

音声劣化を許容した GSC と AMNOR における特性比較検討*

☆森一馬, 金田豊 (東京電機大)

1 はじめに

適応形マイクロホンアレーの一つの制御指針として音声(目的音)劣化を許容することで大きな雑音抑圧性能を得る手法がある。その代表例として AMNOR (Adaptive Microphone array for NOise Reduction)[1]が提案されている。一方, 目的音を劣化させない手法の代表例である GSC[2]に対しても目的音の劣化を許容することで大きな雑音抑圧量を得る試みがなされており, その代表例として, SP-SDR-MWF (Spatially Pre-processed Speech Distortion Regularized Multichannel Wiener Filter) [3]が提案されている。

本稿では, AMNOR と SP-SDR-MWF の特性比較を行い, 両手法の理論的關係を明確化することを目的とする。

2 適応形マイクロホンアレー

2.1 AMNOR の原理

図 1 に AMNOR の原理図を示す。AMNOR は, M 素子のマイクロホンと, 各チャンネルに接続された雑音抑圧フィルタ, フィルタ係数演算部から構成される。受信された信号 $u_i (i = 1, 2, \dots, M)$ は各フィルタ h_i を通した後, 総和を取って出力を得る。

AMNOR のフィルタ係数ベクトル \mathbf{h} は次式で与えられる。

$$\mathbf{h} = (\lambda^2 \mathbf{R}_S + \mathbf{R}_N)^{-1} \lambda^2 \mathbf{S}_X \quad (1)$$

ただし, \mathbf{R}_S は事前に学習する目的音方向の受信信号(もしくは受信をシミュレートした信号)の相関行列, \mathbf{R}_N は事前に学習する雑音の相関行列, \mathbf{S}_X は \mathbf{R}_S の一つの列ベクトル, λ は目的音の劣化量を制御するためのパラメータである。AMNOR は, 拘束条件として目的音の劣化許容量を設定し, その条件下で雑音を最小化するフィルタを形成する。

2.2 SP-SDR-MWF の原理

図 2 に SP-SDR-MWF の原理図を示す。SP-SDR-MWF は, M 素子のマイクロホンと, 固定ビームフォーマ, 目的音除去を目的とし

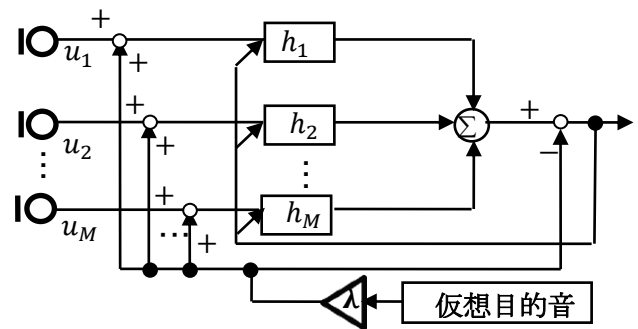


Fig. 1 AMNOR の原理図

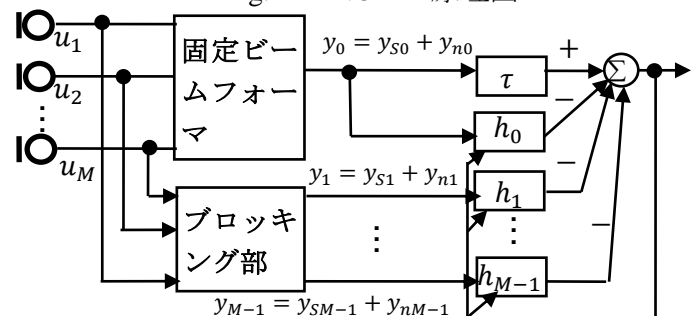


Fig. 2 SP-SDR-MWF の原理図

たブロッキング行列, それぞれの後段に接続された雑音抑圧フィルタから構成される。

SP-SDR-MWF のフィルタ係数ベクトル \mathbf{h} は次式で与えられる。

$$\mathbf{h} = \left(\frac{1}{\mu} \mathbf{R}_S' + \mathbf{R}_N' \right)^{-1} \mathbf{N}_X \quad (2)$$

ただし, \mathbf{R}_N' は事前に学習する雑音 $y_{ni} (i = 0, 1, \dots, M-1)$ の相関行列である。また, \mathbf{R}_S' は目的音 $y_{si} (i = 0, 1, \dots, M-1)$ の相関行列で, 実際には雑音の定常性を仮定して, 受信信号の相関行列から雑音の相関行列を差引くことで推定する。 \mathbf{N}_X は雑音ベクトルと固定ビームフォーマの雑音出力 y_{n0} との相関ベクトル, μ は目的音の劣化量を制御するパラメータである。SP-SDR-MWF は, パラメータ μ の値を変えることにより, AMNOR 同様に目的音の劣化を許容し, 大きな雑音抑圧量を得る。

3 AMNOR と SP-SDR-MWF の特性

AMNOR と SP-SDR-MWF の関係性を調べるために, 両手法の出力を周波数領域で理論的に検討した。検討条件は 2 素子アレーで, 目的音はアレーの軸に対して垂直な方向から到来して同一信号 $U_S(\omega)$ として受信されると

* A study of performance comparison between GSC allowing speech degradation and AMNOR, by MORI, Kazuma and KANEDA, Yutaka (Tokyo Denki University).

し、各マイクロホンで受信される雑音はそれぞれ $U_{N1}(\omega)$, $U_{N2}(\omega)$ とした。

3.1 AMNOR の理論検討

AMNOR のフィルタ係数計算で使われる目的音成分の相関行列 $\mathbf{R}_S(\omega)$, 雑音の相関行列 $\mathbf{R}_N(\omega)$, 目的音の相関ベクトル $\mathbf{S}_X(\omega)$ は次式で計算される。ただし、以降の計算式の中では簡単のために周波数変数 (ω) は省略する。

$$\mathbf{R}_S = E \left[\begin{pmatrix} U_S \\ U_S \end{pmatrix} (U_S^* \quad U_S^*) \right]$$

$$\mathbf{R}_N = E \left[\begin{pmatrix} U_{N1} \\ U_{N2} \end{pmatrix} (U_{N1}^* \quad U_{N2}^*) \right]$$

$$\mathbf{S}_X = E \left[\begin{pmatrix} U_S \\ U_S \end{pmatrix} U_S^* \right]$$

ただし、 \cdot^* は複素共役を表す。ここで、 $P_S =$

$$E [U_S U_S^*], \quad P_N = E [U_{N1} U_{N1}^*] = E [U_{N2} U_{N2}^*],$$

$\Phi_N = E [U_{N1} U_{N2}^*]$ ($E[\cdot]$ は期待値) と置くと、

AMNOR のフィルタの周波数特性 $\mathbf{H}(\omega)$ は次式で表せる。

$$\mathbf{H} = (\lambda^2 \mathbf{R}_S + \mathbf{R}_N)^{-1} \lambda^2 \mathbf{S}_X = \frac{1}{B} \begin{pmatrix} P_N - \Phi_N \\ P_N - \Phi_N^* \end{pmatrix}$$

$$B = (2P_N - (\Phi_N + \Phi_N^*)) + \frac{P_N^2 - \Phi_N \Phi_N^*}{\lambda^2 P_S}$$

そして、目的音と雑音の出力パワー、 $P_{Sout}(\omega)$ と $P_{Nout}(\omega)$ は以下ようになる。

$$P_{Sout} = \mathbf{H}^H \mathbf{R}_S \mathbf{H} = \frac{P_S (2P_N - (\Phi_N + \Phi_N^*))^2}{B^2}$$

$$P_{Nout} = \mathbf{H}^H \mathbf{R}_N \mathbf{H} = \frac{(P_N^2 - \Phi_N \Phi_N^*) (2P_N - (\Phi_N + \Phi_N^*))}{B^2}$$

ただし、 \cdot^H は共役転置を表す。

3.2 SP-SDR-MWF の理論検討

SP-SDR-MWF のフィルタ係数計算で使われる目的音成分の相関行列 $\mathbf{R}'_S(\omega)$, 雑音の相関行列 $\mathbf{R}'_N(\omega)$, 雑音のベクトル $\mathbf{N}_X(\omega)$ は次式で計算される。

$$\mathbf{R}'_S = E \left[\begin{pmatrix} \frac{U_{S1} + U_{S2}}{2} \\ \frac{U_{S1} - U_{S2}}{2} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \frac{U_{S1}^* + U_{S2}^*}{2} & \frac{U_{S1}^* - U_{S2}^*}{2} \end{pmatrix} \right]$$

$$\mathbf{R}'_N = E \left[\begin{pmatrix} \frac{U_{N1} + U_{N2}}{2} \\ \frac{U_{N1} - U_{N2}}{2} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \frac{U_{N1}^* + U_{N2}^*}{2} & \frac{U_{N1}^* - U_{N2}^*}{2} \end{pmatrix} \right]$$

$$\mathbf{N}_X = E \left[\begin{pmatrix} \frac{U_{N1} + U_{N2}}{2} \\ \frac{U_{N1} - U_{N2}}{2} \end{pmatrix} \frac{U_{N1}^* + U_{N2}^*}{2} \right]$$

$\Phi_S = E [U_{S1} U_{S2}^*]$ とおくと、SP-SDR-MWF のフィルタの周波数特性 $\mathbf{H}'(\omega)$ は次式で表せる。

$$\mathbf{H}' = \left(\frac{1}{\mu} \mathbf{R}'_S + \mathbf{R}'_N \right)^{-1} \mathbf{N}_X = \frac{1}{A'} \begin{pmatrix} H_0 \\ H_1 \end{pmatrix}$$

$$H_0 = \frac{1}{\mu} (P_S P_N + \frac{P_S}{2} (\Phi_N + \Phi_N^*) - \frac{P_N}{2} (\Phi_S + \Phi_S^*)$$

$$- (\frac{\Phi_S \Phi_N^*}{2} + \frac{\Phi_S^* \Phi_N}{2})) + (P_N^2 - \Phi_N \Phi_N^*)$$

$$H_1 = 1/\mu (\frac{P_S}{2} (\Phi_N - \Phi_N^*) - \frac{P_N}{2} (\Phi_S - \Phi_S^*)$$

$$+ \frac{\Phi_S^* \Phi_N}{2} - \frac{\Phi_S \Phi_N^*}{2}$$

$$A' = 1/\mu (2P_S P_N - (\Phi_S^* \Phi_N + \Phi_S \Phi_N^*))$$

$$+ 1/\mu^2 (P_S^2 - \Phi_S \Phi_S^*) + (P_N^2 - \Phi_N \Phi_N^*)$$

ここで、 $U_{S1} = U_{S2}$ である場合、ブロッキング部が目的音を完全に除去でき、 $\Phi_S = \Phi_S^* = P_S$ となって、目的音と雑音の出力パワー $P'_{Sout}(\omega)$ および $P'_{Nout}(\omega)$ は以下ようになる。

$$P'_{Sout} = \mathbf{H}'^H \mathbf{R}'_S \mathbf{H}' = \frac{P_S (2P_N - (\Phi_N + \Phi_N^*))^2}{B'^2}$$

$$P'_{Nout} = \mathbf{H}'^H \mathbf{R}'_N \mathbf{H}'$$

$$= \frac{(P_N^2 - \Phi_N \Phi_N^*) (2P_N - (\Phi_N + \Phi_N^*))}{B'^2}$$

$$B' = (2P_N - (\Phi_N + \Phi_N^*)) + \frac{\mu (P_N^2 - \Phi_N \Phi_N^*)}{P_S}$$

この結果に対し、 $\lambda^2 = 1/\mu$ とおくと、AMNOR と SR-SDR-MWF は、目的音と雑音に対する特性が同一のものであることがわかる。

4 むすび

本稿では、音声劣化を許容した二つの適応形マイクロホンアレー方式の、AMNOR と SP-SDR-MWF の特性比較を理論的に行った。その結果、各受信目的音が等価のため、SP-SDR-MWF のブロッキング部が目的音を完全に除去できる場合において、両手法は目的音および雑音の出力特性が同一になることがわかった。

参考文献

- [1] Y. Kaneda and J. Ohga, IEEE Trans. ASSP, vol. ASSP-34, no. 6, pp. 1391-1400, Dec. 1986.
- [2] L. J. Griffiths and C. W. Jim, IEEE Trans. ASSP, vol. AP-30, no. 1, pp. 284-290, Jan. 1982.
- [3] A. Spriet *et al.*, Signal Processing, 84, 12, pp. 2367-2387, December 2004.