博士（工学）　三　橋　龍　一

学 位 論 文 題 名

雪中レーダの高速化とデータ処理に関する研究

学位論文内容の要旨

本論文は，積雪内に埋没している物体を探査し映像化する「雪中レーダ」に関して，回転型アンテナアレーやDSPシステムを用いた高速化と雪中レーダのデータである多周波ホログラムの特性を応用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。雪中レーダは，北海道大学工学部で研究が続けられている新しいタイプのレーダ装置であり，積雪内の物体の探査と映像化を目的としたホログラフィックレーダの一種である。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，積雪内部に埋没している物体の探査を目的とした装置の実用化が望まれている。このような要求に対して研究開発を行っているのが積雪内埋没物体3次元映像化レーダシステムである雪中レーダである。しかし，多周波ホログラフィ法というその原理により，望まれる実時間処理の実現は困難ではあるが，実用化をめざして高速化の手法を検討している。また，その原理を応用することで従来は必要としていた積雪の密度測定等を省き，雪中レーダで収集したデータのみから自動像再生処理する手法について述べている。

本論文は，全体が以下に述べる全5章より構成されている。

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記述している。

第2章では，多周波ホログラフィ法を雪中レーダの基本原理としている理由について述べている。不可視情報の映像化装置においては，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，この手法を雪中レーダに単純に適用しても分解能の点で問題があると指摘している。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や，ホログラフィ法についてその原理を簡単に述べている。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があり，雪中レーダではこの手法を複数の周波数でデータを収集する多周波ホログラフィに拡張して，高い分解能を実現していること，およびその手法の優位性に

ついて述べている。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，多くの周波数でホログラムを収集し，各周波数での位相回転により距離方向の情報を得ており，この手法により雪中レーダでは方位方向，距離方向とも必要とする高い分解能を実現している。

第3章では，高速化するため回転型アンテナアレーやDSPシステムを用いた雪中レーダ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，原理的に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り，これを高速に行うためには多数のアンテナ素子を面状に並べることが理想的である。しかし，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ため，1次元のアンテナアレーを回転させてデータを収集する回転型アンテナアレーを用いたシステムを考案し，その理論と試作システムについて述べている。回転型アンテナアレーに対応するため円偏波の電波を用い，アンテナ素子をヘリカルアンテナとし，参照波にDSB変調をかけており，このアンテナ系で得られる多周波ホログラムについて解析的に明らかにし，像再生処理法を導いている。特に，微弱な受信信号とアレー化に伴う素子間のばらつきの問題の解決をはかるため，変調方式を工夫し照明波と参照波を異なるものとしており，その特徴について明らかにしている。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比較的大規模な演算処理が必要であり，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を雪中レーダの像再生処理に用いることで高速化をはかった像再生システムを提案し，実験を行っている。この効果は大きく，データ転送や用いたDSPシステムに適応した形式にデータ変換するなどの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と報告している。実際に試作した，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そのアンテナ素子の特徴や各種の信号処理について述べ，基礎的な実験結果についても述べている。

第4章では，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り，およそ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ことを雪中レーダのデータである多周波ホログラムの解析で明らかにしている。従来は，雪中レーダで探査対象としている乾いた積雪の比誘電率が，積雪の密度と高い相関

性があることを利用して，測定した積雪の密度値から推定しており，このような探査とは別の測定はできるだけ避けたいとしている。さらに，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，方位方向と距離方向では距離情報に関して逆方向の変化をすることを明らかにしている。この特性に着目し，収集したデータから積雪の比誘電率を推定する手法を考案し，シミュレーションでその妥当性を検証している。また，積雪の比誘電率を再生像から自動推定するため導入した画像処理の技術を応用した手法について述べている。この手法を用いることで，積雪の比誘電率と標的物体までの距離の両方が未知でも，雪中レーダの像再生処理を自動的に行うことが可能になる。また，実際の雪中レーダのデータに対する有効性を確認するため，雪中レーダを試作しており，そのシステムについて述べている。飯ごうを標的物体とした実験データを処理して，その妥当性を検証している。実験データに対する本手法の処理結果，積雪の密度から推定した比誘電率とほぼ一致することが確認されている。さらに，雪中レーダの研究では遭難者の捜索という目的の１つがあり，その目的実現をめざして，人体の検出に関する実験も行っている。

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。

学位論文審査の要旨

主　査　教　授　青　木　由　直
副　査　教　授　新　保　　勝
副　査　教　授　伊　藤　精　彦
副　査　教　授　小　柴　正　則

本論文は，長波長ホログラフィ法を応用した積雪内に埋没している物体を探査し映像化する「雪中レーダ」に関して，実用化する上の問題点の解決及び改善を目的として研究を行ったものである。これらの研究には，装置の高速化とデータ処理上必要であるパラメータを自動推定する方法の開発が含まれている。

雪中レーダは，北海道大学工学部で研究が続けられている新しいタイプのレーダ装置であり，積雪内の物体の探査と映像化を目的としたホログラフィックレーダの一種である。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，積雪内部に埋没している物体の探査を目的とした装置の実用化が望まれている。このような要求に対して研究開発を行っているのが積雪内埋没物体3次元映像化レーダシステムである雪中レーダである。しかし，多周波ホログラフィ法というその原理により，望まれる実時間処理の実現は困難ではあるが，実用化をめざして高速化の手法を検討している。また，その原理を応用することで従来必要としていた積雪の密度測定等を省き，雪中レーダで収集したデータのみから自動像再生処理する手法について述べている。

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記述している。

第2章では，多周波ホログラフィ法を雪中レーダの基本原理としている理由について述べている。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，多くの周波数でホログラムを収集し，各周波数での位相回転により距離方向の情報を得ており，この手法により雪中レーダでは方位方向，距離方向とも高い分解能を実現している。

第3章では，高速化するため回転型アンテナアレーやディジタル信号処理装置（DSPシステム）を用いた雪中レーダ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，原理的に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り，これを高速に行うためには多数のアンテナ素子を面状に並べることが理想的である。しかし，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ため，回転型アンテナアレーを用いたシステムを考案し，その理論と試作システムについて述べている。特に，微弱な受信信号とアレー化に伴う素子間のばらつきの問題の解決をはかるため，変調方式を工夫し照明波と参照波を異なるものとしており，その特徴について明らかにしている。また，像再生処理に関しては，ここ数年急速に進んだLSI技術の賜物であるDSPを雪中レーダの像再生処理に用いることで高速化をはかったシステムを提案し実験を行い，飛躍的な高速化の確認を行っている。

第4章では，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。従来は，雪中レーダで探査対象としている乾いた積雪の比誘電率が，積雪の密度と高い相関性があることを利用して，測定した積雪の密度値から推定しており，このような探査とは別の測定が効率化を妨げている。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，収集したデータから積雪の比誘電率を推定する手法を考案し，シミュレーションでその妥当性を検証して

いる。この手法を用いることで，積雪の比誘電率と標的物体までの距離の両方が未知でも，雪中レーダの像再生処理を自動的に行うことが可能になる。また，実際の雪中レーダのデータに対する有効性を確認するため，雪中レーダを試作しており，そのシステムについて述べている。飯ごうを標的物体とした実験データを処理して，その妥当性を検証している。実験データに対する本手法の処理結果，積雪の密度から推定した比誘電率とほぼ一致することが確認されている。さらに，雪中レーダの研究では遭難者の捜索という目的の１つがあり，その目的実現をめざして，人体の検出に関する実験も行っている。その結果，生きている人間の検出にも有効である事を明らかにしている。

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。

これを要するに，著者は，雪中レーダのみならず小規模なホログラフィックレーダの高速化及びデータ処理に関して新知見を得ており，理論のみならず実験装置を試作してその有効性を検証し，情報工学および応用電波工学に貢献するところが大なるものがある。

よって著者は，博士（工学）の学位を授与される資格あるものと認める。