

風計測コヒーレントドップラライダの小型化を実現するパルスセロダイン光送受信技術

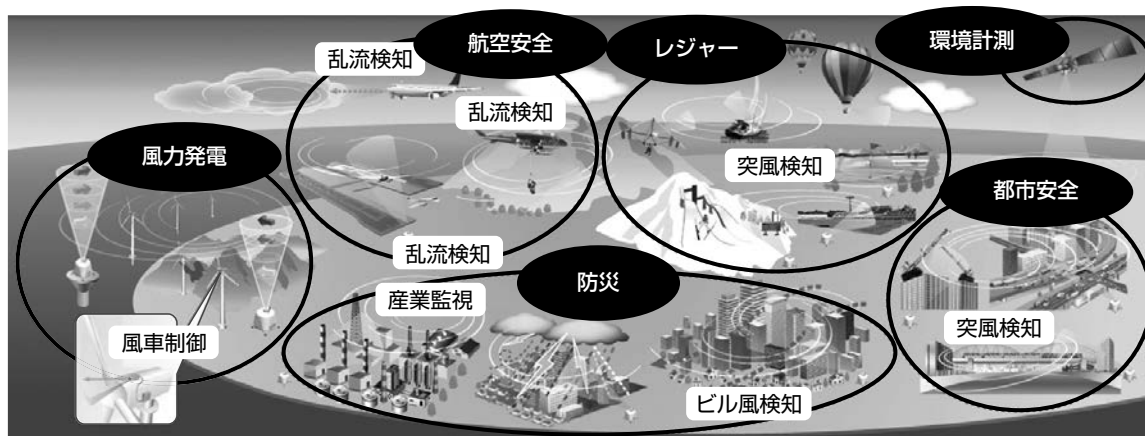
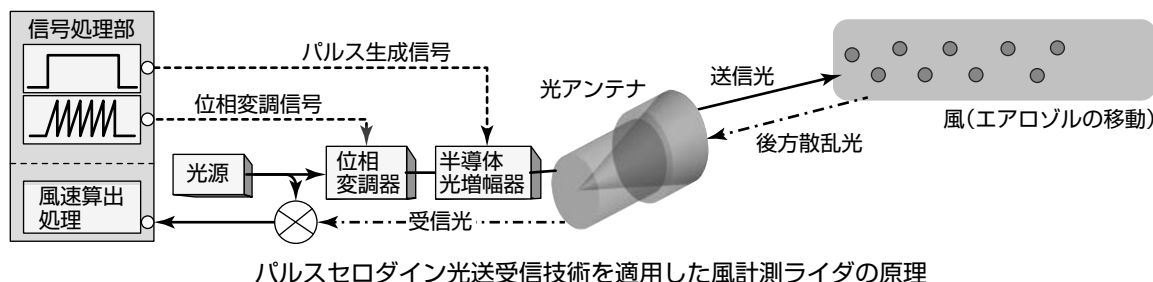
原口英介*
安藤俊行**

Optical Transceiver Using Pulse Serrodyne Technique to Realize Downsized Coherent Doppler LIDAR for Wind Sensing
Eisuke Haraguchi, Toshiyuki Ando

要旨

風計測コヒーレントドップラライダ(Light Detection And Ranging : LIDAR) (以下“風計測ライダ”という。)は単一周波数のパルスレーザー光を大気中に送出し、風と同速度で移動するエアロゾルからの後方散乱光をヘテロダイン受信して、そのドップラー周波数シフトから風速を遠隔計測する装置である。この装置は空港監視、飛行中の安全確保のための航空機前方の乱流検知、風力発電での風況計測に用いられている。適用対象の更なる拡大に向け、風計測ライダの小型・低消費電力化が望まれている。一方、最近の光通信分野でのデジタルコヒーレント技術の普及によって、風計測ライダに適用できる可能性を持ち、かつ小型で高信頼の光・電子コンポーネントが増えつつあるが、機能や性能の違いによってそのままの適用は困難であった。今

回の開発ではデジタルコヒーレント光通信コンポーネントを風計測ライダに用いるため、パルスセロダイン変調方式を新たに考案した。この方式では、通信用の半導体光増幅器で生成したパルスレーザー光に鋸波状の位相変調を付加することで、風計測ライダに必要な送信光周波数シフトを実現するとともに、半導体光増幅器で発生する不要な周波数偏移の補償が可能になる。今回の開発で実現した光通信技術と風計測ライダ技術との相乗効果によって、従来の風計測ライダを大幅に小型・低消費電力化し、バッテリー駆動可能な可搬型風計測ライダ(質量4.9kg, サイズ166×341×292(mm), 計測距離1 km, 稼働時間5.5時間以上)を試作し、これら技術の有用性を実証した。



パルスセロダイン光送受信技術を適用した風計測ライダの原理と適用アプリケーション

現在、風計測ライダが適用されているのは空港監視や風力発電での風況計測などである。今回、風計測ライダの風車搭載、災害対策やレジャー(ゴルフ、ヨットなど)等の適用先拡大に向け、小型・軽量、可搬性を持つ風計測ライダを実現するパルスセロダイン光送受信技術を開発した。

1. ま え が き

風計測ライダは単一周波数のパルスレーザ光を空間照射し、風と同速度で移動するエアロゾルからの後方散乱光を受信して、そのドップラー周波数シフトから風速を計測する装置である⁽¹⁾⁽²⁾。特に波長1.5 μm の光源と光ファイバ部品によって構成した全光ファイバ型風計測ライダはアイセーフ、小型、高信頼のシステムを実現できる利点がある⁽²⁾。近年では山岳地域や洋上のような運搬車両がアクセスできない場所、災害地域など電源確保が困難な場所での観測へと多様化しており、更なる小型化・可搬可能な構成が望まれている。一方、最近のデジタルコヒーレント光通信技術の普及によって風計測ライダに適用できる可能性を持つ小型高信頼の光・電子コンポーネントが増えつつある。例えば光通信用の半導体光増幅器は小型・集積化が可能なことに加えて利得補填(ほてん)や強度変調が可能といった利点がある⁽³⁾。しかし半導体光増幅器で注入電流を変化させてパルス変調を行う場合、内部の屈折率変動に伴いパルスON期間に瞬時的な周波数偏移が生じる⁽³⁾。この瞬時周波数偏移量は風計測ライダに使用するパルス幅100~1,000nsの範囲では15~150MHz程度(風速誤差10~100m/s相当)と見込まれ、無視することができない。

三菱電機はこの課題解決のため、パルスゼロダイン変調技術を新たに考案した。この変調技術を光通信用半導体光増幅器と光位相変調器に適用することによって、風計測ライダで要求される周波数シフトを付加したコヒーレントパルス光の発生と、パルス内の瞬時周波数の補償とが可能となる。

2. パルスゼロダイン変調を用いた光送受信部

図1にパルスゼロダイン変調を用いた光送受信・信号処理部の構成を、図2に試作した光送受信部と信号処理部を一体化したインテグレートド光送受信ボードの外観を示す。光送受信ボードでは、はじめに基準光源出力光を送信光路と局発光路に2分岐する。次に送信光路では、送信光は光周波数シフトを実現する光位相変調器、パルス化する半導体光増幅器を介して周波数シフトを付加したパルスレーザ光として出力される。出力された送信光は高出力光増幅器で増幅後、送受光路分離用の偏波保持光サーキュレータを介して、光アンテナで空間出力される(送信)。空間出力された送信光がエアロゾルで散乱し、後方散乱光を光アンテナで受信する(受信)。受信した散乱光は偏波保持光サーキュレータで送受分離後、光送受信部の受信ポートに入力する。受信光と局発光とを合波後、光受信器で光ヘテロダイン受信し、信号処理部で時間・周波数解析を行う。信号処理部には、プロセッサ内蔵のSoC(System on a Chip) FPGA(Field-Programmable Gate Array)を用

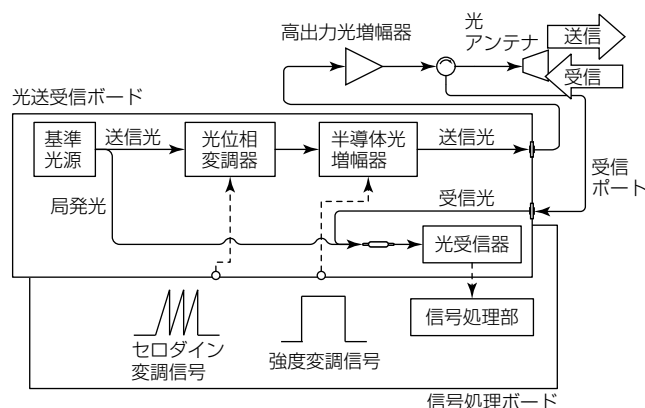


図1. 光送受信・信号処理部の構成

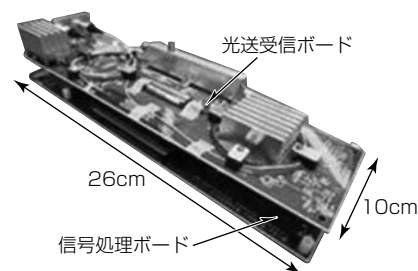


図2. インテグレートド光送受信ボード

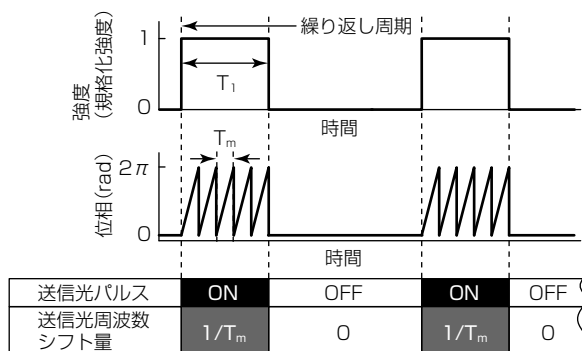


図3. パルスゼロダイン変調信号のイメージ

いることで、信号処理用の外部計算機を不要として小型化を実現している。

図3にパルスゼロダイン変調信号のイメージを示す。パルスゼロダイン変調では繰り返し周期のパルスON期間(T1)にだけ鋸波状の変調信号を光位相変調器に印加し、パルスOFF期間には変調信号をOFFとする。位相の変化量(dφ)と周波数(Δf)にはΔf=dφ/dtの関係が成り立つため、一定周期(Tm)、変調幅2πの位相変調を印加した際、1/Tmの周波数がシフトされる。これらを踏まえるとパルスON期間とOFF期間の送信光電場(E_{SON}, E_{SOFF})、及び局発光電場(E_L)はそれぞれ式(1)で表される。ここでA_{SON}, A_{SOFF}はパルスON期間とOFF期間の送信光振幅、A_Lは局発光の振幅、f₀は基準光源の光周波数、T_mは鋸波の周期、φ_s, φ_Lは信号光と局発光の光位相を表す。

$$\begin{aligned}
 E_{SON} &= A_{SON} \exp\left\{i\left\{2\pi\left(f_0 + \frac{1}{T_m}\right)t + \phi_s\right\}\right\} \\
 E_{SOFF} &= A_{SOFF} \exp[i\{2\pi f_0 t + \phi_s\}] \dots\dots\dots (1) \\
 E_L &= A_L \exp[i\{2\pi f_0 t + \phi_L\}]
 \end{aligned}$$

式(1)を用いて、光受信器の光電変換効率を η 、信号光と局発光の光位相差を $\Delta\phi$ とすると、パルスON、OFF期間に出力した送信光の受信信号 (I_{SON} , I_{SOFF}) はそれぞれ式(2)、(3)で表される。ここで風計測に用いる後方散乱光は観測空間までの送信光の往復時間によって遅延が生じ、パルスOFF期間に受信される。式(2)から、パルスOFF期間に受信した風計測信号成分は周波数 $1/T_m$ のビート信号として検出される。一方、パルスOFF期間でも、パルスON/OFF消光比で決まる漏洩(ろうえい)光が光サーキュレータ等の漏れ(クロストーク)によって受信ポートに不要波として回り込む。ここで漏洩光は周波数シフトされていないため、光ヘテロダイン受信信号は直流成分だけであり(式(3))、風計測信号と周波数領域で分離が可能である。

$$\begin{aligned}
 I_{SON} &= \eta |E_{SON} - E_L|^2 \\
 &= \eta |A_{SON}|^2 + \eta |A_L|^2 \dots\dots\dots (2) \\
 &\quad + 2\eta A_{SON} A_L \sin\left(\frac{2\pi t}{T_m} + \Delta\phi\right)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 I_{SOFF} &= \eta |E_{SOFF} - E_L|^2 \\
 &= \eta |A_{SOFF}|^2 + \eta |A_L|^2 \dots\dots\dots (3) \\
 &\quad + 2\eta A_{SOFF} A_L \sin(\Delta\phi)
 \end{aligned}$$

3. パルスゼロダイン変調を用いた周波数偏移補償

3.1 周波数偏移の補償原理

ここでは半導体光増幅器で生じる瞬時周波数偏移のパルスゼロダイン変調を用いた補償原理について述べる。図4に原理を示す。2章で述べたようにパルスゼロダイン変調

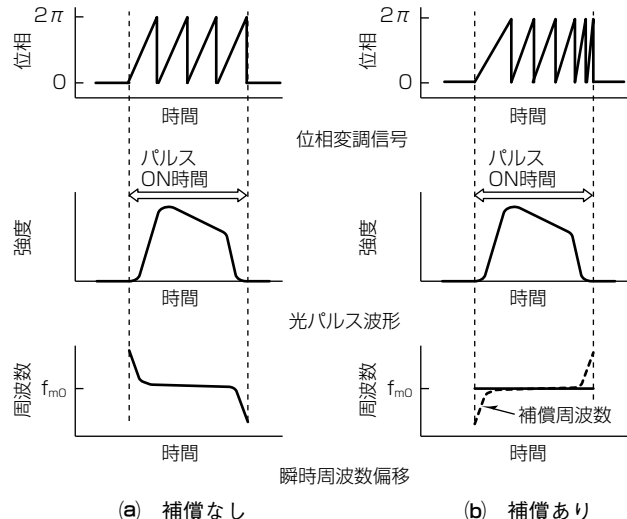


図4. パルスゼロダイン変調による瞬時周波数偏移補償原理

による周波数シフト量は鋸波周期によって決まる。この鋸波周期を時間的に変化させることで、パルスON期間内の瞬時周波数制御を行う。半導体光増幅器で生じる瞬時周波数偏移を $f_{chirp}(t)$ 、風計測ライダで必要とされる周波数シフト量を f_{m0} (2章で述べた $1/T_m$ に相当) とする。光位相変調器に印加する鋸波の周期 $f_m(t)$ を $f_m(t) = f_{m0} - f_{chirp}(t)$ とすることでパルスON期間に生じる瞬時周波数偏移を補償し、かつ風計測ライダで必要とされる周波数シフトを付加したパルス光を生成する。ここで、従来の風計測ライダ光送信部に用いられてきた音響光学素子は変調可能な周波数幅が数MHz、応答帯域が10MHzほどであり、パルスON期間に生じる瞬時周波数偏移を補償するには帯域、変調幅ともに不足している。一方、パルスゼロダイン変調方式によって風計測ライダの送信部として使用可能になった光通信用の光位相変調器は変調帯域、変調幅ともに数GHz以上と広帯域であるため、数nsのパルス幅であっても適用可能である。

3.2 周波数偏移の補償実験

3.1節で述べた周波数偏移の補償原理を用いて、補償前後の周波数偏移評価実験を行った。測定結果を図5に示す。図5(a)から補償前ではパルス立ち上がり、立ち下がり領域で $-20 \sim +15$ MHzの瞬時周波数偏移が生じていることが分かる。一方、補償信号を印加した際には(図5(b))、フリーラン時最大35MHzの瞬時周波数偏移がパルス内全領域で一定となっていることが分かる。このとき残存周波数偏移量は最大 ± 0.4 MHz、平均0.03MHz(風速換算0.02m/s)と風計測ライダの受信帯域と比べ十分小さい値であった。これは国際標準化機構で規定されている風速測定精度0.5m/sを満たしている⁽²⁾。

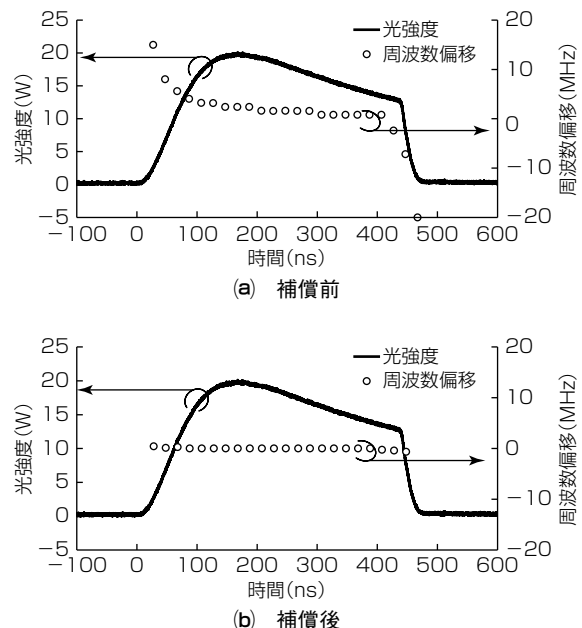
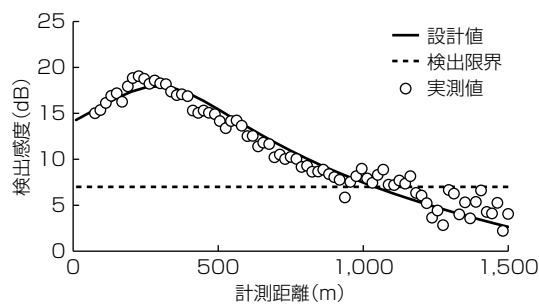


図5. 瞬時周波数偏移の測定結果

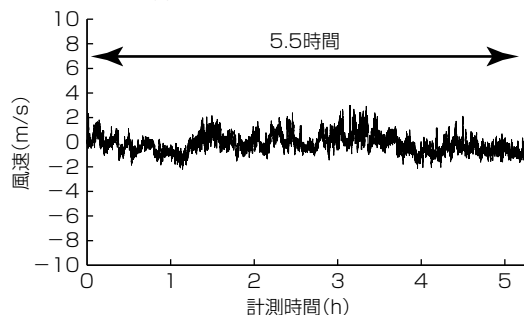
4. パルスゼロダイン変調を用いた風計測実証

パルスゼロダイン変調に基づくインテグレートド光送受信ボードを用い、バッテリー駆動可能な可搬型の風計測ライダを試作した。試作器の外観を図6に、仕様を表1に示す。この風計測ライダはリチウムポリマバッテリー(12V, 220Wh)によって駆動する。また軽量化のため、筐体(きょうたい)にはCFRP(Carbon Fiber Reinforced Plastics)を用いた。これによって質量4.9kg(従来比25%⁽⁴⁾)と消費電力31.4W(従来比67%⁽⁴⁾)とを実現した。

図7に試作器を用いた風計測結果を示す。図7(a)に示す検出感度の計測距離依存性で、距離1kmまでの視線方向風速が得られ、設計値と実測値とが良好に一致していることを確認した。また、図7(b)の風速の連続計測結果に示す様に、バッテリーによる連続稼働時間が少なくとも5.5時間以上であることを確認した。



(a) 検出感度の計測距離依存



(b) 風速の連続計測結果

図7. 試作器を用いた風計測結果

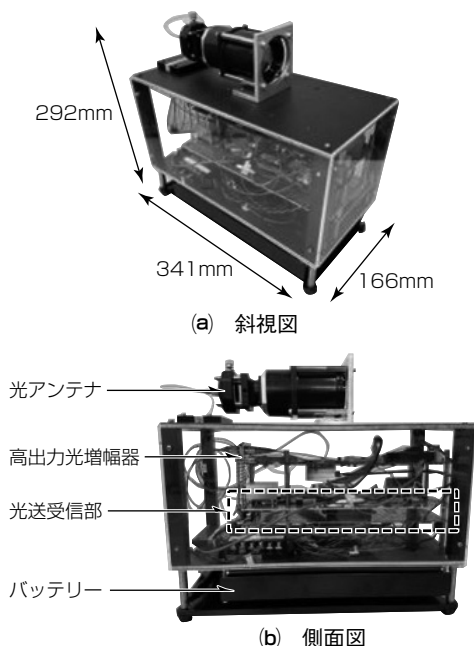


図6. バッテリー駆動型風計測ライダの試作器

表1. 試作器の仕様

項目	仕様
質量, サイズ	4.9kg, 166×341×292(mm)
消費電力	31.4W
バッテリー容量, 稼働時間	220Wh, >5.5hrs
光アンテナ開口径	φ50mm
光出力パワー	ピーク: +44dBm 平均: +17dBm
パルス幅, 繰り返し周波数	200ns, 4kHz
計測距離分割数	80

5. むすび

風計測ライダの適用分野拡大に向け、光通信技術と風計測ライダ技術との相乗効果を可能にするパルスゼロダイン変調方式と、これを用いた光送受信・信号処理部の開発結果について述べた。提案手法によって、国際標準化機構で規定されている風速精度(0.5m/s)を満足し⁽²⁾、かつ連続5.5時間以上のバッテリー駆動が可能な可搬型の風計測ライダの試作評価結果について述べた。

参考文献

- (1) Kameyama, S., et al.: Compact all-fiber pulsed coherent Doppler lidar system for wind sensing, *Appl. Opt.*, **46**, 1953~1962 (2007)
- (2) Air quality - Environmental meteorology - Part2: Ground-based remote sensing of wind by heterodyne pulsed Doppler lidar, ISO/PRF 28902-2 (2017)
- (3) Gillner, L.: Modulation properties of a near travelling-wave semiconductor laser amplifier, *IEE Proc.-J*, **139**, No.5, 331~338 (1992)
- (4) Ando, T., et al.: Mobile coherent Doppler LIDAR system for wind sensing, *Proc. of 17th Coherent Laser Radar Conference* (2013)