

2.3 アクティブノイズコントロールのオーディオへの応用

—新幹線「Max」のシートオーディオシステム—

松下電器産業(株) 橋本 裕之 寺井 賢一

☆はじめに

航空機, 列車等のオーディオサービスには, ヘッドホンやイヤホンが用いられているが, 装着感が不快である, あるいは有償であるという理由から利用率が低い. この対策としてスピーカによるサービスが考えられるが, 周囲への音もれが問題となり, ほとんど実用化されなかった. また最近では, 軽量化された客室内での騒音が大きな問題となっている. このような状況において, 従来の音響的な対策では低周波領域に対して効果を上げようとすると重厚長大な材料が必要となり, 高速化指向の移動体においてはとうてい不可能なことであった.

このため, 我々は, デジタル技術の進歩により実用段階に入ったアクティブ騒音制御技術を用いて, 隣接席

からのもれ音を含む複数の騒音源からの到来騒音に対して, 複数点を同時に制御する適応フィルタの可能性について検討した. その結果, オーディオシステムへの応用としても例のない製品を開発した¹⁾.

☆シートオーディオシステムへの応用

アクティブクロストークコントロール (ACC)

図-1に本システムのブロック図を示す. 隣接席からのもれ音は G_{LL} , G_{LR} , G_{RL} , G_{RR} の4系統の伝達関数を経て自席に到達する. 一方, 隣接席のオーディオ入力を処理する適応フィルタ H_{LL} , H_{LR} , H_{RL} , H_{RR} の出力は自席のオーディオ信号と加算され, 自席のスピーカより制

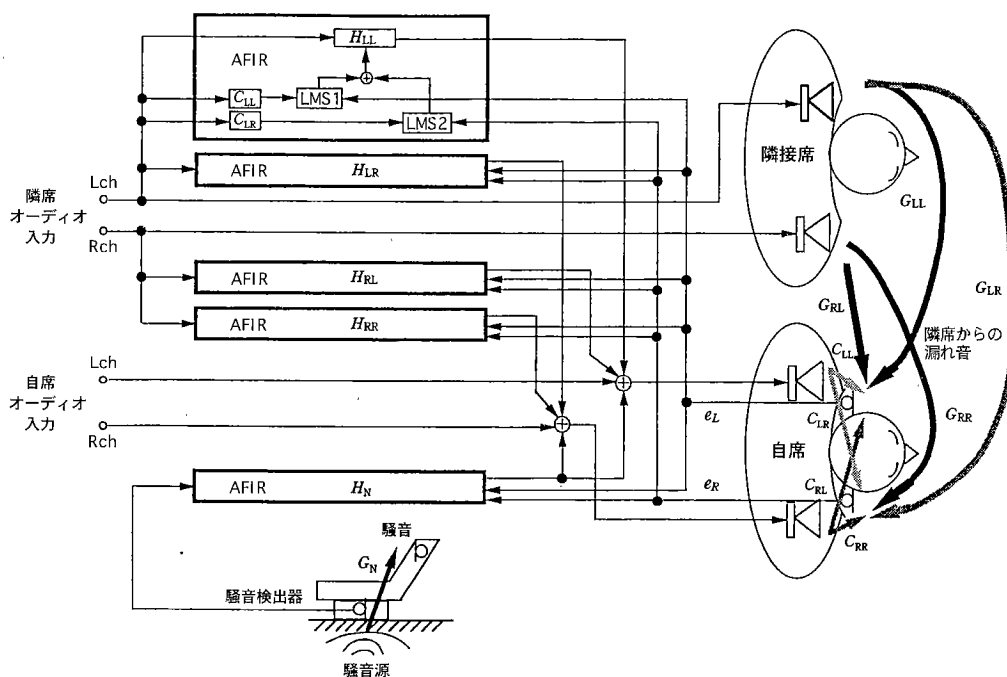


図-1 システムブロック図

御音が発音され、制御系伝達関数 C_{RR} , C_{RL} , C_{LR} , C_{LL} を経てもれ音を減少させる。このとき自席のヘッドレストに設置された誤差検出マイクでもれ音と制御音との誤差音を検出し、この誤差音が小さくなるように適応フィルタ H_{LL} , H_{LR} , H_{RL} , H_{RR} の係数を更新する。

たとえば、適応フィルタ H_{LL} の係数は、

$$H_{LL}(n+1) = H_{LL}(n) + \alpha \{ r_{LL}(n) e_L(n) + r_{LR}(n) e_R(n) \}$$

に基づいて更新される^{2), 3)}。

ただし、

$$r_{LL}(n) = x^T(n) C_{LL}(n),$$

$$r_{LR}(n) = x^T(n) C_{LR}(n)$$

である。

アクティブノイズコントロール (ANC)

座席シートの下に設置された騒音検出マイクによる信号を適応フィルタ H_N によって処理し、制御出力を自席のオーディオ信号に加算して制御スピーカより発音する。ACCと同様にして、誤差検出信号で適応フィルタ H_N の係数を更新する。本来、適応フィルタは2系統必要であるが、騒音検出マイクから左右の耳までの伝達関数が低周波領域でほぼ等しいため1系統とした。

★ システム構成

ソフトウェア

これまで述べてきた構成をDSPのソフトウェアにより実現した。しかし、先に説明したACCとANCは1座席あたりに適応フィルタを5個(係数更新演算10個)必要とするので、演算量を低減するために次の手法を適用した。

マルチレート方式

本システムのオーディオサービスは、28kHzサンプリングのPCM通信方式であり、アクティブ騒音制御の帯域(~1.6kHz)よりかなりサンプルレートが高い。そこで、隣接席のオーディオ信号を1/5の5.6kHzに変換してACCの処理を行い、再び5倍の28kHzに変換して自席のオーディオ信号と加算し、元のPCM通信システムに接続する。このマルチレート方式によると、1サンプル時間が5倍になるので同じ時間長を実現できるタップ長が1/5で済み、かつ1サンプル時間に実行できるDSPのフィルタ演算量が5倍になる。

同定/計測/サービスモードの分離と切り換え

(1) 同定モード

図-1における制御系伝達関数 C_{LL} , C_{LR} , C_{RL} , C_{RR} を同定し、これらをメモリに格納する。

(2) 計測/サービスモード

適応フィルタは固定FIRフィルタの3倍程度の演算量

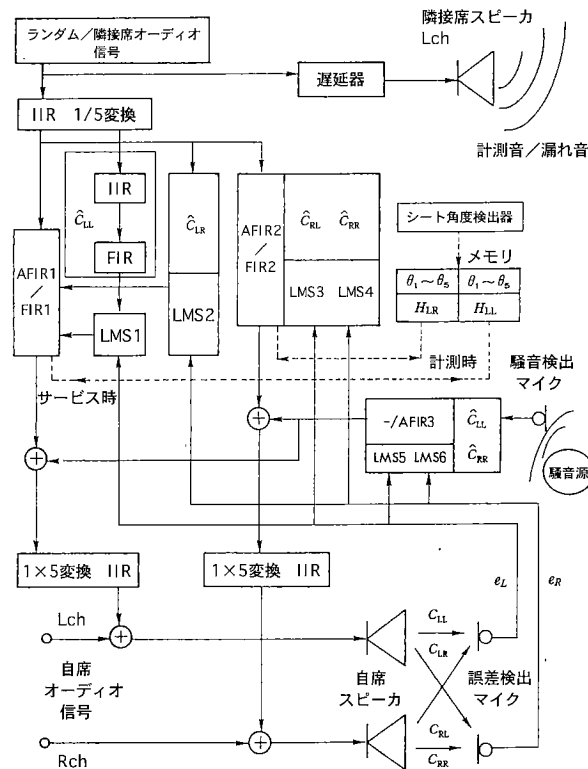


図-2 計測/サービスモードのブロック図 (1座席, 1ch分)

が必要であり、この演算量を低減するためACCについては、適応フィルタを用いた計測モードと、その結果得られた収束係数を設定する固定フィルタを用いたサービスモードとに分離した。同定も含めて各モードは任意に再実行可能であり、スピーカの経年変化などに容易に対応できる。

図-2に隣接席のLchのもれ音に対する制御ブロック図を示す。信号源とフィルタ部がモードにより切り換わる。まず計測モードではランダム信号を内部発生し、数msecの遅延を施して隣接席のLchスピーカより計測音として発生させる。一方、1/5にサンプルレート変換したランダム信号を適応フィルタAFIR1, AFIR2で処理し、再びサンプルレートを5倍上げて自席のスピーカより発音させる。隣接席からの計測音と制御音とが干渉した結果の誤差検出信号を小さくするように適応フィルタAFIR1, AFIR2をMEFXアルゴリズムにより係数更新し、収束させる。この動作を隣接席と自席のリクライニング角度を相対的に5段階に変化させ、各々の係数 H_{LL} , H_{LR} をメモリに格納する。この隣接席Lchの計測後、Rchについても同様に行う。これにより計測モードでは、リアルタイム動作として、適応フィルタを2個(係数更新演算4個)に削減した。

ついでサービスモードに移行し、計測モードで測定した係数 H_{LL} , H_{LR} を座席角度検出器信号に基づいてメモリより固定フィルタFIR1, FIR2に設定する。隣接席の

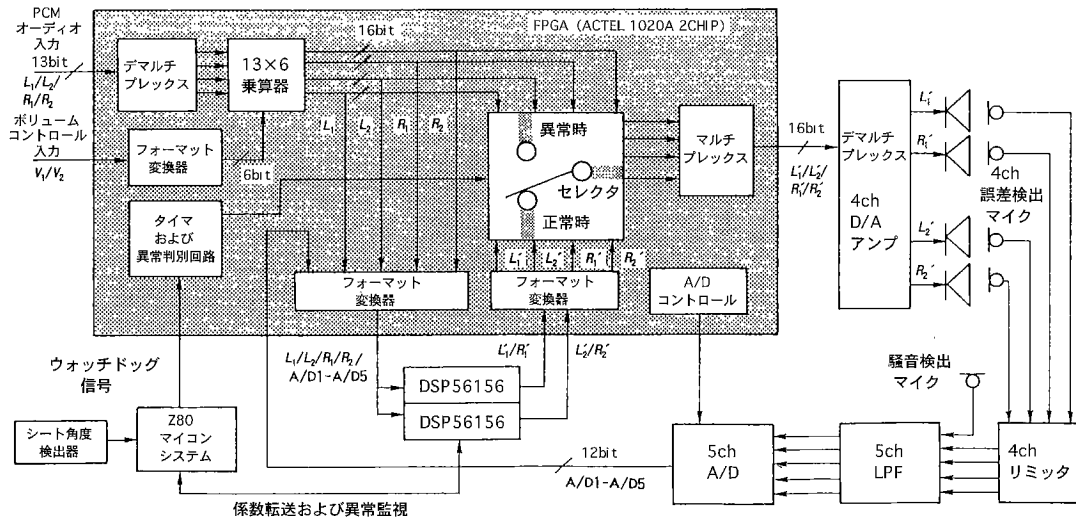


図-3 FPGA内部および全体のハードのブロック図

	ACC	ANC
サンプリング周波数		
騒音入力部	28kHz (PCM入力)	5.6kHz (A/D入力)
フィルタ部	5.6kHz	5.6kHz
制御周波数帯域	100~1,600Hz	100~500Hz (周期音)
適応フィルタタップ数	128タップ	64タップ
消音量	10dB以上	20dB以上

表-1 システム仕様

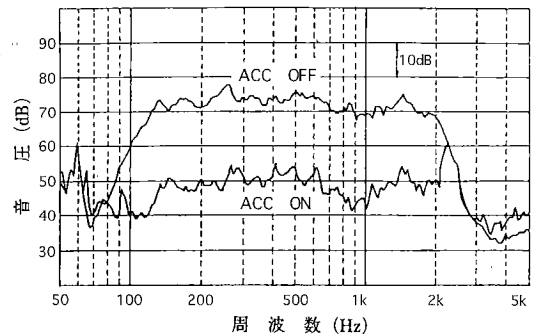


図-4 ACCの効果

Lchオーディオ信号のサンプルレートを1/5に変換して、この両フィルタで処理してACC制御信号とする。一方、騒音検出器の検出信号は適応フィルタAFIR3で処理され、先のACC制御信号と加算した後、再び5倍のサンプルレート変換を行い、自席のオーディオ信号と加算して自席のスピーカより発音する。Rchについても同様である。これによりサービスモードでは、適応フィルタ1個と固定フィルタ4個に削減した。

FIR+IIRハイブリッド構成のFxフィルタ

FxフィルタをIIRとFIRの縦続によるハイブリッド構成(図-2の \hat{C}_{LL} に一部を示す)とした^{4), 5)}。IIRフィルタはバクワッドの2段階構成でもFIRフィルタの十数タップ分の演算量で済み、複数騒音源、複数制御点のMEFXアルゴリズム実行におけるFIR演算量の低減が図られた。

ハードウェア

以上のDSP演算量の削減の結果、2座席分の主要デジタル部を汎用16ビットDSP(DSP56156)2個とDSP周辺回路を集積したFPGA(Field Programable Gate Array: Actel 1020A)2個に収めた。このDSPは1命令

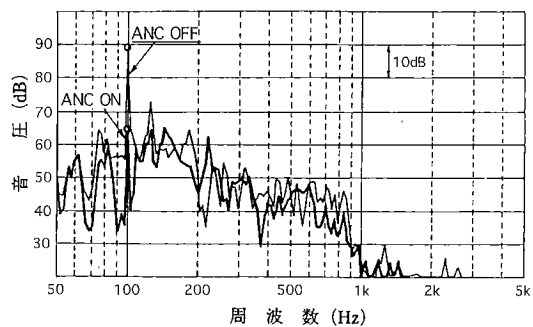


図-5 ANCの効果

33ns.の高速性と適応フィルタの演算が3命令(係数更新:2命令, FIRフィルタ:1命令)で実行できるために使用した。図-3に、2座席分の全体ハードブロック図とFPGAの内部ブロックを示す。

システム仕様

表-1にシステムの主要仕様を示す。

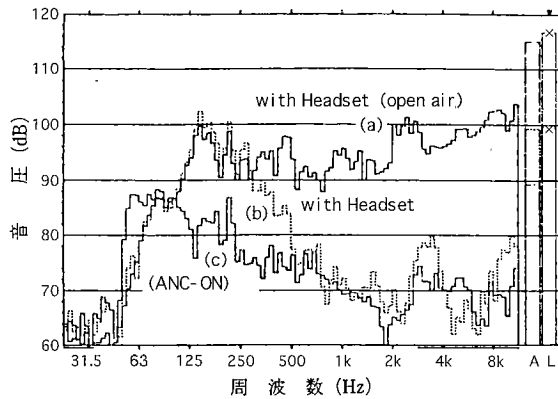


図-6 ANCヘッドセットのパッシブ遮音とアクティブ制御効果（ランダム音）

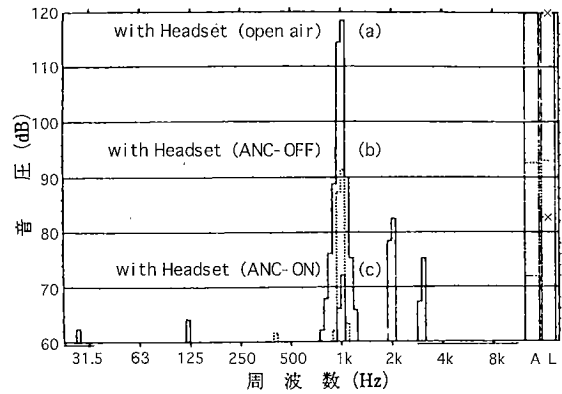


図-7 ANCヘッドセットのパッシブ遮音とアクティブ制御効果（周期音）

★ アクティブ騒音制御の効果

以上のアクティブ騒音制御システムの実車実験を行い、その結果を誤差検出マイクでの消音量として測定した。図-4はACC、図-5はANCの効果を示すものである。ACCは20dB、ANCは25dB近くの消音量が得られた。これらは独立に測定したが、音もれと騒音が同時に発生している時は同時に消音され、聴感上もACC、ANCの効果が相乗され、自席のオーディオサービス音のS/N比が向上して、音楽にひたれる環境が実現される。

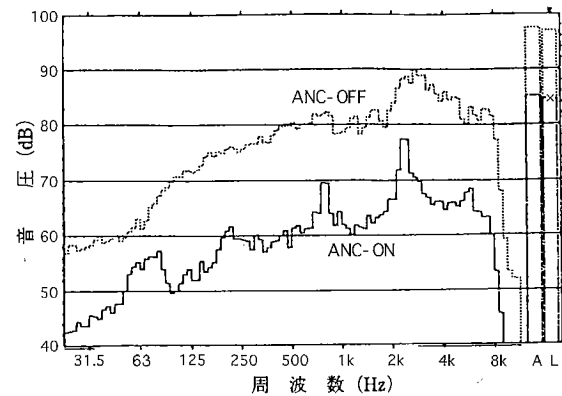


図-8 音声マイクのANC効果

★ むすび

シートオーディオシステムの隣接席のもれ音とモータなどの周期騒音の複数の騒音源に対し、座席ごとに両耳の2点を制御するアクティブ騒音制御システムを開発した。DSPの演算量を軽減するため、サンプルレート変換、モード切り換え、IIRフィルタによるモデリングなどにより、座席あたりDSP1個とFPGA1個に集積した。このシステムは東北（上越）新幹線『Max』のグリーン車に搭載され、1994年7月より試行されている。

ところで、このフィードフォワード方式をさらに高サンプル化することによりシステム遅延を低減してヘッドセットに適用する開発も行っている⁶⁾。

図-6はランダム騒音に対するANCヘッドセットのパッシブ遮音（(a)と(b)の差）とアクティブ騒音制御の効果（(b)と(c)の差）を、図-7は周期騒音に対するANCヘッドセットのパッシブ遮音（(a)と(b)の差）とアクティブ騒音制御の効果（(b)と(c)の差）を、図-8は自分自身の音声を検出する送話マイクにおけ

るアクティブ騒音制御の効果をそれぞれ示している。

ANCヘッドセットは、現在、商品化を検討しており、発電所など110dBを超える高騒音下においてフィールドテストを行っている。

今後の検討として、シートオーディオシステムは航空機などへの応用や、ランダム走行騒音の3次元局所制御を、ANCヘッドセットは早期商品化をそれぞれ行う所存である。

参考文献

- 1) 橋本裕之他: シートオーディオシステムのアクティブ騒音制御, 電子情報通信学会技術研究報告, US94-89 (Jan. 1995).
- 2) Elliott, S. J. et al.: A Multiple Error LMS Algorithm and Application to the Active Control of Sound and Vibration, IEEE Trans. Acoust. ASSP-35, No.10, pp.1423-1434 (1987).
- 3) Nelson, P. A. and Elliott, S. J.: Active Control of Sound, ACADEMIC PRESS, London (1992).
- 4) 齊藤 望他: フィルタードXLMSアルゴリズムにおけるモデリングエラーの影響, 電子情報通信学会研究報告, EA92-73 (1992).
- 5) 三坂 智他: SHARF Algorithmによるシステム同定とその応用, 音響学会講演論文集, p.523 (Apr. 1992).
- 6) 寺井賢一他: デジタルANCヘッドセット, 電子情報通信学会研究報告, EA96-9 (1996).

(平成10年11月27日受付)