

光ファイバアンプを用いた小型コヒーレントライダーの開発

長澤 親生, 阿保 真, 柴田 泰邦

首都大学東京システムデザイン学部 (〒191-0065 東京都日野市旭が丘 6-6)

Development of the compact coherent lidar using optical fiber amplifiers

Chikao NAGASAWA, Makoto ABO, and Yasukuni SHIBATA

Tokyo Metropolitan Univ., 6-6 Asahigaoka, Hino, Tokyo 191-0065

Abstract: A new compact multi-purpose lidar system is proposed. The laser transmitter is available to the DIAL and Doppler lidar for the observations of three-dimensional gas constituents, particulates, temperature and wind distributions in the atmosphere. The laser source of this lidar system consists of the seeded optical fiber amplifiers with high repetition rate and narrow bandwidth. We report the concept and current development status of this lidar system.

Key Words: DIAL, optical fiber amplifier, atmospheric temperature, wind, coherent detection

1. はじめに

システムが簡易で全自動観測が可能なミーライダーが主流であったネットワーク観測は、近年の技術進歩により高スペクトル分解能ライダーやコヒーレント検波方式のドップラーライダーへと、ライダー手法の広がりが見られる。今後は高度な波長制御が必要な DIAL による水蒸気、CO₂、CH₄、SO₂ などの微量気体観測を組み合わせたネットワークライダーの実現により、発生源の特定や動態予測が期待される。さらに気温分布のネットワークライダーの実現は、ヒートアイランド対策効果の測定、竜巻など局地的気象現象の予測などに貢献できる。

ドップラーライダー以外の従来の大気観測用ライダーの光源には、主に Nd:YAG レーザに代表される固体レーザが単体又は励起光源として用いられてきた。しかし、固体レーザは共振器構造の安定性やインジェクションシーディング技術・波長整合システムなどを考えると装置の小型化には限界がある。一方 DFB レーザなど半導体レーザの狭帯域化、波長安定化の技術は進歩しており、各種ガスセンサへの利用が進んでいる。しかし、狭帯域半導体レーザのパルス化、高出力化は技術的に困難である。

DIAL に用いられる吸収波長は近赤外波長に多く存在する。また近距離のみの計測を想定するため、高繰り返しパルス方式が効率の観点から有効である。このような用途には光ファイバレーザまたは光ファイバアンプが有用である。

我々は、小型ライダーの送信レーザとして複数のレーザ方式を検討し、DFB 狭帯域半導体レーザを LD 励起の Nd:YAG レーザに注入するパルス増幅方式²⁾、小型光ファイバアンプを用いた小型レーザの開発³⁾を行った。今回は光ファイバアンプを用いた小型レーザとコヒーレント検波器を組み合わせた小型ライダーの開発状況について報告する。

2. 光ファイバアンプ

利得媒質に光ファイバを用いたものを光ファイバ増幅器と呼び、希土類添加ファイバ増幅器と光ファイバラマン増幅器に分けられる。希土類添加ファイバ増幅器の代表は Er 添加ファイバ増幅器 (EDFA) と Yb 添加ファイバ増幅器 (YDFA) がある。EDFA は 1530~1610nm、YDFA は 1030~1090nm の信号光を増幅する。励起光波長として EDFA は 980/1480nm、YDFA は 975/915nm が用いられる⁴⁾。

光ファイバアンプはシード光の波長を安定化させれば、アンプ出力光も波長安定化され、さらに DIAL の場合シード光を切り替えるだけで容易に ON/OFF 波長の切り替えが出来る点にメリットがある。

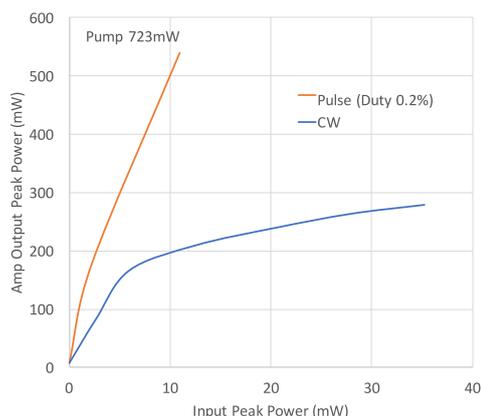


Fig.1 Input and output characteristics of the YDFA for CW and pulsed operations.

Fig. 1 に CW とパルス (Duty 比 0.2%) の入力光ピークパワーに対する出力特性の実験結果を示す。これよりパルスの方がゲイン飽和が起こりにくいこ

とが分かる。シード光は波長 1064nm の DFB レーザ、励起用には波長 976nm の FBG Stabilized LD、増幅媒質としては長さ 4m の Yb 添加ファイバを用いた。

3. コヒーレント検波方式ライダー

風測定用ドップラーライダーの場合、ドップラーシフトを受信信号スペクトルから求めるが、受信信号のフーリエ変換でスペクトルを求める場合その周波数分解能 Δf はデータの受信信号サンプル時間 T_s の逆数となる。一方ドップラー周波数 f_D は、視線方向風速 V とレーザ波長 λ を用いて $f_D = 2V/\lambda$ で表される。例えば、波長 $1.5\mu\text{m}$ で風速 1m/s の場合の f_D は 1.3MHz となり、これは距離分解能に換算すると 112.5m に相当する。このようにドップラーライダーでは風速分解能を上げるためには距離分解能を犠牲にする必要がある。一方信号強度のみを利用する DIAL の場合にはこのような制限は生じない。

また、レーザのパルス幅 Δt とスペクトル幅 $\Delta \nu$ の間には $\Delta \nu \geq k/\Delta t$ の関係が成り立つ。 Δt を半値全幅としてパルス波形をガウシアン型とした場合 ($k=0.44$) の $\Delta \nu$ と Δt の関係を Fig.2 に示す。ドップラーライダーではスペクトル分解能を高めるため Δt を長くして、 $\Delta \nu$ を狭くする必要がある。例えば $\Delta \nu=1\text{MHz}$ とするためには $\Delta t=440\text{ns}$ と長くする必要がある。一方 DIAL の場合の $\Delta \nu$ は吸収線幅より狭く数 100MHz 以下であれば良いので Δt は 10ns オーダまで狭くすることが可能である。

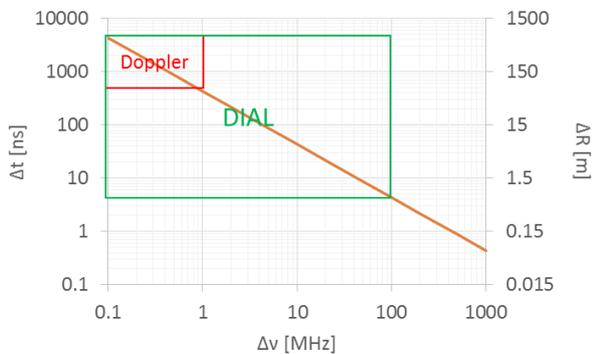


Fig.2 Spectral width ($\Delta \nu$) versus pulse width (Δt) for a Gaussian laser pulse.

コヒーレント検波方式はドップラーライダーでは標準的に用いられているが、ドップラーライダー以外では直接検波方式が一般的である。将来の小型 DIAL を構築する上で、コヒーレント検波方式の精度や感度を直接検波方式と比較するために、Fig.3 の様なコヒーレント検波方式のライダーを試作した。

一般的なコヒーレントライダーは、ローカル光を周波数シフトしているが、このシステムはシグナル光を AO 変調器でパルス化と周波数シフト (150MHz) を同時に行っている。また送受信は同軸では無く、口径 50mm のレンズを用いて集光し、バランス型光検出器でヘテロダイン検波を行っている。光源は前述の Yb 添加光ファイバアンプ方式である。

4. まとめ

次世代分散型ネットワークライダーは、ライダーの将来展開のためには、期待される有力な技術の一つである。本研究では、ネットワークライダーの光源として、シードされたファイバアンプレーザをパルス化し、コヒーレント検波方式ライダーを試作しその稼動実験を行った。ファイバアンプ方式はコンパクトで面倒な調整が不要なシステムとなり得るので、コストを下げる事が出来れば、多数のライダーをネットワーク状に配置することにより、さらに広い大気空間の 3 次元構造を捉えることが可能となる。

謝辞

本研究は科研費 (17K18956) の助成を受けたものである。

参考文献

- 1) レーザレーダ研究会・調査委員会 (第一次報告書) (2016).
- 2) 長澤親生他: 第 35 回レーザセンシング シンポジウム, P-A3 (2017)
- 3) 長澤親生他: 第 36 回レーザセンシング シンポジウム, P33 (2018)
- 4) 住村和彦他: 解説ファイバーレーザー—基礎編— (オプトロニクス, 2011)

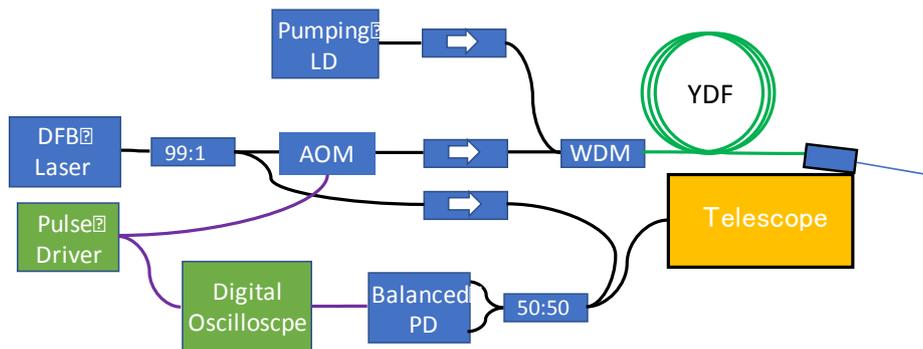


Fig. 3 Block diagram of the compact coherent lidar.