

適応形マイクロホンアレイにおける性能劣化要因の検討

森 一馬 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: [12kmc33@ms, kaneda@c].dendai.ac.jp

あらまし 適応形マイクロホンアレイの一つである一般化サイドローブキャンセラ GSC (Generalized Sidelobe Canceller) は、理論的には目的音を全く劣化させない条件の下で雑音を抑圧するシステムであり、既存の適応形マイクロホンアレイの中では演算コストが低いという利点があるため広く用いられている。本報告ではまずシミュレーションによって理想的条件における GSC の雑音抑圧効果の検討を行った。そして、適応形雑音抑圧マイクロホンアレイ AMNOR (Adaptive Microphone array for Noise Reduction) の目的音の劣化を少し許容することで雑音を大きく抑圧するという考えを GSC に取り入れることで雑音抑圧性能が向上することを示した。一方、実環境においての GSC は、各マイクロホンの特性のバラつきや反射音、目的音方向誤差などの外的要因により目的音が劣化してしまう問題がある。従来、この劣化は改善されるべきだと考えられていたが、本検討では過度に劣化を改善した場合には雑音抑圧性能が低下することがわかった。

キーワード GSC, AMNOR, 目的音の劣化, 雑音抑圧

A Study of Performance Degradation of Adaptive Microphone Array

Kazuma MORI and Yutaka KANEDA

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

E-mail: [12kmc33@ms, kaneda@c].dendai.ac.jp

Abstract The GSC (Generalized Sidelobe Canceller) is an adaptive microphone array that reduces noise while theoretically not degrading the target sound. It is widely used because of its low computational cost. In this study, we first examine the noise reduction effect of the GSC under ideal conditions by simulation. Then, we show that the GSC can improve the noise reduction by adopting the concept of AMNOR (Adaptive Microphone array for Noise Reduction), in which the noise is further reduced by allowing a small amount of degradation of the target sound. In a real environment, the original GSC degrades the target sound owing to various factors such as variations in the characteristics of each microphone, the target sound direction error and room reflections. Although this degradation should be reduced, it was found that the noise suppression performance deteriorates when the degradation is reduced excessively.

Keyword GSC, AMNOR, degradation of target sound, noise reduction

1. はじめに

マイクロホンで音声などを受音しようとするとき、その場所に存在する不要な音まで受音してしまう。このような問題を解決する技術として、適応形マイクロホンアレイは小規模で、雑音抑圧効果も大きいという利点がある[1]。

適応形マイクロホンアレイは、その使用環境に適応させて、ある拘束条件の下で雑音を最小化するフィルタを作成する。拘束条件は、目的音を全く劣化させないというものと、目的音の劣化を許容するというものがある。前者で代表的なシステムとしては、Frost 型ビームフォーマ[2]や一般化サイドローブキャンセラ GSC (Generalized Sidelobe Canceller)[3]がある。GSC は、他の適応形マイクロホンアレイに比べて処理

が簡単であり、また、フィルタの数が少なく済むので演算コストが低いという利点がある。一方、後者の代表的なシステムとしては、適応形雑音抑圧マイクロホンアレイ AMNOR (Adaptive Microphone array for Noise Reduction) [4]がある。AMNOR では目的音の劣化を許容する代わりに雑音を大きく抑圧することができ、SNR が優れたものとなっている。

本稿では、低演算コストの GSC に AMNOR の拘束条件の考え方を適用することで雑音抑圧性能向上を目指す。さらに、実環境において GSC を使用することの問題点を調査し、それに伴って起こる性能劣化要因について検討する。

2. 適応形マイクロホンアレー

2.1. GSC の原理

図 1 に GSC の原理図を示す。GSC は、M 素子のマイクロホンと、目的音除去部(ブロック部)，目的音除去後に接続された雑音抑圧フィルタから構成される。GSC において、各マイクロホン出力 $u_1[n] \sim u_M[n]$ に含まれる目的音は同振幅、同位相であると仮定される(例えば図 1 の左から到来する場合など。そうでない場合は遅延を用いて調整する)。この時、目的音除去部において、隣り合うマイクロホン出力を減算すると、その出力 $u_{i,i+1}[n]$ ($i = 1, 2, \dots, M-1$) は雑音のみを含んだ信号となる。この雑音信号をフィルタ $h_i[n]$ ($i = 1, 2, \dots, M-1$) に通して、目的音と雑音が含まれている $u_1[n]$ (または、 $u_1[n] \sim u_M[n]$ の遅延和信号) から引くことにより、目的音を劣化させずに雑音を抑圧した出力が得られる。

出力に含まれる雑音成分を最小化する GSC のフィルタ係数ベクトル \mathbf{h} は次式で求められる。

$$\mathbf{h} = \mathbf{R}_N^{-1} \overline{\mathbf{n}n_1} \quad (1)$$

ただし、

$$\mathbf{u}_{i,i+1} = [u_{i,i+1}[n], u_{i,i+1}[n-1], \dots, u_{i,i+1}[n-L+1]]$$

$$\mathbf{n} = [\mathbf{u}_{1,2}, \mathbf{u}_{2,3}, \dots, \mathbf{u}_{M-1,M}]^T$$

$$\mathbf{R}_N = \overline{\mathbf{n} \cdot \mathbf{n}^T}$$

L : フィルタタップ数, $[\cdot]^T$: 転置, $\overline{\cdot}$: 平均

2.2. AMNOR の原理

図 2 に AMNOR の構成図を示す。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 $u_i[n]$ ($i = 1, 2, \dots, M$) は各フィルタ $h_i[n]$ を通した後、総和を取って出力を得る。

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。AMNOR のフィルタ係数ベクトル \mathbf{h} は次式で求められる。

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

ただし、目的信号が存在しない時に受信する雑音のみの受信信号を u_{Ni} ($i = 1, 2, \dots, M$)、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)を $u_{Si}[n]$ とすると、

$$\mathbf{u}_{Ni} = [u_{Ni}[n], u_{Ni}[n-1], \dots, u_{Ni}[n-L-1]]$$

$$\mathbf{u}_{Si} = [u_{Si}[n], u_{Si}[n-1], \dots, u_{Si}[n-L-1]]$$

$$\mathbf{u}_N = [\mathbf{u}_{N1}, \mathbf{u}_{N2}, \dots, \mathbf{u}_{NM}]^T$$

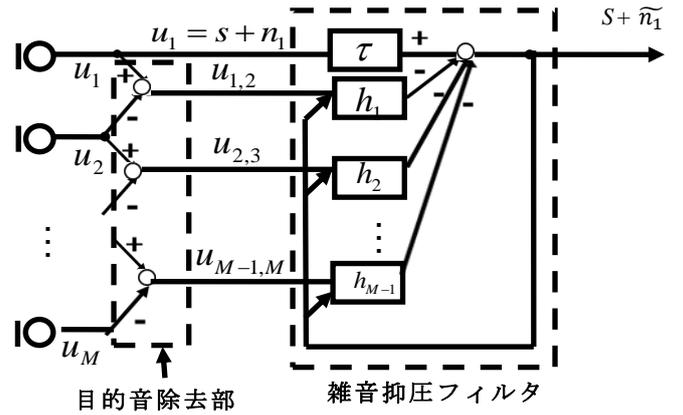


Fig. 1 GSC の原理図

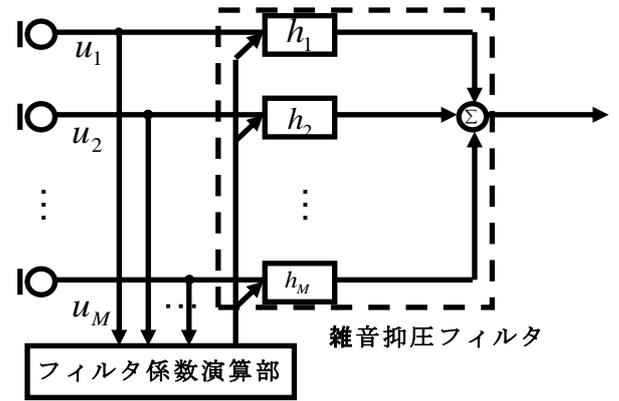


Fig. 2 AMNOR の原理図

$$\mathbf{u}_S = [\mathbf{u}_{S1}, \mathbf{u}_{S2}, \dots, \mathbf{u}_{SM}]^T$$

$$\mathbf{R}_N = \overline{\mathbf{u}_N \mathbf{u}_N^T}, \quad \mathbf{R}_S = \overline{\mathbf{u}_S \mathbf{u}_S^T}$$

また、 \mathbf{S}_X は \mathbf{R}_S の一つの列ベクトル、 λ は次節で説明するトレードオフ関係を制御操作するためのパラメータである。

2.3. 線形アレー処理における目的音と雑音のトレードオフ関係

一般に、線形アレー処理において、雑音を大きく抑圧しようとする目的音が劣化し、また目的音の劣化を少なくしようとする雑音あまり抑圧できないというトレードオフ関係が存在する。AMNOR は、このことに基づいて、目的音の劣化を許容できる範囲まで劣化させることで雑音を大きく抑圧するアレー方式である。図 3 に AMNOR におけるトレードオフ関係利用のモデル図を示す。ただし目的音劣化量は、目的音に対するアレー周波数特性の平坦特性からの平均二乗誤差と定義する[4]。

AMNOR では目的音の許容劣化量を設定することで

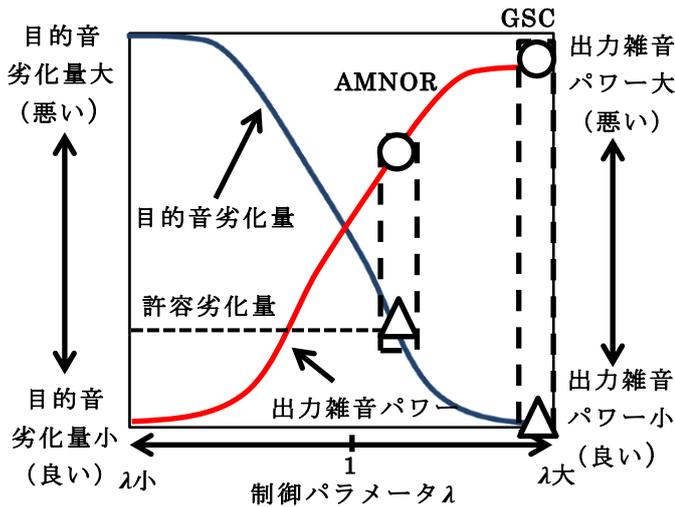


Fig. 3 AMNOR のトレードオフ関係利用のモデル図

トレードオフ関係に基づいた雑音抑圧量が得られる。その結果、AMNOR は目的音の劣化を全く許容しない GSC に比べて雑音抑圧性能は向上するが、その反面、許容劣化量を実現する λ の値を求めるために繰り返し計算が必要となり、GSC と比べて演算量が増加する。

3. GSC の雑音抑圧性能の向上

本章では、まず、シミュレーションにより GSC と AMNOR の性能比較を行う。そして、AMNOR の考え方を GSC に導入することで性能向上が得られることを示す。

3.1. GSC と AMNOR

GSC は目的音の劣化を全く許容しないものである。一方、AMNOR は制御パラメータ λ を大きくすることで、目的音をほぼ劣化させない出力を作ることができる。ここではまず、これら二つの雑音抑圧性能をシミュレーションで検証した。シミュレーション条件は図 4 のように、2 素子アレー、サンプリング周波数は 8000Hz、マイクロホン間隔 4.25cm、フィルタタップ数 64、目的音はアレーの軸に対して垂直な方向から到来する白色雑音、雑音(一個)はアレーの軸に対して平行な方向から到来する白色雑音とした。

図 5 に GSC の目的音と雑音に対する周波数応答特性を示す。図より、目的音に対する特性はほぼ平坦で、目的音の劣化は起きていないことがわかる。一方、雑音は低周波数成分の抑圧ができていない。

次に、AMNOR に対して λ を大きく ($\lambda = 10^{1.5}$) 設定して、同じ条件でシミュレーションした結果を図 6 に示す。図より、目的音の劣化は起きていない。また、図 5 と比較すると雑音抑圧性能がほぼ同等である。この結果から、許容劣化量無し AMNOR は GSC とほぼ同等の対目的音・対雑音特性を持つことがわかる。

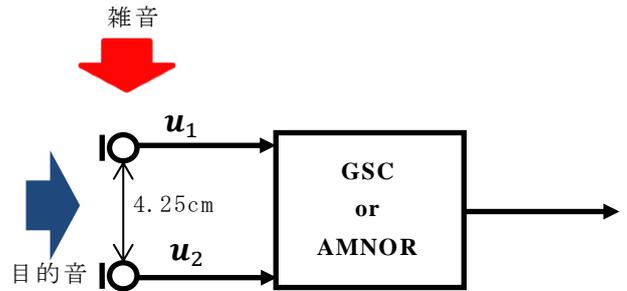


Fig. 4 シミュレーション条件

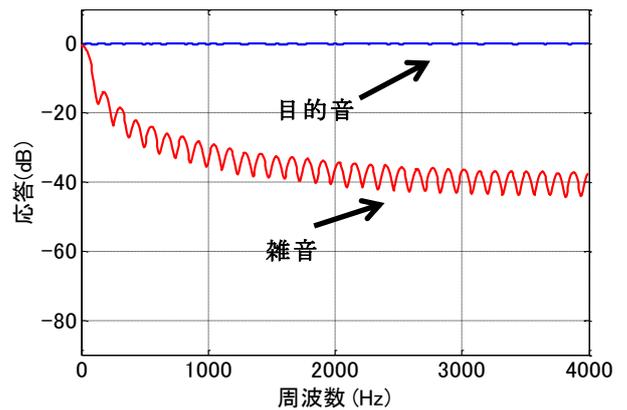


Fig. 5 GSC における目的音と雑音の周波数応答

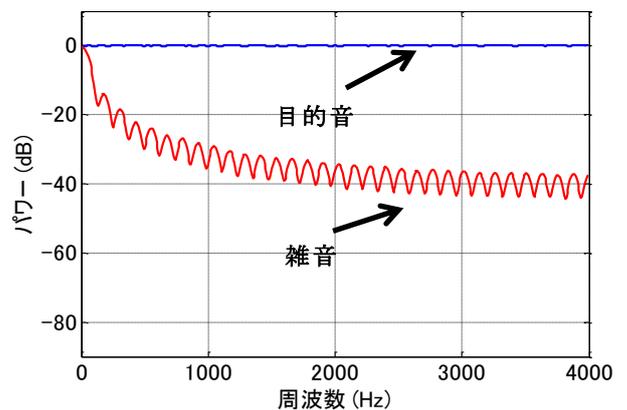


Fig. 6 AMNOR における目的音と雑音の周波数応答 ($\lambda = 10^{1.5}$: 目的音劣化無)

3.2. 目的音劣化を許容した AMNOR

AMNOR は目的音の劣化を許容することで雑音抑圧量を増加する。図 7 は、AMNOR における制御パラメータを小さくして ($\lambda = 10^{-1.5}$)、目的音の劣化を許容した場合の結果である。図より目的音の 100Hz 以下の特

性が劣化している代わりに、劣化無しの場合では抑圧できなかった雑音の低域周波数成分を抑圧していることがわかる。また、低域以外にも全帯域で雑音抑圧量が増加していることがわかる(例えば、1000Hz での雑音応答レベルは、図 6 の約 -30dB に対して図 7 では約 -65dB と低下している)。

3.3. GSC に対する目的音劣化の許容

GSC は本来目的音を劣化させない手法であるが、AMNOR と同様に、目的音の劣化を許容すれば雑音抑圧性能が向上するのではないかと考えた。

図 1 の GSC の原理図における目的音除去部は目的音の劣化を防止するものである。しかし、各マイクロホン出力を減算することは、各マイクロホンにおいて類似な波形として受音される雑音の低周波数成分を減衰させる。その結果、雑音の低減に利用される信号(図 1 の $u_{i,i+1}$)には低周波数成分が少なくなって、低周波数成分の雑音抑圧性能が劣化するものと考えた。

そこで、例えば図 8 に示すように、減算前の片方のマイクロホン出力に β ($\beta < 1$) を乗算することで GSC における目的音除去部の性能を劣化させることを考える、そうすれば、雑音の低周波数成分の減衰の問題も軽減され、雑音抑圧性能が向上するのではないかと考えた。

図 9 は $\beta = 0.8$ とした場合の結果を示す。図 5 に比べて目的音の周波数応答は、100Hz 以下で大きく劣化しているが、雑音の低周波数成分が大きく低下している。また、1000Hz 以上においても図 5 と比べて 20dB 以上の雑音抑圧効果が得られていることがわかる。

このように、GSC に対しても、AMNOR と同様に目的音の劣化を許容すれば、劣化がなかった場合では抑圧できなかった周波数帯域成分を抑圧することができ、20dB 以上の SNR の改善が行えることが分かった。

4. 実環境における GSC

4.1. GSC の問題点

実環境においては、各マイクロホンの特性のバラつきや反射音、目的音の方向誤差などの外的要因により GSC における目的音の除去が不良となる。その結果、図 1 における $u_{i,i+1}[n]$ に目的音が漏れ出し、 $u_1[n]$ に含まれる目的音成分が雑音抑圧の減算によって劣化してしまう問題がある[5]。

このことを実環境実験により確認した。実験は残響時間 0.4 秒の室内で図 4 と同じ条件で行った。目的音源および雑音源としてはスピーカを用い、それぞれアレー軸に対して垂直方向 50cm、平行方向 50cm の位置に配置した。音源信号としてはそれぞれ異なる白色雑音を用いた。

実験結果を図 10 に示す。この図における平均雑音抑圧量は約 8dB であったが、図において、目的音の応

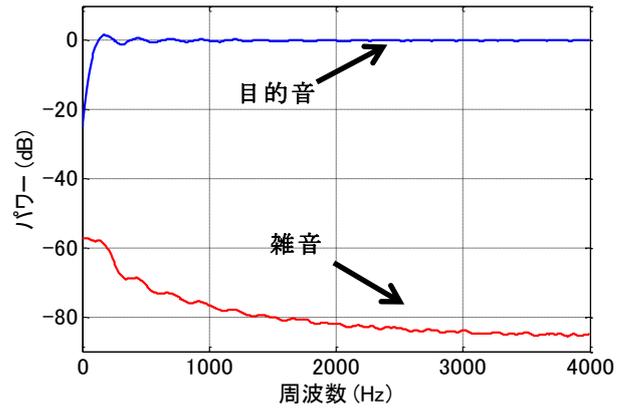


Fig. 7 AMNOR おける目的音と雑音の周波数応答 ($\lambda = 10^{-1.5}$: 目的音劣化有)

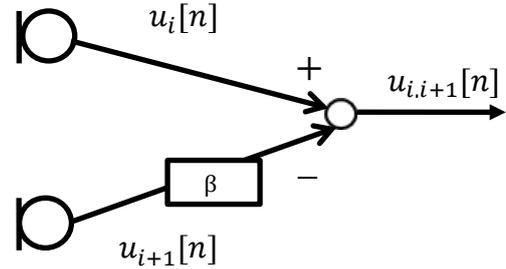


Fig. 8 雑音の低減周波数成分の減衰問題を解決した目的音除去部

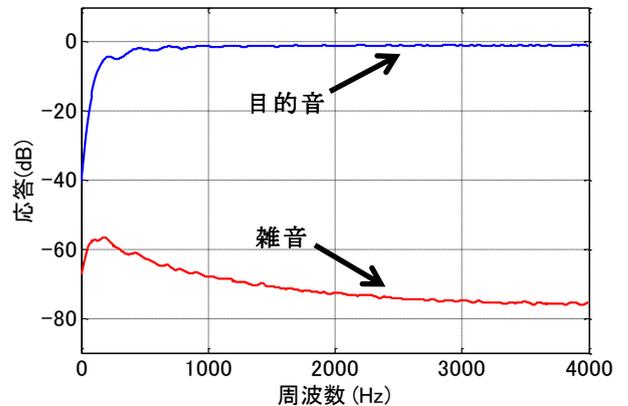


Fig. 9 劣化を許容した GSC ($\beta = 0.8$) の目的音と雑音の周波数応答

答が 500Hz 以下で劣化している。この原因は 2 つのマイクロホンで受音された目的音波形が不一致であり、目的音の除去が不良であったためと考えられた。

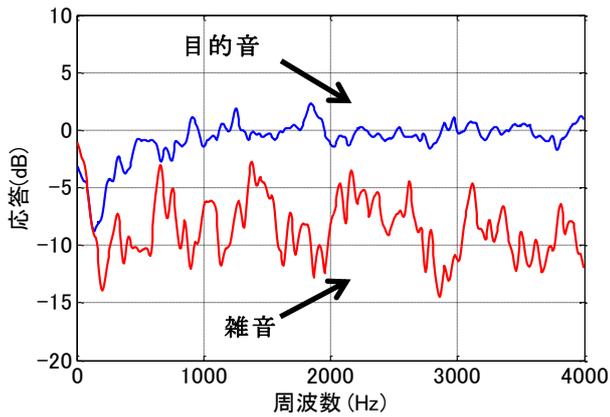


Fig. 10 実環境における GSC の目的音と雑音の周波数応答

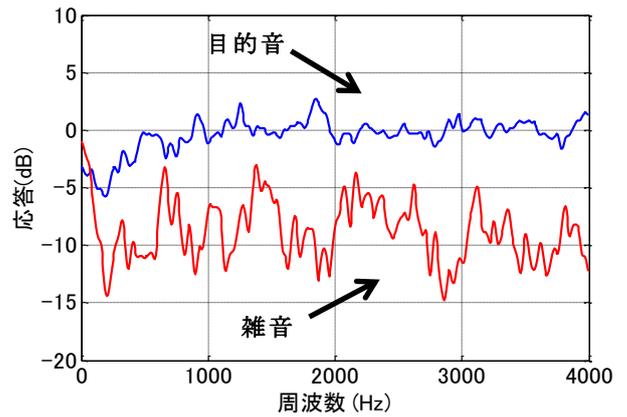


Fig. 11 マイクロホン系のゲイン補正を施した GSC の目的音と雑音の周波数応答

4.2. マイクロホン系のゲイン補正

目的音源は各マイクロホンから等距離の位置に配置されているので同一波形としての受音が期待される。それにもかかわらず波形が不一致となっている一つの原因は、マイクロホン系(マイクロホン素子およびマイクロホンアンプ)のゲイン不一致が予想された。そこで、実験に使用した各マイクロホン系のゲインを実測して、これを受音信号に対して補正した後、再度 GSC 処理を行った結果を図 11 に示す。図よりゲイン補正を行った結果、100Hz 付近の目的音の劣化が改善されていることがわかる。一方、平均雑音抑圧量は約 8dB と変化は無かった。

4.3. 整合フィルタによる目的音の劣化の改善

目的音の劣化の問題を解消するには、可能な限り目的音の除去を行う必要がある。そこで、目的音のみの受音を行って、目的音除去部からの出力を最小化する整合フィルタ $g_i[n]$ (図 12)を計算した。ただし、その際、全てのフィルタ係数が 0 となることを防止するため、フィルタ係数の一つを 1 に固定した。目的音除去部にこの整合フィルタを用いた場合の GSC の、目的音と雑音の周波数特性を図 13 に示す。目的音の周波数特性は劣化が小さくなり、ほぼ平坦になっていることがわかる。しかし、平均雑音抑圧量は約 4dB 度に低減した。

4.4. トレードオフ関係に基づく GSC 動作の解釈

2 章で述べたように、線形アレー処理において、雑音を大きく抑圧しようとするると目的音が劣化し、また目的音の劣化を少なくしようとするると雑音あまり抑圧できないというトレードオフ関係が存在する。このトレードオフ関係は、マイクロホン数、フィルタタップ数、雑音数、室内音響条件などによって大きく変化するが、実測データをもとに、AMNOR における制御パラメータ λ の値を少しずつ変化させながら、目的信

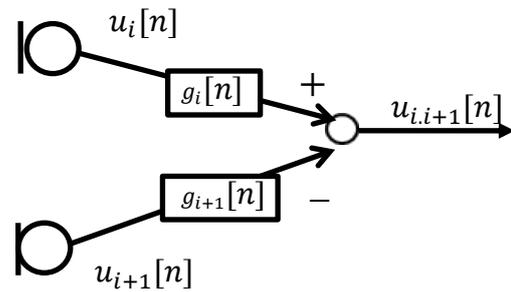


Fig. 12 整合フィルタを加えた目的音除去部

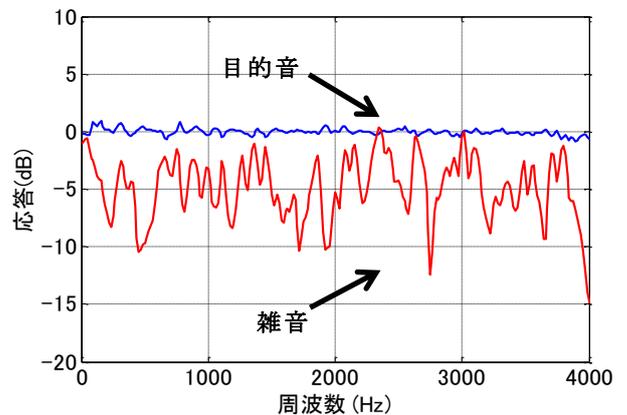


Fig. 13 整合フィルタを用いたときの GSC の目的音と雑音の周波数応答

号劣化量とその時の出力雑音パワーを計算することで、求めることができる。

今回の実験条件に対して計算したトレードオフ関係を図 14 に示す。図における雑音パワーは、雑音の出

力・入力パワー比を，目的音の出力・入力パワー比で正規化して表した．図より，この実験条件では雑音の抑圧量の最大値は約 10dB であることがわかる．一方，目的音の劣化を極端に小さくすると，この条件ではほとんど雑音抑圧量が得られないことがわかる（図 14 の A の特性）．

GSC は理論的には，目的音劣化量が最小の図 14 の A の特性に対応し，その場合にはほとんど雑音低減効果が得られない．しかし今回の実環境では，図 10 で示したような特性となり，この場合の目的音劣化量 D と，出力雑音パワーを計算すると，それぞれ，0.21, -8dB となり，図 14 の B の特性となる．

次に，ゲイン補正を行った結果（図 11）の目的音劣化量と出力雑音パワーを計算した．図 11 は，目的音の低周波域の劣化を多少は改善しているが，劣化量 D を大きく変化するものではなく，D=0.20 であった．そして，それに伴って出力雑音パワーもほぼ変化はなく，図 14 における C の特性（B とほぼ同じ）となった．

次に，整合フィルタを用いた場合（図 13）の目的音劣化量と出力雑音パワーを計算すると，それぞれ，0.048 と -4.1dB であった．目的音劣化量は大幅に減少しているが，その反面，出力雑音パワーは増大した．この特性は図 14 の D となる．

図 14 のトレードオフ曲線は，特定の目的音劣化量に対して実現できる最小の出力雑音パワーを表している．したがって，B, C, D の特性の雑音パワーはそれより上回った値となっているが，目的音の劣化を減少させると出力雑音が増加するというトレードオフ関係を反映したものとなっている．

以上のことより実環境における GSC の動作に関して以下のことがわかった．

- 1) 実環境での GSC は目的音が劣化する反面，大きな雑音低減量を得ている
 - 2) 今回の条件では，調整なし，またはゲイン調整のみの GSC は，与えられた処理条件・環境条件で達成できる最大雑音低減量（10dB）に近い値を実現していた
 - 3) GSC の目的信号の劣化を過度に低減させると，トレードオフ関係より，雑音低減量の低下が発生する
- 以上のことより，実環境における GSC は，結果的に AMNOR と同様の動作，すなわち目的音に劣化が生じることで大きな雑音低減量を得ていることが分かった．

5. おわりに

本報告ではまず，シミュレーションにより一般化サイドローブキャンセラ GSC と AMNOR の性能比較を行った．そして，AMNOR の考え方を GSC に導入することによる性能向上の可能性を検討した．その結果，GSC に対しても，AMNOR と同様に目的音の劣化を許容す

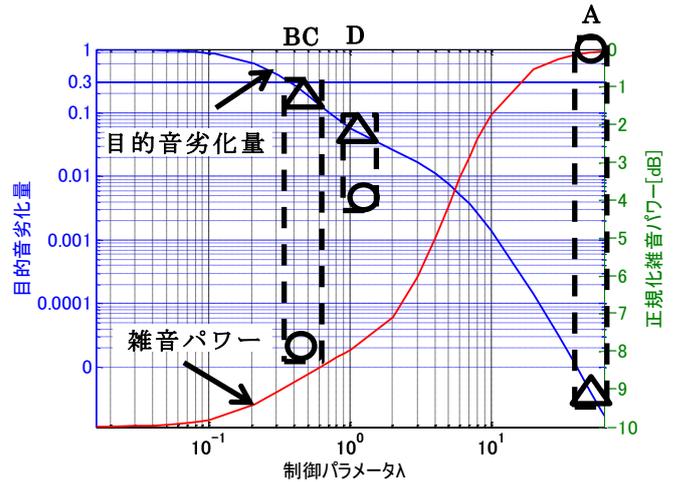


Fig.14 線形アレー処理のトレードオフ関係と GSC 動作の関係(△: GSC の目的音劣化量, ○: GSC の出力雑音パワー)

れば，劣化がなかった場合では抑圧できなかった周波数帯域成分を抑圧することができ，大幅な SNR の改善が行えることを示した．

次に，実環境における GSC の特性について検討した．その結果，通常の GSC の使用状態で発生する目的音の劣化は，線形アレー処理の目的音劣化量と雑音抑圧量のトレードオフ関係において雑音抑圧量を増加させる効果を持つ場合があることを示した．

文 献

- [1] 浅野太，音のアレー信号処理，日本音響学会（編），pp.90-95，（社）コロナ社，東京，2011．
- [2] O. L. FROST, An Algorithm for Linearly Constrained Adaptive Array Processing, Proc.IEEE, vol.60, no.8, pp.926-935, Aug. 1972.
- [3] L. J. Griffiths and C.W. Jim, An Alternative Approach to Linearly Constrained Adaptive Beamforming, IEEE Trans.ASSP, vol.AP-30, no.1, pp.284-290, Jan. 1986.
- [4] Y. Kaneda and J. Ohga, Adaptive Microphone-Array System for Noise Reduction, IEEE Trans.ASSP, vol.AP-34, no.6, pp.1391-1400, Dec. 2001.
- [5] M.Brandstein, Microphone Arrays, D.ward, pp.88-90, Springer-Verlag, Berlin, 2001.