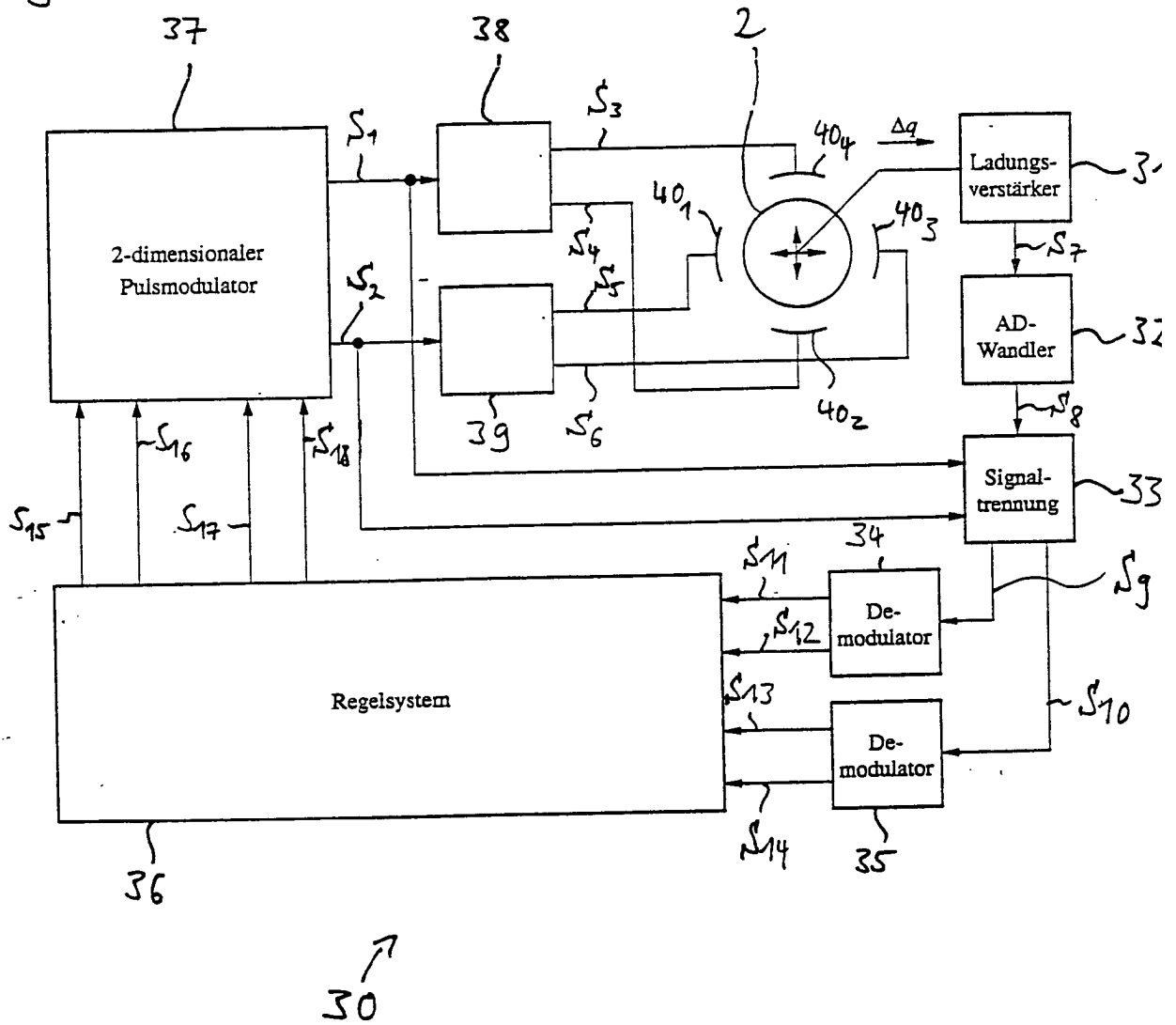
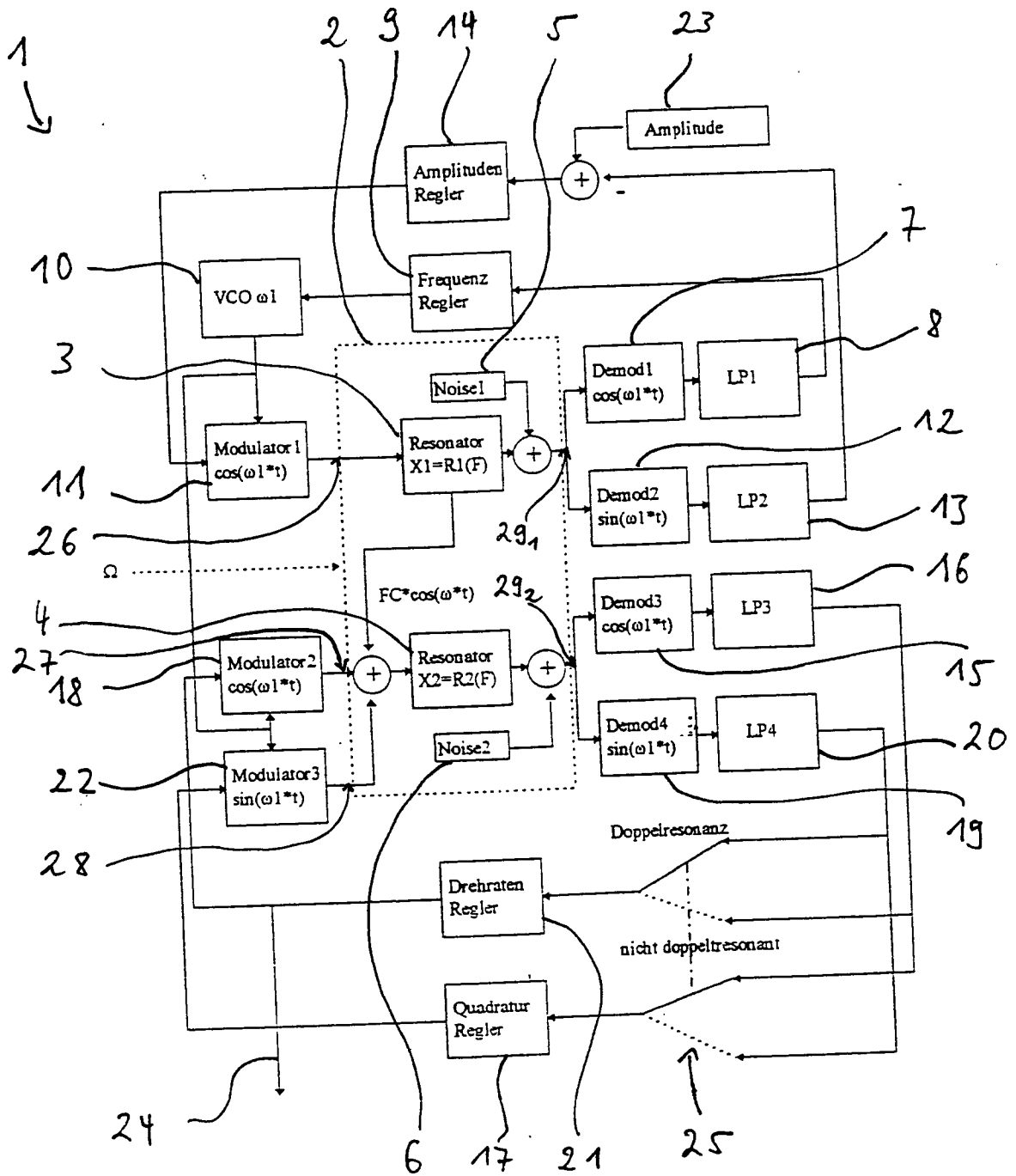


Fig. 2



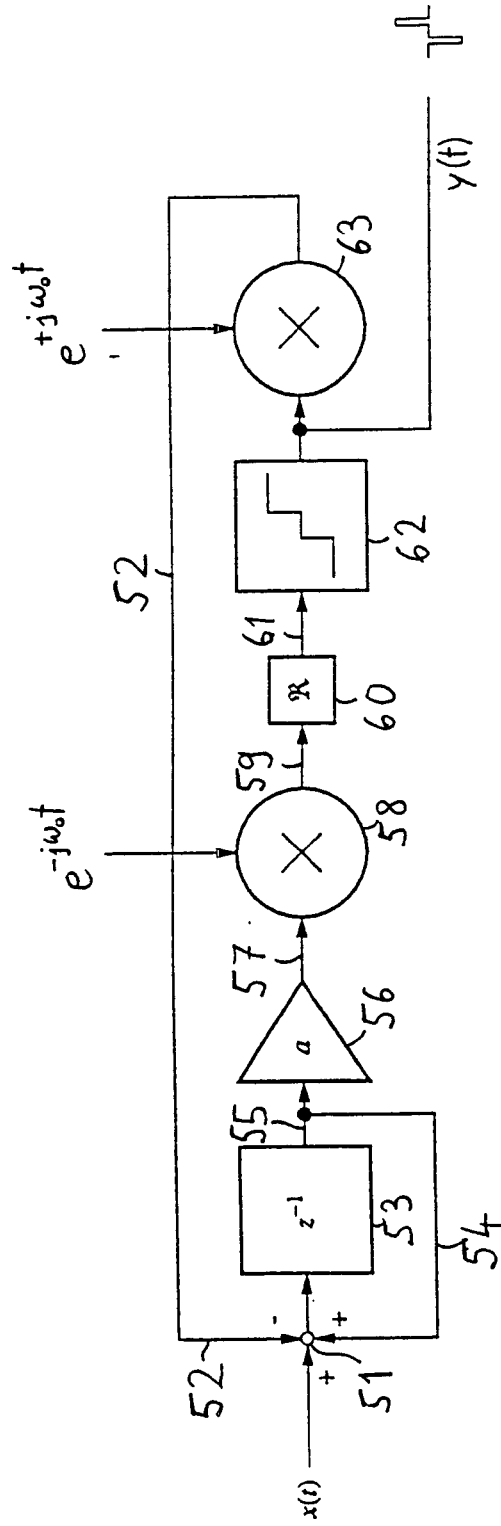


Fig. 3

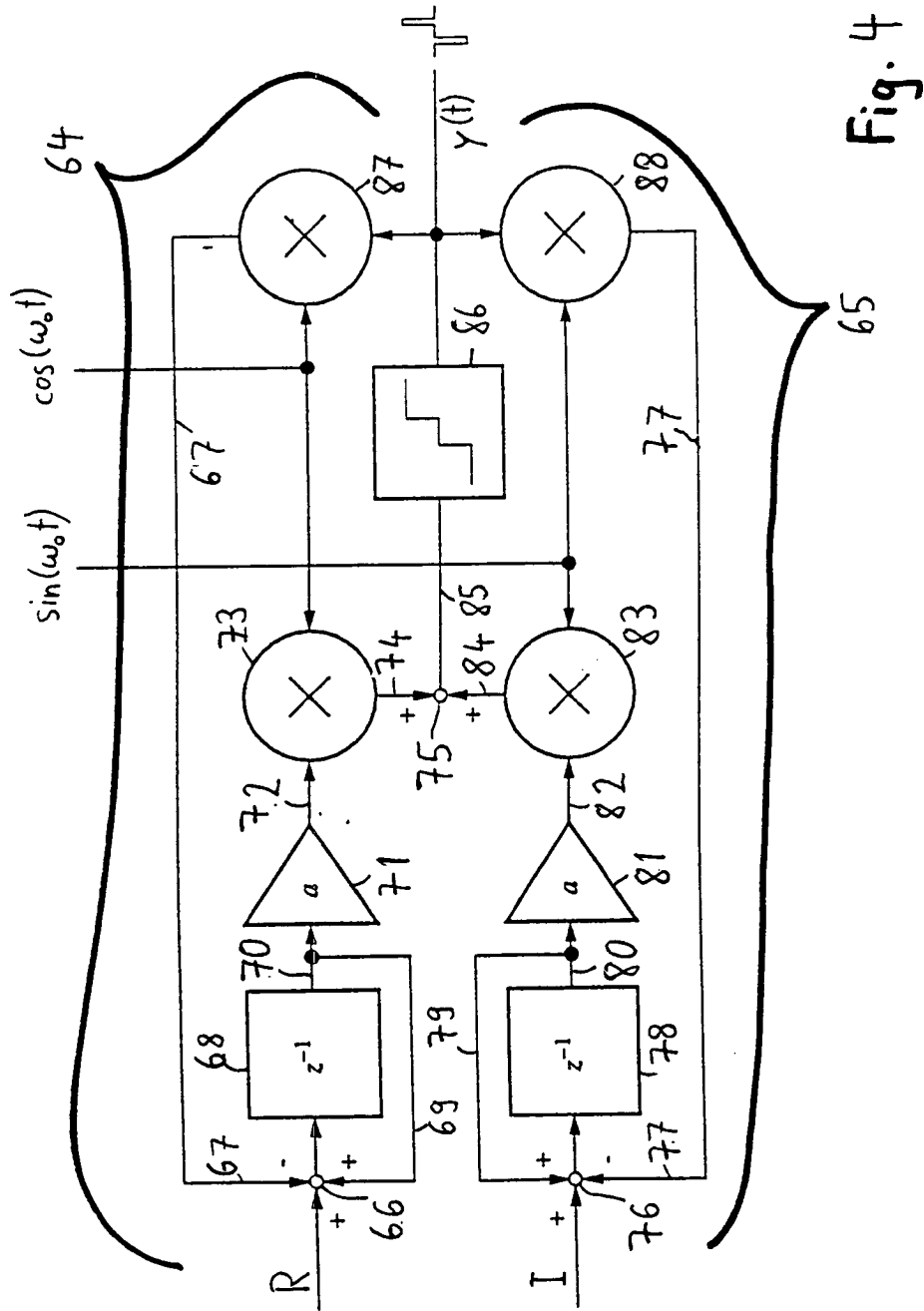


Fig. 4

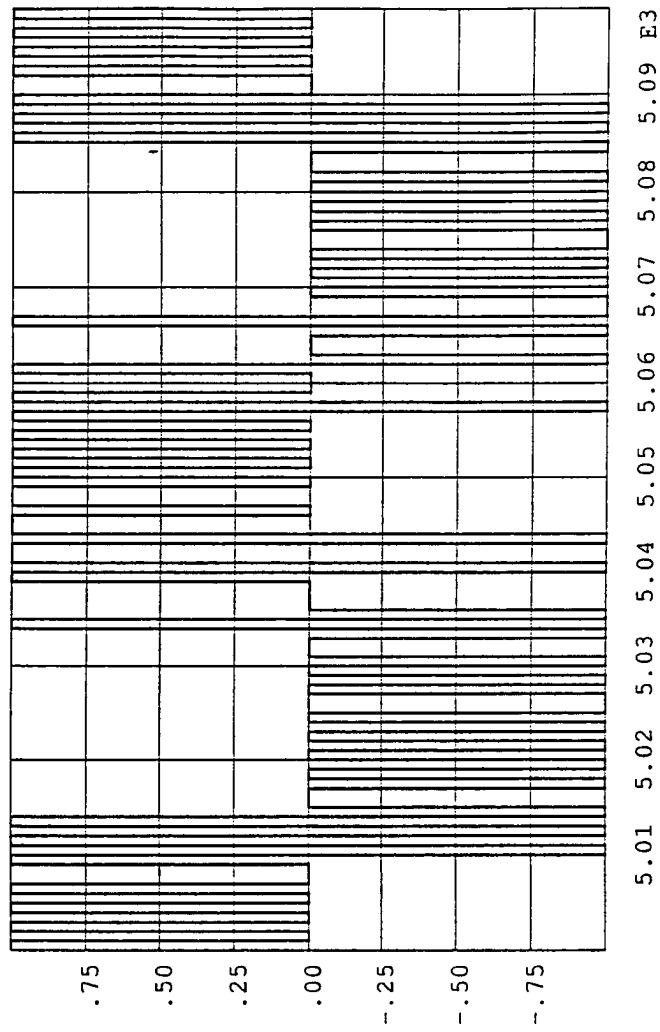


Fig.5

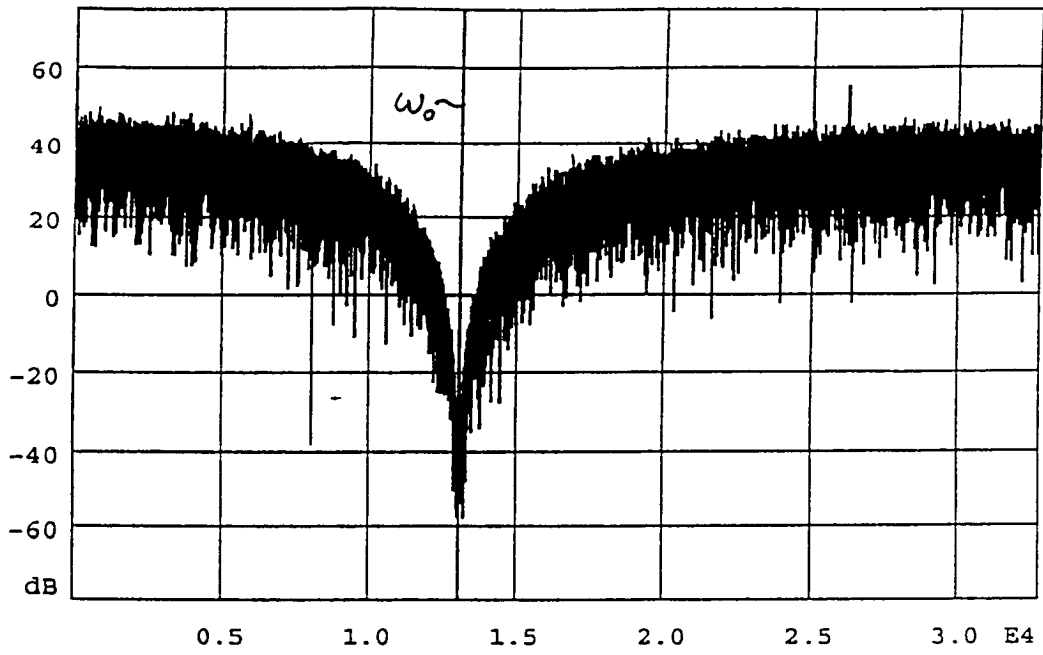


Fig. 6

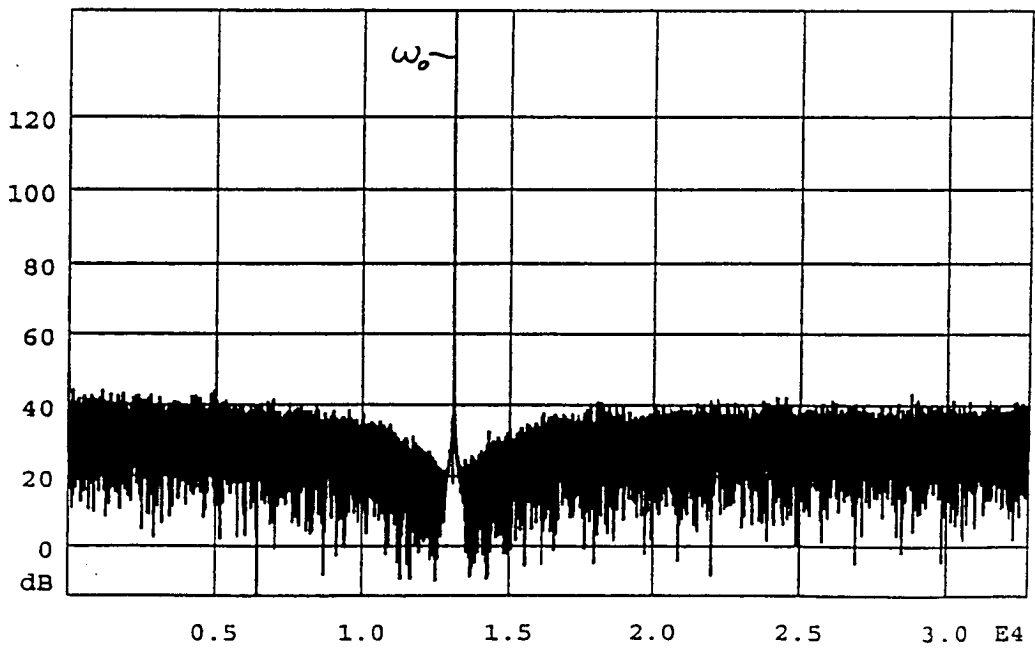


Fig. 7

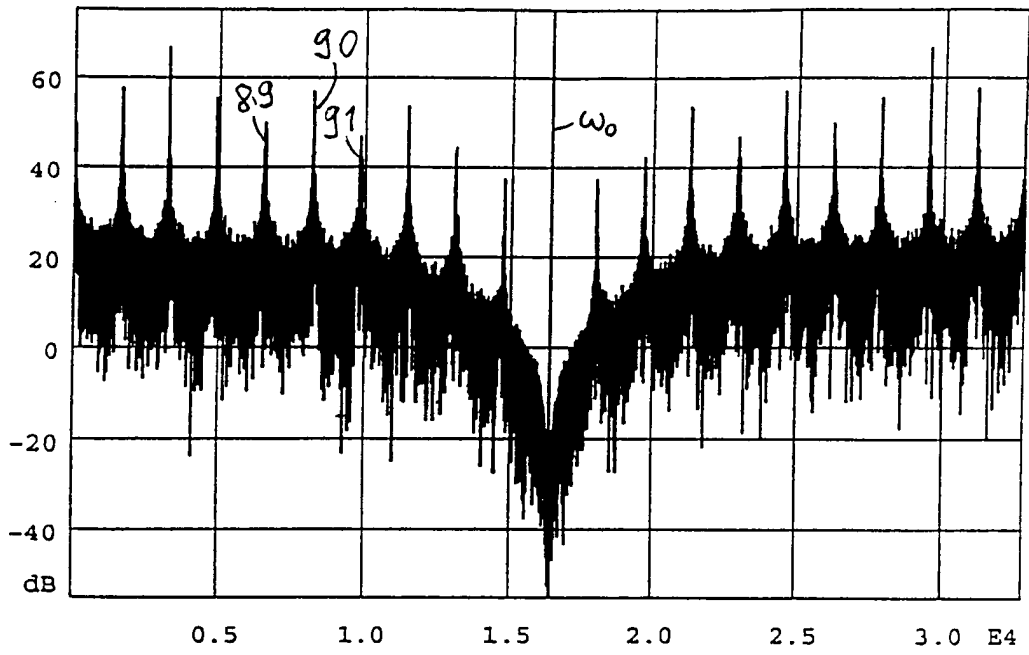


Fig. 8

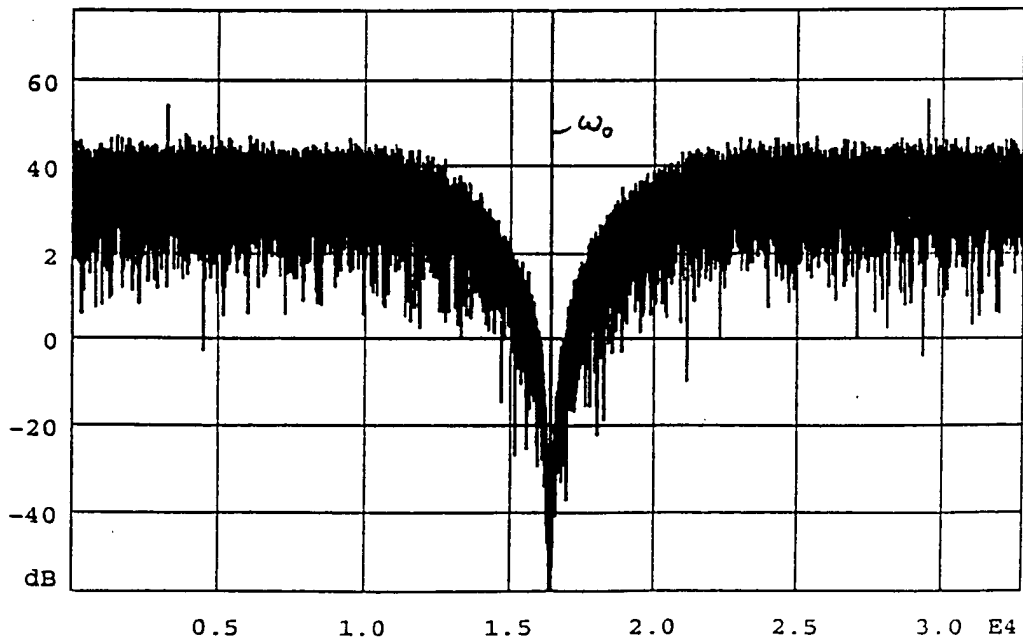


Fig. 10

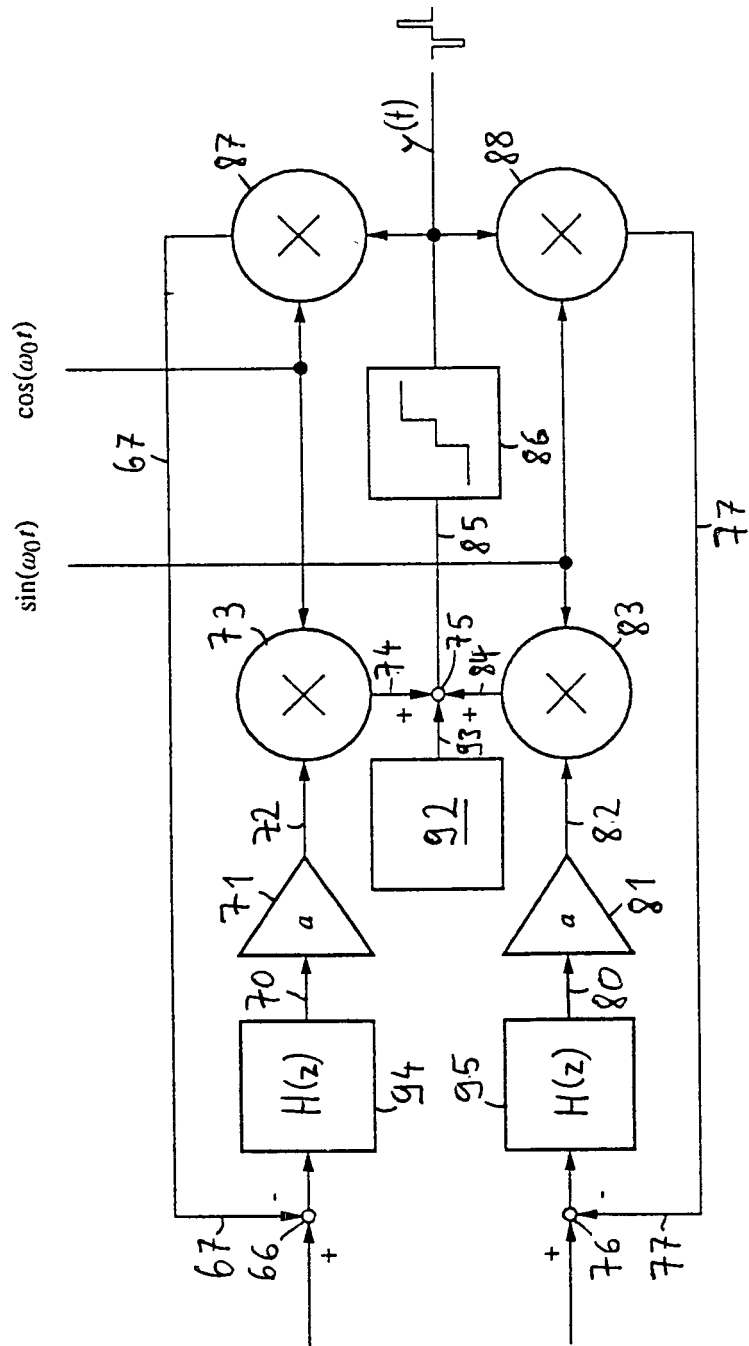


Fig. 9

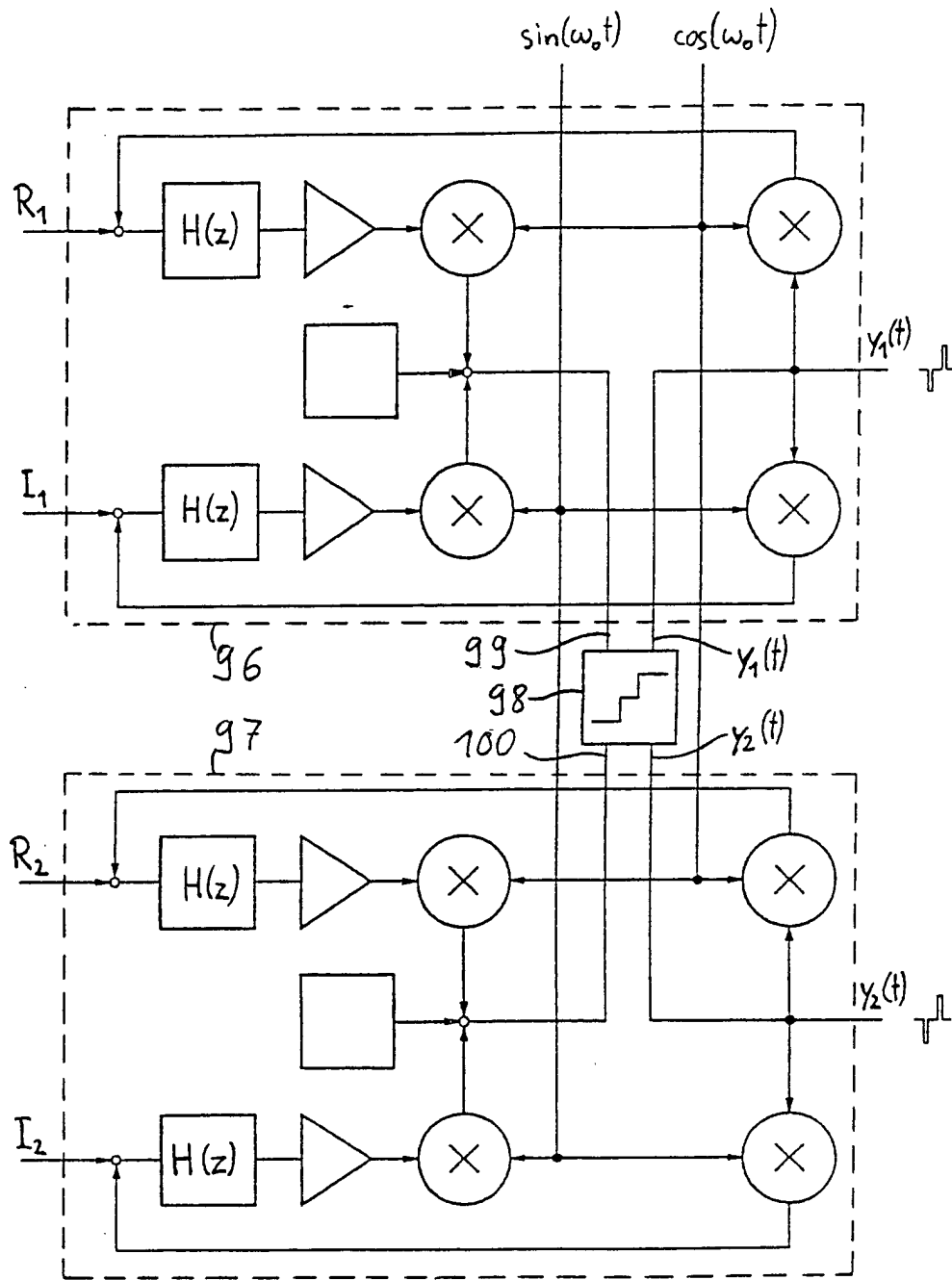


Fig. 11