

## 35 スーパーレゾリューション法を用いた高分解能FM-CWレーダについて

佐藤 寛 山田 寛喜 藤本 京平 山口 芳雄 仙石 正和

新潟大学 工学部

## 1. まえがき

地中や雪中にある物体を、レーダを用いて検出する場合要求される性能として、深部まで検出可能であること、高分解能であることが挙げられる。深さ方向の要求に対しては、減衰の少ない低い周波数を使用すること、分解能に対しては高分解能のスペクトル推定法の導入が必要となる<sup>1)</sup>。現在我々の研究室では、FM-CWレーダによる測定を行い、FFTによりビート周波数を求めているが、FFTの距離分解能は掃引周波数帯域幅に依存し、高分解能性の実現には広い周波数帯域幅で動作するレーダシステムが必要となる。そこで、ここでは分解能が帯域幅によらないスーパーレゾリューション法の一手法である Kumaresan-Tufts 法<sup>2)</sup> (以下 KT 法)とする。最小ノルム法とも呼ばれる)を用いたスペクトル推定を行い、その結果について報告する。また、事前に Hilbert 変換を用いたビート信号の複素化を行うことにより本手法の分解能の向上、および、解析パラメータ設定条件の緩和に有効であることを示す。

## 2. スーパーレゾリューション法によるスペクトル解析

FM-CWレーダは線形に周波数変調された連続波を送信信号として物体に照射し物体からの反射信号との合成により得られるビート信号の周波数が物体までの距離に比例することを用いて計測を行うレーダである。反射が距離  $R$  に存在する物体からのものからなる場合を考えるとビート信号  $r_b(t)$  は次式で表される。

$$r_b(t) = A \cos \left[ 2\pi (f_b t + f_0 \tau) \right] \quad (1.a)$$

$$f_b = M \tau = \frac{2\sqrt{\epsilon_r} R}{c} \cdot \frac{\Delta f}{\Delta t} \quad (1.b)$$

ここで  $A$  はビート信号の振幅、 $f_0$  は掃引開始周波数である。ビート周波数  $f_b$  は周波数変調率  $M$  と伝搬遅延時間  $\tau$  の積で表され、さらに、比誘電率  $\epsilon_r$ 、光速  $c$ 、掃引周波数帯域幅  $\Delta f$ 、掃引時間  $\Delta t$  を用いて式(1.b)のように表現できる。したがってビート周波数を求めることにより物体までの距離の検出が可能となる。

スーパーレゾリューション法とは測定により得られたデータの信号と雑音の統計的性質の違いを利用してスペクトル推定を行う手法の総称で、中でも、データから構成される相関行列の固有値解析を用いた手法が特に注目されている。ここではそのうちのひとつである Kumaresan-Tufts 法について検討した。予測次数  $L$ 、信号数の推定値  $M$  としたとき、モードベクトル  $a(f)$  と、相関行列から求めた  $L \cdot M + 1$  個の固有ベクトルを列成分とする行列  $E_N$  を用いてスペクトルを次の関数により推定する。

$$P_{KT}(f) = \frac{a(f)^H a(f)}{a(f)^H d d^H a(f)} \quad (2)$$

$$a(f) = \begin{bmatrix} 1 & e^{j2\pi f} & e^{j2\pi f} & \dots & e^{j2\pi f} \end{bmatrix}^T$$

$$d = \begin{bmatrix} 1 & \frac{E_N c^*}{c^H c} \end{bmatrix}^T$$

ここで、 $c$  は行列  $E_N$  の第 1 行目のベクトル、 $E_N^*$  は  $E_N$  から  $c$  を除いた行列である。 $*$  は複素共役、 $T$  は転置、 $H$  は複素共役転置を表す。 $f=f_0$  のときベクトル  $a$  と  $d$  が直交することにより式(2)は発散し、この位置に鋭いピークが検出される。 $E_N$  が存在するためには  $L \geq M$  を満たさなければならず、これが推定できる信号数の条件となる。

この手法を FM-CWレーダにより得られたビート信号に対して適用することにより、ビート周波数は、ピークの位置より推定される。

3. Hilbert変換<sup>3)</sup>

KT法によるスペクトル解析が高分解能を示すためには、信号数  $M$  (周波数成分の数) が適用条件を満たしていなければならない。地中などでの測定では、地表での反射や、アンテナなどによる多重反射など多数の波が存在していると考えられる。このような場合、Hilbert変換による前処理を行うことにより分解能の向上が期待できる。

前述のビート信号は次のように変形される。

$$r_b(t) = \frac{A}{2} \left( e^{j2\pi(f_b t + f_0 \tau)} + e^{-j2\pi(f_b t + f_0 \tau)} \right)$$

上式から明らかなように、ビート信号は  $+f_b$ 、 $-f_b$  の 2 つの周波数成分から構成されている。KT法は複素データに対して定式化されているため、これらを別々の波として取り扱う。ビートスペクトルは正の周波数領域のみ考慮すればよいので、離散ヒルベルト変換を用いて実信号を複素化する前処理により負の周波数成分を除去したのち、KT法を適用することにより、周波数成分を半減させ、KT法の適用が容易となる。よって Hilbert 変換による不要スペクトル成分 (負の周波数成分) の除去は入射信号数を半減させ、本手法の分解能の向上に効果があるといえる。

## 4. 実験結果

電波暗室内で行った測定データに対する KT法、Hilbert 変換の適用結果を示す。測定状況を図 1、諸元を表 1 に示す。ターゲット A (導体球: 直径 15cm) を固定し、ターゲット B (導体球: 直径 12cm) を 2cm ずつ移動して測定し、周波数スペクトルを求めた。図 2 は KT 法による推定結果 (表中の記号は、 $L$ : 予測次数、 $M$ : 信号数、 $N$ : データ数)、図 3

は同じデータに対するFFTによる推定結果で、ともに横方向にアンテナ開口面からの距離、奥行きにターゲットBの移動距離をとったものである。FFTでは、 $Y = 16\text{cm}$ から2つのピークが分離しはじめるのに対して、KT法では $Y=10\text{cm}$ から分離されており、また、ピークが鋭い形で表されるため、正確な物体の位置を求めることができる。図4は $L$ の値を小さくして適用条件を厳しくしたもの、図5は同じ $L$ の値でHilbert変換による前処理を行ったデータに対してスペクトルを求めたものである。図4では適用条件を満たしていないためモードベクトルと直交するベクトル $d$ が得られず検出できなかったピークが、図5ではHilbert変換により信号数が半減したため、再び正しく検出されるようになっていのが分かる。

5. あとがき

実験により、KT法により高分解能な周波数スペクトル解析が可能なこと、その際にHilbert変換が有効であることが確認できた。今後は他の手法との比較、反射強度の推定などを行う予定である。

参考文献

[1] 山口、仙石、藤本、" 偏波による土壤中埋没物体の高精度検出" 重点領域研究「遺跡探査法の開発研究」総括班「遺跡探査」第2回研究成果検討会議論文集、平成6年  
 [2] Donald W. Tufts and Ramdas Kumaresan: " Estimation of Frequencies of Multiple Sinusoids. Making Linear Prediction Perform Like Maximum Likelihood" . Proc. IEEE, vol.70, no.9, pp.975 -989 (Sep. 1982)  
 [3] Ramdas Kumaresan and Donald W. Tufts: " Estimating the Angles of Arrival of Multiple Plane Waves" , IEEE Trans. Aerosp. Electron. Syst. vol. AES-19, no.1, pp.134-139 (Jan. 1983)  
 [4] A. V. Oppenheim and R. W. Schaffer, 伊達 玄訳 : " デジタル信号処理 (下)" コロナ社, 1978年  
 [5] 山田ほか、" スーパーレゾリューションFM-CWレーダに関する実験的検討"、信学技報、A・P94-27, pp.7-14 (1994-07).

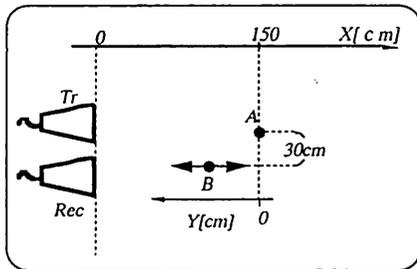


図1 測定状況

表1 FM-CWレーダ諸元

送信・受信アンテナ	角すいホーンアンテナ
掃引周波数	15 GHz ~ 16 GHz
掃引時間	5.1 ms
サンプリング点数	102
RF Power	22 dBm

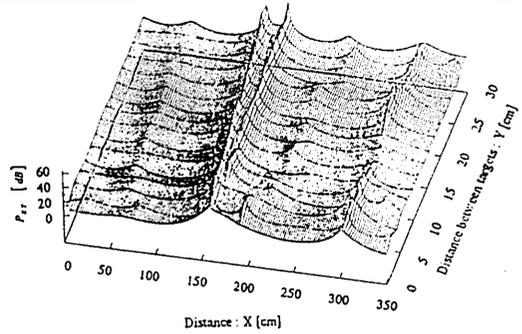


図2 KT法を用いたスペクトル推定結果 ( $L=20, M=8, N=90$ )

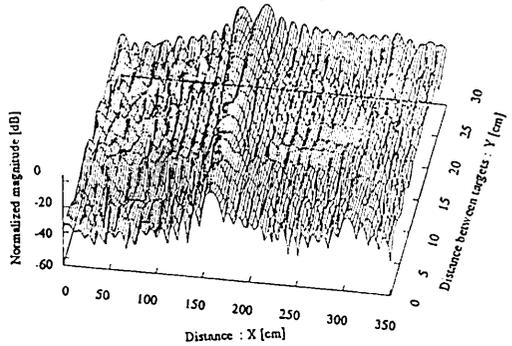


図3 FFTによるスペクトル推定結果

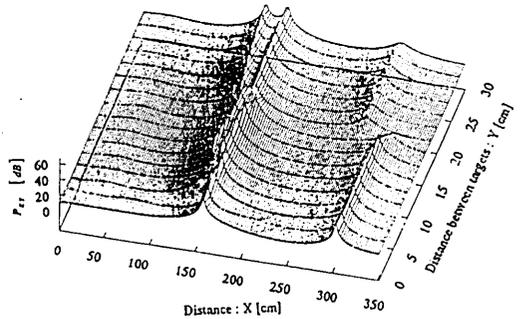


図4 KT法を用いたスペクトル推定結果 (Hilbert変換を行わないとき、 $L=15, M=5, N=70$ )

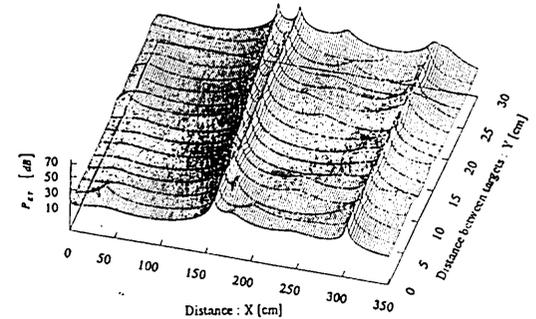


図5 KT法を用いたスペクトル推定結果 (Hilbert変換を行った時、 $L=15, M=5, N=70$ )