

レーダーエコーの位相の利用*

(地形エコーの除去など)

立 平 良 三**

1. まえがき

レーダーから発射された電波（マイクロ波）は、雨滴などによって反射され、いわゆるレーダーエコーとして受信される。エコーももちろん電波であるから、振幅と位相を持つが、通常的气象レーダーはこのうち振幅（つまりエコー強度）のみを取扱い、位相の情報は捨てられている。

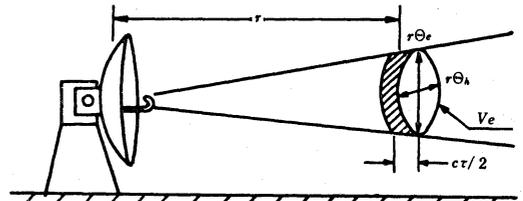
エコーの位相も取扱う測器としては、ドップラーレーダーがよく知られているが、ここでは通常的气象レーダーに話を限って、地形エコー除去などの位相情報を利用した技術について解説する。

位相情報の利用には、波長のそろったいわゆるコヒーレント（可干渉性）な電波を発振する必要がある。可視光の分野では、マイクロ波のようにコヒーレントな波を得ることが難しかったが、最近のレーザー技術の進歩により容易に単色光が得られるようになり、ホログラフのような位相を利用した技術の進歩が著しい。

最近 Seasat などの極軌道衛星に積載され、極めて分解能の高い観測をしている SAR (Synthetic Aperture Radar) も、高分解能を得るためにやはりエコーの位相情報を利用しているものであるが、気象観測を主目的とするものではないので、ここではふれない。

2. 多数の雨滴からのエコーの性質

気象レーダーからパルス的に発射された電波が、雨滴 k によって反射され、レーダーで受信される電圧 $E_k(t)$ は、



第1図 レーダーの目標体積 V_e 。 r : 距離, θ : ビーム半値幅, τ : パルス幅, c : 光速。

$$E_k(t) = A_k \cos(\omega t + \theta_k) \quad (1)$$

位相 θ_k は雨滴までの距離 r_k によってきまる。

$$\theta_k = 4\pi r_k / \lambda \quad \lambda: \text{レーダーの波長} \quad (2)$$

レーダーの電波はビーム状に発射されるので、第1図のようないわゆる目標体積内に存在する多数の雨滴からの反射波が重畳してレーダーに戻ってくる。結局、レーダーで受信される合成電圧 $E(t)$ は、

$$E(t) = \sum_{k=1}^N E_k(t) = \sum_{k=1}^N A_k \cos(\omega t + \theta_k) \quad (3)$$

N : 目標体積内の雨滴数

個々の雨滴からの反射波の電力は $1/2 A_k^2$ であるが、その合成波の電力 P は、各反射波の位相 θ_k の相互関係によってさまざまな値をとる。

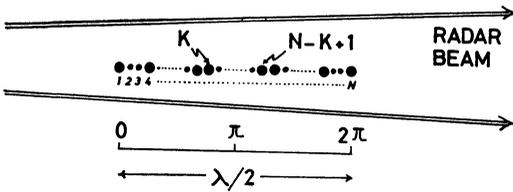
極端な例として、 θ_k が全雨滴について同一の場合を考えると、

$$P = \overline{\{E(t)\}^2} = \overline{\left\{ \left(\sum_{k=1}^N A_k \cos \omega t \right)^2 \right\}} = 1/2 \left(\sum_{k=1}^N A_k \right)^2 \quad (4)$$

もう一つの極端な例として、第2図のように θ_k が $0 \sim 2\pi$ の間に均一に分布している場合を考える。 k と

* Operational use of echo phase by conventional radar.

** Ryozyo Tatchira, 気象庁予報部.



第2図 雨滴の規則的配列の例.

$N-k+1$ の雨滴の反射波は位相が逆になるので,

$$P = \overline{\{E(t)\}^2} = \overline{\left\{ \sum_{k=1}^{N/2} (A_k - A_{N-k+1}) \cos(\omega t + \theta_k) \right\}^2} \quad (5)$$

さらに第2図のように $A_k = A_{N-k+1}$ が成立っておれば,

$$P = 0 \quad (6)$$

このような現象は例えば、多数の均一な雨滴が目標体積内に様に分布するような場合に起こりうる。

大気中の雨滴の分布は上の例のように規則的ではなく、いわゆるランダムな分布をしている。この場合の電力 P は,

$$P = \overline{\{E(t)\}^2} = \overline{\left\{ \sum_{k=1}^N A_k \cos(\omega t + \theta_k) \right\}^2} = 1/2 \sum_{k=1}^N \sum_{l=1}^N A_k A_l \cos(\theta_k - \theta_l) \quad (7)$$

$(\theta_k - \theta_l)$ の値は雨滴が相互運動しておれば時々刻々に変化する。しかし雨滴 k が雨滴 l と全く独立に運動するものと仮定すれば、 $(\theta_k - \theta_l)$ は $0 \sim 2\pi$ の間の値をランダムにとることになり、 $\cos(\theta_k - \theta_l)$ の平均値は0になる。従って $k \neq l$ の項は平均によって消去され $k=l$ の項のみが残る。

$$\bar{P} = 1/2 \sum_{k=1}^N A_k^2 \quad (8)$$

つまり、 \bar{P} は個々の雨滴からの電力の和となる。

簡単のため、目標体積内の全雨滴 (N 個) の振幅 A が等しい場合を例にとって考えてみよう。全雨滴が同位相の場合、(4) 式より、

$$P = 1/2 (NA)^2 \quad (9)$$

また雨滴がランダムに分布する場合は、(8) 式より、

$$\bar{P} = 1/2 NA^2 \quad (10)$$

目標体積中の多数の雨滴は大気中の乱流によってランダムな運動をしており、その電力は平均をとれば(10)式のようになるわけである。しかし瞬間的には均一に近

い配列になることもあり、そのときには(6)式のように電力は0になる。また別の瞬間には、反射波の位相がそろような配列となり、(9)式のように、(10)式の N 倍にも及ぶ大きな瞬時電力を示す。これが A スコープ上で降水エコーが烈しい時間変動を示す理由である。

つまり、 A スコープ上の降水エコーの変動は雨滴からのエコーの位相情報なのである。従来の気象レーダーはこの変動を邪魔物扱いにして、エコーの平均値をいかに取出すかに苦心していた。しかし実はこの変動は色々と気象学的に有用な情報を与えてくれるのである。この変動の重要な特性として、変動幅と変動周期の二つがある。次節ではまず変動幅について考えよう。

3. 降水エコーの振幅特性

降水エコーの電圧波形は一般に(3)式で表わされ、その振幅は各雨滴の θ_k が時々刻々に変わるによって様々な値をとる。もし θ_k の変動、つまり各雨滴の位置がランダムに変化しておれば、振幅が A という値をとる確率密度 $W(A)$ は次のレーリー分布に従うことが導かれている(小平, 1972)。

$$W(A) = \frac{2A}{\bar{P}} \exp(-A^2/\bar{P}) \quad (11)$$

ここで \bar{P} は(8)式で示されている平均電力である。この確率分布を用いて、振幅 A の平均値 \bar{A} および分散 σ_A^2 を計算すると

$$\bar{A} = \int_0^\infty A \cdot W(A) \cdot dA = 1/2 \sqrt{\pi \bar{P}} \quad (12)$$

$$\sigma_A^2 = \int_0^\infty (A - \bar{A})^2 \cdot W(A) \cdot dA = (1 - \pi/4) \bar{P} \quad (13)$$

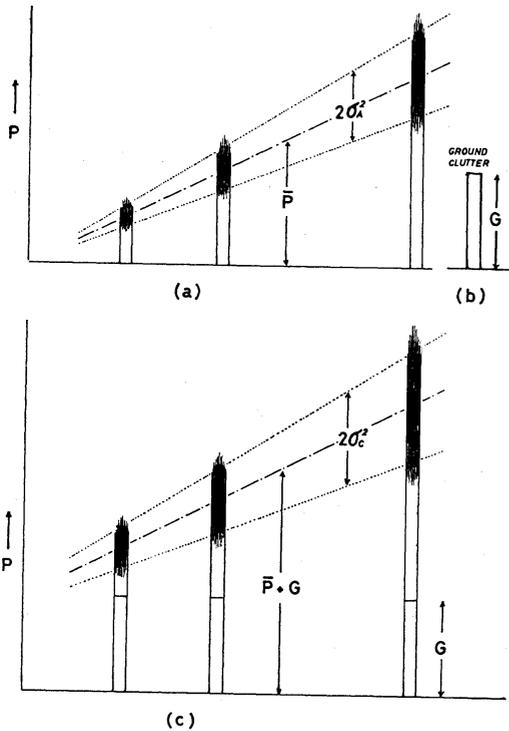
(13) 式は、振幅 A の分散 σ_A^2 と平均電力 \bar{P} が比例関係にあることを意味しており、これを利用して、次節の「地形エコー除去技術」が開発された(Tatehira・Shimizu, 1978)。

4. 地形エコーの除去技術

言い旧されたことではあるが、気象レーダーは広範囲の3次元空間内の降水粒子の分布を時々刻々に観測できるという優れた性能を持っている。しかし、同時に次のような弱点もある。

(1) レーダーの目標体積が距離と共に拡大し、しかも地表面から離れるので、観測が均質でないこと。

(2) 地形によるエコーなどが混在し、降水エコーの観



第3図 降水エコーと地形エコーの電力変動。
 (a) 降水エコーのみ
 (b) 地形エコー
 (c) 降水エコーと地形エコーの重畳

測を妨げること。

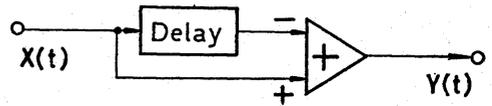
地形エコーの除去ができれば、降水エコーを人手でスケッチするという前近代的な観測作業から解放されるわけで、それはレーダー観測者の長年の夢であった。

これまでに、晴天時の地形エコーを記憶させておき減算を行うなど、色々の方法が試みられたが、最終的に(13)式の関係を利用することによって実用的な技術が確立された(立平, 1980)。

(13)式の関係を図示すると第3図(a)のようになる。一方、レーダーの目標体積中の地形は降水粒子のような運動はせず、近似的に静止していると見てよいので、そのエコーは第3図(b)のように振幅の変動がない。この両者を重畳すると第3図(c)のようになるが、このときの分散 σ_c^2 はもとの降水エコーの分散 σ_A^2 とほぼ等しいことが証明される(立平他, 1976)。従って、(c)の重畳エコーを High-pass フィルターに通して直流成分を除き、変動分だけをとり出してその分散を求め

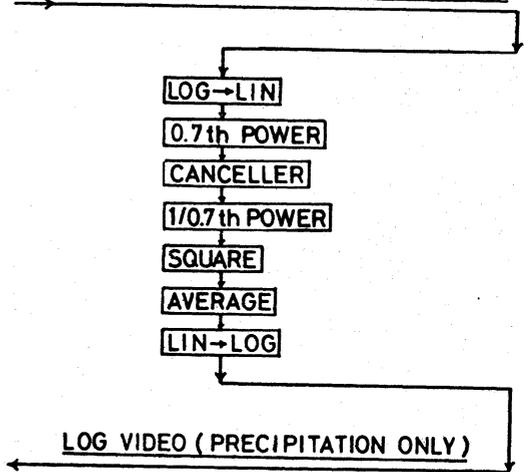
1980年12月

DELAY TIME: Pulse Repetition Period T



第4図 Delay を用いた Canceller.

LOG VIDEO (PRECIPITATION + GROUND)



第5図 気象庁の地形エコー除去の方式。

ればもとの降水エコーの分散 σ_A^2 が推定できる。さらに(13)式を適用して降水エコーの平均電力 \bar{P} が求められる。つまり地形エコーは除去され、降水のみのエコー強度が抽出されたわけである。

実用的な High-pass フィルターとして、第4図のような Delay 線を利用したリアルタイムの Canceller がよく用いられる。この図のような送信周期 T を Delay 時間とする消去回路の場合、出力 Y(t) は、

$$\overline{Y(t)} = \overline{X(t) - X(t-T)} = 0 \quad (14)$$

$$\sigma_Y^2 = \overline{Y^2(t)} - \overline{Y(t)}^2 = \overline{Y^2(t)} \quad (15)$$

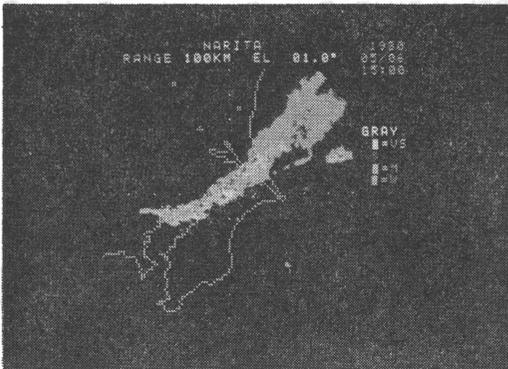
$$\overline{Y^2(t)} = \overline{[X(t) - X(t-T)]^2} = 2\sigma_X^2 \{1 - \rho_T\} \quad (16)$$

ρ_T : X(t) と X(t-T) の間の相関係数

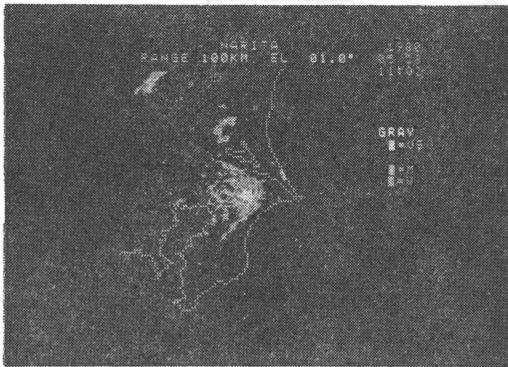
(16)式より、

$$\sigma_X^2 = \overline{Y^2(t)} / (2(1 - \rho_T)) \quad (17)$$

つまり、入力 X(t) の分散 σ_X^2 は、出力 Y(t) の自乗平均から求められる。 ρ_T の値は送信周期 T と共に減少し、通常のレーダーの送信周期 T (約 4 ms) の場合は一般にかなり 0 に近いと考えてよい。しかし正確には次節で説明するように、 ρ_T は雨滴の動く速さに関係し、動きの遅いときはかなり大きな値となり、 σ_X^2 を求める

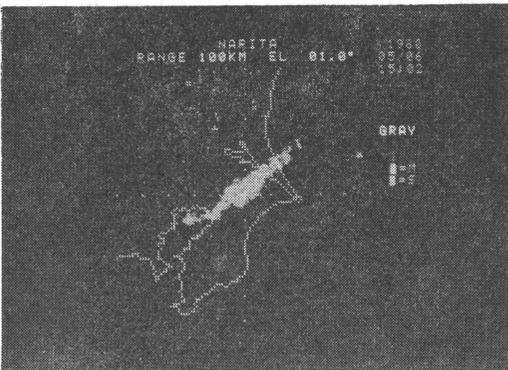


(a)



(b)

第6図* (a) 地形エコー除去の例 (1980年5月6日15時, 新東京航空気象台レーダー). (b) 晴天時の地形エコー (東京管区気象台提供)



第7図* じょう乱探知レーダーの観測例 (1980年5月6日15時, 新東京航空気象台レーダー). 第6図(a)の带状エコーに対応するじょう乱度を示す. ただし等価降雨強度が8mm/hr以上のエコーについてのみ表示されている(東京管区気象台提供).

際の誤差を生ずる. これを避けるには送信周期 T の2倍とか3倍の Delay を含む回路が使われる.

以上のような比較的簡単な原理がなぜもっと早く発見されなかったのか, 不思議な気がするが, 一つの原因は気象レーダーの受信機が対数特性だったことによるものと思われる. 対数特性の場合, 降水エコーの時間変動の分散は平均電力 \bar{P} に関わらず一定になることが容易に導かれる. 従ってエコーの分散から \bar{P} を推定することは不可能であって, これまでの議論はすべて直線特性の受信機にしか適用できないのである.

気象レーダーで対数特性が使われているのは, 降水エコーの強さの範囲が大きく, そのような大きなダイナミック・レンジを持った直線特性受信機の製作が困難だったことによる. しかしこの困難は電子工学の進歩により実はかなり前から解決されていたのだが, 依然として固定観念にとらわれつづけていたわけである.

気象レーダーよりもっと広範囲なユーザーを持つ各種の探知レーダーでも, 地形エコー除去のニーズはあった. しかしこの分野ではドップラーレーダーによるMTI (Moving Target Indicator) 技術で簡単に解決できた. しかしこの方法では, 地形エコーを消すだけでなく降水エコーの強度も変えてしまうため, 気象レーダーには適用できなかった.

以上は極めて原理的な説明であるが, 実際問題としては, 地形エコーも僅かながら時間的に変動するため, その分散が地形エコーの消え残りとしてレーダー指示器上に現われてくる. また第3図の σ_A^2 と σ_C^2 が厳密には等しくないのが, これが降水エコーの測定誤差になる.

これらの問題を解決するには, 直線特性のエコーではなく, その0.6~0.7乗を使うのが実用的であることが明らかにされた (Tatehira・Shimizu, 1980). このような特性を使うと,

(1) 地形エコー単独の場合, 直線特性のときの消え残りをさらに約15dBも減少させることができる.

(2) 降水エコーと地形エコーが重畳している場合, 地形エコーの消え残り $\sigma_A^2 \sim \sigma_C^2$ の差がうまくキャンセルして, 降水エコーの強度を高い精度で取出すことができる.

結局, 通常の気象レーダーによる対数特性エコーは, 第5図のように0.7乗特性に変換され, Delay線を含む Canceller を通って, 対数特性の降水エコーのみが出力

* 第6図, 第7図は本来はカラー写真なので, 強度階調はカラーでは明瞭に表示されている.

される。これらの処理はリアルタイムに行われ、出力された降水エコーは直ちにAスコープやPPIに表示することができる。第6図はその一例である。

5. 風速変動の測定

前節の地形エコー除去には、降水エコーの時間変動の振幅特性が利用された。この節では、変動の周波数特性を利用すると、目標体積内の風速変動が測定できることを説明しよう。周波数特性というのは、平たく言えばエコーの時間変動の速さである。

第2節で説明したように、降水エコーの振幅変動は目標体積内の雨滴の運動(位相)によるものであるが、実は(2)式からわかるようにレーダービームの方向の成分、つまり動径速度(Radial Velocity)のみが関与している。

目標体積内の各雨滴はさまざまな動径速度を持つが、これを表現するのに速度スペクトラムが使われる。さらに簡単に記述するには、平均速度 \bar{V}_r とそのまわりの標準偏差 σ_v がよく用いられる。

雨滴は大気の水平運動の良いTracerなので、レーダービームがほぼ水平のときは、 σ_v は目標体積内の水平風速(動径成分)の乱れを示すものと見てよい。所でこの σ_v は次のようにして降水エコーの時間変動からリアルタイムに導くことができる(\bar{V}_r の方はドップラーレーダーでなければ測定できない)。

第4図のようなCancellorが、送信周期 T の n 倍のDelay時間を持つ場合を考えると、出力 $Y(t)$ の自乗平均は式(16)と同様にして、

$$\bar{Y}^2(t) = 2\sigma_x^2(1 - \rho_{nT}) \tag{18}$$

所で相関係数 ρ_{nT} は雨滴の相互運動が激しくなるに従って $1 \rightarrow 0$ に近づくという性質がある。つまり雨滴の動きの遅いときは nT 時間内に各雨滴からの反射波の位相があまり変化せず、従ってその合成波の振幅の変化が少ないので1に近い相関係数が計算される。しかし動きが早ければ振幅が大きく変化し相関係数 ρ_{nT} は0に近づくということである。

以上の説明からわかるように、 ρ_{nT} は雨滴の動径速度の分散 σ_v^2 に関係する量で、雨滴の速度スペクトラムをガウス分布で近似すると、そのフーリエ変換として次の式で表わせる。

$$\rho_{nT} = \exp\{-8(\pi n T \sigma_v / \lambda)^2\} \tag{19}$$

(18)と(19)式から、

$$\bar{Y}^2(t) = 2\sigma_x^2[1 - \exp\{-8(\pi n T \sigma_v / \lambda)^2\}] \tag{20}$$

ここで波長 λ が 5.66 cm の気象レーダーについて、 $T = 1$ ms, $n = 1$ と $n = 10$ の2台のCancellorを使うと、その出力はそれぞれ、

$$\bar{Y}_1^2(t) = 2\sigma_x^2(1 - \exp(-0.0246\sigma_v^2)) \tag{21}$$

$$\bar{Y}_2^2(t) = 2\sigma_x^2(1 - \exp(-2.46\sigma_v^2)) \tag{22}$$

σ_v は大気中で数 m/s のオーダーなので、(22)式は近似的に、

$$\bar{Y}_2^2(t) = 2\sigma_x^2 \tag{23}$$

従って、

$$\bar{Y}_1^2(t) / \bar{Y}_2^2(t) = 1 - \exp(-0.0246\sigma_v^2) \tag{24}$$

(24)式は、2台のCancellorの出力の比をとることによって、リアルタイムに σ_v が求まることを示している。この原理にもとづいて製作されたのが「空港用じょう乱探知レーダー」(志崎, 1980)で、第7図にその観測例を示す。ここでは σ_v (じょう乱度)を次の3段階で表示している。

S (Slow) 3 m/s 以下

M (Moderate) 3~8 m/s

F (Fast) 8 m/s 以上

じょう乱の探知には、(20)~(23)式の議論からわかるように送信周期 T は 1ms 程度にする必要がある。この場合、特別な工夫をしない限りレーダーの探知範囲は半径 150 km 以下に押えられる。気象庁の空港用じょう乱探知レーダーでは最大探知半径は 128 km に設計されている。

σ_v を大気じょう乱度の目安として利用する場合には、次のことに注意する必要がある。

(1) σ_v はレーダー目標体積内における風速の乱れの指数であるから、目標体積の大きさおよび高度が距離と共に増大することによって見かけ上の変化が生ずる。

(2) 目標体積内の風速の乱れは、風のシャー的なものと乱流的な性格のものに大別できるが、このうちシャー的なものは方向性を持つ。 σ_v は風の動径成分にのみ関連するものであるから、シャーの卓越するような場合は、レーダーの方位によって風速の乱れを十分表現していない場合も起こりうる。

6. あとがき

レーダーエコーの位相の利用については、これまでドップラーレーダーばかりが話題にされていた感じがあるが、通常的气象レーダーでもここで解説したように幾つかの技術が育ってきている。

通常レーダーは個々の送信パルスごとに電波がコヒー

レント（可干渉性）になっているが、ドップラーレーダーではさらに送信パルス相互間でもコヒーレント性が保持されており、位相の利用範囲は一層拡大される。

気象レーダーにドップラー能力を持たせるには40%程度のコストアップが必要とされているが、現業用の気象レーダーのドップラー化もそう遠い未来のことではなからう。その暁におけるレーダーエコーの位相の利用はまた一段と目覚しいものがあるろう。

文 献

- 小平信彦, 1972: 気象レーダーの基礎, 気象研究ノート, 112, 247-302.
志崎大策, 1980: 空港用じょう乱探知レーダ, 気象

研究ノート, 139, 62-67.

立平, 清水, 小佐野, 1976: 地形エコーと重畳した降水エコーの強度測定—地形エコー除去の方法, 研究時報, 28, 313-316.

Tatehira, R. and T. Shimizu, 1978: Intensity measurement of precipitation echo superposed on ground clutter—A new automatic technique for ground clutter rejection, Preprints, 18 th Conf. Radar Met., 364-369.

Tatehira, R. and T. Shimizu, 1980: Improvement in performance of ground clutter rejection, Preprints, 19 th Conf. Radar Met., 176-179.

立平良三, 1980: 気象レーダーのデータ処理, 気象研究ノート, 139, 33-78.