

(19) 日本国特許庁(JP)

(12) 特許公報(B2)

(11) 特許番号

特許第6487558号  
(P6487558)

(45) 発行日 平成31年3月20日(2019.3.20)

(24) 登録日 平成31年3月1日(2019.3.1)

(51) Int.Cl.		F I			
GO 1 R 29/10	(2006.01)	GO 1 R	29/10	A	
GO 1 R 29/08	(2006.01)	GO 1 R	29/08	D	
		GO 1 R	29/10	Z	

請求項の数 14 (全 30 頁)

(21) 出願番号	特願2017-534474 (P2017-534474)	(73) 特許権者	504176911 国立大学法人大阪大学 大阪府吹田市山田丘1番1号
(86) (22) 出願日	平成28年8月9日(2016.8.9)	(74) 代理人	100109210 弁理士 新居 広守
(86) 国際出願番号	PCT/JP2016/073482	(72) 発明者	久武 信太郎 大阪府吹田市山田丘1番1号 国立大学法 人大阪大学内
(87) 国際公開番号	W02017/026494	(72) 発明者	永妻 忠夫 大阪府吹田市山田丘1番1号 国立大学法 人大阪大学内
(87) 国際公開日	平成29年2月16日(2017.2.16)		
審査請求日	平成30年1月23日(2018.1.23)	審査官	菅藤 政明
(31) 優先権主張番号	特願2015-158917 (P2015-158917)		
(32) 優先日	平成27年8月11日(2015.8.11)		
(33) 優先権主張国	日本国(JP)		
(31) 優先権主張番号	特願2016-43860 (P2016-43860)		
(32) 優先日	平成28年3月7日(2016.3.7)		
(33) 優先権主張国	日本国(JP)		

最終頁に続く

(54) 【発明の名称】 電磁界測定方法、電磁界測定装置及び位相イメージング装置

(57) 【特許請求の範囲】

【請求項1】

電界又は磁界を測定するために空間に第1プローブ及び第2プローブを配置する配置ステップと、

前記第1プローブで得られた信号に参照信号発生器で生成された参照信号を乗じる第1乗算ステップと、

前記第1乗算ステップで得られた信号に、前記第2プローブで得られた信号を乗じる第2乗算ステップと、

前記第2乗算ステップで得られた信号から、前記参照信号発生器で生成された参照信号に同期する信号成分を抽出する同期検波ステップと

を含む電磁界測定方法。

【請求項2】

前記配置ステップでは、前記第2プローブを前記空間において固定した状態で、前記第1プローブを前記空間における複数の測定点に順に移動させて配置し、

前記第1乗算ステップ、前記第2乗算ステップ及び前記同期検波ステップは、前記配置ステップにおいて前記第1プローブが前記複数の測定点のそれぞれに配置される毎に、実行される

請求項1記載の電磁界測定方法。

【請求項3】

前記配置ステップでは、前記第1プローブと前記第2プローブとの間隔を固定した状態

で、前記第 1 プローブ及び前記第 2 プローブを一体的に前記空間における複数の測定点に順に移動させて配置し、

前記第 1 乗算ステップ、前記第 2 乗算ステップ及び前記同期検波ステップは、前記配置ステップにおいて前記第 1 プローブ及び前記第 2 プローブが前記複数の測定点のそれぞれに配置される毎に、実行される

請求項 1 記載の電磁界測定方法。

【請求項 4】

前記配置ステップでは、現在の測定点における前記第 1 プローブ及び前記第 2 プローブの一方の位置が、次の測定点における前記第 1 プローブ及び前記第 2 プローブの他方の位置に一致することとなるように、前記第 1 プローブ及び前記第 2 プローブを一体的に移動させる

10

請求項 3 記載の電磁界測定方法。

【請求項 5】

前記配置ステップでは、所定時点における前記第 1 プローブと前記第 2 プローブとの間隔を分割して得られる複数の位置のそれぞれに、前記第 1 プローブ及び前記第 2 プローブの一方が順に位置することとなるように、前記第 1 プローブ及び前記第 2 プローブを一体的に移動させる

請求項 3 記載の電磁界測定方法。

【請求項 6】

さらに、前記第 1 プローブで得られた信号に前記参照信号を乗じ、得られた信号に前記第 1 プローブで得られた信号を乗じ、得られた信号から、前記参照信号に同期する信号成分を抽出することで、前記参照信号のオフセット位相を算出するオフセット位相算出ステップを含む

20

請求項 3 ~ 5 のいずれか 1 項に記載の電磁界測定方法。

【請求項 7】

さらに、前記複数の測定点の一つについて、前記配置ステップにおける前記第 1 プローブ及び前記第 2 プローブの位置を入れ換えた状態で、前記第 1 乗算ステップ、前記第 2 乗算ステップ及び前記同期検波ステップを実行し、前記配置ステップにおいて前記同期検波ステップで抽出された信号成分の位相と、前記入れ換え後における前記同期検波ステップで抽出された信号成分の位相とを加算することで、前記参照信号のオフセット位相を算出するオフセット位相算出ステップを含む

30

請求項 3 ~ 5 のいずれか 1 項に記載の電磁界測定方法。

【請求項 8】

電界又は磁界を測定するために空間に配置される第 1 プローブ及び第 2 プローブと、参照信号を生成する参照信号発生器と、前記第 1 プローブで得られた信号に前記参照信号を乗じる第 1 乗算器と、前記第 1 乗算器から出力された信号に前記第 2 プローブで得られた信号を乗じる第 2 乗算器と、

前記第 2 乗算器から出力された信号から、前記参照信号に同期する信号成分を抽出する同期検波器と

40

を備える電磁界測定装置。

【請求項 9】

さらに、

前記第 1 プローブから出力される信号の周波数をより低い中間周波数に変換する第 1 周波数変換器と、

前記第 2 プローブから出力される信号の周波数を前記中間周波数に変換する第 2 周波数変換器とを備え、

前記第 1 乗算器は、前記第 1 周波数変換器から出力された信号に前記参照信号を乗じ、

前記第 2 乗算器は、前記第 1 乗算器から出力された信号に前記第 2 周波数変換器から出力された信号を乗じる

50

請求項 8 記載の電磁界測定装置。

【請求項 1 0】

さらに、前記第 1 乗算器から出力された信号から、前記第 1 乗算器に入力された信号の周波数と前記参照信号の周波数との和又は差の周波数をもつ信号成分を選択するフィルタを備え、

前記第 2 乗算器は、前記フィルタから出力された信号に前記第 2 プローブから出力される信号を乗じる

請求項 8 記載の電磁界測定装置。

【請求項 1 1】

前記第 1 プローブ及び前記第 2 プローブは、検出した電界に応じた光信号を出力し、

前記第 1 周波数変換器は、前記第 1 プローブから出力された光信号を、当該光信号の周波数よりも低い中間周波数の電気信号に変換し、

前記第 2 周波数変換器は、前記第 2 プローブから出力された光信号を前記中間周波数の電気信号に変換し、

前記第 1 乗算器は、前記第 1 周波数変換器から出力された電気信号に前記参照信号を乗じ、

前記第 2 乗算器は、前記第 1 乗算器から出力された信号に前記第 2 周波数変換器から出力された電気信号を乗じる

請求項 9 記載の電磁界測定装置。

【請求項 1 2】

電界又は磁界を測定するために空間に配置される第 1 プローブ及び第 2 プローブと、

前記第 1 プローブで得られた信号をデジタル値に変換する第 1 A / D 変換器と、

前記第 2 プローブで得られた信号をデジタル値に変換する第 2 A / D 変換器と、

前記第 1 A / D 変換器及び前記第 2 A / D 変換器から出力された信号を処理するコンピュータ装置とを備え、

前記コンピュータ装置は、

前記第 1 A / D 変換器から出力された信号に参照信号を乗じる第 1 乗算ステップと、

前記第 1 乗算ステップで得られた信号に前記第 2 A / D 変換器から出力された信号を乗じる第 2 乗算ステップと、

前記第 2 乗算ステップで得られた信号から、前記参照信号に同期する信号成分を抽出する同期検波ステップと

を実行する電磁界測定装置。

【請求項 1 3】

請求項 1 2 記載のコンピュータ装置が実行するステップを含むプログラム。

【請求項 1 4】

電磁波が対象物を透過又は反射するときの前記電磁波の位相シフト量を測定して画像化する位相イメージング装置であって、

電磁波を出射する電磁波源と、

前記電磁波源から出射された電磁波を第 1 電磁波及び第 2 電磁波に分岐させる光学装置と、

前記光学装置で分岐された前記第 1 電磁波及び前記第 2 電磁波のうち前記第 1 電磁波だけが前記対象物における 2 次元状の複数の測定点を順に走査しながら入射するように、前記対象物と前記第 1 電磁波との相対的位置関係を変化させる機構部と、

前記対象物を透過又は反射した前記第 1 電磁波と前記対象物を透過及び反射していない前記第 2 電磁波との位相差を、前記複数の測定点のそれぞれについて、測定する請求項 8 ~ 1 2 のいずれか 1 項に記載の電磁界測定装置と、

前記電磁界測定装置で測定された位相差を、前記複数の測定点に対応させて画像化する画像化装置とを備え、

前記電磁界測定装置は、当該電磁界測定装置が備える第 1 プローブ及び第 2 プローブを用いて、それぞれ、前記第 1 電磁波及び前記第 2 電磁波を検出し、

10

20

30

40

50

前記画像化装置は、前記電磁界測定装置が備える同期検波器で抽出された信号成分の位相を前記位相差として画像化する

位相イメージング装置。

【発明の詳細な説明】

【技術分野】

【0001】

本発明は、電磁界測定方法及び電磁界測定装置に関し、特に、放射電界又は放射磁界の振幅及び位相の空間分布を安定かつ精密に測定するのに適した電磁界測定方法等に関する。

【背景技術】

10

【0002】

アンテナからの放射パターンの解析等には、放射電界又は放射磁界の振幅及び位相の空間分布を測定する必要がある。

【0003】

従来、放射電界又は放射磁界の振幅及び位相の空間分布を測定する技術として、被測定系と測定系とを同期させる手法が知られている（例えば、特許文献1参照）。

【先行技術文献】

【特許文献】

【0004】

【特許文献1】特開2005-134169号公報

20

【発明の概要】

【発明が解決しようとする課題】

【0005】

しかしながら、被測定系と測定系とを同期させる手法では、信号発生源に対して外部から同期信号を注入できない場合、例えば、信号発生源とアンテナ等の放射体とが集積された回路（オンチップアンテナ）である場合には、位相測定のために測定系を被測定信号に同期させる必要がある。ところが、広いロックレンジを有する位相同期ループを構成することは一般に困難である。

【0006】

そこで、本発明は、被測定系と測定系とを同期させることなく、安定かつ精密に電界又は磁界の空間分布を測定できる電磁界測定方法、電磁界測定装置及び位相イメージング装置を提供することを目的とする。

30

【課題を解決するための手段】

【0007】

上記目的を達成するために、本発明の一形態に係る電磁界測定方法は、電界又は磁界を測定するために空間に第1プローブ及び第2プローブを配置する配置ステップと、前記第1プローブで得られた信号に参照信号発生器で生成された参照信号を乗じる第1乗算ステップと、前記第1乗算ステップで得られた信号に、前記第2プローブで得られた信号を乗じる第2乗算ステップと、前記第2乗算ステップで得られた信号から、前記参照信号発生器で生成された参照信号に同期する信号成分を抽出する同期検波ステップとを含む。

40

【0008】

これにより、被測定電磁界に配置された2本のプローブを用いることで、被測定電磁界における電界又は磁界の位相及び周波数ゆらぎがキャンセルされるので、被測定電磁界における電界又は磁界の周波数が変動する場合であっても、被測定系と測定系とを同期させることなく、安定かつ精密に電界又は磁界の空間分布が測定される。その結果、信号発生源とアンテナ等の放射体とが集積された回路（オンチップアンテナ）からの放射パターンを、被測定系と測定系とを同期させることなく測定できる。

【0009】

ここで、前記配置ステップでは、前記第2プローブを前記空間において固定した状態で、前記第1プローブを前記空間における複数の測定点に順に移動させて配置し、前記第1

50

乗算ステップ、前記第2乗算ステップ及び前記同期検波ステップは、前記配置ステップにおいて前記第1プローブが前記複数の測定点のそれぞれに配置される毎に、実行されてもよい。

【0010】

これにより、第1プローブを空間における複数の測定点に順に移動させて計測を繰り返すことで、被測定電磁界における電界又は磁界の振幅及び位相の空間分布が測定される。

【0011】

また、前記配置ステップでは、前記第1プローブと前記第2プローブとの間隔を固定した状態で、前記第1プローブ及び前記第2プローブを一体的に前記空間における複数の測定点に順に移動させて配置し、前記第1乗算ステップ、前記第2乗算ステップ及び前記同期検波ステップは、前記配置ステップにおいて前記第1プローブ及び前記第2プローブが前記複数の測定点のそれぞれに配置される毎に、実行されてもよい。

10

【0012】

これにより、第1プローブ及び第2プローブの一方を固定しておいて他方を空間走査することが困難な状況においても、測定点間の位相関係が求められ、結果として、被測定電磁界における電界又は磁界の振幅及び位相の空間分布の測定が可能になる。

【0013】

また、前記配置ステップでは、現在の測定点における前記第1プローブ及び前記第2プローブの一方の位置が、次の測定点における前記第1プローブ及び前記第2プローブの他方の位置に一致することとなるように、前記第1プローブ及び前記第2プローブを一体的に移動させてもよい。

20

【0014】

これにより、複数の測定点における位相については、隣接する2つの測定点間での位相関係が求まるので、結果として、複数の測定点の全てにおける位相が求められる。

【0015】

また、前記配置ステップでは、所定時点における前記第1プローブと前記第2プローブとの間隔を分割して得られる複数の位置のそれぞれに、前記第1プローブ及び前記第2プローブの一方が順に位置することとなるように、前記第1プローブ及び前記第2プローブを一体的に移動させてもよい。

【0016】

これにより、第1プローブと第2プローブとの間隔よりも小さい間隔で、つまり、高い空間分解能で、測定点間の位相関係が求められ、結果として、被測定電磁界における電界又は磁界の振幅及び位相の空間分布が測定される。

30

【0017】

またさらに、前記第1プローブで得られた信号に前記参照信号を乗じ、得られた信号に前記第1プローブで得られた信号を乗じ、得られた信号から、前記参照信号に同期する信号成分を抽出することで、前記参照信号のオフセット位相を算出するオフセット位相算出ステップを含んでもよい。

【0018】

これにより、複数本のプローブを一体的に移動させる場合において、被測定電磁界の計測と同時に参照信号のオフセット位相が求まり、同期検波ステップで抽出される信号成分の位相からノイズとしてのオフセット位相  $\theta_{ff}$  を差し引くことができるので、高い精度で位相差が求められる。

40

【0019】

また、さらに、前記複数の測定点の一つについて、前記配置ステップにおける前記第1プローブ及び前記第2プローブの位置を入れ換えた状態で、前記第1乗算ステップ、前記第2乗算ステップ及び前記同期検波ステップを実行し、前記配置ステップにおいて前記同期検波ステップで抽出された信号成分の位相と、前記入れ換え後における前記同期検波ステップで抽出された信号成分の位相とを加算することで、前記参照信号のオフセット位相を算出するオフセット位相算出ステップを含んでもよい。

50

## 【0020】

これにより、複数本のプローブを一体的に移動させる場合において、プローブを入れ換えることで参照信号のオフセット位相が求まり、同期検波ステップで抽出される信号成分の位相からノイズとしてのオフセット位相を差し引くことができるので、高い精度で位相差が求められる。

## 【0021】

また、上記目的を達成するために、本発明の一形態に係る電磁界測定装置は、電界又は磁界を測定するために空間に配置される第1プローブ及び第2プローブと、参照信号を生成する参照信号発生器と、前記第1プローブで得られた信号に前記参照信号を乗じる第1乗算器と、前記第1乗算器から出力された信号に前記第2プローブで得られた信号を乗じる第2乗算器と、前記第2乗算器から出力された信号から、前記参照信号に同期する信号成分を抽出する同期検波器とを備える。

10

## 【0022】

これにより、被測定電磁界に配置された2本のプローブを用いることで、被測定電磁界における電界又は磁界の位相及び周波数ゆらぎがキャンセルされるので、被測定電磁界における電界又は磁界の周波数が変動する場合であっても、被測定系と測定系とを同期させることなく、安定かつ精密に電界又は磁界の空間分布が測定される。その結果、信号発生源とアンテナ等の放射体とが集積された回路（オンチップアンテナ）からの放射パターンを、被測定系と測定系とを同期させることなく測定できる。

20

## 【0023】

ここで、さらに、前記第1プローブから出力される信号の周波数をより低い中間周波数に変換する第1周波数変換器と、前記第2プローブから出力される信号の周波数を前記中間周波数に変換する第2周波数変換器とを備え、前記第1乗算器は、前記第1周波数変換器から出力された信号に前記参照信号を乗じ、前記第2乗算器は、前記第1乗算器から出力された信号に前記第2周波数変換器から出力された信号を乗じてよい。

## 【0024】

これにより、2本のプローブから出力される被測定電界又は被測定磁界の振幅及び位相に応じた信号（RF信号）の周波数がダウンコンバートされるので、周波数が比較的高い電磁界（例えば、マイクロ波、ミリ波、テラヘルツ波等の電磁界）についても測定が可能になる。

30

## 【0025】

また、さらに、前記第1乗算器から出力された信号から、前記第1乗算器に入力された信号の周波数と前記参照信号の周波数との和又は差の周波数をもつ信号成分を選択するフィルタを備え、前記第2乗算器は、前記フィルタから出力された信号に前記第2プローブから出力される信号を乗じてよい。

## 【0026】

これにより、第1乗算器から出力された信号のうち、第1乗算器に入力された信号及び参照信号それぞれの周波数の差又は和の周波数をもつ不要な信号成分が除去され、和又は差の周波数をもつ必要な信号成分だけが選択されて出力されるので、続く信号処理が安定化される。

40

## 【0027】

また、前記第1プローブ及び前記第2プローブは、検出した電界に応じた光信号を出力し、前記第1周波数変換器は、前記第1プローブから出力された光信号を、当該光信号の周波数よりも低い中間周波数の電気信号に変換し、前記第2周波数変換器は、前記第2プローブから出力された光信号を前記中間周波数の電気信号に変換し、前記第1乗算器は、前記第1周波数変換器から出力された電気信号に前記参照信号を乗じ、前記第2乗算器は、前記第1乗算器から出力された信号に前記第2周波数変換器から出力された電気信号を乗じもよい。

## 【0028】

これにより、2本のプローブからは光信号で出力されて処理されるので、周波数が比較

50

的高い電磁界（例えば、マイクロ波、ミリ波、テラヘルツ波等の電磁界）に対して安定した測定が可能になる。

【0029】

また、上記目的を達成するために、本発明の別の形態に係る電磁界測定装置は、電界又は磁界を測定するために空間に配置される第1プローブ及び第2プローブと、前記第1プローブで得られた信号をデジタル値に変換する第1A/D変換器と、前記第2プローブで得られた信号をデジタル値に変換する第2A/D変換器と、前記第1A/D変換器及び前記第2A/D変換器から出力された信号を処理するコンピュータ装置とを備え、前記コンピュータ装置は、前記第1A/D変換器から出力された信号に参照信号を乗じる第1乗算ステップと、前記第1乗算ステップで得られた信号に前記第2A/D変換器から出力された信号を乗じる第2乗算ステップと、前記第2乗算ステップで得られた信号から、前記参照信号に同期する信号成分を抽出する同期検波ステップとを実行してもよい。

10

【0030】

これにより、雑音キャンセル処理がデジタル信号処理によって実現されるので、DSP (Digital Signal Processor) やデジタルフィルタ、FPGA (Field-Programmable Gate Array) 等を含む論理回路又はプログラムによって高い精度で安定した信号処理が行われる。

【0031】

また、上記目的を達成するために、本発明の別の形態に係る位相イメージング装置は、電磁波が対象物を透過又は反射するときの前記電磁波の位相シフト量を測定して画像化する位相イメージング装置であって、電磁波を出射する電磁波源と、前記電磁波源から出射された電磁波を第1電磁波及び第2電磁波に分岐させる光学装置と、前記光学装置で分岐された前記第1電磁波及び前記第2電磁波のうち前記第1電磁波だけが前記対象物における2次元状の複数の測定点を順に走査しながら入射するように、前記対象物と前記第1電磁波との相対的位置関係を変化させる機構部と、前記対象物を透過又は反射した前記第1電磁波と前記対象物を透過及び反射していない前記第2電磁波との位相差を、前記複数の測定点のそれぞれについて、測定する上記電磁界測定装置と、前記電磁界測定装置で測定された位相差を、前記複数の測定点に対応させて画像化する画像化装置とを備え、前記電磁界測定装置は、当該電磁界測定装置が備える第1プローブ及び第2プローブを用いて、それぞれ、前記第1電磁波及び前記第2電磁波を検出し、前記画像化装置は、前記電磁界測定装置が備える同期検波器で抽出された信号成分の位相を前記位相差として画像化してもよい。

20

30

【0032】

これにより、周波数ゆらぎを有する電磁波源を用いた場合であっても、周波数ゆらぎがキャンセルされた位相差による画像化が行われるので、安定して高精度な位相イメージングが可能になる。

【0033】

なお、本発明は、上記のような電磁界測定方法及び電磁界測定装置として実現できただけでなく、上記電磁界測定装置が備えるコンピュータ装置が実行するステップを含むプログラムとして実現してもよいし、そのプログラムが記録されたCD-ROM等のコンピュータ読み取り可能な記録媒体として実現してもよい。

40

【発明の効果】

【0034】

本発明により、被測定系と測定系とを同期させることなく、安定かつ精密に電界又は磁界の空間分布を測定できる電磁界測定方法及び電磁界測定装置が提供される。

【0035】

よって、携帯電話やスマートフォン等の集積化された回路を備える無線通信装置が広く普及してきた今日において、アンテナからの放射パターンの解析等に好適な本発明の実用的価値は極めて高い。

【図面の簡単な説明】

50

## 【0036】

【図1】図1は、本発明の実施の形態における電磁界測定装置の構成を示すブロック図である。

【図2】図2は、本発明の実施の形態における電磁界測定装置を用いた電磁界測定方法の手順を示すフローチャートである。

【図3】図3は、本発明の実施の形態における電磁界測定装置の動作確認のための実験系の構成を示すブロック図である。

【図4A】図4Aは、図3に示された実験系で得られた検出信号の波形を示す図である。

【図4B】図4Bは、従来技術の信号処理で得られた検出信号の波形を示す図である。

【図5】図5は、図3に示される実験系において2つの発振器の一方から出力される信号の位相を時間に対して線形に変化させた時に得られた検出信号の波形を示す図である。

【図6】図6は、本発明の実施の形態の第1変形例に係る電磁界測定装置の構成を示すブロック図である。

【図7】図7は、本発明の実施の形態の第1変形例に係る電磁界測定装置を用いた実験の結果を示す図である。

【図8】図8は、本発明の実施の形態の第2変形例に係る電磁界測定装置が備える雑音キャンセル部の構成を示すブロック図である。

【図9】図9は、本発明の実施の形態の第2変形例に係る電磁界測定装置を用いた実験の結果を示す図である。

【図10】図10は、2本のプローブを一体的に移動させて空間走査する電磁界測定方法を説明する図である。

【図11】図11は、図10に示される、2本のプローブを一体的に走査させる方法による実験によって得られた測定値とシミュレーション結果とを示す図である。

【図12】図12は、測定用プローブ及び参照用プローブを、プローブ間隔  $x$  よりも小さい距離だけ、一体的に、ずらしながら移動させて空間走査する電磁界測定方法を説明する図である。

【図13】図13は、図12に示される電磁界測定方法による実験によって得られた測定値とシミュレーション結果とを示す図である。

【図14】図14は、本発明の実施の形態の電磁界測定装置を用いた位相イメージング装置の構成を示すブロック図である。

【図15】図15は、図14に示される位相イメージング装置による実験を説明するための図である。

【図16】図16は、参照信号発生器から同期検波器に入力される参照信号に含まれるオフセット位相の算出方法を説明するための図である。

【図17】図17は、本発明に係る電磁界測定装置によって得られた被測定電磁界の位相の空間分布を可視化した例を示す図である。

## 【発明を実施するための形態】

## 【0037】

以下、本発明の実施の形態について、図面を用いて詳細に説明する。なお、以下で説明する実施の形態は、いずれも本発明の好ましい一具体例を示すものである。以下の実施の形態で示される数値、形状、材料、構成要素、構成要素の配置位置及び接続形態、ステップ、ステップの順序等は、一例であり、本発明を限定する主旨ではない。また、以下の実施の形態における構成要素のうち、本発明の最上位概念を示す独立請求項に記載されていない構成要素については、より好ましい形態を構成する任意の構成要素として説明される。

## 【0038】

図1は、本発明の実施の形態における電磁界測定装置10の構成を示すブロック図である。電磁界測定装置10は、アンテナ等からの放射電界又は放射磁界の振幅及び位相の空間分布を測定する装置であり、大きく分けて、検出部20及び雑音キャンセル部30から構成される。

10

20

30

40

50

## 【 0 0 3 9 】

検出部 2 0 は、2 つのプロープを用いて被測定電磁界における電界又は磁界を検出するための処理部であり、第 1 プロープ 2 1、第 2 プロープ 2 2、第 1 周波数変換器 2 3 及び第 2 周波数変換器 2 4 で構成される。

## 【 0 0 4 0 】

第 1 プロープ 2 1 は、被測定電磁界の空間における測定点に配置される測定用の電界プロープ又は磁界プロープであり、測定点における被測定電界又は被測定磁界の振幅及び位相に応じた信号 ( R F 信号 ) を出力する。なお、測定点は、被測定電界又は被測定磁界の振幅及び位相の空間分布を計測するために予め定められた空間位置であり、例えば、一次元、二次元又は三次元のメッシュにおける格子点である。

10

## 【 0 0 4 1 】

第 2 プロープ 2 2 は、被測定電磁界の空間における基準点に固定して配置される参照用の電界プロープ又は磁界プロープであり、基準点における被測定電界又は被測定磁界の振幅及び位相に応じた信号 ( R F 信号 ) を出力する。なお、基準点は、測定点における被測定電界又は被測定磁界の位相の基準となる位相を検出するための位置であり、被測定電磁界の空間内であれば、いずれの位置であってもよい。

## 【 0 0 4 2 】

なお、本実施の形態では、第 1 プロープ 2 1 及び第 2 プロープ 2 2 は、いずれも、電界測定用のプロープ ( 電界プロープ ) であるとして、以下の説明をする。

## 【 0 0 4 3 】

第 1 周波数変換器 2 3 は、第 1 プロープ 2 1 から出力される R F 信号の周波数をより低い中間周波数 ( I F ) に変換するダウコンバータであり、例えば、第 1 プロープ 2 1 から出力される R F 信号と局部発振器 ( 図示せず ) から出力された L O ( L o c a l o s c i l l a t o r ) 信号とを混合することでそれら両信号の周波数の差の周波数 ( 中間周波数 ) をもつ第 1 I F 信号に変換するミキサである。具体的には、第 1 プロープ 2 1 から出力される R F 信号の周波数を  $f_{R F}$ 、L O 信号の周波数を  $f_{L O}$  とすると、第 1 周波数変換器 2 3 は、中間周波数  $f_{I F} (= | f_{R F} - f_{L O} | )$  の第 1 I F 信号を生成する。

20

## 【 0 0 4 4 】

第 2 周波数変換器 2 4 は、第 2 プロープ 2 2 から出力される R F 信号の周波数を、第 1 周波数変換器 2 3 が出力する信号の周波数と同じ中間周波数 ( I F ) に変換するダウコンバータであり、例えば、第 2 プロープ 2 2 から出力される R F 信号と上記 L O 信号とを混合することでそれら両信号の周波数の差の周波数 ( 中間周波数 ) をもつ第 2 I F 信号に変換するミキサである。具体的には、第 2 プロープ 2 2 から出力される R F 信号の周波数を  $f_{R F}$ 、L O 信号の周波数を  $f_{L O}$  とすると、第 2 周波数変換器 2 4 は、中間周波数  $f_{I F} (= | f_{R F} - f_{L O} | )$  の第 2 I F 信号を生成する。

30

## 【 0 0 4 5 】

なお、第 1 周波数変換器 2 3 及び第 2 周波数変換器 2 4 は、第 1 プロープ 2 1 及び第 2 プロープ 2 2 から出力される R F 信号の周波数が比較的高い場合 ( 例えば、マイクロ波、ミリ波、テラヘルツ波等 ) に設ければよく、R F 信号の周波数が数十 M H z 以下程度の比較的低い場合には、設けなくてもよい。この場合には、第 1 プロープ 2 1 から出力される R F 信号は雑音キャンセル部 3 0 の第 1 乗算器 3 2 に直接入力され、第 2 プロープ 2 2 から出力される R F 信号は雑音キャンセル部 3 0 の第 2 乗算器 3 4 に直接入力される。

40

## 【 0 0 4 6 】

雑音キャンセル部 3 0 は、被測定電磁界における電界又は磁界の位相及び周波数ゆらぎ ( R F 信号と L O 信号との相対的周波数ゆらぎも含む ) をキャンセルするための処理部であり、参照信号発生器 3 1、第 1 乗算器 3 2、フィルタ 3 3、第 2 乗算器 3 4 及び同期検波器 3 5 で構成される。なお、本実施の形態では、雑音キャンセル部 3 0 は、被測定電界の位相及び周波数ゆらぎをキャンセルするための処理部として機能する。

## 【 0 0 4 7 】

参照信号発生器 3 1 は、上述した位相及び周波数ゆらぎをキャンセルするのに用いられ

50

る参照信号を発生する回路であり、例えば、単一の周波数  $f_s$  の信号を発生する。

【0048】

第1乗算器32は、第1プローブ21で得られた信号に参照信号発生器31が発生した参照信号を乗じる乗算器であり、例えば、アナログ乗算器又はミキサである。本実施の形態では、第1プローブ21の後に第1周波数変換器23が接続されているので、第1乗算器32は、第1周波数変換器23から出力された第1IF信号に参照信号発生器31が発生した参照信号を乗じ、その結果、第1乗算器32に入力された信号の周波数（ここでは、中間周波数  $f_{IF}$ ）と参照信号の周波数  $f_s$  との和の周波数（ $f_s + f_{IF}$ ）及び差の周波数（ $f_s - f_{IF}$ ）をもつ信号成分を含む信号を出力する。

【0049】

フィルタ33は、第1乗算器32から出力された信号から、第1乗算器32に入力された信号の周波数（ここでは、中間周波数  $f_{IF}$ ）と参照信号の周波数  $f_s$  との和又は差の周波数（本実施の形態では、差の周波数（ $f_s - f_{IF}$ ））をもつ信号成分を選択する回路であり、例えば、バンドパスフィルタ又はローパスフィルタである。なお、RF信号の周波数とLO信号の周波数との関係によっては、このフィルタ33は、必ずしも必要ではない。

【0050】

第2乗算器34は、第1乗算器32から出力された信号に第2プローブ22で得られた信号を乗じる乗算器であり、例えば、アナログ乗算器又はミキサである。本実施の形態では、第1乗算器32の後にフィルタ33が接続され、第2プローブ22の後に第2周波数変換器24が接続されているので、第2乗算器34は、フィルタ33から出力された信号に第2周波数変換器24から出力された第2IF信号を乗じ、その結果、フィルタ33から出力された信号の周波数（ $f_s - f_{IF}$ ）と第2IF信号の周波数（ $f_{IF}$ ）との和の周波数  $f_s$ （ $= f_s - f_{IF} + f_{IF}$ ）及び差の周波数（ $f_s - 2f_{IF}$ ）をもつ信号成分を含む信号を出力する。

【0051】

同期検波器35は、第2乗算器34から出力された信号から、参照信号に同期する信号成分（周波数  $f_s$  をもつ信号成分）を抽出する回路であり、例えば、第2乗算器34から出力された信号を入力とし、参照信号発生器31が発生した参照信号と同期する信号成分だけを抽出するロックインアンプである。同期検波器35から出力される検出信号は、第1プローブ21が配置された測定点における被測定電界の振幅及び位相（被測定電界において第2プローブ22が配置された基準点における被測定電界の位相を基準とする位相）を示している。このように、同期検波器35では、第2乗算器34から出力された信号のうち、被測定電界の位相及び周波数ゆらぎがキャンセルされ、かつ、中間周波数に依存する信号成分がキャンセルされた、参照信号の周波数  $f_s$ （ $= f_s - f_{IF} + f_{IF}$ ）をもつ信号成分だけが抽出され、被測定電界の振幅及び位相が特定される。

【0052】

なお、第2乗算器34と同期検波器35との間に、第2乗算器34から出力された信号から周波数  $f_s$  の信号成分だけを選択して出力するフィルタ（バンドパスフィルタ等）を設けてもよい。

【0053】

次に、以上のように構成された本実施の形態における電磁界測定装置10の動作及び測定原理について、説明する。

【0054】

第1プローブ21から出力されたRF信号は、第1周波数変換器23に入力され、第1周波数変換器23において、LO信号と混合され、両信号の周波数の差の周波数（中間周波数）をもつ信号に変換される。第1周波数変換器23から出力される信号  $S_a$  は、以下の式1で表わされる。

【0055】

$$S_a = A_1 \cos \{ 2 f_{IF} t + \phi_n(t) + \dots \} \quad \text{式 1}$$

10

20

30

40

50

## 【 0 0 5 6 】

ここで、 $A_1$  は、第 1 プローブ 2 1 が配置された測定点における被測定電界の振幅に対応し、 $f_{IF}$  は、中間周波数であり、 $\phi_n(t)$  は、その被測定電界の位相ゆらぎであり、 $\phi$  は、測定点における被測定電界の位相（第 2 プローブ 2 2 が配置された基準点での被測定電界の位相を基準とする位相）である。なお、第 1 周波数変換器 2 3 を用いない場合には、上記式 1 は、第 1 プローブ 2 1 からの出力信号を表わす。そのときには、 $f_{IF}$  は、被測定電界の周波数（RF 信号の周波数）である。

## 【 0 0 5 7 】

一方、第 2 プローブ 2 2 から出力された RF 信号は、第 2 周波数変換器 2 4 に入力され、第 2 周波数変換器 2 4 において、LO 信号と混合され、両信号の周波数の差の周波数（中間周波数）をもつ信号に変換される。第 2 周波数変換器 2 4 から出力される信号  $S_b$  は、以下の式 2 で表わされる。

## 【 0 0 5 8 】

$$S_b = A_2 \cos \{ 2 f_{IF} t + \phi_n(t) \} \quad \text{式 2}$$

## 【 0 0 5 9 】

ここで、 $A_2$  は、第 2 プローブ 2 2 が配置された基準点における被測定電界の振幅に対応し、 $f_{IF}$  は、中間周波数であり、 $\phi_n(t)$  は、その被測定電界の位相ゆらぎである。なお、第 2 周波数変換器 2 4 を用いない場合には、上記式 2 は、第 2 プローブ 2 2 からの出力信号を表わす。そのときには、 $f_{IF}$  は、被測定電界の周波数（RF 信号の周波数）である。

## 【 0 0 6 0 】

第 1 周波数変換器 2 3 から出力された信号は、第 1 乗算器 3 2 に入力され、第 1 乗算器 3 2 において、参照信号発生器 3 1 からの参照信号が乗じられることで、中間周波数と参照信号の周波数との和の周波数及び差の周波数をもつ信号成分を含む信号に変換される。そして、第 1 乗算器 3 2 から出力された信号は、フィルタ 3 3 に入力され、フィルタ 3 3 において、中間周波数と参照信号の周波数との和又は差の周波数（本実施の形態では、差の周波数）をもつ信号成分が選択される。フィルタ 3 3 から出力される信号  $S_c$  は、以下の式 3 で表わされる。

## 【 0 0 6 1 】

$$S_c = (A_1 / 2) \cos \{ 2 (f_s - f_{IF}) t + \phi_s - \phi_n(t) \} \quad \text{式 3}$$

## 【 0 0 6 2 】

ここで、 $f_s$  は、参照信号の周波数であり、 $\phi_s$  は、被測定電界の位相に対する参照信号の位相である。

## 【 0 0 6 3 】

フィルタ 3 3 から出力された信号は、第 2 乗算器 3 4 に入力され、第 2 乗算器 3 4 において、第 2 プローブ 2 2 で得られた信号  $S_b$  が乗じられ、その結果、フィルタ 3 3 から出力された信号  $S_c$  の周波数と第 2 プローブ 2 2 で得られた信号  $S_b$  の周波数との和の周波数及び差の周波数をもつ信号成分を含む信号が出力される。第 2 乗算器 3 4 から出力される信号のうち、フィルタ 3 3 から出力された信号  $S_c$  の周波数と第 2 プローブ 2 2 で得られた信号  $S_b$  の周波数との和の周波数をもつ信号成分  $S_d$  は、以下の式 4 で表わされる。

## 【 0 0 6 4 】

$$S_d = (A_1 A_2 / 4) \cos \{ 2 f_s t + \phi_s + \phi_n(t) \} \quad \text{式 4}$$

## 【 0 0 6 5 】

この信号成分  $S_d$  は、フィルタ 3 3 から出力された信号  $S_c$ （式 3）に存在した、被測定電界の位相ゆらぎ  $\phi_n(t)$  がキャンセルされ、かつ、中間周波数  $f_{IF}$  に依存する周波数成分がキャンセル（ $f_s - f_{IF} + f_{IF}$ ）された、参照信号の周波数  $f_s$  をもつ信号成分である。なお、位相ゆらぎがキャンセルされることは、周波数ゆらぎもキャンセルされることを意味する。

## 【 0 0 6 6 】

第 2 乗算器 3 4 から出力された信号は、同期検波器 3 5 に入力され、同期検波器 3 5 に

10

20

30

40

50

において、参照信号発生器 3 1 からの参照信号と同期する信号成分  $S_d$  だけが抽出される。同期検波器 3 5 で抽出される信号成分の振幅  $A$  及び位相  $\theta$  は、それぞれ、以下の式 5 及び式 6 で表わされる。

【 0 0 6 7 】

$$A = A_1 A_2 / 4 \quad \text{式 5}$$

$$\theta = \theta_1 - \theta_2 \quad \text{式 6}$$

【 0 0 6 8 】

同期検波器 3 5 で得られた振幅  $A$  は、被測定電界における、測定点での振幅  $A_1$  と基準点での振幅  $A_2$  との積に対応し、同期検波器 3 5 で得られた位相  $\theta$  は、基準点での位相を基準とする測定点での位相  $\theta_d$  を示す。このようにして、基準点を基準とする測定点における被測定電界の振幅及び位相が測定される。

10

【 0 0 6 9 】

なお、上記式 1 ~ 式 6 を用いた説明では、同一時刻  $t$  における第 1 プローブ 2 1 及び第 2 プローブ 2 2 からの出力信号が用いられたが、このような時間の同一性は、説明の便宜上であり、必須ではない。例えば、位相ゆらぎ  $\theta_n(t)$  に応じて許容される範囲内であれば、異なるタイミングで得られた第 1 プローブ 2 1 及び第 2 プローブ 2 2 からの出力信号が用いられてもよいし、電磁界発生源から第 1 プローブ 2 1 及び第 2 プローブ 2 2 までの距離（つまり、伝搬時間）に差があってもよい。

【 0 0 7 0 】

このように、被測定電界における第 1 の測定点での振幅及び位相の測定を終えると、続いて、第 2 プローブ 2 2 を基準点に固定したまま、第 1 プローブ 2 1 を第 2 の測定点に移動させ、再び、同様の信号処理によって、第 2 の測定点における被測定電界の振幅及び位相を測定する。このような測定を、予め定められた全ての測定点について、繰り返す。このような測定手順（電磁界測定方法）をまとめると、図 2 に示されるフローチャートとなる。

20

【 0 0 7 1 】

図 2 は、本実施の形態における電磁界測定装置 1 0 を用いた電磁界測定方法の手順を示すフローチャートである。ここでは、電界の空間分布を得るための主要なステップが示されている。

【 0 0 7 2 】

まず、被測定電界の空間における測定点に第 1 プローブ 2 1 を配置し、基準点に第 2 プローブ 2 2 を配置する（1 回目の配置ステップ S 1）。

30

【 0 0 7 3 】

次に、第 1 乗算器 3 2 により、第 1 プローブ 2 1 で得られた信号に参照信号発生器 3 1 で生成された参照信号を乗じる（第 1 乗算ステップ S 2）。なお、第 1 プローブ 2 1 から出力される信号をより低い周波数（中間周波数）に変換する必要がある場合には、第 1 周波数変換器 2 3 により、第 1 プローブ 2 1 から出力される信号の周波数を中間周波数に変換した後に、第 1 乗算器 3 2 による乗算を行う。

【 0 0 7 4 】

続いて、第 2 乗算器 3 4 により、第 1 乗算ステップ S 2 で得られた信号に、第 2 プローブ 2 2 で得られた信号を乗じる（第 2 乗算ステップ S 3）。なお、第 2 プローブ 2 2 から出力される信号をより低い周波数（中間周波数）に変換する必要がある場合には、第 2 周波数変換器 2 4 により、第 2 プローブ 2 2 から出力される信号の周波数を中間周波数に変換した後に、第 2 乗算器 3 4 による乗算を行う。さらに、必要に応じて、フィルタ 3 3 により、第 1 乗算器 3 2 から出力された信号から、中間周波数と参照信号の周波数との和又は差の周波数をもつ信号成分を選択した後に、第 2 乗算器 3 4 による乗算を行う。

40

【 0 0 7 5 】

次に、同期検波器 3 5 により、第 2 乗算ステップ S 3 で得られた信号から、参照信号発生器 3 1 で生成された参照信号に同期する信号成分を抽出する（同期検波ステップ S 4）。これにより、測定点における被測定電界の振幅及び位相が得られる。

50

## 【0076】

そして、予め定められた全ての測定点での測定が終了したか否かを判断し（S5）、終了していない場合には（S5でNo）、第2プローブ22を基準点に固定したまま、第1プローブ21を次の測定点に移動させて配置し（2回目以降の配置ステップS6）、同様の信号処理を繰り返す（S2～S4）。一方、全ての測定点での測定が終了した場合には（S5でYes）、測定を終了する。

## 【0077】

このように、配置ステップ（S1、S6）では、第2プローブ22を被測定電界の空間において固定した状態で、第1プローブ21を空間における複数の測定点に順に移動させて配置（空間走査）し、第1乗算ステップS2、第2乗算ステップS3及び同期検波ステップS4を、配置ステップS6において第1プローブ21が複数の測定点のそれぞれに配置される毎に、実行する。これにより、電磁界測定装置10による被測定電界の空間分布が得られる。

## 【0078】

なお、第1プローブ21及び第2プローブ22として、磁界測定用のプローブ（磁界プローブ）を採用した場合には、同様の原理により、被測定磁界の空間分布が得られる。

## 【0079】

以上のように、本実施の形態における電磁界測定装置10及び電磁界測定方法によれば、被測定電磁界に配置された2本のプローブを用いることで、雑音キャンセル部30において、被測定電磁界における電界又は磁界の位相及び周波数ゆらぎがキャンセルされる。よって、被測定電磁界における電界又は磁界の周波数が変動する場合であっても、被測定系と測定系とを同期させることなく、安定かつ精密に電界又は磁界の空間分布を測定できる。その結果、信号発生源とアンテナ等の放射体とが集積された回路（オンチップアンテナ）からの放射パターンを、被測定系と測定系とを同期させることなく測定できる。

## 【0080】

（原理実証の実験）

次に、上記実施の形態における電磁界測定装置10の雑音キャンセル部30が検出部20によらずに動作することを確認する実験を行ったので、説明する。

## 【0081】

図3は、実験系の構成を示すブロック図である。図3に示されるように、第1プローブ21及び第2プローブ22からの信号を、2chの発振器41及び42で模擬した。それぞれの周波数は、0.9MHzである。外部雑音源40を用いてそれぞれの信号の位相を変調している。つまり、雑音によって位相が変調された0.9MHzの信号を、雑音キャンセル部30（第1乗算器32及び第2乗算器34）に入力し、同期検波器35で得られた検出信号（0.9MHzの信号の振幅及び位相）を確認した。

## 【0082】

図4Aは、本発明に係る雑音キャンセル部30で得られた検出信号の波形（検出された振幅と位相の時間変化）を示す図である。図4Bは、従来技術の信号処理で得られた検出信号の波形（検出された振幅と位相の時間変化）を示す図である。図4A及び図4Bともに、横軸は時間を示し、左の縦軸は振幅（mV）を示し、右の縦軸は位相（deg.）を示す。図4A及び図4Bを比較して分かるように、従来技術によれば、検出信号には位相雑音が重畳されているが（図4B）、本発明に係る雑音キャンセル部30によれば、雑音成分がキャンセルされている（図4A）。

## 【0083】

図5は、図3に示される実験系において、発振器41及び42の一方から出力される信号の位相を時間に対して線形に変化させた時に得られた検出信号の波形を示す図である。図4A及び図4Bと同様に、横軸は時間を示し、左の縦軸は振幅（mV）を示し、右の縦軸は位相（deg.）を示す。この実験では、第1プローブ21及び第2プローブ22のうち一方を空間の一点に固定し、他方を空間走査することで、被測定電界の位相の空間分布を測定することを模擬している。図5から分かるように、位相雑音を伴った信号源で

10

20

30

40

50

ある発振器 4 1 及び 4 2 からの両信号間の相対位相が位相雑音を除去した状態で測定されている。

【 0 0 8 4 】

( その他の実施の形態 )

上記実験で実証されたように、本発明に係る電磁界測定装置は、検出部の種類及び検出方法を問わない。

【 0 0 8 5 】

図 6 は、上記実施の形態の第 1 変形例に係る電磁界測定装置 1 1 の構成を示すブロック図である。この電磁界測定装置 1 1 は、上記実施の形態における電磁界測定装置 1 0 の検出部 2 0 を E O ( E l e c t r o - O p t i c ) 型検出部 5 0 に置き換えたものに相当する。

10

【 0 0 8 6 】

E O 型検出部 5 0 は、2 つのプロープを用いて被測定電界を検出するための処理部であり、第 1 E O プロープ 5 1、第 2 E O プロープ 5 2、第 1 光サーキュレータ 5 3、第 2 光サーキュレータ 5 4、第 1 光フィルタ 5 5、第 2 光フィルタ 5 6、第 1 光検出器 5 7 及び第 2 光検出器 5 8 で構成される。第 1 E O プロープ 5 1 及び第 2 E O プロープ 5 2 は、被測定電界の振幅及び位相に応じた光信号 ( R F 信号 ) を出力する電気光学プロープである。第 1 光サーキュレータ 5 3 及び第 2 光サーキュレータ 5 4 は、光の進行方向を変えるものであり、それぞれ、光源から入射される光 L O 信号を第 1 E O プロープ 5 1 及び第 2 E O プロープ 5 2 に出射し、第 1 E O プロープ 5 1 及び第 2 E O プロープ 5 2 から入射される光信号を第 1 光フィルタ 5 5 及び第 2 光フィルタ 5 6 に出射する。例えば、第 1 光サーキュレータ 5 3 には、周波数  $f_1$  及び  $f_2$  (ただし、 $f_{RF} < f_2 - f_1$  又は  $f_{RF} > f_2 - f_1$  を満たす) の光信号を含む光 L O 信号が入射し、第 1 E O プロープ 5 1 に出射される。第 1 E O プロープ 5 1 では、周波数  $f_{RF}$  の光信号 (被測定電界信号) と第 1 光サーキュレータ 5 3 からの光信号との相互作用により、周波数  $(f_1 + f_{RF})$  及び周波数  $(f_1 - f_{RF})$  のサイドバンド成分、及び、周波数  $(f_2 + f_{RF})$  及び周波数  $(f_2 - f_{RF})$  のサイドバンド成分が生じる。第 2 光サーキュレータ 5 4 及び第 2 E O プロープ 5 2 についても同様である。

20

【 0 0 8 7 】

第 1 光フィルタ 5 5 及び第 2 光フィルタ 5 6 は、それぞれ、第 1 E O プロープ 5 1 から第 1 光サーキュレータ 5 3 を介して出力された光信号、及び、第 2 E O プロープ 5 2 から第 2 光サーキュレータ 5 4 を介して出力された光信号から、一つのサイドバンドの光信号及び光 L O 信号に含まれる一方の光信号 (例えば、周波数  $(f_1 + f_{RF})$  及び周波数  $f_2$  の信号成分) を選択するバンドパスフィルタである。

30

【 0 0 8 8 】

第 1 光検出器 5 7 及び第 2 光検出器 5 8 は、それぞれ、第 1 光フィルタ 5 5 及び第 2 光フィルタ 5 6 から出力された光信号を電気信号 (例えば、周波数  $(|f_2 - f_1 - f_{RF}|)$  の信号成分) に変換し、第 1 I F 信号及び第 2 I F 信号として出力する受光素子である。

【 0 0 8 9 】

第 1 光サーキュレータ 5 3、第 1 光フィルタ 5 5 及び第 1 光検出器 5 7 が、第 1 E O プロープ 5 1 から出力された光信号を、当該光信号の周波数よりも低い中間周波数の電気信号に変換する第 1 周波数変換器に相当する。同様に、第 2 光サーキュレータ 5 4、第 2 光フィルタ 5 6 及び第 2 光検出器 5 8 が、第 2 E O プロープ 5 2 から出力された光信号を、当該光信号の周波数よりも低い中間周波数の電気信号に変換する第 2 周波数変換器に相当する。

40

【 0 0 9 0 】

以上のように構成される本変形例に係る電磁界測定装置 1 1 を用いて放射電界を測定する実験を行った。

【 0 0 9 1 】

50

第1 E Oプローブ5 1及び第2 E Oプローブ5 2が受けたRF信号の周波数 $f_{RF}$ はおよそ75.598 GHzであり、光LO信号に含まれる2つの光信号の周波数の差( $f_2 - f_1$ )はおよそ75.6 GHzであるため、第1 IF信号の周波数( $f_2 - f_1 - f_{RF}$ )はおよそ2 MHzとなる。ただし、RF信号と光LO信号とは同期していないため、第1 IF信号の周波数にはゆらぎが存在している。参照信号発生器3 1からの参照信号の周波数を1.8 MHzに設定したため、第1乗算器3 2における周波数変換により、およそ3.8 MHzの信号成分と、およそ0.2 MHzの信号成分とが得られる。フィルタ3 3により0.2 MHzの信号成分を選択し、選択した信号成分と、第2 E Oプローブ5 2により得られた第2 IF信号(およそ2 MHzの信号)とを第2乗算器3 4で混合することで、1.8 MHzと2.2 MHzの信号が得られる。同期検波器3 5により1.8 MHzの信号の振幅と位相を計測すると、得られた振幅は第1 E Oプローブ5 1及び第2 E Oプローブ5 2で得られたRF信号の振幅の積に比例した値に相当し、得られた位相は第1 E Oプローブ5 1及び第2 E Oプローブ5 2で得られたRF信号の位相の差に相当することになる。

10

#### 【0092】

図7は、本変形例に係る電磁界測定装置1 1を用いた実験の結果を示す図である。ここでは、第1 E Oプローブ5 1の直前に普通紙を配置することで第1 E Oプローブ5 1と第2 E Oプローブ5 2で検出される両RF信号間に位相差を与えた時に同期検波器3 5から得られた検出信号が示されている。図4 A及び図4 Bと同様に、横軸は時間を示し、左の縦軸は振幅(mV)を示し、右の縦軸は位相(deg.)を示す。

20

#### 【0093】

図7に示されるように、普通紙を挿入した時に得られた位相変化量は、普通紙の屈折率とRF信号の周波数(およそ75 GHz)から計算される値と一致しており、本変形例に係る電磁界測定装置1 1によって位相雑音がキャンセルされながら位相差が測定されていることが分かる。

#### 【0094】

以上のように、本変形例における電磁界測定装置1 1によれば、被測定電磁界に配置された2本のプローブを用いることで、雑音キャンセル部3 0において、被測定電界の位相及び周波数ゆらぎがキャンセルされる。よって、被測定電界の周波数が変動する場合であっても、被測定系と測定系とを同期させることなく、安定かつ精密に電界の空間分布を測定できる。

30

#### 【0095】

なお、上記実施の形態及び第1変形例における電磁界測定装置では、アナログ信号処理によって雑音がキャンセルされたが、デジタル信号処理によって雑音をキャンセルしてもよい。

#### 【0096】

図8は、上記実施の形態の第2変形例に係る電磁界測定装置が備える雑音キャンセル部6 0の構成を示すブロック図である。なお、本変形例に係る電磁界測定装置が備える検出部は、上記実施の形態又は第1変形例の検出部と同じである。

#### 【0097】

雑音キャンセル部6 0は、デジタル信号処理によって被測定電磁界における電界又は磁界の位相及び周波数ゆらぎをキャンセルするための処理部であり、第1 A/D変換器6 1、第2 A/D変換器6 2及びコンピュータ装置6 3を備える。

40

#### 【0098】

第1 A/D変換器6 1は、上記実施の形態における第1プローブ2 1等で得られた第1 IF信号をデジタル値に変換する。

#### 【0099】

第2 A/D変換器6 2は、上記実施の形態における第2プローブ2 2等で得られた第2 IF信号をデジタル値に変換する。

#### 【0100】

50

コンピュータ装置 63 は、第 1 A / D 変換器 61 及び第 2 A / D 変換器 62 から出力されたデジタル信号を処理する装置であり、内部に保持するプログラム 64 に従って、図 2 に示される電磁界測定方法を実行する。電磁界測定方法には、少なくとも、第 1 A / D 変換器 61 から出力されたデジタル信号に参照信号を乗じる第 1 乗算ステップ S2 と、第 1 乗算ステップ S2 で得られた信号に第 2 A / D 変換器 62 から出力された信号を乗じる第 2 乗算ステップ S3 と、第 2 乗算ステップ S3 で得られた信号から、参照信号に同期する信号成分を抽出する同期検波ステップ S4 とが含まれる。より詳しくは、コンピュータ装置 63 は、実施の形態における雑音キャンセル部 30 による信号処理と等価なデジタル信号処理を実行する。

#### 【0101】

図 9 は、本変形例に係る電磁界測定装置を用いた実験の結果を示す図である。ここでは、第 1 I F 信号及び第 2 I F 信号に対して共通の位相雑音を重畳させ、第 2 I F 信号の位相を時間とともに線形にシフトさせた実験で得られた検出信号（被測定電界の振幅（図 9 の（a））及び位相（図 9 の（b））の波形が示されている。図 4 A 及び図 4 B と同様に、横軸は時間を示し、左の縦軸は振幅（mV）を示し、右の縦軸は位相（deg.）を示す。

#### 【0102】

図 9 から分かるように、デジタル信号処理によって雑音をキャンセルする本変形例に係る電磁界測定装置により、第 1 I F 信号及び第 2 I F 信号に共通の位相雑音はキャンセルされ、第 1 I F 信号及び第 2 I F 信号の相対位相差の時間変化が測定できている。

#### 【0103】

以上のように、本変形例における電磁界測定装置によれば、被測定電磁界に配置された 2 本のプローブを用いることで、デジタル信号処理を用いた雑音キャンセル部 60 において、被測定電磁界における電界又は磁界の位相及び周波数ゆらぎがキャンセルされる。よって、被測定電磁界における電界又は磁界の周波数が変動する場合であっても、被測定系と測定系とを同期させることなく、安定かつ精密に電界又は磁界の空間分布を測定できる。

#### 【0104】

なお、上記実施の形態では、第 2 プローブ（参照用プローブ）を空間の一点に固定し、第 1 プローブ（測定用プローブ）を空間走査した。しかしながら、この走査方法では、被測定対象の物理的形狀や、被測定電磁波の放射パターン形状によっては、参照用プローブを空間の一点に固定した状態で測定用プローブを空間走査することが難しい状況が生じうる。そこで、このような問題を解決するために、プローブの走査方法として、2 本のプローブを一体的に移動させてもよい。なお、「n本のプローブを一体的に移動させる」とは、n本のプローブの相対的な位置関係（相互の間隔）を固定したまま、n本のプローブを移動させることをいう。以下、2本のプローブを一体的に移動させる走査方法を説明する。

#### 【0105】

図 10 は、2本のプローブを一体的に移動させて空間走査する電磁界測定方法を説明する図である。ここでは、1次元（x軸方向）の位相分布測定の原理が示されている。なお、振幅分布については、それぞれのプローブで測定される信号から容易に求まるため、説明を省略する。

#### 【0106】

図 10 に示されるように、第 1 プローブ 21 及び第 2 プローブ 22 により、x 軸上の x（第 1 プローブ 21 の座標を x2、第 2 プローブ 22 の座標を x1 とした場合に、 $x = x2 - x1$ ）だけ座標が異なる場所での電磁界の位相を、位相差検出装置 70 を用いて、測定する。なお、位相差検出装置 70 は、2つの信号の位相差を検出する装置であり、例えば、上記実施の形態における雑音キャンセル部 30 である。

#### 【0107】

それぞれの位置での位相を決めるためには、基準が必要となるが、これについては、測

10

20

30

40

50

定系のローカル信号を基準に取る。測定系のローカル信号と被測定信号とは位相同期が取れていないので、各プローブで測定される位相にはゆらぎが重畳されるが、そのゆらぎは第1プローブ21及び第2プローブ22においてコモンモードとなっている。そのため、両プローブの場所での位相差を取ると、これら共通の位相ゆらぎはキャンセルされて、本図に示すように、座標 $x_2$ 及び座標 $x_1$ における被測定信号の位相差  $\phi_{21} (= \phi(x_2) - \phi(x_1))$  が検出されることになる。

#### 【0108】

ここで、第1プローブ21及び第2プローブ22を、位置決めステージにより、一体的に $x$ 軸方向に $\Delta x$ 移動させる。つまり、第1プローブ21の座標が $x_3 (= x_2 + \Delta x)$ となり、第2プローブ22の座標が $x_2$ となる。移動後に測定される位相は、  $\phi_{32} (= \phi(x_3) - \phi(x_2))$  となる。移動前と移動後のこれら2つの測定値により、  $\phi(x_1)$  と  $\phi(x_2)$  と  $\phi(x_3)$  との相対位相が求まる。これを繰り返すことで、1次元上での電磁界の相対位相の空間分布が明らかとなる。

10

#### 【0109】

なお、2次元用プローブは、例えば、図10に示される第2プローブ22に対して $y$ 軸上(紙面に垂直)に間隔 $\Delta y$ だけずれた位置に第3プローブを配置することで得られる。これら3本のプローブを、位置決めステージ(XYステージ)により、一体的に $xy$ 面上で $x$ ずつ及び $y$ ずつ走査することで、上述の原理に基づき電磁界の $xy$ 面内での分布が計測可能となる。さらに、3次元用プローブについても、同様に、2次元用プローブに対して $xy$ 面から $\Delta z$ だけ $z$ 軸上離れた場所に第4プローブを配置することで得られる。そして、これら4本のプローブを、位置決めステージ(XYZステージ)により、一体的に $x$ ずつ及び $y$ ずつ及び $z$ ずつ走査することで、上述の原理に基づき電磁界の3次元分布が計測可能となる。

20

#### 【0110】

このように、図10に示された2本のプローブの一体的な走査方法による電磁界測定方法では、図2に示された配置ステップS1において、第1プローブ21と第2プローブ22との間隔を固定した状態で、第1プローブ21及び第2プローブ22を一体的に空間における複数の測定点に順に移動させて配置し、図2に示された第1乗算ステップS2、第2乗算ステップS3及び同期検波ステップS4は、配置ステップS1において第1プローブ21及び第2プローブ22が複数の測定点のそれぞれに配置される毎に、実行される。より具体的には、配置ステップS1では、現在の測定点における第1プローブ21及び第2プローブ22の一方の位置が、次の測定点における第1プローブ21及び第2プローブ22の他方の位置に一致することとなるように、第1プローブ21及び第2プローブ22を一体的に移動させる。

30

#### 【0111】

このような複数のプローブの一体的な走査方法により、第2プローブ(参照用プローブ)を空間の一点に固定する走査方法における問題が解決される。つまり、空間の一点に参照用プローブを固定し、この位置における位相に対する相対的な位相分布を計測する手法では、被測定対象や放射場の分布によっては計測ができない状況が生じる問題があるが、この問題が解決される。よって、複数のプローブの一体的な走査方法により、自励発振デバイス等から放射される周波数ゆらぎを有する放射場の位相の空間分布計測が、任意の面上において可能となる。

40

#### 【0112】

なお、図10では、上記実施の形態における第1プローブ21及び第2プローブ22が用いられたが、プローブの種類はこれに限定されるものではなく、上記第1変形例におけるE0プローブ等の他の種類のプローブであってもよい。また、図10の位相差検出装置70についても、上記実施の形態における雑音キャンセル部30に限られず、2つの信号の位相差を検出する装置であれば、他の種類の装置であってもよい。

#### 【0113】

図11は、図10に示される、2本のプローブを一体的に走査させる方法による実験に

50

よって得られた測定値（点のプロット）とシミュレーション結果（実線）とを示す図である。横軸は、2本のプローブの移動距離（x軸上の位置）を示し、縦軸は、その移動距離における位相を示す。

【0114】

本実験では、上記実施の形態の第1変形例での実験と同じ装置及び条件下で行った。つまり、位相差検出装置70として、図6に示されるE0型検出部50及び雑音キャンセル部30を用いた。また、RF光信号の周波数 $f_{RF}$ はおよそ75.598GHzであり、光LO信号に含まれる2つの光信号の周波数の差はおよそ75.6GHzであり、参照信号の周波数を1.8MHzに設定し、雑音キャンセル部30から出力される1.8MHzの信号の位相を計測することにより、測定用の第1EOプローブ51と参照用の第2EO

10

【0115】

なお、測定用の第1EOプローブ51及び参照用の第2EOプローブ52の間隔  $x$  は5mmであり、それら2本のプローブを位置決めステージに固定してx軸上に移動させた。

【0116】

図11から分かるように、本実験において5mm間隔で得られた位相分布の測定値は、シミュレーション結果とよい一致を示している。

【0117】

なお、図11に示される実験では、測定用プローブと参照用プローブとを、一体的に、プローブ間隔  $x$  だけ移動させることで位相の空間分布を測定したが、測定開始点を少しだけ（ $x$ よりも小さい距離だけ）ずらしたNセットのデータを取得し、これらが滑らかに繋がる等の補間の条件を課すことで、より空間分解能の高い位相分布を測定してもよい。

20

【0118】

図12は、測定用プローブ及び参照用プローブを、プローブ間隔  $x$  よりも小さい距離だけ、一体的に、ずらしながら移動させて空間走査する電磁界測定方法を説明する図である。ここでは、プローブ間隔  $x$  において、Nセットのデータを取得して滑らかに繋ぐ（近似曲線に近い位置にプロットする）ことで得られる位相分布の一例が示されている。

【0119】

図13は、図12に示される、プローブ間隔よりも小さい距離の刻みで2本のプローブを、位置決めステージを用いて、一体的に走査させる方法による実験によって得られた測定値（点のプロット）とシミュレーション結果（実線）とを示す図である。

30

【0120】

プローブ間隔  $x$  が5mmの2本のプローブを一体的に動かした場合には、5mm間隔のデータセットがNセット取得できるが、本実験は、プローブを一体的に0.5mm間隔で移動させたため、 $N=100$ となる。それぞれのデータセットの間の位相関係は不定であるが、それぞれのデータセットは同じ位相分布を計測しているため、各データセットが作る位相の空間分布が滑らかに接続されるように、初期位相の不定量を決定することで、図13に示す空間分解能が向上した位相分布の計測が可能となる。なお、図13に示される実験データは、図11に示されるデータを取得したプローブ間隔  $x$  が5mmのEOプローブを使用した。図13から分かるように、本実験において0.5mm間隔で得られた位相分布の測定値は、シミュレーション結果とよい一致を示している。

40

【0121】

このように、図12及び図13に示されるプローブの走査方法による電磁界測定方法では、図2に示される配置ステップS1において、所定時点における第1プローブと第2プローブとの間隔を分割して得られる複数の位置のそれぞれに、第1プローブ及び第2プローブの一方が順に位置することとなるように、第1プローブ及び第2プローブを一体的に移動させている。そして、複数の位置のそれぞれで得られた位相が滑らかに繋がる等の補間の条件を課すことで、より空間分解能の高い位相分布が測定される。

50

## 【 0 1 2 2 】

次に、上記実施の形態の電磁界測定装置の応用例として、ミリ波を用いて非破壊で対象物の中を可視化する位相イメージング装置を説明する。

## 【 0 1 2 3 】

図 1 4 は、上記実施の形態の電磁界測定装置を用いた位相イメージング装置 8 0 の構成を示すブロック図である。

## 【 0 1 2 4 】

位相イメージング装置 8 0 は、電磁波が対象物 1 0 0 を透過又は反射（本応用例では、透過）するときの電磁波の位相シフト量を測定して画像化する装置であり、電磁波源 8 2、光学装置 9 0、位置決めステージ 1 1 0、電磁界測定装置 1 0 a（検出部 2 0 a 及び雑音キャンセル部 3 0 a）、及び、画像化装置 1 2 0 で構成される。

10

## 【 0 1 2 5 】

電磁波源 8 2 は、電磁波を出射する装置である。

## 【 0 1 2 6 】

光学装置 9 0 は、電磁波源 8 2 から出射された電磁波を第 1 電磁波及び第 2 電磁波に分岐させる光学系であり、集光レンズ 9 2 a ~ 9 2 c、ビームスプリッタ 9 4、及び、放物面鏡 9 6 a ~ 9 6 d で構成される。電磁波源 8 2 から出射された電磁波は、集光レンズ 9 2 a で平行光となり、ビームスプリッタ 9 4 で第 1 電磁波及び第 2 電磁波に分岐され、第 1 電磁波が放物面鏡 9 6 a ~ 9 6 d を反射し、集光レンズ 9 2 c で集光される。本応用例では、放物面鏡 9 6 c と放物面鏡 9 6 d との間の光路上に対象物 1 0 0 が置かれ、第 1 電磁波が対象物 1 0 0 を透過する。

20

## 【 0 1 2 7 】

位置決めステージ 1 1 0 は、光学装置 9 0 で分岐された第 1 電磁波及び第 2 電磁波のうち第 1 電磁波だけが対象物 1 0 0 における 2 次元状の複数の測定点を順に走査しながら入射するように、対象物 1 0 0 と第 1 電磁波との相対的位置関係を変化させる機構部の一例（本実施の形態では、X Y ステージ）である。本応用例では、画像化装置 1 2 0 によって、対象物 1 0 0 を移動するように、制御される。なお、ガルバノミラー等を用いて第 1 電磁波の対象物 1 0 0 への入射方向を変化させることで、対象物 1 0 0 と第 1 電磁波との相対的位置関係を変化させてもよい。

## 【 0 1 2 8 】

電磁界測定装置 1 0 a は、対象物 1 0 0 を透過又は反射した第 1 電磁波と対象物 1 0 0 を透過及び反射していない第 2 電磁波との位相差を、対象物 1 0 0 における複数の測定点のそれぞれについて、測定する装置である。本応用例では、電磁界測定装置 1 0 a は、機能的には、上記実施の形態に係る電磁界測定装置 1 0 と同じ装置であり、検出部 2 0 a 及び雑音キャンセル部 3 0 a を備える。

30

## 【 0 1 2 9 】

検出部 2 0 a は、光学装置 9 0 で得られた第 1 電磁波及び第 2 電磁波を検出して電気信号に変換する装置であり、局部発振器 1 5 0、ホーンアンテナ 1 5 1 及び 1 5 2、高周波ミキサ 1 5 3 及び 1 5 4、逓倍器 1 5 5 及び 1 5 6 で構成される。局部発振器 1 5 0 は、上記電磁界測定装置 1 0 の検出部 2 0 における L O 信号を出力する発振器である。ホーンアンテナ 1 5 1 及び 1 5 2、並びに、高周波ミキサ 1 5 3 及び 1 5 4 は、それぞれ、上記電磁界測定装置 1 0 の検出部 2 0 における第 1 プローブ 2 1、第 2 プローブ 2 2、第 1 周波数変換器 2 3 及び第 2 周波数変換器 2 4 に相当する。本応用例では、ホーンアンテナ 1 5 1 が装荷された高周波ミキサ 1 5 3 は、光学装置 9 0 から出力される、対象物 1 0 0 を透過又は反射（本応用例では、透過）した第 1 電磁波を検出する測定用の第 1 プローブ及び第 1 周波数変換器として機能し、一方、ホーンアンテナ 1 5 2 が装荷された高周波ミキサ 1 5 4 は、光学装置 9 0 から出力される、対象物 1 0 0 を透過及び反射していない（ビームスプリッタ 9 4 で生成された）第 2 電磁波を検出する参照用の第 2 プローブ及び第 2 周波数変換器として機能する。逓倍器 1 5 5 及び 1 5 6 は、局部発振器 1 5 0 から出力された L O 信号を逓倍し、それぞれ、高周波ミキサ 1 5 3 及び 1 5 4 に出力する。

40

50

## 【 0 1 3 0 】

雑音キャンセル部 3 0 a は、検出部 2 0 a の第 1 プローブ（ホーンアンテナ 1 5 1 が装荷された高周波ミキサ 1 5 3）から出力される第 1 I F 信号と、第 2 プローブ（ホーンアンテナ 1 5 2 が装荷された高周波ミキサ 1 5 4）から出力される第 2 I F 信号との位相差を検出する処理部であり、上記電磁界測定装置 1 0 の雑音キャンセル部 3 0 が備える構成（参照信号発生器 3 1、第 1 乗算器 3 2、フィルタ 3 3、第 2 乗算器 3 4 及び同期検波器 3 5）に、信号を増幅するためのアンプ 1 3 0 a ~ 1 3 0 c が追加された構成を備える。

## 【 0 1 3 1 】

画像化装置 1 2 0 は、対象物 1 0 0 の複数の測定点のそれぞれについて電磁界測定装置 1 0 a で測定された位相差（雑音キャンセル部 3 0 a の同期検波器 3 5 で抽出された信号成分の位相）を、その測定点の座標に対応させて画像化する処理部であり、例えば、同期検波器 3 5 の出力端子及び位置決めステージ 1 1 0 の制御入力端子と接続されたパーソナルコンピュータである。より詳しくは、画像化装置 1 2 0 は、位置決めステージ 1 1 0 を制御することで、ビームスプリッタ 9 4 で生成された第 1 電磁波が対象物 1 0 0 における 2 次元状の複数の測定点の一つに入射するように対象物 1 0 0 を移動させ、その状態で、電磁界測定装置 1 0 a で測定された位相差を取得し、取得した位相差を測定点の座標と対応づけて記憶する、という処理を、複数の測定点のそれぞれについて繰り返す。そして、画像化装置 1 2 0 は、複数の測定点について得られた位相差を画素値に変換（例えば、位相差が大きいほど青色に近い色となるように位相差を色に変換）したうえで、測定点の座標に対応させて、画素値を表示することで、画像化する。

## 【 0 1 3 2 】

なお、電磁界測定装置 1 0 a で測定される位相差には、光学装置 9 0 における第 1 電磁波の伝搬長と第 2 電磁波の伝搬長との差に基づく位相差（オフセット位相差）が含まれるが、このオフセット位相差は測定点によらずに一定なので、測定された位相差からオフセット位相差を除くことによって、対象物 1 0 0 の透過に起因する正味の位相差が得られる。

## 【 0 1 3 3 】

図 1 5 は、図 1 4 に示される位相イメージング装置 8 0 による実験を説明するための図である。図 1 5 の（ a ）は、対象物 1 0 0 の外観を示し、図 1 5 の（ b ）は、対象物 1 0 0 に内蔵された物を示す。ここでは、対象物 1 0 0 は、M 字（大きさが 5 0 m m × 5 0 m m）をかたどったアクリル板 1 0 5（図 1 5 の（ b ））が差し込まれた本（厚さが 2 5 m m）である（図 1 5 の（ a ））。図 1 5 の（ c ）は、参考例としての画像例（図 1 5 の（ b ）における 7 0 m m × 1 0 0 m m の領域 1 0 7 における画像例）、つまり、振幅イメージングによる画像例（電磁界測定装置 1 0 a の第 1 プローブ及び第 2 プローブで得られた信号の振幅積に対応する画像例）を示す図であり、図 1 5 の（ d ）は、本応用例における位相イメージング装置 8 0 で得られた位相イメージングによる画像例（図 1 5 の（ b ）における 7 0 m m × 1 0 0 m m の領域 1 0 7 における画像例）を示す図である。

## 【 0 1 3 4 】

なお、本実験では、電磁波源 8 2 として、1 0 m W 程度の比較的高い出力のミリ波を出力する Gunn 発振器が用いられ、そのミリ波の周波数は、3 M H z 程度変動する。また、局部発振器 1 5 0 から出力される L O 信号はおよそ 9 . 7 G H z であり、これが逡倍器 1 5 5 及び 1 5 6 で 8 逡倍されて高周波ミキサ 1 5 3 及び 1 5 4 に入力される。高周波ミキサ 1 5 3 及び 1 5 4 からは、およそ 5 M H z に周波数変換された第 1 I F 信号及び第 2 I F 信号が出力され、それぞれ、雑音キャンセル部 3 0 a のアンプ 1 3 0 a 及び 1 3 0 b で増幅されて第 1 乗算器 3 2 及び第 2 乗算器 3 4 に入力される。雑音キャンセル部 3 0 a における参照信号発生器 3 1 から出力される参照信号の周波数  $f_s$  は 1 . 7 M H z である。

## 【 0 1 3 5 】

図 1 5 の（ c ）に示される画像例から分かるように、アクリル板 1 0 5 はミリ波に対して吸収量が小さいために振幅イメージングの結果ではコントラストが低く不明瞭である。一方、図 1 5 の（ d ）に示される画像例から分かるように、位相イメージングによれば高

10

20

30

40

50

いコントラストが得られる。

【0136】

このように、本応用例における位相イメージング装置80によれば、被測定電磁界における電界又は磁界の位相及び周波数ゆらぎがキャンセルされるので、周波数が変動する電磁波源82を用いているにも拘わらず、高いコントラストで、対象物100の中が非破壊で可視化される。つまり、本応用例により、高出力であるが周波数ゆらぎを有し、外部から位相同期をすることが困難な光源(電磁波源82)を使った場合であっても、安定して高精度な位相イメージングが可能となる。

【0137】

なお、本応用例の位相イメージング装置80では、透過型のイメージングが行われたが、反射型のイメージングが行われてもよい。

10

【0138】

また、本応用例の位相イメージング装置80では、電磁界測定装置10aは、機能的には、上記実施の形態に係る電磁界測定装置10と同じ装置であったが、これに限られず、上記実施の形態の第1変形例に係る電磁界測定装置11、又は、上記実施の形態の第2変形例に係る雑音キャンセル部60を備える電磁界測定装置であってもよい。

【0139】

なお、複数本のプローブを一体的に移動させる場合には、参照信号発生器31から同期検波器35に入力される参照信号に含まれるオフセット位相を知る必要がある。同期検波器35から出力される信号には、そのオフセット位相がノイズとして含まれることになるので、計測された位相差からそのオフセット位相を差し引くためである。以下、そのオフセット位相の算出方法を説明する。

20

【0140】

図16は、参照信号発生器31から同期検波器35に入力される参照信号に含まれるオフセット位相  $\theta_{ff}$  の算出方法を説明するための図である。図16の(a)は、オフセット位相  $\theta_{ff}$  の雑音キャンセル部30における影響を説明する図であり、図16の(b)は、上述した雑音キャンセル部30に、オフセット位相  $\theta_{ff}$  を算出する回路(オフセット位相算出部37)が付加された回路の構成を示すブロック図である。

【0141】

図16の(a)に示されるように、いま、第1プローブから出力される信号が  $A_1 \cos(\omega_0 t + \phi_1 + \theta_m)$  とし、第2プローブから出力される信号が  $A_2 \cos(\omega_0 t + \phi_2 + \theta_m)$  とする。ここで、 $\omega_0$  は、被測定電磁界の角周波数であり、 $\theta_m$  は、第1プローブの位置と第2プローブの位置での被測定電磁界の位相差であり、 $\theta_m$  は、被測定電磁界の位相ゆらぎである。また、参照信号発生器31から第1乗算器32に入力される参照信号は、周波数  $f_s$  (角周波数  $\omega_s$ ) の信号であり、参照信号発生器31から第2乗算器34に入力される参照信号は、 $\cos(\omega_s t + \theta_{ff})$  の信号であるとする。ここで、 $\theta_{ff}$  は、参照信号のオフセット位相(第1乗算器32に入力される参照信号を基準としたオフセット位相)である。

30

【0142】

この状態では、上記実施の形態で説明した原理により、第2乗算器34から出力される信号は、 $(A_1 A_2 / 4) \cos(\omega_s t + \phi_1 + \phi_2 + \theta_{ff})$  となる。よって、同期検波器35で抽出される信号成分の位相は、 $(\phi_1 + \phi_2 + \theta_{ff})$  となる。つまり、計測したい位相差  $\theta_m$  に、参照信号のオフセット位相  $\theta_{ff}$  が加算された値となる。よって、参照信号のオフセット位相  $\theta_{ff}$  を知る必要がある。

40

【0143】

そこで、図16の(b)に示されるように、図16の(a)に示される雑音キャンセル部30に、参照信号のオフセット位相  $\theta_{ff}$  を算出する回路(オフセット位相算出部37)を付加する。オフセット位相算出部37は、雑音キャンセル部30が備える第1乗算器32、フィルタ33、第2乗算器34及び同期検波器35のそれぞれと同じ機能の第1乗算器32a、フィルタ33a、第2乗算器34a及び同期検波器35aを備える。第1

50

プローブから出力された信号は、第1乗算器32aだけでなく、第2乗算器34にも並列に入力される。また、第1乗算器32a及び同期検波器35aには、雑音キャンセル部30が備える参照信号発生器31から参照信号が入力される。

【0144】

このようなオフセット位相算出部37によれば、第1乗算器32aにおいて第1プローブからの出力信号と参照信号とが乗算され、その出力信号に対して、さらに、第2乗算器34において第1プローブからの出力信号が乗算されるので、第2乗算器34から出力される信号は、 $(A_1^2/4)\cos(\theta_1 + \theta_{off})$ となる。よって、この信号が入力された同期検波器35で抽出される信号成分の振幅は $(A_1^2/4)$ となり、位相は $\theta_{off}$ となる。つまり、オフセット位相算出部37によって、参照信号のオフセット位相 $\theta_{off}$ が算出されることになる。よって、雑音キャンセル部30で算出された位相 $(\theta_1 + \theta_{off})$ から、オフセット位相算出部37によって算出されたオフセット位相 $\theta_{off}$ を差し引くことで、第1プローブの位置と第2プローブの位置での被測定電磁界の位相差が求まる。

10

【0145】

なお、オフセット位相算出部37によれば、振幅 $(A_1^2/4)$ が得られることから分かるように、第1プローブからの出力信号の振幅 $A_1$ も高感度で測定できるというメリットもある。ただし、振幅 $A_1$ の検出については、IF信号のパワー検出や、整流回路を用いた検出等であってもよい。

【0146】

このように、オフセット位相算出部37によれば、第1プローブで得られた信号に参照信号を乗じ、得られた信号に第1プローブで得られた信号を乗じ、得られた信号から、参照信号に同期する信号成分を抽出することで、参照信号のオフセット位相 $\theta_{off}$ が算出される(オフセット位相算出ステップ)。これにより、複数本のプローブを一体的に移動させる場合において、被測定電磁界の計測と同時に参照信号のオフセット位相 $\theta_{off}$ が求まり、同期検波器35で抽出される信号成分の位相からノイズとしてのオフセット位相 $\theta_{off}$ を差し引くことで、高い精度で位相差が求められる。

20

【0147】

ここで、参照信号のオフセット位相 $\theta_{off}$ の算出方法としては、図16に示されたオフセット位相算出部37による方法だけに限られない。例えば、第1プローブと第2プローブとを入れ換えることで、 $\theta_1 - \theta_2 + \theta_{off}$ と $\theta_2 - \theta_1 + \theta_{off}$ とを測定し、これらの和から $\theta_{off}$ を算出してもよい。ここで、 $\theta_1$ は、第1プローブの位置における被測定電磁界の位相であり、 $\theta_2$ は、第2プローブの位置における被測定電磁界の位相である。

30

【0148】

なお、第1プローブと第2プローブの入れ換えは、電子的スイッチによって切り替えてもよい。例えば、ある測定点において、電子的スイッチによって第1プローブと第2プローブとを入れ換えた測定、つまり、2回の測定を行い、その後次に次の測定点に第1プローブ及び第2プローブを移動させるという処理を繰り返してもよい。

【0149】

このように、複数の測定点の一つについて、上記配置ステップにおける第1プローブ及び第2プローブの位置を入れ換えた状態で、上記第1乗算ステップ、第2乗算ステップ及び同期検波ステップを実行し、上記配置ステップにおいて同期検波ステップで抽出された信号成分の位相 $(\theta_1 - \theta_2 + \theta_{off})$ と、入れ換え後における同期検波ステップで抽出された信号成分の位相 $(\theta_2 - \theta_1 + \theta_{off})$ とを加算することで参照信号のオフセット位相 $\theta_{off}$ を算出するオフセット位相算出ステップを実行してもよい。これにより、複数本のプローブを一体的に移動させる場合において、プローブを入れ換えることで参照信号のオフセット位相が求まり、同期検波器35で抽出される信号成分の位相からノイズとしてのオフセット位相 $\theta_{off}$ を差し引くことで、高い精度で位相差が求められる。

40

【0150】

50

以上、本発明に係る電磁界測定装置、電磁界測定方法及び位相イメージング装置について、実施の形態及び変形例に基づいて説明したが、本発明は、これらの実施の形態及び変形例に限定されるものではない。本発明の主旨を逸脱しない限り、当業者が思いつく各種変形を実施の形態及び変形例に施したものと、実施の形態及び変形例における一部の構成要素を組み合わせる別の形態も、本発明の範囲内に含まれる。

#### 【0151】

例えば、上記実施の形態では、第1乗算器32から出力される2つの信号成分(2つの入力信号の周波数の和及び差の周波数をもつ信号成分)のうち、差の周波数をもつ信号成分が利用されたが、和の周波数をもつ信号成分が利用されてもよい。この場合には、第2乗算器34から出力される2つの信号成分(2つの入力信号の周波数の和及び差の周波数をもつ信号成分)のうち、差の周波数をもつ信号成分が参照信号に同期する信号成分として同期検波器35で検波される。これにより、実施の形態1と同様に、被測定電界の位相及び周波数ゆらぎがキャンセルされ、かつ、中間周波数に依存する信号成分がキャンセルされた、参照信号の周波数 $f_s (= f_s + f_{IF} - f_{IF})$ をもつ信号成分だけが抽出される。

10

#### 【0152】

また、上記実施の形態の第1変形例では、EO型検出部として、光フィルタ等が用いられたが、このような構成に限られず、例えば、特開2007-57324号公報(特許文献2)に開示された偏光処理装置と同様の構成であってもよい。

#### 【0153】

また、上記実施の形態等における電磁界測定装置によって得られた被測定電磁界の位相及び振幅の空間分布を可視化してもよい。図17は、上記実施の形態の変形例1に相当する電磁界測定装置によって得られた被測定電磁界の位相の空間分布を可視化した例を示す図である。この実験では、およそ77.7GHzで自励発振するGunn発振器で発生されたRF信号を図17の(a)に示されるようなホーンアンテナから放射した。Gunn diodeは±300kHz程度の周波数揺らぎを有していた。電磁界測定装置の一方のプロープを空間の一点に固定し、他方のプロープを空間内で動かすことで、被測定電磁界の位相の空間分布を取得し、コンピュータを用いて、図17に示される位相と色(ここでは、濃淡)との対応を示すカラー(ここでは、グレースケール)バーに従って、取得された位相を、対応する色(ここでは、濃淡)に変換し、測定位置に対応させて画像化(可視化)した。なお、図17では白黒による図示の都合上、色の変化が濃淡で表現されているが、カラーで表現されてもよい。図17の(b)に示される図のうち、空間分布の箇所は実験の結果を示す可視化データであり、ホーンアンテナの箇所はCADデータである。このような被測定電磁界の位相及び振幅の空間分布の可視化により、被測定電磁界の位相及び振幅の空間分布を直感的に知ることができる。

20

30

#### 【0154】

また、上記実施の形態の第2変形例では、雑音キャンセル部60は、プログラム64によって実現されたが、DSPやデジタルフィルタ、FPGA等を含む論理回路によって実現してもよい。

#### 【0155】

また、上記応用例における位相イメージング装置80では、2本のプロープによる1次元用プロープが用いられたが、3本のプロープによる2次元用プロープを用いてもよい。ミキサを2次元アレイ化したものでもよい。これにより、対象物100における2次元状の複数の測定点を走査するのに要する時間が短縮される。

40

#### 【0156】

また、上記実施の形態等における電磁界測定方法及び電磁界測定装置では、3本のプロープを移動させることに代えて、CCDカメラのように2次元アレイ状に配置されたプロープアレイを用いてもよい。これにより、プロープを移動させることなく、プロープアレイにおける各プロープ間の相対位相、あるいは、ある一点を参照点として、これとの相対位相を測定することで、電界又は磁界の空間分布を測定できる。同様に、2本のプロープ

50

を移動させることに代えて、1次元アレイ状に配置されたプローブアレイを用いてもよい。

【0157】

また、上記実施の形態等では、アンテナ等から放射された放射電磁界を測定するために空間にプローブが配置されたが、回路上の電位を測定するためにプローブが配置されてもよい。いずれであっても、プローブによって得られた電圧信号を処理する点で共通するからである。よって、本明細書において、「電界又は磁界を測定するために空間にプローブを配置する」とは、放射電界又は放射磁界を測定するために空間にプローブを配置するケースだけではなく、電位を測定するために回路上にプローブを配置するケースも含まれる。

10

【産業上の利用可能性】

【0158】

本発明は、電界又は磁界の空間分布を安定かつ精密に測定する電磁界測定方法、電磁界測定装置及び位相イメージング装置として、例えば、信号発生源とアンテナ等の放射体とが集積された回路（オンチップアンテナ）からの放射パターンを解析する装置、及び、非破壊で対象物の中を可視化する検査装置として、利用できる。

【符号の説明】

【0159】

- 10、10a、11 電磁界測定装置
- 20、20a 検出部
- 21 第1プローブ
- 22 第2プローブ
- 23 第1周波数変換器
- 24 第2周波数変換器
- 30、30a、60 雑音キャンセル部
- 31 参照信号発生器
- 32、32a 第1乗算器
- 33、33a フィルタ
- 34、34a 第2乗算器
- 35、35a 同期検波器
- 37 オフセット位相算出部
- 40 外部雑音源
- 41、42 発振器
- 50 EO型検出部
- 51 第1EOプローブ
- 52 第2EOプローブ
- 53 第1光サーキュレータ
- 54 第2光サーキュレータ
- 55 第1光フィルタ
- 56 第2光フィルタ
- 57 第1光検出器(PD)
- 58 第2光検出器(PD)
- 61 第1A/D変換器
- 62 第2A/D変換器
- 63 コンピュータ装置
- 64 プログラム
- 70 位相差検出装置
- 80 位相イメージング装置
- 82 電磁波源
- 90 光学装置

20

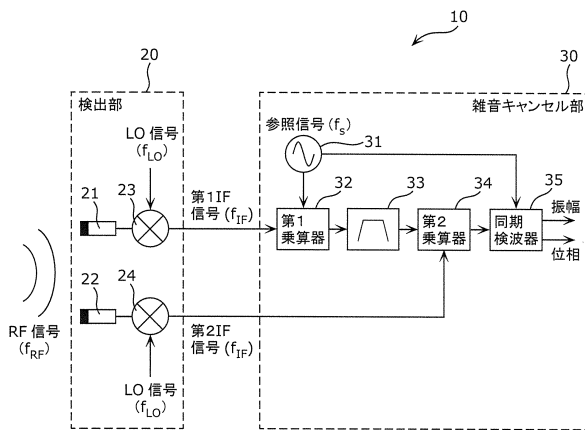
30

40

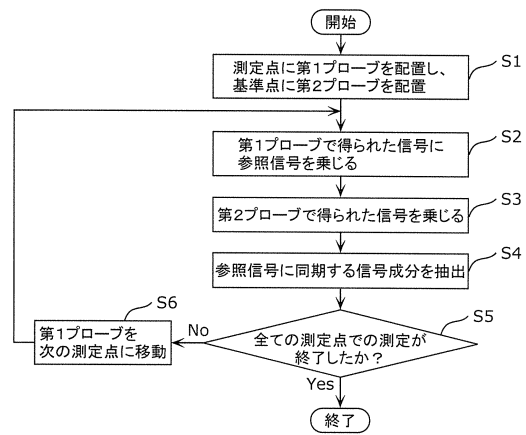
50

- 9 2 a、9 2 b、9 2 c 集光レンズ
- 9 4 ビームスプリッタ
- 9 6 a、9 6 b、9 6 c、9 6 d 放物面鏡
- 1 0 0 対象物
- 1 1 0 位置決めステージ
- 1 2 0 画像化装置
- 1 3 0 a、1 3 0 b、1 3 0 c アンプ
- 1 5 0 局部発振器
- 1 5 1、1 5 2 ホーンアンテナ
- 1 5 3、1 5 4 高周波ミキサ
- 1 5 5、1 5 6 逡倍器

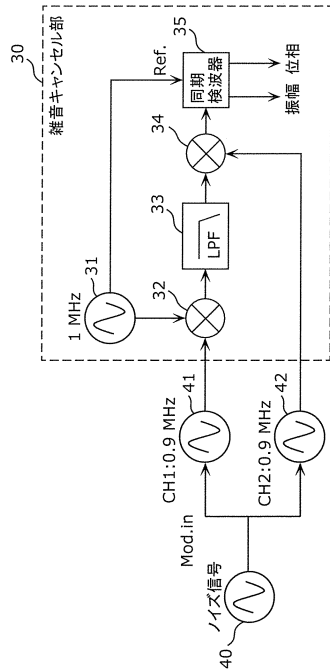
【図1】



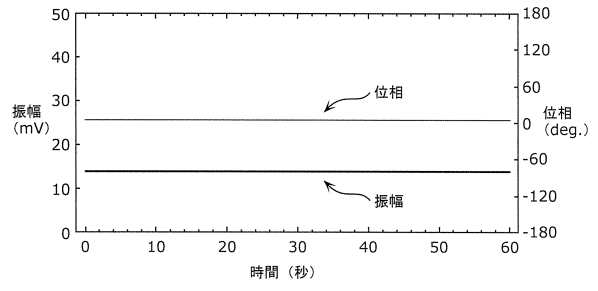
【図2】



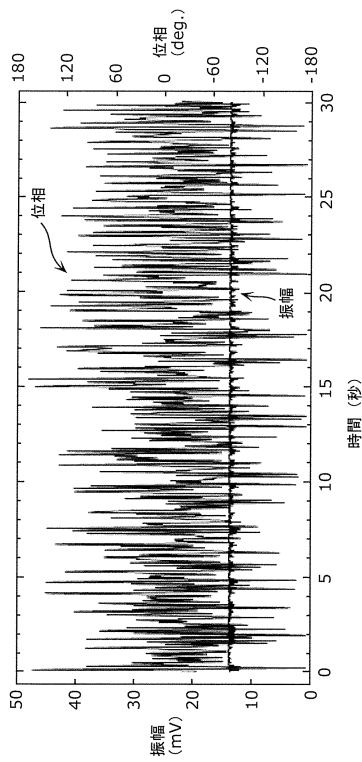
【図3】



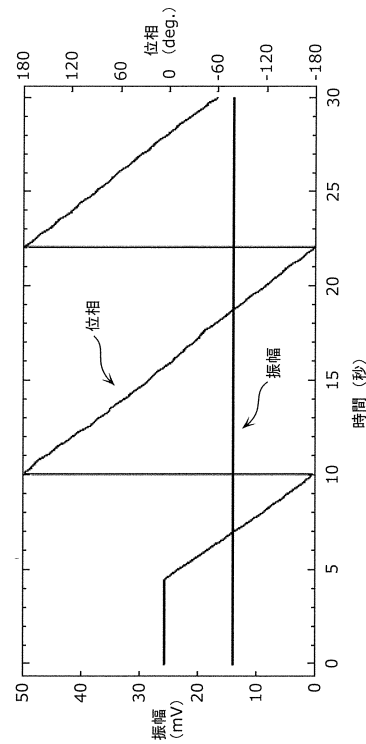
【図4A】



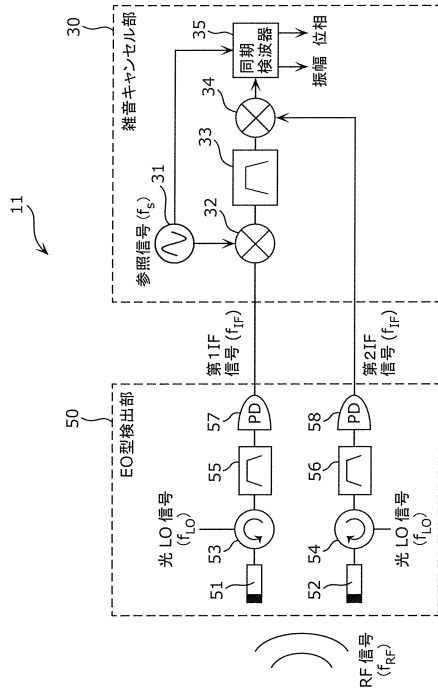
【図4B】



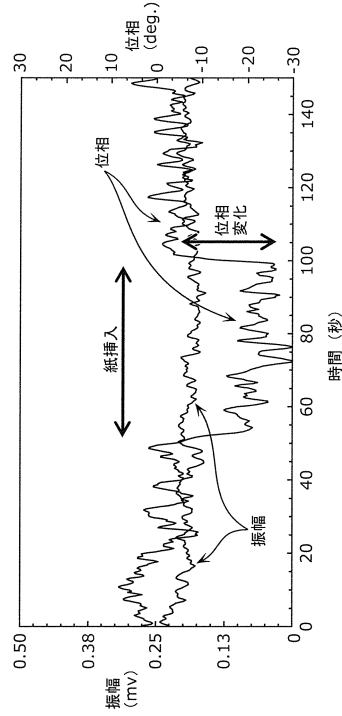
【図5】



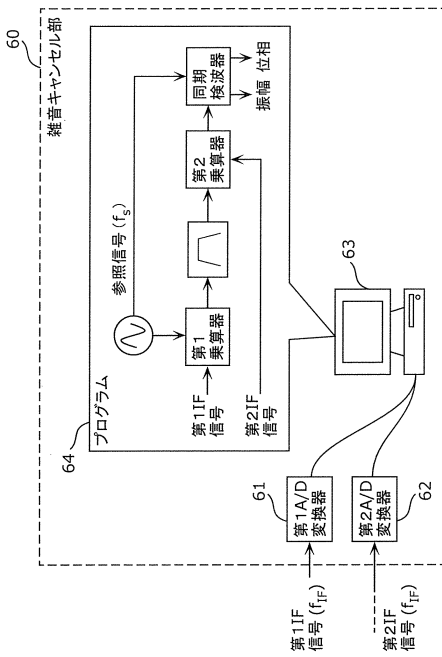
【 図 6 】



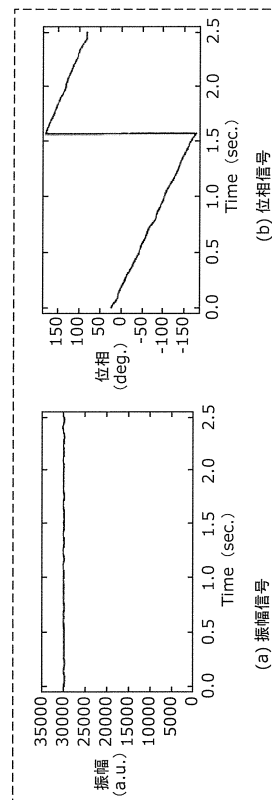
【 図 7 】



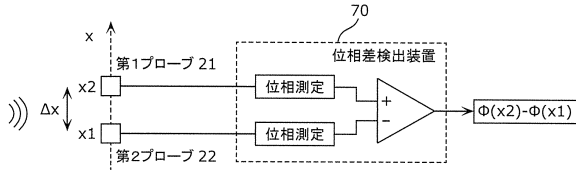
【 図 8 】



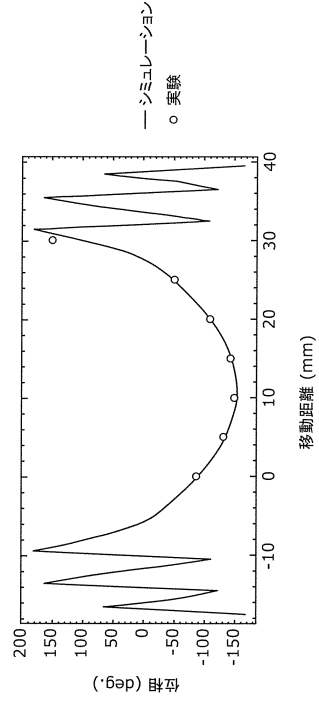
【 図 9 】



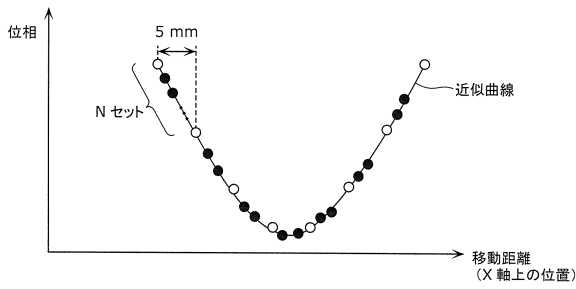
【図10】



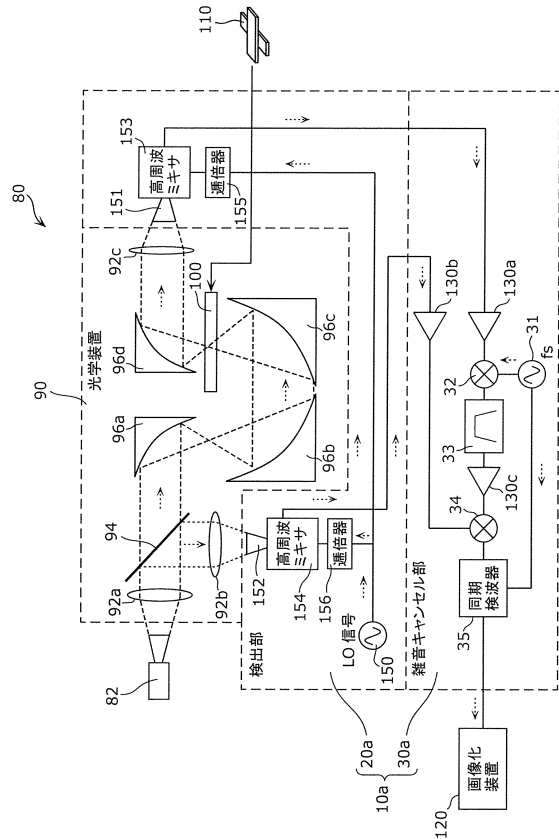
【図11】



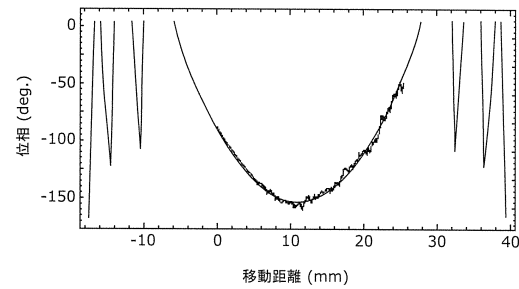
【図12】



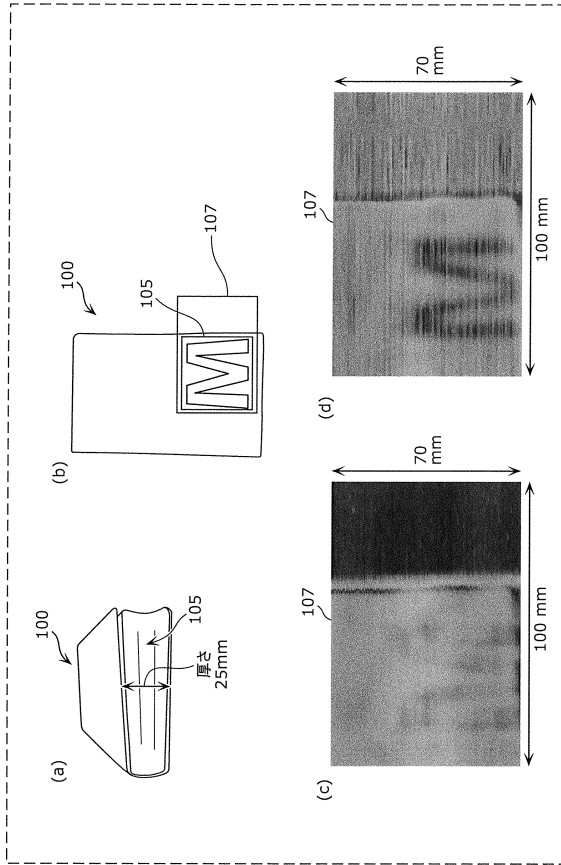
【図14】



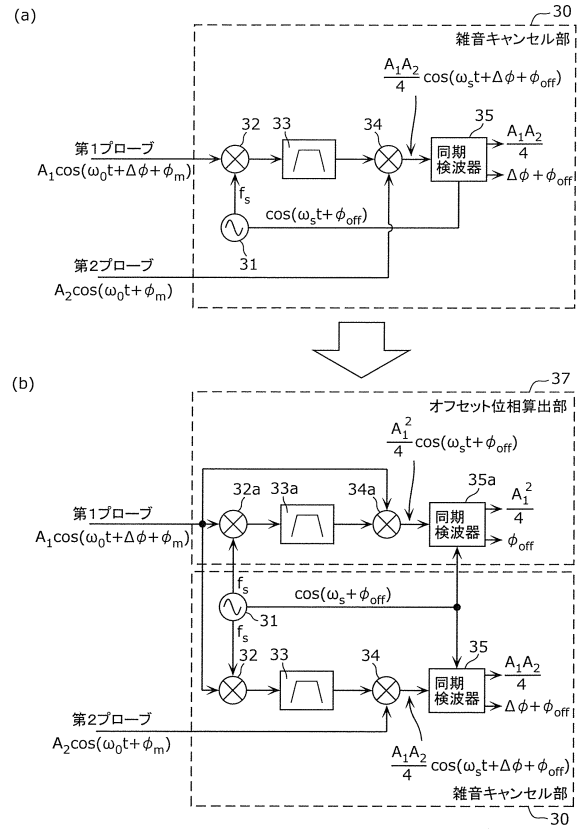
【図13】



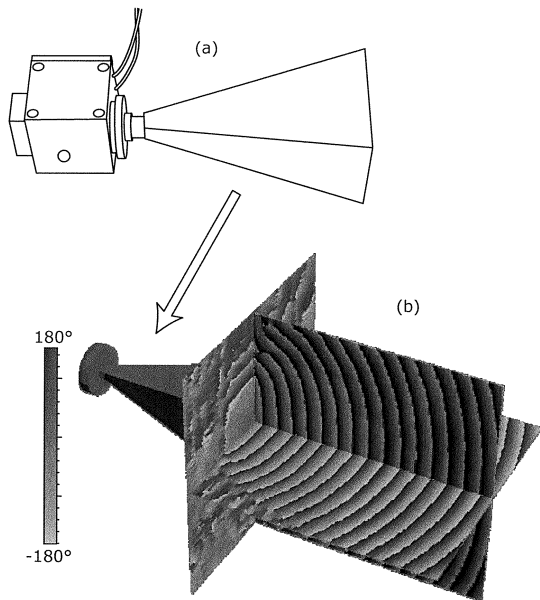
【図15】



【図16】



【図17】



---

フロントページの続き

(56)参考文献 特開2003-18067(JP,A)  
特開2003-185689(JP,A)  
特開平2-268277(JP,A)

(58)調査した分野(Int.Cl., DB名)  
G01R 29/10  
G01R 29/08