

(19) 日本国特許庁(JP)

(12) 特 許 公 報(B2)

(11) 特許番号

特許第5641713号  
(P5641713)

(45) 発行日 平成26年12月17日(2014.12.17)

(24) 登録日 平成26年11月7日(2014.11.7)

(51) Int.Cl. F I  
**A 6 1 B 5/055 (2006.01)** A 6 1 B 5/05 3 5 1

請求項の数 30 (全 14 頁)

<p>(21) 出願番号 特願2009-146568 (P2009-146568)                  (22) 出願日 平成21年6月19日 (2009. 6. 19)                  (65) 公開番号 特開2010-358 (P2010-358A)                  (43) 公開日 平成22年1月7日 (2010.1.7)                  審査請求日 平成24年4月27日 (2012. 4. 27)                  (31) 優先権主張番号 10 2008 029 175.7                  (32) 優先日 平成20年6月19日 (2008. 6. 19)                  (33) 優先権主張国 ドイツ (DE)</p>	<p>(73) 特許権者 390039413                  シーメンス アクチエンゲゼルシャフト                  Siemens Aktiengesellschaft                  ドイツ連邦共和国 D-80333 ミュンヘン                  ヴィッテルスバッハープラッツ 2                  Wittelsbacherplatz 2, D-80333 Muenchen, Germany                  (74) 代理人 100061815                  弁理士 矢野 敏雄                  (74) 代理人 100099483                  弁理士 久野 琢也</p>
---	---

最終頁に続く

(54) 【発明の名称】 高周波送信コイルの駆動制御のためのパルスシーケンスを求めめるための方法及び所属の磁気共鳴装置

(57) 【特許請求の範囲】

【請求項 1】

高周波のパルスシーケンスを送信する、1つ以上の送信チャネルを有する磁気共鳴装置の駆動方法であって、

選択されたスライス領域または選択されたボリューム領域の時間依存性の選択のために磁気共鳴装置の傾斜磁場コイルに対して、パルスシーケンスの複数のタイムステップ毎に定められる駆動シーケンスが設定され、

所望の目標磁化の設定と傾斜磁場コイルの駆動シーケンスの考慮のもとで、タイムステップ毎に送信コイルの個々の送信チャネルの駆動パラメータに対して非線形の方程式系が解かれ、

空間及び時間に関して離散化された前記非線形の方程式系は、プロッホ方程式から得られる駆動制御パラメータに関して非線形の方程式の他に、さらなる境界条件を表す少なくとも1つの付加的方程式を含んでおり、

前記付加的方程式は、SAR負荷を表す方程式であり、かつ、駆動制御パラメータに直接依存するベクトル値散乱変数と散乱パラメータマトリックスとに依存して被検体の損失電力を表す方程式である、

ことを特徴とする方法。

【請求項 2】

前記制御パラメータマトリックスは三次元の電磁的シミュレーションを用いて求められる、請求項1記載の方法。

## 【請求項 3】

前記制御パラメータマトリックスは測定される、請求項 1 記載の方法。

## 【請求項 4】

前記付加的方程式として、駆動制御パラメータに直接依存する電界分布と導電率分布に依存して被検体の損失電力を表す方程式が用いられる、請求項 1 記載の方法。

## 【請求項 5】

前記導電率分布は、被検体の先行する磁気共鳴撮像データ及び / 又はコンピュータトモグラフィ撮像データによる組織分布から間接的に求められる、請求項 4 記載の方法。

## 【請求項 6】

前記電界分布は、被検体における所定の導電率分布のもとで三次元の電磁的シミュレーションによって求められる、請求項 4 または 5 記載の方法。

10

## 【請求項 7】

被検体に関する入力データに基づいて組織分布を求める人体モデルが組織分布算出のために用いられる、請求項 6 記載の方法。

## 【請求項 8】

前記導電率分布は電気的なインピーダンストモグラフィを用いて求められる、請求項 4 記載の方法。

## 【請求項 9】

前記付加的方程式は局所的分解能に関する、請求項 4 から 8 いずれか 1 項記載の方法。

20

## 【請求項 10】

前記局所的分解能に関する付加的方程式は、局所的 SAR 値を表している、請求項 9 記載の方法。

## 【請求項 11】

前記方程式系を解くために非線形最小二乗法が用いられる、請求項 1 から 10 いずれか 1 項記載の方法。

## 【請求項 12】

前記駆動制御パラメータに対して最小値及び / 又は最大値が設定される、請求項 1 から 11 いずれか 1 項記載の方法。

## 【請求項 13】

解の調整のために、前記方程式系の方程式を重み付けする重み付け係数が用いられる、請求項 1 から 12 いずれか 1 項記載の方法。

30

## 【請求項 14】

SAR 限界値の維持の検査のために、駆動制御パラメータを求めた後で SAR 負荷が求められる、請求項 1 から 13 いずれか 1 項記載の方法。

## 【請求項 15】

駆動シーケンスにより、スライス選択に用いられなかった傾斜磁場コイルのみを駆動制御する、請求項 1 から 14 いずれか 1 項記載の方法。

## 【請求項 16】

高周波のパルスシーケンスを送信する、1 つ以上の送信チャンネルを有する磁気共鳴装置であって、

40

選択されたスライス領域または選択されたボリューム領域の時間依存性の選択のために磁気共鳴装置の傾斜磁場コイルに対して、パルスシーケンスの複数のタイムステップ毎に定められる駆動シーケンスが設定され、

所望の目標磁化の設定と傾斜磁場コイルの駆動シーケンスの考慮のもとで、タイムステップ毎に送信コイルの個々の送信チャンネルの駆動パラメータに対して非線形の方程式系が解かれ、

空間及び時間に関して離散化された前記非線形の方程式系は、プロット方程式から得られる駆動制御パラメータに関して非線形の方程式の他に、さらなる境界条件を表す少なくとも 1 つの付加的方程式を含んでおり、

50

前記付加的方程式は、SAR負荷を表す方程式であり、かつ、駆動制御パラメータに直接依存するベクトル値散乱変数と散乱パラメータマトリックスとに依存して被検体の損失電力を表す方程式である、

ことを特徴とする装置。

【請求項 17】

前記制御パラメータマトリックスは三次元の電磁的シミュレーションを用いて求められる、請求項 16 記載の装置。

【請求項 18】

前記制御パラメータマトリックスは測定される、請求項 16 記載の装置。

【請求項 19】

前記付加的方程式として、駆動制御パラメータに直接依存する電界分布と導電率分布に依存して被検体の損失電力を表す方程式が用いられる、請求項 16 記載の装置。

【請求項 20】

前記導電率分布は、被検体の先行する磁気共鳴撮像データ及び/又はコンピュータトモグラフィ撮像データによる組織分布から間接的に求められる、請求項 19 記載の装置。

【請求項 21】

前記電界分布は、被検体における所定の導電率分布のもとで三次元の電磁的シミュレーションによって求められる、請求項 19 または 20 記載の装置。

【請求項 22】

被検体に関する入力データに基づいて組織分布を求める人体モデルが組織分布算出のために用いられる、請求項 21 記載の装置。

【請求項 23】

前記導電率分布は電気的なインピーダンストモグラフィを用いて求められる、請求項 19 記載の装置。

【請求項 24】

前記付加的方程式は局所的分解能に関する、請求項 19 から 23 いずれか 1 項記載の装置。

【請求項 25】

前記局所的分解能に関する付加的方程式は、局所的 SAR 値を表している、請求項 24 記載の装置。

【請求項 26】

前記方程式系を解くために非線形最小二乗法が用いられる、請求項 16 から 25 いずれか 1 項記載の装置。

【請求項 27】

前記駆動制御パラメータに対して最小値及び/又は最大値が設定される、請求項 16 から 26 いずれか 1 項記載の装置。

【請求項 28】

解の調整のために、前記方程式系の方程式を重み付けする重み付け係数が用いられる、請求項 16 から 27 いずれか 1 項記載の装置。

【請求項 29】

SAR 限界値の維持の検査のために、駆動制御パラメータを求めた後で SAR 負荷が求められる、請求項 16 から 28 いずれか 1 項記載の装置。

【請求項 30】

駆動シーケンスにより、スライス選択に用いられなかった傾斜磁場コイルのみを駆動制御する、請求項 16 から 29 いずれか 1 項記載の装置。

【発明の詳細な説明】

【技術分野】

【0001】

本発明は、磁気共鳴装置における 1 つ以上の送信チャンネルを有する高周波送信パルスの駆動制御のためのパルスシーケンスを求めるための方法に関する。

10

20

30

40

50

## 【背景技術】

## 【0002】

従来の磁気共鳴装置は平衡な磁化からのスピンの偏向を生成するために、従来の磁気共鳴装置は高周波送信コイルの駆動制御に対して次のように設計されたパラメータ、すなわち被検体によって占有されていない測定領域内で形成された偏向磁場（これはB1磁場とも称される）ができるだけ均一となるように設計されたパラメータを用いている。なおここでは最初に"高周波送信コイル"というものが送受信コイルも含めたものであることを述べておく。

## 【0003】

特により新しい装置、例えば基本磁場強度が3テスラ以上である装置のもとでは、このような均一性は被検体（患者）の搬入によって既に阻害されることがわかっている。なぜなら被検体の中でそれ自体障害フィールドを形成する渦電流が生成されるからであり、その結果として前記偏向磁場の均一性が損なわれ、それに伴って磁化も破壊される。そのような渦電流作用の増加は、より高い周波数の強制的な使用に起因している。

10

## 【0004】

前述したような公知の古典的なケースにおいては駆動制御が通常は次のように行われている。すなわちコイルのn個の励起チャンネルのもとで順次連続する複数のチャンネルがそれぞれ2/nだけずらされて駆動される。これは円偏波磁場を得るためである。このような駆動制御の変形例は無の空間の均一な偏向磁場を生成し、これはしばしば"モード1"と称されている。

20

## 【0005】

前述したような問題を解決するための第1の取り組みは"静的なアプローチ"である。この場合は均一な磁化を達成するために励起位相の全持続時間とチャンネル毎の振幅が一定に保たれる。しかしながらそれによって得られる改善はいずれにせよ不十分なものであり、特に被検体のSAR負荷に関する最適化も（頻繁に望まれる）スピンの局所的な偏向も得ることができない。

## 【0006】

特に後者で述べた問題の解決に対しては、励起すべきスライスの所定の領域を時間分解能でもって選択するために、傾斜磁場コイルを高周波励起パルスの期間中も使用することが提案されている。この傾斜磁場コイルは励起中は通常はスライス選択磁場勾配を除いて非活動化状態におかれるものである。またそれと平行して次のようなことも提案されている。すなわち励起の継続期間中は送信チャンネルの位相と振幅の動的な変化を許容し、それによってパルスシーケンスが生じるようにすることである。これによって所定の領域が選択され、励起が相応に行われ、次のステップにおいては別の領域が処理される。それに対してはk空間軌跡（k-space trajectory）が傾斜磁場コイルに対して設定される。これは励起すべきスライスボリュームの部分容積空間（これはボクセルとも称される）を所定の形式で選択する。

30

## 【0007】

しかしながらその場合には高度に複雑な方程式系を解かなければならない問題が生じる。これらの方程式はいわゆるブロッホの方程式から直接得られるものである。

40

## 【0008】

## 【数1】

$$\frac{d\vec{M}}{dt} = \gamma \vec{M} \times \vec{B}_1 \quad (1)$$

この場合前記Mは磁化、前記tは時間、そして前記B1は偏向磁場である。通常この式は緩和を表す項も含んでいるがしかしながらこれは無視できる。なぜならば励起の持続時間が時定数T1, T2よりもはるかに短いからである。以下の明細書においてブロッホの方程式を取り上げる場合には前記式(1)を意味するものと理解されたい。所望の均一な磁化若しくは所定の領域における均一な磁化は、パルスシーケンスの持続時間(1ms若し

50

くは数ms)に関する時間積分として得られるか、ないしは時間に関して離散しているケースでは全ての時間ステップに関する総和として得られる。このような所望の磁化は予め定められるものであり、それに対してはB1磁場と傾斜磁場のどのような組み合わせがこのような結果をもたらすかが求められるべきである。そしてこの組み合わせからは送信チャンネルに対する駆動制御パラメータが導出できる。

#### 【0009】

しかしながら前記ブロッホの方程式はそのベクトル構造と、空間及び時間に関して実施される離散化のために、多数の方程式にわかれ、それらが方程式系を形成するものとなる。例えば各時間単位毎(通常は1msの全励起パルスの持続時間中に数百)に各送信チャンネル(例えば8個)が複素数値係数(例えば駆動制御パラメータとしての振幅と位相)を必要とするならば、ブロッホ方程式の利用のもとでは数千の変数を伴う方程式系が生じる。そしてこのような方程式系に、選択されたスライスの所望の磁化(例えば均一な磁化)ないしは所望の磁化分布(例えば所定の領域内の均一性)が入力される。

これに対して公知のパルス計算手法は小さな角度の近似から出発し、これは得られた方程式系の線形化を可能にする。つまりこのことは小さな偏向角度から開始されることを意味する。前記方程式系への入力(例えば所望の磁化の実数部分と虚数部分)であり、この場合の磁化は小角度近似を可能にするために平衡磁化の数パーセント(<10%)しか許されない。

#### 【0010】

この解決策では大きな偏向角度が許容されないことを除外すれば、さらに生じる問題は無視できる。高周波照射中の傾斜磁場の印加は選択された空間に励起を引き起こす。それ故に、全体的にもたらされる損失電力、つまりSAR(比吸収率)が増加し、このことは所定の限界値の上回りにつながり、被検体を危険にさらす。さらに個別に励起される領域内ではSARが局所的に異常に高くなる領域、いわゆるホットスポットが発生し得る。最終的には、励起パルスを制限するさらなるパラメータの考慮も、例えば高周波増幅器の励起出力が制限される場合にはできなくなるか、できたとしても非常に難しくなる。

#### 【発明の概要】

#### 【発明が解決しようとする課題】

#### 【0011】

本発明の課題は前記したような欠点に鑑みこれを解消すべく改善を行うことであり、具体的には、大きな偏向角度に対しても、さらなる(線形及び非線形的)制約(特にSAR制限)の考慮のもとで、所望の磁化達成のための理想的な励起パルスを求めることのできる方法を提供することである。

#### 【課題を解決するための手段】

#### 【0012】

前記課題を解決するために前述した形式の本発明による方法では以下に述べるステップが行われる。

選択されたスライス領域または選択されたボリューム領域の時間依存性の選択のために磁気共鳴装置の傾斜磁場コイルに対して、パルスシーケンスの複数のタイムステップ毎に定められる駆動シーケンスが設定され、

所望の目標磁化の設定と傾斜磁場コイルの駆動シーケンスの考慮のもとで、タイムステップ毎に送信コイルの個々の送信チャンネルの駆動パラメータに対する非線形の方程式系が解かれ、

空間及び時間に関して離散化された前記非線形の方程式系は、ブロッホ方程式から得られる駆動制御パラメータに関して非線形の方程式の他に、さらなる境界条件を表す少なくとも1つの付加的な方程式を含んでいる。

#### 【図面の簡単な説明】

#### 【0013】

【図1】本発明による磁気共鳴装置の概略図

【図2】本発明による方法を説明するためのフローチャート

【図3】傾斜磁場コイルに対する駆動シーケンスのk空間軌跡を示した図

10

20

30

40

50

【図4】本発明による方法を用いて得られる磁化分布を示した図

【図5】モード1の励起を用いて従来技法で得られた磁化分布を示した図

【発明を実施するための形態】

【0014】

本発明による方法においてはまず傾斜磁場コイルのための駆動シーケンスが設定される。選択されたスライス内若しくは選択されたボリューム内の異なる領域を異なるタイムステップで選択するために、スライス選択用の磁場勾配に対してさらに付加的に、つまり残りの傾斜磁場コイルにも駆動シーケンスに従って通電がなされる。ここでは関連性のないスライス領域や部分容積空間も考えられ得る。つまり任意の領域において磁化が設定され得る。また駆動シーケンスは時間と空間に関して既に離散化されていてもよい。空間に関する離散化は、選択されたスライスの種々のボクセルへの分割の形で表れる。

10

【0015】

傾斜磁場コイルに対するそのような駆動シーケンスを求めるための方法は、従来技法においてもよく知られている。詳細には三次元のk空間軌跡が頻繁に選択される。これは実質的に螺旋カーブを追従し、最終的に選択された領域の磁化を形成するために軌跡周波数の間隔で実行される。従って駆動シーケンスの設定を用いれば、どのタイプステップの、どの領域が、高周波送信パルスのパルスに該当するかが分かる。

【0016】

本発明によれば、この設定とさらに所望の目標磁化の設定を用いることによって、タイムステップ毎に送信パルスの個々の送信チャネルの駆動制御パラメータに対して非線形の方程式系が解けるようになる。これらの駆動制御パラメータは既に前述したように複素値係数であり、それらは振幅及び位相によってあらわされ、それらを用いることで送信チャネルに対応する給電ポイントへの給電が行われる。非線形の方程式系は空間及び時間に関して離散化され、プロッホ方程式(1)から得られる駆動制御パラメータに関して非線形の方程式の他に、さらなる境界条件を表す少なくとも1つの付加的な方程式を含んでいる。この明細書における境界条件とは、本解決手段に設定できるあらゆる付加条件("基準"とも称する)である。従って、プロッホ方程式をその非線形形態の方程式系として解くためにだけ提案されるのではなく、さらなる境界条件を付加的方程式の形態で方程式系にもたすため提案されている。

20

【0017】

それ故にここでは駆動制御パラメータを近似的に求めるために、方程式系の線形化が行われるのではなく(これは従来技法に当てはまる)、有利には非線形の方程式系に対する解決手段、特に非線形の最小二乗法が用いられる。このことだけでも従来技法に比べて著しい利点をもたらされる。そのためここでは任意の磁化ないしは任意の偏向角度のための高周波パルスを算出することも可能である。線形化に基づいて小さな角度の励起のみが合理的に算出される従来技法に対して、本願では大きな角度の励起も処理できるようになる。

30

【0018】

さらに非線形の取り組みは、所望の目標磁化の絶対値のみの設定を可能にする。このことは磁気共鳴撮像過程に対して十分である。線形化される方程式系の適用のもとではこのことは不可能であった。なぜなら絶対値形成が非線形化過程となるからである。ここにおいて絶対値形成の提示はさらなる目的、例えば患者負担低減の達成のためにより多くの可能性をもたらすのに十分である。

40

【0019】

さらに有利には、多くの非線形解決手法は変化例の制約を許容する。これは本願では高周波増幅器の最大出力の制限に相応する。それによりパルスシーケンスの算出は汎用の高周波ハードウェアにも適応化させられる。しかしながら非線形への取り組みの最大の利点は、特に非線形のさらなる付加方程式が、解決手法のもとで直接的に、つまり所望の目標磁化と同時に考慮できる点である。

【0020】

50

本発明による方法の有利な実施例によれば、前記付加的方程式として、SAR負荷を表す、駆動制御パラメータに関して非線形の少なくとも1つの方程式が用いられる。この非線形のアプローチでは特にSAR負荷を表す非線形の方程式が方程式系を解くのに用いられる。この場合は例えばSARに対する所定の限界値がパルス算出に直接関与する。それにより、例えば被検体（患者）が過度に高いSARにさらされるようなことが避けられる。一定の、すなわち最大限均一な目標磁化の設定（ボクセル毎及びタイムステップ毎にそれぞれ1つの方程式）と同時に非常に僅かな損失電力目標値（例えば値"0"；各タイムステップにおいて総損失電力に対しさらなる方程式の供給、または全タイムステップに亘って加算される場合に1つの方程式の供給など）のもとでは、非線形方程式系の解を近似的に求めることによって、良好から非常に良好なレベルの磁化の均一性をもたらすと同時に総損失電力もより僅かとなる、すなわち被検体の負担がより軽減されるパルスシーケンスが供給される。

10

【0021】

SAR関連の損失電力を表す方程式の導入には実質的に2つの手段が存在する。その1つによれば、付加的な方程式として、駆動制御パラメータに直接依存するベクトル値散乱変数と散乱パラメータマトリックスに依存して被検体の損失電力を表す方程式が用いられる。損失電力と散乱パラメータマトリックスとの関係は物理的に公知な事項であり、一般的には以下の式によって表すことができる。

【0022】

【数2】

20

$$PL \approx \sum_N a^+ (I - S^+ S) a \quad (2),$$

この場合前記PLが総損失電力を表し、前記Nはタイムステップ、前記aは、複素数値係数に相応する、すなわちタイムステップ毎の全てのチャンネルの駆動制御パラメータに相応する散乱パラメータであり、前記Sは散乱パラメータマトリックス、前記Iは単位マトリックスを表し、前記+は共役と転置を表している。SARは通例のように相応の重さで割ることによって得られる。

【0023】

散乱パラメータマトリックスは一方では三次元の電磁的シミュレーションによって求めることが可能であり、その場合は例えば人体モデルを基礎とすることができる。また有利には散乱パラメータマトリックスを測定することも可能である。その際には従来技法で公知の全ての方法が使用できる。この散乱パラメータマトリックスを含んでいる付加的方程式の利用では測定することができるという利点はあるが、しかしながらそうゆうでんそうないしはタイムステップ毎の損失電力しか観測できないという欠点もある。そのためこれによるホットスポットは限局できなくなる。

30

【0024】

それ故にSAR負荷を表す付加的方程式の別の変化例が可能となる。本発明の別の実施形態によれば、前記付加的方程式として、駆動制御パラメータに直接依存する電界分布と導電率分布に依存して被検体の損失電力を表す方程式が用いられる。このような基礎的物理的関係から得られる方程式も以下のような数式として表すことが可能である。

40

【0025】

【数3】

$$PL \approx \sum_{v=1}^V \sigma_v \sum_{n=1}^N \left| \sum_{ch}^R \vec{E}(v, t_n, ch) \right|^2 \quad (3),$$

この場合前記PLは損失電力を表し、 $\sigma_v$ は導電率分布を表し、Vは対応する連続指標を伴ってボクセルないし容積空間単位を表し、Nは連続変数nを伴ったタイムステップの数を表し、tは時間を表し、Eは電界分布を表し、Rは連続変数chを伴って送信チャンネルを

50

著す。この方程式はそれによって局所的SARが考慮できる利点を有しており、その場合には統合的方程式の代わりに個別の $v$ -加数が着目される。すなわち有利には付加的方程式(3)を局所的分解能で観測できる。それ故に方程式系における付加的な非線形方程式によって最大限の局所的SARホットスポットの所定の数パルス計算に含ませることが可能となる。これは局所的SAR値を制限値以下に維持するかないしは広域SAR値に対し所定の比率以下に維持するためのものである。つまり局所分解能の付加的方程式が局所的SAR値を表すようにしてよもい。この局所分解能の付加的方程式が所定の領域、すなわち最大の局所SAR値が表れる領域(ホットスポット)に絞られるならば、その場合の計算機コストはさらに低減することが可能となる。この場合は5~10のそのような領域で既に十分である。これにより本発明による方法はそのようなSARホットスポットの回避を所期のようにできる初の方法となり得る。

10

## 【0026】

それに対して本発明によれば、組織分布が例えば被検体の先行する撮像結果、特に磁気共鳴及び/又はコンピュータトモグラフィ撮像結果から求められるようにしてもよい。そこからは種々の組織形態の周波数依存性の導電率が既知なため導電率分布を求めることができる。電界分布に対する測定手法は未知である。しかしながらこのことは有利には、被検体における所定の導電率分布のもとで三次元の電磁的シミュレーションによって求められる。その際有利には被検体に関する入力データに基づいて組織分布を求める人体モデルが組織分布算出のために用いられる。つまり例えば電子カルテに記録されている患者個人のデータ、例えば性別、体重、身長、年齢などが、人体モデルにおける人体組織分布の形成に利用可能である。このことは三次元の電磁的シミュレーションに対する基礎を形成し、その結果は個々の送信チャンネル毎の駆動制御のもとでの電界分布となり得る。このようにして本発明による方法では前記式(3)も付加的方程式として利用することが可能である。

20

## 【0027】

被検体(患者)の先行する撮像結果からの組織分布に基づく導電率分布の間接的検出の他にも、電気的なインピーダンストモグラフィを用いて導電率分布を直接求めることも可能である。さらに別の代替例によれば、導電率分布がテーブルにファイルされている導電率アトラスに基づいて確定される。

一般に、境界条件を表す付加的方程式を用いて非線形方程式系の解を求めることは本発明による方法を有利に展開するためのさらなる一連の手段となる。そのため既に前述したように、駆動制御パラメータに対する最小値及び/又は最大値を設定することも可能である。これらは高周波ハードウェア、特に高周波増幅器の制限値に相応する。

30

## 【0028】

さらに本発明による方法の別の有利な実施形態によれば、解の調整のために、前記方程式系の方程式の重み付けのために重み付け係数が用いられる。それによって方程式系の方程式には満たされるべき値が割当てられる。このことは特に次のような場合に有利である。すなわち求められた解、つまり求められた駆動制御パラメータが、部分的に相容れない目的同士の場合に(例えば磁化の均一性と患者への負担軽減)それらの間でどちらか一方の目的に向けて調整するような場合である。例えばプロッホ方程式から得られる方程式に1つの重み付け係数が与えられ、1つ若しくはそれ以上の付加的方程式には別の重み付け係数が与えられてもよい。

40

## 【0029】

SAR限界値の維持を検査するために、駆動制御パラメータを求めた後でSAR負荷が求められる。そのような付加的検査は被検体ないし患者にとっての安全面の上で有利となる。SAR負担が例えばいまだに高い場合には、前記重み付け係数を変更するかまたは例えば付加的方程式を別の限界値の利用のもとで形成してもよい。基本的には本発明による方法を用いることによって、反復的な最適化プロセスを実施することも可能である。この場合は本発明による方法を複数回実行することにより、できるだけ僅かな患者負担と、最大の均一性の間で最終的に理想的な妥協点を見つけることができる。

50

## 【0030】

その場合にはここでも再度説明するが、選択されたスライス若しくは選択された容積空間の所定の領域のみを選択的に良好に励起することが可能となる。

## 【0031】

特に冒頭にも述べたように、必ずしも1つのスライスだけでなく、任意の容積空間が観測可能である。本発明による方法の特に有利な実施形態によれば、スライス選択傾斜磁場は全く利用されなくてもよい。このことはスライス選択に用いられない傾斜磁場コイルのみが駆動シーケンスによって駆動制御されることを意味している。例えばx軸方向とy軸方向の傾斜磁場コイルだけが駆動制御され、そのためz軸方向に延在するボリュウム励起が行われる。

10

## 【0032】

算出された駆動制御パラメータは最終的に、傾斜磁場コイルの駆動シーケンスと同期して高周波送信コイルの種々の送信チャネルの駆動と対応の磁化を得るために用いられる。

## 【0033】

本発明による方法が用いられる磁気共鳴装置は、例えば入力ユニット並びに制御ユニットを含み得る。操作者は入力ユニットを介して所望の磁化を入力でき、さらに本発明の方法を実施するように構成された制御ユニットは、傾斜磁場コイルに対する所定の駆動シーケンスのもとで高周波送信コイルに対する駆動制御パラメータを本発明による方法に従って自動的に求め、これを対応に駆動制御する。

20

## 【0034】

その場合に本発明による方法はより少ないチャネル数を有する高周波送信コイルに対しても適用できる。特にここでは高周波増幅器から供給された信号が2つ以上の変調ユニットに分割され、それらの変調パラメータが本発明の方法に対する駆動制御パラメータに対応するような構成も提案されている。このようなケースにおいても本発明の方法は有利に用いられる。

## 【0035】

本発明のその他の利点、特徴ならびに詳細な点は、以下で説明する実施例ならびに図面から明らかとなる。

## 【実施例】

## 【0036】

図1には、本発明による方法の実施が可能な磁気共鳴装置1が概略図で示されている。この磁気共鳴装置は、基本磁場マグネット2を含んでおり、この基本磁場マグネット2は3テスラ以上の静磁場を形成する。さらに3つの傾斜磁場コイル3, 4, 5が設けられており、ここでは傾斜磁場コイル3がz軸方向に対応付けられ、励起パルスシーケンスのもとでがスライス選択勾配磁場を形成している。傾斜磁場コイル4及び5はx軸方向とy軸方向の磁場勾配を形成している。さらに高周波送信コイルのレイ6が設けられており、この実施例のケースではバードケージ型コイルであり、これらは受信コイルとしても利用できる。ここでは8つの送信チャネルが存在しており、それらの送信チャネルを介して、駆動制御パラメータによって定められたパルスシーケンスが、検査すべき被検体の核スピンを平衡磁化から均一に偏向させるために照射されている。そのために必要な高周波磁場は、複数の高周波増幅器7によって形成される。ここでは増幅器7は前記レイ6の送信アンテナを給電している。代替的に増幅器7は複数の送信アンテナを給電してもよい。その場合には振幅と位相に関して独立した通電を可能にするために各送信アンテナには変調器と移相器が対応付けられる。本発明による方法はもちろん1つの送信コイルのみが存在する場合にも適用可能である。

40

## 【0037】

磁気共鳴装置1に対してはさらに中央制御装置8が設けられており、この中央制御装置8を介して磁気共鳴装置1の種々の構成要素、特にコイル3~6が駆動制御される。前記制御装置8は本発明による方法の実施のために構成されており、傾斜磁場コイルと所望の目標磁化に対する駆動シーケンスの設定のもとで、パルスシーケンスに対する駆動制御パ

50

ラメータが算出され、それに基づいて傾斜磁場コイル3, 4, 5と、特に高周波送信コイルアレイ6の送信チャンネルが相応に駆動制御される。前記制御装置8にはさらに入力ユニット9が対応付けられており、この入力ユニット9を介して操作者は磁気共鳴装置1に対するパラメータ、特に本発明による方法に対する入力データを入力できる。

【0038】

図2には本発明による方法を説明するためのフローチャートが示されている。

【0039】

ここではまずステップ10において、傾斜磁場コイルに対して設定すべき駆動シーケンスが求められるか否かは選出される。その際考慮すべき量として、対応付けられるハードウェアと傾斜磁場コイル3, 4, 5自体の制限が入力される(ボックス11)。スライス選択磁場勾配が傾斜磁場コイル3によって形成されるのに対して(これはパルスシーケンス期間中連続的にアクティブであってもよい)、傾斜磁場コイル4及び5もパルスシーケンス期間の間個々のタイムステップでスイッチングされ、それによって、選択すべきスライスの所定の領域が選択される。駆動シーケンスとしては例えば図3に例示的に示されているようなk空間軌跡(k-space trajectory)が特に好適であることがわかっている。このk空間軌跡は、螺旋状に走行し、局所周波数の所定の間隔を獲得する。この場合図3に示されている個々の各点は、タイムステップ毎の傾斜磁場コイルパラメータに相応している。

【0040】

駆動シーケンスが傾斜磁場コイル3, 4, 5に対して初めてわかると、ステップ12において非線形の方程式系が非線形の最小二乗法を用いて解かれる。この方程式系は、時間と空間に関して離散化されたプロッホ方程式(1)から導出される非線形の方程式と、(この場合駆動制御パラメータは相応のB1値を介して方程式に導入される)付加的方程式からなる。前記付加的方程式(これらのうちの1つのみが存在していてもよい)は境界条件を表し(本願ではSAR負担)、当該実施例自体では非線形である。この場合本願では2つの方程式、すなわちSAR負担を表す2つの方程式、詳細には方程式(2)と(3)が考えられ、これらに関しては以下でさらに詳細に説明する。前記1つ若しくはそれ以上の付加的方程式は、最大損失電力(すなわち最大SAR値)の適用下で形成され、境界条件としてSAR限界値が付加的方程式によってゆるやかに方程式系に導入され、それによってその解が求められる場合に直接考慮されるようになる。ここではもはやさらなる複雑な計算過程の実施が不要となる。

駆動シーケンスに対してはさらに入力量として所望の目標磁化の絶対値が全てのボクセルに対してないしは全ての容積空間単位に対して必要となる(ボックス13)。所望の目標磁化は、プロッホ方程式(1)に関する積分である。目標磁化としては、選択された全スライス内で均一な目標磁化が設定されてもよいし、任意の磁化分布、例えば所定の領域内のみの磁化が設定されてもよい。

【0041】

さらに入力量として、ステップ12において駆動制御パラメータに対する最小値と最大値が設定されてもよい(ボックス14)。最小二乗法が適用される場合には、駆動制御パラメータのサイズを制限することも可能である。これらの最小値及び/又は最大値はハードウェア、特に高周波増幅器7の特性によって定められる。

【0042】

付加的方程式(複数)の選択に対しては実質的に2つの手段が存在し、詳細には前記方程式(2)及び(3)である。この2つの手段はそれぞれ利点と欠点を有しており、従って必要に応じて選択される。

【0043】

方程式(2)(散乱パラメータマトリックスに関するアクセス)を用いれば、駆動制御パラメータが散乱パラメータを介して直接方程式に含まれる。さらに有利には散乱パラメータマトリックスが測定されてもよい。また散乱パラメータマトリックスを相応の三次元の電磁的シミュレーション、例えば人体モデルを用いて求めることも可能である。いずれ

10

20

30

40

50

にせよ前記方程式(2)は総損失電力に対するアクセスのみ、あるいはタイムステップ毎の総損失電力に対するアクセスのみを提供する。それ故に局所的ホットスポットは何も所期のように排除できない。

【0044】

前記方程式(3)を用いた場合には状況は異なる。前記方程式3は、各ボクセル毎ないしは各部分容積空間毎の個別の平衡化に分類される。そのためSAR制限も局所的に設定できる。しかしながらこれまでは駆動制御パラメータを含む電界分布に対する測定技術的アクセスは何も知られておらず、そのためこれはシミュレーションを介して求める必要がある。それに対しては被検体(患者)の組織分布がわかっているなければならない。しかしながらこのことは適応化された人体モデル(これは例えば患者のパラメータ、例えば身長、体重、年齢、性別などに基づいて適応化される)を用いて実現することが可能である。従って三次元の電磁的シミュレーションを介して電界分布を求めることが可能となる。導電率分布(これも前記方程式(3)に導入される)は、本発明による方法のもとでは先行する撮像結果、特に磁気共鳴若しくはコンピュータトモグラフィ撮像結果からの組織分布から間接的に求められるか、あるいはインピーダンストモグラフィまたはテーブルに記憶された導電率アトラスから直接求められる。

10

【0045】

ステップ12の方程式系が最初に解かれ、駆動制御パラメータに対する近似的な値が得られると、付加的なステップ15においてSAR負荷値、特に局所的なSAR不可知が算出され得る。そのようにして、全ての限界値が維持されているか否か、つまり最適なパルスシーケンスが存在しているか否かが再度検査される。このことが当てはまらない場合には、矢印16で示されているように、例えば方程式系の方程式かまたはそれらの重み付け係数を相応に変更して新たな計算が行われるようにしてもよい。またここではステップ12と14が最適化基準を満たすまで複数回繰り返される最適化プロセスも考えられる。

20

【0046】

非線形方程式系の方程式は、図2による方法ではさらに相応の重み付けを表す重み付け係数が用いられる。このような重み付け係数の設定調整によれば、例えばプロット方程式から得られた方程式に対する重み付け係数と付加的方程式に対するさらなる重み付け係数が実線的に設定できる。そしてこれらの設定をもとに、矛盾する関係若しくは対立する関係(例えば均一性に対する要求とSAR負担軽減に対する要求が対立している場合など)が早期に解決される。

30

【0047】

ステップ17では最終的に制御装置8が傾斜磁場コイル3, 4, 5と、高周波送信コイル6の複数のチャンネルを駆動シーケンスと算出された駆動制御パラメータに応じて駆動制御し、それによって最適なパルスシーケンスが得られる。このパルスシーケンスを用いれば、均一性の向上もSAR負担の改善も達成できる。

【0048】

このことは図4および図5の例に基づいて詳細に説明する。この例では8つの送信チャンネルを有するボディコイルが観測される。ここでは小角度励起(偏向角 $0.57^\circ$ )のもとに、平衡磁化の1%の均一な磁化が得られる。この場合図4には本発明の方法による磁化分布の結果が示されており、それぞれ斜線領域は偏差を表している。ここでは斜線の度合が偏差の度合を表している。図5には、同じ患者のもとでモード1の励起の際に達成される磁化分布が示されている。ここでは明らかに偏差の度合いが強いことが識別される。本発明による方法によれば、モード1での励起に比べて均一性の向上が5倍になる(ここでは腕を除く胸部断面において磁化の平均値に対する標準偏差が観測された)その際の総損失電力はモード1の励起の1.5倍にしかならない。これは同じパルス期間のもとで同じ平均磁化に至る際の結果である。

40

【0049】

本発明による方法は、大きな角度の励起、例えば $48.6^\circ$ の偏向角度に対しても適用可能である。同じく8つの送信チャンネルを有するヘッドコイルに対する相応の試みにおい

50

ても、本発明による方法を用いた均一性についてはほぼ3倍の向上が認められ、その場合本発明による方法での総損失電力もモード1の励起の75%にしかない。

【0050】

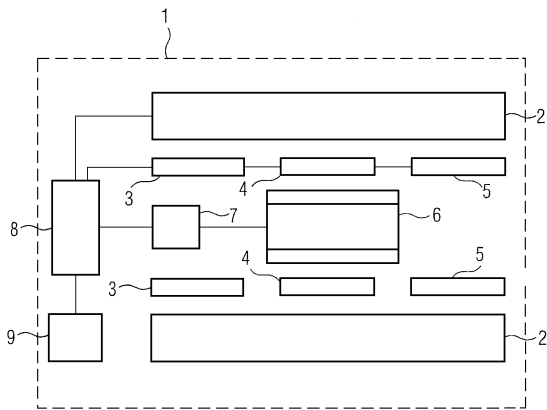
それにより本発明による方法を用いれば、SAR限界値の考慮のもとで著しい向上が得られるようになる。

【符号の説明】

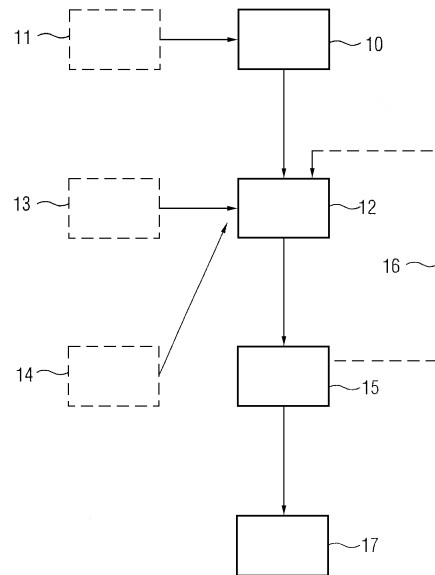
【0051】

- 1 磁気共鳴装置
- 2 基本磁場マグネット
- 3 傾斜磁場コイル
- 4 傾斜磁場コイル
- 5 傾斜磁場コイル
- 6 高周波送信コイルアレイ
- 7 高周波増幅器
- 8 中央制御装置
- 9 入力ユニット

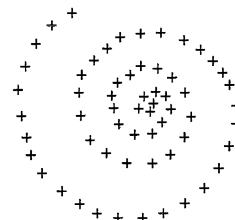
【図1】



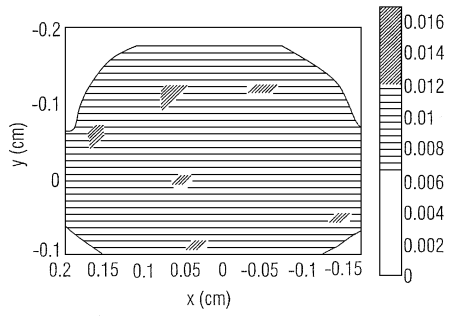
【図2】



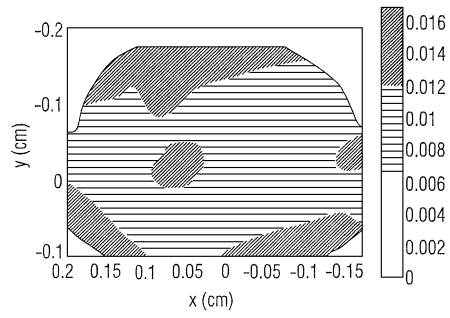
【図3】



【 4 】



【 5 】



## フロントページの続き

- (74)代理人 100112793  
弁理士 高橋 佳大
- (74)代理人 100128679  
弁理士 星 公弘
- (74)代理人 100135633  
弁理士 二宮 浩康
- (74)代理人 100114890  
弁理士 アインゼル・フェリックス=ラインハルト
- (72)発明者 ディルク ディール  
ドイツ連邦共和国 エアランゲン ベルリーナー プラッツ 3
- (72)発明者 レネ グンブレヒト  
ドイツ連邦共和国 ヘアツォーゲンアウラッハ イン デア レーテ 1
- (72)発明者 ユルゲン ニストラー  
ドイツ連邦共和国 エアランゲン マイゼンヴェーク 40
- (72)発明者 ヴォルフガング レンツ  
ドイツ連邦共和国 エアランゲン コンラート-ツェ-シュトラーセ 23
- (72)発明者 マルクス フェスター  
ドイツ連邦共和国 ニュルンベルク ハンス-ファラダ-シュトラーセ 59
- (72)発明者 ゼバスティアン ヴォルフ  
ドイツ連邦共和国 アーデルスドルフ ウルメンヴェーク 6

審査官 島田 保

- (56)参考文献 特開2005-152655(JP,A)  
特開昭64-086951(JP,A)  
国際公開第2007/017779(WO,A2)  
特表平09-507403(JP,A)  
特開2000-139866(JP,A)  
特開平04-357934(JP,A)  
特開平02-119843(JP,A)  
特開2005-152657(JP,A)  
特開平01-218435(JP,A)  
C.Cai, Z.Chen, et al., "POM: A Simulation Program for NMR under Inter-and Intramolecular Interactions", Proc. Intl. Soc. Mag. Reson. Med., 2006年 5月 6日, P3046

(58)調査した分野(Int.Cl., DB名)

A61B 5/055

Wiley Online Library