



(19)
Bundesrepublik Deutschland
Deutsches Patent- und Markenamt

(10) **DE 602 03 805 T2 2006.01.19**

(12) **Übersetzung der europäischen Patentschrift**

(97) **EP 1 419 476 B1**

(21) Deutsches Aktenzeichen: **602 03 805.7**

(86) PCT-Aktenzeichen: **PCT/GB02/03895**

(96) Europäisches Aktenzeichen: **02 755 237.1**

(87) PCT-Veröffentlichungs-Nr.: **WO 03/019461**

(86) PCT-Anmeldetag: **23.08.2002**

(87) Veröffentlichungstag
der PCT-Anmeldung: **06.03.2003**

(97) Erstveröffentlichung durch das EPA: **19.05.2004**

(97) Veröffentlichungstag
der Patenterteilung beim EPA: **20.04.2005**

(47) Veröffentlichungstag im Patentblatt: **19.01.2006**

(51) Int Cl.⁸: **G06K 7/10 (2006.01)**

G06K 19/067 (2006.01)

G01S 13/02 (2006.01)

B60C 23/04 (2006.01)

(30) Unionspriorität:

0120571 23.08.2001 GB

(73) Patentinhaber:

Transense Technologies PLC, Bicester, Oxon, GB

(74) Vertreter:

**Grünecker, Kinkeldey, Stockmair &
Schwanhäusser, 80538 München**

(84) Benannte Vertragsstaaten:

**AT, BE, BG, CH, CY, CZ, DE, DK, EE, ES, FI, FR, GB,
GR, IE, IT, LI, LU, MC, NL, PT, SE, SK, TR**

(72) Erfinder:

**KALININ, Victor Alexandrovich, Headington,
Oxford OX3 OAR, GB; BECKLEY, John Peter,
Bicester, Oxfordshire OX4 3QS, GB; BOWN,
George E., Abington, Oxfordshire OX13 6SF, GB**

(54) Bezeichnung: **ABFRAGEVERFAHREN FÜR EIN ÜBERWACHUNGSSYSTEM MIT PASSIVEN SENSOREN**

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

[0001] Diese Erfindung betrifft ein Verfahren zum Abfragen eines Sensorsystems, das auf einem drahtlos abgefragten passiven Sensor-Transponder, wie beispielsweise zum Messen von Druck und Temperatur der Luft in einem Fahrzeugreifen verwendet, basiert. Spezieller stellt die bevorzugte Ausführung der Erfindung einen Abfragealgorithmus für einen passiven Sensor, der hohe Genauigkeit der Messung von Temperatur und Druck ermöglicht, bereit.

[0002] Nach dem Stand der Technik ist eine Anzahl von Lösungen für das Problem einer drahtlosen Abfrage von passiven Druck- und Temperatursensoren bekannt. Die Sensoren verwenden entweder Ein-Tor-Verzögerungsleitungen oder Ein-Tor-Resonatoren, vorzugsweise auf Oberflächenschallwellentechnologie (SAW-Technologie) basierend, obwohl andere Ansätze ebenso möglich sind (beispielsweise Volumenschallwellenvorrichtungen oder dielektrische Resonatoren). Die Verwendung von Verzögerungsleitungen (siehe F. Schmidt und G. Scholl Wireless SAW identification and sensor systems in dem Buch Advances in Surface Acoustic Wave Technology, Systems and Applications, Herausgeber C. W. C. Ruppel und T. A. Fjeldly, Singapur, World Scientific 2001, Seite 287) oder von Resonatoren (siehe W. Buff, S. Klett, M. Rusko, J. Ehrenpfordt und M. Goroll Passive remote sensing for temperature and pressure using SAW resonator devices, IEEE Trans. On Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control, Band 45, Nr. 8, 1998, Seiten 1388–1392) wird von der Notwendigkeit diktiert, einerseits ein passives Sensorverhalten und andererseits ein direkt durchgehendes Signal zusammen mit Umgebungs-Echosignalen zu unterscheiden. Dies wird durch das Nutzen der Tatsache, dass das Impulsantwortverhalten der Verzögerungsleitungen und der Resonatoren beachtlich länger als jedes Störsignal ist, erreicht.

[0003] Das auf Verzögerungsleitungen basierende Abfragen von passiven SAW-Sensoren wird üblicherweise mittels sehr kurzer (üblicherweise 0,1 μ s) HF-Impulse durchgeführt. Im Ergebnis erfordert das Abfragesystem eine relativ weite Bandbreite von 10 MHz oder sogar mehr, die bei Bändern für die industrielle, wissenschaftliche und medizinische Anwendung (ISM-Bänder) unter 1 GHz nicht lizenzfrei verfügbar ist. Für diese Bänder sind Sensoren, die auf Ein-Tor-Resonatoren mit hohem Q-Faktor basieren, wegen ihres Schmalbandverhaltens besser geeignet. Aus diesem Grund werden wir uns auf das Abfragen von passiven Sensoren des Resonatortyps, vorzugsweise auf SAW-Resonatoren basierend, konzentrieren. Der Hauptzweck des Abfragens ist, bei den Resonatoren die Frequenz der Eigenschwingungen (Resonanzfrequenz), die durch relativ lange Schmalband-HF-Abfrageimpulse angeregt wird, zu messen. Da die Resonanzfrequenzen von der Temperatur und

dem Druck abhängig hergestellt werden können, ermöglicht das Kennen der Resonanzfrequenzen, dass Temperatur und Druck berechnet werden können.

[0004] Um den Einfluss von variierender Antennenimpedanz auszuschließen, schlägt der Stand der Technik (siehe W. Buff, S. Klett, M. Rusko, J. Ehrenpfordt und M. Goroll, die zuvor erwähnt wurden) vor, dass eine Differenz zwischen den Frequenzen der Eigenschwingungen von zwei gleichen Resonatoren (möglicherweise mit geringfügig verschiedenen Resonanzfrequenzen), die an eine Antenne angeschlossen sind, gemessen wird. Wenn beide Resonatoren derselben Temperatur sind und verschiedene Druckempfindlichkeiten aufweisen, kann der Druck aus der Frequenzdifferenz ermittelt werden und der Einfluss der Temperatur wird weitgehend verringert. Die beiden Resonatoren können durch biharmonische HF-Impulse, die in beiden Resonatoren gleichzeitig Eigenschwingungen anregen, sehr effizient abgefragt werden (siehe GB9925538.2). Wenn der Abfrageimpuls vorbei ist, wird die Antwort ein exponentiell abklingendes Schwebungssignal, mit der Schwebungsfrequenz gleich der gemessenen Frequenzdifferenz, darstellen. Die Schwebungsfrequenz kann mittels einer Amplitudendetektion und Periodenzählung genau bestimmt werden.

[0005] In dem Fall von sowohl der Messung des Drucks als auch der Temperatur sind wenigstens drei an eine Antenne angeschlossene Resonatoren erforderlich und zwei Frequenzdifferenzen müssen gemessen werden, um die beiden Unbekannten, den Druck und die Temperatur, zu berechnen (siehe W. Buff, M. Rosko, M. Goroll, J. Ehrenpfordt und T. Vandahl Universal pressure and temperatur SAW sensor for wireless applications, 1997 IEEE Ultrasonic Symp. Proceedings, 1997, Seiten 359–362). Das Messen der Schwebungsfrequenz ist in diesem Fall unmöglich. Die folgenden Abfrage Techniken sind aus der Literatur bekannt

1. Die Resonatoren werden der Reihe nach durch HF-Impulse angeregt. Das exponentiell abklingende Ansprechverhalten jedes Resonators wird von einer Antenne aufgenommen und wird als ein Eingangssignal für eine gesteuerte PLL-Verfolgungsänderung der Resonanzfrequenz verwendet (siehe A. Pohl, G. Ostermeyer und F. Seifert Wireless sensing using oscillator circuits locked to remote high-Q resonator IEEE Trans. On Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control, Band 45, Nr. 5, 1998, Seiten 1161–1168). Diese Technik ist für einen einzelnen Resonator geeigneter und wird in dem Fall von drei Resonatoren, insbesondere, wenn deren Frequenzen sehr nahe beieinander liegen, zu schwerfällig und unzuverlässig.
2. Die Resonatoren werden der Reihe nach durch einen HF-Impuls angeregt. Das exponentiell abklingende Ansprechverhalten jedes Resonators wird von einer Antenne aufgenommen, auf eine

niedrigere Zwischenfrequenz abwärts gewandelt und anschließend wird die Periode der Eigenschwingung gezählt (siehe GB9925538.2). Dieses Verfahren funktioniert ebenso gut für einen einzelnen Resonator oder, wenn der Abstand zwischen den Resonanzfrequenzen viel größer als die Resonatorbandbreite ist. Wenn sie jedoch weniger als zehn Mal die Bandbreite (die in diesem Fall das ISM-Band ist) ist, dann wird mehr als ein Resonator durch den HF-Impuls angeregt werden, wodurch Störfrequenzmodulation in der Sensorantwort verursacht wird und die Genauigkeit der Messung drastisch reduziert wird.

3. Alle drei Resonatoren werden auf einmal angeregt. Das Spektrum der Sensorantwort wird in dem Empfänger mittels diskreter Fourier-Transformation analysiert und alle Resonanzfrequenzen werden gemessen (siehe L. Reindl, G. Scholl, T. Ostertag, H. Scherr und F. Schmidt Theory and applications of passive SAW radio transponders as sensors, IEEE Trans. On Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control, Band 45 Nr. 5, 1998, Seiten 1281–1291). Dieser Lösungsansatz erlaubt das Abfragen einer großen Anzahl von Resonatoren. Jedoch erfordert er die Verwendung eines Breitband-HF-Impulses, der den gesamten Frequenzbereich des Betriebs des Sensors abdeckt. Dem Rechnung tragend, dass die Höchstleistung des Abfrageimpulses im ISM-Band begrenzt ist (üblicherweise ist sie nicht höher als 10 mW), ist es klar, dass die Verbreiterung des Impulsspektrums die Effizienz der Resonatoranregung verringert. Dies beeinflusst das Signal-zu-Rausch-Verhältnis (SNR) und folglich die Genauigkeit der Messung nachteilig.

[0006] US-A-5691698 legt ein Erkennungs- und/oder Sensorsystem, bei dem ein Sensor mittels eines Impulses abgefragt wird offen. Ein sich daraus ergebendes Signal, das zurück an eine Empfangsvorrichtung übertragen wird und das eine Amplitude aufweist, die mit der Zeit abfällt, fourier-transformiert von der Abfallfunktion der Amplitude, die verwendet wird, um die Resonanzfrequenzen der Resonatoren in dem System zu bestimmen.

[0007] US-A-4725841 legt ein System zum Abfragen eines passiven Transponders, der phasenverschlüsselte Information trägt, offen, bei dem ein Antwortsignal von einem passiven Transponder durch einen Bandpassfilter, der durch einen Anti-Aliasing-Filter bereitgestellt wird, geführt wird, wiederholt mit einer Abtastfrequenz abgetastet wird und bevor es einer Fourier-Transformation ausgesetzt wird, digitalisiert wird, um die Frequenz, die in dem Originalsignal enthalten ist, zu bestimmen.

[0008] Es ist die Aufgabe der vorliegenden Erfindung, ein Abfrageverfahren bereitzustellen, das die Vorteile der Fourier-Analyse behält und gleichzeitig

eine hohe Effizienz der Resonatorerregung und eine hohe Genauigkeit der Messungen bereitstellt.

[0009] Gemäß der vorliegenden Erfindung umfasst ein Verfahren zum Abfragen von Resonanzanordnungen zum Bestimmen der Resonanzfrequenzen der Vorrichtung die folgenden Schritte:

- (1) Bestimmen einer optimalen Abfragefrequenz für jede Resonanzvorrichtung,
- (2) Wiederholen der Abfrage jeder Resonanzvorrichtung auf ihrer jeweiligen, wie in Schritt (1) bestimmten, optimalen Abfragefrequenz eine Vielzahl von Malen,
- (3) Durchführen diskreter Fourier-Transformationen auf den Daten, die als Ergebnis des Schrittes (2) gesammelt wurden,
- (4) Bestimmen des Mittelwertes der aus Schritt (3) gewonnenen Daten.

[0010] Die Erfindung wird durch die folgende Beschreibung einer bevorzugten Ausführung davon besser verstanden. Die Ausführung wird ausschließlich beispielhaft beschrieben, wobei Bezug auf die begleitenden Zeichnungen genommen wird, in denen:

[0011] [Fig. 1](#) schematisch ein Druck- und Temperaturüberwachungssystem zur Verwendung in einem Fahrzeugreifen darstellt und

[0012] [Fig. 2](#) den durch die vorliegende Erfindung vorgeschlagenen Abfragealgorithmus darstellt.

[0013] Zuerst auf die [Fig. 1](#) Bezug nehmend, ist die vorliegende Erfindung insbesondere auf ein System zum Überwachen der Temperatur und des Drucks in einem Fahrzeugreifen anwendbar. Es ist jedoch zur Kenntnis zu nehmen, dass die Erfindung nicht auf diese Anwendung beschränkt ist und in anderen Fällen, bei denen der Druck und die Temperatur zu überwachen sind, oder auf weitere Fälle, bei denen durch ein passives Sensorsystem eine Vielzahl weiterer Parameter zu messen ist, angewendet werden kann.

[0014] Die bevorzugte Ausführung der vorliegenden Erfindung umfasst drei Oberflächenschallwellenvorrichtungen SAW1, SAW2 und SAW3, die an eine gemeinsame Antenne angeschlossen sind. Während SAW-Vorrichtungen bevorzugt als Einrichtungen zum Erzeugen von Signalen, die die abgetastete Bedingung angeben, verwendet werden, ist zur Kenntnis zu nehmen, dass die Erfindung nicht auf solche Vorrichtungen beschränkt ist und dass andere passive Sensoren, die in der Lage sind, mittels Resonanzfrequenz adäquate Angaben bereitzustellen, verwendet werden können.

[0015] In der bestimmten bevorzugten Ausführung der vorliegenden Erfindung (Abtasten des Drucks und der Temperatur von Fahrzeugreifen) sind die

SAW-Vorrichtungen SAW1, SAW2, SAW3 und die Antenne **12** als eine Einheit A innerhalb eines Fahrzeugreifens befestigt. Eine Anregungs- und Überwachungseinheit B ist auf dem Fahrzeug angeordnet, um Anregungssignale an die in dem Reifen befestigte Einheit bereitzustellen und um Antwortsignale von dieser zu erhalten. Zu diesem Zweck enthält die Einheit B eine Antenne **11** zum Kommunizieren mit der Antenne **12** der Einheit A.

[0016] Durch einen Leistungsverstärker **8**, der durch einen Sender-Synthesizer **10** angeregt wird, wird ein Abfrageimpuls erzeugt. Der Impuls geht durch einen HF-Schalter **1** zu der Antenne **11** der Abfrageeinheit B. Die ausgestrahlte elektromagnetische Welle wird von der Antenne **12** der Sensoreinheit A aufgenommen und regt infolgedessen die drei SAW-Resonatoren in dem Sensor an. Die zurückgestrahlte Sensorantwort wird durch die Sensorantenne übertragen und durch die Antenne **11** empfangen. Das Signal geht durch einen rauscharmen Front-End-Vorverstärker **2** zu dem Frequenzwandler **2**, wo es mit dem Signal des Empfänger-Synthesizers **3** gemischt wird. Die Frequenzdifferenz zwischen dem Empfänger-Synthesizer **3** und dem Sender-Synthesizer **10** ist gleich der Zwischenfrequenz, zum Beispiel 1 MHz. Das ZF-Signal geht durch einen Filter **4** und einen Begrenzungsverstärker (der den dynamischen Bereich des Empfängers erhöht) zu einem 8-Bit- oder 10-Bit-Analog-digital-Wandler **6** mit einer im Vergleich mit dem ZF ausreichend hohen Abtastfrequenz von beispielsweise 10 MHz oder 20 MHz. Die Sensorantwort in Digitalformat wird in dem internen Speicher eines DSP-Chips **7** gespeichert, wo sie während des Abfragevorgangs auf eine kohärente Art und Weise akkumuliert wird. Der Chip führt dann für alle drei SAW-Resonatoren eine Fourier-Transformation der Daten durch, errechnet die drei Resonanzfrequenzen, führt den Durchschnittsberechnungsvorgang durch und berechnet den Druck und die Temperatur.

[0017] Der DSP-Chip **7** steuert ebenso die Arbeit der Synthesizer **3** und **10**, des HF-Schalters und die des ADCs **6**. Daneben kann er außerdem, um die Isolation zwischen dem Empfänger und dem Sender zu verstärken, den Leistungsverstärker **8** und den LNA **2** aktivieren und deaktivieren. Als eine der Maßnahmen, kohärentes Akkumulieren der Sensorantworten sicherzustellen, wird vorzugsweise derselbe Quarzoszillator **9** sowohl für beide Synthesizer als auch für den DSP-Chip als Referenz verwendet.

[0018] Das oben beschriebene System kann ebenso unter Verwendung eines Zweifachumsetzungsempfängers, der die Spiegelbildkanal-Dämpfung erhöht, implementiert werden. Eine alternative Empfängerarchitektur kann auf einer direkten Frequenzumwandlung basieren. Dies würde das Entfernen eines der Synthesizer und das Hinzufügen des zweiten

Mischers und des zweiten ADCs verursachen.

[0019] Im Folgenden auf die [Fig. 2](#) Bezug nehmend, wird die bevorzugte Ausführung der vorliegenden Erfindung beschrieben. Die drei Resonatoren SAW1, SAW2 und SAW3 weisen geringfügig verschiedene Resonanzfrequenzen und verschiedene Temperatur- und Druckempfindlichkeit auf. Die Frequenzen werden auf eine solche Art und Weise ausgewählt, dass der Mindestabstand zwischen diesen bei jeder Temperatur und bei jedem Druck nicht kleiner als die Resonatorbandbreite ist. Im Ergebnis ist das gesamte Betriebsfrequenzband (beispielsweise das ISM-Band) in drei Teilbänder, die durch die drei Resonatoren besetzt werden, aufgeteilt.

[0020] Der Sensor A wird durch rechteckige HF-Impulse mit der Spektralbreite gleich oder kleiner als die Resonatorbandbreite abgefragt. Dieses stellt die effiziente Anregung des Resonators für den Fall, dass die Abfragefrequenz nahe der Resonanzfrequenz des Resonators ist, sicher. Bei jedem Teilband werden mehrere diskrete Abfragefrequenzen auf eine solche Art und Weise ausgewählt, dass der Abstand zwischen ihnen gleich oder geringer als die Bandbreite der Resonatoren ist. Die Anzahl der diskreten Abfragefrequenzen ist von dem Q-Faktor der SAW-Resonatoren abhängig. Beispielsweise würde es in dem Fall von Leerlauf-Q = 5000 ausreichend sein, neun Abfragefrequenzen innerhalb des 434-MHz-ISM-Bandes zu haben.

[0021] Im Ergebnis werden, wie auch immer die Temperatur und der Druck sind, aus der Reihe der gewählten diskreten Frequenzen immer drei Abfragefrequenzen, die die optimale Anregung der drei Resonatoren sicherstellen, vorhanden sein. Die Anregung ist in dem Sinne optimal, dass die Schwingungsamplitude in dem Resonator am Ende des Abfrageimpulses nahe an der maximal möglichen für eine gegebene Anregungsamplitude sein wird.

[0022] Der Abfragevorgang besteht aus fünf Hauptstufen, wie durch das Ablaufdiagramm in der [Fig. 2](#) dargestellt.

1. Ermitteln der drei optimalen Abfragefrequenzen, die die Leistungsspektraldichte der Sensorantwort maximieren

[0023] Auf dieser Stufe wird der Sensor der Reihe nach auf allen diskreten Abfragefrequenzen abgefragt. Jedes Mal nach dem Einkoppeln des Abfrageimpulses wird die Sensorantwort empfangen und ihre Spektraldichte wird festgestellt. Dieses kann durch das Abwärts-Umwandeln der Frequenz, Abtasten der Antwort auf der Zwischenfrequenz und das Berechnen der diskreten Fourier-Transformation bewerkstelligt werden. Danach werden die drei optimalen Frequenzen ausgewählt, eine in jedem Teilband, die

den maximalen Spitzenwert der Spektraldichte ergeben. Alternativ können, wenn in dem Empfänger eine automatische Verstärkungsregelung verwendet wird, die drei Frequenzen, die das Verhältnis des Spitzenwertes der Spektraldichte zu dem durchschnittlichen Pegel seiner Nebenzipfel maximieren, ausgewählt werden. Alternativ können, wenn der Begrenzungsverstärker in dem Empfänger verwendet wird, die drei Frequenzen gewählt werden, die die Länge der Sensorantwort maximieren.

[0024] Auf dieser Stufe können die drei Resonanzfrequenzen bereits durch das Messen der Spitzenfrequenzen der Spektraldichte festgestellt werden. Dieses würde jedoch, wegen des Vorhandenseins von Rauschen und der finiten Auflösung der Fourier-Transformation, nur eine grobe Schätzung der tatsächlichen Eigenschwingungen ergeben.

2. Kohärente Akkumulation der Sensorantworten

[0025] Auf dieser Stufe wiederholen wir die Abfrage des Sensors der Reihe nach auf jeder optimalen Abfragefrequenz n Male. Die durch den Empfänger aufgenommenen Signale werden abwärts gewandelt, abgetastet und in drei Datenfeldern in einem Systemspeicher auf eine kohärente Art und Weise akkumuliert. Das Ziel der kohärenten Akkumulation ist, das SNR um einen Faktor von \sqrt{N} zu erhöhen. Die kohärente Akkumulation kann beispielsweise durch die Verwendung eines gemeinsamen quarzstabilisierten Oszillators sowohl in dem Empfänger- als auch in dem Sender-Synthesizer und als ein Taktgenerator in dem DSP-Chip sichergestellt werden. Mit anderen Worten, die Periode des Abfragesignals auf der Zwischenfrequenz und der Abstand zwischen den Abfrageimpulsen werden ausgewählt, um eine ganzzahlige Anzahl der Abtastperiode zu sein. Außerdem wird die Anzahl der akkumulierten Impulse n ausgewählt, um ausreichend klein zu sein ($n = 10 \dots 30$), so dass die Gesamtzeit, die für die kohärente Akkumulation (ungefähr $1 \dots 2$ ms) gebraucht wird, im Vergleich mit der Reifenumdrehung eines Fahrzeugs klein genug ist (beispielsweise $1/40$). Im Ergebnis wird eine Änderung in der Position der Sensorantenne während der Akkumulation keine große Verschiebung bei der Phase der Sensorantwort verursachen. Dieses ist ebenso unter dem Gesichtspunkt der Änderung der Frequenzdifferenzen zwischen den drei Resonatoren, die durch Variation der Antennenimpedanz als Ergebnis des Drehens der Reifen verursacht wird, wichtig.

[0026] Außerdem wird vor der kohärenten Akkumulation das Vorhandensein von Interferenzen an jeder der drei optimalen Abfragefrequenzen geprüft. Dies kann beispielsweise durch das Vergleichen des Maximums der Spektraldichte des in Abwesenheit des Abfrageimpulses empfangenen Signals mit einem adäquaten Schwellenwertpegel erfolgen. Wenn es

den Schwellenwert überschreitet, dann wiederholt das System die Abfrage nach einer geringen Verzögerung. Ebenso kann innerhalb des kohärenten Akkumulationszyklus ein einfacher Interferenzerkennungsvorgang verwendet werden. In diesem Fall kann die Interferenz durch das Messen des Spitzenwertes des empfangenen Signals während $1-2 \mu\text{s}$ vor dem Übertragen des Abfrageimpulses ermittelt werden.

3. Diskrete Fourier-Transformation und Interpolation

[0027] Auf dieser Stufe werden die drei Datenfelder, die als ein Ergebnis der kohärenten Akkumulation gewonnen wurden, verwendet, um mittels der diskreten Fourier-Transformation (DFT) die Spektraldichten zu berechnen. Jedes Spektrum enthält eine Spitze, die der Frequenzantwort eines einzelnen Resonators entspricht, obwohl wegen der Anregung der beiden anderen Resonatoren weitere Spitzen vorhanden sein können. Jedoch weist die Hauptspitze eine größere Amplitude auf und die kleineren Spitzen werden nicht berücksichtigt. Die Hauptspitzenfrequenz entspricht der relevanten Frequenz der Eigenschwingung. Die Auflösung der Fourier-Analyse Δf wird durch das Auffüllen mit Nullen erhöht, so dass sich, $\Delta f = 5-10$ kHz die Analysezeit verlängert, beispielsweise von $10-20 \mu\text{s}$ bis zu $0,1-0,2$ ms. Diese Genauigkeit ist für viele Anwendungen noch immer nicht ausreichend.

[0028] Eine weitere Erhöhung der Genauigkeit wird durch die Verwendung von quadratischer Interpolation oder höherwertiger Interpolation in der Umgebung der Spitzenfrequenz erreicht, um für alle drei Resonatoren die Resonanzfrequenz zu finden. Im Ergebnis ist die Genauigkeit nicht länger durch die Auflösung der Fourier-Analyse, sondern hauptsächlich durch das Systemrauschen begrenzt.

[0029] Außer der Zufallskomponente des Frequenzmessfehlers wegen Rauschens ist außerdem wegen der finiten Länge der Sensorantwort eine systematische Komponente (Bias) vorhanden. Der Wert des Bias ist von dem Anfangsphasenwinkel des Sensorantwortimpulses auf der Zwischenfrequenz abhängig und er kann von einem Zyklus der kohärenten Akkumulation zu einem anderen variieren. Es ist unmöglich, ihn vorherzusagen, weil die Anfangsphase durch den Abstand zwischen der unbekannteren Resonanzfrequenz und der Abfragefrequenz bestimmt wird. Die folgenden Verfahren werden angewendet, um den Bias beträchtlich zu verringern und infolgedessen die Genauigkeit des Systems zu erhöhen.

a) Die kohärente Akkumulation wird bei jeder Abfragefrequenz zweimal wiederholt, jedoch wird während des zweiten Zyklus der Akkumulation eine zusätzliche Phasenverschiebung von 90° in den Abfrageimpuls eingeführt. Alternativ werden die Abtastungen mit der Verzögerung $\tau = 1/(4f_{\text{int}})$,

wobei f_{int} die nominale Zwischenfrequenz (die Differenz zwischen der Abfragefrequenz und der Frequenz des lokalen Oszillators) während des zweiten Zyklus der Akkumulation ist, vorgenommen. Da die Bias in den beiden Spitzenfrequenzen entgegengesetzte Vorzeichen und annähernd gleiche Absolutwerte aufweisen und einander aufheben, kommt diese gemittelte Frequenz der gemessenen Resonanzfrequenz viel näher. Ein Nachteil des Verfahrens ist, dass die Gesamtzeit der Messung verdoppelt wird.

b) Das zweite Verfahren erfordert keine Verlängerung der Messungszeit. Die kohärente Akkumulation wird bei jeder Abfragefrequenz einmal wiederholt. Die Abtastrate wird derartig ausgewählt, dass das Abtastintervall T_s einer 90° -Phasenverschiebung auf der nominalen Zwischenfrequenz geteilt durch jede Ganzzahl entspricht. Mit anderen Worten, $T_s = \tau/n$, wobei $n = 1, 2, 3 \dots$ ist. Wenn $f_{\text{int}} = 1$ MHz ist, dann kann beispielsweise T_s gewählt werden, um $0,05 \mu\text{s}$ zu sein, da $\tau = 0,29 \mu\text{s}$. Die erste DFT wird für die von der ersten beginnenden Abtastungen durchgeführt und die zweite DFT wird für die Abtastungen, beginnend von der n -ten, durchgeführt. Tatsächlich bedeutet dies, dass wir eine 90° -Phasenverschiebung zwischen den beiden Reihen von Abtastungen haben. Im Ergebnis der Mittelwertbildung der beiden Spitzenfrequenzen, die mittels DFT und Interpolation ermittelt wurden, wird der Bias-Wert erheblich verringert. Als ein Beispiel wird der Maximalwert des Bias für den Mindestabstand zwischen den drei Resonanzfrequenzen von 350 kHz von 1,69 kHz auf 0,57 kHz verringert.

4. Statistische Verarbeitung und Analyse der Resonanzfrequenzdaten

[0030] Die Stufen 1 bis 3 (oder nur 2 und 3, wenn die Variation der Resonanzfrequenz langsam ist und ein häufiges Wiederholen von Stufe 1 nicht erforderlich ist) werden kontinuierlich wiederholt und die Daten über die drei Resonanzfrequenzen werden in den drei Datenfeldern in dem Systemspeicher gespeichert. Nach m Abfragezyklen (m kann in einem breiten Bereich variieren, beispielsweise von 10 bis 300) werden die gemittelten Werte $f_{1,2,3}$ und die Standardabweichungen $\sigma_{1,2,3}$ jeder der drei Resonanzfrequenzen berechnet. Im Ergebnis werden die Standardabweichungen von $f_{1,2,3}$ im Vergleich zu $\sigma_{1,2,3}$ weiter, ungefähr um einen Faktor von \sqrt{M} , vermindert. Danach werden alle Frequenzen f_i in den relevanten Feldern, die die Bedingung

$$|f_i - f_{1,2,3}| \leq k\sigma_{1,2,3}$$

(wobei k Werte von 1 bis 3 haben kann) nicht erfüllen, von der Berücksichtigung ausgeschlossen und die gemittelten Frequenzen werden wieder neu berechnet. Der letztere Vorgang wird durchgeführt, um den

möglichen Einfluss von Interferenz und plötzlichem Abfall bei der Signalamplitude, die grobe Fehler bei den Resonanzfrequenzen verursachen, während der kohärenten Akkumulation auszuschließen. Die Standardabweichungen $\sigma_{1,2,3}$ können außerdem als ein Urteil über die Gültigkeit der Information über die Resonanzfrequenzen verwendet werden.

5. Berechnen von Druck und Temperatur

[0031] Nach dem Mitteln werden zwei verschiedene Frequenzen berechnet und anschließend werden der Druck und die Temperatur unter Verwendung eines Lösungsansatzes, der unter Referenz (4) beschrieben wurde, ermittelt.

[0032] Das vorgeschlagene Abfrageverfahren zielt darauf ab, eine Genauigkeit der Resonanzfrequenzmessung von besser als 5×10^{-6} zu erreichen. Für den Fall von SAW-Resonatoren, die in dem 434-MHz-ISM-Band arbeiten, soll sie eine Genauigkeit der Druckmessung, die besser als 1 psi ist und eine Genauigkeit der Temperaturmessung, die besser als 1°C ist, ergeben.

Patentansprüche

1. Verfahren zum Abfragen einer Vielzahl von Resonanzvorrichtungen zum Ermitteln der jeweiligen Resonanzfrequenzen der Vorrichtungen, folgende Schritte umfassend:

- (1) Ermitteln einer optimalen Abfragefrequenz für jede Resonanzvorrichtung,
- (2) Wiederholen des Abfragens jeder Resonanzvorrichtung eine Vielzahl von Malen mit ihrer jeweiligen, wie in Schritt (1) ermittelten, optimalen Abfragefrequenz,
- (3) Durchführen diskreter Fourier-Transformationen an den Daten, die als Ergebnis des Schrittes (2) akkumuliert wurden,
- (4) Bestimmen des Mittelwertes der aus Schritt (3) erhaltenen Daten.

2. Verfahren nach Anspruch 1, wobei Schritt (4) das Ermitteln der Standardabweichung für jede der ermittelten Durchschnittsfrequenzen, das Verwerfen jeder der Frequenzen, die von der Durchschnittsfrequenz um mehr als ein vorgegebenes Vielfaches der Standardabweichung abweicht, und das Neuberechnen der Durchschnittsfrequenz nach dem Ausschließen der verworfenen Daten umfasst.

3. Verfahren nach Anspruch 1 oder 2, wobei die optimalen Abfragefrequenzen durch das Feststellen der Frequenzen, bei denen die Signale von der Resonanzvorrichtung eine maximale Leistungsspektraldichte aufweisen, ermittelt werden.

4. Verfahren nach Anspruch 3, wobei die maximale Leistungsspektraldichte durch Frequenz-Ab-

wärtswandlung, Abtasten der Antwort auf einer Zwischenfrequenz und das Berechnen diskreter Fourier-Transformationen ermittelt wird.

5. Verfahren nach Anspruch 3, wobei die maximale Leistungsspektraldichte mittels eines Linearverstärkers mit automatischer Verstärkungsregelung ermittelt wird und die optimalen Frequenzen gewählt werden, um das Verhältnis des Spitzenwertes der Spektraldichte zu dem Durchschnittspegel seiner Nebenzipfel zu maximieren.

6. Verfahren nach Anspruch 3, wobei die maximale Leistungsspektraldichte unter Verwendung eines Begrenzungsverstärkers ermittelt wird und die Frequenzen gewählt werden, um die Länge der Sensorantwort zu maximieren.

7. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, wobei die optimalen Abfragefrequenzen innerhalb der jeweiligen Teilbänder eines ISM-Bandes liegen.

8. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, wobei während des Wiederholens des Schrittes (2) des Anspruchs 2 jedes empfangene Signal, um eine kohärente Akkumulation optimaler Abfragefrequenzen bereitzustellen, abwärts umgewandelt, abgetastet und akkumuliert wird.

9. Verfahren nach Anspruch 8, wobei die kohärente Akkumulation durch das Verwenden eines gemeinsamen Oszillators sowohl in dem Empfänger-Synthesizer als auch in dem Sender-Synthesizer und eines Taktgenerators in einem DPS-Chip erreicht wird.

10. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, wobei die Anzahl der wiederholten Abfragen in Schritt (2) und die Geschwindigkeit, mit der solche Abfragen ausgeführt werden, derartig sind, dass die Gesamtabfrageperiode im Vergleich mit jeder zyklischen Bewegung des Sensors relativ zu dem Abfragegerät klein ist.

11. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, wobei jede kohärente Akkumulation bei jeder Abfragefrequenz wiederholt wird, jedoch mit einer in den Abfrageimpuls während des zweiten Zyklus der Akkumulation eingeführten zusätzlichen Phasenverschiebung von 90° der Abtastungen, die während des zweiten Akkumulationszyklus mit der Verzögerung vorgenommen werden.

12. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 10, wobei die Abtastrate auf eine solche Art und Weise gewählt wird, dass das Abtastintervall einer 90° -Phasenverschiebung auf der Zwischenfrequenz geteilt durch eine Ganzzahl entspricht.

13. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, wobei die ermittelten Frequenzen verwendet werden, um Druck und Temperatur zu berechnen.

14. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, wobei die Resonanzvorrichtungen SAW-Vorrichtungen sind.

Es folgen 2 Blatt Zeichnungen

Anhängende Zeichnungen

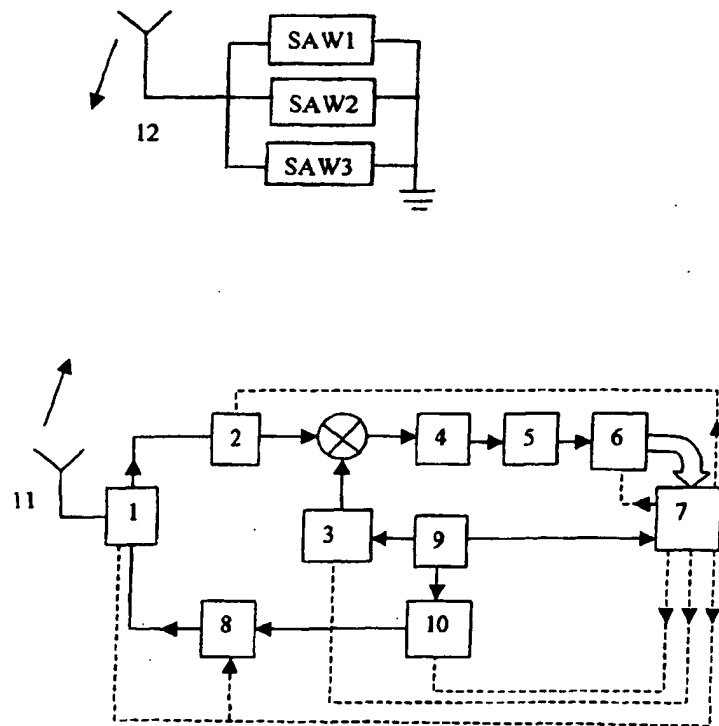


Fig 1

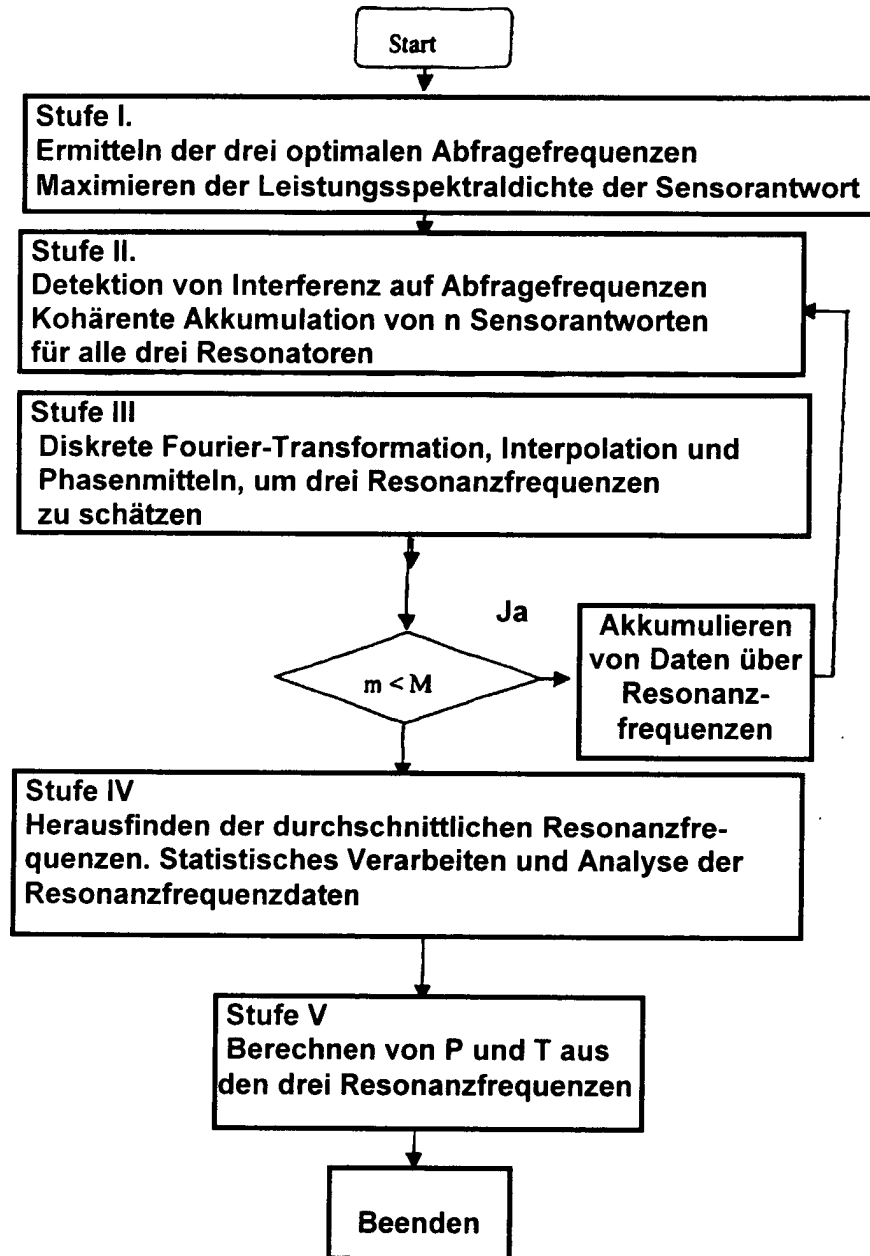


Fig 2