W５　時間微分信号を用いた偏波 FM-CW レーダ

森山敏文　山口芳雄　笠原一　山田寛喜

新潟大学工学部

1. まえがき

地中レーダに関する研究が盛んに行われている．地中レーダで問題となることは，地表面と地中内部の不均質によるクラッタの影響，また電波の減衰などが挙げられる．我々は，FM-CW レーダを用いて地中や雪中の埋没物体検出に関する研究を行ってきた．そして，このレーダにレーダポーラリメトリを偏波フィルタとして適用することにより，地表面の反射を大きく抑圧させることができた[1]．また，FM-CW レーダの時間信号を微分することにより，電波の減衰を補正できることがわかっている[2]．この補正を行っても，電波の位相情報は保存されるため，偏波を考慮して取得した時間信号を微分しても，レーダポーラリメトリの理論がそのまま適用可能であると考えられる．そこで，今回の報告では，これらの二つの理論を適用し，偏波情報が保存されることの確認とその有効性を検討した．

2. FM-CW レーダ

2.1 時間微分信号[2]

FM-CW レーダとは，線形に周波数変調を施した連続波を目標物体に対して照射し，その送信信号と物体からの反射信号から得られるビート信号の周波数により，物体までの距離を計測するものである．原理図を図１に示す．ビート信号は，次のように表される．

$$s_b(t)=gA\cos(2\pi f_b t+\theta) \tag{1}$$

g：ターゲットの反射係数

A：距離に関する減衰項

$f_b=\dfrac{2\sqrt{\varepsilon_r}R}{c}M$：ビート周波数

M は変調率，c は光速を表す．このように，ビート信号の周波数は，物体の距離に比例しており距離が計測できる．しかし，ビート信号の振幅は，距離によって減衰するため，遠距離の計測が難しい．そこで，次のような信号の性質から距離に関する減衰を補正することができる．

$$FT\left[s_b(t)\right]=j2\pi f_b\, S_b(j2\pi f_b)$$
$$FT\left[\frac{\partial^n}{\partial t^n}s_b(t)\right]=(j2\pi f_b)^n S_b(j2\pi f_b) \tag{2}$$

ここで，FT はフーリエ変換である．つまり，微分した信号に対してフーリエ変換を行うと周波数(距離)に関する項が乗ぜられ，減衰項を補正してくれる．そこで，このような微分したビート信号を時間微分信号と呼ぶことにする．この時間微分信号のスペクトラムは，今までのビートスペクトラムに距離に関する振幅項と，位相項 j が掛かっているだけであり位相成分は，そのまま保存される．

2.2 合成開口処理

合成開口処理について説明する．図２に示すような反射係数 g を持つ物体がフレネル領域内に存在すると仮定すると，物体が存在する距離 $z=z_0$ でのビートスペクトラムは，次のようになる．

$$U(x,z_0)=\int g(x_0,z_0)\,h(x-x_0,z_0)\,dx_0 \tag{3}$$

但し，$h(x-x_0,z_0)=\exp\left[j\dfrac{4\pi f_0}{c}\left\{z_0+\dfrac{(x-x_0)^2}{2z_0}\right\}\right]$

この U は，形式上フレネルホログラムの一種と見なせるため，フレネル逆変換を施すことにより物体の反射係数 g を取り出すことができ，物体像を再生することができる．これを，FM-CW レーダにおける合成開口法と呼ぶ．

3. レーダポーラリメトリ[1]

レーダポーラリメトリとは，電波の持つベクトル性である偏波の情報を最大限に利用する技術である．ある複素偏波比 ρ の電磁波が物体に照射されると，その散乱波の偏波状態は一般に入射波のものとは異なったものとなる．この偏波状態の違いは，その物体特有の散乱特性を示すものであり，それは散乱マトリクス $[S]$ によって表すことができる．その過程を Jones ベクトル形式で表現する．

$$E_s(HV)=\left[S(HV)\right]E_i(HV) \tag{4}$$

$$\left[S(HV)\right]=\begin{bmatrix}S_{HH} & S_{HV}\\ S_{VH} & S_{VV}\end{bmatrix}\approx\begin{bmatrix}g_{HH} & g_{HV}\\ g_{VH} & g_{VV}\end{bmatrix} \tag{5}$$

E_i・E_s は入射波，散乱波を表す．また，散乱マトリクスと偏波を考慮した物体の反射係数 g が以上のような対応関係がある．このときの受信電力は，

$$P=\left|h(HV)^T E_s(HV)\right|^2=\left|h(HV)^T\left[S(HV)\right]E_i(HV)\right|^2 \tag{6}$$

となる．T は転置を表す．この式から受信電力の最適化が行える．

4. 実験と考察

測定状況を図3に示す．測定対象物は，長さ85cm幅15cmの金属板であり，走査方向に対して約135度傾けて地表面から下約38cm付近に埋めてある．測定偏波条件として，走査方向をH偏波，それに直交する方向をV偏波とし，送受信アンテナの偏波状態をHH·HV·VVの三つで測定を行った．

図4に通常の実験結果に対して地表面の受信電力を最小(0)にしたCo-pol nullイメージを示す．また，図5に2階微分した時間微分信号のデータを用いたCo-pol nullイメージを示す．どちらの画像も地表面の反射は抑圧されおり，その時の偏波状態もほぼ一致した．また，物体の反射は2階微分を行った方が強調されており，距離に関する減衰が補正されているのがわかる．

5. まとめ

偏波FM-CWレーダに，時間微分信号を用いる手法について検討した．その結果，時間微分信号を用いても偏波情報は保存され，従来通りにレーダポーラリメトリを適用することができた．また，微分操作により距離に関する減衰を補正することができた．これらのことより，レーダポーラリメトリと時間微分信号を併用することは，FM-CWレーダにおいて有効であることが確認できた．

謝辞

この研究の一部は，文部省科学研究費重点領域研究による援助のもとで行われたものであり，感謝致します．

参考文献

[1] T. Moriyama, et al, "Reduction of Surface Clutter by a Polarimetric FM-CW Radar in Underground Target Detection," IEICE Trans. Commun., vol.E78-B, no.4, pp.625-629, April 1995.

[2] 笠原一,山口芳雄,森山敏文,山田寛喜,"FM-CW レーダの深部探査性能の向上について,"信学技報,SANE 95-50,pp.61-66,July.1995.

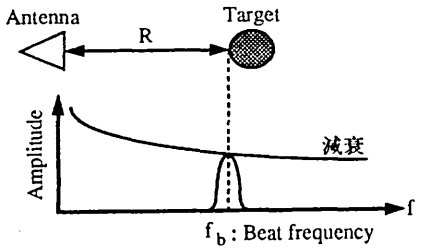


図1 FM-CWレーダの原理図

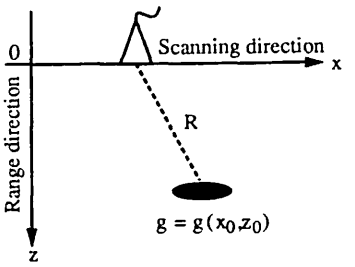


図2 測定空間

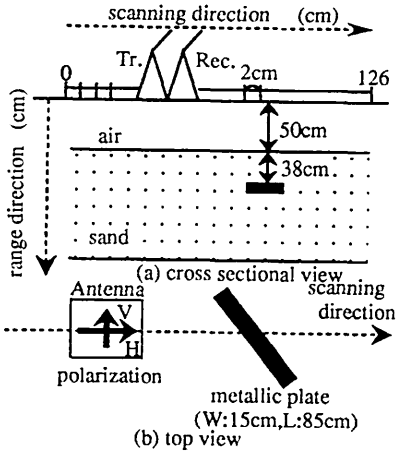


図3 測定状況

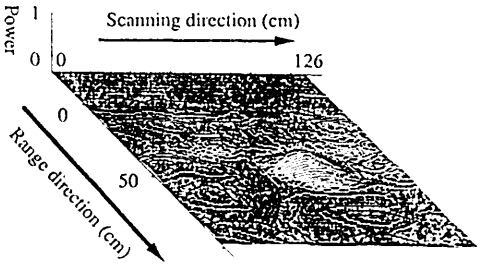


図4 地表面のCo-pol nullイメージ(微分なし)

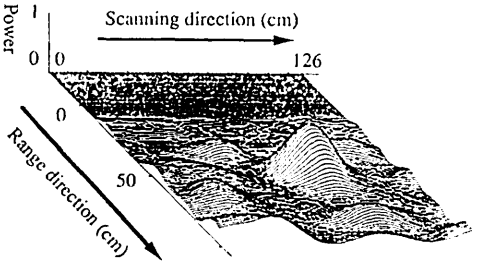


図5 地表面のCo-pol nullイメージ(2階微分)