

マイクロ波変調ドップラーライダの開発

Development of Doppler Lidar Using Microwave Modulated Optical Signal

亀山 俊平、水間 将支、平野 嘉仁

Shumpei Kameyama, Masashi Mizuma, 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

A new concept of Doppler lidar system using microwave modulated optical signal is proposed. This system utilizes merits of both optical and microwave signal. Features of this system including long time coherent integration are explained and the results of preliminary experiment are introduced.

1. まえがき

風計測コヒーレントドップラーライダ^{1),2)}は、光受信においてショット雑音限界を実現しやすいというメリットを有している。しかし、ドップラー信号のコヒーレント時間が μs オーダーと短く、コヒーレント積算による S/N 比改善において大きな制限が存在する。また、光受信において検出できるのがミー散乱成分だけであるため、エアロゾルの極端に少ない高層での風計測が困難であるという課題もある。ここでは、光およびマイクロの特長を生かしたドップラーライダの新方式を提案し、その特長について述べる。本方式は特に、航空機巡航高度にて晴天乱気流の検出を行う、航空機搭載乱気流検出装置に適しているものと考えられる。本方式の特長に関する原理確認実験を行ったので合わせて報告する。

2. マイクロ波変調ドップラーライダの原理

マイクロ波で強度変調した光は、マイクロ波変調周波数成分だけ離れた、キャリア周波数成分、および、位相雑音を含めて同相の変調周波数成分(側帯波)の2波で表される。この光が、動いている目標で散乱される場合、2波は、それぞれ、その周波数に応じたドップラーシフトを受ける。このため、通常の2乗検波により検出される、2波の間隔、すなわちマイクロ波変調周波数成分もドップラーシフトを受けるため、このマイクロ波変調周波数成分のドップラーシフトから動いている目標の速度を推定可能となる。この方式では、電磁波として光を用いているものの、信号処理としてはマイクロ波領域のレーダのものをそのまま用いることが可能となる。

この原理を用いた風検出用マイクロ波変調ドップラーライダの構成例を図1に示す。CW レーザ光源の出力を光変調器により周波数MHz~GHzオーダーのマイクロ波で強度変調し、光増幅器で増幅して送信光学系から送信し、大気からの散乱光を受信光学系により受信する。

この時、送信マイクロ波に対しては、距離分解能に対応した周期の擬似ランダム位相変調を施してある。一方、受信光は、光復調器により、光信号のターゲットレンジまでの往復時間だけ遅延を与えた送信マイクロ波信号で、再度強度変調される。これにより、ターゲットレンジからの散乱光成分のみが、DC近傍の変調成分(ドップラー変調成分)として復調される。この復調された光信号を光受信機により2乗検波することでドップラー信号を得、FFTによるコヒーレント積算によりドップラースペクトルを求め、ドップラー周波数から風速を推定する。

本方式は従来のドップラーライダと比較して次に示す特長を有している。

(1)長時間コヒーレント積算による S/N 比改善

コヒーレントドップラーライダでは、ドップラー信号のコヒーレント時間が光キャリアの揺らぎにより決まり、風速分布を持つ大気での散乱では $0.1 \sim 1 \mu s$ 程度に制限される。これに対し本方式では、光キャリアの揺らぎは、マイクロ波を復調する光受信器で同相でキャンセルされるため、ドップラー信号のコヒーレント時間はマイクロ波信号がの位相揺らぎできまり、波長比率程度となるため、

0.1~1 秒程度となる。これにより、コヒーレントドップラーライダーに比べ長時間コヒーレント積算が可能になり大幅に S / N 比が改善ができる。

(2)レイリー散乱成分の利用による高層での風計測性能の向上

本方式では光受信方式が直接検波であるため、インコヒーレントドップラーライダーと同様に、風計測におけるトレーサーとしてエアロゾルによるミー散乱とともに大気分子のレイリー散乱が利用できる。したがって、特に高層における風計測においてコヒーレントドップラーライダーに比べ、受信信号量が非常に大きくなり大幅に S / N 比が改善ができる。

(3)直接検波における狭帯域・高感度光受信

本方式では、直接検波を用いるため、受信感度がコヒーレントドップラーライダーで用いるヘテロダイン検波により得られるショットノイズ限界に比べ劣化する。これを改善するため、光復調器で変調周波数をマイクロ波帯からベースバンド帯にダウンコンバートしており、光受信機の帯域をベースバンド帯で限定している。これにより光受信機のトランスインピーダンスゲインを高くしての高感度受信を実現し、ショットノイズ限界に近い受信感度を実現する。

(4)擬似ランダムデジタル位相変復調によるレンジング

本方式では、ドップラー信号のコヒーレント時間が高いため、パルス方式ではなく、デジタル位相変復調方式によるレンジングが可能となる。また、パルス方式では(3)で述べた光受信機の帯域幅を距離分解能に対応する幅まで広くする必要があるので、このレンジング方式を用いることで、光受信機の帯域幅はドップラー周波数シフトの計測幅程度とできるので、トランスインピーダンスゲインを高くできるという特長を生かすことができる。

(5)ドップラー周波数の低周波化によるリアルタイム性の向上

ドップラー周波数はキャリア周波数に比例するため、本方式におけるドップラー周波数は、コヒーレントドップラーライダーと比較して 5 ~ 6 桁低い Hz オーダーである。このため、信号のデジタル化に必要な AD 変換レートは低く、また、コヒーレント積算が可能のため FFT 演算の回数は 1 回だけとなり、パソコンレベルでのリアルタイム信号処理が容易に実現できる。

(6)全光ファイバ型構成

コヒーレント時間が長く、また、デジタル位相変復調方式によるレンジングを用いるため、ピークパワーが低く平均パワーの高い光源の利用が可能となる。このような光源として、近年、高平均出力化が目覚ましい、光ファイバ増幅器が利用可能であり、また、ライダー構成として、小型・高信頼化を実現できる全光ファイバ構成を適用できる。一方、コヒーレントドップラーライダーに全光ファイバ構成を適用した場合の問題点である高出力時のファイバ内での非線形効果（ブリルアン散乱や自己位相変調）⁵⁾ については、マイクロ波変調ドップラーライダーでは光源に要求されるスペクトル純度が圧倒的に緩和されるため問題とならない。

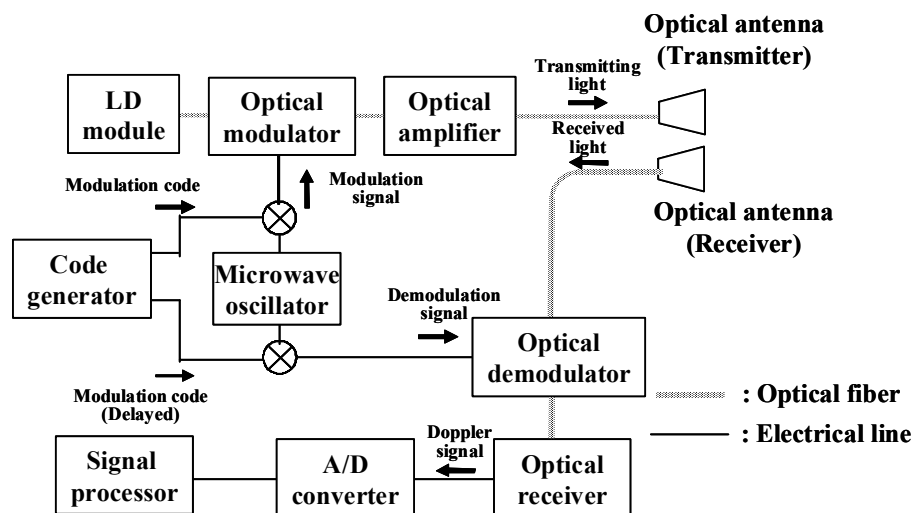
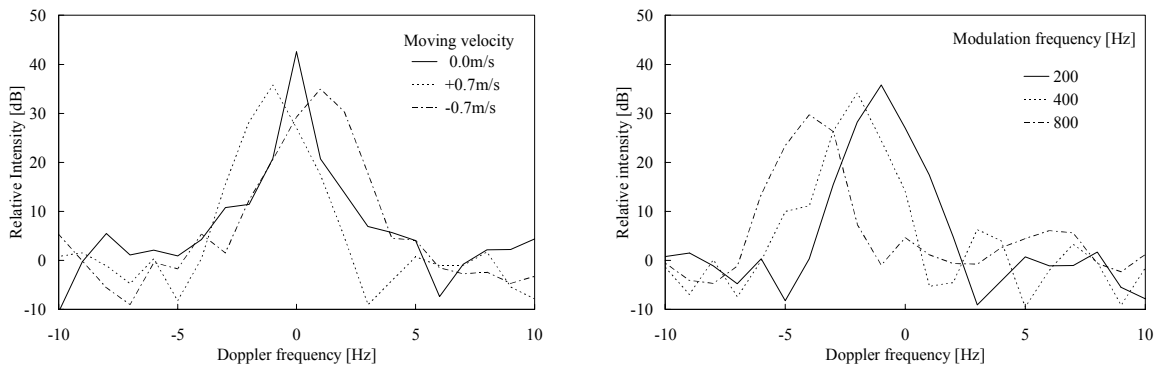


Fig. 1. Configuration of Microwave-modulating Doppler LIDAR.

3. 原理確認実験結果

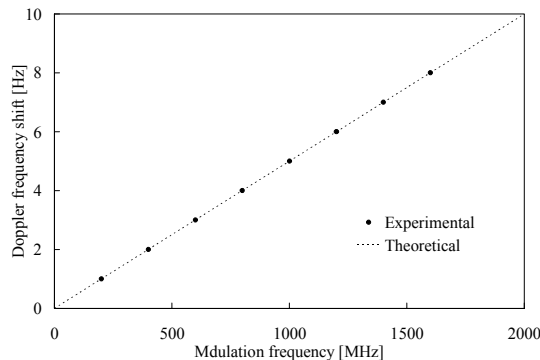
次にベンチトップ実験により本方式の原理確認を行った結果について述べる。前章で述べたように、本方式におけるドップラーシフトの周波数は、Hz オーダーとなる。このため実験では低周波のドップラー周波数シフトが本当に検出できるかを含め確認を行った。実験系は図1と同じ構成で、光源には波長 $1.5\ \mu\text{m}$ のLDモジュール、光変復調器にはマツツェンダ干渉型LN変調器、光増幅器にはEDFA(Erbium-Doped Fiber Amplifier)を用いた。光増幅器からの送信パワーは27mWである。マイクロ波変調周波数を200MHzとし、ドップラー周波数の \pm を識別するため、変復調周波数間に500Hzの差を与えた。変調コード長を2047、変調周期を1 μs とした。光受信機のトランスインピーダンスゲインを200M、受信時間を1sとした。ターゲットとして完全拡散板を距離4mの位置に配置してこの付近に送受信ビームをオーバーラップさせ、この完全拡散板をオーバーラップ領域内においてビーム方向に沿って移動させた。

ターゲットを $\pm 0.7\text{m/s}$ で移動させた場合およびターゲットを移動させない場合のドップラースペクトルを図2(a)に示す。図において、スペクトルの線幅はHzオーダーであり、信号が秒オーダーのコヒーレント時間を有していること(FFTにより長時間コヒーレント積算できていること)を確認できる。また、移動速度のドップラー周波数に対応したベースバンド(1Hz)の周波数シフトが検出できている。次に、変調周波数を200MHzから変化させたときのドップラースペクトルを図2(b)に、変調周波数とドップラースペクトルのピーク周波数との関係を図2(c)にそれぞれ示す。図において変調周波数と周波数シフト量とは比例関係にあり、本実験で検出されている周波数シフトが、ドップラー効果によるものであることが確認できる。



(a) Frequency shift caused by target moving.

(b) Spectra for each modulation frequency.



(c) Modulation frequency versus frequency shift.

Fig. 2. Doppler frequency shift caused by target moving.

次に、変復調信号間の遅延時間(遅延ビット)を、光信号のターゲットまでの往復時間を0ビットとして与えた場合のスペクトルの変化を図3に示す。遅延ビットを ± 1 ビット与えることで信

号強度が大きく低減されていることが分かる。次に、遅延ビット数を変えた場合ドップラー信号強度（スペクトルにおけるピーク強度）を図4に示す。遅延ビット0の場合だけ信号が復調され、それ以外では変調コード数に比例して信号強度が抑圧されている。これにより、擬似ランダム位相変調によるレンジングが実現できることを確認できる。

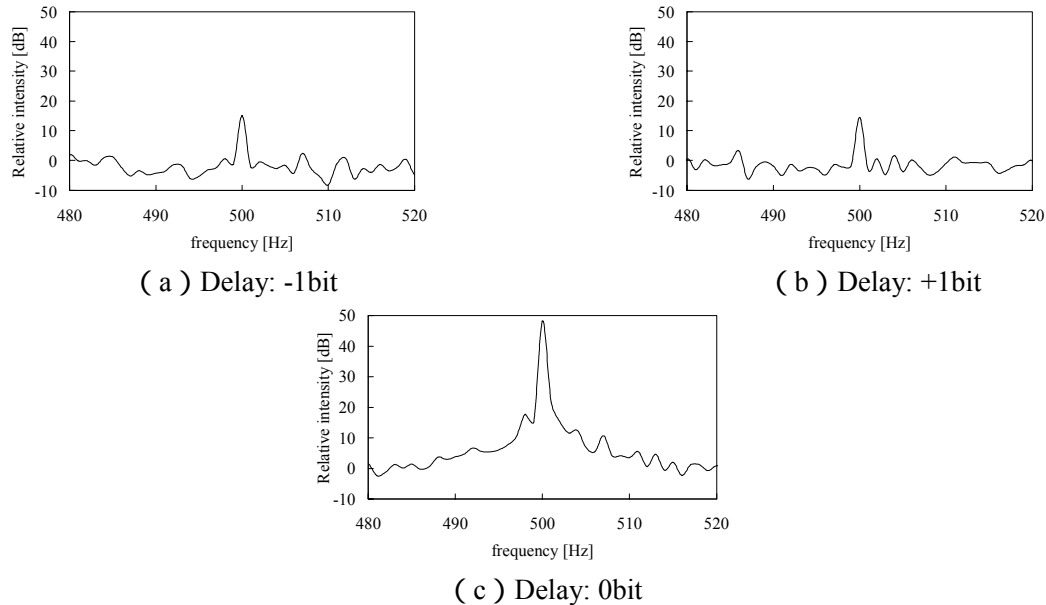


Fig. 3. Spectra for each delay bit.

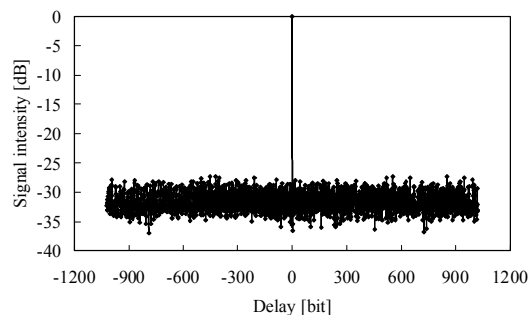


Fig. 4. Delay bit versus signal intensity.

4. まとめ

光およびマイクロ波の特長を生かした、ドップラーライダーの新方式であるマイクロ波変調ドップラーライダーを提案し、その特長について述べるとともに原理確認を行った。本方式は特に、高層におけるリアルタイム風計測において他方式に対して優位であり、かつ小型・高信頼な全光ファイバ型回路構成の適用に向いている。したがって、従来、困難であった、航空機巡航高度における晴天乱気流の検出を行う、航空機搭載乱気流検出装置に適しているものと考えられる。ここで紹介した原理確認実験は実験室内においてハードターゲットを用いたものであったが、今後、レーザ出力の向上を含め、装置試作を行い、風計測における実証を行う予定である。

参考文献

- [1] R. M. Huffaker and R. M. Hardesty, Proc. of IEEE, 34, pp. 181-204, 1996.
- [2] J. M. Vaughan, Proc. of IEEE, 34, pp. 205-226, 1996.
- [3] C. J. Korb et al., Applied Optics, 31, pp. 4202-4213, 1992.
- [4] R. J. Doviak and D. S. Zrnic, *Doppler Radar and Weather Observations*, Academic Press, Inc.
- [5] 安藤他, 第22回レーザセンシングシンポジウム予稿集, pp. 57-60, 2003.