

フレネル領域における少ない測定系列から反射波の方向を推定する
アルゴリズムとその評価

正 員 王 建青[†] 正 員 佐藤 次男^{††}
正 員 越後 宏[†] 正 員 高木 相[†]

A Direction Finding Algorithm of Reflected Waves using Small Size Data Series Measured in Fresnel Region and Its Evaluation

Jianqing WANG[†], Tsugio SATO^{††}, Hiroshi ECHIGO[†] and Tasuku TAKAGI[†], Members

あらまし 建造物や壁などからのフレネル領域の波となっている電波の不要反射特性を知るために、その反射源の方向を知ることが必要である。本論文では、フレネル領域の空間系列のスペクトルの形状と性質を検討することに基づいて、フレネル領域における反射波の到来方向を逐次的に推定するアルゴリズムを提案する。すなわち、少ないデータから高分解能でスペクトル推定できる最大エントロピー法と非線形方程式を解くためのニュートン・ラフソン法による誤差補正とを組合せることによりこれを実現している。また、その有効性を確認するための計算機シミュレーションと実験結果を示す。計算機シミュレーションの結果では、5倍波長の開口の40個測定データから $0.1^\circ \sim 2.9^\circ$ の誤差で反射方向が推定された。実験の例でも 0.5° 以下の誤差という高い精度で反射方向が推定された。これらの結果により、このアルゴリズムは実際の電磁環境で反射波の方向解析に応用できる見通しが得られた。

1. ま え が き

情報化社会の進展に伴い、我々の生活空間中の電磁環境はますます悪化している。すなわち、屋内の壁、市街の建物などの反射により、情報の転送にさまざまな妨害が生じている。このため、屋内、市街における電磁界分布の状況を把握する必要が出てくる。一方では、電波暗室などの電磁界実験場所の性質を精密に評価するために、反射特性を解析する要望もでてきた。更に、反射波の重畳した電磁界分布から反射波成分を除去することも非常に有意義なことである。このような場合、電磁波の反射方向および強度を推定することができれば、電波妨害の防止や実験場所の評価や反射波の除去などが可能となるものと考えられる。十分遠方の電波の到来方向の推定に関して、近年、時系列でのスペクトル推定を応用した推定法が注目されてい

る^{(1),(2)}。しかし、屋内、市街などの狭い場所で、あるいは周波数が低い場合、反射波は十分遠方から到来する平面波とはみなせない。このとき、反射波の電界強度は距離の逆数に比例して変化する。つまり、フレネル領域の波となっている。このような電磁波の方向と波源の位置の推定法に関していろいろな研究があるが⁽³⁾⁻⁽⁵⁾、データ開口の大きいこと、推定点数の多いこと、雑音に対して弱いことなどの制限がある。実用上で、小さい開口の少ないデータから反射方向を推定できる方法が必要である。

本論文では、フレネル領域の空間系列データのスペクトル解析に基づいて、少ないデータから高分解能でスペクトル推定できる最大エントロピー法と非線形方程式を解くためのニュートン・ラフソン法による誤差補正とを組合せることにより、逐次的に反射方向を推定するアルゴリズムを提案し、計算機シミュレーションと実験により、その有効性を確認した。その一例では、5倍波長の開口の40個データから、 $0.1^\circ \sim 2.9^\circ$ の誤差で反射方向が推定された。更に、実験結果により、この推定法は雑音と測定誤差に対して割合強いことがわかり、その実用性が確認できた。

[†] 東北大学工学部通信工学科, 仙台市
Faculty of Engineering, Tohoku University, Sendai-shi, 980
Japan

^{††} 宮城工業高等専門学校, 名取市
Miyagi National College of Technology, Natori-shi, 981-12 Japan

2. フレネル領域の空間系列データのスペクトル

時系列のデータからスペクトルを推定すると、その時系列に含まれる各周波数の強度分布がわかる。時間と空間の類似性から電磁界の空間的な測定値を用いてスペクトル推定することにより、電波の到来方向が求められる。本章で、フレネル領域の空間系列のスペクトルを検討することにより、反射方向を推定することを試みる。また、スペクトル推定と誤差補正とを組合せることにより、その高精度化を検討する。

2.1 遠方場とフレネル領域との比較

単一周波数 f_0 の場合を取り扱う。十分遠方からの電磁波について考えると、距離による減衰がすべての測定点において一定であり、かつ入射角度は同じである(図1参照)。従って、斜めに入ってくる電磁波の二つの波頂間の距離 λ_0 (波長)は測定領域 Y 軸上で λ となる。すなわち、次の関係式で与えられる。

$$\lambda = \lambda_0 / \cos(\theta) \tag{1}$$

スペクトルを推定するとき、 λ を一つの波の波長と考えてよい。式(1)により、

$$f = f_0 \cdot \cos(\theta) \tag{2}$$

が得られる。従って、Y 軸上の測定データを用い、スペクトル推定により、等価的な f を求めると、式(2)

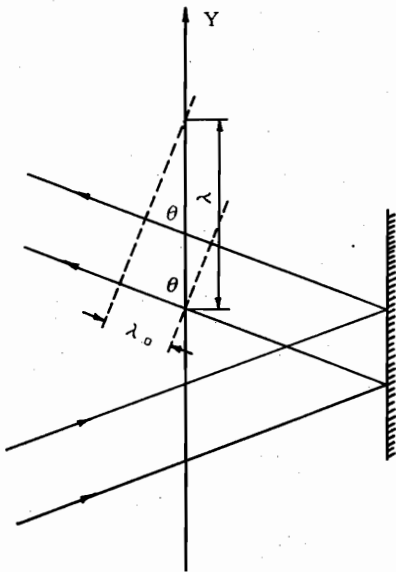


図1 十分遠方からの電磁波の反射
Fig.1 Reflection in far field.

の関係から斜めに入ってくる電磁波の到来方向が求められる。

しかし、フレネル領域の場合、電磁波の強度が距離と反比例して減衰する上、すべての測定点に対して反射波の入射角度が違っている(図2参照)。しかしながら、電磁波源を通る Y 軸上でデータをとる範囲、すなわちデータの開口が小さいものとする、式(1)と式(2)が近似的に成り立つ。但し、このときには f と θ はある範囲の値をとることとなる。もし、この場合、遠方場の場合と同じようにスペクトル推定により f をある範囲で決めることができれば、反射方向もある範囲でわかる。本手法を確認するため、フレネル領域の空間系列のスペクトルの形の検討を行った。

2.2 距離変化のスペクトルへの影響

まず、距離変化のスペクトルへの影響を検討する。フレネル領域での電磁波源から出た電界強度は簡単に書くと、式(3)によって表される。

$$E = E_0 \cdot e^{j\phi} \cdot e^{-jkR} / R \tag{3}$$

その実部は式(4)で表される。

$$E_r = E_0 \cdot \cos(kR - \phi) / R \tag{4}$$

但し、 E_0 は波源の電界強度の振幅、 ϕ は波源の電界強度の位相、 R は波源からの距離、 k は波数である。

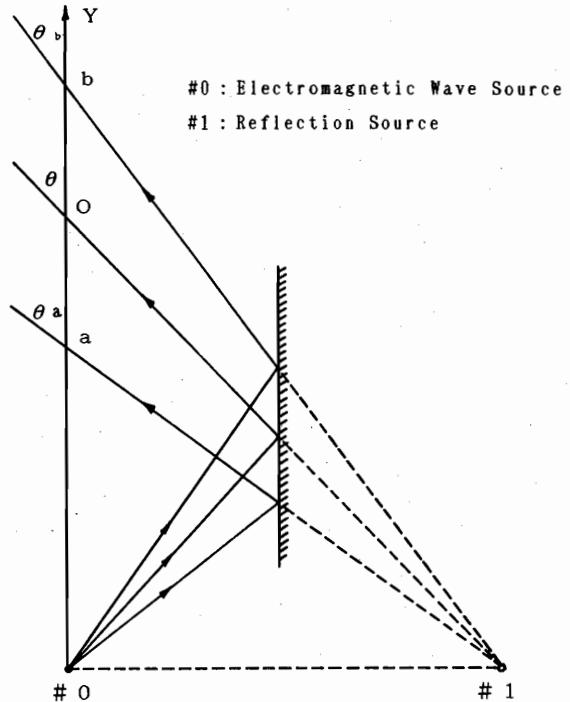


図2 フレネル領域の電磁波の反射
Fig.2 Reflection in Fresnel region.

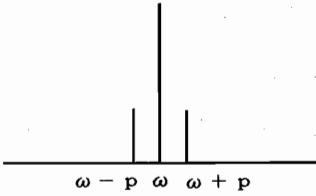


図3 振幅変調波のスペクトル
Fig.3 Spectrum of AM wave.

反射波がいくつかある場合には、Y軸上での測定データは式(4)のようなそれぞれ違う波数 k の波の和として表される。

$$R \rightarrow t \quad k \rightarrow \omega$$

のように対応づけると、式(4)は式(5)のような時間関数と等価である。

$$y(t) = E_0 \cdot \cos(\omega t - \phi) / t \quad (5)$$

これはある時間範囲 (t_1, t_2) で近似的に振幅変調された波と考えてよい。 t の範囲が小さいとき、 $1/t$ は周期の長い正弦波で近似できる。その角周波数を p で表示すると、 p は ω よりずっと小さい値である。従って、 t の狭い範囲では近似的に

$$y_c(t) = A \cdot (1 + m \cos(pt + \psi)) \cdot \cos(\omega t - \phi) \quad (6)$$

のよう書くことができる。ここに A は振幅で、 ϕ は初期位相で、 m は変調度である。 $y_c(t)$ のスペクトルは図3の形となる。すなわち、 ω 付近にスペクトルが広がりを持つことになる。しかし、 p は小さいので、 ω 付近でスペクトルはシャープである。つまり、式(5)の $y(t)$ のスペクトルは ω 付近に少し広がりを持つピークが出るはずである。同様に、フレネル領域の電磁界測定データのスペクトルを推定することにより、ある広がりはあるもののピークの位置に対応する周波数 \hat{f} を決めることが可能である。つまり、反射角度がある程度の誤差で推定できる。

2.3 反射角度変化のスペクトルへの影響

Y軸上のすべての測定点に対して、反射波の入射角度は変わっている。ここでは、この変化のスペクトルに対する影響を検討し、誤差補正の基本的な方程式を導出する。

図2を参照されたい。反射波の方向を決める基準として、測定データ開口の midpoint o を選び、 θ を反射波の入射角度、すなわち反射方向と定義する。

式(2)の微分をとると、

$$\Delta f = -f_0 \cdot \sin(\theta) \cdot \Delta \theta \quad (7)$$

が得られる。つまり、推定値 \hat{f} には Δf のひずみがあ

る。すなわち、

$$\begin{aligned} \hat{f} &= f + \Delta f \\ &= f - f_0 \cdot \sin(\theta) \cdot \Delta \theta \end{aligned} \quad (8)$$

である。式(8)からわかるように反射波の入射角度の変化 $\Delta \theta$ により、スペクトルにピークが出る周波数 \hat{f} は実際に定義した θ と対応する周波数 f からずれている。従って、反射方向 θ を求めるのに、スペクトル推定で求めた \hat{f} に対して、誤差補正をしなければならない。つまり、スペクトル推定で等価周波数 \hat{f} を求め、式(8)により、 \hat{f} から Δf の影響を除去すれば、反射方向 θ を推定することが可能である。

3. 反射波の方向推定アルゴリズム

3.1 MEM スペクトル推定

前章で検討したように、反射方向を推定するのに、まず測定データのスペクトルを推定しなければならない。実用上で、開口の小さい少ないデータから高分解能でスペクトルを推定できる方法が必要である。そこで、Burgの最大エントロピー法(MEM)^{(6),(7)}を取り上げる。

MEM法の基本概念は、信号系列の情報エントロピーを最大に保ちながら有限区間の信号データから全体の信号スペクトルを推定することである。MEMスペクトルは式(9)で計算される⁽⁷⁾。

$$P(f) = \frac{P_M \cdot \Delta t}{\left| 1 + \sum_{m=1}^M \nu_m e^{j2\pi f m \Delta t} \right|^2} \quad (9)$$

但し、 Δt はサンプリング間隔、 ν_m は m 点予測誤差フィルタの係数、 P_M はこのフィルタからの平均出力である。

3.2 誤差補正による反射方向の逐次推定

MEMスペクトル推定により等価周波数 \hat{f} を決め、式(8)を用い、反射方向 θ を推定する。式(2)を式(8)に代入することにより、

$$\hat{f}/f_0 = \cos(\theta) - \sin(\theta) \cdot \Delta \theta \quad (10)$$

が得られる。式(10)を解けば、反射方向 θ が求められる。式(10)のような非線形方程式に対して、根 θ の良い近似値 θ^0 が知られているときに、 θ のよりよい近似を速く求める手法としてニュートン・ラフソン法がある。これを式(10)へ応用する。

$$F(\theta) = \cos(\theta) - \sin(\theta) \cdot \Delta \theta - \hat{f}/f_0 \quad (11)$$

とおくと、ニュートン・ラフソン法により、

$$\theta^{n+1} = \theta^n - F(\theta^n)/F'(\theta^n) \quad (12)$$

となる。ここに、 θ^n は反復回数 n での推定値である。

このように逐次的に反射方向が推定され、十分な精度をもった推定値 $\hat{\theta}$ が求められる。

但し、

$$F'(\theta^n) = dF(\theta^n)/d\theta^n = -\sin(\theta^n) - \cos(\theta^n) \cdot \Delta\theta^n \quad (13)$$

である。しかし、 $F(\theta^n)$ と $F'(\theta^n)$ の中の $\Delta\theta^n$ も未知数である。 $\Delta\theta^n$ としては、測定データ開口の中心 o (図2参照) から a 側の反射波の入射角度の最大ずれ $\Delta\theta_a^n \max = \theta_a^n - \theta^n$ と b 側の反射波の入射角度の最大ずれ $\Delta\theta_b^n \max = \theta^n - \theta_b^n$ の算術平均値に選ぶ。すなわち、各 n 回目の反復ごとに、

$$\Delta\theta^n = (\Delta\theta_a^n \max + \Delta\theta_b^n \max) / 2 \quad (14)$$

のように決める。図2を参照してみると、電磁波源 #0 と測定領域 aob との間の距離が既知であるため、電磁波源のイメージ、すなわち反射源 #1 はいつも電磁波源 #0 と障害物 (例えば、壁、建物など) との垂直線の延長線の上にあるという性質を利用すれば、 θ^n が決まると同時に θ_a^n と θ_b^n も決められ、 $\Delta\theta_a^n \max$ と $\Delta\theta_b^n \max$ が簡単に求められる。つまり、 θ_a^n と θ_b^n が θ^n の関数であることにより、 $\Delta\theta_a^n \max$ と $\Delta\theta_b^n \max$ も θ^n の関数となり、 θ^n により決まる。

式(12)の逐次計算の初期値 θ^0 は式(2)により、

$$\theta^0 = \arccos(\hat{f}/f_0) \quad (15)$$

のように選べばよい。

このようにして、ニュートン・ラフソン法を用い、 \hat{f} から反射方向を推定できる。

3.3 アルゴリズム

これまでの検討により、反射波の方向推定アルゴリズムは次のようにまとめられる。

STEP 1 MEM を用い、測定データのスペクトルを推定する。

STEP 2 推定されたスペクトルのもっているピークの位置から \hat{f} を決める。

STEP 3 式(15)により、初期値 θ^0 を決める。

STEP 4 式(14)により、 $\Delta\theta^n$ を決める。

STEP 5 式(12)により、 θ^{n+1} を計算する。

STEP 6 もし、 $\theta^{n+1} - \theta^n$ の絶対値が、ある十分小さい値 ϵ より小さければ、計算を終了する。このときの θ^{n+1} が求める反射方向の推定値 $\hat{\theta}$ である。 $\theta^{n+1} - \theta^n$ の絶対値が ϵ より大きければ、 $\theta^n = \theta^{n+1}$, $n = n + 1$ として、STEP 4 に戻り逐次近似計算を続ける。

4. シミュレーション

4.1 シミュレーション結果

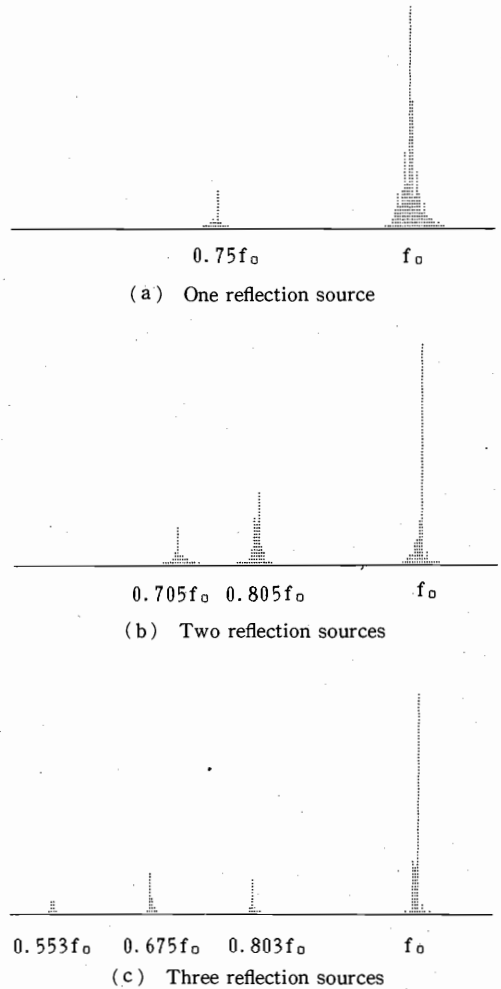


図4 MEM スペクトル
Fig. 4 MEM spectrum.

この推定法の有効性を確認するために、計算機シミュレーションにより検証を行った。シミュレーションは点波源からの距離による減衰と位相遅れだけを仮定し、無指向性の電磁波源と等価反射源を用いて行った。仮定した電磁波源と反射源のパラメータを表1に示す。但し、#0は電磁波源で、#1、#2、#3は等価反射源である。Y軸方向に電磁波源#0から6倍の波長点から5倍波長分(図2)の距離に渡り、1/8の波長の間隔でデータをとったことにする。提案したアルゴリズムにより推定した反射方向 $\hat{\theta}$ と設定値と θ との関係を表2に示す。MEMで推定したスペクトルを図4に示す。その結果は3°以内の誤差で反射方向が推定された。また、測定データに数値的にガウス雑音を加算し、この推定法の雑音に対する強さを検討した。信号対雑

表1 仮定した電磁波源と反射源のパラメータ

波源	位置(x)	θ	パワー
#0	0	0°	1
#1	6.4λ	37.0°	0.5
#2	4.8λ	29.5°	0.5
#3	9λ	46.6°	0.5

表2 推定された $\hat{\theta}$ と θ の関係

反射源の個数	反射源番号	反射方向 θ	推定値 $\hat{\theta}$	推定誤差 $\hat{\theta}-\theta$
1個	#1	37.0°	34.1°	-2.9°
2個	#1	37.0°	37.5°	+0.5°
	#2	29.5°	29.4°	-0.1°
3個	#1	37.0°	39.7°	+2.7°
	#2	29.5°	29.7°	+0.2°
	#3	46.6°	48.4°	+1.8°

表3 推定された $\hat{\theta}$ と θ の関係(SNR=20dB)

反射源の個数	反射源番号	反射方向 θ	推定値 $\hat{\theta}$	推定誤差 $\hat{\theta}-\theta$
1個	#1	37.0°	33.2°	-3.8°
2個	#1	37.0°	38.7°	+1.7°
	#2	29.5°	29.7°	+0.2°
3個	#1	37.0°	42.0°	+5.0°
	#2	29.5°	30.5°	+1.0°
	#3	46.6°	50.9°	+4.3°

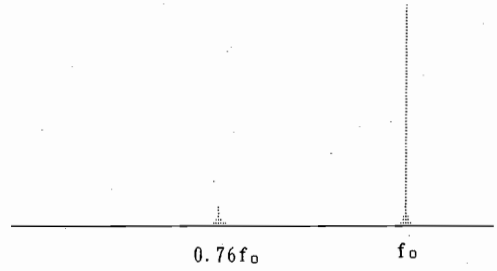
音電力比 SNR を

$$SNR = 10 \log(\sigma_s^2/\sigma_n^2) \quad (16)$$

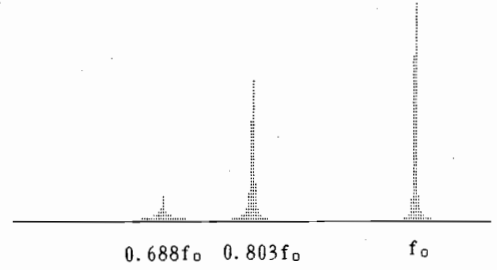
のように定義する。ここに、 σ_s^2 , σ_n^2 はそれぞれ信号の分散と雑音の分散である。SNR が 20 dB のときの推定結果を表 3 に、このときの MEM スペクトルを図 5 に示す。その結果、5° 以内の誤差で推定された。この提案した推定法は雑音に対して割合強いことがわかった。

4.2 検討

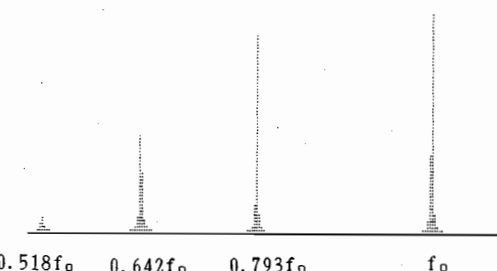
(a) MEM スペクトル推定では、推定の次数をいくつに取るかが問題となる。通常用いられる基準は赤池の FPE (Final Prediction Error) ⁽⁷⁾ である。しかし、ここで取り扱う反射波の場合、データの数がとても少ないので、普通 FPE は明らかな最小値を取らない。筆者らの経験によれば、等価反射源の数が一つの場合はデータの



(a) One reflection source



(b) Two reflection sources



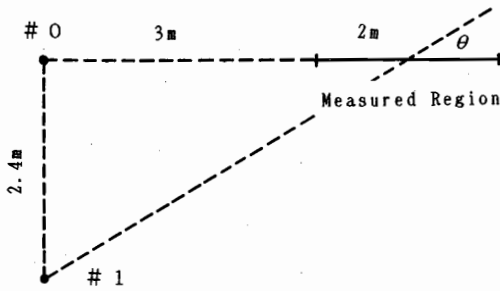
(c) Three reflection sources

図5 MEM スペクトル (SNR=20 dB)

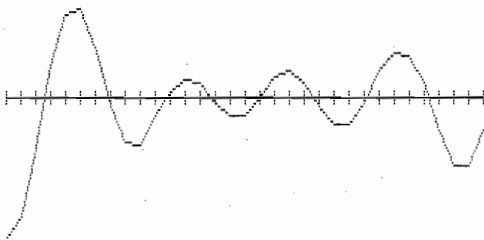
Fig. 5 MEM spectrum (SNR=20 dB).

数 N に対し $N/2$ の程度で、等価反射源の数が二つ以上の場合には $3N/4$ の程度で推定次数を打ち切るのが適切である。

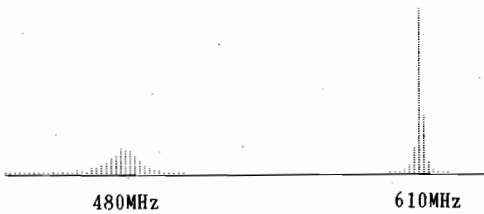
- (b) 図 4, 5 のスペクトルからわかるように、ピークの強さは実際の反射源の強度と合わない。従って、この提案したアルゴリズムではよい精度で反射方向が推定できるが、反射波の強度は推定できない。
- (c) ニュートン・ラフソン法により、逐次的に反射角度を推定するとき、シミュレーションの条件の下で、5 回程度の繰り返しで収束した。
- (d) 空間スペクトルを得るための開口を 5 倍波長より小さくするにつれて、推定誤差は大きくなり、開口が 3 倍波長以下のとき、5° 以上の推定誤差のあることがわかった。また、5 倍波長のデー



(a) The position of antennas and the scanning region of measurement

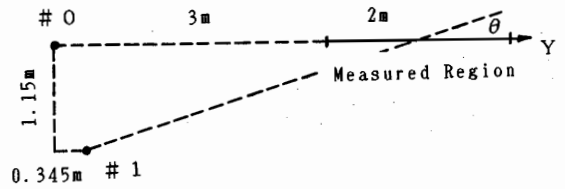


(b) Measured data

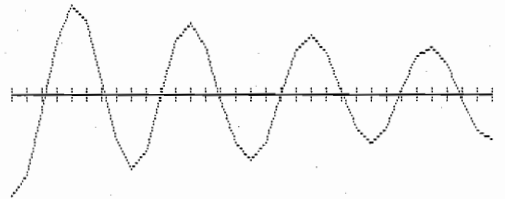


(c) MEM spectrum

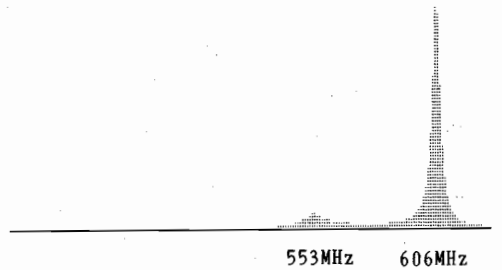
図6 実験1
Fiig. 6 Experiment 1.



(a) The position of antennas and the scanning region of measurement



(b) Measured data



(c) MEM spectrum

図7 実験2
Fig. 7 Experiment 2.

タ開口に対して、推定誤差とサンプリング間隔との関係もシミュレーションによって検討した。その結果、サンプリング間隔は1/4の波長より小さくさえすれば、推定誤差にあまり影響しないことがわかった。

(e) 推定誤差の原因としては、式(8)を導出するために近似式(2)を用いたこと、 $\Delta\theta$ の決め方などが考えられる。

5. 実 験

提案した反射波の方向推定アルゴリズムの実用性を実験により確認する。実験に関する諸元を表4に示す。測定は筆者らが開発した自走式電磁界測定システムを用いた⁽⁶⁾。実験1では、等価反射源として送信源と

表4 実験に関する諸元

実験場所	電波暗室内
周波数	600MHz
送信アンテナ	標準ダイポール(垂直)
センサ	垂直ダイポール
スキャン平面	水平面
発信器	標準信号発生器
検出器	ベクトルボルトメータ

同様のダイポールアンテナを使用した。実験2では、等価反射源として半波長の銅棒を使用した。図6(a)、7(a)にアンテナの配置と測定領域の関係を示した。図6(b)、7(b)にそれぞれの場合の測定データ曲線を示した。図6(c)、7(c)にそれぞれの場合の測定

データの MEM スペクトルを示した。この推定法の応用結果を次に示す。

$$\text{実験 1: } \hat{\theta} = 30.8^\circ \quad \theta = 31.0^\circ$$

$$\text{推定誤差 } \hat{\theta} - \theta = -0.2^\circ$$

$$\text{実験 2: } \hat{\theta} = 18.0^\circ \quad \theta = 17.5^\circ$$

$$\text{推定誤差 } \hat{\theta} - \theta = 0.5^\circ$$

但し、実験 2 の場合、銅棒の配置は壁の反射波をシミュレートする位置と一致していない。つまり、送信源 #0 を通る Y 軸の垂直線から離れている (図 7 (a) を参照)。これに対して、銅棒の Y 座標が既知と仮定し、この推定法を応用した。実験 1 と実験 2 の推定結果からわかるように、高い精度で、等価反射方向が推定された。ここで、筆者らによる提案した反射方向の推定法の実用性が期待できる。

6. むすび

建造物や壁からの電波の不要反射特性を知るために、その反射源の方向を知ることが必要である。そこで、筆者らは測定した電磁界空間分布から反射源の方向を逆算することを試みた。すなわち、電磁界分布の空間スペクトルのピーク周波数 \hat{f} と反射角度 θ の関係式を導出した。空間スペクトルの解析には最大エントロピースペクトル推定法 (MEM) を用いた。また、MEM 法による結果の誤差を補正し、精度を向上するために、ニュートン・ラフソン法を用い、逐次的に改善する方法を合わせて提案した。また、計算機シミュレーションと実験により、その有効性を確認した。シミュレーションの一例では、5 倍波長開口の 40 個データから、 $0.1^\circ \sim 2.9^\circ$ の誤差で方向の推定ができた。実験の一例でも 0.5° の誤差という高い精度で推定ができた。これらの結果により、この推定法は実際の電磁環境の反射波の解析へ応用できる見通しが得られた。反射波の強度推定については稿を改めて述べる。

この推定法の問題点としては、電磁波源と対称な位置にある反射源が弁別できないことなどがある。

謝辞 おわりに、種々御援助頂く東北金属工業株式会社の関係各位に深謝する次第である。なお、本研究の一部は昭和 61 年後期放送文化基金の援助によるものであることを記して謝意を表す。

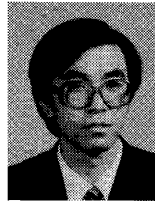
文 献

- (1) W. F. Gabriel: "Spectral analysis and adaptive array superresolution technique", Proc. IEEE, 68, pp. 654-666 (1980-06).
- (2) R. L. Johnson and G. E. Miner: "Comparison of super-

resolution algorithms for radio direction finding", IEEE Trans. Aerosp. & Electron. Syst. AES-22, 4, pp. 432-442 (1986-07).

- (3) W. M. Boerner, et al. (eds.): "Inverse methods in electromagnetic imaging", Part 1, 2, NATO ASI Series, D. Reidel Publ. Co., Dordrecht, Holland (1985).
- (4) 長沢, 菊池, 佐藤: "合成開口法を用いた電磁波源位置推定の実験", 信学論(B), J69-B, 1, pp. 96-107 (昭 61-01).
- (5) 菊池, 長沢: "最大エントロピー法を用いた電磁波源の位置推定", 信学論(B), J69-B, 9, pp. 949-957 (昭 61-09).
- (6) D. G. Childers, (Ed.): "Modern spectrum analysis", IEEE Press (1978).
- (7) 日野幹雄: "スペクトル解析", 朝倉書店 (1977).
- (8) 佐藤, 王, 越後, 高木: "電磁界のホログラフィックパターン自動計測システムの開発", 信学技報, EMCJ87-37 (1987-09).

(昭和 62 年 8 月 26 日受付, 11 月 13 日再受付)



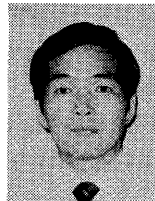
王 建青

昭 59 中国北京工業学院・電子工程卒。昭 60 来日、現在東北大学院通信工学専攻博士前期課程在学中。EMC に関する研究に従事。



佐藤 次男

昭 39 古川工業高・電気卒。昭 42 国家公務員上級試験電子通信職合格。昭 41 宮城工業高等専門学校に勤務し、助手などを経て現在講師。回路・教育工学・EMC の研究に従事。テレビジョン学会、計測自動制御学会会員。



越後 宏

昭 41 東北大・工・通信卒。昭 46 同大学院博士課程了。同年東北大・工・助手。以後、回路通信方式、EMC の研究に従事。現在同大学助教授。電気学会、テレビジョン学会、計測自動制御学会、IEEE 会員、工博。



高木 相

昭 30 九工大・電気卒。昭 35 東北大学院博士課程了。同年東北大・工・助手。以後助教授を経て現在教授。電子計測、EMC、音声、画像信号処理・認識などの研究に従事。昭 54 EMC 国際シンポジウム (オランダ) 論文賞、同年科学計測振興会賞受賞。著書「応用計測通論」、「オプトエレクトロニクスの基礎」、「半導体電子回路」など。本会環境電磁工学専門委員会委員長。電気学会、計測自動制御学会、日本音響学会、テレビジョン学会、IEEE などの会員、工博。