

(19) 日本国特許庁(JP)

(12) 特 許 公 報(B2)

(11) 特許番号

特許第6243088号
(P6243088)

(45) 発行日 平成29年12月6日(2017.12.6)

(24) 登録日 平成29年11月17日(2017.11.17)

(51) Int.Cl.		F I		
GO 1 N	21/49	(2006.01)	GO 1 N	21/49 C
GO 1 S	17/95	(2006.01)	GO 1 S	17/95
GO 1 B	9/02	(2006.01)	GO 1 B	9/02

請求項の数 5 (全 12 頁)

<p>(21) 出願番号 特願2017-516007 (P2017-516007)</p> <p>(86) (22) 出願日 平成27年6月24日 (2015.6.24)</p> <p>(86) 国際出願番号 PCT/JP2015/068257</p> <p>(87) 国際公開番号 W02016/208013</p> <p>(87) 国際公開日 平成28年12月29日 (2016.12.29)</p> <p>審査請求日 平成29年3月16日 (2017.3.16)</p> <p>早期審査対象出願</p>	<p>(73) 特許権者 501273886 国立研究開発法人国立環境研究所 茨城県つくば市小野川16-2</p> <p>(73) 特許権者 517094459 ナショナルサイエンティフィックアンド テクニカルリサーチカウンスル アルゼンチン共和国 CP1425 ブエ ノスアイレスゴドイクルス2290 ーテンスフロアー</p> <p>(73) 特許権者 517094460 ミニストリーオブディフェンス アルゼンチン共和国 CP1107 ブエ ノスアイレス自治市アソパルド250- エディフィスィオリベルタドル</p> <p style="text-align: right;">最終頁に続く</p>
--	---

(54) 【発明の名称】 ライダーシステム及び計測方法

(57) 【特許請求の範囲】

【請求項1】

マルチ縦モードのレーザ光を大気中へ出射するレーザ光源と、
前記レーザ光に対する散乱光を集光する集光部と、
前記集光部で集光された光を入射し、前記レーザ光のモード間隔と同一の間隔で透過ブ
ークを複数有する透過スペクトルに基づいて前記入射した光を選択的に通過させる干渉計
と、
前記干渉計から出射された光を検出する検出部と、
前記検出部で検出された光に係る情報から、レイリー散乱光を分離した光信号を取得す
ることで、ミー散乱光及びレイリー散乱光に係る情報を取得し、エアロゾル層の光学特性
を示す消散係数及び後方散乱係数を算出する分析部と、
を備えるライダーシステム。

【請求項2】

前記レーザ光源から出射された光の一部を参照光として前記干渉計に対して入射させる
参照光入射部をさらに備える請求項1に記載のライダーシステム。

【請求項3】

前記干渉計は、前記入射した光を2分岐する光分岐手段と、分岐された2つの分岐光の
間に光路差を設ける光路差形成手段と、光路差が設けられた2つの分岐光を干渉させる光
干渉手段と、を備え、

前記光路差形成手段は、前記2つの分岐光の間に設ける光路差を変更可能である請求項

1又は2に記載のライダーシステム。

【請求項4】

前記検出部は、前記干渉計における光路差を変更しながら前記干渉計から出射された光を検出する請求項2又は3に記載のライダーシステム。

【請求項5】

ライダーシステムによる計測方法であって、

レーザ光源からマルチ縦モードのレーザ光を大気中へ出射することによる、大気中からの散乱光を集光部で集光するステップと、

前記集光された光を入射し、干渉計によって、前記レーザ光のモード間隔と同一の間隔で透過ピークが複数有する透過スペクトルに基づいて選択的に通過させるステップと、

前記干渉計から出射された光を検出部において検出するステップと、

前記検出部で検出された光に係る情報から、レイリー散乱光を分離した光信号を取得することで、ミー散乱光及びレイリー散乱光に係る情報を取得し、エアロゾル層の光学特性を示す消散係数及び後方散乱係数の算出を分析部にて行うステップと、

を有する計測方法。

【発明の詳細な説明】

【技術分野】

【0001】

本発明は、ライダーシステムに関し、特に、高スペクトル分解ライダーを含むライダーシステム及び当該ライダーシステムによる計測方法に関する。

【背景技術】

【0002】

大気汚染粒子及び黄砂等の大気中のエアロゾル粒子に起因する環境問題への対応等の目的から、大気中のエアロゾルの観測が行われている。大気中のエアロゾルの観測装置として、ライダー(LIDAR:Light Detection and Ranging)システムが知られている。ライダーシステムは、レーザ光を用いたレーダシステムであり、種々の構成が知られている(例えば、非特許文献1,2参照)。

【0003】

大気中のエアロゾルの観測を行う場合、レーザ光を照射することで、エアロゾルによるミー散乱(Mie scattering)と、大気構成分子によるレイリー散乱(Rayleigh scattering)とが含まれる散乱光を検出し、これに基づいてエアロゾルに係る消散係数及び後方散乱係数を求める方法が用いられる。また、望遠鏡により受講された大気からの散乱光を検出器で検出した後に分光することによって、全散乱光からレイリー散乱光を分離した上で分析を行う所謂高スペクトル分解ライダーについても研究されている。

【先行技術文献】

【非特許文献】

【0004】

【非特許文献1】杉本伸夫、竹内延夫著、「レーザーレーダーによる大気計測 - 計測手法とその応用 -」、応用物理、応用物理学会、1994年5月、第63巻、第5号、p.444-454

【非特許文献2】Clauns Weitkamp編、「Springer Series in Optical Sciences (第102巻)Lidar:Range-Resolved Optical Remote Sensing of the Atmosphere」(ドイツ)、第1版、シュプリンガー(Springer)、2005年6月29日、全456頁

【発明の概要】

【発明が解決しようとする課題】

【0005】

高スペクトル分解ライダーでは、光源から出力されるレーザ光の波長に対応した干渉計を配置することで、ミー散乱光成分とレイリー散乱光成分とが含まれる全散乱光から、ミー散乱光成分を除去することで、レイリー散乱光成分のみを取り出す手法が検討され

10

20

30

40

50

ている。したがって、レイリー散乱光成分を好適に分離して高い計測性能を実現するためには、光源からのレーザー光を単一縦モードとすることが理想的であると考えられていた。

【0006】

しかしながら、単一縦モードのレーザー光源は非常に高価である。また、単一縦モードのレーザー光を利用したライダーシステムを実現しようとするためには、例えば、単一縦モードのレーザー光の波長を固定するための装置等も必要となり、装置構成も複雑になることが考えられる。

【0007】

本発明は上記を鑑みてなされたものであり、簡便な装置構成であり、高い計測性能を実現可能なライダーシステム及び当該ライダーシステムによる計測方法に関する。

10

【課題を解決するための手段】

【0008】

上記目的を達成するため、本発明の一形態に係るライダーシステムは、マルチ縦モードのレーザー光を大気中へ出射するレーザー光源と、前記レーザー光に対する散乱光を集光する集光部と、前記集光部で集光された光を入射し、前記レーザー光のモード間隔と同一の間隔で透過ピークを複数有する透過スペクトルに基づいて前記入射した光を選択的に通過させる干渉計と、前記干渉計から出射された光を検出する検出部と、前記検出部で検出された光に係る分析を行う分析部と、を備えることを特徴とする。

【0009】

また、本発明の一形態に係る計測方法は、ライダーシステムによる計測方法であって、レーザー光源からマルチ縦モードのレーザー光を大気中へ出射することによる、大気中からの散乱光を集光部で集光するステップと、前記集光された光を入射し、干渉計によって、前記レーザー光のモード間隔と同一の間隔で透過ピークが複数有する透過スペクトルに基づいて選択的に通過させるステップと、前記干渉計から出射された光を検出部において検出するステップと、前記検出部で検出された光に係る分析を分析部にて行うステップと、を有する。

20

【0010】

上記のライダーシステム、及び、ライダーシステムによる計測方法によれば、単一縦モードのレーザー光源に代えてマルチ縦モードのレーザー光源を用いると共に、レーザー光のモード間隔と同一の間隔で透過ピークを複数有する透過スペクトルに基づいてレーザー光を選択的に通過させる干渉計を備えることで、全散乱光からレイリー散乱光成分のみを好適に取り出すことができる。したがって、単一縦モードのレーザー光源を用いる場合と比較して簡便な装置構成によって、レイリー散乱光成分のみの選択的な抽出という高い計測性能を有するライダーシステム及びこのライダーシステムによる計測方法を実現することができる。

30

【0011】

ここで、前記レーザー光源から出射された光の一部を参照光として前記干渉計に対して入射させる参照光入射部をさらに備える態様とすることができる。

【0012】

上記の構成を有する場合、参照光入射部から干渉計に入射する参照光を利用して、干渉計の調整が可能となる。また、参照光の検出結果を利用した分析を行うこともできるため、より高い計測性能を実現することができる。

40

【0013】

前記干渉計は、前記入射した光を2分岐する光分岐手段と、分岐された2つの分岐光の間に光路差を設ける光路差形成手段と、光路差が設けられた2つの分岐光を干渉させる光干渉手段と、を備え、前記光路差形成手段は、前記2つの分岐光の間に設ける光路差を変更可能である態様とすることができる。

【0014】

上記の構成を有する場合、干渉計における光路差が可変となるので、例えば、レーザー光源の種類に応じて光路差を調整することや、詳細の分析のために光路差を微調整すること

50

等が可能となることから、より簡便な装置構成でありながらも高い計測性能を実現することができる。

【0015】

また、前記検出部は、前記干渉計における光路差を変更しながら前記干渉計から出射された光を検出する態様とすることができる。

【0016】

上記の構成を有する場合、干渉計の光路差を変更すると、透過スペクトルの透過ピークの波長が変動するので、透過ピークを移動させながら散乱光の検出を行うことで、大気からの散乱光に係るより詳細な分析を行うことが可能となる。

【発明の効果】

10

【0017】

本発明によれば、簡便な装置構成であり、高い計測性能を実現可能なライダーシステム及び当該ライダーシステムによる計測方法が提供される。

【図面の簡単な説明】

【0018】

【図1】本発明の実施形態に係るライダーシステムの概略構成図である。

【図2】図2(A)は、ミー散乱光とレイリー散乱光とが含まれる光信号の例を示す図である。図2(B)は、レイリー散乱光のみを分離した光信号の例を示す図である。

【図3】図3(A)は、集光部20によって集光された光の散乱光スペクトルである。図3(B)は、干渉計30による透過スペクトルの例を示す図である。

20

【発明を実施するための形態】

【0019】

以下、添付図面を参照して、本発明を実施するための形態を詳細に説明する。なお、図面の説明においては同一要素には同一符号を付し、重複する説明を省略する。

【0020】

図1は、本発明の実施形態に係るライダーシステムの装置構成を示す概略構成図である。本実施形態に係るライダーシステム1は、レーザ光を出射するレーザ光源10と、レーザ光を照射することによる大気中の分子からの後方散乱光を集光する集光部20と、集光部20で集光された光のうち特定波長の光のみを選択的に等価する干渉計30と、干渉計30で干渉された光を検出する検出器41, 42(検出部)と、検出器41, 42による検出結果に基づく分析を行う分析部50と、を含んで構成される。

30

【0021】

図1に示すライダーシステム1(LIDAR: Light Detection and Ranging)は、主に大気中のエアロゾル(浮遊粒子状物質)の観測に用いられるシステムである。レーザ光を大気中に照射した場合、レーザ光と大気との間でいくつかの種類の相互作用が生じる。本実施形態に係るライダーシステム1で大気中のエアロゾルの観測を行う場合、パルスレーザ光を大気中に照射して、大気中のエアロゾルや、大気を構成する分子による後方散乱光を測定する。レーザ光の出射から受光までの時間に基づいて、光源から散乱光が発生した位置までの距離(散乱体までの距離)を求めることができ、検出器において受光する光の強度から、レーザ光の光路上での散乱係数を算出することができる。これにより、レーザ光を大気中(上方)に向けて照射した場合には、高度に応じた散乱係数の分布を得ることができる。

40

【0022】

一般的に、ライダー測定に利用される散乱の種類には、エアロゾルによるミー散乱(Mie scattering)、大気構成分子によるレイリー散乱(Rayleigh scattering)、及びラマン散乱(Raman scattering)等が挙げられる。これらを利用してエアロゾルの空間分布や大気密度、大気成分の濃度分布などが測定される。その他、レーザ光が散乱体までを往復する間に大気中の分子によって受ける吸収に着目し、吸収の大きな波長と小さな波長の2波長のライダー信号の比から吸収分子の濃度の空間分布を求める差分吸収法などの手法がある。

50

【 0 0 2 3 】

本実施形態に係るライダーシステム1は、レイリー散乱を利用した高スペクトル分解ライダー(High Spectral Resolution Lidar:HSRL)である。従来から用いられているミー散乱ライダーは、エアロゾル由来のミー散乱光と、大気構成分子由来のレイリー散乱光とが含まれる光信号を受光して解析するシステムである。これに対して、HSRLは、ミー散乱光とレイリー散乱光とが含まれる光信号と、この光信号からレイリー散乱光のみを分離した光信号とを取得することが可能なシステムである。

【 0 0 2 4 】

本実施形態に係るライダーシステム1の動作機構であるHSRLの詳細について、図2を参照しながら説明する。図2(A)は、ミー散乱光とレイリー散乱光とが含まれる光信号の例を示す図である。また、図2(B)は、レイリー散乱光のみを分離した光信号の例を示す図である。図2(A)、(B)とも、横軸を光信号の強度として、縦軸を高度としている。

10

【 0 0 2 5 】

高度 $h_1 \sim h_2$ の間にエアロゾル層が存在すると仮定すると、エアロゾル層が存在しない高度(h_1 よりも低層及び h_2 よりも高層)では、大気構成分子由来のレイリー散乱光が発生するが、高度 $h_1 \sim h_2$ のエアロゾル層においては、エアロゾル由来のミー散乱光と、大気構成分子由来のレイリー散乱光と、が発生する。また、上方に向かうにつれてライダーシステム1から出射するレーザー光は減衰するので、大気構成分子由来のレイリー散乱光は、高度が上昇すると減衰する。

20

【 0 0 2 6 】

この結果、図2(A)に示すように、レーザー光の照射によって各高度において生じる散乱光の強度(信号強度)は、高層に向かうにつれて減衰するが、エアロゾル層では、散乱光の強度が大きくなるのが分かる。従来のミー散乱ライダーでは、この情報のみを取得して、エアロゾル層の光学特性を分析していた。これに対して、HSRLは、レイリー散乱光のみを分離した光信号を取得する。

【 0 0 2 7 】

図2(B)に示すように、レイリー散乱光のみを分離すると、大気構成分子由来の散乱光の強度の変化をライダーシステムで取得することができる。この場合、特に高度 $h_1 \sim h_2$ のエアロゾル層における大気構成分子由来のレイリー散乱光の情報を取得し、図2(A)に示すミー散乱光とレイリー散乱光とが混合された情報と組み合わせることで、ミー散乱光に係る情報をより精度よく取り出すことができる。この結果、エアロゾル層の光学特性を示す情報である消散係数()及び後方散乱係数()の抽出が可能となり、より高い精度でエアロゾル層の分析を行うことができる。

30

【 0 0 2 8 】

本実施形態に係るライダーシステム1は、上記のHSRLをより簡便な装置構成で実現することができる。ライダーシステム1は、HSRLシステムにおいて、ミー散乱光成分とレイリー散乱光成分とを分離して測定する構成について特徴を有する。そのため、以下の実施形態では、ミー散乱光成分とレイリー散乱光成分とを分離して検出する検出機構について特に説明する。

40

【 0 0 2 9 】

図1に戻り、ライダーシステム1の各装置について説明する。レーザー光源10は、レーザー光を出射する光源である。レーザー光源10としては、例えば、Nd:YAGレーザーを用いることができる。この場合、レーザー光として、Nd:YAGレーザーの第二高調波(波長532nm)を用いることができるが、レーザー光源10から出射するレーザー光の波長は特に限定されない。なお、Nd:YAGレーザーに代えて、Nd:YLFレーザーを用いることもできる。本実施形態に係るライダーシステム1では、マルチ縦モード(縦マルチモード)のレーザー光を用いることができる。このため、レーザー光源10を安価に準備することができる。

【 0 0 3 0 】

50

レーザ光源 10 から出射されたレーザ光は、2つのミラー 11 及びビームスプリッタ 12 (参照光入射部) を経て、ミラー 13 で反射されたレーザ光が大気中へ出射される。ビームスプリッタ 12 では、レーザ光源 10 から出射されたレーザ光を入力し、入力光を2分岐して一方の分岐光をミラー 13 へ向けて出射すると共に、他方の分岐光を参照光として集光部 20 へ向けて出射する。参照光は、干渉計 30 の調整等に用いられるが詳細は後述する。

【0031】

集光部 20 は、レーザ光源 10 からのレーザ光を大気中に出射することにより生じる後方散乱光を集光する機能を有し、例えば、天体望遠鏡により実現される。集光部 20 により集光された光は、視野絞り 21 を経て、コリメートレンズ 22 によりコリメートされる。その後、コリメート光は、ミラー 23 を経て、干渉計 30 へ入射する。

10

【0032】

なお、全散乱光を並行して測定する場合、例えば、図 1 に示すように、ミラー 23 の後段にビームスプリッタにし、このビームスプリッタにより分岐された光の一部を検出器 43 で直接測定する構成としてもよい。この場合、検出器 43 も後述の分析部 50 に接続されることで、検出器 43 にて測定した結果を分析部 50 における分析に利用することができる。ただし、本実施形態に係るライダーシステム 1 のように、2つの検出器 41, 42 で検出される光の透過率が互いに逆位相となる場合には、2つの検出器 41, 42 で検出される光の情報に基づいて全散乱光を算出することができるため、検出器 43 を別途設けなくてもよい。

20

【0033】

干渉計 30 は、所謂マッハツェンダー干渉計であり、ミラー 23 を経て入射したコリメート光をビームスプリッタ 31 (光分岐手段) で2分岐して、一方の分岐光については直進させると共に、他方の分岐光については可動ルーフミラー 32 (光路差形成手段) を経由させる。これにより、2つの分岐光は互いに光路差を有することになる。これらの2分岐光をビームスプリッタ 33 (光干渉手段) で合成することで互いに干渉する。このとき、干渉計 30 により形成される干渉縞の間隔がレーザ光のモード間隔と対応する構成とする。この点は後述する。

【0034】

干渉計 30 の可動ルーフミラー 32 は、例えば、 piezo 素子に対してレトロルーフミラーをマウントすることにより実現することができる。この場合、piezo 素子を制御することで、2つの分岐光の光路差の調整を行うことができる。ただし、可動ルーフミラー 32 は、干渉計 30 における2つの分岐光の光路差を制御可能であればその構成は適宜変更することができる。

30

【0035】

また、本実施形態では、マッハツェンダー型の干渉計 30 を用いる場合について説明するが、例えばマイケルソン干渉計、ファブリペロー干渉計、サニャック干渉計、フィゾー干渉計等、周期的な透過スペクトルを持つ干渉計を用いることもできる。

【0036】

検出器 41 は、可動ルーフミラー 32 を経由した光がビームスプリッタ 33 を直進した位置に配置する。また、検出器 42 は、ビームスプリッタ 31 を直進した光がビームスプリッタ 33 を直進した位置に配置する。これにより、検出器 41, 42 は、互いに位相が逆の信号を検出することができる。

40

【0037】

分析部 50 は、検出器 41, 42 (及び、検出器 43 を備える場合には、検出器 43) において検出された信号から、ミー散乱光及びレイリー散乱光に係る情報を取得し、分析対象であるエアロゾル層の光学特性を示す消散係数 () 及び後方散乱係数 () を算出する機能を有する。

【0038】

分析部 50 は、CPU (Central Processing Unit)、主記憶装置である RAM (Ran

50

dom Access Memory) 及び ROM (Read Only Memory)、検出器 41, 42 等の他の機器との間の通信を行う通信モジュール、並びにハードディスク等の補助記憶装置等のハードウェアを備えるコンピュータとして構成される。そして、これらの構成要素が動作することにより、分析部 50 としての機能が発揮される。

【0039】

分析部 50 における消散係数 () 及び後方散乱係数 () の算出方法は、レーザ光源 10 の種類等には依存しない。したがって、消散係数 () 及び後方散乱係数 () の算出方法は、公知の方法を用いることができる。具体的には、例えば、Zhaoyan Liu 他 2 名、「High-spectral-resolution lidar using an iodine」、Optical Engineering、第 38 巻、第 10 号、1999 年 10 月、p. 1661-1670 に記載された方法に基づいて、エアロゾルの光学特性を示す消散係数 () 及び後方散乱係数 () を算出することができる。

10

【0040】

本実施形態に係るライダーシステム 1 は、マルチ縦モードのレーザ光を用いながら、測定精度の高い高スペクトル分解ライダー (HSRL) システムを実現している点を特徴とする。この点について、図 3 を参照しながら説明する。

【0041】

図 3 (A) は、集光部 20 によって集光された光の散乱光スペクトルである。また、図 3 (B) は、干渉計 30 による透過スペクトルの例を示す図である。本実施形態に係るライダーシステム 1 では、ミー散乱光及びレイリー散乱光を含む散乱光が集光部 20 において取得される。集光部 20 において取得される散乱光のうち、ミー散乱光成分 S1 は、図 3 (A) に示すように、レーザ光源 10 から出射されるレーザ光の形状に対応したものとなり、レーザ光波長及び当該波長に対してモード間隔毎にピーク P1 が形成される。一方、レイリー散乱光成分 S2 は、ドップラー拡がりをもつので、図 3 (A) に示すように、ミー散乱光成分 S1 に比べて拡がりをもつ緩やかなピーク P2 を有する。このレイリー散乱光成分 S2 のピーク P2 は、レーザ光のモード間隔の間 (隣接するピーク P1 の間) を埋めるような形状をしているので、隣接するミー散乱光成分 S1 のピーク P1 の間の波長域の散乱光を検出すれば、レイリー散乱光成分 S2 が含まれる情報を取得することができる。

20

【0042】

そこで、ライダーシステム 1 では、干渉計 30 を制御して、ミー散乱光成分 S1 を除去する構成とする。上述のように、干渉計 30 はマッハツェンダー型であるので、2 分岐光の光路差を調整することで、干渉縞の間隔 W2 を調整することができる。このような干渉計 30 による透過スペクトルを図 3 (B) に示す。干渉計 30 では、透過スペクトルの下向きのピーク P3 が形成される波長の光は干渉計 30 により透過することができない。図 3 (B) に示すように、干渉計 30 により通過させる光の波長を示す透過スペクトルは、所定の間隔 W2 毎に形成される透過ピークを複数有するスペクトルとなる。

30

【0043】

本実施形態に係るライダーシステム 1 による計測方法について説明する。

【0044】

まず、レーザ光源 10 からマルチ縦モードのレーザ光を出射することによる大気中からの散乱光を集光部 20 にて集光し (集光するステップ)、集光した光をレーザ光のモード間隔に対応した透過スペクトルを有する干渉計 30 を通過させる (干渉計によって選択的に通過させるステップ)。2 分岐光の干渉により、ミー散乱光成分 S1 は除去されると共にレイリー散乱光成分 S2 が干渉計 30 を通過し、これを検出器 41, 42 にて検出する (検出するステップ)。これにより、各高度に対応するミー散乱光成分 S1 のみの散乱光強度を示す情報と、各高度に対応するレイリー散乱光成分 S2 のみの散乱光強度を示す情報と、を取得することができる。したがって、2 つの検出器 41, 42 で検出される情報を足し合わせることで全散乱光を算出した後に、上記の 2 つの情報に基づいて、分析部 50 において、分析対象であるエアロゾル層の光学特性を示す消散係数 () 及び後方散乱

40

50

係数()を算出する(分析を行うステップ)。これにより、ライダーシステムによる計測が終了する。

【0045】

レイリー散乱光成分S2の取得についてさらに説明する。本実施形態に係るライダーシステム1では、ミー散乱光成分S1のピークP1の波長と干渉計30における下向きピークP3の波長とを一致した状態で、散乱光のモード間隔W1と干渉計30による干渉縞の間隔W2とを一致させることで、ミー散乱光成分S1の複数のピークP1を除去することが可能となる。なお、W1とW2とを一致させるためには、干渉計30における2分岐光の光路差長を、レーザ光源10における共振器の長さに一致させればよい。これにより、干渉計30を通過した光を検出する検出器41, 42で、レイリー散乱光成分S2のみを検出することが可能となる。なお、図3(B)では、 $W1 < W2$ となっているので、ピークが一致していないが、 $W1 = W2$ の関係となるように干渉計30を調整することで、ミー散乱光成分S1を除去した散乱光を検出することができる。したがって、全散乱光と、ミー散乱光成分S1を除去した散乱光(レイリー散乱光成分S2)と、を検出することで、ミー散乱光成分S1も実質的に測定可能となる。これにより、消散係数()及び後方散乱係数()の算出が可能となる。

10

【0046】

従来のミー散乱ライダーでは、マルチ縦モードのレーザ光源が用いられていたのに対して、高スペクトル分解ライダー(HSRL)システムでは、レーザ光源として単一縦モードのレーザ光源を用いることを前提とされていた。これは、上述したように、レーザ光を照射することにより集光部20で集光される散乱光にはミー散乱光成分とレイリー散乱光成分とが混合しているため、レイリー散乱光成分のみを分離して取得しようとする場合、除去するミー散乱光成分の波長帯を少なくした方がミー散乱光成分を確実に除去できると考えられていたためである。

20

【0047】

しかしながら、単一縦モードのレーザ光源は非常に高価であるという課題があった。また、単一縦モードのレーザ光源としては、単一縦モードのレーザ光を出射するために、音響光学素子や、高速の応答(100Mps以上)が可能なAD変換器等を備える必要があることから、装置構成が複雑になるという課題があった。さらに、集光部20より後段の検出器においても、ミー散乱光成分を正確に除去するためには、高分解能の分光素子を備える必要があった。また、レーザ光の出射波長に応じて分光素子の透過波長を調節する必要があるが、この調整は技術的にも困難であった。このように、単一縦モードのレーザ光を出射する光源を用いたHSRLシステムは、装置のコスト面及び技術面から負荷が高く、常時観測等の用途に安易に設置することは困難であった。

30

【0048】

これに対して、本実施形態に係るライダーシステム1では、単一縦モードのレーザ光源よりも安価なマルチ縦モードのレーザ光源10を使用する。また、マルチ縦モードのレーザ光源10から出射されるレーザ光のモード間隔が一定であるため、マッハツェンダー型の干渉計30モード間隔に対応した波長間隔毎に透過ピークを有する干渉計を実現することができる。したがって、レーザ光のモード間隔毎にピークを有するミー散乱光成分S1を干渉計30により除去することが可能となる。したがって、マルチ縦モードのレーザ光を用いることにより生じる複数のミー散乱光成分S1のピークを干渉計30により除去することが可能となり、レイリー散乱光成分S2を精度よく測定することが可能となる。また、上記のライダーシステム1は、従来のHSRLシステムと比較して、より安価な光源を用いることができる。また、マルチ縦モードのレーザ光源は、単一縦モードのレーザ光源と比較してレーザパワーの観点からも安定性が優れている。参照光を使用することにより、単一縦モードのレーザ光源では必要であった光源側での波長制御等が不要となり、全散乱光からのミー散乱光成分S1の除去に関しても干渉計30のみで実現することができる。

40

【0049】

50

また、従来のHSRLシステムでは、ミー散乱光成分を除去するための干渉計として、ファブリペロー型の干渉計（例えば、エタロン干渉計等）を用いていた。これは、単一縦モードのレーザ光を用いるために、ミー散乱光も単一波長となることをふまえて、当該波長の光を好適に除去する干渉計を使用していたためである。しかしながら、ファブリペロー型の干渉計を利用して、マルチ縦モードのレーザ光における複数の波長ピークを有するミー散乱光を除去する構成を実現することは可能であるが、コスト面で課題がある。この点について、ライダーシステム1では、より安価なマッハツェンダー型の干渉計30を採用してマルチ縦モードのレーザ光におけるミー散乱光を除去可能な構成を実現可能としている。したがって、レーザ光源10のみならず、干渉計30についてもより簡便な装置構成を実現することが可能となる。このように、本実施形態に係るライダーシステム1は、

10

【0050】

また、ライダーシステム1では、ビームスプリッタ12によりレーザ光源10から出射されたレーザ光の一部を参照光として取り込む構成としている。このような構成を備えることにより、参照光を用いた干渉計30の調整が可能となる。参照光は、マルチ縦モードのレーザ光であり、ミー散乱光成分が含まれるであろう波長域にピークを有する光である。したがって、参照光におけるピーク成分を除去可能となるように干渉計30の光路差を調整することで、大気中からの全散乱光からミー散乱光成分S1を除去することが可能な状態に干渉計30を制御することが可能となり、より高い計測性能を実現することができる。

20

【0051】

また、大気中からの全散乱光を測定する前に、参照光のみに関して干渉計30を介した計測を行うことで、参照光に係る干渉計30による干渉効果（透過効果）を事前に測定することができる。したがって、透過波長の設定ズレによるバイアス成分を検知することが可能となり、当該データを全散乱光の検出結果からレイリー散乱光成分S2を分離測定する際の補正に利用することができる。

【0052】

また、干渉計30は、可動ルーフミラー32を備えているため、2つの光路の光路差が容易に変更可能とされている。光路差を容易に変更することができるということは、干渉計30による透過スペクトルのピーク間の間隔W2を容易に変更することができる。干渉計30の光路差を非常に小さく変更すると、透過スペクトルのピーク間の間隔W2はほとんど変わらず、ピークの位置が移動する。したがって、例えば、レーザ光源10から出射するレーザ光のピークの位置を変更した場合であっても、光路差を例えばレーザ光の1波長分だけ掃引させながら検出を行うと、レーザ光におけるミー散乱光成分S1に由来するピークの位置を検出することができる。このように、レーザ光に応じた干渉計30の光路差の調整を容易に行うことができる。また、同一のレーザ光源10からのレーザ光を用いた測定であっても、干渉計30による干渉の度合いを変更しながら測定することが可能となり、多方面からの分析を行うことも可能となる。この場合、例えば、全散乱光に含まれるミー散乱光成分S1の割合及びレイリー散乱光成分S2の割合の分析等を評価することが

30

40

【0053】

また、ライダーシステム1では、2つの検出器41, 42により、互いに位相が逆の信号を個別に検出することが可能な構成を備えている。したがって、干渉計30による透過スペクトルに係る情報を取得することができるため、検出器41, 42による測定感度を向上させることができる。特に、検出器41, 42が互いに逆位相の信号を検出する構成とした場合、得られた情報を干渉計30の制御に適用することができる。具体的には、例えば、検出器41, 42において検出する信号に基づいて干渉計30の光路差を最適にす

50

るように制御するフィードバックシステムを、より高精度に構築することができる。

【0054】

以上、本発明の実施形態に係るライダーシステム及ライダーシステムによる計測方法について説明したが、上述した実施形態は本発明の一例を示すものである。本発明に係るライダーシステム及び計測方法は、上記実施形態に限られるものではなく、各請求項に記載した要旨を変更しない範囲で変形し、又は他のものに適用したものであってもよい。

【0055】

例えば、上記実施形態のライダーシステム1に含まれる光学素子等の配置は適宜変更することができる。また、上記実施形態では、検出器41, 42が2台設置されている場合について説明したが、検出部としての検出器は少なくとも1台あればよい。

10

【0056】

また、上記のライダーシステム1では、参照光を干渉計30の調整等に用いる場合について説明したが、参照光を用いない構成、すなわち、ビームスプリッタ12によりレーザー光源10からのレーザー光を分岐して集光部20に集光させる手段を備えていない構成であってもよい。その場合でも、ライダーシステム1における高い計測性能は実現することができる。また、集光部20を経由して参照光を干渉計30に入射させる構成に代えて、参照光を直接干渉計30に導入させる構成としてもよい。すなわち、参照光を干渉計30に導入させるための光路を、散乱光を干渉計30に導入させるための光路とは別に設けることができる。

【0057】

全散乱光の測定と、レイリー散乱光成分S2の測定との順序は変更してもよい。また、全散乱光の測定は干渉計30を用いずに集光部20で集光された光を測定すればよい。したがって、全散乱光を測定するための構成については、例えば検出器43のように、ライダーシステム1に適宜追加することができる。

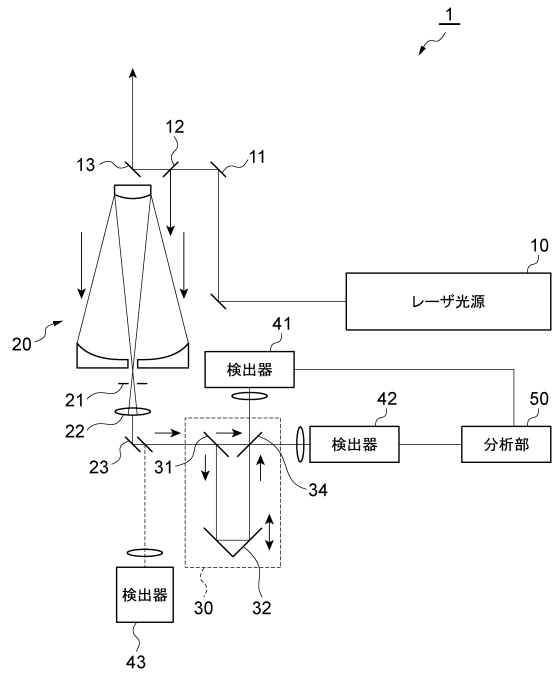
20

【符号の説明】

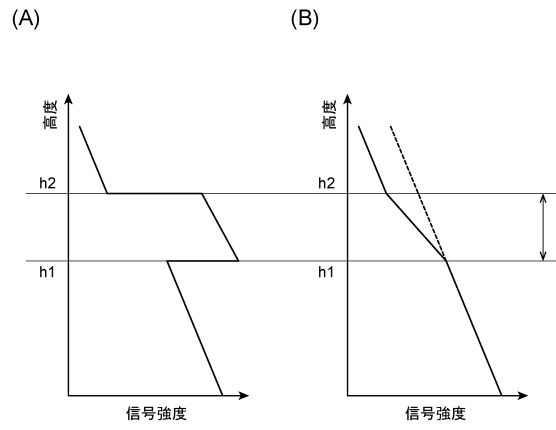
【0058】

1...ライダーシステム、10...レーザー光源、20...集光部、30...干渉計、41, 42...検出器、50...分析部。

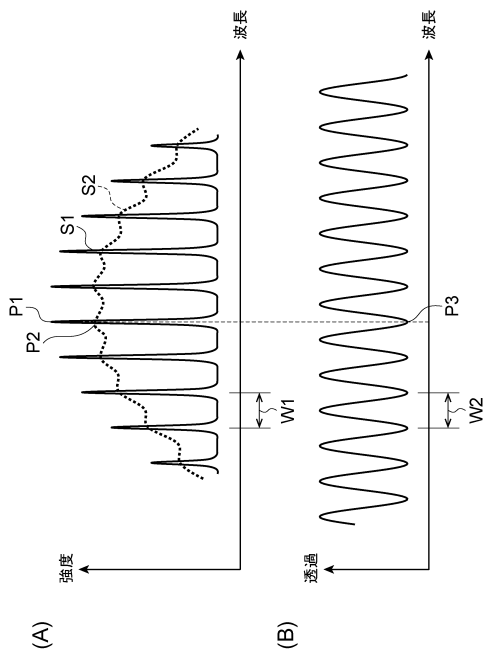
【図1】



【図2】



【図3】



フロントページの続き

- (74)代理人 100088155
弁理士 長谷川 芳樹
- (74)代理人 100113435
弁理士 黒木 義樹
- (72)発明者 神 慶孝
茨城県つくば市小野川16-2 国立研究開発法人国立環境研究所内
- (72)発明者 杉本 伸夫
茨城県つくば市小野川16-2 国立研究開発法人国立環境研究所内
- (72)発明者 西澤 智明
茨城県つくば市小野川16-2 国立研究開発法人国立環境研究所内
- (72)発明者 リストリ パプロ
アルゼンチン共和国 ブエノスアイレス ビジャマルテリ フアンパウティスタデラサージェ
4397
- (72)発明者 オテロ リディア
アルゼンチン共和国 ブエノスアイレス ビジャマルテリ フアンパウティスタデラサージェ
4397
- (72)発明者 ケール エドアルド
アルゼンチン共和国 ブエノスアイレス ビジャマルテリ フアンパウティスタデラサージェ
4397

審査官 横尾 雅一

- (56)参考文献 特開2008-051674(JP,A)
特開2002-071518(JP,A)
米国特許出願公開第2013/0314694(US,A1)
米国特許出願公開第2011/0222048(US,A1)
Bruneau D, et.al., Direct-detection wind lidar operating with a multimode laser, APPLIED OPTICS, 2013年 7月10日, Vol. 52, No. 20, p.4941-4949
杉本伸夫、竹内延夫, レーザ-レーダーによる大気計測 -計測手法とその応用-, 応用物理, 1994年 5月, 第63巻第5号, 第444頁-第454頁
LIU Z, et al, High-spectral-resolution lidar using an iodine absorption filter for atmospheric measurements, Optical Engineering, 1999年10月, Vol. 38 No. 10, p.1661-1670
Bruneau D, Pelon J, Simultaneous measurements of particle backscattering and extinction coefficients and wind velocity b, APPLIED OPTICS, 2003年 2月20日, Vol. 42, No. 6, p.1101-1114
Bruneau D, Mach.Zehnder interferometer as a spectral analyzer for molecular Doppler wind lidar, APPLIED OPTICS, 2001年 1月20日, Vol. 40, No. 3, p.391-399

(58)調査した分野(Int.Cl., DB名)

G01N 21/00 - 21/61

G01N 15/06

G01B 9/00

G01B 11/00

G01J 3/45

G01S 7/00

G01S 17/00

JSTPlus/JMEDPlus/JST7580(JDreamIII)