

(19) 日本国特許庁(JP)

(12) 特許公報(B2)

(11) 特許番号

特許第5066694号  
(P5066694)

(45) 発行日 平成24年11月7日(2012.11.7)

(24) 登録日 平成24年8月24日(2012.8.24)

(51) Int. Cl.		F I		
<b>H05H 13/04</b>	<b>(2006.01)</b>	H05H 13/04		D
<b>H05H 7/18</b>	<b>(2006.01)</b>	H05H 13/04		M
		H05H 7/18		

請求項の数 4 (全 9 頁)

(21) 出願番号	特願2008-161290 (P2008-161290)	(73) 特許権者	301032942
(22) 出願日	平成20年6月20日 (2008.6.20)		独立行政法人放射線医学総合研究所
(65) 公開番号	特開2010-3538 (P2010-3538A)		千葉県千葉市稲毛区穴川四丁目9番1号
(43) 公開日	平成22年1月7日 (2010.1.7)	(73) 特許権者	000003078
審査請求日	平成23年2月2日 (2011.2.2)		株式会社東芝
			東京都港区芝浦一丁目1番1号
		(74) 代理人	100082005
			弁理士 熊倉 禎男
		(74) 代理人	100067013
			弁理士 大塚 文昭
		(74) 代理人	100086771
			弁理士 西島 孝喜
		(74) 代理人	100109070
			弁理士 須田 洋之

最終頁に続く

(54) 【発明の名称】 高周波加速制御装置

(57) 【特許請求の範囲】

【請求項1】

円形加速器の加速空洞に基本波と高調波の合成波の高周波電圧を加えて加速を行う高周波加速制御装置であってダイレクトデジタルシンセサイザ(DDS)を有する高周波加速制御装置において、

上記DDSが、

それぞれ異なる高周波のデジタル波形データを記憶する少なくとも2つの波形データ記憶手段と、

1つの高周波パターンメモリからの高周波周波数制御信号に基づいて上記少なくとも2つの波形データ記憶手段に記憶された波形データを読み出すための1つのアドレスプロセッサと、

上記各波形データ記憶手段の出力にそれぞれ接続された少なくとも2つの乗算器であって、各波形データ記憶手段に関連する高周波電圧パターンメモリから供給された高周波電圧を上記読み出された波形データと乗算する乗算器と、

上記少なくとも2つの乗算器のデジタル出力を足し合わせる加算器と、

上記加算器から出力されたデジタル信号をアナログ信号に変換するデジタルアナログコンバータと、を備え、

上記少なくとも2つの波形データ記憶手段に記憶された波形データは、基本波に高調波が加えられた合成波の波形データであって、且つ、上記加算器によって足し合わされた波形データが、円形加速器の一サイクルの各段階において最適な波形となるように設定さ

10

20

れていることを特徴とする高周波加速制御装置。

【請求項 2】

上記少なくとも 2 つの波形データ記憶手段は、第 1 の ROM と第 2 の ROM とで構成され、第 1 の ROM は、ビームを閉じ込めておくのに適した高周波波形の波形データを記憶し、第 2 の ROM は、平坦な加速部分を持つ高周波波形の波形データを記憶することを特徴とする請求項 1 に記載の高周波加速制御装置。

【請求項 3】

上記加算器は、円形加速器の捕獲段階において第 1 の ROM に記憶された波形データの高周波波形のみを出力し、円形加速器の初期の加速段階において、第 1 の ROM に記憶された波形データの高周波波形と第 2 の ROM に記憶された波形データの高周波波形とを足し合わせて出力することを特徴とする請求項 2 に記載の高周波加速制御装置。

10

【請求項 4】

上記少なくとも 2 つの波形データ記憶手段に記憶された波形データは、上記加速空洞のインピーダンスの周波数依存性を考慮して設定されていることを特徴とする請求項 1 ないし 3 のいずれか 1 項に記載の高周波加速制御装置。

【発明の詳細な説明】

【技術分野】

【0001】

本発明は、荷電粒子を加速するためのシンクロトロンのような円形加速器で使用される高周波加速制御装置、特に高調波を利用した高周波加速制御装置に関する。

20

【背景技術】

【0002】

シンクロトロンにおける荷電粒子の加速は、図 1 に示すように、シンクロトロンリング 1 に配置された加速空洞 2 に高周波電圧を印加することによって行われる。シンクロトロンリング 1 には、図 1 に示すように、加速空洞 2 の他に、加速ビームの周回軌道を制御する偏向電磁石 3、シンクロトロンリング 1 にビームを導入する入射装置 4 及び周回ビームをシンクロトロンリングの外部へ取り出す出射装置 5 が配置されている。さらに、シンクロトロン 1 は、ビームを加速するための高周波電圧を発生し且つ制御する高周波加速制御装置 6 を備えている。高周波加速制御装置 6 は、パターンメモリ 7 からの周波数及び電圧制御用のデジタル信号を DDS 8 に入力して高周波信号を発生させ、これを必要な電力まで増幅器 9 で増幅して加速空洞 2 に入れるように構成されている。

30

【0003】

シンクロトロンの運転サイクルは、シンクロトロンリングへビームを導入し、高周波電圧に同期して荷電粒子をビームとして周回させる捕獲段階、ビームを加速する加速段階、加速完了したビームを取り出す出射段階に大きく分けることができる。

【0004】

高周波加速制御装置は、まず捕獲段階において一様な入射ビームに高周波電圧を印加し、形成された安定領域上にビームを捕獲して集団（バンチ）化する。次いで、加速段階では、加速空洞に印加する高周波電圧の周波数を増加させることによってビームを加速してゆく。また、ビームの周回半径を一定にするために偏向磁石による偏向磁場強度と協調して高周波電圧周波数を制御する。

40

【0005】

高周波加速制御装置は、以上のようにして高周波電圧を制御するが、捕獲段階から加速段階初期においてビームが比較的低いエネルギー状態にある間、空間電荷効果によってビーム電荷に発散力が働くことが知られている。これにより、ビームの損失が起こりやすくなり、場合によってはビームの加速が不可能になることがある。

【0006】

そこで、このような空間電荷効果によるビーム損失を解決する手法として、高周波電圧に基本周波数の高周波（以下基本波）とその整数次高調波（以下単に高調波）を併用する手法がある。この手法によれば、基本波及び高調波を予め合成した後、必要な電力まで増

50

幅器で増幅して加速空洞に印加している。この基本波及び高調波を合成する方法として、基本波とその高調波についてそれぞれアナログ出力を持ち、1つ1つ振幅と位相を加速と共にパターン制御する方法がある(特許文献1)。

【0007】

しかしながら、この方法では制御対象である多くのアナログ高周波信号を制御する必要があり、制御システムが複雑になり、正しい動作をさせるための調整箇所も増え、製造コストが増大してしまう。すなわち、2次の高調波を使う場合には、基本波の振幅並びに2次高調波の振幅及び位相の計3個のパターンコントロールが必要になり、3次の高調波の場合には、そのパターンにさらに、3次高調波の振幅及び位相のパターンコントロールが加わるため、計5個のパターンコントロールが必要になる。つまり、良い加速波形を得ようとしてより高い高調波を利用しようとするれば、より多いパターンの制御が必要になる。また、制御対象がアナログ信号であるため、制御が複雑になる。

10

【0008】

一方、他の手法では、図1に示すように、パターンメモリから周波数及び電圧を制御するためのデジタル制御信号をダイレクトデジタルシンセサイザ(DDS: Direct Digital Synthesizer)に入力して、アナログの高周波加速信号を発生させ、これを必要な電力まで増幅器で増幅して加速空洞に入れる。この結果加速空洞に高周波加速電圧が発生し、これによりビームを加速することができる。通常は一つの周波数(加速空洞の共振周波数)をビームの加速とともに掃引して行う。しかし、最近利用され始めた、無同調空洞では一つの周波数だけでなく、同時に高調波も入力することができる。このとき、基本波と共に入力された高調波の位相と振幅を調整することによって、高周波電圧を空洞に発生させることによってできるビームパンチをシャープで無く、なだらかなものにし加速することができる。こうすることで、空間電荷効果を緩和して、より高いビーム強度を得ることができる。

20

【0009】

図1のDDSには、図7に示すように、高周波の波形データを記憶するリードオンリメモリ(ROM)71が設けられ、そこには、コンピュータを介して基本波と高調波の合成波の波形データが入力されている。さらにアドレスプロセッサ72が設けられ、このアドレスプロセッサ72によって、高周波の周波数のパターンメモリからの周波数制御信号に基づいてROM71から高周波の波形データが読出され、高周波電圧のパターンメモリから供給された高周波電圧と乗算器73において乗算される。すなわち、この乗算器73によって読み出された波形データの振幅制御が行われ、その乗算された波形がデジタルアナログコンバータ(DAC)74によってアナログ信号へ変換され、さらにローパスフィルタ(LPF)75を介して高周波加速信号として出力される。

30

【0010】

このようなシステムでは、DDS内の波形データそのものに基本波に高調波を加えた合成波を入れて動作させるために、制御システムは単純になり、調整要素も少なく、制御システムを安価にすることができる。ただし、この方式ではシンクロトロン運転の一サイクル内で波形は一定であり、ビームの捕獲段階と加速段階の双方の段階において最適な波形を作ることはできない。そのために、得られるビーム強度の向上は小さい。

40

【0011】

【特許文献1】特開平2006 49208号公報

【発明の開示】

【発明が解決しようとする課題】

【0012】

従来技術によれば、上述したように、制御システムが複雑になり、正しい動作をさせるための調整箇所も増え、製造コストが増大してしまうという問題点がある。また、ビームの捕獲及び加速段階の双方で最適な波形を作ることができないという問題点がある。本発明の課題は、これらの問題点を解決して、制御システムを単純化するとともに、調整要素も少なく、制御システムを安価にすることができる高周波加速制御装置を提供することで

50

ある。

【課題を解決するための手段】

【0013】

上記課題を解決するため、本発明によれば、円形加速器の加速空洞に基本波と高調波の合成波の高周波電圧を加えて加速を行う高周波加速制御装置であってダイレクトデジタルシンセサイザ（DDS）を有する高周波加速制御装置において、上記DDSが、それぞれ異なる高周波のデジタル波形データを記憶する少なくとも2つの波形データ記憶手段と、1つの高周波パターンメモリからの高周波周波数制御信号に基づいて上記少なくとも2つの波形データ記憶手段に記憶された波形データを読み出すための1つのアドレスプロセッサと、上記各波形データ記憶手段の出力にそれぞれ接続された少なくとも2つの乗算器であって、各波形データ記憶手段に関連する高周波電圧パターンメモリから供給された高周波電圧を上記読み出された波形データと乗算する乗算器と、上記少なくとも2つの乗算器のデジタル出力を足し合わせる加算器と、上記加算器から出力されたデジタル信号をアナログ信号に変換するデジタルアナログコンバータと、を備え、上記少なくとも2つの波形データ記憶手段に記憶された波形データは、基本波に高調波が加えられた合成波の波形データであって、且つ、上記加算器によって足し合わされた波形データが、円形加速器の一サイクルの各段階において最適な波形となるように設定されていることを特徴とする高周波加速制御装置が提供される。

10

【0014】

本発明の1つの態様によれば、上記少なくとも2つの波形データ記憶手段は、第1のROMと第2のROMとで構成され、第1のROMは、ビームを閉じ込めておくのに適した高周波波形の波形データを記憶し、第2のROMは、平坦な加速部分を持つ高周波波形の波形データを記憶するように設定されていてもよい。

20

【0015】

本発明の別の態様によれば、上記加算器は、円形加速器の捕獲段階において第1のROMに記憶された波形データの高周波波形のみを出力し、円形加速器の初期の加速段階において、第1のROMに記憶された波形データの高周波波形と第2のROMに記憶された波形データの高周波波形とを足し合わせて出力するように構成されていてもよい。また、第1のROMに記憶された波形データのみを利用して、必要なパターンメモリを減らすように構成してもよい。

30

【0016】

本発明の更に別の態様によれば、上記少なくとも2つの波形データ記憶手段に記憶された波形データは、上記加速空洞のインピーダンスの周波数依存性を考慮して設定されることが好ましい。例えば、上記少なくとも2つの波形データ記憶手段が、上記第1のROM及び第2のROMに加えて更に第3のROMを含むように構成され、該第3のROMが、上記加速空洞のインピーダンスの周波数依存性を補正するための波形を記憶するように構成されてもよい。

【発明の効果】

【0017】

本発明によれば、DDS内に波形データを複数持たせ、それらの波形データを足し合わせることによって最適な波形を作るように構成されているので、加速制御システムの複雑さを避けて、運転の一サイクル内で波形を調整でき、ビームの獲得段階及び加速段階の双方で最適な波形を作ることができる。従って、加速中もビームパンチをシャープで無く、なだらかなものに保つ事が可能になり、十分な空間電荷効果の抑制が期待できる。また、従来の制御システムに必要であったパターンメモリの数を減らすことができる。

40

【発明を実施するための最良の形態】

【0018】

図2に本発明の高周波加速制御装置の主要部であるDDSの構成を示す。この構成は、図7のDDSの構成を改良したものである。図2のDDSでは、それぞれ異なる高調波の波形データを記憶する2つのリードオンリメモリ（第1ROM及び第2ROM）11及び

50

21が設けられている。第1ROMには、図7のDDSと同様に、コンピュータを介して基本波と高調波の合成波の波形データが入力されている。さらにアドレスプロセッサ12が設けられ、このアドレスプロセッサ12によって、高周波の周波数のパターンメモリからの周波数制御信号に基づいて第1ROM11から高周波の波形データが読出され、高周波電圧のパターンメモリから供給された高周波電圧と乗算器13において乗算される。

【0019】

また、第2ROM21には、図7のDDSと同様に、コンピュータを介して基本波と高調波の合成波の波形データが入力されている。さらに、上記第1ROM11と同じアドレスプロセッサ12によって、上記第1ROM11と同じ高周波の周波数パターンメモリからの周波数制御信号に基づいて第2ROM21から高周波の波形データが読出され、高周波電圧のパターンメモリから供給された高周波電圧と乗算器23において乗算される。上記乗算された第1及び第2のROM11及び21の出力波形が加算器22によって足し合わされ、デジタルアナログコンバータ(DAC)14を介してアナログ信号へ変換され、さらにローパスフィルタ(LPF)15を介して高周波加速信号として出力される。

10

【0020】

第1ROM11及び第2ROM21には、それぞれ図3、図4のような基本波に高調波が加わった合成波の波形データが記憶されている。そしてこれらの波形を乗算器13、23においてそれぞれ高周波電圧と乗算することによって、振幅制御を行い、その後、加算器22によってデジタル的に足し合わせて高周波のアナログ信号として出力する。この方式によれば、微妙な調整が必要なアナログ信号を複数出力する必要がなく、デジタルデータの処理だけで一つにまとめることができる。

20

【0021】

図3はビームを閉じ込めておくのに適した高周波波形で、ビーム捕獲段階の平坦な安定領域部分ではこの波形のみを出力する。図4は平坦な加速部分を持つ高周波波形で、磁場勾配(dB/dt)がゼロでなくなり実際に加速が始まった時に図3の波形に足し合わせてDACに入力する。

【0022】

通常のサイン波による加速では、実質的に加速に使われる電圧Vは、

$$V \sin \theta = 2 R \text{ dB/dt}$$

となり、位相 $\theta$ を中心にしてシンクロトロン振動している。Rはシンクロトロンリングの平均半径、 $\theta$ は偏向電磁石中でのビームの曲率半径、dB/dtは偏向電磁石の磁場の時間微分である。

30

【0023】

本発明のシステムでは、この実質的に加速に使われる電圧を発生させる図4の波形をdB/dtと共に増大させる。この2つの波形をそれぞれ2つのパターンデータによりdB/dtに対応した最適な値で足し合わせて利用する。又、このパターン制御には従来のBクロック(一定の磁場の増減に対してパルスを出す、HIMAC(本件出願人の重イオン医療用加速器)の場合は0.2 Gauss変化するごとにパルスの一つ出力する)による制御の他にTクロック(普通の意味での一定時間ごとにパルスを出す。シンクロトロンの運転がライン同期している場合には、それに同期させたTクロックを使う)により行う。これらの2つを足し合わせて作った波形の例を図5に示す。

40

【0024】

図5の波形を参照すると、確かに中心の電圧がゼロではない値になっていて、平坦な電圧部分を広く確保できている。この中心付近の電圧がサイン波による加速での $V \sin \theta$ の値に相当する。このような波形の利用によりバンチ巾を広くしたままで加速することができる。これにより、ビームの強度が空間電荷効果により制限されている加速器において空間電荷効果を小さくできて、その結果ビーム強度を上げることができる。又、位相方向に広がると言うことは、縦方向であるエネルギー巾を小さくできると言うことでもあり、軌道のずれのあるところでのビームサイズを小さくできる。この事はシンクロトロンにおいて必要なマグネットのサイズを小さくすることに寄与する。

50

## 【 0 0 2 5 】

実際に加速空洞に高周波電力を入れて望みの高周波波形を得るためには、加速空洞のインピーダンスの周波数依存性を考慮する必要がある。図6が、本発明の実験において使用したコバルト製コアを利用した加速空洞（1/4の共振器で構成される）のインピーダンスの周波数依存性を示したグラフであるが、各高調波を加速空洞に入れる際に、この空洞のインピーダンスの変化を補正した波形を入力する。又、加速とともに周波数が変化した場合、補正値が必ずしも正しくなくなるが、ビーム強度を制限するのは、加速の初期であり、その期間の波形が理想の波形に近いように調整する。これは、制御を簡単にしたことから来る制限になる。

## 【 0 0 2 6 】

本発明のシステムでは、このような制限はあるが、利用する高調波の次数には制限が無いという特徴がある。利用する高調波の次数は、実際には加速空洞で出せる電圧の範囲で制限される。たとえば、良く使われる3次までの高調波だけでなく、4次までの高調波を使う事も、同じシステムでROMの波形データに4次までの高調波を入れることででき、それによってバンチ長を長くする効果が得られる。

## 【 0 0 2 7 】

もし4次までの高調波の利用を、従来のシステムのようにそれぞれの高調波の出力の振幅と位相を制御することによって行うとすれば7個のパターン制御が必要になる。これに対して本発明のシステムでは、2個のパターン制御だけで可能になる。つまり本発明のシステムでは、加える高調波の数を増やしても、全く同じ制御システムで実現できるというメリットがある。又、本発明のシステムの延長として、周波数を掃引して出てくる誤差を補正することや、全く新しい波形に乗り換えるために3個の波形データを利用する構成も考えられる。

## 【 図面の簡単な説明 】

## 【 0 0 2 8 】

【図1】本発明の高周波加速制御装置を使用するシンクロトロン の概略図である。

【図2】本発明の高周波加速制御装置の主要部を構成するDDSの構成図である。

【図3】図2のDDSの一方のROMに記憶された波形データに基づく高周波波形を示すグラフである。

【図4】図2のDDSの他方のROMに記憶された波形データに基づく高周波波形を示すグラフである。

【図5】図2のDDSによって足し合わされた高周波波形を示すグラフである。

【図6】加速空洞のインピーダンスの周波数依存性を示すグラフであり、黒丸「・」は実数部、白四角印「□」は虚数部を示す。

【図7】従来の高周波加速制御装置に使用されるDDSの構成図である。

## 【 符号の説明 】

## 【 0 0 2 9 】

- 1 シンクロトロンリング
- 2 加速空洞
- 3 偏向電磁石
- 4 入射装置
- 5 出射装置
- 6 高周波加速制御装置
- 7 パターンメモリ
- 8 ダイレクトデジタルシンセサイザ (DDS)
- 9 増幅器
- 11 第1ROM
- 12、72 アドレスプロセッサ
- 13、23、73 乗算器
- 14、74 デジタルアナログコンバータ (DAC)

10

20

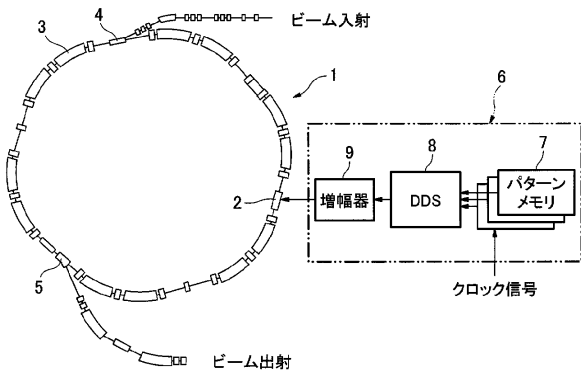
30

40

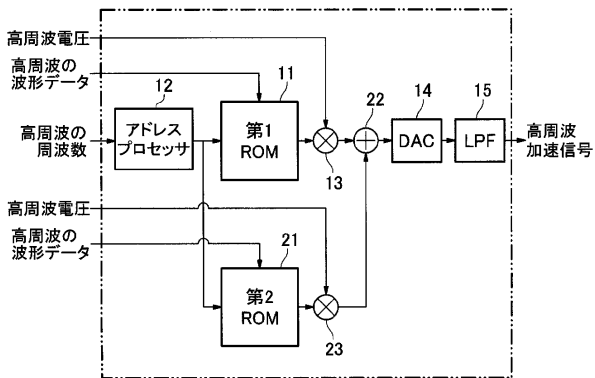
50

- 1 5、7 5 ローパスフィルタ ( L P F )
- 2 1 第 2 R O M
- 2 2 加算器
- 7 1 R O M

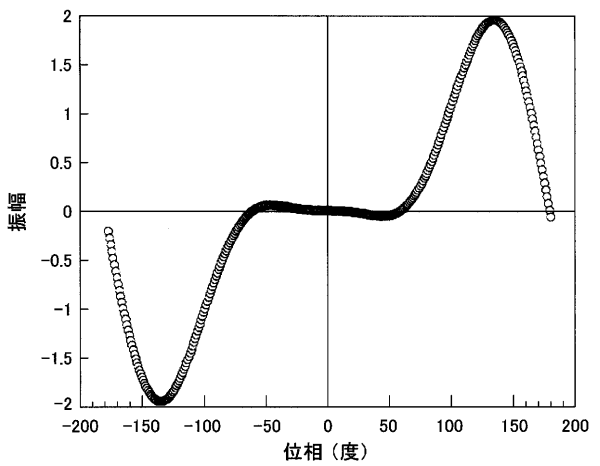
【 図 1 】



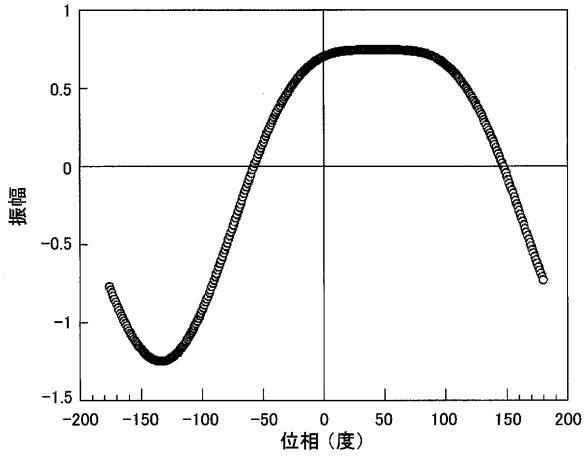
【 図 2 】



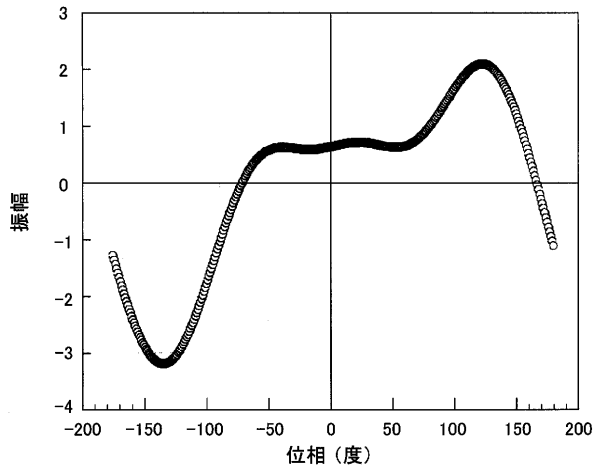
【 図 3 】



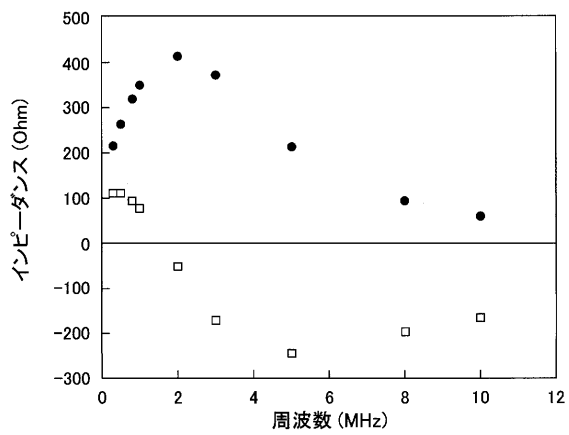
【 図 4 】



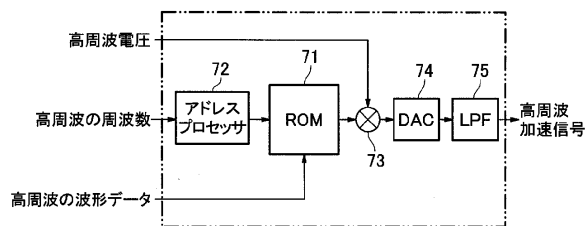
【 図 5 】



【 図 6 】



【 図 7 】





---

フロントページの続き

- (72)発明者 金澤 光隆  
千葉県千葉市稲毛区穴川四丁目9番1号 独立行政法人放射線医学総合研究所内
- (72)発明者 杉浦 彰則  
千葉県千葉市稲毛区穴川四丁目9番1号 独立行政法人放射線医学総合研究所内
- (72)発明者 前田 一尚  
東京都港区芝浦一丁目1番1号 株式会社東芝内

審査官 藤本 加代子

- (56)参考文献 特開平10-233298(JP,A)  
特開2001-006899(JP,A)  
特開2002-367800(JP,A)  
特開平03-285300(JP,A)  
特開2006-049208(JP,A)

- (58)調査した分野(Int.Cl., DB名)  
H05H 13/04  
H05H 7/18  
JSTPlus(JDreamII)