

V14 ホーンアンテナを用いたFM-CWレーダ における分解能劣化補正の検討

笠原一 山口芳雄 山田寛喜

新潟大学工学部

1. まえがき

著者らは、これまでFM-CWレーダによる地中埋没物探査の研究を行ってきた¹⁾。FM-CWレーダは、距離分解能が掃引周波数幅に依存することから、広帯域が望まれる。一方、土壌中における電波の減衰を考慮すると、できるだけ低い周波数を利用し、減衰を抑えることも要求される。この2つから、リッジホーンアンテナを用いて、広帯域化、低周波化している。その反面、このアンテナを用いると、周波数により信号に位相、振幅とも歪みが生じ、ターゲットの検出精度（距離分解能）が劣化する。そこでこの報告では、リッジホーンアンテナ内を伝搬する電波の周波数特性を認識し、その特性を打ち消すことで、分解能劣化を補正する。また、その補正を地中埋没物探査に適用し有効であることを示す。

2. FM-CWレーダ

FM-CWレーダは、線形な周波数変調を施した連続波をターゲットに対して照射し、その送信信号とターゲット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、ターゲットまでの遅延時間（距離）を計測するものである¹⁾。ビート信号は次式の様に表される。

$$s_0(t) = g A \cos[2\pi M \tau_0 t] \quad (1)$$

g : ターゲットの反射係数

A : 距離に関する減衰項

$M = \frac{\Delta f}{\Delta t}$: 周波数変調率

ここで、 Δf は掃引周波数幅、 Δt は掃引時間、 τ_0 は遅延時間を表す。これを $-\frac{\Delta t}{2} \leq t \leq \frac{\Delta t}{2}$ でフーリエ変換し、遅延時間 τ で表せば次式となる。

$$S_0(\tau) = g A \Delta t \frac{\sin[\pi(\tau - \tau_0)\Delta f]}{[\pi(\tau - \tau_0)\Delta f]} \quad (2)$$

よって、sinc関数のピーク位置よりターゲットの遅延時間が推定される。また、式(2)よりFM-CWレーダの遅延時間の分解能はsinc関数のスペクトル幅で決定され、掃引周波数幅 Δf に依存することが分かる（図1）。

3. 時変性を有するビート信号

地中FM-CWレーダで要求されるアンテナは、低周波（L-band）において広帯域にわたりリターンロスが少なく、放射ビームが鋭いことである。これらを実現するアンテナとしてリッジホーンアンテナを用いている。しかし、これは導波管に近い伝搬特性を示し、伝搬する電波の周波数によって、伝搬速度、減衰係数が異なる²⁾。従って、このアンテナを用いた場合、信号に周波数特性を受ける。FM-CWレーダにおいては観測時間と掃引周波数が比例しているため、この周波数特性によりビート信号は時変性信号となる。この場合の時変性ビート信号 $s(t)$ は次式で表せる。

$$s(t) = g A \alpha(t) \cos[2\pi M \tau_0 t + \beta(t)] \quad (3)$$

ここで位相 $\beta(t)$ は t に対し非線形であるため、この時変性ビート信号 $s(t)$ の周波数スペクトルは $S_0(f)$ に対して歪んだスペクトルとなり、分解能劣化を引き起こす。

4. 分解能劣化の補正

正確なターゲット検出を行うには、時変性ビート信号より $\alpha(t)$ 、 $\beta(t)$ を取り除く補正が必要である。そのために、まず以下に示すHilbert変換により時変性ビート信号を複素化する³⁾。

$$\begin{aligned} \tilde{s}(t) &= s(t) + j \int \frac{s'(t')}{t-t'} dt' \\ &= g A \alpha(t) \exp[-j 2\pi M \tau_0 t] \exp[-j \beta(t)] \\ &= \bar{s}_0(t) \bar{h}(t) \end{aligned} \quad (4)$$

$\bar{s}_0(t) = g A \exp[-j 2\pi M \tau_0 t]$: 複素ビート信号

$\bar{h}(t) = \alpha(t) \exp[-j \beta(t)]$: アンテナの伝搬特性関数

これよりアンテナの伝搬特性関数 $\bar{h}(t)$ が求まれば、その複素共役 $\bar{h}^*(t)$ を式(4)に乗じることにより周波数特性を除去できる。 $\bar{h}(t)$ を取得するためには、送/受信アンテナを互いに向かい合わせ信号を取得し、同様にHilbert変換を施す。この場合の観測信号は次式となる。

$$\tilde{s}^{com}(t) = \bar{s}_0^{com}(t) \bar{h}(t) + \bar{w}(t) \quad (5a)$$

$$\bar{s}_0^{com}(t) = A_1 \exp[-j 2\pi M \tau_1 t] \quad (5b)$$

ここで、 $\tilde{s}_0^{com}(t)\tilde{h}(t)$ が直接到達する信号で、 $\tilde{w}(t)$ が多重反射等の不要信号である。まず、 $\tilde{w}(t)$ は周波数フィルタにより近似的に除去する。そして、 $M\tau_0$ だけ周波数シフトさせれば $\tilde{h}(t)$ を取得できる。またここでは、時間-周波数解析の一手法である STFT (短時間フーリエ変換) により補正の有効性を確認する。そこで、アンテナ開口面より 20cm 遠ざけた鉄板の反射信号に対し補正を施してみた。表1に測定条件を示す。図1(a)、図1(b)に補正前、補正後の STFT 結果を示す。補正前では周波数が低い程、遅延時間が遅く、周波数が高い程、減衰が激しい。これに対し、補正後では補正前に比べて周波数特性が補正されている。図2に周波数スペクトルを示す。補正前では半値幅約 2.42 [ns] であったが、補正後では半値幅約 1.91 [ns] に向上していることが分かる。

5. 地中埋没物探査実験

次に、以上に示した補正を地中埋没物探査に適用した結果を示す。図3に測定状況、図4(a)、図4(b)に補正前、補正後の検出結果を示す。補正前では、地表面反射と鉄板の反射が重なってしまい、分離されていない。一方、補正後では2つのスペクトラムが良好に分離され、6.5 [ns] 付近に鉄板の像が明瞭に検出されている。

6. まとめ

時変性ビート信号に対し、Hilbert変換を用いて周波数特性を補正する方法について示し、STFT結果をもとにその有効性を示した。また、この補正が地中埋没物探査にも有効であることを実験により示した。

参考文献

- [1] Y. Yamaguchi and M. Sengoku, "Detection of objects buried in sandy ground by a synthetic aperture FM-CW radar," *IEICE Trans. Common.*, vol. E76-B, no. 10, pp. 1297-1303, 1993.
- [2] C. A. Balanis, *Advanced Engineering Electromagnetics*, Chapter 8, Wiley, 1989.
- [3] C. S. Burrus, *Synthetic aperture radar*, Chapter 1, Springer-Verlag, New York, 1988.

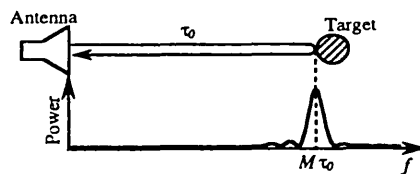


図1 FM-CWレーダの原理

表1 測定条件

開始周波数	266 [MHz]
終了周波数	1000 [MHz]
掃引時間	4.4 [ms]
サンプリング点数	88

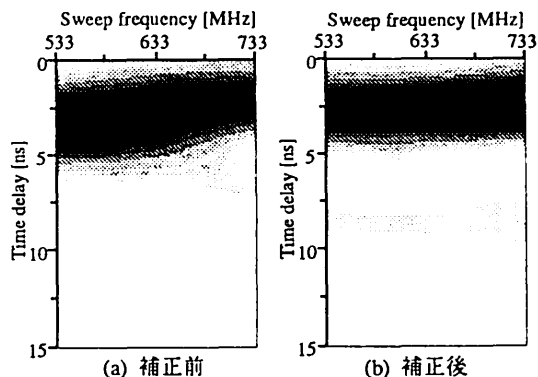


図2 反射信号のSTFT結果

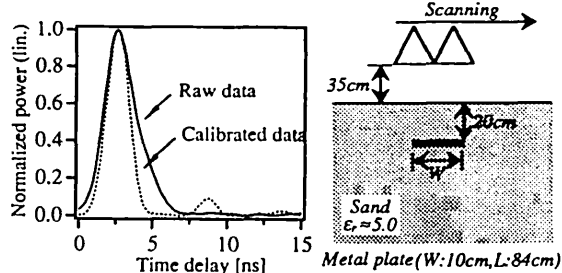


図3 反射信号のスペクトル

図4 測定状況

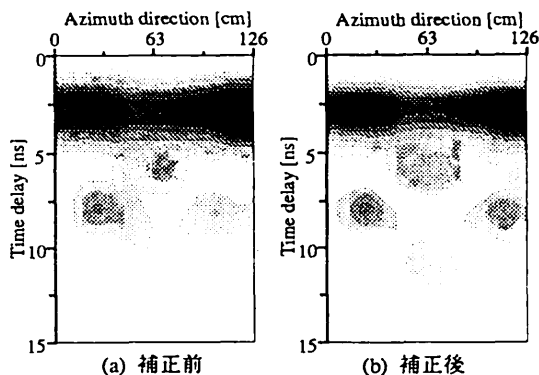


図5 検出結果