

# 全光ファイバ型パルスドップラライダにおけるファイバ内自己位相変調の影響評価

Estimation for influences of Self-Phase Modulation within an optical fiber in the all-fiber coherent Doppler lidar system

安藤 俊行、酒巻 洋、若山 俊夫、亀山 俊平、平野 嘉仁

Toshiyuki ANDO, Hiroshi SAKAMAKI, Toshio WAKAYAMA, Shumpei KAMEYAMA, and Yoshihito HIRANO

三菱電機(株) 情報技術総合研究所

Mitsubishi Electric Corporation, Information Technology R&D Center

## Abstract

Measurement errors in Doppler velocity obtained by all-fiber coherent Doppler lidar system has been studied. Self-Phase Modulation (SPM) in optical fiber causes optical frequency chirp within coherent optical pulses, leading to zero Doppler velocity offset. 1.5 MHz negatively chirped frequency has been estimated by spectrum analysis in optical heterodyne signals between local and output-pulse signals. The temporal transition of measured chirp-frequency have qualitatively agreed with the theoretical values of SPM which are analytically evaluated by the solutions for propagating equations.

## まえがき

波長 1.5  $\mu\text{m}$  を用いる全光ファイバ型コヒーレントドップラライダ (CDL) は、アイセーフ且つ小型・高信頼・高配置自由度なシステムを実現できる [1]。我々はこれまでに全光ファイバ型 CDL [2] を用いて航空機内からの前方風速測定 [3] や、風力発電風況精査に向けた測定精度検証実験 [4] を行い、その有用性を確認してきた。一方、光ファイバ型 CDL はシステムを小型・高信頼にできる反面、コア径の小さいファイバを利用しているために、ピーク出力がファイバの損傷や、非線形効果などにより制限されるといった問題がある。特に、高スペクトル純度のパルスレーザ光を用いる CDL では、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る。全光ファイバ型 CDL のように光ファイバ増幅器が用いられる場合には、Brillouin 利得とファイバ増幅器利得が結合するために特に起こりやすく、光部品に損傷を与えたり、ヘテロダイン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。このため全光ファイバ型 CDL では SBS を発生させない程度に光ファイバ増幅器の利得を抑制する必要がある、10~15W 程度にピークパワーを制限している [5]。

全光ファイバ型 CDL において、SBS 以外に考慮すべき非線形効果として、自己位相変調 (Self Phase Modulation; SPM) [6] があげられる。これまで、全光ファイバ型 CDL において、SPM の影響は検討されていないが、送信光周波数に変動を与えるため計測速度の測定誤差の発生要因となると考えられる。ここでは全光ファイバ型 CDL における SPM の影響を定量的に評価したので報告する。

## 光ファイバ内での自己位相変調効果 [6]

パルス光を光学媒質に入射するとカー効果により光強度に応じて屈折率が時間的に変化する。自己位相変調の一般式は光の電場  $A$  が光ファイバの伝搬方向に対してゆっくりと変化する場合 (Slowly varying 近似) における次の伝搬方程式から導き出せる。

$$i \frac{\partial A}{\partial z} = -\frac{i}{2} \alpha A + \frac{1}{2} \beta_2 \frac{\partial^2 A}{\partial T^2} - \frac{2\pi}{\lambda} \gamma |A|^2 A \quad (1)$$

ここで  $A$  は光の電場、 $\alpha$  は光ファイバでの減衰、 $\lambda$  は波長、 $\beta_2$  は屈折率分散によるパルス幅増加因子を示す。式 (1) の右辺第三項は次式 (2) で表される非線形光学係数  $\gamma$  を含む非線形光学効果を示す。

$$\gamma = \frac{n_2 \omega_0}{c A_{\text{eff}}} = \frac{2\pi}{\lambda} \frac{n_2}{A_{\text{eff}}} \quad (2)$$

ここで  $c$  は光速、 $A_{\text{eff}}$  は光ファイバ有効コア面積、 $P_0$  はパルス光のピークパワー、 $\omega_0$  は光の周波数、 $n_2$  は 3 次非線形分極に関する非線形屈折率をあらわす。

自己位相変調を考えるため  $\beta_2=0$  (ゼロ分散) を仮定し、さらに光の電場  $A$  を次式の規格化振幅  $U$  で表すと、規格化振幅  $U$  の解は次式 (3) で表される。

$$A(z, T) = \sqrt{P_0} \exp[-\alpha z/2] U(z, T) \quad (3)$$

$$U(z, T) = U(0, T) \exp[i\phi_{NL}(z, T)] \quad (4)$$

ここで  $U(0, T)$  は伝搬距離  $z = 0$  おける規格化振幅を、 $\phi_{NL}$  は次式で表される非線形位相偏移を表す。

$$\phi_{NL}(z, T) = |U(0, T)|^2 \frac{L_{eff}}{L_{NL}} \quad (5)$$

また  $L_{eff}$  は実効的伝搬距離、 $L_{NL}$  は非線形長を示し、各々式(6)、(7)で表される。

$$L_{eff} = \frac{1 - \exp[-\alpha L]}{\alpha} \quad (6)$$

$$L_{NL} = \frac{1}{\gamma P_0} \quad (7)$$

一方、非線形位相偏移  $\phi_{NL}$  の時間変化は光の周波数偏移（チャープ）として現れる。

$$f_{chirp} = -\frac{1}{2\pi} \frac{\partial \phi_{NL}(z, T)}{\partial T} = -\frac{1}{2\pi} \left( \frac{L_{eff}}{L_{NL}} \right) \frac{\partial}{\partial T} |U(0, T)|^2 \quad (8)$$

これにより送信パルス光の立ち上がり部分（ $|U(0, T)|^2$  の微係数が正の期間）では光の周波数は減少方向に偏移し、パルス立下り部分では増加方向に変移する。

波長  $1.5 \mu\text{m}$  で考えると、通常のシングルモード光ファイバの損失は  $-0.2\text{dB/km}$  程度であり、数  $10\text{m}$  程度のファイバ長に対しては無視でき、 $L_{eff}$  は光ファイバ長  $L$  に近似できる。このため周波数偏移はパルス光のピークパワー  $P_0$ 、ファイバ長  $L$ 、非線形屈折率  $n_2$ 、パルスの時間変化率  $d|U|^2/dt$  に比例し、光ファイバの実効的コア面積  $A_{eff}$  に反比例する特性をもつことが分かる。

### SPM の影響評価結果

Fig. 1 に全光ファイバ型 CDL システムを用いた SPM 評価系のブロック図を示す。基準光源（DFB-ファイバレーザ）から出力されたスペクトル幅  $24.8\text{kHz}$  の連続光を、AO パルス変調器（Acousto Optic Modulator: AOM）により  $1 \mu\text{s}$  のパルス光として切り出す。同時に、パルス光の周波数には  $100\text{MHz}$  の周波数シフトを与えている。このパルス光を光ファイバ増幅器（EDFA）でピーク出力  $14\text{W}$  に増幅して送信光とする。送信光は長さ  $12\text{m}$  のコア拡大ファイバ（ $A_{eff}=130 \mu\text{m}^2$ ）により光ファイバ型サーキュレータをへて送受信望遠鏡に伝送している。

送信光の周波数偏移は、送受信望遠鏡前のコア拡大ファイバの端で発生する内部反射光のヘテロダイン検出信号を解析することで評価した。ヘテロダイン検出信号は Digital Storage Oscilloscope; DSO を用いて次のように周波数解析を行った。まずサンプリングレート  $1\text{GS/s}$  で内部反射光とのビート付近の  $1280$  点のデータを取得し、次に  $256$  点ずつオフラインにて FFT 処理を行いスペクトルを算出する。最後に各スペクトルのピーク周囲で重心演算を行い各 FFT 期間ごとに中心周波数を算出する。

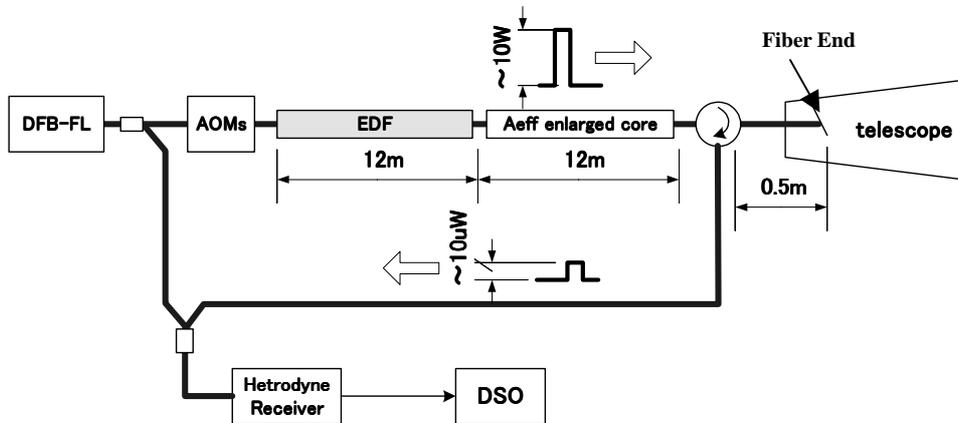
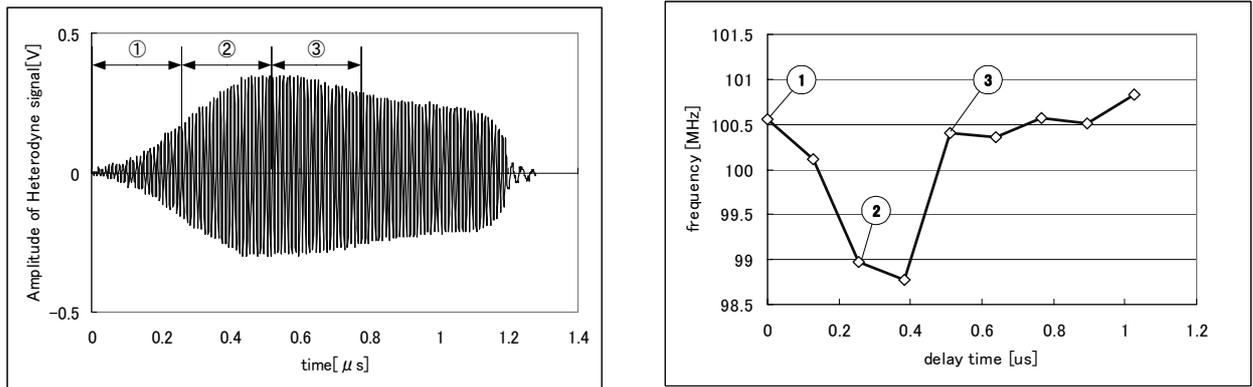


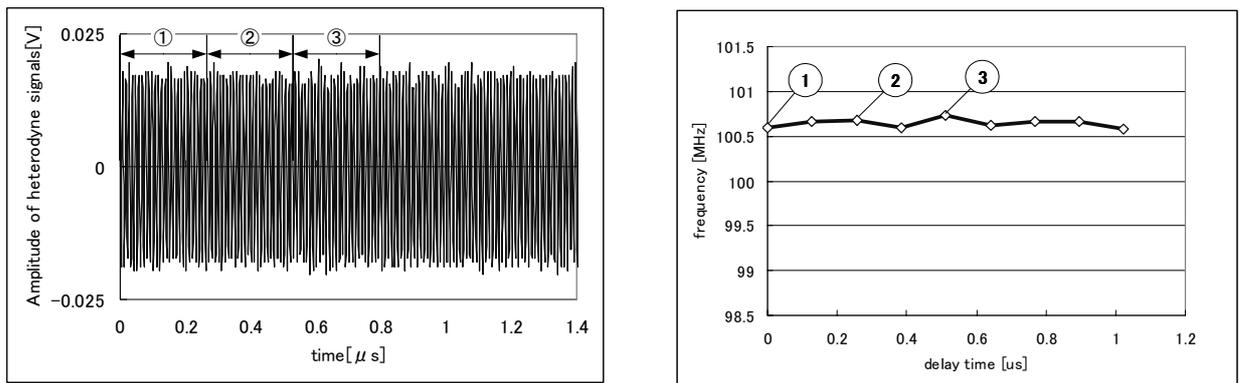
Fig.1 Schematic diagrams of experimental setup for estimating frequency variations of transmitted light in the present CDL system.

Fig. 2 に内部反射光のヘテロダイン検出信号の時系列データ（左）および周波数解析結果（右）を示す。(a)は送信光を pulse 出力させた場合の結果である。期間 ① に対応する中心周波数を見ると、期間 ② 付近の周波数が期間 ③ の周波数よりも 1.5MHz 程度低いことが分かる。これに対して、(b)は送信光を CW (Continuous Wavelength) 出力させた場合の結果で、評価期間内で有意な周波数偏移がないことが確認できる。さらに、(a)の周波数偏移の原因が EDFA 以降で発生しているかどうかを確認するため、AOM 出力パルス光(ピークパワー約 1mW)に適当な減衰をかけてヘテロダイン検出を行った(c)。その結果、(a)で周波数偏移が発生していた期間 ① においても有意な周波数偏移が見られないことが分かる。以上のことから、送信パルス光にはパルス立上り期間に系統的な周波数偏移が存在すること、周波数偏移は EDFA で増幅後のパルス光のみに発生していることが確認できる。

(a)pulse output with EDFA



(b) CW output



(c) pulse output without EDFA

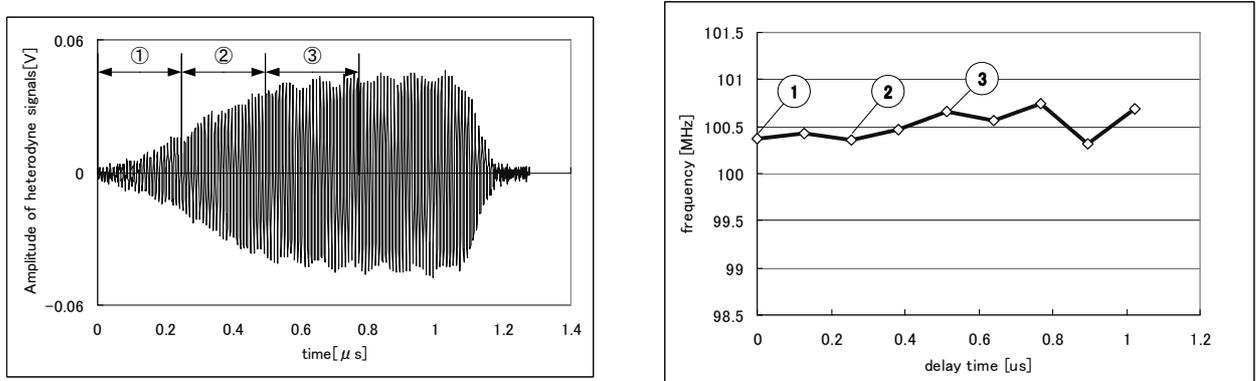


Fig.2 The heterodyne signals between local and back-reflected light (left: time domain data, right: frequency variation). (a) pulse output mode, (b) CW output mode and (c) pulse output mode without EDFA

周波数偏移の原因が送信パルスの SPM によるものかを確認するために、送信パルス光の時間波形から式(8)に基づき、周波数偏移量を計算した。計算には Fig.1 の機器構成に則して  $L=12\text{m}$ 、 $A_{\text{eff}}=65\ \mu\text{m}^2$  の EDF[5] と  $L=12\text{m}$ 、 $A_{\text{eff}}=130\ \mu\text{m}^2$  のコア拡大ファイバとが接続された光路を  $P_0=14\text{W}$  の送信光が伝送する場合を想定した。また非線形屈折率  $n_2$  として一般的なシングルモードファイバで用いられる値 ( $2.6 \times 10^{-20}\text{m}^2/\text{W}$ ) で代表させた。Fig.3 に(a)送信パルス波形を示す。この時の (b)送信光の周波数偏移の SPM に基づく計算値 (実線) とスペクトル解析による実測値 (破線) を Fig.3 (b)示す。図より、理論値と実測値は良く一致し、周波数偏移の原因が SPM であることが定量的に確認できる。

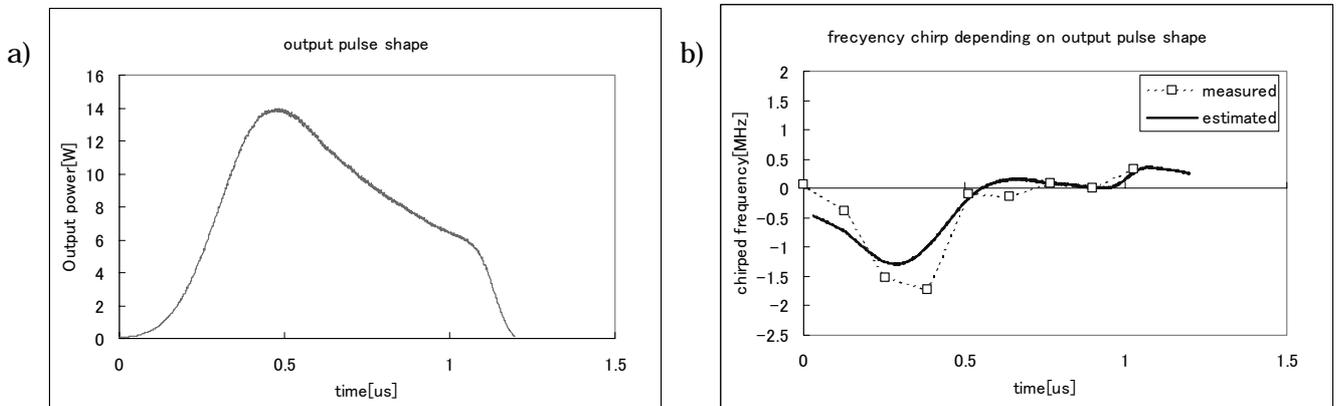


Fig.3 Evaluation of chirp frequency based on Self Phase Modulation for the actual output pulses  
(a) output optical pulse shape, (b) frequency chirp depending on output pulse shape

一方、風速測定においては波長  $\lambda$  の送信光の周波数偏移  $f$  により  $(2/\lambda) f$  の風速オフセットが生じる。通常、風速推定に用いるレンジゲートを送信パルス幅と同程度にとるため、送信パルス内での送信周波数の偏移  $f_{\text{chirp}}$  は平均化される。平均化後に残存する周波数偏移量は送信パルス形状に依存する。例えば立上りの変化率が等しくパルス幅のみ異なる送信光パルスに対しては、短パルスほど周波数偏移量が大きく現れる。本 CDL 装置において、異なるパルス幅の送信光に対して算出した残存周波数偏移量はパルス幅  $1.0\ \mu\text{s}$  に対して  $0.2\text{MHz}$ 、パルス幅  $0.25\ \mu\text{s}$  に対して  $1\text{MHz}$  であった ( $\lambda=1.5\ \mu\text{m}$  に対して各々、 $0.15\text{m/s}$ 、 $0.77\text{m/s}$  に対応する)。この残存周波数偏移を風速スペクトルピーク周波数から減算することで風速オフセットが補償できる。文献[7]における風杯式風速計と本 CDL 装置との風速比較測定において、上記の風速オフセット補償を行った場合に両測器の風速残差が小さくなった。このことから風速オフセット補正が正しく行えることが分かる。

## まとめ

全光ファイバ型 CDL における送信光のファイバコア内で発生する SPM とその測定値に対する影響を評価した。その結果、送信光のパルス期間内で負  $0$  正の系統的な周波数偏移が発生すること、周波数偏移量が送信パルス波形、光ファイバ実効のコア面積、ファイバ長から見積られる  $-1.5 \sim 0.5\text{MHz}$  に良く一致することが分かった。また風速測定の際にはこれらレンジゲート内での周波数偏移は平均化されて実効的に小さくなるが、残存偏移量はパルス波形に依存して  $0.15 \sim 0.77\text{m/s}$  程度に異なることが分かった。さらに上記の方法により見積もられた周波数偏移を測定ドップラー速度から減算することで、オフセット風速が補正できることが分かった。以上の結果から全光ファイバ型 CDL において測定風速精度を確保するためには SPM 補償を行う必要があることが示唆される。

## 参考文献

- [1] C.J.Karlsson et al., Applied Optics, **39**(2000), pp3716-3726
- [2] 安藤 他: 第 22 回レーザーセンシングシンポジウム予稿集(June5-6,2003)p57-60
- [3] 亀山 他: 第 22 回レーザーセンシングシンポジウム予稿集(June5-6,2003)p23-26
- [4] 酒巻 他, 第 25 回風力利用技術シンポジウム 2003/11/19, p137-140
- [5] G.Kulscsar et al., IEEE Photon., Tech. Let., **15**(2003), pp801-803
- [6] G.P. Agrawal: 3<sup>rd</sup> edition Nonlinear Fiber Optics, academic press(2001)p97-134
- [7] 若山 他 本学会予稿集