

令和 5 年 6 月 6 日現在

機関番号：82645

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2017～2022

課題番号：17K06484

研究課題名（和文）低電力・長時間変調パルスレーザを用いた風観測手法の実証

研究課題名（英文）Demonstration of wind ranging and velocimetry using low-power, long-duration, and frequency-modulation optical pulse

研究代表者

吉川 栄一（Yoshikawa, Eiichi）

国立研究開発法人宇宙航空研究開発機構・航空技術部門・主任研究開発員

研究者番号：70619395

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,600,000円

研究成果の概要（和文）：長時間変調パルスを用いたコヒーレントドップラーライダー(CDL)が実証された。単一周波数パルスを用いた従来のパルスCDL(PCDL)では、距離と速度の分解能はトレードオフの関係にある。このトレードオフ関係を解消するために、周波数変調を用いたCDL(FMCDL)がこれまでの研究によって、理論的に提案されていた。本研究で開発したプロトタイプは、PCDLとFMCDLの両方として機能するように開発された。その観測データは、FMCDLがPCDL同様に風観測を実現しており、またFMCDLが理論通りの距離と速度の分解能を達成したことを示した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究で提案されたライダー方式は、従来の方式が持つ距離分解能と速度分解能のトレードオフ関係を解消するもので、その解消によって様々なアウトカムをもたらすと考えられる。学術的な意義としては、距離分解能を保ったまま速度分解能を高めることによって、大気機中のエアロゾルを分解して観測し、気候変動プロセスにおいて重要なエアロゾルの化学変化などを捉えることができると思われる。社会的な意義としては、小型の航空機に影響を与えるスケールの乱流を検知することに、本方式が提供する高距離分解能観測は極めて有効であるため、本技術はドローンなどを用いた新航空輸送の実現に必要な不可欠になると予想される。

研究成果の概要（英文）：A coherent Doppler LIDAR (CDL) with long-duration frequency-modulated pulses was validated. In traditional CDL using single-frequency pulses (PCDL; pulsed CDL), distance and velocity resolution are in a trade-off relation. Meanwhile, CDL using frequency-modulated signals (FMCDL; frequency-modulated CDL) was theoretically proposed in a previous work to dissolve the trade-off relation. Specifically, the FMCDL's distance and velocity resolution are determined by frequency-modulation band width and pulse duration (strictly, auto-correlation function of transmitting waveform and power spectrum of envelope of the waveform), respectively. A prototype was developed in this study to work as both PCDL and FMCDL. From the observed data, one hundred pair of distance-velocity profiles of the PCDL and FMCDL were calculated and compared. The obtained profiles indicated that the FMCDL worked in consistent with the PCDL and accomplished distance and velocity resolution according to the theory.

研究分野：リモートセンシング

キーワード：ライダー 風 周波数変調 信号処理 エアロゾル ドローン

1. 研究開始当初の背景

コヒーレントドップラーライダ（CDL）は、近年風観測用途に頻繁に用いられるようになった。用途の例としては、風力発電施設の建設場所を決定するための風況調査や、航空気象安全のための空港における乱気流観測などが挙げられる。さらには、飛行中の航空機の安全性・安定性を高めるための航空機搭載風観測ライダの研究開発、地球規模の風の流れを観測するための人工衛星搭載風観測ライダの研究開発といった取り組みも行われている。CDL が頻繁に活用されるようになった理由は、光学機器が一般化し、比較的安価になってきたということであり、今後のさらなる発展を考えたとき、経済的なハードルはますます下がっていくと思われる。

風観測ライダの重要な性能は、距離分解能と速度分解能である。従来の風観測ライダは単一周波数パルスを用いており、そのために降はパルス PCDL と呼ぶが、距離分解能と速度分解能がトレードオフの関係にある。詳しくは、どちらの分解能もパルス幅によって決定され、前者はそれに比例し、後者はそれに反比例する。そのため、一般的な距離・速度分解能としては、百メートル程度・一メートル毎秒程度といったところである。一方で風観測ライダの用途と照らし合わせると、風況調査においては、想定されるタービンの高さや大きさに合わせた分解能による観測が必要であるが、距離分解能を数十メートル程度に改善しようとする、速度分解能を数メートル毎秒に劣化させなければならない。民間旅客機の高さは30メートル程度であり、同等の距離分解能を求めようとする、やはり数メートル毎秒という粗い速度分解能となる。数十センチメートルのドローンの飛行を支援するためには、数十センチメートルの距離分解能が必要であり、これはほぼ絶望的である。このように、PCDL が有する距離分解能と速度分解能のトレードオフ関係が、風観測ライダの応用範囲を狭めている。

上記のトレードオフ関係を解消するために、申請者らは新しい風観測ライダ方式を、理論的に提案した。それは、長時間変調パルスを用いるというものである。長時間変調パルスを用いたライダを以降 FMCDL と呼ぶ。理論研究によると、FMCDL の距離分解能は変調帯域幅によって、速度分解能はパルス幅によって、それぞれ独立して決定されるため、PCDL が持つトレードオフ関係は解消されている。しかし同理論を元に実際に FMCDL を構成し観測を行うことを考えると、長時間変調パルスをどの程度正確かつ安定的に生成できるのか、エアロゾルの散乱において変調はどの程度正確に保持されるのか、それらを総合して FMCDL には実現性があるのか、といった疑問があった。

2. 研究の目的

FMCDL の実現性を明らかにすることを目的とした。

3. 研究の方法

FMCDL の試作機を製作し、試作機を用いた観測を通して、FMCDL の理論性能がどの程度実際に発揮されるのかを確認する。

4. 研究成果

図1に試作機の構成図を示す。光源からは、連続波が出力され、それがカプラーで分離される。その一方が、サーキュレータを介し、まずは音響光学変調器に入力される。音響光学変調器に、任意信号発生器から長時間無変調パルスが RF 周波数で入力されることによって、光の長時間無変調パルスが生成される。同光パルスは、直後のミラーで反射され、もう一度同じ変調を加えられる。このように2回の変調を施すことによって、精度の良い変調波を生成することができた。二度変調された光パルスは、サーキュレータを介して EDFA に入力され、増幅される。EDFA は、光パルスの振幅を大きく歪ませてしまう特性があるため、音響光学変調器において、それを相殺するような振幅変調を施した。その後光パルスは、二つ目のサーキュレータを介して、望遠鏡から空中に放射される。二つ目のサーキュレータには、EDFA で増幅された強力な光が入力されるため、本来全てが望遠鏡に行くはずの光が、若干二つ目のカプラーに直接もれ込んでしまう。この漏れこみを抑えるため、二つ目のサーキュレータには、非常に低いクロストークレベルをもつ個体を採用した。空中のエアロゾルからの散乱光は、同望遠鏡で受信され、サーキュレータを介して、二つ目のカプラーに入力される。ここで一つ目のカプラーから分離された連続波と混合され、フォトディテクタによって RF の受信波に変換される。RF の受信波はデジタルでの記録を行った。

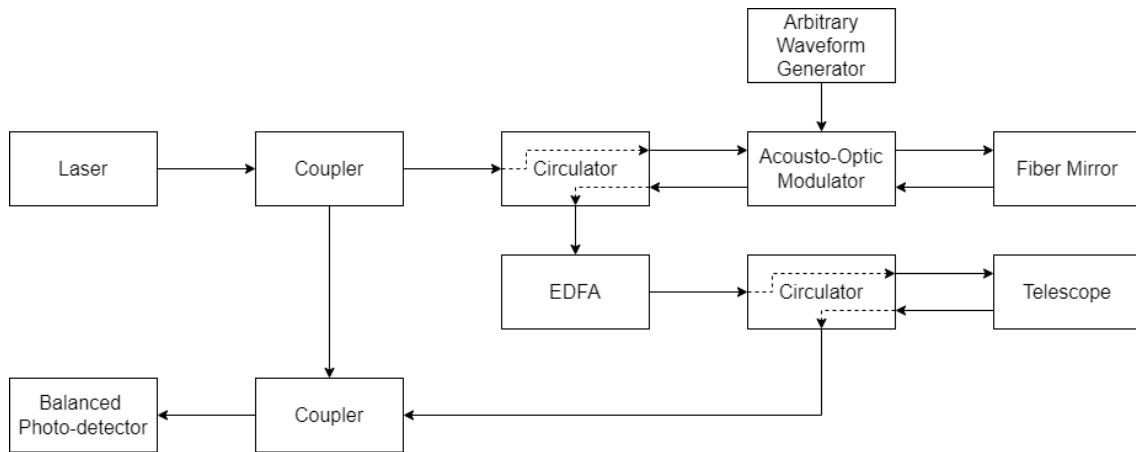


図1 試作機の構成

受信信号から、距離-速度プロファイルを算出する新しい信号処理手法も、本研究では開発した。具体的には、距離-速度プロファイルと受信信号を結びつける線型方程式を構築し、逆問題解法を適用する、というものである。受信信号には、必ず加算ノイズが混入することを考慮して、Capon が提案したスペクトル推定法を応用した逆問題解法を採用した。結果として、顕著なサイドローブが抑え、クリアな距離-速度プロファイルを算出することに成功した。

試作機は、図1から分かるように、PCDL と FMC DL のどちらとしても動作するように構成されている。つまり、任意信号発生器によって短時間単一周波数パルスを生成すれば PCDL として、長時間変調パルスを生成すれば FMC DL として、動作する。観測実験においては、それぞれのパルスを、500 マイクロ秒感覚で交互に送信した。PCDL と FMC DL それぞれにおいて、10,000 の受信信号を用いて距離-速度プロファイルを算出したので、二つのプロファイルはほぼ同時のものともみなせる。図2に、算出された距離-速度プロファイルの一例を示す。左が PCDL、右が FMC DL である。プロファイルは各距離において、スペクトルのピーク値によって正規化されている。この時、FMC DL の距離分解能は PCDL と同等、速度分解能は PCDL の約4倍に設定されている。それを示すように、平均的な速度については、両プロファイルはほぼ一致した値を示している。一方、速度幅については、FMC DL は PCDL と比べて同等以下となっている。速度幅が常に小さい値を取らないのは、風自体に速度幅があることに起因していると思われる。裏を解すと、PCDL の速度分解能（ここでは1.5メートル毎秒程度）は、この時点の距離-速度プロファイルを表現するのに十分でない、ということがわかる。1.5メートル毎秒という速度分解能は、広く活用されている分解能であるため、もし多くの時点でこのような速度幅を風が持つのであれば、これは重要な知見である。

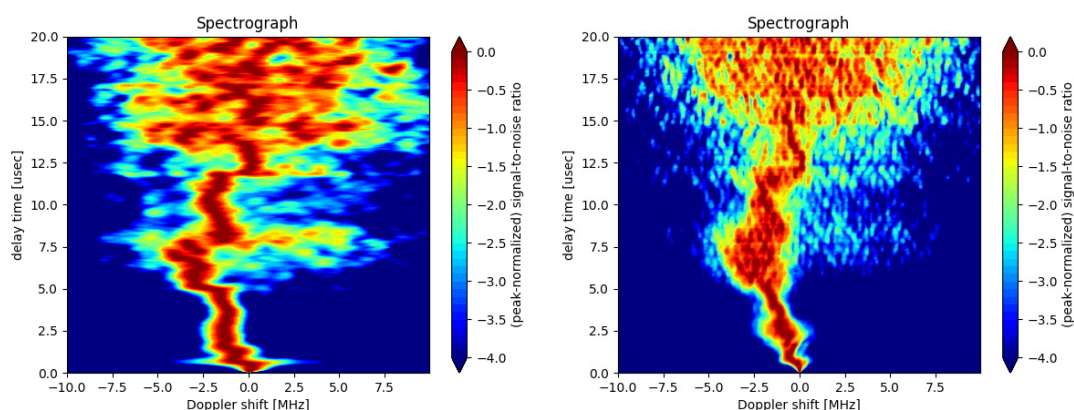


図2 観測された距離-速度プロファイルの一例（左：PCDL、右：FMC DL）

このように、FMC DL が、従来の風観測ライダである PCDL と同様の風観測を実現していることと、距離・速度分解能のトレードオフを解消した観測が実現できたことを確認することができた。それは同時に、長時間変調パルスを正確かつ安定的に生成することができ、エアゾルの散乱において変調が保持される、ということも意味している。多数の事例を用いた定量評価についても進めており、近い将来に学術論文として発表を目指している。

5 . 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計12件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 9件）

1 . 発表者名 Eiichi Yoshikawa, Makoto Aoki, Hironori Iwai, Tomoo Ushio, and Shoken Ishii
2 . 発表標題 A Simulation Study on Performance of a Coherent Wind Lidar Transmitting Long Duration and Frequency Modulated Pulses
3 . 学会等名 102nd Annual Meeting of American Meteorological Society (国際学会)
4 . 発表年 2022年

1 . 発表者名 93.Eiichi Yoshikawa, Makoto Aoki, Hironori Iwai, Tomoo Ushio, and Shoken Ishii
2 . 発表標題 Distance-Velocity Profile Estimation via Constrained Minimization of Power on Coherent Wind Lidars Transmitting Frequency-Modulated Pulses
3 . 学会等名 101st Annual Meeting, American Meteorological Society (国際学会)
4 . 発表年 2021年

1 . 発表者名 86.Eiichi Yoshikawa, Hiroshi Yamasuge, Makoto Aoki, Hironori Iwai, Tomoo Ushio, and Shoken Ishii
2 . 発表標題 A Coherent Wind Lidar with Frequency-Modulated and Long-Duration Pulse: Principles and Experiments for Feasibility Study
3 . 学会等名 100th Annual Meeting, American Meteorological Society (AMS) (国際学会)
4 . 発表年 2020年

1 . 発表者名 80.Hiroshi Yamasuge, Eiichi Yoshikawa, Tomoo Ushio, Shoken Ishii, Makoto Aoki, and Kazuki Hashimoto
2 . 発表標題 Progress in Development of a Laser Radar with Long-Duration Frequency-Modulated Pulse for Measuring Wind
3 . 学会等名 39th Conference on Radar Meteorology, American Meteorological Society (国際学会)
4 . 発表年 2019年

1. 発表者名 Eiichi Yoshikawa, Tomoo Ushio, and Hiroshi Yamasuge
2. 発表標題 Analytical Feasibility Study of Wind Lidar with Long-Duration Frequency-Modulated Pulse
3. 学会等名 19th Coherent Laser Radar Conference (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Hiroshi Yamasuge, Eiichi Yoshikawa, Tomoo Ushio, Shoken Ishii, Makoto Aoki, and Kazuki Hashimoto
2. 発表標題 Experimental Verification of Wind Lidar with Long-Duration Frequency-Modulated Pulse, " 19th Coherent Laser Radar Conference
3. 学会等名 19th Coherent Laser Radar Conference (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 山菅大, 吉川栄一, 牛尾知雄, 石井昌憲, 青木誠, 橋本和樹
2. 発表標題 長時間変調パルスを用いた風観測ライダの研究開発
3. 学会等名 第36回レーザセンシングシンポジウム
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 山菅大, 吉川栄一, 牛尾知雄, 石井昌憲, 青木誠, 橋本和樹
2. 発表標題 長時間変調パルスレーザを用いたドップラーライダの実証実験の経過
3. 学会等名 日本大気電気学会第97回研究発表会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Eiichi Yoshikawa and Tomoo Ushio
2. 発表標題 Analytical Study of Long-Modulated Pulsed Lidar for Wind Sensing
3. 学会等名 OSA Imaging and Applied Optics Congress (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Eiichi Yoshikawa, Tomoo Ushio, and Hiroshi Yamasuge
2. 発表標題 Analytical Feasibility Study of Wind Lidar with Long-Duration Frequency-Modulated Pulse
3. 学会等名 The 19th Coherent Laser Radar Conference (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Hiroshi Yamasuge, Eiichi Yoshikawa, Tomoo Ushio, Shoken Ishii, Makoto Aoki, and Kazuki Hashimoto
2. 発表標題 Experimental Verification of Wind Lidar with Long-Duration Frequency-Modulated Pulse
3. 学会等名 The 19th Coherent Laser Radar Conference (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 山菅大, 吉川栄一, 牛尾知雄, 石井昌憲, 青木誠, 橋本和樹
2. 発表標題 長時間パルスレーザを用いた風観測ライダの研究開発
3. 学会等名 日本大気電気学会第96回研究発表会
4. 発表年 2018年

〔図書〕 計0件

〔出願〕 計1件

産業財産権の名称 計測装置及び計測方法	発明者 吉川栄一	権利者 同左
産業財産権の種類、番号 特許、特開2021-156660	出願年 2020年	国内・外国の別 国内

〔取得〕 計0件

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究 分 担 者	牛尾 知雄 (Ushio Tomoo) (50332961)	大阪大学・大学院工学研究科・教授 (14401)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------