HOKKAIDO UNIVERSITY

Title	アンテナアレーを用いた雪中レーダシステムの高速化
Author(s)	青木, 由直; 三橋, 龍一; 横路, 浩明 他
Citation	北海道大學工學部研究報告, 147, 47-58
Issue Date	1989-07-31
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/42199
Type	departmental bulletin paper
File Information	147_47-58.pdf

Hokkaido University Collection of Scholarly and Academic Papers : HUSCAP

北海道大学工学部研究報告
第147号（平成元年）

Bulletin of the Faculty of Engineering,
Hokkaido University. No. 147 (1989)

「アンテナアレーを用いた雪中レーダシステムの高速化」

青木由直　三橋龍一
横路浩明　石川貴之

（平成元年3月31日受理）

A Technique of High-Speed Processing of Snow Search Radar System with a Linear Antenna Array

Yoshinao AOKI Ryuichi MITSUHASHI
Hiroaki YOKOMICHI Takayuki ISHIKAWA

(Received March 31, 1989)

Abstract

In this paper we discuss a technique of high-speed processing of holographic imaging radar for searching objects under accumurated snow. An experimental system was constructed with a linear antenna array with 16 array elements,where the array was rotated to collect radar signals reflected from objects,resulting in high-speed acquisition of radar data compared with the conventional technique of mechanical raster-scanning of an antenna. To detect weak radar signals efficiently a DSB (Double Side Band) modulation with 455 kHz modulation frequency was adopted and demodulated signals were used for image reconstruction. A recently developed DSP (Digital Signal Processor) was used in reconstructing radar image in order to realize quasi-real-time reconstruction of radar images. An experiment with X-band microwave was conducted to test the constructed system. A FZP (Fresnel Zone Plate) was recorded as a holographic radar data of a point object and a point image was reconstructed according to the theory. The experimental result confirms that the proposed experimental system is promissing for realizing a real-time snow-radar.

1. 序　　論

雪崩等で雪に埋まっている人間の捜索，および除雪車による除雪作業時における事故防止等の要求に答える積雪内探査用のレーダには，比較的近距離にある小物体を検出し，その形状が判るような形で観察者に対して提示する能力が要求される。

近年，雪氷に対するリモートセンシングの研究が盛んである。その主たる目的は広範囲にわたる積雪の分布，および積雪量の推定であり，近距離用のものであっても，氷床下の地形観測等であり，分解能も数十m以上で基本的にはパルスレーダであるものがほとんどである。一方，合成開口レーダ等のホログラフィックレーダを用いた高分解能を有するレーダも開発されていて，これは雪氷内の構造を正確に測定することを目的とするものである。しかし，積雪内に埋没した物

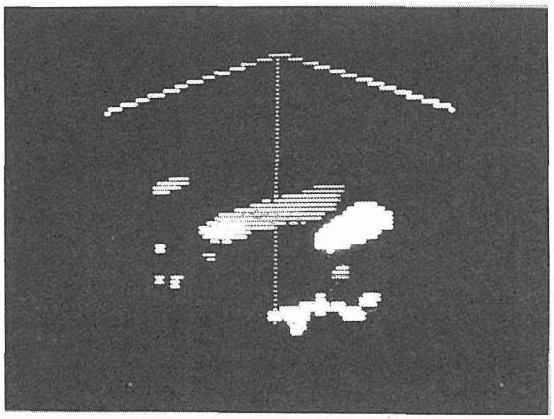

写真 1　従来のシステムによる再生像
（積雪中の長短２本の金属管による実験）

体を認識するためのレーダは，雪氷の分野でもほとんど研究されていないのが現状である。

そこで，このような要求に答えるものとして本研究では，「雪中レーダ」と呼んでいるシステムを開発している。雪中レーダは，周波数掃引の手法を用いた長波長ホログラフィの原理に基づくホログラフィックレーダの一種で，近距離の探査を可能とし，要求される高い分解能を得ることができるものである。用いている電波は，雪に対して比較的透過性のよいX-bandのマイクロ波である。実際に製作したレーダシステムで実験を行い，設定した性能が得られることを確認してきた[1)]。

従来の実験システムで，雪中レーダの有効性が示され所期の成果を上げることに成功した。しかし，理論を実証するための基礎研究用のシステムということもあり，いくつかの問題点が明らかになってきた。その主なものは，処理時間と可搬性の問題である。今までのシステムでは，像再生まで約１時間の時間を要し，アンテナ系もその構造から可搬性に乏しかった。そこで，アンテナ系をアレー化し，像再生処理もDSP（Digital Signal Processor）を導入し，システムの高速化を実現した，新しい雪中レーダシステムを開発した。

アンテナアレーを採用する上で問題になるのは，素子間のばらつきである。ここで位相情報を干渉波の強度だけで取る方式では，そのばらつきを除去する必要があり，実際の製作が困難である。また，従来のアンテナ系との構造的な違いにより，受信される電波が微弱であることに起因する技術的困難な問題もある。そこで，送信波に変調をかけ，復調された変調波から位相情報の一部を取り出すことにより，多少のばらつきを許し，信号増幅時の技術的な問題も解決している。

2. 雪中レーダシステムの概要

2. 1 従来のシステムの問題点

ホログラフィックレーダでは，その原理的特徴から標的情報を空間的な広がりの中から収集する必要がある。また，像再生処理として，膨大な演算を行う必要もある。

従来のシステムでは，標的情報の収集，つまりホログラムデータの収集に送受信共用のホーンアンテナをX−Y方向に機械的に走査する，いわゆるラスタスキャン型のアンテナ系を使用していた。しかし，このアンテナ系では，データの収集に時間がかかり，実際に使用される

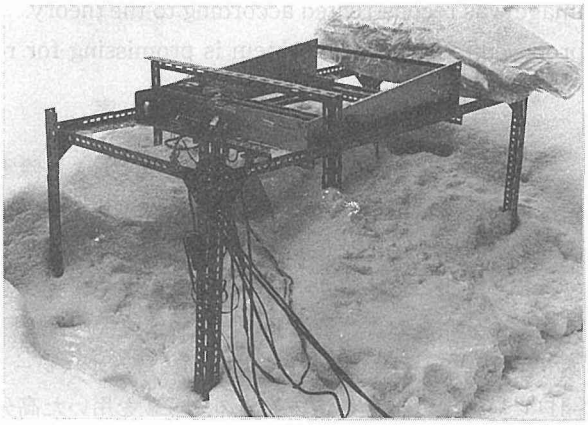

写真 2　従来のスキャナー

環境である降雪厳寒期の野外では機械動作が不安定であり，その構造的特徴から装置が大型化し，可搬性もほとんどなかった。また，像再生処理である計算機処理も16bitのCPUを用いて，全ての処理をソフトウェア上で行っていたため，かなりの処理時間が必要であった。実際の時間としては，データ収集に約30分，像再生処理に約30分の合計約1時間が必要であった。

今回開発した新しい雪中レーダシステムは，以上のような従来のシステムの問題点を解決することを目的としている。具体的には，データ収集のアンテナ系に回転型アンテナアレーを，像再生処理の演算用にDSPを採用することにより問題解決を計っている。そのほかの細かい点についてもほぼ全面的に改善する事により，ホログラムデータ収集から像再生まで2分以下という飛躍的な高速処理化を達成した。

2. 2 アンテナアレー・雪中レーダシステム

マイクロ波ホログラフィックレーダのアンテナ系は，データの高速収集という面からは，2次元のアンテナアレーを用いて電子的に走査するのが望ましい。この方法だと瞬時にして多くのデータを収集することができる。しかし，アンテナ素子の数が膨大となり，技術的に実現が困難である。1次元の送信アレーと1次元の受信アレーをクロスアレーとして組み合わせる方法[2]は，アンテナ素子の数が少なくても，多くの情報を得ることができる有効な方法である。ところが，マイクロ波用の送信アレーを電子的に切り替える装置はコスト高になり，技術的にも難しい。そこで，受信系のみを1次元のアレーとする方法が最も現実的なものとなる。実際には，送信波の周波数を掃引し，受信アンテナを電子的に切り替える時間が必要であるため，本システムの場合には，2次元のアレーを用いた場合との時間的な差はそれ程大きくない。一般的には，1次元のアレーで2次元平面を走査するには，アレーに対して直角方向に機械的に移動させてデータを収集する。この方法を採用すると速度面以外では，従来のシステムの欠点が残ってしまう。そこで，ここで提案する新しい雪中レーダでは，1次元の受信用アレーを回転させデータを収集する方法を採用した。回転型アンテナアレーは，前述のものと比べ機械的に小型化でき，信頼性の高いものを製作することが可能である。

回転型アンテナアレー系では，送信アンテナを固定し，受信アンテナを回転させながらデータを収集するため，送・受信アンテナ間の相対的な角度が常に変化する。したがって，角度が変化しても正しい受信強度を得るため，円偏波アンテナの1つであるヘリカルアンテナを採用した。ヘリカルアンテナを採用したのは，周波数を掃引しながらデータを収集するために必要な，広帯域にわたってSWR・指向性・ゲインが一定であるという特徴を持っているからである。また，2ターンのものを用いているのは，軸比（水平偏波と垂直偏波の比）が1であり，さらに合成開口型のレーダの特徴として指向性の高いアンテナ素子を用いると，分解能が低下するという性質があるためである。さらに，円偏波を用いることにより再生像の質を向上させるという副産物を得る可能性もある。これは，円偏波の特

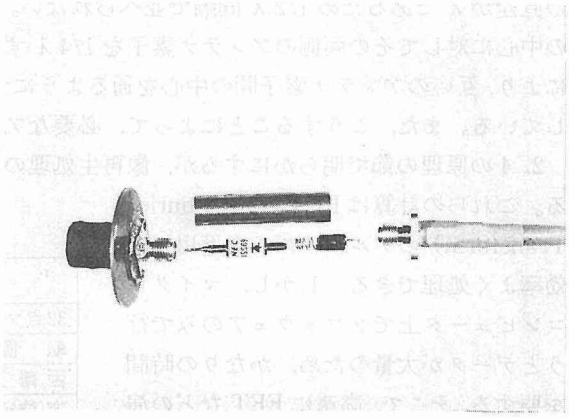

写真 3 ヘリカルアンテナ

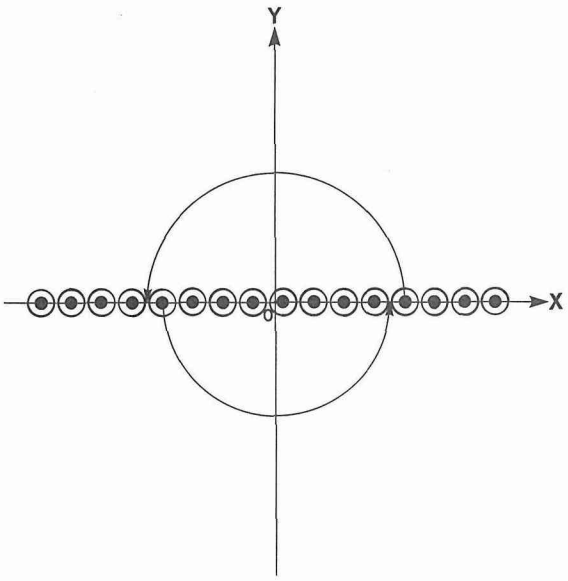

図 1　サンプリング解説図

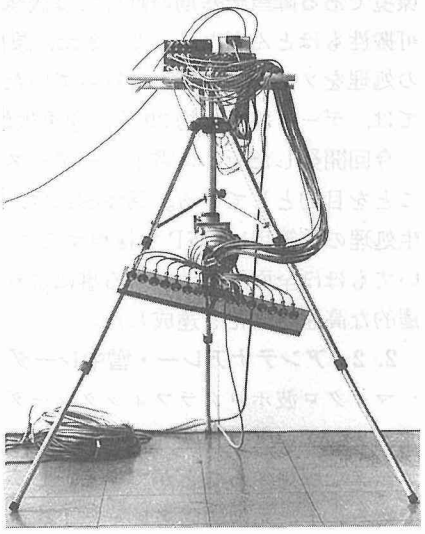

写真 4　回転型アンテナアレー

徴として，固定端反射では旋回方向が逆になり，自由端反射では旋回方向が変化しないという性質があり，これを利用することにより従来のシステムでは不可能であった固定端反射か自由端反射かの区別がつく可能性があることを利用している。実際のアンテナ系では，固定端反射のみを対象としているので，送信と受信に逆旋回のアンテナを用いている。これにより，対象内で2回反射した電波を無視する効果も期待できる。

受信アンテナアレーのアンテナ素子の間隔は，あまり大きく取ると再生の結果，実際に求めようとする位置以外にある物体の像がゴーストとして現われる。これは，離散的フーリエ変換でいう折返し現象である。つまり，ホログラム面上の干渉波パターンをサンプリングする場合，干渉波の間隔の 1/2 よりサンプリング間隔が大きいと，ナイキストの定理より折返しが発生することになる。干渉波の想定される最も短い波長は，マイクロ波の波長に等しく λ であるから，サンプリング間隔つまりアンテナ素子の間隔は 1/2 λ が適当である。しかし，用いたアンテナの反射板の直径が λ であるため 1/2 λ 間隔で並べられない。そこで，回転型であることを活かして，回転の中心に対してその両側のアンテナ素子を 1/4 λ ずつずらした位置に取り付け，1回転することにより，互いのアンテナ素子間の中心を通るようにすることで，1/2 λ 間隔のサンプリングを実現している。また，こうすることによって，必要なアンテナ素子の数は半分になる。

2. 4 の原理の節で明らかにするが，像再生処理の主な計算はフーリエ変換とフレネル変換である。これらの計算は FFT（Fast Fourier Transform）のアルゴリズムを適用して効率よく処理できる。しかし，マイクロコンピュータ上でソフトウェアのみで行うとデータが大量のため，かなりの時間を要する。そこで，高速に FFT などの演算を行うことのできる信号処理用の LSI

表 1　処理時間の比較

	16 bit 8086 +87 fortran	DSP 処理装置
32点フーリエ変換	0.1 秒／1 回	0.1 秒／1024 回
転　置　処　理	---------	3.0 秒
距離方向処理	110 秒	0.1 秒
方位方向処理	600 秒	4.0 秒
総　計　算　時　間	710 秒	7.1 秒

であるDSPを採用して高速化を計っている。しかし，使用しているDSPは画像処理用に開発されたものであり，2次元処理に向いていても，雪中レーダで必要である3次元処理に用いるには工夫が必要である。そこで，DSPで処理するためのデータ加工を16bitのマイクロコンピュータで行っている。そのため，DSP内の処理よりデータ加工のための時間の方が大きくなっているという問題が出てくる。それでも純粋に像再生処理時間だけをDSPを使用しない場合と比較すると，約100倍の高速化がはかれることになる。

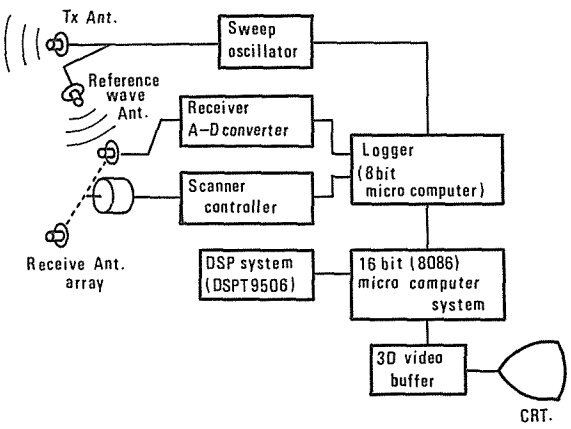

図2 雪中レーダーシステム・ブロックダイアグラム

2.3 送信波の変調

従来のシステムでは，アンテナに送受信共用のホーンアンテナを用いていた。これは，ホーンアンテナ直後の導波管内部に検波用ダイオードをマウントしたもので，送信波自身を参照波とするものであり，必要十分な利得を得ることができるものであった。しかし，新しいシステムのアンテナ系では構造上大きな利得は望めない。実際に受信される電圧は，数μ～数十μVであり，A－D変換器によりディジタルデータにするためには100dB以上の増幅を必要とする。しかし，これを実現するような高利得のDC増幅器を制作するのは，非常に困難である。これは，増幅器には通常数mVのオフセット電圧があるせいで，このように微弱な信号ではオフセットの方が100倍～1000倍も大きくなり，その上，温度によるドリフトもあるためこれらの影響を消し去ることが不可能であるためである。そこで，新しいシステムでは，比較的高利得のものが製作可能であるAC増幅器を使用するために送信波に変調をかけ，マイクロ波で検波し変調周波数のみを取り出し増幅する方法をとっている。

AM変調では，参照波だけでも変調周波数が復調されてしまい，その振幅は参照波の強さに大きく依存し，弱い反射波との干渉による影響は参照波による振幅の上にわずかに現われるだけとなり好ましくない。そこで，実際にマイクロ波にかける変調は，455kHzのDSB（Double Side Band）変調とした。この変調方式は，搬送波に対して上下に変調周波数だけずれた側波帯を持ち，搬送波自身は抑圧されている。したがって，参照波にDSB変調波，照明波に無変調波を用いることにより，干渉波の強度が変調周波数の振幅として得られる。変調周波数を455kHzとしたのは，変調周波数をあまり高くすると搬送波からのずれが大きくなり，これが周波数方向のサンプリング間隔に近くなると問題になるために，あまり変調周波数を高くすることができないためである。また，この周波数は周波数選択素子として高性能であるセラミックフィルタが利用できることも採用理由になっている。受信波の復調は，マイクロ波用ダイオードによって行われており，これは，基本的にはAM変調波を復調するのと同様である。

アンテナアレーを用いる上で問題になるのは，増幅器も含めた素子間のばらつきであり，これを完全に除去することは，製作する上で実際問題として困難である。しかし，干渉パターンを電波の強度データとして得るのであるから，素子間にばらつきがあると正確なデータは得られない。

そこで，復調される変調波はマイクロ波の位相がπ変化する毎に，位相が反転するという特徴を利用している。この位相の変化は0かπしかなく，中間値は存在しない。つまり，復調された変調波と送信波の変調に使用した変調波の位相を比較することにより，2値化された干渉パターンデータを得ることができる。しかも，このデータは原理的には，信号さえあればその強度に関係なく得られるので，素子間のゲインのばらつきに左右されない。実際には，素子間の特性をできるだけ近くなるように調整し，2値化されたデータと強度データを加算してデータとしている。これらの理論的説明については次節で述べる。

2. 4　雪中レーダの原理

雪中レーダの原理は，多周波ホログラフィであり，次に実際のシステム設定における原理について示す。発振器からの出力を2つに分け，一方をそのまま照明波として物体に向け照射し，他方にDSB変調をかけ参照波としホログラム面に向け照射する。用いる電波の周波数をf，変調周波数をf'とする。点物体が(x_o, y_o, z_o)の位置に存在するとき，ホログラム面上の点$R(x, y)$で受信される物体波$g_r(t)$と参照波$u_r(t)$は，

$$g_r(t)=a(z_o)\cdot\exp\left\{j2\pi f\left(t-\frac{l_f+l_o}{v}\right)\right\} \tag{1}$$

$$u_r(t)=b(x,y)\cdot\left[\exp\left\{j2\pi(f+f')\left(t-\frac{l_r}{v}\right)\right\}+\exp\left\{j2\pi(f-f')\left(t-\frac{l_r}{v}\right)\right\}\right] \tag{2}$$

と表わされる。ここで，vは電波の速度を表わす。照明，参照波面での振幅をそれぞれA，Bとすると，$a(z_o)=A\cdot\exp(-z_o/\delta_p)$，$b(x,y)=B/l_r$である。但し，$\delta_p$は減衰距離を表わす定数であり，表皮の深さと呼ばれ，乾いた雪では数mである。

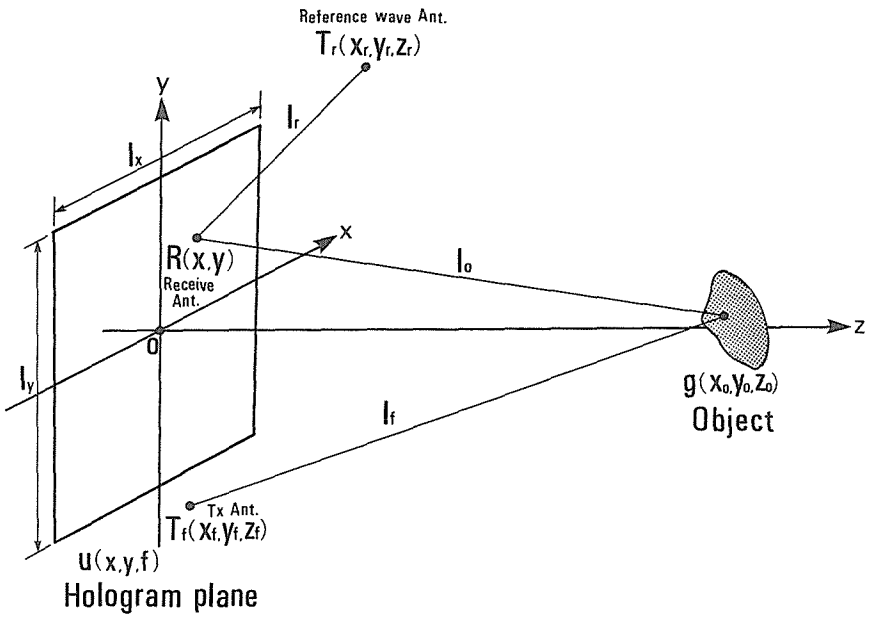

図3　多周波ホログラフィにおける座標系

受信は，検波用のダイオードの二乗検波特性により行っているので，実際に収集されるデータは物体波と参照波の合成強度 $I(x,y)$ である。

$$\begin{aligned} I(x,y)&=|g_r(t)+u_r(t)|^2 \\ &=\left\{a(z_o)\right\}^2+4\left\{b(x,y)\right\}^2\cdot\cos^2\left\{2\pi f'\left(t-\frac{l_r}{v}\right)\right\} \\ &\quad+4a(z_o)\cdot b(x,y)\cdot\cos\left\{2\pi f'\left(t-\frac{l_r}{v}\right)\right\}\cdot\cos\varphi \end{aligned} \tag{3}$$

但し，

$$\varphi=2\pi f\frac{l_f+l_o-l_r}{v} \tag{4}$$

式(3)の第3項目は干渉縞を構成しており，変調周波数 f' の振幅として得られる。一般化のために，物体反射率分布 $g(x_o, y_o, z_o)$ を導入し，

$$g'(x_o,y_o,z_o)=a(z_o)\cdot g(x_o,y_o,z_o) \tag{5}$$

とおいて，フレネル・キルヒホッフの回折積分を用いると，ホログラム面において受信されるデータは，次のように与えられる。

$$u(x,y,f)=4\cdot b(x,y)\int_0^\infty\int_{-\infty}^{\infty}\int_{-\infty}^{\infty}g'(x_o,y_o,z_o)\cdot\cos\varphi\,dx_o\,dy_o\,dz_o \tag{6}$$

ここで，式(6)に既知である位相項 $\exp(-j2\pi fl_r/v)$ をかけ，ホログラムの結像作用に着目すると，

$$u'(x,y,f)=\int_0^\infty\int_{-\infty}^{\infty}\int_{-\infty}^{\infty}g'(x_o,y_o,z_o)\cdot\exp\left(-j2\pi f\frac{l_f+l_o}{v}\right)dx_o\,dy_o\,dz_o \tag{7}$$

と書き換えられる。さらに，l_f，l_o をフレネル領域に設定してフレネル近似し，周波数 f を中心周波数 f_o とそれとの差 Δf とすると，

$$\begin{aligned} -j2\pi f\frac{l_f+l_o}{v}&\fallingdotseq-j2\pi f\frac{2z_o-z_f}{v}-j\frac{2\pi f_o}{v} \\ &\cdot\left\{\frac{(x_o-x_f)^2+(y_o-y_f)^2}{(2z_o-z_f)}\right. \\ &\left.+\frac{(x-x_o)^2+(y-y_o)^2}{2z_o}\right\} \end{aligned} \tag{8}$$

と近似できるので，式(7)は次式で表わすことができる。

$$\begin{aligned} u'(x,y,f)=&\int_0^\infty\exp\left(-j2\pi f\frac{2z_o-z_f}{v}\right)\int_{-\infty}^{\infty}\int_{-\infty}^{\infty} \\ &\cdot g'(x_o,y_o,z_o)\cdot\exp\left[-\frac{2\pi f_o}{v}\left\{\frac{(x_o-x_f)^2+(y_o-y_f)^2}{(2z_o-z_f)}\right.\right. \\ &\left.\left.+\frac{(x-x_o)^2+(y-y_o)^2}{2z_o}\right\}\right]dx_o\,dy_o\,dz_o \end{aligned} \tag{9}$$

ここで，

$$\begin{aligned} h(x,y,z_o)=&\int_{-\infty}^{\infty}\int_{-\infty}^{\infty}g'(x_o,y_o,z_o)\cdot\exp\left[-j\frac{2\pi f_o}{v}\right. \\ &\left.\cdot\left\{\frac{(x_o-x_f)^2+(y_o-y_f)^2}{2(z_o-z_f)}+\frac{(x-x_o)^2+(y-y_o)^2}{2z_o}\right\}\right]dx_o\,dy_o \end{aligned} \tag{10}$$

とおくと，式(9)は次のようになる。

$$u'(x,y,f)=\int_0^{\infty} h(x,y,z_o)\cdot\exp\left(-j2\pi f\frac{2z_o-z_f}{v}\right)dz_o \tag{11}$$

式(10)は，位相歪の伴ったフレネル変換の式となっているが，この位相歪は強度を再生像としているのでその影響は除去される。

したがって，本手法で得られるホログラムは基本的には，物体の距離方向の情報を周波数方向に関しフーリエ変換した形で，方位方向の情報をx，y平面に関しフレネル変換した形で，それぞれ独立した形で記録されることになる。よって，得られデータからの像再生の主な処理は，距離方向の処理としてフーリエ逆変換を行った後に，更に方位方向の処理として，各距離において2次元のフレネル逆変換を行うというものである。ところで，フレネル変換を効率よく行う方法として，フーリエ変換を1回または2回用いた方法が知られている[3]。本研究では，探査距離が近距離であるため2回フーリエ変換を使用する方法を採用した。つまり，像再生処理はFFTを使用することで非常に効率よく行うことができ，これらの処理をFFT演算が得意なDSP上で行うことにより，高速処理が可能になる。

3. 実験結果および考察

3. 1 実験の設定

制作したシステムが理論通り動作することを確かめるため，ホログラフィの基本であるFZP（Fresnal Zone Plate）が得られるべく設定し，実験を行った。FZPは同心円群で表わされ，得られたデータを見るだけで，正しいデータかどうかをおおよそではあるが判断でき，システムの基本テストとして最適である。照明・参照波源の位置による位相歪を考えなくてよく，再生が簡単になるように設定した。参照波源をホログラム面で平面波に見なせるように遠方に置き，照明波源をホログラム面に向けそのまま物体波とし，参照波を平面波として像再生処理した場合，ホログラム面から約90cmの所に再生されるように設定を行った。また，回転型アンテナアレーであるため，素子間のばらつきがあるとその影響が同心円状に現われ，回転軸を中心とした円群のデータであると正しいデータかどうかの判断がしにくいことから，実験では意図的に照明波源を中心からずらして設定した。

3. 2 単周波での実験

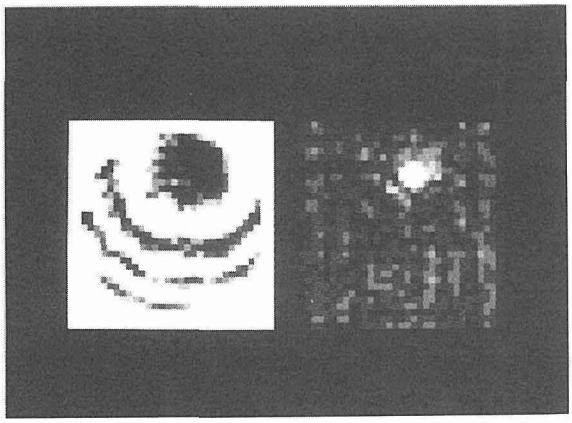

写真 5 単周波ホログラムデータ（左）と再生像（右）

まず，アンテナ系が正しくデータ収集をする事を確認するため，単周波（9GHz）で実験を行った。もともと周波数方向に32点のデータを取るように設計してあるため，同一のデータが32個取れる。したがって，32個のデータを重ねることによりノイズの影響を減らすことができ，比較的きれいなデータが得られる事が予測できる。得られたデータは，写真5の左のものであり，FZPを確認することができる。このデータを2次元のフレネル逆変換し，像再生処理を行った結果が同写真の右である。このように，

単周波の実験では正しいデータが得られ，像も再生できることが確認された。

3. 3 多周波での実験

多周波で実験を行うのに先立って，計算機上でシミュレーションを行った。写真 6 に示すのが作成したシミュレーションのホログラムデータであるが，これは DSP 上の表現で，上段が実部，下段が虚部のデータを表わす。しかし，この表示ではわかりにくいので，並べ変えて表示したのが写真 7 である。上 2 段が実部，下 2 段が虚部のデータを表わし，各ボックスは各周波数別の方位方向のデータであり，左上から右下に向かって周波数が高くなっている。写真 8 は距離方向処理（周波数方向のフーリエ逆変換）を行った結果である。さらに，方位方向の処理（方位方向のフレネル逆変換）を行った再生像は写真 9 であり，点像が設定距離に再生されている。

実験は周波数を 8GHz から 9GHz まで掃引して行った。得られたホログラムデータは写真 10 であり，単周波の場合に比べノイズが目立つ。しかし，距離方向の処理を行うと写真 11 に示すように，距離方向圧縮に成功している。ところで，対称位置にも FZP が見られる。これは，フーリエ変換でいう折返し現象である。距離方向圧縮されたデータに方位方向処理を行ったのが，写真 12 であり，距離方向は 15cm 毎のボックスになっているので，7 つ目のボックス，つまり 90cm の

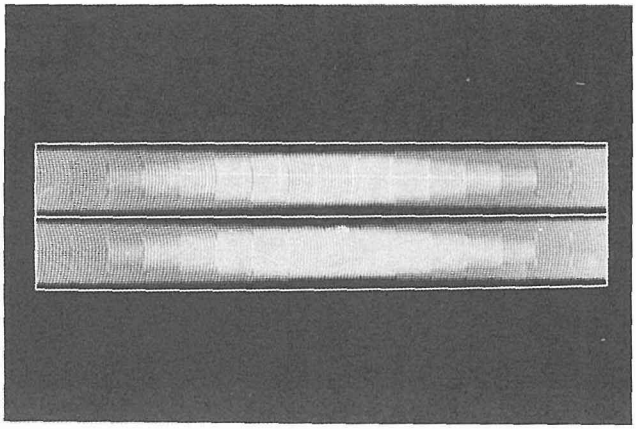

写真 6 多周波シミュレーションデータ（DSP 内部表現）

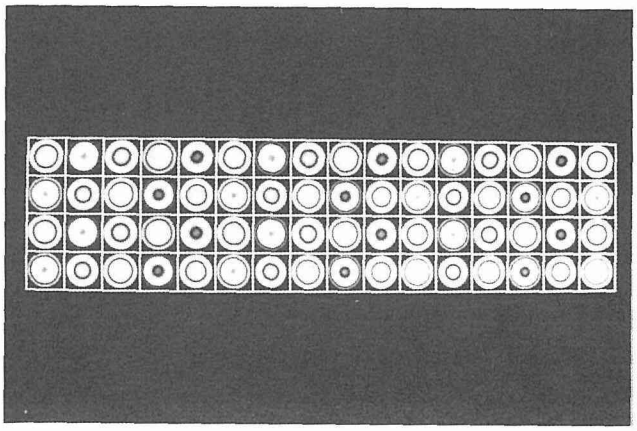

写真 7 多周波シミュレーションデータ

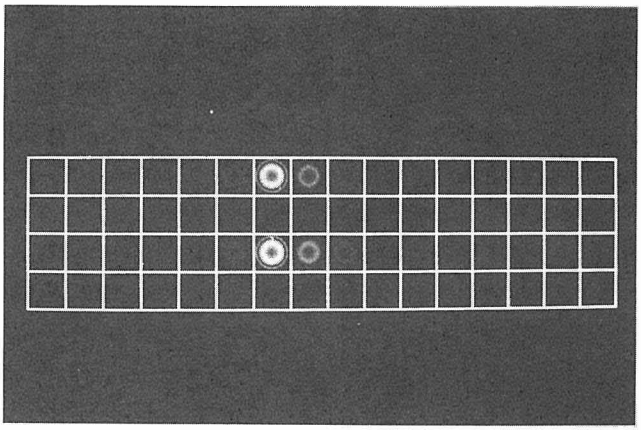

写真 8　距離方向処理後のデータ

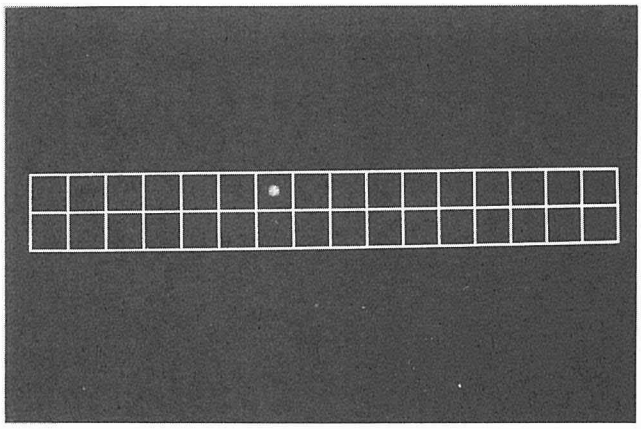

写真 9　再　生　像

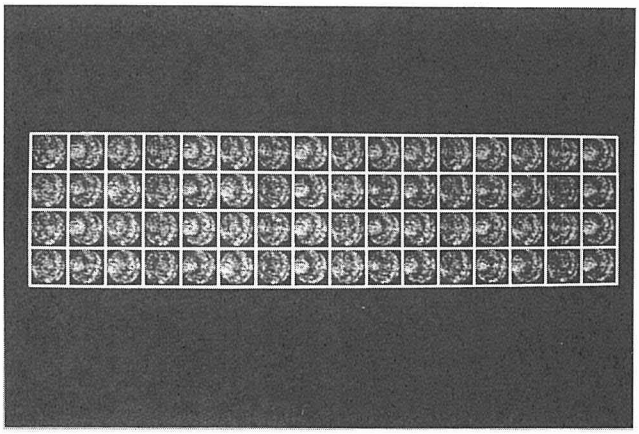

写真 10　多周波ホログラムデータ

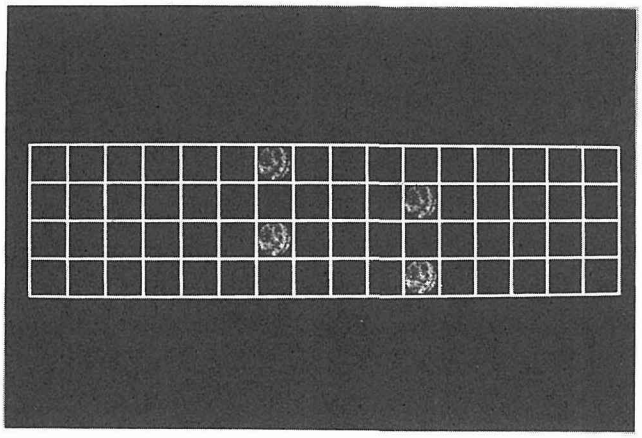

写真 11 距離方向処理後のデータ

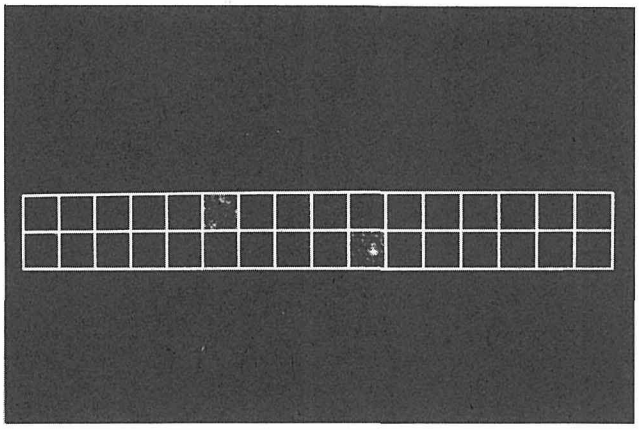

写真 12 再 生 像

所に像が再生されていることが確認できる。折返し像は，方位方向処理を行っても結像しないため，ぼけて再生されていない。

4. 結　　論

雪中レーダシステムの高速化を目指し，回転型アンテナアレーと DSP を中核にした新しいシステムを考案し，制作，基礎実験を行った。その結果，データ収集から像再生まで 2 分以下という高速化が実現でき，更にその半分程度の高速化の可能性を残していることを確認した。点像ではあるが，多周波での像再生にも成功し本手法の正しさが実証された。当然，今後は積雪に対して実験を行う予定である。本システムは，高速化に不可欠なアンテナアレー化にかかわる諸問題の解決手法の 1 つを提示するものであり，最近の LSI 技術の発達によるディジタル信号処理の高速化により，ホログラフィックレーダの欠点である処理時間の問題も，近い将来大方解決できることを示唆するものである。現在，高速に 3 次元データを 2 次元表示用に変換する装置も開発中であり，リアルタイムで再生像を自由な面，及び方向から見る様に表示出来るようにする予定である。

謝　　辞

本研究は，文部省科学研究費補助金（試験研究－2課題番号61850065）及び(財)セコム科学技術振興財団の援助のもとに行なわれたものである。これらの助成に対して感謝する。

参 考 文 献

1） 坂本雄児，田尻克博，澤井孝哉，青木由直：信学論(B)，Vol. J70-B，No. 12(1987)，pp. 1544-1550.
2） 松尾優，山根国義：レーダホログラフィ（昭55），p. 119，電子通信学会.
3） 青木由直，石塚滋樹：信学論(B)，Vol. J57-B，No. 8(1974)，pp. 511-518.