

風速計測のための差分弁別方式ドップラーライダー

Differential discrimination Doppler lidar for wind velocity measurement

福井大学 工学部

劉 兆岩・小林 喬郎

Faculty of Eng., Fukui Univ. Z. Liu, T. Kobayashi

Abstract: A new incoherent Doppler lidar technique for wind measurement is proposed. A two-channel differential discrimination technique is developed, which provides high sensitive velocity measurement. With this technique, Mie scattering and molecular Rayleigh scattering are separately detected and the wind velocity and the backscatter ratio of aerosols to molecules are simultaneously determined. A polarization dependent, two-channel Mach-Zehnder (M-Z) interferometer has been constructed and the total Doppler lidar system is developed for wind velocity measurement. Calculation results show that a high velocity measurement accuracy can be obtained.

1. はじめに

風速測定のためのドップラーライダーとして現在までコヒーレント方式が多数研究されているが、装置構成と信号処理法が複雑などの問題点がある。一方、インコヒーレント方式としてエッジ法が Korb らにより提案されているが¹⁾、ライダー信号に含まれるエアロゾルによるミー散乱光と分子によるレイリー散乱光の両者を分離するのが難点となっている。レイリー散乱光のスペクトル幅 (FWHM) は大気温度とレーザー波長に依存し、5 km の高度で (温度は約 255K) 600 MHz ($\lambda=1\mu\text{m}$)、1.2 GHz ($\lambda=532\text{ nm}$) と広い。また、ミー散乱の幅は狭く、パルスレーザーのスペクトル幅とほぼ一致している。

我々はエッジ法の欠点を改良するため、マッハツェンダ (M-Z) 干渉計の構成を用いる 2 チャンネル差分弁別法を考案した²⁾。この差分弁別法は 2 つの偏光を分離して用いる 2 チャンネル M-Z 干渉計によりミー散乱光とレイリー散乱光が分離され、風速とミー散乱強度、レイリー散乱強度が同時に計測できるものである。ここでは、2 チャンネル M-Z 干渉計の試作と予備実験結果を示す。

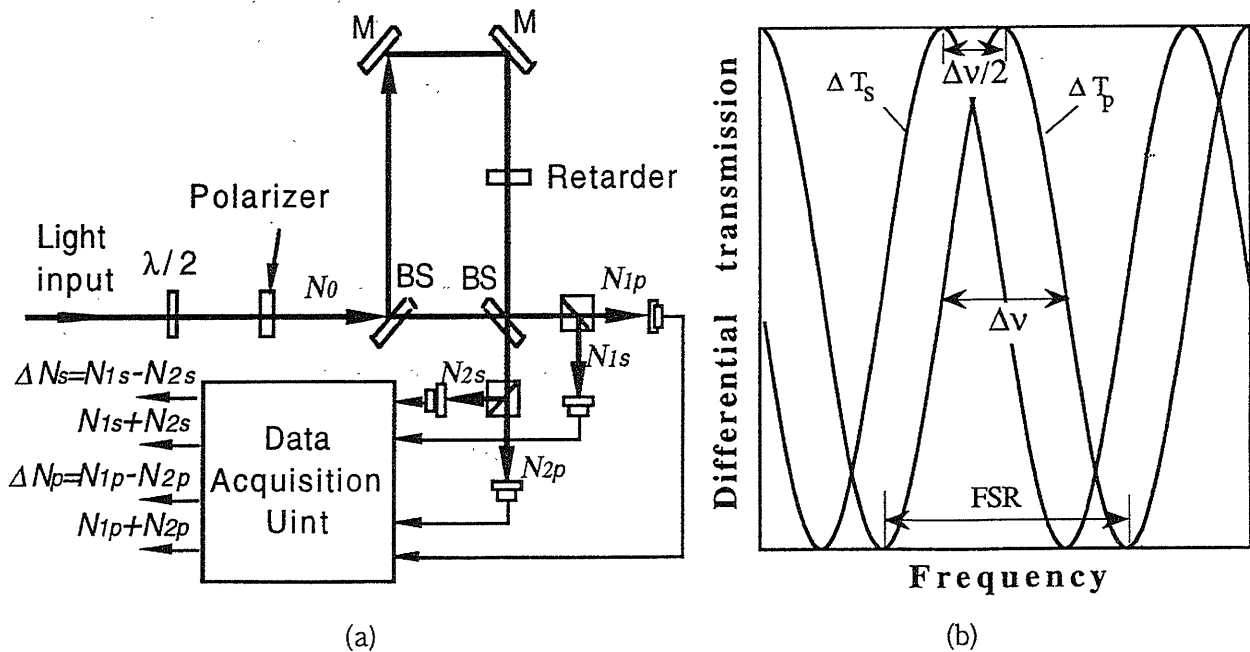


図 1 (a) 2 チャンネルマッハツェンダ (M-Z) 干渉計の構成 (b) 2 チャンネルの差分伝達関数の信号光周波数変化

2. 計測原理

図1(a)に2チャンネルのM-Z干渉計の構成を示す。M-Z干渉計は $\lambda/2$ 板と偏光子により受信光の偏光方向を 45° にして、また、PBSにより2つの出力をsとpに分け、差分処理を行って2チャンネルの差分弁別器としている。さらに、干渉計に位相遅延板($\lambda/4$ 板)を入れ、2つのチャンネルの差分伝達関数はFSR/4(干渉計の全スペクトル幅 $\Delta\nu$ の1/2)ずれている。図1(b)にsとp偏光チャンネルの差分伝達関数を示す。各チャンネルの差分透過率は次式で表される。

$$\Delta T_i = T_{i1} - T_{i2} = \int_{-\infty}^{\infty} h(\nu - \nu') \tau_{i1}(\nu') d\nu' - \int_{-\infty}^{\infty} h(\nu - \nu') \tau_{i2}(\nu') d\nu', \quad (i=s, p) \quad (1)$$

ここで、 $\Delta T_i = (N_{i1} - N_{i2}) / (N_{i1} + N_{i2})$ は差分透過率、 $T_{i1} = N_{i1} / (N_{i1} + N_{i2})$ と $T_{i2} = N_{i2} / (N_{i1} + N_{i2})$ はsとpチャンネルの出力1と2の透過率、 N_{i1}, N_{i2} は各出力の光子数、 $\tau_{i1}(\nu)$ と $\tau_{i2}(\nu)$ は干渉計のsとpチャンネルの出力1と2の伝達関数である。 $h(\nu)$ は受信光のスペクトル関数であり、レーザー光と散乱光に対して、ガウス形である。図2に差分透過率と信号光のスペクトル幅の依存性を示す。受信光のスペクトル幅 $\delta\nu$ は干渉計のスペクトル幅 $\Delta\nu$ の2.5倍広くなると、差分透過率が零となり、スペクトル幅の広いレイリー散乱光とスペクトル幅の狭いミー散乱光が分離できる。これがM-Z干渉計の重要なスペクトル特性である。

次に、速度感度は1 m/sの速度変化に対する差分透過率の変化と定義され²⁾、

$$S_i = \frac{d(\Delta T_{ai})}{d\nu} = \frac{1}{(N_{ai1} + N_{ai2})} \frac{d(N_{ai1} - N_{ai2})}{d\nu} \quad (i=s, p) \quad (2)$$

となる。また、2チャンネルの速度感度は $S = (S_s^2 + S_p^2)^{1/2}$ で定義される。

図3に速度感度の受信光の周波数依存性を示す。ピーク速度感度は6%で、従来のエッジ法の感度より1.5倍高い。2チャンネルの速度感度は広い周波数域で定数となり、各チャンネルのピーク感度と一致している。この結果により2チャンネル弁別法は広い周波数域で高感度の速度計測法であることも特徴である。

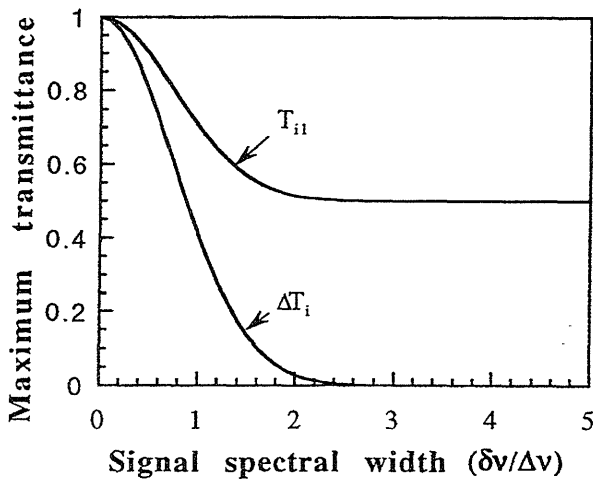


図2 最大中心透過率の信号スペクトル幅依存性
 $\Delta\nu$ は干渉計のスペクトル幅 (FSRの半値)
 $\delta\nu$ は信号スペクトル幅

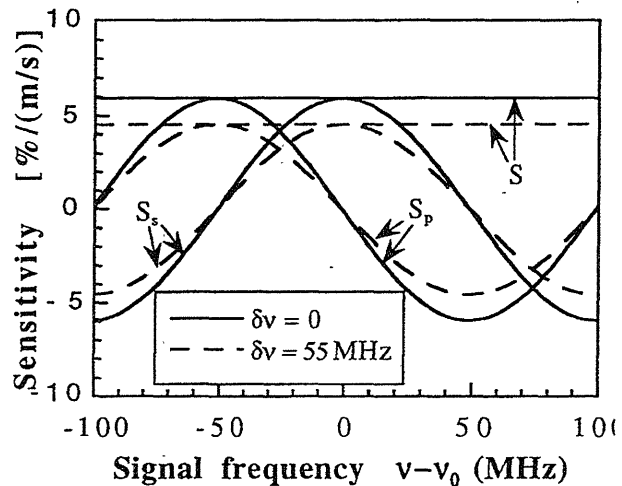


図3 速度感度と受信光周波数の関係

3. シミュレーション

図4にNd:YAGラドップライダー装置の構成を示す。レーザーはシーダ付きの単一モードであり、1064 nmの基本波と532 nmの2倍高調波が発生でき、表1にシステムパラメータをまとめて示す。

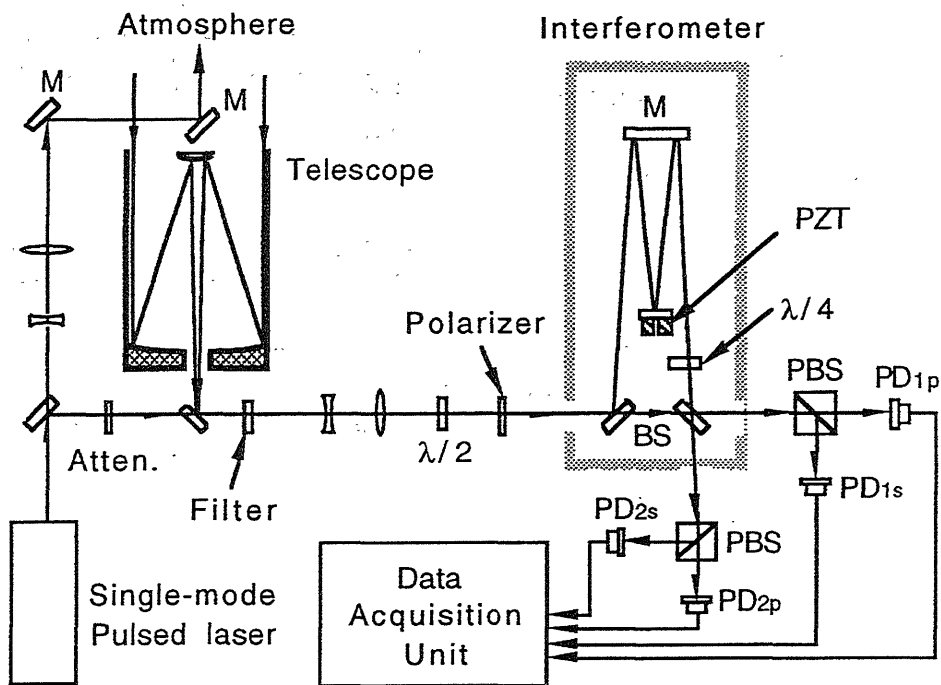


図4 ドップラーライダー装置の構成

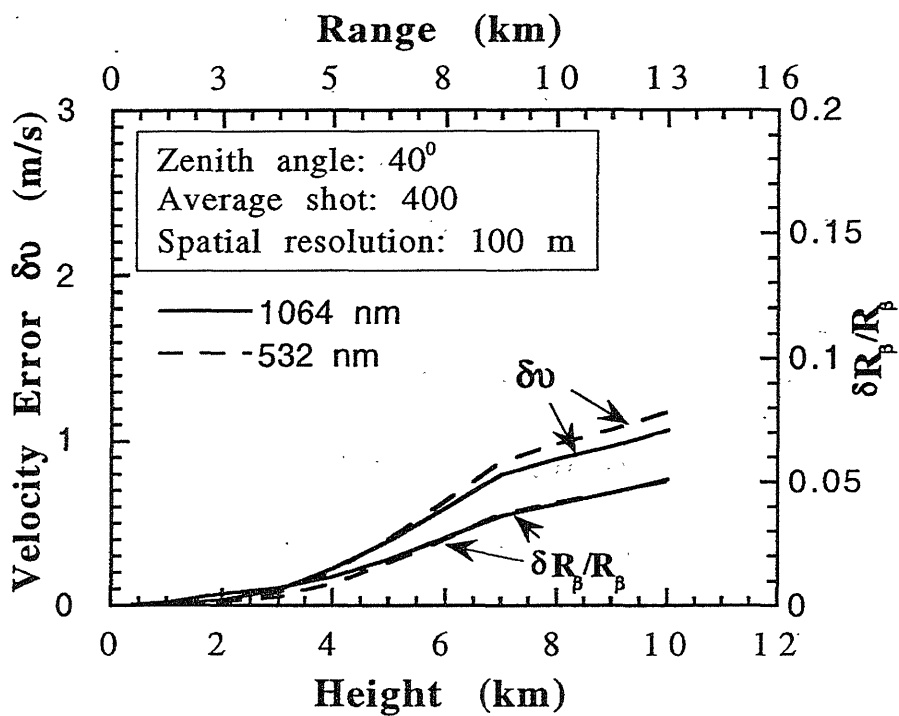


図5 ドップラーライダーの速度誤差と散乱比誤差の高度変化の計算結果

表1に示されたシステムパラメータを用いて計算したライダーの速度誤差と散乱比の相対誤差の高度変化を図5に示す。その結果より、積算回数400ショットで10 kmまでの高度範囲で、速度誤差が1 m/s以下、散乱比の誤差が5%以下の計測結果が期待される。

表1 システムパラメータ

ライダー	1064 nm	532 nm
エネルギー	300 mJ	100 mJ
望遠鏡の直径	50 cm	50 cm
光学効率	0.3	0.3
光検出器	PMT	Si-APD
量子効率	0.15	0.05

4. 予備実験

図4に示す構成の2チャンネルM-Z干渉計を試作した。熱膨張係数の低いスーパーインバー棒を3本用いて干渉計を構成した。干渉計の30分で長時間安定性は40MHz以内であった。また、単一モードのNd:YVO₄マイクロチップレーザーを用いて、PZTにより干渉計を掃引させて透過スペクトル特性を計測した。図6に干渉計のsとpチャンネルの差分透過率を示す。干渉計のスペクトル幅(FWHM)は130 MHzであり、 $\lambda/4$ 板の挿入により、sとp偏光の透過関数は $\Delta v/2$ ずれている。無偏光誘電体ハーフミラーの反射率はs偏光に対して約70%、p偏光に対して約30%、ミラーの面精度は $\lambda/10$ 以上であるため、差分透過率は-0.5~0.9のサイン型であった。また、Nd:YAGの蛍光を用いて広いスペクトル幅の信号光の差分透過率を測定し、その値は9.5%の定数であった。

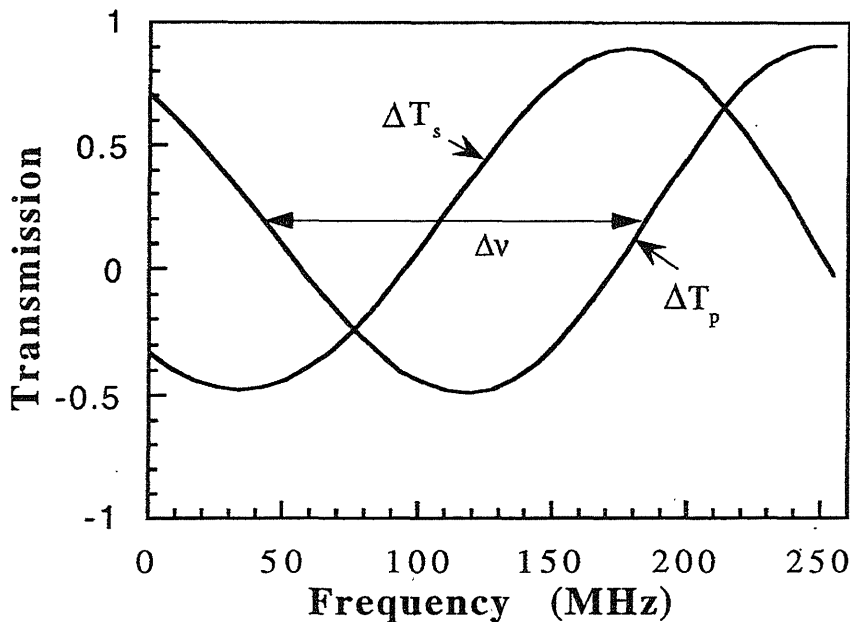


図6 計測した干渉計のsとp偏光透過スペクトル特性

5. まとめ

新しいドップラーライダー方式を検討し、予備実験を行った。実験と理論結果により、2チャンネルM-Z干渉計による弁別法が可能であり、10 kmまでの風速と散乱比の高精度計測が期待できることが分かった。現在ライダーシステムを構成しており、風速測定実験を行う予定である。

参考文献：

- 1) C. L. Korb, B. M. Gentry and C. Y. Weng; *Appl. Opt.*, vol.31, p4202 (1992).
- 2) Z. Liu and T. Kobayashi, to be published in *Optical Review* (1995).