

C 6

擬似ランダム変調コヒーレント CWライダーの検討

A Study of a Random-Modulation CW Coherent Lidar

竹内延夫
Nobuo TAKEUCHI

国立公害研究所
National Institute for Environmental Studies

SYNOPSIS: A coherent lidar (CL) is noticed to be a high sensitive technique, especially for wind measurement. Here a new scheme CL to enhance SNR is proposed, where the detected signal amplitude is integrated instead of the intensity. This scheme is especially effective for a random-modulation-type lidar. The condition for its validation is investigated.

擬似ランダム変調CWライダー(RM-CWライダー)はピークパワーが小さい光源に対して効率の良い検出が可能な測定方式として著者らによって提案され、半導体レーザーを光源として可搬型の装置が製作され、フィールドでの有効性が実証された¹⁾。通常のインコヒーレント検出方式のRM-CWライダーでは1周期にNパルス送信されるとき微小信号のSN比の増加は \sqrt{N} 倍である。一方、RM-CW方式のコヒーレントライダー(CL)ではSN比の増加はN倍となる。したがってパルスCLとRM-CW-CLでは平均パワーが等しければ同じSN比を与える。本講演では理論の概要、CLが有効な条件、システム構成、SN比の計算を紹介する。

[RM-CW-CL] RM-CWライダー(インコヒーレント)が擬似ランダムコードの(1,0)に対応してON,OFFのパルスを送信するのに対し、RM-CW-CLでは(1,-1)に対応してcw光の位相を(0, π)変調して送光する方式である(同一位相のCW光を(1,0)に対応してON,OFFする方式もある)²⁾。

CLでは振幅、位相を扱うので、受信信号(振幅)を u 、変調コードとの相関を Ψ (インコヒーレントでは y と S)とすると基準となる時間より $i\Delta t$ 後に受光される受信信号光の振幅 $u_s(\omega_s)$ は(送信振幅 $E_T(\omega_s)$ 、角周波数 ω_s)、

$$u_{s,i}(\omega_s) = E_R(\omega_s) \sum a_{i,-j} Q_j + E_{b,i}(\omega_s) \quad (1)$$

ここで $a_{i,-j}$ は(1,-1)からなるM系列、散乱係数 Q_j (Q_j は直接検波方式の応答関数の平方根に比例; 大気の揺らぎの影響を受ける)、 $E_{b,i}(\omega_s)$ は背景光(角周波数 ω_b)の振幅。局部発振光(振幅 E_L 、角周波数 $\omega_L = \omega_s - \omega_{IF}$)、中間周波の基準信号と混合されてDC成分 u_i (DC)を得る。RM-CW-CLでは ω_{IF} との混合(ダブルヘテロダイン)によって直線検波を行うのが特徴である。M回積算後の変調コードとの相関値の期待値は

$$\Psi_i(DC) = M E_R E_L \xi_{IF} \{ (N+1) Q_1 - \sum Q_j \} \quad (2)$$

となる(ξ_L, ξ_{IF} は定数)。右辺第2項を差し引き、自乗することによって散乱体濃度の空間分布($\propto Q_1^2$)を求めることができる。後方散乱係数 β_1 は Ψ_{RM}^2 に比例するのでSNRは

$$\begin{aligned} SNR &= E[\Psi_{RM,i}^2] / \{ \text{Var}[\Psi_{RM,i}^2] \}^{1/2} \\ &= \frac{M^2 (N+1)^2 CNR_p}{\{ M^4 (N+1)^4 \text{Var}[|\Psi_i|^2] + 2M^2 N(N+1)^2 CNR_p + M^2 N^2 \}^{1/2}} \quad (3) \end{aligned}$$

で与えられる。RM-CW-CLでは一般に信号レベルが低いので、 $CNR (= N \cdot CNR_p) < 1$ が成立し、 $SNR = N \cdot CNR_p$ となる。 CNR_p は E_T^2 すなわちパワー P_T に比例するので、 $SNR = N \cdot CNR_p$ はSNRが平均パワーで決まることを示している。

[RM-CW-CLの必要条件]

- (1) [受光面積 A_r と視野角 Ω_r] (Siegmanのアンテナ理論) $A_r \Omega_r \approx \lambda^2$
- (2) [位相整合] 受光面上で受信信号光、局部発振光(LO)の位相が一致。
- (3) [中間周波数とゲート時間] $\Delta t \cdot \omega_{IF} \leq 2\pi$
- (4) [スペクトル幅] レーザースペクトル幅 $\delta\nu \leq$ フィルター帯域幅 $\Delta\nu_{IF} <$ 中間周波数 ν_{IF}
ただし $\delta\nu = \{ (\delta\nu_s)^2 + (1/2\pi \tau_s)^2 + (\Delta\nu_{Dop})^2 \}^{1/2}$

($\delta \nu_0$:レーザー固有のスペクトル幅、 τ_s :大気の揺らぎの相関時間、 $\Delta \nu_{Dop}$:ドップラー幅)。

(5) [コヒーレンス時間] コヒーレンス時間($\tau_c=1/2\pi\delta\nu$)>積算時間>M系列周期。

このうち(1)(2)は全てのCLに共通な条件、(3)は振幅加算に必要な条件、(4)、(5)は振幅加算が有効に行われるための条件である。

【システム構成】RM-CW-CLの装置構成としてはFig.1の様な構成が考えられる。安定度の良い中間周波発生器(IF Generator)を基準としてレーザー光を周波数シフトして局部発振光($\omega_L=\omega_0-\omega_{IF}$)を作り、中間周波受信信号を基準の ω_{IF} と周波数混合(double heterodyne)してDC成分を得る。

【SN比の計算】本方式で期待されるSN比について理想的な場合(完全な位相整合状態、大気の揺らぎが無視できる、レーザー固有のスペクトル幅は0)について計算した。他のパラメータはレーザー出力100mW(シングルモード、波長1 μ m)、口径10cm、光学系効率10%、視程5km、積算時間は1秒、コヒーレント時間 τ_c は100 μ sで、その間はコヒーレントに(振幅)加算可能、それより長い時間はインコヒーレントな加算を仮定している。空間分解能15m(サンプル時間100ns)、擬似ランダム変調コードは10次(1周期1023要素)を想定している($\tau_c=100\mu$ sであるので1周期分だけ振幅加算可能)。RM-CW方式以外では繰返しを10kHz(周期100 μ s)としている。CLではSNの式分母第1項(大気の揺らぎがあると寄与大)の寄与を無視している。

【おわりに】実際のCLでは望遠鏡口径の制約や、信号光と参照光の位相が一致する必要があり、しかも大気の揺らぎの影響が無視できないので、インコヒーレント検出と比較して大幅なSN比の改良は難しいが飛翔体の速度や風速の測定などCLが必要な場合には位相加算を行うことによって大幅なSN比の改善が期待される。したがって、宇宙空間からの風速測定(LAWS計画)などに非常に有効である。

文献

- 1) N.Takeuchi, H.Baba, K.Sakurai, T.Ueno: Appl. Opt. 25 (1986) 63-67.
- 2) 竹内延夫: 擬似ランダム変調CWコヒーレントライダー。第2回光波利用シンポジウム。(1988.2)、東京, 61-66.

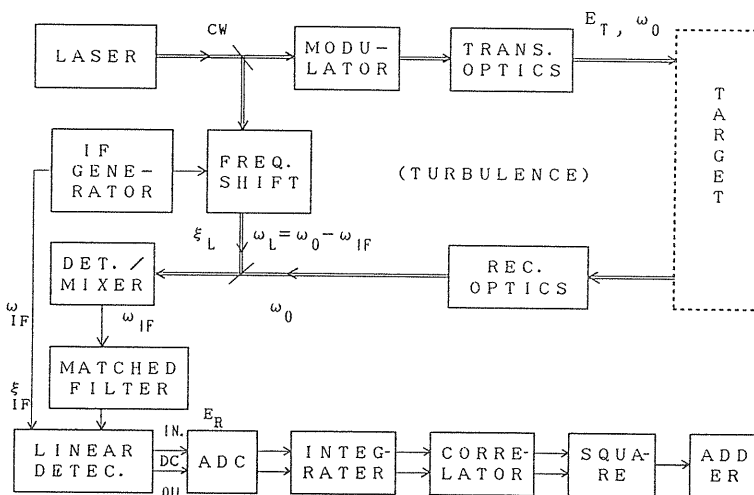


Fig. 1 Block diagram of the RM-CW coherent lidar. The IF signal is mixed with ω_{IF} frequency signal from the stable generator to get linear detection of the signal amplitude. IN and QU are in-phase and quadrature DC-component of the signal, respectively.

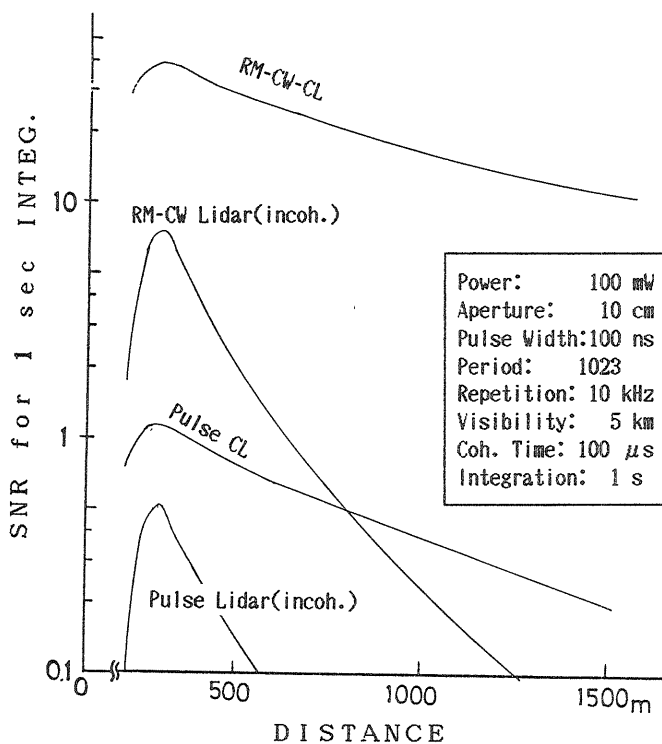


Fig.2 SNR estimation for different kinds in lidar scheme: incoherent pulsed lidar (repetition rate: 10 kHz), RM-CW lidar (100 ns gate time, 1023 elements in a period), pulsed coherent lidar, and RM-CW coherent lidar.

Atmospheric turbulence is neglected, and phase matching of received and local frequency is assumed.