B10　コヒーレントライダーにおける振幅加算性の成立条件の検討

Conditions for Amplitute Integration in a Coherent Lidar

竹内延夫
Nobuo TAKEUCHI

国立公害研究所
National Institute for Environmental Studies

Usually in an optical region, coherent lidar is considered so that the amplitukde is squared in each pulse due to short coherence time. On the contrary, the coherent microwave radar integrates the signal amplitude and then takes the square. Here the conditions validating the amplitude integration in an optical coherent lidar is studied, taking into account the atmospheric turbulence. If the conditions are met, the random-modulation CW coherent lidar is a prominent method in the optical region.

【はじめに】 前回のシンポジウム（C６）で擬似ランダム変調ＣＷコヒーレントライダー（ＲＭ－ＣＷ－ＣＬ）の検討について報告した[1]。コヒーレントライダー（ＣＬ）で、空間分解能を得る方法にはパルス方式、ＦＭ－ＣＷ方式があるが、これらはいずれも中間周波に変換後、自乗検波して光の強度として検出し、その後、信号の加算を行っている（強度加算ＣＬ）。一方、マイクロ波領域のコヒーレントレーダーでは振幅で加算した後、自乗することによって強い信号強度を得ている（振幅加算ＣＬ）。前回検討したＲＭ－ＣＷ－ＣＬ[2]は光の波長領域で振幅加算を行って、空間分解能が得られるＣＬである。大気中ではその揺らぎによって、十分なコヒーレント時間を得ることが難しい。揺らぎ強度の鉛直分布とKolmogorovのスペクトルを仮定してコヒーレンス時間について検討を行った。

【ＲＭ－ＣＷ－ＣＬと振幅加算条件】 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Ｓとすると基準となる時間よりｉΔｔ後に受光される受信信号光の振幅（中間周波成分ω_{IF}）は

$$u_i(\omega_{IF}) = E_R \xi_L \Sigma a_{i-j} Q_j + n_i(\omega_{IF}) \tag{1}$$

となる（ξ_Lは局発モードに依存する定数）。ω_{IF}成分を直線検波して、振幅成分を変調コードと相関をとると

$$S_i(DC) = M E_R \xi_L \xi_{IF} \{ (N+1) Q_i - \Sigma Q_j \} + \sum_{q=1}^{M} \sum_{i=(q-1)N+1}^{(q-1)N+N} n(DC)_{i+1} a_i \tag{2}$$

となる（n(DC)は雑音のω_{IF}成分がDC成分に変換された量）。後方散乱係数β_iは$S_{RM}{}^2$に比例するので

$$SNR = \langle S_{RM,i}{}^2 \rangle / \{ Var [S_{RM,i}{}^2] \}^{1/2}$$
$$= \frac{M^2 (N+1)^2 CNR_P}{\{M^4 (N+1)^4 \overline{Var[|S_i|^2]} + 2M^3 N (N+1)^2 \overline{CNR_P} + M^2 N^2\}^{1/2}} \tag{3}$$

となる。ただし$CNR_P = \langle |S_i|^2 \rangle$はパルスＣＬのＳＮＲである。

ＣＬが効率的に動作するための必要な条件は：

(1) ［受光面積と視野角］$A_r \Omega_r \simeq \lambda^2$（$A_r$は受光光学系の開口面積、$\Omega_r$は視野角）。

(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) ［スペクトル幅］ レーザスペクトル幅$\delta\nu \leqq$フィルター帯域幅$\Delta\nu_{IF} <$中間周波数ν_{IF}。

振幅加算可能であるためには

(4) ［中間周波数とゲート時間］｛位相の変化は2π以下｝ （2・距離分解能／c）・$\omega_{IF} \leqq 2\pi$
（ω_{IF}はアナログ信号のままビートダウンするときはその最終ビート周波数）

(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。

【大気の揺らぎの影響】 振幅の加算性はコヒーレンス時間τ_sが積算時間に比べて十分長いか否かに懸かっている（レーザースペクトル幅は $\delta\nu=\{(\delta\nu_\theta)^2+(1/2\pi\tau_s)^2+(\Delta\nu_{Dop})^2\}^{1/2}$ で与えられ、レーザ固有のスペクトル幅$\delta\nu_\theta$、ドップラー幅$\Delta\nu_{Dop}$が無視できるとき、$\delta\nu=1/2\pi\tau_s$の関係がある）。大気の揺らぎによる位相面の歪は受光系の有効開口径を横方向のコヒーレンス長ρ_θ：

$$\rho_0=[2.91k^2\int_0^L dzCn^2(z)(1-z/L)^{5/3}]^{-3/5} \qquad (4)$$

に制限する。

コヒーレンス時間τcはコヒーレンス長Lc／光速度で与えられる。コヒーレンス長は距離Lから戻って来た光の振幅が受光面上の２点で相関が1／eとなるときの距離で定義され[3]、送受信望遠鏡の半径を(4)式で与えられるρ_θに等しく置いたときのLの値と等しくなる。Kolomogorovのスペクトルに現れる構造定数Cn^2として図１の例[4]を取ることが知られている。各高度zにおいて水平方向に距離Lにわたって測定した場合のρ_θの値を図２（(a)$\lambda=1\mu$mと(b)10μm）に示した。また、地上から鉛直方向に測定した場合（したがってL＝z）のρ_θの値を図３に示した。RM－CW－CLでM系列の次数をn＝10（要素数:1023）としたとき積算時間は最小100μs（L＝15km）必要である。図２から地上（z＝0）では$\lambda=1\mu$mのとき光学系半径は0.3cm以下、$\lambda=10\mu$mのとき5cm以下であることが必要である。また、図３から、鉛直上方に向けて測定するときには、初めの１kmの揺らぎが大きく、それより上空はほとんど影響しないことが分かる。

なお、SNRに対しては大気の揺らぎの振幅に与える影響は揺らぎの振幅の分散値で与えられる。これについてもKolmogorovのスペクトルを仮定して計算される。

【おわりに】 本稿ではCLで振幅加算性が成立するときの条件を検討し、揺らぎの高度分布を考慮し、高層ではその条件が満たされることを示した。振幅加算のCLではSNRが飛躍的に向上することが期待される。

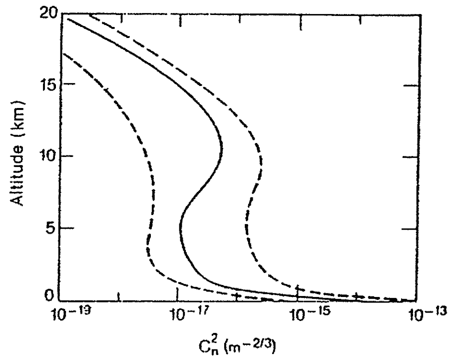

図１ 揺らぎの構造定数Cn^2の高度依存性[4]

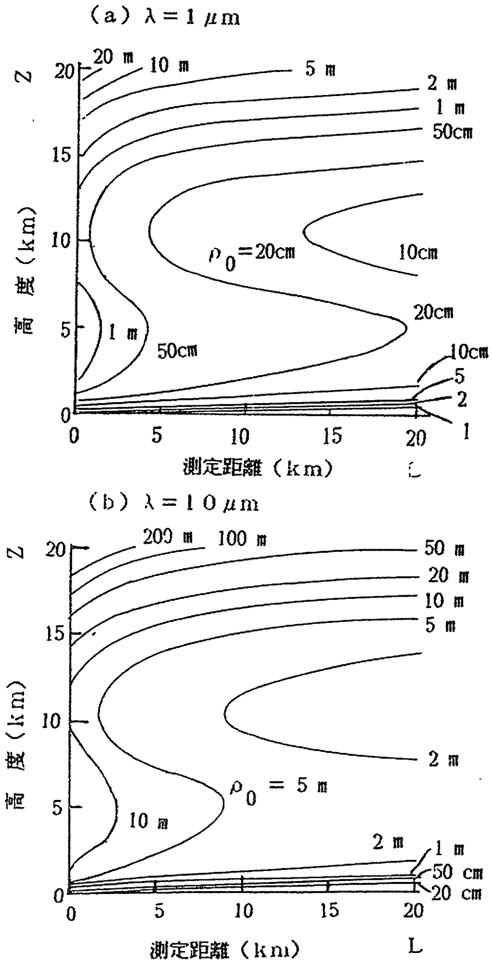

図２ 高度zにおいて水平方向に距離Lだけ測定した場合のρ_θの値。(a) $\lambda=1\mu$m、(b) 10μm

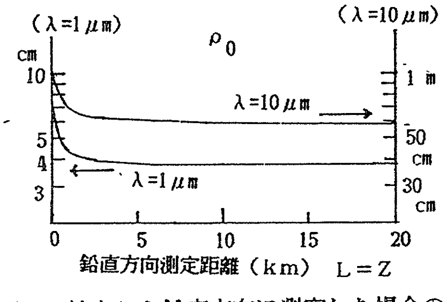

図３ 地上から鉛直方向に測定した場合のρ_θの値

1）竹内延夫：第12回レーザセンシングシンポジウム、岡山(1988.5).C6.

2）竹内延夫：第２回「光波利用センシング」シンポジウム、61-66(1988.2).

3）J.H.Shapiro,B.A.Capron,R.C.Harney:Appl. Opt. 20 (19) 3292-3313 (1981).

4）R.E.Hufnagel:Topical Mt. Opt. Propagation through Turbulence, OSA., (1974).