



HOKKAIDO UNIVERSITY

Title	雪中レーダの高速化とデータ処理に関する研究
Author(s)	三橋, 龍一
Degree Grantor	北海道大学
Degree Name	博士(工学)
Dissertation Number	甲第3213号
Issue Date	1993-03-25
DOI	https://doi.org/10.11501/3071509
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/49889
Type	doctoral thesis
File Information	000000265351.pdf



市中データの高速化と
データ延滞に関する研究

三橋 龍一

①

学位論文

雪中レーダの高速化と
データ処理に関する研究

目次

1 序論

1.1 研究の背景と意義

1.2 研究の目的と範囲

1.3 論文の構成

2 雪中レーダの基本原理と特性

2.1 レーダの基本原理

2.2 雪中レーダの特性

3 高速化のための技術的検討

3.1 高速化の必要性

3.2 高速化のための技術的検討

3.3 高速化の実現

4 データ処理の高速化と精度向上

4.1 データ処理の現状

4.2 データ処理の高速化と精度向上のための技術的検討

4.3 データ処理の高速化と精度向上の実現

5 結論

5.1 本研究の成果

5.2 今後の研究課題

平成4年12月

北海道大学大学院工学研究科
情報工学専攻 応用計算機工学講座

三橋 龍一

目次

1 序論	4
2 雪中レーダの原理	9
2.1 はじめに	9
2.2 パルスエコー法	10
2.3 合成開口法	13
2.4 長波長ホログラフィ法	15
2.5 雪中レーダのホログラフィ法	16
2.6 むすび	18
3 回転型アンテナアレーによる高速雪中レーダ	19
3.1 はじめに	19
3.2 回転型アンテナアレーを用いた雪中レー ダのホログラフィ理論	20
3.2.1 回転型アンテナアレーを想定し たホログラムの記録	21
3.2.2 像再生法	28
3.3 回転型アンテナアレーを用いた雪中レー ダ実験システム	30

3.3.1	回転型アンテナレー	38
3.3.2	照明波の変調	44
3.3.3	D S P による像再生処理	47
3.4	実験結果	48
3.4.1	実験の設定	48
3.4.2	空中単周波実験	49
3.4.3	空中多周波実験	50
3.4.4	雪による実験	52
3.5	むすび	63
4	積雪の比誘電率推定による自動像再生法	64
4.1	はじめに	64
4.2	実験システムにおける多周波ホログラ フィ理論	66
4.3	積雪が多周波ホログラフィ法に与える影 響	71
4.4	積雪の比誘電率の推定法	77
4.4.1	像再生処理	77
4.4.2	比誘電率の推定法	78
4.4.3	結像の判定法	78
4.5	雪中レーダによる実験結果	83
4.5.1	雪中レーダの諸元	83
4.5.2	実験結果	87
4.5.3	表示法	89
4.5.4	実験結果（複雑な形状物体の検 出）	93

目次	3
4.6 むすび	99
5 総括	105
謝辞	
参考文献	
研究業績一覧	

第 1 章

序論

積雪の多い地方では、雪崩や屋根からの落雪等による遭難者の捜索、および除雪車による除雪作業時における事故防止等のため、積雪内部にある物体の探査用レーダの実用化が望まれている。そのような要求に答える映像化レーダには、数 m 程度と一般的なレーダにとっては非常に近距離にある小物体を検出し、その形状が分かる程度の解像度で観測者に対して提示する能力が必要である。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り、人工衛星による観測も試みはじめられている。例えば、南極大陸等の氷床内部の構造や氷床下の地形の測定、積雪量の推定、流水の観測などが行われている。しかし、ほとんどの研究対象は雪氷そのものの観測・測定である。本論文で研究対象としている、積雪内に埋没した物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り、近年になってわずかな研究報告が行われているにすぎない。一方、土壌に対しては埋設した水道管、ガス管などの探査を目的とした地中レーダ

が研究されており、一部は既に製品化されている。地中レーダは、エジプトのピラミッド内部の探査や遺跡の探査などにも応用され、注目を集めている。しかし、現在市販されている地中レーダはパルスエコー法を原理としており、あまり高い分解能は期待できない。そこで近年、合成開口の手法を用いて分解能を向上させる研究が、盛んに行われている。地中レーダで積雪内の探査を行う事も可能である。実際に市販されている地中レーダで、筆者らが積雪内の探査を行ったところ、土壌よりも積雪の方が媒質的に均質であるため物体からの反射が明瞭であった。しかし、分解能が低いため物体の有無程度しか判別できず、その形状まで把握するのは困難であった。

積雪内の探査用レーダとして筆者が所属する北海道大学工学部では、従来から雪中レーダの研究が続けられている。雪中レーダは、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、一般的なパルスエコー型のレーダでは困難である近距離の探査と、必要とされる高い分解能を得ることができるものである。波動として用いる電波は、雪に対する透過性とレーダの分解能の両方の観点から、Xバンドのマイクロ波としている。既に、試作した雪中レーダで実験を行い、所期の性能が得られることが確認されている。

しかし、雪中レーダの問題点も次第に明らかになってきた。その一つは、処理速度に関するものである。これは、雪中レーダの原理によるものである。雪中レーダでは、その原理的特徴から標的の位置と形状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、膨大な演算を行なう必要もある。従来のシステムでは、データの収集から像再生まで約1時間を要していた。この処理時間では、雪中レーダの応用範囲は限られたものになる。そこで、高速化の可能性を探る高速処理が可能な装置を製作面上から検討した。アンテナ系をアレー化し、像再生処理もDSP (Digital Signal Processor: デジタル信号処理装置) 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。

もう一つの問題点は、積雪を対象としていることに起因するものである。積雪の電気的特性は、その積雪の状態で変化する。そのため、雪中レーダの像再生処理に必要な積雪の比誘電率を、探査と同時に何らかの方法で測定する必要があった。そこで、雪中レーダのデータの特徴から積雪の比誘電率を推定する方法を考案した。理論のみならず、試作した雪中レーダで得られたデータでその有効性を確認した。

本論文は、雪中レーダの実用化に不可欠な高速化をハード面から追求し、実際の制作上無視できない実現性・経済性の面からも検討を行い、さらに、雪中レーダの原理的な特性から、像再生処理に必要な積雪の比誘電率を自動推定する手法について述べたものである。本論文は、全体が以下にあげる5章から構成されている。

- 第1章 序論
- 第2章 雪中レーダの原理
- 第3章 回転型アンテナアレーによる高速雪中レーダ

- 第4章 積雪の比誘電率推定による自動像再生法
- 第5章 総括

以下に、各章の内容の概要を記す。

第1章では、序論として本論文を起草するにいたった背景と全体の構成が述べられている。

第2章では、雪中レーダの基本原理として多周波ホログラフィ法を用いている理由を述べている。処理時間の観点からは、パルスエコー法が原理的にも単純で有利であるが、雪中レーダに適用するには問題がある。積雪中の探査では、透過性の問題からあまり短い波長の電波は使用できず、単純なパルスエコー法では十分な分解能が得られない。また、近距離での探査では電波の反射時間が非常に短いため、装置の技術的問題がある。そこで、雪中レーダでは近距離で高い分解能が期待でき、さらに装置の試作も比較的容易であるホログラフィ法の原理を応用している。

第3章では、高速化をめざして回転型アンテナアレーやDSPシステムを用いた雪中レーダシステムについて述べている。合成開口タイプのレーダのアンテナ系では、データ収集の高速化を実現する手法としてはアンテナ素子のアレー化が一般に行われている。しかし、実際に制作する場合、多数の素子を用いることで、素子のばらつき、配置、経済性などが問題になる。そこで、それらの問題の解決法の1つとして、回転型アンテナアレーを考案した。回転型アンテナアレーを

用いるホログラフィ理論や信号処理に新しい手法を導入した。

第4章では、雪中レーダの像再生処理に必要な積雪の比誘電率を雪中レーダのデータ自身から推定する方法について述べている。雪中レーダの基本原理が多周波ホログラフィ法であることから、収集されるデータの特性を解析し、その結果から積雪の比誘電率を自動推定する方法を考案した。試作した雪中レーダの実験データで、その有効性を確認した。さらに、雪中レーダの研究において当初からの目標の1つであった人体の検出の実験も行った。

第5章では、全体の総括として、本論文の研究で得られた成果を要約して述べている。

第 2 章

雪中レーダの原理

2.1 はじめに

電磁波、エックス線、音波などを用いて、直接肉眼では観測できない物体を映像化する研究が各分野で行われている。それは、一般に不可視情報の映像化と呼ばれるものである。特に、医療分野ではその必要性から研究が進んでおり、超音波診断装置、エックス線 C T、M R I など体内を映像化する優れた装置が既に実用化されている。

本論文で述べている雪中レーダは、積雪内に埋没した物体の映像化を目的とした 3 次元映像化レーダシステムである。雪中レーダで対象としている積雪は、可視光は当然として音波に対しても透明度は悪い。このことは、降雪期の夜が静かである事例からも容易に理解される。そこで、雪中レーダでは積雪に対する透過性が比較的良いとされる電波を用いて探査を行っている。レーダの分解能からは、波長が短い電波すなわち高い周波数が、積雪に対する透過性からは低い周波数が望まれる。そこで、両方の観点から X バンドのマイクロ

波を使用することにした。更に、雪中レーダでは、研究目的の達成に必要な高い分解能を得るために、ホログラフィ法を拡張した多周波ホログラフィ法を用いている。本章では、雪中レーダの原理として多周波ホログラフィ法を採用した理由を、不可視情報の映像化としては基本的な手法であるパルスエコー法の原理的性能限界を通じて述べ、合成開口法やホログラフィ法の時代的背景についても触れる。

以下では、まず第2.2節でパルスエコー法について簡単に解説し、第2.3節で分解能を高める合成開口法について述べる。第2.4節では、雪中レーダの基本原則である長波長ホログラフィ法について説明し、第2.5節で雪中レーダへの適用について述べる。

2.2 パルスエコー法

一般にレーダは、アクティブレーダとパッシブレーダに大きく分けられるが、本論文では単にレーダと記すと前者を意味するものとしている。アクティブレーダは、その名が示すように能動的にレーダ装置から波動を照射し、その反射波を受信するものである。アクティブレーダにより探査を行う場合、指向性の鋭い波動を照射し、その反射時間とアンテナの方向を情報として処理するパルスエコー法が単純で実用的である。

不可視情報の映像化の手法として、パルスエコー法が多用されている。この方式は、電波を用いたものでは航空管制用のレーダ、超音波では医用診断装置や魚群探知機など広く一般的に実用化されている。その原理を簡単に、医用診断装置

を例にとり説明する。この原理は、一般的な地中レーダでも超音波を電波に置き換えるだけで同様である。

以下のような手順により映像化する。

1. 超音波探触子を体表にあて、ビーム状の超音波パルスを発射する。
2. 超音波は体内を一定速度で進み、媒質が変化するとそこで一部が反射する。
3. 反射波は探触子で検出される。
4. 探触子を体表上で移動させ、対象各位置について反射波を検出する。
5. 検出された信号をC R T上の輝点として、以下のように対応づけて表示する。
 - 輝 度 → 反射波の強度
 - 輝点の横座標 → 探触子の位置
 - 輝点の縦座標 → パルスが反射波として検出されるまでの時間

このようにして表示された輝度分布は、対象となった人体の断層像を表わすものになる。この手法を使用すると、複雑な演算処理等が必要ないため、ほぼ実時間で映像化でき、用途によっては十分な性能をもつ装置が実現できる。

しかし、分解能を考えると位相操作等のビームパターン形成操作を行わない単純なパルスエコー法では原理的な性

能上の問題がある。探触子の走査方向（横方向）の分解能は、ビーム幅で決まる。一方、超音波の進行方向（縦方向）の分解能は、パルス幅の分解能に対応する。超音波に関しては、電子回路技術によってパルス幅は十分に狭くすることが可能であるので、縦方向の分解能はほとんど問題がない。また、電波領域においても最近のレーダ工学では、距離方向の分解能を決定するのは送信パルス幅ではなく、送信パルスの有する周波数帯域幅であると考えられるようになり、帯域幅を広くするためにパルス内に変調を施した特殊な送信信号が使われるようになった。つまり、パルス圧縮方式である。しかし、ビーム幅に関しては、パルスエコー法の原理を保ったまま狭くするのは困難である。

ビーム幅を細くして、分解能を上げることが困難であるのは、次のような理由による。開口幅 D のアンテナから平面波を放射した放射界を近似的に解析すると、波長 λ の波動を放射すると、アンテナ面から D^2/λ までは波動は直進して、幅 D のビームが形成される。しかし、それ以上の距離では伝搬距離 z に対して、 λ/D の傾きでビームは広がってしまう。したがって、分解能を上げるためビーム幅を細くしようとして、開口幅を小さくすると直進距離は短くなる。しかも、広がるときの傾きが急であるため、ごく近傍領域での分解能を上げることしかできなく、それ以上の距離では逆に開口幅が小さい方がビーム幅が広くなり分解能が低下する。波長を短くする、言い換えると波動の周波数を高くすると直進する距離が大きくなるので開口幅が小さくても鋭いビームを得ることがで

きる。しかし、用いる波動の周波数は対象とする媒質に対する減衰をから自ずから限られてしまう。例えば、「乾いた雪」での減衰距離を表わす表皮の深さは、 6GHz では 8m 程度だが 35GHz では数十 cm 程度となる。つまり、周波数が高くなるにつれ、媒質による減衰は飛躍的に大きくなるので、単純に高い周波数を用いるわけにはいかない。

雪中レーダにおいて、物体が何であることを認識することができるためには、最低でも 10cm 程度の分解能が必要であると考えられる。そこで、開口幅 $D = 10\text{cm}$ 、波長 $\lambda = 3\text{cm}$ とすると、 $D^2/\lambda \simeq 33\text{cm}$ であり、 10cm の分解能が保てるのは 33cm までということになる。また、ビーム幅は 1m では 30cm 、 2m では 60cm まで広がってしまう。さらに、開口幅を 5cm に狭めると直進する距離は僅か 8cm 程度になってしまい、それ以降のビームが広がる割合は、開口幅を 10cm としたときの倍になる。

以上のことより、単純なパルスエコー法は単に物体があることを認識することを目的とし、高い分解能を必要としない場合、または、波長の短い波動を利用でき、しかもごく近傍のみを対象とする場合には適用できるが、雪中レーダに適用しても目標とする性能を得ることが困難であることが理解される。

2.3 合成開口法

近年、航空機や人工衛星などから、地表・海面など地球対象物からの放射または散乱波を受信観測することにより、観測領域を映像化するリモートセンシングの研究が盛んに行な

われている。観測する波動の種類によっては、地形の観測のみならず、地球環境の調査、資源探査、自然災害の予測などにも役に立つ。中でもマイクロ波を用いたアクティブレーダは、雨・霧・雲などの気象条件や昼夜に関わらず、地上の地形や構造物などを映像化できるため、古くから研究開発が進んでいる。航空機搭載型側方監視レーダ（SLAR）が、その代表的なものである。

SLARには形式上、実開口SLARと合成開口SLARがある。実開口SLARは、航空機に搭載した比較的大きなアンテナからのマイクロ波ビームにより、航空機の進行方向に平行な刈り幅の地形が映像として観測されるものである。しかし、マイクロ波の波長は光波に比べかなり長いため、一般の航空写真に比べ分解能がかなり悪くなるという難点がある。距離方向の分解能はパルスエコーレーダと同様に、パルス圧縮することによって向上させられるが、飛行方向の分解能は飛行高度を下げるか、アンテナのビーム角を狭くしなければならない。ビーム角を狭くするには周波数を高くするか、アンテナ開口長を機軸方向に長くする必要があるが、これらには自ずから限界がある。そこで、飛行方向の分解能を飛躍的に向上させるために登場したのが以下に述べる合成開口SLARである。

合成開口SLARの基本概念は、1951年 C.Wiley によって提唱された「ドップラシャープニング」という考えである。これは、動いているレーダビーム内にある静止物体は、ドップラ偏移を測ることにより解像できるというものである。また、このような合成開口の手法は、次の節で述べるホログラフィ技術

と一致融合するものである。このことは、合成開口アンテナの考え方でも説明される。航空機に搭載される実際のアンテナが、航空機の飛行方向に並べられた長さが地上のビーム幅の長さである仮想的な1次元のアンテナアレーの一つの素子であり、次々と仮想的なアレーの素子の位置を通過し、それぞれの点での受信信号の振幅と位相を記録しておき、あとで適当な合成処理をすることにより、実質的にビーム幅の開口をもつアンテナで地球対象物を測定したのと等価になるという説明もできる。つまり、合成開口SLARは距離方向の情報はパルスエコー型のレーダと同様にして得て、方位方向の情報はホログラフィの原理と同様な手法で得ることにより、高い両方の分解能を得ることができるレーダであるといえる。

2.4 長波長ホログラフィ法

ホログラフィの原理は、光学の分野で1948年 D.Gabor (1971年ノーベル賞受賞者) が電子顕微鏡の収差を除くことを目的として提案したものである。それは、物体からの回折パターンと参照波との干渉縞で物体の情報を波面情報という形で記録するというもので、強度のみを記録する通常の写真技術とはまったく異なった技術である。また、ホログラフィは波面再生技術であるので光波領域に限らず、他の種類の波動を用いても記録・再生が可能である。特に近年、超音波・マイクロ波など光に比べ長い波長の波動を用いた長波長ホログラフィが、不可視情報の映像化技術として脚光を浴びている。

長波長ホログラフィでは、ホログラフィにとって不可欠なコ

ヒーレントな波源が得やすい。また、長波長であるがため光領域のホログラフィに比べ情報密度が低いので情報量的に計算機処理が可能であり、デジタル処理を行うことにより再現性・処理の自由度が優れている。ここで計算機処理が必要なのは、記録されるホログラムはそのままでは単なる波動場の干渉パターンに過ぎず、像としては認識できないので、その像の再生処理としてである。この再生処理の操作の主なものは、フーリエ変換やフレネル変換である。この再生処理は、可視光領域のホログラフィの場合、光学系の持つ並列演算機能によって一瞬のうちに行なわれる。そこで、長波長ホログラフィでも縮小して光学的に再生処理をする試みも行なわれていた。しかし、最近の計算機能力の向上により長波長ホログラフィでは計算機処理が主流になってきた。これは、処理容量では光学的処理に劣るが、長波長であることにより有効なデータが光領域のそれに比べ、およそ波長比だけ少ないのであまり問題にならず、光学的処理では現像などの不確定的な要素が入るため困難であった実時間処理が高性能な計算機によって可能になりつつあるためである。さらに、デジタル処理であるためフィルタリングなどの画像信号処理が容易であるため、光学系では困難である各種の加工が可能になるなど利点が多い。

2.5 雪中レーダのホログラフィ法

雪中レーダの原理は、周波数掃引の手法を用いた長波長ホログラフィである。FM-CWを用いたレーダに合成開口の処理

を加えたものと、ほぼ同様の原理であると言える。ただし、周波数は離散的にサンプリングしているため正確には「多周波の長波長ホログラフィ」といえる。

雪中レーダは、方位方向の情報はホログラフィの手法により得ている。距離方向の情報は、もともとホログラフィの特徴として3次元の情報が再生されるはずであるが、合成開口幅を十分に大きく取れないため、焦点調整によって得られる奥行き分解能は方位方向に比べきわめて劣ったものになる。そこで、合成開口SLARと同様に距離方向は、パルス圧縮により分解能を高める必要がある。しかし、普通のパルス圧縮では時間方向のパラメータも必要になり、データの収集速度の問題が生じる。そこで、雪中レーダでは複数の周波数でホログラムを記録し、各周波数での位相回転により距離方向の情報を得る手法を用いている。これは、原理的には広帯域送信波をパルス圧縮処理によって狭いパルスを合成する、FM-CW等とほぼ等価である。また、多周波ホログラフィ法では時間方向のパラメータを持たないため、通常のパルス圧縮にみられるデータの収集速度の問題から解放される。

雪中レーダでは、多周波ホログラフィ法を用いることにより、数 m の領域で方位・距離方向とも要求される高い分解能を得ることが可能になった。また、多周波ホログラムからの再生処理は、距離方向は周波数方向の1次元のフーリエ逆変換、方位方向は2次元のフレネル逆変換で処理でき、これらはいずれもFFT演算の組み合わせで実現できるため、処理の複雑さに比べ計算機上で高速処理が可能である。

2.6 むすび

本章では、雪中レーダの原理として多周波ホログラフィ法を用いている理由について述べた。単純なパルスエコー法を原理とした場合と比べ、処理時間に関しては不利であるが、積雪内に埋没した物体をそれが何であるかが認識できる程度の分解能を得るためには、有効性が大きい。

しかし、その原理の特性に起因する問題点もある。つまり、ホログラフィ法という原理により空間的な広がりからデータを収集しなければならず、映像も収集されるデータは干渉パターンにすぎないため、画像処理を行わなければならない。また、積雪を対象としているために生じる問題もある。本論文の次章以降では、それらの問題点を解決すべく行った研究について述べている。

第 3 章

回転型アンテナアレーによる高速雪中レーダ

3.1 はじめに

雪中レーダは、その研究目的から実時間処理を理想とした高速化が望まれる。雪中レーダにおける処理過程は大きく、データ収集と像再生処理の2つに分けられる。像再生処理はコンピュータによるFFT演算を主とするデジタル信号処理である。近年のデジタルIC技術のめざましい発達により信号処理専用の高性能なDSPが比較的容易に利用できるようになり、特にFFTのような汎用性の高い演算には専用の高性能なものが安価に入手可能になってきている。一方、データの収集に関してはホログラフィ法という原理的な特徴から標的の形状情報を空間的な広がりの中から収集する必要がある。そのため、1個のアンテナを用いた場合は基本的に2次元平面の走査が必要になり、これを機械的に行うのは時間的に不利である。2次元のアンテナアレーを用いる事が望

ましいが、技術的・経済的な問題で現在のところ研究室レベルでは実現が困難である。そこで、次善の策として1次元のアンテナアレーを組み合わせたものが報告されている。本章では技術的に制作が容易で経済的にも有利な回転型アンテナアレーを考案し、その基本原理から装置の試作、基礎実験結果までを述べる。

以下では、まず第3.2節で回転型アンテナアレーにおけるホログラフィ理論について解説し、第3.3節では試作した雪中レーダシステムについて述べる。第3.4節では、試作した雪中レーダシステムで行った基礎実験の結果について述べる。

3.2 回転型アンテナアレーを用いた雪中レーダのホログラフィ理論

回転型アンテナアレーとは、受信用のアンテナを回転する直線状のアンテナアレーとし、光波系のホログラフィでは代表的な手法である二光束干渉法に近い手法でホログラムを記録するものである。しかし、ホーンアンテナ等の利得の高いアンテナの使用ができず、受信信号の増幅や方式そのものから生ずる問題解決のため、送信波にDSB (Double Side Band modulation) 方式の変調や円偏波を取り入れている。

回転型アンテナアレーを用いた雪中レーダのデータ収集系は、図3.1に示すように、受信アンテナと送信アンテナである照明波用と参照波用を別々に設定して、照明波は物体に、参照波は受信アンテナにのみ直接照射するというものである。また、送信波は参照波のみにDSB方式の変調をかけ、照明

波は無変調つまり搬送波のみという方法をとっている。

3.2.1 回転型アンテナアレーを想定したホログラムの記録

雪中レーダの基本原理は、多周波ホログラフィ法である。つまり、ステップ状に変化する各周波数毎にホログラムを記録するものである。次に、実際のシステム設定における原理について示す。図3.1に示したように、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、DSB方式の変調をかけた方を参照波とし斜め前方からホログラム面に向け照射する。座標系は図3.2に示すものである。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 $R(x, y, 0)$ で受信される物体波 $g_r(t)$ と参照波 $u_r(t)$ は、

$$g_r(t) = a(z_o) \cdot \exp \left\{ j2\pi f \left(t - \frac{l_a + l_o}{v} \right) \right\} \quad (3.1)$$

$$u_r(t) = b(x, y) \cdot \left[\exp \left\{ j2\pi (f + f') \left(t - \frac{l_r}{v} \right) \right\} + \exp \left\{ j2\pi (f - f') \left(t - \frac{l_r}{v} \right) \right\} \right] \quad (3.2)$$

と表わされる。ここで、 v は空気中の電波の速度を表わす。照明波源面と参照波源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、 δ_p は減衰距離を表わす定数であり、電界の強度が $1/e \simeq 0.368$ に減衰する距離である。この定数は、表皮の深さと呼ばれている。積雪に相当する誘電定数で計算すると、周波数が高いほどまた誘

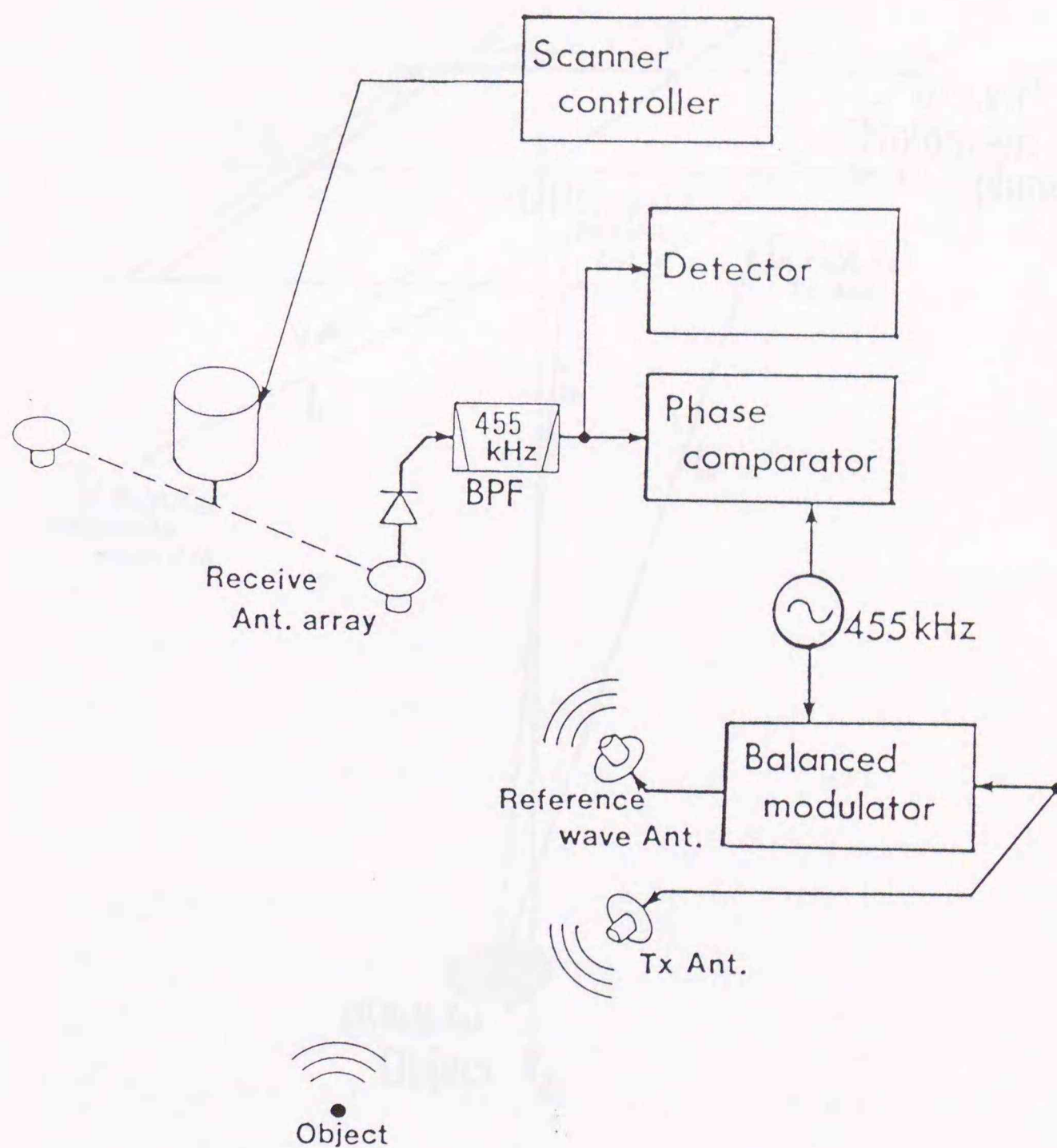


図 3.1: アンテナ系の設定

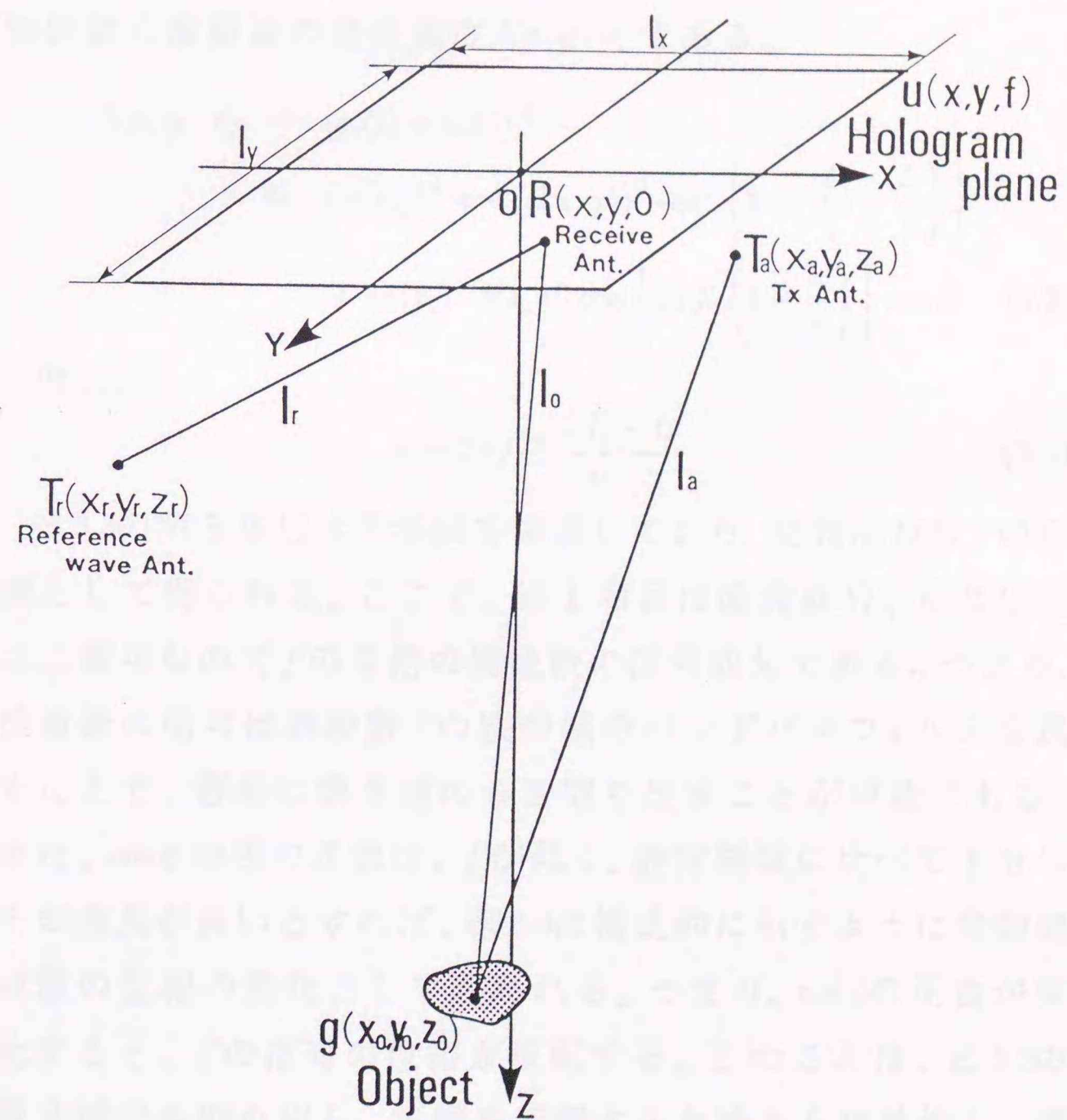


図 3.2: 多周波ホログラフィにおける座標系 (回転型アンテナアレー)

電定数が大きいほど小さくなる。乾いた雪において、 10GHz のマイクロ波では数 m である。

受信電波の検出は、マイクロ波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 $I(x, y: t)$ である。

$$\begin{aligned} I(x, y: t) &= |g_r(t) + u_r(t)|^2 \\ &= \{a(z_o)\}^2 + 4\{b(x, y)\}^2 \cos^2 \left\{ 2\pi f' \left(t - \frac{l_r}{v} \right) \right\} \\ &\quad + 4a(z_o) \cdot b(x, y) \cos \left\{ 2\pi f' \left(t - \frac{l_r}{v} \right) \right\} \cos \phi \quad (3.3) \end{aligned}$$

但し、

$$\phi = 2\pi f' \frac{l_a + l_o - l_r}{v} \quad (3.4)$$

式3.3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。ここで、第1項目は直流成分、第2項目は二乗項なので f' の2倍の周波数の信号成分である。つまり、検波後の信号は周波数 f' の狭帯域のバンドパスフィルタを通すことで、容易に第3項のみを取り出すことが可能である。また、 $\cos \phi$ の項の正負は、 f' が低く、設定領域に比べて十分にその波長が長いとすれば、図3.3に模式的に示すように変調周波数の位相の変化として現われる。つまり、 $\cos \phi$ の正負が変化すると、 f' の信号の位相が反転する。このことは、式3.3の第3項目を取り出し、振幅を記録するためさらに検波し、直流成分にしてA/D変換器でデジタル信号としたものと、変調周波数発信器の信号との位相を比較したものを合わせることで、必要な干渉成分を記録できることを意味する。そこで、送・受信まわりの信号処理回路は、図3.4に示すようにして

あり、変調周波数の信号の振幅と位相を同時に記録できるように設計してある。ここまでは、一点の物体に対する議論であったが、さらに一般化のために、物体反射率分布 $g(x_o, y_o, z_o)$ を導入し、

$$g'(x_o, y_o, z_o) = a(z_o) \cdot g(x_o, y_o, z_o) \quad (3.5)$$

とにおいて、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検波される受信信号は、次のように与えられる。

$$u(x, y, f) = 4 \cdot b(x, y) \int_0^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} g'(x_o, y_o, z_o) \cdot \cos \phi dx_o dy_o dz_o \quad (3.6)$$

ここで、式3.6に既知である参照波源と受信点の距離による位相項 $\exp(-j2\pi f \frac{l_o}{v})$ をかけ、ホログラムの結像作用に着目すると、

$$u'(x, y, f) = \int_0^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} g'(x_o, y_o, z_o) \cdot \exp\left(-j2\pi f \frac{l_a + l_o}{v}\right) dx_o dy_o dz_o \quad (3.7)$$

と書き換えられる。更に、 l_a 、 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_0 とそれとの差 Δf とすると、

$$-j2\pi f \frac{l_a + l_o}{v} \simeq -j2\pi f \frac{2z_o - z_a}{v} - j \frac{2\pi f_0}{v} \cdot \left\{ \frac{(x_o - x_a)^2 + (y_o - y_a)^2}{2(z_o - z_a)} + \frac{(x - x_o)^2 + (y - y_o)^2}{2z_o} \right\} \quad (3.8)$$

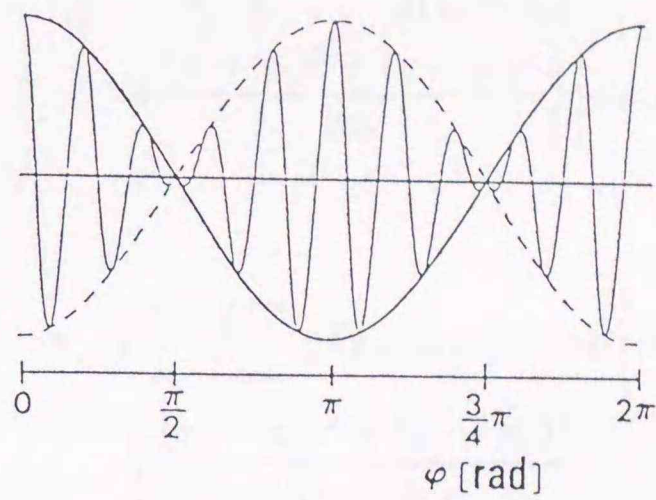


図 3.3: 検波後の信号

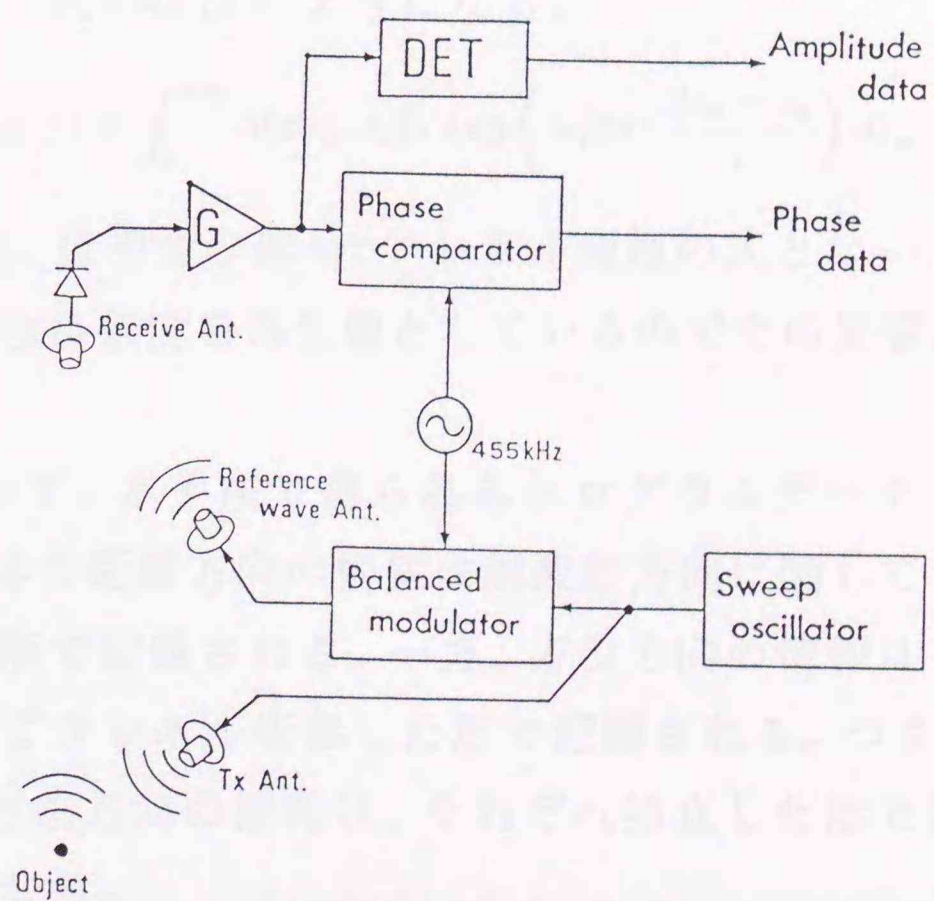


図 3.4: 送・受信まわりの構成図

と近似できるので、式3.7は次式で表わすことができる。

$$u'(x, y, f) = \int_0^{+\infty} \exp\left(-j2\pi f \frac{2z_o - z_a}{v}\right) \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} g'(x_o, y_o, z_o) \cdot \exp\left[-j \frac{2\pi f_0}{v} \left\{ \frac{(x_o - x_a)^2 + (y_o - y_a)^2}{2(z_o - z_a)} + \frac{(x - x_o)^2 + (y - y_o)^2}{2z_o} \right\}\right] dx_o dy_o dz_o \quad (3.9)$$

ここで、

$$h(x, y, z_o) = \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} g'(x_o, y_o, z_o) \cdot \exp\left[-j \frac{2\pi f_0}{v} \left\{ \frac{(x_o - x_a)^2 + (y_o - y_a)^2}{2(z_o - z_a)} + \frac{(x - x_o)^2 + (y - y_o)^2}{2z_o} \right\}\right] dx_o dy_o \quad (3.10)$$

とおくと、式3.9は次のようになる。

$$u'(x, y, f) = \int_0^{+\infty} h(x, y, z_o) \cdot \exp\left(-j2\pi f \frac{2z_o - z_a}{v}\right) dz_o \quad (3.11)$$

式3.10は、位相歪の伴ったフレネル変換の式となっているが、この位相項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データは基本的には、物体の距離方向の情報は周波数方向に関してフーリエ変換した形で記録される。一方、方位方向の情報は $x - y$ 平面に関してフレネル変換した形で記録される。つまり、物体の距離・方位方向の情報は、それぞれ独立した形で記録されることになる。

3.2.2 像再生法

記録したホログラム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、さら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。これは、基本的には参照波を平面波とした再生法に、参照波源の位置による歪を補正する処理を加えればよい。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。本研究では、探査距離が近距離であるためホログラム面と再生面が同一の大きさになる、2回のフーリエ変換による方法を採用した。つまり、像再生処理はFFTを組み合わせて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演算を高速に処理するDSP上で行うことにより、高速処理が可能となる。

まず、得られたホログラムデータ $U(x, y, f)$ に参照波の位相歪の項を取り除くため、位相補正項を掛ける。

$$U'(x, y, f) = U(x, y, f) \cdot \frac{\exp(-j2\pi f \frac{L_r}{v})}{4 \cdot b(x, y)} \quad (3.12)$$

物体の距離方向の分布は、式3.11で表わされたように周波数軸上に記録されている。したがって、ホログラムデータ $U'(x, y, f)$ を周波数軸方向に1次元のフーリエ逆変換を行えば物体の距離方向分布 $h'(x, y, z_s)$ が得られることになる。

$$h'(x, y, z_s) = \int_{-\frac{F}{2}}^{+\frac{F}{2}} U'(x, y, f) \cdot \exp\left(j2\pi f_d \frac{2z_o - z_a}{v}\right) df_d \quad (3.13)$$

但し、 $f_d = \Delta f = f - f_0$

ここで、 F は周波数掃引幅、再生された空間での軸を x_s, y_s, z_s としている。

物体の方位方向の分布は、式 3.10 で表わされたように物体の距離 z_0 における $x-y$ 平面内の分布を 2 次元のフレネル変換した形で記録されている。したがって、 $x-y$ の方位方向に対して 2 次元のフレネル逆変換を行えばよい。伝搬関数 p を

$$p(x, y) = \exp \left\{ -j \frac{2\pi f(x^2 + y^2)}{2z_0} \right\} \quad (3.14)$$

と置くと、式 3.10 は強度再生像に影響のない位相歪の項を無視すると、コンボリューション積分式として次のように表わすことができる。

$$h(x, y) = g(x, y) \star p(x, y) \quad (3.15)$$

式 3.15 はフーリエ変換によって、乗算として次式のように表わすことができる。

$$H(f_x, f_y) = G(f_x, f_y) \cdot P(f_x, f_y) \quad (3.16)$$

但し、 $H(f_x, f_y)$ 、 $G(f_x, f_y)$ 、 $P(f_x, f_y)$ は、 $h(x, y)$ 、 $g(x, y)$ 、 $p(x, y)$ の z_0 をパラメータとしてフーリエ変換したものである。したがって、 $g(x, y)$ のフレネル変換 $h(x, y)$ は次のように表わされる。

$$h(x, y) = \mathcal{F}^{-1} \{ G(f_x, f_y) \cdot P(f_x, f_y) \} \quad (3.17)$$

つまり、フレネル変換は物体反射率分布関数と伝搬関数をそれぞれフーリエ変換したものを乗算し、さらにフーリエ逆変換することで効率よく行なうことができる。

フレネル逆変換も伝搬関数 $p(x, y)$ の複素共役 $p^*(x, y)$ を用いることにより、同様に計算することができる。したがって、物

体反射率分布関数 $g'(x_s, y_s, z_s)$ は、 $h'(x, y, z_s)$ から次のように求めることができる。

$$g'(x_s, y_s, z_s) = \mathcal{F}^{-1} \{ H'(f_x, f_y) \cdot P^*(f_x, f_y) \} \quad (3.18)$$

次式の減衰率補正処理により、最終的な再生像が得られる。

$$g(x_s, y_s, z_s) = \frac{g'(x_s, y_s, z_s)}{a(z_s)} \quad (3.19)$$

以上の解析より得られる像再生のアルゴリズムを図3.5に示した。

ここでは空気中を想定したが、雪中レーダにそのまま適用して再生処理を行なうと、10～30%程度実際の距離より遠くに物体像が再生され再生像も若干のボケを生じる。これは、電波の伝搬速度が媒質の比誘電率の逆数の平方根に比例し、積雪中では空気中に比べて遅くなるためである。そこで、像再生処理時に積雪の比誘電率に応じて電波の速度を補正する必要がある。乾いた雪の比誘電率は、雪密度と正比例の関係があるため、密度の測定値から容易に推定することが可能である。

3.3 回転型アンテナアレーを用いた雪中レーダ実験システム

雪中レーダシステムは大きく2つの部分に分けられる。1つはアンテナ系も含めたデータ収集部、もう一つは像再生のためのデータ処理部である。両部分のコンピュータシステムは、高速通信回線で結ばれており、独立した動作が可能であ

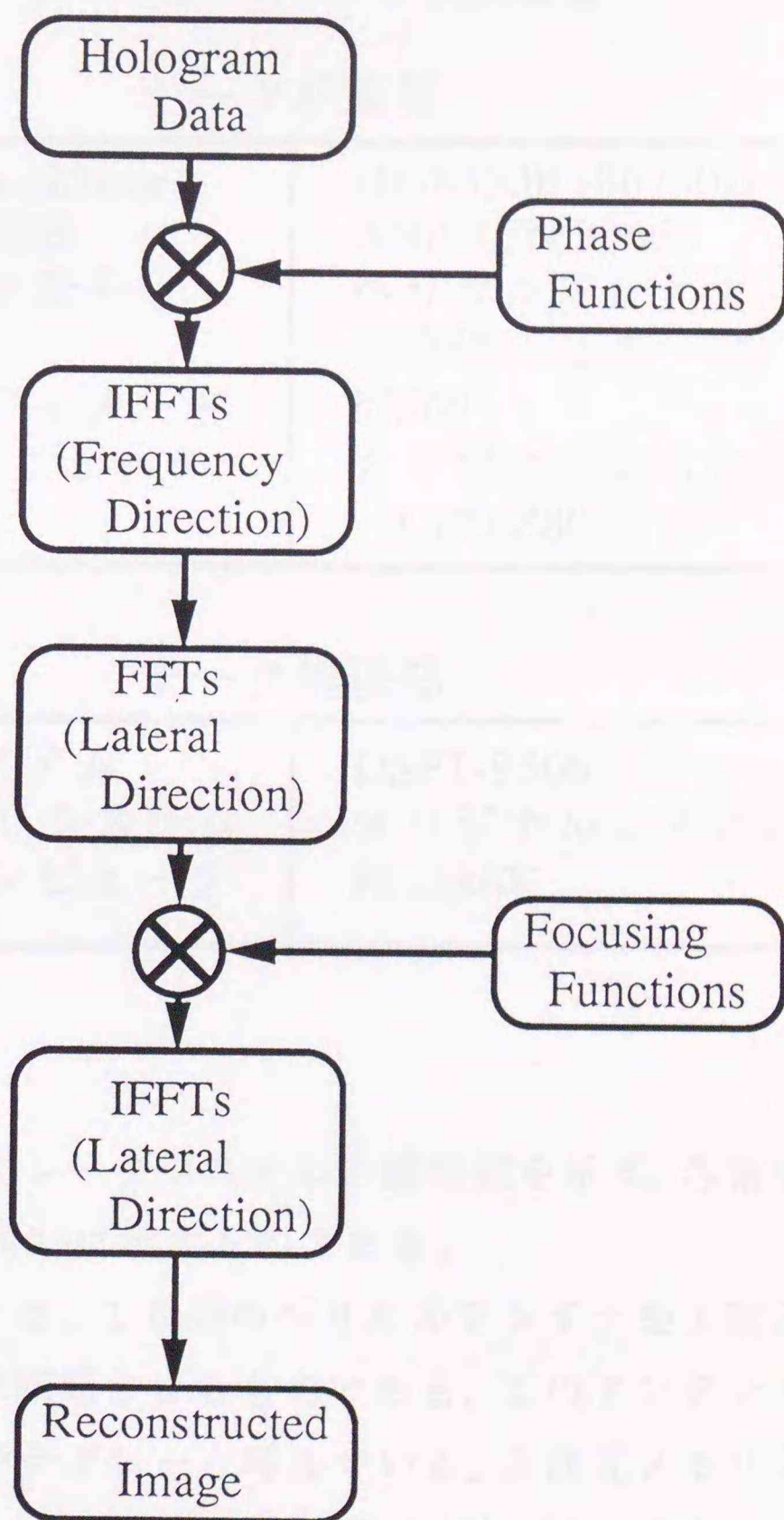


図 3.5: 像再生アルゴリズム (回転型アンテナアレー)

表 3.1: 雪中レーダの構成機器

データ収集部	
Sweep-oscillator 平衡変調器 アンテナ素子	HP-8350B+86250D ANAREN 70668 ヘリカルアンテナ (自作、2 ターン)
検波用ダイオード 8bit コンピュータ	ISS69 オリジナルシステム (CPU:Z80)
データ処理部	
DSP システム 3D メモリシステム 16bit コンピュータ	DSPT-9506 オリジナルシステム PC-286V

る。図 3.6 に雪中レーダシステムの構成図を示す。各構成機器の主なものは表 3.1 に示すものである。

受信アンテナは、16 個のヘリカルアンテナを 1 次元に配置し、モータで回転させるものである。このアンテナアレーを回転型アンテナアレーと呼んでいる。3 次元メモリシステムは、雪中レーダの再生像を高速にハードウェア上で処理し表示するためのシステムである。

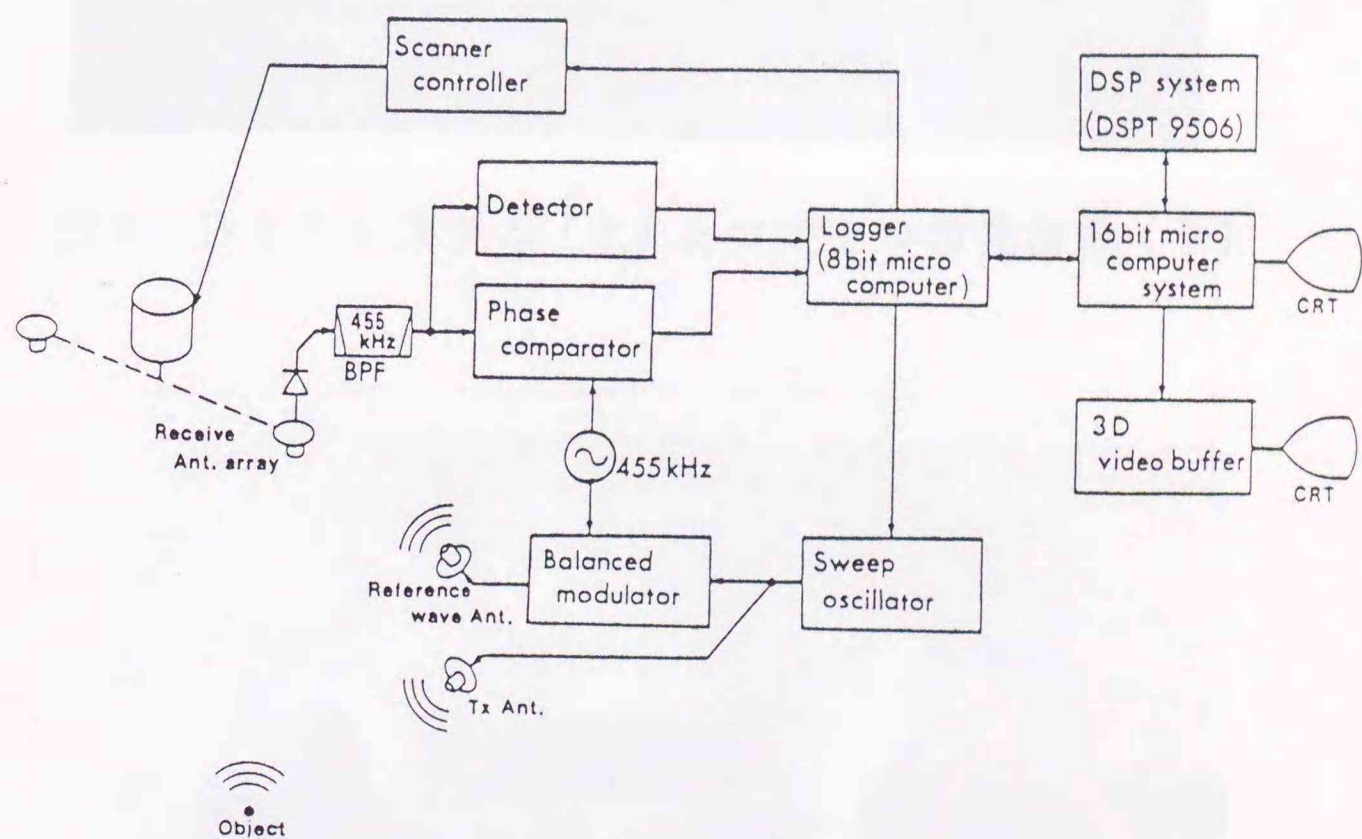


図 3.6: 雪中レーダシステムの構成図

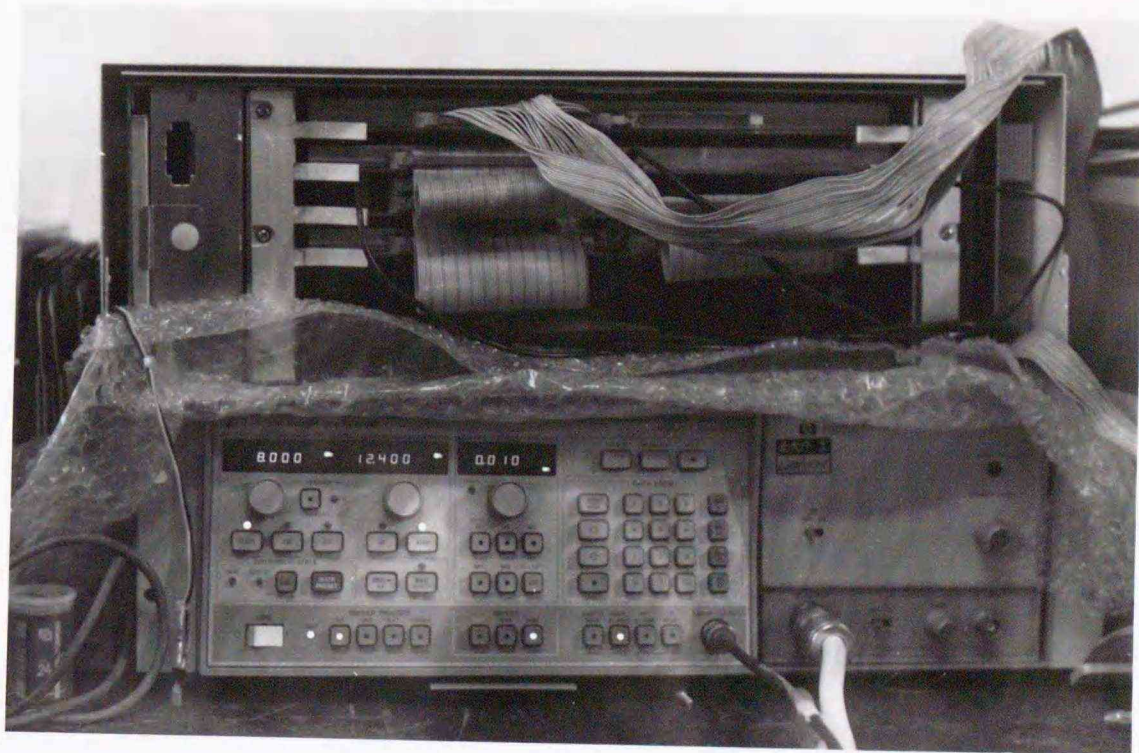


図 3.7: DSP システム (上) とマイクロ波発信機 (下)

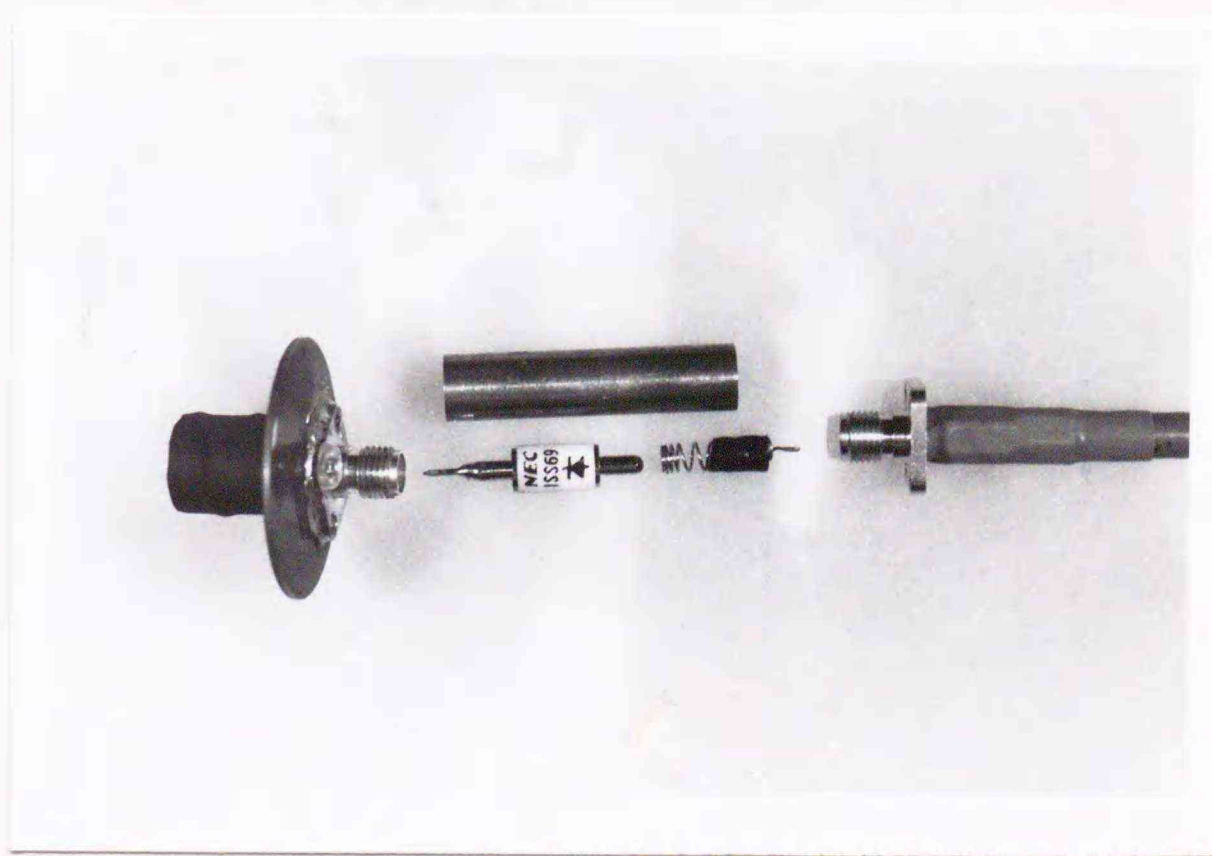


図 3.8: ヘリカルアンテナと検波用ダイオード

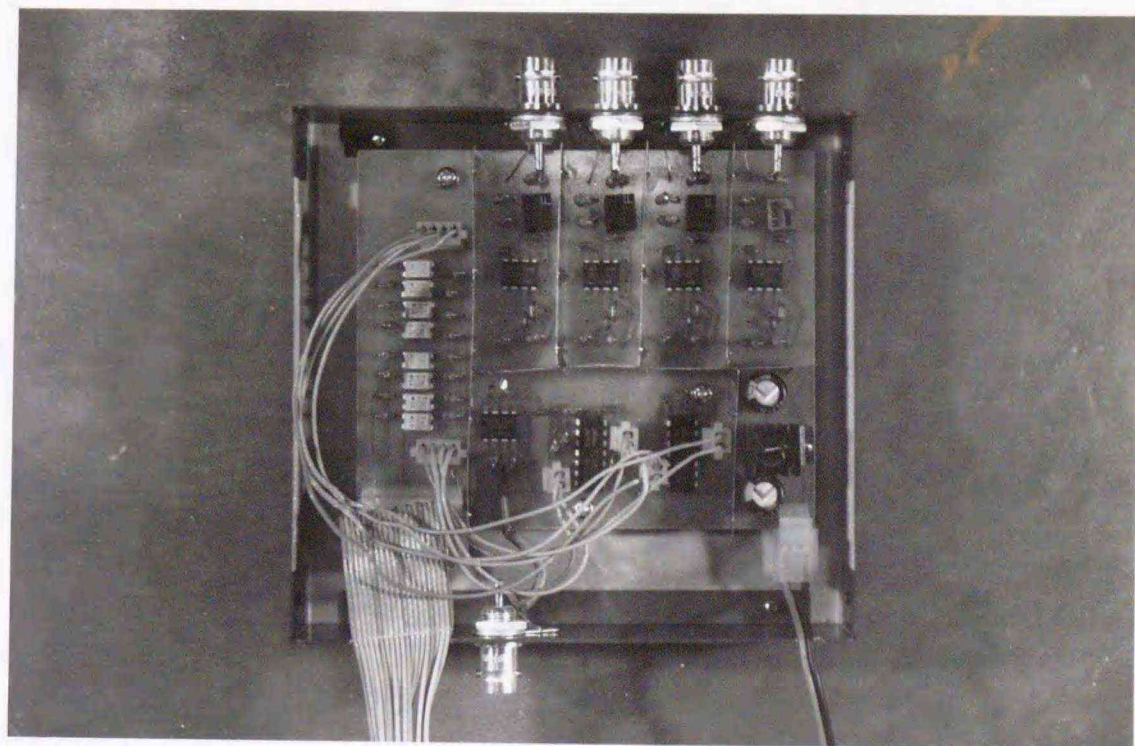


図 3.9: 受信アンプ



図 3.10: 16 bit マイクロコンピュータシステム

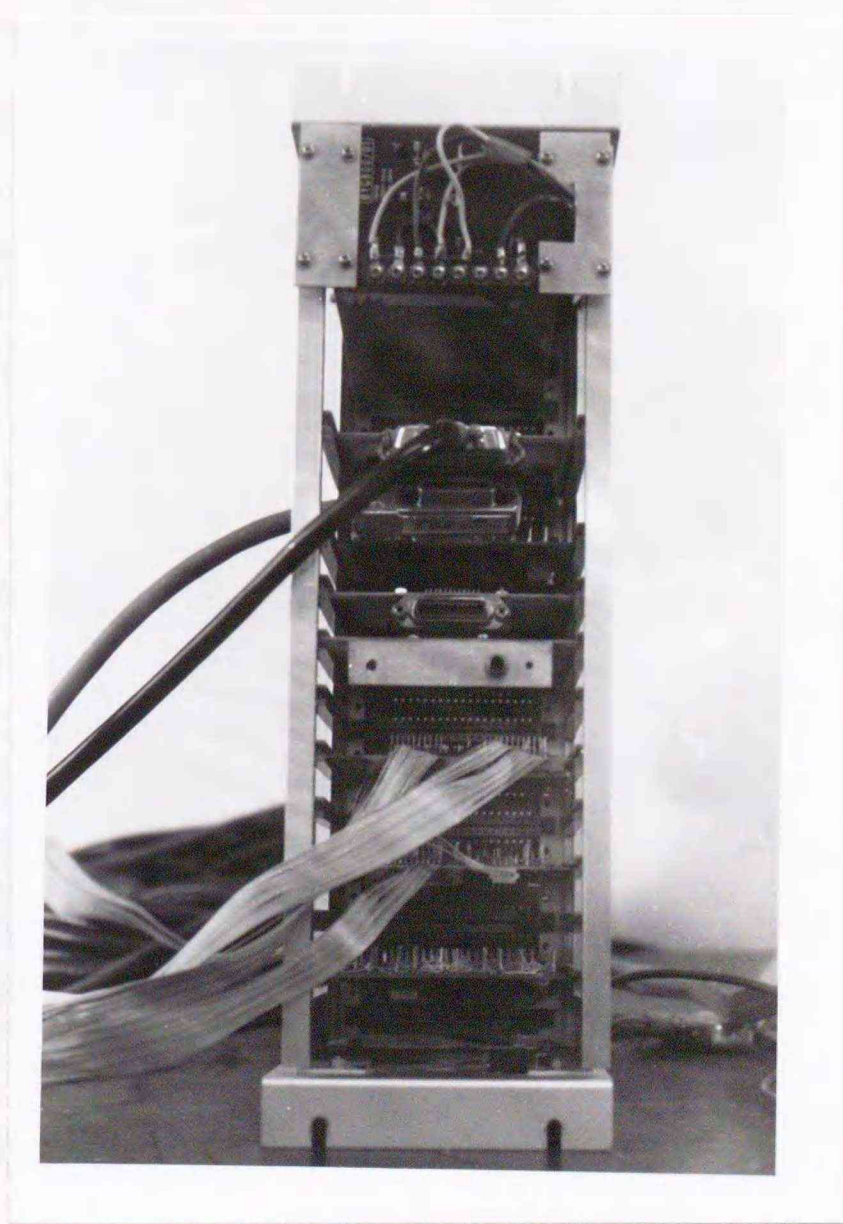


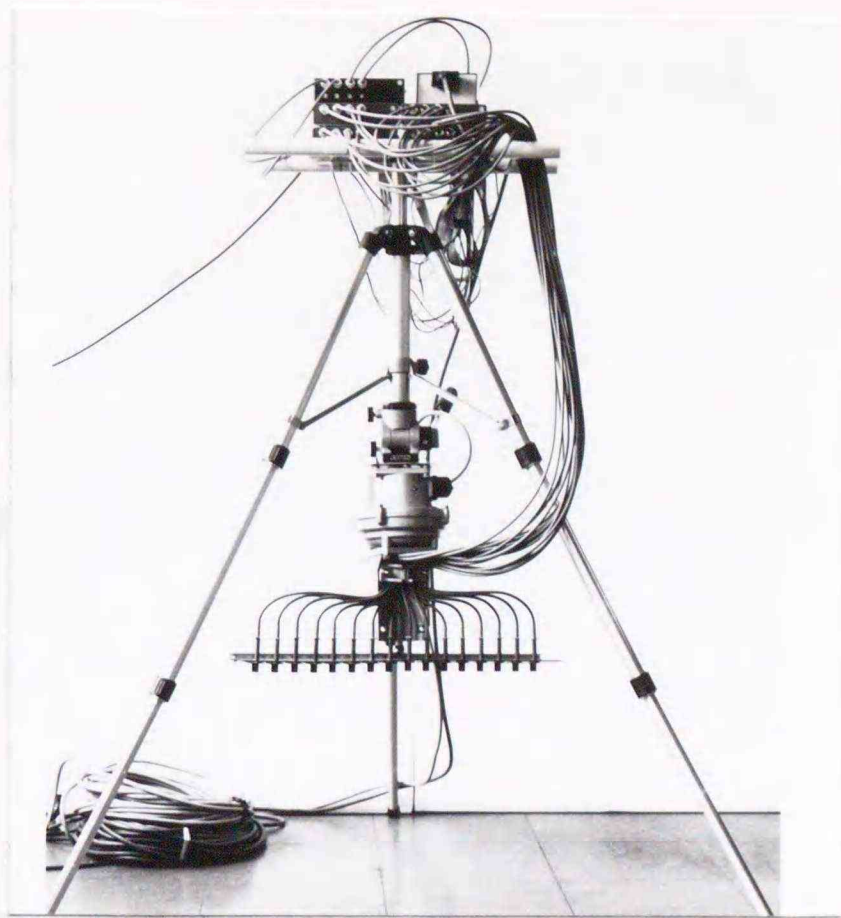
図 3.11: オリジナル 8 bit コンピュータシステム

表 3.2: 雪中レーダシステムの諸元

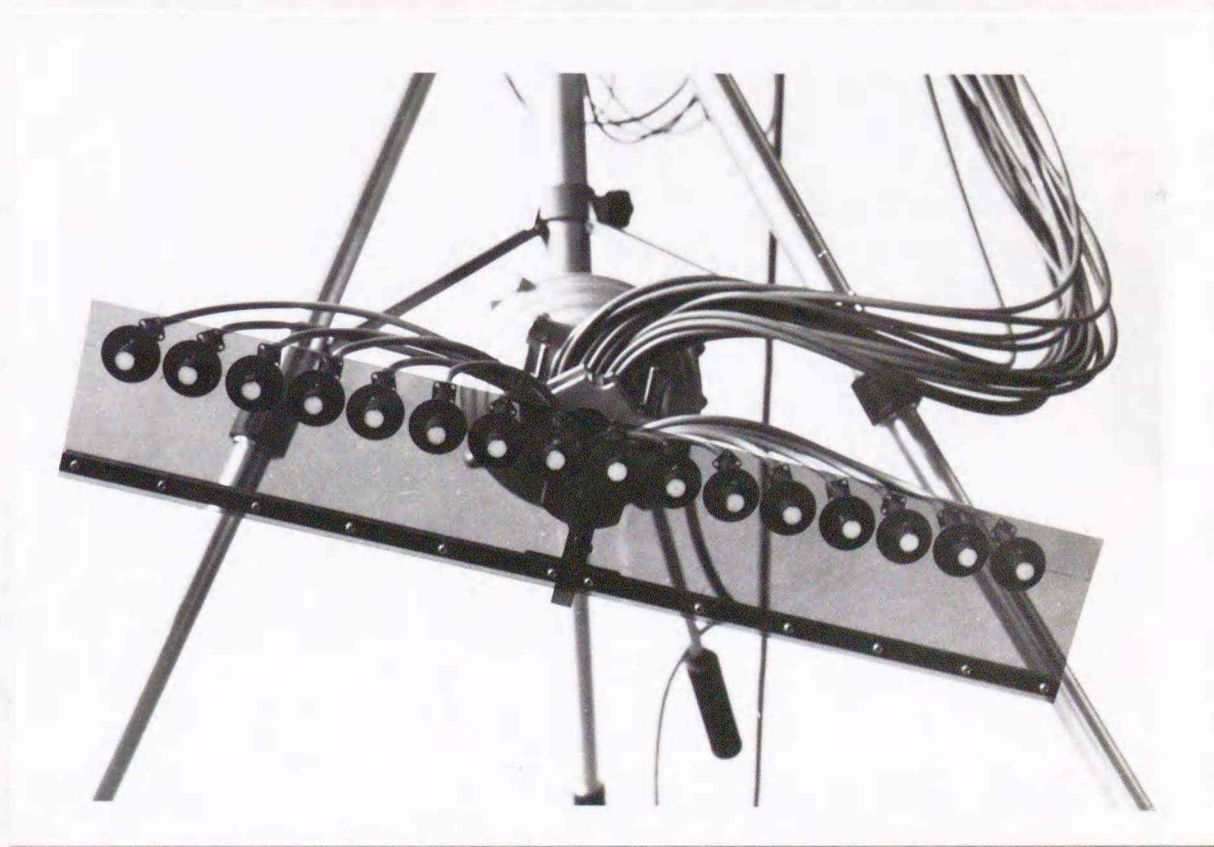
合成開口幅	0.5×0.5m
サンプル数 (方位)	32×32点
サンプル間隔 (方位)	16mm
使用周波数	8.0～10.0GHz
中心周波数	9.0GHz
掃引周波数幅	2.0GHz
サンプル数 (周波数)	32点
サンプル間隔 (周波数)	64.5MHz
方位方向分解能	7.5cm
距離方向分解能	6.8cm
偏波面	円偏波

3.3.1 回転型アンテナアレー

雪中レーダのような近距離用の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。このアンテナ系であると、実時間で多くのデータを収集できる可能性がある。しかし、分解能の高い2次元のアンテナアレーでは、素子の数が膨大となり、技術的にも経済的にも製作が難しくなる。一方、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。しかし、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、自作では技術的にも難しい。そこで、受信系のみを1次元のアレーとする方法が、雪中レーダのような小規模システムとしては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、A/D変換器を通してデジタルデータとして記録す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ほど大きくない。本システムで受信アンテナを2次元アレーにした場合、2倍強程度のデータ収集速度の高速化になる。しかし、データ収集から表示までの全処理時間からすると、25%程度の高速化に過ぎず、システム全体の高速化に対する寄与はあまり大きくない。ここで提案する新しい雪中レーダでは、図3.12に示す装置を用いて、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。



(a) 回転型アンテナレー全体



(b) アンテナレー部

図 3.12: 回転型アンテナレー

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には、垂直・水平偏波など一定の偏波面をもっている電波は適していない。また、照明波からの直接波が反射波より強いレベルで受信される可能性もある。そこで、偏波を円偏波とするため、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である、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、アレー化する都合上小さいことが要求されるためでもある。円偏波の特徴として、対象物体における反射では旋回方向が逆になるという性質がある。そこで、実際のアンテナ系では図3.13に示すように照明波用と参照波・受信用に逆旋回のアンテナを用いている。したがって、照明波の電波は標的物体で反射し、円偏波の旋回方向が逆にならなければ受信用のアンテナと旋回方向が一致せず、アンテナ自身の持つ旋回方向選択受信能力によって直接波の受信感度は低くなるため、照明波用のアンテナからの直接波の影響はほとんどなくなる。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

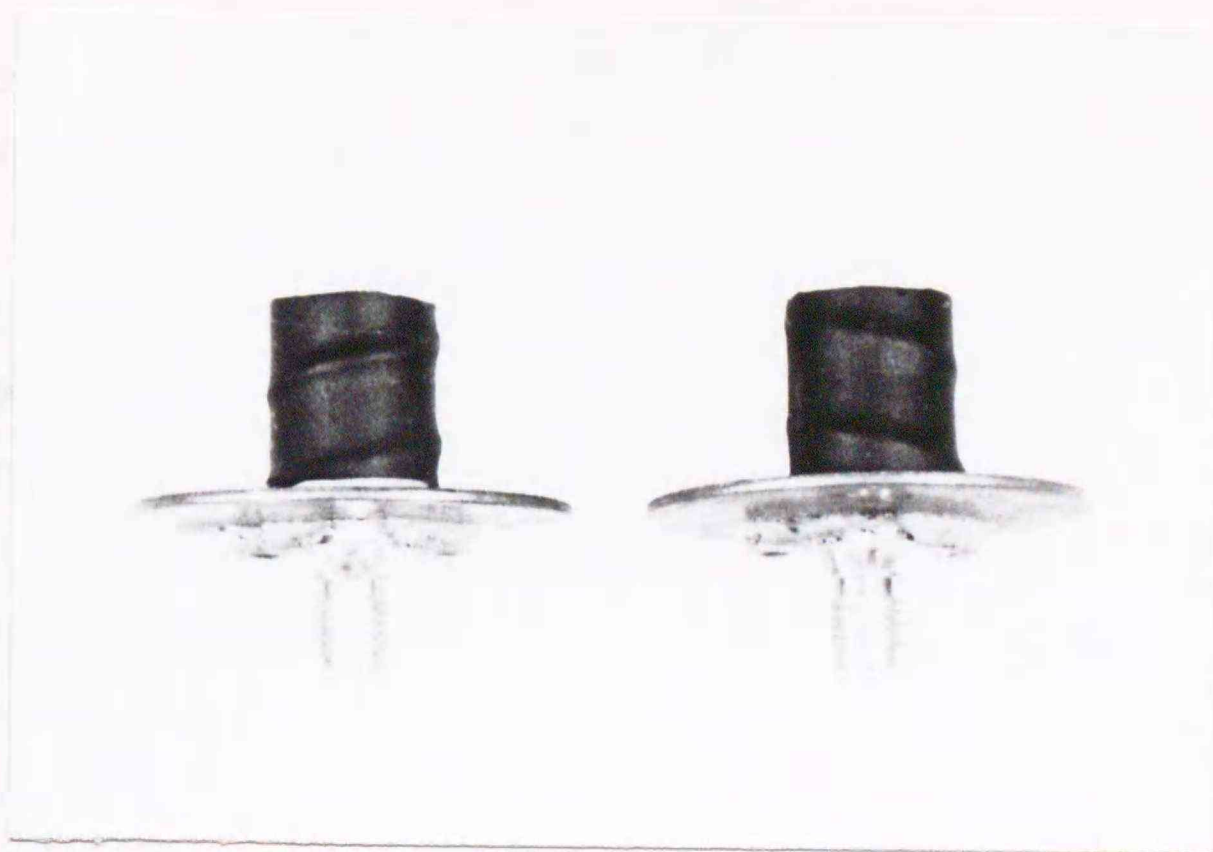


図 3.13: 参照波・受信用（左）と照明波用（右）のヘリカルアンテナ

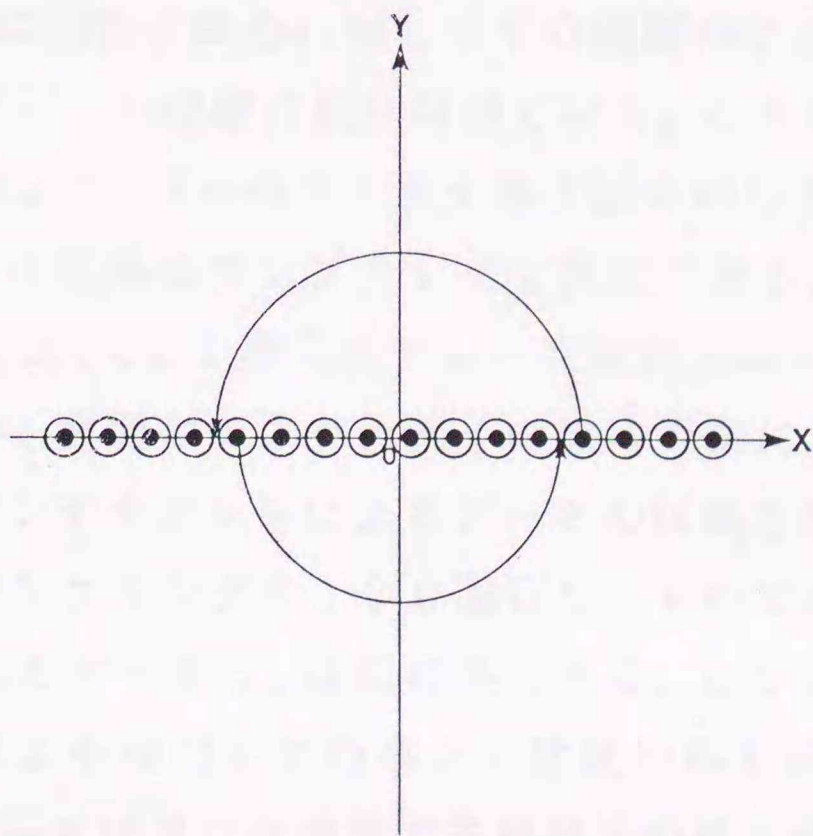


図 3.14: 回転型アンテナアレーのサンプリング法

を得る可能性もある。これは、標的やクラッターにより2回反射した電波を無視する効果も期待できるからである。

受信アンテナアレーのアンテナ素子の間隔は、大きすぎると再生の結果、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という折返し現象である。つまり、ホログラム面上の干渉縞パターンをサンプリングする場合、干渉縞の間隔の $1/2$ 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。よって、サンプリング間隔、つまりアンテナ素子の間隔は $\lambda/2$ としたい。しかし、用いたアンテナの反射板の直径が λ であるため $\lambda/2$ 間隔で並べられない。ヘリカルアンテナの特性上、これより小さい反射板を用いるわけにはいかない。そこで、回転型であることを活かして、図3.14のように回転の中心に対してその両側のアンテナ素子を $\lambda/4$ ずつずらした位置に取り付けている。こうして、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れば、 $\lambda/2$ 間隔のサンプリングを実現できる。また、こうすることによって、1次元のアレーを直角方向に移動させる方式に比べ、必要なアンテナ素子の数は半分になる。

回転型アンテナアレーによるデータの収集方法は、回転時3度毎のサンプリングを120回行なうものである。この方法で得られるデータは、極座標系である。しかし、FFTのアルゴリズムを使用して効率よく数値的再生処理を行なうために、データは直交座標系で碁盤目上のサンプリング点のものである必要がある。そこで、像再生の前処理として、座

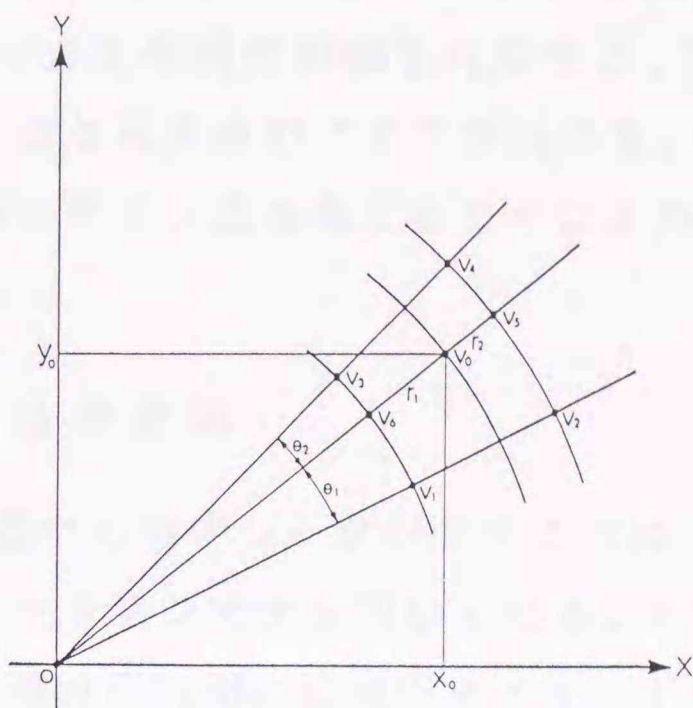


図 3.15: データ変換法

標変換によるデータ近似を行なっている。データ近似は、図 3.15に示すように求めようとする直交座標上の点を扇型状に囲む4点のサンプリング点のデータから直線補完によっておこなう。その4点は、求める点を扇型に囲んでおり、それぞれのサンプリング値 $V_1 \sim V_4$ から次のような演算で、近似値 V_0 を求める。

$$V_5 = \frac{V_4 \cdot \theta_1 + V_2 \cdot \theta_2}{\theta_1 + \theta_2} \quad (3.20)$$

$$V_6 = \frac{V_1 \cdot \theta_2 + V_3 \cdot \theta_1}{\theta_1 + \theta_2} \quad (3.21)$$

$$V_0 = \frac{V_6 \cdot r_2 + V_5 \cdot r_1}{r_1 + r_2} \quad (3.22)$$

この近似法は、隣接点による近似に比べて、直交座標上への近似後のデータの急峻な変化が減少するため、近似により

再生像に現れるノイズは少ない。

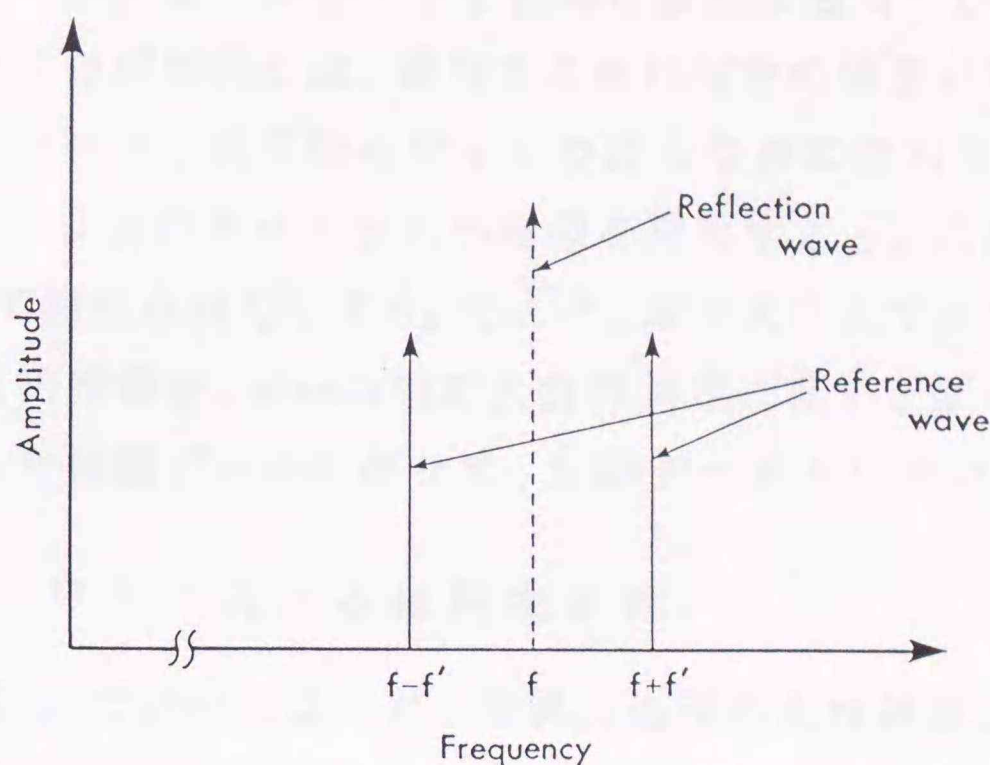
また、領域外には、ダミーデータとして零を代入する。したがって、そのまま像再生処理を行なうと、領域間のデータの有無の差により高周波のノイズが現れる。そこで、データにあらかじめコサイン窓を乗じることにより、ノイズを軽減させている。

3.3.2 照明波の変調

第4.5.1節で述べる雪中レーダシステムでは、アンテナに送受信共用のホーンアンテナを用いている。それは、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、必要とする利得を得ることができるものである。しかし、本章のシステムのアンテナ系のアンテナ素子では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 μ Vであり、A/D変換器によりデ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倍も大きくなるためである。その上、温度によるドリフトもあるので、これらの影響を消し去ることが不可能であることによる。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、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採って

いる。

各種の変調方式が考えられるが、例えばA M方式の変調では、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、弱い物体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。このことは、従来の雪中レーダシステムでも問題になっており、無変調の電波をダイオード検波し強度を直流成分として取り出した場合、強い参照波の直流分の上にわずかに干渉成分が現われる程度であった。そこで、実際にマイクロ波にかける変調は、455kHzのD S B方式とした。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D S B方式の変調波、照明波に無変調波を用いることにより、干渉後の電波の強度が変調周波数の振幅として得られる。受信波の復調は、マイクロ波検波用ダイオードによって直接行われており、基本的にはA M方式の変調波を復調するのと同様である。この方法で復調すると、物体波と参照波のスペクトルが図3.16に示す関係にあるため、変調をかけた参照波のみを受信しても変調周波数は得られず、物体波と同時に受信されてはじめて出力が得られる。したがって、参照波に比べて弱い物体波が埋もれてしまうことはない。しかも、ダイオード検波後の信号を狭帯域のバンドパスフィルタに通すことにより、像再生において再生像質の低下を招く信号成分は、直流や変調周波数の2倍の周波数であるため容易に取り除くことが可能である。変調周波数を455kHzとした



f : 搬送波の周波数、 f' : 変調周波数

図 3.16: 物体・参照波のスペクトル

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、原理上問題になるためである。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。

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。第3.2.1節の式3.3の第3項目により明らかになった、復調される変調周波数の信号の位相が、マイクロ波の位相が π 変化する毎に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。しかし、2値のホログラムから像を再生すると、高次の像が重なって再生されてしまう。そこで、本システムではこの変調波の位相情報を、 $\cos\phi$ の項の正負の判定に使い、ばらつきを補正した振幅データと併せて、記録データとしている。

3.3.3 DSPによる像再生処理

第3.2.2節で述べたように、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これらの演算を行うと、データが大量のため、かなりの時間を要する。そこで、FFTなどの演算をハードウェア的に高速化するため、DSPを採用している。しかし、使用しているDSPシステム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。データ加工の処理時間を入れても像再生の主要部の処理時間は、DSPを使用しない場合と比較すると、710秒から7秒と約百倍の高速化が実現できた。

3.4 実験結果

3.4.1 実験の設定

試作した雪中レーダシステムが理論通り動作することを確認するため、ホログラフィの基本であるF Z P (Fresnel Zone Plate) が得られるように設定し、空気中と雪の壁による実験を行った。F Z Pは図3.17のように同心円群で表わされ、得られたデータを見るだけで、正しくデータが収集された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。F Z Pの縞は、物体波が参照波と同位相で受信された部分は明るく、位相差が π である部分は暗くなる。例は中心に物体波源を設定した場合で、中心から周辺に向かって物体波は遅れ、位相の 2π の遅れが一组の明暗の縞に相当する。また、例の図は2値化したものであるが、実際の受信データでは干渉した電波の振幅に比例した明暗のコントラストが観測される。

実験では照明波・参照波の位置による歪を考えなくてよく、再生が簡単になるように設定した。つまり、参照波用アンテナをホログラム面で平面波に見なせるように遠方に置き、照明波用アンテナ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。ここで、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を誤る恐れがあ

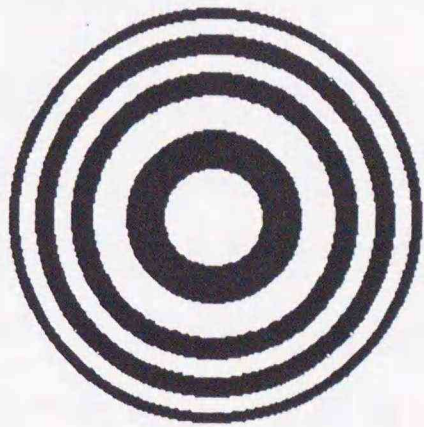


図 3.17: F Z P の例

る。そこで、本実験では意図的に照明波源を中心から若干ずらした位置に設定した。

3.4.2 空中単周波実験

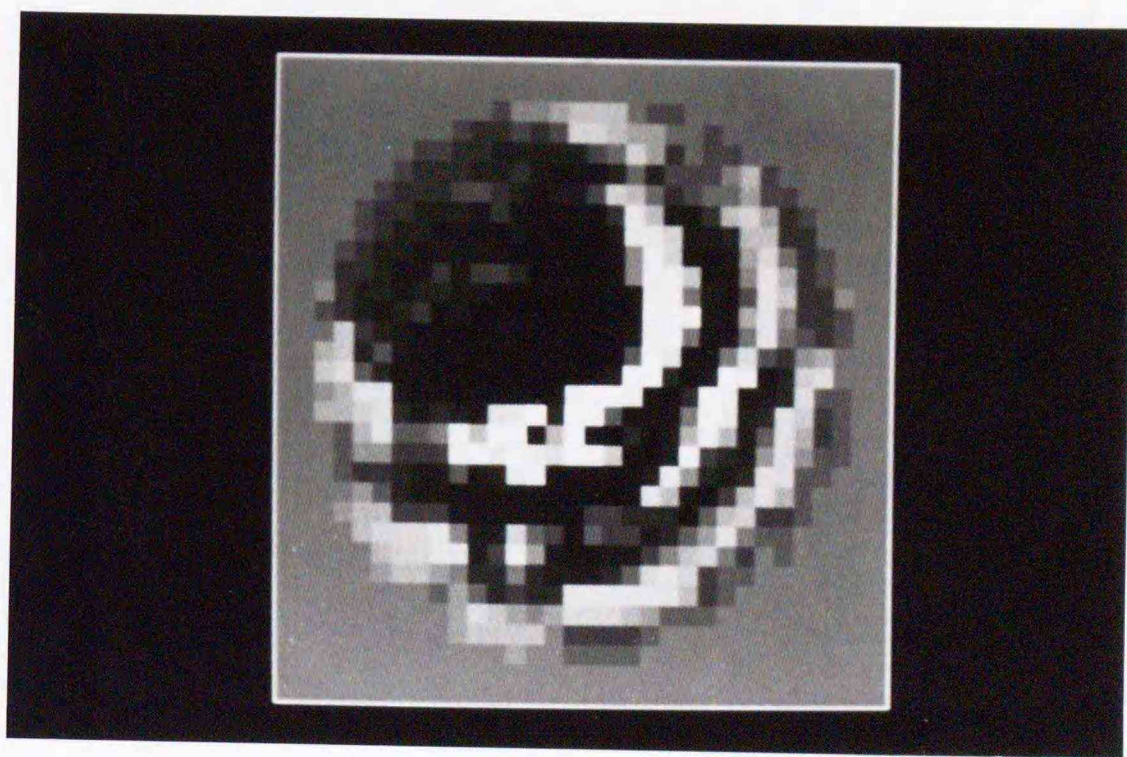
まず、アンテナ系が正しくデータの収集をする事を確認するため、単周波 (9GHz) で実験を行った。周波数方向のデータが必要ないので、本来なら 8 ~ 10GHz の 32 種の周波数でデータ収集するところを代わりに同一周波数でデータを 32 個取った。したがって、32 個のデータを重ねることによりノイズの影響を減らすことができ、比較的きれいなデータが得られる事が予測できる。得られたデータは、図 3.18(a) のものであり、F Z P を確認することができる。このデータを 2 次元のフレネル逆変換し、像再生処理を行った結果が同図 (b) である。こ

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。

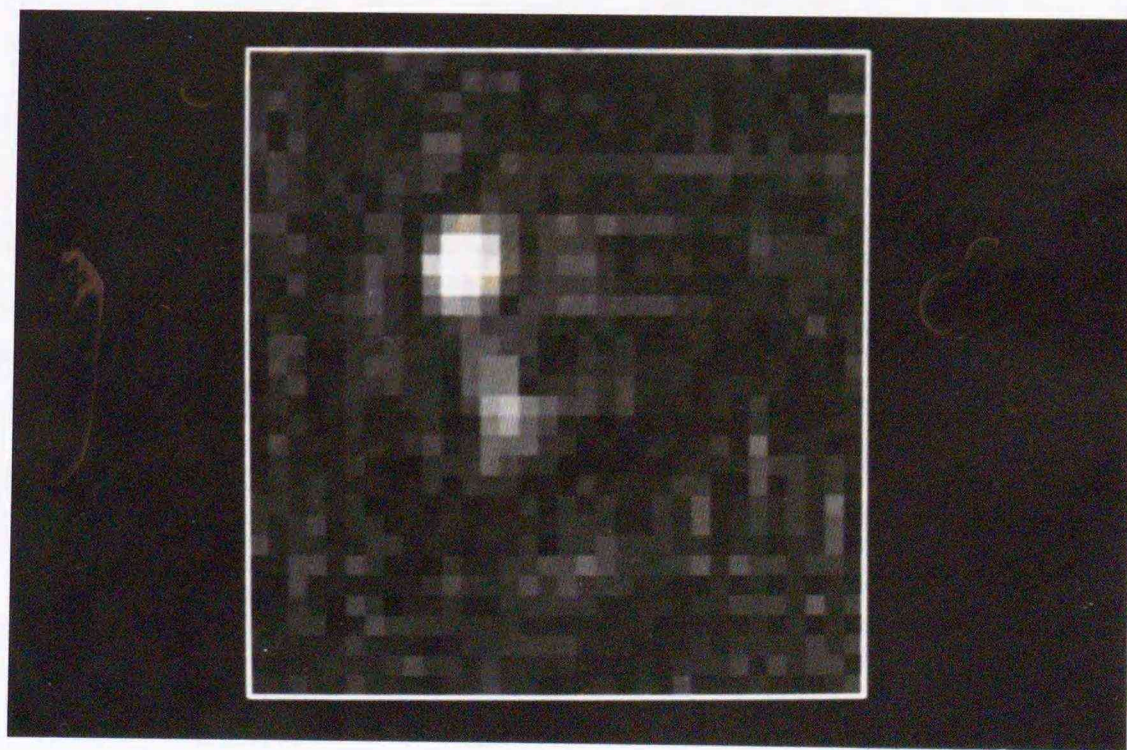
3.4.3 空中多周波実験

実験は、単周波の場合と同様に設定し、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図3.19(a)である。この表示は、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る順である。つまり、1段目最左のボックスは 8GHz の実部データであり、2段目最右のボックスは 9GHz の実部データである。但し、実際に得られるホログラムデータは実部データのみであるので、ここでは虚部データを表す下2段には実部データをコピーしたものを表示している。

図3.19(a)を見ると単周波の場合に比べノイズが目立つ。距離方向の再生処理（周波数方向のフーリエ逆変換）を行ったのが図3.19(b)である。この表示においても上2段が実部データ、下2段が虚部データを表している。周波数方向のFFTの折返しの影響で、実際の距離以外に折返し像のFZPパターンが認められる。さらに、方位方向の再生処理（方位方向のフレネル逆変換）を行ったのが図3.19(c)である。この図を見て分かるように、実際の距離である7つ目のボックスの点は結像しているが、折返し像はフレネル変換における伝搬関数の距離パラメータが一致しないため結像せず、ぼけて全体に散らばっている。したがって、折返し像は距離パラメータの関係で



(a) ホログラムデータ



(b) 再生像

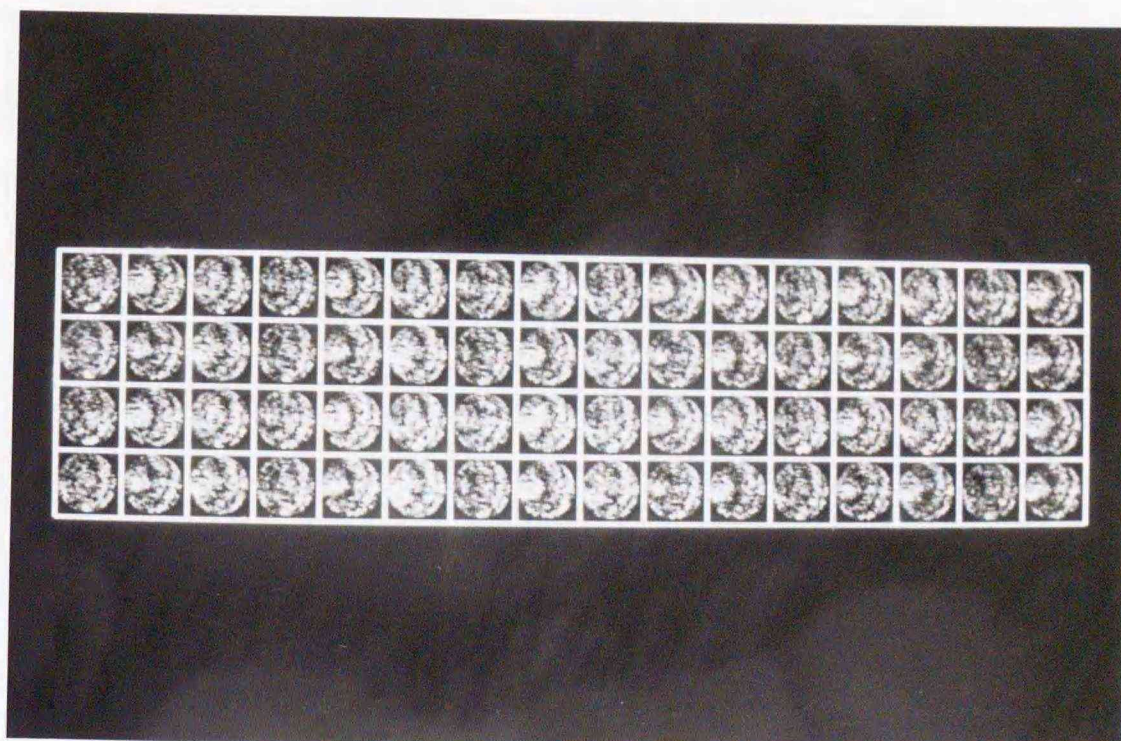
図 3.18: 単周波における実験結果

再生されないことになる。その実部と虚部の強度をとった最終的な再生像が図3.19(d)であり、点像が設定距離に再生されている。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の所に像が再生されていることが確認できる。

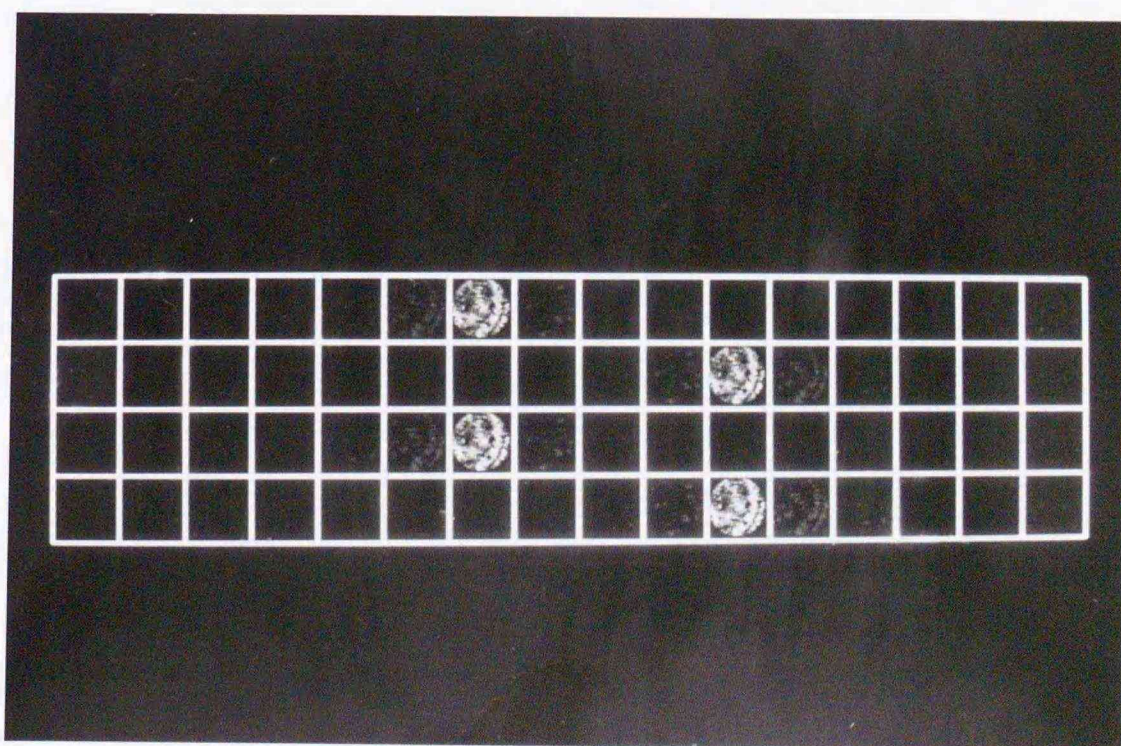
視線探索法により、再生像を立体的に3次元メモリシステムで処理・表示したのが図3.20である。ここでは、上から下に向かって距離が大きくなる方向で処理している。1点の再生像ということもあり、この場合はあまり表示上のメリットは感じられない。しかし、もっと一般的な形状の物体においては、雪中レーダの再生像のように低い解像度の像の認識には高速に視線方向を変えて処理・表示できるこのシステムの役割は大きい。3次元メモリシステムでの視線探索法による処理に関しては、第4.5.3節で詳しく述べている。

3.4.4 雪による実験

積雪は、氷粒と空気と水からなる混合体と考えられる。特に、水の複素誘電率の虚部は、マイクロ波帯の周波数で最大になる。つまり、マイクロ波帯で減衰の極大値が存在するため、積雪の含水率が大きくなると減衰が激しくなる。雪は大まかに含水率が低い順に、乾雪、湿雪、ぬれ雪、みず雪と分類される。北海道で寒厳期に降る雪で多いのは、乾雪である。乾雪に関しては、雪密度とほぼ比例して比誘電率は増加する。また、湿雪に関しては、誘電分散が約9 GHz付近にあり、これは水の誘電分散と同じと考えられる。したがって、雪中

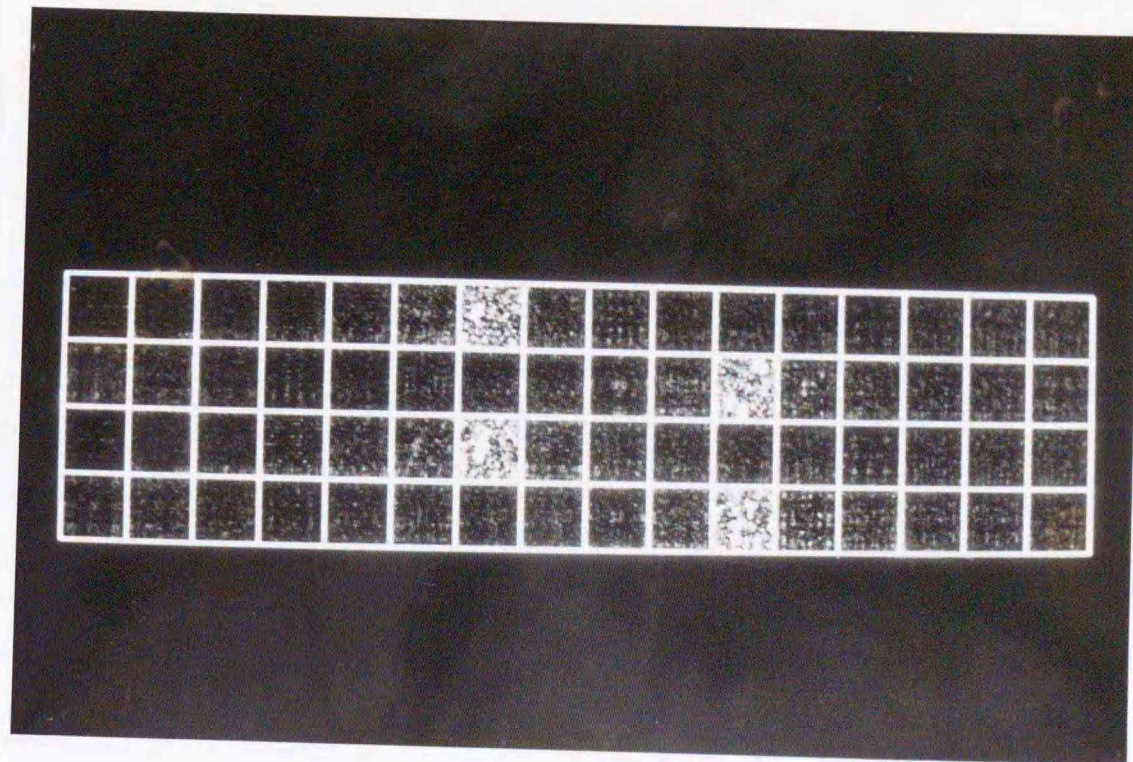


(a) ホログラムデータ

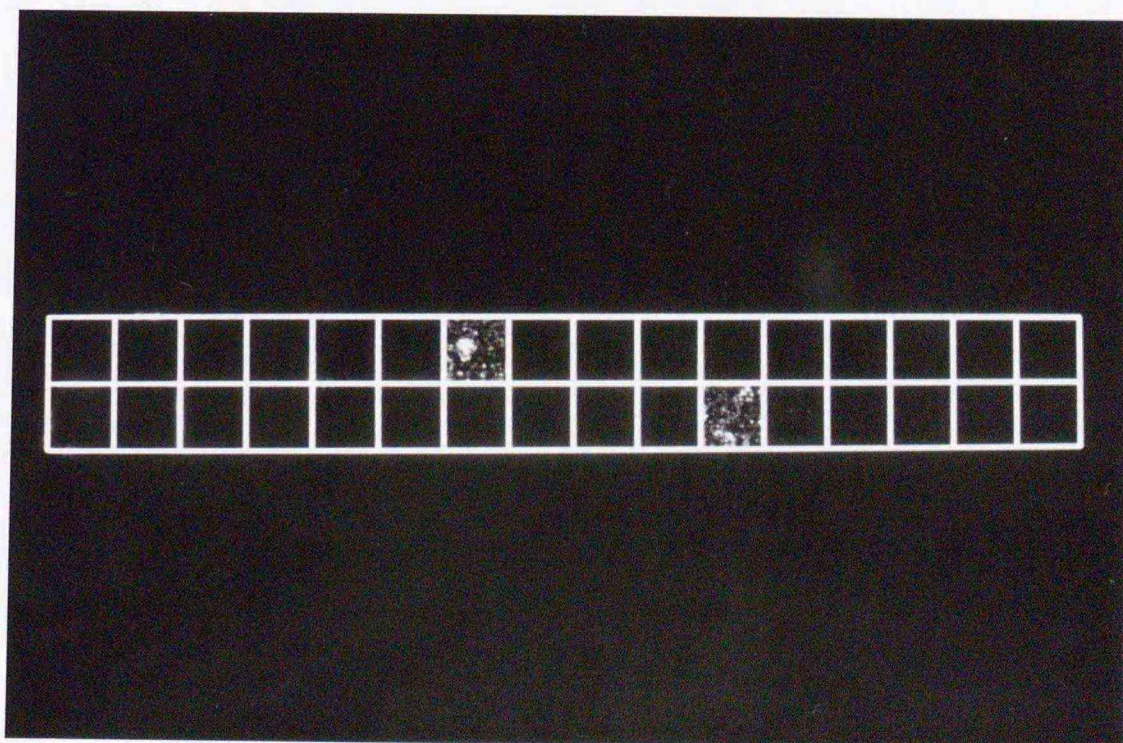


(b) 距離方向処理データ

図 3.19: 多周波における実験結果



(c) 再生像 (方位方向処理)



(d) 再生像 (最終像)

図 3.19: 多周波における実験結果

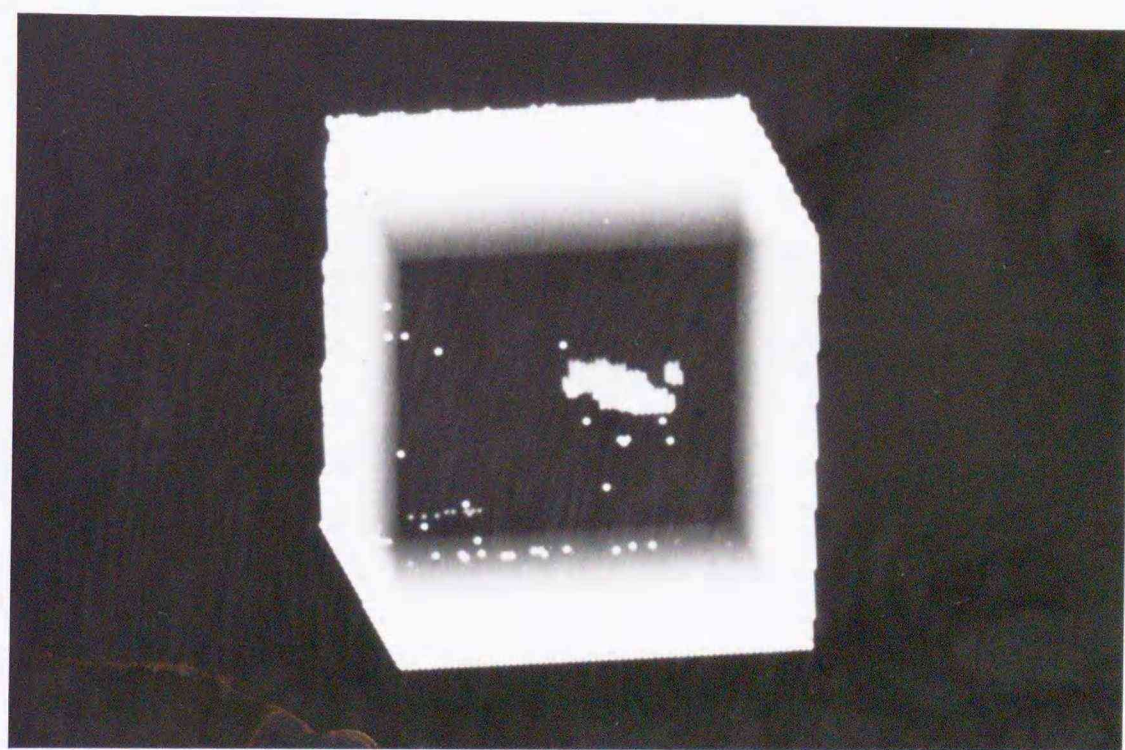
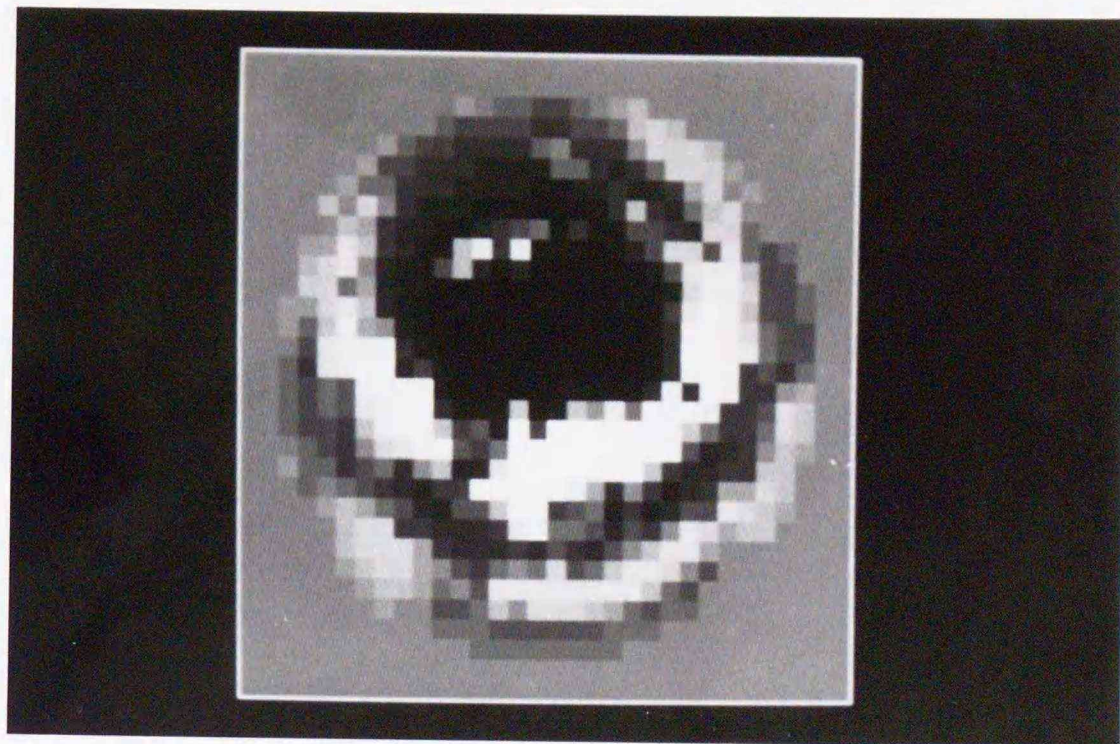


図 3.20: 3次元メモリシステムによる再生像

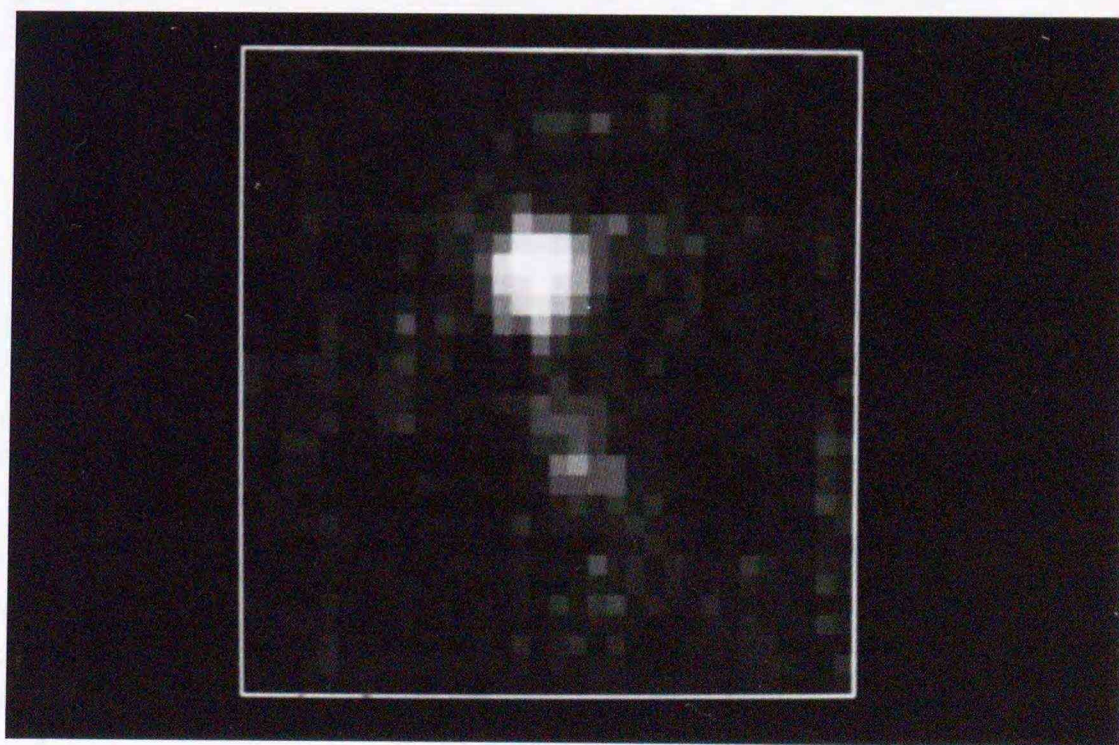
レーダで探査可能な積雪は乾雪であり、含水率が高い雪を対象とする場合は用いる周波数の再検討を要する。

雪による実験は、基本的には単周波の空中実験と同様に行なった。段ボール箱に雪を詰め、厚さ 30cm の雪の壁として、受信アンテナと送信アンテナの間に設置した。雪質は2種類について行い比較した。降って間もない乾雪を静かに箱に詰めた場合と、暖気が続き表面が解けそれが更に凍結して厚さ数センチにわたり堅くなった雪を意図的に乱雑に箱に詰めた場合である。

実験結果は、図3.21と図3.22に示すものである。乾雪の場合、明瞭に F Z P が認められ、点像も再生できている。また、箱を暖めて表面が溶けだした状態で実験を行なっても全体的に受信電波は弱まるが、再生像には大きな影響はない。このような場合は、送信電波の出力を上げることで対処できると考えられる。しかし、乱雑に詰めた雪による実験では、はっきりした F Z P が認められなかった。一応、点像が何とか確認できる程度の再生像が得られるが、1点の像以外では再生が困難であると考えられる。このような結果になったのは、電波は十分に受信されているが F Z P の形が崩れていることから、減衰が大きいだけでなく、硬い雪を乱雑に詰め込んだための不連続面における散乱や屈折の影響であると推定できる。

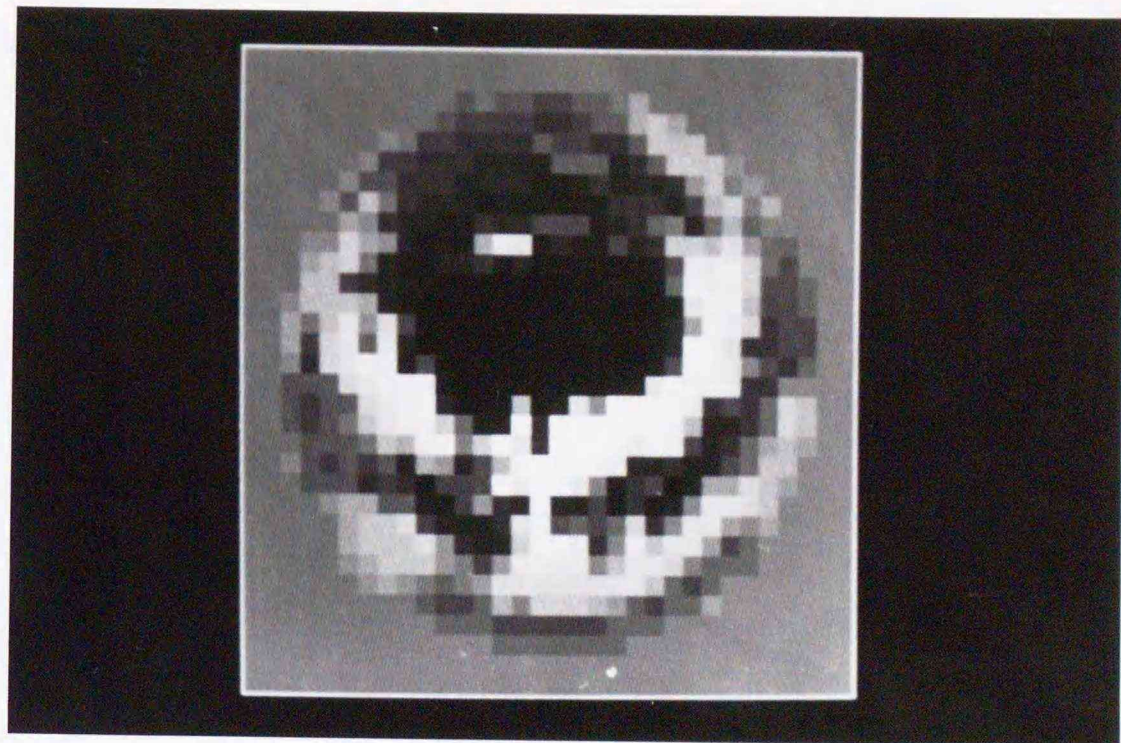


(a) ホログラムデータ (空中)

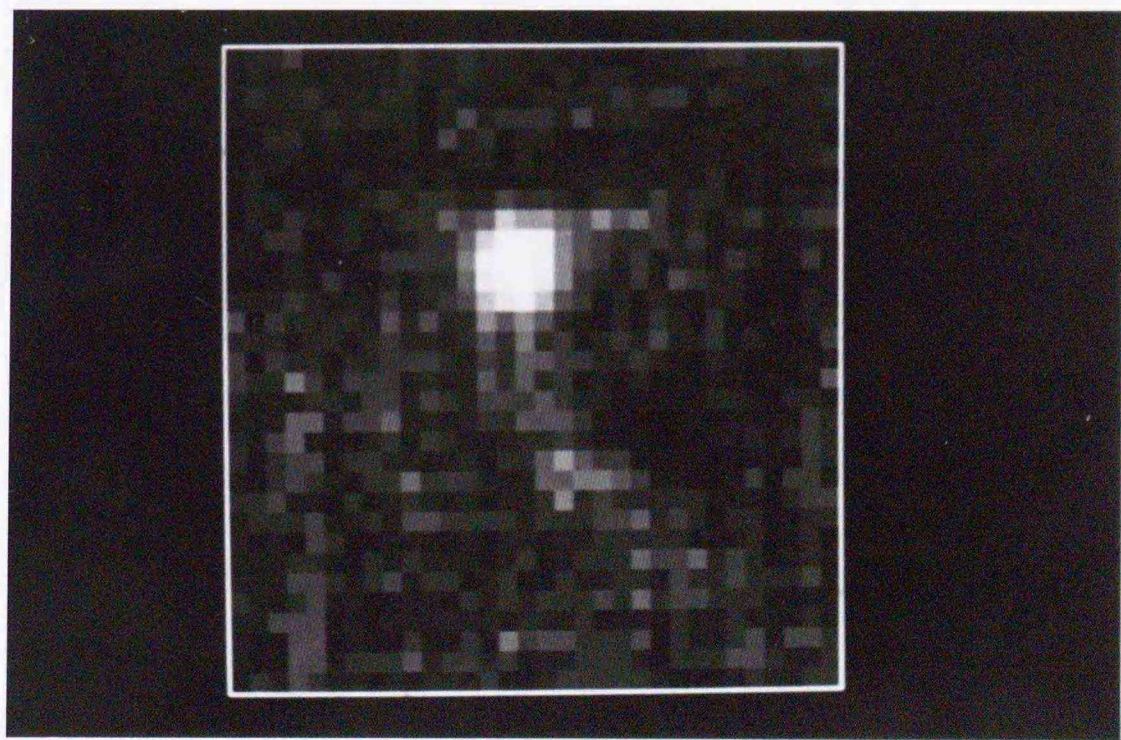


(b) 再生像 (空中)

図 3.21: 乾雪による実験結果

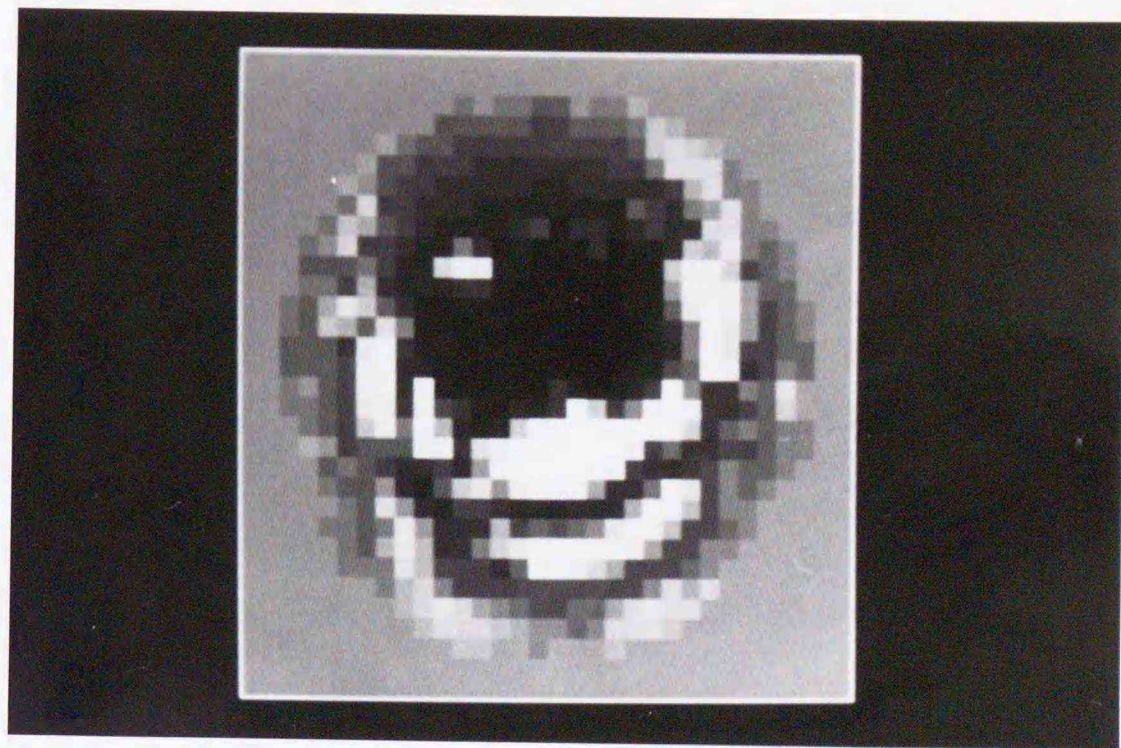


(c) ホログラムデータ (箱のみ)

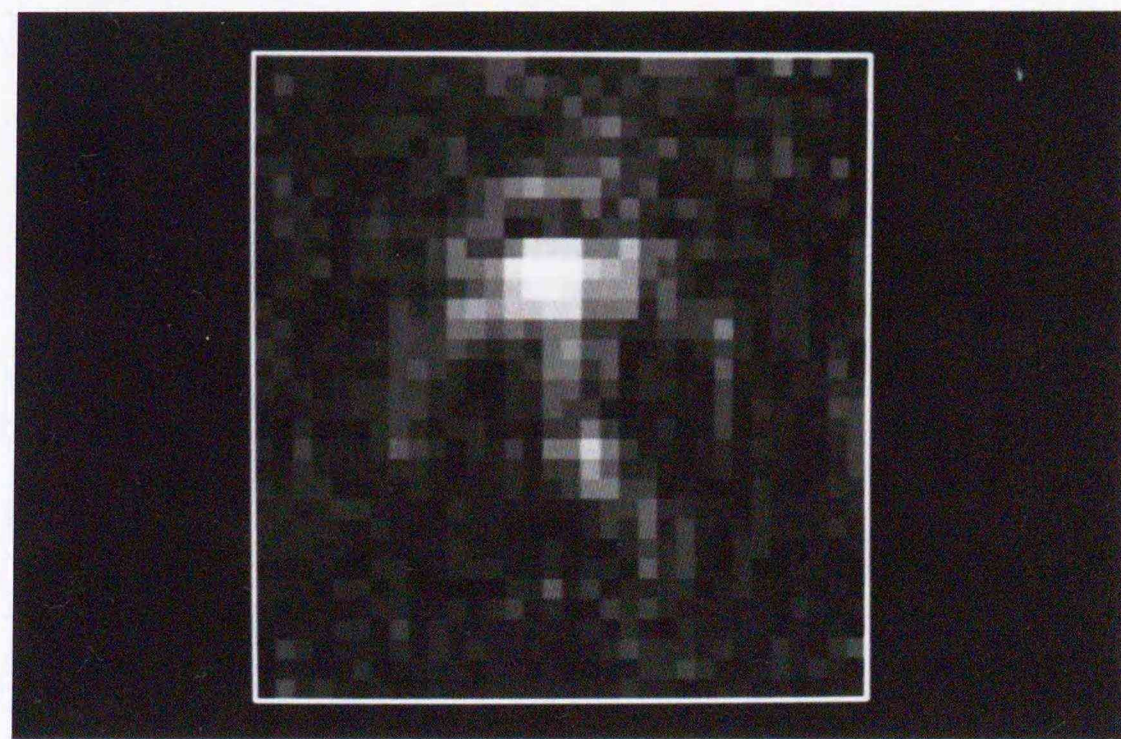


(d) 再生像 (箱のみ)

図 3.21: 乾雪による実験結果

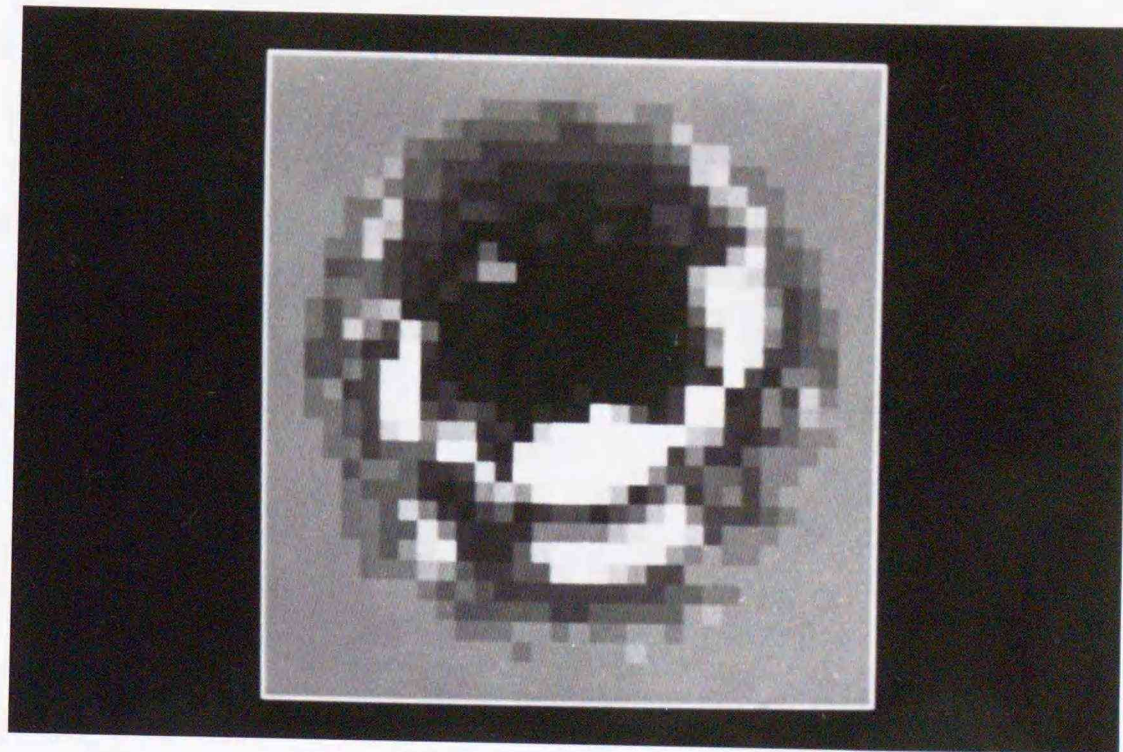


(e) ホログラムデータ (乾雪)

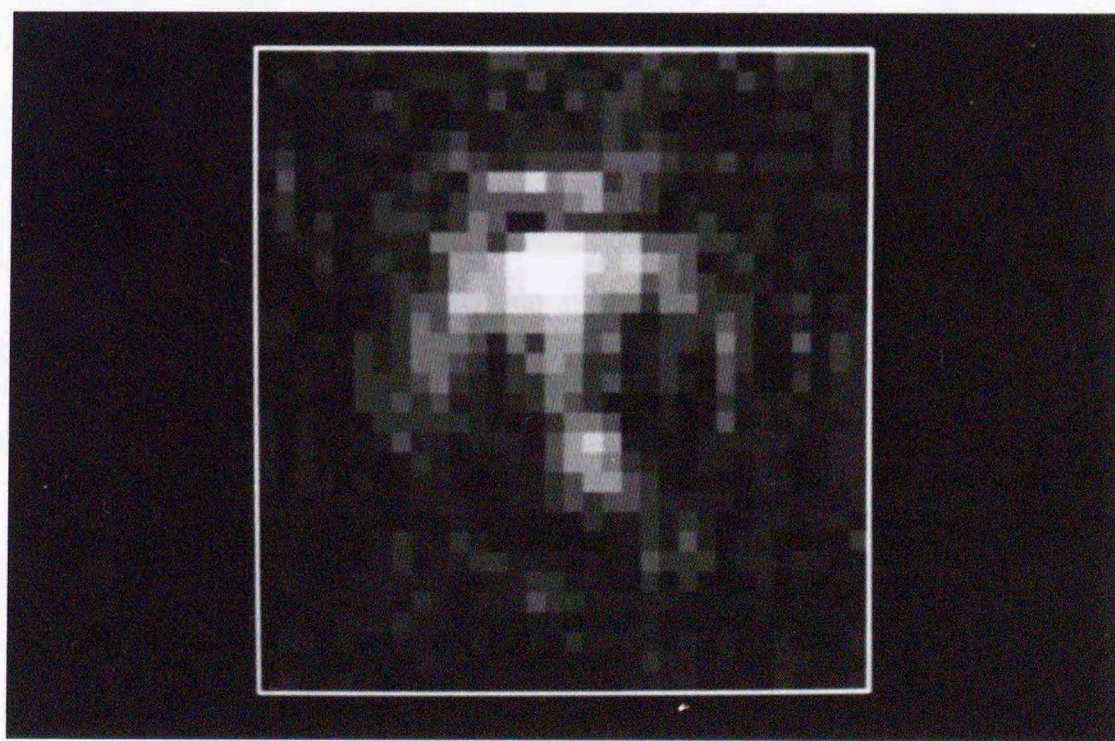


(f) 再生像 (乾雪)

図 3.21: 乾雪による実験結果

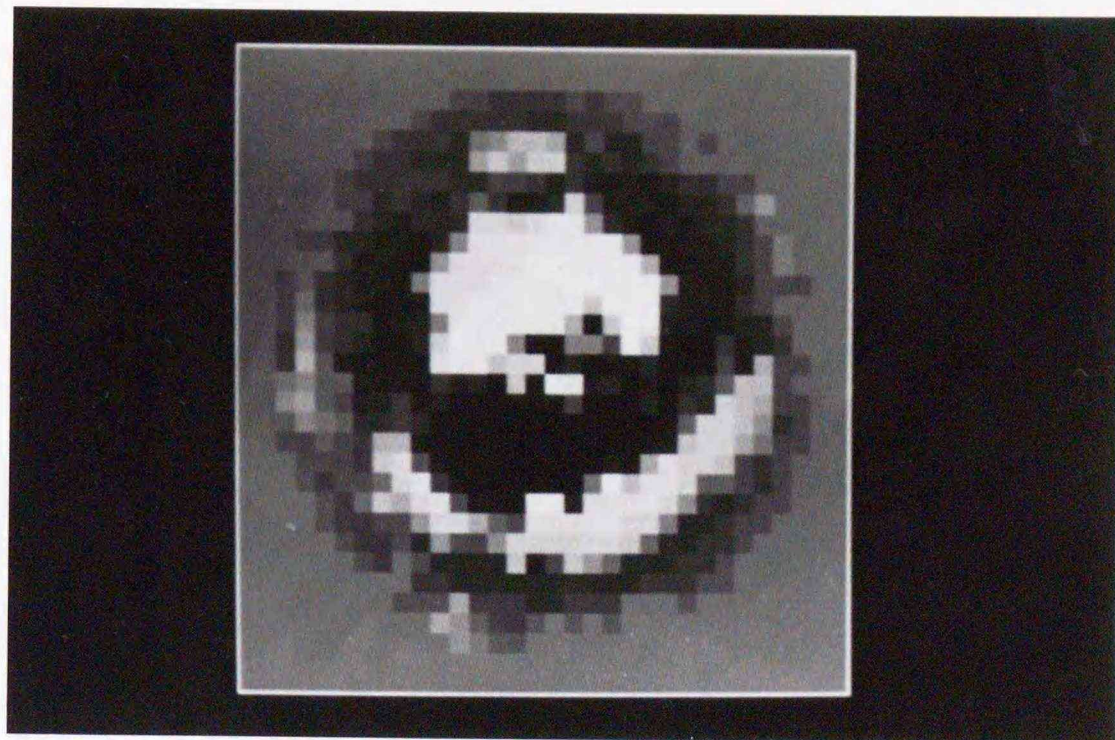


(g) ホログラムデータ（表面が溶けだした雪）

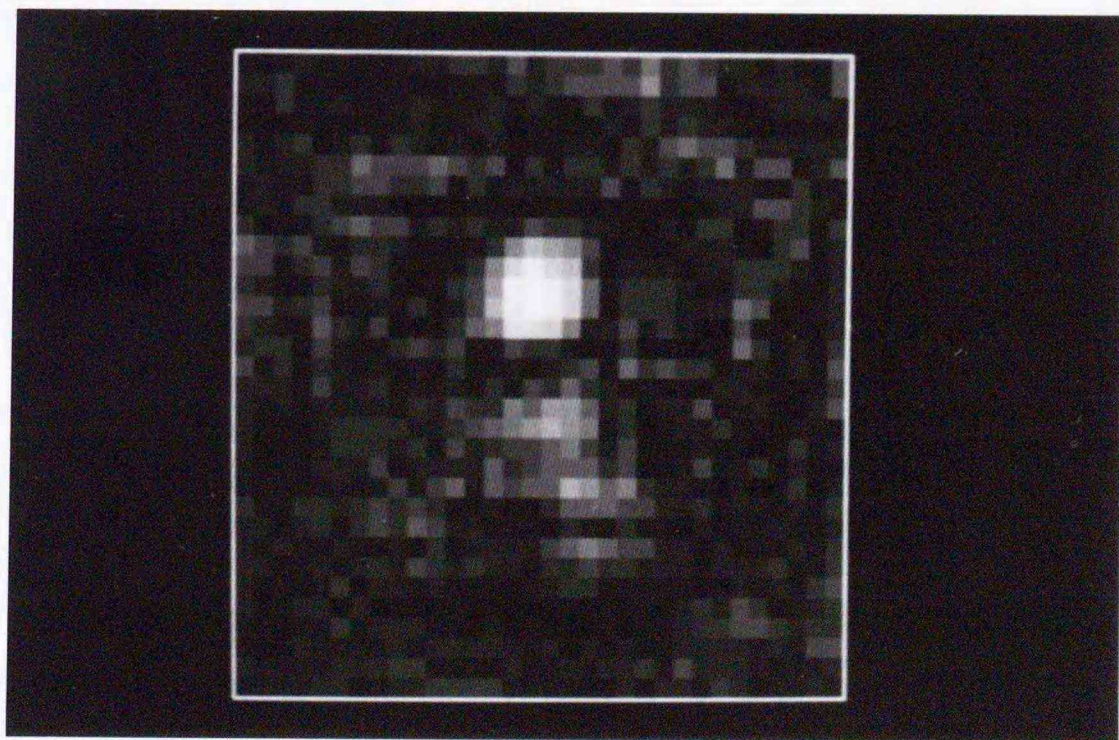


(h) 再生像（表面が溶けだした雪）

図 3.21: 乾雪による実験結果

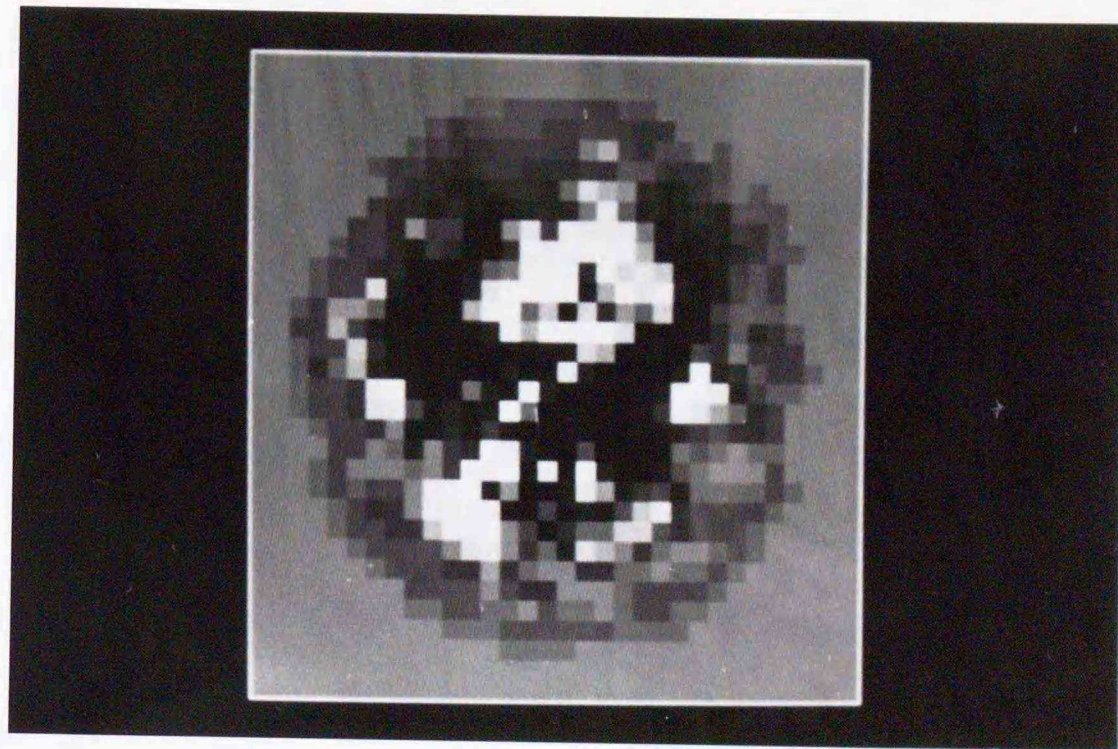


(a) ホログラムデータ (空中)

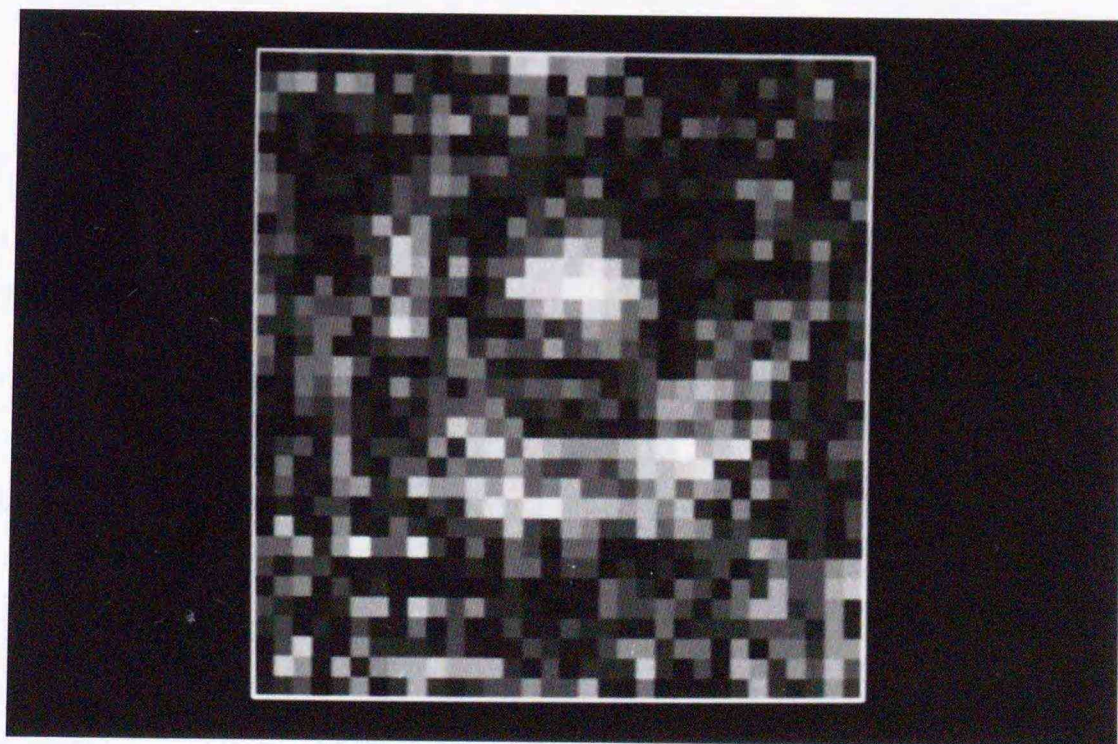


(b) 再生像 (空中)

図 3.22: 乱雑に詰めた雪による実験結果



(c) ホログラムデータ (雪)



(d) 再生像 (雪)

図 3.22: 乱雑に詰めた雪による実験結果

3.5 むすび

雪中レーダを基礎実験システムから、実用化に向けたシステムに進化させるため、まずは高速化を目指し、回転型アンテナアレーとDSPを核にした新しいシステムを考案し、試作、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た。単純な点像ではあるが、多周波での像再生や雪の壁を障害にした像再生にも成功した。しかし、送信出力や用いたアンテナの利得が十分でないため制作した実験システムのままでは、雪中レーダとして積雪に対して実験を行うのは困難であった。

今回のシステム開発の主眼は、アンテナのアレー化である。理論的には、1つのアンテナで実現できるものなら、単純に数を増やし並べるとよいと思えるが、実際に製作すると問題が生じる。これは技術的や経済的な問題であるが、信号処理や設定上の問題解決のため円偏波を取り入れたり、DSB方式の変調を施すなどの新しい考え方で解決をはかり、一応の成果を得た。

つまり、本章で述べた研究はホログラフィックレーダの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る。更に、最近のめざましい半導体技術の発達によるデジタル信号処理の高速化により、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。

第 4 章

積雪の比誘電率推定による自動 像再生法

4.1 はじめに

雪中レーダの像再生の基本処理は、周波数変化に対する受信信号の位相変化により距離を推定し、その距離の値により逆伝搬関数を求めて、畳み込み演算を行うものである。したがって、積雪中のデータに対して、距離（レンジ）方向処理後のデータを空気中とみなした距離情報で方位（アジマス）方向の像再生処理を行うと、実際との距離の差が生じ再生像がボケて結像し、距離も実際とは違うところに評価される。これは、積雪中では空気中に比べて電波の伝搬速度が遅くなるためである。

電波の伝搬状態は積雪の電気的特性の影響で変化する。したがって、雪中レーダでは像再生処理を行うとき、データ収集時の探査対象とした積雪の使用周波数帯における電気的特性が既知である必要がある。特に重要なのは、積雪の比誘電

率の値である。積雪の比誘電率は、密度や含水率、温度などの要因で変化する。そこで、従来は積雪の比誘電率と密度の高い相関性に着目し、データ収集時の積雪の密度を測定することにより比誘電率を推定して、その推定値で像再生処理を行っていた。また、受信データから比誘電率を推定する方法としては、あらかじめ距離がわかっている物体の受信データを空気中と仮定して再生した距離方向情報と、実際の距離との差から測定する方法等がある。

しかし、専用の測定機を使用したにせよ雪中レーダによる探査と同時になんらかの測定が必要であり、実際の運用では不便である。すなわち、雪中レーダの受信データのみから比誘電率が推定できれば、全自動像再生が可能となる。そこで、本章では雪中レーダで得られるデータである多周波ホログラムの特性から積雪の比誘電率を自動推定する方法を述べ、実際に雪中レーダのデータを処理した結果について報告する。

以下では、まず第4.2節で送受信点同一の雪中レーダにおける多周波ホログラフィ法について説明を行い、第4.3節で多周波ホログラフィ法の観点から積雪がマイクロ波の伝搬に与える影響を検討する。第4.4節では本章で提案する積雪の比誘電率の推定法について、第4.5で雪中レーダのデータに対して行った実験結果について述べる。

4.2 実験システムにおける多周波ホログラフィ理論

雪中レーダのアンテナ走査範囲であるホログラム開口面積は、装置の制約上電波の波長に比べあまり大きくとれないため単一周波数のホログラムからの像再生では、方位方向に比べて距離方向の分解能がかなり悪くなる。これを改善するため雪中レーダでは、多周波ホログラフィ法を用いている。多周波ホログラフィ法は、複数の周波数でホログラムを記録し、各周波数での位相回転により距離方向の情報を得るものである。距離方向の1次元フーリエ変換の形をしているため、ディジタル処理系での取扱が単純で高速に処理できる。図4.1に示す座標系で、点物体が (x_o, y_o, z_o) に存在し、ホログラム面上の点 $R(x, y)$ のアンテナから周波数 f の電波を照射し、反射波を同じアンテナで受信すると受信信号 $g_r(t)$ と参照波信号 $u_r(t)$ は、

$$g_r(t) = A \cdot \exp \left\{ j2\pi f \left(t - \frac{2r}{v} \right) \right\} \quad (4.1)$$

$$u_r(t) = B \cdot \exp(j2\pi ft) \quad (4.2)$$

但し、

- A, B : 受信点における振幅
- t : 時間
- v : 電波の速度
- r : 反射点からアンテナまでの距離

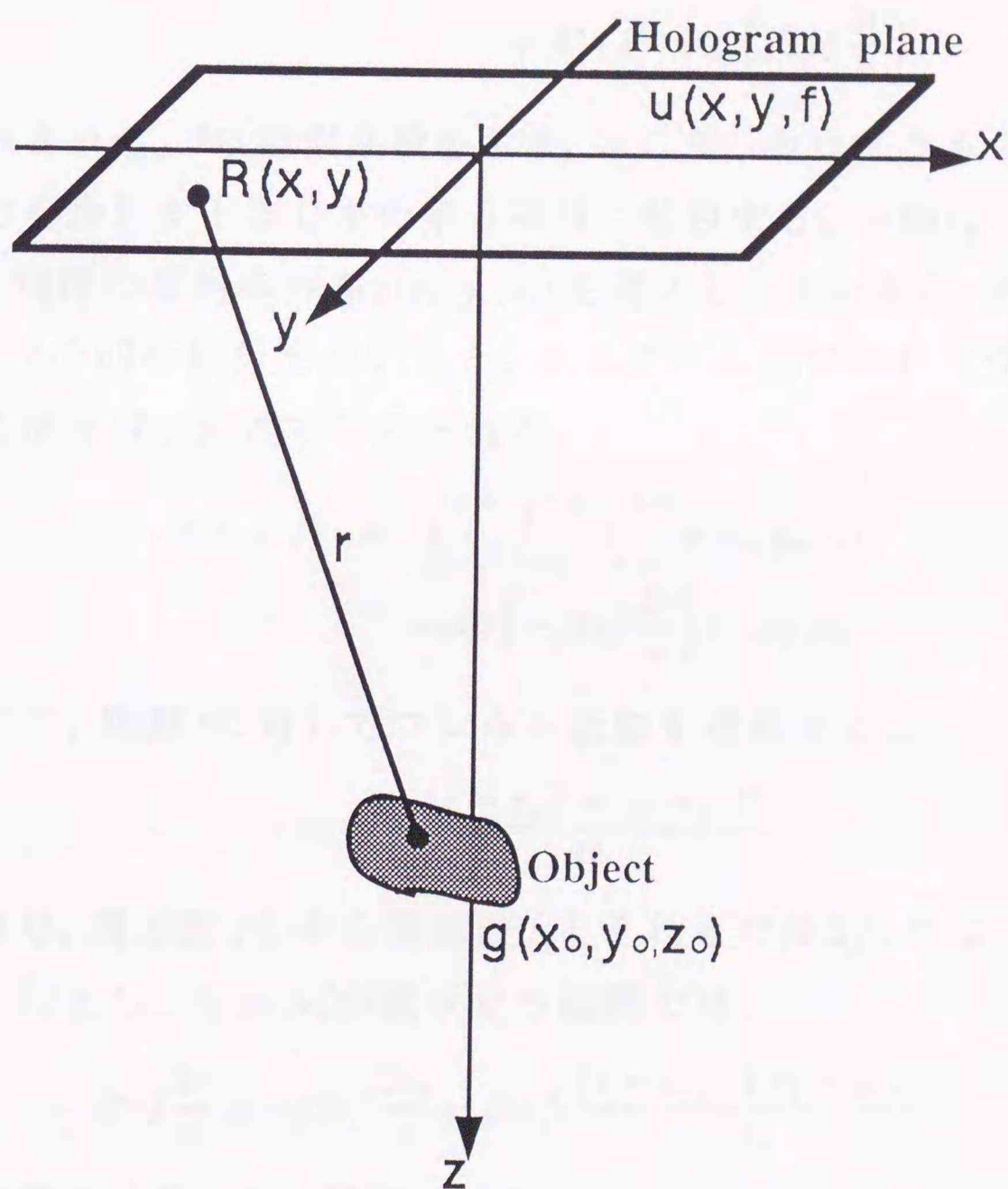


図 4.1: 多周波ホログラフィ法における座標系 (送受信点同一)

と表わさる。距離 r に係数 2 が掛かっているのは、反射型ホログラムであるためである。2乗検波された合成強度 $I(x, y)$ は、

$$\begin{aligned} I(x, y) &= |g_r(t) + u_r(t)|^2 \\ &= |A|^2 + |B|^2 + A \cdot B^* \cdot \exp\left(-j2\pi f \frac{2r}{v}\right) \\ &\quad + A^* \cdot B \cdot \exp\left(j2\pi f \frac{2r}{v}\right) \end{aligned} \quad (4.3)$$

で示される。 $*$ は複素共役を示す。ここで、ホログラムの虚像成分を表わす干渉じまの第3項目に着目する。一般化のために、物体の反射率分布 $g(x_o, y_o, z_o)$ を導入し、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信号は、次式で与えられる。

$$\begin{aligned} u(x, y, f) &= \int_0^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} g(x_o, y_o, z_o) \\ &\quad \cdot \exp\left(-j2\pi f \frac{2r}{v}\right) dx_o dy_o dz_o \end{aligned} \quad (4.4)$$

ここで、距離 r に対してフレネル近似を適用すると、

$$r \simeq z_o + \frac{(x - x_o)^2 + (y - y_o)^2}{2z_o} \quad (4.5)$$

となり、周波数 f を中心周波数 f_0 とそれとの差 Δf 、つまり $f = f_0 + \Delta f$ とし、 $f_0 \gg \Delta f$ が成り立つ範囲では、

$$-j2\pi f \frac{2r}{v} \simeq -j2\pi f \frac{2z_o}{v} - j2\pi f_0 \frac{(x - x_o)^2 + (y - y_o)^2}{v z_o} \quad (4.6)$$

と近似できる。この近似によりレンジカーバチャの影響を生じるが、雪中レーダでは開口幅と周波数掃引幅をその影響が無視できる範囲に設定している。式4.6を式4.4に代入すると、

$$u(x, y, f) = \int_0^{+\infty} \exp\left(-j2\pi f \frac{2z_o}{v}\right) \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty}$$

$$g(x_o, y_o, z_o) \exp \left\{ -j2\pi f_0 \frac{(x - x_o)^2 + (y - y_o)^2}{v z_o} \right\} dx_o dy_o dz_o \quad (4.7)$$

となる。内側の積分を次式のようにおく。

$$h(x, y, z_o) = \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} g(x_o, y_o, z_o) \exp \left\{ -j2\pi f_0 \frac{(x - x_o)^2 + (y - y_o)^2}{v z_o} \right\} dx_o dy_o \quad (4.8)$$

すると式4.7は次のように表わされる。

$$u(x, y, f) = \int_0^{+\infty} h(x, y, z_o) \cdot \exp \left(-j2\pi f \frac{2z_o}{v} \right) dz_o \quad (4.9)$$

つまり、受信信号である多周波ホログラム $u(x, y, f)$ は、 $h(x, y, z_o)$ を距離 z_o に関してフーリエ変換した形になっている。また、 $h(x, y, z_o)$ は、距離 z_o に物体を置いた場合のフレネル領域での単周波ホログラムを表わしている。

以上より、多周波ホログラフィ法で記録した受信データからの像再生処理は、周波数方向に1次元フーリエ逆変換したものをさらに方位方向に2次元フレネル逆変換をするものである。また、式4.8はコンボリューション積分式の形をしているため、2回のフーリエ変換による手法で高速に処理できる。つまり、第3.2.2節で述べた回転型アンテナアレーによるデータの像再生処理から、参照波源の位置による歪を補正する処理を除いた図4.2に示すアルゴリズムで像再生処理が行われる。

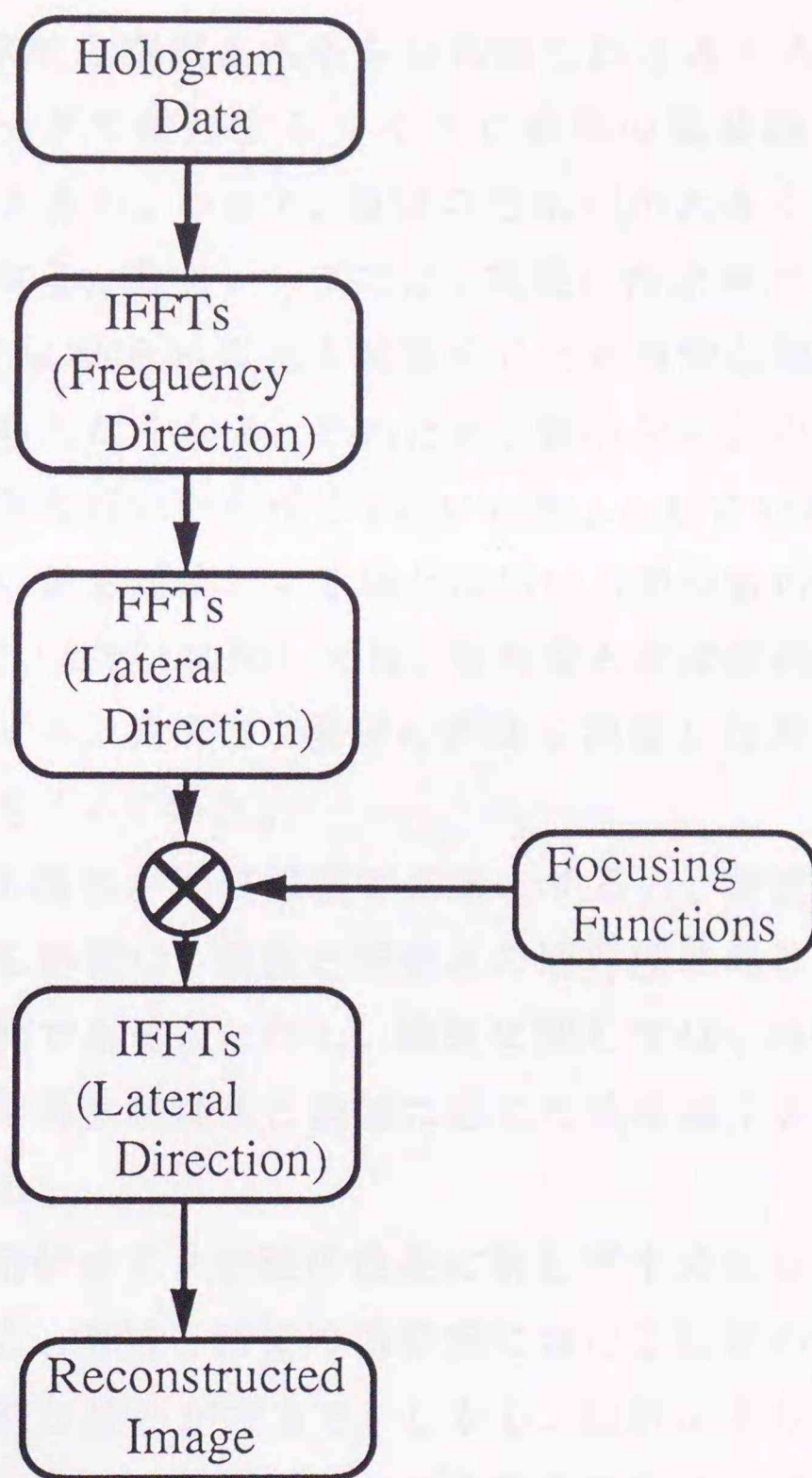


図 4.2: 像再生アルゴリズム (送受信点同一)

4.3 積雪が多周波ホログラフィ法に与える影響

積雪は、氷粒と空気と水からなる混合体と考えられる。特に、雪中レーダで使用するマイクロ波帯の周波数では水による減衰が大きい。つまり、積雪の含水率が大きくなると減衰が激しくなる。雪中レーダでは、実際に含水率が1%程度でも、10GHzでは30dB/m以上も減衰するため有効な強度の受信データが得られなくなる。そのため、雪中レーダの対象とする雪は含水率の低いいわゆる「乾いた雪」としている。また、含水率が高い雪を対象とする場合は用いる周波数の再検討を要する。「乾いた雪」に関しては、雪密度とほぼ比例して比誘電率は増加する。従来は、積雪の密度を測定し比誘電率を推定する方法をとっていた。

対象とする積雪が均質媒質であるとする、積雪が電波の伝搬に与える影響は、積雪と空気との境界面における屈折と速度、減衰率である。ただし、減衰に関しては、再生処理時に距離方向の再生処理後に距離に応じた強度補正をすることで対応できる。

積雪の表面がマイクロ波の波長に対して十分になめらかであるとする、空気と積雪の境界面における屈折の影響は幾何光学的な取り扱いができる。しかし、屈折により受信データが受ける影響は、雪中レーダの設定条件下では非常に小さいため無視できる。

ここで、図4.1に示す座標系で、簡単のためホログラム面と

積雪表面を一致させて考えることにする。積雪の屈折率 n は、導電性の無視できる非磁性物質であるとする。比誘電率 ϵ_r から、

$$n = \sqrt{\epsilon_r} \quad (4.10)$$

となる。電波の速度は空気中に比べ $1/n$ に比例して遅くなる。そこで、考え方を単純にするため視点を変えて速度一定と仮定して、その代わりに伝搬距離が n に比例して大きくなるものとし、

$$z'_o = n z_o \quad (4.11)$$

$$z''_o = \frac{z_o}{n} \quad (4.12)$$

とする。つまり、 z'_o, z''_o は空気中に換算した距離を表す。ここで、式4.5に代入すると屈折率 n の媒質では、

$$r_n = z'_o + \frac{(x - x_o)^2 + (y - y_o)^2}{2z''_o} \quad (4.13)$$

となる。これは、媒質の比誘電率が大きくなると仮定した場合、多周波ホログラムのもつ距離情報が周波数方向は遠くに、方位方向は近くに変化したのと同様になることを示している。ここでは、周波数方向のデータのフーリエ逆変換によるものを周波数方向のもつ距離情報、方位方向の2次元フレネル逆変換時に必要な距離パラメータを方位方向のもつ距離情報と呼んでいる。比誘電率の変化は、周波数方向と方位方向がそれぞれ独立してもつ距離情報を相反する方向に変化させる。つまり、実際の距離を $1m$ としたとき、積雪の比誘電率の変化に対し z'_o, z''_o は、図4.3に示す変化をする。したがって、周波数方向処理後のデータに対して空気中と仮定した場

合の周波数方向のもつ距離情報で方位方向の処理を行うと必要な距離パラメータと大きく異なるため焦点の合った再生像が得られない。

図4.4は、第4.5.1節で示す雪中レーダの諸元に基づき作成した比誘電率1.0と1.8のシミュレーションデータとそれに対し距離方向の再生処理、つまり周波数方向のフーリエ逆変換したものである。物体は1mの距離の中心にある点物体とした。シミュレーションデータの64面の各面が各周波数でのホログラムを表す。左上が8GHzのもので、右そして下に行くに従って周波数が高くなり、右下が10GHzのホログラムを表す。周波数方向処理後のデータの32面の各面が各距離に対応する方位方向のデータである。本章では、便宜上この表示法において上段の左端の面を第0面、その右隣の面を第1面と順に名づけ、下段の左端の面を第16面、最後の下段の右端の面を第31面と呼ぶ。比誘電率1.0の場合は、シミュレーションの設定では各面の距離間隔が7.5cmであるから、図4.4(c)では第13面に点物体のフレネルホログラムであるフレネルゾーンプレートが見られる。第14面にも同様の形が見えるが、これは式4.6の近似によるレンジカーバチャの影響である。但し、雪中レーダでは、この影響が2面以内に収まる領域（比誘電率1.0の場合、距離が約80cm以上）に設定することにより補正を省いている。また、比誘電率1.8の場合は、各面の距離間隔が比誘電率の平方根の逆数に比例して短くなるため、見かけ上図4.4(d)に示すように図4.4(c)に比べ遠くの面である第18面と第19面に見られる。さらに注意深く比較すると、図

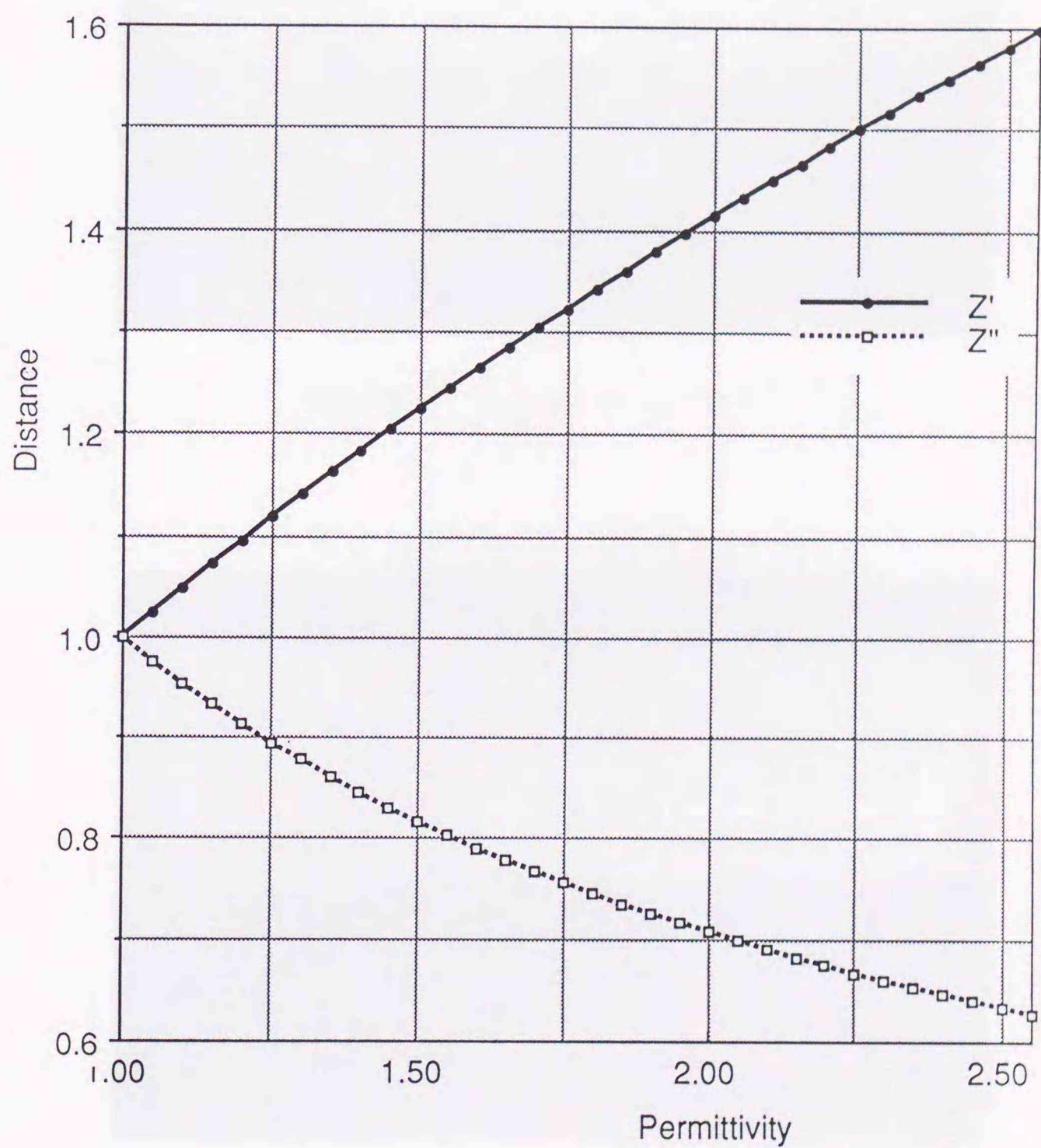
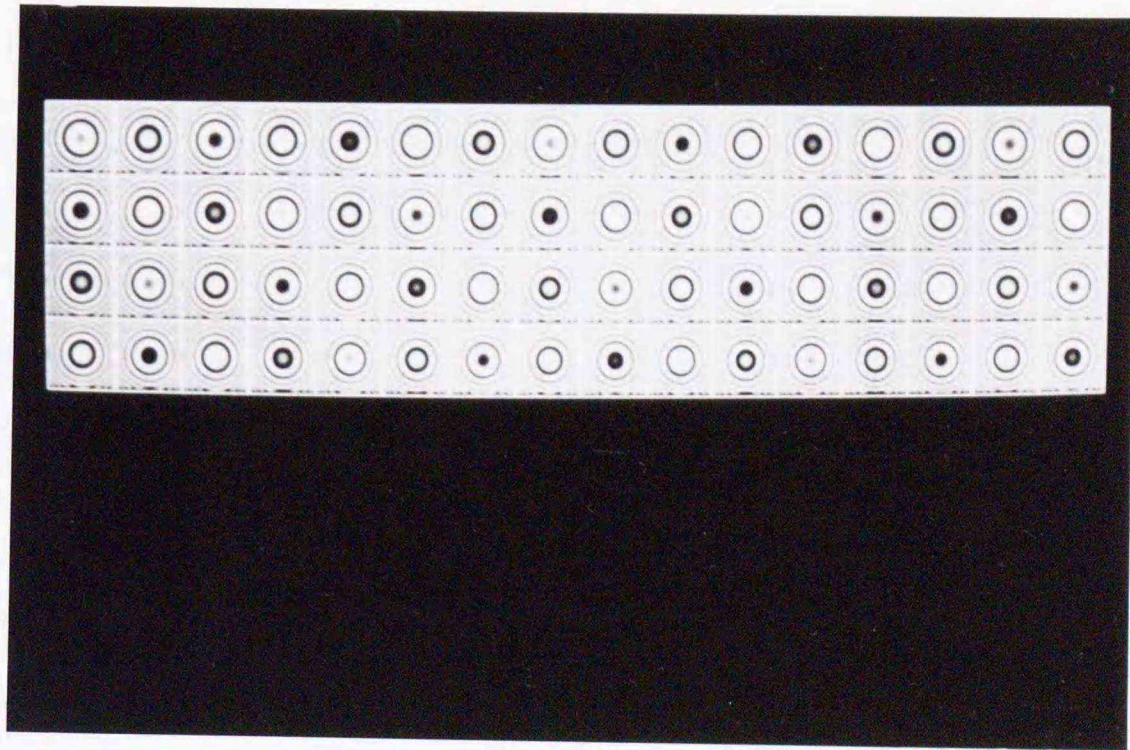
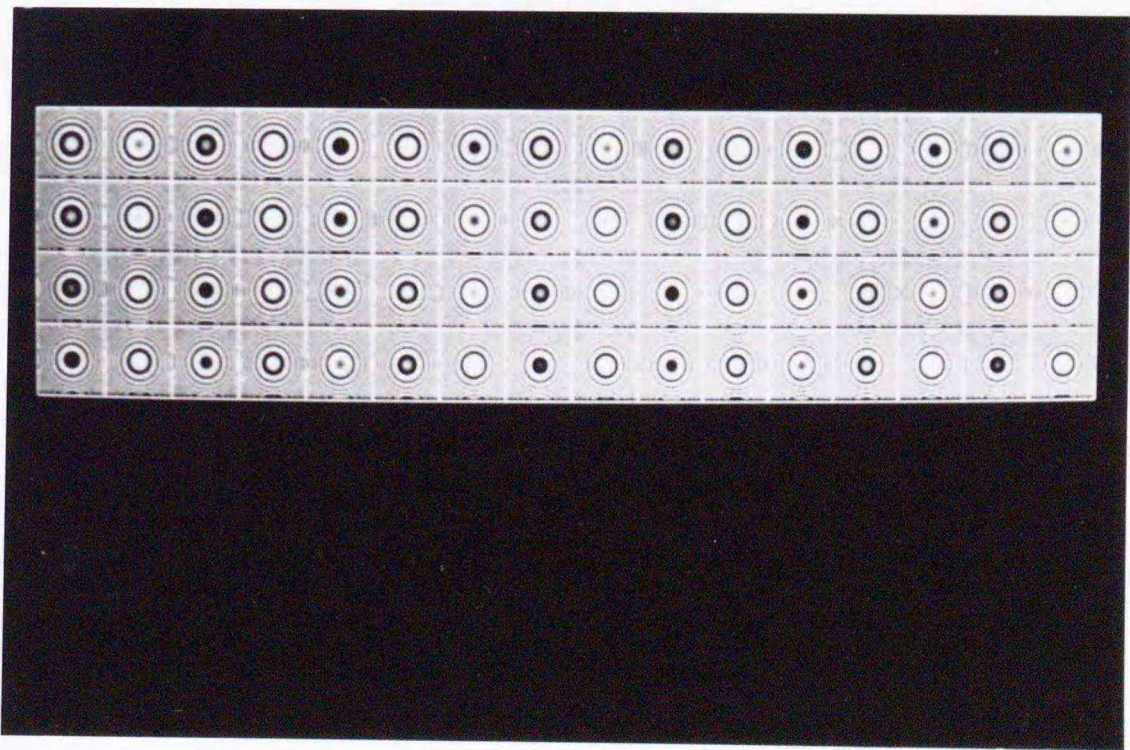


図 4.3: 距離パラメータの変化

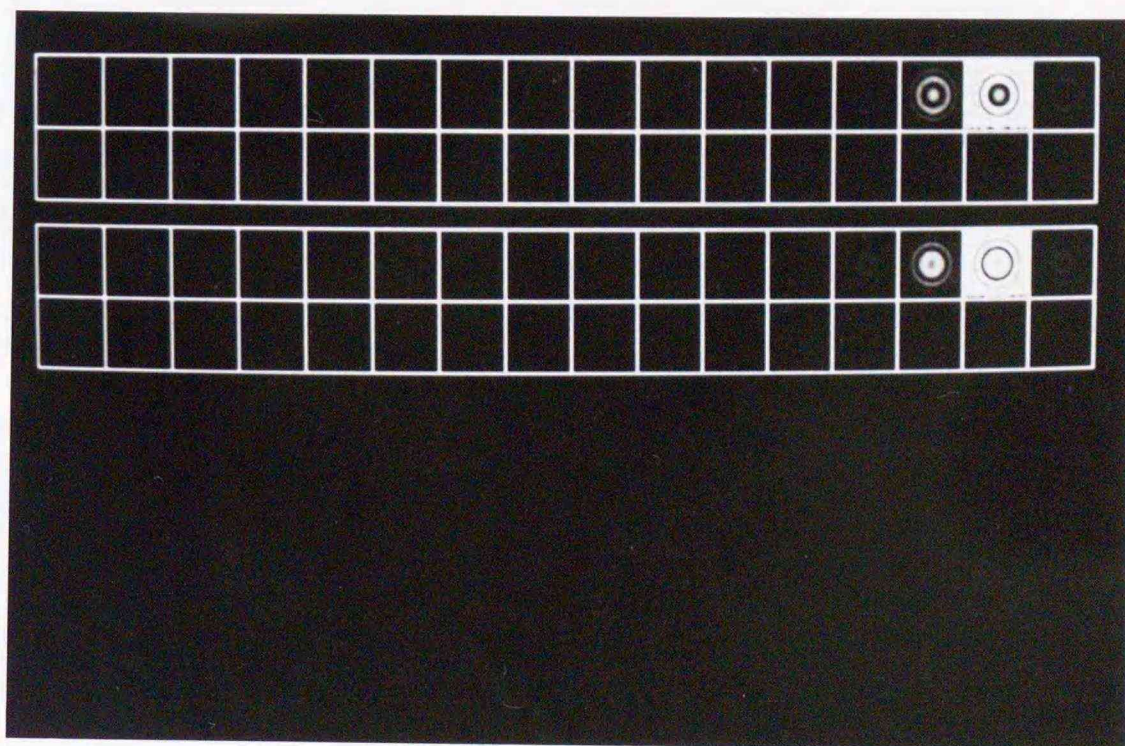


(a) ホログラムデータ ($\epsilon_r = 1.0$)

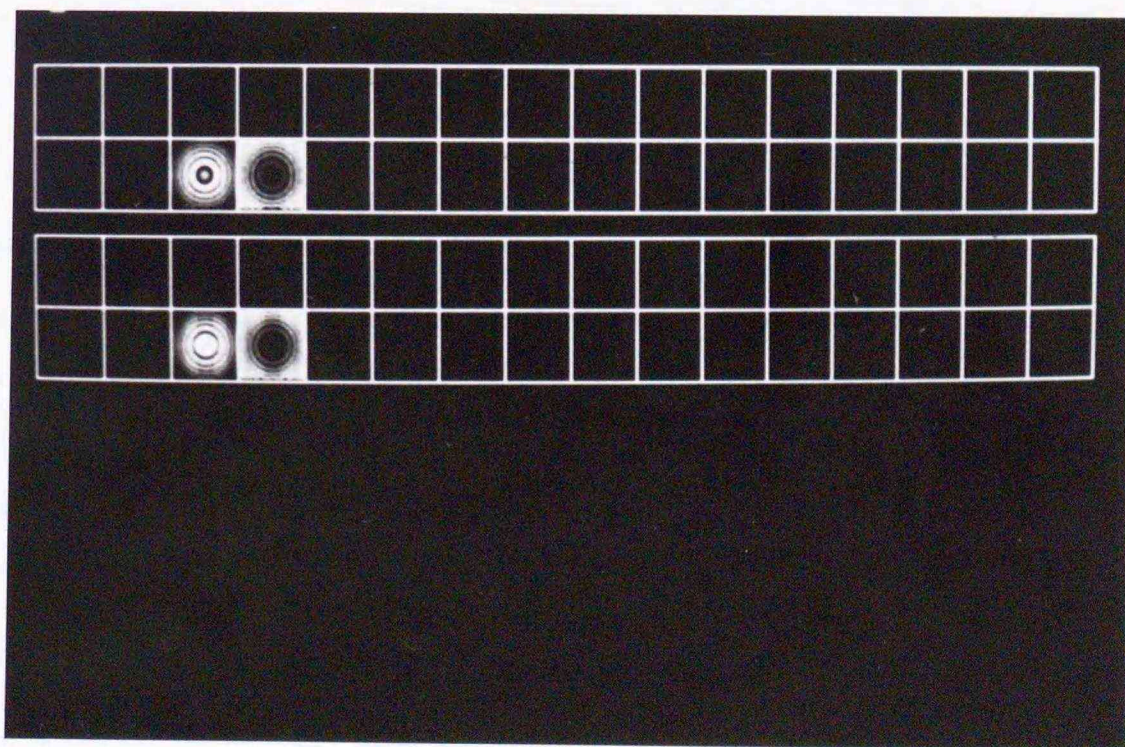


(b) ホログラムデータ ($\epsilon_r = 1.8$)

図 4.4: 計算機シミュレーション



(c) 周波数方向処理後のデータ ($\epsilon_r = 1.0$)



(d) 周波数方向処理後のデータ ($\epsilon_r = 1.8$)

図 4.4: 計算機シミュレーション

4.4(c) に比べ(d)のフレネルゾーンプレートの各ゾーンプレートの間隔が狭い、つまり空間周波数が高いことがわかる。同じ設定なら、フレネルホログラムの空間周波数が高い方が、物体までの距離が近いことを意味し、両方を比較するとフレネルゾーンプレートからは図4.4(c)より(d)の方が近いことを表わす。これらのシミュレーションデータの処理結果は、本節で検討した結果と完全に一致するものである。

4.4 積雪の比誘電率の推定法

4.4.1 像再生処理

雪中レーダで得られるデータは多周波ホログラムであるから、第4.2節で述べたように距離方向は周波数方向の1次元フーリエ逆変換、方位方向は距離方向処理後のデータに対し方位方向の2次元フレネル逆変換によって像再生ができる。ここでは、フレネル逆変換を解析的に解いた伝搬関数のフーリエ変換の複素共役を用いた畳み込み演算の手法いわゆる2回のフーリエ変換による方法で行った。ところで、ここまで述べたホログラフィ理論では無指向性のアンテナを想定しているが、実際に用いるアンテナには指向性があり、アンテナ自身の利得を上げるため指向性の影響が無視できなくなる場合もあり得る。その場合も距離方向は同様にフーリエ逆変換で、方位方向は点物体からの反射波の受信パターンをアンテナの指向性に合わせてシミュレートし、それを点拡がり関数として、逆伝搬関数としてその複素共役を畳み込み演算する

ことで像が再生できる。

4.4.2 比誘電率の推定法

式4.11、4.12より、

$$z''_o = \frac{z'_o}{n^2} \quad (4.14)$$

であるから、結像時の距離パラメータより比誘電率と実際の距離を推定することができる。 z'_o 、 z''_o は空気中の距離に換算したそれぞれ周波数方向と方位方向のもつ距離情報であると見なせる。

具体的な処理手順は次のようなものである。収集した多周波ホログラムのデータに対し距離方向の再生処理として周波数方向の1次元フーリエ逆変換をし、大きな強度の面を選択する。ここで言う大きな強度の面とは、例えば図4.4(c)では第14面を指すものである。その面に対して、積雪の比誘電率のパラメータを変化させ方位方向の像再生処理を行い、最もボケの小さい像が再生された時の値が、推定する比誘電率である。このとき、実際の距離 z_o は、周波数方向における距離 z'_o を距離方向処理後の選択した面から空気中の距離に換算し、式4.11に代入して求める。これにより推定した比誘電率に基づいて、全ての距離の面に対して方位方向の像再生処理を行なう。

4.4.3 結像の判定法

比誘電率を推定するためには、結像の判定が必要である。結像の判定は、人が再生像を見て判断することも可能である

が、計算機上で自動的に行われる方が望ましい。「乾いた雪」の比誘電率は、雪中レーダの周波数帯では大きくても2.5程度までと範囲が限られているため、画像処理技術で比較的容易にもっともボケの小さい結像した画像を選択することが可能である。

ここでは、結像の判定は画像処理技術を応用し、再生像をフーリエ変換して高周波成分を見ることにより行った。比誘電率を変化させながら像再生を行なうことは、距離パラメータを変化させたのと等価であるから、比誘電率が実際と違う値であると再生された像は写真でいうピントがボケた状態になる。ボケた画像では物体の輪郭部の濃度値が緩い変化をする。画像の空間周波数のうち、高い周波数成分が少なくなると輪郭部が鈍ることになる。つまり、輪郭部が鮮明な物体は、画像の高い空間周波数成分を評価することで最もピントが合った状態を判別することが可能である。但し、輪郭部の濃度変化でピントを判定するため、再生した画像内に物体の輪郭が存在する必要がある。ここで用いた判別法は、高い周波数成分まで大きな値を持つものが大きな値になるように図4.5に示す空間周波数に正比例した重み関数をかけ、その荷重周波数成分の和が最大になる場所を選択するものである。試作した雪中レーダで得られる再生画像は、 32×32 の画素で表わされるデジタル画像であるから、各画像の評価値 $J(p)$ は、

$$J(p) = \sum_{m=0}^{l/2} m |s(p, m)|^2 \quad (4.15)$$

と表わされる。これを x, y 方向の2次元に適用した。但し、

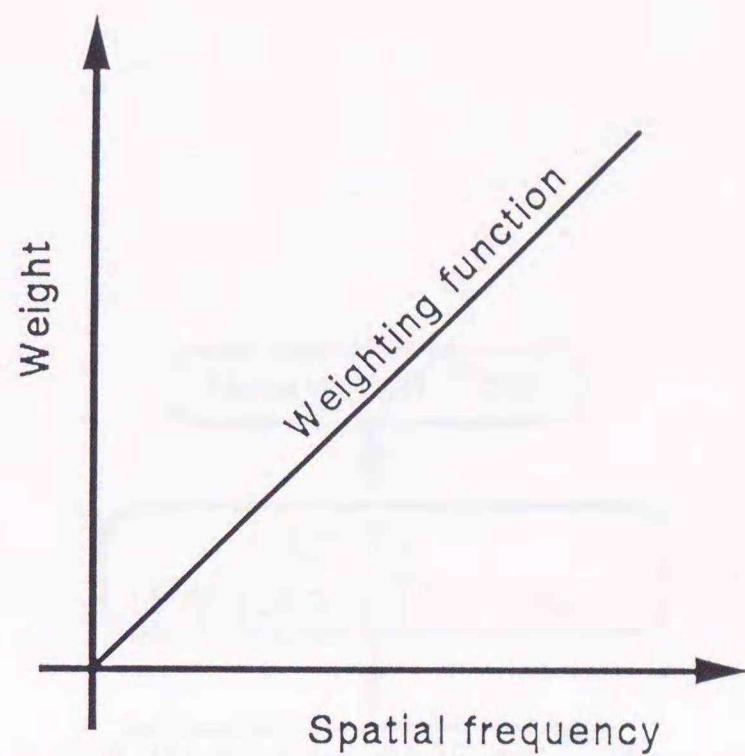


図 4.5: 結像判定用重み関数

$|s(p, m)|^2$ は比誘電率 p で再生処理した画像の m 次高調波成分のパワースペクトルを表わす。また、 l は離散フーリエ変換の点数であり、雪中レーダでは32である。自動像再生のための処理手順を図4.6に示した。

図4.7は、図4.4(d)のデータに対して結像の判定を行った結果である。縦軸の値は、正規化したものである。シミュレーションデータを作成したときの比誘電率である1.8で最大値になっており、本手法で積雪の比誘電率が推定できることが示された。

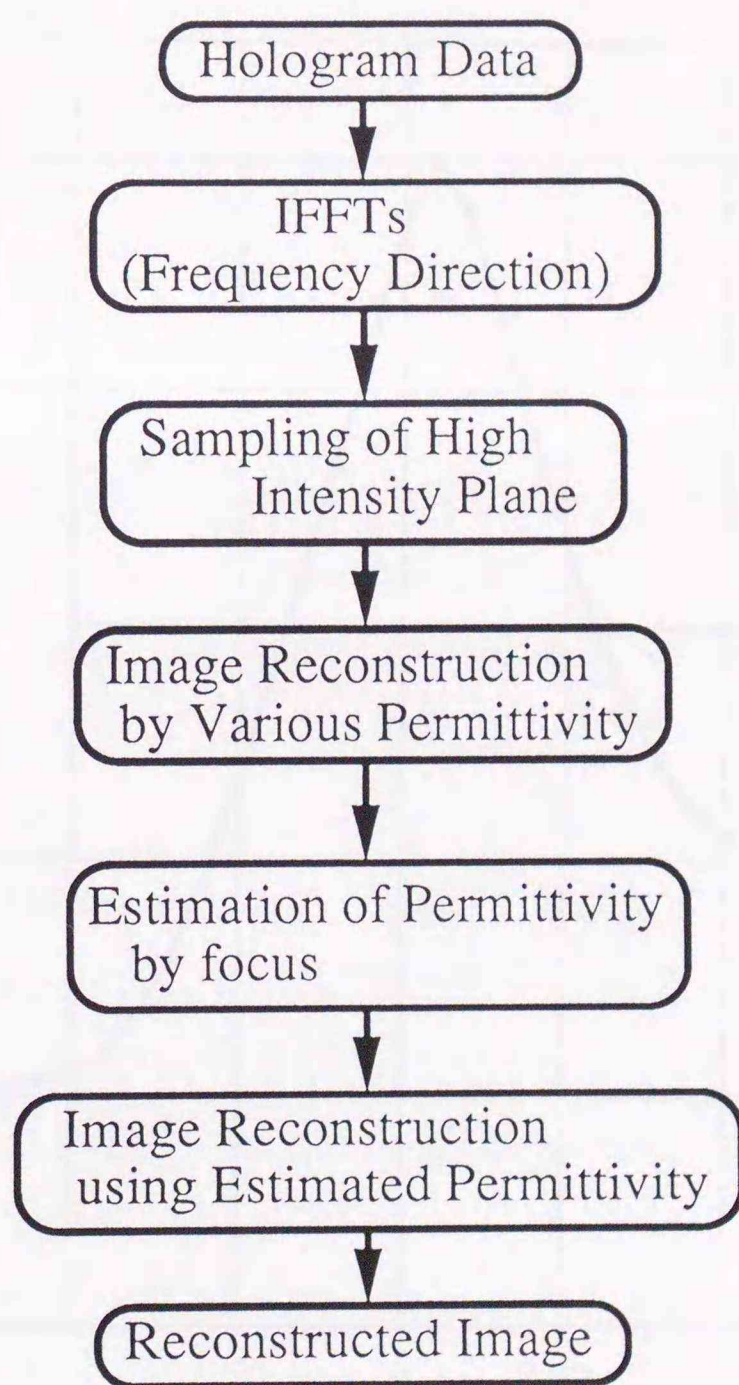


図 4.6: 自動像再生の処理手順

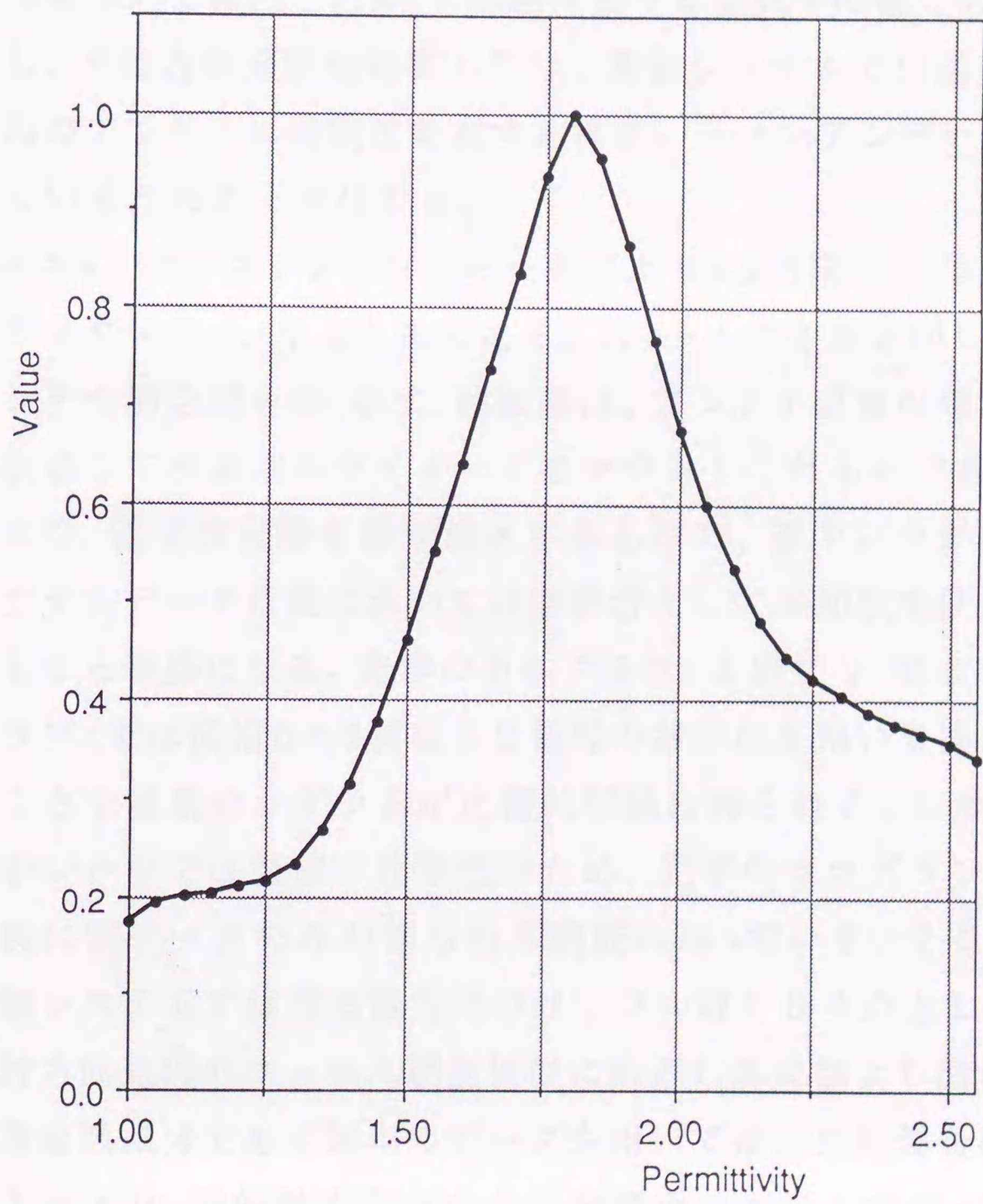


図 4.7: 比誘電率に対する結像の評価

4.5 雪中レーダによる実験結果

4.5.1 雪中レーダの諸元

本章の研究のために試作した雪中レーダの構成は、図4.8に示すものである。表4.1の諸元の分解能は、レイリーの解像基準に基づいて算出した1mの距離における空気中の値である。但し、方位方向分解能に関しては、実験システムでは送受信共用のアンテナに指向性を有する角すいホーンアンテナを用いているため若干劣化する。

スキャナは、ステッピングモータによりx,y方向にアンテナをラスタスキャンするものである。スキャナの全景を図4.9に、アンテナ部を図4.10に示す。検波部は、アンテナ直後の導波管を改造して検波用のダイオードをマウントしたものである。つまり、送信波自身を参照波とするもので、雪中レーダのホログラムデータ収集においては参照波として平面波を使用したものと等価になる。光学のホログラフィと異なり、電波ホログラフィでは位相が $\pi/2$ 異なる2種類の参照波を用いて検波することで複素ホログラムが比較的容易に得られる。しかし、雪中レーダでは装置の簡単化のため、光学のホログラフィと同様に実データのみが得られる構成になっている。そこで、実験システムでは周波数方向のサンプル数を64点とし、周波数方向処理のフーリエ逆変換後に折返し周波数より前の正の周波数成分である前半のデータを用いて像再生処理を行うことにより、周波数方向32点の複素ホログラムで行った場合と同等の情報を得ている。

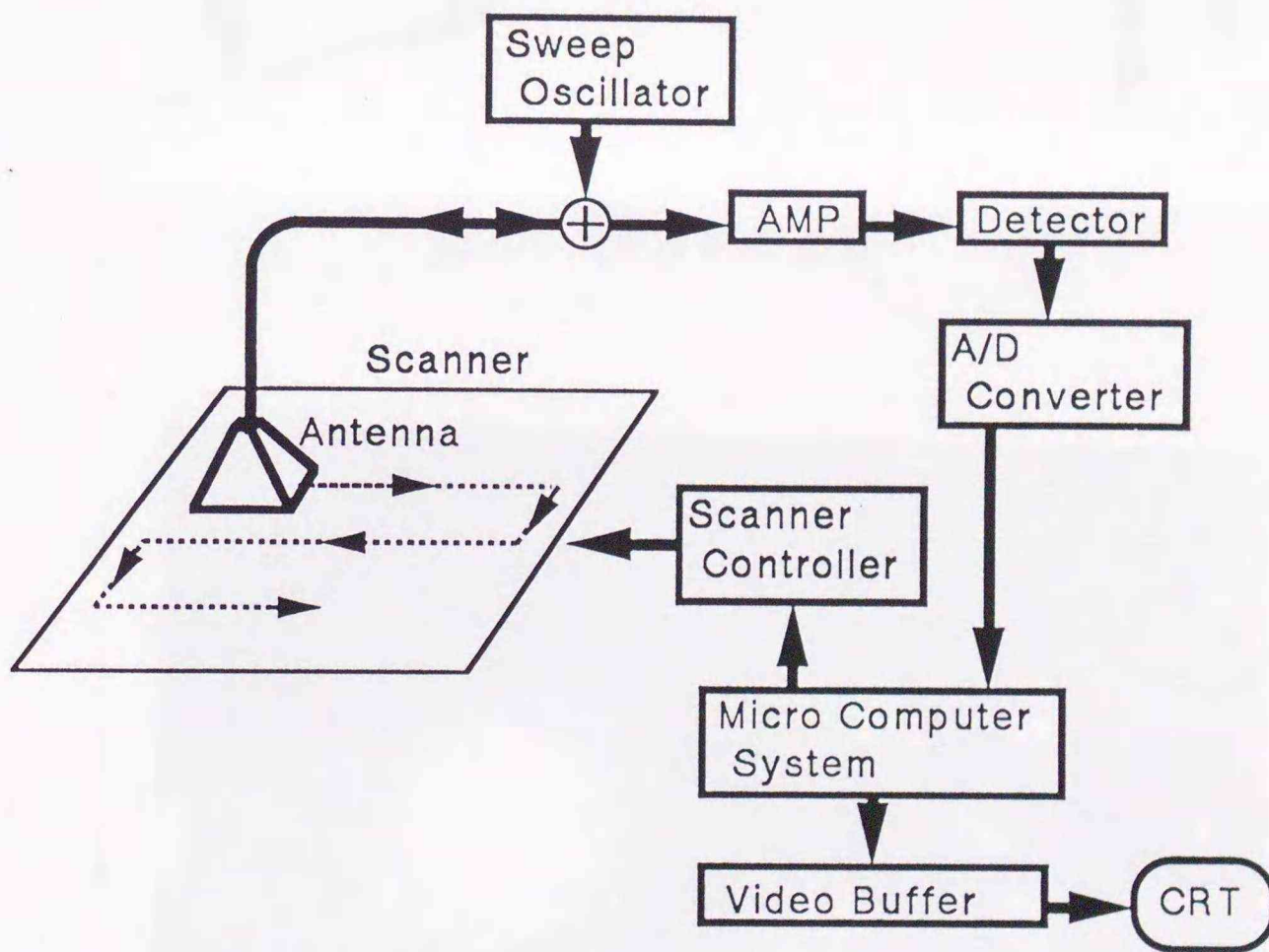


図 4.8: 雪中レーダシステムの構成図

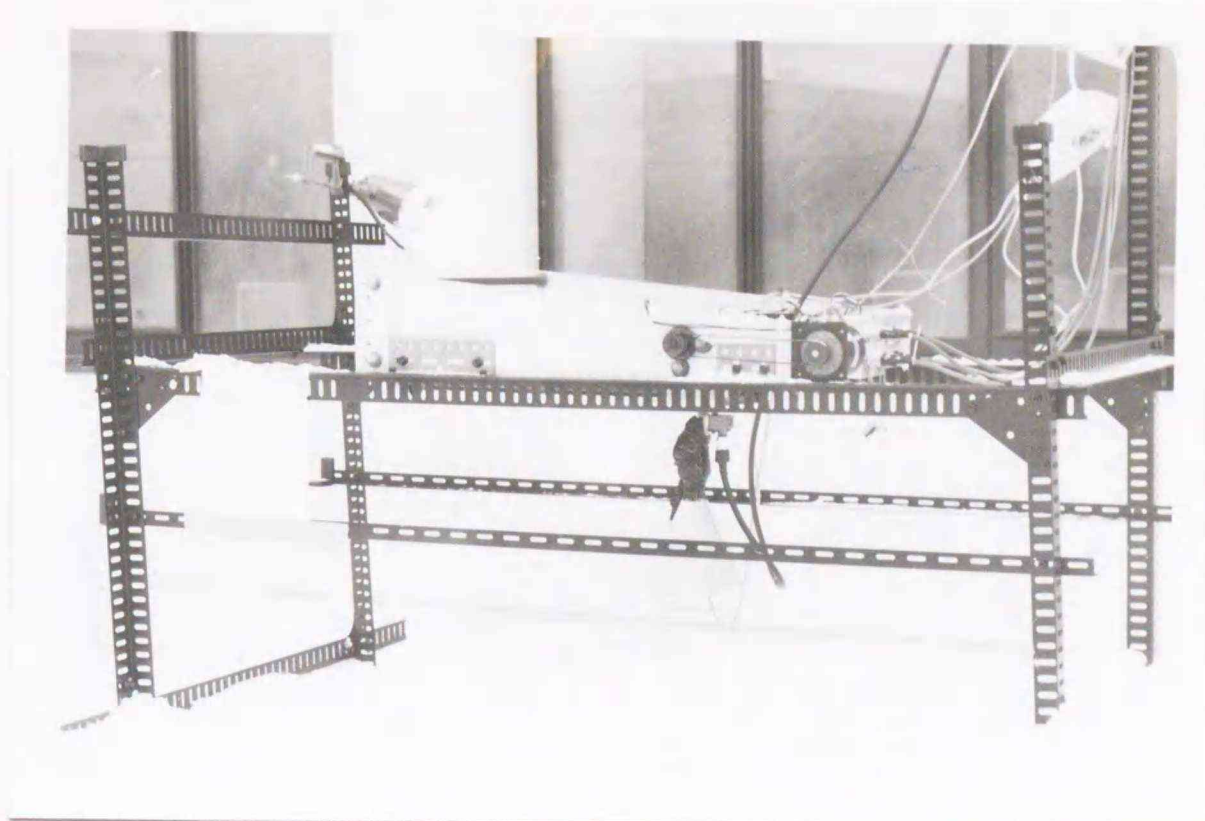


図 4.9: スキャナの全景

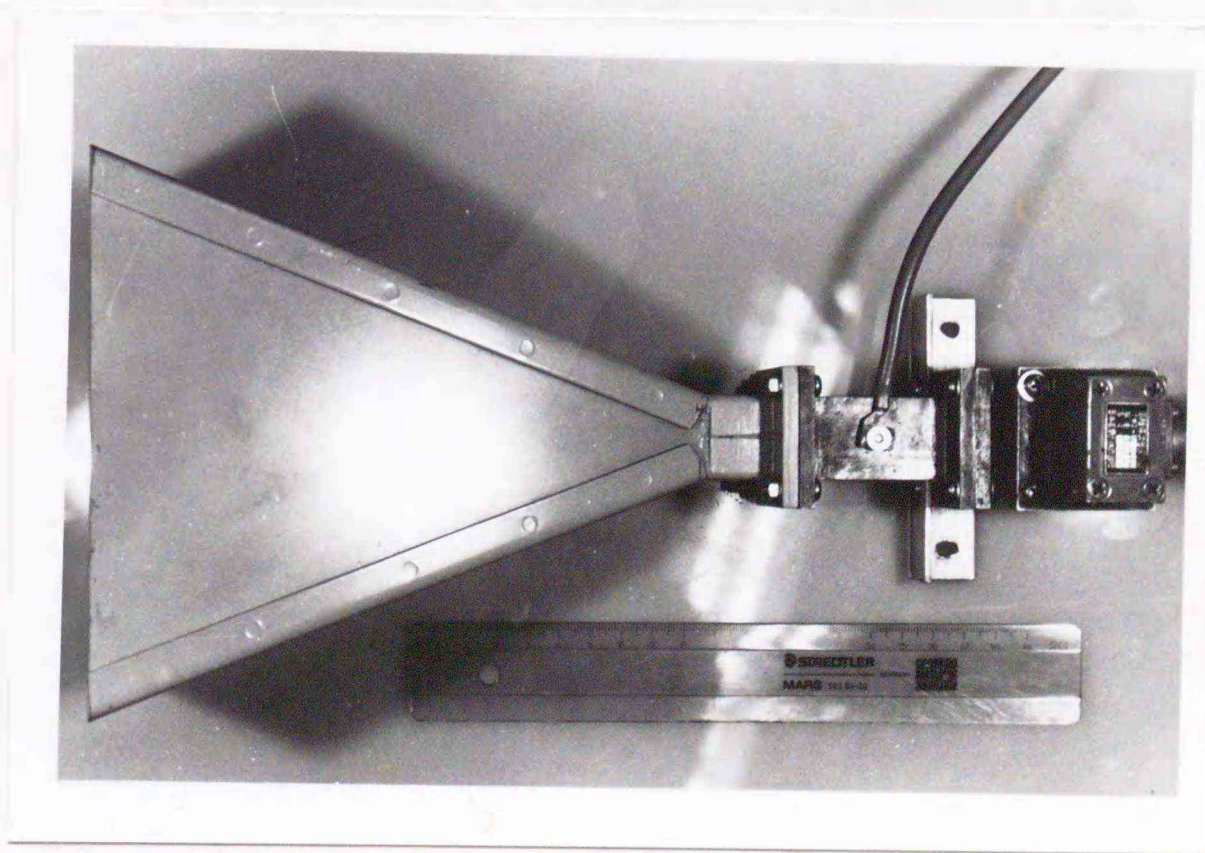


図 4.10: アンテナと検波部

表 4.1: 雪中レーダシステムの諸元

ホログラム開口面積	0.5×0.5m
方位方向サンプル数	32×32点
使用周波数	8.0～10.0GHz
中心周波数	9.0GHz
周波数方向サンプル数	32点
方位方向分解能	7.5cm
距離方向分解能	3.3cm

4.5.2 実験結果

実験は標的物体に飯ごうを用いて行った。標的物体に飯ごうを選択したのは、金属物体であり雪中レーダによる探査に有利であること、試作した雪中レーダのスキャナの探査範囲から適当な大きさであるためである。最初の実験の設定は、図4.11に示したようにホログラム面（アンテナの走査面）を積雪から0.6m上方とし、飯ごうをスキャナの探査範囲の中心から少しずれた位置の約30cmの深さの積雪中に埋めたものである。実験時に同時に測定した密度は、 0.10g/cm^3 であった。比誘電率 ϵ_r と乾いた積雪の密度 ρ の関係の近似式 $\epsilon_r = 1.0 + 2.3\rho$ から、実験に用いた積雪の比誘電率は1.23と推定した。

図4.13は、雪中レーダの受信データである。雪中レーダの受信データである多周波ホログラムに対して、周波数方向の1次元フーリエ逆変換（レンジ圧縮処理）を行った結果が、図4.14である。図4.14の上部が実部、下部が虚部のデータを表す。第12面と第13面が飯ごう、第7面と第8面が積雪の表面、そして第24面と第25面が地面に対応するものである。実際の雪中レーダのデータに対して像再生処理をおこなう場合、シミュレーションデータの処理に必要な各パラメータに加えてホログラム面と積雪の距離が必要である。この空気中の距離と、比誘電率によって変化する積雪中での見かけの距離の和をフレネル逆変換時に用いる距離とする。像再生処理プログラムでは、比誘電率を推定する方位方向のデータとして強度が最大の第12面を選択し処理を行った。図4.15は、比誘電率を0.05ステップで変化させ、結像の判定を行った結果であり、比誘電

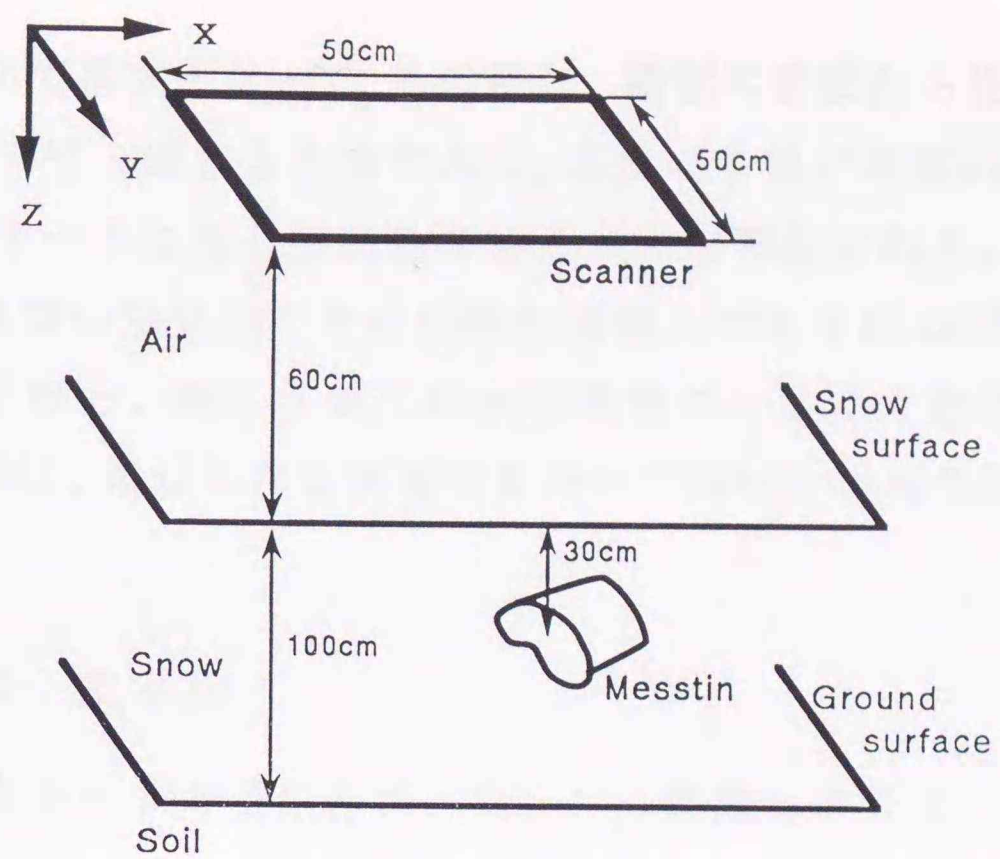


図 4.11: 実験配置図 (飯ごう 1 個)



図 4.12: 標的物体 (飯ごう)

率1.25で最大となった。この値は、積雪の密度から推定したものとほぼ一致するものであり、本章の手法が実際の雪中レーダのデータに対して有効であることが確認された。また、第8面までは空気中でそれ以降が積雪内であり第12面で比誘電率1.25から、飯ごうは約27cmの積雪中であると推定できる。図4.16は、推定した比誘電率を用いて処理した再生像である。

4.5.3 表示法

雪中レーダで再生される像は、各距離毎の2次元像つまり3次元像とみなせる。図4.16の各距離の2次元再生像から頭の中で3次元的な位置関係を把握するには熟練を要する。雪中レーダの再生像の表示法として、視線探索法を用いたものが適している。図4.17は、図4.16を視線探索法により表示したものである。図4.18に視線探索法の原理を示した。つまり、3次元のアドレスを持つボクセル空間に物体を格納し、観察したい位置にスクリーンを設定して各ピクセルから垂直に視線をのぼし、予め設定したしきい値を越える値のボクセルに到達するまで視線をのぼす。ピクセルの値は、到達したボクセル値と視線の長さによって決定される。この方法はハードウェア化に適しており、視線の探查距離に応じて明暗をつけることにより、単純で効果的に3次元形状を表示できる。この手法をハードウェアで高速に実現する、図4.19に示す3次元メモリシステムも試作されている。図4.17は図4.16の再生像を視点を変えながら表示したものの1つである。実際の表示は、



図 4.13: 受信データ (飯ごう 1 個)

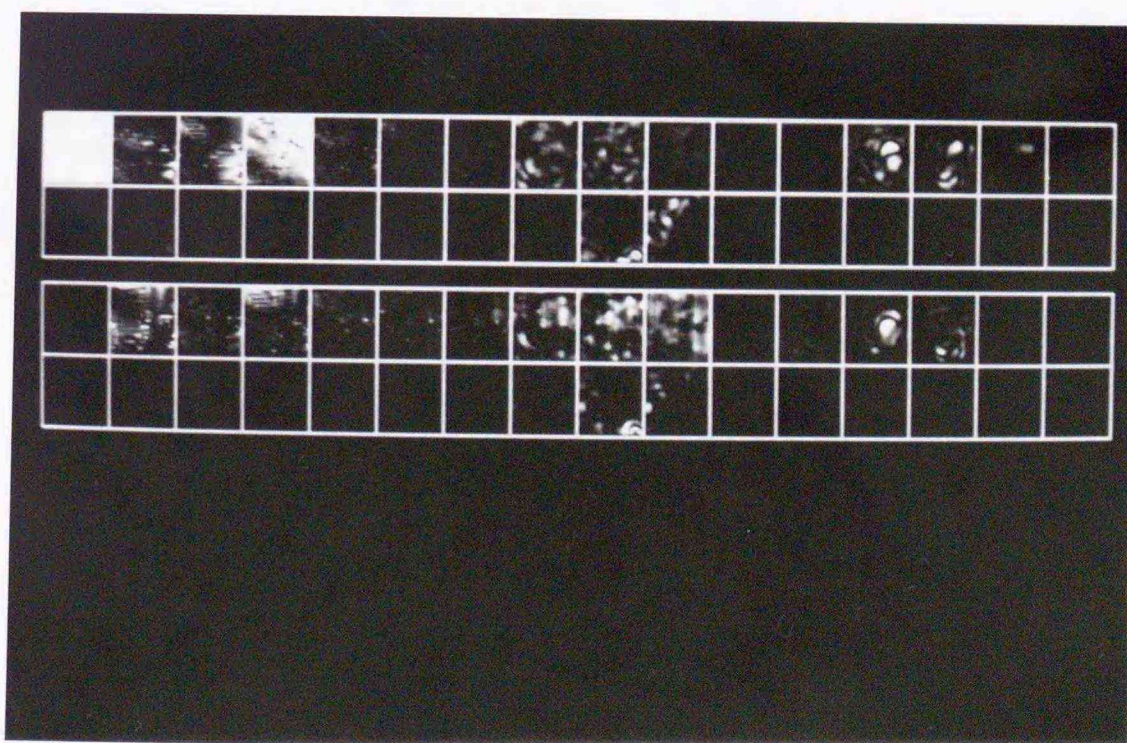


図 4.14: 周波数処理後のデータ (飯ごう 1 個)

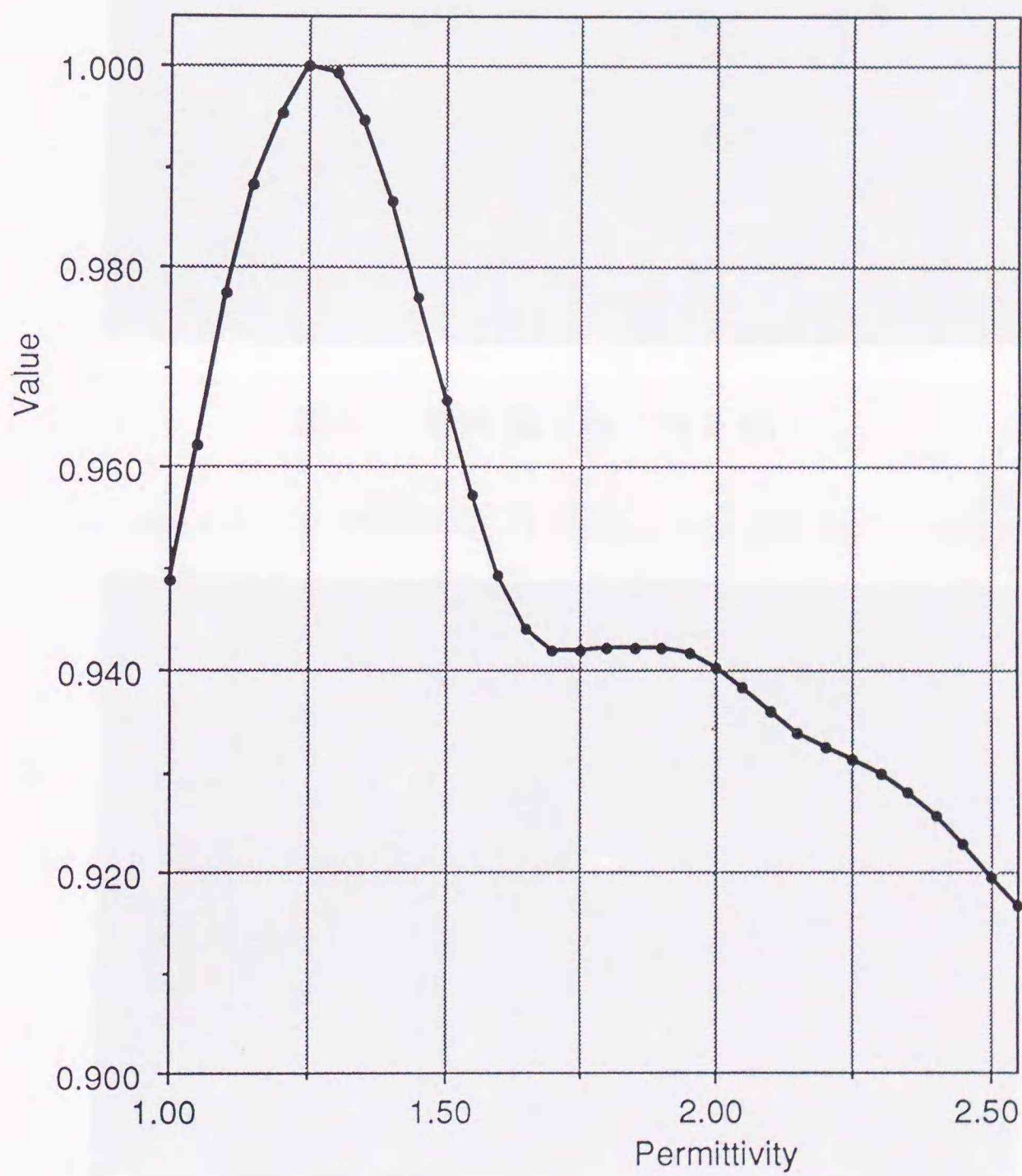


図 4.15: 実験データの比誘電率に対する結像の評価 (飯ごろ 1 個)

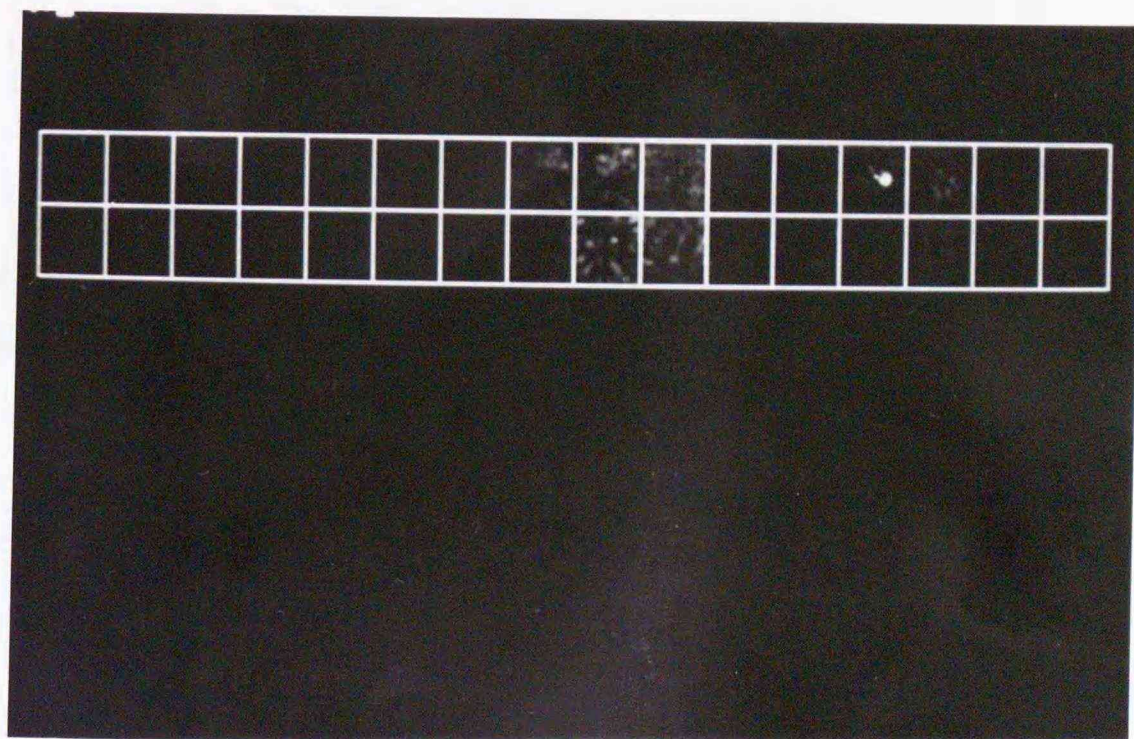


図 4.16: 再生像 (飯ごう 1 個)

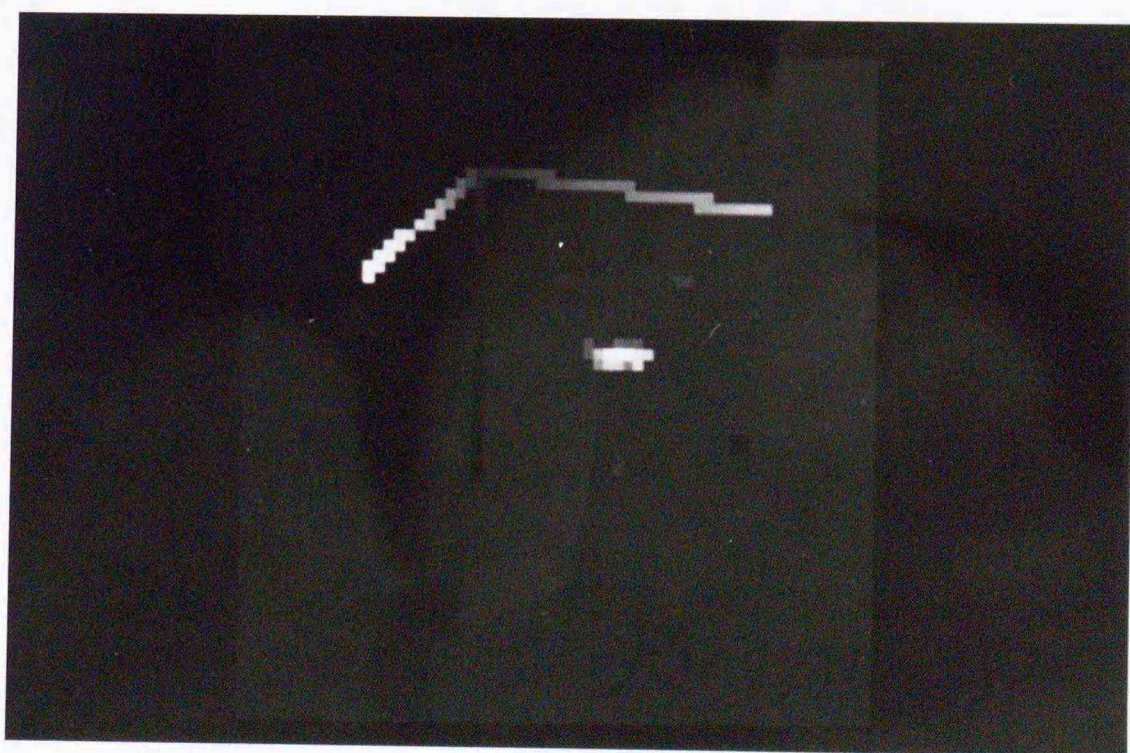


図 4.17: 視線探索法による再生像の表示 (飯ごう 1 個)

ディスプレイ上に図4.20に示したように、少しずつ視線の方向を回転させた多数の再生像をアニメーションのように連続的に切り替えて表示するものである。この表示法により、雪中レーダの再生像の3次元的な位置関係が容易に認識できる。

4.5.4 実験結果（複雑な形状物体の検出）

第4.5.2節の実験は、比較的単純な小物体である飯ごうによるものであった。また、積雪も密度が 0.10g/cm^3 とほぼ新雪に相当するものであり、雪中レーダによる探査実験の条件としてはかなり良いものであった。ここでは、標的物体が複雑になったり、積雪の密度が高くなった場合の実験結果について述べる。

まず、飯ごうを2個用いた実験を行った。第4.5.2節の実験に、約 50cm の深さにもう1個の飯ごうを加えた設定である。積雪も上から押しつぶし、密度を 0.25g/cm^3 にした。この積雪の密度から、比誘電率を1.58と推定した。図4.22に示した周波数方向処理後のデータの第13面を積雪中の最大強度の面として自動選択し、再生像の結像の評価を行った図4.23から比誘電率は1.55と推定した。図4.24は、この値を用いて再生処理した結果である。第13面と第16面にそれぞれの飯ごうが認められるが、それぞれの深さは約 30cm と約 48cm であると推定された。雪中レーダの開発目的の1つに、雪崩等で雪に埋まった人間の捜索がある。試作した雪中レーダのスキャナの捜査範囲が狭く（ $50 \times 50\text{cm}$ ）、全身の検出は困難であるため下半身による実験を行った。実験は図4.26に示すように、スキャナの探査範

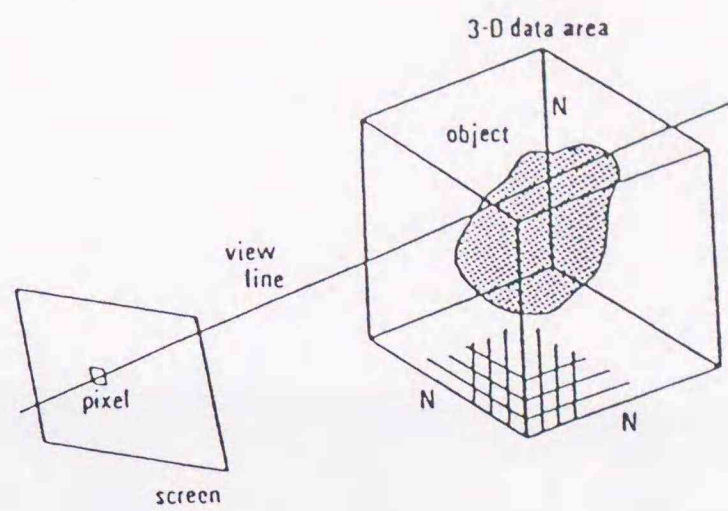


図 4.18: 視線探索法

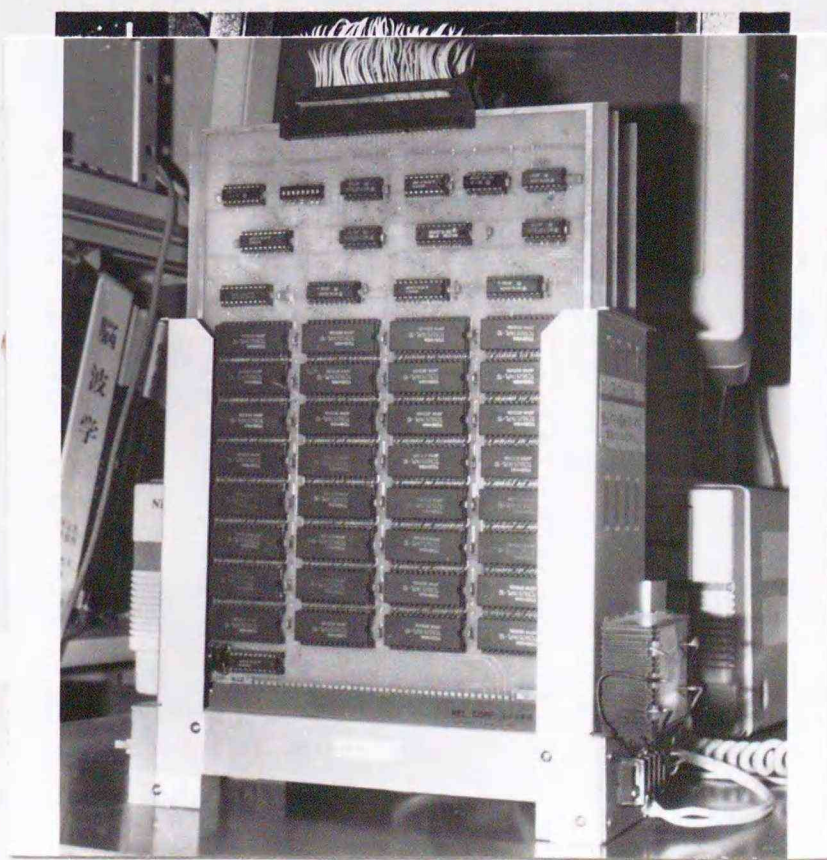


図 4.19: 3次元メモリシステム

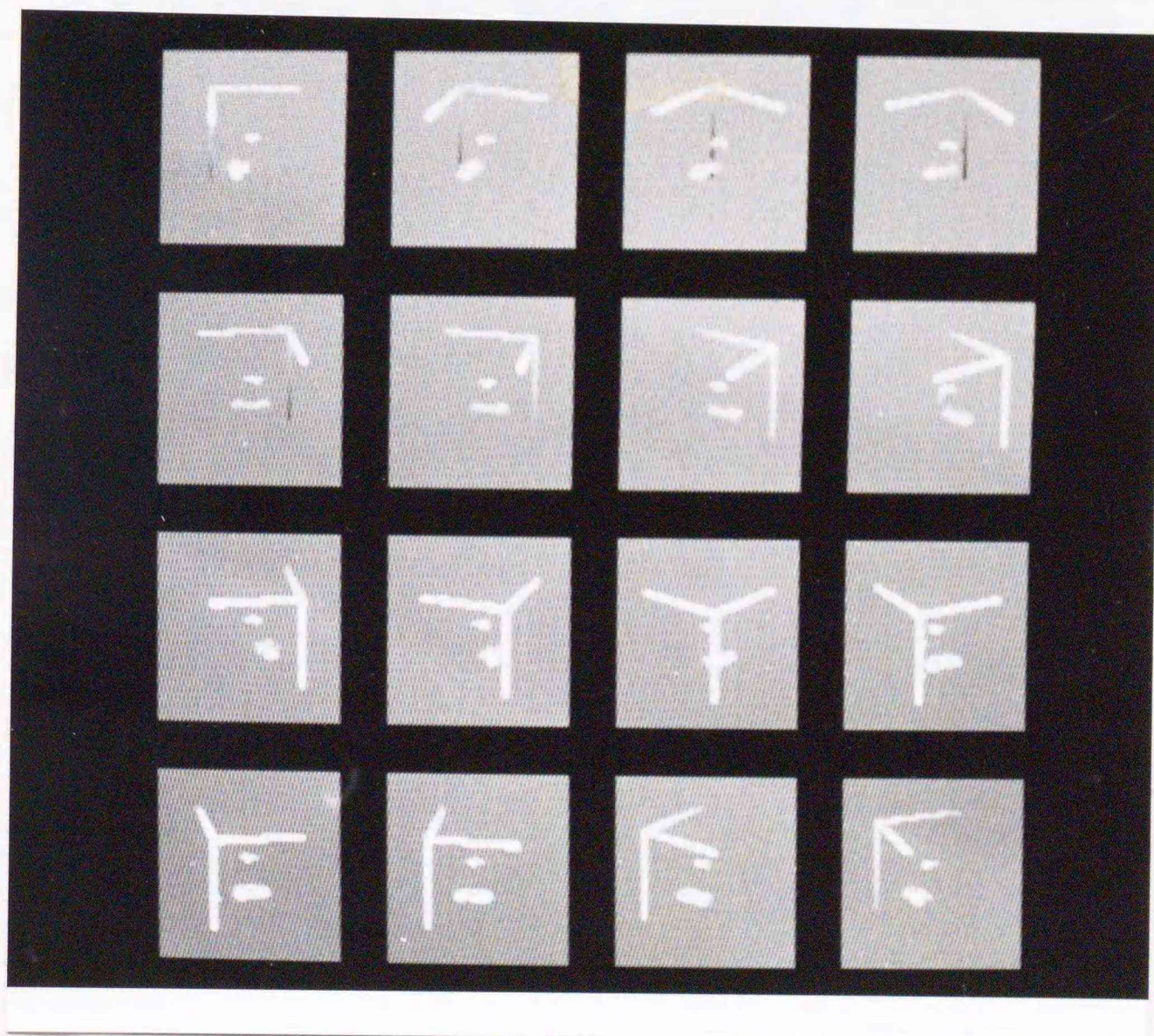


図 4.20: 各方向から見た再生像 (長短 2 本の管)



図 4.21: 受信データ (飯ごう 2 個)

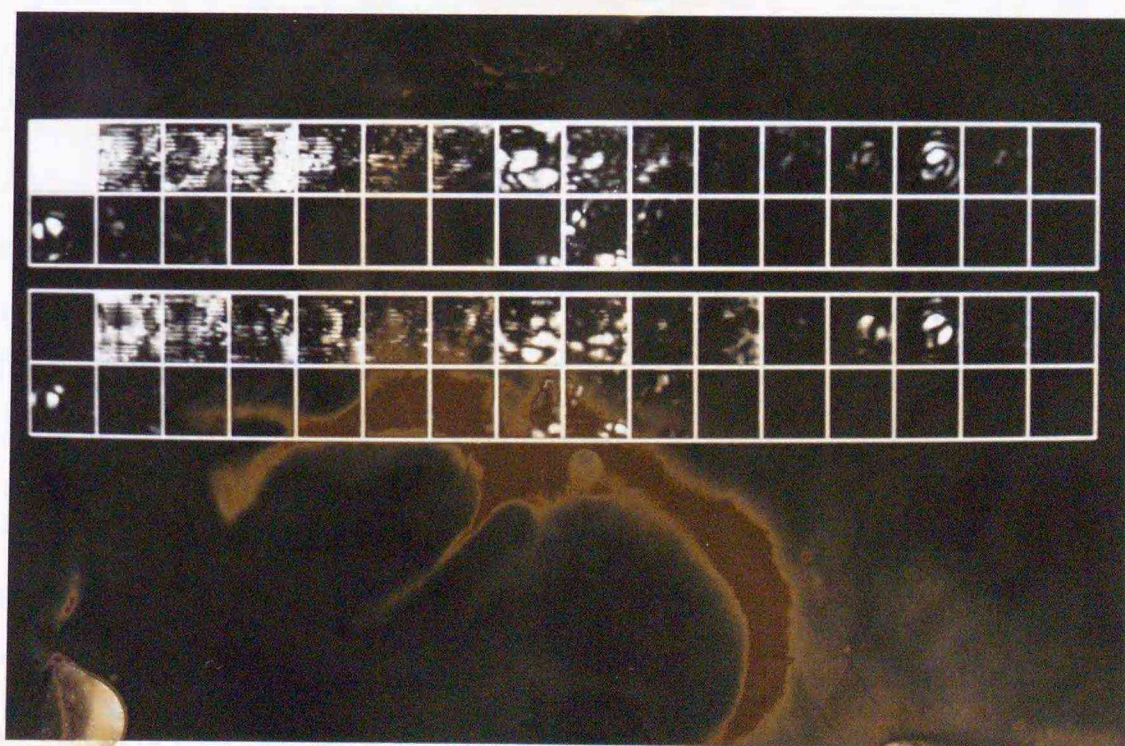


図 4.22: 周波数処理後のデータ (飯ごう 2 個)

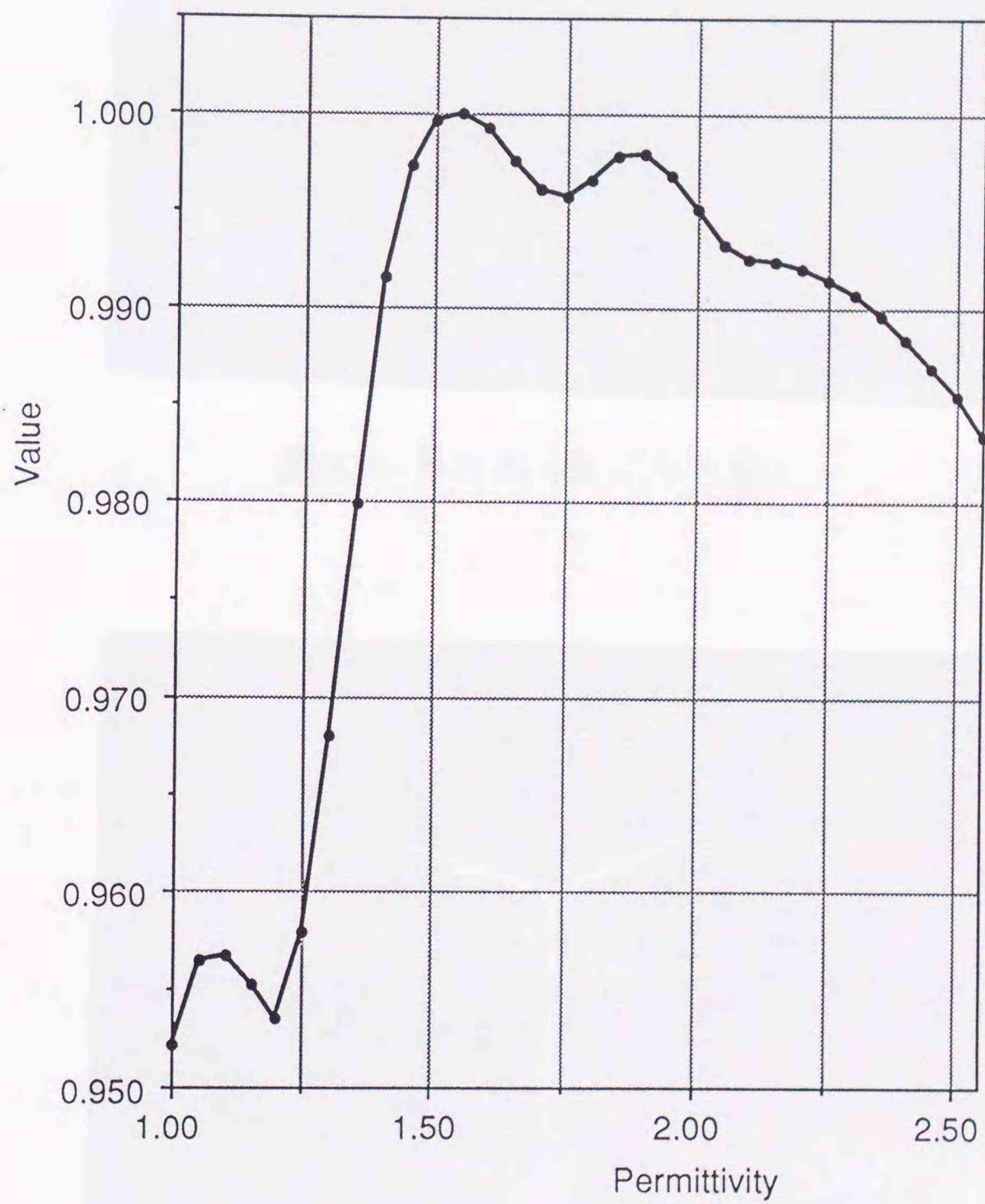


図 4.23: 実験データの比誘電率に対する結像の評価 (飯ごろ 2 個)

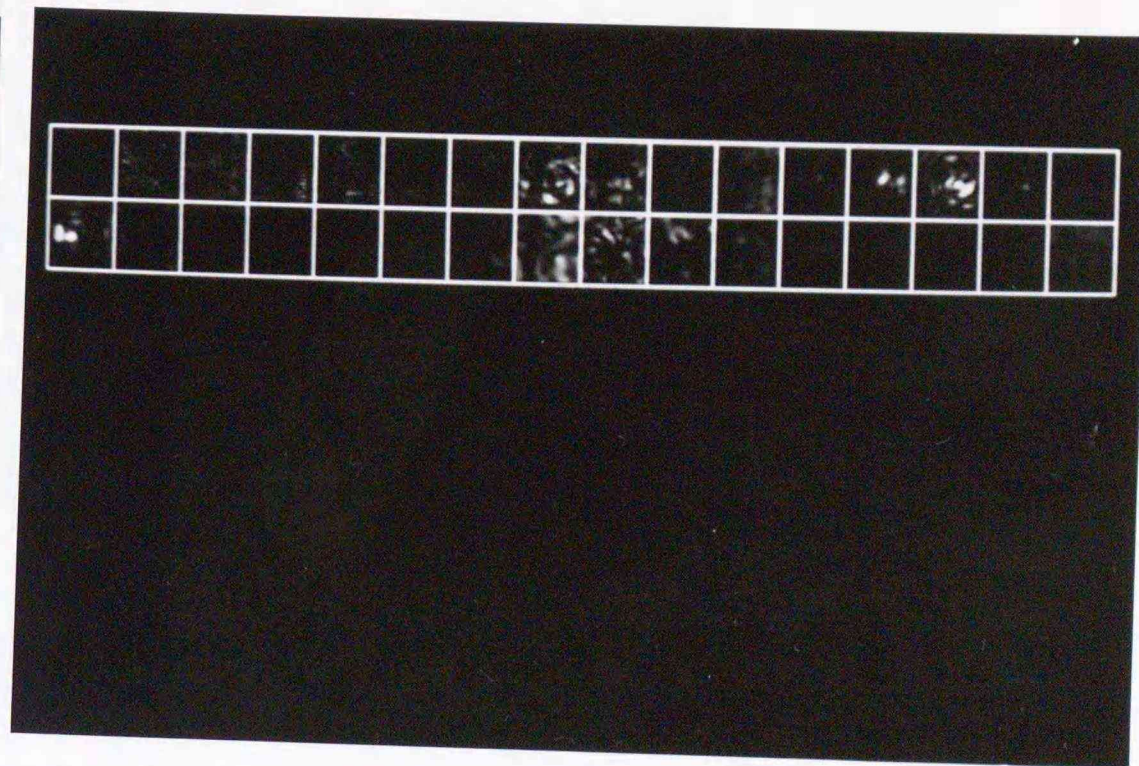


図 4.24: 再生像 (飯ごう 2 個)

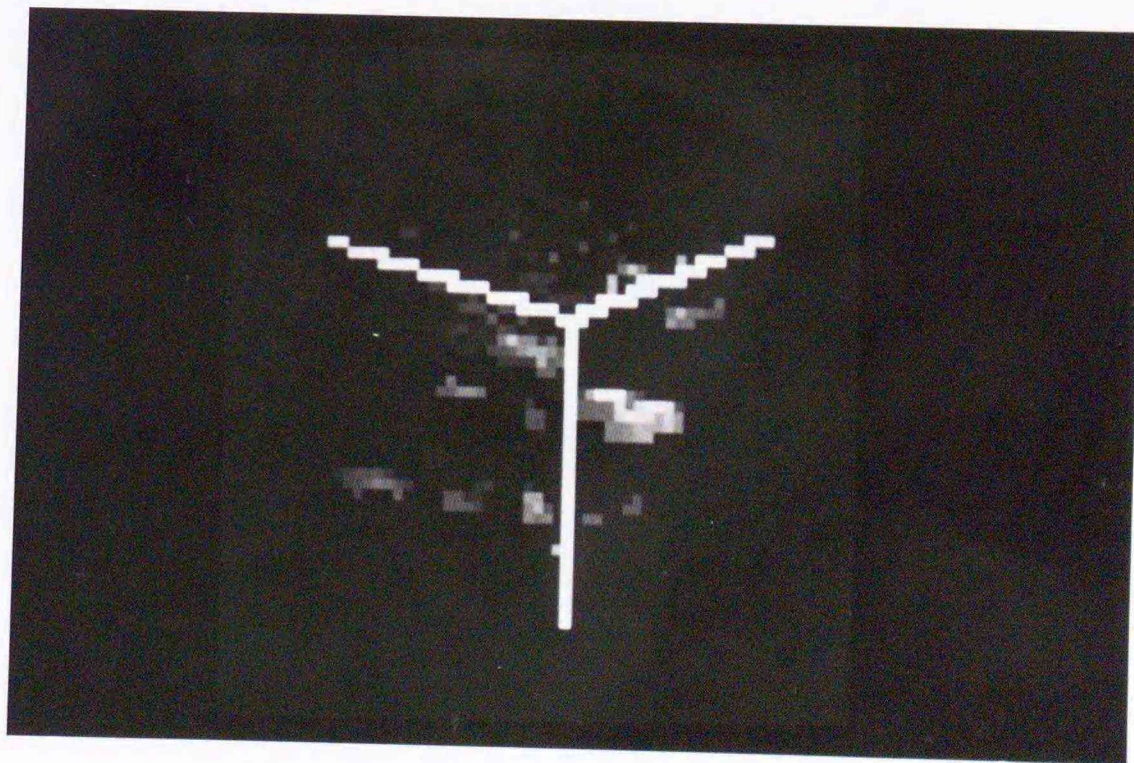


図 4.25: 視線探索法による再生像の表示 (飯ごう 2 個)

囲に足を入れる横穴を掘り、その中にもぐり込み隙間を雪で埋めて行った。積雪表面からの深さは、約40cmである。積雪は、可能な限り押し固め、手で穴を掘るのが困難なほどの密度である 0.45g/cm^3 とした。この積雪の密度から、比誘電率を2.04と推定した。図4.28に示した周波数方向処理後のデータの第15面を積雪中の最大強度の面として自動選択し、再生像の結像の評価を行った図4.29から比誘電率は2.05と推定した。図4.30は、この値を用いて再生処理した結果である。第15面に足の像が認められるが、その深さは約37cmと推定された。再生像はあまりはっきりしたものではないが、これは積雪の状態が雪中レーダの探査には良くなかった事と、探査中に被験者が若干でも動いた事などによると推定する。

4.6 むすび

雪中レーダの像再生に必要な積雪の比誘電率の値を多周波ホログラフィ法の観点から積雪がマイクロ波の伝搬に与える影響を解析し、自動推定する方法を示した。また、その有効性を実際の雪中レーダのデータを処理することで確認した。本手法を用いることにより、積雪の比誘電率が未知の雪中レーダのデータから像再生ができるようになり、雪中レーダの実用化に寄与するところ大きい。

ところで、自然の積雪は降った時期によって層状になっており、さらに同層内でも下部と上部では自重によって密度が異なり、積雪内で均一の比誘電率を持つことは一般にない。そのような場合、本章の手法では比誘電率の推定に使用した距

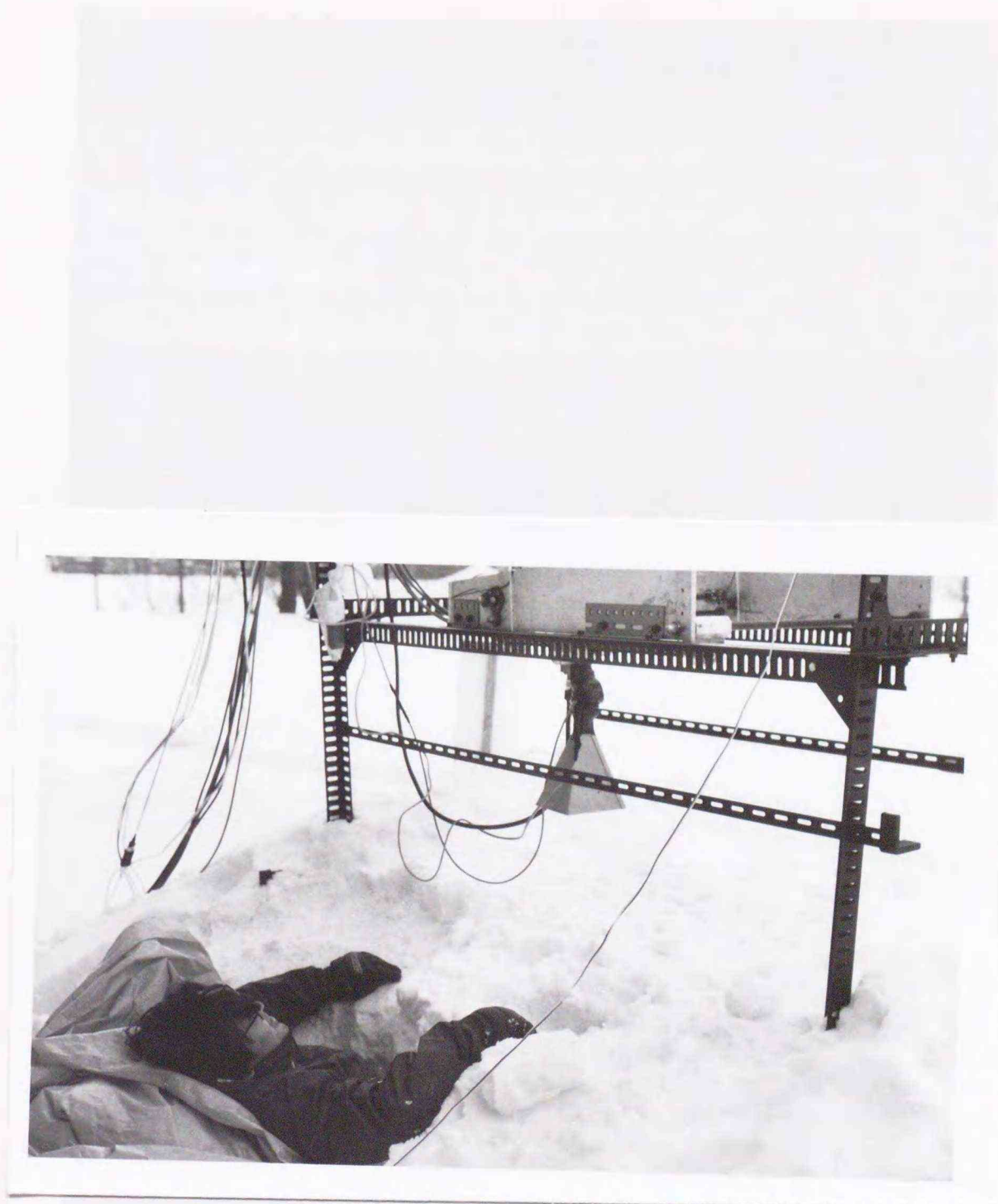


図 4.26: 実験風景 (人体)



図 4.27: 受信データ (人体)

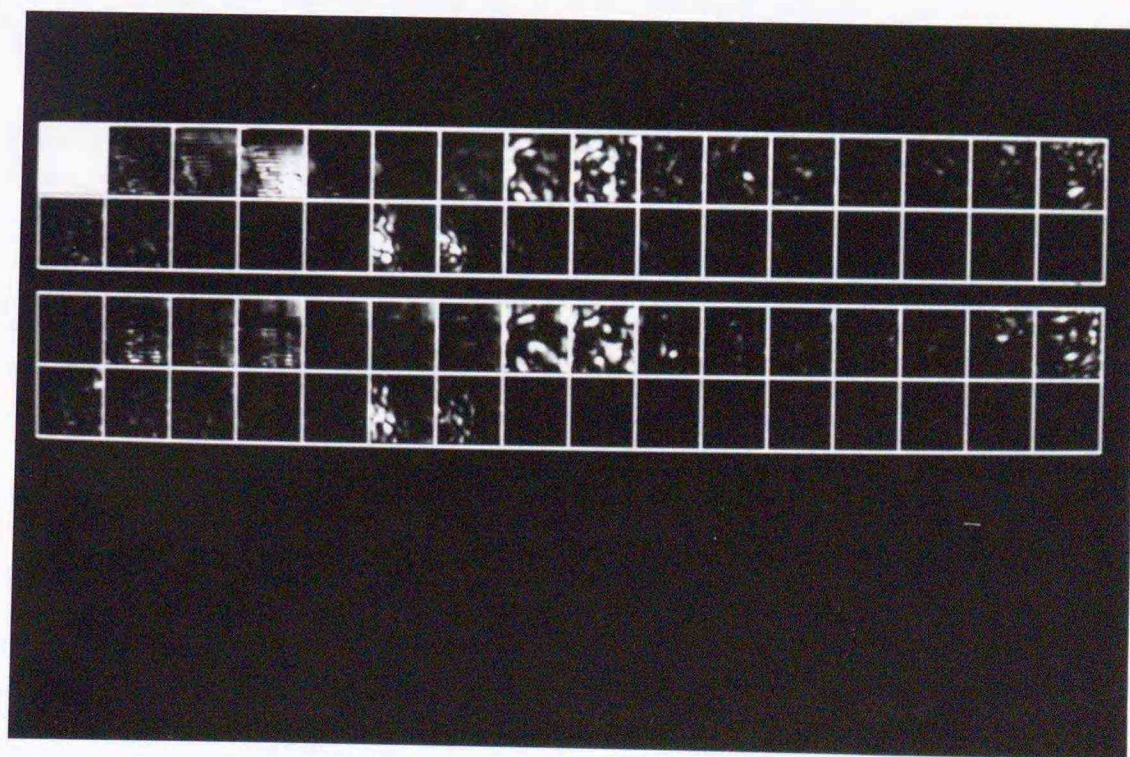


図 4.28: 周波数処理後のデータ (人体)

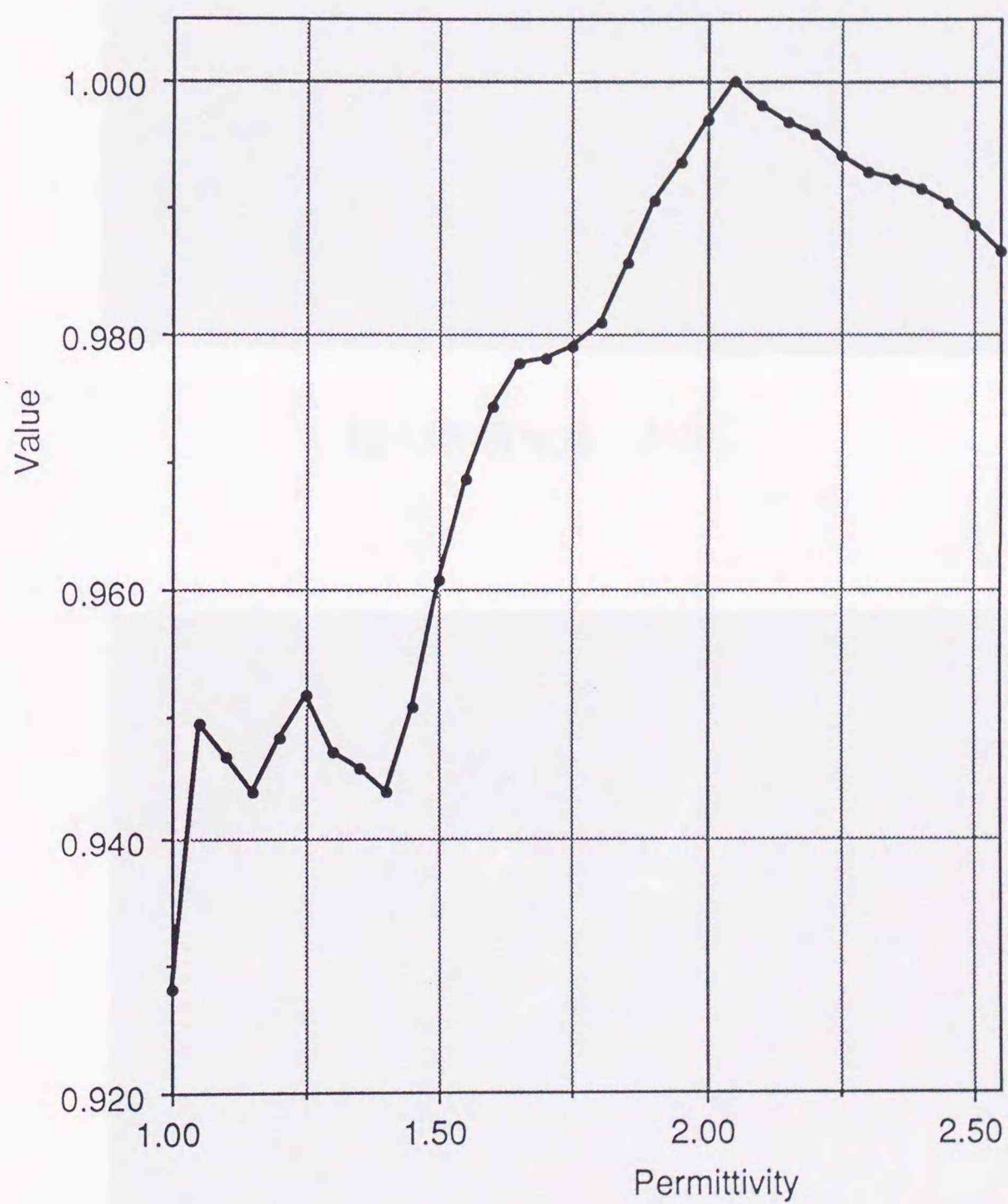


図 4.29: 実験データの比誘電率に対する結像の評価 (人体)

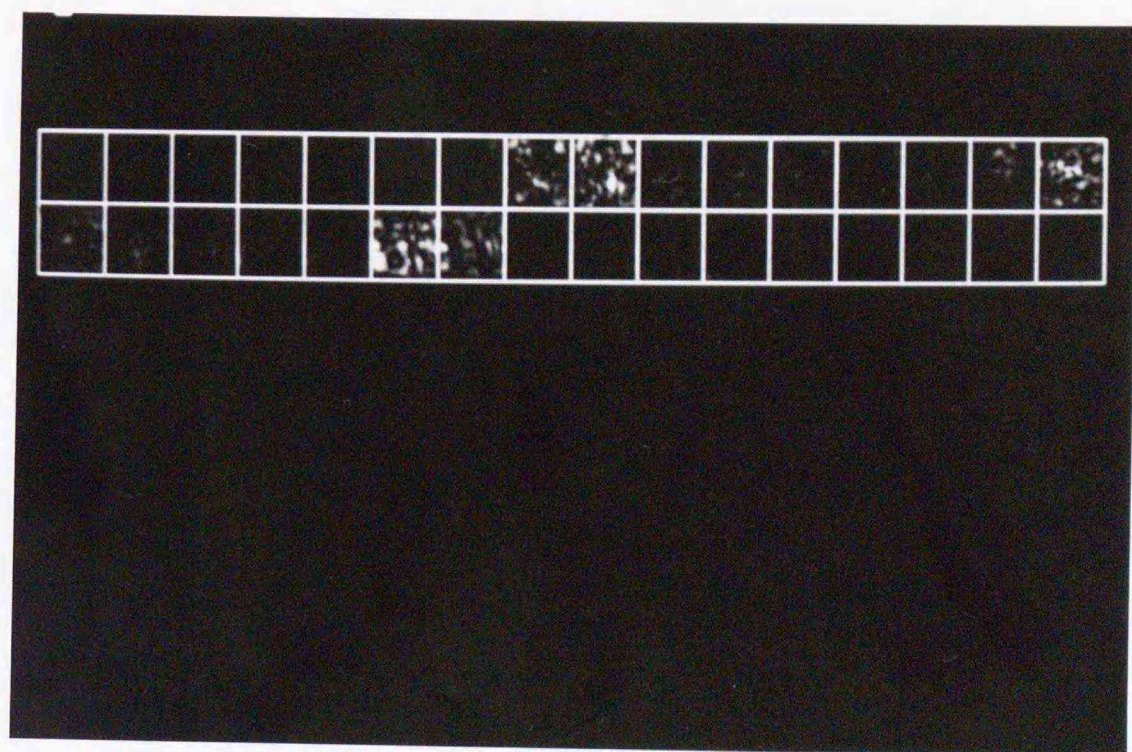


図 4.30: 再生像 (人体)

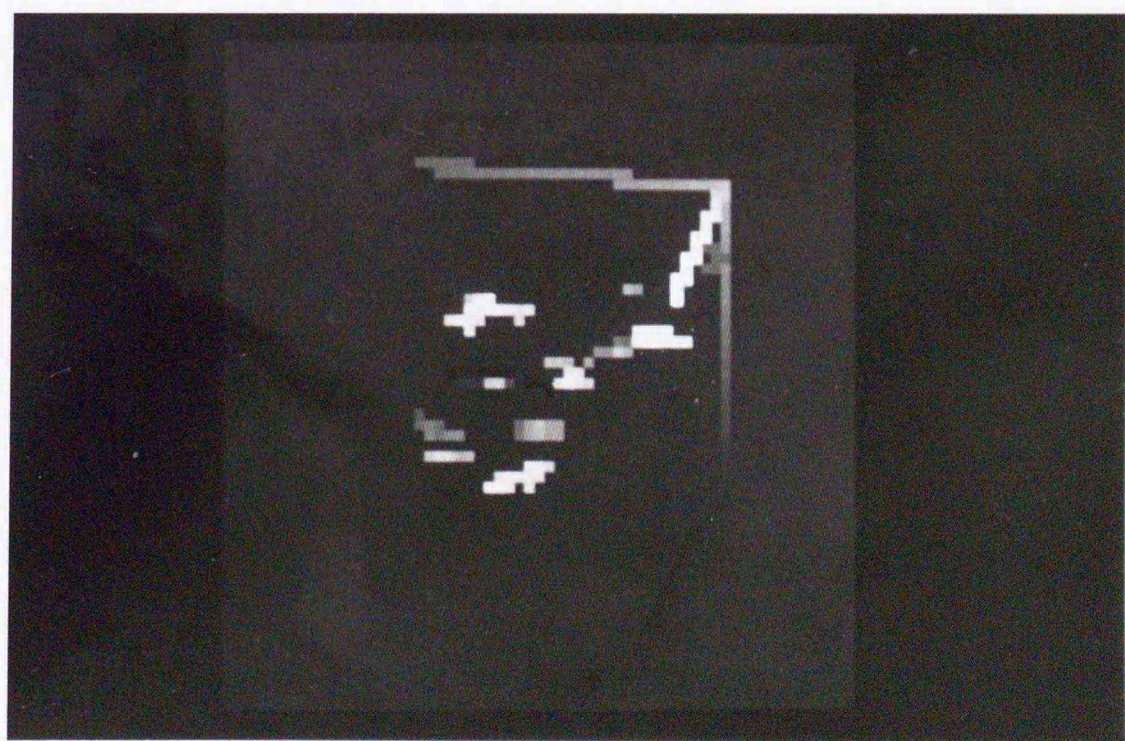


図 4.31: 視線探索法による再生像の表示 (人体)

離までの平均値として求められる。物体がある距離に集中している場合、たとえば本章の2個の飯ごうを用いた実験程度では、このことは像再生において障害にはならない。しかし、距離が大きく異なる複数の物体の場合は、物体の距離毎に比誘電率の推定を行う必要が生じる。

また、雪中レーダにおいては当初からの懸案であった人体の検出実験を行った。スキャナの制約で全身像の検出はできなかったが、雪中レーダで人体の検出が可能であることが明らかになった。

第 5 章

総括

本論文は、積雪内に埋没している物体を探索し映像化する雪中レーダに対して、高速化と雪中レーダのデータの特性に着目した像再生処理における自動化に関して述べたものである。本文中で述べてきたように所期の性能実現のため、雪中レーダでは基本原理を多周波ホログラフィ法としている。そのため、データ収集や像再生処理にある程度の時間が必要になることは、原理上避けられない。それを実現可能な範囲で、できる限りの高速化をはかったシステムを考案し、試作を行った。また、収集するデータである多周波ホログラムの特性を解析することで得られた、積雪の比誘電率推定による自動像再生法を提案した。本論文を総括するにあたり、まず各章の内容と結果を簡単にまとめる。

第 1 章は序論であり、本論文の研究が行われるに至った背景と目的を述べ、全体の概要と構成を示している。

第 2 章は、雪中レーダの基本原理として多周波ホログラフィ

法を用いている理由について述べている。不可視情報の映像化においては、原理が単純で実用性も高いことからパルスエコー法を用いたものが多く研究され、実用化されている。しかし、単純なパルスエコー法では分解能の点で問題があるため、等価的に開口幅の小さいアンテナで開口幅の大きなアンテナの性能を達成する合成開口法の適用により、分解能を上げているものもある。一方、ホログラフィは光学の分野で開発されたものであるが、波長の長い超音波や電波を用いた長波長ホログラフィと呼ばれる技術も研究されている。解釈の仕方によっては、ホログラフィと合成開口の原理は相似のものである。つまり、単純なパルスエコー法では使用されない位相情報を有効に使い、データ収集後に適当な処理を行う事で分解能を高めようとするものである。

雪中レーダでは、単一周波数のホログラムからの情報では、その分解能が方位方向に比べ距離方向（積雪の深さ方向）がかなり劣ったものになるため、複数の周波数でホログラムを収集する、多周波ホログラフィ法を用いている。つまり、各周波数での位相回転により距離方向の情報を得るものである。この手法により、雪中レーダでは方位方向、距離方向とも2波長強程度の高い分解能を実現している。

第3章は、雪中レーダを高速化するため回転型アンテナアレーやDSPシステムを用いたシステムの構成と試作について述べている。雪中レーダのようなホログラフィックレーダでは、標的物体の形状情報を空間的な広がりの中から収集す

る必要がある。多数のアンテナ素子を面状に並べることが可能であると、データ収集時間の面では理想的であるが、実際には膨大な数のアンテナ素子が必要となり、技術的・経済的に実現が困難である。そこで、1次元のアンテナアレーを用いてホログラムを収集するシステムが現実的である。アンテナアレーに対して垂直方向に移動するシステムが単純であるが、ここでは回転させてデータを収集する回転型アンテナアレーを開発した。回転型の場合、垂直方向に移動するタイプに比べアンテナ素子が半分になり、スキャナの駆動系が単純であるため小型化がはかれる。回転型に対応するため円偏波を用い、アンテナ素子をヘリカルアンテナとし、参照波にDSB変調をかけている。

また、収集した多周波ホログラムから物体像を映像として再生するためには、フーリエ変換やフレネル変換等のかなりの量の演算処理が必要である。これを汎用のマイクロコンピュータシステムで行うと、かなりの演算時間を要し、理想とする実時間処理とはほど遠くなる。そこで、ここ数年急速に進んだLSI技術の賜物であるDSPを雪中レーダシステムの像再生処理に用いる事で高速化をはかった。この効果は大きく、データ転送やデータの配置等を用いたDSPシステムに適応した形式に変換するなど多くの無駄な部分を含みながらも、100倍程度の高速化が実現できた。

第4章は、雪中レーダの像再生処理において必要な積雪の比誘電率の値を、収集したデータから自動推定し、像再生処

理を行う方法について述べている。雪中レーダの探査で用いている電波は、積雪中では伝搬速度が遅くなる。積雪中では、およそその積雪の比誘電率の平方根の逆数に比例して遅くなる。つまり、積雪中では電波の波長が短くなるため、積雪の比誘電率が不明であると正しい像再生処理ができない。従来は、積雪の密度を測定し比誘電率を推定していた。雪中レーダの探査で得られる、多周波ホログラムの積雪の比誘電率の変化に対する特性を解析したところ、方位方向と距離方向では距離パラメータに関し逆方向の変化をすることが明らかになった。この特性を応用することにより、収集したデータから積雪の比誘電率を自動推定する手法を考案し、実験データを処理してその有効性を示した。さらに、雪中レーダの研究では当初からその実現が望まれていた、人体の検出の実験も行った。

第5章では、本論文の内容を総括し、研究成果を要約して述べている。

本論文では、雪中レーダによる積雪内の物体の映像化までの過程において、多周波ホログラフィ法という原理からある程度の時間を要するが、これをできる限り実時間処理に近づけたいという要求から、高速化を目的としたデータ収集系と像再生処理系のシステム構築を行った。その結果、データ収集から像再生まで2分以下とかなりの高速化が達成された。しかし、データ収集系に関しては、実用化のためにはより広範囲のデータ収集が1度に可能なものが望ましい。この点に

関しては、広範囲のデータ収集方法の検討が今後の雪中レーダの課題として残されている。像再生処理に関しては、DSPなどのデジタル信号処理技術のより一層の進歩により高速に可能になるであろうことが示された。また、雪中レーダのデータのみから積雪の比誘電率を測定する手法により、雪中レーダによる探査とは別に行っていた積雪の比誘電率の測定が必要なくなり、探査の効率化がはかれるであろう。

日本列島は南北に長く、雪がほとんど降らない地方がある一方で半年近くが降雪期であったり、積雪が数メートルにおよぶ地方もある。そのような積雪地方では、単なる興味で積雪中の物体を見たいという願望だけではなく、生活上での安全を確保するためにも、本論文で述べている雪中レーダのような装置の実用化が望まれている。本論文の研究内容が、少しでも実用化に寄与できれば幸いである。

謝辞

本論文は、昭和63年4月から平成4年12月まで、筆者が北海道大学大学院工学研究科電気工学専攻修士、同大学院情報工学専攻博士両過程に在籍期間に北海道大学工学部情報工学科応用計算機工学講座において行われた研究、実験の成果をまとめたものである。この期間を通じ、北海道大学工学部情報工学科青木由直教授には、研究の方針、実験結果の検討、あるいは学会発表の準備等、あらゆる面において終始御指導、御鞭撻をいただき深く感謝いたします。

本研究の遂行にあたり、博士過程在籍当時から現在に至るまで、有益な御指導、御助言をいただいた、本講座坂本雄児助手に深く感謝いたします。また、筆者が本研究を進めるにあたり、ゼミナール等を通じ御指導、御助言をいただいた、本講座川嶋稔夫助教授、山本強助教授（現北海道大学大型計算機センター）、恩田邦夫助手（現北海道職業訓練短期大学校）に深く感謝いたします。

当講座の院生の方々には実験、研究を続ける上で色々と御協力をいただいた。特に、横路浩明氏（現三菱電機）、石川貴之

氏（現日立製作所）、佐藤智之氏（現ソニー）には大学院在学中、貴重な御助言、御協力をいただき、お礼申し上げます。

本研究の一部は、文部省科学研究費（試験研究(2)課題番号61850065）、（財）セコム科学技術振興財団及び、文部省重点領域研究（01646009）の援助を受けて行ったものである。

本論文は、これら各位の多大な御指導と御協力によってはじめて完成させることができたものであり、ここに改めて深くお礼申し上げます。

参考文献

第 1 章に関する参考文献

- [1] 坂本、高橋、飯島、青木: "多周波ホログラフィ法を用いた雪中レーダ"、信学論(B)、J68-B, No. 5, pp. 602-608 (昭60-5)
- [2] 坂本、田尻、澤井、青木: "多周波ホログラフィー法を用いた積雪埋没物体の3次元形状の検出"、信学論(B)、J70-B, No. 12, pp. 1544-1550 (昭62-12)
- [3] Sakamoto Y., Tajiri K., Sawai T. and Aoki Y.: "Three-Dimensional Imaging of Objects in Accumulated Snow Using Multifrequency Holography", IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing, 26, 4, pp. 430-436(July 1988)
- [4] 古濱、岡本、増子: "人工衛星によるマイクロ波リモートセンシング"、電子通信学会(昭61)
- [5] 上野、大隅: "波動による地中物体のイメージング"、電子通信学会誌、Vol. 69, No. 9, pp. 959-968(1986)

- [6] 荒井、鈴木: "地中レーダシステム"、信学論(B)、J66-B, No. 6, pp. 713-720(1983)

第2章に関する参考文献

- [7] 永井: "超音波ホログラフィー開口合成による映像"、日刊工業新聞社(平1)
- [8] 吉田: "レーダ技術"、電子通信学会(昭59)
- [9] テレビジョン学会編: "不可視情報の画像化"、(株)昭晃堂(昭54)
- [10] J.W.Goodman: "Introduction to Fourier Optics", McGRAW-HILL (1968)
- [11] D.Gabor: "A New Microscopic Principle", Nature, 161, May 15, pp. 777 (1948)
- [12] E.N.Leith, J.Upatnieks: "Reconstructed Wavefront and Communication Theory", JOSA, Vol. 52, No. 10, pp. 1123 (1962)
- [13] 松尾、山根: "レーダホログラフィ"、電子通信学会(昭55)
- [14] S.A.Hovanessian: "Introduction to Synthetic Array and Imaging Radars", Hughes Aircraft Company and the University of California (1980)

- [15] 山口、三本、川上、仙石、阿部:”合成開口FM-CWレーダによる物体の検出”、信学論(B-II)、J74-B-II, No. 7, pp. 413-420 (1991-07)
- [16] 鈴木:”雪氷電波・光工学”、(株)昭晃堂(昭62)

第3章に関する参考文献

- [17] 三橋、横路、石川、青木:”雪中レーダのアンテナアレー化”、信学論(B-II)、J73-B-II, No. 4, pp. 205-213 (1990-04)
- [18] 青木:”波動信号処理”、(株)森北出版(昭61)
- [19] 電子情報通信学会編:”ディジタル信号処理”、(昭50)
- [20] 青木:”BASIC数値計算法”、(株)コロナ社(昭59)
- [21] 青木、石塚:”数値的2次元フレネル変換法”、信学論(B)、J57-B, No. 8, pp. 511-518 (昭49-08)
- [22] 青木、鈴木、石塚:”長波長ホログラムからの数値的像再生法” 信学論(C)、J58-C, No. 2, pp. 71-78 (昭50-02)
- [23] 雨宮、小柴、植田:”発振・変復調回路の考え方”、(株)オーム社(昭54)

第4章に関する参考文献

- [24] 三橋、青木: "積雪の比誘電率推定による雪中レーダの像再生法"、信学論 (B-II), J75-B-II, No. 8, pp.580-587 (1992-08)
- [25] F.T.Ulaby and W.H.Stiles: "Microwave response of snow", Adv.Space Des., 1(10), pp. 131-149(1981)
- [26] Yoshino T.: "The reflection properties of radio wave on the ice cap", IEEE Trans. Antennas & Propag., AP-15, 4, pp. 542-551(July 1967)
- [27] 三本、山口、仙石、阿部: "合成開口法をもちいた雪中埋設物の探査", 信学技報, A-P91-72 (1991-09)
- [28] 田尻、坂本、青木: "近接領域におけるレンジカーバチャ補正を用いた多周波ホログラフィ", 信学論 (B), J70-B, 3, pp. 396-402(昭 62-03)
- [29] W.A.Cumming: "The Dielectric Properties of Ice and Snow at 3.2 Centimeters", Jour.of AppliedPhys., 23-7, pp. 768-773(1952)
- [30] 高橋、坂本、青木: "雪中レーダシステムのための3次元データ表示手法", 信学論 (D), J71-D, 10, pp. 2002-2009(昭 63-10)
- [31] Sato T.,Mitsubishi R. and Aoki Y.: "Development of 3D-Data Display System Based on Voxel Space", 4th SSICCA, pp. 207-210(1990).

研究業績一覧

論文

1. 三橋龍一, 横路浩明, 石川貴之, 青木由直

”雪中レーダのアンテナアレー化”

電子情報通信学会論文誌 B-II, Vol. J73-B-II, No. 4, 1990 年 4

月 pp.205-213

2. 三橋龍一, 青木由直

”積雪の比誘電率推定による雪中レーダの像再生法”

電子情報通信学会論文誌 B-II, Vol. J75-B-II, No. 8, 1992 年 8

月 pp.580-587

口頭発表

1. 三橋龍一, 横路浩明, 石川貴之, 青木由直
”雪中レーダシステムの高速化ハードウェアの開発”
電子情報通信学会秋季全国大会、C-399、船橋、1988-9
2. 三橋龍一, 横路浩明, 石川貴之, 青木由直
”高速処理・雪中レーダシステムのハードウェアの開発”
電気関係学会北海道支部連合大会、No. 128、札幌、1988-10
3. 三橋龍一, 青木由直
”カード識別装置の積雪に対する性能評価”
電子情報通信学会春期全国大会、B-145、東大阪、1989-3
4. 三橋龍一, 佐藤智之, 青木由直
”回転型アンテナアレーを用いた雪中レーダの基礎実験”
電子情報通信学会秋季全国大会、C-411、横浜、1989-9
5. 三橋龍一, 佐藤智之, 青木由直
”高速処理・雪中レーダシステムの信号処理と基礎実験”
電気関係学会北海道支部連合大会、No. 124、室蘭、1989-9
6. 三橋龍一, 佐藤智之, 青木由直
”高性能雪中レーダの開発”
寒地技術シンポジウム'89、CTC-891207、札幌、1989-10

7. 三橋龍一, 佐藤智之, 青木由直
”ホログラムの距離パラメータ自動推定による再生法”
電子情報通信学会秋季全国大会、C-85、広島、1990-9
8. 三橋龍一, 佐藤智之, 青木由直
”ホログラムの伝搬関数成分分離による自動再生法”
電気関係学会北海道支部連合大会、No. 122、札幌、1990-10
9. R.Mitsunashi T.Sato Y.Aoki
”A method of Automatic Estimation of A Range Parameter from
a Hologram Using Logarithmic Transform”
4th SSICCA, J-1, Sapporo Japan, 1990-10
10. R.Mitsunashi T.Sato Y.Aoki
”Display Technique for Subsurface Radar Images by Three-Dimensional
Memory System”
4th SICG, I-3, Sapporo Japan, 1990-11
11. 三橋龍一, 坂本雄児, 青木由直
”積雪がマイクロ波の伝搬に与える影響を考慮した雪中
レーダの像再生法”
電子情報通信学会研究会 A・P、A・P91-73、札幌、1991-9
12. 三橋龍一, 坂本雄児, 青木由直
”積雪の境界面と誘電率を考慮した雪中レーダの像再生

法”

電子情報通信学会秋季全国大会、SB-2-5、町田、1991-9

13. 三橋龍一, 坂本雄児, 青木由直

”積雪のマイクロ波ホログラフィに対する影響を考慮した雪中レーダの像再生法”

電気関係学会北海道支部連合大会、No. 151、札幌、1991-10

14. R.Mitsubishi T.Sato Y.Aoki

”A Method of Image Reconstruction for Multi-Frequency Microwave Holograms by Focus”

5th SICG, RD-2, Sapporo Japan, 1991-11

15. 三橋龍一, 青木由直

”焦点距離推定による雪中レーダの自動像再生法”

電子情報通信学会春季全国大会、SB-2-6、野田、1992-3

16. 三橋龍一, 棚橋真, 青木由直

”雪中レーダの実用化への考察”

電子情報通信学会研究会、SANE92-25、札幌、1992-8

17. R.Mitsubishi Y.Aoki

”A METHOD OF AUTOMATIC IMAGE RECONSTRUCTION FOR SNOW SEARCH RADAR”

1992 ISAP, 3D3-2, Sapporo Japan, 1992-9

18. 三橋龍一, 棚橋真, 青木由直

”雪中レーダの衛星通信を用いたデータ伝送”

電子情報通信学会秋季全国大会、B-106、東京、1992-9

19. 三橋龍一, 棚橋真, 坂本雄児, 青木由直

”雪中レーダのデータ伝送の誤りに関する考察”

電気関係学会北海道支部連合大会、No. 396、北見、1992-10

