

セレクトティブ ノイズキャンセリングヘッドセット*

JEFFREY N. DENENBERG**・ DAVID J. CLAYBAUGH**

(フォスター・NCTヘッドセット(株))

1. はじめに

環境騒音は産業革命以来の問題である。騒音は我々の健康や安全に影響を与え、通信の障害となり、また、生活を最大限にエンジョイすることの障害ともなっている。アクティブノイズキャンセレーションの騒音制御への応用は50年以上も前に提案されたことであるが、当時はまったくそのような提案の実用化ができる状態にはなかった。しかし近年になって、コンピューター技術が進歩した結果、従来は対

応が困難とされてきた環境騒音問題に対して、アクティブノイズキャンセレーションが実的な解決策となるにいたった。

アクティブノイズキャンセレーションを緊急車両用のヘッドセットに応用すると、耳における騒音レベルを選択的に10から15dB減衰させることができる。その結果、搭乗員の安全性が高まり、難聴になるおそれが下がり、車両内部での交信もできるようになる。

2. 概要

この技術は騒音をマスクするものではなく、不快な騒音と同等ではあるが180度位相がずれているキャンセル用のアンチノイズを発生させることで騒音を減少させるものである。このアンチノイズは耳へ送られるが、騒音にちょうどマッチするようになっているので、お互いにキャンセルし合って騒音エネルギーは相当量が耳の位置で除去されることになる。

ノイズをアクティブに（能動的に）キャンセルするという考えは目新しいものではない。騒音をコピーしてもとの騒音をキャンセルするというアイディアは今世紀の初頭にさかのぼる。最初に作られたシステムでは“遅延させ反転させる”手法が使われ、期待のもてる結果が得られたが、騒音を構成する要素が多岐にわたることから効果は限定された。

1970年代の中頃になって、アンチノイズを作り出すにあたってアダプティブフィルターを利用するという一大前進が見られた。システム内部の要素のみならず外部の変化にも適応することから、システムの効果が大幅に改善されたのである。同じく1970年代の中頃のもう一つの飛躍として、緊急車で使用されるサイレンの音も含む多くの騒音源には周期性の騒音もしくはトーンナルな騒音があることが認識されたことがあげられる。騒音の反復サイクルはどれもその直前のサイクルに似ていることで、このトーンナルノイズがより効果のある解決策のキーとなり得るのである。騒音を予想できれば、正確なアンチノイズが作り出せることになる。

当時利用可能であったエレクトロニクス技術の水

筆者紹介

Jeffrey N. Denenberg

Denenberg 博士の、エレクトロニクス業界、通信業界、コンピューター業界での経験は20年を超える。NCTには、副社長ならびにR&Dと技術担当主任オフィサーとして1990年の入社であるが、それ以前は、モトローラ、ベル研究所、ITT、プロジディサービスで活躍した。1966年にノースウエスタン大学からBSを、1968年と1970年にはイリノイインスティテュートオブテクノロジーからMSとPh.D.を取得しているが、どれも電気技術分野におけるものである。また、同氏はIEEEのシニアメンバーであり、11の特許の所有者でもある。

David J. Claybaugh

Claybaugh 氏は、1991年10月から役員として、NCTのパーソナルクワイエティング関係製品開発担当の任にある。担当分野には、通信用ヘッドセット製品の開発と、米国を中心に進められている客室の静粛化プロジェクトとの調整業務が含まれている。NCTに入社する前の6年間は、米国海軍の軍事研究所で水中音響信号とイメージ処理技術の開発に関連するいくつかの責任ある地位にあった。数学分野でのBAをセントビンセントカレッジから、電気技術分野でBSをノートルダム大学から、同じく電気技術分野でMSをジョンホプキンス大学から、MBAをメリーランド大学から取得されている。

*A Selective Noise Canceling Headset

**Jeffrey N. Denenberg, David J. Claybaugh (FOSTER/NCT HEADSET INTERNATIONAL LTD.)

アクティブノイズキャンセレーションのその他の応用可能分野

応用分野は多いが、その一部に次のようなものがある。
アクティブマフラー—内燃機関、圧縮機、真空ポンプ等の排気音を、背圧による効率低下を招くことなく小さくできる。

アクティブマウント—回転機器の振動を抑制して快適性を高める。磨耗を抑える。振動から派生する騒音を減らす。

アクティブエンクロージャー—冷却用の空気の入出力、メンテナンス、その他の目的の開閉部のある軽量エンクロージャーで低い周波数の騒音を制御する。
クワイエットゾーン—機械を操作する人たちに快適な作業域を提供するためのサイレントシートやキャビンクワイエットティング。

準は、アクティブノイズキャンセレーションシステムの実用化には十分ではなかったために、この技術の応用はさらに先のことにならざるを得なかったが、今や、デジタルコンピューター技術が進んで、騒音のキャンセルに関係する複雑な計算ができて、かつ、コスト的にも有利なDSPが利用できるまでになった。この技術的な進展によって、従来は対応が困難であった騒音問題に、合理的なコストでアクティブノイズキャンセレーションを応用することが可能になったのである。

緊急用車両が出す騒音にはいくつかの騒音源があるが、どの騒音もかなり強烈である。ここでは、この中で最も音の大きい電子サイレン（ほかの騒音の多くもキャンセルできる）に絞って説明する。

救急車（あるいはほかの緊急用車両）の内部の騒音は、サイレンの取付け場所、室内の音響的な絶縁、及び窓の状態（開いているか閉まっているか）の関数として変化する。実地測定によって、騒音のレベルは80から100dBAの間にあることがわかっているが、この大きな騒音は運転者や同乗者に次のようなマイナスの影響を及ぼす。

- 急速な疲労
- 判断力・思考力の低下
- 会話が困難
- 警報の聞き漏らし
- 耳に障害をもたらす可能性

3. サイレン音

代表的な緊急用車両のサイレンには何種類かの音のパターンがある。日本の電子サイレンの代表的な騒音のパターンは“ファストウエイル”型である。

図-1に示す。このサイレンでは、サイレン用スピーカーに送られる信号は、周期的に変化するレベルの高い矩形波である。

変調サイクルは4秒を超え、立上がり時間は早く、立下がり時間は遅い。周波数は、どのサイクルでも400Hzから800Hzの間で変化している。

この信号がサイレン用帯域制限スピーカーを通過

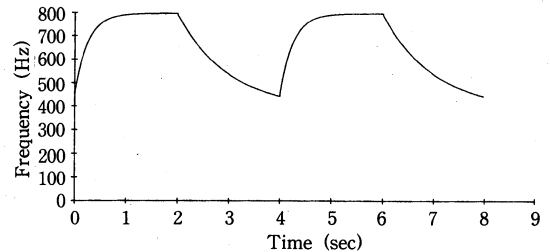


図-1 ファストウエイル変調

すると、図-2に示すように、高い周波数の高調波は減衰して騒音（サイレン音）が後に残る（分かりやすくするために騒音周波数は図-2では1/20に縮小してある）。

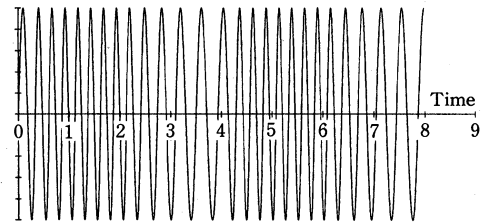


図-2 サイレンの波形

車両内部で聞こえる騒音は、室内の音響的な環境によって実際にはかなり複雑な内容をもっている。共振ならびにいくつかある音響的なパスのために、周波数の変化に伴って騒音の大きさは急速に変動する。この結果生ずる騒音の波形を、この報告書の結果部分で車両の内部測定結果として示す。

4. アクティブノイズキャンセレーション

この手法を応用するには、騒音の変化よりも早く適応できるシステムが必要となる。ほとんどのキャンセルシステムで問題となるのは、適応が遅いか、あるいはキャンセルすべき騒音の基準となる信号をあらかじめ予期する必要がある点である。利用できる基準信号はサイレンの駆動信号だけであること、また、この信号と耳の位置での騒音の関係は非直線であるうえに、頭の位置によって変化することから、これまでのフィードフォワードアルゴリズムや同期式のノイズキャンセルアルゴリズムはよい方策とは

いえない。

これを解決できるのが、NCTの特許であるデジタル非同期式アルゴリズムである。一つの音がほかの音に比べて非常に大きいとき、このフィードバックアルゴリズムは、騒音の周期時間の合計（この騒音に対しては1.25から2.5ms）ならびにフィードバックループ内の遅延時間の合計（約0.5ms、これには、アルゴリズムの処理時間が確保できるように、ヘッドセット、アナログフィルター、小さな数値ではあるがデジタルサンプリング時間が含まれている）の2倍近い早さでその音に対応する。したがって、デジタル非同期式アルゴリズムは、5msという変化よりも相当に早い速度でこの騒音の変化に対応できる。

図-3は、デジタルコントローラーを組み込んだアクティブヘッドセットの構成である（完全なシステムでは騒音を両方の耳で個別にコントロールするが、図では片側のみを示してある）。

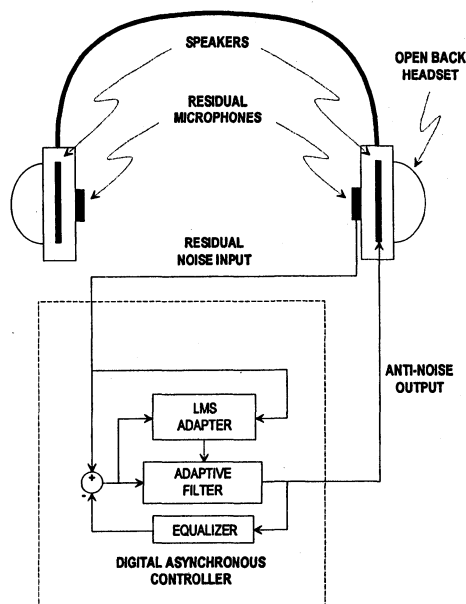


図-3 サイレン用ヘッドセット

このシステムを構成する機器としては：

ヘッドセット — 軽量の背面開放型で、外部の信号はほとんど減衰しない状態で耳に達する。信号の遅れを最低にとどめるために、スピーカーは広帯域型を使用している。

残留音収集用マイクロホン — このマイクロホンが拾う残留騒音を使ってデジタルコントローラーがアンチノイズの波形を連続的に調節して、耳での騒音を最低にする。

イコライザー — アンチノイズパスがアンチノイ

ズに対してもっている特性と同等の特性をもつフィルター。フィルターを通過した騒音が残留信号に加えられて基準信号、すなわち、キャンセルする前に原騒音を耳で近似化する信号を取り出す。

アダプティブフィルター — 有限のパルスレスポンスフィルターであって、基準信号からアンチノイズ信号を発生させるように、タップウエイトが連続的に調節される。

LMSアダプター — アダプティブフィルターのタップウエイトの調整が必要かどうかを判断するために、残留信号と基準信号との相関をとる。

図-4は、キャンセレーションアルゴリズム実行用のDSPハードウェアのブロックダイアグラムである。

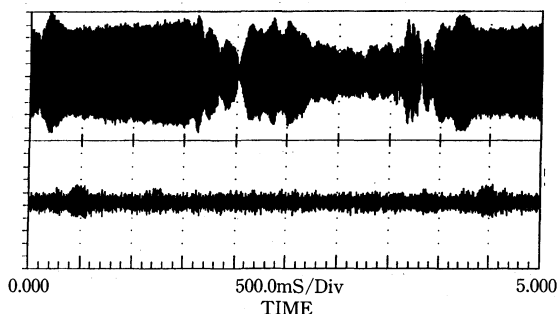


図-4 デジタルコントローラーダイアグラム

このハードウェアのプロトタイプを開発するにあたっては、NCTとフォスター電機が共同で作業をした。ハードウェアは、完全に1枚の基板にシステムとして収められており、厚み、幅、奥行きがそれぞれわずか2.5cm、20cm、16cmのケースに収納できるにもかかわらず2チャンネル分（両耳用）の処理能力をもっている。電源は、車両の標準である12Vである。

5. ハードウェアの構成

アンチエイリアスフィルター — 残留信号の帯域は、これらのフィルターによって騒音の帯域幅（先に述べたサイレンの場合は400から800ヘルツ）に制限される。また、これらのフィルターは、フィルターがかかる過程で生ずる時間の遅延を最小限にとどめながらも、帯域外のエネルギーを除去してエイリアス（サンプリングの過程によって、サンプリングレートの1/2を超える信号が周波数に翻訳されてしまう傾向）が避けられるように設計してある。

A/D変換器 — 残留騒音信号は、特別に設計したA/D変換器によってデジタルに変換され

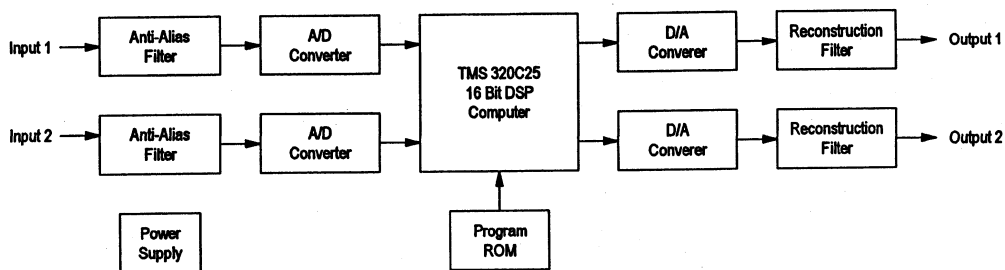


図-5 測定結果

る。

16ビットDSP — システムのプロトタイプに使用したDSPは、良好な結果が得られたDSPのうちの一つであるテキサスインスツルメント社のTMS 320C25であるが、アナログデバイス社の2100シリーズ、モトローラ社の56000シリーズでもよい結果が出ている。

プログラムROM — アルゴリズムはDSPチップのアセンブル言語で書いて、効率のよい処理が行えるようにした。その結果得られるマシン語のプログラムは外部のROMチップに保存する（量産では、DSPチップに乗っているROMメモリーを使うことになる）。

D/A変換器 — D/A変換器は、出力となるアンチノイズ信号を発生させるために使用する。これらの変換器も設計にあたっては、時間の遅延が最小にとどまるよう、また10kHzのサンプリングレートで12ビットの精度を持つように留意した。

リコンストラクションフィルター — 周波数がサンプリングレートの倍数の場合、D/A変換器の出力には期待するアンチノイズのコピーが含まれている。こういった周波数は、アンチエイリアスに使用するフィルターに類似のフィルターによって除去される。

電源 — 電源は、車両のバッテリー電圧（一般に12V）で働く高能率のスイッチング型であり、コントローラーに含まれるアナログ及びデジタル電子回路に必要な正確な電圧が供給できる。

6. キャンセル結果

図-5に、車両の客室でのアクティブノイズキャンセリングヘッドセットの動作を示す。上の半分は、アクティブキャンセレーションを切った状態での5秒間（変調サイクルは4秒）の原騒音である。騒音の変化の割合と複雑さは、騒音が通る複合音響パスが原因となっていることに注目願いたい。

下半分は、アクティブキャンセレーションシステ

ムが動作している状態である。ほかの外部の音はほとんど影響されないで、サイレンの音が10から15dB確実に減少している。

このシステムは、もっと変化の早い米国の標準型のサイレンで試験して、ここでもよい結果を得ている。現在、東海岸の大きな都市の緊急医療サービス組織の手で実用試験中である。

7. 結 論

アクティブノイズキャンセレーションを緊急車両用のヘッドセットに応用すれば、電子式サイレンのレベルのみを確実に10から15dB減少させることができるが、このヘッドセットの利点としては次のようなことが挙げられる：

- 運転者が外部の警報音を聞きとる可能性が高まるので安全性も高まる
- 騒音のレベルが下がるので、聴力を損傷するおそれが低くなる
- 開放型であるため会話がほとんど減衰しないので、車両内部の交信の了解度が改善される。

8. おわりに

この作業は、大編成のチームのきわめて長期にわたる努力によってなされたものである。チームに参加した人は、一部ではあるが以下のとおりである。

Ralph Busch
Graham Eatwell
Robert Evans
John Hohman
Joe Kulikauskas
Roy Scott

参 考 文 献

- 1) Denenberg, J.: Anti-Noise, IEEE Potentials, 第11巻 2号 (1992.4), pp.36-40.
- 2) Lemme, H. J. Denenberg: Lärm Kontra Lärm, Elektronik Magazine, 第41巻第19号 (1992.9), pp.42-48.
- 3) Widrow, Stearns: Adaptive Signal Processing, Prentiss-Hall, 1985.