QR 分解を用いた MENSE 法に基づく到来波数推定 法の改善

新村	剛士†	杉本	和人†(学生員)
菊間	信良 ^{†a)} (正員:フェロー)	平山	裕† (正員)
榊原久	二男†(正員)		

Improvement of MENSE Method for Estimating the Number of Incident Waves with QR Decomposition

Gousi SHINMURA[†]. Nonmember.

Kazuto SUGIMOTO[†], Student Member,

Nobuyoshi KIKUMA^{†a)}, Fellow, Hiroshi HIRAYAMA[†], and Kunio SAKAKIBARA[†], Members

†名古屋工業大学大学院工学研究科情報工学専攻,名古屋市 Department of Computer Science and Engineering, Nagoya Institute of Technology, Nagoya-shi, 466–8555 Japan

a) E-mail: kikuma@m.ieice.org

あらまし 高分解能到来方向推定の実現には、事前 に到来波数が必要である.本論文では QR 分解を用い た到来波数推定法である MENSE 法に改善を加えた改 善法 (I-MENSE) を提案する. 計算機シミュレーショ ンによりその性能を評価し、有効性を示した.

キーワード 到来波数推定, QR 分解, MENSE 法, I-MENSE 法

1. まえがき

近年研究されている MUSIC 等の到来方向推定で は,到来波数が既知であることを前提としている ため、信頼性の高い到来波数推定法の開発が重要な 課題となっている[1]. その到来波数推定法の一つに MENSE (Method of Estimating the Number of Signals without Eigendecomposition) 法 [2] が存在する が. MENSE 法では複数の相関波が到来する場合. 到来波の位相差によって性能が劣化するという問題 がある[5]. そこで本論文では、その改善法として I-MENSE (Improved-MENSE) 法を提案し、計算機シ ミュレーションにより性能評価を行う.

2. アレーアンテナと受信信号

M 素子等間隔リニアアレーに L 波の到来波が入射 する場合を考え、第1波の到来角、モードベクトル、 複素振幅をそれぞれ θ_l , $a(\theta_l)$, $s_l(t)$ $(l = 1, 2, \cdots, L)$ と表す. また、モードベクトル $a(\theta_1)$ は以下のように 表される[1].

$$\boldsymbol{a}(\theta_l) = \left[1, \exp\left(-j\frac{2\pi}{\lambda}d\sin\theta_l\right), \cdots, \\ \exp\left(-j\frac{2\pi}{\lambda}d(M-1)\sin\theta_l\right)\right]^T$$
(1)

ただし λ は波長, dは素子間隔である. このとき, ア レーの受信信号 $x_1(t), \cdots, x_M(t)$ をベクトル表記した 入力ベクトルx(t)は以下のようになる.

$$\boldsymbol{x}(t) = \sum_{l=1}^{L} \boldsymbol{a}(\theta_l) s_l(t) + \boldsymbol{n}(t)$$
(2)

$$= \mathbf{A}\mathbf{s}\left(t\right) + \mathbf{n}(t) \tag{3}$$

$$\boldsymbol{A} = [\boldsymbol{a}(\theta_1), \cdots, \boldsymbol{a}(\theta_L)] \tag{4}$$

$$\boldsymbol{s}(t) = [\boldsymbol{s}_1(t), \cdots, \boldsymbol{s}_L(t)]^T \tag{5}$$

ここで,A は方向行列,n(t) は内部雑音ベクトルで ある.

3. MENSE法

1 0

MENSE 法について説明する [2]. 名前のとおり, 固 有値分解を行わないのが本手法の特徴である.この手 法は完全相関波も対象としているため,空間平均法[1] が用いられている.

M 素子等間隔リニアアレーから K 素子サブアレー (K < M)をN(= M - K + 1)個抽出する. この N 個のサブアレーから4種類の相関ベクトルを以下のよ うに得る.

$$\boldsymbol{\varphi}_{fn} \stackrel{\Delta}{=} E[\boldsymbol{x}_{fn}(t)\boldsymbol{x}_M^*(t)] \tag{6}$$
$$(n = 1, 2, \cdots, N-1)$$

$$\bar{\boldsymbol{\varphi}}_{fn'} \stackrel{\Delta}{=} E[\boldsymbol{x}_{fn'}(t)\boldsymbol{x}_1^*(t)]$$

$$(n' = 2, 3, \cdots, N)$$
(7)

$$\boldsymbol{\varphi}_{bn} \stackrel{\Delta}{=} E[\boldsymbol{x}_1(t)\boldsymbol{x}_{bn}(t)] \tag{8}$$

ΔT

$$(n = 1, 2, \cdots, N - 1)$$
$$\bar{\varphi}_{bn'} \stackrel{\Delta}{=} E[x_M(t) \boldsymbol{x}_{bn'}(t)] \tag{9}$$

$$(n' = 2, 3, \cdots, N)$$

 $\mathbf{r}_{s}(t) = [r_{s}(t), \dots, r_{s}, \dots, (t)]^{T}$ (10)

$$\boldsymbol{x}_{fn}(t) = [x_n(t), \cdots, x_{n+K-1}(t)]$$
(10)

$$\boldsymbol{x}_{bn}(t) = [x_{M-n+1}(t), \cdots, x_{M-K-n+2}(t)]^{2}$$
(11)

上記の4種類の相関ベクトルを全て水平結合した行 列を Φとする. すなわち, 行列 Φの各列ベクトルが式 (6)~式 (9) の相関ベクトルとなる. そして $\Psi = \Phi \Phi^H$ を構成し、その列の順序を入れ換えた行列 [2] を Ψ' と して、これを QR 分解する.得られた R 行列 \hat{R} の成 分を用いて到来波数推定を行う. その際に次式で定義 する関数 ζ(i) を導入する.

$$\zeta(i) \stackrel{\Delta}{=} \sum_{k=i}^{M-K} |\hat{r}_{ik}| + \varepsilon$$

$$(i = 1, 2, \cdots, M - K)$$
(12)

電子情報通信学会論文誌 B Vol. J95-B No.9 pp. 1185-1187 ⓒ一般社団法人電子情報通信学会 2012 1185 ここで \hat{r}_{ik} は $\hat{\mathbf{R}}$ の (i,k) 成分, ε はゼロ割防止のため の微小値である. $\zeta(i)$ は $\hat{\mathbf{R}}$ の i 行成分の 0 以外の列 成分の絶対値を足し合わせたものである. MENSE 法 の基準式 $\xi(i)$ は次のように定義され, ξ が最大とする i の値が到来波数の推定値となる.

$$\xi \stackrel{\Delta}{=} \frac{\zeta(i)}{\zeta(i+1)}$$
(13)
(i = 1, 2, \cdots, K-1)

4. MENSE 法の改善法

MENSE 法を用いた場合,到来する相関波の位相差 によっては,著しく性能が劣化する場合が見られた[5]. そこでこの問題に対処するため MENSE 法で使われ る空間平均法を改善する.

MENSE 法では1素子目及び *M* 素子目と各サブア レーから4種類の相関ベクトルを作成した. I-MENSE 法においては1素子目と *M* 素子目以外の素子にも注 目し,4種類の相関ベクトルを作成する.その際内部 雑音の影響を受けないように同じ素子同士では相関を とらないようにする.以下に式(6)~式(9)を改良し た相関ベクトルを示す.

$$\varphi_{fmn} \stackrel{\Delta}{=} E[\boldsymbol{x}_{fn}(t)\boldsymbol{x}^*_{M-m+1}(t)]$$
(14)
(m = 1, ..., M - K; n = 1, ..., N - m)

$$\bar{\boldsymbol{\varphi}}_{fmn'} \stackrel{\Delta}{=} E[\boldsymbol{x}_{fn'}(t)\boldsymbol{x}_m^*(t)] \tag{15}$$

$$(m = 1, \cdots, M - K; n = m + 1, \cdots, N)$$

$$\boldsymbol{\varphi}_{bmn} \equiv E[\boldsymbol{x}_m(t)\boldsymbol{x}_{bn}(t)] \tag{16}$$

$$(m = 1, \cdots, M - K; n = 1, \cdots, N - m)$$
$$\bar{\boldsymbol{\varphi}}_{bmn'} \stackrel{\Delta}{=} E[\boldsymbol{x}_{M-m-1}(t)\boldsymbol{x}_{bn'}(t)] \tag{17}$$

$$(m = 1, \cdots, M - K; n = m + 1, \cdots, N)$$

上記の4種類の全ての相関ベクトルを水平結合して 行列Φを構成し, MENSE 法と同様の処理を施す[2].

5. 計算機シミュレーションによる性能評価

計算機シミュレーションにより, I-MENSE 法の性 能評価を行う.到来波は2波とし,基本的なシミュ レーション諸元を表1に示す.また,表2~表4にシ ミュレーションに用いた電波環境を示す.なお,本シ ミュレーションでは全て2波が完全相関で到来したと し,2波の位相差がランダムとしてシミュレーション を行った.ここでランダムとは試行ごとにランダムに 位相差を固定することを意味する.評価は検出確率を 用いて行った.検出確率とは全試行の中で到来波が正 しく推定できた割合を表す.図1に SNR に対する検

衣 1	ンミュレーンヨ	「/詴兀
Table 1	Simulation c	onditions.

アレー形状	10 素子等間隔リニアアレー
素子間隔	$\lambda/2$
サブアレーの素子数	5
サブアレーの数	6
試行回数	100

表 2 電波環境 (1) Table 2 Radio environment (1).

入力 SNR	$-10 \sim 15 dB$
スナップショット数	64
到来波数	2
2 波の位相差	試行ごとにランダム
到来角	$(0^{\circ}, 12^{\circ})$
入力電力	$(0\mathrm{dB},0\mathrm{dB})$

表 3 電波環境 (2) Table 3 Radio environment (2).

	. ,
入力 SNR	$-3\mathrm{dB}$
スナップショット数	64
到来波数	2
1 波目の位相	0°
2 波目の位相	$0^{\circ} \sim 360^{\circ}$
到来角	$(0^{\circ}, 12^{\circ})$
入力電力	$(0 \mathrm{dB}, 0 \mathrm{dB})$

表 4 電波環境 (3) Table 4 Radio environment (3).

入力 SNR	$0\mathrm{dB}$
スナップショット数	$1\!\sim\!100$
到来波数	2
2 波の位相差	試行ごとにランダム
到来角	$(0^{\circ}, 12^{\circ})$ or $(0^{\circ}, 7^{\circ})$
入力電力	$(0 \mathrm{dB}, 0 \mathrm{dB})$



Fig. 1 Detection probability vs. SNR (Table 2).







出確率を示す.図2は1波目の位相を基準に2波目の 位相を0°~360°と変化させたときの検出確率である. また,図3,図4はスナップショット数に対する検出 確率である.

図1から、2波の位相差が試行ごとにランダムである 場合、低SNRにおいて MENSE 法に比べ I-MENSE 法が有効であることが分かる.次に図2より I-MENSE 法では2波の位相差による影響を低減できているこ とが確認できる.最後に図3、図4から、低スナップ ショット数においても I-MENSE 法が良好に動作して いることが分かる.特に2波の角度差が小さいときに



両方法の差異が顕著となる.以上より,提案法である I-MENSE 法の有効性を確認することができた.

6. む す び

本論文では,到来波数推定法である I-MENSE 法を 提案し,その性能評価を行った.2 波の完全相関波が どのような位相差であっても,I-MENSE 法が良好に 動作することが示された.今後の課題として,3 波以 上の多数波に対する推定性能の検討,実験による検証, 及び到来方向推定を含めた総合的評価が挙げられる.

文 献

- [1] 菊間信良, アレーアンテナによる適応信号処理, 科学技術 出版, 1998.
- [2] J. Xin, N. Zheng, and A. Sano, "Simple and efficient nonparametric method for estimating the number of signals without eigendecomposition," IEEE Trans. Signal Process., vol.55, no.4, pp.1405–1420, April 2007.
- [3] M. Wax and T. Kailath, "Detection of signal by information theoretic estimation," IEEE Trans. Acoust. Speech Signal Process., vol.ASSP-33, no.2, pp.387– 392, April 1985.
- [4] 辻 真志,梅林健太,神谷幸宏,鈴木康夫,"微弱な相 関波に対する高精度な波数推定法の一検討,"信学技報, A·P2008-160, Jan. 2009.
- [5] 新村剛士,菊間信良,榊原久二男,平山 裕,"QR 分解 を用いた MENSE 法に基づく到来波数推定法の改善に関 する検討,"2011 信学総大, B-1-194, March 2011. (平成 24 年 1 月 6 日受付)