

# 等方的雑音場における結晶型アレイを用いた非線形ビームフォーマ\*

伊藤 信貴, 小野 順貴, 嵯峨山 茂樹 (東大院情報理工)

## 1 はじめに

雑音環境下において, 特定方向から到来する信号を分離取得するアレイ信号処理として, 死角型ビームフォーマ, 適応アレイ等の様々な手法が提案されてきた. これらの従来法は, 方向性雑音の抑圧に対しては有効であるが, 背景雑音や残響等の拡散性雑音の抑圧は困難である. 従って, 拡散性雑音を効果的に抑圧する新しい枠組が望まれる.

我々は前報告 [2] で, 拡散性雑音場のモデルとして等方的雑音場の概念を導入し, 或る特別な対称性を有するアレイ配置に基づく等方的雑音の直交化を経て, 目的信号のパワースペクトルを復元する方法を提案した. 本稿では, この研究を発展させ, 拡散性雑音場の存在下で目的信号を波形として復元する方法を提案する.

## 2 等方的雑音場における結晶型アレイを用いた非線形ビームフォーマ

本節では, 拡散性雑音場の存在下において, 我々が [2] において提案した手法を用いた振幅スペクトルの推定値と, DS 法 (delay-and-sum beamforming) による位相スペクトルの推定値を用いて, 目的信号を波形領域で復元する方法を示す.

### 2.1 問題設定

拡散性雑音場の存在下で, 既知の一方から目的信号 (平面波) が到来するとする. 各マイクロフォンにおける観測信号を並べたベクトルを  $\mathbf{X}_{t,\omega}$  とおくと,

$$\mathbf{X}_{t,\omega} = S_{t,\omega} \mathbf{b}_\omega + \mathbf{N}_{t,\omega} \quad (1)$$

と書ける. ここで,  $S_{t,\omega}$  は目的信号,  $\mathbf{b}_\omega$  はそのステアリングベクトル,  $\mathbf{N}_{t,\omega}$  は各マイクロフォンにおける雑音成分を並べたベクトルである. 紙面の都合上, 引数を添字により表している. 信号  $S_{t,\omega}$  と雑音  $\mathbf{N}_{t,\omega}$  は平均 0 で互いに無相関とする. 式 (1) の両辺の相関行列を取ると,

$$E[\mathbf{X}_{t,\omega} \mathbf{X}_{t,\omega}^H] = E[|S_{t,\omega}|^2] \mathbf{b}_\omega \mathbf{b}_\omega^H + E[\mathbf{N}_{t,\omega} \mathbf{N}_{t,\omega}^H] \quad (2)$$

となる. ここで,  $^H$  は Hermite 転置である.

### 2.2 等方的雑音直交化による振幅スペクトル推定

本小節では, 我々が [2] において提案した等方的雑音直交化に基づく目的信号のパワースペクトルの推定法を簡潔に述べた後, その手法を用いて目的信号の振幅スペクトルの推定値を得る方法を述べる.

我々は [2] において, 拡散性雑音場を, パワースペクトルが任意の点で等しく, クロススペクトルが 2 点間の距離のみによって決まる等方的雑音場としてモデル化し, 等方的雑音場において正多角形, 正多面体等の特別な対称性を有するアレイ配置 (本稿では結晶型アレイと呼ぶ) を用いた場合, 雑音相関行列はその値に依らない定ユニタリ行列により対角化可能であることを示した. その対角化行列 (の 1 つ) を  $P$  とすると, 式 (2) は

$$E[\tilde{\mathbf{X}}_{t,\omega} \tilde{\mathbf{X}}_{t,\omega}^H] = E[|S_{t,\omega}|^2] \tilde{\mathbf{b}}_\omega \tilde{\mathbf{b}}_\omega^H + E[\tilde{\mathbf{N}}_{t,\omega} \tilde{\mathbf{N}}_{t,\omega}^H] \quad (3)$$

と変換される. ここで,  $\tilde{\mathbf{X}}_{t,\omega} \equiv P^H \mathbf{X}_{t,\omega}$ ,  $\tilde{\mathbf{b}}_\omega \equiv P^H \mathbf{b}_\omega$ ,  $\tilde{\mathbf{N}}_{t,\omega} \equiv P^H \mathbf{N}_{t,\omega}$  である.  $E[\tilde{\mathbf{N}}_{t,\omega} \tilde{\mathbf{N}}_{t,\omega}^H]$  は対角行列であり, 従って  $m \neq n$  ならば,

$$E[(\tilde{X}_m)_{t,\omega} (\tilde{X}_n^*)_{t,\omega}] = E[|S_{t,\omega}|^2] (\tilde{b}_m)_\omega (\tilde{b}_n^*)_\omega \quad (4)$$

が成り立つ. ここで,  $*$  は複素共役を表す. 式 (4) により, 理論上は目的信号のパワースペクトル  $E[|S_{t,\omega}|^2]$  が求まるが, 実際には, 期待値を有限時間区間における平均により算出することに起因する誤差, 及び雑音場の等方性からのずれに起因する誤差が存在するため, 最尤法により  $E[|S_{t,\omega}|^2]$  を推定する. 以上が [2] におけるパワースペクトル推定法の概要である.

本稿では, 目的信号の振幅スペクトルの推定値として, 上述の手法により推定されたパワースペクトル  $\hat{\Phi}_{t,\omega}$  の平方根  $\sqrt{\hat{\Phi}_{t,\omega}}$  を用いる. 但し, 上述の手法によるパワースペクトル推定の後処理として,  $\hat{\Phi}_{t,\omega} < 0$  なる bin は, 確からしくないと判断して 0 で置き換えるバイナリマスキングを行う.

### 2.3 DS 法による位相スペクトル推定と目的信号波形の復元

本稿では, 目的信号の位相スペクトルの推定値として, DS 法の出力

$$\hat{S}_{t,\omega}^{\text{DS}} \equiv \frac{1}{M} \mathbf{b}_\omega^H \mathbf{X}_{t,\omega} \quad (5)$$

\* A Nonlinear Beamformer in the Isotropic Noise Field Using Crystal Arrays by ITO, Nobutaka, ONO, Nobutaka, and SAGAYAMA, Shigeki (The University of Tokyo)

の位相を用いる．ここで， $M$  はマイクロフォン数である．

上記の振幅，位相スペクトルの推定値を用いて，目的信号のスペクトログラムの推定値を，

$$\hat{S}_{t,\omega} \equiv \sqrt{\hat{\Phi}_{t,\omega}} \frac{\hat{S}_{t,\omega}^{\text{DS}}}{|\hat{S}_{t,\omega}^{\text{DS}}|} \quad (6)$$

により求める． $\hat{S}_{t,\omega}$  を時間領域に戻せば推定波形が得られる．

尚，位相スペクトルの推定に用いる  $\hat{S}_{t,\omega}^{\text{DS}}$  は， $N_{t,\omega}$  が  $M$  次元複素 Gauss 分布  $\mathcal{N}(0, \sigma^2 I)$  に従うと仮定した場合の  $S_{t,\omega}$  の最尤推定値となっているが， $N_{t,\omega}$  の成分間には一般に相関があるため，その仮定は正しくない．従って， $N_{t,\omega}$  の成分間の相関を考慮に入れて  $S_{t,\omega}$  の位相を最尤推定することにより，性能の向上が見込まれるが，これは今後の課題としたい．

### 3 目的信号の波形分離実験と結果

本節では，等方的雑音場において，提案法により既知の方向から到来する目的信号の波形を分離するシミュレーションの結果を述べる．比較のため，DS法，MV法 (minimum variance beamforming) [1] による結果も示す．

Fig. 1 に実験の設定を図示する． $xy$  平面内， $x$  軸からの偏角  $\frac{360^\circ}{64}j$  ( $j = 0, \dots, 63$ ) の 64 方向から到来する白色雑音または相異なる音声の平面波により，等方的雑音場をシミュレートした．目的信号としては， $xy$  平面内， $x$  軸からの偏角  $60^\circ$  の方向から到来する音声の平面波を加えた．音声は ATR の音声データベース B セットの連続音声をサンプリング周波数 16kHz に変換したものをを用いた．使用したアレイは，半径 0.1 m，各マイクロフォンの座標が  $(0.1 \cos(90^\circ m), 0.1 \sin(90^\circ m))$  (m) ( $m = 0, 1, 2, 3$ ) の正方形アレイである．分析条件はフレーム長  $2^8$  点，フレームシフト  $2^4$  点，窓関数は Hamming 窓とした．以上の条件の下，白色雑音，音声雑音のそれぞれの場合について，観測信号の SN 比を 5.0dB，0.0dB，-5.0dB と変えて，提案法，DS法，MV法の各手法により目的信号を波形分離した．尚，提案法におけるパワースペクトル推定では，雑音相関行列を対角化する行列として DFT 行列を用い， $2^4$  フレーム毎に推定を行い，最尤法の反復計算回数は 15 回とした．また，MV法において，観測信号の相関行列は全観測区間に互る平均により算出し，その逆行列の算出の際には正則化を行い，正則化パラメータは結果が最良となるように調節した．

Table 1 に結果を示す．(a)，(b) は，それぞれ雑音として白色雑音，音声を用いた場合の結果である．提案法が他の 2 つの手法より高い SN 比を示している．

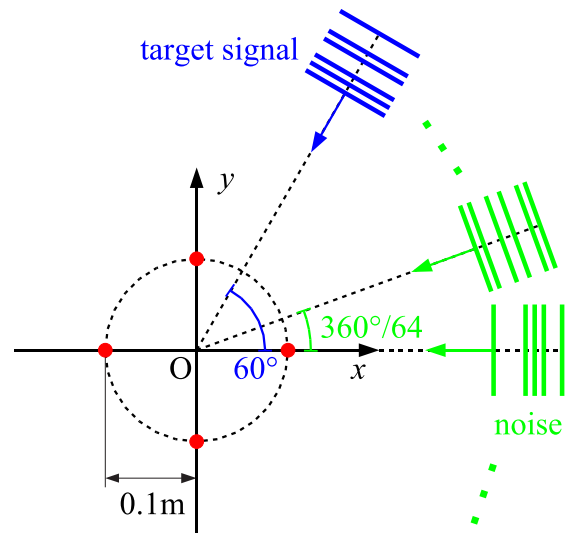


Fig. 1 実験の設定．赤い点がマイクロフォンを表す．

Table 1 提案法，DS法，MV法による推定波形の SN 比 [dB]．(a)：雑音として白色雑音を用いた場合，(b)：雑音として音声を用いた場合．

(a) white noise			
observed	5.0	0.0	-5.0
proposed	11.7	8.7	4.6
delay-and-sum	9.4	4.8	-0.2
minimum variance	9.5	5.1	0.5
(b) vocal noise			
observed	5.0	0.0	-5.0
proposed	9.6	5.8	1.3
delay-and-sum	7.0	2.1	-3.0
minimum variance	9.1	5.1	0.3

### 4 おわりに

本稿では，拡散性雑音場の存在下で，特定の一方から到来する目的信号波形を取得する非線形ビームフォーマを提案した．シミュレーションにより，提案法は DS法，MV法よりも拡散性雑音の抑圧能力が高いことが示された．今後，更なる性能の向上を図る予定である．

### 参考文献

- [1] D. H. Johnson et al., Array signal processing, Prentice Hall, 1993.
- [2] 清水他，日本音響学会春季研究発表会，2-1-12，in CD-ROM，3月，2007．