

E 5 直交する偏波成分を用いたMUSICアルゴリズム

山倉利春 山田寛喜 山口芳雄 阿達透
新潟大学工学部

1. まえがき

近年、偏波情報を用いてMUSICアルゴリズムの分解能を向上させる研究が数多く報告されている^{[1][2]}。しかし、これらの手法は従来のMUSIC法と比べて分解能は向上するものの、計算時間が増加してしまうという欠点がある。そこで本稿では偏波情報を有効に利用し、計算時間をほとんど増加させずに分解能を向上させる手法を提案し、本手法が従来の偏波情報を用いた手法と比較して、計算コスト、分解能の点において有効であることを実験により確認している。

2. 直交偏波MUSIC法

2.1 信号の定式化

受信アンテナを水平(H)、垂直(V)偏波にして、発信器にネットワークアナライザを用いて得られるL個の周波数サンプルデータ $r^{(*)}(f_l)$ ($l=1, 2, \dots, L$)、($*$ =HまたはV)は、d個の局所的散乱波を有しているものとし、それぞれの受信アンテナの位相中心は一致しているものとする。このとき全散乱電界は次式で表される^[3]

$$r_m^{(*)}(f_l) = \sum_{i=1}^L s_i^{(*)} \exp(-j2\pi f_l t_i) + n^{(*)}(f_l) \quad (1)$$

$$s_i^{(H)} = \cos \gamma_i s_i \quad (2)$$

$$s_i^{(V)} = \sin \gamma_i e^{i\phi_i} s_i \quad (3)$$

ここで t_i, s_i はi番目の散乱波の伝搬遅延時間、および、偏波に依存しない本質的な散乱係数を表し、 γ_i, ϕ_i は偏波状態を表す。また、 $s_i, (*=H$ またはV)は水平(H)、又は垂直(V)受信偏波により得られるi番目の散乱波の散乱係数、 $n^{(*)}(f_l)$ はH、V受信偏波における時間平均0、分散 σ^2 の雑音を示している。更に式(1)は次に示すような行列形式で表現することが可能である。

$$r^{(*)} = A s^{(*)} + n^{(*)} \quad (4)$$

$$r^{(*)} = [r^{(*)}(f_1), \dots, r^{(*)}(f_L)]^T \quad (5)$$

$$s^{(*)} = [s_1^{(*)}, \dots, s_L^{(*)}]^T \quad (6)$$

$$n^{(*)} = [n^{(*)}(f_1), \dots, n^{(*)}(f_L)]^T \quad (7)$$

$$A = [a(t_1), \dots, a(t_d)] \quad (8)$$

$$a(t_i) = [\exp(-j2\pi f_l t_i), \dots, \exp(-j2\pi f_L t_i)]^T \quad (9)$$

ここで T は転置を表す。

2.2 直交偏波MUSIC法の適用

H、V受信偏波で得られたL個の周波数サンプルデータからそれぞれM個のサブアレー $r_k^{(*)}$ 及びその相関行列 $R_k^{(*)}$ ($k=1, 2, \dots, M$)、($*$ =H また

はV)を作る。

$$r_k^{(*)} = [r^{(*)}(f_k), \dots, r^{(*)}(f_{k+N-1})]^T \quad (10)$$

$$R_k^{(*)} = E [r_k^{(*)} \cdot r_k^{(*)H}] \quad (11)$$

ここで $E[\cdot]$ はアンサンブル平均、 \cdot は複素共役転置を表す。この式(11)の平均化相関行列 $R_{ssp}^{(P)}$ を次のように定義する。

$$R_{ssp}^{(P)} = \frac{1}{M} \sum_{k=1}^M \{ R_k^{(H)} + R_k^{(V)} \} \quad (12)$$

また、M個の後ろ向きのサブアレー $r_m'^{(*)}$ 及び相関行列 $R_m'^{(*)}$ ($m=1, 2, \dots, M$)を次のように定義する。

$$r_m'^{(*)} = [\bar{r}^{(*)}(f_{L-m+1}), \bar{r}^{(*)}(f_{L-m}), \dots, \bar{r}^{(*)}(f_{L-N+1})]^T \quad (13)$$

$$R_k'^{(*)} = E [r_k'^{(*)} \cdot r_k'^{(*)H}] \quad (14)$$

ここで $\bar{r}^{(*)}$ は $r^{(*)}$ の複素共役を表す。

このとき、平均化相関行列 $R_{ssp}'^{(P)}$ を次のように定義する。

$$R_{ssp}'^{(P)} = \frac{1}{M} \sum_{m=1}^M \{ R_m'^{(H)} + R_m'^{(V)} \} \quad (15)$$

次に、式(12)、(15)で得られた平均化相関行列から前進/後進方向平均化相関行列 $R_{mspp}^{(P)}$ を次のように定義する。

$$R_{mspp}^{(P)} = \frac{R_{ssp}^{(P)} + R_{ssp}'^{(P)}}{2} \quad (16)$$

ここで、 $R_{mspp}^{(P)}$ は $M \geq d/2$ を満たすとき、以下の2つの性質を持つ。

(性質1)

固有値 λ_i を値の大きい順に $\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_N$ とすると、これらの固有値は $(N-d)$ 個の雑音電力 σ^2 に等しい固有値とそれよりも値の大きなd個の固有値に分けられる。

$$\lambda_1 \geq \lambda_2 \geq \dots \geq \lambda_d > \lambda_{d+1} = \dots = \lambda_N = \sigma^2$$

(性質2)

雑音固有値 $(\lambda_{d+1}, \dots, \lambda_N)$ に対応する雑音固有ベクトル (e_{d+1}, \dots, e_N) が振る空間は信号のモードベクトル $a(t_i)$ に直交する。

$$\{e_{d+1}, \dots, e_N\} \perp \{a(t_1), \dots, a(t_d)\}$$

(性質1)より、散乱波の信号数dの推定が可能であり、(性質2)から次に示す掃引関数を用いて伝搬遅延時間の推定が可能となる。

$$P_{music}(t) = \frac{a(t)^H a(t)}{a(t)^H E_N E_N^H a(t)} \quad (17)$$

$$E_N = [e_{d+1}, \dots, e_N] \quad (18)$$

3. 実験結果及び考察

測定は図1に示すように $60^\circ, 45^\circ$ に傾けた3つ

の線状ターゲットを異なる高さで配置し、送信側にはV方向の偏波状態を有するホーンアンテナ(12.4~18GHz)を使用し、受信側にはH,Vの2通りの受信アンテナを用いた。このときの測定周波数は13~17GHz(周波数帯域4GHz)とした。図2にV偏波で受信したデータに対して逆フーリエ変換(IFFT)を施したときの時間領域波形を示す。図3、図4にそれぞれ14.5~15GHz(周波数帯域500MHz)の測定データに対して、従来の偏波情報を用いたMUSIC法^[1]と今回示した直交偏波MUSIC法による時間領域波形を示す。また、表1に図1,2,3で示されているtarget#1,#2,#3による伝搬遅延時間と、target#3以降に存在する床からの反射(target#4)による伝搬遅延時間を示す。

従来までの偏波情報を用いたMUSIC法ではtarget#3以降の床からの反射成分の検出は困難であり、また、target#2に対しては、かなりの検出誤差が存在している。それに対して今回示した手法では床からの反射成分は明瞭に検出されており、target#2に対してもほぼ正確に検出されている。また、従来の偏波情報を用いたMUSIC法^[1]に要した計算時間は68(sec)であるのに対し、今回示した手法では2(sec)となり大幅に計算時間が短縮されている。

4. まとめ

今回示した直交偏波MUSIC法が従来までの偏波情報を用いたMUSIC法と比較して計算時間、分解能の点において有効であることを確認した。

5. 参考文献

- [1] E.R.Ferrara, Jr., and T.M.Parks, "Direction finding with an array of antennas having diverse polarizations", IEEE Trans. Antennas Propagat., vol.AP-31, no.2, pp.231-236, March 1983.
- [2] J.Li and R.J.Compton, Jr., "Angle and polarization estimation using ESPRIT with a polarization sensitive array", IEEE Trans. Antennas Propagat., vol.39, no.9, pp.1376-1383, Sept. 1991.

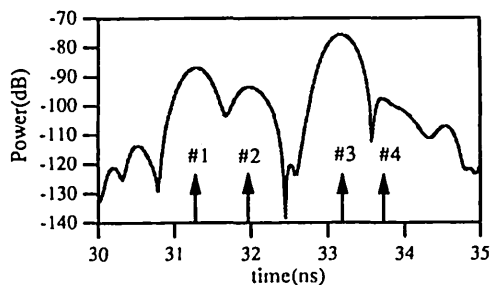


図2. 逆フーリエ変換による時間領域波形(周波数13~17GHz)

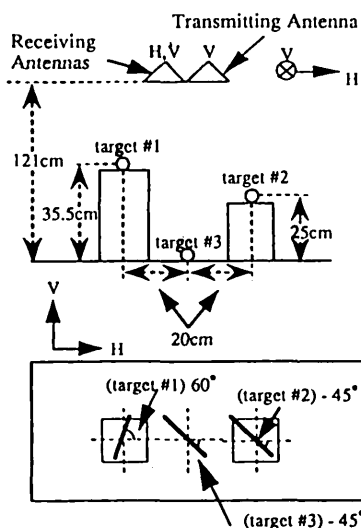


図1. 測定状況図

表1 伝搬遅延時間推定結果(ns)

	#1	#2	#3	#4
IFFT法	31.29	31.98	33.18	33.72
従来法	31.30	32.17	33.17	
直交偏波MUSIC法	31.29	32.01	33.18	33.72

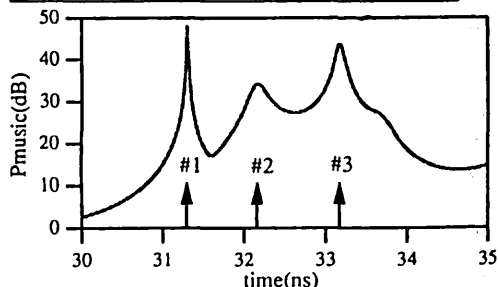


図3. 従来の偏波情報を用いたMUSIC法による時間領域波形 $f_1 = 14.5\text{GHz}$, $N=20$, $M=7$, $\Delta f=20\text{MHz}$

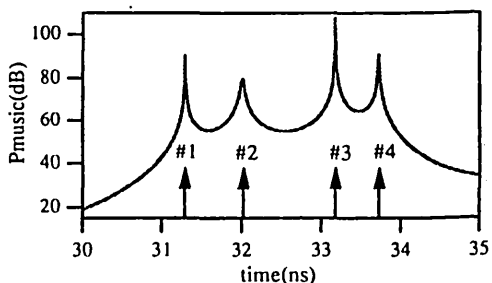


図4. 直交偏波MUSIC法による時間領域波形 $f_1 = 14.5\text{GHz}$, $N=20$, $M=7$, $\Delta f=20\text{MHz}$