

合成開口 FM-CW レーダによる物体の検出

正 員 山口 芳雄[†] 准 員 三本 雅[†]
 正 員 川上 温^{†*} 正 員 仙石 正和[†]
 正 員 阿部 武雄[†]

Detection of Objects by Synthetic Aperture FM-CW Radar

Yoshio YAMAGUCHI[†], *Member*, Masashi MITSUMOTO[†], *Associate Member*,
 Tatsushi KAWAKAMI^{†*}, Masakazu SENGOKU[†] and Takeo ABE[†], *Members*

あらまし FM-CW レーダはパルスレーダに比べて近距離の物体を計測するのに適している。今まで実開口レーダとして物体までの距離を測定するために用いられてきた FM-CW レーダを物体のイメージングに応用するために、ここでは新たに合成開口手法を取り入れて、その基本的な特性や特徴を調べた。この論文では合成開口 FM-CW レーダの原理と基礎的な実験結果について述べる。実験では、Xバンドのマイクロ波を用いて自由空間におかれた金属平板、金属管の検出を行った。その結果、合成開口手法を用いた FM-CW レーダは近距離におかれた物体の高精度検出レーダとして十分動作することが確認できた。

1. まえがき

レーダは一般にアンテナと物体間の距離を計測するものであり、今までは電波の遅延時間を利用したパルスレーダが数多く用いられてきた^{(1),(2)}。しかし、検出されるべき物体 (例えば、埋没物) がレーダから 2~3 m 以内の近い距離にある場合、パルスレーダではナノ秒~ピコ秒オーダーの非常に高精度な時間分解能をもつ装置が要求される。一方、FM-CW レーダでは送信に周波数変調を施した連続波を用い反射波とのビート周波数を計測しているので装置の高速時間応答性は要求されない⁽²⁾。そのため、我々は雪中埋没物体の探査をはじめとして FM-CW レーダの研究を行ってきた^{(3)~(6)}。

今までの FM-CW レーダでは実開口アンテナを用いて単に物体までの距離を計測するもの⁽⁷⁾とイメージングを行おうとするものがある。そのうち、物体のイメージングに関してはアンテナを走査するもの^{(3)~(5)}や、アンテナを固定しておき計測シーンの時間変化⁽⁸⁾を調べるものがある。しかし、実開口 FM-CW レーダで、高分解能に物体を検出しようとするれば、指

向性の鋭いアンテナを使わなければならない。このアンテナを実現するには、開口面積を大きくする必要があり、レーダ実装に実用的ではない。そのため、開口面積の小さなアンテナでも高精度の物体検出ができるように、この論文では FM-CW レーダに対して合成開口法の適用性を検討した。今まで FM-CW レーダに対してはパルスレーダ^{(9),(10)}や多周波ホログラフィックレーダ⁽¹¹⁾に用いられているような合成開口法を使った高精度な物体の検出やイメージングに関する研究は行われていない。この研究では、1~2 m 程度の近距離におかれた物体の高精度な検出やイメージングを目的として、その基礎的な検討を行った。以下、2. では FM-CW レーダの簡単な原理を述べ、3. でこのレーダによるビートスペクトルデータがホログラムデータに対応すること、4. で高精度な物体検出のための合成開口法と 5. でデータ処理方法を示すと共に 6. で自由空間におかれた具体的な金属平板、金属管の検出実験の結果について述べる。

2. FM-CW レーダの原理

ここでは、FM-CW レーダによる距離計測の原理を簡単に説明する。FM-CW レーダは線形に周波数変調された連続波を目標物体に向けて照射し、物体からの反射波と送信周波数とのビート周波数によって物体ま

[†] 新潟大学工学部情報工学科, 新潟市
 Faculty of Engineering, Niigata University, Niigata-shi, 950-21
 Japan

* 現在, (株)トキメック

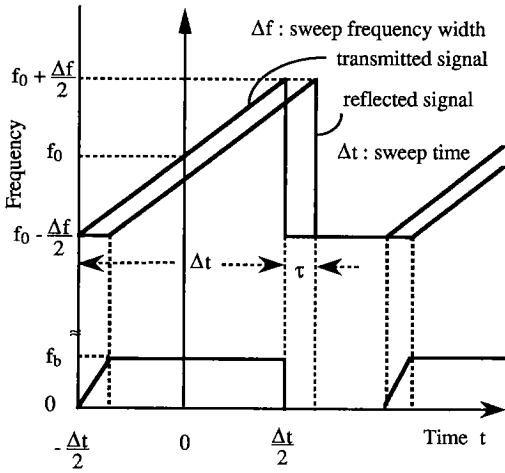


図 1 FM-CW レーダにおける時間と周波数の関係
Fig. 1 Relation between time and frequency in FM-CW radar.

での位置を計測するものである。図1のように、のこぎり波によって送信信号を周波数変調するものとするば、時間関数としての送信信号 $S_{tr}(t)$ は次式で表される。

$$S_{tr}(t) = A \cos \left[2\pi \left(f_0 t + \frac{M}{2} t^2 \right) \right] \quad (1)$$

但し、

A : 振幅

f_0 : 掃引開始周波数

t : 時間

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

Δf : 掃引周波数幅

Δt : 掃引時間

次に、図2のように送信アンテナより距離 r だけ離れた位置におかれた物体に、この信号を照射し、反射信号を送信アンテナと同じ位置で受信したとする。物体の形状を反映する反射係数分布 (あるいは再放射源分布)^{(13),(14)} を

$$g = g(x_0, z_0) \quad (2)$$

(x_0, z_0) : 物体の座標

とすると、受信信号 $S_{rec}(t)$ は、 $\tau = 2r/c$ (c : 光速) の時間遅れをもって受信され、

$$S_{rec}(t) = gA' \cos \left[2\pi \left\{ f_0(t - \tau) + \frac{M}{2}(t - \tau)^2 \right\} \right] \quad (3)$$

A' : 反射係数以外の要因による振幅

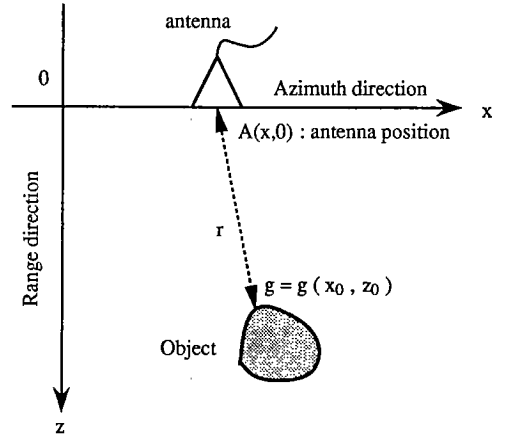


図 2 アンテナと物体の位置関係
Fig. 2 Positions of antenna and object.

と表せる。ここで振幅項 gA' は厳密には周波数、時間の関数となるが、簡単のため掃引周波数範囲で一定と仮定しておく。これら二つの波を2乗検波し、フィルタに通すことによって、次の時間変動項をもつビート信号 $S_b(t)$ を得ることができる。

$$S_b(t) = gAA' \cos \left[2\pi \left(f_0 \tau + M \tau t - \frac{M}{2} \tau^2 \right) \right] \quad (4)$$

式(4)の時間 t に関する係数から

$$M \tau = \frac{2M}{c} r = \frac{2}{c} \frac{\Delta f}{\Delta t} r = f_b \quad (5)$$

とおくことができ、これはビート周波数 f_b を表している。 f_b は距離 r に比例するため、物体までの距離計測はビート信号の周波数を求めることによって決定される。これがよく知られている FM-CW レーダの基本原則である。ここで注意することは FM-CW レーダでは式(4)で表される振幅の測定しか行っていないことである。

さて、レーダから 1~2 m 程度におかれた物体の距離計測では、本レーダシステムにおいて、

$$f_0 = 8.7 \times 10^9 \text{ Hz}, \tau \approx 10^{-8} \text{ s}, \Delta t = 5.2 \times 10^{-3} \text{ s},$$

$$M \approx 2 \times 10^{11}, f_0 \tau \approx 10^2, M \tau \approx 2 \times 10^3, \frac{1}{2} M \tau^2 \approx 10^{-5}$$

程度なので、式(4)の \cos 関数中で第3項は他の項に比べて無視できる。それ故、式(4)は、

$$S_b(t) = gAA' \cos [2\pi(f_b t + f_0 \tau)] \quad (6)$$

と近似できる。本論文では、ビート信号 $S_b(t)$ のフーリエ変換によってビート周波数のスペクトルを求めている。具体的に式(6)を図1の $-\Delta t/2 \leq t \leq \Delta t/2$ で時間

t に関してフーリエ変換し、周波数軸上の正の領域における成分を取り出すと次式が得られる。

$$S_b(f) = Bg \exp(-j2\pi f_0 \tau) \frac{\sin[\pi(f-f_b)\Delta t]}{\pi(f-f_b)\Delta t} \quad (7)$$

$$B = \frac{AA'\Delta t}{2} : \text{振幅}$$

なお、フーリエ変換で、 $-\Delta t/2 \leq t < -\Delta t/2 + \tau$ の区間は考慮していない。その理由は、1~2 m 程度の近距離では $\Delta t \gg \tau$ となり、その区間の影響は無視できるためである。この式から、フーリエ変換されたビートスペクトルには、波動の伝搬遅延時間による位相項が含まれていることが分かる。

3. ビートスペクトルとホログラム

FM-CW レーダで得られるビート周波数をフーリエ変換すればレーダシーンに対応したビート周波数スペクトルが求まる。次に、アンテナを走査してレーダシーンを変え、測定を繰り返すことによってスペクトル列が得られ、物体分布の計測が可能となる。周波数軸上のスペクトルの形(大きさ)を基にイメージングを行うものが実開口 FM-CW イメージングレーダであり、従来は式(7)の位相項を考慮していなかった^{(5),(7),(15)}。ここでは、式(7)の位相項に着目し、振幅測定しか行っていない FM-CW レーダでも、合成開口手法による物体のイメージングが可能を示す。

物体 $g(x_0, z_0)$ がフレネル領域に存在していると仮定すると図2から τ は

$$\tau = \frac{2}{c} r \approx \frac{2}{c} \left[z_0 + \frac{(x-x_0)^2}{2z_0} \right] \quad (8)$$

と置き換えられる。一方、

$$f_b = \frac{2M}{c} r \approx \frac{2}{c} \frac{df}{dt} z_0 \quad (9)$$

とすると、

$$\pi(f-f_b)\Delta t \approx \frac{2\pi df}{c} (z-z_0) = a(z-z_0), \quad a = \frac{2\pi df}{c}$$

$$\frac{\sin[\pi(f-f_b)\Delta t]}{\pi(f-f_b)\Delta t} = \frac{\sin[a(z-z_0)]}{a(z-z_0)} \quad (10)$$

とおくことができ、周波数 f に関する関数は空間座標 z の関数に置き換えられることになる。それ故、時間に関してフーリエ変換されたビートスペクトル $S_b(x, z, f)$ は空間座標のみの関数となり、ここで改めて $U(x, z)$ とおく。

$$U(x, z) \equiv S_b(x, z, f) \approx S_b\left(x, z, \frac{a}{\pi\Delta t} z\right) = S_b(x, z) \\ = Bg(x_0, z_0) \exp\left[-j\frac{4\pi f_0}{c} \left\{z_0 + \frac{(x-x_0)^2}{2z_0}\right\}\right]$$

$$\times \frac{\sin[a(z-z_0)]}{a(z-z_0)} \quad (11)$$

ここで、便宜上、各関数を以下のように書き換える。

$$f(z-z_0) = \frac{\sin[a(z-z_0)]}{a(z-z_0)} = \text{Sinc}[a(z-z_0)] \quad (12)$$

$$h(x-x_0, z_0) = \exp\left[-j\frac{4\pi f_0}{c} \left\{z_0 + \frac{(x-x_0)^2}{2z_0}\right\}\right] \quad (13)$$

それ故、式(11)は

$$U(x, z) = Bf(z-z_0)g(x_0, z_0)h(x-x_0, z_0) \quad (14)$$

物体が方位方向 (x 方向, Azimuth direction) と距離方向 (z 方向, Range direction) に広がりをもつとすれば反射係数分布 $g(x_0, z_0)$ を物体の領域について積分することによってビートスペクトルは次式となる。

$$U(x, z) = B \int_0^\infty \int_{-\infty}^\infty f(z-z_0)g(x_0, z_0) \\ \times h(x-x_0, z_0) dx_0 dz_0 \quad (15)$$

この $U(x, z)$ が記録される信号で、物体の反射係数分布に対し、距離方向に Sinc 関数 f が、方位方向には伝搬関数 h が乗じられていることが分かる。これは畳み積の形式で、かつ、キルヒホッフの回折積分式をフレネル近似したもの⁽¹³⁾と等価である。なお、キルヒホッフ-フレネル回折で、その回折パターンを記録したものはフレネルホログラムと呼ばれている⁽¹²⁾。ここでこの記録信号はビートスペクトルであり、フレネルホログラムにおける回折パターンではない。しかし、形式上は同形なため、ビートスペクトルを回折パターンに対応して考えれば、ホログラムの一種と見なすことができる。

4. 合成開口手法の適用

式(15)においてビート信号が理想的な連続波であると仮定すると Sinc 関数は

$$f(z-z_0) \rightarrow \delta(z-z_0) = \begin{cases} 1, & z=z_0 \\ 0, & z \neq z_0 \end{cases} \quad (16)$$

なので

$$U(x, z_0) = B \int_0^\infty g(x_0, z_0)h(x_0-x, z_0) dx_0 \quad (17)$$

上式で物体反射係数分布を求めるためには記録信号 U に逆伝搬関数 h^* を掛けて畳み積をすればよい。これを式で表すと

$$g(x_0, z_0) = \int_{-\frac{L}{2}}^{\frac{L}{2}} U(x, z_0)h^*(x_0-x, z_0) dx \quad (18)$$

但し、 L はアンテナの方位方向の走査範囲、 $*$ は複素共役を示す。この式が合成開口レーダの原理となって

おり、 L で与えられる合成開口アンテナによる物体計測に対応している。

合成開口法は、長波長ホログラフィーの一種で、物体像の高精度の再生が可能である。物体とアンテナまでの距離は各アンテナの走査位置によって異なり、これが散乱波の伝搬遅延、すなわち空間的位相ずれとなってアンテナに受信される。そのため空間的位相ずれを補正することによって物体像が再生できるが、合成開口幅が広いほどその位相成分を多く取入れることができ、分解能が向上することになる。合成開口幅を広くすることは、物理的には半値角の広いアンテナを用いることと等価であり、ホログラフィー的には、図3

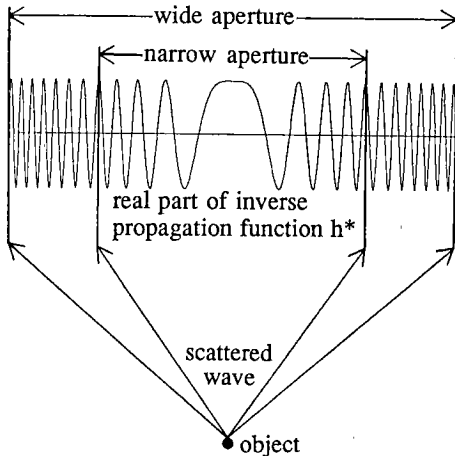


図3 開口幅と逆伝搬関数 h^* .
Fig. 3 Aperture width and inverse propagation function h^* .

に示す位相に関する伝搬関数の高調波成分をより多く含ませることと等価で、その結果、物体像のボケを減らすことができる。

5. データ処理方法

式(18)は畳込み積分の性質より、フーリエ変換を用いて

$$g(x_0, z_0) = FT^{-1}[FT(U) \cdot FT(h^*)] \quad (19)$$

FT: フーリエ変換

FT⁻¹: 逆フーリエ変換

のように3回のフーリエ変換で計算できる。

式(19)で与えられる物体像 g を得るために、測定ではアンテナを方位方向に走査する。各走査点ごとに得られるビート信号を時間に関してフーリエ変換し、図4に示すような計算機上のメモリ空間にデータを配置する。第 i 走査地点のフーリエ変換された測定データが第 i 列に記録される。 M 回の走査によって $N \times M$ データ行列が得られる。 N は距離方向の Δz の個数である。次に、データ行列の各行と、逆伝搬関数 h^* それぞれを、方位方向 x に関してフーリエ変換し、その積に対して逆フーリエ変換を行う。フーリエ変換は計算機上でFFT演算によって高速に実行される。

6. 物体検出実験

合成開口手法を用いたFM-CWレーダによる物体の高精度検出、特に方位方向の分解能向上を目的に室内で金属板と金属管の検出実験を行った。図5に構成したFM-CWレーダのブロック図を示す。また、実験

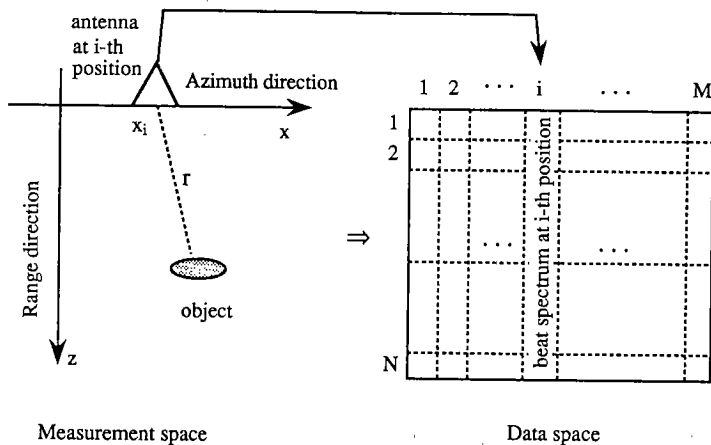


図4 測定空間と計算機上のデータ配列
Fig. 4 Measurement space and data storage in computer.

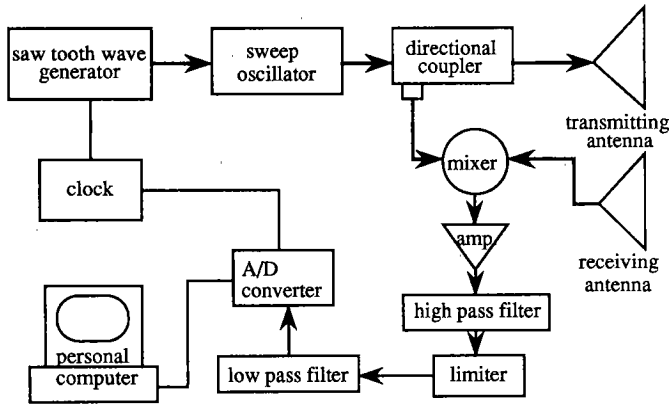


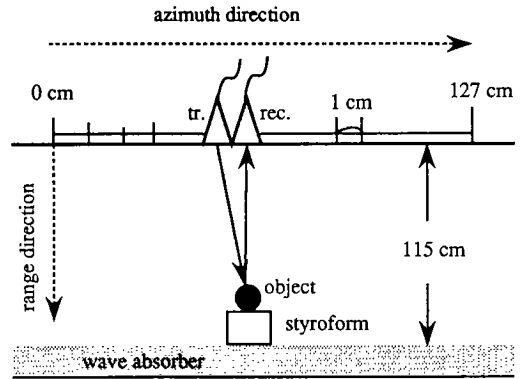
図 5 FM-CW レーダのブロック図
Fig. 5 Block diagram of FM-CW radar.

表 1 FM-CW レーダ諸元

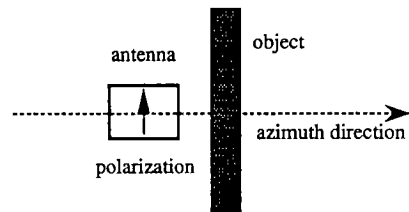
RF パワー	18 dBm
偏波	直線 (物体の長軸と平行)
受信部感度	-42 dBm
掃引周波数	8.2 - 9.2 GHz
掃引時間	5.2 msec
ビート信号のサンプル点数	104 個 (12 bit)
距離分解能	1.52 cm
走査可能範囲	180 cm
走査幅	1 cm

表 2 実験に用いたアンテナ

アンテナタイプ	H-面 (cm)	E-面 (cm)	半値角 (度)
A	15.0	10.0	16.6
B	3.8	10.0	89.4



(a) cross sectional view



(b) top view (polarization with respect to target orientation)

図 6 測定方法
Fig. 6 Measurement scheme.

で用いたレーダ諸元を表 1 に示す。レーダ装置ではビート信号 S_b を A-D 変換 (12 bit) し、計算機に取込むが、掃引時間 5.2 ms に対し、104 個のサンプルデータが得られ、時間軸上のデータとして FFT 演算を行った。離散周波数間隔は 19.5 Hz で、距離では 1.52 cm の長さに相当する。

合成開口法では、アンテナの半値角が広い方が分解能が向上することが知られているが、表 2 に示す半値角の異なる 2 種類の方形ホーンアンテナで実際の効果も合わせて調べた。ホーンアンテナを用いた理由は標準アンテナであり、使用周波数帯で特性がほぼ一定であるためである。図 6 は実験の構成図である。また、表 3 に検出に用いた金属物体のパラメータを示す。実験では、図 6 のように床の上に電波吸収体を置き、発泡スチロールを重ねてその上に金属物体を設置した。

そして送受信アンテナを一体化し、物体の長軸と平行に偏波を合せた。1 cm 間隔でアンテナを走査し、まず、ビートスペクトルの分布を取得した。図 7 (a), (b) に金属板に対する 2 種類のアンテナで得られたビート

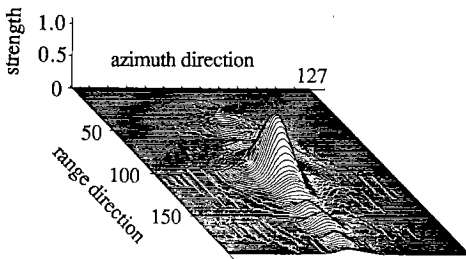
スペクトルの強度分布を示す。この図で、方位方向幅は物体を中心とした 127 cm の走査幅に対応し、距離方向はアンテナ開口から 194.56 cm の範囲に対応している。それぞれの方向で 128 ポイントの離散点から構成されている。また、縦軸は、正規化したビートス

ペクトルの強度を表している。半値角の広いアンテナ A の方が、広い範囲で物体からのビートスペクトルが得られており、距離方向には Sinc 関数が掛かった形が得られている。この測定結果は 3. と 4. の理論結果と一致している。

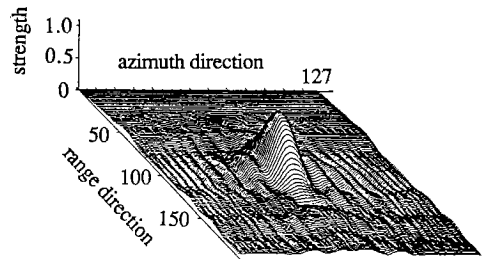
なお、送受信アンテナ間の相互結合や電波吸収体で覆われた床面からの反射成分はビートスペクトルを得るためのアナログ信号処理の段階でフィルタの調整によって取り除くことができる。このことは、測定者が距離方向の測定範囲（ビート周波数の周波数範囲に等しい）をフィルタ調整によって選択し、かつ、不要反

表 3 検出に用いた物体

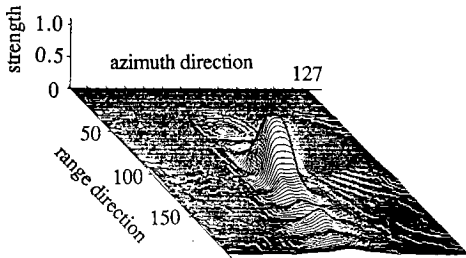
物体	長さ (cm)	幅 (cm)	厚さ (mm)	アンテナからの最小距離 (cm)
金属板	84	15	2	100
金属管	100	10φ	3	100



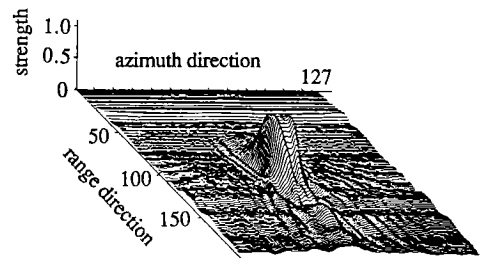
(a) beat spectrum distribution obtained by antenna A



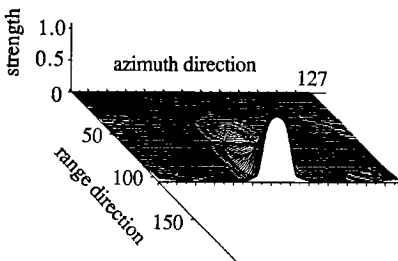
(b) beat spectrum distribution obtained by antenna B



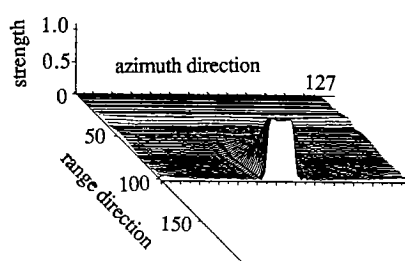
(c) processed spectrum distribution of (a)



(d) processed spectrum distribution of (b)



(e) cross sectional view at the maximum value of (c)



(f) cross sectional view at the maximum value of (d)

図 7 金属平板の検出結果
Fig. 7 Detection result of metallic plate.
(Range and azimuth axes are measured in cm)

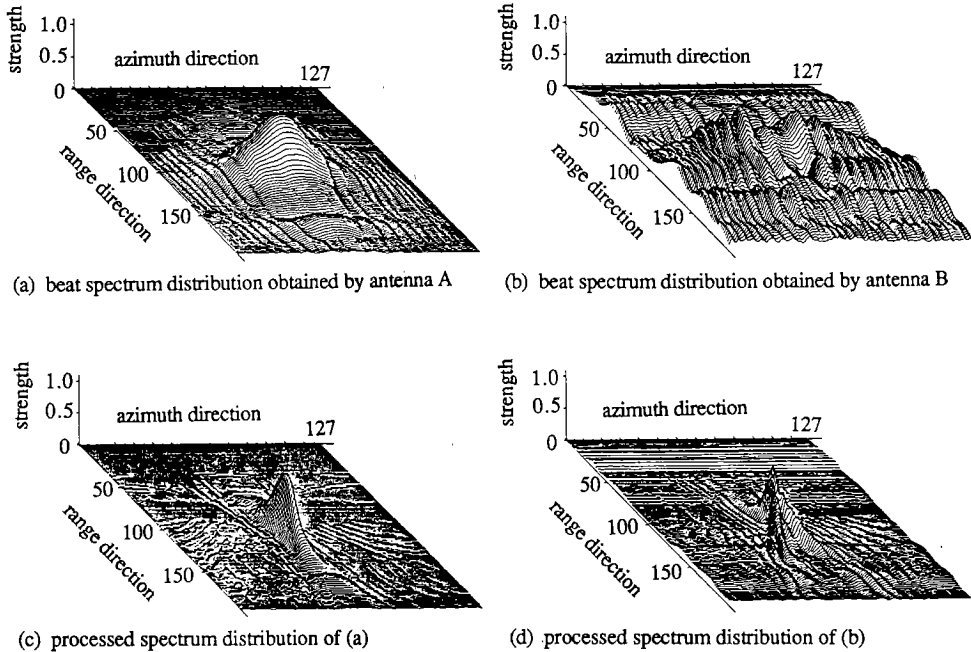


図 8 金属パイプの検出結果
 Fig. 8 Detection result of metallic pipe.
 (Range and azimuth axes are measured in cm)

射成分をカットできることを意味し、FM-CW レーダの大きな利点となっている。

次に、物体像再生のため、計算機上で式(19)の演算を行った。その処理結果を図7(c), (d)に示す。この再構成された分布図から、方位方向に関しては広がったビートスペクトルが圧縮され、解像度が上がっていることがわかる。しかし、距離方向には Sinc 関数が含まれた分布となっているので方位方向ほど解像度は良くない。そこでスペクトルが最大となっている距離で方位方向のスペクトル分布を調べた。図7(e), (f)にその分布を示す。半値角の広いアンテナ Bの方が板の反射係数分布の形をより良く再現していることが確認できる。

金属管についても同様の実験を行い、図8(a), (b)に実験で取得したビートスペクトルを示す。この金属管は円形断面をもっているため、板よりも広い範囲(方位方向)で散乱波によるビートスペクトルが現れるが、合成開口手法により図8(c), (d)のように鮮明な形状が再現できる。アンテナ Aでは幅の狭い平板から得られるような分布となっているが、アンテナ Bの方では物体が距離方向に奥行のある分布形状になっていることが分かる。

以上の実験結果より、理論的な結果が確認でき、本文中で述べた合成開口法による FM-CW レーダの実現、およびその有効性が確かめられた。

7. むすび

この論文では合成開口手法を FM-CW レーダに適用して、高精度の物体検出を行うことを試みたものである。従来の FM-CW レーダでは、実開口アンテナから得られるビートスペクトルを取得してその大きさをもとに物体までの距離検出やイメージングを行っていたが、ここでは、ビートスペクトルの位相項に着目し、それがホログラムの一種になることを利用して合成開口手法を適用した。8.2-9.2 GHz の周波数帯を用いた室内での物体検出実験によって、特に、方位方向では実開口レーダでは見られない高精度な物体形状の検出結果が得られた。今後、距離方向の検出精度の改善、更に実際の積雪中での埋没物体検出へ応用し、その効果を確認する予定である。但し、雪中埋没物体検出の際には、電波の伝搬媒質が不均質になると予想されるため、その不均質性によるクラッタをいかに抑圧するかが問題になると思われる。

謝辞 この研究の一部は、文部省科学研究費、セコ

ム科学技術振興財団の援助のもとで行われたものであり、感謝致します。

文 献

- (1) Wehner D.R.: "High Resolution Radar", Artech house, pp.244-266 (1987).
- (2) 吉田孝監修: "レーダ技術", 電子通信学会, pp.287-289 (1985).
- (3) 渡辺一弘, 星野勝也, 山口芳雄, 阿部武雄: "FM-CW 法による雪中埋没物体の検出", 信学技報, EMCJ86-72(1986-11).
- (4) 丸山泰一, 星野勝也, 渡辺一弘, 山口芳雄, 阿部武雄: "FM-CW 法による雪中埋没物体の探査", 信学技報, A・P87-25 (1987-06).
- (5) 丸山泰一, 川上 温, 山口芳雄, 仙石正和, 阿部武雄: "FM-CW 法による雪中埋没物体の検出", 信学技報, A・P 88-67 (1988-10).
- (6) 川上 温, 丸山泰一, 山口芳雄, 仙石正和, 阿部武雄: "FM-CW レーダによる物体検出", 信学技報, A・P89-68(1989-12).
- (7) Sasaki M., Suzuki M., Matsumoto T., Fujino K. and Kawamura T.: "Stratigraphic images of snowpack obtained by an FM-CW microwave system", Proc. of ISAP '89, pp.1045-1048 (Aug. 1989).
- (8) Fujino K., Wakahama G., Suzuki M. and Matsumoto T.: "Snow stratigraphy measured with an active microwave sensor", Proc. of ISAP '85, pp.671-674 (Aug. 1985).
- (9) Michiguchi Y., Hiramoto K., Nishi M., Ootaki T. and Okada M.: "Advanced Subsurface Radar System for Imaging Buried Pipes", IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing, 26, 6, pp.733-740 (Nov. 1988).
- (10) Osumi N. and Ueno K.: "Microwave holographic image of underground objects", IEEE Trans. Antennas Propagat., AP-33, 2, pp.152-159 (Feb. 1985).
- (11) Sakamoto Y., Tajiri K., Sawai T. and Aoki Y.: "Three-dimensional imaging of objects in accumulated snow using multi-frequency holography", IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing, 26, 4, pp.430-436 (July 1988).
- (12) 山下栄吉: "電磁波工学入門", 産業図書 (昭55).
- (13) 青木由直: "波動信号処理", 森北出版, pp.210-212 (1986).
- (14) 松尾 優, 山根国義: "レーダホログラフィ", 電子通信学会, 2, 3章 (1985).
- (15) Oliver A.D. and Cuthbert L.G.: "FMCW radar for hidden object detection", IEE Proc., 135, Pt. F, 4, pp.354-361 (Aug. 1988).

(平成2年11月14日受付, 3年2月13日再受付)

山口 芳雄



昭51新潟大・工・電子卒, 昭53東工大大学院修士課程了。同年新潟大・工・助手, 現在, 助教授。損失媒質での電波伝搬・導波路伝送, 移動通信, マイクロ波リモートセンシング, レーダポラリメトリの研究に従事。工博。日本雪工学会, IEEE 各会員。

川上 温



昭63新潟大・工・情報卒, 平2同大学院修士課程了。現在, (株)トキメック勤務。在学中, FM-CW レーダ, 波動イメージングの研究に従事。

三本 雅



平2新潟大・工・情報卒。現在, 同大学院在学中。この間, イメージング FM-CW レーダの研究に従事。

仙石 正和



IEEE 会員。

昭42新潟大・工・電気卒。昭47北海道大学大学院博士課程了。工博。同年北大工学部・電子助手。昭53新潟大・工・情報助教授, 現在, 同教授。回路網理論, グラフ・ネットワーク理論, 情報伝送特に移動通信の研究に従事。著書「グラフ理論」(共著)。

阿部 武雄



日本雪氷学会, 日本雪工学会各会員。

昭24東工大・工・電気卒。電気試験所, 千葉工大, 東工大工業教員養成所を経て, 現在, 新潟大・工・教授・工学部長。この間, 高周波標準, レーザ光の降雪中の伝搬, マイクロ波素子, 損失媒質中の伝搬, および移動通信などの研究に従事。工博, IEEE,