37

擬似ランダム変調CWライダーの特性とエアロゾル観測

Pseudo-Random Modulation CW Lidar and Its Application to Aerosol Monitoring

竹内延夫, 桜井捷海*, 杉本伸夫, 馬場浩司*, 近藤真通*

N. Takeuchi, K. Sakurai*, N. Sugimoto, H. Baba* and M. Kondo*

国立公害研究所, 東京大学教養学部基礎科*

National Institute for Environmental Studies, Univ. of Tokyo*

〔はじめに〕 ライダーの送信レーザー光を試験信号とみなすと、散乱体からの後方散乱(A-スコープ)は応答関数とみなせる。応答関数 $g(t)$ を求める方法には、インパルス応答によるもの(通常のパルスライダー)と、擬似ランダム雑音を用いるもの(擬似ランダム変調: Pseudo-Random Modulation, 以下RMと呼ぶ)がある。[1] ライダー方程式は, 試験信号 $X(t)$, 受信々号 $P_r(t)$, 背景光雑音電力 $b(t)$ を用いて

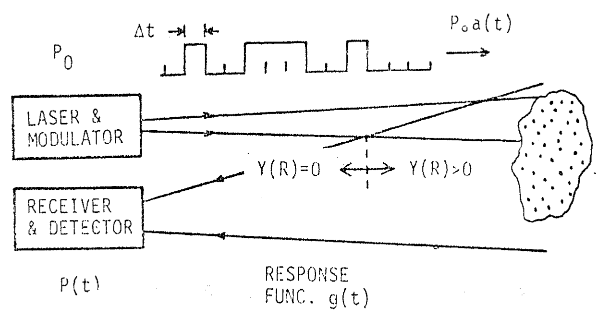

Fig.1 Principle of RM CW lidar

$$P_r(t) = \int_0^T X(t - t_c)g(t_c)dt_c + b(t) \qquad (1)$$

と書ける。ライダー方程式は

RM変調(周期T):

$$X(t - t_c) = P_0 a(t - t_c)$$

P_0 : CW光出力, $a(t)$: 擬似ランダム・コード

$$P_r(t) = P_0 \int_0^T a(t - t_c)g(t_c)dt_c + b(t) \qquad (2)$$

インパルス応答

$$X(t - t_c) = P_p \Delta t \delta(t - t_c)$$

P_p : パルス・ピーク出力, Δt : パルス幅

$$P_r(t) = P_p g(t) + b(t) \qquad (2)'$$

$$g(t) = \eta\left(\frac{c\Delta t}{2}\right)A_r\beta_r(R)T^2(R)Y(R)/R^2, \quad R = ct/2 \qquad (3)$$

となる。RMとして、2値M系列(binary M-sequence;次数n, 要素数N, ゲート幅Δt, 周期$T = N\Delta t$)を用いる。M系列は, "1"と"0"の出現回数の均等性や"連"の出現率に固有の性質を持ち, ("1", "0"を"1", "-1"で置きかえると)自己相関関数は

$$\Phi_{a,a}(\tau) = \frac{1}{T}\int_t^{t+T} a(t' - \tau)a(t')dt' = \begin{cases} 1 & (\tau=0) \\ -\frac{1}{N} & (\tau\neq 0) \end{cases} \qquad (4)$$

となる。他の関数(例えば, 背景光雑音 $b(t)$)との相関は、$\tau \neq 0$ の自己相関関数と同様であると考える。式(4)の性質によって、

$$\frac{1}{T}\int_t^{t+T} P_r(t')a(t' - t_c)dt' = P_0 g(t_c) + \bar{b}/N \qquad (5)$$

となる($\bar{b}$ は $b(t)$ の時間平均値)。Nが大きいとき$\bar{b}/N$ は十分に小さく、零レベルが自動的に

求められる。RM変調による距離分解能は $(c\Delta t/2)$ となる。

〔SN比〕信号 x のSN比は $\bar{x}/\sigma(x)$ ($\bar{x}=E(x)$ は x の期待値, $\sigma^2(x)=E((x-\bar{x})^2)$ は分散)で与えられる。光検出器(量子効率 η_Q)で検出された光電子数の時刻 $t+k\Delta t$ における値 $n_p(t+k\Delta t)$ ($n_p(t)=\xi P_r(t)$, $\xi=\eta_Q\Delta t/h\nu$, $h\nu$ は光量子のエネルギー)を $n_p(k)$ と表現すると,

$$\sigma^2(n_p(k)) = E((n_p(k) - \bar{n}_p)^2)$$
$$= \xi\left(P_0\sum_{i=0}^{N-1} g(i) + 2N\bar{b}\right)/L^2 \qquad (6)$$

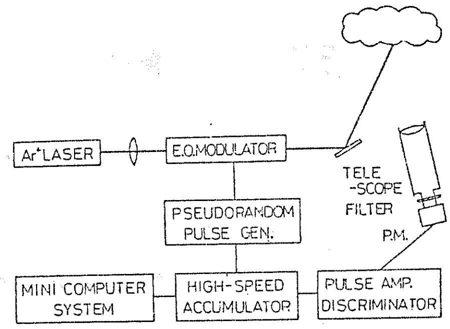

Fig.2 Block diagram of the experimental setup

($L=2^{n-1}$ は"1"の数, $L/N\simeq 1/2$)となる。(π, $-\pi$ の位相を用いて"1","−1"のコードをRM変調に用いると, 式(6)のLはNとなる。) SNの式は

RM−CWライダー:

$$(S/N)_{RM} = \frac{\sqrt{\xi}LP_0 g(k)}{\sqrt{(P_0/\Delta t)\int_{t_m}^{t_m+T} g(t)dt + 2N\bar{b}}} \qquad (7)$$

パルスライダー:

$$(S/N)_p = \frac{\sqrt{\xi}P_p g(k)}{\sqrt{P_p g(k) + 2\bar{b}}} \qquad (8)$$

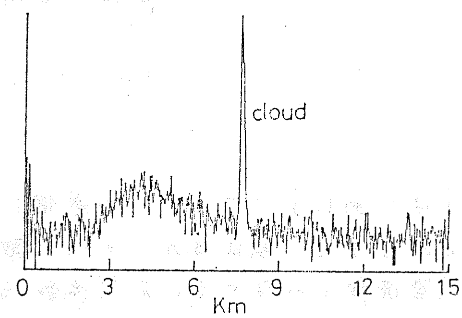

Fig.3 An example of the measurement

で与えられる。一周期Tの間の受信々号の平均値 $\bar{g}$ が $g(k)$ と等しく、一周期の間の送信エネルギーが等しい($LP_0\Delta t=P_p\Delta t$)とき、$(S/N)_{RM}/(S/N)_{pulse}\simeq 1/\sqrt{2}$ となる。(位相を反転させて"1","−1"を用いると $NP_0\Delta t=P_p\Delta t$ のときには、$(S/N)_{RM}/(S/N)_{pulse}\simeq 1$ となる。)

〔実験〕[2] 装置のブロック図をFig.2に示した。Ar^+ レーザー(514.5nm, 出力1w)の連続光はEO変調器で10次のM系列によって変調され、大気中に送出される。望遠鏡(合成焦点距離, 約1.3m, 口径15cm, 副鏡口径3.2cm, 絞り口径 3×10^{-3} m)は、レーザーから5mの位置に設置された。M系列のゲート幅は200ns ($c\Delta t/2=30$ m), 要素数1023, 周期, 約200μs であり, 測定は夜間行われた。約5分間の測定結果をFig.3に示す。Eq.(7)を用いて計算した例をFig.4に示す。

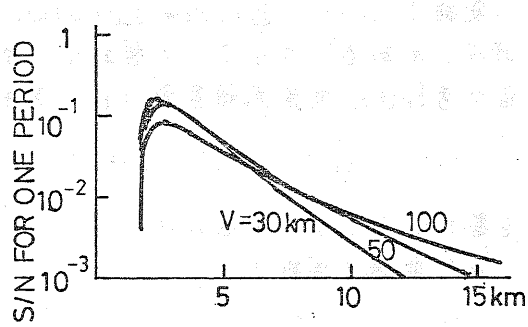

Fig.4 S/N estiamtion by Eq.(6). Conditions are the same as the experiment.

〔まとめ〕 RM−CWライダーは次の特徴を持つ:

(1) 平均出力が $P_0/2$ のパルス動作ライダーとほぼ同じ性能である。

(2) CW動作であるので動作が安定である。

(3) 放電に伴う雑音が少い。

(4) 応答関数 $g(t)$ は距離の自乗に反比例するので、常に近距離からの寄与が大きい(この欠点は、$Y(R)>0$ となる距離を遠方にとることによって解決される)。

(5) ゼロレベルは自動的に補正される

以上の特徴からRM−CWライダーは遠方の微弱信号を精度良く測定するのに適した手法である。

最後に、RMについて文献をお教え致いた清水富士夫助教授(東大工)に感謝致します。

1) 竹内他、応用物理学会, '82 春(東京) 4aG3,　2) 桜井他, 同 4aG4.