5. アンテナ２次元走査装置の作製とその実験結果

システム工学技術系

阿　達　　透

１．目的

我々の研究室では、従来よりＦＭ－ＣＷレーダによる物体の探査などの研究を行ってきた。このＦＭ－ＣＷレーダに、レーダポーラリメトリを適用させ、物体のイメージングを行うことを目的として研究している。

ＦＭ－ＣＷレーダによる物体の探査では、地中や雪中埋没物をターゲットとしているため、周波数を低くし、その結果アンテナは大きいものを使用するので、当然のように手動でアンテナを動かしていた。しかし、物体のイメージングをするには、より高い周波数でアンテナを２次元に走査させ、より細かい測定が必要になる。測定ポイントが多くなることにより、手動でアンテナを動かすとすれば、１回の実験にかかる手間と時間は膨大なものになってしまう。そのため、今回の装置はアンテナの移動とデータの取得をコンピュータで制御し、１回の実験データを取得するのにかかる手間と時間を大幅に削減すると共に、より正確なデータを取得することを目的として、この装置を作製する事とした。

２．設計・製作

アンテナ２次元走査装置の設計にあたり、クリアしなければならない条件として、以下のようなことがあげられる。

○アンテナの移動距離：1,500mm×1,500mm、走査間隔：10mm程度、走査精度：１ mm以内

○パソコンによるアンテナの制御、データの取得を可能とし、測定時間を短縮する。

また、実際に製作するにあたり、研究室の学生が実験データを取得し、修士論文（卒業論文）としてまとめなければならないため、あまり製作時間をかけられない。また、情報工学科の学生には機械工作の知識はないので、装置の製作はほとんど自分一人で行わなければならない。これらを考慮し、この装置はなるべく軽量・シンプルにする方向で設計することにした。

最初に頭の中でイメージしたのはＸ－Ｙプロッターであるが、サイズが大きいだけに強度、精度を考えるとワイヤーやベルトを使って作るには無理があると考え、ボールネジとスライドシャフトを使って、それをステッピングモータで駆動する方式に決定した。ステッピングモータの制御に関しては、２軸制御用のボードが市販されている。それを用いることにより、プログラムを１度組んでしまえば、非常に測定が容易になる。

装置本体は、Ｌアングルでフレームを組み、旋盤で作ったシャフトホルダーでスライドシャフトをフレームに固定する。ボールネジは、ピロー型ユニットを介してフレームに固定するが、そのままでは取り付けに難があり、旋盤で継ぎ手を作り、ベアリングのついているピロー型ユニットに固定した。

ステッピングモータの選定

動力源としてステッピングモータを用いるが、ここでモータの選定が必要になる。モータの選定には、以下のようなことを考慮する必要がある。

(1) 駆動方式の決定

モータとボールネジをカップリングで直結して使用する。ボールネジは、直径15mm、全長1500mm、ピッチ10mmのものを用いた。

(2) 必要分解能の算出

ステッピングモータの基本ステップ角は２相式で1.8°、５相式で0.72°であるので、１パルスあたりの送り量は、それぞれ0.05mm、0.02mmとなり、どちらを用いても問題ないが、今回は５相式を用いることにした。

(3) 運転パターンの決定

まず、動作パルス数を求める。

$$\text{動作パルス数(A)} = \frac{\text{１回あたりの送り量}}{\text{ボールネジのピッチ}} \times \frac{360^\circ}{\text{ステップ角}}$$

１回あたりの送り量を10mmとすると、ボールネジのピッチは10mm、ステップ角は0.72°なので、動作パルス数(A)は500となる。

次に運転パルス速度を求める。ステッピングモータで中・高速運転する場合は、加速時間、減速時間を用いて徐々にパルス速度を変化させる必要があるが、加減速時間のない自起動運転で求めてみる。

$$\text{運転パルス速度 } f_Z\,[\text{Hz}] = \frac{\text{動作パルス数}}{\text{位置決め時間 [sec]}}$$

位置決め時間を1(sec)とすると、動作パルス数は500なので、運転パルス速度は500 [Hz] となる。

(4) 必要トルクの算出

必要トルクを求めるには、負荷トルクと加速トルクを求める必要がある。負荷トルクは、駆動方式、移動させる装置の重量によって大きく変わるので正確に求めることはできないが、ボールネジと直結で駆動させる場合は以下のように求めることが出来る。

$$F=F_A+W(\sin\alpha+\mu\cos\alpha)\ [kg]$$

ここで、Fは軸方向加重を示す。F_Aは外部からの力で、0。Wは重量でここでは余裕をみて10kg、μはスライドシャフトの摩擦係数で0.1。αは傾斜角度で0。これらを代入すると　F=1 [kg] となる。

$$T_L=\frac{F\,P_F}{2\pi\,\eta}\times\frac{\mu_0\,F_0\,P_F}{2\pi}\quad[kg/cm]$$

負荷トルクT_Lは上記の式で求められる。P_Fはボールネジのピッチで1cm、ηは効率で0.9。μ_0は予圧ナットの内部摩擦係数で0.3とする。F_0は予圧加重で、これはFの1/3で代用でき、0.33。これらを代入すると $T_L \fallingdotseq 0.2$[kg/cm] となる。

つぎに加速トルクを算出する。加速トルクTaは次式で求めることが出来る。

$$T_a=\frac{J_0+J_L}{g}\times\frac{\pi\cdot\theta_S\cdot f_2^{\,2}}{180\cdot n}\ [kg\,cm]$$

J_0：ローター慣性モーメント[kg cm^2]

J_L：全慣性モーメント[kg cm^2]

θ_S：ステップ角[°]

f_2：運転パルス速度[Hz]

n：係数(=3.6°/θ_S)

ここで、J_0はカタログに記載されており、J_Lを求めてみる。

$$J_L=J_B+J_T$$

J_B：ボールネジの慣性モーメント

J_T：移動させる装置の慣性モーメント

$$J_B=\frac{\pi}{32}\cdot\rho\cdot L_B\cdot D_B^{\,4}$$

$$\rho=\left(7.9\times10^{-3}\ [kg/cm^3]\right)$$

$L_B=150$ [cm]、$D_B=1.5$ [cm]

$$J_T=W\left(\frac{P_B}{2\pi}\right)^2$$

$W=10$ [kg]、$P_B=1$ [cm]

これらを計算すると、$J_B \fallingdotseq 0.6$、$J_T \fallingdotseq 0.3$となるので、$J_L \fallingdotseq 0.9$[kg cm^2] となる。

そこで、$T_a \fallingdotseq 0.64\,J_0+0.58$ となる。J_0はカタログにより得られるが、ここでは4 [kg cm^2] を代入すると、$T_a \fallingdotseq 3.14$[kg cm] とする。

そこで、必要トルクT_Mは

$$T_M=(T_L+T_a)\times\text{安全率}$$

で求められる。ここでは安全率を3として計算すると、$T_M \fallingdotseq 10$[kg/cm] となる。

機械加工と組み付け

必要な機械加工は、ボール盤による穴あけと旋盤による部品の加工くらいであるが、出来上がり予定図は下図のようになる。

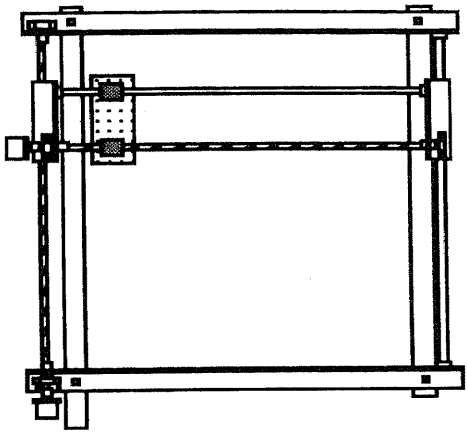


図1．装置の完成図

上の完成図では、モータの固定がされていないが、特に下図のX部を動作させるモータは、出来るだけ軽量にしたかったため、モータの取り付けを後回しにして、良い方法を模索した。

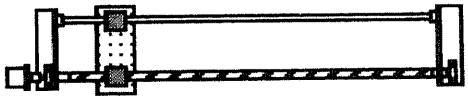


図2．装置のX部

重量の増加を最小限にくい止め、モータとボールネジのセンター合わせが容易にでき、そしてなるべく簡単な加工でモータを固定する方法として、下の写真のように取り付けることにした。

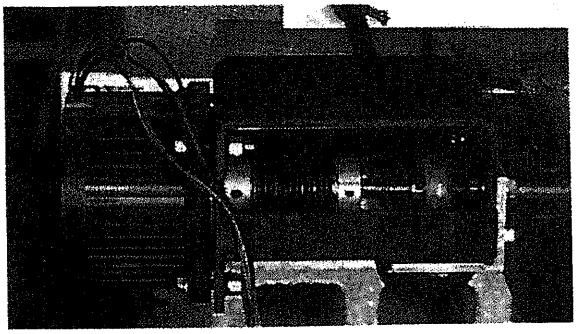


図3．X部のモータ取り付け

これは、角パイプを切断し、あとは簡単な加工しかしていない。だが、重量の増加は少なく、モータも精度よく固定することができた。

Y部のモータの取り付けであるが、こちらはフレームのLアングルがしっかりしているので、特にむずかしく考えることはなく、鉄板をT字に溶接してモータを取り付けた。Y部も最初はX部と同じ

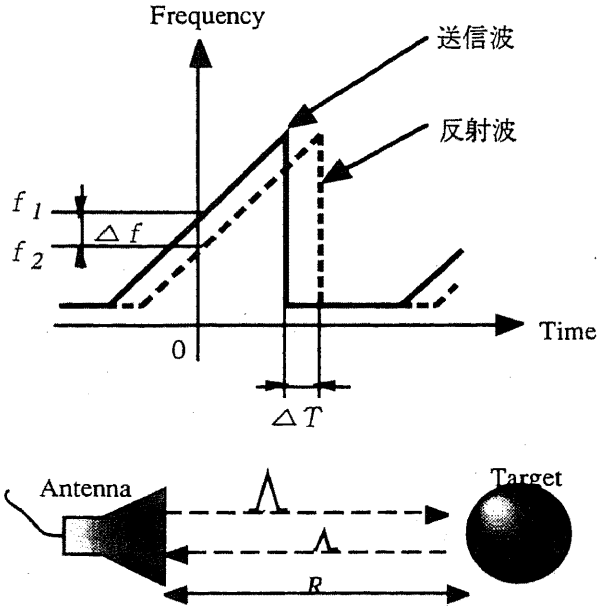
カップリングを使っていたが、使っているうちに破損してしまった。これは、X部より力がかかることもあるが、ステッピングモータの振動による部分もあると思われる。そこで、モータの振動も吸収できる樹脂製のカップリングに変更した。

3．実験結果

実験結果を示す前にＦＭ－ＣＷレーダについて簡単に説明する。

ＦＭ－ＣＷレーダは、線形に周波数変調を施した連続波を送信波として用いる。これを物体に照射し、物体からの反射波を受信波とする。送信波の周波数を時間的に変化させると、反射波が戻ってくる時間には、送信波の周波数は変わっているので、送信波の周波数ｆ１と受信波の周波数ｆ２の周波数の差△ｆを求めることができる。△ｆが求まれば、△Ｔが求まり、アンテナから物体までの距離を求めることが出来る。

また、レーダには実開口レーダと合成開口レーダがあり、前者はアンテナからの受信情報をそのまま記録するもので、アンテナのサイズによって分解能が決まるものである。これに対して、合成開口レーダは、ここでは小さな開口アンテナを移動させ、その間に得られた情報を合成し、信号処理するものである。今回の装置は、この合成開口ＦＭ－ＣＷレーダのアンテナをスピーディーに、かつ精度よく走査させるための装置である。この装置をもちいて実験することによって、精度良いデータを取得し、複雑な形状の物体のイメージングも可能となる。



$$\Delta T = \frac{2R\sqrt{\varepsilon_r}}{c}$$　　ε_r：比誘電率　c：光速

図４．ＦＭ－ＣＷレーダの原理図

次に、ポーラリメトリについて簡単に述べると、電波の持つベクトル性である偏波情報を利用する技術で、電波を照射する物体形状により、その反射波の偏波成分もさまざまに変化する。それらの情報には、反射電力と位相情報が含まれている。

偏波を考慮に入れたターゲットからの反射係数分布は、送受信の偏波の組合せによって得ることが出来るが、今回の実験では、水平偏波、垂直偏波の２つの直線偏波の組合せによって実験し、これから得られる情報から、物体のイメージングを行うものである。また、イメージングに有効な偏波状態も得ることが出来る。

以下に、わかりやすい実験結果を示す。まず直径6mm、長さ50cmの金属の丸棒を図５のように配置し、掃引周波数8.2-9.2GHz、アンテナから物体までの距離70cmにして、２次元走査によるポーラリメトリック測定を行った。なお、アンテナの走査間隔は15mm、走査点数は64×64である。偏波はＸ方向をＨ偏波、Ｙ方向をＶ偏波とし、測定は送信アンテナ、受信アンテナが、それぞれＶＶ、ＨＨ、ＶＨ偏波の３つの状態で実験を行った。

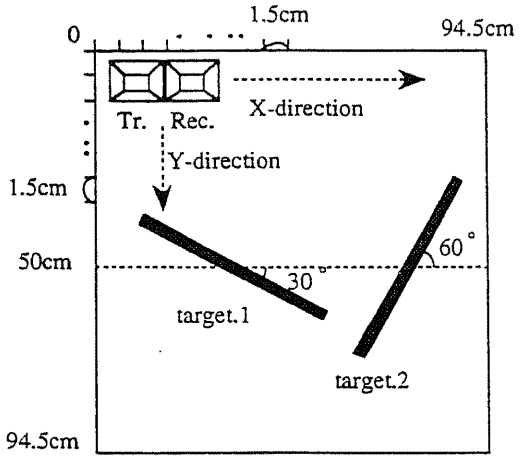
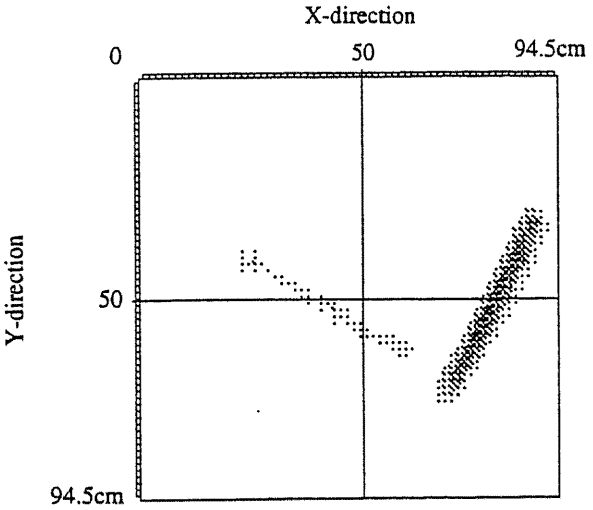


図５．ターゲットの配置図

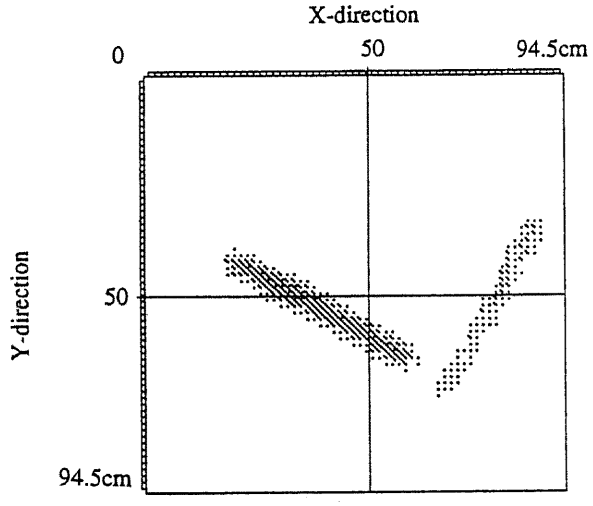
測定したイメージング結果を図６に示す。これらの結果は、測定から得られたデータを合成開口処理したものである。

ＶＶ偏波では、ターゲット２、ＨＨ偏波ではターゲット１の方が、それぞれ強く現れている。また、ＶＨ偏波ではどちらのターゲットも同じレベルとなっている。これらの結果は物体からの反射電力イメージであるが、物体の形状や傾きにより、偏波の方向によって受信レベルが大きく変わることが分かる。

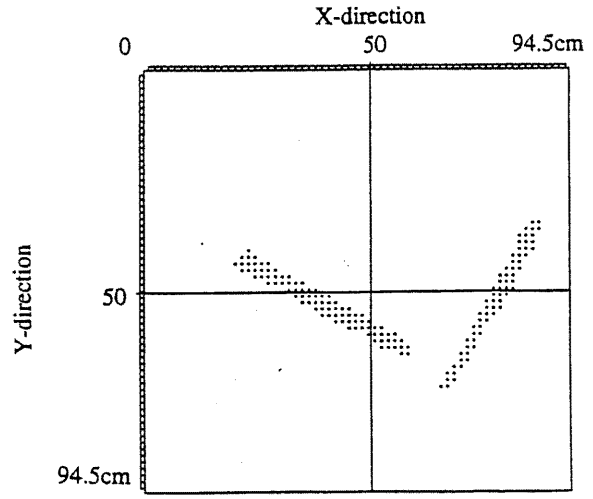
また、測定データから各ターゲットに対して反射電力が最大となる偏波状態（Co-pol max）を求めることができ、それをイメージングしたのが図７であ



（a）ＶＶ偏波

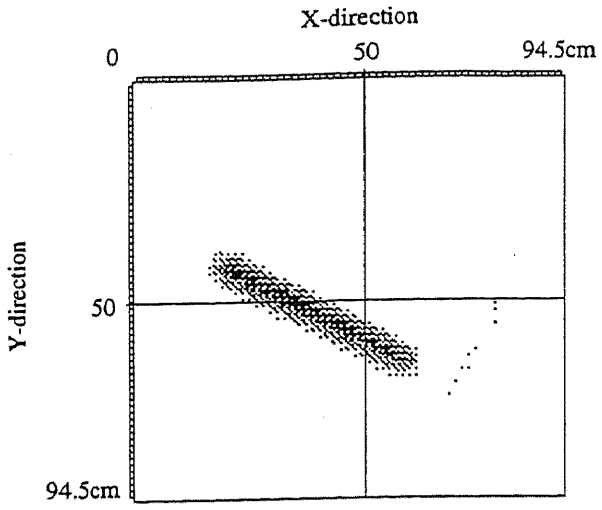


（b）ＨＨ偏波

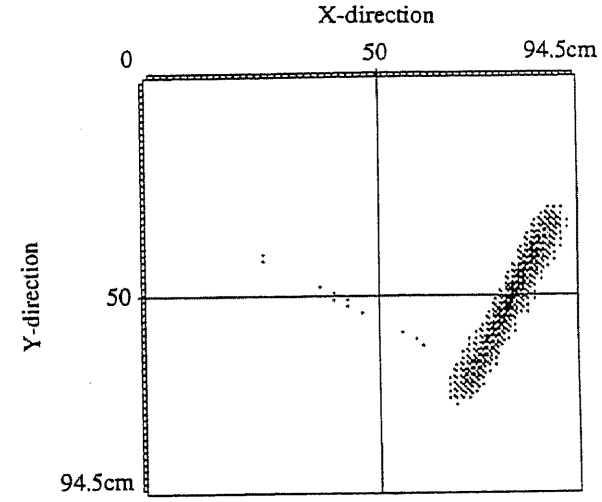


（c）ＶＨ偏波

図６．合成開口イメージ



（a）ターゲット１



（b）ターゲット２

図７．Co-pol max イメージ

る。

ターゲットはそれぞれ直交しているため、Co-pol maxを求めたターゲットではないほうのターゲットは、それぞれ反射電力は最小となっている。

模型飛行機のイメージング

次に、ターゲットとして模型飛行機を使った実験結果について報告する。

測定状況を図８に示す。ターゲットは、長さ３０cm、幅３０cmのプラモデルの飛行機である。なお、この実験では、表面に金属テープを貼ってある。

掃引周波数は15.5GHz-16.5GHz、走査間隔は0.8cm、走査点数は64×64点、走査幅は50.4cm、ターゲットからアンテナまでの高さは64.0cmである。

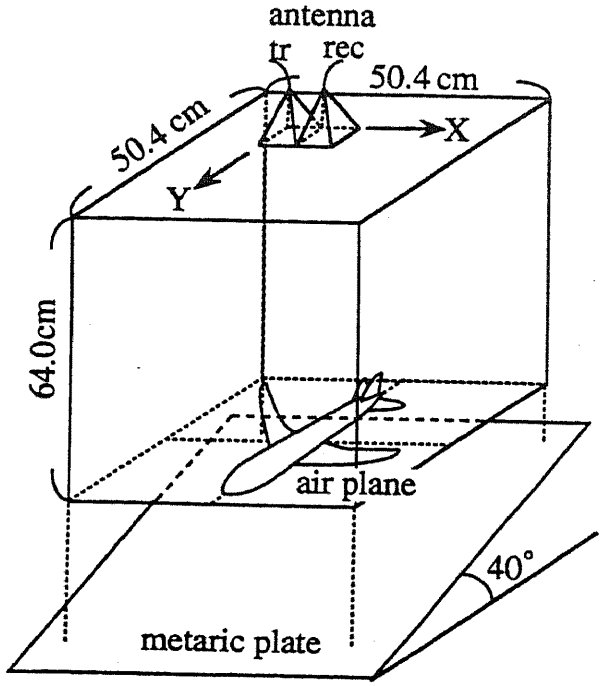


図８．測定状況

偏波はＸ方向をＨ偏波、Ｙ方向をＶ偏波とし、測定は送信アンテナ、受信アンテナが、それぞれＨＨ、ＶＶ、ＨＶ偏波の３つの状態で実験を行った。

まず、図９にＨＨ偏波での実開口イメージを示す。これは、合成開口処理をする前の電力分布を示すが、この図からはまったく飛行機の形状は分からない。これに合成開口処理を施した電力イメージを図１０に示す。これらの図は、受信電力が一番強い部分を１として正規化し、濃淡で表している。ＨＨ偏波では胴体よりも羽根の方が強く検出され、ＶＶ偏波では胴体の方が強く検出されているのが分かる。ＨＶ偏波では羽根の部分が主に検出され、胴体は検出されていない。また、ＨＨ偏波、ＶＶ偏波と比べると受信電力はかなり小さくなっている。

次に、これら３つの偏波の組合せであるSpanイメージを図１１に示す。この図は、よりはっきりと

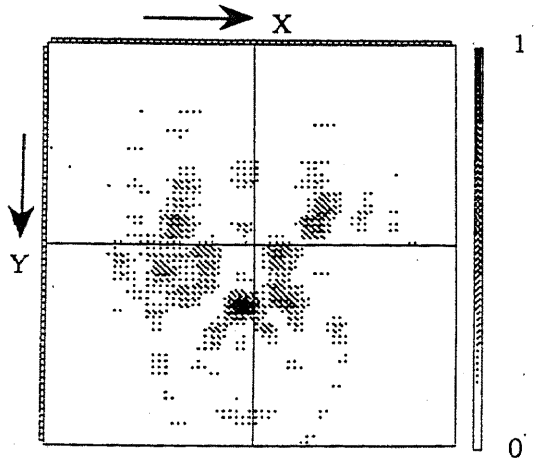
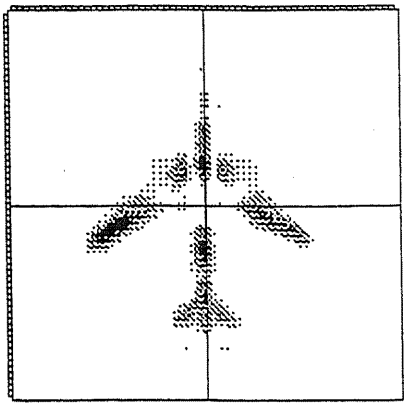
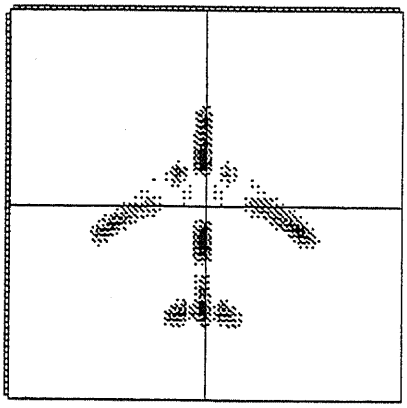


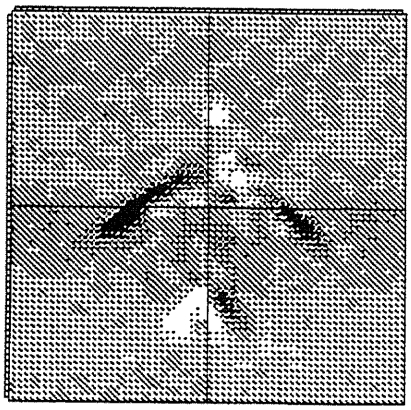
図９．実開口イメージ（HH偏波）



（ａ）ＨＨ偏波



（ｂ）ＶＶ偏波



（ｃ）ＨＶ偏波

図１０．合成開口イメージ

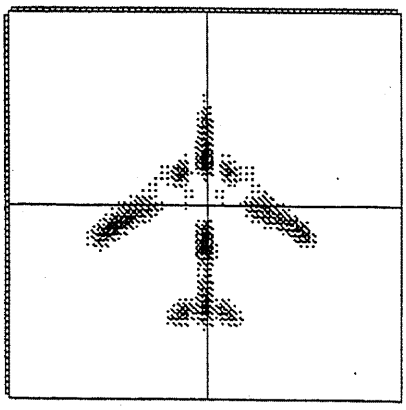
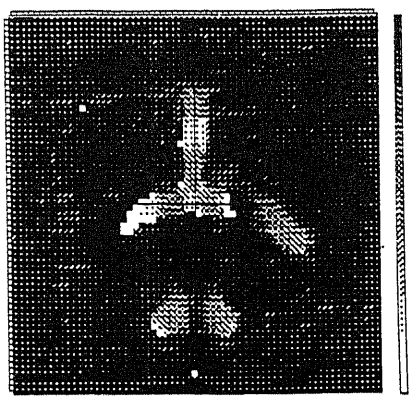
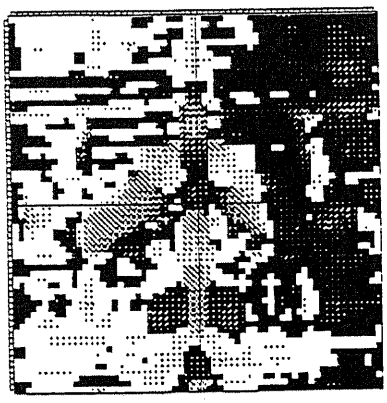


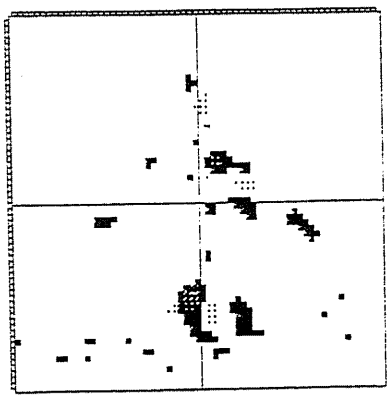
図１１．Spanイメージ



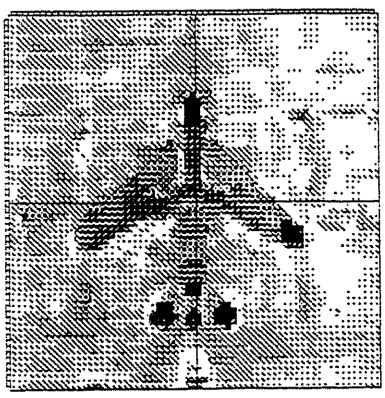
（a）HH偏波（ϕ_{HH}）



（b）VV偏波（ϕ_{VV}）



（c）HV偏波（ϕ_{HV}）



（d）差分イメージ

図11．位相情報によるイメージング

飛行機の形状がイメージングできている。

最後に、測定データの位相情報を用いてイメージングを行ったので、それを図12に示す。この図は$-\pi$からπまでの位相を濃淡によって表したものである。これらの図から、飛行機のエッジの部分での位相の変化が大きいことが分かる。（d）の差分イメージは$\frac{\phi_{HH}+\phi_{VV}}{2}$で表すことが出来るが、飛行機の輪郭線においては電力イメージよりも鮮明にイメージングできている。

このように、位相情報からでも高精度なイメージングが出来ることが分かった。

4．まとめ

今回作った実験装置の最終的な目的は、物体のイメージングであったが、このように高精度にイメージングすることが出来た。また、この装置を作ったことによる最大の利点は、実験データの取得に関して、大量のデータを大きな手間をかけずに得られるようになったことが、一番であろう。

この報告では、実験で得られたデータのイメージングの結果のみを紹介してきたが、レーダポーラリメトリ、合成開口FM−CWレーダについての詳しい内容については、下記の文献を参照していただきたい。

参考文献

[1] Yoshio Yamaguchi, et.al, "On radar polarimetry in FM-CW radar," Proc. of 1993 International Geoscience and Remote Sensing Symposium, pp.368-370, 1993,

[2] 西川徹，他2名，"ポーラリメトリック合成開口FM-CWレーダによる2次元イメージング，"電子情報通信学会技術研究報告SANE93-49, 平成5年10月

[3] 二瓶浩之，他4名，"2次元合成開口FM-CWレーダによるポーラリメトリックイメージング，"電子情報通信学会技術研究報告，A・P94-96, 平成7年1月