SB-1-6 2次元スーパレゾリューション法の分離可能信号数について

On the number of signals resolvable by a two-dimensional superresolution technique

山田 寛喜 吉野 元樹 山口 芳雄
Hiroyoshi YAMADA Motoki YOSHINO Yoshio YAMAGUCHI
新潟大学 工学部
Faculty of Engineering, Niigata University

1. まえがき レーダ，およびモバイル通信の分野では，スーパレゾリューション法に基づくアレー信号処理を用いた高分解能センシングに関する研究が精力的に進められている[1],[2]．特に近年では，アンテナアレーにより得られる空間データに加え，時間，周波数等のデータを含めた多次元信号処理への拡張が検討されている．

例えば，アンテナアレーにより得られた空間，周波数データに対してスーパレゾリューション法を適用する場合，到来方向と遅延時間の推定が可能となる[3],[4]．このような2次元(空間+周波数)データを用いると，同一あるいは近接した到来方向を有する入射波であっても遅延時間が異なる場合ならば，それらの入射波を分離検出することが可能となる．また，空間アレーにおけるスーパレゾリューション法の分離可能信号数は最大，アンテナ素子数 -1 であるが，周波数サンプルデータ(周波数アレー)を加えた2次元データとするとアンテナ素子数以上の入射波の分離検出が可能となる．これは，少ない素子数(自由度の低いアンテナアレー)で数多くの到来波を分離できることを意味し，近年注目されているスマートアンテナに繋がるアレー信号処理である．

MUSIC法などのスーパレゾリューション法は，比較的容易に2次元推定に拡張可能である．そのような検討例がいくつか見られるが，FFTに基づく手法では分離できない近接した信号群に対する分離可能信号数の検討は，ほとんどなされていないようである．そこで本稿では，いくつかの数値計算結果を示し，MUSIC法における空間，周波数データを用いた到来方向，遅延時間推定問題を取り上げ，アレー素子数，サンプリング周波数点数と分離可能信号数の関係(すなわち，空間周波数アレーの自由度)に関して検討する．

2. 2次元MUSIC法 ここでは，結果のグラフ化の容易なMUSIC法を取り上げる．固有値解析に基づく他の手法においても，後述の議論は同様に成立する．さて，アンテナ素子数を N_A，サンプリング周波数点数を N_F とする．ここで k 番目のアンテナ素子により得られる掃引周波数データを

$$r_k = [r_{k1}, r_{k2}, \cdots, r_{kN_F}]^T, \quad k = 1, 2, \cdots, N_A \tag{1}$$

T は転置である．2次元MUSIC法で用いる空間周波数(Spatio-frequency)データベクトル $\boldsymbol{r}$，および，相関行列 $\boldsymbol{R}$ は，下記のように定義される．

$$\boldsymbol{r} = [\boldsymbol{r_1}^T, \boldsymbol{r_2}^T, \cdots, \boldsymbol{r}_{N_A}^T]^T \tag{2}$$

$$\boldsymbol{R} = E[\boldsymbol{r}\boldsymbol{r}^H] \tag{3}$$

ここで $E[\cdot]$ はアンサンブル平均，H は複素共役転置である．到来信号数 d は上記の相関行列の固有値分布から推定される．さらに，個々の到来波の到来方向，遅延時間は次式のピークから推定可能となる．

$$P_{music}(t,\theta) = \frac{\boldsymbol{a}(t,\theta)^H \boldsymbol{a}(t,\theta)}{\boldsymbol{a}(t,\theta)^H \boldsymbol{E}_N \boldsymbol{E}_N^H \boldsymbol{a}(t,\theta)} \tag{4}$$

ここで，$\boldsymbol{a}(t,\theta)$ はモードベクトル，$\boldsymbol{E}_N$ は雑音部分空間である．

3. 数値計算結果 本節では5波が入射するモデル(雑音無し)を考える．それらは全てコヒーレントであり，MUSIC適用の際にはSSPによる相関抑圧処理($M=5$)を施している[3]．一般にアンテナアレーによる到来方向推定では素子数 -1 個の到来方向の推定が可能である．従って $d < N_A - 1$ の場合，正確な到来方向推定が可能である．遅延時間に関しても同様な議論が成立し，$d < N_F$ ならば全ての入射波の遅延時間の推定が可能である．よって，$d < min(N_A, N_F)$ ならば，到来方向，遅延時間とも正確に推定可能となることは自明である．

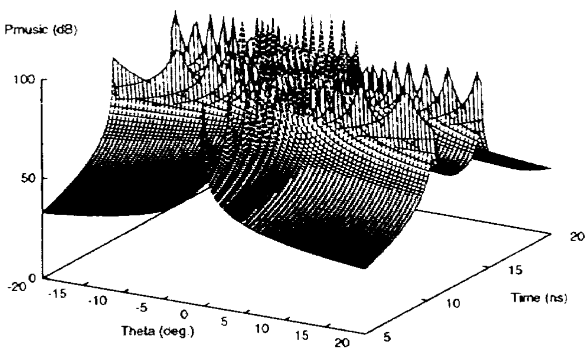
一方，1次元MUSIC法等の手法ではデータアレー長 -1 個の入射波の分離が可能である．その議論を直接，式(2)に適用すると $N_A \times N_F - 1$ 個の入射波の分離が可能であると予想される．しかしながら，図1(a)により，この予想は成立しないことが分る．ここでは $(N_F, N_A) = (3, 2)$，すなわちアレー長を6としている．この図では，信号に対応する5つのピーク以外に多くのスプリアスピークが存在し，実際の信号を識別出来ない．図1(b)，(c)にそれぞれ $(N_F, N_A) = (4, 2)$, $(N_F, N_A) = (3, 3)$ とした場合の推定結果を示す．周波数点数を増加する(図1(b))とスプリアスピークが小さくなり，信号の識別が容易になっている．これらのスプリアスピークは，サンプリング周波数間隔を広げても消失せず，周波数点数 N_F を増加すると消失した．一方，アンテナ素子数を増加した場合では，2次元MUSIC法の推定結果としてよく見られる信号ピークのみが発散した推定結果が得られている．以上より，Spatio-temporal型の相関行列を用いる場合の分離可能信号数に関しては N_A(あるいは N_F)より多くの入射信号が分離可能であるが，1次元MUSIC法の分離可能信号数のような，全アレー長 -1 の議論は成立しないことが分る．詳細な関係については，理論を含めた更なる検討が必要である．

また，分離可能信号数は信号の到来方向，遅延時間にも依存する．図2(a)~(c)は $t = 11$ns に2波，$t = 14$ns に3波の合計5波が存在するモデル(到来方向は全て異なる)を，周波数点数 $N_F = 8$，アンテナ素子数 N_A をそれぞれ2,3,4として推定した結果である．$N_A = 2$ とした図2(a)では対応する遅延時間にピークが現れているが，到来方向は全く推定できていない．$N_A = 3$ で前方の2波が分離され，$N_A = 4$ で後方の3波を含めた全5波が正しく検出された．このことから，同一の伝搬遅延を有する入射波は，$N_A - 1$ 個以下でなければ正しく動作しないと言える(同様に，同一の方向から到来する入射波は，$N_F - 1$ 個以下)．遅延時

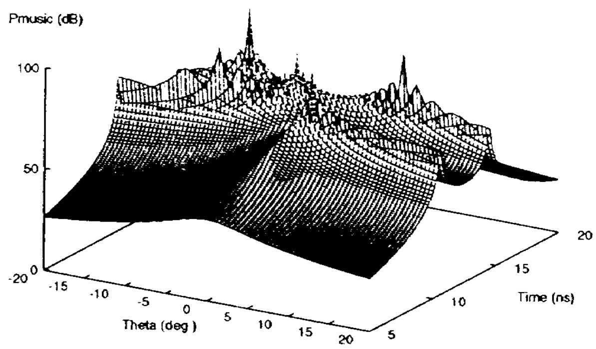
間(到来方向)を同一としたこの関係は一般的なアレー素子数(周波数点数)と分離可能信号数に対応している.

4. むすび 本稿では，2次元スーパレゾリューション法の分離可能信号数に関して，MUSIC法による5波モデルの数値計算結果を用いた考察を行った．その結果，2次元MUSIC法では，アンテナ素子数(あるいは周波数点数)を越えた入射信号の分離検出が可能であるが，入射信号数が，アンテナ素子数，あるいは，周波数点数を越えた場合の分離可能性は，信号の位置にも関係した興味深い関係があることが分った．少ないアレー素子数で多数の信号の分離検出が可能である点は，ハードウェア構成の上では，大きな利点と言えるが，ある程度，入射信号数，分布の様子を踏まえた素子数，周波数点数の設定が必要であると言える.

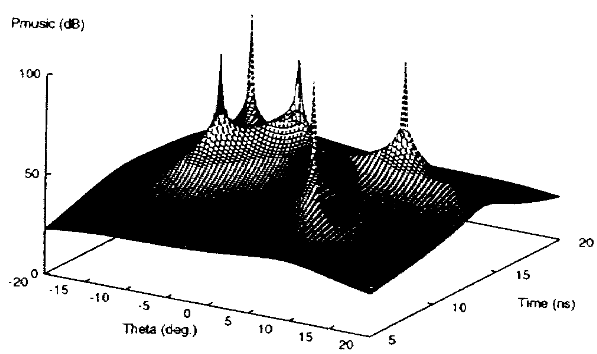
文献 [1] S.Haykin ed., Advances in spectrum analysis and array processing, vols.I–III, Prentice Hall, 1992.
[2] L.C.Godara, "Application of antenna arrays to mobile communications, Part II," Proc.IEEE, vol.85, no.8, pp.1195-1245, Aug. 1997. [3] Y.Ogawa et al., "High-resolution analysis of indoor multipath propagation structure," IEICE Trans. Commun., vol.E-78-B, no.11, pp.1450-1457, Nov. 1995. [4] H.Yamada et al., "High-resolution indoor propagation analysis using a 2-dimensional polarization sensitive MUSIC algorithm," Proc. of MDMC'96, pp.56-60, July 1996.



(a) $(N_F, N_A) = (3, 2)$

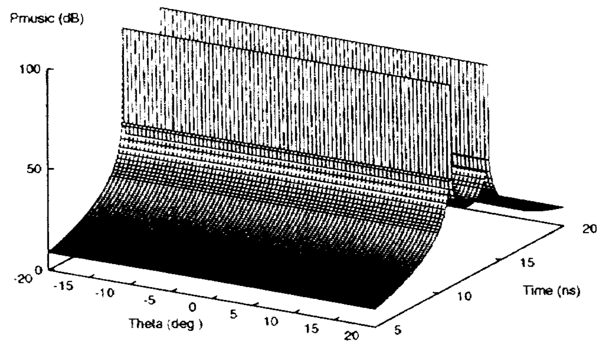


(b) $(N_F, N_A) = (4, 2)$

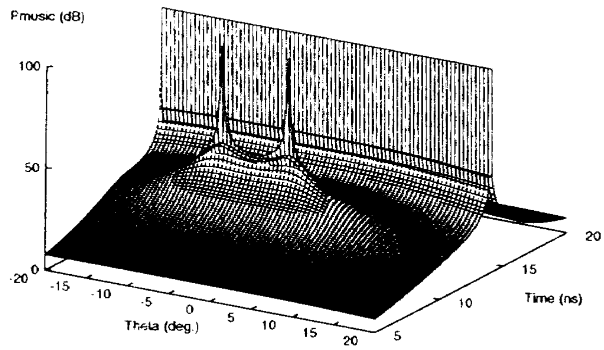


(c) $(N_F, N_A) = (3, 3)$

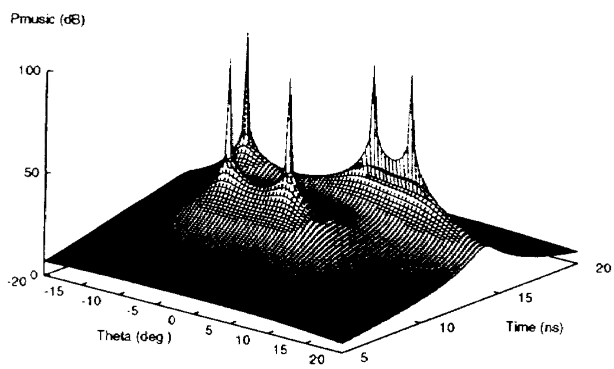
図1. 2次元MUSIC法による到来方向・遅延時間推定(1). 第1周波数点 13 GHz, サンプリング周波数間隔 10 MHz.



(a) $(N_F, N_A) = (8, 2)$



(b) $(N_F, N_A) = (8, 3)$



(c) $(N_F, N_A) = (8, 4)$

図2. 2次元MUSIC法による到来方向・遅延時間推定(2). 第1周波数点 13 GHz, サンプリング周波数間隔 10 MHz.