(19)日本国特許庁(JP)　(12)公開特許公報(A)　(11)特許出願公開番号
特開2018-124231
(P2018-124231A)
(43)公開日　平成30年8月9日(2018.8.9)

(51)Int.Cl.		F I		テーマコード（参考）
G01R 27/26	(2006.01)	G01R 27/26	H	2G028

審査請求 未請求　請求項の数 9　ＯＬ　（全 18 頁）

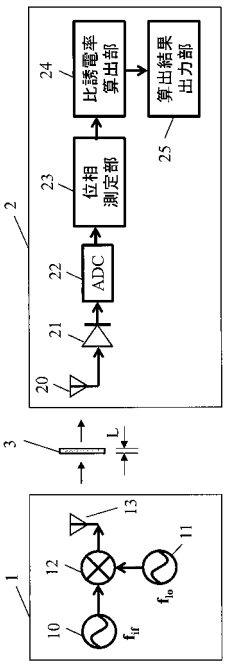
(21)出願番号　特願2017-18439(P2017-18439)
(22)出願日　平成29年2月3日(2017.2.3)

(71)出願人　000004226
日本電信電話株式会社
東京都千代田区大手町一丁目５番１号
(74)代理人　100098394
弁理士　山川　茂樹
(74)代理人　100153006
弁理士　小池　勇三
(74)代理人　100064621
弁理士　山川　政樹
(72)発明者　徐　照男
東京都千代田区大手町一丁目５番１号　日本電信電話株式会社内
(72)発明者　濱田　裕史
東京都千代田区大手町一丁目５番１号　日本電信電話株式会社内

最終頁に続く

(54)【発明の名称】誘電率測定システム、装置および方法

(57)【要約】
【課題】比誘電率の測定時間を短縮する。
【解決手段】誘電率測定システムは、２つの周波数の信号が混ざったＲＦ信号を送信する送信機１と、ＲＦ信号を受信して物体３の比誘電率を算出する受信機２とを備える。受信機２は、ＲＦ信号を受信するアンテナ２０と、アンテナ２０で受信されたＲＦ信号を検波し、２つの周波数の信号の差周波信号を出力する検波用ダイオード２１と、送信機１と受信機２との間に物体３が存在しない状態と物体３が存在する状態のそれぞれについて差周波信号の位相を測定する位相測定部２３と、物体３が存在しない状態で測定された差周波信号の位相と、物体３が存在する状態で測定された差周波信号の位相と、物体３の厚さとから、物体３の比誘電率を算出する比誘電率算出部２４とを備える。
【選択図】　図１



【特許請求の範囲】
【請求項１】
２つの周波数の信号が混ざった無線周波信号を送信する送信機と、
この送信機との間に測定対象の物体が存在しない状態と前記物体が存在する状態のそれぞれについて前記無線周波信号を受信して前記物体の比誘電率を算出する受信機とを備え、
前記受信機は、
前記無線周波信号を受信する第１のアンテナと、
この第１のアンテナで受信された無線周波信号を検波し、前記２つの周波数の信号の差周波信号を出力する検波器と、
前記送信機と前記受信機との間に前記物体が存在しない状態と前記物体が存在する状態のそれぞれについて前記差周波信号の位相を測定する位相測定部と、
前記物体が存在しない状態で測定された前記差周波信号の位相と、前記物体が存在する状態で測定された前記差周波信号の位相と、前記物体の厚さとから、前記物体の比誘電率を算出する比誘電率算出部とを備えることを特徴とする誘電率測定システム。
【請求項２】
請求項１記載の誘電率測定システムにおいて、
前記受信機は、前記検波器と前記位相測定部との間に設けられ、前記検波器の出力信号を増幅するアンプをさらに備えることを特徴とする誘電率測定システム。
【請求項３】
請求項２記載の誘電率測定システムにおいて、
前記受信機は、
第１のローカル信号を出力する第１の発振器と、
前記アンプと前記位相測定部との間に設けられ、前記アンプから出力された前記差周波信号と前記第１の発振器から出力された前記第１のローカル信号とを混合することにより、前記差周波信号の周波数を、前記無線周波信号および前記第１のローカル信号よりも低い周波数に変換する第１のミキサとをさらに備えることを特徴とする誘電率測定システム。
【請求項４】
請求項１乃至３のいずれか１項に記載の誘電率測定システムにおいて、
前記送信機は、
中間周波信号を出力する第２の発振器と、
第２のローカル信号を出力する第３の発振器と、
前記第２の発振器から出力された中間周波信号と前記第３の発振器から出力された第２のローカル信号とを混合する第２のミキサと、
この第２のミキサから出力された無線周波信号を送信する第２のアンテナとを備えることを特徴とする誘電率測定システム。
【請求項５】
請求項４記載の誘電率測定システムにおいて、
前記第２のミキサは、前記第２のローカル信号、および前記第２のローカル信号と前記中間周波信号との和の周波数の信号を通過させ、前記第２のローカル信号と前記中間周波信号との差の周波数の信号を遮断する通過帯域特性を有する単側波帯ミキサであることを特徴とする誘電率測定システム。
【請求項６】
請求項４記載の誘電率測定システムにおいて、
前記第２のミキサと前記第２のアンテナとの間に設けられたバンドパスフィルタをさらに備え、
前記第２のミキサは、前記第２のローカル信号、前記第２のローカル信号と前記中間周波信号との和の周波数の信号、および前記第２のローカル信号と前記中間周波信号との差の周波数の信号を通過させる通過帯域特性を有する両側波帯ミキサであり、

前記バンドパスフィルタは、前記第２のミキサから出力された信号のうち、前記第２のローカル信号、および前記第２のローカル信号と前記中間周波信号との和の周波数の信号を通過させ、前記第２のローカル信号と前記中間周波信号との差の周波数の信号を遮断する通過帯域特性を有することを特徴とする誘電率測定システム。
【請求項７】
請求項１乃至３のいずれか１項に記載の誘電率測定システムにおいて、
前記送信機は、
中間周波信号と第２のローカル信号との和の周波数の信号を出力する第２の発振器と、
前記第２のローカル信号を出力する第３の発振器と、
前記第２の発振器から出力された信号と前記第３の発振器から出力された第２のローカル信号とを合波する合波器と、
この合波器から出力された無線周波信号を送信する第２のアンテナとを備えることを特徴とする誘電率測定システム。
【請求項８】
無線周波信号を受信するアンテナと、
このアンテナで受信された無線周波信号を検波し、この無線周波信号に含まれる２つの周波数の信号の差周波信号を出力する検波器と、
前記無線周波信号の到来方向に測定対象の物体が存在しない状態と前記物体が存在する状態のそれぞれについて前記差周波信号の位相を測定する位相測定部と、
前記物体が存在しない状態で測定された前記差周波信号の位相と、前記物体が存在する状態で測定された前記差周波信号の位相と、前記物体の厚さとから、前記物体の比誘電率を算出する比誘電率算出部とを備えることを特徴とする誘電率測定装置。
【請求項９】
送信機が、この送信機と受信機との間に測定対象の物体が存在しない状態で２つの周波数の信号が混ざった無線周波信号を送信する第１のステップと、
前記受信機が、前記物体が存在しない状態で前記無線周波信号を受信する第２のステップと、
前記受信機が、前記物体が存在しない状態で前記無線周波信号を検波し、前記２つの周波数の信号の差周波信号を出力する第３のステップと、
前記受信機が、前記物体が存在しない状態で前記差周波信号の位相を測定する第４のステップと、
前記送信機が、前記物体が存在する状態で前記２つの周波数の信号が混ざった無線周波信号を送信する第５のステップと、
前記受信機が、前記物体が存在する状態で前記無線周波信号を受信する第６のステップと、
前記受信機が、前記物体が存在する状態で前記無線周波信号を検波し、前記差周波信号を出力する第７のステップと、
前記受信機が、前記物体が存在する状態で前記差周波信号の位相を測定する第８のステップと、
前記受信機が、前記物体が存在しない状態で測定した前記差周波信号の位相と、前記物体が存在する状態で測定した前記差周波信号の位相と、前記物体の厚さとから、前記物体の比誘電率を算出する第９のステップとを含むことを特徴とする誘電率測定方法。
【発明の詳細な説明】
【技術分野】
【０００１】
本発明は、電磁波を用いて物体の比誘電率を測定する誘電率測定システム、装置および方法に関するものである。
【背景技術】
【０００２】
近年、物品の製造メーカにおいては、製品検査の重要度が増している。特に、食品の製

造メーカにおいては、加工食品への異物混入により、会社の信頼性低下や出荷停止など、業績を逼迫する状況になる場合も生じている。製品の出荷検査の段階で、製品への異物混入を検出して、異物が混入した製品の出荷を未然に防ぐことが望ましい。しかしながら、既存の検出装置であるイメージング装置は、金属の検出は可能であるが、昆虫や、製品とは異なる食品などの有機物質を高い精度で検出することはできないという問題点があった。

【０００３】

一方、物体の比誘電率を求めることができれば、物体への異物の混入を検出することが可能になる。従来、物体の比誘電率を測定する方法として、２つの異なる周波数間の位相傾きを用いる方法がある（非特許文献１参照）。図１３は従来の誘電率測定システムの構成を示すブロック図である。誘電率測定システムは、送信機１００と、受信機１０１とから構成される。

【０００４】

送信機１００は、電圧制御発振器（ＶＣＯ：Voltage Controlled Oscillator）１０００を用いて、図１４（Ａ）のように無線周波信号（以下、ＲＦ信号）の周波数を時間掃引し、ＲＦ信号をアンテナ１００１から送出する。

【０００５】

受信機１０１は、物体１０２を透過したＲＦ信号をアンテナ１０１０で受信する。ミキサ１０１１は、受信されたＲＦ信号と受信機用のローカル信号（以下、ＬＯ信号）とを混合することにより、ＲＦ信号を中間周波信号（以下、ＩＦ信号）に変換する。ＲＦ信号の周波数をf_1，f_2、ＬＯ信号の周波数をf_{lo}とすると、図１４（Ｂ）に示すようにＩＦ信号の周波数はf_1-f_{lo}，f_2-f_{lo}となる。

【０００６】

ＡＤ変換器（ＡＤＣ：Analog to Digital Converter）１０１２は、ＩＦ信号をデジタル信号に変換する。位相測定部１０１３は、ＩＦ信号の２つの周波数f_1-f_{lo}，f_2-f_{lo}のそれぞれにおける位相θ_1，θ_2を測定する。位相差算出部１０１４は、位相差$\theta_1-\theta_2$を算出する。そして、比誘電率算出部１０３は、位相差$\theta_1-\theta_2$から物体１０２の比誘電率ε_rを算出する。

【０００７】

送信機１００と、受信機１０１のアンテナ１０１０とミキサ１０１１とＡＤ変換器１０１２と位相測定部１０１３としては、ネットワークアナライザー（ＶＮＡ：Network Analyzer）が使用される。ＶＮＡについては例えば非特許文献２に開示されている。

【０００８】

しかしながら、従来の誘電率測定システムでは、主に次の２つの理由により測定時間が長いという問題点があった。

（I）第１の理由は、ＲＦ信号の周波数を時間掃引しているためである。従来の誘電率測定システムでは、２つの周波数のＲＦ信号を順次生成して物体に照射し、物体を透過した信号の位相を別々に測定していた。

（II）第２の理由は、ＲＦ信号の周波数の切り替えをＶＣＯによって行なう際に、所望の周波数に落ち着くまでにセトリング時間が必要であり、周波数の切り替えに時間がかかることである。非特許文献３によると、セトリング時間は、一般的に数ｍｓである。

【０００９】

上記のように食品への異物混入を検査する場合には、生産ラインを流れる食品を短時間で検査する必要があるため、測定時間は短いことが望ましい。したがって、誘電率測定システムの測定時間の改善が求められている。

【先行技術文献】

【非特許文献】

【００１０】

【非特許文献１】T.Jyo, et al., “THz Permittivity Imaging Using Multi-tone Unwrapped Phase Slope method”, IRMMW 2016

【非特許文献２】“計測の基礎セミナ　ＲＦ／マイクロ波コース　ネットワーク・アナライザの基礎”，アジレント・テクノロジー株式会社，ｐ．４９，２０１３年，＜http://cp.literature.agilent.com/litweb/pdf/5988-6966JA.pdf＞
【非特許文献３】Roberto Nonis, et al., “Modeling, design and characterization of a new low-jitter analog dual tuning LC-VCO PLL architecture”, IEEE Journal of Solid-State Circuits, Vol.40, No.6, 2005
【発明の概要】
【発明が解決しようとする課題】
【００１１】
本発明は、上記課題を解決するためになされたもので、従来と比較して測定時間を短縮することが可能な誘電率測定システム、装置および方法を提供することを目的とする。
【課題を解決するための手段】
【００１２】
本発明の誘電率測定システムは、２つの周波数の信号が混ざった無線周波信号を送信する送信機と、この送信機との間に測定対象の物体が存在しない状態と前記物体が存在する状態のそれぞれについて前記無線周波信号を受信して前記物体の比誘電率を算出する受信機とを備え、前記受信機は、前記無線周波信号を受信する第１のアンテナと、この第１のアンテナで受信された無線周波信号を検波し、前記２つの周波数の信号の差周波信号を出力する検波器と、前記送信機と前記受信機との間に前記物体が存在しない状態と前記物体が存在する状態のそれぞれについて前記差周波信号の位相を測定する位相測定部と、前記物体が存在しない状態で測定された前記差周波信号の位相と、前記物体が存在する状態で測定された前記差周波信号の位相と、前記物体の厚さとから、前記物体の比誘電率を算出する比誘電率算出部とを備えることを特徴とするものである。
【００１３】
また、本発明の誘電率測定システムの１構成例において、前記受信機は、前記検波器と前記位相測定部との間に設けられ、前記検波器の出力信号を増幅するアンプをさらに備える。
また、本発明の誘電率測定システムの１構成例において、前記受信機は、第１のローカル信号を出力する第１の発振器と、前記アンプと前記位相測定部との間に設けられ、前記アンプから出力された前記差周波信号と前記第１の発振器から出力された前記第１のローカル信号とを混合することにより、前記差周波信号の周波数を、前記無線周波信号および前記第１のローカル信号よりも低い周波数に変換する第１のミキサとをさらに備える。
【００１４】
また、本発明の誘電率測定システムの１構成例において、前記送信機は、中間周波信号を出力する第２の発振器と、第２のローカル信号を出力する第３の発振器と、前記第２の発振器から出力された中間周波信号と前記第３の発振器から出力された第２のローカル信号とを混合する第２のミキサと、この第２のミキサから出力された無線周波信号を送信する第２のアンテナとを備える。
また、本発明の誘電率測定システムの１構成例において、前記第２のミキサは、前記第２のローカル信号、および前記第２のローカル信号と前記中間周波信号との和の周波数の信号を通過させ、前記第２のローカル信号と前記中間周波信号との差の周波数の信号を遮断する通過帯域特性を有する単側波帯ミキサである。
また、本発明の誘電率測定システムの１構成例は、前記第２のミキサと前記第２のアンテナとの間に設けられたバンドパスフィルタをさらに備え、前記第２のミキサは、前記第２のローカル信号、前記第２のローカル信号と前記中間周波信号との和の周波数の信号、および前記第２のローカル信号と前記中間周波信号との差の周波数の信号を通過させる通過帯域特性を有する両側波帯ミキサであり、前記バンドパスフィルタは、前記第２のミキサから出力された信号のうち、前記第２のローカル信号、および前記第２のローカル信号と前記中間周波信号との和の周波数の信号を通過させ、前記第２のローカル信号と前記中間周波信号との差の周波数の信号を遮断する通過帯域特性を有する。

また、本発明の誘電率測定システムの１構成例において、前記送信機は、中間周波信号と第２のローカル信号との和の周波数の信号を出力する第２の発振器と、前記第２のローカル信号を出力する第３の発振器と、前記第２の発振器から出力された信号と前記第３の発振器から出力された第２のローカル信号とを合波する合波器と、この合波器から出力された無線周波信号を送信する第２のアンテナとを備える。

【００１５】

また、本発明の誘電率測定装置は、無線周波信号を受信するアンテナと、このアンテナで受信された無線周波信号を検波し、この無線周波信号に含まれる２つの周波数の信号の差周波信号を出力する検波器と、前記無線周波信号の到来方向に測定対象の物体が存在しない状態と前記物体が存在する状態のそれぞれについて前記差周波信号の位相を測定する位相測定部と、前記物体が存在しない状態で測定された前記差周波信号の位相と、前記物体が存在する状態で測定された前記差周波信号の位相と、前記物体の厚さとから、前記物体の比誘電率を算出する比誘電率算出部とを備えることを特徴とするものである。

【００１６】

また、本発明の誘電率測定方法は、送信機が、この送信機と受信機との間に測定対象の物体が存在しない状態で２つの周波数の信号が混ざった無線周波信号を送信する第１のステップと、前記受信機が、前記物体が存在しない状態で前記無線周波信号を受信する第２のステップと、前記受信機が、前記物体が存在しない状態で前記無線周波信号を検波し、前記２つの周波数の信号の差周波信号を出力する第３のステップと、前記受信機が、前記物体が存在しない状態で前記差周波信号の位相を測定する第４のステップと、前記送信機が、前記物体が存在する状態で前記２つの周波数の信号が混ざった無線周波信号を送信する第５のステップと、前記受信機が、前記物体が存在する状態で前記無線周波信号を受信する第６のステップと、前記受信機が、前記物体が存在する状態で前記無線周波信号を検波し、前記差周波信号を出力する第７のステップと、前記受信機が、前記物体が存在する状態で前記差周波信号の位相を測定する第８のステップと、前記受信機が、前記物体が存在しない状態で測定した前記差周波信号の位相と、前記物体が存在する状態で測定した前記差周波信号の位相と、前記物体の厚さとから、前記物体の比誘電率を算出する第９のステップとを含むことを特徴とするものである。

【発明の効果】

【００１７】

本発明によれば、送信機から２つの異なる周波数の信号が混ざった無線周波信号を送信して、送信機と受信機との間に測定対象の物体が存在しない状態と物体が存在する状態のそれぞれについて無線周波信号を受信して、無線周波信号の位相の情報を基に物体の比誘電率を算出するので、無線周波信号の周波数の時間掃引が不要となり、また従来のＶＣＯで要していたセトリング時間も不要となるので、測定時間を短縮することが可能となる。

【図面の簡単な説明】

【００１８】

【図１】本発明の第１の実施例に係る誘電率測定システムの構成を示すブロック図である。

【図２】本発明の第１の実施例に係る誘電率測定システムの動作を説明するフローチャートである。

【図３】本発明の第１の実施例に係る誘電率測定システムにおける無線周波信号および差周波信号の周波数を説明する図である。

【図４】物体の比誘電率の算出原理を説明する図である。

【図５】本発明の第２の実施例に係る誘電率測定システムの構成を示すブロック図である。

【図６】本発明の第２の実施例に係る誘電率測定システムの動作を説明するフローチャートである。

【図７】本発明の第２の実施例に係る誘電率測定システムにおける無線周波信号および差周波信号の周波数を説明する図である。

【図８】本発明の第２の実施例において試験測定に用いた物体の断面図および物体の厚さを示す図である。
【図９】本発明の第２の実施例における比誘電率の測定結果を示す図である。
【図１０】本発明の第３の実施例に係る誘電率測定システムの送信機の構成を示すブロック図である。
【図１１】本発明の第４の実施例に係る誘電率測定システムの送信機の構成を示すブロック図である。
【図１２】本発明の第５の実施例に係る誘電率測定システムの受信機の構成を示すブロック図である。
【図１３】従来の誘電率測定システムの構成を示すブロック図である。
【図１４】従来の誘電率測定システムにおける無線周波信号および中間周波信号の周波数を説明する図である。
【発明を実施するための形態】
【００１９】
［第１の実施例］
以下、本発明の実施例について図面を参照して説明する。図１は本発明の第１の実施例に係る誘電率測定システムの構成を示すブロック図である。誘電率測定システムは、送信機１と、受信機２（誘電率測定装置）とから構成される。
【００２０】
送信機１は、発振器１０，１１と、ミキサ１２と、アンテナ１３とから構成される。受信機２は、アンテナ２０と、検波用ダイオード２１（検波器）と、ＡＤＣ２２と、位相測定部２３と、比誘電率算出部２４と、算出結果出力部２５とから構成される。
【００２１】
図２は本実施例の誘電率測定システムの動作を説明するフローチャートである。まず、送信機１と受信機２との間に測定対象の物体３がない状態で、送信機１は、２つの周波数f_1，f_2（$f_2 > f_1$）の無線周波信号（以下、ＲＦ信号）を受信機２に向けて照射する（図２ステップＳ１００）。具体的には、送信機１の発振器１０は、周波数が$f_{if} = f_2 - f_1$の中間周波信号（以下、ＩＦ信号）を出力し、発振器１１は、周波数が$f_{lo} = f_1$のローカル信号（以下、ＬＯ信号）を出力する。
【００２２】
送信機１のミキサ１２は、発振器１０からのＩＦ信号と発振器１１からのＬＯ信号とを混合する。ミキサ１２は、$f_1 = f_{lo}$，$f_2 = f_{lo} + f_{if}$の周波数の信号を通過させ、$f_{lo} - f_{if}$の周波数の信号を遮断する通過帯域特性を有する単側波帯（ＳＳＢ：Single Sideband）ミキサである。このため、ミキサ１２は、図３（Ａ）に示すように周波数f_1とf_2が混ざったＲＦ信号を出力する。アンテナ１３は、ミキサ１２から出力されたＲＦ信号を受信機２に向けて送信する。
【００２３】
受信機２の検波用ダイオード２１は、アンテナ２０で受信されたＲＦ信号を自乗検波し、２つの周波数のＲＦ信号の差周波信号を出力する（図２ステップＳ１０１）。上記のように、ＲＦ信号の周波数をf_1，f_2とすると、図３（Ｂ）に示すように差周波信号の周波数は$f_2 - f_1$である。
【００２４】
ここで、検波用ダイオード２１の入力S_{ano}を式（１）のように記述すると、検波用ダイオード２１の出力S_{cath}は、検波用ダイオード２１の自乗検波作用により式（２）のようになる。
【００２５】
【数１】

$$S_{ano} = \cos(2\pi f_1 t + \theta_1) + \cos(2\pi f_2 t + \theta_2) \qquad \cdots (1)$$

【００２６】
【数２】

$$S_{cath} = \{\cos(2\pi f_1 t + \theta_1) + \cos(2\pi f_2 t + \theta_2)\}^2$$
$$= 1 + \frac{\cos(4\pi f_1 t + 2\theta_1)}{2} + \frac{\cos(4\pi f_2 t + 2\theta_2)}{2}$$
$$+ \frac{1}{2}\cos\{2\pi(f_1 + f_2)t + \theta_1 + \theta_2\}$$
$$+ \frac{1}{2}\cos\{2\pi(f_2 - f_1)t + \theta_2 - \theta_1\} \quad \cdots (2)$$

【００２７】
式（１）、式（２）におけるθ_1，θ_2は、それぞれアンテナ２０で受信した周波数f_1，f_2のＲＦ信号の位相である。式（２）の右辺第５項から明らかなように、$\theta_2-\theta_1$の位相成分を有する、周波数f_2-f_1の差周波信号が生成されることが分かる。
【００２８】
次に、受信機２のＡＤＣ２２は、検波用ダイオード２１から出力された差周波信号をデジタル信号に変換する（図２ステップＳ１０２）。なお、本実施例では明記していないが、後述の実施例で説明するように、式（２）の右辺第１項のＤＣ成分と右辺第２項～第４項の高調波成分（周波数f_1，f_2，f_1+f_2の成分）を除去し、差周波の成分のみがＡＤＣ２２に入力されるようにしておくことが望ましい。
【００２９】
受信機２の位相測定部２３は、差周波信号の位相（正確には送信側の基準のＩＦ信号に対する差周波信号の位相の変化量）を測定する（図２ステップＳ１０３）。本実施例では、送信機１と受信機２との間に物体３がない場合（空気のみが存在する場合）に測定される差周波信号の位相をθ_{air}とする。位相測定部２３は、例えばＤＳＰ（Digital Signal Processor）によって構成することができる。
【００３０】
次に、誘電率測定システムを使用するユーザは、厚さＬが既知の物体３を、送信機１と受信機２との間に配置する。
送信機１は、このように物体３が配置された状態で、２つの周波数f_1，f_2のＲＦ信号を物体３に向けて照射する（図２ステップＳ１０４）。このステップＳ１０４の処理は、ステップＳ１００と同様である。
【００３１】
受信機２の検波用ダイオード２１は、送信機１のアンテナ１３から送信され、物体３を透過してアンテナ２０で受信されたＲＦ信号を自乗検波し、２つの周波数f_1，f_2のＲＦ信号の差周波信号を出力する（図２ステップＳ１０５）。
【００３２】
受信機２のＡＤＣ２２と位相測定部２３の動作（図２ステップＳ１０６，Ｓ１０７）は、それぞれステップＳ１０２，Ｓ１０３と同様である。本実施例では、送信機１と受信機２との間に物体３が存在する場合に測定される差周波信号の位相をθ_{sample}とする。
【００３３】
次に、受信機２の比誘電率算出部２４は、送信機１と受信機２との間に物体３が存在しない場合に測定された差周波信号の位相θ_{air}と、物体３が存在する場合に測定された差周波信号の位相θ_{sample}と、ＲＦ信号の透過方向（図１の左から右への方向）における物体３の既知の厚さＬとから、物体３の比誘電率ε_rを算出する（図２ステップＳ１０８）。
【００３４】
なお、送信機１と受信機２との間に物体３が存在する状態か存在しない状態かを示す状

態信号をユーザが比誘電率算出部２４に入力すれば、比誘電率算出部２４は２つの状態を識別することが可能である。

ここで、本実施例の比誘電率ε_rの算出原理を図４（Ａ）～図４（Ｄ）を用いて説明する。図４（Ａ）は比誘電率ε_rの小さい物体３に対して周波数f_1，f_2のＲＦ信号を順番に照射して、物体３を透過した周波数f_1，f_2のＲＦ信号の位相θ_1，θ_2を順番に測定する処理を模式的に表している。この場合、位相差$\Delta\theta=\theta_2-\theta_1$が図４（Ｂ）のように得られたとする。

【００３５】

一方、図４（Ｃ）は比誘電率ε_rの大きい物体３に対して周波数f_1，f_2のＲＦ信号を順番に照射して、物体３を透過した周波数f_1，f_2のＲＦ信号の位相θ_1，θ_2を順番に測定する処理を模式的に表している。この場合、位相差$\Delta\theta=\theta_2-\theta_1$は図４（Ｄ）のようになる。このように位相差$\Delta\theta$（位相の傾き）は、物体３の比誘電率$\varepsilon_r$に応じて異なる値をとる。物体３の比誘電率$\varepsilon_r$は式（３）により求めることができる。

【００３６】

【数３】

$$\frac{\theta_2-\theta_1}{f_2-f_1}=\frac{2\pi\left(\sqrt{\varepsilon_r}-1\right)L}{c} \qquad \cdots（３）$$

【００３７】

式（３）のｃは光速である。以上の比誘電率ε_rの算出原理は非特許文献１に開示されている。

本実施例では、送信機１から周波数f_1とf_2が混ざったＲＦ信号を送信するが、位相測定部２３が測定する位相情報の中に位相差$\Delta\theta=\theta_2-\theta_1$の情報が含まれる。したがって、本実施例の比誘電率算出部２４は、式（３）に基づく以下の式（４）により物体３の比誘電率ε_rを求めることが可能である。

【００３８】

【数４】

$$\frac{\theta_{sample}-\theta_{air}}{f_2-f_1}=\frac{2\pi\left(\sqrt{\varepsilon_r}-1\right)L}{c} \qquad \cdots（４）$$

【００３９】

なお、誘電率測定システムの各素子で発生する固定の位相オフセットは、位相θ_{sample}とθ_{air}との差分をとることで相殺される。したがって、位相オフセットが比誘電率ε_rの算出に影響を与えることはない。

【００４０】

受信機２の算出結果出力部２５は、比誘電率算出部２４の算出結果を出力する（図２ステップＳ１０９）。具体的には、算出結果出力部２５は、例えば比誘電率算出部２４が算出した物体３の比誘電率ε_rの値を表示したり、比誘電率ε_rの情報を外部に送信したりする。こうして、本実施例の誘電率測定システムの処理が終了する。

【００４１】

比誘電率算出部２４と算出結果出力部２５とは、ＣＰＵ（Central Processing Unit）、記憶装置及びインタフェースを備えたコンピュータと、これらのハードウェア資源を制御するプログラムによって実現することができる。コンピュータのＣＰＵは、記憶装置に格納されたプログラムに従って本実施例または以下の実施例で説明する処理を実行する。

【００４２】

本実施例では、送信機１から２つの異なる周波数の信号が混ざった２トーンＲＦ信号を送信して、物体３を透過したＲＦ信号の位相の情報を基に物体３の比誘電率ε_rを算出するため、ＲＦ信号の周波数の時間掃引が不要となり、また従来のＶＣＯで要していたセト

リング時間も不要となるので、測定時間を短縮することが可能である。

【００４３】

［第２の実施例］

次に、本発明の第２の実施例について説明する。図５は本発明の第２の実施例に係る誘電率測定システムの構成を示すブロック図であり、図１と同一の構成には同一の符号を付してある。本実施例は、第１の実施例の具体例を説明するものである。本実施例の誘電率測定システムは、送信機１ａと、受信機２ａ（誘電率測定装置）とから構成される。

【００４４】

送信機１ａは、発振器１０，１１ａと、ミキサ１２と、アンテナ１３と、周波数逓倍器１４とから構成される。

受信機２ａは、アンテナ２０と、検波用ダイオード２１と、ＡＤＣ２２と、位相測定部２３と、比誘電率算出部２４と、算出結果出力部２５と、ＩＦアンプ２６と、発振器２７と、ＩＦミキサ２８とから構成される。

【００４５】

図６は本実施例の誘電率測定システムの動作を説明するフローチャートである。送信機１ａは、送信機１ａと受信機２ａとの間に測定対象の物体３がない状態で、２つの周波数f_1，f_2のＲＦ信号を受信機２ａに向けて照射する（図６ステップＳ２００）。

【００４６】

送信機１ａの発振器１０は、第１の実施例と同様に、周波数が$f_{if}=f_2-f_1$のＩＦ信号を出力する。一方、発振器１１ａは、周波数がf_a（$f_a<f_{lo}$）の信号を出力する。周波数逓倍器１４は、発振器１１ａから出力された信号のＮ（Ｎは２以上の整数）倍の周波数$f_{lo}=f_1=f_a\times N$のＬＯ信号を出力する。

【００４７】

送信機１ａのミキサ１２は、発振器１０からのＩＦ信号と周波数逓倍器１４からのＬＯ信号とを混合する。第１の実施例で説明したとおり、ミキサ１２は、$f_1=f_{lo}$，$f_2=f_{lo}+f_{if}$の周波数の信号を通過させ、$f_{lo}-f_{if}$の周波数の信号を遮断する通過帯域特性を有する。このため、ミキサ１２は、図７（Ａ）に示すように周波数f_1とf_2が混ざったＲＦ信号を出力する。図７（Ａ）の１２０はミキサ１２の通過帯域を示している。アンテナ１３は、ミキサ１２から出力されたＲＦ信号を受信機２ａに向けて送信する。

【００４８】

受信機２ａの検波用ダイオード２１は、第１の実施例と同様に、アンテナ２０で受信されたＲＦ信号を自乗検波し、２つの周波数f_1，f_2のＲＦ信号の差周波信号を出力する（図６ステップＳ２０１）。

【００４９】

受信機２ａのＩＦアンプ２６は、検波用ダイオード２１の出力信号を増幅する（図６ステップＳ２０２）。第１の実施例で説明したとおり、検波用ダイオード２１の出力には、差周波信号の他に、ＤＣ成分と高調波成分とが含まれるが、これらＤＣ成分と高調波成分とはＩＦアンプ２６の帯域特性によって除去される。したがって、ＩＦアンプ２６からは、図７（Ｂ）に示すように周波数f_2-f_1の、増幅された差周波信号が出力される。

【００５０】

次に、受信機２ａのＩＦミキサ２８は、ＩＦアンプ２６から出力された周波数f_2-f_1の差周波信号と発振器２７から出力された周波数f_{lo_rx}の受信機用のＬＯ信号とを混合することにより、差周波信号の周波数を変換（ダウンコンバート）する（図６ステップＳ２０３）。このミキサ２８によるダウンコンバートにより、f_2-f_1の差周波信号の周波数は、図７（Ｃ）に示すように$f_2-f_1-f_{lo_rx}$に変換される。

【００５１】

受信機２ａのＡＤＣ２２は、ＩＦミキサ２８から出力された差周波信号をデジタル信号に変換する（図６ステップＳ２０４）。

受信機２ａの位相測定部２３の動作（図６ステップ２０５）は、第１の実施例と同様である。本実施例においても、送信機１ａと受信機２ａとの間に物体３がない場合に測定さ

れる差周波信号の位相をθ_{air}とする。

【００５２】

次に、ユーザは、厚さＬが既知の物体３を、送信機１ａと受信機２ａとの間に配置する。送信機１ａは、物体３が配置された状態で、２つの周波数f_1，f_2のＲＦ信号を物体３に向けて照射する（図６ステップＳ２０６）。このステップＳ２０６の処理は、ステップＳ２００と同様である。

【００５３】

受信機２ａの検波用ダイオード２１は、送信機１ａのアンテナ１３から送信され、物体３を透過してアンテナ２０で受信されたＲＦ信号を自乗検波し、２つの周波数f_1，f_2のＲＦ信号の差周波信号を出力する（図６ステップＳ２０７）。

【００５４】

受信機２ａのＩＦアンプ２６とＩＦミキサ２８とＡＤＣ２２と位相測定部２３の動作（図６ステップＳ２０８，Ｓ２０９，Ｓ２１０，Ｓ２１１）は、それぞれステップＳ２０２，Ｓ２０３，Ｓ２０４，Ｓ２０５と同様である。本実施例においても、送信機１ａと受信機２ａとの間に物体３が存在する場合に測定される差周波信号の位相をθ_{sample}とする。

【００５５】

受信機２ａの比誘電率算出部２４は、第１の実施例と同様に式（４）により物体３の比誘電率ε_rを算出する（図６ステップＳ２１２）。

受信機２ａの算出結果出力部２５の動作（図６ステップ２１３）は、第１の実施例と同様である。

【００５６】

次に、本実施例の誘電率測定システムを用いて物体３の比誘電率ε_rを実際に測定した結果を示す。ここでは、図８（Ａ）に示すように厚さＬが階段状に変化する物体３に対して誘電率測定を行った。図８（Ａ）のインデックスｉ１～ｉ９は物体３上の位置を示している。インデックスｉ１～ｉ９の位置の物体３の厚さＬを図８（Ｂ）に示す。この例では、厚さＬが０．８ｍｍから４０ｍｍまで階段状に変化している。

【００５７】

この測定では、f_{if}＝１５ＧＨｚ、f_a＝１４．８８８…ＧＨｚ、Ｎ＝１８、f_{lo}＝２６８ＧＨｚ、f_1＝２６８ＧＨｚ、f_2＝２８３ＧＨｚ、f_{lo_rx}＝１５．０１ＧＨｚとした。図８（Ａ）に示した物体３の材料は樹脂で、この物体３のテラヘルツ帯における比誘電率は２．５５である。比誘電率ε_rの測定結果を図９に示す。図９におけるε_3は物体３の正しい比誘電率である。

【００５８】

図９によると、最大誤差５．８％で比誘電率ε_rを測定できていることが分かる。また、インデックスｉ１～ｉ９の１点毎に必要な測定時間は０．０２８ｍｓであった。測定時間が０．０２８ｍｓであったのは、ＡＤＣ２２に入力される１０ＭＨｚの差周波信号（１周期０．１μｓ）を２８５周期測定しているからである。

【００５９】

一方、ＶＮＡを用いた従来の誘電率測定システムで同様の測定を行うためには、６ｍｓの測定時間が必要である（文献「“Keysight E8361A/C PNA Network Analyzer”, keysight, p.79, <http://literature.cdn.keysight.com/litweb/pdf/E8361-90007.pdf?id=451064>」参照）。したがって、本実施例によれば、測定時間を１／２００に短縮できていることが分かる。

【００６０】

こうして、本実施例では、第１の実施例と同様の効果を得ることができる。また、本実施例では、差周波信号をダウンコンバートするため、第１の実施例よりも低速のＡＤＣを採用することができる。

【００６１】

［第３の実施例］

次に、本発明の第３の実施例について説明する。図１０は本発明の第３の実施例に係る

誘電率測定システムの送信機の構成を示すブロック図であり、図１、図５と同一の構成には同一の符号を付してある。本実施例の送信機１ｂは、発振器１０，１１と、アンテナ１３と、両側波帯（ＤＳＢ：Double Sideband）ミキサ１２ｂと、バンドパスフィルタ１５とから構成される。

【００６２】

発振器１０，１１の動作は第１の実施例で説明したとおりである。ＤＳＢミキサ１２ｂは、発振器１０からのＩＦ信号と発振器１１からのＬＯ信号とを混合する。このとき、ＤＳＢミキサ１２ｂは、第１、第２の実施例のミキサ１２と異なり、f_1，f_2の周波数の信号を通過させるだけでなく、$f_{lo}-f_{if}=2f_1-f_2$の周波数の信号も通過させる。

【００６３】

バンドパスフィルタ１５は、ＤＳＢミキサ１２ｂから出力された信号のうち、f_1，f_2の周波数の信号を通過させ、$f_{lo}-f_{if}=2f_1-f_2$の周波数の信号を遮断する通過帯域特性を有する。このため、バンドパスフィルタ１５は、周波数f_1とf_2が混ざったＲＦ信号を出力する。アンテナ１３は、バンドパスフィルタ１５から出力されたＲＦ信号を送信する。

こうして、本実施例では、第１の実施例と同様の機能を有する送信機１ｂを実現することができる。

【００６４】

受信機の構成としては、第１の実施例の受信機２を用いてもよいし、第２の実施例の受信機２ａを用いてもよい。

また、発振器１１の代わりに、第２の実施例の発振器１１ａと周波数逓倍器１４とを用いて周波数f_aの信号からＬＯ信号を生成してもよい。

【００６５】

［第４の実施例］

次に、本発明の第４の実施例について説明する。図１１は本発明の第４の実施例に係る誘電率測定システムの送信機の構成を示すブロック図であり、図１、図５と同一の構成には同一の符号を付してある。本実施例の送信機１ｃは、発振器１０ｃ，１１と、アンテナ１３と、合波器１６とから構成される。

【００６６】

発振器１０ｃは、$f_{lo}+f_{if}=f_2$のＩＦ信号を出力する。合波器１６は、発振器１０ｃからの周波数$f_{lo}+f_{if}=f_2$のＩＦ信号と発振器１１からの周波数$f_{lo}=f_1$のＬＯ信号とを合波（周波数加算）する。このため、合波器１６は、周波数f_1とf_2が混ざったＲＦ信号を出力する。アンテナ１３は、合波器１６から出力されたＲＦ信号を送信する。

こうして、本実施例では、第１の実施例と同様の機能を有する送信機１ｃを実現することができる。

【００６７】

受信機の構成としては、第１の実施例の受信機２を用いてもよいし、第２の実施例の受信機２ａを用いてもよい。

また、発振器１１の代わりに、第２の実施例の発振器１１ａと周波数逓倍器１４とを用いて周波数f_aの信号からＬＯ信号を生成してもよい。

【００６８】

［第５の実施例］

次に、本発明の第５の実施例について説明する。図１２は本発明の第５の実施例に係る誘電率測定システムの受信機の構成を示すブロック図であり、図１、図５と同一の構成には同一の符号を付してある。本実施例の受信機２ｄは、アンテナ２０と、検波用ダイオード２１と、ＡＤＣ２２と、位相測定部２３と、比誘電率算出部２４と、算出結果出力部２５と、ＩＦアンプ２６とから構成される。

【００６９】

本実施例は、第１の実施例の受信機２の検波用ダイオード２１とＡＤＣ２２との間に、第２の実施例で説明したＩＦアンプ２６を挿入したものである。これにより、検波用ダイ

オード２１の出力信号を増幅すると共に、検波用ダイオード２１の出力信号に含まれるＤＣ成分と高調波成分とは除去することができる。

【００７０】

送信機の構成としては、第１の実施例～第４の実施例の送信機１，１ａ，１ｂ，１ｃのいずれかを用いればよい。

なお、本実施例では、第２の実施例のような差周波信号のダウンコンバートを実施していないため、第１の実施例と同様の高速のＡＤＣが必要になることは言うまでもない。

【００７１】

［第６の実施例］

第１～第５の実施例では、測定対象の物体３の厚さＬを既知の値としたが、厚さ検出部（不図示）を用いて物体３の厚さＬを検出し、検出した厚さＬの値を比誘電率算出部２４に入力するようにしてもよい。厚さ検出部の例としては、例えば超音波を用いた厚さ検出部、赤外光を用いた厚さ検出部、カメラで取得した物体３の可視画像から厚さＬを算出する厚さ検出部など、既存の様々な厚さ検出の技術を適用することができる。こうして、本実施例では、厚さＬが未知の物体３についても、厚さＬをリアルタイムに取得して物体３の比誘電率ε_rを算出することができる。

【産業上の利用可能性】

【００７２】

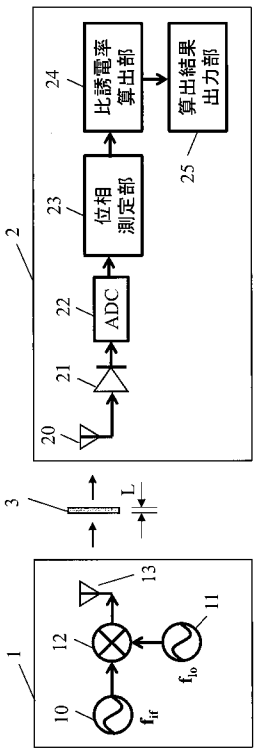
本発明は、電磁波を用いて物体の比誘電率を測定する技術に適用することができる。

【符号の説明】

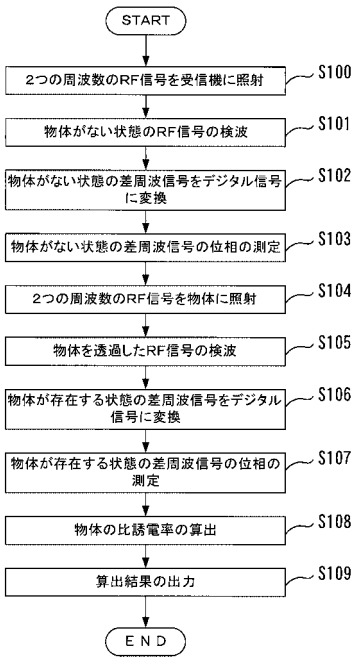
【００７３】

１，１ａ…送信機、２，２ａ…受信機、１０，１１，１１ａ，２７…発振器、１２…ミキサ、１２ｂ…両側波帯ミキサ、１３，２０…アンテナ、１４…周波数逓倍器、１５…バンドパスフィルタ、１６…合波器、２１…検波用ダイオード、２２…ＡＤ変換器、２３…位相測定部、２４…比誘電率算出部、２５…算出結果出力部、２６…ＩＦアンプ、２８…ＩＦミキサ。

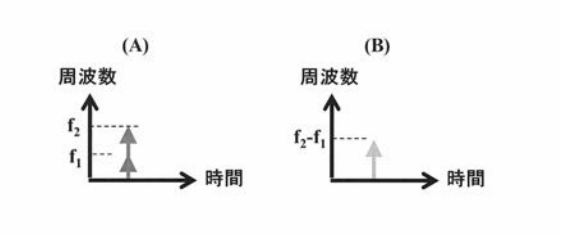
【図１】


比誘電率算出部
算出結果出力部
位相測定部
ADC
24
25
23
22
21
20
2
3
L
1
13
11
12
10
f_{lo}
f_{if}

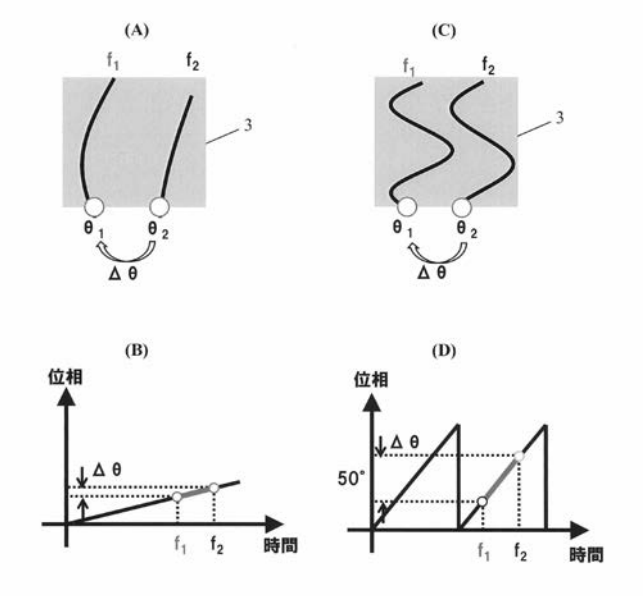
【図２】


START
2つの周波数のRF信号を受信機に照射
S100
物体がない状態のRF信号の検波
S101
物体がない状態の差周波信号をデジタル信号に変換
S102
物体がない状態の差周波信号の位相の測定
S103
2つの周波数のRF信号を物体に照射
S104
物体を透過したRF信号の検波
S105
物体が存在する状態の差周波信号をデジタル信号に変換
S106
物体が存在する状態の差周波信号の位相の測定
S107
物体の比誘電率の算出
S108
算出結果の出力
S109
END

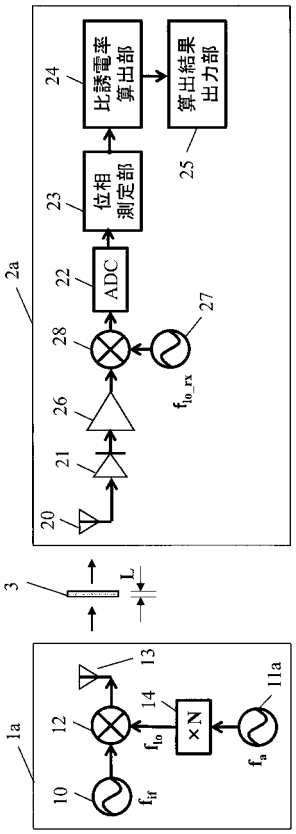
【図３】


(A)
周波数
f_2
f_1
時間
(B)
周波数
f_2-f_1
時間

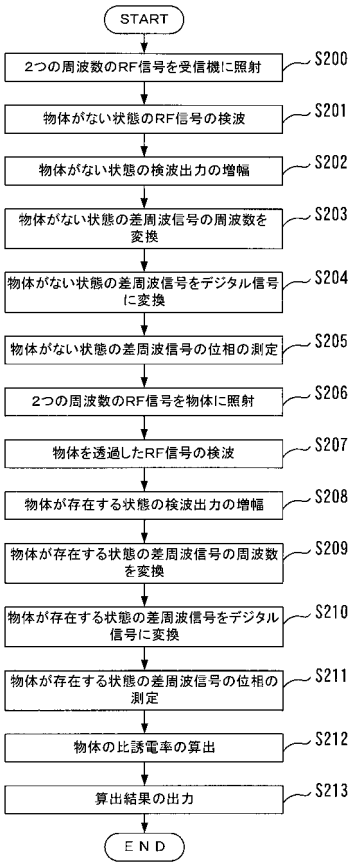
【図４】


(A)
f_1
f_2
3
θ_1
θ_2
Δθ
(C)
f_1
f_2
3
θ_1
θ_2
Δθ
(B)
位相
Δθ
f_1
f_2
時間
(D)
位相
Δθ
50°
f_1
f_2
時間

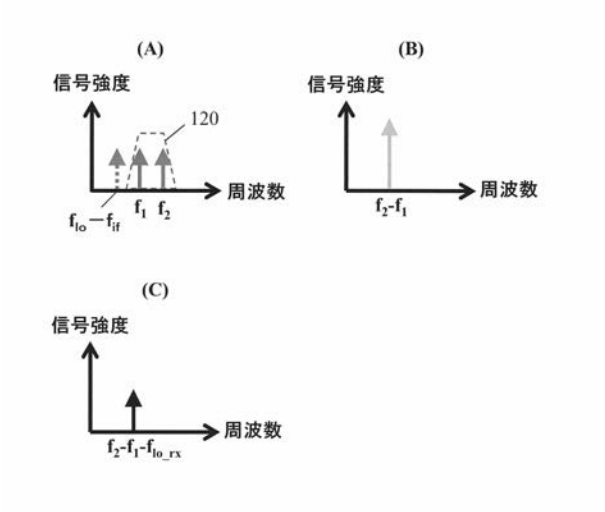
【図５】


比誘電率算出部
算出結果出力部
位相測定部
ADC
24
25
23
22
2a
27
28
26
21
20
3
L
1a
13
12
14
11a
10
×N
f_{lo}
f_{if}
f_a
f_{lo_rx}

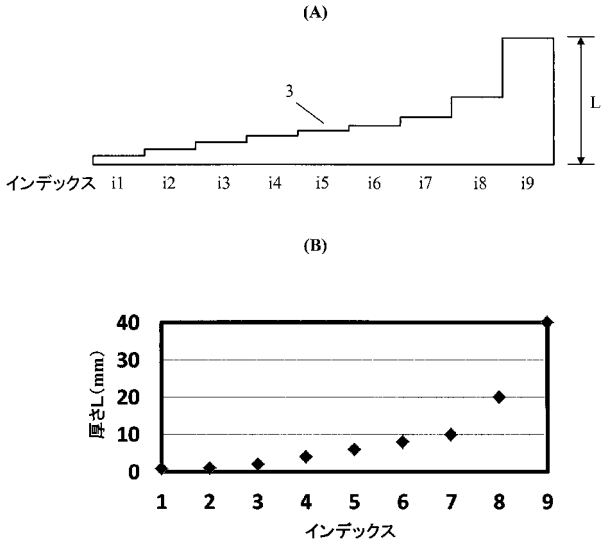
【図６】


START
2つの周波数のRF信号を受信機に照射
S200
物体がない状態のRF信号の検波
S201
物体がない状態の検波出力の増幅
S202
物体がない状態の差周波信号の周波数を変換
S203
物体がない状態の差周波信号をデジタル信号に変換
S204
物体がない状態の差周波信号の位相の測定
S205
2つの周波数のRF信号を物体に照射
S206
物体を透過したRF信号の検波
S207
物体が存在する状態の検波出力の増幅
S208
物体が存在する状態の差周波信号の周波数を変換
S209
物体が存在する状態の差周波信号をデジタル信号に変換
S210
物体が存在する状態の差周波信号の位相の測定
S211
物体の比誘電率の算出
S212
算出結果の出力
S213
END

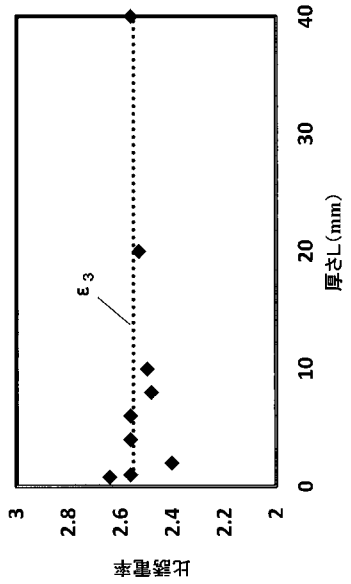
【図７】


(A)
信号強度
120
周波数
$f_{lo}-f_{if}$
f_1 f_2
(B)
信号強度
周波数
f_2-f_1
(C)
信号強度
周波数
$f_2-f_1-f_{lo_rx}$

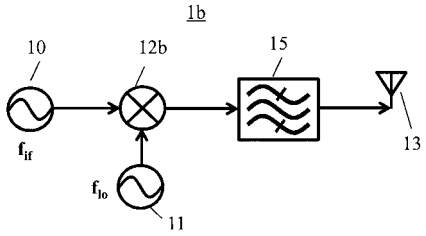
【図８】


(A)
3
L
インデックス i1 i2 i3 i4 i5 i6 i7 i8 i9
(B)
厚さL(mm)
40
30
20
10
0
1 2 3 4 5 6 7 8 9
インデックス

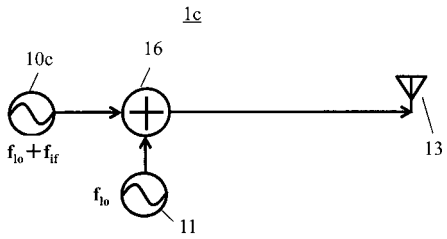
【図９】



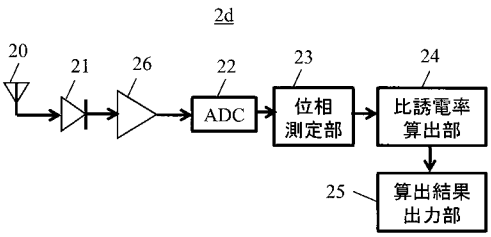
【図１０】



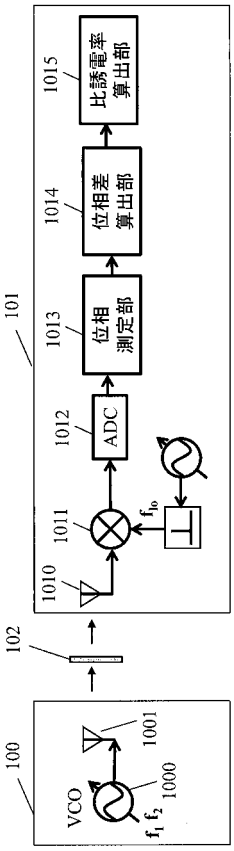
【図１１】



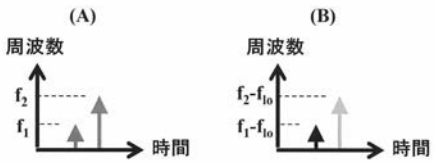
【図１２】



【図１３】



【図１４】



フロントページの続き

(72)発明者　矢板　信
東京都千代田区大手町一丁目５番１号　日本電信電話株式会社内

Ｆターム(参考) 2G028 AA02 BC10 CG09 CG18 DH04 DH11 DH15 GL07 HN14 LR02