

1.5 μm 高性能ドップラーライダの開発

Development of 1.5 μm high-performance Doppler LIDAR

平野 嘉仁¹、柳澤 隆行¹、古田 匡¹、大鋸 康功¹、藤井 康宏¹、浅香 公雄²
Y. HIRANO¹, T. YANAGISAWA¹, M. FURUTA¹, Y. OOGA¹, Y. FUJII¹, K. ASAKA²

¹三菱電機株式会社

¹Mitsubishi Electric Corporation

²航空宇宙技術研究所 飛行システム研究センター

²National Aerospace Laboratory of Japan, Flight Systems Research Center

Abstract : We have been developing a 1.5-micron pulsed coherent Doppler LIDAR system. Here, we plan to introduce three new technologies, an all-fiber type optical transmitter/receiver circuit, a high-power QPM parametric amplifier, and a parallel processing signal processor, to improve reliability and measurement speed of the system. A design and progress of development are briefly explained.

1. まえがき

コヒーレントドップラーライダ (CDL) は、単一周波数発振光のレーザ光を大気中に照射し大気中の分子やエアロゾルによる散乱光のドップラシフトを計測することにより、風速を遠隔から測定する装置である。CDL による風速の測定は、電波を用いたウインドプロファイラに比べ、ドップラシフトが大きく精度の高い測定が可能であるとともに、ビーム幅が狭く局所的な風速測定が可能である。また、エアロゾルの散乱を利用するため晴天での測定が可能である。これらの特長を生かした用途として、航空機の後方に発生する乱気流を検出する飛行機離着陸の管制応用や、高高度における前方の気流の乱れを検出する航空機搭載乱気流警報装置などへの用途が期待される。これら用途では、できるだけ長距離の計測をリアルタイムに行うことが要求される。

我々は、これまで、高スペクトル純度 Er:Glass レーザ¹⁾を用いた波長 1.5 μm 帯の風速検出用 CDL の開発を世界に先駆けて行ってきた²⁾。波長 1.5 μm 帯は、これまで開発されてきた波長 10 μm 帯 (CO₂ レーザ)、波長 2 μm 帯 (Ho,Tm:YAG レーザ³⁾) などと比べ、空間分解能 Δx と速度分解能 Δv の積 ($\Delta x \Delta v = c\lambda / 3.4\pi$) が小さい、目に対する最大許容エネルギーが約 10 倍大きい、大気の吸収線が少ないため波長選択が容易、光通信用の廉価な光学部品を使用可能等の利点がある。しかし、Er:Glass レーザでは、熱的問題により、高繰り返し動作に限界があり(繰り返しは最大 40Hz)、測定距離 5 km までの風速測定におけるデータ更新レートは 0.15Hz~5Hz と低く制限されており、高繰り返しが可能で波長 2 μm 帯に比べ、計測距離および計測スピードという計測性能において課題を残している。

現在、我々は、この課題を克服し、波長 1.5 μm 帯の優位性を生かしつつ、他の波長帯に対し計測性能で遜色の無い高性能 CDL 実現に取り組んでいる。課題克服のために、新しい技術の導入を図っており、ここでは、開発を行っている 3 つの技術、および、システム開発状況について述べる。

2. 波長 1.5 μm CDL 向けの新規技術開発

波長 1.5 μm CDL において高信頼・高性能化を図るため、高信頼化をはかるための全光ファイバ型光回路構成の光送受信器、波長 1.5 μm における高繰り返し、高出力レーザ光を得るための光パラメトリック増幅器、高繰り返しに対応した信号処理を可能とするための並列演算信号処理装置の開発を新たに行っている。以下にそれぞれについて述べる。

(1) 光ファイバ型光回路構成光送受信器

光送受信器における信頼性を向上と、パルス幅可変などの自由度を向上させるために、全光ファイバ型光回路構成の光送受信器を開発している。Fig.1 に開発している光送受信器の構成を示す。

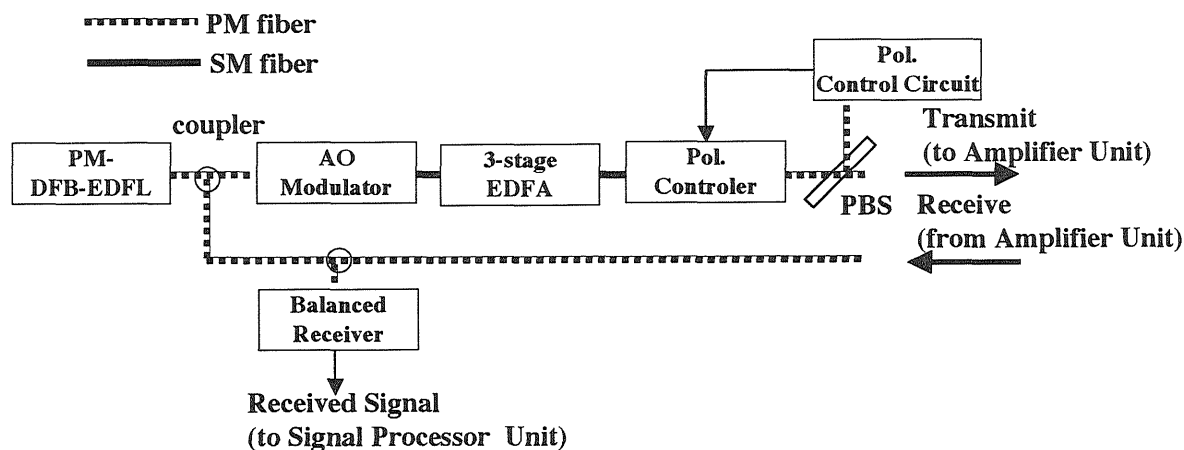
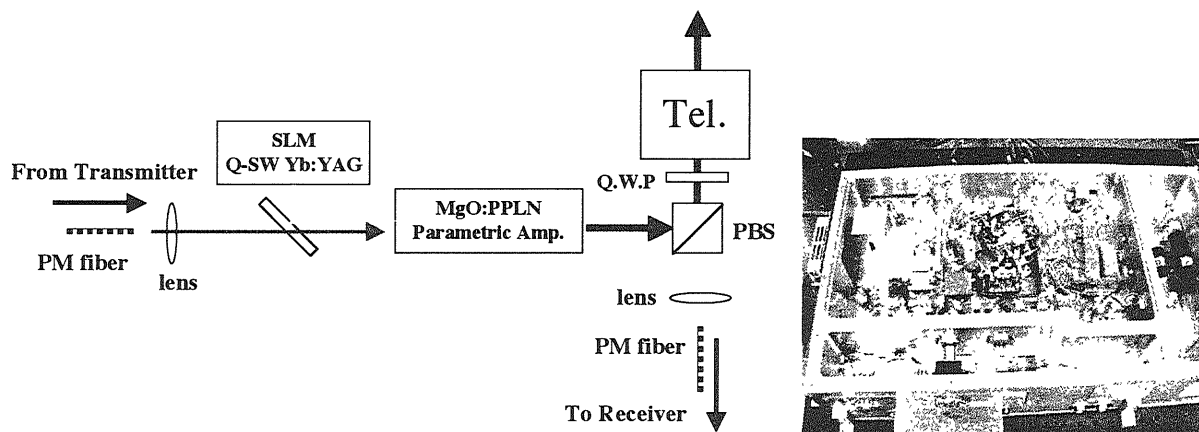


Fig. 1. Configuration of all-fiber type Transmitter/Receiver optical circuit.

光源には、波長 $1.53 \mu\text{m}$ で単一縦モード発振（線幅 $<10\text{kHz}$ ）する定偏波分布帰還型 Er ファイバレーザ（PM-DFB-EDFL）を用いる。約 14mW の出力の内、一部をローカル光として、一部を送信種光として用いる。送信種光に、AO 変調器でローカル光周波数に対し周波数オフセットを与えると同時に、任意のパルス幅でパルス化し、3段の Er ファイバ増幅器（EDFA）で最大ピーク出力 10W まで増幅する。ファイバ増幅器が定偏波ファイバでは無い場合、ファイバ増幅器出射光は偏波制御器と偏波分離ファイバカップラ（PBS）を介し再び定偏波ファイバに入力される。この時、偏波分離カップラの片側の出力を最小にするように、偏波制御器により自動的に偏波コントロールを行うことで出力偏波を一定とし、パラメトリック増幅器に出力する。一方、受信光は定偏波ファイバによりローカル光とミクシングし、バランス型光受信器でヘテロダイン検波を行う。

(2) パラメトリック増幅器

近年の LD 励起固体レーザと非線形光学結晶の技術革新により、波長 $1.5 \mu\text{m}$ において高繰り返し、高出力を得る方策として波長変換が適応できるようになってきた。特に、高効率で単一縦モード出力が得られ、入力信号光のパルス幅で出力パルス幅を可変できるパラメトリック増幅器は CDL 用増幅器として適している。Fig.4 に、a) 開発中のパラメトリック増幅器の構成と、b)内観を示す。励起光源としては、比較的、長パルス幅化が容易な低利得媒質である波長 $1.03 \mu\text{m}$ の Yb:YAG レーザを単一縦モード化して用いる。一方、パラメトリック増幅器としては、高出力時のフォトリフラクティブダメージに強い MgO:PPLN 結晶を用いる⁴⁾。全光ファイバ型光回路から定偏波ファイバで入力された送信種光を、筐体内で空間に出射し、Yb:YAG レーザ出射光と光路をそろえてパラメトリック増幅器に投入し、増幅する。増幅された送信光は、偏光分離スプリッタ（PBS）と $1/4$ 波長板（Q.W.P）で構成される送受分離スイッチを介して、テレスコープ（Tel）から大気中に出射される。一方、大気中でドップラーシフトを受けた受信光は、テレスコープで受信され、送受分離スイッチを介して、定偏波ファイバに入力され、全光ファイバ型光回路に伝送される。



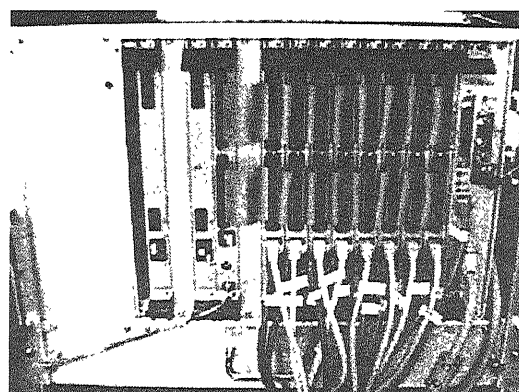
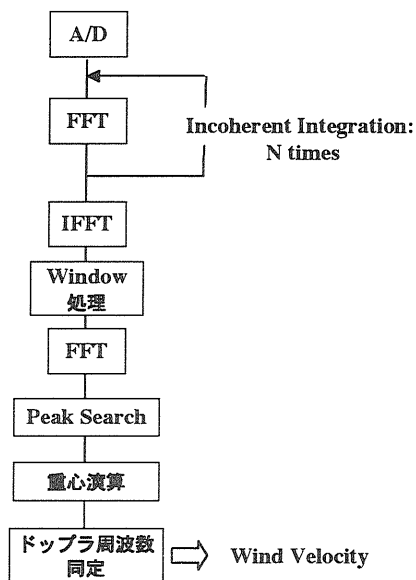
(a) Configuration (b) Appearance

Fig. 2. Configuration and appearance of Parametric Amplifier

開発途上での Yb:YAG レーザの特性は、CW 横マルチモード出力 30W の励起モジュールを 2 式用い、横単一モード、Q スイッチ動作で 8W (4kHz/~2.5mJ/500ns) の出力である。また、パラメトリック増幅器の出力としては、約 2W (変換効率 25%) が得られている。現在、励起レーザの縦単一モード化および出力向上を図っており、最終目標出力は、縦横単一モードで出力 4W (4kHz/1mJ/400ns)、増幅利得 23dB である。

(3) 並列演算信号処理装置

バランス型光受信器でヘテロダイン検波された受信信号は、信号処理装置により、AD 変換 (8bit/216MHz) された後、信号処理装置に入力される。Fig.3 に (a)信号処理のフローと、(b)信号処理装置の外観を示す。信号処理装置では、4kHz の繰り返しパルスに対し、リアルタイム演算処理を行うため、マスタ CPU の他に 16 個のスレーブ CPU を用いた



(a) Flow of processing

(b) Appearance of parallel processor

Fig. 3. Flow and appearance of parallel processor.

並列演算処理を行う。これにより 100m 分解能で 8km までの距離 (80 レンジビン) に対する FFT (128 点) がリアルタイムで行われる。実際の処理では、FFT された受信信号のパワースペクトルを、レンジビン毎にインコヒーレント積算しノイズ分散を減じる。さらに、逆 FFT により自己相関関数を求め、これに窓関数を掛け白色に近い雑音成分を除去した後、FFT によりパワースペクトルに直して信号のピーク検出を行う。この後、ピーク値の周波数近傍の周波数ビンでの信号強度の重心演算を行い、ドップラースペクトルの中心周波数と周波数分散を求め、風速と風速分散に換算する。

回線設計では、レーザ出力 1mJ で、距離 8km において SN 比 3dB 以上を得るためのインコヒーレント積分回数は 800 回程度と見積もられ、0.2 秒で 8km までの一方位に対する計測が可能となる。

3. 全体システム

全体システムは、シェルタに格納され、スキャナにより全方位 (水平軸: $\pm 185^\circ$ 、垂直軸: $\pm 95^\circ$) の計測が可能である。Fig.4 にシェルタの外観を示す。測定モードとしては、水平方向を固定して垂直方向を掃引する RHI モード、垂直方向を固定して、水平方向を掃引する PPI モードを有する。約 1 分で 8km までの 360 度全周 PPI データが取得できる。さらに、VAD (Velocity Azimuth Display) 手法を用いて、風向分布を表示する機能を有している。

また、システムは電話回線等の通信手段を介して遠隔操作が可能であり、機器の操作およびデータの取得を遠隔から行うことができる。

現状、パラメトリック増幅器を残して、システムは完成しており、パラメトリック増幅器無しの状態 (光ファイバ出力エネルギー $6\mu\text{J}/0.6\mu\text{s}$) で、距離 3~4km までの測定を 16000 回のインコヒーレント積分 (4 秒) で行えることを確認している。今後、パラメトリック増幅器の導入により、所要性能を満足できる予定である。

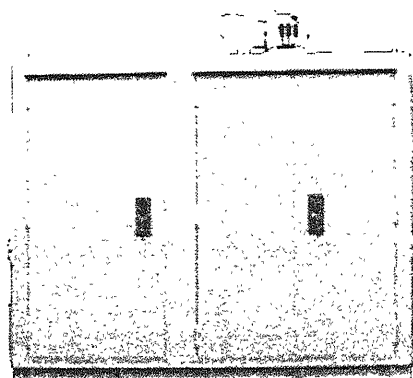


Fig.4 Appearance of system.

4. まとめ

1.5 μm 帯のコヒーレントドップラーライダの開発を行っている。現在、繰り返し周波数に制限のある Er:Glass レーザ ($< 40\text{Hz}$) にかえて、全光ファイバ型送受信器とパラメトリック増幅器を用いた高繰り返し化 (4kHz) をはかっている。また、高繰り返しに対応したリアルタイム計測を可能とする並列信号処理装置も新たに開発した。これまで、1.5 μm 帯は 2 μm 帯に対して多くの優位性を有しながら、レーザの繰り返しの観点から、リアルタイム性、測定距離という点に課題を残していた。本開発により、2 μm 帯の装置性能を凌駕するとともに、コヒーレントドップラーライダが真に有効な計測器となるものと考えられる。

参考文献

1. T. Yanagisawa et. al., Opt. Lett., 26, 1262 (2001).
2. K. Asaka et. al., Proc. of 11th CLRC, 147 (2001).
3. R. Tang et. al., Appl. Opt., 35, 7117 (1996).
4. Y. Hirano et. al., in postdeadline papers of CLEO'2000, CPD7-1 (2000).