

1.5 μm インコヒーレントドップラーライダー受光用 FBG フィルタの最適化 FBG filter optimization for a 1.5 μm incoherent Doppler lidar

柴田泰邦、長澤親生、阿保 真

Yasukuni Shibata, Chikao Nagasawa and Makoto Abo

首都大学東京 システムデザイン学部

Faculty of System Design, Tokyo Metropolitan University

Abstract : The fiber Bragg grating filter is used for the filter of the Doppler shift detection. The measurement sensitivity of the Doppler shift depends on the filter gradient and the bandwidth of the filter slope. In this paper, optimization of the FBG filter used for the 1.5 μm eye-safe incoherent Doppler lidar is discussed. Without the influence of Mie scattering, it is shown that wind measurement is possible from the ground to the stratosphere with 0.0005[MHz] filter gradient. The simulation results of the wind error on the optimal condition of the FBG filter are 1.0 m/s up to 5km altitude and 10m/s up to 20km altitude.

1. はじめに

ライダーによる風観測手法にはコヒーレント方式とインコヒーレント方式に大別される。コヒーレント方式は送信光と散乱光をヘテロダイン検波することによって風速を求めるが、レイリー散乱が卓越する領域では、ヘテロダイン検波によって検出される信号のスペクトル幅が広く、ドップラーシフト検出に不向きであるため、ミー散乱が卓越する領域において有効な手法である。インコヒーレント方式はヨウ素フィルターやエタロンフィルターを用い、散乱光のフィルター透過信号強度の変動分からドップラーシフト成分を求め、広いレイリー散乱領域においても測定可能である。

ライダーによる 3 次元風分布観測を行う場合、紫外や 1.3 μm 以上のアイセーフ光源が必須条件となる。そこで我々は、地上から対流圏上部にわたる 3 次元風分布を目的とする、1.5 μm アイセーフ・インコヒーレントドップラーライダーを提案した。ドップラーシフト検出フィルターには光通信分野で波長分別フィルターやファイバーセンサーとして利用されている Fiber Bragg Grating (FBG) フィルターを用いる。FBG フィルターはファイバーコア内にグレーティングを持つ構造で、Bragg 条件を満たす波長のみ反射されるデバイスである。FBG フィルターを用いるドップラーライダーは、レーザ波長を FBG フィルター特性の傾き部分に同調し、FBG フィルターを透過する受信光(散乱光)の透過光と反射光の比の変化からドップラーシフト成分を求める。我々は、FBG フィルターを用いたドップラーシフト検出装置により回転体の回転速度を測定することに成功した。

ドップラーシフトの検出感度はフィルターの特性(傾き、傾き部分の帯域幅およびサイドローブの有無)に依存する。これらのパラメータは FBG のグレーティング長、屈折率分布の変化量とその分布パターンによって決定される。今回は、1.5 μm インコヒーレントドップラーライダーに用いる FBG フィルターの最適化について検討を行った。

2. FBG フィルター

FBG フィルターは光波長分割多重通信(WDM: Wavelength division Multiplexing)システムの波長分別用フィルターや、温度センサーや歪センサーとして用いられている。ファイバーコア内にグレーティング構造を持ち、Bragg 条件を満たす波長 λ_0 のみ反射される。反射特性は以下の式で与えられる。

$$R = \frac{\kappa^2 \sinh^2(\gamma L)}{\gamma^2 + \kappa^2 \sinh^2(\gamma L)} \quad (1)$$

$$\gamma = \sqrt{\kappa^2 - \delta^2}, \quad \delta = \frac{2\pi n_{\text{eff}}}{\lambda} - \frac{\pi}{\Lambda}$$

ここで、 $\lambda_0 = 2n_{\text{eff}}\Lambda$ 、 n_{eff} : コアの実効屈折率、 L : グレーティング長、 Λ : グレーティング周期である。

グレーティングの屈折率変化が長手方向に一樣な場合、反射スペクトルの両側に複数のサイドローブが発生するが、アポダイズ(apodized)と呼ばれるグレーティングの両サイドの屈折率変化を抑える構造を用いると、サイドローブが抑制される。フィルターのスローブ部分の傾きは L に、半値全幅は屈折率変化量 Δn に依存する。

3. FBG フィルターの最適化

FBG フィルターを用いたドップラーライダーは、一方のフィルター傾き中心部にレーザ周波数を同調し、フィルター透過光 I_T と反射光 I_R の比 $r (=I_T/I_R)$ からドップラーシフト周波数 ν_d を求める。フィルターにサイドローブがあると、ドップラーシフト周波数に対する比 r が一意に決まらないため、サイドローブの抑制は重要である。

ドップラーシフト周波数の測定感度は、単位ドップラーシフト周波数あたりの r の変化量 $(dr/d\nu_d)$ として与えられ、この測定感度が大きいほど高分解能測定が可能となる。フィルター特性は反射率0%付近と100%付近は傾きがフラットではないので、フィルターの傾きがほぼフラットとなる反射率10-90%を用いたFBGフィルターの最適仕様を検討した。

まず、FBGフィルター傾き部分の帯域幅 Δv_{slope} について検討する。中緯度の高度11km付近は偏西風が卓越しており、その風速は80m/s以上にも達する。レーザービームの天頂角を 60.0° とした場合、水平風速100.0m/sはレーザービーム視線方向の風速に換算して86.6m/s、ドップラーシフトに換算して57.7MHz(波長1500nm)となる。よって、 Δv_{slope} を120.0MHz以上($> 57.7\text{MHz} \times 2$)とすることで水平風速 $\pm 100.0\text{m/s}$ が測定可能となる。Fig.1に L を変化させたときの反射率10-90%区間のFBGフィルター傾き[MHz]を示す。反射率10-90%内において Δv_{slope} が120.0 MHzとなるフィルターの傾き $\beta = 0.8 / 120\text{MHz} = 0.0067$ [MHz]となり、 L は約0.1m(10cm)となる。

次に、ミー散乱の影響について検討する。Fig.2(a)に $L = 0.1\text{m}$, $\Delta n = 10^{-4}$ としたときの Δv_d に対するFBGフィルター透過光と反射光の比 r の関係を様々な散乱比について示す。この条件では、レイリースペクトルの裾がフィルター傾きの帯域幅内に収まらず、散乱比が大きくなるとミー散乱とレイリー散乱のスペクトル幅の違いによる影響が大きくなり、 r に対する Δv_d が一対一にならない。そこで、散乱比に依存しない L - Δv_d の関係を調べた。Fig.3に L に対する測定感度を示す。 L が0.01m以下では測定感度は散乱比に依存しないことがわかる。Fig.2(b)に $L = 0.008\text{m}$, $\Delta n = 10^{-4}$ としたときの Δv_d に対する r の関係を様々な散乱比について示す。散乱比によらず Δv_d に対する r の関係は一定で、エアロゾル濃度を気にすることなく風観測が可能となる。

最後に、FBGフィルターの最適条件($L = 0.008\text{m}$, $\Delta n = 10^{-4}$)における水平風速測定誤差の検討結果をFig.4に示す。レーザー出力100mJ、望遠鏡直径30cm、天頂角 30° 、受光素子の光電効率をPMT(光電子増倍管)は0.5%、APDは50%とした。高度5km以下を対象とする場合、積算回数100、距離分解能50mでAPDを用いることで風速誤差1.0m/s以内となる。PMTは効率が悪いAPDに比べて測定誤差が大きい。対流圏上部から成層圏を対象とする場合、APD、PMTとも高度20kmまでは水平方向の風速誤差10m/s以内での測定が可能である。APDはそれ自体から発生するノイズが非常に大きいため、ライダー信号が弱くなる高高度ではAPDとPMTの測定誤差が逆転する。

4. まとめ

1.5 μm インコヒーレントドップラーライダーに用いるFBGフィルターの最適化について検討した。フィルターの傾きを0.0005 [MHz]とした場合にミー散乱の影響を受けない最大の測定感度となる。また、レーザー出力100mJ、望遠鏡直径30cm、天頂角 30° 、受光素子の光電効率をPMT(光電子増倍管)は0.5%、APDは50%とした場合、積算回数100、距離分解能50mで高度5kmまで水平風速誤差1.0m/s以下(APD)、積算回数18,000、距離分解能100mで高度20kmまで水平風速誤差10m/s以内での測定が可能であることを示した。

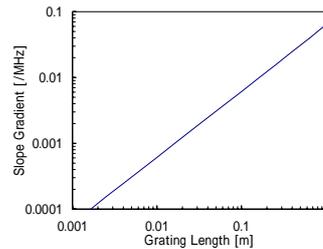


Fig.1 Slope gradient of the FBG filter as a function of the grating length.

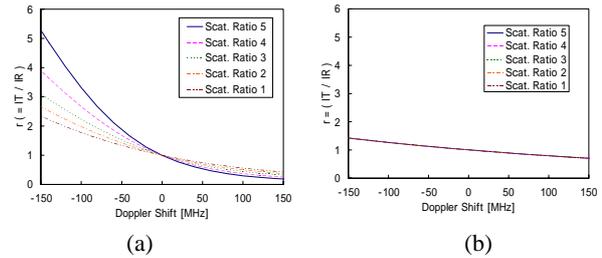


Fig.2 Signal ratio r as a function of the Doppler shift at various scattering ratio. (a) $L = 0.1\text{m}$, (b) $L = 0.008\text{m}$

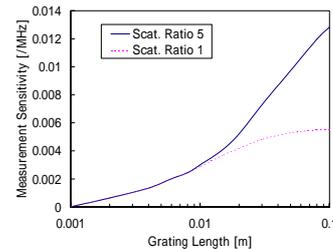


Fig.3 Measurement sensitivity as a function of the grating length L .

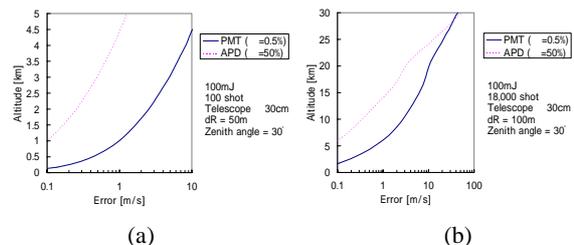


Fig.4 Comparison of the wind velocity error with the PMT and the APD. (a)100shots averaged, 50m range resolution (b) 18,000shots averaged, 100m range resolution

<参考文献>

- J. Skaar and K. M. Risvik, J. Lightwave Technol., Vol.16, No.10, 1928-1932 (1998)
- I. Stenholm and R. J. DeYoung, NASA/TM-2001- 211261, p34- (2001)
- 柴田他、第24回レーザーセンシングシンポジウム予稿集、(2004)
- Y. Shibata, et al., Proc. of 23rd ILRC, 151-153 (2006)