C-4

中距離版・全光ファイバ型風計測ドップラライダの開発

Middle range all-fiber Coherent Doppler LIDAR (CDL) system for wind sensing

安藤 俊行[1]、亀山 俊平[1]、崎村 武司[1]、浅香 公雄[2]、平野 嘉仁[1]、田中 久理[3]、井之口浜木[3]
[1]三菱電機㈱ 情報技術総合研究所、[2]三菱電機㈱ 通信機製作所、[3]宇宙航空研究開発機構
Toshiyuki ANDO[1], Shumpei KAMEYAMA[1] , Takeshi SAKIMURA1, Kimio ASAKA[2], Yoshihito HIRANO[1]
Hisamichi TANAKA[3], Hamaki INOKUCHI[3]
[1] Mitsubishi Electric Corporation, Information Technology R&D Center, [2] Mitsubishi Electric Corporation, Communication Systems Center
[3]Japan Aerospace Exploration Agency(JAXA)、 e-mail: ando.toshiyuki@MitsubishiElectric.co.jp

Abstract: Middle range all-fiber Coherent Doppler LIDAR (CDL) system has been developed for wind sensing. A newly developed Er3+/Yb3+ fiber MOPA (Master Oscillator Power Amplification) source has enabled transmitting optical pulse to be performed its pulse energy of several tenth micro joule, which was previously limited up to several micro joule because of Stimulated Brillouin Scattering (SBS) in an optical fiber. The new all-fiber CDL has successfully measured maximum range for wind velocities up to 8km which is about 5 times as long as the measurable distance of a few kilometer in a conventional all-fiber CDL.

１．はじめに

コヒーレントドップラライダ（CDL）は遠隔の風向風速を計測できる有用な測器として、気象学、空港内での後方乱気流検出そして風力発電用の風況調査など多方面から期待されている。我々はアイセーフ波長の 1.5μm 帯を測定光波長に用いた CDL を開発しており[1]、また光送受信回路を光ファイバ部品により構成した全光ファイバ型 CDL を製品化している[2]。

全光ファイバ型 CDL は小型で高い配置自由度がある光ファイバ部品により回路を小型化できるのに加え、光通信用に信頼性保障された部品を流用できるため低コストで高信頼な光送受信回路を構成できるメリットがある。しかしながら、高スペクトル純度のパルスレーザ光を用いる CDL においてはパルス送信光が光ファイバコア中を伝送する際に誘発される誘導 Brillouin 散乱（Stimulated Brillouin Scattering; SBS）が問題となる。SBS はパルスレーザ光により発生した音響波が光ファイバのコア屈折率を変調し、これにより送信光が後方散乱される非線形光学効果であり、光部品に損傷を与えたり、光受信器に漏れ込み雑音を増加させるといった問題を引き起こす。従来の全光ファイバ型 CDL においては SBS を発生させない程度（10～15W）にピークパワーを抑制運用しており、このため最大測定距離が 1.5km 程度に制限されていた[5]。

一般に SBS しきい値は、伝送ファイバの有効コア面積に比例し、有効伝搬長に反比例することが知られている。SBS の課題解決のアプローチのひとつとして、大口径コアファイバによる有効コア面積増加が考えられる。Philippov 等はコア径 50um のダブルクラッド型（Double Cladding Fiber DCF）の光ファイバ増幅器を用いて 出力エネルギー290uJ 繰り返し 4 kHz の狭線幅パルス光源を実現している[3]。最近では Canat 等が、コア径 12um と 31um DCF 型の光ファイバ増幅器を組み合わせて用いて 出力エネルギー100uJ 繰り返し 10kHz の出力を SBS フリーで得ている[4]。一方、我々は、光ファイバ増幅器短尺化のアプローチにより SBS しきい値を引き上げ可能な高ピークパワー光ファイバ増幅器を開発した[7]。ここではこの光ファイバ増幅器を全光ファイバ型 CDL に組み込み、地上からの風速測定を行った結果、約 8ｋｍまでの最大計測距離が得られたので報告する。

２．装置構成

Fig. 1 に中距離版 CDL 装置の構成を示す。本 CDL 装置は従来の全光ファイバ CDL に新たに開発した高ピークパワー光ファイバ増幅器を接続する構成とし、光送受信ユニット、励起光発生ユニット、ライダ信号処理ユニット、および光アンテナユニットの４ユニット構成とした。重量は 42kg 以下、消費電力は 306VA 以下であり、19 インチサーバラックに収納可能である。

種パルス光源として従来の偏波保持型光ファイバ MOPA(Master Oscillator Power Amplifier)をベースとした。基準光源として連続光出力の DFB ファイバレーザ（λ＝1.548nm, パワー17mW）を分岐し片側をパルス種光に、他方を局発光に用いた。パルス種光は音響光学変調器 AOM（シフト周波数 80MHz）をダブルパス構成で用いて on/off 消光比 83dB、パルスくり返し周波数 4ｋHz のパルス切り出しを行った後、C バンド EDFA（MFD φ5.7μm、 ファイバ長 約 20m）を用いてパルス増幅し

た。パルス種光のピークパワーは SBS 発生しきい値以下の 10W 程度に設定した。さらに今回、種光のパルス OFF 期間に含まれる自然放出光(Amplified Spontaneous Emission　ASE)を抑圧するため、パルス種光を２段目の AOM を用いて再度パルス切り出しを行った後　高ピーク出力光ファイバ増幅器に接続した。

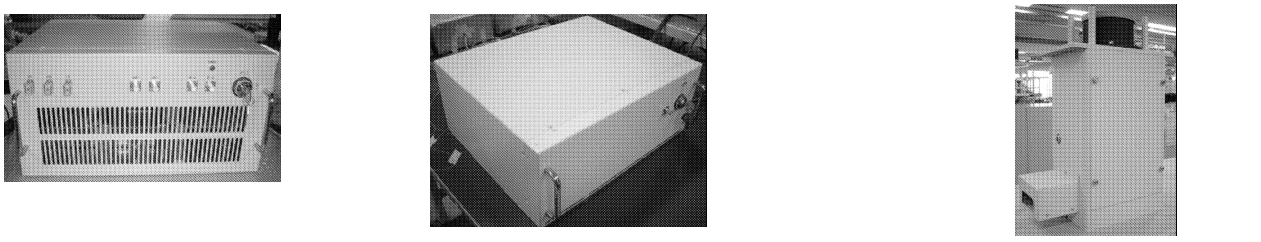
高ピークパワー光ファイバ増幅器は、専用設計したシングルモード型 Er、Yb 共添加光ファイバ EYDF（MFD φ8.3um、ファイバ長 3.5m）を波長 1480nm のレーザダイオード（LD）で双方向励起する構成とした[6,7]。励起光の導入は WDM（Wavelength Division Multiplexer）光ファイバカプラによるコア励起とし、励起 LD 光を励起光発生ユニットから光ファイバにより供給した。

また高ピークパワー光ファイバ増幅器内での偏波変動の影響を最小化するため、次の手順により偏波制御を行った。まず高出力光ファイバ増幅器出力を偏光ビームスプリッタで直交偏波成分に分岐、反射光パワーを最小化するようにパルス種光の偏波状態を制御した。これにより偏光ビームスプリッタ透過光は定偏波出力となる。偏波補正出力光を偏波保持型の光ファイバサーキュレータを介して送受信望遠鏡（φ110mm）により大気放出した。エアロゾルからの後方散乱光を同じ望遠鏡で収集し、光ファイバサーキュレータにより受信光路に伝送された後　ヘテロダイン受信した。

本装置では、増幅光のファイバ伝搬長を可能な限り短縮するため、高ピーク出力光ファイバ増幅器から望遠鏡までの素子を光アンテナユニット内に収納し、望遠鏡までの光路中に空間結合のないファイバ接続構成とした。高出力光ファイバ増幅器以降の光ファイバ融着接続損失は 0.2dB 以下であった。

光ヘテロダイン受信信号は、FPGA（Field Programmable Gate Array）ベースの前置信号処理ボード[5]を用いてドップラスペクトルを算出後、PC によりピーク検出、風速演算を行った。

(a) optical TRX unit　(b)Laser diode driver unit　(c)Optical antenna unit



(d) block diagram

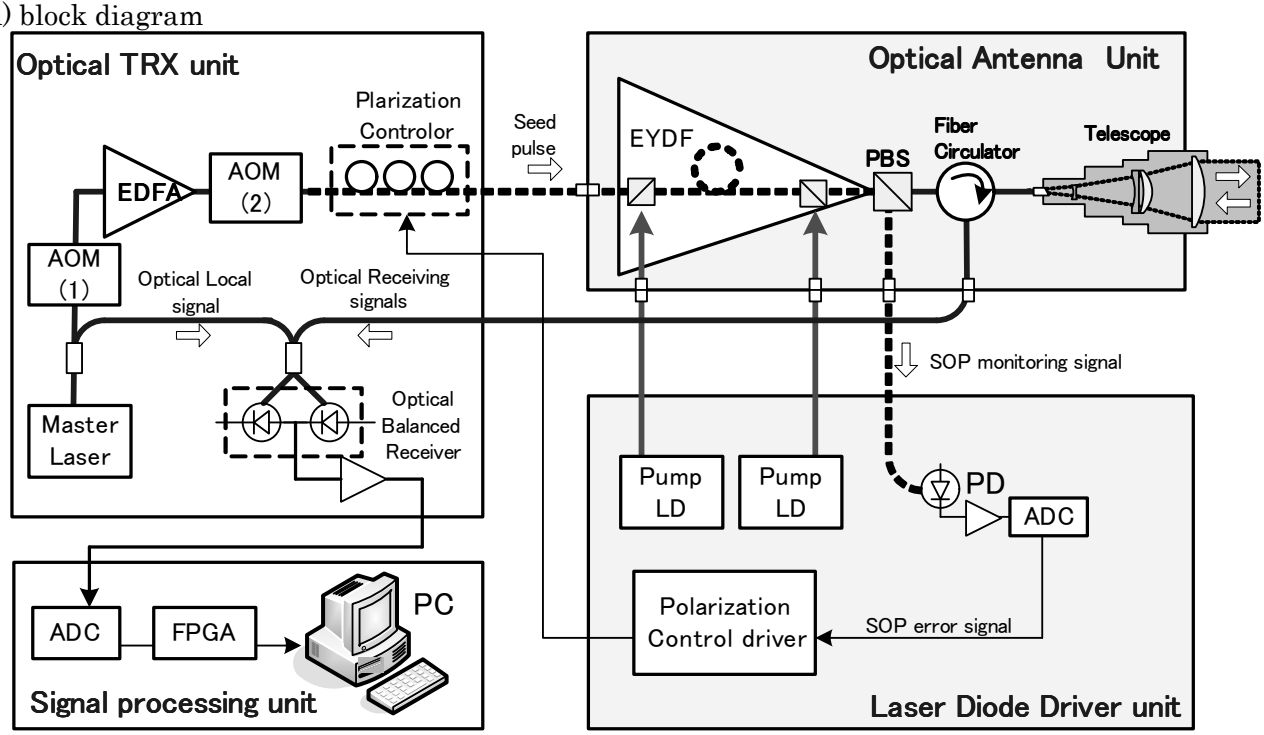


Fig. 1　Block diagram of middle range all-fiber CDL system

Real bold line indicates polarization maintaining fibers and broken bold line means the non-polarization maintaining single mode fibers.

Fig2 に、中距離版 CDL 装置の送信出力パルス光の測定結果を、従来の全光ファイバ型 CDL 製品（LR-05FC）との比較で示す。パルス繰り返し周波数 4kHz において、ピークパワー90W、パルスエネルギー58μJ、パルス幅 600ns が得られた。従来製品のピークパワーの約 9 倍に相当する。
また出力パルス波形中に SBS 発生に伴う乱れは見られなかった。パルス幅の短縮によりピークパワーを増加させて SBS しきい値を評価したところ約 125W だった。従来製品に対する有効コア面積比～2.1 倍、有効伝搬長比～5.7 倍から想定される SBS の増加量　約 12 倍に良く一致する結果と考えられる。

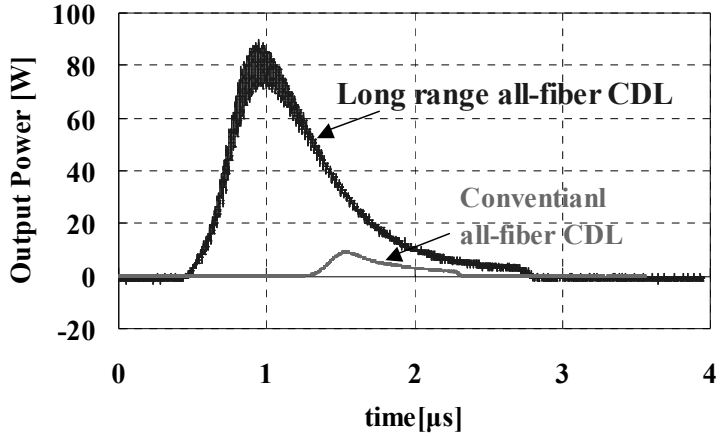


Fig.2　Optical pulse shapes of the new and conventional all-fiber CDL system

Fig３に、出力光の偏波補償機構の動作確認結果を示す。偏波制御の動作後１時間以上に渡りモニタ光（S 偏光）信号は０付近に追い込まれ、出力光である P 偏光パワーは安定して出力されていることが確認できる。

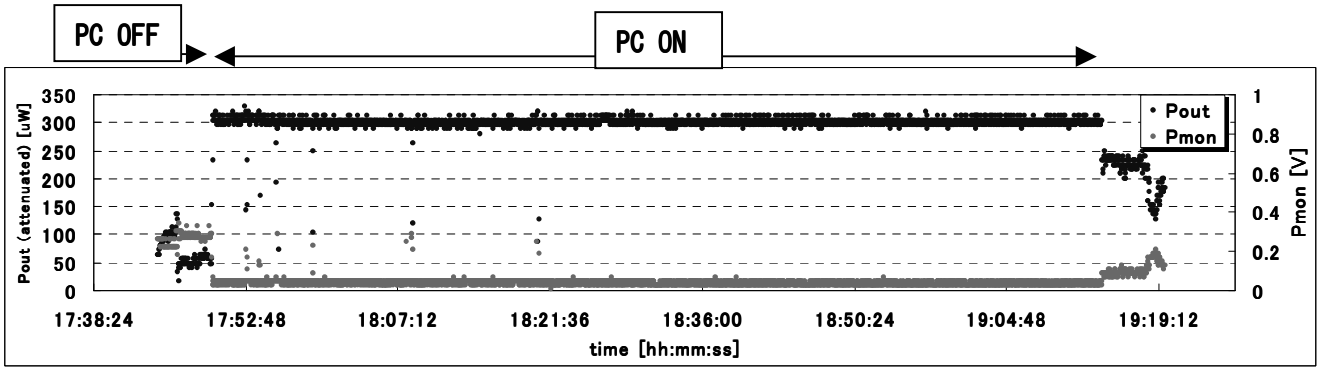


Fig.3　time series data of transmitting optical power as well as monitoring power for stabilizing SOP.

３．風速測定結果

本装置の計測性能確認の目的で晴天時の風速を地上計測(仰角 10 度)した。測定条件として望遠鏡の集光距離を無限大、距離分解能を 150m、インコヒーレント積分数 3600 回とした。測定時のエアロゾル状態は 0.047L 中のφ0.3μm 以上のパーティクル数が約 9000count であり、測定地(鎌倉)における年平均量(～6000cnt)[8]よりも多い状態であった。
Fig. 4 に、視線方向風速の計測により得られた距離―Detectability 特性を示す。実線は従来製品の理論特性、プロットは本 CDL 装置の実測値を示している。これを見ると、測定距離　約 8kmまで検出ライン(4.5dB)以上の ditectability が得られており、本装置の最大計測距離が従来製品(～1.5km)の約 5.3 倍を達成していることが分かる。この最大計測距離は受信開口径の拡大と出力エネルギーの増加量から見積もられる拡大量(約 5.4 倍)に良く一致しており、妥当な結果であると判断できる。

Fig.5 に同じ日時に測定した、距離 9.6km における視線方向風速と Detectability の時間変化を示す。約 50 分間、検出レベル以上の Detectability が得られ　9.6km の距離レンジにおいても概ね安定して風速測定が行われていたことが分かる。しかしこの測定において低層の雲による光路遮蔽により Detectability が低下する状況が散見された。今後、本装置を用いた地上測定においては、エアロゾル状態よりも光路遮蔽が距離制限要因になり得ることが示唆される。

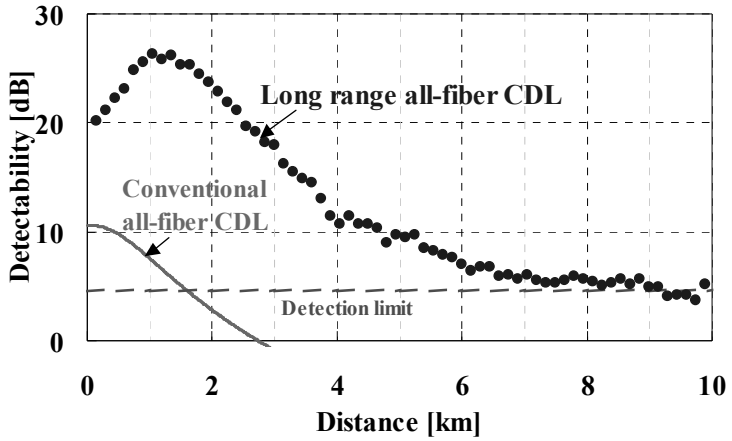


Fig.4　The comparison of the range performance between the new and conventional all-fiber CDL

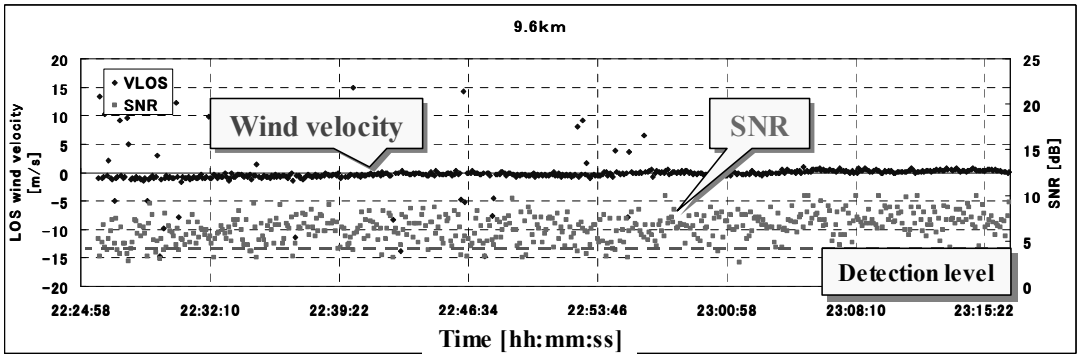


Fig.5　time series data of LOS wind velocity and SNR

４．まとめ

中距離・風計測用の全光ファイバ型 CDL の開発　評価結果について述べた。
全光ファイバ型 CDL の出力段に新規設計した短尺の光ファイバ増幅器を組み合わせて SBS しきい値を引き上げ、これにより従来比 9 倍の出力エネルギー（58μJ）が得られた。また偏波制御機構により光ファイバ増幅器内の偏波変動を最小化できることを確認した。さらに晴天時の風速を地上計測（仰角 10 度）し、最大で約 8km までの水平計測距離が得られることを確認した。この最大計測距離は受信開口径の拡大と出力エネルギーの増加量から見積もられる拡大量（約 5.4 倍）に良く一致しており、妥当な結果であると判断できる。
今後はさらなる計測距離の拡大のため、送信出力エネルギーの増強の開発を進めていく予定である。

５. 参考文献

[1] S. Kameyama et al. :" Compact all-fiber pulsed coherent Doppler lidar system for wind sensing", Appl. Opt. 46(2007),1953-1962

[2] T.Ando et al. "Improvements of performance in all-fiber Coherent Doppler LIDAR(CDL) system with considering non-linear optical effects", Proc. 23rd ILRC (2006), 259-262.

[3] V. Philippov et al. : "High-energy in-fiber pulse amplification for coherent lidar application", Opt. Let. 29 (2004) 2590-2592.

[4] G.Canat et al.:"100uJ generation using a narrow linewidth Er+3-Yb+3 doped fiber MOPA and its modeling", Proc. QELS (2005), 1370-1372.

[5] 安藤他:「全光ファイバ型ドップラライダの低コスト製品化開発」、第 24 回レーザセンシング(2005), p161-164

[6] T. Ando et al.:"Long range all-fiber coherent Doppler LIDAR(CDL) system for wind sensing"
, Proc. 14th CLRC(2007)

[7] 崎村他:「コヒーレントライダ用の高ピークパワー光ファイバ増幅器」、本研究会予稿集

[8] 亀山他、「鎌倉市における地表付近エアロゾル数の年平均推移と波長 1.5μm における後方散乱係数の推定」、第 24 回レーザセンシング(2005), p101-102