

2. 最近の電話の音響技術

——エコー制御技術——

島田正治[†], 牧野昭二^{††}

1. ま え が き

自分の声が相手側の経路を経由して送話者自身に戻り、“こだま”のように知覚される現象を送話者エコーと呼ぶ(以下、単にエコーと呼ぶ)。このエコーは、国際電話のように伝搬遅延の大きな通話や、スピーカ・マイクロホンを使った拡声通話(ハンズフリー通話)などにおいて発生し、通話の妨げとなる。また、エコーが回線の両端で発生すると通信網を介して閉ループが形成され、ループ利得が1を越える場合には発振現象(ハウリング)が発生し、通話不能に陥る。

エコーを制御するための装置として従来からエコーサプレッサが用いられてきた。また、最近では通話時の切断感のないエコーキャンセラが盛んに検討されている。エコーキャンセラは、1957年榎本らによって提案され¹⁾、1966年にATTベル研究所のM. Sondhi²⁾によって理論的にその適応アルゴリズムが記述された。しかしながら、エコーキャンセラの複雑な適応アルゴリズムや所要エコー消去量を当時のアナログ技術で実現することは不可能であった。

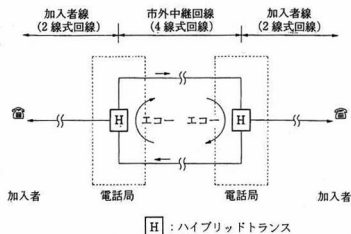
1970年代に入ると複雑かつ高精度の演算が容易なデジタル信号処理技術の台頭と、LSI技術の急速な進展により、エコーキャンセラを小型・低価格のハードウェアで実現することが可能となった。衛星・国内回線用エコーキャンセラLSIを最初に開発したのはATTベル研究所のDuttweiler³⁾で、当時はエコー消去時間8ms(64タップ)であった。その後、ATT、KDD等が60ms程度(480タップ相当)の1チップLSIを開発し、現在では、衛星・国内回線にエコーキャンセラは急速に導入されている。

エコーキャンセラ技術は、近年では長距離回線だけでなく、着信転送サービス用双方向中継増幅器、多地点間電話会議用中継装置、テレコンファレンスシステムなどの新電話サービスへも適用されるようになってきた。また、音声以外のデータ通信においても、2線式全二重モデム、さらには、ISDNのデジタル加入者伝送用にエコーキャンセラ方式の双方向デジタル通信が活発に研究されている⁴⁾。このようにエコーキャンセラの用途は広範囲にわたっており、今後ますます拡大していくと思われる。

本解説では、電話(音声通信)用のエコー制御技術について、電話回線用エコーキャンセラと音響用エコーキャンセラの原理、および適用例に主眼を置いて解説する。

2. エコーの発生とエコー障害

電話回線の構成を図1に示す。加入者と市内交換機を結ぶ回線では、経済性と交換の利便性の点から、送信信号と受信信号を同じ一対の伝送路に重畳する2線式回線が用いられている。一方、市外交換機間を結ぶ



[H] : ハイブリッドトランス

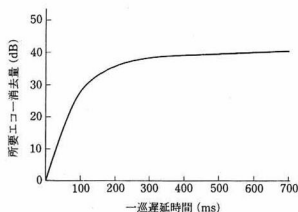
電話回線におけるエコーは、ハイブリッドトランスにおけるインピーダンス不整合により発生する。

図1 電話回線の構成

[†] NTT 通信網総合研究所

^{††} NTT ヒューマンインタフェース研究所

"Recent Techniques of Circuit and Acoustic Echo Control for Telephony" by Shoji Shimada (NTT Telecommunication Networks Laboratories, Tokyo) and Shoji Makino (NTT Human Interface Laboratories, Tokyo)



回線エコーでは一巡遅延時間が大きくなるほど所要エコー消去量が大きくなる。

図2 回線エコーにおける所要エコー消去量(電話系)

長距離回線では、伝送損失を補償し、複数の回線を効率良く使用するために、送信側と受信側を別々の2対の伝送路によって構成する4線式回線が用いられている。この2線式回線と4線式回線をつなぐ2線4線変換回路がハイブリッドトランスである。

このハイブリッドトランスは、2線式回線とバランス用ネットワークとのインピーダンス整合により、4線側の受信信号が4線側の送信信号に回り込まないように設計される。しかし、2線側の加入者線は、加入者ごとに線路の種類や長さが異なるため、バランス用ネットワークとのインピーダンス不整合が起こり、4線側の受信信号の一部が4線側の送信信号に流れ込み、エコーが発生する。

図2は一巡遅延時間と所要エコー消去量の実測例⁵⁾(エコー許容限)である。図2から一巡遅延時間が大きくなるほど、所要エコー消去量が大きくなる様子がわかる。日本国内においては、一巡遅延時間が約60 ms以上となる回線にエコーキャンセラを導入している。国際回線の一巡遅延時間は衛星回線で500 ms、日米間長距離海底ケーブル回線で約300 msであり、エコーを除去する必要性がますます増大する。

マイクロホンとスピーカを用いた拡声通話系の構成を図3に示す。送話者の音声は、相手側のスピーカ・室内音響系・マイクロホンを通して時間遅れが付加され、再び送話者側のスピーカから再生されてエコーが発生する。図4に一巡遅延時間に対する所要エコー消去量(エコー許容限)の実測結果⁶⁾を示す。図4は回線エコーの場合(図2)と異なり、音響エコー経路特性の影響により、一巡遅延時間が数10 ms程度であってもエコーを除去する必要があることを示している。

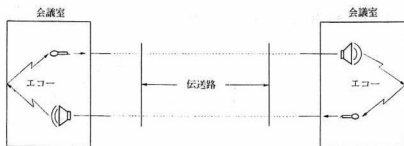
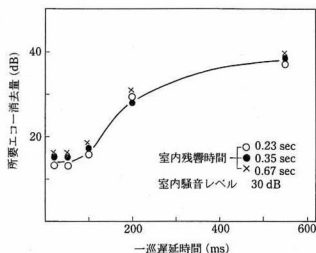


図3 拡声通話系の構成



音響エコーでは一巡遅延時間が数10 ms程度であってもエコーを除去する必要がある。

図4 音響エコーにおける所要エコー消去量(拡声系)

3. エコー制御装置の構成と動作

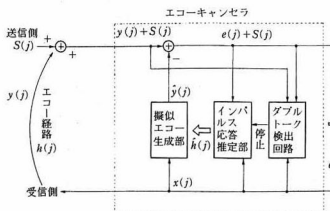
3.1 エコーサプレッサ

エコーサプレッサは、送信信号レベルと受信信号レベルを検出・比較して、受信信号レベルが大きいときには送話路に損失を挿入し、送信信号レベルが大きいときには受話路に損失を挿入し、エコーを抑圧する。エコーサプレッサは構成が簡単で経済的にシステムを構成できるが、レベル検出の遅れが損失挿入の遅れになり、挿入損失量が大きい場合には会話の始めや終わりが途切れて聞こえなくなったり(話頭・話尾切断)、送話と受話の同時通話ができにくくなるなどの原理的な欠陥がある。

3.2 エコーキャンセラ

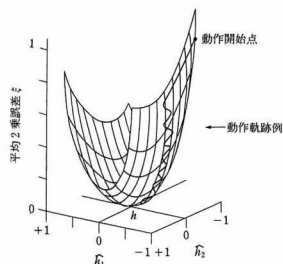
エコーキャンセラはエコー経路の伝達特性を推定してインパルス応答のレプリカを生成し、受信信号と畳み込んで擬似エコー信号を作成し、これを真のエコー信号から差し引くことによってエコーを消去する⁷⁾。

エコー経路の伝達特性は、時間の経過とともに変化するため、擬似エコー回路は常時インパルス応答のレ



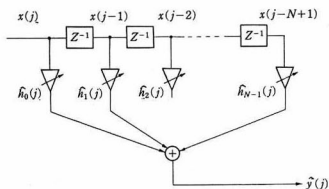
エコーキャンセラはエコー $y(j)$ から擬似エコー $\hat{y}(j)$ を差し引くことにより、エコー $y(j)$ を消去する。近話者信号 $S(j)$ はエコーの影響を受けずにそのまま送られる。

図5 エコーキャンセラの構成



平均2乗誤差曲面は(超)放物面をなす。

図7 平均2乗誤差曲面の例(2次元)



フィルタ係数 $\hat{h}_1(j)$ と入力信号 $x(j-1)$ で畳込み積分が行われる。

図6 可変係数トランスバーサル型フィルタ

プリカを求める適応型のものが使われ、適応アルゴリズムには実時間動作、高速、高精度が要求される。

(1) エコーキャンセラの構成

エコーキャンセラには様々な構成が提案されているが^{(8)~(10)}、実時間動作が可能で安定性が保証されており、かつ、変動する伝達特性の推定方法が確立されているトランスバーサル型適応フィルタを用いる場合が多く⁽¹¹⁾⁽¹²⁾、以下この構成について説明する。図5にエコーキャンセラの構成を、図6に図5の擬似エコー生成部にあたる可変係数トランスバーサル型フィルタの構成を示す。擬似エコー $\hat{y}(j)$ は可変係数 $\hat{h}_i(j)$ と入力信号 $x(j)$ の畳込み積分で求める。

可変係数 $\hat{h}_i(j)$ はエコー信号 $y(j)$ と擬似エコー信号 $\hat{y}(j)$ の誤差信号 $e(j) = y(j) - \hat{y}(j)$ の電力が小さくなるように、インパルス応答推定部で逐次的に推定して求める。可変係数トランスバーサル型フィルタではフィルタのインパルス応答振幅値がそのまま可変係数 $\hat{h}_i(j)$ となる。エコーキャンセラをトランスバーサル型フィルタで構成する場合には、インパルス応答の継

続時間が長いほど適応フィルタのフィルタ長も長くする必要がある⁽¹³⁾。

(2) エコー経路の推定方法

様々なエコー経路推定方法が提案されているが⁽¹⁴⁾⁽¹⁵⁾、演算量が少なく実時間動作が可能な学習同定法を用いる場合が多い。

推定の良さを表す評価関数として平均2乗誤差の期待値 $\{\xi = E[e(j)^2]\}$ を考えれば、 ξ は $\hat{h}_i$ の2次関数である。図7はタップ係数ベクトル $\hat{h}$ が2成分である場合、この2成分の関数として ξ を表したものである。これは、下に凸な(超)放物面であり、 ξ が最小の点が最適解 h に対応している。

評価関数として ξ を用い、 ξ からグラジエント $\bar{V}(j)$ を推定し、(1)式に従ってフィルタ係数を修正するのが最急降下法(method of steepest descent)である。

$$\hat{h}(j+1) = \hat{h}(j) + \mu(-\bar{V}(j)) \quad (1)$$

最急降下法は期待値の計算のための演算量と記憶容量が大きい。このため、期待値 ξ の代わりに瞬時値 $e(j)^2$ を用い、 $e(j)^2$ からグラジエント $\bar{V}(j)$ を推定すると、

$$\bar{V}(j) = -2e(j)X(j) \quad (2)$$

となる。これを(1)式に代入すれば、

$$\hat{h}(j+1) = \hat{h}(j) + 2\mu e(j)X(j) \quad (3)$$

となる。(3)式がLMS(Least Mean Square)法による逐次修正式である。LMS法において修正ベクトルを入力信号の大きさを正規化して 2μ を α に置き換えた(4)式、

$$\hat{h}(j+1) = \hat{h}(j) + \alpha \frac{e(j)}{\|X(j)\|^2} X(j) \quad (4)$$

が学習同定法による逐次修正式である。

学習同定法によってエコー以外の信号は雑音となり、推定誤差を生じ性能の劣化をきたす。このため、ダブルトーク検出回路を設け、相手側が発声しているときのみ適応動作を行い、それ以外の状態のときには適応動作を停止している。なお、適応動作が停止してもインパルス応答特性は保持されて擬似エコーは生成されるため、エコーは消去される。近端話者信号はエコーの影響を受けずにそのまま送出される。

4. 回線エコー制御¹⁶⁾

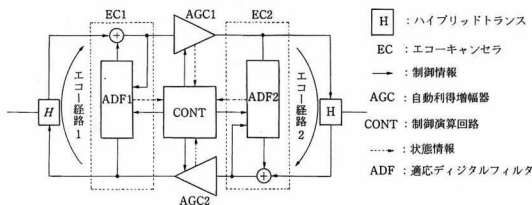
回線エコー経路は電気回路系であるため、そのインパルス応答長は約 20 ms 以下と短い。エコーキャンセラはエコー経路の伝搬遅延時間とインパルス応答時間と和の時間 40~60 ms 程度の場所に設置されるため、エコーキャンセラを 8 kHz サンプリングのトランスバーサル型フィルタで表せば、320~480 タップ (エコー消去時間約 60 ms) となる。これは現在の集積回路技術をもってすれば LSI 1 チップで充分であ

る¹⁷⁾。また、雑音も比較的少なく、一度回線が設定されればエコー経路の伝達特性の変動は少ないなど、エコーキャンセラにとって条件は非常に良く、解析はすでに終了し、盛んに実用化が進展している。以下に長距離回線以外の様々な応用例について述べる。

4.1 着信転送サービス

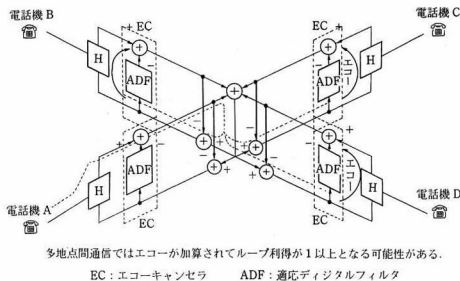
加入者への着信呼をあらかじめ設定しておいた別の電話機に自動的に転送するものが着信転送サービスである。着信転送サービスでは任意の回線に対して着信転送を行うために、着信呼を加入者交換機あるいは加入者宅の電話機で転送することから、発信者から転送先までの回線損失が増加する。この損失を補償するため、ハイブリッドによって 2 線を 4 線に変換分離し、それぞれの方向で増幅を行い、再びハイブリッドによって 4 線を 2 線に変換合成する 2 線式双方向中継増幅器が用いられる。

この 4 線区間内でのループエコーを消去するために、図 8 に示すようにエコーキャンセラが用いられて



エコーキャンセラ EC1, EC2 はエコー経路 1, 2 で生ずるエコーをそれぞれ消去し、一巡ループ利得を 1 以下とするために用いられる。

図 8 2線式双方向中継増幅器の構成



多地点間通信ではエコーが加算されてループ利得が 1 以上となる可能性がある。

EC:エコーキャンセラ ADF:適応デジタルフィルタ

図 9 電話会議サービスにおけるエコーの発生（4対地接続）

いる¹⁸⁾。

4.2 多地点間電話会議サービス

複数の電話機を接続することによって、多くの人の同時通話を可能とするサービスである。このシステムでは多対地からの送信信号を加算して各対地に分配するため、回線エコーあるいは音響エコーも加算される。このため、4線系のループ利得が1を越える可能性がある。このため図9に示すようにエコーキャンセラを用いてエコーを消去している¹⁹⁾。

4.3 音声応答サービス

予約システムなど、サービスセンターからの音声に對し、押しボタン電話機からの信号によって回答するサービスである。音声を終了する前にボタンを押下して回答する場合があるため、サービスセンターでは音声信号のエコーと押しボタン電話の信号とを区別するためにエコーキャンセラを導入している。

5. 音響エコー制御

音響エコーはスピーカからマイクロホンへの直接波と、室内の壁面の多重反射からもたらされる間接波(いわゆる残響)を重ね合わせたものであり、そのインパルス応答は回線エコーのインパルス応答とかなり異なる。また、時間の経過と共に、人やものが移動したり、室内の温度が変化することで、その特性も大幅に変動する²⁰⁾。また、空調騒音や周囲の人の話し声など、エコーキャンセラの性能を劣化させる雑音も多い。

5.1 テレビ会議システム

室内音響エコー経路のインパルス応答の一例を図10に示す。一般的な会議室の残響時間は100~400msであり、これを8kHzサンプリングのトランスバーサル型フィルタで表すと、約4000タップに及ぶため、そのハードウェア実現問題は他の種類のエコーキ

ャンセラに比べて極めて難しい。そのため、複数チップを縦続接続して並列処理を行うことにより、1チップ当たりに必要な演算量と記憶容量を低減したり(縦続接続法²¹⁾)、通話帯域をいくつかのサブバンドに分割し、ハイバンド側は変調によって低域側に折り返してサンプリング周波数を低減させたり(帯域分割法²²⁾)することにより、実時間動作を確保している。また、インパルス応答の指数減衰特性を利用した方法によって収束時間を短くする検討も行われている²³⁾。

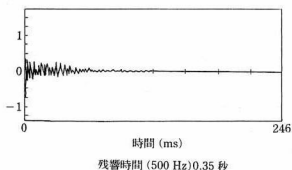
5.2 自動車電話

自動車の室内は容積が小さくシートによる吸収力が大きいため、一般の室内に比べて残響時間が短い。また通話帯域も0.3~3.4kHzであり、テレビ会議用に比べてハードウェア規模は少なくてよい。そのため、最近盛んに検討されている²⁴⁾。

しかしながら、走行中は騒音が大きく、小空間のため人の移動によってエコー経路の伝達特性が変化しやすいなど、実使用環境としてはかなり厳しい。また、回線側のエコー制御にもエコーキャンセラを使う場合には、電波伝搬の非線形性などの問題もある。

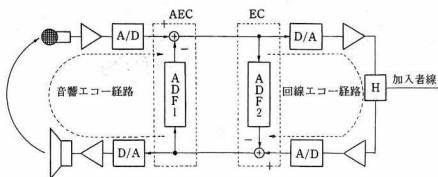
5.3 拡声電話機

ハンドセットを持たずにスピーカとマイクロホン



音響エコーは直接音と残響音により、複雑な波形となる。

図10 室内音響エコー経路のインパルス応答



音響エコー経路用のエコーキャンセラ(AEC)と回線エコー経路用のエコーキャンセラ(EC)の2つで構成することで4線ループ内の一巡利得を1以下とする。

ADF: 適応デジタルフィルタ

図11 エコーキャンセラを用いた拡声電話機の構成

用いて通話できる拡声電話機には、スピーカ・マイクロホン間の音響結合による音響エコーとハイブリッドトランスによる回線エコーの両方が生じる。拡声電話機は操作性を考慮して、スピーカとマイクロホンが一体形のものが主流であり、このためテレビ会議などに比べて音響エコーが大きい。また、拡声電話機には低価格が必須の条件であるためトランスバーサル型フィルタのフィルタ長を長くできない。そのため、もっぱらハウリング防止を目的としてエコー制御装置が使用されている²⁵⁾。エコーキャンセラを用いた拡声電話機の構成例を図11に示す。

6. む す び

音声通信用エコー制御技術について、エコーキャンセラに主眼を置いてその原理と応用例を述べてきた。電話回線用エコーキャンセラはLSI化も行われ急速に普及中であるが、音響用エコーキャンセラは現在でも多くのLSIが必要であり、小型・低価格化の障壁になっている。また、収束時間はタップ数に比例して増大するため、収束特性の向上も重要な課題である。このため最近ではIIR型フィルタを用いた検討が盛んである。今後のLSI技術の進展によっては逐次最小2乗法やラティスフィルタの使用も現実的なものとなろう。エコーキャンセラの性能を左右する大きな要因のひとつであるにもかかわらず、根本的な解決法の見あたらないダブルトーク制御法も重要な問題である。

(1989年11月6日受付)

(参 考 文 献)

- 大島, 榎本: “鳴音防止方式”, 特許公告, 昭32-3054
- M. Sondhi: “An Adaptive Echo Canceller”, BSTJ, 46, 3, pp. 497-511 (Mar. 1967)
- D. L. Duttweiler and Y. S. Chen: “A Single Chip VLSI Echo Canceller”, BSTJ, 59, 2, pp. 149-160 (Feb. 1980)
- 村野: “エコーキャンセラの応用”, 信学誌, 70, 5, pp. 479-481 (May 1987)
- CCITT 勧告 G. 131: “Stability and Echo”, Red Book, pp. 183-195 (1984)
- Kishimoto, et al.: “Transmission Quality of Handsfree Audio Teleconference Services”, ICC'88, 8.4 (June, 1988)
- 辻井監修: “エコーキャンセラ技術”, 日本工業技術センタ, 東京 (1986)
- 黒沢, 井戸, 辻井: “エコーキャンセラのIIR形構成に関する検討”, 信学技報, CS83-34, pp. 63-68 (1983)

- 板倉, 西川: “カルマンフィルタを用いたエコーキャンセラのアルゴリズムとその簡易化”, 信学論(A), J60-A, 11 (Nov. 1977)
- 超, 辻井: “ダブルトーク期間において制御可能な3端子対エコーキャンセラの提案”, 信学論(A), J71-A, 2, pp. 379-386 (1988)
- 野田, 南雲: “システム学習の同定法”, 計測と制御, 7, 9, pp. 597-605 (1968)
- B. Widrow, et al.: “Adaptive Noise Cancelling: Principles and Applications”, Proc. IEEE, 63, 12, pp. 1692-1716 (1975)
- 古川ほか: “音響エコーキャンセラの所要タップ長に関する検討”, 信学論(B), J70-B, 1, pp. 48-55 (Jan., 1987)
- 尾関, 梅田: “アフィン部分空間への直交射影を用いた適応フィルタ・アルゴリズムとその諸性質”, 信学論(A), J67-A, 2, pp. 126-132 (1984)
- 谷萩, 斎藤: “インパルス応答の分割推定に基づいた並列形カルマンフィルタによるエコーキャンセラ”, 信学論(A), J69-A, 1, pp. 138-149 (1986)
- CCITT 勧告 G. 165, CCITT Red Book, Vol. 3-Fascicle 3.1, pp. 258-279 (1984)
- 福井, 越川, 海上等: “専用LSIによるエコーキャンセラの構成”, 信学技報, CAS86-27 (1986)
- H. Yasukawa and S. Shimada: “Voiceband Bothway Repeater using Echo Canceller for Automatic Call-transfer Service” ISCAS' 85, pp. 1489-1492 (1985)
- 島田, 安川ほか: “電話会議用中継装置”, 研実報, 34, 4 (1985)
- 牧野, 小泉: “直方体ブース内の障害物によるインパルス応答の変動について”, 音調論, p. 295 (1987. 3)
- K. Takahashi, et al.: “A Cascadable Canceller”, ICAS-SP, 5F3 (1982)
- I. Furukawa: “A Design of Canceller for Broadband Acoustic Echo”, Proc. ITS, pp. 232-239 (Apr. 1984)
- 牧野, 小泉: “エコーキャンセラの室内音場における適応特性の改善について”, 信学論(A), J71-A, 12, pp. 2212-2214 (1988)
- 中野, 伊藤, 宮本: “エコーキャンセラを用いたハンズフリー自動車電話”, 信学全大, B-301 (1988)
- 古川, 島田, 西野: “エコーキャンセラの拡声電話機への適用性評価”, 信学総全大, No. 2306 (1985)



しまだ しやうじ
島田 正治 昭和45年, 早稲田大学, 大学院修士課程修了。同年, NTTに入社。以来, モデム, デジタル伝送, エコー制御等の信号処理の研究に従事。CCITT 第9研究会期 SG XV音響エコー制御装置の特別報告者。現在, 同社通信網総合研究所主幹研究員, 工学博士。



まきの しやうじ
牧野 小泉 昭和56年, 東北大学大学院機械工学専攻修士課程修了。同年, NTT電気通信研究所に入社。以後, 同研究所において電気音響変換器, 拡声電話機, 音響エコーキャンセラの研究開発に従事。現在, 同社ヒューマンインタフェース研究所音声情報研究部主任研究員, 正会員。