



(10) **DE 11 2009 000 823 T5** 2012.08.30

(12)

Veröffentlichung

der internationalen Anmeldung mit der
(87) Veröffentlichungs-Nr.: **WO 2009/126767**
in deutscher Übersetzung (Art. III § 8 Abs. 2 IntPatÜG)
(21) Deutsches Aktenzeichen: **11 2009 000 823.2**
(86) PCT-Aktenzeichen: **PCT/US2009/040001**
(86) PCT-Anmeldetag: **09.04.2009**
(87) PCT-Veröffentlichungstag: **15.10.2009**
(43) Veröffentlichungstag der PCT Anmeldung
in deutscher Übersetzung: **30.08.2012**

(51) Int Cl.: **G01R 33/36 (2006.01)**

(30) Unionspriorität:

61/044,065	11.04.2008	US
12/420,098	08.04.2009	US

(74) Vertreter:

Rüger und Kollegen, 73728, Esslingen, DE

(71) Anmelder:

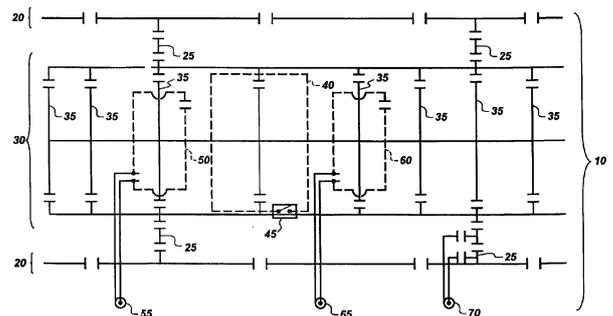
General Electric Co., Schenectady, N.Y., US

(72) Erfinder:

Hancu, Ileana, Clifton, N.Y., US; Piel, Joseph Edward, Scotia, N.Y., US; Dixon, Thomas W., Clifton Park, N.Y., US

(54) Bezeichnung: **Multifrequenz-HF-Spule**

(57) Zusammenfassung: Es wird eine Multifrequenz-Bildgebungs-(HF)-Spule bereitgestellt, die bei drei oder mehr unterschiedlichen Frequenzen arbeiten kann, mit einer frequenzverschiebenden Schleifenstruktur in unmittelbarer Nähe zu der Spule und schaltbar damit gekoppelt, um unterschiedliche Frequenzen zu erzeugen, wenn die Schleifenstruktur mit der Hochfrequenzspule gekoppelt ist. In einer Ausführungsform ist eine von den Frequenzen eine Protonenfrequenz, eine ist eine Natriumfrequenz und eine von den Frequenzen ist eine Kohlenstofffrequenz. Ein Beispiel beinhaltet Bildgebungsuntersuchungen unter Anwendung hyperpolarisierter Verbindungen.



Beschreibung

Querverweis auf verwandte Anmeldungen

[0001] Diese Anmeldung beansprucht die Priorität der U.S. Provisional Applications No. 61/044,065, eingereicht am 11. April 2008, welche hierin in ihrer Gesamtheit durch Verweis darauf beinhaltet ist.

Hintergrund

[0002] Magnetresonanzbildgebung (MRI) oder Kernmagnetresonanzbildgebung (NMRI) sind medizinische Bildgebungstechniken, die zum Visualisieren bestimmter struktureller Aspekte und Funktionalitäten von Versuchspersonen und Versuchstieren genutzt werden. Die Bildgebung nutzt typischerweise ein Magnetfeld, um bestimmte Atome in dem Körper in der Richtung des Magnetfeldes auszurichten. Veränderungen der Ausrichtung bewirken ein rotierendes Magnetfeld, das detektiert werden kann. Kontrastmittel können zur Verbesserung der Bildgebung eingesetzt werden, indem sie beispielsweise zusätzliche Arten von Atomen für die Bildgebung bereitstellen. Varianten magnetischer Bildgebung sind im Fachgebiet bekannt.

[0003] In einer Standard-Bildgebungserfassung erfolgt ein Vorscan- bzw. sogenannter Prescan-Prozess zur Ermittlung der für den Scanprozess zu verwendenden optimalen Parameter. Der Prescan hat mehrere Schritte, wie z. B. die Ermittlung der genauen Scannerträgerfrequenz, der Empfängerverstärkungsfaktoren und der Signalverstärkung (oder der Sendeverstärkung), wovon alle dazu genutzt werden, ein maximales Detektionssignal sicherzustellen. Der Prescan-Prozess wird typischerweise bei derselben Frequenz wie der Frequenz des Bildgebungsexperimentes durchgeführt.

[0004] Die Verwendung von hyperpolarisierten Molekülen in Verbindung mit der Magnetresonanzbildgebung hat die Magnetresonanzbildgebung in den Bereich einer Stoffwechselbildgebung gebracht. Typischerweise werden in einer Untersuchung, in welcher mit ^{13}C -Atomen markierte Verbindungen in eine Versuchsperson injiziert werden, zwei Spulen verwendet, eine auf die Protonenfrequenz abgestimmte und eine auf die Kohlenstofffrequenz abgestimmte. In einigen Beispielen wird nur eine zweifach abgestimmte Spule verwendet.

[0005] Eine Schwierigkeit bei der Durchführung einer Bildgebung bei Vorliegen von hyperpolarisierten ^{13}C -Verbindungen besteht in der Kalibrierung des Systems derart, dass eine optimale Bildgebung durchgeführt wird. Vor der Injektion der hyperpolarisierten Verbindungen ist typischerweise ein unzureichendes natürlich vorkommendes ^{13}C -Signal vorhanden, das für die Kalibrierung des Kippwinkels bzw.

sogenannten Flipwinkels verwendet werden kann. Die markierte Verbindung wird typischerweise in die Versuchsperson injiziert, und Bilder einer anatomischen Verteilung der injizierten hyperpolarisierten Verbindung und ihrer nachfolgenden Produkte werden erhalten. Das Signal aus der injizierten Verbindung ist zeitveränderlich; es verändert sich mit der Zeit aufgrund von Relaxation, Strömung, Perfusion und Stoffwechsel. Für einen minimalen Signalverlust ist es wichtig, dass die Bildgebung kurz nach der Injektion ohne längere Prozeduren für die Kalibrierung erfolgt.

[0006] Sofern kein lipidreicher Bereich in dem abzubildenden Gebiet mit genügend natürlichem Überschuss an ^{13}C vorliegt, wird üblicherweise keine Flipwinkelkalibrierung in vivo durchgeführt. In einigen Fällen wird die Kalibrierung zu Beginn in einem Phantom durchgeführt, das dafür ausgelegt ist, die in vivo-Versuchspersonen zu simulieren. In diesen Phantomkalibrierungen wird der Wert für die Sendeverstärkung erhalten und für alle in vivo-Untersuchungen verwendet, wobei die von den unterschiedlichen Versuchspersonen erzeugte unterschiedliche Belastung ignoriert wird. Alternativ kann ein mit Kohlenstoff angereichertes Material in das Bildgebungsgebiet eingebracht und die Flipwinkel-(FA)-Kalibrierung unter Verwendung des Signals aus diesem Phantom durchgeführt werden. Da jedoch dieses Phantom in die Spule in der Gegenwart der Versuchsperson eingeführt werden muss, muss es klein sein, was zu gewissen Ungenauigkeiten in der FA-Kalibrierung aufgrund einer eingeschränkten Signalverfügbarkeit aus der kleinen Phantomprobe führt. Ferner muss ein Phantom inhärent in der Nähe der Spule dort positioniert werden, wo das Hochfrequenzmagnetfeld (B_1) tendenziell inhomogen ist und sich möglicherweise deutlich von dem B_1 -Feld in der Mitte der Spule unterscheidet, in welchem sich die Versuchsperson befindet. Demzufolge sind herkömmliche Lösungsansätze für die FA-Kalibrierung nicht besonders genau und können zu einem unerwünschten Signalverlust führen. Verbesserte Techniken für die Kalibrierung würden die Hyperpolarisierungs-Bildgebungstechnologie verbessern, und die Systeme wirtschaftlich attraktiver machen.

Kurzbeschreibung

[0007] Ausführungsformen der Erfindung betreffen im Wesentlichen eine Multifrequenz-HF-Spule für Bildgebung und insbesondere für die Bildgebung hyperpolarisiert markierter Verbindungen.

[0008] Eine Ausführungsform ist eine Multifrequenz-Bildgebungsspule mit einer Hochfrequenzspule, die bei drei oder mehr unterschiedlichen Frequenzen arbeiten kann. Diese enthält eine frequenzverschiebende Struktur in unmittelbarer Nähe der Hochfrequenzspule und schaltbar gekoppelt, um wenigstens eine

der Frequenzen zu erzeugen, wenn die frequenzverschiebende Struktur mit der Hochfrequenzspule gekoppelt. Eine weitere von den Frequenzen wird erzeugt, wenn die frequenzverschiebende Struktur von der Hochfrequenzspule entkoppelt ist.

[0009] Ein Beispiel einer derartigen Hochfrequenzspule ist eine zweifach-abgestimmte Vogelkäfigspule bzw. sogenannte Birdcage-Spule, wobei eine von den Frequenzen eine Protonen-Frequenz ist, eine von den Frequenzen eine Natrium-Frequenz ist und eine von den Frequenzen eine Kohlenstoff-Frequenz ist. Insbesondere arbeitet in diesem Beispiel die Birdcage-Spule bei der ^1H Protonen-Frequenz von 63,86 MHz, bei der ^{23}Na Natrium-Frequenz von angenähert 16,89 MHz und in Quadratur bei der ^{13}C Kohlenstoff-Frequenz von angenähert 16,06 MHz.

[0010] Eine weitere Ausführungsform beinhaltet ein Verfahren zur Erfassung eines Bildes mit einer Multifrequenz-Bildgebungsspule, das die Kopplung wenigstens einer frequenzverschiebenden Schaltkreisschleife mit der Spule beinhaltet, wobei die verschiebende Schaltkreisschleife von einer Kohlenstoff-Frequenz zu einer Natrium-Frequenz verschiebt, wenn sie damit gekoppelt ist. Das Verfahren stellt die Durchführung einer anatomischen Bildgebung unter Verwendung einer Protonen-Frequenz, einer Prescan-Kalibrierung unter Verwendung einer Natrium-Frequenz und Verarbeitung zum Erzielen einer Flipwinkelkalibrierung für die Kohlenstoff-Frequenz bereit. Ferner stellt das Verfahren die Entkopplung der frequenzverschiebenden Schaltkreisschleife und die Durchführung einer Bildgebung bei der Kohlenstoff-Frequenz unter Anwendung der Flipwinkelkalibrierung aus der Prescan-Kalibrierung bereit.

[0011] In noch einer weiteren Ausführungsform enthält ein Bildgebungssystem für hyperpolarisierte Verbindungen eine Bildgebungsspule, die über wenigstens drei Frequenzen hinweg arbeiten kann, die wenigstens eine frequenzverschiebende Schleifenstruktur besitzt, die mittels eines Schalters mit der Bildgebungsspule gekoppelt wird, wobei die frequenzverschiebende Schleifenstruktur eine von den Frequenzen zu einer Frequenz für eine Prescan-Kalibrierung einer Versuchsperson unter Verwendung einer natürlich auftretenden Verbindung in der Versuchsperson verschiebt, wenn die frequenzverschiebende Schleifenstruktur mit der Spule gekoppelt ist, und eine Hyperpolarisierungs-Bildgebung unter Verwendung der hyperpolarisierten Verbindungen ausführt, die nicht ausreichend genug in der Versuchsperson vorhanden sind, wenn die frequenzverschiebende Schleifenstruktur entkoppelt ist.

Zeichnungen

[0012] Diese und weitere Merkmale, Aspekte und Vorteile der vorliegenden Erfindung werden besser

verständlich, wenn die nachstehende detaillierte Beschreibung unter Bezugnahme auf die beigefügten Zeichnungen gelesen wird, in welchen gleiche Bezugszeichen gleiche Teile durchgängig durch die Zeichnungen bezeichnen, wobei:

[0013] **Fig. 1** eine Schaltbild-Perspektive gemäß einer Ausführungsform darstellt;

[0014] **Fig. 2** eine Ansicht einer Spulenstruktur gemäß einer Ausführungsform darstellt;

[0015] **Fig. 3** ein Flussdiagramm der Multifrequenzspulen-Prozesses gemäß einer Ausführungsform darstellt;

[0016] **Fig. 4A–Fig. 4E** verschiedene graphische Aufzeichnungen in Verbindung mit Betriebsaspekten der in den **Fig. 1** und **Fig. 2** dargestellten Spule veranschaulichen; und

[0017] **Fig. 5** eine graphische Darstellung der Inversions-Sendeverstärkungen (iTG's) bei der ^{13}C -Frequenz gegenüber den iTG's bei der ^{23}Na -Frequenz für ein Belastungsphantom veranschaulichen.

Detaillierte Beschreibung

[0018] In der nachfolgenden detaillierten Beschreibung werden zahlreiche spezifische Details der Reihe nach dargestellt, um ein gründliches Verständnis verschiedener Ausführungsformen der vorliegenden Erfindung zu ermöglichen. Jedoch wird der Fachmann erkennen, dass Ausführungsformen der vorliegenden Erfindung ohne diese spezifischen Details ausgeführt werden können, dass die vorliegende Erfindung nicht auf die dargestellten Ausführungsformen beschränkt ist, und dass die vorliegende Erfindung in einer Vielfalt alternativer Ausführungsformen ausgeführt werden kann. In weiteren Fällen wurden allgemein bekannte Verfahren, Prozeduren und Komponenten nicht im Detail beschrieben.

[0019] Ferner können verschiedene Operationen als mehrere diskrete Schritte beschrieben werden, die in einer Weise durchgeführt werden, die für das Verständnis von Ausführungsformen der vorliegenden Erfindung hilfreich ist. Jedoch sollte die Reihenfolge der Beschreibung weder als Implizierung betrachtet werden, dass diese Operationen in der dargestellten Reihenfolge ausgeführt werden müssen, noch dass sie überhaupt reihenfolgenabhängig sind. Ferner bezieht sich die wiederholte Nutzung des Ausdrucks "in einer Ausführungsform" nicht notwendigerweise auf dieselbe Ausführungsform, obwohl es auch der Fall sein kann. Schließlich sollen die Begriffe "aufweisend", "enthaltend", "habend" und dergleichen, sowie ihre Beugungsformen, wie sie in der vorliegenden Anmeldung verwendet werden, synonym sein, sofern es nicht anders dargestellt ist.

[0020] Gemäß verschiedenen Ausführungsformen ist eine einzige Resonanzspulenstruktur in der Lage, bei drei oder mehr interessierenden Frequenzen für Hyperpolarisierungs-Scans zu arbeiten. Die erste Frequenz wird für anatomische Lokalisierungszwecke genutzt, und ein Prescan wird bei einer zweiten Frequenz genutzt, um Bildgebungsleistungsanforderungen unter Verwendung einer Kalibrierungskurve für den Sendeverstärkungsverlauf bei der zweiten Frequenz zu ermitteln. Auf der Basis der Prescan-Werte für die Verarbeitung der zweiten Frequenz wird der Verstärkungspegel für die dritte Frequenz ermittelt. Die Bildgebung bei der dritten Frequenz wird somit sicher bei dem Verstärkungspegel durchgeführt, welcher zu dem höchsten Signal/Rausch-Verhältnis (SNR) des Bildes führt. Weitere Ausführungsformen und Strukturen werden hierin für weitere Auslegungen und Anwendungen erläutert.

[0021] Wie erläutert führt, anders als einer typischen MRI-Untersuchung, wenn sowohl der Prescan als auch die Scan-Schritte bei derselben Frequenz durchgeführt werden, die eingeschränkte Verfügbarkeit eines natürlichen Überschusskohlenstoff-Signals vor der Injektion der hyperpolarisierten Verbindung im Allgemeinen zu einer schwierigen und oft ungenauen Flipwinkelkalibrierung. Eine genaue Flipwinkel-(FA)-Kalibrierung, welche zur Maximierung des Signal/Rausch-Verhältnisses (SNR) des Bildes beiträgt, kann gemäß einer Ausführungsform des Systems in vivo unter Verwendung eines natürlichen Überschusses von Natrium in dem Körper durchgeführt werden. In einer Ausführungsform zeigt die Resonanzstruktur eine lineare Resonanz bei den ^1H - (z. B. 63,67 MHz bei 1,5 T) und ^{23}Na - (z. B. 16,89 MHz bei 1,5 T)-Frequenzen und in Quadratur bei der ^{13}C - (z. B. 16,06 MHz bei 1,5 T)-Frequenz. Wie angemerkt, ist die Frequenz von ^{23}Na ziemlich nahe an der von ^{13}C , was eine Verschiebung des Frequenzverhaltens der Spule ermöglicht, um eine Kalibrierung unter Verwendung des natürlich auftretenden Natriums zu ermöglichen. Das im Körper natürlich auftretende Natriumsignal kann zur Flipwinkelberechnung und Spulenempfindlichkeitsprofilzuordnung in Untersuchungen mit hyperpolarisierten ^{13}C -Verbindungen genutzt werden.

[0022] In [Fig. 1](#) ist ein elektrisches Schaltbild für eine Ausführungsform der Multifrequenz-HF-Spule **10** dargestellt. In diesem Beispiel ist die Multisprossen-Birdcage-Spule eine zweifach-abgestimmte Spule mit zwei äußeren Ringen **20**, zwei inneren Ringen **30** und mit einer frequenzverschiebenden Schaltkreisschleife **40**, die in der Nähe der Birdcage-Spule **10** montiert ist, wobei die frequenzverschiebende Schaltkreisschleife **40** schaltbar gekoppelt ist, um das Frequenzverhalten des inneren Ringes zu verschieben.

[0023] In diesem Beispiel enthält die Spule **10** eine lineare Spule mit einer durch die äußeren Ringe **20** begrenzten Resonanz bei der Protonen-Frequenz, eine durch die inneren Ringe **30** begrenzte Kohlenstoffspule, die, und eine schaltbar gekoppelte Schleifenstruktur **40**, die eine Verschiebung des Frequenzverhaltens der Kohlenstoffspule **30** ermöglicht, wenn die Schleife **40** geschlossen ist.

[0024] Die durch die äußeren Ringe **20** in diesem Beispiel begrenzte Protonenspule hat zwei Sprossen **25** mit einer Anzahl von Kondensatoren. Die Kohlenstoffspule **30** hat zwei Ringe und acht Sprossen **35**. Es ist wenigstens eine frequenzverschiebende Schaltkreisschleife **40** vorhanden, die in der Nähe des inneren Ringes **30** montiert ist, und die eine wechselseitige Kopplung zu dem inneren Ring erzeugt, wenn die frequenzverschiebende Schaltkreisschleife **40** geschlossen ist. Die Auswirkungen der frequenzverschiebenden Schaltkreisschleife **40** sind vernachlässigbar, wenn die Schleife offen ist. Die frequenzverschiebende Schaltkreisschleife **40** wird in einer Ausführungsform durch einen Schalter **45** geöffnet und geschlossen, der sich irgendwo entlang dem Pfad der Schleife **40** befindet. Der Schalter **45** kann mechanisch, elektromechanisch oder elektrisch sein. In einem Beispiel ist der Schalter **45** eine vorgespannte Diode, die zum Öffnen und Schließen des Schalters **45** elektrisch gesteuert werden kann.

[0025] Es gibt eine Anzahl von Eigenschaften in Verbindung mit der frequenzverschiebenden Schaltkreisschleife **40**, die ihren Betrieb ermöglichen, um ein für die zweite Frequenz, welche in einer Ausführungsform für Natrium ist, erforderliches Resonanzverhalten zu erzeugen. Die Größe und Form der Schleife der frequenzverschiebenden Schaltkreisschleife **40** sowie die Platzierung und Ausrichtung sind einige der Faktoren, die das Frequenzverhalten bestimmen, das den Betrieb bei zwei unterschiedlichen Frequenzen ermöglicht. Beispielsweise ist die Schaltkreisschleife des verschiebenden Schaltkreises **40** in diesem Beispiel ein Abschnitt eines leitenden Mikrostreifens, der auf einer dielektrischen Leiterplatte angeordnet und über einem Teil des inneren Ringes **30** positioniert ist und über der Spule **10** unter Verwendung von Abstandshaltern, Befestigungselementen oder dielektrischen Klebern positioniert sein kann. Die Schaltkreisschleife des verschiebenden Schaltkreises **40** ist auf eine Frequenz nahe der Frequenz der durch die Ringe **30** begrenzten ^{13}C -Spule abgestimmt, um eine maximale wechselseitige Kopplung mit der Spule zu ermöglichen.

[0026] Die durch die äußeren Ringe **20** begrenzte Spule, beispielsweise eine Protonen-Frequenz-Spule kann von einem einfach gekoppelten Ausgang **70**, wie z. B. in diesem Beispiel dargestellt, angesteuert werden. In einem anderen Beispiel können zwei Ansteuerpunkte in Quadratur für ein höheres Signal/

Rausch-Verhältnis (SNR) vorhanden sein. Die Kopplung mit der durch die inneren Ringe **30** begrenzten Kohlenstoffspule kann durch Verwenden eines oder mehrerer Kopplungsschleifen **50**, **60** erreicht werden, die sich in unmittelbarer Nähe zu der durch die Innenringe **30** begrenzten Kohlenstoffspule befinden. In diesem Beispiel sind die Kopplungsschleifen nicht elektrisch mit den Leitern der inneren Spule **30** verbunden, sondern sind auf kleinen (nicht dargestellten) dielektrischen Abschnitten platziert. Die Ausgangssignale aus den zwei Quadratur-Kopplungsschleifen **50**, **60** können mittels zwei Kopplungstreiberkabeln **55** bzw. **65** aufgenommen werden.

[0027] In einer Ausführungsform ist die Spule **10** für eine Resonanz bei drei Frequenzen, nämlich bei einer Protonen-Frequenz von der durch die äußeren Ringe **20** begrenzten Spule, einer Natrium-Frequenz von der durch die inneren Ringe **30** begrenzten Spule bei geschlossenem Schaltkreis **40** und einer Kohlenstoff-Frequenz von der durch die inneren Ringe **30** begrenzten Spule bei offenem Schaltkreis **40** ausgelegt. Das Frequenzverhalten der durch die inneren Ringe **30** begrenzten Spule bei geschlossenem Kopplungsschaltkreis **40** hängt von dem Gütefaktor (Q-Faktor) der inneren Spule und dem Q-Faktor der verschiebenden Schaltkreisspule **40** sowie von der Fläche der Kopplungsspule **40** und ihrer Platzierung ab. Beispielsweise wird die geschlossene Schaltkreisschleife **40** in der Nähe der inneren Spule **30** platziert, um eine gute Kopplung zu erzeugen und gedreht, bis das optimale Verhalten für Natrium erreicht wird. An diesem Punkt kann die Schleifenstruktur **40** für die Lebensdauer der Spule befestigt werden. Die Lage der verschiebenden Schaltkreisschleife **40** wird in einem Beispiel empirisch abgeleitet, indem die Schaltkreisschleife **40** über der Spule **10** platziert wird, während gleichzeitig das Frequenzverhalten der Struktur an einem Netzwerkanalysator beobachtet wird.

[0028] Es gibt verschiedene Größen und Formen für die Schaltkreisschleife **40**. Beispielsweise müsste eine größere Schleife von dem inneren Ring **30** weiter weg platziert werden, da die Kopplungsstärke größer wäre. Die Schaltkreisschleife **40** kann rechteckig, quadratisch, rund oder eine beliebige andere Polygonform haben, sowie eine Mäanderlinie sein, wobei jedoch die Form nur einer von den Faktoren bei der Bestimmung des Resonanzfrequenzverhaltens ist. Andere Faktoren umfassen die Größe der Schaltkreisschleife, die Größe der leitenden Streifen, das Material des leitenden Streifens und der Spalt zwischen der inneren Spule und der Schleifenstruktur.

[0029] Eine Ausführungsform ist eine Spule, die bei den Protonen-, Natrium- und Kohlenstoff-Frequenzen optimiert für die Bildgebung hyperpolarisierter mit Kohlenstoff markierter Verbindungen arbeiten kann. In dem dargestellten Beispiel sorgt eine zweifach ab-

gestimmte lineare Protonen- und Quadratur-Kohlenstoff-Birdcage-Spulenkonstruktion für einen linearen Betrieb bei der Natrium-Frequenz. Die frequenzverschiebende Schleife ist in einem Beispiel so ausgelegt, dass sie, wenn die Schleife geschlossen ist, die Betriebsfrequenz der Spule **30** teilt, indem sie einen ihrer Modi zu der Natrium-Frequenz verschiebt. Ein Mechanismus für die Erzeugung der Frequenzverschiebungsfähigkeit ist eine einfache Ein-Windungs-Schleife, die unmittelbar an der Birdcage-Spule platziert ist. Der elektrische Schaltkreis der Schleife kann beispielsweise unter Verwendung eines Schaltmechanismus geöffnet und geschlossen werden. Ein Schließen des Schalters führt zu einer Aufteilung der Betriebsfrequenz der Spule **30** und zur Verschiebung einer ihrer Frequenzen zu der Natrium-Frequenz.

[0030] Eine alternative Konstruktion, um die Frequenz der zweifach-abgestimmten Spule wirksam von ^{13}C auf ^{23}Na zu verschieben, besteht in der Verwendung von variablen Kondensatoren auf den acht Innenspulen-Sprossen mit geeigneter Vorspannung. Aufgrund der engen Nähe der zwei Resonanzfrequenzen für Kohlenstoff und Natrium können variable Kondensatoren ihren Betriebsbereich innerhalb 10% mit einer kleinen (< 10 V)-Vorspannung ändern. Alternativ können PIN-Dioden verwendet werden, um eine zusätzliche Kapazität hinzuzufügen, die zum Umschalten zwischen der Natrium- und Kohlenstoff-Frequenz erforderlich ist. Mit einer Vorspannung in Rückwärtsrichtung arbeitet die PIN-Diode wie ein offener Schaltkreis, was der Spule eine Resonanz bei der Natrium-Frequenz gibt. Mit einer Vorspannung in Vorwärtsrichtung für die Diode wird ein zweiter Kondensator in den Schaltkreis parallel zu dem Ersten eingeführt, was den Schaltkreis wieder auf die Kohlenstoff-Frequenz abstimmt. Obwohl sie mehr Konstruktionsarbeit erfordert, hat diese Konstruktion den Vorteil einer sauberen einfachen Resonanz bei der Natrium-Frequenz, was zu einem besseren Natriumverhalten bei einem Betrieb in einem echten Quadraturmodus führt.

[0031] In [Fig. 2](#) ist eine perspektivische Ansicht der Spulenanordnung **200** des Bildgebungssystems gemäß einer ersten Ausführungsform dargestellt. Die Spulenanordnung **200** ist als eine runde Anordnung dargestellt, die einen Innenquerschnitt hat, der gemäß den beabsichtigten Anwendungen bemessen ist. Beispielsweise wäre, wenn die Spule **200** zur Bildgebung für das menschliche Gehirn gedacht wäre, die Öffnung dementsprechend bemessen.

[0032] Der äußere Ring **20** hat leitende Abschnitte, die um das dielektrische runde Gehäuse **230** herum mit entsprechenden Enden und Sprossen **25** angeordnet sind, die sich vollständig zwischen den äußeren Ringen **20** erstrecken. Der innere Ring **30** hat Enden mit einer Anzahl von Sprossen **35**, die um das Gehäuse **230** herum angeordnet sind. Es sind Kopp-

lungsschleifen **50, 60** auf dem Gehäuse **230** mit kleinen dielektrischen Abschnitten **210** angeordnet, um die Kopplungsschleifen **50, 60** von dem inneren Ring **30** elektrisch isoliert zu halten.

[0033] Die frequenzverschiebende Schleife **40** ist in der Nähe der durch die inneren Ringe **30** definierten Spule angeordnet. In diesem Beispiel ist die frequenzverschiebende Schleife **40** auf einem dielektrischen Abschnitt **220** und in einem kleinen Abstand über dem Ring **30** angeordnet. Ein Schalter **45** ist elektrisch mit der Schleifenstruktur **40** so gekoppelt, dass der Schalter **45** die Schleife elektrisch vervollständigt, wenn der geschlossen ist.

[0034] In einer Ausführungsform hat die Kohlenstoffspule den inneren Ring **30** mit acht Sprossen mit entsprechender kapazitiver Kopplung. Es sind auch zwei Kopplungsaufnahmeschleifen **50, 60** vorhanden, die auf der Oberseite des inneren Ringes **30** mit Schichten aus dielektrischem Material **210** angeordnet, die die Kopplungsabschnitte **50, 60** von den leitenden Bahnen des inneren Ringes **30** isolieren. Die zwei Aufnahmekopplungsschleifen **50, 60** sind in angenähert ein 90 Grad Entfernung bei der Kohlenstoffresonanzfrequenz positioniert, um einen Quadraturbetrieb zu erzeugen.

[0035] Verschiedene strukturelle Modifikationen liegen innerhalb des Schutzzumfangs dieses Systems, die den Anwendungsbereich erweitern. In der dargestellten Ausführungsform hat der äußere Ring zwei Sprossen, die das Protonenausgangssignal liefern. Weitere Beispiele enthalten weitere Sprossen, die dazu genutzt werden können, für eine erhöhte Empfindlichkeit zu sorgen und die sogar einen zusätzlichen Treiberpunkt verwenden können, für einen Quadraturbetrieb bei der Protonen-Frequenz zu sorgen.

[0036] In diesem Beispiel ist die frequenzverschiebende Schleifenstruktur auf die Kohlenstoff-Frequenz abgestimmt und mit der zweifach-abgestimmten Spule gekoppelt. Die Spule arbeitet linear bei der Natrium-Frequenz; ihre Empfindlichkeit ist in dem einen Beispiel nicht besonders gut, jedoch für den Prescan ausreichend. Die Spule hat eine größere Empfindlichkeit in dem Kohlenstoffbetriebsmodus (die Spule arbeitet während der ^{13}C -Bildgebung in Quadratur). In einer weiteren Ausführungsform ist eine zusätzliche frequenzverschiebende Schleifenstruktur hinzugefügt, um die Empfindlichkeit des Natriumverhaltens zu verbessern. Die zwei frequenzverschiebenden Schleifenstrukturen können um 90 Grad voneinander angeordnet sein und für eine Quadraturansteuerung bei der Natrium-Frequenz für eine größere Empfindlichkeit sorgen.

[0037] Gemäß nochmaliger Bezugnahme auf [Fig. 2](#) enthält die Spule in diesem Beispiel eine Tiefpass-, 8-Sprossen-Quadratur-Birdcage-Kohlenstoffspule, die

zwei ihrer Schenkel mit einer linearen Protonen-Halb-Helmholtzspule teilt. In einer Ausführungsform ist eine frequenzverschiebende Schleife **40** auf die Kohlenstoff-Frequenz abgestimmt und mit der zweifach abgestimmten Struktur gekoppelt, wobei die frequenzverschiebende Schleife sich zwischen zwei Sprossen der Kohlenstoffspule befindet.

[0038] Der Schaltkreis dieser frequenzverschiebenden Schleifenstruktur kann leicht unter Verwendung eines Schaltmechanismus wie z. B. eines mechanischen, elektromechanischen oder elektrischen Schalters geöffnet oder geschlossen werden, um die frequenzverschiebende Schleife mit der Spule zu koppeln oder davon zu entkoppeln. Beispielsweise kann in einer alternativen Ausführungsform eine PIN-Diode verwendet werden, um die frequenzverschiebende Schleifenstruktur zu öffnen oder zu schließen. Während der Schaltkreis offen ist, hat die frequenzverschiebende Schleife keine Auswirkung auf die Abstimmung oder Anpassung der zweifach-abgestimmten Protonen/Kohlenstoff-Basissspule. Bei geschlossenem Schaltkreis sind der Birdcage und die frequenzverschiebende Schleife gekoppelt, was zu dem Vorliegen mehrerer Resonanzen für den anfänglichen Kohlenstoff-Birdcage mit einer der Resonanzen bei der Natrium-Frequenz führt. Gleichzeitig wird die Protonenresonanz typischerweise durch die offene/geschlossene Position des Schaltmechanismus nicht beeinflusst.

[0039] In [Fig. 3](#) ist ein vereinfachtes Betriebsverfahren **300** gemäß einer Verarbeitungsausführungsform dargestellt. In diesem Beispiel beginnt die Bildgebungsuntersuchung mit geschlossenem Schalter, um die frequenzverschiebende Schleife mit der Birdcage-Spule zu koppeln, **310**. Eine anatomische Bildgebung wird durchgeführt, sowie eine beliebige optionale Abstimmung, **320**. In diesem Beispiel wird die anatomische Bildgebung bei der Protonen-Frequenz durchgeführt.

[0040] Der Prescan wird dann bei der Natrium-Frequenz für die Sendeverstärkungs-(oder Flipwinkel)-Kalibrierung durchgeführt, **330**. Die Prescaninformation wird verarbeitet, um eine Kalibrierung für den Flipwinkel bei der Kohlenstoff-Frequenz auf der Basis einer Interpolation der Ergebnisse aus dem Prescan bei der Natrium-Frequenz zu erzeugen, **340**.

[0041] Die verschiebende Schaltkreisschleife wird dann z. B. durch Öffnung des Schalters entkoppelt, **350**, was effektiv die Auswirkungen der verschiebenden Schaltkreisschleife beseitigt. Sobald die Auswirkungen der verschiebenden Schaltkreisschleife beseitigt sind, kann die Bildgebung in dem kalibrierten System bei der Kohlenstoff-Frequenz durchgeführt werden, **360**. In diesem Beispiel wird das saubere Kohlenstoff-Frequenzverhalten in Quadratur von zwei Kopplungsschleifen für ein besseres SNR erhal-

ten. Ein lineares Verhalten liegt ebenfalls innerhalb des Schutzzumfangs dieser Ausführungsform, wenn ein niedrigeres SNR akzeptabel ist.

[0042] [Fig. 4A–Fig. 4E](#) veranschaulichen tatsächliche Testmessungen für die Spule und veranschaulichen die Größe des Reflexionskoeffizienten S_{11} für die zwei Kohlenstoffkanäle (Natrium-Frequenz und Kohlenstoff-Frequenz) bei geöffnetem und geschlossenem Schalter der frequenzverschiebenden Schleife und für den Protonenkanal, welcher durch die Position des Schalters nicht beeinflusst wird. In [Fig. 4A](#) ist die Größe des Reflexionskoeffizienten S_{11} bei der Protonen-Frequenz dargestellt. In [Fig. 4B](#) ist die Größe des Reflexionskoeffizienten S_{11} für einen von den Kohlenstoffkanälen bei geöffnetem Schalter (gepunktete Linie) und bei geschlossenem Schalter (durchgezogene Linie) dargestellt. [Fig. 4C](#) stellt die Größe des Reflexionskoeffizienten S_{11} für den anderen Kohlenstoffkanal bei geöffnetem Schalter (gepunktete Linie) und geschlossenem Schalter (durchgezogene Linie) dar. Die Schließung des Schaltkreises der frequenzverschiebenden Schleife bewirkt eine starke Störung des damit koppelten linearen Modus, indem es dessen Resonanz aufteilt. Bei geschlossenem Schalter (durchgezogene Linie in [Fig. 4B](#)) ist die Kohlenstoffspule auch für die Natrium-Frequenz bei angenähert 17 MHz empfindlich. Im Gegensatz dazu arbeitet, wenn der Schalter offen ist (gepunktete Linie in den [Fig. 4B](#) und [Fig. 4C](#)) die Kohlenstoffspule in Quadratur bei der Kohlenstoff-Frequenz.

[0043] In [Fig. 4D](#) wurden die S_{21} -Messwerte in der Ebene der abtastenden Sende- und Empfangs-(T/R)-Spulen parallel zu der Ebene der Ein-Windungs-Schleife erhalten, die das Vorliegen einer Resonanz bei der Natrium-Frequenz anzeigen, und das einer weiteren Resonanz symmetrisch unterhalb der Kohlenstoffresonanz. Eine Kohlenstoffresonanz liegt in dieser Ebene nicht vor.

[0044] Die durch das Vorhandensein der Ein-Windungs-Schleife ausgelöste Störung beeinflusst jedoch nicht den anderen linearen Modus des Birdcage, welcher auf die Kohlenstoff-Frequenz abgestimmt bleibt. [Fig. 4E](#) stellt die in der Ebene der abtastenden T/R-Spulen senkrecht zu der Ebene der Ein-Windungs-Schleife erhaltenen S_{21} -Messwerte dar, die die Messdaten bestätigen. Demzufolge wird bei geschlossenem Schalter der Ein-Windungs-Schleife die ursprüngliche Quadratur ^{13}C -Spule in eine Spule mit einem linearen Modus bei der ^{13}C -Frequenz und einem linearen Modus bei der ^{23}Na -Frequenz und einer Frequenz transformiert, die sich symmetrisch unterhalb in Bezug auf die ^{13}C -Resonanz befindet. Da die Ausrichtung der mit den I- und U-Kanälen des Birdcage koppelnden induktiven Schleifen weder parallel noch senkrecht zu der Ebene der störenden Ein-Windungs-Schleifen ist, zeigt sich eine Kombination dieser zwei fundamentalen linearen Modi in den

S_{11} -Messungen bei geschlossenem Schaltkreis der Ein-Windungs-Schleife (durchgezogene Linien in den [Fig. 4B](#) und [Fig. 4C](#)).

[0045] Unbelastete Gütefaktoren (Q_u) für diese Spule waren 134 für die ^{13}C -Resonanz (Schalter offen) und 90 für die ^{23}Na -Resonanz (Schalter geschlossen). Das Verhältnis zwischen den belasteten und unbelasteten Qualitätsfaktoren war $Q_u/Q_l = 1,5$ für die Kohlenstoffresonanz (Schalter offen) und $Q_u/Q_l = 1,25$ für Natrium-Frequenz (Schalter geschlossen), was zeigt, dass die Spule in einem Zwischenbereich arbeitete (wobei das Rauschen sowohl von der Spule als auch der Probe kam). Ferner war die Spule bei den zwei Frequenzen nicht ähnlich belastend.

[0046] [Fig. 5](#) veranschaulicht eine graphische Darstellung der Inversions-Sendeverstärkungen (iTG's – welche die TG's für die Flipwinkel von 180 Grad repräsentieren) bei der ^{13}C -Frequenz gegenüber den iTG's bei der ^{23}Na -Frequenz für die Belastungsphantome. Um diese Spule für alle nachfolgenden in vivo-Experimente zu kalibrieren, wurde die zum Erzielen eines vorgegebenen Flipwinkels bei den ^{13}C - und ^{23}Na -Frequenzen erforderliche Sendeleistung für sechs Belastungsphantome gemessen.

[0047] Die iTG's wurden von einem Scanoperator in einem manuellen Prescan gemessen, indem beide Signale im Absorptionsmodus phasenverschoben wurden und die TG's aufgezeichnet wurden, für welche Signale minimiert waren. Die Bestimmungsunsicherheit der TG für minimales Signal in Phantomexperimenten war gering, und umfasste ca. vier TG-Einheiten bei der ^{13}C -Frequenz und ungefähr zwei TG-Einheiten bei der ^{23}Na -Frequenz. Die Mittelwert-TG's, für welche die Signale minimiert waren, wurden als Datenpunkte dargestellt, während die Fehlerbalken den gesamten Unsicherheitsbereich für die Signalminimierung abdeckten.

[0048] In einem praktischen Experiment wird die Birdcage-Spule einschließlich der mit der Birdcage-Spule gekoppelten Ein-Windungs-Frequenzverschiebungsschleife für die Anfangsserie einer Hyperpolarisationsuntersuchung in vivo zur Scheibenlokalisierung und zur Abstimmung bei der ^1H -Frequenz und zur FA-Kalibrierung bei der ^{23}Na -Frequenz verwendet. Der Schaltkreis der äußeren Schleife wird dann geöffnet, die Birdcage-Spule kehrt zu ihren ursprünglich zweifach-abgestimmten $^1\text{H}/^{13}\text{C}$ -Betriebsmodus für den abschließenden Scan zurück, welcher die Lage der injizierten ^{13}C -Verbindung und ihre nachfolgenden Stoffwechselprodukte abbildet. Die Verwendung dieser Spule bei ihren drei Frequenzen (^1H für anatomische Lokalisierung und Abstimmung, ^{23}Na für die FA-Kalibrierung und ^{23}Na -Bildgebung und bei ^{13}C zur Bildgebung wird nachstehend demonstriert.

[0049] In der experimentellen Ausführungsform repräsentiert die Spule eine 1,5T-Tierspule mit einer kleinen Öffnung. Die Spule enthält eine zweifach-abgestimmte Tiefpass- $^1\text{H}/^{13}\text{C}$ -Spule. Eine 8-Sprossen-Quadratur- ^{13}C -Birdcage-Spule (8 cm Durchmesser, 10 cm Länge) hat zwei ihrer Sprossen, in 180 Grad entfernt, verlängert, um eine lineare ^1H -Halb-Helmholtzspule zusammen mit zwei extra Endringen auszubilden, die etwa angenähert in 14,5 cm Abstand angeordnet sind. Die Leiterbahnen für diese zweifach-abgestimmte Spule sind angenähert 6 mm breit und sind typischerweise aus Kupfer, obwohl andere geeignete Leiterbahnen innerhalb des Schutzzumfangs des Systems liegen. Die ^1H -Spule ist kapazitiv mit ihrem Treiberkabel gekoppelt, wobei die zwei orthogonalen Modi des ^{13}C -Birdcage induktiv mit ihren Treiberkabeln gekoppelt sind.

[0050] In der dargestellten Ausführungsform ist eine rechteckige Ein-Windungs-Schleife, angenähert 5,5 cm lang und 3 cm breit, für eine Resonanz bei der ^{13}C -Frequenz ausgelegt. In einer Ausführungsform ist die Schleife fest an der Birdcage-Spule symmetrisch zwischen den ^{13}C -Birdcage-Ansteuerungs-sprossen angebracht. Während ein offener Schaltkreis die Abstimmung oder Anpassung der zweifach abgestimmten $^1\text{H}/^{13}\text{C}$ -Struktur nicht beeinflusst, führt ein geschlossener Schaltkreis zu einer Kopplung der Schleifen mit dem Schaltkreis der ^{13}C -Spule und Modifizierung ihrer Resonanzstruktur. Der Abstand und die leichte Drehung dieser Schleife gegenüber dem Kunststoffträgerzylinder werden experimentell gewählt, um eine Resonanz bei der ^{23}Na -Frequenz (16,89 MHz) zu erzeugen.

[0051] In diesem Beispiel wurde eine relativ große Fläche für die Kopplungsschleife für diese Schleife gewählt, um die Spulenkopplung zu maximieren, wobei die Schleifenstruktur für eine Resonanz bei der ^{13}C -Frequenz ausgelegt ist. Die frequenzverschiebende Schleifenstruktur passt in eine Spulenkunststoffabdeckung und ist zwischen den Ansteueranschlüssen für die Birdcage-Kanäle platziert. Der Abstand und die leichte Drehung/Kippung zwischen der Schleifenstruktur und der Spule werden experimentell angepasst, um eine Resonanz bei der gewünschten ^{23}Na -Frequenz für die Birdcage-Spule zu erzielen. Die Schleife wird befestigt, sobald das optimale Verhalten erzielt ist.

[0052] Gemäß nochmaligem Bezug auf die Graphik von [Fig. 5](#) kann man sehen, dass etwas weniger Leistung zum Invertieren der ^{13}C -Signale erforderlich ist, als zum Invertieren der ^{23}Na -Signale erforderlich ist. Gemäß theoretischen Überlegungen sollte unter Annahme einer Quadratursteuerung und einer perfekten Abstimmung und Anpassung bei den Frequenzen, die Leistung zum Erhalt eines vorgegebenen FA bei der ^{13}C -Frequenz zwischen 0 und 3 dB höher als die Leistung sein, die für den Erhalt desselben FA

bei der ^{23}Na -Frequenz erforderlich ist, wobei der genaue Betrag der Leistungszunahme von der dominanten Rauschquelle abhängt. Eine Leistungssteigerung von 3 dB ist bei der ^{23}Na -Frequenz aufgrund des linearen Betriebs der Spule bei dieser Frequenz im Vergleich zu dem Quadraturbetrieb der ^{13}C -Frequenz erforderlich. Die beobachtete Leistungserhöhung war ca. 1,5 dB, um denselben FA bei der ^{23}Na -Frequenz wie bei der ^{13}C -Frequenz zu erhalten.

[0053] Ferner stellt die Graphik von [Fig. 5](#) dar, dass der Variationsbereich für die Sendeverstärkung, der zum Invertieren der Signale bei beiden Frequenzen für verschiedene Spulenbelastungen erforderlich ist, etwas kleiner als der typisch erwartete ist. Abgesehen von dem Umstand, dass ein derartiges Ergebnis bei niedrigen Betriebsfrequenzen (16 bis 17 MHz) nicht ungewöhnlich ist, beruht dieses auch auf dem Umstand, dass die Spule unter voller Belastung abgestimmt worden ist. Wenn die Belastung in den Experimenten verringert wurde, traten gegenläufige Effekte auf, die die Auswirkung der unterschiedlichen Spulenbelastung auf die TG-Variabilität minimieren. Beispielsweise erforderte eine kleinere Belastung eine kleinere absorbierte Leistung, um einen gegebenen Flipwinkel zu erhalten. Gleichzeitig wurde jedoch die Spule leicht fehlangepasst und fehlabgestimmt, was wiederum mehr Vorleistung erforderte, um denselben Flipwinkel zu erzielen. Ferner war die Beziehung zwischen den iTG's bei den zwei unterschiedlichen Frequenzen ziemlich linear. Eine durch die Gleichung y ist $1,57x - 95,9$ ($R^2 = 0,96$) bestimmte Zweiparameter-Linearapproximation (durchgezogene Linie), nähert die Ergebnisse an.

[0054] Die Spule wurde für bestimmte in vivo Experimente verwendet. Experimente wurden mit der in ihrem $^1\text{H}/^{23}\text{Na}$ -Modus arbeitenden Spule für eine anatomische Lokalisierung und Abstimmung begonnen. Eine FA-Kalibrierung wurde dann genau bei der ^{23}Na -Frequenz durchgeführt. Die Senderfrequenz des Scanners wurde anschließend auf die ^{13}C -Resonanzfrequenz geändert, die Sendeverstärkung wurde entsprechend verringert, um den gewünschten Flipwinkel bei der ^{13}C -Frequenz gemäß der Kalibrierungskurve für die Spule zu erzielen, der Schleifen-spulenschalter wurde geöffnet, und ^{13}C -Bilder wurden in vivo erhalten. Keine Kabelverbindungen oder Trennungen waren während der Untersuchung erforderlich. Der ^1H -Kanal war immer angeschlossen und aufgrund ihrer Nähe liefen sowohl die ^{23}Na - und ^{13}C -Signale durch dieselbe Sende- und Empfangs-Kette.

[0055] Für klinische Untersuchungen haben die hierin detailliert dargestellten Spulen den Vorteil, einen genauen Abschluss aller Prescan- und Scan-Schritte zu ermöglichen, ohne die Versuchspersonen neu zu positionieren, Kabel anzuschließen oder zu trennen oder die hyperpolarisierte Probe zu verschwenken. Die FA-Kalibrierung kann auch bei der ^1H (an-

stelle der ^{23}Na -Frequenz) durchgeführt werden, was eine weniger komplexe HF-Spule für die Bildgebung bei Vorliegen hyperpolarisierter Verbindungen erfordert. In den meisten klinischen Implementationen von MRI-Scannern wandern die ^1H und ^{13}C -Signale durch vollständig unterschiedliche Sende- und Empfangsketten (unterschiedliche HF-Verstärker sowie unterschiedliche T/R-Schalter). Eine Ausführungsform kalibriert zu Beginn den Flipwinkel bei der Protonenfrequenz und sagt dann die erforderliche Sendeleistung bei der ^{13}C -Frequenz voraus. In diesem Falle tritt eine leichte Änderung in dem Verhalten des Verstärkers eine leichte Änderung in dem Verhalten des Verstärkers oder T/R-Schalters bei einer der Frequenzen auf, wobei sich jedoch konsistente Fehler in der ^{13}C -Flipwinkelkalibrierung zeigen.

[0056] Modifikationen können angewendet werden, um die Konstruktion dieser Spule für 3 T anzupassen, wobei der Unterschied zwischen den ^{23}Na - und ^{13}C -Resonanzen leicht 1,5 MHz überschreitet. Beispielsweise kann eine vergrößerte Fläche der Einwindungs-Schleife erforderlich sein, um die Spulenkopplung zu erhöhen. Die rauscharme Hardware (Vorverstärker usw.), die in den ^{13}C -Untersuchungen verwendet wird hat die Tendenz, sehr stark frequenzspezifisch zu sein und kann das Natriumsignal in einem Maße abschwächen, bei welchem Hardwaremodifikationen erforderlich sind. Alternativ kann eine FA-Kalibrierung bei der Protonenfrequenz genutzt werden.

[0057] In noch einer weiteren Ausführungsform kann eine größere Schleifenstruktur auf ^1H so abgestimmt werden, dass sie mit der ^1H -Spule koppelt und auch die größere Spule auf Fluor abstimmt. Fluor (^{19}F) hat eine Resonanz bei einer Larmor-Frequenz von etwa 60,12 MHz (1,5 T), die ausreichend nahe an der ^1H -Frequenz von etwa 63,87 MHz liegt, sodass die Verschiebung durch die Kopplung mit der Schleifenstruktur erreicht werden kann. Ferner ermöglicht die Verwendung einer frequenzverschiebenden Schleifenstruktur zum Verschieben zwischen den Natrium- und Kohlenstoff-Frequenzen und einer weiteren frequenzverschiebenden Schleifenstruktur zum Verschieben zwischen der Protonen- und Fluor-Frequenz eine Vier-Frequenzen-Spule ermöglichen.

[0058] Ein Beispiel für die Verwendung der hierin beschriebenen Systeme betrifft die beschleunigte Bildgebung bei Vorliegen von hyperpolarisierten Verbindungen. Eine verringerte Anzahl von Phasencodierungsschritten und eine verringerte Bildgebungszeit sind in MRI unter der Bedingung einer Nutzung von Spulenempfindlichkeitsprofilen zur Gewinnung nicht durch Gradienten codierter Information möglich. Während eine Erzeugung von Spulenempfindlichkeitsprofilen vor der Injektion von hyperpolarisierten Verbindungen aufgrund des Fehlens einer endogenen Verbindung nicht möglich ist, verschwendet ih-

re Erzeugung nach der Injektion der Injektionsverbindung Zeit und verringert in der Folge das SNR der sich ergebenden Bilder. Ein System von auf ^{13}C abgestimmten Spulen, die durch Kopplung mit zusätzlichen Schleifen bei der Natrium-Frequenz zur Resonanz gebracht werden können, wären in der Lage, die Spulenempfindlichkeitsprofile bei der Natrium-Frequenz zu erfassen, indem sie das endogene Natriumsignal nutzen. Diese Zuordnungen würden eine Beschleunigung der ^{13}C -Bildgebung und ein verbessertes SNR eines ^{13}C -Bildes ermöglichen. Beispielsweise würde eine B1-Zuordnungskalibrierung bei der Natrium-Frequenz für eine ^{13}C -Bildgebung verwendet.

[0059] Eine Ausführungsform nutzt die Verwendung einer schaltbar gekoppelten Struktur, um die Bildgebungsspulen auf unterschiedliche Frequenzverhaltensbereiche umzuschalten, statt die Spulen manuell abzustimmen.

[0060] Obwohl nur bestimmte Merkmale der Erfindung hierin dargestellt und beschrieben wurden, werden viele Modifikationen und Änderungen für den Fachmann ersichtlich sein. Es dürfte sich daher verstehen, dass die beigefügten Ansprüche alle derartigen Modifikationen und Änderungen, soweit sie in den tatsächlichen Erfindungsgedanken der Erfindung fallen, abdecken sollen.

Patentansprüche

1. Multifrequenz-Bildgebungsspule, aufweisend: eine Hochfrequenzspule, die bei drei oder mehr unterschiedlichen Frequenzen arbeiten kann; und eine frequenzverschiebende Struktur in unmittelbarer Nähe der Hochfrequenzspule und schaltbar damit gekoppelt, um wenigstens eine von den Frequenzen zu erzeugen, wenn die frequenzverschiebende Struktur mit der Hochfrequenzspule gekoppelt ist und eine andere von den Frequenzen, wenn die frequenzverschiebende Struktur von der Hochfrequenzspule entkoppelt ist.

2. Bildgebungsspule nach Anspruch 1, wobei die Hochfrequenzspule eine zweifach abgestimmte Birdcage-Spule ist, und wobei eine von den Frequenzen eine Protonenfrequenz ist, eine von den Frequenzen eine Natrium-Frequenz und eine von den Frequenzen eine Kohlenstoff-Frequenz ist.

3. Bildgebungsspule nach Anspruch 2, wobei die Birdcage-Spule bei der Protonenfrequenz bei ^1H von angenähert 63,87 MHz arbeitet, bei der Natrium-Frequenz bei ^{23}Na von angenähert 16,89 MHz und in Quadratur bei der Kohlenstoff-Frequenz bei ^{13}C von angenähert 16,06 MHz arbeitet.

4. Bildgebungsspule nach Anspruch 2, wobei die Birdcage-Spule acht Sprossen für eine innere Spule und zwei Sprossen für eine äußere Spule hat.

5. Bildgebungsspule nach Anspruch 1, wobei die frequenzverschiebende Struktur für eine Resonanz bei der Kohlenstoff-Frequenz ausgelegt ist.

6. Bildgebungsspule nach Anspruch 1, wobei die frequenzverschiebende Struktur eine einzelne Schleife aus leitendem Metall auf einem dielektrischen Substrat ist.

7. Bildgebungsspule nach Anspruch 1, wobei die frequenzverschiebende Struktur schaltbar mit der Hochfrequenzspule mittels eines Schalters gekoppelt wird.

8. Bildgebungsspule nach Anspruch 7, wobei der Schalter wenigstens einer von einem elektrischen, elektromechanischen oder mechanischen Schalter ist.

9. Bildgebungsspule nach Anspruch 7, wobei der Schalter eine Diode oder ein mikroelektromechanischer Schalter ist.

10. Verfahren zum Erfassen eines Bildes mit einer Multifrequenz-Bildgebungsspule, mit den Schritten: Koppeln wenigstens einer frequenzverschiebenden Schleife mit der Spule, wobei die frequenzverschiebende Schleife von einer Kohlenstoff-Frequenz zu einer Natrium-Frequenz im gekoppelten Zustand verschiebt; Durchführen einer anatomischen Bildgebung unter Anwendung einer Protonen-Frequenz; Kalibrieren unter Anwendung einer Natrium-Frequenz und Verarbeiten, um eine Flipwinkelkalibrierung für die Kohlenstoff-Frequenz zu gewinnen; Entkoppeln der frequenzverschiebenden Schleife; und Durchführen einer Bildgebung bei der Kohlenstoff-Frequenz unter Anwendung der Flipwinkelkalibrierung aus der Kalibrierung.

11. Verfahren nach Anspruch 10, wobei das Bild für eine Versuchsperson ist, und das ferner den Schritt einer Injektion eines hyperpolarisierten Kontrastmittels in die Versuchsperson vor der Bildgebung aufweist.

12. Verfahren nach Anspruch 10, wobei die Kopplung und Entkopplung mittels eines Schalters ausgeführt wird.

13. Verfahren nach Anspruch 10, wobei die Bildgebung in Quadratur ausgeführt wird.

14. Verfahren nach Anspruch 10, wobei die Kalibrierung zwei von den verschiebenden Schaltkreisen

schleifen verwendet und wobei die Kalibrierung in Quadratur ausgeführt wird.

15. Bildgebungssystem für hyperpolarisierte Verbindungen, aufweisen: eine Bildgebungsspule, die bei wenigstens drei Frequenzen arbeitet; und wenigstens eine frequenzverschiebende Struktur, die schaltbar mittels eines Schalters mit der Bildgebungsspule gekoppelt werden kann; wobei die frequenzverschiebende Struktur eine von den Frequenzen zu einer Frequenz für eine Kalibrierung unter Anwendung einer natürlich auftretenden Verbindung in der Versuchsperson verschiebt, wenn die frequenzverschiebende Struktur mit der Spule gekoppelt ist, und eine Hyperpolarisierungs-Bildgebung unter Anwendung der hyperpolarisierten Verbindungen ausführt, die nicht natürlicherweise in der Versuchsperson auftreten, wenn die frequenzverschiebende Struktur entkoppelt ist.

16. System nach Anspruch 15, wobei die Frequenzen wenigstens drei von einer Protonen-Frequenz, einer Natrium-Frequenz, einer Fluor-Frequenz oder einer Kohlenstoff-Frequenz beinhalten.

17. System nach Anspruch 16, wobei das System linear bei der Protonen-Frequenz und Natrium-Frequenz und in Quadratur bei der Kohlenstoff-Frequenz arbeitet.

18. System nach Anspruch 15, wobei wenigstens eine frequenzverschiebende Struktur zwei Schleifenstrukturen für ein Quadraturverhalten für die Kalibrierung aufweist.

19. System nach Anspruch 15, wobei der Schalter einer von einem elektrischen, elektromechanischen, mechanischen Schalter, einer Diode oder einem mikroelektromechanischen Schalter ist.

Es folgen 7 Blatt Zeichnungen

Anhängende Zeichnungen

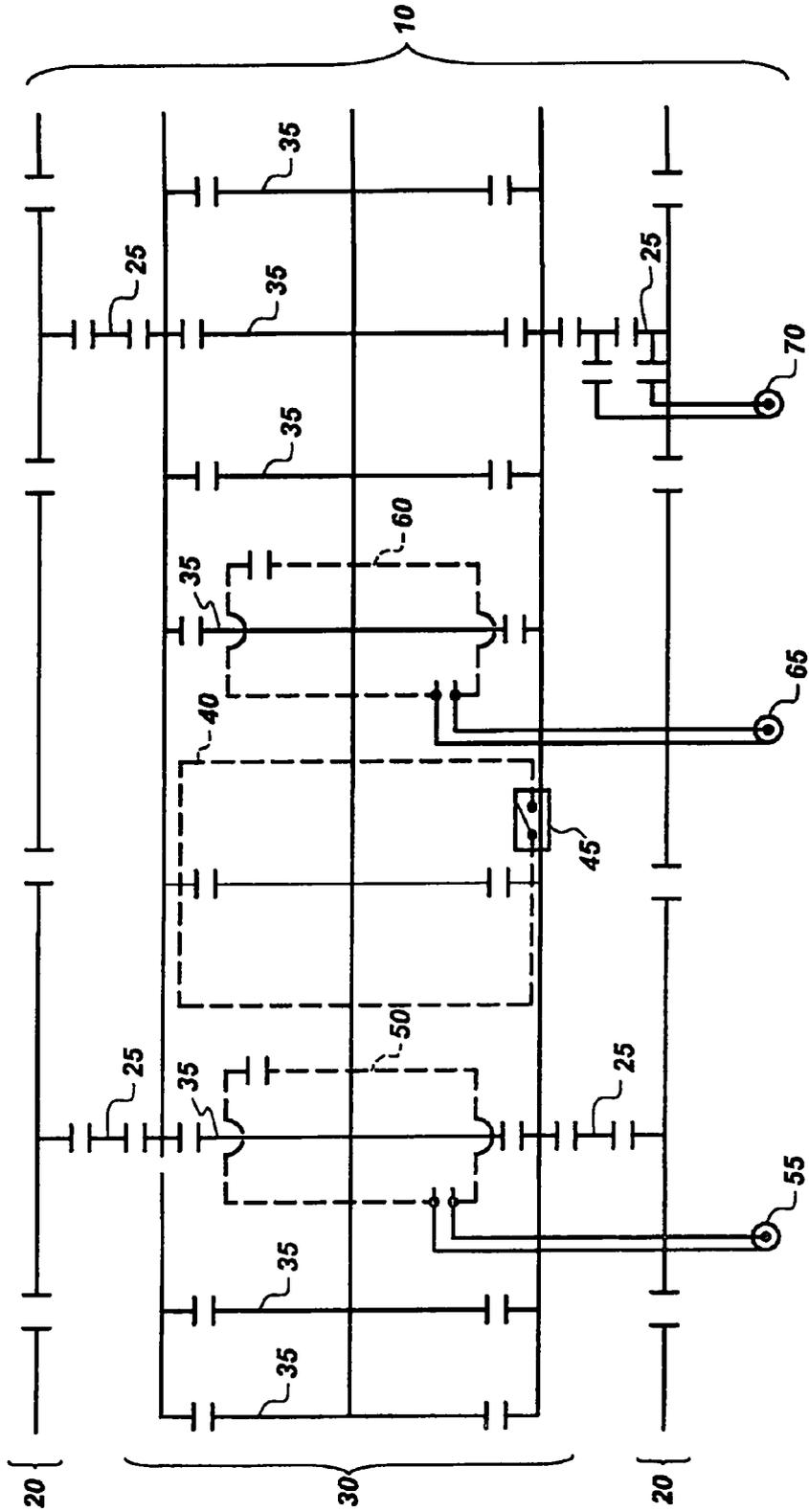
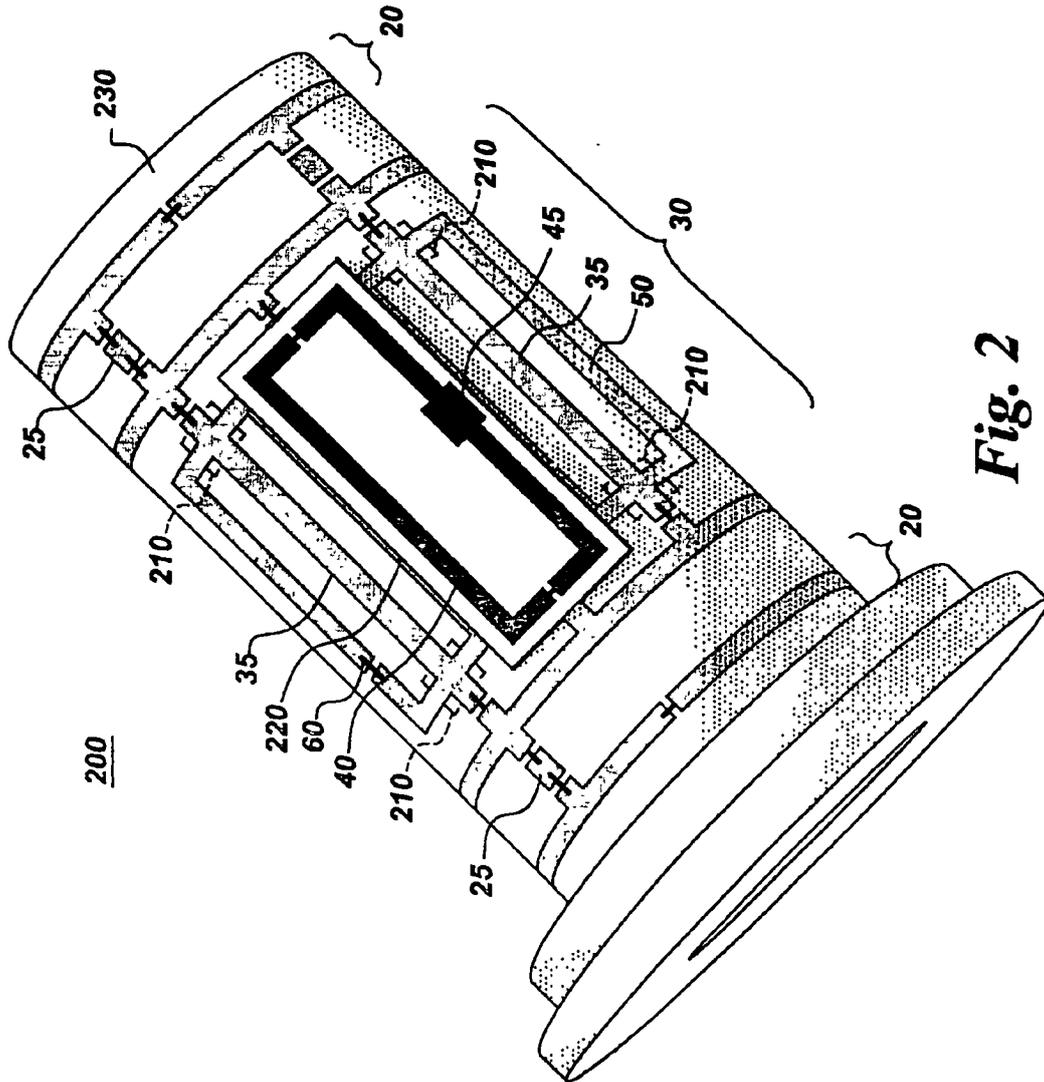


Fig. 1



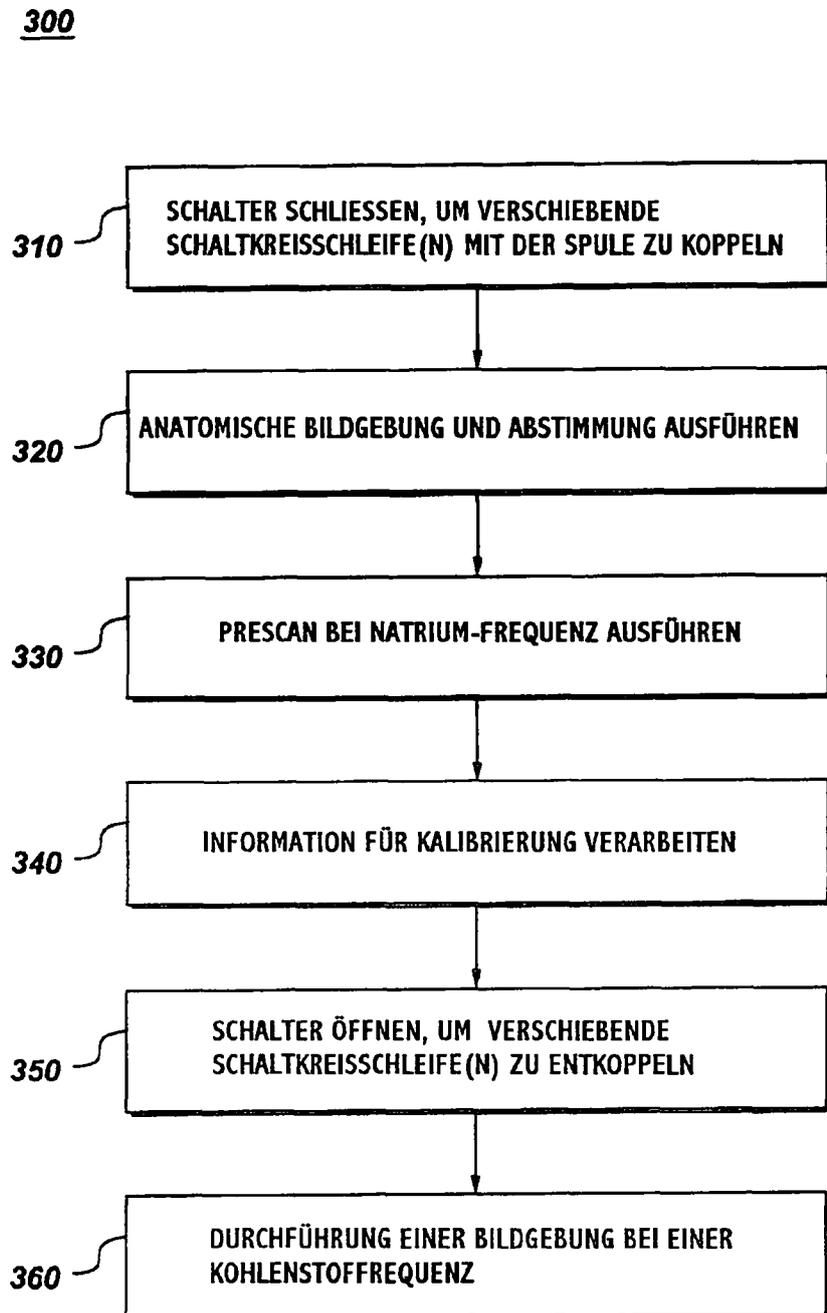


Fig. 3

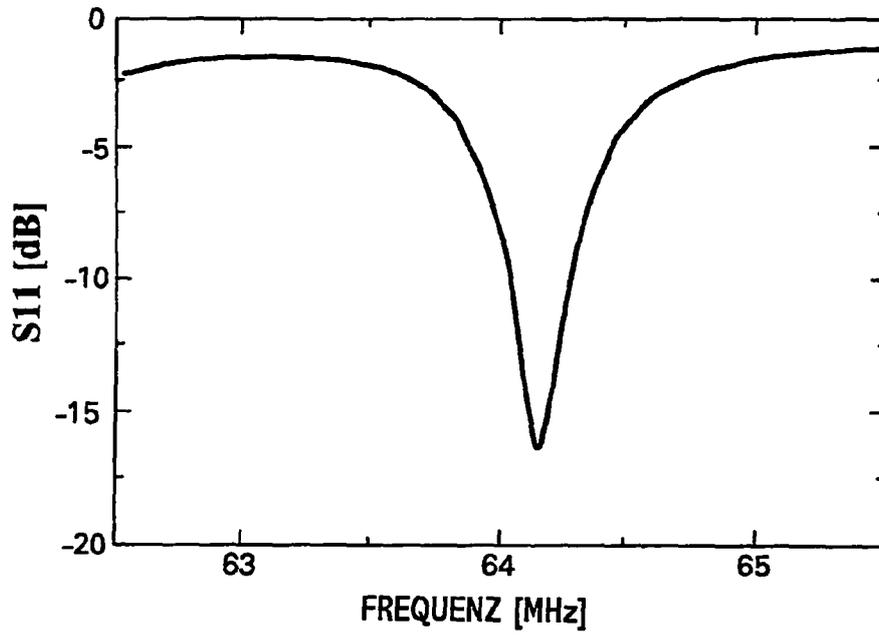


Fig. 4A

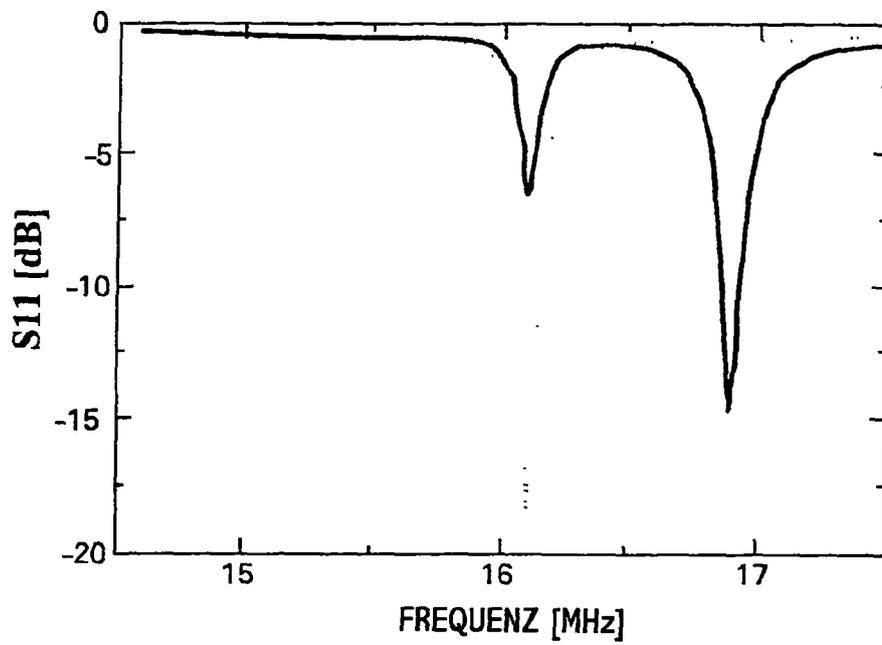


Fig. 4B

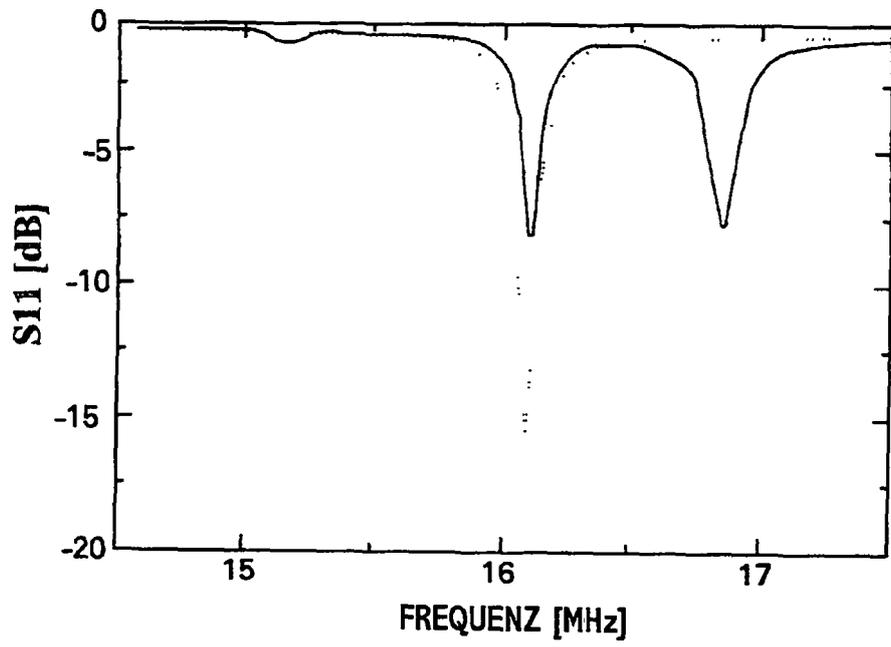


Fig. 4C

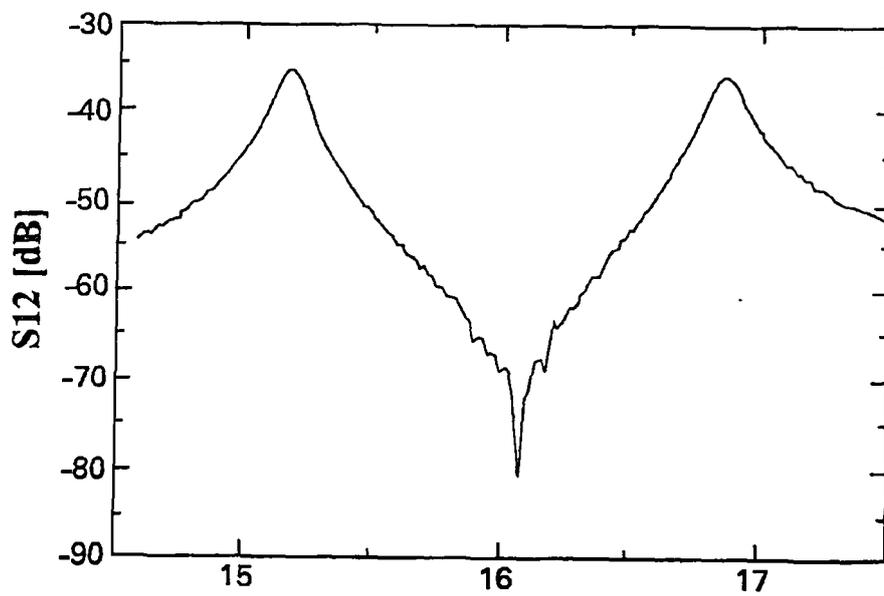


Fig. 4D

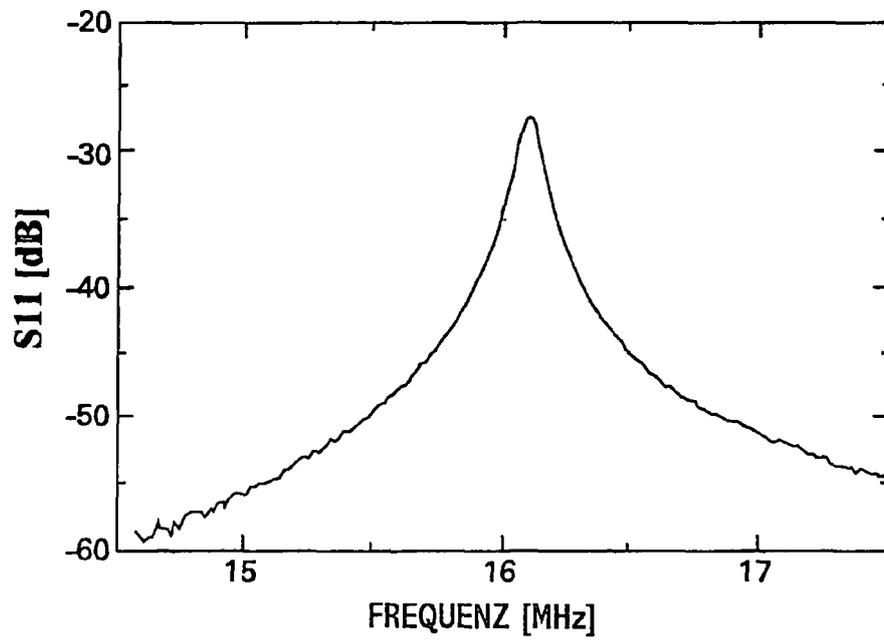


Fig. 4E

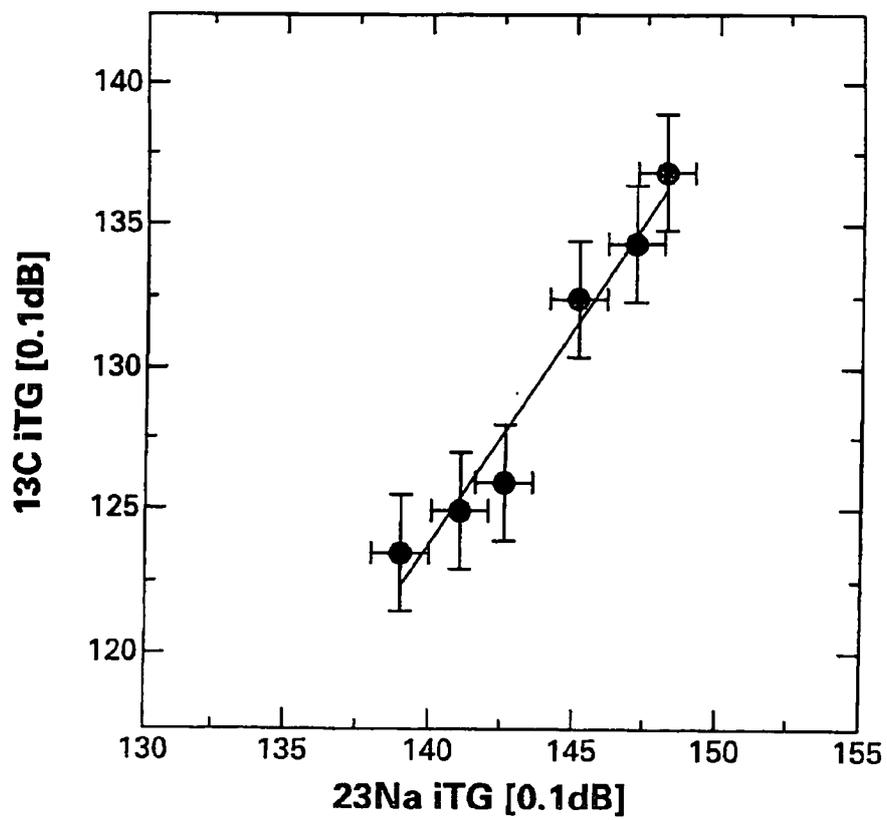


Fig. 5