

(19) 日本国特許庁 (JP)

(12) 特 許 公 報 (B2)

(11) 特許番号

特許第6291328号
(P6291328)

(45) 発行日 平成30年3月14日 (2018. 3. 14)

(24) 登録日 平成30年2月16日 (2018. 2. 16)

(51) Int. Cl.

F I

A 6 1 B 5/055 (2006. 01)

A 6 1 B 5/05 3 4 2

G O 1 N 24/08 (2006. 01)

G O 1 N 24/08 5 1 O Y

請求項の数 13 (全 21 頁)

(21) 出願番号 特願2014-80184 (P2014-80184)
 (22) 出願日 平成26年4月9日 (2014. 4. 9)
 (65) 公開番号 特開2015-198818 (P2015-198818A)
 (43) 公開日 平成27年11月12日 (2015. 11. 12)
 審査請求日 平成28年9月26日 (2016. 9. 26)

(73) 特許権者 000005108
 株式会社日立製作所
 東京都千代田区丸の内一丁目6番6号
 (74) 代理人 110000888
 特許業務法人 山王坂特許事務所
 (72) 発明者 谷口 陽
 東京都千代田区丸の内一丁目6番6号 株
 式会社日立製作所内
 (72) 発明者 白猪 亨
 東京都千代田区丸の内一丁目6番6号 株
 式会社日立製作所内
 (72) 発明者 横沢 俊
 東京都千代田区丸の内一丁目6番6号 株
 式会社日立製作所内

最終頁に続く

(54) 【発明の名称】 磁気共鳴イメージング装置および磁気共鳴イメージング装置に搭載されるパルスシーケンスの算出方法

(57) 【特許請求の範囲】

【請求項 1】

静磁場を発生する静磁場磁石と、前記静磁場磁石が発生する静磁場内に傾斜磁場を発生する傾斜磁場コイルと、高周波磁場を発生するとともに核磁気共鳴信号を検出する高周波コイルと、所定のパルスシーケンスに従って、前記傾斜磁場コイルおよび高周波コイルを駆動する制御部と、を備える磁気共鳴イメージング装置であって、

前記パルスシーケンスに含まれる少なくとも一つの傾斜磁場が、時間軸方向にずれた2以上の基本波を合成した形状（合成波形）を持つパルスであり、前記基本波は、上に凸のなめらかに変化する波形を持つことを特徴とする磁気共鳴イメージング装置。

【請求項 2】

請求項 1 に記載の磁気共鳴イメージング装置であって、

前記制御部は、前記合成波形状を持つ傾斜磁場パルスのパラメータを変更する波形変換部を備えることを特徴とする磁気共鳴イメージング装置。

【請求項 3】

請求項 1 に記載の磁気共鳴イメージング装置であって、

前記合成波形の傾斜磁場パルスは、スライス選択パルスであることを特徴とする磁気共鳴イメージング装置。

【請求項 4】

請求項 3 に記載の磁気共鳴イメージング装置であって、

スライス選択パルスの形状に対応して、前記高周波コイルが発生する高周波磁場パルス

を変更する高周波磁場パルス生成部を備えることを特徴とする磁気共鳴イメージング装置。

【請求項 5】

請求項 1 に記載の磁気共鳴イメージング装置であって、

前記合成波形の傾斜磁場パルスは、エンコードパルスであることを特徴とする磁気共鳴イメージング装置。

【請求項 6】

請求項 1 に記載の磁気共鳴イメージング装置であって、

前記合成波形の傾斜磁場パルスは、読み出し傾斜磁場パルスであることを特徴とする磁気共鳴イメージング装置。

10

【請求項 7】

請求項 1 に記載の磁気共鳴イメージング装置であって、

前記合成波形の傾斜磁場パルスは、三角形又は台形の傾斜磁場パルスと、印加開始点と印加終了点とが同じであって、面積（時間積分値）がほぼ同じであり、且つ時間方向の中心付近における強度が前記三角形又は台形の傾斜磁場パルスの強度とほぼ同じかそれ以下であることを特徴とする磁気共鳴イメージング装置。

【請求項 8】

請求項 1 に記載の磁気共鳴イメージング装置であって、

前記基本波は、強度がオフセットされて極性が単一である一周期のサイン関数状の波形であることを特徴とする磁気共鳴イメージング装置。

20

【請求項 9】

請求項 1 に記載の磁気共鳴イメージング装置であって、

前記基本波は、ガウス関数状の波形であることを特徴とする磁気共鳴イメージング装置。

。

【請求項 10】

磁気共鳴イメージング装置に搭載されるパルスシーケンスの算出方法であって、

前記パルスシーケンスに含まれるスライス選択傾斜磁場パルスについて、縦軸を強度、横軸を時間とする所定のパルス形状をもとに、上に凸のなめらかに変化する波形を持つ第一の傾斜磁場パルスを算出するステップと、

前記第一の傾斜磁場パルスと同時に印加される高周波磁場パルスを算出するステップと

30

、

算出した前記高周波磁場パルスの比吸収率（SAR）が閾値以内か閾値を超えるかを判定するステップと、

前記比吸収率が閾値以内のときに前記の傾斜磁場パルスを前記パルスシーケンスのスライス傾斜磁場として設定し、

前記比吸収率が閾値を超えるとときに、前記スライス選択傾斜磁場について、縦軸を強度、横軸を時間とする所定のパルス形状をもとに、上に凸のなめらかに変化する波形を持つ基本波を複数用いて、当該複数の基本波を時間軸方向にずらして合成して、一つの合成波形を持つ第二の傾斜磁場パルスを算出し、前記パルスシーケンスのスライス傾斜磁場として設定するステップと、

40

を含む方法。

【請求項 11】

磁気共鳴イメージング装置に搭載されるパルスシーケンスの算出方法であって、

前記パルスシーケンスに含まれる少なくとも一つの傾斜磁場パルスについて、縦軸を強度、横軸を時間とする所定のパルス形状をもとに、上に凸のなめらかに変化する波形を持つ基本波を複数用いて、当該複数の基本波を時間軸方向にずらして合成し、その際、

前記合成波形を持つパルスの時間軸方向の開始時点および終了時点、対象とする傾斜磁場パルスの開始時点および終了時点と同じにするとともに、

前記合成波形を持つパルスの面積を、対象とする傾斜磁場パルスの面積とほぼ同じにして、一つの合成波形を持つパルスを算出するステップを含む方法。

50

【請求項 1 2】

請求項 1 1 に記載の磁気共鳴イメージング装置に搭載されるパルスシーケンスの算出方法であって、

前記対象とする傾斜磁場パルスの印加時間に応じて合成波形を算出するか否かを選択するステップを含む方法。

【請求項 1 3】

請求項 1 2 に記載の磁気共鳴イメージング装置に搭載されるパルスシーケンスの算出方法であって、

前記印加時間が 2 m s 程度以上であるときに合成波形を算出することを特徴とする方法。

10

【発明の詳細な説明】

【技術分野】

【0001】

本発明は、磁気共鳴イメージング装置に関し、特に、傾斜磁場によって発生する音を抑制する技術に関する。

【背景技術】

【0002】

磁気共鳴イメージング (MRI) 装置は、被検体を横切る任意の断面内の水素原子核に核磁気共鳴を起こさせ、発生する核磁気共鳴信号からその断面内における断層像を撮影する医用画像診断装置である。一般的には、撮影面を特定するスライス傾斜磁場を印加すると同時にその面内の磁化を励起させる励起パルスを与え、これにより励起された磁化が収束する段階で発生する核磁気共鳴信号 (エコー) を得る。磁化に位置情報を与えるため、励起からエコーを得るまでの間に、断層面内で互いに垂直な方向の位相エンコード傾斜磁場とリードアウト傾斜磁場を印加する。

20

【0003】

エコーを発生させるためのパルスと各傾斜磁場は、あらかじめ設定されたパルスシーケンスに基づいて印加されるようになっている。このパルスシーケンスは、目的に応じて種々のものが知られている。

30

【0004】

こうしたパルスシーケンスでは一般に、台形波形の傾斜磁場を高速にオン、オフするため、ボア内では 80 dB から 100 dB 以上の非常に大きな音が発生する。この音は、ボア内に置かれた被検者がヘッドホンや耳栓などを装着してもかなり不快に感じる大きさである。また、こうした音は高磁場化とともに大きくなるため、3 T (テスラ) 以上の高磁場機では対策が必要になる。

【0005】

静音化の技術として、傾斜磁場波形の形状を変化させる技術が提案されている (非特許文献 1、非特許文献 2 など)。一般に傾斜磁場によって発生する音は、装置固有の周波数応答関数 (FRF: frequency response function) と傾斜磁場波形の周波数分布との積で表され、FRF の値が小さい周波数では音は小さくなることが知られている (非特許文献 3)。非特許文献 1 は、FRF が 200 Hz 以下の成分が非常に小さくなることから、ローパスフィルタを用いて傾斜磁場波形のそれ以上の周波数成分を抑制すると音を小さくできることを開示している。具体的には、静音化のために、台形波の傾斜磁場パルスをローパスフィルタに通して立ち上がり立ち下りの強度変化をなめらかにすることを提案している。

40

【0006】

また非特許文献 2 は、リードアウトと位相エンコードの傾斜磁場パルスをサイン波形にすることを提案している。

【先行技術文献】

50

【非特許文献】

【0007】

【非特許文献1】Hedeen RA, Edelstein WA. Characterization and Prediction of Gradient Acoustic Noise in MR Imagers. Magn Reson Med 1997;37:7-10.

【非特許文献2】Hennel F, Girard F, Loenneker T. “Silent” MRI With Soft Gradient Pulses. Magn Reson Med 1999;42:6-10.

【非特許文献3】Hennel F. Fast Spin Echo and Fast Gradient Echo MRI With Low Acoustic Noise. Magn Reson Med 2001;13:960-966.

【発明の開示】

【発明が解決しようとする課題】

10

【0008】

MRIでは、傾斜磁場の時間積分値や一部の区間における強度によって空間分解能や視野などの撮影条件が決定されることから、静音化後もこの積分値や強度が変化しないようにしなければならない。従って、非特許文献1に記載された方法による静音化後の傾斜磁場波形は、印加時間が長くなってしまい、傾斜磁場パルス印加する間隔に時間的な余裕のない高速パルスシーケンスには適用できないという問題がある。

【0009】

これに対して非特許文献2に記載された技術ではリードアウトと位相エンコードをサイン波にして高速シーケンスでも静音化を実現している。しかし、高速法への適用を意図した非特許文献2の方法では、スライス傾斜磁場パルスにはサイン波を用いていない。あるいはスライス傾斜磁場を使う必要のない3D撮影に限定されている。これは、スライス傾斜磁場パルスをサイン波にすると、スライスプロファイルが変化してしまうこと、および、スライス傾斜磁場のあとのクラッシャーの印加量（強度の時間積分値）を十分に保つことができないためである。

20

【0010】

またリードアウト傾斜磁場パルスについては、サイン波形にすることによって強度の最大値が大きくなる。このため、台形波の場合と比較してサンプリングの帯域が大きくなりSN比が低下してしまうという問題がある。

【0011】

これらの問題に加えて、撮影条件の一つであるエコー時間TEが繰り返し時間TRに依存しており任意に設定できない、リードアウト方向のクラッシャー印加量がリードアウトパルスに依存するため任意に設定できない、といったパルスシーケンス設計の自由度に対する制約がある。

30

【0012】

本発明は、上記従来の問題点に鑑みてなされたもので、パルスシーケンス設計の自由度が確保された静音化技術を提供することを課題とする。

【課題を解決するための手段】

【0013】

上記課題を解決するため、本発明のMRI装置は、傾斜磁場パルスとして、複数の基本波を合成した合成波の形状の傾斜磁場パルスを用いる。

40

【0014】

すなわち本発明のMRI装置は、静磁場を発生する静磁場磁石と、前記静磁場磁石が発生する静磁場内に傾斜磁場を発生する傾斜磁場コイルと、高周波磁場を発生するとともに核磁気共鳴信号を検出する高周波コイルと、所定のパルスシーケンスに従って、前記傾斜磁場コイルおよび高周波コイルを駆動する制御部と、を備え、前記パルスシーケンスに含まれる少なくとも一つの傾斜磁場が、時間軸方向にずれた2以上の基本波を合成した形状（合成波形）を持つパルスであり、前記基本波は、上に凸のなめらかに変化する波形を持つことを特徴とする。

【0015】

また本発明のMRI装置は、静磁場を発生する静磁場磁石と、前記静磁場磁石が発生す

50

る静磁場内に傾斜磁場を発生する傾斜磁場コイルと、高周波磁場を発生するとともに核磁気共鳴信号を検出する高周波コイルと、所定のパルスシーケンスに従って、前記傾斜磁場コイルおよび高周波コイルを駆動する制御部と、前記パルスシーケンスに含まれる傾斜磁場パルスの波形を計算する計算機と、を備え、前記計算機は、縦軸を強度、横軸を時間とする所定のパルス形状をもとに、上に凸のなめらかに変化する波形を持つ基本波を複数用いて、当該複数の基本波を時間軸方向にずらして合成して、一つの合成波形を持つパルスを算出することを特徴とする。

【 0 0 1 6 】

さらに本発明は、磁気共鳴イメージング装置に搭載されるパルスシーケンスの算出方法、および、この方法をコンピュータに実行させるためのプログラム並びに当該プログラムを記録した媒体を提供する。このパルスシーケンス算出方法は、前記パルスシーケンスに含まれるスライス選択傾斜磁場パルスについて、縦軸を強度、横軸を時間とする所定のパルス形状をもとに、上に凸のなめらかに変化する波形を持つ第一の傾斜磁場パルスを算出するステップと、前記第一の傾斜磁場パルスと同時に印加される高周波磁場パルスを算出するステップと、算出した前記高周波磁場パルスの比吸収率（SAR）が閾値以内か閾値を超えるかを判定するステップと、前記比吸収率が閾値以内のときに前記の傾斜磁場パルスを前記パルスシーケンスのスライス傾斜磁場として設定し、前記比吸収率が閾値を超えるとときに、前記スライス選択傾斜磁場について、縦軸を強度、横軸を時間とする所定のパルス形状をもとに、上に凸のなめらかに変化する波形を持つ基本波を複数用いて、当該複数の基本波を時間軸方向にずらして合成して、一つの合成波形を持つ第二の傾斜磁場パルスを算出し、前記パルスシーケンスのスライス傾斜磁場として設定するステップと、を含む方法である。

【発明の効果】

【 0 0 1 7 】

本発明のMRI装置が採用する傾斜磁場パルスは、上に凸のなめらかに変化する波形を持つ基本波を合成したものであるため、サイン波等と同様の静音効果を持つ。また、合成波であるため、三角形や台形の傾斜磁場と、時間積分値および印加時間が等しく、且つ最大値が同程度とすることができる。これにより、印加時間や他のクラッシャー傾斜磁場パルスに影響を与えることなく、パルスシーケンスを設計することができる。

【図面の簡単な説明】

【 0 0 1 8 】

【図1】本発明が適用されるMRI装置の全体概要を示すブロック図。

【図2】計算機の機能を説明する図。

【図3】第一実施形態のパルスシーケンスの一例を示す図。

【図4】第一実施形態の波形変換処理のフローを示す図。

【図5】基本波を示す図で、（a）は、サイン波形を示す図、（b）は、ガウシアン関数で表される波形を示す図。

【図6】台形からサイン波形への変換を説明する図で、（a）は台形とそれから作られるサイン波形の関係を示す図、（b）～（d）は、それぞれ台形波とサイン波の周波数分布の違いを示す図。

【図7】複数のサイン波を合成した傾斜磁場波形の一例を示す図。

【図8】複数のサイン波を合成した傾斜磁場波形の他の例を示す図。

【図9】図7のサイン波のスライス選択傾斜磁場を用いた場合の、RFパルス波形の変更を説明する図で、（a）はRFパルス波形の変更を示す図、（b）は変更後プロファイルを示す図、（c）は変更前のプロファイルを示す図。

【図10】単一のサイン波形のスライス選択傾斜磁場を用いた場合の、RFパルス波形の変更を説明する図で、（a）はRFパルス波形の変更を示す図、（b）変更後プロファイルを示す図。

【図11】傾斜磁場パルスの波形変換処理フローの一例を示す図。

【図12】隣接する二つの傾斜磁場から、一つのサイン波形の傾斜磁場への変換を説明す

10

20

30

40

50

る図。

【図 1 3】隣接する三つの傾斜磁場から、一つの傾斜磁場波形への変換を説明する図で、(a) は、一つのサイン波形の傾斜磁場への変換、(b) は、合成波形の傾斜磁場への変換を示す。

【図 1 4】隣接する三つの傾斜磁場から合成波形への変換の他の例を示す図。

【図 1 5】第一実施形態による効果を確認するための測定を説明する図。

【図 1 6】図 3 のパルスシーケンスの変更例を示す図。

【図 1 7】第二実施形態パルスシーケンスの一例を示す図。

【図 1 8】第二実施形態パルスシーケンスの他の例を示す図。

【発明を実施するための形態】

10

【 0 0 1 9 】

本実施形態の M R I 装置は、静磁場を発生する静磁場磁石 (1 0 1) と、静磁場磁石が発生する静磁場内に傾斜磁場を発生する傾斜磁場コイル (1 0 2) と、高周波磁場を発生するとともに核磁気共鳴信号を検出する高周波コイル (以下、R F コイルという) (1 0 7) と、所定のパルスシーケンスに従って、傾斜磁場コイルおよび R F コイルを駆動する制御部 (1 0 4 、 1 0 9) と、を備える。所定のパルスシーケンスに含まれる少なくとも一つの傾斜磁場は、時間軸方向にずれた 2 以上の基本波を合成した形状 (合成波形) を持つパルスであり、基本波は、上に凸のなめらかに変化する波形を持つ。

【 0 0 2 0 】

基本波は、例えば、強度がオフセットされて極性が単一である一周期のサイン関数状の波形、或いは、ガウス関数状の波形である。また合成波形の傾斜磁場パルスは、三角形又は台形の傾斜磁場パルスと、印加開始点と印加終了点とが同じであって、面積 (時間積分値) が同じであり、且つ時間方向の中心における強度が前記三角形又は台形の傾斜磁場パルスの強度以下である。

20

【 0 0 2 1 】

制御部は、合成波形の傾斜磁場パルスの符号、強度 (最大強度) 、印加開始時間、印加終了時間、印加時間等のパラメータを変更する機能を持つ (波形変換部の機能) 。

【 0 0 2 2 】

合成波形の傾斜磁場パルスは、スライス選択傾斜磁場、スライスエンコード傾斜磁場、位相エンコード傾斜磁場 (以下、必要に応じて、スライスエンコード傾斜磁場および位相エンコード傾斜磁場をまとめてエンコード傾斜磁場という) 、および、リードアウト傾斜磁場のいずれか 1 種以上である。合成波形の傾斜磁場パルスがスライス選択傾斜磁場である場合には、スライス選択パルスの形状に対応して、高周波コイルが発生する高周波磁場パルスを変更する (高周波パルス生成部の機能) 。

30

【 0 0 2 3 】

以下、図面を参照して、本実施形態の M R I 装置とその動作を説明する。

まず、本実施形態の M R I 装置について説明する。図 1 は、本実施形態の M R I 装置 1 0 0 の概略構成を示すブロック図である。M R I 装置 1 0 0 は、静磁場を発生するマグネット 1 0 1 と、傾斜磁場を発生する傾斜磁場コイル 1 0 2 と、シーケンサ 1 0 4 と、傾斜磁場電源 1 0 5 と、R F 発生部 1 0 6 と、高周波磁場を照射するとともに N M R 信号を検出する送受信コイル 1 0 7 と、受信器 1 0 8 と、計算機 1 0 9 と、ディスプレイ 1 1 0 と、記憶媒体 1 1 1 とを備える。送受信コイル 1 0 7 は、図では単一のものを示しているが送信コイルと受信コイルとを別個に備えていてもよい。

40

【 0 0 2 4 】

被検体 (例えば、生体) 1 0 3 はマグネット 1 0 1 の発生する静磁場空間内の寝台 (テーブル) に載置される。また、シーケンサ 1 0 4 は、傾斜磁場電源 1 0 5 と R F 発生部 1 0 6 に命令を送り、それぞれ傾斜磁場および高周波磁場を発生させる。高周波磁場は、送受信コイル 1 0 7 を通じて被検体 1 0 3 に印加される。被検体 1 0 3 から発生した N M R 信号は送受信コイル 1 0 7 によって受波され、受信器 1 0 8 で検波が行われる。検波の基準とする核磁気共鳴周波数 (検波基準周波数 f_0) は、シーケンサ 1 0 4 によりセットさ

50

れる。検波された信号は、計算機 109 に送られ、ここで画像再構成などの信号処理が行われる。その結果は、ディスプレイ 110 に表示される。必要に応じて、記憶媒体 111 に検波された信号や測定条件を記憶させることもできる。

【0025】

シーケンサ 104 は、予めプログラムされたタイミング、強度で各装置が動作するように制御を行う制御部として機能する。プログラムのうち、特に、高周波磁場、傾斜磁場、信号受信のタイミングや強度を記述したものはパルスシーケンス(撮影シーケンス)と呼ばれる。本実施形態のMRI装置 100 では、任意のパルスシーケンスが使用可能である。撮像に応じて所定のパルスシーケンスが選択され、実行されることにより、撮像が行われる。

10

【0026】

計算機 109 は、所定のパルスシーケンスに従ってNMR信号(エコー)を計測することをシーケンサ 104 に指示するもので、図2に示すように、計測されたエコーをk空間に配置するエコー計測部 1091 と、k空間に配置されたエコーから画像を再構成する画像再構成部 1092 と、傾斜磁場パルスの波形を変換する波形変換部(パルスシーケンス算出部) 1093 と、を備える。

【0027】

エコー計測部 1091 および画像再構成部 1092 の機能は、特に言及しない限り、従来のMRI装置と同様であり、説明を省略する。波形変換部 1093 は、本実施形態の特徴をなす機能であり、シーケンサ 104 にデフォルトとして設定されるパルスシーケンスの傾斜磁場パルスを、強度変化がなめらか一極性の基本波を用いた合成波形の傾斜磁場パルスに変換する。もともになる傾斜磁場パルスの形状は、通常、三角形或いは台形(矩形)であり、その符号(極性)、強度(最大強度)、印加開始時間、印加終了時間、印加時間等のパラメータが記憶媒体 111 (あるいはシーケンサ 104) から読み出され、使用される。

20

【0028】

計算機 109 の各部の機能は、記憶媒体 111 に格納されたプログラムを、計算機 109 のCPUがメモリにロードして実行することにより実現される。波形変換部 1093 のプログラムは、計算機 109 以外の計算機で実行され、得られた変換波形を含むパルスシーケンスを記憶媒体 111 に格納してもよい。

30

【0029】

以下、波形変換部 1093 の処理を中心に、実施形態を説明する。

【0030】

< 第一実施形態 >

本実施形態は、本発明を2D-SE(Spin Echo)シーケンスに適用した実施形態であり、このパルスシーケンスに含まれる複数の傾斜磁場に、合成波形の傾斜磁場パルスを用いる。

【0031】

図3に、2D-SEシーケンスを示す。図中、点線を挟んで左側が、基本となる2D-SEシーケンス200、右側が傾斜磁場パルスを変換後の2D-SEシーケンス300を示している。また本図において、RF、Gs、Gp、Gfはそれぞれ、高周波磁場、スライス傾斜磁場、位相エンコード傾斜磁場、リードアウト傾斜磁場を表す。A/Dがエコー信号のサンプリング時間を示す。横軸は時間である(以下、パルスシーケンス図において同じ)。基本2D-SEシーケンスの各傾斜磁場パルスは台形波か三角波である。

40

【0032】

この基本パルスシーケンス200では、まず、スライス選択傾斜磁場パルスAs1の印加とともに高周波磁場(RF)パルスAr1を照射し、対象物体内のあるスライスの磁化を励起する。次いでスライスリフェーズ傾斜磁場パルスBs1と磁化の位相に位相エンコード方向の位置情報を付加するための位相エンコード傾斜磁場パルスAp1、ディフェーズ用リードアウト傾斜磁場Af1を印加する。そして、不要な信号を抑圧するクラッシャ

50

ーパルス Cs_1 、 Bp_1 、 Bf_1 を各軸に印加した後、スライス選択傾斜磁場パルス Ds_1 とともにリフォーカスパルス Br_1 を照射し、再びクラッシャーパルス Es_1 、 Cp_1 、 Cf_1 を印加する。その後、リードアウト方向の位置情報を付加するためのリードアウト傾斜磁場パルス Df_1 を印加しながら磁気共鳴信号（エコー）をサンプリング時間で計測し、最後に三軸にクラッシャーパルス Fs_1 、 Dp_1 、 Ef_1 を印加する。高周波磁場パルス Ar_1 の照射からエコーピークまでの時間はエコー時間 TE と呼ばれる。

【0033】

以上の手順を位相エンコード傾斜磁場パルス Ap_1 の強度（位相エンコード量）を変化させながら繰り返し時間 TR で繰り返し、選択したスライスの画像再構成に必要なエコーを計測する。さらにスライス位置を変化させて同様の計測を行うことにより、複数スライスの画像データを得ることができる。スライス位置は、高周波磁場パルスの周波数によって変化させる。

【0034】

この基本パルスシーケンス 200 に対し、右側のパルスシーケンス 300 は、各パルスの印加タイミングは同じであるが、次の変更が加えられている。まずスライス選択傾斜磁場パルス As_1 、 Ds_1 が、それぞれ、合成波の傾斜磁場パルス As_3 、 Ds_2 に変換されている。またリードアウト傾斜磁場 Df_1 とそれに隣接する 2 つのクラッシャーパルス Cf_1 とともに、一つの合成波の傾斜磁場パルス Cf_3 に変換されている。その他の傾斜磁場パルスは、単独に或いは隣接する傾斜磁場パルスと一体として、一極性の増加および減少が滑らかな波形に変換されている。また図では違いを明確に示していないが、スライス選択傾斜磁場パルス As_1 、 Ds_1 の変更に伴い、RF パルス Ar_1 、 Br_1 の波形が Ar_2 と Br_2 に変化している。

【0035】

これら波形の変換処理の手順の概略を、図 4 に示す。

【0036】

まず処理の対象となるパルスシーケンスを読み出し、各傾斜磁場パルスのパラメータ（符号、印加量、印加時間、印加開始時間、印加終了時間）を読み出す（ステップ S_1 ）。次いで、例えば、傾斜磁場パルスの印加順序に従い、合成波形への変換を行う。図示する例では、まずスライス傾斜磁場の波形変換を行い（ S_2 、 S_3 ）、その後、リワインド傾斜磁場/エンコード傾斜磁場の波形変換を行い（ S_5 、 S_6 ）、読み出し傾斜磁場の波形変換を行っているが（ S_7 、 S_8 ）、順序は特に限定されない。

【0037】

スライス傾斜磁場について波形変換処理を行った場合には、それと同時に照射される RF パルスの波形も変更する（ S_4 ）。

【0038】

またスライス傾斜磁場以外の傾斜磁場パルスについては、隣接して同軸の傾斜磁場パルスがあるか否かを判断し、同軸の傾斜磁場がある場合には、互いに隣接する傾斜磁場パルスを合わせたものについて一つの合成波形を作成する（ S_6 、 S_8 ）。なお隣接する傾斜磁場パルスとは、ほぼ連続して印加される傾斜磁場パルスであって、間に RF パルスの印加がない場合をいう。

【0039】

対象とするパルスシーケンスに含まれる全ての傾斜磁場について、上述し処理を行い（ S_9 ）、波形変換処理が完了する。以下、個々の処理の詳細を説明する。

【0040】

<<スライス選択傾斜磁場パルスの変換>>

波形変換部は、上に凸のなめらかに変化する波形を持つ基本波を時間軸方向にずらして合成し、スライス選択傾斜磁場パルスを生成する。この際、生成されるスライス選択傾斜磁場パルスは、基本となるスライス選択傾斜磁場パルスと、符号、印加量（時間積分値）、印加開始時間、および印加終了時間がほぼ同一であって、RF パルスの強度が最大値となる時刻（ピーク位置の時刻）における強度が同一かそれ以下となるようにする。基本とな

10

20

30

40

50

るスライス選択傾斜磁場パルスのパラメータ（符号、印加量（時間積分値）、印加開始時間、および印加終了時間）は、シーケンス 104 または記憶媒体 111 に予め設定されたパルスシーケンスから読み出す。

【0041】

合成に用いる基本波の例を図 5 に示す。図 5 (a) は、強度がオフセットされて極性が単一である一周期のサイン関数状の波形であり、次式 (1-1) で表される。この基本波の面積 (S_0) は式 (1-2) で表される。図のグラフの横軸を時間、縦軸を傾斜磁場強度(相対値)としたとき、面積 S_0 は、この波形の傾斜磁場パルスの印加量に相当する。傾斜磁場強度の最大値を 1 としたとき、 $S_0 = 0.5$ である。

【0042】

【数 1】

$$f(t) = \begin{cases} 0.5 \sin(2\pi t - \pi/2) + 0.5 & 0 \leq t \leq 1 \\ 0 & \text{else} \end{cases} \quad (1-1)$$

$$S_0 = \int_0^1 f(t) dt = 0.5 \quad (1-2)$$

【0043】

図 5 (b) は、ガウス関数状の波形であり、次式 (2-1) で表される。

【0044】

【数 2】

$$f_1(t, m, s) = \frac{e^{\frac{-m+t}{2s^2}}}{\sqrt{2\pi}s} \quad (2-1)$$

$$S_{01} = \int_0^1 f_1(t) dt = 1 \quad (2-2)$$

【0045】

式 (2-1) はガウス関数の一種である正規分布関数であり、式中、 m 、 s は、それぞれ、平均と標準偏差である。図 5 (b) は、式 (2-1) で $m = 0.5$ 、 $s = 0.15$ とした場合の波形であり、最大値は 2.66 である。この基本波の面積 (S_{01}) は式 (2-2) で表され、 $S_{01} = 1$ である。

なお以下の説明では、基本波がサイン波の場合を例に説明する。

【0046】

ここで、単一の基本波のみを用いる場合の可否を判断する。図 6 (a) は、台形の傾斜磁場パルス A_{s1} をもとに、サイン波の傾斜磁場パルス A_{s2} を作成した場合を示している。この傾斜磁場パルス（サイン波形パルス） A_{s2} は、式 (3-1) で記述され、傾斜磁場パルス A_{s1} と印加開始時刻と印加終了時刻がほぼ等しく、且つ面積を等しくなるように作成したものである。傾斜磁場パルス A_{s2} の最大強度（ピーク強度） g_2 は、式 (3-2) で表される。式 (3-2) 中、 S_1 は台形波形の面積である。

【0047】

【数 3】

$$f_A(t) = g_2 f((t-t_0)/(t_2-t_1)) \quad (3-1)$$

$$g_2 = S_1 / ((t_2-t_1)S_0) \quad (3-2)$$

【0048】

例えば、スライス選択傾斜磁場パルス A_{s1} は、強度が 4.5 mT/m、印加開始時刻と印加終了時刻がそれぞれ 0.1 ms と 3.5 ms、印加時間は 3.4 ms である。また、このスライス選択傾斜磁場パルス A_{s1} と同時に照射する RF パルス A_{r1} の印加開始時刻と印加終了時刻はそれぞれ 0.2 ms と 3.4 ms となっており、傾斜磁場パルス A_{s1} の印加時間とほぼ等しい。この場合、サイン波形パルスのピーク強度 g_2 は 8.7 mT/m である。

10

20

30

40

50

【 0 0 4 9 】

このように、傾斜磁場パルス上台形波から同じ印加時間、同じ時間積分値のサイン波形に変換することにより、傾斜磁場パルスの周波数分布が全体に低くなる。図 6 (b) に、両波形の周波数スペクトルを示す。台形パルス A s 1 の周波数スペクトルは 3 0 0 H z 以下が大きく、それ以上では 2 0 0 0 H z まで広く分布している。これに対してサイン波形パルス A s 2 の周波数スペクトルは 5 0 0 H z 以下の成分だけになっている。このように、台形波をサイン波にすることにより、高い周波数成分がなくなり、低い周波数成分だけになる。これにより、傾斜磁場によって発生する音を小さくすることができる。その程度は装置固有の F R F の形状に依存する。

【 0 0 5 0 】

なお、R F パルスの印加時間は 0 . 2 m s から 3 . 4 m s までであるため、台形波とサイン波の強度は、この印加時間内のそれぞれの面積が等しくなるように決定した方がより正確であり、波形変更によるスライスプロファイルの変化をより小さくすることができる。この場合、時刻 0 . 2 m s から 3 . 4 m s までの台形波の面積は $4 . 5 \times (3 . 4 - 0 . 2) = 1 4 . 4 \text{ m T / m} \cdot \text{s}$ であり、この印加時間内のサイン波の面積を等しくするにはサイン波の強度 g_2 を 8 . 5 とすればよい。この場合の g_2 は図 6 (a) の $g_2 = 8 . 7$ に対して 9 8 % とほぼ同じ値であるが、より正確な波形変更となる。

【 0 0 5 1 】

図 6 (b) は、図 6 (a) に示すように、台形波の印加時間が 3 m s 程度の長さがある場合であり、この場合には、波形をサイン波に変換することによって周波数成分が 5 0 0 H z 程度以下に抑えられるため音圧レベル低下の効果があることがわかる。

【 0 0 5 2 】

しかし、印加時間がより短い場合には、波形をサイン波にしても周波数成分が数 k H z まで分布し、音圧レベル低下の効果は小さくなる。その程度は F R F の形状に依存する。例えば、図 6 (c) に示すように、台形波の印加時間が 2 m s の場合 (5 0 1) には、サイン波に変換してもその周波数成分は 5 0 2 のように 1 0 0 0 H z まで分布しており、印加時間が 3 m s の場合ほどの効果は得られなくなる。また、図 6 (d) に示すように印加時間がこれ以上短く、例えば 1 m s になると、サイン波 (5 0 4) の方が台形波 (5 0 3) よりも 1 k H z 以上の成分がかなり大きくなるため、台形波をサイン波に変換することにより音圧レベルがむしろ大きくなる可能性が高い。従って、F R F の形状に依存するが、例えば 2 m s 程度以下の印加時間の波形はサイン波に変換しない方が音圧レベルは小さくなる可能性が高い。従って、基本となる台形波形の印加時間によって音圧レベル低下の効果がない場合、すなわち M R I 装置の F R F の形状に依存するが、例えば 2 m s 程度以下の場合には、印加時間サイン波への変換を行わなくてもよい。

【 0 0 5 3 】

傾斜磁場パルス A s 1 とサイン波形 A s 2 のピーク強度を比較すると、前掲の例では、サイン波形 A s 2 のピーク強度 g_2 は、傾斜磁場パルス A s 1 のピーク強度の 1 . 9 倍 ($8 . 7 \text{ m T / m}$) になる。このように傾斜磁場パルス強度の最大値が台形波と比べて大きくなると、これに伴って高周波磁場パルスのピークの強度も大きくなり、S A R が大きくなる。そこで S A R が所定の閾値 (許容範囲以内の値) を超える場合には、複数の基本波形を組み合わせた合成サイン波形とすることにより、傾斜磁場パルス強度の最大値を低くして、高周波磁場パルスのピーク強度の増加を防ぐ。S A R が閾値以下の場合には、上述の通りサイン波により音圧レベル低下の効果を得られる印加時間の傾斜磁場について、単一のサイン波を用いてもよい。

【 0 0 5 4 】

合成サイン波の例を、図 7 および次式 (4 - 1) に示す。図示する例では、3 つの基本波 A 3 1、A 3 2、A 3 3 を合成して作成した傾斜磁場パルス波形 A s 3 を作成している。波形 A s 3 は、式 (4 - 3) で表される周期が印加時間の 1 倍のサイン波形 1 個 (A 3 2) と、式 (4 - 2) および式 (4 - 4) で表される 1 / 2 倍のサイン波形 2 個 (A 3 1 と A 3 3) の合計 3 個の波形を加算した合成サイン波形である。A 3 2 と A 3 1 の初期位相

10

20

30

40

50

は 0 であり、A 3 3 の初期位相は印加時間の 1 / 2 である。また式 (4 - 5) で示すように、各波形 A 3 1、A 3 2、A 3 3 は、それぞれの強度 g_{31} 、 g_{32} 、 g_{33} が等しく、その値は、合成波形 A s 3 の面積が、もとの傾斜磁場波形 A s 1 の面積と等しくなるよう 0 . 5 としている。

【 0 0 5 5 】

【 数 4 】

$$f_{As3}(t) = f_{A31}(t) + f_{A32}(t) + f_{A33}(t) \quad (4-1)$$

$$f_{A31}(t) = g_{31} f_A(2t) \quad (4-2)$$

$$f_{A32}(t) = g_{32} f_A(t) \quad (4-3)$$

$$f_{A33}(t) = g_{33} f_A(2(t - (t_2 - t_1)/2)) \quad (4-4)$$

$$g_{31} = g_{32} = g_{33} = 0.5 \quad (4-5)$$

10

【 0 0 5 6 】

このように合成波形 A s 3 は、周波数成分としては、A 3 1、A 3 3 の成分と A 3 2 の成分しか含まないため、単一のサイン波を用いた場合と同様に、高い周波数成分がなくなり、低い周波数成分だけになるので、静音効果が得られる。また R F 波形のピーク位置の時刻 $t = 1 . 8 \text{ ms}$ における傾斜磁場強度は、波形 A 3 2 のピーク強度 g_{32} と同じであり、もとの台形波形の強度より小さい。従って波形変換による S A R の増加がない。

20

【 0 0 5 7 】

合成サイン波の別の例を、図 8 および式 (5 - 1) に示す。図示する例では、式 (5 - 2) および式 (5 - 3) で表される 2 つの同一形状の基本波 A 3 4、A 3 5 を、互いの一部が重なるように時間軸方向にずらし、合成して作成した傾斜磁場パルス波形 A 3 ' を作成している。式 (5 - 2) および式 (5 - 3) において、 g_{34} と g_{35} は、波形 A 3 4 と波形 A 3 5 の強度、 a_1 は、波形 A 3 4 と波形 A 3 5 の周期と初期位相を調整する変数である。図 8 に示す例では、 g_{34} と g_{35} は 0 . 8 とし (式 (5 - 4))、 a_1 は 1 . 6 としている (式 (5 - 5))。

【 0 0 5 8 】

【 数 5 】

$$f_{A3'}(t) = f_{A34}(t) + f_{A35}(t) \quad (5-1)$$

$$f_{A34}(t) = g_{34} f(a_1 t) \quad (5-2)$$

$$f_{A35}(t) = g_{35} f(a_1(t - (1 - 1/a_1))) \quad (5-3)$$

$$g_{34} = g_{35} = 0.8 \quad (5-4)$$

$$a_1 = 1.6 \quad (5-5)$$

30

【 0 0 5 9 】

この合成サイン波形 A 3 ' は、時間軸方向の中央位置で傾斜磁場強度が元の台形波とほぼ等しくなっている。つまり合成サイン波 A 3 ' をスライス選択傾斜磁場 A s 3 (図 3) とした場合、R F パルス A r 1 のピーク位置の時刻において、強度がもとの台形波と同じかそれ以下であるため、合成サイン波形 A s 3 と同様に、S A R の増加のないパルスシーケンスが得られる。

40

【 0 0 6 0 】

以上、図 3 の励起 R F パルス A r 1 と同時に印加されるスライス選択傾斜磁場 A s 1 について合成波形の傾斜磁場パルスに変換する場合を説明したが、リフォーカスパルス B r 1 とともに印加されるスライス選択傾斜磁場 D s 1 についても同様の変換を行い、合成波形の傾斜磁場パルス D s 2 に変換する。

【 0 0 6 1 】

< < R F 波形の変換 > >

50

上述したスライス傾斜磁場パルス A_{s1} 、 D_{s1} を、合成波形の傾斜磁場パルス A_{s2} 、 D_{s2} に変換したのに伴い、それらとともに照射する RF パルス A_{r1} 、 B_{r1} の波形を変更する。傾斜磁場波形に合わせた RF 波形の変更は、例えば、Small tip angle approximation 法を用いて算出することができる。

【0062】

図7のスライス傾斜磁場パルス A_{s3} （合成波形）に対応して変更した RF パルス b_{As3} の波形とそのスライスプロファイルを、図9（a）、（b）に示す。ここでは、もとの RF パルス b_{As1} が sinc 関数の場合を示している。この変更後の RF パルス b_{As3} は、式6に従って求めることができる。

【数6】

$$b_{As3}(t) = b_{As1}(\tau(t))f_{As3}(t)/f_{As1}(t) \quad (6-1)$$

$$\tau(t) = \int_0^t f_{As3}(t)/f_{As1}(t) dt \quad (6-2)$$

ここで、 b_{As1} はもとの RF パルス、 g_{As1} と g_{As2} はそれぞれ添字のパルスの傾斜磁場強度であり、 $\tau(t)$ は時間拡張関数と呼ばれる。また参考として、もとの RF パルス b_{As1} のスライスプロファイルを図9（c）に示す。図示するように、変形後の RF パルス波形 b_{As3} は、元の RF パルス波形 b_{As1} と比較するとピーク強度がほぼ同じになっており、その他の部分も同等の強度になっていることがわかる。従って SAR は元の波形とほぼ等しい。また図9（b）のスライスプロファイルを、同図（c）と比較するとほとんど変化していないことが確認できる。このように、RF 波形のピーク時刻における傾斜磁場強度が元の傾斜磁場強度よりも小さくした合成サイン波形を用いることにより、元の RF パルス波形と同等のピーク強度を維持することができ、SAR を増加させずに RF 照射中の傾斜磁場パルスをサイン波形のパルスに変換することができる。一般に、RF 波形のピーク強度は傾斜磁場の強度が等しければほとんど変化しない。従って、RF 波形のピーク時刻における合成サイン波形の強度を元の傾斜磁場波形とほぼ等しいか小さくしておけばよいことがわかる。

【0063】

図10（a）、（b）は、スライス選択傾斜磁場パルスとして、合成波形ではなく、図6（a）に示す単一のサイン波 A_{s2} の傾斜磁場パルスを用いる場合の RF パルス b_{As1} の変形とスライスプロファイルを示している。ここでも元の RF パルス b_{As1} が sinc 関数の場合を示している。単一のサイン波を用いた場合には、図10（b）に示すように、スライスプロファイルは殆ど変化していないが、変形後の RF 波形 b_{As2} のピーク強度は、元の RF パルス b_{As1} に比べ大きくなっている。この場合は、SAR は元の波形の 1.9 倍になり、人体への許容度を超える可能性がある。

【0064】

以上のスライス傾斜磁場の波形変換処理フローの一例を図11に示す。まずスライス傾斜磁場の印加時間によって、波形変換するか否かを判断する（S11）。波形変換しない場合には、もとの台形の傾斜磁場パルスを使用する（S12）。波形変換をすることにより、静音効果が得られると判断した場合には、まず、スライス傾斜磁場パルスと印加時間、印加量（時間積分値）が同じであるサイン波を作成し（S13）、SAR を評価する。SAR が許容値（あるいは予め設定した閾値）以下の場合には（S14）、サイン波を傾斜磁場パルスとして使用する（S15）。S14で SAR が許容値（閾値）を超えると判断した場合には、合成波形を算出し（S16）、合成波形を傾斜磁場パルスとして設定する（S17）。設定した傾斜磁場パルスと同時に照射する RF 波形を変更する（S18）。全てのスライス選択傾斜磁場パルスについて（S11～S18）を繰り返す（S19）。

【0065】

<<その他の傾斜磁場波形の変換>>

スライス選択傾斜磁場以外の傾斜磁場パルスについても、スライス選択傾斜磁場の場合と同様に、まず、基本波（図5（a）、（b））を選択し、これら基本波を用いて、基本

10

20

30

40

50

波と同じ波形の傾斜磁場パルス又は基本波を合成した合成波形の傾斜磁場パルスを作成する。

【0066】

ただしスライス選択傾斜磁場以外の傾斜磁場パルスでは、隣接する傾斜磁場パルスがある場合、それらを一体にして、その印加時間および印加量が等しい傾斜磁場パルスを作成する。これにより高い静音効果が得られる。例えば、図3のパルスシーケンスのディフェーズ用リードアウト傾斜磁場A f 1とクラッシャー傾斜磁場B f 1は隣接し、それらが印加されている間にR Fパルスの印加がない。これら傾斜磁場パルスA f 1とB f 1は一体として印加することができる。図12に傾斜磁場パルスA f 1とB f 1と、印加時間および印加量が等しいサイン波形状の傾斜磁場パルスA f 2を示す。ディフェーズ傾斜磁場やクラッシャー傾斜磁場の場合には、SARの問題やリードアウト時のSN劣化の問題がないので、基本波の合成波形ではなく、サイン波を用いることができる。

10

【0067】

<<リードアウト傾斜磁場の変換>>

リードアウト傾斜磁場についても、静音化の観点から、隣接する傾斜磁場パルスを一体にして、一つの傾斜磁場パルスに変換する。例えば、図3に示すパルスシーケンスのクラッシャーパルスC f 1、リードアウト傾斜磁場D f 1およびクラッシャーパルスE f 1を一体として、これらと印加時間、印加量が同じ一つのサイン波或いは合成波形を作成する。

【0068】

20

図13(a)は、リードアウト方向の上記3つの傾斜磁場パルスをサイン波C f 2に置き換えた場合、(b)は合成波形C f 3に変換した場合を示している。合成波形C f 3は、3つの基本波C f 3 1、C f 3 2、C f 3 3を合成した波形である。3つの基本波は、周期が印加時間の1倍のサイン波形C f 3 2と、周期が印加時間の1/2のサイン波形C f 3 1、C f 3 3であり、合成波形C f 3は、サイン波形C f 3 1、C f 3 3が重ならないように時間軸方向にずらしてサイン波形C f 3 2と合成したものである。各基本波の強度 g_{31} 、 g_{32} 、 g_{33} は、合成波形C f 3の面積がクラッシャーパルスC f 1、リードアウト傾斜磁場D f 1およびクラッシャーパルスE f 1の合計と同じとなるように決定し、図示する例では、 $g_{31} = g_{33} = 0.8$ 、 $g_{32} = 0.4$ としている。ただし、 g_{31} 、 g_{32} 、 g_{33} の大きさは任意であり、 g_{31} と g_{33} は必ずしも等しくする必要はない。

30

【0069】

図13(a)に示すサイン波形C f 2は、A/D中に印加されるリードアウト傾斜磁場パルスとして見たとき、その最大強度は、元のリードアウト傾斜磁場D f 1の最大強度に比べ、かなり大きく、D f 1の2.2倍となる。サンプリングの帯域はリードアウト傾斜磁場パルスの強度に比例して大きくなるため、この場合は凡そ2倍となる。S/N比は帯域の平方根に比例して低下するため、サイン波形C f 2のパルスを用いた場合のS/N比は約1/1.4に低下する。

【0070】

これに対し図13(b)に示す合成サイン波形C f 3を用いた場合は、A/D期間中の平均的な強度が元のリードアウト傾斜磁場パルスD f 1よりもやや大きい程度であるため、S/N比の低下が抑えられている。

40

【0071】

合成サイン波形を作成するのに必要なサイン波形の数は3個に限らない。図14に、図8に示す合成波(式(5-1))と同様に、2個のサイン波形C f 4 1、C f 4 2を組み合わせで作成された合成サイン波形C f 4の例を示す。この場合にも、合成サイン波形C f 4の面積がクラッシャーパルスC f 1、リードアウト傾斜磁場D f 1およびクラッシャーパルスE f 1の合計と同じとなるように決定している。また各基本波の強度 g_{34} と g_{35} は、 $g_{34} = g_{35} = 1.1$ とし、 a_1 はA/D中の傾斜磁場強度が元の台形波とほぼ同じになるよう $a_1 = 1.7$ としている。但し、 g_{34} と g_{35} の大きさは任意であり

50

必ずしも等しくする必要はない。この合成サイン波形 C f 4 は、3 個のサイン波から作成した合成サイン波形 C f 3 と比較すると、ほぼ同等の波形が得られていることがわかる。従って、C f 3 と同様に、C f 4 を用いても S / N 比の低下がほとんどない画像を得ることができる。

【 0 0 7 2 】

なおリードアウト傾斜磁場パルスを作成波形に変換するに際し、図 1 1 を参照して説明したスライス傾斜磁場の場合と同様に、最初にサイン波を作成し、その最大強度を元の台形のリードアウト傾斜磁場と比較し、その結果に応じて、合成波形を作成するようにすることも可能である。すなわち、リードアウト傾斜磁場パルスをサイン波変換することによって画像の S / N 比が大きく低下し、それによる画質の劣化が許容できない場合に合成波

10

【 0 0 7 3 】

以上、図 4 に示す波形変換処理の詳細を説明したが、これら波形変換処理は、既に述べたように M R I 装置の計算機 1 0 9 の機能として行うことも可能であるが、M R I 装置とは別の計算機で予め計算し、波形変換後のパルスシーケンスを M R I 装置に搭載することも可能である。

【 0 0 7 4 】

< < 騒音の評価 > >

本実施形態における静音化の効果を評価するため、次のようにして等価騒音レベルを見積もった。すなわち、傾斜磁場波形をフーリエ変換して周波数分布を求め、その周波数分布に M R I 装置で測定した A 特性の F R F を乗算した結果から等価騒音レベルを計算した。F R F は、ホワイトノイズ状の傾斜磁場を印加しながら発生する音をマイクで測定し、測定した音を周波数スペクトル変換することにより、得られる。図 1 5 に、パルスシーケンスに用いる傾斜磁場波形 G とその周波数分布 F T (G) および測定した F R F を示す。図 1 5 の最下段が、傾斜磁場の周波数分布と F R F を乗算した結果 (F T (G x) x F R F) である。

20

【 0 0 7 5 】

パルスシーケンスとしては、図 3 の左側のパルスシーケンス 2 0 0、右側のパルスシーケンス 3 0 0 および図 1 6 の右側のパルスシーケンス 3 1 0 を評価した。図 1 6 の右側のパルスシーケンス 3 1 0 は、図 1 6 の左側のパルスシーケンス 2 0 0 (図 3 のパルスシーケンス 2 0 0 と同じ) の傾斜磁場パルスを合成波ではなく、サイン波に置き換えたものである。

30

【 0 0 7 6 】

その結果、台形の傾斜磁場パルスを用いた元のパルスシーケンス 2 0 0 の等価騒音レベルは 7 8 d B であった。これに対して、図 1 6 に示すサイン波形変換をしたパルスシーケンス 3 1 0 の等価騒音レベルは 5 9 d B であった。傾斜磁場パルスをサイン波形に変換することにより音圧レベルを 1 9 d B 低減することができた。また、R F パルス照射中の傾斜磁場パルスを合成サイン波形に変換したパルスシーケンス 3 0 0 の等価騒音レベルは 6 1 d B であった。こちらは、S A R の上昇や、S N 比の低下がほとんどない状態で、騒音低減効果として 1 7 d B を実現できた。

40

【 0 0 7 7 】

< 第二実施形態 >

第一実施形態は、2 D - S E シーケンスに適用した実施形態であるが、本発明は、2 D - S E シーケンス以外のパルスシーケンスにも適用できる。本実施形態は、グラディエントエコー (G r E) シーケンスに適用した実施形態である。G E シーケンスは、図 1 7 に示す 3 次元シーケンス (3 D - G r E シーケンス)、図 1 8 に示す 2 次元シーケンス (2 D - G r E シーケンス) のいずれにも適用することができる。2 D - G r E シーケンス (4 1 0、4 1 1) は、3 D - G r E シーケンスのスライスエンコードを省いたものであり、その他はほぼ同じであるので、以下、3 D - G r E シーケンスについて説明する。

【 0 0 7 8 】

50

図17の左半分に台形波で構成された3D-GrEシーケンス400を示し、その右側にサイン波形に変換したシーケンス401を示す。3D-GrEシーケンスの動作は、まず、スライス選択傾斜磁場パルス201の印加とともに高周波磁場(RF)パルス202を照射し、対象物体内のあるスライスの磁化を励起する。次いで磁化の位相に位置情報を付加するためのスライスエンコード傾斜磁場パルス203と位相エンコード傾斜磁場パルス204、ディフェーズ用リードアウト傾斜磁場205を印加する。スライスエンコード傾斜磁場パルス203にはスライスリフェーズ傾斜磁場パルスが加算されている。そして、リードアウト方向の位置情報を付加するためのリードアウト傾斜磁場パルス206を印加しながら磁気共鳴信号(エコー)をA/Dのサンプリング時間207で計測し、最後にスライスエンコードと位相エンコードをそれぞれキャンセルするパルス208と209を印加し、r軸にクラッシャーパルス210を印加する。

10

【0079】

以上の手順をスライスエンコード傾斜磁場パルス203と位相エンコード傾斜磁場パルス204の強度(スライスエンコード量、位相エンコード量)を変化させながら、繰り返し時間TRで繰り返し、エコーを計測する。

【0080】

各エコーは3次元のk空間上に配置され、逆フーリエ変換によって画像が再構成される。このパルスシーケンスは、通常はTRを数十ミリ秒として、T1強調像の撮影に用いられる。

【0081】

20

このパルスシーケンスの台形波をサイン波形に変換した結果を図17の右側のパルスシーケンス401に示す。スライス傾斜磁場パルス201は、図7に示す合成サイン波As3と同様の方法で作成した合成サイン波形のスライス傾斜磁場パルス201'に変換し、リードアウト傾斜磁場パルス206とクラッシャー傾斜磁場パルス210は、両者を一体にして、図13(b)に示す合成サイン波Cf3と同様の方法で作成した合成サイン波形のリードアウト傾斜磁場パルス206'に変換している。その他のパルスは印加開始時刻と印加終了時刻、面積の等しいサイン波形(例えば、図6(a)のサイン波)に変換している。また、RFパルス202は、傾斜磁場パルス201の波形変換に対応して、図9(a)に示すように変換している。

【0082】

30

この3D-GrEシーケンスおよび2D-GrEシーケンスについても、第一実施形態と同様に、FRFを用いた騒音の評価を行ったところ、いずれのパルスシーケンスも、傾斜磁場波形の変換前は音圧レベルが83dBであるのに対し、変換後には71dBとなり、12dBの静音効果が得られた。これにより本実施形態においても、第一実施形態と同様に、SARの増加やS/N比の低下を抑えた上で、音圧レベルを低下させることができることが確認された。

【0083】

以上、本発明の各実施形態を説明し、これら実施形態では、スライス傾斜磁場とリードアウト傾斜磁場の両方について、合成波形の傾斜磁場を用いた例を説明したが、スライス傾斜磁場とリードアウト傾斜磁場のうち一方が合成波形の傾斜磁場であるパルスシーケンスも本発明に包含される。また合成波形の傾斜磁場以外の傾斜磁場をサイン波とした場合を説明したが、一部に台形や三角形の傾斜磁場パルスを含むパルスシーケンスも本発明に包含される。

40

【産業上の利用可能性】

【0084】

本発明によれば、パルスシーケンス設計の自由度を保ちながら静音化を図ることができる。また本発明によれば、傾斜磁場波形の変更によるSARの増加やS/N比の低下を抑制できる。

【符号の説明】

【0085】

50

101・・・静磁場磁石、102・・・傾斜磁場コイル、104・・・シーケンサ、106・・・RF発生部、109・・・計算機、1093・・・波形変換部、111・・・記憶媒体。

【図1】

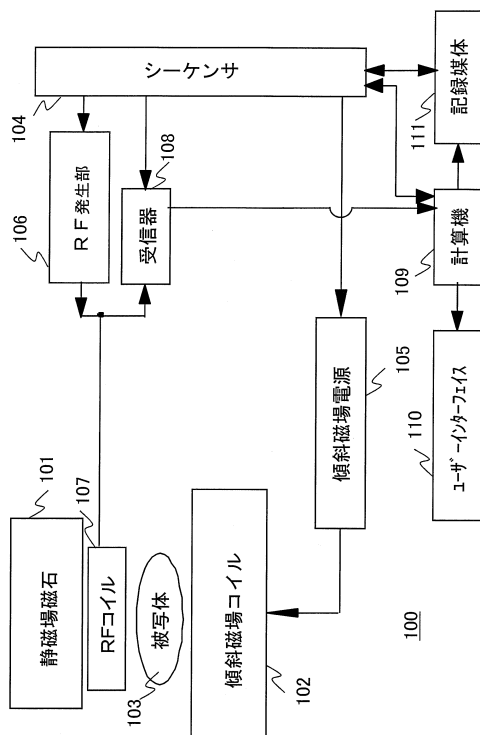


図1

【図2】

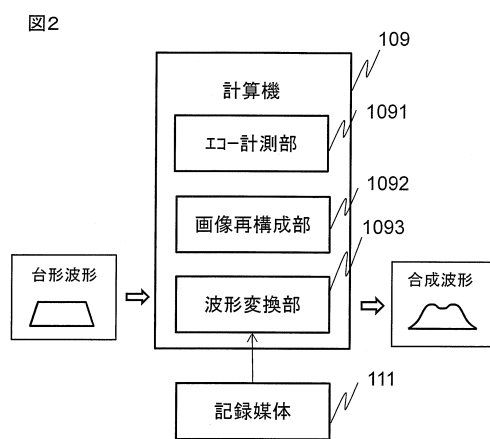
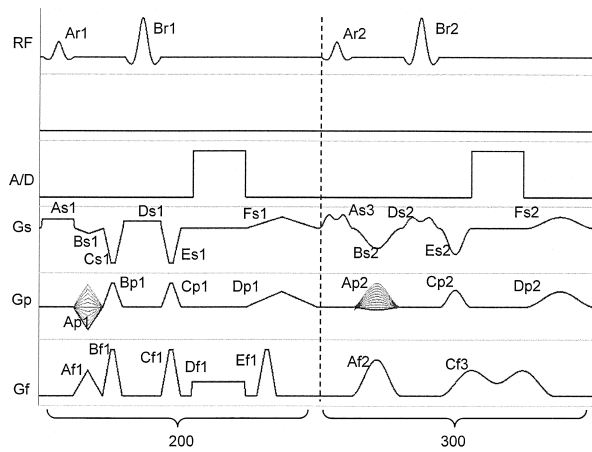


図2

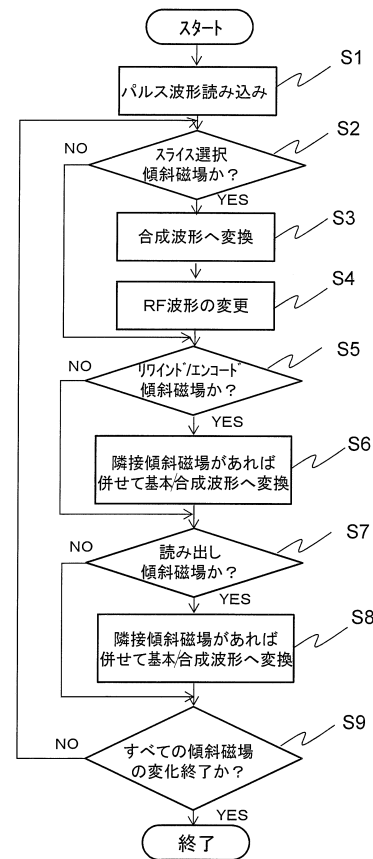
【図3】

図3



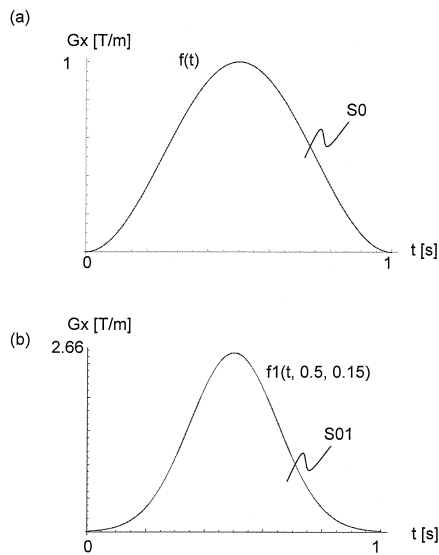
【図4】

図4



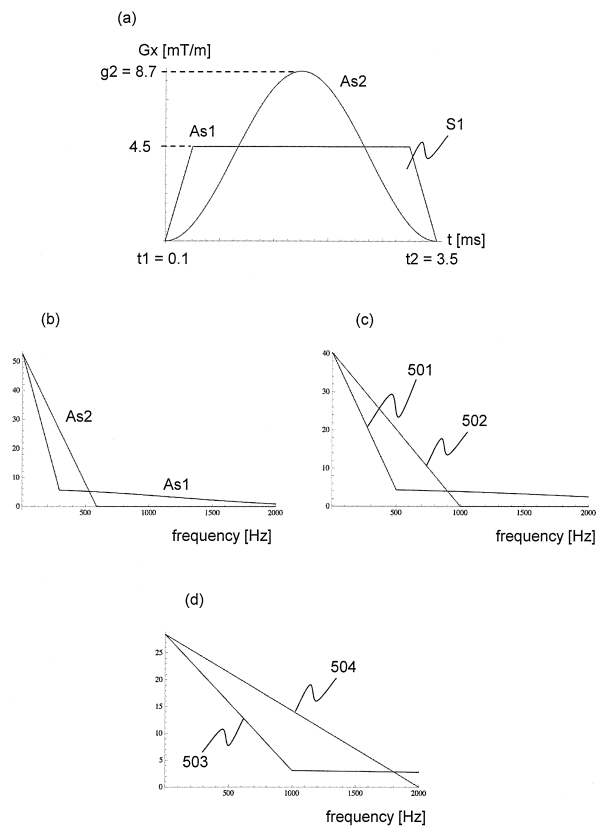
【図5】

図5

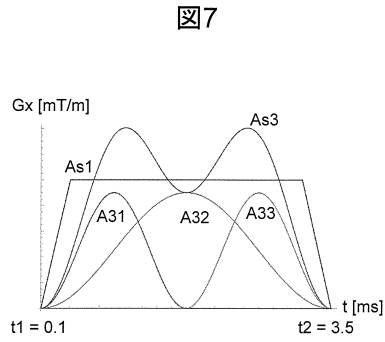


【図6】

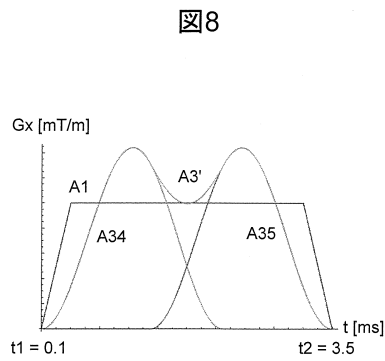
図6



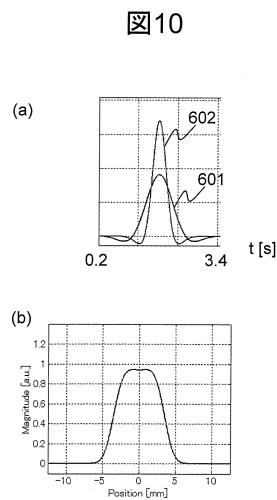
【図 7】



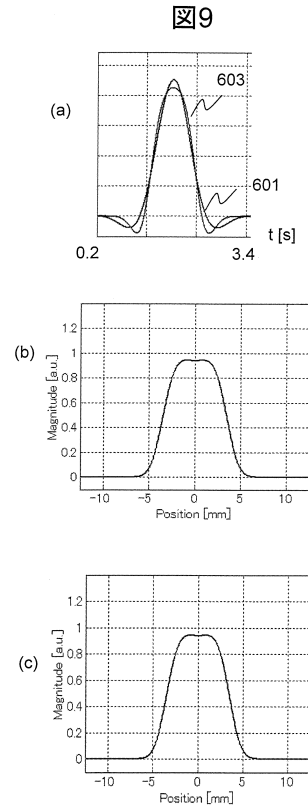
【図 8】



【図 10】

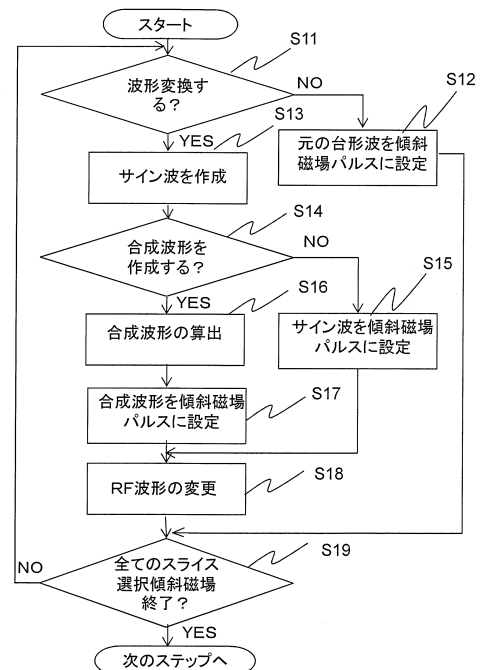


【図 9】



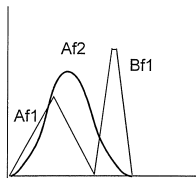
【図 11】

図11



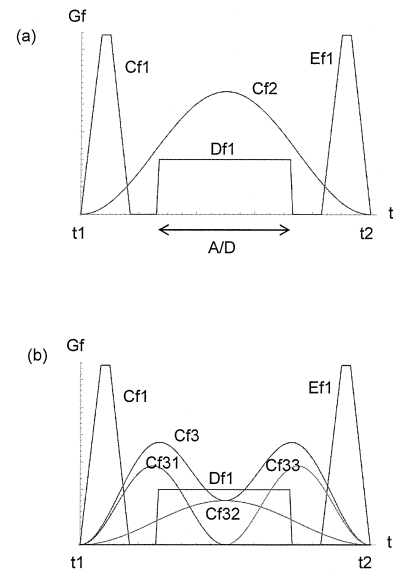
【図 12】

図12



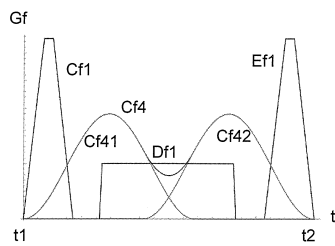
【図 13】

図13



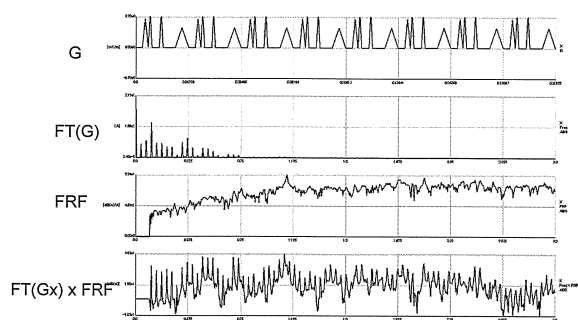
【図 14】

図14



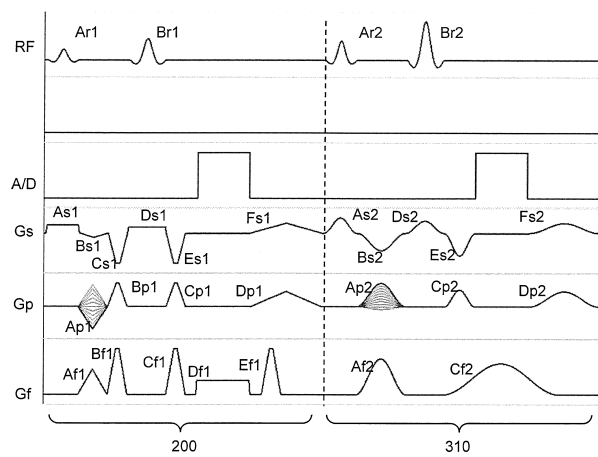
【図 15】

図15



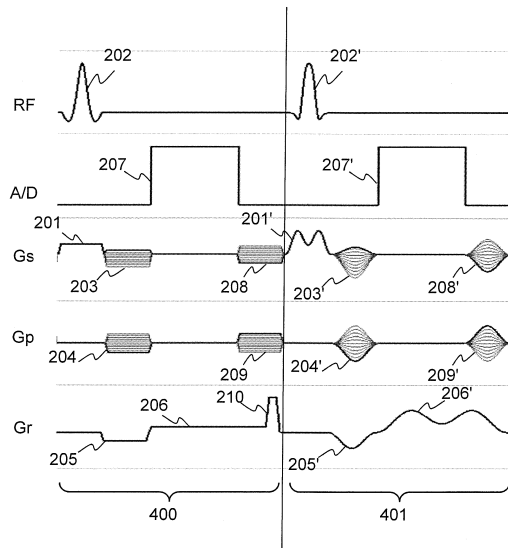
【図 16】

図16



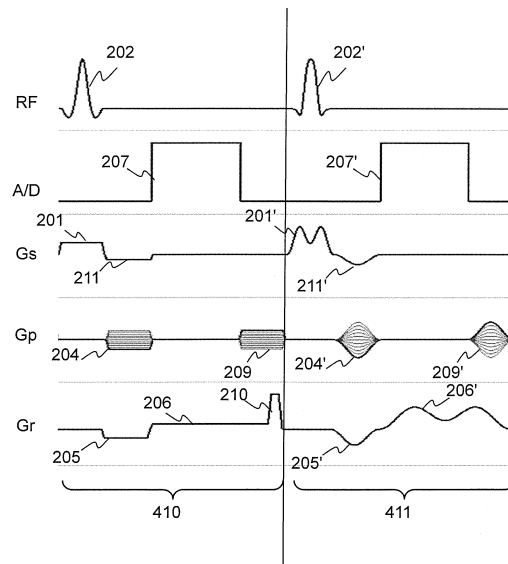
【図 17】

図17



【図 18】

図18



フロントページの続き

- (72)発明者 越智 久晃
東京都千代田区丸の内一丁目6番6号 株式会社日立製作所内
- (72)発明者 黒川 眞次
東京都千代田区丸の内一丁目6番6号 株式会社日立製作所内
- (72)発明者 竹内 博幸
東京都千代田区外神田四丁目14番1号 株式会社日立メディコ内

審査官 島田 保

- (56)参考文献 特開2011-025009(JP,A)
特開平07-299047(JP,A)
特開2008-302102(JP,A)
米国特許第06566877(US,B1)
S. Schmitter, A VERSE algorithm with additional acoustic noise constraints, Proceedings of International Society for Magnetic Resonance in Medicine[CD-ROM], 2009年, p179
Brian A.Hargreaves, et al., "Variable-Rate Selective Excitation for Rapid MRI Sequences", Magnetic Resonance in Medicine, 2004年, Vol.52, p590-p597

- (58)調査した分野(Int.Cl., DB名)
A61B 5/055
Wiley Online Library