



(19)
Bundesrepublik Deutschland
Deutsches Patent- und Markenamt

(10) **DE 602 00 890 T2 2005.08.18**

(12)

Übersetzung der europäischen Patentschrift

(97) **EP 1 382 124 B1**

(51) Int Cl.⁷: **H03M 3/02**

(21) Deutsches Aktenzeichen: **602 00 890.5**

(86) PCT-Aktenzeichen: **PCT/FR02/01229**

(96) Europäisches Aktenzeichen: **02 724 409.4**

(87) PCT-Veröffentlichungs-Nr.: **WO 02/084884**

(86) PCT-Anmeldetag: **09.04.2002**

(87) Veröffentlichungstag
der PCT-Anmeldung: **24.10.2002**

(97) Erstveröffentlichung durch das EPA: **21.01.2004**

(97) Veröffentlichungstag
der Patenterteilung beim EPA: **04.08.2004**

(47) Veröffentlichungstag im Patentblatt: **18.08.2005**

(30) Unionspriorität:
0104977 11.04.2001 FR

(84) Benannte Vertragsstaaten:
DE, GB, IT

(73) Patentinhaber:
Commissariat à l'Energie Atomique, Paris, FR

(72) Erfinder:
**ORSIER, Elisabeth, F-38000 GRENOBLE, FR;
BELLEVILLE, Marc, F-38120 SAINT-EGREVE, FR;
CONDEMIN, Cyril, F-38100 GRENOBLE, FR**

(74) Vertreter:
**Grünecker, Kinkeldey, Stockmair &
Schwanhäusser, 80538 München**

(54) Bezeichnung: **BANDPASS-SIGMA-DELTA-MODULATOR UND ANWENDUNGEN DESSELBEN ZUR WANDLUNG,
DETEKTIERUNG UND ERZEUGUNG VON SIGNALEN**

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

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

Beschreibung

Technisches Gebiet

[0001] Die vorliegende Erfindung betrifft einen Sigma-Delta-Modulator und noch genauer einen Sigma-Delta-Modulator mit wenigstens einem Resonator und einem internen Wandler.

[0002] Die Erfindung betrifft auch die Verwendung eines solchen Sigma-Delta-Modulators, um Analog-Digital-Umwandlungsvorrichtungen, Detektionsvorrichtungen physikalischer Größen und/oder Signalerzeugungsvorrichtungen zu realisieren.

[0003] Wegen dieser sehr unterschiedlichen Verwendungen hat die Erfindung zahlreiche technische Anwendungsgebiete. Zum Beispiel kann die Erfindung dazu dienen, Hochfrequenzsignale zu verarbeiten oder in einer Kommunikationsvorrichtung ein Bezugsfrequenzsignal zu erzeugen. Sie kann folglich in einem tragbaren oder analogen Telefon verwendet werden. Die Erfindung kann auch zur Realisierung physikalischer Messinstrumente dienen, zum Beispiel elektromechanischer, optischer, akustischer, thermischer oder anderer Messinstrumente.

Stand der Technik

[0004] Die Sigma-Delta-Modulatoren sind elektronische Vorrichtungen, die jetzt in Signalverarbeitungsgeräten sehr häufig verwendet werden. Der Einsatz von Sigma-Delta-Modulatoren ist sehr üblich bei der Umwandlung analoger Signale in digitale Signale. Der Stand der Technik bezüglich der Sigma-Delta-Modulatoren sowie ein breiterer technologischer Hintergrund der Erfindung gehen aus den Dokumenten (1) bis (12) hervor, deren vollständige Referenzen am Ende der vorliegenden Beschreibung angegeben sind.

[0005] Unter den bekannten Sigma-Delta-Modulatoren kann man insbesondere zwei Modulatorgruppen unterscheiden, nämlich die Tiefpass-Modulatoren und die Bandpass-Modulatoren.

[0006] Die Bandpass-Sigma-Delta-Modulatoren sind im Wesentlichen um ein oder mehrere integrierende Elemente herum aufgebaut. Verbunden mit wenigstens ein Tiefpassfilter realisierenden Filtereinrichtungen bilden sie sogenannte Tiefpass-Sigma-Delta-Wandler. Die zum Beispiel in dem Dokument (1) dargestellten Sigma-Delta-Modulatoren werden hier nicht betrachtet. Die Erfindung betrifft nämlich die Tiefpass-Sigma-Delta-Modulatoren. Diese, verbunden mit Filtereinrichtungen, die wenigstens die Bandpassfilter-Funktion erfüllen, bilden sogenannte Bandpass-Sigma-Delta-Wandler.

[0007] Die beigefügte [Fig. 1](#) zeigt schematisch und

vereinfacht die hauptsächlichen Elemente eines Bandpass-Sigma-Delta-Wandlers bekannten Typs. Dieser Wandler ist ein Wandler zweiter Ordnung. Er enthält einen Resonator, der wie zwei Integratoren verbucht werden kann. Die Anzahl der Integratoren definiert die Ordnung eines Sigma-Delta-Wandlers.

[0008] Man kann bei dem Sigma-Delta-Wandler **10** zwei Hauptteile unterscheiden, nämlich einen Modulator **12** und Filtereinrichtungen **130**. Ein Eingang E des Sigma-Delta-Modulators ist in Reihenfolge mit einem elektrischen Resonator **16**, einem Komparator **18** und einem digitalen Bandpass verbunden, der hier die Filtereinrichtungen **130** bildet. Der Ausgang des Sigma-Delta-Wandlers entspricht dem der Filtereinrichtungen **130**. Eine Rückkopplungsschleife **20** verbindet den Ausgang des Komparators **18** mit dem Eingang des Resonators **16**. Ein Mischer **15** ist vorgesehen, um das in den Anschluss E eingespeiste Eingangssignal und das Signal der Rückkopplungsschleife **20** zu addieren. Die Rückkopplungsschleife kann außerdem Bauteile wie einen internen Digital-Analog-Wandler oder einen Verstärker enthalten. Diese sind aus Gründen der Vereinfachung nicht dargestellt.

[0009] Ein spezielles Ausführungsbeispiel des elektrischen Resonators **16** kann man zum Beispiel in dem oben erwähnten Dokument (3) finden.

[0010] Der Komparator **18** wird wie ein interner Analog-Digital-Wandler verwendet. Er liefert zum Beispiel ein in einem einzigen Bit codiertes Signal, das einen ersten logischen Wert annimmt, wenn das durch den elektrischen Resonator gelieferte analoge Signal einen bestimmten Schwellenwert überschreitet, und das einen zweiten – komplementären – logischen Wert annimmt, wenn das von dem Resonator stammende analoge Signal kleiner ist als dieser Schwellenwert. Das analoge Signal ist also am Ausgang des Modulators ein mittels PDM (Pulse Density Modulation) moduliertes Signal.

[0011] Die Filtereinrichtungen **130** sind vom Bandpass-Typ und haben vor allem die Funktion, in dem modulierten Signal ein der Umwandlung des analogen Signals in ein zum Beispiel auf die Ausgangsniveaus des Komparators quantifiziertes inhärentes Quantifizierungs-Rauschen zu eliminieren.

[0012] Wenn der Sigma-Delta-Modulator als Analog-Digital-Wandler benutzt wird, sind die Filtereinrichtungen **130** digital und können auch als Dezimator verwendet werden, das heißt zur Umwandlung eines in einer kleinen Zahl von Bits codierten Signals mit hoher Frequenz in ein in einer größeren Zahl von Bits codiertes Signal mit niedrigerer Frequenz.

[0013] Der elektrische Resonator **16** ist gekennzeichnet durch seinen Qualitätsfaktor. Dieser drückt

die Breite eines Frequenzbands aus, in dem die Resonanzamplitude einen Schwellenwert überschreitet. Man nimmt an, dass der Qualitätsfaktor hoch ist, wenn die Resonanzamplitude einen großen Absolutwert hat und das Frequenzband schmal ist. Der Schwellenwert wird als Maximalwert der Resonanz weniger 3 dB definiert.

[0014] Die Qualität des Sigma-Delta-Modulators ist mit dem Qualitätsfaktor des Resonators verknüpft. Sie bedingt insbesondere die Eliminierung des Quantifizierungsgeräusches in dem Durchlassband. Mit anderen Worten liefert ein Sigma-Delta-Modulator, ausgestattet mit einem Resonator mit einem breiten Resonanzband, das heißt mit einem sehr schlechten Qualitätsfaktor, ein Ausgangssignal mit einem sehr starken Quantifizierungsgeräusch. Dies ist trotz des Filterns durch die Filtereinrichtungen **130** der Fall.

[0015] Um die Qualität des Sigma-Delta-Modulators zu verbessern, besteht eine Lösung darin, mehrere Resonatorstufen in Serie vorzusehen. So erhält man einen Sigma-Delta-Modulator höherer Ordnung. Zu diesem Thema kann man zum Beispiel auf die Dokumente (3) und (4) konsultieren.

[0016] Die Vervielfachung der Modulatorstufen drückt sich jedoch durch eine bestimmte Anzahl von Schwierigkeiten aus. Eine der Hauptschwierigkeiten ist die der Betriebsstabilität des Sigma-Delta-Modulators. Weitere Schwierigkeiten sind mit eventuellen Interferenzen der elektrischen Resonatoren untereinander oder mit anderen elektrischen Bauteilen verknüpft. Die Vervielfachung der Stufen der Sigma-Delta-Modulatoren drückt sich durch einen erhöhten Verbrauch von elektrischer Energie aus, der sich als unvereinbar mit den Versorgungsquellen von tragbaren Geräten erweisen kann.

Darstellung der Erfindung

[0017] Die vorliegende Erfindung hat die Aufgabe, einen Sigma-Delta-Modulator vorzuschlagen, der nicht die Beschränkungen der oben erwähnten Vorrichtungen aufweist.

[0018] Eine Aufgabe besteht insbesondere darin, einen Sigma-Delta-Modulator vorzuschlagen, der ein sehr schwaches Quantifizierungsgeräusch aufweist und dabei nur über eine begrenzte Anzahl von Resonatoren verfügt.

[0019] Eine andere Aufgabe besteht darin, einen Sigma-Delta-Modulator vorzuschlagen, der unempfindlich ist für die Interferenzen mit elektrischen oder elektronischen Schaltungen der Umgebung, insbesondere bei Hochfrequenz-Anwendungen, und der den Anforderungen entspricht, die mit den tragbaren Geräten verbunden sind.

[0020] Schließlich hat die Erfindung noch die Aufgabe, mehrere spezifische Anwendungen des Sigma-Delta-Modulators vorzuschlagen, die seinen Besonderheiten entsprechen.

[0021] Um diese Aufgaben zu lösen, hat die Erfindung einen Sigma-Delta-Modulator zum Gegenstand, der umfasst:

- wenigstens einen Resonator,
- einen internen Wandler zur Umwandlung eines von dem Resonator stammenden analogen Signals in ein digitales Zeitinformationssignal, und
- eine Rückkopplungsschleife, die einen Ausgang des Wandlers mit einem Anregungseingang des Resonators verbindet.

[0022] Festzustellen ist, dass die Erfindung nicht nur mit einem linearen Resonator realisiert werden kann, sondern auch mit einem nichtlinearen Resonator.

[0023] Nach der Erfindung wird wenigstens ein Resonator des Sigma-Delta-Modulators aus der Gruppe ausgewählt, welche die mechanischen, elektromechanischen, elektrostatischen, optischen und chemischen Resonatoren umfasst.

[0024] Unter Resonator versteht man eine Vorrichtung, bei der davon ausgegangen wird, dass sie in einem die Frequenz null ausschließenden Resonanzband schwingt und deren Reaktion bei einer Anregungsfrequenz außerhalb des Resonanzbands vernachlässigbar ist. Man geht zum Beispiel davon aus, dass eine Reaktion vernachlässigbar ist, wenn ihre Amplitude um wenigstens 10 dB niedriger ist als die Amplitude einer Reaktion mit der Verstärkung 1.

[0025] Der in dem Sigma-Delta-Modulator verwendete Resonator ist kein elektronischer oder elektrischer Resonator. Dies bedeutet, dass die Resonanz an sich kein elektrisches oder elektronisches Phänomen ist. Jedoch ist festzustellen, dass das Anregungssignal des Resonators oder das Ausgangssignal des Resonators ohne weiteres elektrische Signale sein können. Die Tatsache, dass der Resonator weder elektrisch noch elektronisch ist, ermöglicht, die Interferenzen mit Schaltungen der Umgebung stark zu reduzieren, egal ob diese mit hoher oder niedriger Frequenz arbeiten. Außerdem hat sich gezeigt, dass die mechanischen oder optischen Resonatoren zum Beispiel Qualitätsfaktoren aufweisen, die im Allgemeinen höher sind als die der elektrischen Resonatoren. Man kann also selbst mit einer reduzierten Anzahl Resonatorstufen eine sehr gute Eliminierung des Quantifizierungsgeräusches erzielen.

[0026] Der Sigma-Delta-Modulator der Erfindung kann einen einzigen aber auch mehrere Resonatoren umfassen. Wenigstens einer dieser Resonatoren ist kein elektrischer Resonator, wie oben angegeben.

Dies schließt jedoch nicht die Verbindung dieses Resonators mit einem oder mehreren anderen Resonatoren – des elektronischen Typs oder nicht – aus.

[0027] Wenn der Anregungseingang und/oder der Ausgang des Resonators nicht elektrisch ist, kann der Resonator wenigstens einem elektrischen Interface zugeordnet werden, das heißt einem Organ, das fähig ist, die physikalischen Signale, zum Beispiel mechanische, optische oder akustische, in elektrische Signale umzuwandeln, oder umgekehrt. Dies ermöglicht insbesondere, den Ausgang mit den Filtereinrichtungen kompatibel zu machen.

[0028] Es ist außerdem anzumerken, dass in dem Fall, wo der Eingang des Resonators kein elektrischer Eingang ist, es wieder möglich ist, den Resonator direkt mit einem physikalischen Signal anzuregen. Es ist dann am Eingang des Resonators kein elektrisches Interface nötig.

[0029] Wenn hingegen die Rückkopplungsschleife ein elektrisches Signal liefert und der Anregungseingang vom physikalischen Typ ist, kann die Rückkopplungsschleife mit dem Anregungseingang jeweils durch ein elektromagnetisches Interface, ein elektrooptisches Interface oder ein elektroakustisches Interface für das Signal verbunden werden. Diese Aspekte werden in der Folge des Textes noch detaillierter dargestellt.

[0030] Die Bandpass-Filtereinrichtungen sind wie bei den klassischen Sigma-Delta-Wandlern vorgesehen, um das Quantifizierungsgeräusch zu filtern und eventuell eine Dezimation des Signals durchzuführen. Sie können ein oder mehrere Filterelemente umfassen, deren Gesamtverhalten das einer Bandpassfilterung ist. Das Band wird ebenfalls klassisch in Bezug auf das des Resonators angepasst.

[0031] Der interne Wandler des Sigma-Delta-Wandlers ist eine Vorrichtung, die fähig ist, ein Digitalsignal mit Zeitinformation zu liefern. Es handelt sich um ein Signal mit relativ hoher Frequenz, in einer kleinen Zahl von Bits codiert, zum Beispiel in einem einzigen Bit. Die Information ist dann wenigstens teilweise in einer mehr oder weniger großen Pulsdichte enthalten. Ein solcher interner Wandler, auch als Analog-Digital-Wandler bezeichnet, kann als einfacher Komparator dargestellt werden, der dazu bestimmt ist, eine Amplitude des von dem Resonator stammenden analogen Signals mit einem oder mehreren Schwellenwerten zu vergleichen. Man darf also diesen internen Analog-Digital-Wandler nicht mit der Analog-Digital-Umwandlungsfunktion eines Sigma-Delta-Modulators vergleichen, der mit den digitalen Filtereinrichtungen verbunden ist. Dieser Aspekt wird in der Folge des Textes detaillierter beschrieben.

[0032] Bei einer speziellen Ausführung des Sig-

ma-Delta-Modulators kann der Resonator ein freier Oszillator sein. In diesem Fall ist er mit einer Rückkopplungsschleife ausgestattet, die seinen Ausgang mit seinem Eingang verbindet. Diese Schleife kann eventuell mit Verstärkungs- oder Vergleichseinrichtungen ausgestattet sein.

[0033] Nach einem weiteren Aspekt kann der Resonator ein Resonator mit Resonanzunterhaltung, zum Beispiel ein durch ein äußeres Anregungssignal unterhaltener Oszillator.

[0034] Gemäß einer Perfektionierung kann der erfindungsgemäße Sigma-Delta-Modulator mit einer Regelschleife ausgestattet sein, die einen Ausgang des Modulators mit einem Anregungseingang des Modulators verbindet. Diese Schleife kann mit Filtereinrichtungen eines Regulators und/oder eines Komparators versehen sein, um das Ausgangssignal oder eine Charakteristik dieses Signal mit einem Einstellwert oder einem Einstellsignal zu vergleichen. Die Regelschleife hat dann im Wesentlichen die Aufgabe, das Verhalten des Modulators zu stabilisieren, zum Beispiel wenn dieser benutzt wird, um ein Signal zu erzeugen.

[0035] Die Erfindung betrifft auch eine Analog-Digital-Umwandlungsvorrichtung eines Signals, die einen analogen Signaleingang und einen wie oben beschriebenen Sigma-Delta-Wandler umfasst. Der analoge Signaleingang ist dann mit dem Anregungseingang des Resonators verbunden. Das in den Eingang des Resonators eingespeiste Signal ist ein umzuwandelndes analoges Signal. Der Begriff "Signal" wird hier in einem sehr allgemeinen Sinn angewendet, der die Einspeisung eines kontinuierlichen und invariablen Signals nicht ausschließt. Der Wandler kann nämlich bei allen Anwendungen benutzt werden, bei denen ein von einer Signalquelle stammendes Signal oder eine zum Beispiel von einem Messinstrument stammende Spannung in einem Digitalwert umgewandelt werden muss.

[0036] Wenn der Anregungseingang des Resonators ein physikalischer Eingang ist, während das umzuwandelnde Signal ein elektrisches Signal ist, kann der analoge Eingang mit dem Anregungseingang in der schon erwähnten Weise durch ein elektromechanisches oder elektrooptisches Interface verbunden werden.

[0037] Die Erfindung hat noch einen Generator digitaler oder analoger Signale zum Gegenstand, der einen Sigma-Delta-Modulator wie beschrieben umfasst, bei dem wenigstens ein Resonator ein Oszillator ist, und eventuell Filtereinrichtungen mit einem digitalen oder analogen Filter.

[0038] Das analoge Filter ermöglicht, das am Ausgang des internen Analog-Digital-Wandlers des Sig-

ma-Delta-Modulators verfügbare pulsdichte-modulierte Signal umzuwandeln. Dieses Ausgangssignal ist zum Beispiel ein sinusförmiges Signal.

[0039] Wenn der Sigma-Delta-Modulator als Signal-generator verwendet wird, kann der Resonator ein freier Oszillator sein. In diesem Fall wird in den Anregungseingang des Resonators kein äußeres Signal eingespeist. Dieser hat jedoch noch immer eine Rückkopplungsschleife, die seinen Ausgang mit seinem Anregungseingang verbindet. Diese Schleife ermöglicht, den Resonator in einen freien Oszillator zu verwandeln.

[0040] Die Erfindung betrifft auch noch die Verwendung eines Sigma-Delta-Modulators in einer Messvorrichtung einer physikalischen Größe. Die Messvorrichtung umfasst einen für eine physikalische Größe empfindlichen Detektionsresonator und einen Sigma-Delta-Modulator wie oben beschrieben.

[0041] Zu präzisieren ist, dass die physikalische Größe, für die der Resonator empfindlich ist, nicht mit dem Anregungssignal verbunden bzw. verknüpft ist, das in den Eingang des Resonators eingespeist wird oder nicht. Die physikalische Größe ist eine Größe, welche die Schwingungsamplitude des Resonators modifiziert. Wenn der Resonator zum Beispiel ein Vibrationsgyrometer bzw. Schwingkreisel ist, kann die zu messende Größe eine Corioliskraft sein. Bei anderen Resonatoren kann die physikalische Größe eine Temperatur sein.

[0042] Die hier betrachtete physikalische Größe unterscheidet sich also von einer physikalischen Größe, die von einem außerhalb des Sigma-Delta-Modulators befindlichen Sensor stammt, dessen analoges Messsignal in den Anregungseingang des Resonators eingespeist wird, um in ein digitales Signal umgewandelt zu werden. Dies entspricht nämlich einer Verwendung des Sigma-Delta-Modulators in einem Analog-Digital-Wandler entsprechend der vorhergehend betrachteten Art und nicht als Messvorrichtung an sich.

[0043] Gemäß einer speziellen Realisierung einer erfindungsgemäßen Messvorrichtung kann diese Messvorrichtung Anregungseinrichtungen des Detektionsresonators in Form eines zweiten, sogenannten Anregungsresonators umfassen, der mit dem Detektionsresonator gekoppelt ist. Der Anregungsresonator kann Teil eines unterschiedlichen zweiten Sigma-Delta-Modulators sein. Ein spezielles Beispiel der oben definierten Kopplung kann die Corioliskraft sein.

[0044] Weitere Merkmale und Vorteile der Erfindung gehen aus der nachfolgenden Beschreibung hervor, mit Bezug auf die Figuren der beigefügten Zeichnungen. Diese Beschreibung dient nur der Erläuterung

und ist nicht einschränkend.

Kurzbeschreibung der Figuren

[0045] Die schon beschriebene [Fig. 1](#) ist eine vereinfachte schematische Darstellung eines Sigma-Delta-Modulators bekannten Typs nach dem Stand der Technik.

[0046] Die [Fig. 2](#) und [Fig. 3](#) sind schematische Darstellungen von erfindungsgemäßen Sigma-Delta-Modulatoren.

[0047] Die [Fig. 4](#) bis [Fig. 6](#) sind schematische Darstellungen spezieller Anwendungen erfindungsgemäßer Sigma-Delta-Modulatoren.

Detaillierte Beschreibung von Anwendungsarten der Erfindung

[0048] In der nachfolgenden Beschreibung haben identische, ähnliche oder äquivalente Teile der verschiedenen Figuren dieselben Bezugszeichen. Derart, indem Bezug auf vorangehende Figuren genommen wird, kann man auf die Wiederholung der Beschreibung schon erwähnter Elemente verzichten.

[0049] Der Sigma-Delta-Modulator **100** der [Fig. 2](#) umfasst zwischen einem Eingang E und einem Ausgang S in Reihenfolge einen ersten Resonator **110a**, einen zweiten Resonator **110b**, gestrichelt dargestellt, und einen Analog-Digital-Wandler **120**. Eine Rückkopplungsschleife **140** verbindet den Ausgang des Analog-Digital-Wandlers **120** mit dem Eingang **112** des ersten Resonators **110a**. Ein Operator **130**, gestrichelt dargestellt, kann dem Modulator eventuell zugeordnet werden, um einen Sigma-Delta-Modulator zu bilden.

[0050] Ein mit Hilfe eines Digital-Analog-Wandlers **142** gebildetes analoges Rückkopplungssignal wird über einen Verstärker **144a** in den Eingang **112** eingespeist. Ein Addierer **150** dient dazu, das Rückkopplungssignal und ein eventuelles Eingangssignal zu addieren, das in den Eingang E des Sigma-Delta-Modulators eingespeist wird.

[0051] Der erste Resonator **110a** ist zum Beispiel ein optischer, akustischer oder mechanischer Resonator. Er umfasst ein erstes Interface **112**, das dazu dient, ein elektrisches Eingangssignal und/oder ein elektrisches Rückkopplungssignal in ein mechanisches, elektrisches oder optisches Signal umzuwandeln. Umgekehrt ist ein zweites Interface **114**, angeordnet am Ausgang des Resonators **110a**, dazu vorgesehen, ein physikalisches Resonanzsignal in ein elektrisches Signal umzuwandeln, in Richtung des Analog-Digital-Wandlers **120**. Die Interfaces **112** und **114** sind zum Beispiel ein akustischer Transducer bzw. Wandler des Typs Lautsprecher und ein Mikro-

phon, wenn der Resonator **110a** ein akustischer Hohlraum bzw. Resonator ist. Ein Beispiel eines mit einem solchen Hohlraum bzw. Resonator ausgestatteten Modulators wird in der Folge detaillierter betrachtet.

[0052] Wenn der Resonator vom elektrostatischen oder elektromechanischen Typ ist, das heißt wenn er durch ein elektrisches Signal angeregt werden kann, entfallen die Interfaces **112** und/oder **114**.

[0053] Der zweite Resonator **110b**, gestrichelt dargestellt, kann ein dem ersten Resonator vergleichbarer Resonator sein oder eventuell ein elektrischer Resonator. Er ermöglicht, die Ordnung des Sigma-Delta-Modulators und folglich seine Leistungen zu erhöhen. Ein Zweig der Rückkopplungsschleife **140**, versehen mit einem Verstärker **144b**, ist mit einem Eingang des zweiten Resonators verbunden. Das Rückkopplungssignal und das Ausgangssignal des ersten Resonators werden durch einen Addierer **152** addiert.

[0054] Es sei präzisiert, dass der zweite Resonator **110b** und folglich der zweite Verstärker **144b** weggelassen werden können. Sie können ebenfalls durch eine größere Anzahl Resonatoren ersetzt werden, verbunden gemäß demselben Schaltplan, in Reihe mit dem ersten Resonator **110a**.

[0055] Je nach vorgesehener Verwendung des Sigma-Delta-Modulators können verschiedene Arten von Signalen in den Eingang E eingespeist werden. Bei einer Verwendung als Analog-Digital-Wandler kann man zum Beispiel ein analoges Signal oder eine einfache in Digitalwerte umzuwandelnde Spannung einspeisen. Bei einer Verwendung als Signalgenerator oder als Messvorrichtung kann in den Eingang E ein Anregungssignal eingespeist werden, das dazu bestimmt ist, eine Schwingung zu unterhalten. Schließlich ist es noch möglich, in den Eingang E kein äußeres Signal einzuspeisen.

[0056] Der Resonator **110a** kann nämlich als freier Oszillator verwendet werden. In diesem Fall ist eine Rückkopplungsschleife **160**, zum Beispiel ausgerüstet mit einem Verstärker **162**, zwischen dem Ausgang des Resonators und seinem Eingang geschaltet. Die Rückkopplungsschleife **160**, in der [Fig. 2](#) gestrichelt dargestellt, ist mit dem Addierer **150** vor dem Resonator **110a** verbunden.

[0057] Eine Regelschleife **170**, ebenfalls gestrichelt dargestellt, kann zwischen dem Ausgang S und dem Eingang E vorgesehen sein, um den Betrieb des Sigma-Delta-Modulators zu stabilisieren. Eine solche Schleife kann insbesondere dazu dienen, die Amplitude des Ausgangssignals zu stabilisieren, wenn der Sigma-Delta-Modulator als Signalgenerator benutzt wird. Im Beispiel der [Fig. 2](#) ist die Regelschleife mit

einem Regler **172** mit einem Einstellwert-Eingang K ausgestattet, um einen Vergleich zwischen einer Charakteristik des am Ausgang S verfügbaren Ausgangssignals und einer Charakteristik des an dem Einstellwert-Eingang K angelegten Einstellwert durchzuführen. Es handelt sich zum Beispiel um einen für eine Oszillationsamplitude repräsentativen Einstellwert. Der Regler **172** kann außerdem Filtereinrichtungen umfassen.

[0058] Man sieht, dass bei der in der [Fig. 2](#) dargestellten speziellen Ausführung die Regelschleife **170** nicht direkt mit dem Eingang E verbunden ist. Ein Multiplizierer **173** empfängt die Ausgänge des Reglers **172** und des Verstärkers **162**, um sie zu vor der Einspeisung in den Eingangsaddierer **150** zu multiplizieren. Wenn der Verstärker **162** einen Komparator mit logischem 0- oder 1-Ausgang umfasst, läuft die Multiplikation darauf hinaus, dass das Signal des Reglers an den Eingang angelegt wird oder nicht.

[0059] Die [Fig. 3](#) zeigt ein anderes Beispiel eines erfindungsgemäßen Sigma-Delta-Modulators. Bei diesem Beispiel geht man davon aus, dass der Resonator **110** ein mechanischer Resonator ist, dessen Eingang für eine Kraft oder eine Beschleunigung $\ddot{a}$ empfindlich ist. Der Resonator ist an seinem Ausgang mit einem Interface **114** verbunden, das fähig ist, ein mechanisches Resonanzsignal in ein elektrisches Signal umzuwandeln. Das elektrische Signal wird anschließend in einen Analog-Digital-Wandler **120** umgewandelt.

[0060] Im Gegensatz zu der Vorrichtung der [Fig. 2](#) ist das in den Eingang E des Sigma-Delta-Modulators eingespeiste Signal kein elektrisches Signal, so dass ein dem Interface **112** der [Fig. 2](#) vergleichbares Interface nicht nötig ist. Hingegen umfasst die Rückkopplungsschleife **140** des Sigma-Delta-Modulators der [Fig. 3](#) zusätzlich zu dem Digital-Analog-Wandler **142** ein Interface **146**, fähig ein analoges elektrisches Signal, geliefert durch den Digital-Analog-Wandler **142**, in ein mechanisches Signal, zum Beispiel eine Beschleunigung, umzuwandeln, das kompatibel ist mit dem Anregungseingang des Resonators. Zwischen dem Digital-Analog-Wandler **142** und dem Interface **146** kann ein Verstärker **144** vorgesehen werden.

[0061] Man kann außerdem feststellen, dass der Sigma-Delta-Modulator der [Fig. 3](#) nur einen einzigen Resonator **110** umfasst.

[0062] Die in der Folge beschriebene [Fig. 4](#) zeigt eine spezielle Ausführung eines erfindungsgemäßen Sigma-Delta-Modulators, bei dem der Resonator ein akustischer Gyrometer mit einem Hohlraum aus Silicium ist. Eine Beschreibung eines akustischen Gyrometers findet man zum Beispiel in dem weiter oben erwähnten Dokument (7).

[0063] In der [Fig. 4](#) ist der Hohlraum mit **110a** bezeichnet, analog zur [Fig. 2](#). Er bildet in Wirklichkeit einen Resonator mit einem mechanischen Eingang, noch genauer einem akustischen Eingang, und ebenfalls einem akustischen Ausgang. Ein erstes Interface **112**, dargestellt in Form eines Lautsprechers, ist ein Transducer bzw. Wandler, der fähig ist, ein von einem Eingangs-Addierer **150** stammendes elektrisches Signal umzuwandeln in ein in den Hohlraum, das heißt den Resonator **110a** eingespeistes akustisches Signal.

[0064] Am Ausgang des Hohlraums spielt ein kapazitives Mikrophon **114**, verbunden mit einem Verstärker, die umgekehrte Rolle. Es wandelt ein akustisches Signal des Hohlraums um in ein elektrisches Signal, das dazu bestimmt ist, in einem Analog-Digital-Wandler **120** eingespeist zu werden.

[0065] Eine positive Rückkopplungsschleife **160**, ausgestattet mit einem Verstärker **162**, eventuell verbunden mit einem nicht dargestellten Komparator, ermöglicht die Wiedereinspeisung eines Teils des durch das Mikrophon **114** gelieferten Signals in den Eingang des Hohlraums **110a** über den Wandler **112**. Diese Rückkopplung ermöglicht, den Resonator in einen freien Oszillator zu verwandeln.

[0066] Der oben genannte Analog-Digital-Wandler **140** sowie ein Digital-Analog-Wandler **142** der Rückkopplungsschleife **140** können 1-Bit-Wandler sein. Außerdem ist ein zweiter elektronischer Resonator **110b** in Reihe mit dem akustischen Gyrometer geschaltet. Die Beschreibung dieser Elemente wird hier nicht wiederholt. Man kann sich auf die in Verbindung mit der [Fig. 2](#) gegebene Beschreibung beziehen.

[0067] Der Ausgang des Analog-Digital-Wandlers **120** ist mit einem Ausgangsoperator **130** verbunden, der ein analoges Filter umfasst, fähig den pulsdichtemodulierten digitalen Ausgang in ein zum Beispiel sinusförmiges Ausgangssignal umzuwandeln. Diese Verwendung des Sigma-Delta-Modulators ist zum Beispiel die eines Signalgenerators.

[0068] Der Ausgang des Analog-Digital-Wandlers **120** ist auch mit einer Regelschleife **170** verbunden, die mit dem Eingang des ersten Resonators **110a** verbunden ist, um die Amplitude des Ausgangssignals zu stabilisieren. Außerdem gewährleistet die Schleife **160** eine Frequenzstabilisierung.

[0069] Die Regelschleife umfasst zum Beispiel ein Dezimator-Filter **172**, um das in einem Bit codierte modulierte Signal des Analog-Digital-Wandlers **120** umzuwandeln in ein in mehreren Bits codiertes Signal. Auf den Dezimator folgt ein PID-Regler **174**, der ermöglicht, eine Differenz zwischen dem Ausgangssignal – oder einer Charakteristik dieses Signals – und einer Einstellwert zu minimieren, der die zu errei-

chende Amplitude darstellt. Der Ausgang des PID-Reglers wird zum Signal der Rückkopplungsschleife **160** addiert oder mit diesem Signal multipliziert. Zu diesem Zweck ist ein Addierer **154** oder ein Multiplizierer vorgesehen. Die Realisierung der Vorrichtung mit einem Multiplizierer ist kostengünstig und effizient.

[0070] Die [Fig. 5](#) zeigt die Verwendung eines erfindungsgemäßen Sigma-Delta-Modulators für die Kontrolle der Resonanzabstimmung eines Resonators. Im Falle der Vorrichtung der [Fig. 6](#) ist der Resonator **110a** ein elektrooptischer Modulator. Der Resonator hat zwei Eingänge. Ein erster optischer Eingang ist mit einem HeNe-Anregungslaser **190** verbunden, der mit dem Resonator durch ein optisches System **192** gekoppelt ist, das durch ein Prisma, einen Polarisator und eine Linse gebildet wird. Ein zweiter Eingang ist ein elektrischer Eingang, verbunden mit dem Eingang E des Sigma-Delta-Modulators durch eine Anpassungsschaltung **194** und einen Verstärker **196**. Der optische Ausgang des Resonators ist mit dem Analog-Digital-Wandler **120** verbunden durch eine optoelektronisches Interface **114** in Form eines Fabry-Perot-Interferometers, dem eine Photodiode und ein Verstärker zugeordnet sind, die nicht bezeichnet bzw. dargestellt sind.

[0071] Bei dieser speziellen Ausführung des Sigma-Delta-Modulators ist die Rückkopplungsschleife **140** durch einen Addierer **150** mit dem elektrischen Eingang des Resonators verbunden.

[0072] Bei dieser Anwendung wird der Resonator – das heißt der elektrooptische Modulator – zur Kontrolle der Modulationsfrequenz des optischen Signal benutzt.

[0073] Eine vollständigere Beschreibung eines elektrooptischen Modulators des in dem Sigma-Delta-Modulators der [Fig. 6](#) verwendeten Typs findet man in dem Dokument (9).

[0074] Ein letztes spezielles Anwendungsbeispiel der Erfindung zeigt die [Fig. 6](#). In dieser [Fig. 6](#) sieht man ein System mit zwei gekoppelten Sigma-Delta-Modulatoren **100**, **200**. Diese Art von Vibrationsgyrometer bzw. Schwingkreisel wird als ein System mit zwei gekoppelten mechanischen Oszillatoren verwendet. Die Oszillatoren dienen als Resonator für die Sigma-Delta-Modulatoren. Die Bewegung des zur Anregung benutzten ersten mechanischen Oszillators wird auf den zweiten, zur Detektion benutzten Oszillator übertragen mittels einer durch die Corioliskraft bewirkten Kopplung, wie oben beschrieben. Die Detektion betrifft eine Rotationswinkelgeschwindigkeit.

[0075] Die Corioliskräfte, mit F_{coriolis} bezeichnet, können folgendermaßen ausgedrückt werden:

$$\bar{F}_{\text{coriolis}} = 2 \cdot m \cdot \bar{V} \wedge \bar{\Omega}$$

[0076] In diesem Ausdruck bezeichnen m die Masse des ersten mechanischen Oszillators **110a**, V die Geschwindigkeit des ersten mechanischen Oszillators und Ω die zu messende Rotationsgeschwindigkeit. Man leitet Ω von der Messung der Bewegung des zweiten Oszillators ab.

[0077] Jede Veränderung der Anregung, das heißt der Geschwindigkeit V , findet sich in dem Detektionssignal wieder. Man misst die Geschwindigkeit V , um die Detektion zu demodulieren.

[0078] Für eine bestimmte Rotationsgeschwindigkeit ist das Ausgangssignal maximal, wenn der zweite Oszillator **210a** mit seiner Resonanzfrequenz schwingt und der erste Oszillator eine maximale Geschwindigkeit aufweist. Obgleich nicht unbedingt erforderlich, ist es also vorteilhaft, wenn die beiden Oszillatoren mit einer gleichen oder ähnlichen Resonanzfrequenz gewählt werden, das heißt zum Beispiel um einige Hertz verschieden.

[0079] Die Oszillatoren des Vibrationsgyrometers bzw. Schwingkreisel können auf dem Umweg über Kondensatoren elektrostatisch gesteuert werden. Das Ausgangssignal kann in gleicher Weise durch die Messung der Veränderung der Kondensatorkapazität ermittelt bzw. realisiert werden.

[0080] Schließlich sind das Eingangs- und Ausgangssignal der Resonatoren – im vorliegenden Fall Oszillatoren – elektrische Signale. Nicht dargestellte Kondensatoren dienen als Interface und verwandeln die elektrische Leistung in elektrostatische Kräfte und folglich in mechanische Verschiebung, und umgekehrt.

[0081] In der nachfolgenden Beschreibung werden dieselben Bezugszeichen wie in den vorhergehenden Figuren verwendet, um die Elemente des ersten Sigma-Delta-Modulators zu bezeichnen, und um ähnliche oder äquivalente Elemente des zweiten Modulators zu bezeichnen, werden diese Bezugszeichen um 100 erhöht.

[0082] Der erste Sigma-Delta-Modulator **100** umfasst einen Resonator **110a**, der – einer Rückkopplungsschleife **160** mit einem Verstärker **162** zugeordnet – den ersten, sogenannten Anregungsozillator bildet. Dieser wird auf seine eigene Resonanzfrequenz geregelt. Man kann feststellen, dass die Rückkopplungsschleife **160** eventuell weggelassen werden kann, wenn an den Eingang des ersten Resonators **110a**, das heißt an den Addierer **150**, ein äußeres Anregungssignal angelegt wird.

[0083] Die Rückkopplungsschleife **140** des ersten Sigma-Delta-Modulators **100** umfasst einen Regler

144a mit einem Verschiebungs-Einstellwerteingang. Der Regler **144a** ist vergleichbar mit dem Verstärker **144a** der [Fig. 2](#) und dazu bestimmt, in den Eingang des Anregungsozillators **110a** eine Rückkopplung einzuspeisen. Ein weiterer Verstärker **144b** ist für die Rückkopplung eines zweiten elektronischen Resonators **110b** vorgesehen.

[0084] Das an dem Ausgang S_1 des Analog-Digital-Wandlers **120** verfügbare Signal des ersten Sigma-Delta-Modulators wird in einen nicht dargestellten Ausgangsoperator **130** eingespeist, um die oben genannte Geschwindigkeit V zu ermitteln bzw. zu realisieren.

[0085] Gemäß einer Perfektionierung, gestrichelt dargestellt, können eine Rückkopplungsschleife mit Filtern **171** und einem Regler **172** zwischen dem Ausgang S_1 und dem Eingang des Resonators **110a** geschaltet werden, wobei der Regler **174** ebenfalls einen Einstellwerteingang aufweist.

[0086] Der zweite Sigma-Delta-Modulator **200** umfasst einen Resonator **210a**, mechanisch mit dem Resonator **110a** des ersten Sigma-Delta-Modulators **100** gekoppelt. Die Kopplung ist in der Figur durch eine gestrichelte Linie C dargestellt.

[0087] Die Bezugszeichen **210b**, **220**, **240**, **242**, **244a** und **244b** bezeichnen den Teilen **110b**, **120**, **140**, **144a** und **144b** äquivalente Teile, die weiter oben in Verbindung mit der [Fig. 2](#) schon beschrieben worden sind. Ihre Beschreibung wird hier nicht wiederholt.

[0088] Der Ausgang S_2 des Analog-Digital-Wandlers **220** des zweiten Sigma-Delta-Modulators **200** wird ebenfalls in einen Operator **230** eingespeist, um ein für die Corioliskraft repräsentatives Ausgangssignal zu liefern.

[0089] Ein Rechner kann vorgesehen werden, um aus der Größe der Corioliskraft und der Geschwindigkeit V die weiter oben genannte Rotationsgeschwindigkeit Ω zu ermitteln.

Genannte Dokumente

- (1) "Multi-purpose interface for sensor systems fabricated by CMOS technology with postprocessing", Carlos Azeredo Leme and Henry Baltes, Sensors and Actuators A. 37–38 (1993) 77–81, © 1993, Elsevier Sequoia
 - (2) "A 2.5 MHz 55 dB Switched-current BandPass $\Sigma\Delta$ Modulator for AM Signal Conversion",
 - (3) "A 10.7-MHz N-Path forth-Order Bandpass Sigma-Delta Modulator"
- Fabrizio Francesconi, Valentino Liberali und Franco Maloberti,

Micronova Sistemi S. r. l.

ESSCIRC'96, Seiten 156–159

(4) "An Eight-Order BandPass $\Sigma\Delta$ Modulator for A/D Conversion in Digital Radio",

Loai Louis, John Abcarius und Gordon W. Roberts, IEEE JOURNAL OF SOLID-STATE CIRCUITS, Vol. 34, Nr. 4, April 1999.

(5) "An Invertigation of Bandpass Sigma-Delta A/D Converters"

Yvan Botteron und Behrouz Nowrouzian, 1997 IEEE, Proceedings of the Midwest Symposium on circuits and systems, Vol. 1, SS. 293.6

(6) "BandPass Sigma-Delta Modulator for wideband IF signals"

Luca Daniel, Marco Sabatini, BandPass Sigma-Delta Modulator for wideband IF signals, 10. Juni 1999.

(7) "Preliminary Results on a Silicon Gyrometer Based on Acoustic Mode Coupling in Small Cavities" Tarik Bourouina, Anne Exertier, Serge Spirkovitch, Bernard Chaumet und Eric Pleska, JOURNAL OF MICROELECTROMECHANICAL SYSTEMS, Vol. 6, Nr. 4, Dezember 1997.

(8) "OPTICAL SYSTEM FOR PRESSURE AND TEMPERATURE SENSING"

K. Seibert, d. Largeau, B. Bonvalot und D. T. Angelidis, P. Parsons,

The 7th International Conference on Solid-State Sensors and Actuators.

(9) "RESONANTLY ENHANCED RADO FREQUENCY ELECTROOPTIC PHASE MODULATOR"

Chi Man Shum und Edward A. Whittaker, APPLIED OPTICS, Vol. 29, Nr. 3, 20. Januar 1990.

(10) An Integrated CMOS Micromechanical Resonator High-Q "Oscillator,

de Clark T.-C Nguyen, Member, IEEE und Roger T. Howe,

IEEE JOURNAL OF SOLID-STATE CIRCUITS, Vol. 34, Nr. 4, April 1999, © 1999 IEEE.

(11) High-Accuracy circuits for On-chip Capacitance Ratio Testing or Sensor Readout, Yumin Cao und Gabor C. Temes,

IEEE TRANSACTIONS ON CIRCUITS AND SYSTEMS-II:

ANALOG AND DIGITAL SIGNAL PROCESSINGS, Vol. 41, Nr. 9, September 1994, © 1994 IEEE.

(12) WO-98/27402

Patentansprüche

1. Sigma-Delta-Modulator, umfassend:

- wenigstens einen Resonator (**110**, **110a**, **110b**),
- einen Konverter (**120**) zur Umwandlung eines von dem Resonator stammenden analogen Signals in ein digitales Zeitinformationssignal, und
- eine Rückkopplungsschleife (**140**), die einen Ausgang des Konverters mit einem Anregungseingang des Resonators verbindet,

dadurch gekennzeichnet, dass wenigstens ein Re-

sonator (**110**, **110a**) des Modulators ein aus der Gruppe ausgewählter Resonator ist, welche die mechanischen, akustischen, elektromechanischen, elektrostatischen, optischen, chemischen Resonatoren umfasst, wobei der Resonator einen mechanischen, optischen oder akustischen Anregungseingang aufweist und die Rückkopplungsschleife mit dem Anregungseingang jeweils durch eine elektromechanische Schnitt- bzw. Kopplungsstelle, eine elektroakustische Kopplungsstelle oder eine elektrooptische Kopplungsstelle des Signals verbunden ist.

2. Sigma-Delta-Modulator nach Anspruch 1, bei dem der Resonator (**110a**) ein freier Oszillator ist und eine Rückkopplungsschleife (**160**) umfasst, die einen Ausgang des Resonators mit einem Anregungseingang des Resonators verbindet.

3. Modulator nach Anspruch 1 mit einer Regelungsschleife (**170**), die einen Ausgang des Modulators mit einem Anregungseingang des Resonators verbindet.

4. Sigma-Delta-Konverter mit einem Modulator nach Anspruch 1 und Bandpassfiltereinrichtungen (**130**), verbunden mit einem Ausgang des Modulators.

5. Analog-Digitalumwandlungsvorrichtung eines Signals mit einem analogen Signaleingang (E) und einem Sigma-Delta-Konverter nach Anspruch 4, wobei der analoge Signaleingang mit dem Anregungseingang des Resonators verbunden ist.

6. Vorrichtung nach Anspruch 5, bei welcher der analoge Eingang mit dem Anregungseingang durch eine elektromechanische oder elektrooptische Kopplungsstelle (**112**) verbunden ist.

7. Signalgenerator mit einem Sigma-Delta-Modulator nach Anspruch 1, bei dem wenigstens ein erster Resonator (**110a**) ein freier Oszillator ist.

8. Messvorrichtung einer physikalischen Größe, einen für die genannte physikalische Größe empfindliche Detektionsresonator und einen diesen Detektionsresonator enthaltenden Sigma-Delta-Modulator nach Anspruch 1 umfassend.

9. Messvorrichtung nach Anspruch 8, bei welcher der Detektionsresonator (**110a**, **210a**) ein freier Oszillator ist.

10. Messvorrichtung nach Anspruch 8, Anregungseinrichtungen des Detektionsresonators (**210a**) umfassend, mit einem zweiten Resonator, Anregungsresonator genannt, gekoppelt mit dem Detektionsresonator.

11. Vorrichtung nach Anspruch 10 mit einem den

Anregungsresonator enthaltenden zweiten Sigma-Delta-Modulator.

12. Messvorrichtung nach Anspruch 8, bei welcher der Detektionsresonator mit dem Anregungsresonator durch eine physikalische Größe gekoppelt ist.

13. Vorrichtung nach Anspruch 12, bei der die physikalische Größe eine Corioliskraft ist.

14. Verwendung eines Sigma-Delta-Modulators nach Anspruch 1 in einer Vorrichtung, ausgewählt unter einem Analog-Digitalkonverter, einem Detektor einer physikalischen Größe und einem Signalgenerator.

Es folgen 4 Blatt Zeichnungen

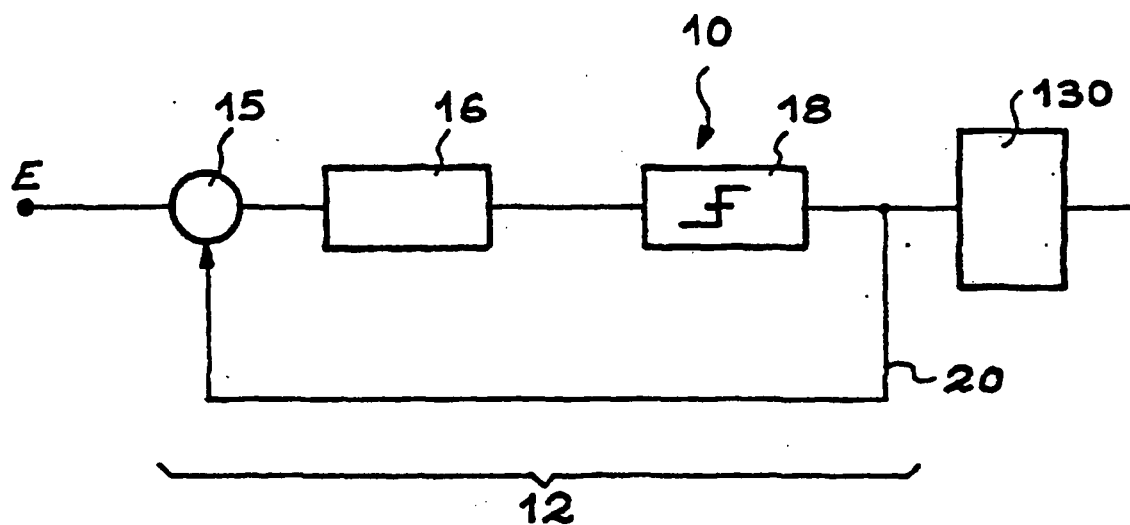


FIG. 1

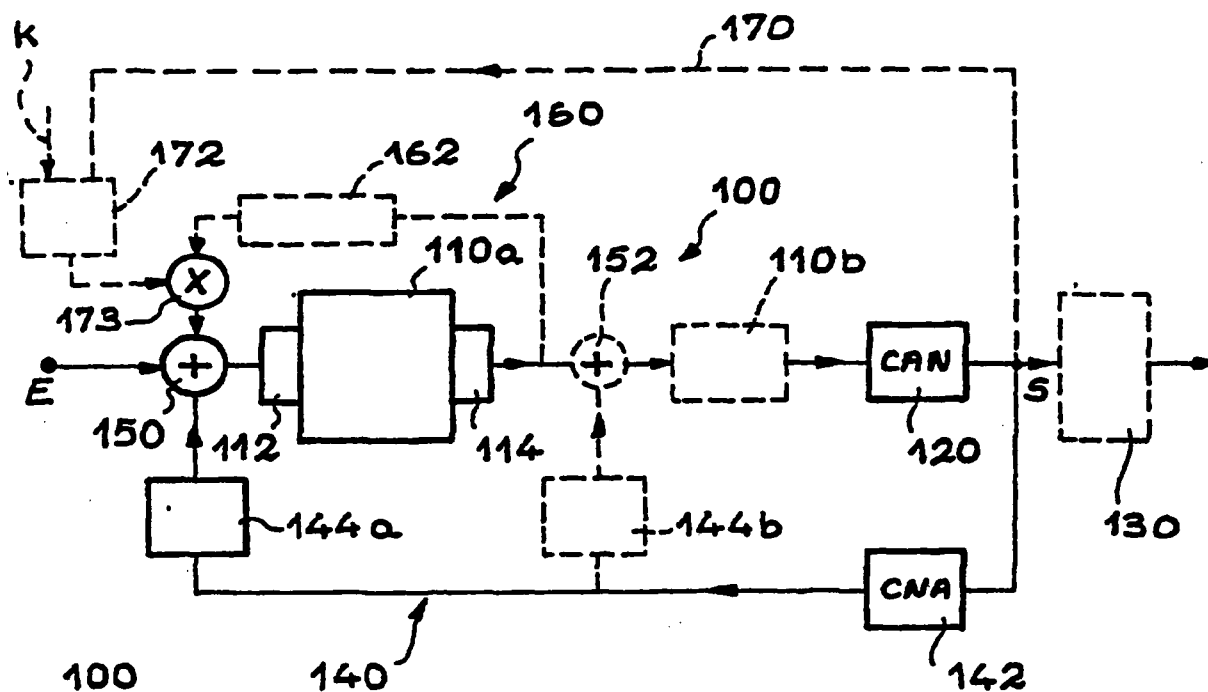


FIG. 2

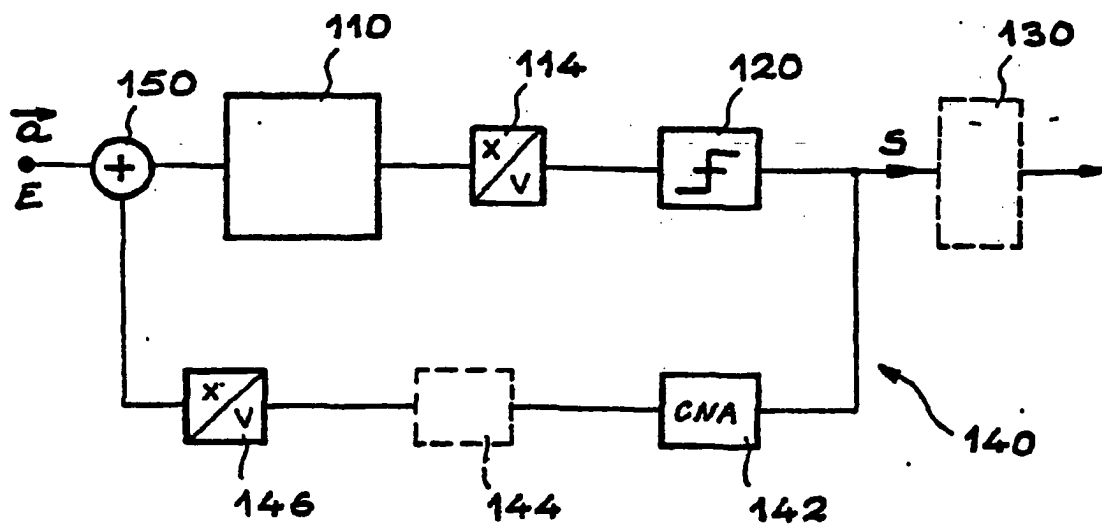


FIG. 3

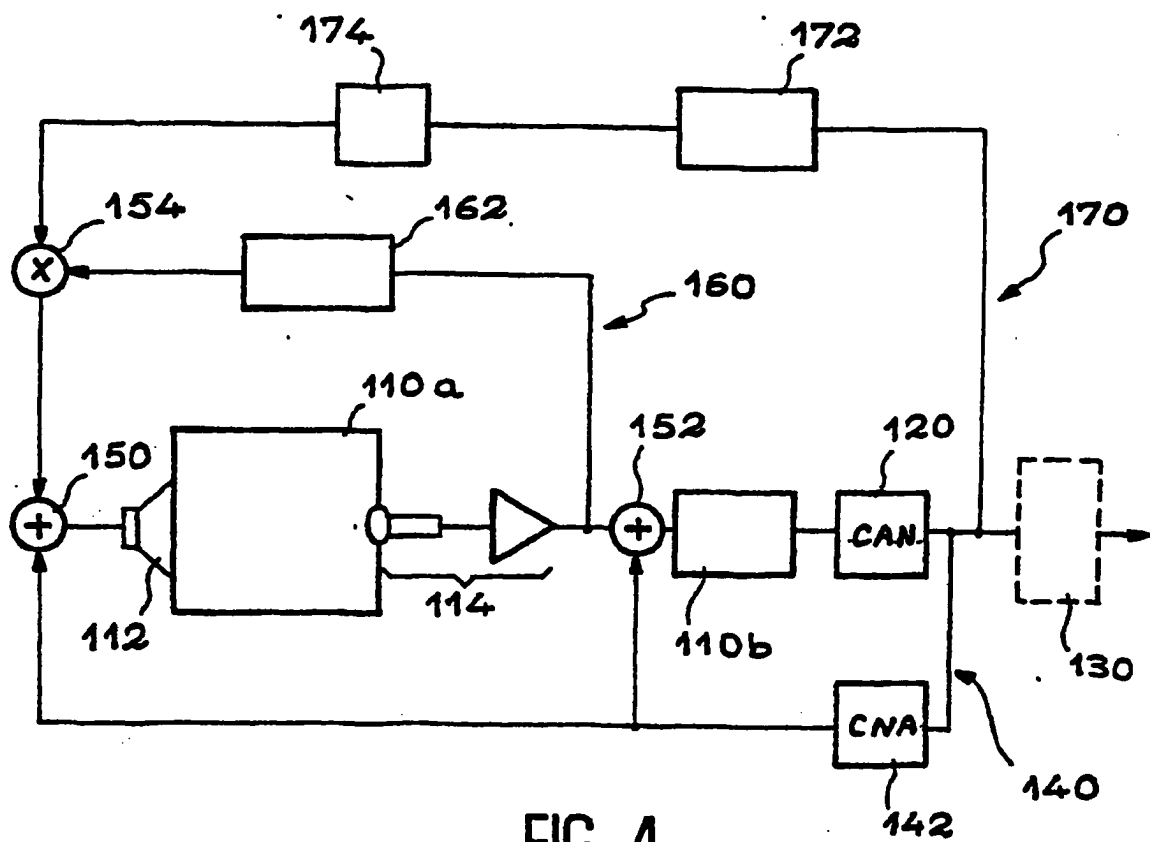


FIG. 4

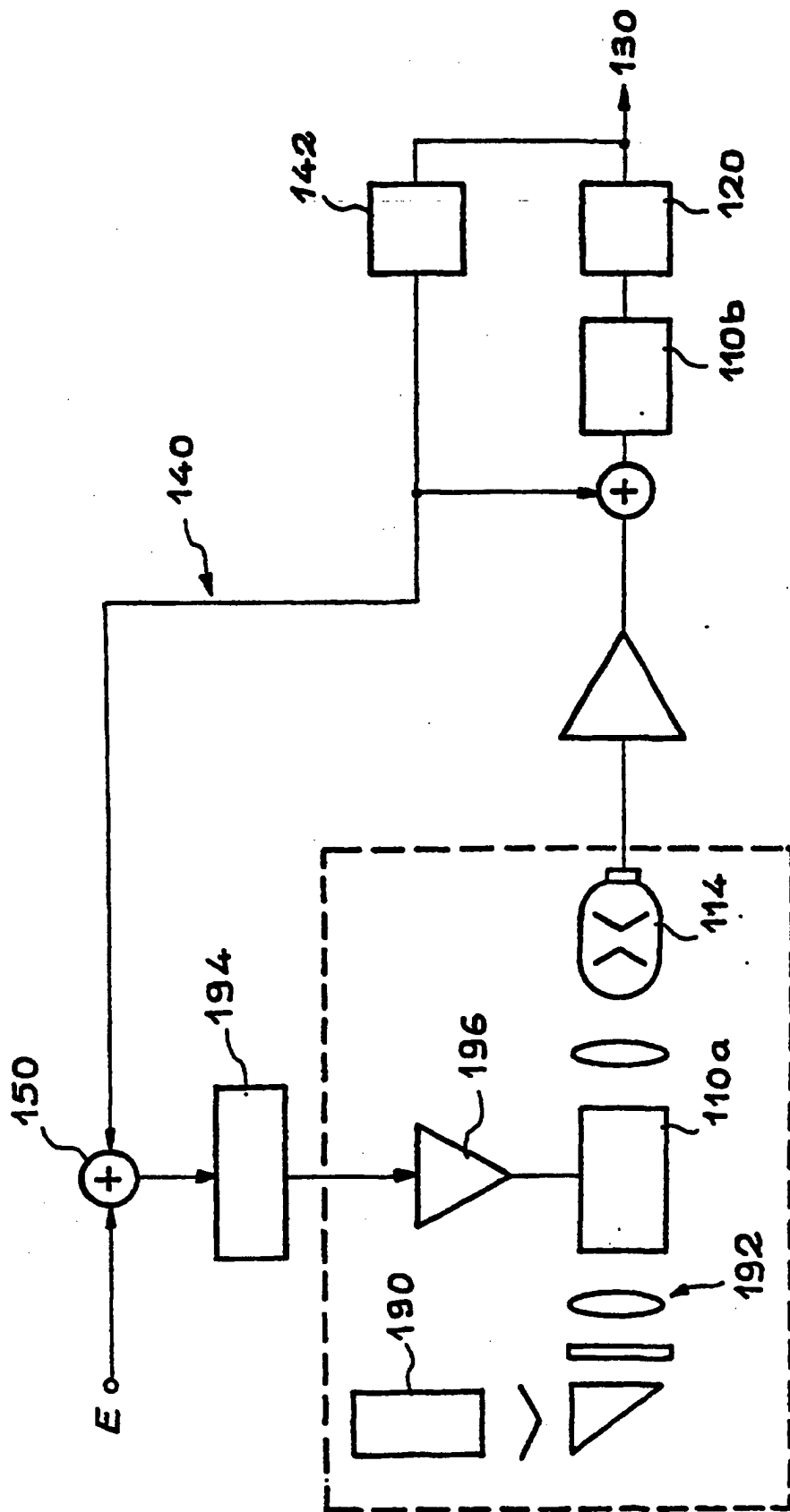


FIG. 5

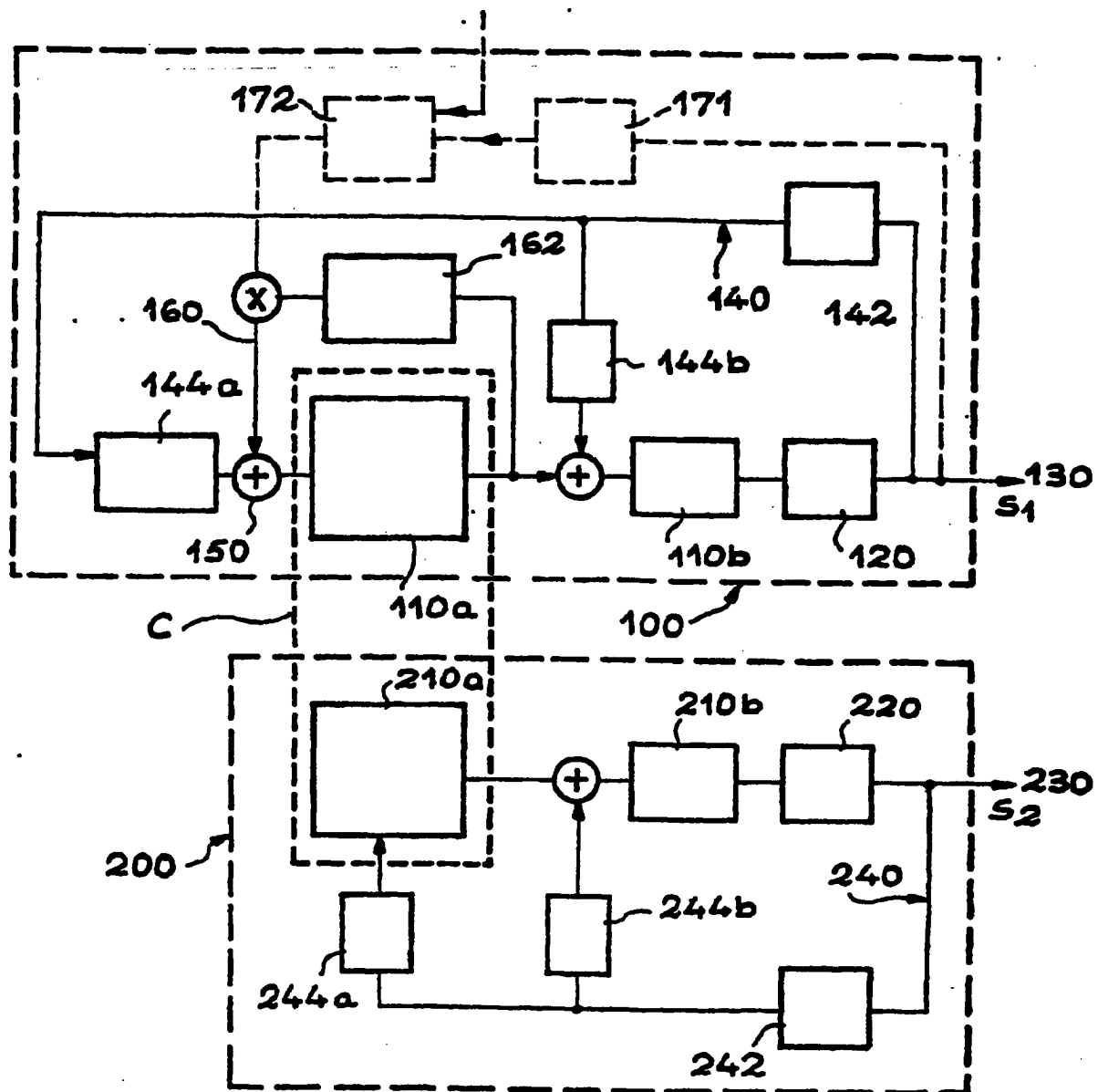


FIG. 6