

## E 7 Monostatic Radar による Specular 反射測定法

小林 弘晃      山口 芳雄      山田 寛喜  
新潟大学工学部

### 1. まえがき

電波の持つ偏波を利用する合成開口レーダ (Synthetic Aperture Radar) を用いることにより、詳細な対象物の情報を得ることができる。送信アンテナと受信アンテナが一致している Monostatic Radar では、対象物の後方散乱の測定を行うことができるが、前方散乱 (Specular 反射) を測定することはできない。粗さのない平面からの散乱は前方散乱であるため、Monostatic Radar では詳細な情報を得ることができない。

本稿では、3 面リフレクタ構造を用いた Monostatic Radar による Specular 反射測定法の提案を行っている。さらにその検証実験として、提案測定法を用い電気定数 ( $\epsilon_r$ ,  $\sigma$ ) 推定の実験を行った結果を示す。

### 2. レーダポーラリメトリ

ポーラリメトリックレーダを用いたときに取得されるデータは、対象物の反射係数である。この反射係数を要素とした  $2 \times 2$  の複素行列を散乱行列と定義し次式で与える。

$$S = \begin{bmatrix} S_{HH} & S_{HV} \\ S_{VH} & S_{VV} \end{bmatrix} \quad (1)$$

但し、添字は直線偏波基底 (水平 : H, 垂直 : V) を表す。以下では monostatic radar を仮定しているため  $S_{HV} = S_{VH}$  とする。各偏波間の情報を得るため、次式の Co-Pol ratio を定義する。

$$\rho = \frac{S_{VV}}{S_{HH}} \quad (2)$$

### 3. Specular 反射測定法

誘電体面からの Specular 反射による散乱行列は、Fresnel の反射係数を用いて次式で表される。

$$S = \begin{bmatrix} R_H & 0 \\ 0 & R_V \end{bmatrix} \quad (3)$$

上式において、

$$R_H = \frac{\cos \theta - \sqrt{\epsilon_r^* - \sin^2 \theta}}{\cos \theta + \sqrt{\epsilon_r^* - \sin^2 \theta}} \quad (4)$$

$$R_V = -\frac{\epsilon_r^* \cos \theta - \sqrt{\epsilon_r^* - \sin^2 \theta}}{\epsilon_r^* \cos \theta + \sqrt{\epsilon_r^* - \sin^2 \theta}}$$

但し、 $\theta$  : 入射角、 $\epsilon_r^*$  : 複素比誘電率である。Specular 反射を Monostatic Radar で測定するために 3 面リフレクタの散乱特性を利用する。3 面リフレクタでは、電波が 3 回反射されてレーダに戻ってくる散乱特性がある (図 1)。この 3 面リフレクタが金属で構成されているとき、散乱行列は次式で表される。

$$S = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (5)$$

この散乱行列は金属平面からの散乱行列に等しい。つまり、底面の金属板からの反射波が、金属の 2 面リフレクタにより反射されてレーダに戻ってくる。これは、3 面リフレクタの底面の金属平面からの Specular 反射と考えることもできる。この特性を利用し、Specular 反射測定を行う。ここで、図 2 に示すように 3 面リフレクタの底面を誘電体に置き換える。このときの散乱行列は、上述の理論より式 (3)、(4) で与えられるはずである。

この測定法は、前方散乱を測定するものであって、前方散乱と後方散乱が生じるような対象物では、両方の散乱がレーダに戻ってきてしまう。平面の粗さが大きいと前方散乱と後方散乱が生じてしまう。本原稿における実験でのターゲット面の粗さは無視できるほど小さい。

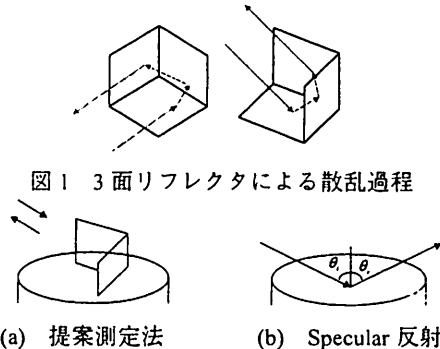


図 2 Monostatic Radar による Specular 反射測定法

### 4. 電気定数 ( $\epsilon_r$ , $\sigma$ ) 推定 [3]

ここでは、Specular 反射により得られた Co-Pol ratio を用いた電気定数推定法を示す。

式 (4) より次式の関係式を得る。

$$R_V = R_H \frac{\cos 2\theta - R_H}{1 - R_H \cos 2\theta} \quad (6)$$

Co-Pol ratio を用いると  $R_H$ ,  $R_V$  は次式で表される。

$$R_H = \frac{\cos 2\theta - \rho}{1 - \rho \cos 2\theta}, \quad R_V = \rho \frac{\cos 2\theta - \rho}{1 - \rho \cos 2\theta} \quad (7)$$

式 (4)、(7) より次式を得る。

$$\epsilon_r^* = \left[ 1 + \left( \frac{1 + \rho}{1 - \rho} \right)^2 \tan^2 \theta \right] \sin^2 \theta = \epsilon_r - j60\lambda\sigma \quad (8)$$

但し、 $\lambda$  : 波長、 $\sigma$  : 導電率である。

式(8)に実験で得られた Co-Pol ratio を代入することにより、電気定数( $\epsilon_r, \sigma$ )を推定することができる。

### 5. 実験

3節で示した Specular 反射測定法を用いた実験により得られた Co-Pol ratio を式(8)に代入することで電気定数推定実験を行う。この実験で電気定数 (Co-Pol ratio)の推定を正しく行うことができれば、3面リフレクタ構造を用いた測定法で Specular 反射を測定できたことになる。

実験は電波暗室内で行った。送受信アンテナを azimuth 方向に一次元走査している。測定パラメータを表1に示す。偏波方向は、azimuth 方向を H 偏波、elevation 方向を V 偏波としている。最初にターゲットが存在しない状況を測定し、ターゲットを置いた状況で取得したデータとの差[1]を取ることによってアンテナのカップリングや解析空間からの不要反射を取り除いたデータを得た。さらに、合成開口処理によって分解能の向上を行い、Polarimetric calibration[2]により偏波間の振幅・位相誤差を取り除いた。最後に3×3 ルックの平均化を行い、散乱行列を取得した。表2に使用したターゲットを示す。また、3面リフレクタ構造のターゲット状況を図3に示す。

表1 測定パラメータ

システム	Network analyzer(HP8720C)
アンテナ	Rectangular horn
使用周波数	9-11 [GHz]
中心周波数	10 [GHz] (3[cm])
周波数ポイント	201
走査幅	1 [cm]
走査点数	64
入射角	45 [deg.]
距離	212 [cm]

### 6. 解析結果及び考察

測定した Co-Pol ratio 及び推定した電気定数の結果を表3に示す。コンクリートの電気定数は、およそ比誘電率で 5-7、導電率で  $10^{-2} \sim 10^{-3}$  [S/m]である。Co-Pol ratio は、式(2), (4)より実部で 0.50-0.57、虚部は 0.0042-0.0026 である。これらの値と測定結果・推定結果とを比べると、誘電率の推定はほぼ理論値通り結果が得られ精度良い推定が行われているが、導電率に関しては理論値とはおよそ  $10^{-3}$  [S/m]の違いが見られる。これは、Co-Pol ratio が理論値と異なっているためである。特に、Co-Pol ratio の虚部に大きな違いが見られる。この原因として、コンクリートの含水率による影響、アンテナ系のアライメントによる影響が考えられる。しかし、導電率は大きく異なるものの、比誘電率が理論値通りに推定されていることから、3面リフレクタ構造を用いた提

案測定法で Specular 反射の測定を行うことは可能であると考えられる。またコンクリートとは別にアクリル板の電気定数推定実験も行った。コンクリートでの推定結果をふまえると比誘電率の推定結果は妥当な結果であると考えられる。

### 7. まとめ

3面リフレクタ構造を用いた Specular 反射法の提案を行い、検証実験として電気定数推定を行った。その結果、比誘電率の推定はほぼ正しく行えたものの、導電率の推定は理論値と大きく異なっていた。しかし、比誘電率の推定は正しく行えたことから、3面リフレクタ構造を用いた測定法で specular 反射を測定することができることを示した。今後の課題としては、さらなる推定精度の向上、Bistatic Radar(送信・受信アンテナが分離しているアンテナ)での測定結果との比較が挙げられる。

謝辞 この研究の一部は、文科省科研費によるものである。

表2 使用ターゲット

アクリル板	30×30×3 [cm]
コンクリート板	30×30×6 [cm]

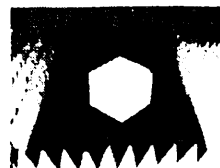


図3 ターゲット状況図

表3 測定結果, 推定結果

	アクリル	コンクリート
Co-Pol ratio	0.24-j0.17	0.58-j0.11
比誘電率	1.46	5.91
導電率	0.467	2.33

### 文献

- [1] J. Fortumy and A. J. Sieber, "Three-dimensional synthetic aperture radar imaging of a fir tree: First result," *IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing*, vol.37, no.2, pp.1006-1014, Mar. 1999.
- [2] J. J. van Zyl, "Calibration of polarimetric radar images using only image parameters and trihedral corner reflectors," *IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing*, vol.28, no.3, pp.337-348, May. 1990.
- [3] Y. Yamaguchi, K. Kimura, H. Yamada, H. J. Eom, "Complex permittivity of flat ground in terms of polarization ratio," *Proc. of KJJC*, pp. 19-22, Sept. 2001.