イリノイ大学シカゴ校における リモートセンシングの研究

山 口 芳 雄*

1. はじめに

筆者は1988年6月14日から1989年6月13日まで1年間アメリカ合衆国イリノイ州シカゴにあるイリノイ大学でResearch Associateとして滞在する機会を得た。この大学には1982年に工学部が設置され、全米の大学の中では比較的新しい大学である。しかし、シカゴというアメリカ第3位の大都市の中にあり、利便の良さや多くの人々が集っていることから、年々レベルが向上し、いわゆる研究大学に変貌しつつあった。学生3万5千人、大学院生1万人程度の規模で全体を把握するのは極めて難しい。私は工学部の電気コンピュータ学科に所属し、以前から電波と雪に関する研究に興味があったのでマイクロ波リモートセンシングに関する研究に従事させてもらった。以下に、レーダを用いたリモートセンシングの研究の一端を紹介し、報告としたい。

2. マイクロ波リモートセンシング・レーダ ポーラリメトリについて

所属した研究室はCommunications LaboratoryでDirectorはWolfgang-M. Boerner教授である。ここでは、15年前ほどからRadar Polarimetryに関する研究を行っていた。Radar Polarimetryはあまり聞慣れない言葉であるが、電波で物体を検知しようとするときに電波の持つベクトル性質を利用して

最適受信しようとするものである。具体的にはレーダで電波を出すと目標物体に当たり、はね帰ってくる。その帰ってきた電波をできるだけ効率よく取り出すには電波のもつ性質をどのように利用したらよいか、どのような送信電波の偏波状態で送り出せば良いかという問題である。

この研究は最近、日本でも盛んに行われているマイクロ波リモートセンシングという大きな研究分野の中の一つの基礎研究テーマである。マイクロ波リモートセンシングについてはよく知られているように地球観測など広域の観測には不可欠の技術である。マイクロ波、ミリ波を使用する利点は昼夜にかかわらず、また、地上が雲に覆われていても人工衛星や飛行機によって地上の様子・情報が同時刻に収集できることである。観測の対象となる水蒸気、雨、雪、風、地表、人工建造物はマイクロ波・ミリ波の特定周波数の伝搬特性、反射特性と干渉するので、今後のリモートセンシングにはこれらの干渉する情報をいかに効率よく取り出すかが重要な課題となっている。レーダで電波をセンサーとして考えたとき取得できるのは振幅、位相、ドップラー周波数、偏波状態である。今までの衛星や、飛行機に搭載されたレーダでは主に振幅、ドップラー周波数のデータを取り扱っているものが多かった。しかし、位相と共に、偏波状態を測定できるようになれば、電波による観測はその機能が著しく向上し、リモートセンシングの飛躍的な発展が期待できる。そのため、Communications Laboratoryでは基礎研究として電波の

*新潟大学工学部助教授・工博
〔本稿受理：1989年8月18日〕

もつベクトル性、偏波に着目して研究を行っている。

よく知られているように、電波は進行方向には成分をもたない横波である。進行方向に垂直な断面内では電界と磁界が横たわり、時間と共にその向きが変る。電界、磁界ベクトルの先端の軌跡をみると一般的には楕円を描く。その軌跡が直線であれば直線偏波（水平偏波、垂直偏波）、円であれば円偏波（右回り、左回り）、最も一般的な場合は楕円偏波（右回り、左回り）となる。

レーダで使われている垂直偏波や水平偏波の直線偏波で送信アンテナから電波を送り出すと、何かの物体に当ることにより偏波状態が変わって電波が返ってくる。すなわち、水平偏波で送り出せば、返ってくる電波は水平偏波成分だけでなく、水平偏波成分と垂直偏波成分を合せもった合成ベクトルの波として受信アンテナに戻ることになる。この偏波状態は一般的には楕円偏波である。物体からの反射により、垂直、水平成分に位相差が生じ、振幅も成分によって異なるためである。

さて、ある一つの偏波状態で送信した電波が物体に当たり、返ってくる電波がレーダに最適受信（受信電力が最も大きくなるような受信）されるかどうかとなると物体の性質によるため問題は少し変わってくる。つまり、ある物体に対して、送信電波が垂直偏波なら、その偏波状態が受信アンテナに最もよく受信されるかどうかである。具体的な例として、右回り円偏波を金属の平板に垂直入射させると反射電波の右回り円偏波成分は0となり、左回り円偏波成分だけとなる。従って、右回り円偏波成分だけを使っているレーダシステムでは金属平板は検知できない。ところが、垂直偏波で出せば、返ってくる波はすべて垂直偏波の状態に戻ってくるので垂直偏波を使ったレーダシステムでは金属平板ははっきりと見えることになる。したがって、物体から返ってくる電波ができる限り物体から多くの情報を運んでくるためには目標物体に応じて、送信電波の偏波状態を変えられるようにした方が望ましい。言い換えれば、物体からの反射波を最適受信できるように送信電波の偏波状態を即時可変できるようなレーダシステムを

作ることが望ましい。このような電波の偏波状態を扱うものがRadar Polarimetryである。

前にも述べたように、送信アンテナからある偏波状態で送り出された電波は、物体に当ることにより、その偏波状態が変わって戻ってくる。このことは、逆に電波の立場から見ると物体が偏波を変換する偏波変換体（散乱体）とも考えられる。従って、物体による反射波の偏波状態・散乱特性を調べることで、ある程度その物体（散乱体）固有の特徴が抽出できるはずである。レーダの目標物体にはいろいろなものがある。雪（新雪、乾燥雪、湿り雪、融雪）、氷（真水による氷、海水、多年氷）、雲、海面、地表、植物、建物や飛行機といった人工建造物など全てがレーダリモートセンシングの対象になる。また、ある種のレーダではこれらのBack Ground中にある人工物体の識別も必要である。そのため研究ではまず、各々のレーダシーンのBack Groundとなる地表等のレーダエコー（受信電波）の偏波状態の特徴付けを行うことから始る。

最も一般的な受信電波の偏波は楕円偏波である。直線偏波は楕円を押し潰せば得られるし、円偏波は楕円の軸比を同じくすれば得られる。楕円を幾何学的に見てみると楕円の大きさ、太り具合、傾き、軌跡の回転方向などのパラメータが考えられるが、これらのうち、太り具合と傾きをパラメータにして目標物体を調べてみる。

図-1は水平偏波で送信し、水平偏波のチャンネルで受信したNASAの航空機搭載polarimetricレーダによるサンフランシスコ湾の画像である。この絵は4096×1024個のピクセルをもつ開口合成レーダによる画像で、白い所ほど反射波の受信信号が強いことを示している。左上は植生のある山、黒くなっている所が海、右下の方が都市部で、海に掛っている白い線は橋である。Radar Polarimetryの理論を使って、例えば、海と都市（橋や船等も含む）の識別を行い、画像のコントラストを増強したい場合、各々のピクセルの受信偏波状態（楕円の太り具合と傾き）を統計的に調べてみる。すると、海で受信レベルが最小、都市部で最大となるような送信電波の偏波状態が図-2(a), (b)のようなヒストグラムとし

図－１ 合成開口レーダによるサンフランシスコ湾の画像。送信、受信とも同じ水平偏波。グレイスケールは受信電圧レベル10-10の区間を均等にわけてある。

て得られる。そして、その最適送信偏波状態に対応した受信偏波状態は図－3(a), (b)のようになる。飛び出ている場所は同じ偏波状態が多いことを示している。この例では、海を弱く、都市部を強く画像表示するための偏波状態のピークが同じ位置にあるので、その位置のパラメータを用いて画像を再構成してやると図4が得られる。図－4から画像のコントラストが増強されているのがよく分り、また、図面の右上にいる船も見えてとれる。

この例は、Radar Polarimetryの応用の1つであるが、レーダシーンのピクセル毎に送信電波の偏波状態を変えてやることによって受信電力を高め、希望する画像がコントラストよく再生できる点に特長がある。さらに、Radar Polarimetryによってレーダ画像のクラッター抑圧やノイズの低減を達成でき、今後ますますリモートセンシングの重要な研究分野になって行くと思われる。また、今後、航空機や人工衛星に高速なコンピュータを搭載し、実時間で偏波の制御から画像生成まで行える新しいレーダ装置が出現してくるであろう。雪に関しては最近、アメリカ、ヨーロッパでミリ波を使ったレーダが脚光を浴びているが、電波のもつベクトル性をすべて受

信できるようなpolarimetricレーダ装置の開発が急がれている。Radar Polarimetryによって雪関係では積雪の広がり具合の観測、雪質の識別、あるい

図－２ 送信電波の最適偏波状態を示す2次元ヒストグラム。(a)海 (b)都市部 最適偏波ベクトルは(a), (b)とも200×200ピクセルのデータより計算し、そのベクトルを使って、楕円の太り具合(Ellipticity)と傾き(Tilt)に変換してある。(a)は海からの反射波が最小となるベクトルのヒストグラム、(b)は都市部からの反射波が最大となるベクトルのヒストグラム。ピークの位置はEllipticity=0, Tilt=90(垂直偏波に対応)する所がある。そのため、この位置の偏波を使えば、海からほとんど反射が無く、都市部から多く反射してくることが予想される。

図-3 図2に対応した送信偏波状態による反射波の2次元ヒストグラム。(a)海, (b)都市部。(a), (b)とも200×200ピクセルのデータに基づいている。海からの反射波はEllipticity=0, Tilt=90にすればアンテナのミスマッチによいほとんど消える。都市部でも部分的に消えるが、ヒストグラムが鋭くないので画像コントラストの改善につながる。

た。説明の不十分な点も多くあると思われるが、御容赦願いたい。今後の雪工学研究の応用分野に少しでも役立てれば幸いである。

研究員として快く受入れてくれたイリノイ大学W. M. Boerner教授, Department HeadのW. K. Chen教授, 関係各位に感謝致します。また, 在外研究員として滞在の機会を与えて頂いた文部省, 及び新潟大学・阿部武雄工学部長, 仙石正和教授に深く感謝の意を表します。

図-4 海からの反射を最小にした送信偏波状態 (Ellipticity=0, Tilt=90) によるサンフランシスコ湾の画像。グレイスケールは図-1と同じ。

付録：参考文献など

は雪中レーダの高機能化などはじめとしてマイクロ波リモートセンシングにかなり大きな変革をもたらすと期待されている。

3. おわりに

本文は、筆者の1年間の滞在期間中に得た情報を基に書いたものである。図などは参考文献5によ

1. W. M. Boerner and M. B. El-Arini et al, "Polarization dependence in electromagnetic inverse problems," IEEE Trans. Antennas Propagat., vol. AP-29, pp. 262-271, 1981.
2. A. B. Kostinski and W. M. Boerner, "On foundations of radar polarimetry," IEEE Trans. Antennas Propagat., vol. AP-34, pp. 1395-1404, Dec. 1986. (See also pp. 1470-1473.)

3. A. P. Agrawal, "A polarimetric rain backscatter model developed for coherent polarization diversity radar applications," Ph. D. dissertation, Dept. of EECS/CL, University of Illinois at Chicago. Dec. 1986.
4. A. B. Kostinski and W. M. Boerner, "On the polarimetric contrast optimization," IEEE Trans., Antennas Propagat., vol. AP-35, 8, pp.988-991, Aug. 1987
5. A. B. Kostinski, B. D. James, and W. M. Boerner, "Polarimetric matched filter for coherent imaging," Can. J. Phys. vol. 66, 1988.
6. A. B. Kostinski, B. D. James, and W. M. Boerner, "Optimal reception of partially polarized waves," J. Optical Society of America A, vol.5, Jan. 1988.
7. A. P. Agrawal and W. M. Boerner, "Re-development of Kennaugh's target characteristic polarization state theory using the polarization transformation ratio formalism for the coherent case", IEEE Trans. Geoscience and Remote Sensing, vol.27, 1, Jan. 1989.

SYNOPSIS

"Research on microwave remote sensing at the University of Illinois at Chicago"

by Yoshio Yamaguchi
Niigata University

This report presents and introduces a research on radar polarimetry of microwave and millimeter wave remote sensing conducted at the University of Illinois at Chicago under the direction of Professor Wolfgang M. Boerner. An introductory explanation to RADAR POLARIMETRY and its applications are given. First, the basic definition of a wave polarization is introduced, relating to a scattering characteristics of radar target, which, in turn, leads to the polarimetric theory. Then, the theory is applied to a specific example of radar image, i. e., of San Francisco Bay Area, obtained by NASA-JPL, in order to enhance image contrast.

By using the highly advanced radar polarimetry, it is possible to enhance and optimize a image contrast of target and to improve the radar performance significantly. This polarimetric radar has an ability of eliminating background noise and speckles, especially in a strong clutter environment, which makes target detection and identification possible. Thus the radar polarimetry will play an important role in the high resolution radar remote sensing in the future.