

# ファイバーフィルターを用いたインコヒーレントライダーの設計

Design of the incoherent Doppler lidar using a fiber filter

柴田泰邦、長澤親生、阿保 真

Yasukuni Shibata, Chikao Nagasawa and Makoto Abo

東京都立大学大学院 工学研究科

Graduate School of Engineering, Tokyo Metropolitan University

Abstract : The incoherent wind lidar employing narrow-band filters for Doppler shift component detection uses Mie or Rayleigh scattering. As compared with the Mie lidar of the same specification, S/N ratio of the incoherent Doppler lidar is poor because of the use of narrowband filters. We propose a Fiber Bragg Grating (FBG) Filter for Doppler shift detection as a wavelength split filter in optical communications, a temperature sensor, and a distortion sensor. As the FBG filter consists of a diffraction grating, only the arbitrary wavelength fulfilling the Bragg conditions is reflected. Improvement of the S/N ratio is expected with use of the ratio of filter transmission light and reflection light. This paper discusses applicability of the FBG filter for Doppler shift detection.

## 1. はじめに

ドップラーライダーは視線方向の風速を決定するため、ミー散乱やレイリー散乱に含まれるドップラーシフトを測定する。一般的に、インコヒーレントドップラーライダーで風速を測定する場合、レイリー散乱またはミー散乱のいずれかを使用するため、測定高度範囲はこの散乱信号のタイプによって制限される。Korb 等はミー散乱用にレーザー周波数に対し対称の位置にある2つの狭帯域フィルタを使用したダブルエッジ法を提案した。Garnier 等、Chanin 等、Korb 等は、レイリー散乱信号用に2枚のエタロンフィルタをレイリースペクトルの裾に置く方法を提案した。ドップラーシフトは個々のフィルタ透過信号強度比の変動から得る。また、1本のヨウ素吸収線の2つの傾斜部分を用いるインコヒーレントドップラーライダーは、ミー散乱を取り除くため、レーザー周波数はフィルタ中心周波数 $\nu_0$ からミー散乱を十分除去できる少しスロープ寄りの2ヶ所 $\nu_0 \pm \nu_s$ に交互に同調される。ドップラーシフトは $\nu_1 = \nu_0 - \nu_s$ と $\nu_2 = \nu_0 + \nu_s$ の各波長においてヨウ素フィルターを透過する信号強度比の変化から得る。これらエタロンやヨウ素フィルターを用いる場合、フィルターを透過する一部の信号を使うので、十分なSNを得ることが難しい。

そこで、波長多重光通信の波長分別フィルターおよび温度・歪センサーとして用いられている Fiber Bragg Grating (FBG) Filter をドップラーシフト検出フィルターに用い、SNの改善を図る方法を新たに提案する。FBGフィルターはコア部に回折格子を形成した光ファイバーであり、Bragg条件を満たす任意の波長だけが反射される。FBGフィルターエッジ部にレーザー波長を同調し、フィルター透過光およびフィルター反射光の比からドップラーシフト成分を検出する。透過光と反射光を用いるためSNの向上が期待できる。

## 2. FBG フィルター

FBGフィルターはコアの実効屈折率が $n_{\text{eff}}$ のファイバーコア内にグレーティング長 $L$ 、周期 $\Lambda$ の屈折率変化 $\Delta n$ を持つグレーティングで、Bragg条件を満たす波長 $\lambda_0 (=2n_{\text{eff}}\Lambda)$ のみ反射され、その反射率 $R$ およびフィルターバンド幅 $\Delta\lambda_0$ は次式で表せる。

$$R = \tanh^2(\pi\Delta nL/\lambda_0) \quad (1)$$

グレーティングの屈折率変化 $\Delta n$ が一樣な場合(uniform)、反射スペクトルにおいてメインピークの両側に複数のサイドローブが発生し、ドップラーシフトに対するフィルター透過強度が一意に定まらない。そこで、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ことでサイドローブの発生を抑制できる。Fig.1に $\lambda_0=1064\text{nm}$ 、 $\Lambda=5\text{cm}$ としたときの、フィルター分布を示す。反射率 $R$ が10-90%に変化するスロープ部分のバンド幅は $\Delta n$ によらずほぼ一定であるので、 $\Delta n$ に要求される精度は低い。Fig.2に示す。ダブルエッジ法ではミー散乱また

はレイリー散乱が十分除去できないので散乱比の値で  $r(\Delta\nu_d)$  の分布が異なるが、FBGフィルター法では散乱信号をそのまま用いても  $r(\Delta\nu_d)$  の分布に散乱比による違いがほとんど見受けられない利点がある。

### 3. 他のインコヒーレント法との比較

他のエタロンおよび分子・原子フィルター(ヨウ素および金属蒸気フィルター)は受信散乱光のうちフィルターを透過する一部の信号しか使わない。Fig.3にダブルエッジ法(aerosolとmolecular)および2波長ヨウ素フィルター法における、大気散乱光強度に対するフィルター透過信号強度の比  $I_T$  を示す。ここで、光学系による損失は考慮していない。ダブルエッジ法(aerosol)はエアロゾルが卓越する条件では、 $I_T$  は約50%と散乱光の半分がフィルターを透過するが、散乱比が小さい条件ではレイリー散乱が卓越するためフィルター透過信号強度が小さくなる。ダブルエッジ法(molecular)や2波長ヨウ素法はレイリー散乱の一部しかフィルターを透過しないので、 $I_T$  が総じて低い。一方、FBGフィルターを用いたドップラーライダーは、FBGフィルターの一方の傾き中心部にレーザ周波数を同調させ、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を求めるので、 $I_T$  が1となり、受光系システム効率の向上が期待される。

次に、風速誤差1m/sを得るのに必要な光子数  $N_p$  を各インコヒーレント法について計算し、その結果をFig.4に示す。FBG法とミー散乱を完全に除去する2波長ヨウ素法は、全ての散乱比において  $N_p$  がほぼ一定となり、これは、エアロゾルや雲の影響を受けることなく風測定ができることを意味する。ダブルエッジ法(molecular)は完全にミー散乱を除去できないので、散乱比が大きいと測定感が悪くなり、 $N_p$  が多くなる。また、ダブルエッジ法(aerosol)は散乱比の大きい下層大気では他の3つの手法に比べて  $N_p$  が少ないが、散乱比が小さくなるとスペクトル幅の広いレイリー散乱の寄与が多くなるため測定感が急激に悪くなり、 $N_p$  が多くなる。以上のことから、FBGフィルターを用いたインコヒーレントドップラーライダーは、地上から成層圏に渡る風観測をエアロゾルや雲の影響を受けることなく、ヨウ素方式に比べて高いシステム効率で観測を行うことが可能であることが示された。

本研究は文部科学省の文科省科学研究費補助金により行われている。

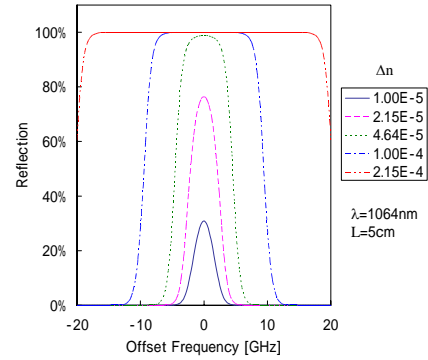


Fig.1 FBG filter profiles

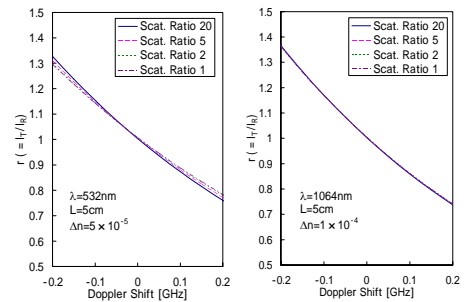


Fig.2 Ratio of the transmitted light and reflected light to the Doppler shift at various scattering ratio.

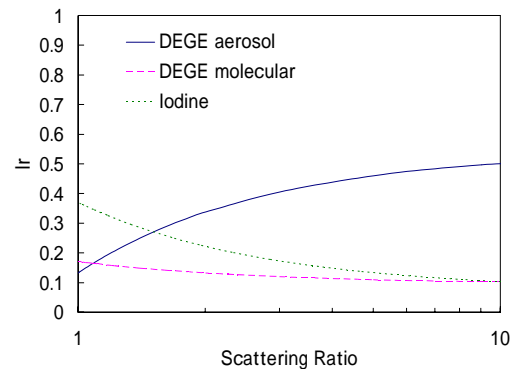


Fig. 3 Ratio of the filter transmission signal and scattering signal as a function of scattering ratio.

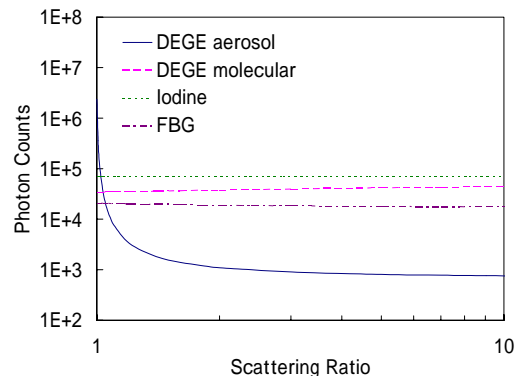


Fig.4 Photon counts required for 1 m/s accuracy.