

(19)日本国特許庁(JP)

(12)特許公報(B2)

(11)特許番号
特許第7325669号
(P7325669)

(45)発行日 令和5年8月14日(2023.8.14)

(24)登録日 令和5年8月3日(2023.8.3)

(51)国際特許分類 F I
G 0 1 S 17/58 (2006.01) G 0 1 S 17/58
G 0 1 S 7/491(2020.01) G 0 1 S 7/491

請求項の数 3 (全22頁)

(21)出願番号	特願2022-569001(P2022-569001)	(73)特許権者	000006013 三菱電機株式会社 東京都千代田区丸の内二丁目7番3号
(86)(22)出願日	令和2年12月24日(2020.12.24)	(74)代理人	110003166 弁理士法人山王内外特許事務所
(86)国際出願番号	PCT/JP2020/048332	(72)発明者	廣澤 賢一 東京都千代田区丸の内二丁目7番3号 三菱電機株式会社内
(87)国際公開番号	WO2022/137410	(72)発明者	西田 美緒 東京都千代田区丸の内二丁目7番3号 三菱電機株式会社内
(87)国際公開日	令和4年6月30日(2022.6.30)	(72)発明者	長谷川 清智 東京都千代田区丸の内二丁目7番3号 三菱電機株式会社内
審査請求日	令和4年11月14日(2022.11.14)	審査官	仲野 一秀
早期審査対象出願			

最終頁に続く

(54)【発明の名称】 レーザレーダ装置

(57)【特許請求の範囲】

【請求項1】

連続発振方式、又は準連続発振方式でレーザを発振する基準光源と、
前記基準光源から発振されたレーザに対して、周波数変調を付与する周波数変調器、又は位相変調を付与する位相変調器と、
前記周波数変調器又は前記位相変調器で変調を付与されたレーザを、送信光と局部発振光とに分離するビームスプリッタと、
前記送信光を送信し、物標から反射された光を受信する送受信光学系と、
前記送受信光学系で受信した受信光と前記局部発振光とを受信し、それぞれの光を電気信号に変換する受信器と
前記受信器が変換した前記電気信号を処理し、物標の距離情報及び速度情報を算出する受信回路と、を備えるレーザレーダ装置であって、
前記周波数変調器が付与する周波数変調、又は前記位相変調器が付与する位相変調は、時間幅Tごとに周波数差Fだけ増加又は減少する階段状の変化を少なくとも1段分行う変調であり、
前記受信回路は、前記局部発振光と前記受信光との周波数差を前記周波数差Fで割算し、余り又は不足に相当する周波数差をドップラ周波数 f_d と判断し、
前記局部発振光に対して変調を付与する第2の周波数変調器又は第2の位相変調器をさらに備え、
前記送信光と前記局部発振光とで、あらかじめ設定された時間幅Tの整数倍の時間がシ

フトされた別々の変調を付与することができる、

ただし、レーザがパルス化されるものを除く、
レーザレーダ装置。

【請求項 2】

連続発振方式、又は準連続発振方式でレーザを発振する第 1 の基準光源と、
連続発振方式、又は準連続発振方式でレーザを発振する第 2 の基準光源と、
前記第 1 の基準光源から発振されたレーザに対して、周波数変調を付与する第 1 の周波数変調器と、

前記第 2 の基準光源から発振されたレーザに対して、周波数変調を付与する第 2 の周波数変調器と、

前記第 1 の周波数変調器で変調を付与されたレーザを、第 1 の送信光と第 1 の局部発振光とに分離する第 1 のビームスプリッタと、

前記第 2 の周波数変調器で変調を付与されたレーザを、第 2 の送信光と第 2 の局部発振光とに分離する第 2 のビームスプリッタと、

前記第 1 の送信光と前記第 2 の送信光を増幅する増幅器と、

増幅された前記第 1 の送信光と前記第 2 の送信光とを送信し、物標から反射された光を受信光として受信する送受信光学系と、

前記受信光と前記第 1 の局部発振光とを受信し、それぞれの光を第 1 の電気信号に変換する第 1 のバランスドディテクタと

前記受信光と前記第 2 の局部発振光とを受信し、それぞれの光を第 2 の電気信号に変換する第 2 のバランスドディテクタと

前記第 1 のバランスドディテクタと前記第 2 のバランスドディテクタとが変換した前記第 1 の電気信号と前記第 2 の電気信号とを処理し、物標の距離情報及び速度情報を算出する受信回路と、を備えるレーザレーダ装置であって、

前記第 1 の周波数変調器が付与する周波数変調は、時間幅 T ごとに周波数差 F だけ増加又は減少する階段状の変化を少なくとも 1 段分行う変調であり、

前記第 2 の周波数変調器が付与する周波数変調は、時間幅 T ごとに前記周波数差 F だけ減少又は増加する前記第 1 の周波数変調器とは逆の変調であり、

前記第 1 の送信光に対する前記受信光と前記第 2 の送信光に対する前記受信光との周波数混合によりドップラ周波数 f_d を求めることを特徴とするレーザレーダ装置。

【請求項 3】

請求項 2 に記載のレーザレーダ装置であって、

前記第 1 の基準光源は、計測するガス成分の吸収線に合うように波長が制御された第 1 のレーザ光を放射し、

前記第 2 の基準光源は、前記第 1 の基準光源と異なる波長の第 2 のレーザ光を放射し、

前記受信光のうち前記第 1 のレーザ光に対応する成分を受信する第 1 のガス濃度計測用受信機と、

前記受信光のうち前記第 2 のレーザ光に対応する成分を受信する第 2 のガス濃度計測用受信機と、をさらに備え

前記ガス成分の濃度を距離ごとに分解して計測するレーザレーダ装置。

【発明の詳細な説明】

【技術分野】

【0001】

本開示技術は、レーザレーダ装置及びレーザレーダ装置を用いた風計測方法に関する。

【背景技術】

【0002】

ライダー装置、LiDAR (Light Detection and Ranging) と呼ばれるレーザレーダ装置は、地質学及び気象学の分野で古くから用いられており、近年では、例えば自動車の自動運転の分野でも注目されている装置である。

【0003】

10

20

30

40

50

レーザレーダ装置の動作原理は、レーザ光を照射し、物標に当たって跳ね返ってきた光を解析することで、物標についての距離及び速度の情報を得るというものである。名前が示すとおり、レーザレーダ装置は、レーザ光を用いたレーダ装置と考えてよい。物標の距離を知りたい場合は、レーザ光を照射した時から反射して戻ってくるまでの時間 (Time of Flight, 以下「TOF」という) を計測し、レーザ光の速度にTOFを乗じて求めることができる。また、物標の速度を知りたい場合は、反射した光の周波数を解析し、ドップラ周波数を求め、照射したレーザ光の周波数とドップラ周波数との関係から得ることができる。

【0004】

物標の距離と速度とを同時に求める用途の場合、前述のとおり、TOFとドップラ周波数を同時に求めることになる。直接的にこれを求めようとした場合、レーザレーダ装置は、時間と周波数という2つの状態に対応するセンサーが必要となる。これに対し、Frequency Modulated Continuous Wave (以下、「FMCW」という) を用いて、TOFを周波数の情報に変換する技術が開示されている。特に、非特許文献1には、アップチャープのFMCWとダウンチャープのFMCWとを組み合わせることによって、物標の距離に起因する照射光と受信光との周波数差と、物標の速度に起因する照射光と受信光との周波数差とを、それぞれ区別して求める技術が開示されている (非特許文献1のFigure 1)。

【先行技術文献】

【非特許文献】

【0005】

【文献】D. Pierrottet他 “Flight test performance of a high precision navigation Doppler Lidar,” Proceedings of SPIE Vol. 7323, 73231 (2009)

【発明の概要】

【発明が解決しようとする課題】

【0006】

非特許文献1に開示された技術は、照射光の周波数が絶えず変化しており、解析にはアップチャープとダウンチャープとの情報を用いている。非特許文献1は、月面探査移動体のナビゲーションの用途として技術を開示しており、このようなある一定距離にある物標 (ハードターゲットという) に対しては問題とならない。

ところが、風計測の場合、通常、レーザ光の照射方向の複数個所にエアロゾルがあり、複数個所のエアロゾルで散乱した光が重なって受信されるため、受信光の波形は複雑になる。レーザレーダ装置は、風計測の用途では、より簡明な方法で物標の距離に起因する周波数情報と物標の速度に起因する周波数情報とを分ける仕組みが求められている。

【0007】

本開示技術は上記課題を解決することを目的としており、簡明な方法で物標の距離に起因する周波数情報と物標の速度に起因する周波数情報とを分ける仕組みを備えるレーザレーダ装置を提供する。

【課題を解決するための手段】

【0008】

本開示技術にかかるレーザレーダ装置は、連続発振方式、又は準連続発振方式でレーザを発振する基準光源と、基準光源から発振されたレーザに対して、周波数変調を付与する周波数変調器、又は位相変調を付与する位相変調器と、周波数変調器又は位相変調器で変調を付与されたレーザを、送信光と局部発振光とに分離するビームスプリッタと、送信光を送信し、物標から反射された光を受信する送受信光学系と、送受信光学系で受信した受信光と局部発振光とを受信し、それぞれの光を電気信号に変換する受信器と受信器が変換した電気信号を処理し、物標の距離情報及び速度情報を算出する受信回路と、を備えるレーザレーダ装置であって、周波数変調器が付与する周波数変調、又は位相変調器が付与す

10

20

30

40

50

る位相変調は、時間幅 T ごとに周波数差 F だけ増加又は減少する階段状の変化を少なくとも 1 段分行う変調であり、受信回路は、局部発振光と受信光との周波数差を周波数差 F で割算し、余り又は不足に相当する周波数差をドブプラ周波数 f_d と判断し、局部発振光に対して変調を付与する第 2 の周波数変調器又は第 2 の位相変調器をさらに備え、送信光と局部発振光とで、あらかじめ設定された時間幅 T の整数倍の時間がシフトされた別々の変調を付与することができる、ただし、レーザがパルス化されるものを除く、というものである。

【発明の効果】

【0009】

本開示技術にかかるレーザレーダ装置は、上記の構成を備えるため、照射されるレーザ光の周波数は、周波数差 F ずつとびとびの離散的な値となる。そのため、物標の距離に相当する TOF は時間 T ごとに周波数差 F の単位で現れ、物標の速度に相当するドブプラ周波数は周波数差 F よりも細かい変化として現れる。このように、本開示技術は、簡明な方法で物標の距離に起因する周波数情報と物標の速度に起因する周波数情報とを分ける仕組みを備えるレーザレーダ装置を提供する。

10

【図面の簡単な説明】

【0010】

【図 1】図 1 は、実施の形態 1 にかかるレーザレーダ装置の構成を示す構成図である。

【図 2】図 2 は、実施の形態 1 及び実施の形態 2 にかかるレーザレーダ装置の受信回路 210 の構成例を示した構成図である。

20

【図 3】図 3 は、本開示技術にかかるレーザレーダ装置の位相変調器若しくは周波数変調器が付与する周波数変調を表したグラフである。

【図 4】図 4 は、図 3 に示す周波数変調を、位相変調として表したグラフである。

【図 5】図 5 は、本開示技術にかかるレーザレーダ装置における局部発振光と受信光とのそれぞれを、周波数の時間変化として比較して表したグラフである。

【図 6】図 6 は、実施の形態 2 及び実施の形態 3 にかかるレーザレーダ装置の構成を示す構成図である。

【図 7】図 7 は、実施の形態 3 にかかるレーザレーダ装置の受信回路 210 の構成例を示した構成図である。

【図 8】図 8 は、実施の形態 4 にかかるレーザレーダ装置の構成を示す構成図である。

30

【図 9】図 9 は、実施の形態 4 にかかるレーザレーダ装置の受信回路 211 の構成例を示した構成図である。

【図 10】図 10 は、実施の形態 4 にかかるレーザレーダ装置の第 1 の周波数変調器 23 と第 2 の周波数変調器 24 とがそれぞれ付与する周波数変調を表したグラフである。

【図 11】図 11 は、実施の形態 4 にかかるレーザレーダ装置の構成の変化例を示す構成図である。

【図 12】図 12 は、実施の形態 5 にかかるレーザレーダ装置の構成を示す構成図である。

【図 13】図 13 は、実施の形態 5 にかかるレーザレーダ装置の受信回路 211 の構成例を示した構成図である。

【発明を実施するための形態】

40

【0011】

本開示技術にかかる実施の形態は、以下の図面に沿った説明により明らかとなる。

【0012】

実施の形態 1 .

図 1 は、実施の形態 1 にかかるレーザレーダ装置の構成を示す構成図である。実施の形態 1 にかかるレーザレーダ装置は、基準光源 10、周波数変調器 20 若しくは位相変調器 20B、第 1 のビームスプリッタ 30、増幅器 40、サーキュレータ 50、送受信光学系 60、第 2 のビームスプリッタ 70、バランスドディテクタ 80、制御信号回路 200、受信回路 210 から構成される。

【0013】

50

基準光源 10 は、狭線幅のレーザ光源を用いる。目に対する安全性の観点から、1.5 μm 帯の波長のものが好適である。ただし、基準光源 10 は、それ以外の波長帯のものであっても問題ない。レーザ光の線幅は狭いものであるほど良いが、狭いものになるほど高価となる傾向がある。レーザ光の線幅は、適宜設計により決定する。基準光源 10 は、連続発振方式すなわち CW (Continuous Wave) 光源であることが良いが、安全上の問題で間欠動作をさせるような場合などを顧慮して準連続発振方式すなわち QCW (Quasi CW) 動作をさせたものでも良い。

【0014】

周波数変調器 20 若しくは位相変調器 20B は、いずれでもよいが、基準光源 10 が発するレーザ光に周波数変調を付与する。簡単のため、実施の形態 1 の説明は、周波数変調器 20 を前提として説明する。また、周波数変調器 20 は、制御信号回路 200 によって制御される。なお、周波数変調器 20 と位相変調器 20B とがいずれでもよい理由は、以下の数式 (1) で示す関係式が成り立つからである。

$$d \phi / dt = 2 \pi f \quad \dots (1)$$

ここで ϕ が位相、 f が周波数、 ω は円周率、 t は時間を表す。

【0015】

第 1 のビームスプリッタ 30 は、周波数変調器 20 で変調されたレーザ光を、送信光と局部発振光に分離する。通常、局部発振光にはそれほど強いパワーは必要ではないため、9:1 など非対称の分岐比のビームスプリッタが使用されることが多い。ただし、第 1 のビームスプリッタ 30 は、5:5 のビームスプリッタでもよい。一般に、レーザレーダ装置に使用されるビームスプリッタは光ファイバを用いることがあり、当該構成部材を光ファイバカプラ等の別名称で呼ぶこともある。

【0016】

増幅器 40 は、第 1 のビームスプリッタ 30 により分離されたレーザ光のうち送信光を増幅する。増幅器 40 は、1 段構成でも多段構成でもよい。増幅器 40 にはよくファイバアンプが使用されるが、ファイバアンプ以外の光増幅器でもよい。多段構成の場合は、ファイバアンプとファイバアンプ以外の光増幅器を組み合わせてもよい。また、多段構成の場合は、自然放出増幅光 (Amplified Spontaneous Emission、以下「ASE」という) を除去する目的で、増幅器と増幅器の間にフィルタ又は戻り光を防止するためのアイソレータを挿入してもよい。

【0017】

増幅器 40 により増幅された送信光は、サーキュレータ 50 を介して送受信光学系 60 に送られる。一般にサーキュレータとは、光路 A から入力した光を光路 B に送るが、B から入力された光は A ではなく別の光路 C から出力される装置をいう。また、狭義のサーキュレータはファラデー素子を用いたものを指すが、サーキュレータ 50 は単に偏光ビームスプリッタと 1/4 波長板を組み合わせただけのもでもよい。

【0018】

送受信光学系 60 は、送信光のビーム径を整えて大気中に放出し、また大気中のエアロゾルから散乱されて戻ってきた受信光を集める働きをする。送受信光学系 60 は、望遠鏡及びビームエキスパンダを備える。また、送受信光学系 60 は、複数の視線を観測できるようにする目的で、スキャナを用いてもよい。

【0019】

第 2 のビームスプリッタ 70 は、送受信光学系 60 で集められた受信光と前記局部発振光を干渉し、干渉して得られた 2 つの干渉光をバランスドディテクタ 80 へ送信する。

【0020】

バランスドディテクタ 80 は、2 か所の受光部を有し、それぞれの受光部に入射した光を電気信号に変換し、変換した 2 つの電気信号の差分を出力する。バランスドディテクタ 80 は、一体化した受光素子でもいいし、フォトダイオードを 2 個用いてそれぞれから得られた光電流の差分を得る回路を別途備えるものでもよい。バランスドディテクタ 80 は受信器として機能するため、単に受信器とよぶことがある。

10

20

30

40

50

【 0 0 2 1 】

第2のビームスプリッタ70の役割は、局部発振光の周波数から受信光の周波数を引いた周波数の差を求めることを目的としている。すなわち、この構成は、周波数の近い2つの光が干渉すると2つの光の周波数の差のうなりが振幅変調として発生する性質を利用している。またバランスドディテクタ80は、DC成分を除去するために使用する。ここで、局部発振光の周波数から受信光の周波数を引いた周波数の差は、局部発振光と受信光とについてそれぞれ周波数成分を求め、その後周波数の差を求めるようにしても何ら問題ない。また、各時刻における局部発振光の周波数は既知であるため、単に受信光の周波数成分を、局部発振光の周波数が一定である時間窓で求めて、周波数差を計算してもよい。

なお、以降の段落は、第2のビームスプリッタ70、及びバランスドディテクタ80を備える構成であることを前提とした説明である。

10

【 0 0 2 2 】

受信回路210は、バランスドディテクタが変換した電気信号を処理し、物標の距離情報及び速度情報を算出する。より具体的には、受信回路210は、バランスドディテクタ80から出力された差分信号を処理し、距離ごとの風速情報を算出する。受信回路210は、電気フィルタ、増幅器、アナログ デジタル変換器、コンピュータ等から構成される。

【 0 0 2 3 】

図2は、受信回路210の構成例である。受信回路210は、前置フィルタ300、増幅器310、周波数フィルタ320、受信機331～333、コンピュータ340から構成される。なお増幅器310は、電気増幅器を用いてよい。

20

【 0 0 2 4 】

バランスドディテクタ80出力された差分信号は、前置フィルタ300で不要な周波数が除去され、その後増幅器310で増幅される。増幅された信号は、周波数フィルタ320で周波数領域ごとに分配され、周波数領域に応じて受信機331～333に送信される。一般に増幅器には帯域特性があるため、前置フィルタ300の機能を増幅器310が兼ねていても良い。また、周波数フィルタ320の後では帯域が制限されるため、増幅器310を周波数フィルタ320の後に配置しても良い。この場合は前置フィルタ300と周波数フィルタ320は共通化しても良く、増幅器は受信機と同数必要となる。図2に示す構成例では受信機が3個描かれているが、個数は適宜設計により決定する。受信機331～333は、具体的にはアナログ デジタル変換器である。受信機331～333は、受信信号をコンピュータ340に送信する。コンピュータ340は、受信機331～333から送信された信号に対してFourier変換などの信号処理を行い、距離と風況に関する情報を算出する。コンピュータ340は、信号処理を行う際、必要に応じて制御信号回路200からタイミング信号などを受け取り使用する。コンピュータ340は、所謂パソコンのような汎用コンピュータでもよいし、ASIC (Application Specific Integrated Circuit) のような専用集積回路でもよい。また、コンピュータ340は、複数種類のコンピュータを組み合わせても良い。

30

【 0 0 2 5 】

実施の形態1にかかるレーザレーダ装置の動作及び風計測方法は、図3に沿った以下の説明により明らかにされる。

40

【 0 0 2 6 】

図3は、周波数変調器20が送信光に付与する周波数変調を表したグラフである。すなわち、周波数変調器20が付与する周波数変調は、時間幅Tごとに周波数差Fだけ増加又は減少する階段状の変化を少なくとも1段分行う変調である。その結果、本開示技術にかかるレーザレーダ装置の送信光は、図3に示す階段状の周波数特性を有する。

【 0 0 2 7 】

この階段状の変化における周波数差Fは、空気中のエアロゾルの移動によるドップラ周波数に比べて十分大きくする。空気中のエアロゾルの移動によるドップラ周波数 f_d は、光の周波数を f_0 、ドップラ周波数を f_d 、風速をV、光速をcとすると以下の数式(2)で与えられる。

50

$$f_d = -2 \cdot v_0 / c \cdot \dots (2)$$

なお、距離は、レーザレーダ装置を原点として遠ざかる方を正と定義する。すると、速度もレーザレーダ装置から遠ざかる方を正と考える。すると風速は追い風するとき正の値をとり、向かい風するとき負の値をとる。これに対応して、ドップラ周波数 f_d も正負どちらの値もとってしまう。例えば光の周波数が $2 [THz]$ (波長 $1.5 [\mu m]$) のときドップラ周波数 f_d は風速 $1 [m/s]$ あたり $-1.33 [MHz]$ となる。従って、図3に示すように周波数差 F が $100 [MHz]$ であれば、一般的な風況でのドップラ周波数 f_d に比べて十分大きいと言える。なお周波数差 F は $100 [MHz]$ に限定するものではなく、より小さい周波数であっても大きい周波数であってもよい。例えば気象用語では $30 m/s$ を超える風は「猛烈な風」として定義されるが、これを超えるような風況は地上ではあまり生じず、生じた場合であっても暴風雨となるため、雨粒や塵の影響でライダ計測が困難となることが多い。そのため、周波数差 F を、風速約 $+30 [m/s]$ と $-30 [m/s]$ を区別することに相当する $80 [MHz]$ としても、実用上問題はない。

10

【0028】

図3は、周波数の観点から本開示技術におけるレーザレーダ装置の送信光の性質を表しているが、式(1)と式(2)から、位相の観点から送信光の性質を表すこともできる。図4は、図3に示す周波数変調を、位相変調として表したグラフである。なお、一般に、位相変調器において無限に大きな位相変調を加えることはできず、多くの場合2で折り返すことになるが、そのようにしても問題ない。制御信号回路200によって位相変調器20Bを制御し、図4に示すような位相変調を付与することは、本開示技術における周波数変調と実質的に同じである。図4のグラフは折れ線で構成されており、位相が連続して変化していることがわかる。図3のグラフからは周波数が切り替わる時点において位相の情報は読み取れないが、周波数変調は図4が示すように位相が連続して周波数が変化する。

20

【0029】

本開示技術の効果は、以下の具体例により、明らかにされる。

【0030】

図3に示す周波数特性を有するレーザレーダ装置の送信光は、大気中のエアロゾルにより散乱され、受信光として測定される。受信光は、大気中の風況であるエアロゾルの速度に応じたドップラシフトを受けると同時に、散乱したエアロゾルの位置に応じたTOFである時間経過後に受信される。

30

【0031】

図5は、以下に示す具体例について、本開示技術にかかるレーザレーダ装置における局部発振光と受信光とのそれぞれを、周波数の時間変化として比較して表したグラフである。

例えばレーザレーダ装置から $600 [m]$ の位置にあるエアロゾルから散乱された光は、往復で $1200 [m]$ の距離を光が飛行する時間である $4 [\mu s]$ 経過後に受信される。これは、光速が秒速 30 万キロメートルであることに由来する。バランスドディテクタ80にて受信した局部発振光と受信光は、図5に示す周波数特性を有する。この具体例では、周波数変調器20における周波数変調は、時間幅 T が $2 [\mu s]$ ごとに周波数差 F が $100 [MHz]$ ずつ階段状に変化する変調周波数を付与する。

【0032】

ここで、 $600 [m]$ の位置にあるエアロゾルから散乱された光は、TOFが $4 [\mu s]$ である時間経過後に、時間がシフトされた形で受信される。本開示技術にかかるレーザレーダ装置が階段状の周波数変調を用いるため、このTOFの情報は、局部発振光と比較して $200 [MHz]$ 低い周波数差という情報に変換される。さらに、受信光はドップラシフトによる影響を受けるため、受信光の周波数と局部発振光の周波数との関係は、以下の数式(3)で表すことができる。

$$(\text{受信光の周波数}) = (\text{局部発振光の周波数}) - 200 [MHz] - f_d \cdot \dots (3)$$

【0033】

ドップラシフトによる影響は、以下の具体例により説明される。光の周波数が $2 [THz]$ (波長 $1.5 [\mu m]$) のときのドップラ周波数 f_d は、風速 $1 [m/s]$ あたり

40

50

- 1.33 [MHz] である。よって、受信光の周波数が局部発振光の周波数よりも 202.66 [MHz] 低かった場合、距離 600 [m] の風況は +2 [m/s]、すなわち追い風の 2 [m/s] であることがわかる。

【0034】

以上のように、本開示技術にかかるレーザレーダ装置は、局部発振光と受信光との周波数差を周波数差 F で割算し、余りに相当する周波数差をドップラ周波数 f_d と判断する。上記の具体例で言えば、本開示技術は、局部発振光と受信光との周波数差 202.66 [MHz] を周波数差 $F = 100$ [MHz] で割算し、余りに相当する 2.66 [MHz] をドップラ周波数 f_d であると判断する。

【0035】

また、受信光の局部発振光との周波数差が 197.34 [MHz] である場合、周波数差 $F = 100$ [MHz] で割算した余りを 97.34 [MHz] とは考えない。基準の周波数を 197.34 [MHz] に近い 200 [MHz] と考え、すなわち 2.66 [MHz] の不足と考えて、距離 600 [m] の風況は -2 [m/s]、すなわち向かい風の 2 [m/s] と考える。

【0036】

図5は、 $TOF = 4$ [μs] が、時間幅 $T = 2$ [μs] のちょうど整数倍である例を示した。 TOF が時間幅 T の整数倍のときは、局部発振光の階段状の周波数が、受信光の階段状の周波数と同じタイミングで変化する。すなわち、局部発振光の周波数が一定であるタイミングで受信光を観測した場合、例えば局部発振光の周波数が 400 [MHz] である 12 [μs] ~ 14 [μs] の時間窓で受信光を観測した場合、受信光の周波数は全区間で 200 [MHz] の一定値である。

【0037】

本開示技術は、 TOF が時間幅 T のちょうど整数倍とならなくても、特段の問題はない。以下の具体例は、 TOF が時間幅 T のちょうど整数倍とならない場合の考え方を明らかにする。

【0038】

TOF が 3.5 [μs] である場合を考える。同じく、局部発振光の周波数が 400 [MHz] である 12 [μs] ~ 14 [μs] の時間窓で受信光を観測すると、12 [μs] ~ 13.5 [μs] では 200 [MHz] であり、13.5 [μs] ~ 14 [μs] では 300 [MHz] である。すなわち、周波数差 F は、12 [μs] ~ 13.5 [μs] では 200 [MHz] であり、13.5 [μs] ~ 14 [μs] では 100 [MHz] である。

【0039】

TOF が 4.5 [μs] である場合も考える。同じく、局部発振光の周波数が 400 [MHz] である 12 [μs] ~ 14 [μs] の時間窓で受信光を観測すると、12 [μs] ~ 12.5 [μs] では 100 [MHz] であり、12.5 [μs] ~ 14 [μs] では 200 [MHz] である。すなわち、周波数差 F は、12 [μs] ~ 12.5 [μs] では 300 [MHz] であり、12.5 [μs] ~ 14 [μs] では 200 [MHz] である。

【0040】

以上のように、本開示技術は、局部発振光の周波数が一定である時間窓で受信光を観測し、観測した受信光の 2 つの周波数の情報と、受信光の周波数が切り替わるタイミングの情報とで、 TOF を求めることができる。受信光の周波数の情報は、コンピュータ 340 による Fourier 変換により求める。

【0041】

レーザレーダ装置は、ある距離範囲（以下「レンジ」という）ごとに風況を求めるような構成にしてもよい。実施の形態 1 においては、周波数フィルタ 320、受信機 331 ~ 333 がこれに該当する。

【0042】

10

20

30

40

50

以下は、実施の形態 1 にかかる周波数フィルタ 3 2 0 の具体例である。例えば、周波数フィルタ 3 2 0 は、3 種類のバンドパスフィルタを備える。具体的には、周波数フィルタ 3 2 0 は 5 0 ~ 1 5 0 [M H z]、1 5 0 ~ 2 5 0 [M H z] 及び 2 5 0 ~ 3 5 0 [M H z] のバンドパスフィルタである。また、周波数フィルタ 3 2 0 は、5 0 ~ 1 5 0 M H z の周波数成分を受信機 3 3 1 に、1 5 0 ~ 2 5 0 M H z の周波数成分を受信機 3 3 2 に、2 5 0 ~ 3 5 0 M H z の周波数成分を受信機 3 3 3 に送るように配置される。

【 0 0 4 3 】

以上のように周波数フィルタ 3 2 0 と受信機 3 3 1 ~ 3 3 3 とを備えると、距離が 3 0 0 [m] 付近の風況の情報が受信機 3 3 1 で、距離が 6 0 0 [m] 付近の風況の情報が受信機 3 3 2 で、距離が 9 0 0 [m] 付近の風況の情報が受信機 3 3 3 で計測できる。コンピュータ 3 4 0 は、それぞれの受信機で計測された電気信号を F o u r i e r 変換し、ピーク周波数を求めることで各レンジにおける風況を算出することができる。

10

【 0 0 4 4 】

図 2 は、受信回路 2 1 0 において周波数フィルタ 3 2 0 で信号を分離してから、それぞれの信号を F o u r i e r 変換する構成を示しているが、これに限定したものではない。本開示技術にかかるレーザレーダ装置は、周波数フィルタ 3 2 0 を使用せず 1 つの受信機で A D 変換を行い、デジタル信号に変換してから F o u r i e r 変換しレンジ分解しても良い。

【 0 0 4 5 】

また、距離ゼロに相当する 5 0 M H z 以下の周波数成分を含む信号には、サーキュレータ 5 0 から送受信光学系 6 0 を通して大気中に放出されるまでの間の光学系で散乱された光がバランスディテクタ 8 0 で受信されることで生じた信号が存在している。こうした装置内部で生じる散乱光は、一般に大気中のエアロゾルにより生じる散乱光と比較して強い。この問題を解決するため、増幅器 3 1 0 の飽和を防ぐ前置フィルタ 3 0 0 を備え、装置内部で生じる散乱光を取り除くことができる。この結果、受信回路 2 1 0 における S N を向上させることができる。

20

【 0 0 4 6 】

実施の形態 1 にかかるレーザレーダ装置は上記の構成を備えるため、簡明な方法で物標の距離に起因する周波数情報と物標の速度に起因する周波数情報とを分ける仕組みを備える。

30

【 0 0 4 7 】

実施の形態 2 .

実施の形態 1 では、レーザ光を周波数変調した後に送信光と局部発振光とに分離する構成を説明したが、本開示技術はこの構成に限定するものではない。実施の形態 2 にかかるレーザレーダ装置は、送信光と局部発振光を分離した後に周波数変調又は位相変調を行う。実施の形態 1 と共通する構成要素については同じ符号を用い、重複した説明は省く。

【 0 0 4 8 】

図 6 は、実施の形態 2 にかかるレーザレーダ装置の構成を示す構成図である。実施の形態 2 にかかるレーザレーダ装置は、第 1 のビームスプリッタ 3 0 の前段には周波数変調器 2 0 若しくは位相変調器 2 0 B を有さない。その代わりに、実施の形態 2 にかかるレーザレーダ装置は、第 1 のビームスプリッタ 3 0 の後段に並列して第 1 の周波数変調器 2 1 と第 2 の周波数変調器 2 2 とを有する。

40

【 0 0 4 9 】

基準光源 1 0 から発せられたレーザ光は、第 1 のビームスプリッタ 3 0 で送信光と局部発振光とに分離される。送信光は第 1 の周波数変調器 2 1 へ、局部発振光は第 2 の周波数変調器 2 2 へ、それぞれ送信され、それぞれ周波数変調が付与される。実施の形態 1 でも説明がなされたが、周波数変調器の代わりに位相変調器が用いられてもよい。すなわち、送信光は第 1 の位相変調器 2 1 B で、局部発振光は第 2 の位相変調器 2 2 B で、それぞれ位相変調が付与されてもよい。第 1 の周波数変調器 2 1 と第 2 の周波数変調器 2 2 とは、ともに制御信号回路 2 0 0 により制御され、同期して変調を実施する。第 1 の位相変調器

50

2 1 B と第 2 の位相変調器 2 2 B とを用いる場合も、同様に同期して変調を実施する。

【 0 0 5 0 】

送信光用と局部発振光用と別々の変調器を用いるメリットは、以下の具体例により明らかにされる。具体例は、第 1 の位相変調器 2 1 B と第 2 の位相変調器 2 2 B とを用いることにする。第 1 の位相変調器 2 1 B が付与する位相変調を (t) 、第 2 の位相変調器 2 2 B が付与する位相変調を (t) とする。実施の形態 1 のように、送信光と局部発振光とに同じ位相変調を付与するのであれば、 (t) と (t) とは以下の数式 (4) を満たす。

$$(t) = (t) \cdots (4)$$

【 0 0 5 1 】

実施の形態 2 にかかるレーザレーダ装置は、送信光の位相変調 (t) と局部発振光の位相変調 (t) とで、時間をシフトした変調を付与する。 (t) と (t) との関係は、以下の数式 (5) を満たすようにする。

$$(t + t_1) = (t) \cdots (5)$$

式 (5) は、送信光の位相変調 (t) が、局部発振光の位相変調 (t) に比べて時間 t_1 だけ遅れていることを意味している。

【 0 0 5 2 】

ここで、送信光の位相変調 (t) は、図 3 に示すような周波数変調に対応する位相変調であるとする。また、送信光の位相変調 (t) は、 $t_1 = 1 [\mu s]$ の時間遅れがあるものとする。すると、TOF が $3 [\mu s]$ のときに、受信光の応答は図 5 と同じになる。

【 0 0 5 3 】

実施の形態 1 と同様、周波数フィルタ 3 2 0 は $50 \sim 150 [\text{MHz}]$ 、 $150 \sim 250 [\text{MHz}]$ 及び $250 \sim 350 [\text{MHz}]$ のバンドパスフィルタであるとする。また、バンドパスフィルタは、 $50 \sim 150 \text{ MHz}$ の周波数成分を受信機 3 3 1 に、 $150 \sim 250 \text{ MHz}$ の周波数成分を受信機 3 3 2 に、 $250 \sim 350 \text{ MHz}$ の周波数成分を受信機 3 3 3 に送るように配置する。この結果、距離 $150 [\text{m}]$ 付近の風況の情報は受信機 3 3 1 で、距離 $450 [\text{m}]$ 付近の風況の情報は受信機 3 3 2 で、距離 $750 [\text{m}]$ 付近の風況の情報は受信機 3 3 3 で計測することができる。

【 0 0 5 4 】

距離ゼロを含むレンジは、前記の通り装置内部で生じる散乱光によりノイズが大きいため観測が難しい。しかし、実施の形態 2 にかかるレーザレーダ装置によれば、距離ゼロに近いレンジの風況も計測が可能となる。実施の形態 2 にかかるレーザレーダ装置は、実施の形態 1 に記載の効果のほか、上記の効果も奏する。なお、第 1 の周波数変調器 2 1 と第 2 の周波数変調器 2 4 とそれぞれの位置は、図 6 で示した位置に限定するものではない。第 1 の周波数変調器 2 1 と第 2 の周波数変調器 2 4 とそれぞれの位置は、数式 (5) で示した関係を示せばよい。例えば第 1 の周波数変調器 2 1 は、基準光源 1 0 と第 1 のビームスプリッタ 3 0 との間にあってもよい。

【 0 0 5 5 】

実施の形態 3 .

実施の形態 3 にかかるレーザレーダ装置の構成は、受信回路 2 1 0 を除けば実施の形態 2 のものと同様となる。実施の形態 1 又は実施の形態 2 と共通する構成要素については同じ符号を用い、重複した説明は省く。

【 0 0 5 6 】

図 7 は、実施の形態 3 にかかるレーザレーダ装置の受信回路 2 1 0 の構成例を示した構成図である。実施の形態 3 にかかるレーザレーダ装置は、受信機 3 3 0 を 1 台備え、前置フィルタ 3 0 0 で選択した周波数範囲のみを計測する。前置フィルタ 3 0 0 は、距離ゼロに相当する周波数を取り除き、ある特定のレンジに相当する周波数を透過する働きを持つ。前置フィルタ 3 0 0 は、1 つのフィルタで構成してもいいし、2 種類以上のフィルタを組み合わせて構成しても良い。また、実施の形態 3 にかかるレーザレーダ装置は、増幅器 3 1 0 の周波数特性を用いて、増幅器がフィルタを兼ねるようにしても良い。

10

20

30

40

50

【 0 0 5 7 】

実施の形態 3 にかかるレーザレーダ装置の動作は、以下の具体例により明らかにされる。実施の形態 3 にかかるレーザレーダ装置が備える第 2 の位相変調器 2 2 B は、以下の式で示す位相変調 $\phi(t)$ を付与する。

$$\phi(t - t_2) = \phi(t) \cdot \dots (5)$$

式 (5) は、実施の形態 2 の式 (4) と比べてシフト時間の正負が異なることに注意する。式 (5) は、送信光の位相変調 $\phi(t)$ が、局部発振光の位相変調 $\phi(t - t_2)$ に比べて時間 t_2 だけ進んでいることを意味している。

【 0 0 5 8 】

やはりここで、送信光の位相変調 $\phi(t)$ は、図 3 に示すような周波数変調に対応する位相変調であるとする。また、送信光の位相変調 $\phi(t)$ は、 $t_2 = 2 [\mu s]$ の時間進みがあるものとする。すると、TOF が $6 [\mu s]$ のときに、受信光の応答は図 5 と同じになる。

10

【 0 0 5 9 】

実施の形態 3 にかかるレーザレーダ装置の前置フィルタ 3 0 0 は、 $50 \sim 150 [MHz]$ のバンドパスフィルタにし、その後段に受信機 3 3 0 を備える。この具体例では、受信機 3 3 0 は $600 [m]$ のレンジを計測することができる。計測するレンジは t_2 を変えることで変更することができる。実施の形態 3 にかかるレーザレーダ装置は、可変の 1 つのレンジを集中的に計測する。

【 0 0 6 0 】

図 5 は、周波数変調をアップチャープに選んだ場合、局部発振光の周波数が、遅れて来る受信光の周波数よりも高くなる側にシフトされることがわかる。一方この具体例では、距離ゼロに相当する受信光の応答は、 $t_2 = 2 [\mu s]$ の時間進みの分、受信光の周波数の方が $100 MHz$ 高くなる側にある。

20

【 0 0 6 1 】

一般に光の干渉では、負の周波数と正の周波数は、干渉縞をバランスディテクタで計測し、電気信号を処理するという処理系において位相が逆転した同じ周波数として計測される。そのため、距離ゼロの強い散乱光が測定したいレンジの情報に混入してしまう。これを防ぐため、局部発振光もしくは受信光に付加する周波数にオフセットをかけることで、上記に示すような負の周波数の折返しによる別レンジの情報の混入を防ぐことができる。すなわち式 (5) の左辺にオフセット周波数の項を追加し、以下の式 (6) とすることで負の周波数の折返しを防ぐことが可能となる。

30

$$\phi(t - t_2) + 2\pi f_0 t = \phi(t) \cdot \dots (6)$$

ただし、 f_0 はオフセット周波数である。周波数にオフセットをかけることは、図 5 において、局部発振光のプロット又は受信光のプロットの、縦軸方向への移動にほかならない。

【 0 0 6 2 】

以上の構成を備えることで、実施の形態 3 にかかるレーザレーダ装置は、1 つの受信機で複数のレンジを変調周波数の遅延時間を切り替えて計測することができる。また、遠距離のレンジほど高い周波数での計測が必要となるが、実施の形態 3 にかかるレーザレーダ装置はこのように構成することで、計測周波数を下げる効果も期待できる。一般に回路の設計は高周波になればなるほど難しくなるが、本開示技術は周波数を下げて同様の計測ができるようになり、コストの低減が期待できる。

40

【 0 0 6 3 】

実施の形態 4 .

実施の形態 1 から実施の形態 3 で示した具体例は、時間幅 $T = 2 [\mu s]$ とし、時間幅 $T = 2 [\mu s]$ で光が移動する距離の半分である $300 [m]$ 、及びその倍数の距離である $600 [m]$ 、 $900 [m]$...、の地点における風況の検出原理について明らかにした。実施の形態 4 にかかるレーザレーダ装置は、時間幅 T により決められるとびとびの距離の地点における風況のみならず、このとびとびの距離の間の地点における風況も容易に求められる構成を備える。

【 0 0 6 4 】

50

実施の形態 4 にかかるレーザレーダ装置が解決する課題は、既出の実施の形態で示した具体例と同じ時間幅 $T = 2 [\mu s]$ とした以下の説明により明らかにされる。周波数変調は、図 3 に示したようにアップチャープの信号で、周波数差 $F = 100 [MHz]$ とする。例えば、距離 $450 [m]$ のエアロゾルから散乱された光は装置から照射後 $3 [\mu s]$ 後に受信される。ここで、局部発振光の周波数が一定である期間を観測窓として、受信光の周波数に関する情報を観測する。例えば、 $4 [\mu s]$ から $6 [\mu s]$ で局部発振光の周波数は $300 [MHz]$ で一定のときの観測窓で考える。観測窓の前半分の時間で受信光の周波数はおよそ $100 [MHz]$ であり、ドップラ周波数の分が付加されている。観測窓の後半分の時間で受信光の周波数は $200 [MHz]$ であり、ドップラ周波数の分が付加されている。すなわち、受信光の周波数は、局部発振光の周波数と比べておよそ $200 [MHz]$ 低い時間と、およそ $100 [MHz]$ 低い時間が混在する。このように、周波数が途中で切り替わる信号を 1 周期分以上の広い時間窓で Fourier 変換すると、その中間の周波数にピークを生じさせてしまう。そのため、実施の形態 1 から 3 に示した構成のみでは、上記の観測対象について位置情報と速度情報との区別が困難となる。

10

実施の形態 4 にかかるレーザレーダ装置は、レンジとレンジの境目に近い地点における風況をシステムティックに求めることを課題とする。

【0065】

実施の形態 4 にかかるレーザレーダ装置は、上記課題を解決するため、離散変調のライダシステムを 2 系統有し、前記 2 系統のそれぞれに逆向きの周波数変調を付与する構成を備える。また、前記 2 系統のレーザ光はそれぞれ大気中へ照射され、エアロゾルで反射された受信光はレーザレーダ装置の受信回路でミキシングする構成である。

20

【0066】

図 8 は、実施の形態 4 にかかるレーザレーダ装置の構成を示す構成図である。図 8 が示すように、実施の形態 4 にかかるレーザレーダ装置は、第 1 の基準光源 11 と、第 2 の基準光源 12 と、第 1 の周波数変調器 23 と、第 2 の周波数変調器 24 と、第 1 のビームスプリッタ 31 と、第 2 のビームスプリッタ 32 と、増幅器 40 と、サーキュレータ 50 と、送受信光学系 60 と、第 3 のビームスプリッタ 71 と、第 4 のビームスプリッタ 72 と、第 1 のバランスドディテクタ 81 と、第 2 のバランスドディテクタ 82 と、チャンネル合波器 91 と、チャンネル分波器 92 と、制御信号回路 201 と、受信回路 211 とを備える。

なお、実施の形態 4 にかかる技術の説明は、既出の実施の形態と共通する構成要素についてはできるかぎり同じ符号を用い、重複した説明は適宜省く。

30

【0067】

第 1 の基準光源 11 は、実施の形態 1 から実施の形態 3 にかかるレーザレーダ装置における基準光源 10 と同じものである。第 2 の基準光源 12 は、第 1 の基準光源 11 と異なる波長をもつ基準光源である。第 2 の基準光源 12 の波長を第 1 の基準光源 11 と異なるものにした理由は、それぞれのレーザ光を容易に結合し分離するためである。第 2 の基準光源 12 は、波長を第 1 の基準光源 11 のものと異なるものにするかわりに異なる偏光にしてモードを異なるものにしてもよい。

【0068】

第 1 の周波数変調器 23 と第 2 の周波数変調器 24 とは、実施の形態 1 から 3 にかかるレーザレーダ装置の周波数変調器 20 と同じように機能する。第 1 の周波数変調器 23 と第 2 の周波数変調器 24 とは、それぞれ第 1 の位相変調器 23B と第 2 の位相変調器 24B とに代えてよい。第 1 の周波数変調器 23 と第 2 の周波数変調器 24 で付加する変調は同時性が重要である。このため、実施の形態 4 にかかるレーザレーダ装置は制御信号回路 201 を備えており、制御信号回路 201 により第 1 の周波数変調器 23 と第 2 の周波数変調器 24 とを制御する。

40

【0069】

第 1 のビームスプリッタ 31 と第 2 のビームスプリッタ 32 とは、実施の形態 1 から 3 にかかるレーザレーダ装置の第 1 のビームスプリッタ 30 と同じように機能する。第 1 の基準光源 11 と第 2 の基準光源 12 とから出力されたレーザ光は、それぞれ第 1 の周波数

50

変調器 2 3 と第 2 の周波数変調器 2 4 とにより変調され、それぞれ第 1 のビームスプリッタ 3 1 と第 2 のビームスプリッタ 3 2 とによって送信光と局部発振光とに分離される。第 1 のビームスプリッタ 3 1 及び第 2 のビームスプリッタ 3 2 の分岐比は、それぞれ設計により決められる。

【 0 0 7 0 】

第 1 のビームスプリッタ 3 1 により分離された送信光と第 2 のビームスプリッタ 3 2 により分離された送信光は、チャンネル合波器 9 1 で合波される。第 2 の基準光源 1 2 が第 1 の基準光源 1 1 と異なる波長のレーザ光を放出している場合、第 1 の基準光源 1 1 の波長は透過し第 2 の基準光源 1 2 の波長は反射する波長フィルタでチャンネル合波器 9 1 を形成すればよい。一般に、光ファイバにより構成されている波長フィルタは、WDM カブラと
10
呼称されることもある。第 2 の基準光源 1 2 の偏光が第 1 の基準光源 1 1 と異なる場合、チャンネル合波器 9 1 は偏光ビームスプリッタでもよい。また、偏光ビームスプリッタは、偏光カブラ又は偏光コンバイナと呼称されることもある。

【 0 0 7 1 】

チャンネル合波器 9 1 で合波された送信光は、増幅器 4 0 で増幅される。増幅器 4 0 は、実施の形態 1 から実施の形態 3 にかかるレーザレーダ装置のものと同様である。図 8 に示す構成例では、増幅器 4 0 の前段で 2 つのチャンネルを合波し、増幅器 4 0 以降は光路を共通化し、構造の簡素化を図っている。本開示技術にかかるレーザレーダ装置はこれに限定するものではなく、増幅器 4 0 を 2 チャンネル分用意しチャンネルごとに備えてもよい。増幅器 4 0 の出力の上限は非線形効果により制限されるため、チャンネル数だけ増幅器を備えた
20
方がチャンネルあたりの光強度を高強度に増幅できる。増幅器 4 0 が多段構成の場合は、1 段目の増幅器 4 0 と 2 段目の増幅器 4 0 との間にチャンネル合波器 9 1 を配置してもよい。

【 0 0 7 2 】

増幅器 4 0 からの出力は、サーキュレータ 5 0 を通過して送受信光学系 6 0 に送られる。この動作は、実施の形態 1 から実施の形態 3 にかかるレーザレーダ装置と同じである。第 1 の基準光源 1 1 と第 2 の基準光源 1 2 とで異なる波長のレーザ光を使う場合、送受信光学系 6 0 は色収差を低減した光学系とすることに留意する。

【 0 0 7 3 】

大気へ照射されたレーザ光は、大気中のエアロゾルに反射し、受信光として送受信光学系 6 0 へ入射される。入射された受信光は、サーキュレータ 5 0 により送信光と分離され
30
、チャンネル分波器 9 2 へ入射される。チャンネル分波器 9 2 は、チャンネル合波器 9 1 と逆の働きをする構成要素である。すなわち、チャンネル分波器 9 2 は、受信光のうち第 1 の基準光源 1 1 の波長相当の成分を第 3 のビームスプリッタ 7 1 へ、第 2 の基準光源 1 2 の波長相当の成分が第 4 のビームスプリッタ 7 2 へ、それぞれ出射する。なお、第 3 のビームスプリッタ 7 1 に第 2 の基準光源 1 2 の波長が混信しても、第 4 のビームスプリッタ 7 2 に第 1 の基準光源 1 1 の波長が混信しても、問題はない。チャンネル分波器 9 2 は、ビームスプリッタで構成してもよい。ただし、ビームスプリッタで構成した場合、光強度は 3 [d b] 損失する。

【 0 0 7 4 】

チャンネル分波器 9 2 から出射された第 1 の基準光源 1 1 の波長相当の成分と、第 1 のビームスプリッタ 3 1 で分離された局部発振光とは、第 3 のビームスプリッタ 7 1 で干渉する。第 3 のビームスプリッタ 7 1 で得られた 2 つの干渉光は、第 1 のバランスディテクタ 8 1 へ出射される。なお、第 2 の基準光源 1 2 からの系統も同様のため、ここでは説明を省略する。
40

【 0 0 7 5 】

受信回路 2 1 1 は、第 1 のバランスディテクタ 8 1 及び第 2 のバランスディテクタ 8 2 から得られた信号を処理し、距離ごとの風速情報を算出する。受信回路 2 1 1 は、電気フィルタ、増幅器、アナログ デジタル変換器、及びコンピュータを有する。図 9 は、受信回路 2 1 1 の構成を示した構成図である。図 9 が示すように、受信回路 2 1 1 は、第 1 の前置フィルタ 3 0 1 と、第 2 の前置フィルタ 3 0 2 と、第 1 の増幅器 3 1 1 と、第 2
50

の増幅器 3 1 2 と、第 1 の周波数フィルタ 3 2 1 と、第 2 の周波数フィルタ 3 2 2 と、第 1 のミキサ 3 5 1 と、第 2 のミキサ 3 5 2 と、第 3 のミキサ 3 5 3 と、受信機 3 3 0 (3 3 1、3 3 2、3 3 3) と、コンピュータ 3 4 0 とを備える。

【 0 0 7 6 】

実施の形態 4 にかかるレーザレーダ装置の受信回路 2 1 1 の処理の流れは、第 1 の前置フィルタ 3 0 1、第 1 の増幅器 3 1 1、第 1 の周波数フィルタ 3 2 1 までは実施の形態 1 と同じである。また、受信回路 2 1 1 は第 2 のバランスディテクタ 8 2 からの信号も処理するため、並列して第 2 の前置フィルタ 3 0 2 と、第 2 の増幅器 3 1 2 と、第 2 の周波数フィルタ 3 2 2 とを備える。第 1 の周波数フィルタ 3 2 1 は、第 1 の増幅器 3 1 1 から出射された信号を、周波数ごとに第 1 のミキサ 3 5 1、第 2 のミキサ 3 5 2、及び第 3 のミキサ 3 5 3 へ分配して出射する。図 9 はミキサが 3 個ある構成を示したが、これに限ったものではなく、何個配置してもよい。第 2 の周波数フィルタ 3 2 2 も同様に、第 2 の増幅器 3 1 2 から出力された信号を、周波数ごとに第 1 のミキサ 3 5 1、第 2 のミキサ 3 5 2、及び第 3 のミキサ 3 5 3 へ分配して出力する。

10

【 0 0 7 7 】

第 1 のミキサ 3 5 1、第 2 のミキサ 3 5 2、及び第 3 のミキサ 3 5 3 は、受け取った信号を掛け合わせることで、和周波又は差周波となる信号を受信機 3 3 0 (3 3 1、3 3 2、3 3 3) へ出力する。一般にミキサにより和周波信号が得られるか差周波信号が得られるかは、入力された 2 つの信号の位相で決まる。よって、第 1 のミキサ 3 5 1、第 2 のミキサ 3 5 2、及び第 3 のミキサ 3 5 3 は、それぞれ位相調整機構を備えていてもよい。受信機 3 3 0 (3 3 1、3 3 2、3 3 3) からコンピュータ 3 4 0 への処理の流れは、実施の形態 1 と同じである。

20

【 0 0 7 8 】

実施の形態 4 にかかるレーザレーダ装置の動作原理は、以下の図にそった具体例によって明らかにされる。図 1 0 は、実施の形態 4 にかかるレーザレーダ装置の第 1 の周波数変調器 2 3 と第 2 の周波数変調器 2 4 とがそれぞれ付与する周波数変調を表したグラフである。なお、既出の実施の形態の説明でも述べたとおり、第 1 の周波数変調器 2 3 と第 2 の周波数変調器 2 4 とは、それぞれ第 1 の位相変調器 2 3 B と第 2 の位相変調器 2 4 B とに代えてよい。

【 0 0 7 9 】

第 1 の周波数変調器 2 3 と第 2 の周波数変調器 2 4 とは、それぞれ時間幅 T ごとに周波数差 F だけ増加又は減少する階段状の変化を少なくとも 1 段分行う変調である。実施の形態 4 にかかるレーザレーダ装置の送信光は、それぞれ図 1 0 で例示されているような階段状の周波数特性を有する。図 1 0 の例は、時間幅 $T = 2 [\mu s]$ 、周波数差 $F = 1 0 0 [M H z]$ の 5 段の階段状の周波数変調をしめしている。第 1 の周波数変調器 2 3 はアップチャープの階段状の周波数変調を、第 2 の周波数変調器 2 4 はダウンチャープの階段状の周波数変調を、それぞれ採用している。本開示技術において周波数差 F は、ドップラシフト周波数に比べて十分大きい値である。

30

【 0 0 8 0 】

実施の形態 4 にかかるレーザレーダ装置の特徴は、2 系統の送信光を生成し、一方をアップチャープにし、他方をダウンチャープにしていることである。2 系統の送信光のそれぞれは、大気中に放射され、大気中のエアロゾルにより散乱され、受信光として測定される。受信光は局部発振光と干渉し、バランスディテクタで受信される。

40

【 0 0 8 1 】

実施の形態 4 にかかるレーザレーダ装置の効果は、以下の具体例により明らかにされる。具体例は、距離が $6 0 0 [m]$ の地点にエアロゾルがあることを考える。この具体例では、受信光が局部発振光と比べて $4 [\mu s]$ 遅れる。アップチャープの階段状の局部発振光に対応する受信光は、局部発振光の周波数と比べて $- 2 0 0 [M H z] +$ ドップラ周波数 f_d の周波数を有する。反対に、ダウンチャープの階段状の局部発振光に対応する受信光は、局部発振光の周波数と比べて $+ 2 0 0 [M H z] +$ ドップラ周波数 f_d の周波数を

50

有する。

【 0 0 8 2 】

実施の形態 4 にかかるレーザレーダ装置は、2 系統の処理を行えるよう、第 1 の周波数フィルタ 3 2 1 と第 2 の周波数フィルタ 3 2 2 とを備える。第 1 の周波数フィルタ 3 2 1 と第 2 の周波数フィルタ 3 2 2 とは、5 0 [M H z] から 1 5 0 [M H z] までの周波数成分を第 1 のミキサ 3 5 1 へ、1 5 0 [M H z] から 2 5 0 [M H z] までの周波数成分を第 2 のミキサ 3 5 2 へ、2 5 0 [M H z] から 3 5 0 [M H z] までの周波数成分を第 3 のミキサ 3 5 3 へ出力する。この結果、実施の形態 4 にかかるレーザレーダ装置においても、距離が 3 0 0 [m] 付近の風況の情報は受信機 3 3 1 で、距離が 6 0 0 [m] 付近の風況の情報は受信機 3 3 2 で、距離が 9 0 0 [m] 付近の風況の情報は受信機 3 3 3 で計測することを意図している。

10

【 0 0 8 3 】

ミキサ 3 5 0 (3 5 1 、 3 5 2 、 3 5 3) は、入力された 2 つの信号を乗じることと和周波を得ることを目的としている。距離が 6 0 0 [m] の地点にあるエアロゾルの具体例では、「 - 2 0 0 [M H z] + ドップラ周波数 f_d 」の信号と「 2 0 0 [M H z] + ドップラ周波数 f_d 」の信号とが第 2 のミキサ 3 5 2 へ入力される。第 2 のミキサ 3 5 2 は、ドップラ周波数 f_d の 2 倍の周波数を有する和周波の信号を、受信機 3 3 3 へ出力する。

【 0 0 8 4 】

次は、実施の形態 4 のレーザレーダ装置が課題としている距離が 4 5 0 [m] の地点にあるエアロゾルの具体例について考える。アップチャープの系統にかかる受信光は、観測窓の前半において「 - 2 0 0 [M H z] + ドップラ周波数 f_d 」、観測窓の後半において「 - 1 0 0 [M H z] + ドップラ周波数 f_d 」、として観測される。対するダウンチャープの系統にかかる受信光は、観測窓の前半において「 + 2 0 0 [M H z] + ドップラ周波数 f_d 」、観測窓の後半において「 + 1 0 0 [M H z] + ドップラ周波数 f_d 」、として観測される。この具体例においてもミキサ 3 5 0 (3 5 1 、 3 5 2 、 3 5 3) は、ドップラ周波数 f_d の 2 倍の周波数を有する和周波の信号を出力する。

20

【 0 0 8 5 】

図 1 1 は、実施の形態 4 にかかるレーザレーダ装置の構成の変化例を示す構成図である。図 1 1 が示すように、2 系統のうちいずれかの系統に局部発振光用周波数変調器 2 5 を挿入してもよい。以下の具体例は、局部発振光用周波数変調器 2 5 を挿入する効果について明らかにする。例えば局部発振光用周波数変調器 2 5 は、第 1 の局部発振光の周波数を 1 0 0 [M H z] 減らすとする。距離 4 5 0 [m] のエアロゾルから散乱された光は装置から照射後 3 [μ s] 後に受信される。第 1 系統の受信信号は、観測窓の前半で「 - 3 0 0 [M H z] + ドップラ周波数 f_d 」となり、観測窓の後半で「 - 2 0 0 M H z + f_d 周波数」となる。一方、第 2 系統の受信信号は、観測窓の前半で「 + 2 0 0 [M H z] + ドップラ周波数 f_d 」となり、観測窓の後半で「 + 1 0 0 M H z + f_d 周波数」となる。

30

【 0 0 8 6 】

この場合のミキサ 3 5 0 (3 5 1 、 3 5 2 、 3 5 3) は、 - 1 0 0 M H z にドップラ周波数 f_d を 2 倍したものを足したものを出力する。このようにすることで、図 1 1 に示す変形例の構成は、ノイズの大きい DC 成分付近にドップラ信号が来ることを防ぐことができ、S N の向上が期待できる。ここで、局部発振光用周波数変調器 2 5 は、局部発振光用位相変調器 2 5 B に代えてもよい。また、局部発振光用周波数変調器 2 5 は、音響光学変調器 (A c o u s t o - O p t i c M o d u l a t o r : A O M) を周波数シフトとして用いる構成でもよい。また、局部発振光用周波数変調器 2 5 は、第 2 の局部発振光側に挿入してもいいし、第 1 のビームスプリッタ 3 1 とチャンネル合波器 9 1 の間に挿入して、第 1 の信号光の周波数をシフトさせてもよい。あるいは、局部発振光用周波数変調器 2 5 は、第 2 の信号光の周波数をシフトさせる構成でもよい。

40

【 0 0 8 7 】

実施の形態 4 にかかるレーザレーダ装置は、換言すれば、受信光と第 1 の局部発振光とを受信し、それぞれの光を第 1 の電気信号に変換する第 1 のバランスドディテクタ 8 1 と

50

、受信光と第2の局部発振光とを受信し、それぞれの光を第2の電気信号に変換する第2のバランスディテクタ82と、第1のバランスディテクタ81と第2のバランスディテクタ82とが変換した第1の電気信号と第2の電気信号とを処理し、物標の距離情報及び速度情報を算出する受信回路と、を備えるレーザレーダ装置であって、第1の周波数変調器23が付与する周波数変調は、時間幅Tごとに周波数差Fだけ増加又は減少する階段状の変化を少なくとも1段分行う変調であり、第2の周波数変調器24が付与する周波数変調は、時間幅Tごとに前記周波数差Fだけ減少又は増加する前記第1の周波数変調器23とは逆の変調であり、第1の送信光に対する前記受信光と前記第2の送信光に対する前記受信光との周波数混合によりドップラ周波数 f_d を求めることを特徴とする。

【0088】

以上の構成を備えることにより、実施の形態4にかかるレーザレーダ装置は、既出の実施の形態にかかるレーザレーダ装置の効果に加え、レンジの取り方によらずどのような位置の風況も精度よく測定できる。

【0089】

実施の形態5 .

実施の形態5にかかるレーザレーダ装置は、実施の形態4にかかるレーザレーダ装置の構成にあらたな構成を加えたものである。実施の形態5にかかるレーザレーダ装置は、第1の基準光源11をガスの吸収線に合わせて使用する。ここでガスとは、大気中のガス、工場の排ガス、又は配管から漏洩したガス等を指す。実施の形態5にかかる技術の説明は、既出の実施の形態と共通する構成要素についてはできるかぎり同じ符号を用い、重複した説明は適宜省く。

【0090】

図12は、実施の形態5にかかるレーザレーダ装置の構成を示す構成図である。図12が示すように、実施の形態5にかかるレーザレーダ装置は、第1の基準光源11を制御する制御装置220を備える。制御装置220は、第1の基準光源11をガスの吸収線にロックする。実施の形態5にかかるレーザレーダ装置は、第2の基準光源12を上記ガスの吸収が少ない波長に設定することで、大気中のガスの濃度分布を計測することが可能となる。第1の基準光源11がレーザダイオードである場合、温度や電流値で波長の微調整が可能である。一般にガスの吸収線は狭いため、制御装置220が行う制御はガスセルを使ったフィードバック制御が考えられる。比較的ガスの吸収線が太い場合、制御装置220はオープンループで第1の基準光源11の温度又は電流値を制御し、第1の基準光源11の波長をガスの吸収線にロックすることができる。

【0091】

図13は、実施の形態5にかかるレーザレーダ装置の受信回路211の構成例を示した構成図である。図13が示すとおり、受信回路211は、第1の周波数フィルタ321、及び第2の周波数フィルタ322を備える。第1の周波数フィルタ321と第2の周波数フィルタ322とで周波数ごとに分配された信号は、第1の信号スプリッタ361、及び第2の信号スプリッタ362でそれぞれ2系統に分割される。なお、見やすくするために図13には第1の信号スプリッタ361と第2の信号スプリッタ362しか示していないが、距離レンジの数だけ信号スプリッタ360が必要となる。信号スプリッタ360(361、362)で分割した信号は、第1のガス濃度計測用受信機371と第2のガス濃度計測用受信機372とでそれぞれ計測される。第1のガス濃度計測用受信機371で計測された信号強度は、ガスによる吸収により相対的に第2のガス濃度計測用受信機372で計測される信号強度よりも弱まる。実施の形態5にかかるレーザレーダ装置は、この信号強度比からガスの濃度分布を計測する。

【0092】

実施の形態5にかかるレーザレーダ装置は、換言すれば、第1の基準光源11は、計測するガス成分の吸収線に合うように波長が制御された第1のレーザ光を放射し、第2の基準光源12は、第1の基準光源11と異なる波長の第2のレーザ光を放射し、受信光のうち第1のレーザ光に対応する成分を受信する第1のガス濃度計測用受信機371と、受信

10

20

30

40

50

光のうち第2のレーザ光に対応する成分を受信する第2のガス濃度計測用受信機372と、をさらに備え大気中のガス成分の濃度を距離ごとに分解して計測できる。

【0093】

実施の形態5にかかるレーザレーダ装置は、実施の形態4で示した手法と組み合わせることで風況を計測できる。風況の計測は、第1の信号スプリッタ361、及び第2の信号スプリッタ362で分割された信号を第1のミキサ351へ入力する。第1のミキサ351は和周波を受信機331へ出力し、ドップラ周波数 f_d を算出することができる。

【0094】

実施の形態5にかかるレーザレーダ装置は上記の構成を備えるため、大気中のガスの分布と風況を同時に計測することができる。

【産業上の利用可能性】

【0095】

本開示技術にかかるレーザレーダ装置は、大気中の風況及びガスの分布を計測する装置に利用できる。

【符号の説明】

【0096】

基準光源 10、 第1の基準光源 11、 第2の基準光源 12、 周波数変調器 20、 位相変調器 20B、 第1の周波数変調器 21、 23、 第1の位相変調器 21B、 23B、 第2の周波数変調器 22、 24、 第2の位相変調器 22B、 24B、 局部発振光用周波数変調器 25、 局部発振光用位相変調器 25B、 第1のビームスプリッタ 30、 31、 第2のビームスプリッタ 32、 増幅器 40、 サーキュレータ 50、 送受信光学系 60、 第2のビームスプリッタ 70、 第3のビームスプリッタ 71、 第4のビームスプリッタ 72、 バランスドディテクタ 80、 第1のバランスドディテクタ 81、 第2のバランスドディテクタ 82、 チャンネル合波器 91、 チャンネル分波器 92、 制御信号回路 200、 201、 受信回路 210、 211、 制御装置 220、 前置フィルタ 300、 第1の前置フィルタ 301、 第2の前置フィルタ 302、 増幅器 310、 第1の増幅器 311、 第2の増幅器 312、 周波数フィルタ 320、 第1の周波数フィルタ 321、 第2の周波数フィルタ 322、 受信機 330、 331、 332、 333、 コンピュータ 340、 ミキサ 350、 第1のミキサ 351、 第2のミキサ 352、 第3のミキサ 353、 信号スプリッタ 360、 第1の信号スプリッタ 361、 第2の信号スプリッタ 362、 第1のガス濃度計測用受信機 371、 第2のガス濃度計測用受信機 372。

10

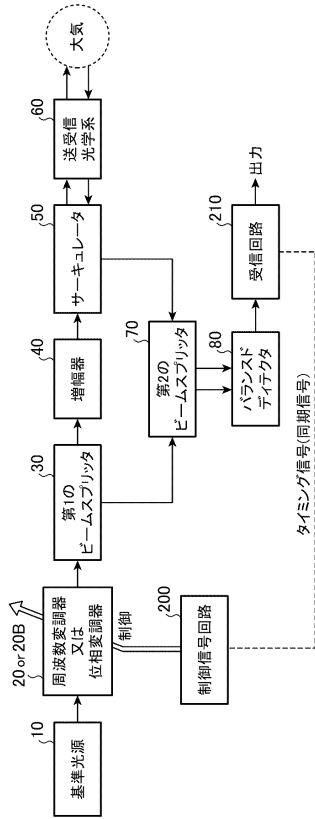
20

30

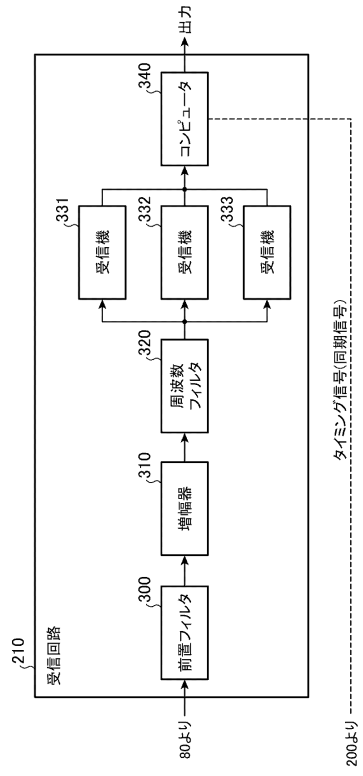
40

50

【図面】
【図 1】



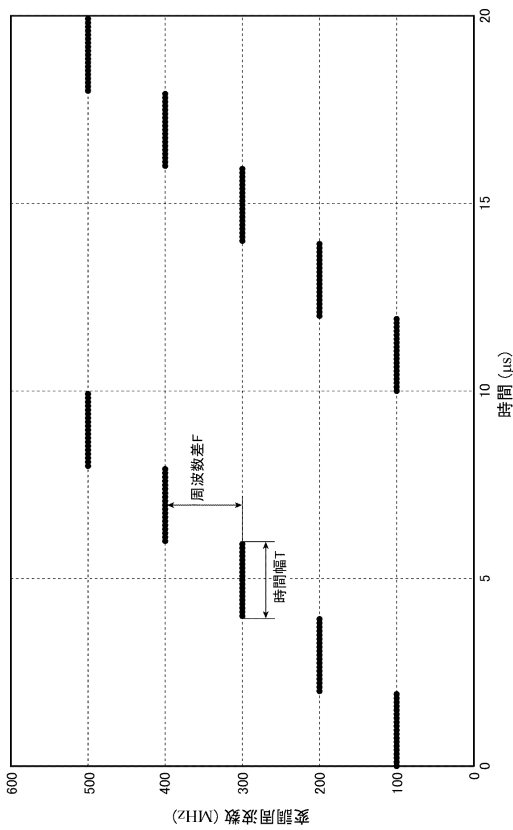
【図 2】



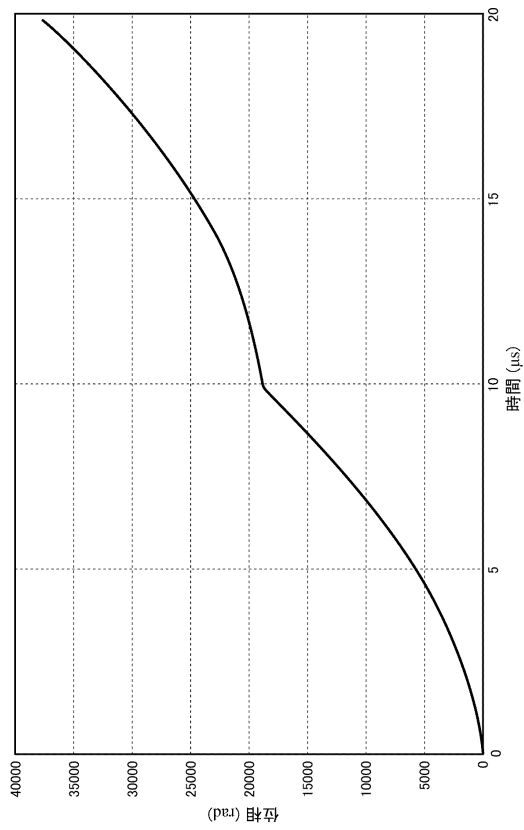
10

20

【図 3】



【図 4】

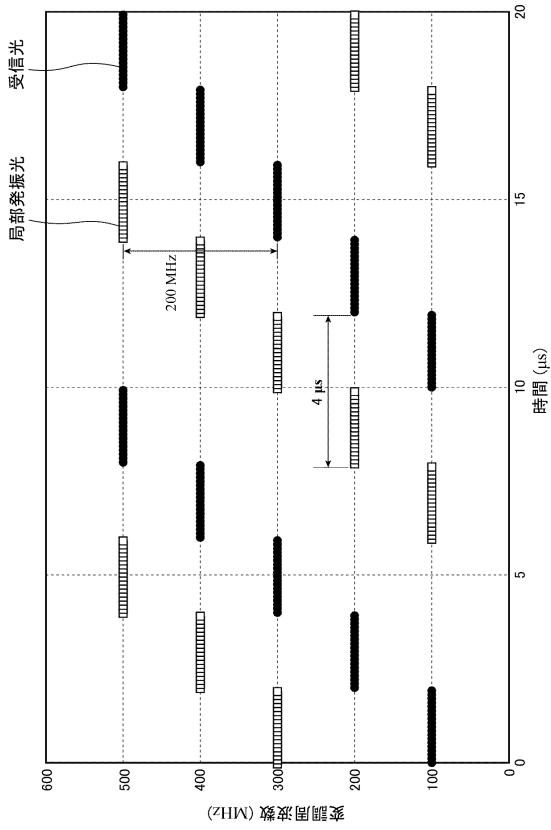


30

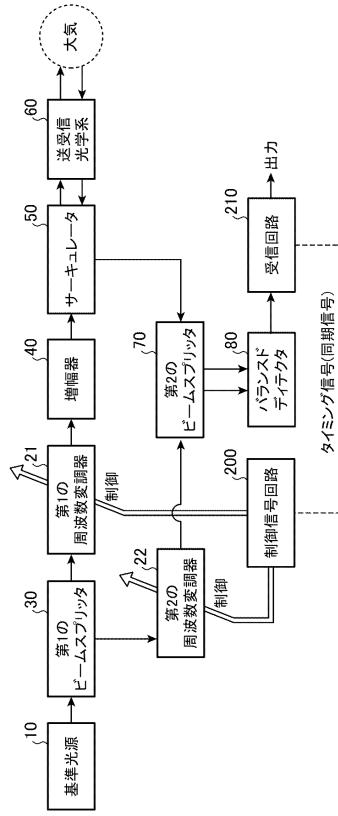
40

50

【図 5】



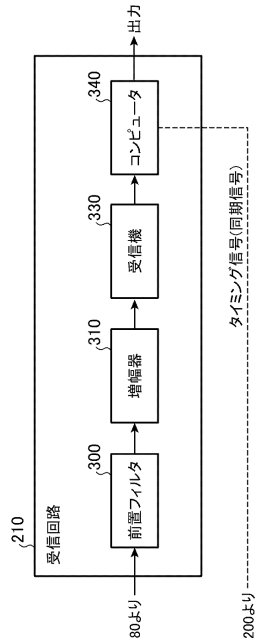
【図 6】



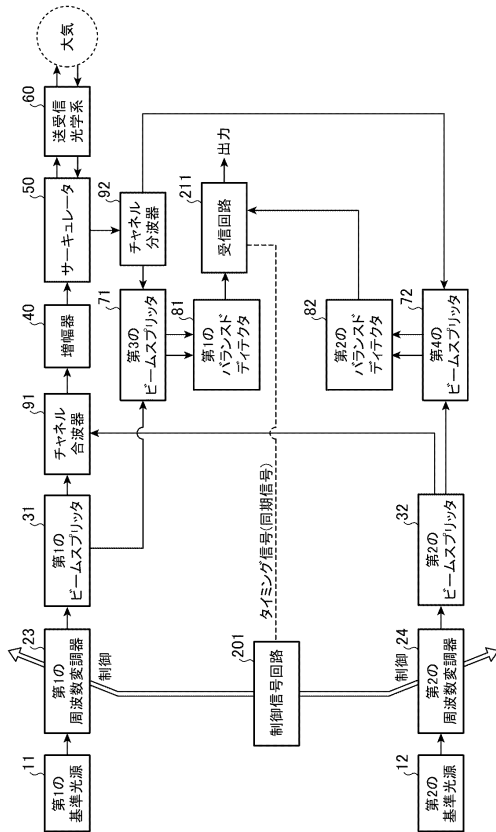
10

20

【図 7】



【図 8】

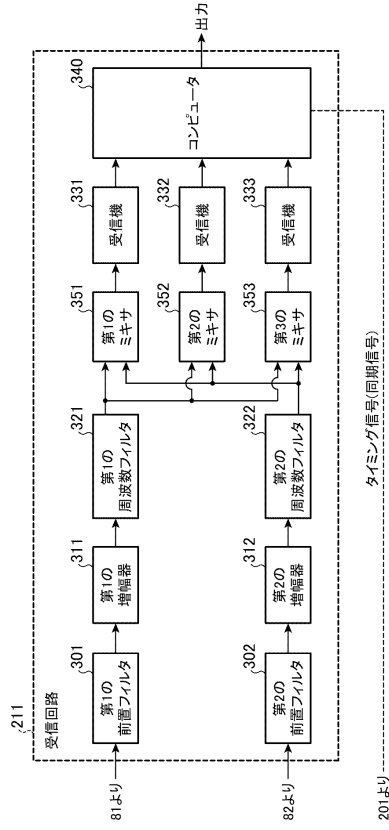


30

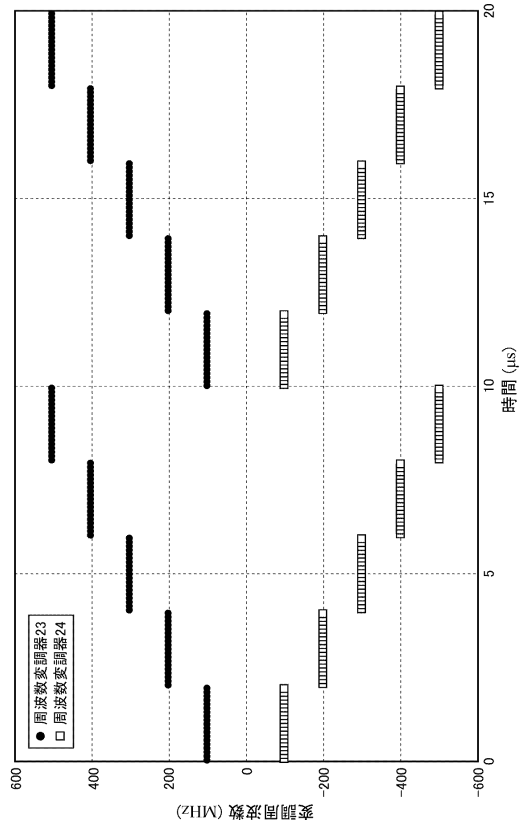
40

50

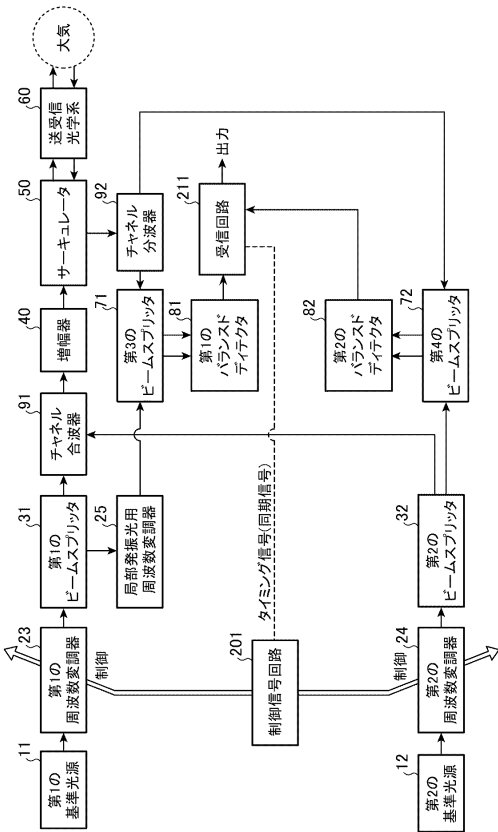
【図 9】



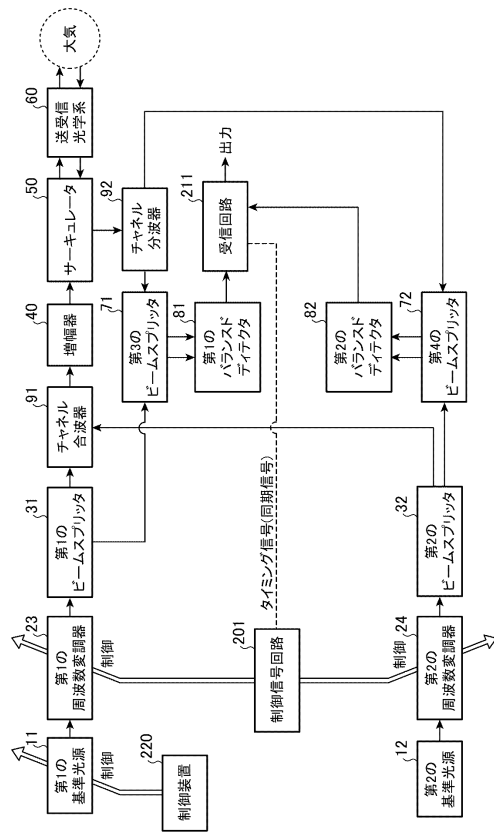
【図 10】



【図 11】



【図 12】



10

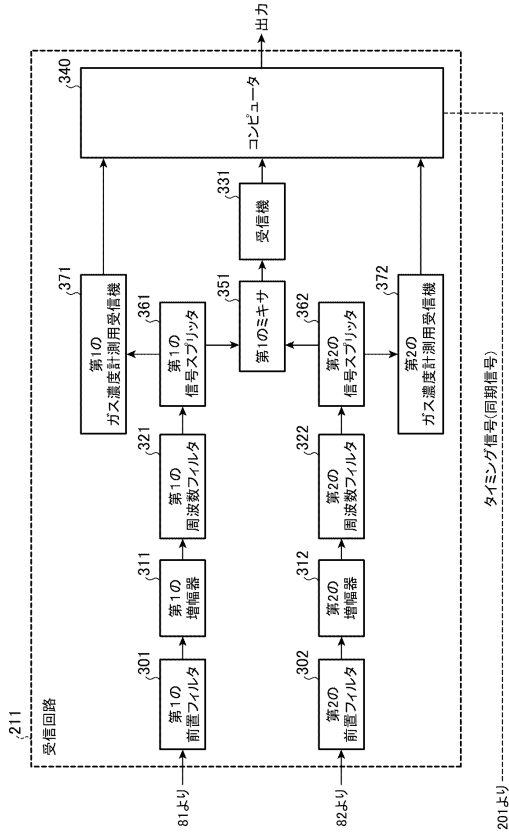
20

30

40

50

【図 13】



10

20

30

40

50

フロントページの続き

- (56)参考文献 国際公開第2012/169539(WO, A1)
特開2003-163634(JP, A)
国際公開第2018/38128(WO, A1)
国際公開第2011/158359(WO, A1)
Anders Olesen, Anders Pedersen, Karsten Rottwitt, Frequency stepped pulse train modulated wind sensing lidar, PROCEEDINGS OF SPIE, 2011年09月13日
- (58)調査した分野 (Int.Cl., DB名)
G01S 7/48 - 7/51
17/00 - 17/95
G01S 7/00 - 7/42
13/00 - 13/95