

適応形雑音抑圧マイクロホンアレーの雑音抑圧機能の検討

大泉 裕磨[†] 金田 豊[‡]

[†] [‡] 東京電機大学大学院工学研究科 〒120-8551 東京都足立区千住旭町 5 番

E-mail: { [†] 13kmc05@ms, [‡] kaneda@c }.dendai.ac.jp

あらまし 適応形雑音抑圧マイクロホンアレー (AMNOR : Adaptive Microphone Array for Noise Reduction) は目的音の劣化を設定した値 (劣化許容量) に保ちながら、雑音を最小化する。そして、劣化許容量を大きくするほど雑音を大きく抑圧できるが、その際、AMNOR の雑音抑圧機能 (指向特性、フィルタ特性) がどのように変化するのか検討されてこなかった。そこで、本研究ではこの点について検討し、その結果、劣化許容量を最小値から最大値へ変化させた際に AMNOR の雑音抑圧機能が、1) 加算形アレー、2) 減算形アレー (帯域別 SN 比最大化処理) + 目的音の劣化補正、3) 減算形アレー + 直流成分を除いた目的音の劣化補正、4) 減算形アレー + ウィナーフィルタ、の各処理に変化することをシミュレーションより確認した。

キーワード 適応形雑音抑圧マイクロホンアレー、AMNOR、雑音抑圧、ウィナーフィルタ

A Study of Noise Reduction Function of Adaptive Microphone Array for Noise Reduction

Yuma OIZUMI[†] and Yutaka KANEDA[‡]

[†] [‡] Graduate School of Engineering, Tokyo Denki University, 5 Senju-asahi-cho, Adachi-ku, Tokyo 120-8551, Japan

E-mail: { [†] 13kmc05@ms, [‡] kaneda@c }.dendai.ac.jp

Abstract An adaptive microphone array for noise reduction (AMNOR) minimizes a noise while limiting the degradation of a target sound to an acceptable level (called acceptable degradation: (AD)). When we set a large AD, noise can be greatly suppressed. However, the noise suppression function (directional characteristic and filter characteristic) of an AMNOR when the AD is changed has not been investigated. In this study, we examine the noise suppression function of an AMNOR, when the AD is changed from the minimum value to the maximum value. Then, it is shown that the noise suppression function of AMNOR changes with a change in the AD as follows; 1) delay and sum array, 2) subtraction array and compensation filter, 3) subtraction array and compensation except for zero frequency, 4) subtraction array and the Wiener filter.

Key words adaptive microphone array for noise reduction, AMNOR, noise reduction, wiener filter

1 はじめに

適応形雑音抑圧マイクロホンアレー (AMNOR : Adaptive Microphone Array for Noise Reduction)[1][2] は目的音の劣化を設定した値 (劣化許容量) に保ちながら、雑音を最小化する。そして、劣化許容量を大きくするほど雑音を大きく抑圧できるが、その際、AMNOR の雑音抑圧機能 (指向特性、フィルタ特性) がどのように変化するのか検討されてこなかった。そこで、本研究では劣化許容量を変化させたときの AMNOR の雑音抑圧機能の変化を検討した。

2 AMNOR の概要

AMNOR は目的音と雑音の到来方向を考慮したアレー処理である。このシステムは以下の 2 つの条件から目的音と雑音の到来方向を学習することで指向性を制御し、設定された劣化許容量を満たす条件で雑音を最小化するフィルタを作成する。

(条件 1) 目的音の到来方向が既知

(条件 2) 雑音のみの受音が可能

Fig. 1 に AMNOR の構成図を示す。AMNOR は M 個のマイクロホンからなるマイクロホンアレーと、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。マイクロホンで受音した信号 u_i , $i = 1, 2, 3, \dots, M$ は各 FIR フィルタ h_i を通した後、総和をとって出力 y を得る。このとき、FIR フィルタ係数 h と目的音の劣化量 D は次式で求められる。

$$h(\lambda) = (\lambda R_S + R_N)^{-1} \lambda S_X \quad (1)$$

$$D(\lambda) = \frac{P_S - 2h(\lambda)^T S_X + h(\lambda)^T R_S h(\lambda)}{P_S} \quad (2)$$

マイクロホンアレー 雑音抑圧フィルタ

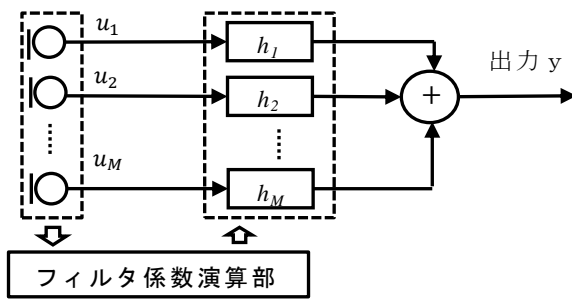


Fig. 1 AMNOR の構成図

ただし、目的音の劣化量 D は、目的音に対する AMNOR の周波数応答の平坦特性から 2 乗偏差を仮想目的音のスペクトルで荷重し、平均したものである [3]。また、 R_S は条件 1 を利用して目的音の受音を模擬した仮想目的音 $u_{Si}(n)$, $i = 1, 2, 3, \dots, M$ の相関行列、 R_N は条件 2 より取得した雑音 $u_{Ni}(n)$, $i = 1, 2, 3, \dots, M$ の相関行列であり、これらは仮想目的音 $u_{Si}(n)$ と雑音 $u_{Ni}(n)$ をベクトルで表した $u_S(n), u_N(n)$ を用いて以下のように定義される。

$$R_S = \overline{u_S(n)u_S(n)^T}$$

$$R_N = \overline{u_N(n)u_N(n)^T}$$

$$u_S(n) = [u_{S1}(n-L), u_{S1}(n-L+1), \dots, u_{S1}(n), u_{S2}(n-L), \dots, u_{S2}(n), \dots, u_{SM}(n-L), \dots, u_{SM}(n)]^T$$

$$u_N(n) = [u_{N1}(n-L), u_{N1}(n-L+1), \dots, u_{N1}(n), u_{N2}(n-L), \dots, u_{N2}(n), \dots, u_{NM}(n-L), \dots, u_{NM}(n)]^T$$

L : フィルタ次数

また、式(1)(2)における S_X は R_S の 1 つの列ベクトル、 P_S は仮想目的音 1 チャンネル当たりのパワー、 λ はフィルタ係数 $h(\lambda)$ と目的音の劣化量 $D(\lambda)$ を制御するパラメータである。

3 パラメータ λ と雑音抑圧機能

AMNOR 処理において、目的音の劣化量 $D(\lambda)$ と次式で定義する目的音出力パワーで正規化した出力雑音パワー $P_N(\lambda)$ (出力 SN 比の逆数に相当。以下、雑音レベルと呼ぶ)

$$P_N(\lambda) = 10 \cdot \log_{10} \left(\frac{h(\lambda)^T R_N h(\lambda)}{h(\lambda)^T R_S h(\lambda)} \right) \quad (3)$$

はトレードオフ関係を持つ。そして、このトレードオフ関係はパラメータ λ によって制御される。

この λ, D, P_N の関係を Table 1 および、Fig. 2 に示した 2 マイク系の条件で求めた結果を Fig. 3 に示す。なお、本実験では実環境における電気ノイズを模擬するために各チャンネルに無相関ノイズ ($=10^{-8}$) を付加している。図より λ の値を大きくすると目的音の劣化量は小さ

Table 1 シミュレーション条件

サンプリング周波数	8000 Hz
仮想目的音	白色雑音 (サンプルずれなし)
目的音	白色雑音 (サンプルずれなし)
雑音	白色雑音 (1 サンプルずれ)
フィルタタップ数	32 ($L = 31$)
λ の範囲	$10^{-12} \sim 10^{10}$

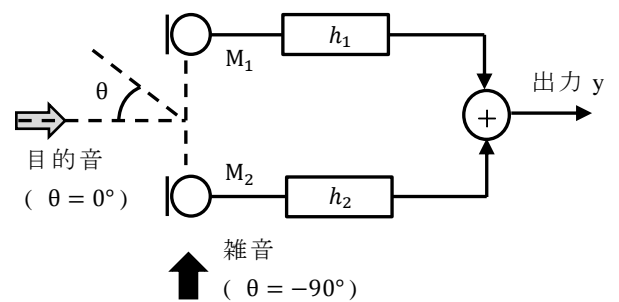


Fig. 2 シミュレーションにおける AMNOR の構成図

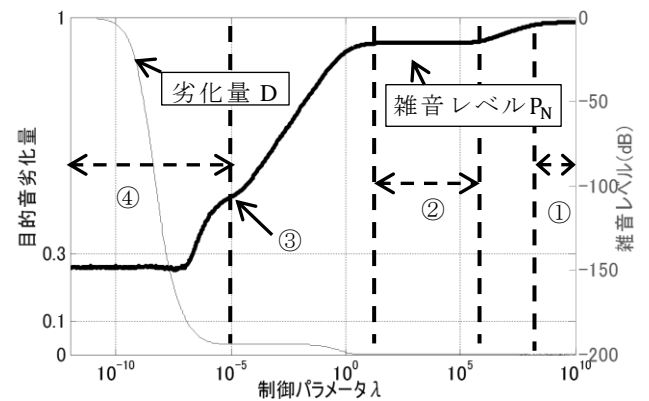


Fig. 3 2 マイク系の AMNOR のトレードオフ関係

く、雑音レベルは大きくなり、逆に λ の値を小さくすると目的音の劣化量は大きく、雑音レベルは小さくなるのがわかる。

このとき、 λ の値による雑音レベルの変化は一定ではなく、それぞれの λ の値で特徴的な変化をしている。これは λ の値によって異なった雑音抑圧機能(指向特性、フィルタ特性)が行われているためだと考えられる。次節では雑音抑圧機能を解析するために、従来の代表的な雑音抑圧機能について説明する。

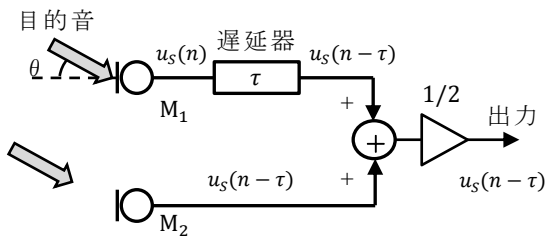


Fig. 4 2マイク系の加算形アレーの構成図

4 代表的な雑音抑圧機能

4.1 加算形アレー

加算形アレーは目的音の到来方向のみを考慮したアレー処理である。この処理は各マイクロホンで受信した目的音の時間差を遅延器により無くし(同位相化)、総和をとることで目的音を強調し、また、他方向から到来する非同相な雑音の影響を小さくする。

Fig. 4に2マイク系の場合の加算形アレーの例を示した。目的音が正面($\theta = 0^\circ$)方向から到来する場合は2マイクの受信信号を単純に加算する処理となる。

加算形アレーは目的音を劣化させずに雑音の影響を小さくするという特徴を持つ。

4.2 減算形アレー

減算形アレーは雑音の到来方向のみを考慮したアレー処理である。この処理は各マイクロホンで受信した雑音の位相を遅延器により同位相化し、減算することで雑音を抑圧する。

Fig. 5に2マイク系の減算形アレーの例を示した。減算形アレーは雑音に着目した処理であるため、雑音の抑圧量は大きい、目的音に劣化が発生するという特徴を持つ。

4.3 ウィナーフィルタ[4]

ウィナーフィルタは1チャンネルの代表的な雑音抑圧処理であり、次式で表す周波数特性 $H(\omega)$ を持つ。

$$H(\omega) = \frac{P_{S0}(\omega)}{P_{S0}(\omega) + P_{N0}(\omega)} = \frac{P_{S0}(\omega)/P_{N0}(\omega)}{P_{S0}(\omega)/P_{N0}(\omega) + 1} \quad (4)$$

ただし、 $P_{S0}(\omega), P_{N0}(\omega)$ はそれぞれ目的音および、雑音のパワースペクトルを表す。この $H(\omega)$ はSN比($= P_{S0}(\omega)/P_{N0}(\omega)$)が十分に大きい($\gg 1$)帯域では $H(\omega) \approx 1$ となり、周波数成分を変化させないが、SN比が小さい($\ll 1$)帯域では $H(\omega) \approx P_{S0}(\omega)/P_{N0}(\omega)$ となってSN比に比例した減衰量を与える。ただし、各周波数に含まれる雑音と目的音はともに抑圧されるため、各周波数帯域におけるSN比は変化しない。

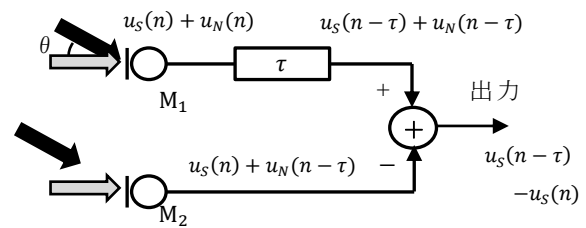


Fig. 5 2マイク系の減算形アレーの構成図

5 AMNORの λ と雑音抑圧機能の検討

本研究ではFig. 3で示した2マイク系のAMNORの雑音レベル P_N と目的音劣化量 D とのトレードオフ関係において、特徴的な雑音抑圧機能の変化があった①から④における λ の値で特性の検討を行った。

① Fig. 6に $\lambda = 10^{10}$ のときのFIRフィルタ h_1, h_2 のフィルタ係数(=インパルス応答)および、その周波数振幅特性を示す。Fig. 6(a)において、32個のフィルタ係数は○で示したものであるが、それを理解しやすくするために10倍補間したものを曲線で示している。以降、フィルタ係数は補間曲線のみで表すものとする。

図において h_1 と h_2 はほぼ同一であるため、両者は重なって区別がつかない。そして、このフィルタ係数による処理は両チャンネルの受信信号を0.5倍して加算するものとなる。よって、このときの処理は目的音方向 $\theta = 0^\circ$ とした加算形アレーであることがわかる。

この処理による目的音および、雑音に対する周波数応答をFig. 7に示す。図より目的音が全帯域で平坦となっており、目的音の劣化がないが、高域以外の帯域ではあまり雑音低減効果が得られていないことがわかる。

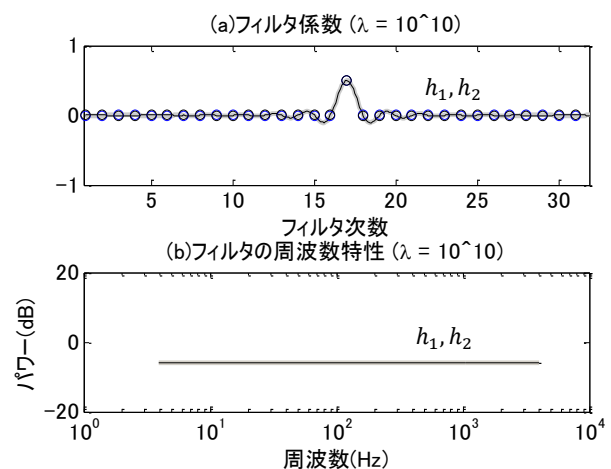


Fig. 6 ①のときのフィルタ特性

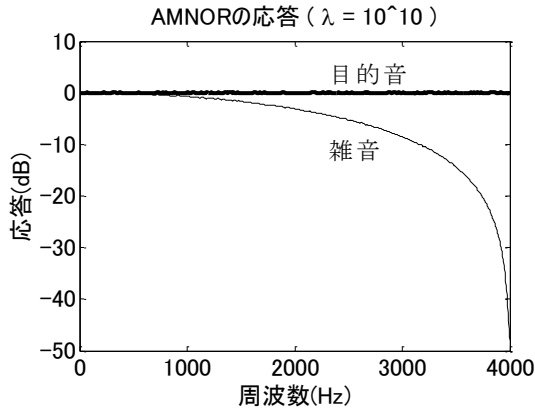


Fig. 7 ①の周波数応答特性

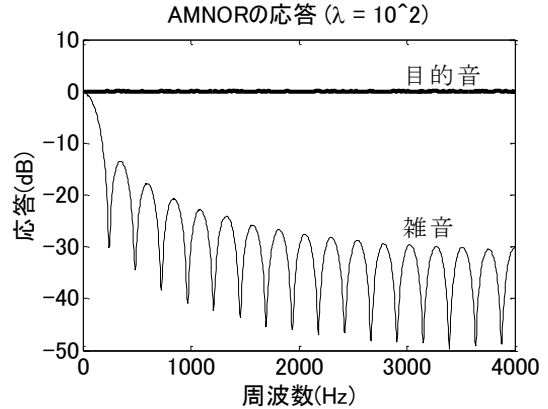


Fig. 11 ②の周波数応答特性

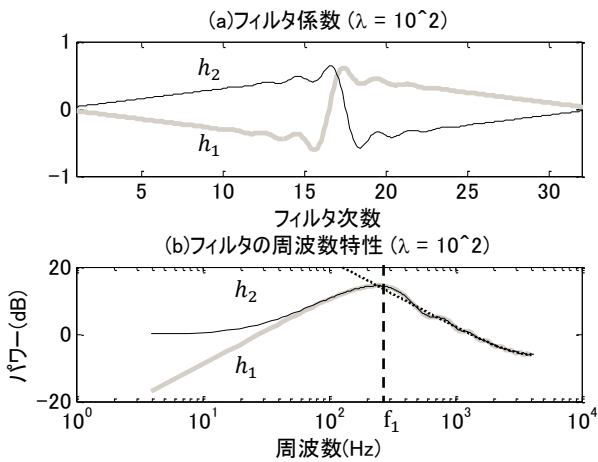


Fig. 8 ②のときのフィルタ特性

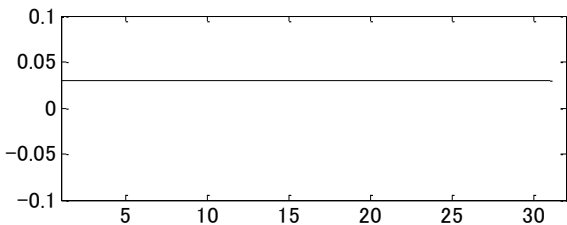


Fig. 9 Fig. 8(a)における $h_2(n) - h_1(n-1)$ の結果

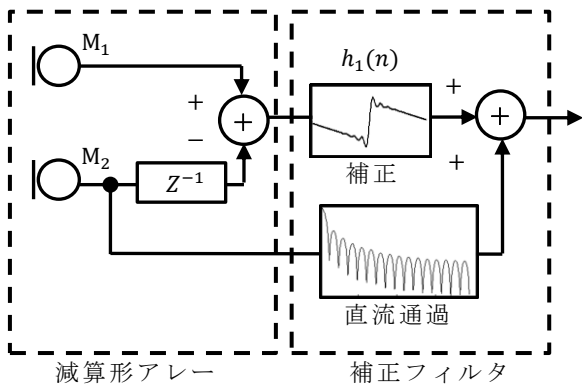


Fig. 10 ②における AMNOR 処理の等価回路

② Fig. 8 に $\lambda = 10^2$ のときのフィルタ係数と周波数特性を示す。Fig. 8(a) より、 h_2 は h_1 を 1 サンプル遅らせて正負反転させたもの、すなわち、 $h_2(n) = -h_1(n-1)$ と予想された。そこで $-h_1(n-1)$ と $h_2(n)$ の和を求めると Fig. 9 に示すように両者は直流成分を除いて一致した。

この 1 サンプルの遅延は雑音受信時のマイク間の遅延量である。つまり、このフィルタは 1 サンプルの遅延を加えることでチャンネル間の雑音を同位相化して減算する減算形アレーの機能を持つものと考えられる。

一方、Fig. 8(b) に示した h_1, h_2 の周波数特性は図の f_1 以下の低域を除いて 2 チャンネルはほぼ等しく、低域が強調された特性になっている。そして、この特性は図の破線で示した減算形アレーの目的音応答(一次差分特性)の逆特性とほぼ一致している。よって、この特性は減算形アレーにより劣化する目的音の補正フィルタ特性となっている。

ここで Fig. 8(b) の周波数 f_1 は「サンプリング周波数 / フィルタタップ数」、すなわち、この FIR フィルタで指定できる最小周波数を表している。つまり、 f_1 以下の周波数は直流成分であり、また、直流成分の逆特性は無限大となって補正フィルタは実現できない。そこで、 h_1 と h_2 の直流成分に差を持たせることで減算により目的音の直流成分が消されるのを防止している。

以上のことより、②のフィルタ特性は減算形アレーに対する補正特性である。このときのフィルタ特性をくり出し、また、直流成分補正用の直流通過パイパスを付加した AMNOR 処理の等価回路は Fig. 10 のようになる。

目的音と雑音に対する応答を Fig. 11 に示す。図より目的音の応答はほぼ平坦となっており、一方、雑音の応答は Fig. 7 に比べて高周波成分が大幅に低減していることがわかる。しかし、目的音のための直流通過フィルタは雑音成分も通過するため、雑音の低域成分が抑圧されず、大きな値を持っている。

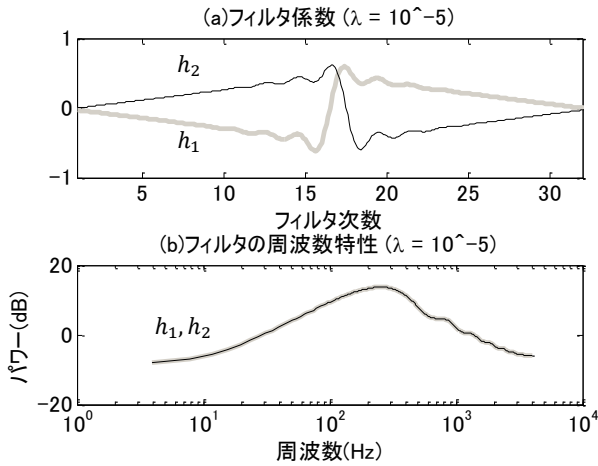


Fig. 12 ③のときのフィルタ特性

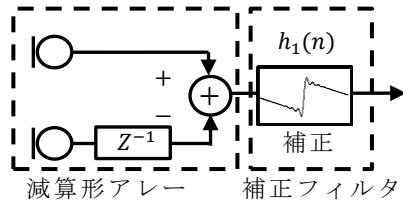


Fig. 13 ③における AMNOR 処理の等価回路

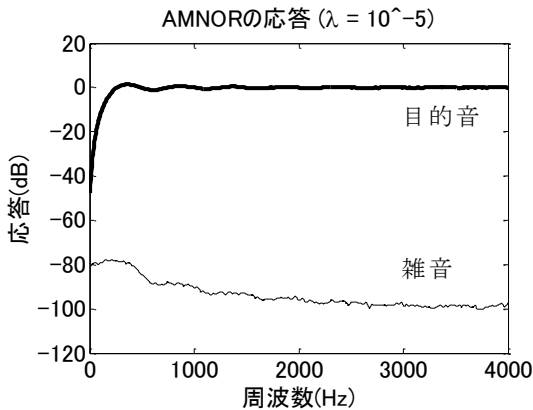


Fig. 14 ③の周波数応答特性

③ Fig. 12 に $\lambda = 10^{-5}$ のときのフィルタ係数と周波数応答を示す。Fig. 12(a) に示したフィルタ係数は②の場合の Fig. 8(a) とほぼ同様な形状であることから減算形アレーに補正を加えた処理だと考えられる。ただし、Fig. 12(b) に示したフィルタの周波数特性は Fig. 8(b) と異なり、チャンネル間の直流成分の差がなく、 h_1, h_2 は同一の振幅特性となっている。よって等価回路は Fig. 10 の直流通過を除去した Fig. 13 となる。そのため、Fig. 14 に示されるように、目的音の低周波成分が劣化するが、雑音を全帯域で大きく抑圧できている。すなわち、③では目的音の劣化を許容することで雑音の抑圧量を大きくしていることがわかる。なお、空間雑音成分は減算形アレーによりほぼ消去されており、残留しているのはチャンネル間で無相関な付加雑音である。

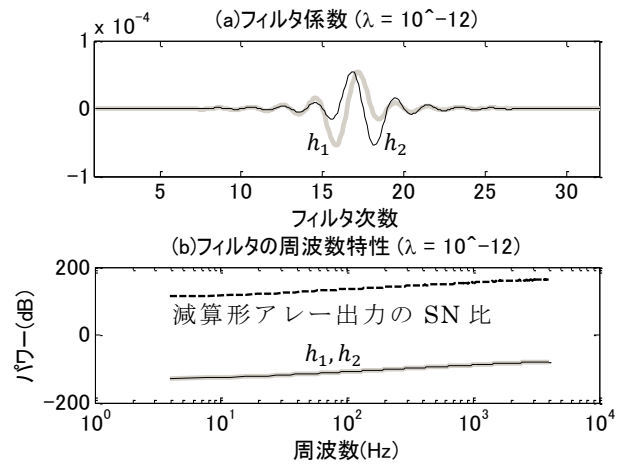


Fig. 15 ④のときのフィルタ特性

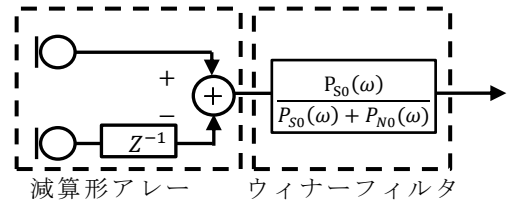


Fig. 16 ④における AMNOR 処理の等価回路

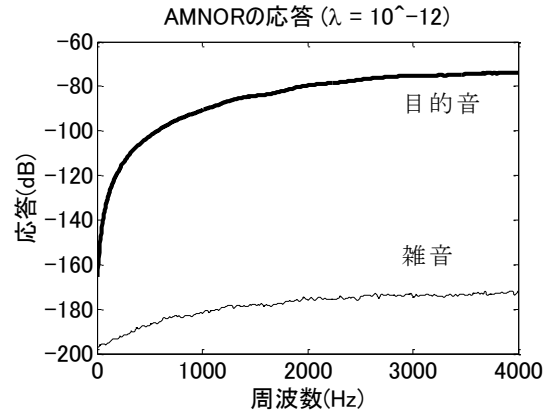


Fig. 17 ④の周波数応答特性

④ Fig. 15 に $\lambda = 10^{-12}$ のときのフィルタ係数と周波数特性を示す。Fig. 15(a) に示したフィルタ係数も $h_2(n) = -h_1(n-1)$ の関係が成立するので、減算形アレーだと考えられる。

次に、Fig. 15(b) より、 h_1, h_2 の周波数特性は同一ではあるが、その特性は低域を大きく抑圧したものとなっている。一方、Fig. 15(b) に示した点線は減算形アレー出力における帯域ごとの SN 比を表している。図より h_1, h_2 のフィルタ特性は、SN 比に比例した特性であり、このことから、 h_1, h_2 はウィナーフィルタの特性を持っていることがわかる。以上のことより、④の AMNOR 処理の等価回路は Fig. 16 のようになる。

Fig. 17 に目的音および雑音に対する周波数応答特性を示す。図より SN 比の小さい帯域ほど目的音と雑

音がともに大きく抑圧され、その結果として、全帯域成分を含ませた SN 比(Fig. 3 の P_N の逆数に相当)は Fig. 14 の応答の場合と比べて上昇していることがわかる。

6. まとめ

本研究では AMNOR の劣化許容量を変化させた際の雑音抑圧機能(指向特性、フィルタ特性)がどのように変化するかを 2 チャンネルの AMNOR におけるシミュレーションで検討した。その結果、劣化許容量を最小値から最大値に変化させた際に、1) 加算形アレー、2) 減算形アレー + 目的音の劣化補正、3) 減算形アレー + 直流成分を除いた目的音の劣化補正、4) 減算形アレー + ウィナーフィルタ、の各処理に変化することを確認した。このように AMNOR は劣化許容量をもとに代表的な雑音抑圧機能である加算形アレー、減算形アレー、ウィナーフィルタから最適な処理を選択、組み合わせることで雑音抑圧を行っていることがわかった。

今回の実験条件では減算形アレーとなったが、この処理の一般解は帯域別の SN 比最大化処理になるのではないかと考えられる。今後はマイク数、雑音方向、雑音の数など、より多くの環境から AMNOR 処理の一般解について検討する。

参考文献

- [1] Y. Kaneda and J. Ohga: "Adaptive microphone-array system for noise reduction," IEEE Trans. on Acoust., Speech and Signal Proc., Vol. ASSP-34, No. 6, pp. 1391-1400, 1986.
- [2] 金田: "アダプティブマイクロホンアレー," 信学論, J75-B-II, No. 11, pp. 742-748, 1992.
- [3] 一ノ瀬、片岡: "適応形雑音抑圧マイクロホンアレー," NTTR&D, Vol. 38, No. 10, 1989.
- [4] J. S. Lim and A. V. Oppenheim: "Enhancement and Bandwidth Compression of Noisy Speech," Proc. IEEE, Vol. 67, No. 12, 1979.