

## ブラインド等化のためのプレフィルタリング

正員 伊藤 克子<sup>†</sup>      正員 島村 徹也<sup>†</sup>      正員 鈴木 誠史<sup>†</sup>

### Prefiltering for Blind Equalization

Katsuko ITOH<sup>†</sup>, Tetsuya SHIMAMURA<sup>†</sup> and Jouji SUZUKI<sup>†</sup>, *Members*

あらまし 分布合同原理に基づくブラインドアルゴリズムの最大の問題点は、収束に要する時間が長いことであるが、その収束特性が何に依存するかは明確にされていない。本論文では、通常の適応等化に多く用いられている LMS アルゴリズムとブラインドアルゴリズムの類似性に着目し、ブラインドアルゴリズムの収束特性が入力相関行列の条件数に依存すると予測し、計算機シミュレーションによりこれを確認している。続いて、ブラインド等化のための固定型および適応型プレフィルタリングを提案している。本手法は、予測誤差フィルタが通信路によるひずみの振幅特性を補正する能力を有することに着目し、両プレフィルタを実現している。プレフィルタリングの振幅特性補正能力により、ブラインド等化では位相特性のみを補正すればよいことになり、ブラインド等化器にかかる負荷が軽減される。また、プレフィルタ出力は白色信号に近い性質を有するため、通信路出力からなる相関行列の条件数の増加に伴うブラインドアルゴリズムの収束特性の劣化を改善することができる。本手法の有効性は、計算機シミュレーションによって確認されている。

キーワード ブラインドアルゴリズム、収束特性、条件数、プレフィルタリング、白色化

### 1. ま え が き

電話回線等のデジタル通信系で用いられている等化器は、トレーニング系列を用いて設計されている。しかし、通信路で何らかの障害が発生し通信路特性が大きく変化した場合、等化器を設計し直さなければならない。また、データ通信でよく用いられるポーリングシステムにおいては、中央局と分岐局との複雑なプロトコルのやりとりが、システムの大規模化に伴い、データスループットの低下をまねく。このような場合に、受信信号のみから等化器を設計するブラインド等化の技術が有効となる。

ブラインド等化に関する研究は、1973 年に Sato によってその概念が示され、ブラインド等化のための適応アルゴリズム (Sato アルゴリズム) が提案されたのが始まりである<sup>(1)</sup>。現在では Sato アルゴリズムのほか、Godard アルゴリズム<sup>(2)</sup>、Benveniste-Goursat アルゴリズム<sup>(3)</sup>、Stop-and-Go アルゴリズム<sup>(4)</sup> 等を代表として、いくつかのブラインドアルゴリズムが提案されている<sup>(5),(6)</sup>。これらのアルゴリズムは、送信信号と等化器出力の確率分布を一致させることによりブラインド

等化を実現していることから、分布合同原理に基づくブラインドアルゴリズムと呼ばれている。分布合同原理に基づくブラインドアルゴリズムは、次のような特徴をもつ。

- (1) アルゴリズム自体が簡潔で、計算量が少ない。
- (2) 収束に要する時間が非常に長い。
- (3) 非線形処理を含んでいる。
- (4) 非所望の平衡状態 (ローカルミニマ) が存在する。
- (5) 収束特性が何に依存するか明確でない。

アルゴリズムがローカルミニマに収束した場合、符号間干渉が十分除去できないため、これを回避することは非常に重要な問題である。従って、ブラインドアルゴリズムの収束特性を解析する論文の多くは、この問題を取り上げている<sup>(7)-(9)</sup>。ローカルミニマは、ブラインド等化の評価関数が等化器係数の完全な 2 次関数として与えられないことや等化器が有限長であることが原因であると言われている<sup>(8)</sup>。しかし、これらのアルゴリズムに含まれる非線形関数の存在により、ブラインドアルゴリズムの収束特性の理論解析は困難であり、ローカルミニマの問題をはじめとして、まだ未知である点が多い。一方、ブラインド等化の手法として、高次統計量を用いる手法も提案されている<sup>(10)-(12)</sup>。しかし、この手法は、精度は良好であるが、計算量が非

<sup>†</sup> 埼玉大学工学部情報工学科、浦和市  
Faculty of Engineering, Saitama University, Urawa-shi, 338  
Japan

常に多くあまり実用的でない。

本論文では、分布合同原理に基づくブラインドアルゴリズムを取り上げ、ブラインド等化の高速化を目的として、ブラインドアルゴリズムの収束特性に関する考察およびブラインド等化のためのプレフィルタリングの提案を行う。論文前半では、LMS アルゴリズムとブラインドアルゴリズムの類似性に着目して、ブラインドアルゴリズムの収束特性が入力信号の相関行列の条件数（最大固有値と最小固有値の比）に依存すると推測し、計算機シミュレーションによってそれを確認する。この結果をふまえて後半では、ブラインド等化のための固定型および適応型プレフィルタリングを提案する。提案法では、2次統計量による予測システムが、通信路特性の振幅特性を補正する能力があることに着目し、これをブラインド等化のプレシステムとしている。プレフィルタリングによりブラインド等化は位相特性の補正のみを行うことになり、等化器にかかる負荷が軽減される。また、プレフィルタ出力は白色に近い信号であるため、通信路出力からなる相関行列の条件数の増加によるブラインドアルゴリズムの収束特性の劣化を防ぐことができる。

本論文は次のような構成である。2. では、Sato アルゴリズムについて簡単に述べる。そして、3. で、計算機シミュレーションにより、代表的なブラインドアルゴリズムの収束特性が入力相関行列の条件数に依存することを確認する。4. では、ブラインド等化のための固定型および適応型プレフィルタリングを提案し、5. で、提案法の有効性を計算機シミュレーションにより立証する。6. では、本論文を総括し、結論を述べる。

## 2. ブラインド等化

本章では、非最小位相通信路におけるブラインド等化問題について述べる。続いて、Sato アルゴリズムについて述べ、ブラインドアルゴリズムの収束特性に関する推測を行う。

### 2.1 非最小位相推移通信路におけるブラインド等化問題

非最小位相推移の通信路  $H(z)$  は、

$$H(z) = \sum_{i=-\infty}^{\infty} h_i z^{-i} \quad (1)$$

と書ける。これは、 $z$  領域においてゼロ点をすべて単位円内にもつ最小位相推移部分  $I(z^{-1})$  とゼロ点を単位円外にもつ最大位相推移部分  $O(z)$  に分けることができるので、次式のように書くことができる。

$$H(z) = I(z^{-1})O(z) \quad (2)$$

但し、 $I(z^{-1})$ 、 $O(z)$  は、それぞれ次式のように与えられる。

$$I(z^{-1}) = \prod_{i=1}^{l_1} (1 - a_i z^{-1}), \quad |a_i| < 1 \quad (3)$$

$$O(z) = \prod_{i=1}^{l_2} (1 - b_i z), \quad |b_i| < 1 \quad (4)$$

このように多くの通信路は、最小位相推移と最大位相推移の組合せとして表される。

ここで、通信路が最小位相推移である場合について考える。式(2)において、最大位相項を  $O(z)=1$  とおくと、次式のように最小位相推移通信路  $H_{\min}(z)$  が与えられる。

$$H_{\min}(z) = I(z^{-1}) \quad (5)$$

このとき、 $H_{\min}(z)$  は因果的であるので、 $H_{\min}(z)$  の逆システムである等化器  $W(z)$  は、次式のような因果的かつ安定な形で存在する。

$$W(z) = \sum_{i=0}^M w_i z^{-i} \quad (6)$$

送信信号  $d(n)$  が最小位相推移通信路  $H_{\min}(z)$  を経由し、受信信号  $x(n)$  が得られるとすると、 $x(n)$  は次のように書くことができる。

$$x(n) = \sum_{i=0}^{\infty} h_i d(n-i) \quad (7)$$

このとき、通信路出力  $x(n)$  が等化器  $W(z)$  に入力されると、 $d(n)$  が得られるはずなので

$$d(n) = \sum_{i=0}^M w_i x(n-i) \quad (8)$$

の関係が成立する。この両辺に  $x(n)$  の過去の値  $x(n-k)$ ,  $k=1, 2, \dots$  を掛けて、期待値をとると

$$E[d(n)x(n-k)] = \sum_{i=0}^M w_i E[x(n-i)x(n-k)] \quad (9)$$

が得られる。ここで、送信信号  $d(n)$  は IID (Independent Identically Distributed) であるので、式(9)の左辺はゼロとなる。更に、 $x(n)$  の自己相関行列を  $\mathbf{R}$ 、等化器係数ベクトルを  $\mathbf{w}$  とおけば、式(9)は Yule-Walker 方程式

$$\mathbf{R}\mathbf{w} = 0 \quad (10)$$

となる。この式には  $x(n)$  の自己相関関数のみが含まれていることより、最小位相推移通信路は受信信号の2次統計量のみを用いてブラインド等化が可能である特別なケースであることがわかる。しかし前述のとおり、多くの通信路は非最小位相推移である。一方、自己相関関数より得られる情報は振幅特性に関してのみであり、位相特性に関する情報は得られない。そこで送信信号と等化器出力の確率分布を一致させることに

よりブライント等化を実現させる分布合同原理に基づくブライントアルゴリズムが提案されている。

## 2.2 分布合同原理に基づくブライント等化

### 2.2.1 ブライントアルゴリズム

分布合同原理に基づくブライント等化の代表的なアルゴリズムとして、Sato アルゴリズム<sup>(1)</sup>、Godard アルゴリズム<sup>(2)</sup>、Benveniste-Goursat アルゴリズム<sup>(3)</sup>、Stop-and-Go アルゴリズム<sup>(4)</sup>が挙げられる。ここでは、これらの中で最も基本的であるとされている Sato アルゴリズムを取り上げ、これについて具体的に記述することにより、ブライント等化問題を定式化する。

図 1 に一般的なディジタル通信系を示す。IID 信号  $d(n)$  が通信路  $H(z)$  を経由し、受信側に  $x(n)$  が得られるとする。等化器は可変タップ係数  $w_i, i=0, \dots, M$  を有する  $M$  次 FIR フィルタとし、等化器出力  $z(n)$  が与えられる。また、ここで扱う信号は特に断らない限り複素数であり、下付き文字  $R, I$  はそれぞれ、実部、虚部を示す。

<Sato アルゴリズム>

Sato アルゴリズムの評価関数は、等化器出力  $z(n)$  により次式で与えられる<sup>(1),(3)</sup>。

$$J = E[|z(n) - \gamma \text{csign}(z(n))|^2] \quad (11)$$

但し、 $\gamma$  は信号の分布を示す実数定数であり、

$$\gamma = \frac{E[|d_R(n)|^2]}{E[|d_I(n)|^2]} = \frac{E[|d_I(n)|^2]}{E[|d_R(n)|^2]} \quad (12)$$

で与えられる。また、 $\text{csign}$  関数は、複素数を次のように符号判定する関数である。

$$\text{csign}(x_R + jx_I) = \text{sign}(x_R) + j\text{sign}(x_I) \quad (13)$$

最急降下法に基づき、Sato アルゴリズムは次式のように与えられる。

$$w(n+1) = w(n) - \mu x^*(n)[z(n) - \gamma \text{csign}(z(n))] \quad (14)$$

但し、 $*$  は複素共役を示す。また  $\mu$  はステップサイズである。

### 2.2.2 ブライントアルゴリズムの特徴

分布合同原理に基づくブライントアルゴリズムは、

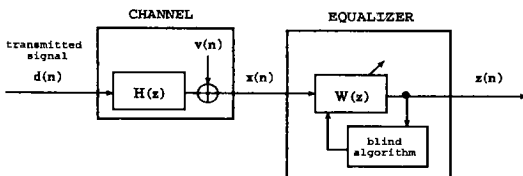


図 1 ブライント等化のシステム構成図  
Fig. 1 Block diagram of blind equalization system.

アルゴリズム自体が簡潔で、計算量が少ない反面、収束に長い時間を要する、ローカルミニマと呼ばれる非所望の収束状態が存在する、収束特性が何に依存するか不明確である、等の問題点がある。これらの問題は、アルゴリズム自体に包有する非線形関数が、収束特性の解析を困難にしているために起きている。文献(7)～(15)は、低次のモデルを用いて収束特性の理論的解析を試みているが、結局 Sato および Godard アルゴリズムのローカルミニマへの収束性は、現実的には回避されないとの結論にたどりついているのみであり、問題の解決にはなっていない。従って、多くの場合、計算機シミュレーションに基づく経験的な検証にとどまらざるを得ない。

アルゴリズムの有する非線形性は、また他のアルゴリズムとの比較をも困難にする。すなわち、アルゴリズムの収束特性が何に最も影響を受けるのか明確になっていないために、対等な条件で比較することが困難である。従って、本論文においては、よく知られる四つのブライントアルゴリズムを取り上げて、考察を行う。

### 2.2.3 ブライントアルゴリズムの収束特性に関する推測

Sato アルゴリズム、Godard アルゴリズムは、最急降下法に基づいて設計されている。Benveniste-Goursat アルゴリズム、Stop-and-Go アルゴリズムは、Sato アルゴリズムや Decision-Directed モードにおける LMS アルゴリズムを改良したアルゴリズムであるため、また最急降下法に基づいていると言える。一方、LMS アルゴリズムが最急降下法に基づいて設計されていることは周知であり、その収束特性は入力相関行列の条件数に依存する<sup>(13)</sup>。

式(14)において、所望とされる信号  $\gamma \text{csign}(z(n))$  を  $d(n)$  に置き換えれば、従来よく知られる LMS アルゴリズムによる適応等化アルゴリズムとなる。式(14)のブライントアルゴリズムには  $\text{csign}(\cdot)$  の非線形処理が含まれており、この点が LMS アルゴリズムと異なっている。しかし双方のアルゴリズムは、最急降下法に基づく類似した記述となっている。また、文献(14)は、Sato アルゴリズムの収束特性について論じている。Sato アルゴリズムの収束特性を解析するために、LMS アルゴリズムの収束特性を解析する手法、すなわち 2 次統計量に基づく手法を適用し、近似的ではあるが、理論特性と計算機シミュレーション結果の十分なマッチングを図っている。従ってここでは、上記の

表 1 計算機シミュレーションの条件

送信信号	16QAM 信号
通信路インパルス応答	$h_i = \begin{cases} \frac{1}{2}[1 + \cos(\frac{2\pi}{W}(i-1))] & , i = 0, 1, 2 \\ 0 & , \text{その他} \end{cases}$
信号対雑音比	40 [dB]

表 2 パラメータ  $W$  と条件数の関係

通信路パラメータ $W$	3.0	3.2	3.4	3.5	3.6
条件数	7.4	15.4	48.7	67.4	120.5

表 3 ブラインドアルゴリズムのパラメータ

Sato アルゴリズム	ステップサイズ	0.0001
Godard アルゴリズム	ステップサイズ	0.0005
	$p$	2
Benveniste-Goursat アルゴリズム	ステップサイズ	0.00005
	$k_1$	5
	$k_2$	1
Stop-and-Go アルゴリズム	ステップサイズ	0.0001
	$\beta_n$	6.0

Sato アルゴリズムと LMS アルゴリズムの類似的記述および文献(14)による 2 次統計量に基づく理論解析の妥当性という 2 点に着目し、ブラインドアルゴリズムの収束特性は LMS アルゴリズムの収束特性に類似した傾向を示すと考える。そして特に、ブラインドアルゴリズムの収束特性は LMS アルゴリズムと同様、入力相関行列の条件数に依存すると推測する。

文献(14)は、Sato アルゴリズムの収束特性について論じているが、各時刻における Sato アルゴリズムの係数が理論的に計算できることを示すにとどまっており、アルゴリズムの収束特性を決定する要因に関する記述は得られていない。これは、アルゴリズムに含まれている非線形処理により、理論的解析が困難であるためと思われる。そこで次章において、ブラインドアルゴリズムの収束特性と条件数の依存性を検証するために、計算機シミュレーションを行う。

### 3. 計算機シミュレーション 1

本章では、ブラインドアルゴリズムの収束特性が入力相関行列の条件数に依存することを検証するために、代表的なブラインドアルゴリズムである Sato アルゴリズム<sup>(1)</sup>、Godard アルゴリズム<sup>(2)</sup>、Benveniste-Goursat アルゴリズム<sup>(3)</sup>、Stop-and-Go アルゴリズム<sup>(4)</sup>を取り上げ、計算機シミュレーションを行う。

#### 3.1 シミュレーションの条件

計算機シミュレーションに用いた送信信号および通信路特性を表 1 に示す。通信路インパルス応答は、典型的な電話回線の特性であり、非最小位相推移である<sup>(15)</sup>。また、これに含まれるパラメータ  $W$  は、その値を変化させることにより通信路出力の条件数を変化させることができる。等化器 20 次の場合の  $W$  の値と、そのときの条件数を表 2 に示す。また、ブラインドアルゴリズムの各種パラメータは、表 3 に示す値を用いる。

#### 3.2 シミュレーション結果

計算機シミュレーションの結果を図 2 に示す。(a) は Sato アルゴリズム、(b) は Godard アルゴリズム、(c) は Benveniste-Goursat アルゴリズム、(d) は

Stop-and-Go アルゴリズムの収束特性と条件数の関係を示している。等化器は 5 次とした。また、横軸はアルゴリズムの反復回数、縦軸は等化器出力の 2 乗平均誤差 MSE

$$\text{MSE} = E[|z(n) - \hat{d}(n)|^2] \quad (15)$$

を示す。但し、 $\hat{d}(n)$  は、等化器出力  $z(n)$  を多値判定して得られた値である。グラフには、100 の独立した試行の平均を示す。

シミュレーションより、代表的なブラインドアルゴリズムの収束特性と条件数の間には、次のような関係が成り立つことがわかる。

- (1) 条件数が増加すると、収束速度が遅延する。
- (2) 条件数が増加すると、グローバルミニマからより遠いローカルミニマへ収束する。

従って、ブラインドアルゴリズムの収束特性は、入力相関行列の条件数に大きく依存すると言える。

またこのシミュレーション結果からは、LMS アルゴリズムに比べ、ブラインドアルゴリズムには条件数の増大に伴う極端な収束速度の劣化が見られないことに気づく。これは、LMS アルゴリズムが所望とする信号へ時間領域において振幅かつ位相を、すなわち信号自体をマッチングさせる操作をするのに対して、ブラインドアルゴリズムではその符号あるいは振幅値のみをマッチングさせる操作となっていることに起因して

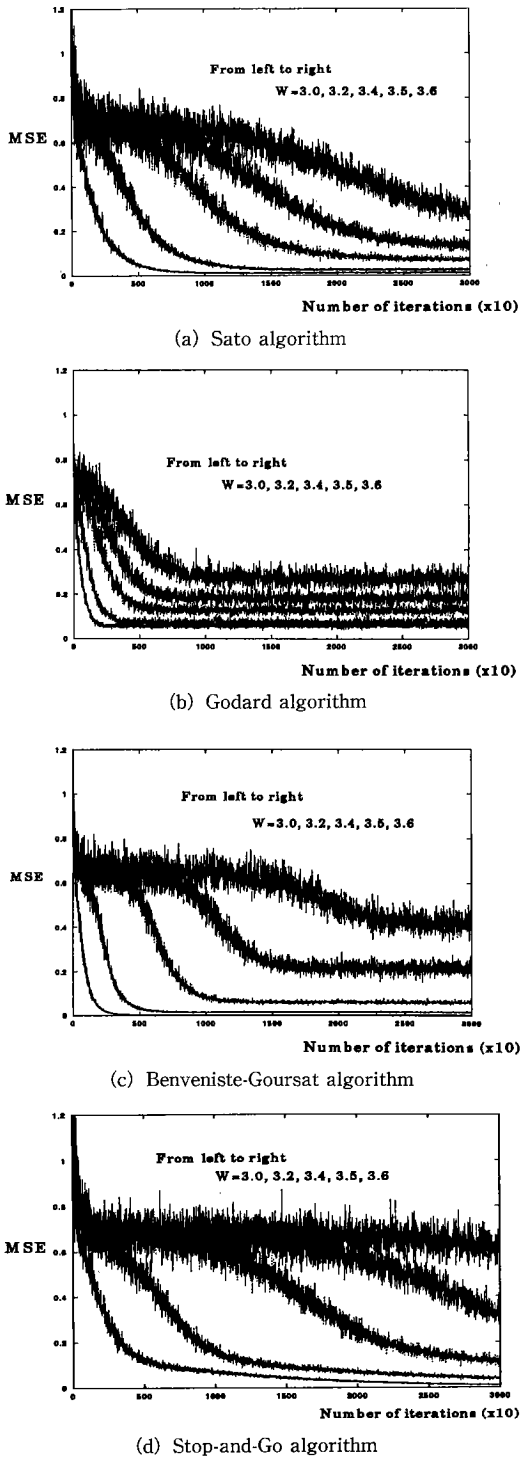


図2 ブライントアルゴリズムの収束特性と条件数の関係  
Fig.2 Relation between convergence properties of blind algorithms and condition numbers.

いよう。その結果、入力相関行列の条件数が大きい場合、LMS アルゴリズムは唯一の最適解が存在するグローバルミナを探査し、多くの時間を要するが、ブライントアルゴリズムはいくつものローカルミナを有し、LMS アルゴリズムよりも比較的短い時間で、そのどこかに収束してしまうと考えられる。

#### 4. ブライント等化のためのプレフィルタリング

本章では、非最小位相推移通信路と予測システムの関係について述べる。続いて、ブライントアルゴリズムの収束特性の改善を目的として、ブライント等化のためのプレフィルタリングを提案する。

##### 4.1 ブライント等化と線形予測

式(2)で与えられる通信路は、次のように変形することができる。

$$H(z) = I(z^{-1})O^*(z^{-1}) \frac{O(z)}{O^*(z^{-1})} \quad (16)$$

従って、非最小位相推移通信路は、 $I(z^{-1})O^*(z^{-1})$ で表される最小位相推移システムと  $O(z)/O^*(z^{-1})$  で表される全域通過システムの積であると考えることができる。

2. において、最小位相推移通信路の場合、受信信号の2次統計量のみを用いてブライント等化が可能であることを述べた。従って、非最小位相推移通信路の場合には、受信信号の2次統計量を用いて、最小位相項  $I(z^{-1})O^*(z^{-1})$  の逆システム  $P(z)$  を実現することができる。従って、逆システム  $P(z)$  は、

$$P(z) = \frac{1}{I(z^{-1})O^*(z^{-1})} \quad (17)$$

と書ける。図3のように、 $P(z)$  を通信路  $H(z)$  に縦続接続すると、 $P(z)$  と  $H(z)$  のトータルシステム  $T(z)$  は、

$$T(z) = H(z)P(z)$$

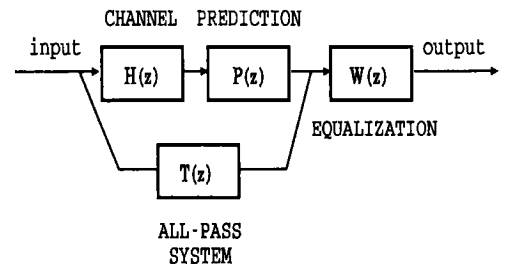


図3 ブライント等化と予測  
Fig.3 Blind equalization and prediction.

$$= \frac{O(z)}{O^*(z^{-1})} \quad (18)$$

となる。\$T(z)\$ の振幅特性は

$$|T(z)| = \left| \frac{O(z)}{O^*(z^{-1})} \right| = 1 \quad (19)$$

となり、\$T(z)\$ は全域通過特性を有する。従って、\$P(z)\$ をブラインド等化器 \$W(z)\$ のプレシステムとすれば、\$P(z)\$ は振幅特性を、\$W(z)\$ は位相特性を補正することになる。別の言い方をすれば、プレシステムは白色化をブラインド等化器は独立化を行う。従って、2 次統計量を用いて求めた最小位相推移項の逆システムをブラインド等化のプレシステムとして用いることにより、等化器にかかる負荷が軽減される。

3. でのシミュレーション結果は、入力信号にブラインドアルゴリズムが大きく依存することを示している。入力相関行列の条件数が小さい場合、ブラインドアルゴリズムは MSE を抑え、高速に収束する。しかし、条件数が大きくなるにつれて、MSE は増大し、また収束速度も劣化する。そこでこの性質を利用し、ここではプレシステムにより、通信路出力の白色化を図る。通信路出力の条件数が大きい場合においても、プレシステムの出力は白色性の信号とすることができ。従って、プレシステムに縦続されるブラインド等化器の入力信号の条件数は十分に低減され、結局、ブラインドアルゴリズムの収束特性は大幅に改善されることになるわけである。

2 次統計量においては、等化と予測は同じ意味を有する<sup>(16)</sup>。従ってここでは、\$P(z)\$ を予測誤差フィルタにより実現することにする。

#### 4.2 固定型プレフィルタを用いたブラインド等化システム

本節では、固定型プレフィルタを用いたブラインド等化システムを提案する。

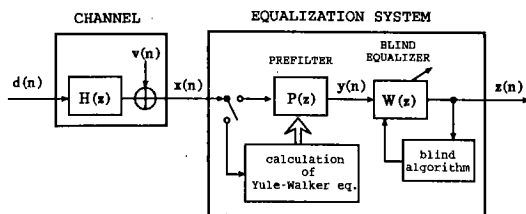


図 4 固定型プレフィルタを用いたブラインド等化システム

Fig. 4 Blind equalization system with fixed prefilter.

図 4 に、固定型プレフィルタを用いたブラインド等化のシステム構成図を示す。本システムは、固定型フィルタ係数を有する \$p\$ 次 FIR フィルタによるプレフィルタ、\$M\$ 次 FIR フィルタによるブラインド等化器、そして Yule-Walker 方程式の計算システムで構成される。プレフィルタは予測誤差フィルタである。

まず、スイッチを Yule-Walker 方程式の計算システム側に切り換える。そして、初期データ \$L\$ 個を取り込み、プレフィルタを設計する。次式の Yule-Walker 方程式

$$\mathbf{a} = \mathbf{R}^{-1} \mathbf{r} \quad (20)$$

を解いて、予測係数ベクトル \$\mathbf{a}\$ を求める。但し、\$\mathbf{R}\$ は \$x(n)\$ の自己相関行列、\$\mathbf{r}\$ は \$x(n)\$ の自己相関ベクトルである。Yule-Walker 方程式の解法には、Levinson-Durbin の解法を用いる。この計算の終了後、求まった予測係数 \$a\_i, i=1, \dots, M\$ はプレフィルタへ渡される。そしてスイッチはプレフィルタ側に切り換えられ、\$a\_i, i=0, \dots, p\$ を用いてプレフィルタリング

$$y(n) = x(n) - \sum_{i=1}^p a_i x(n-i) \quad (21)$$

が行われる。

プレフィルタ出力 \$y(n)\$ は等化器入力となり、等化器係数 \$w\_i, i=0, \dots, M\$ を用いて等化

$$z(n) = \sum_{i=0}^M w_i y(n-i) \quad (22)$$

が行われる。等化器係数ベクトル \$\mathbf{w}\$ は、ブラインドアルゴリズムにより更新される。

#### 4.3 適応型プレフィルタを用いたブラインド等化システム

本節では、適応型プレフィルタを用いたブラインド等化システムを提案する。

適応型プレフィルタを用いたブラインド等化のシス

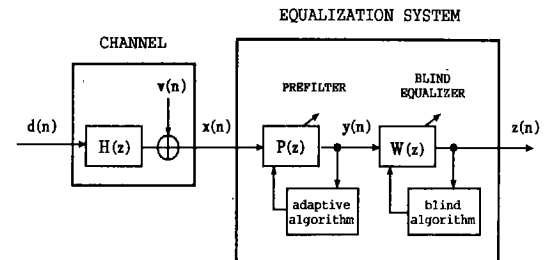


図 5 適応型プレフィルタを用いたブラインド等化システム

Fig. 5 Blind equalization system with adaptive prefilter.

テム構成を図5に示す。本システムは、適応型フィルタ係数を有する $p$ 次FIRフィルタによるプレフィルタと $M$ 次FIRフィルタによるブライント等化器で構成される。プレフィルタは、前向き予測誤差フィルタである。プレフィルタの係数と等化器の係数は、それぞれ、LMSアルゴリズムとブライントアルゴリズムを用いて、同時に更新される。

前向き予測誤差フィルタであるプレフィルタの出力は、入力 $x(n)$ と過去の $p$ 個のデータによる $x(n)$ の予測値 $\hat{x}(n)$ の差

$$y(n) = x(n) - \hat{x}(n|n-1, \dots, n-p) \quad (23)$$

で与えられる。予測係数を $a_i, i=1, \dots, p$ とすると、 $\hat{x}(n)$ は次式のように書き換えることができる。

$$\hat{x}(n|n-1, \dots, n-p) = \sum_{i=1}^p a_i x(n-i) \quad (24)$$

式(24)を式(23)へ代入して、次式が得られる。

$$y(n) = x(n) - \sum_{i=1}^p a_i x(n-i) \quad (25)$$

予測係数ベクトル $\mathbf{a}$ は、予測誤差である $y(n)$ の2乗平均値を最小にするようにLMSアルゴリズムを用いて逐次更新される。プレフィルタ出力 $y(n)$ はブライント等化器に入力され、等化器出力

$$z(n) = \sum_{i=0}^M w_i y(n-i) \quad (26)$$

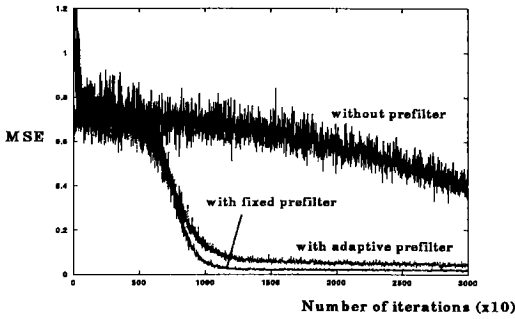
が得られる。等化器係数ベクトル $\mathbf{w}$ は、ブライントアルゴリズムを用いて更新される。

## 5. 計算機シミュレーション2

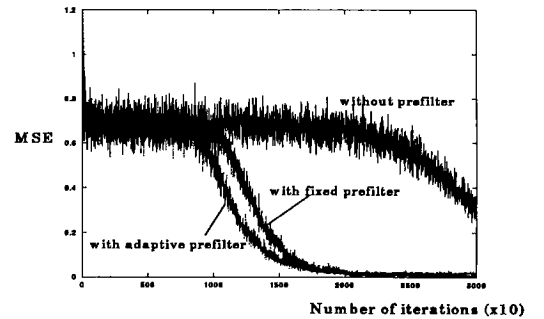
本章では、ブライント等化のための固定型および適応型プレフィルタリングの有効性を検証するために、計算機シミュレーションを行う。

### 5.1 シミュレーションの条件

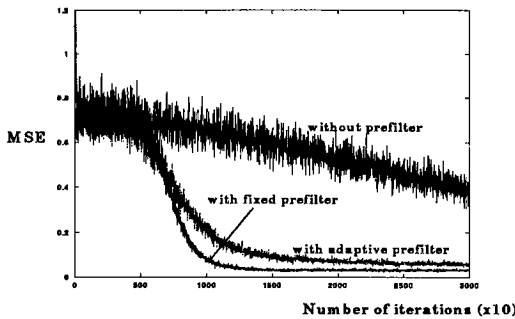
計算機シミュレーションで用いた送信信号および通信路特性は、表1と同じである。但し、通信路のパラメータ $W$ は、 $W=3.6$ とした。従来法は、等化器32次、提案法はプレフィルタ5次、等化器27次とした。プラ



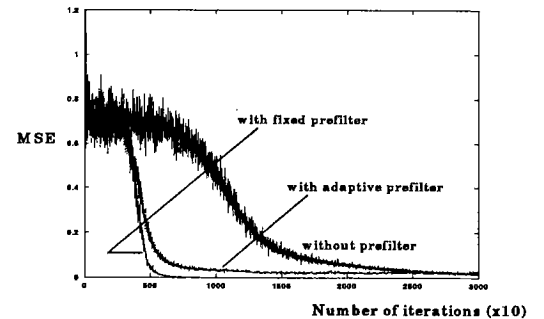
(a) Sato algorithm



(c) Benveniste-Goursat algorithm



(b) Godard algorithm



(d) Stop-and-Go algorithm

図6 ブライントアルゴリズムの収束特性 ( $W=3.6$ , トータル次数32 (従来法: 等化器32次, 提案法: プレフィルタ5次+等化器27次))

Fig. 6 Convergence properties of blind algorithms. ( $W=3.6$ , Conventional method: equalizer 32 order, Proposed method: prefilter 5 order+equalizer 27 order)

インドアルゴリズムの各種パラメータは、表3に示す。固定型プレフィルタは、初期データ256個を用いて設計した。また適応型プレフィルタのステップサイズは、0.0001とした。

## 5.2 シミュレーション結果

図6にシミュレーションの結果を示す。(a)はSatoアルゴリズム、(b)はGodardアルゴリズム、(c)はBenveniste-Goursatアルゴリズム、(d)はstop-and-goアルゴリズムの収束特性である。グラフの横軸はブラインドアルゴリズムの反復回数、縦軸は式(15)で与えられる等化器出力の2乗平均誤差MSEである。また、グラフに示す結果は、100回の独立した試行の平均である。

図6より提案法は、次のような優位性を有することがわかる。

(1) 固定型および適応型プレフィルタリングは、ブラインドアルゴリズムの収束速度の改善に有効である。

(2) 固定型および適応型プレフィルタリングは、よりグローバルミニマに近い点への収束を促す。

また、固定型プレフィルタと適応型プレフィルタを比較した場合、適応型プレフィルタリングをした場合の収束値は、固定型の収束値に同じか若しくは少し劣っている。これは、適応型プレフィルタの係数の変動が、ブラインド等化器の係数に悪影響を与えているためと考えられる。

## 6. む す び

本論文では、分布合同原理に基づくブラインドアルゴリズムの収束特性に関する解析およびブラインドアルゴリズムの収束特性改善の手法の提案を行った。

本論文の前半では、ブラインドアルゴリズムとLMSアルゴリズムとの類似性に着目し、ブラインドアルゴリズムの収束特性が入力に依存すると推測した。そして計算機シミュレーションにより、代表的なブラインドアルゴリズムの収束特性は入力相関行列の条件数に依存することを確認した。

続いて、後半では、ブラインド等化のためのプレフィルタリングを提案した。提案法では、予測誤差フィルタにより、固定型および適応型プレフィルタリングを実現した。提案法は、従来法に比べ以下のような優位性を有する。

(1) プレフィルタは通信路における振幅特性のひずみを補正する能力を有するため、ブラインド等化器

にかかる負荷が軽減される。

(2) プレフィルタの白色化効果により、通信路出力の条件数が大きい場合でも、ブラインドアルゴリズムは良好な収束特性を得ることができる。

(3) プレフィルタリングは、ブラインドアルゴリズムの収束速度を向上させる効果を有する。

(4) プレフィルタリングは、よりグローバルミニマへ近い点への収束を促す。

## 文 献

- (1) Sato Y.: "A method of self-recovering equalization for multilevel amplitude-modulation systems", IEEE Trans. Commun., **COM-22**, pp. 679-682 (1975).
- (2) Godard D. N.: "Self-recovering equalization and carrier tracking in two-dimensional data communication systems", IEEE Trans. Commun., **COM-28**, 11, pp. 1867-1875 (Nov. 1980).
- (3) Benveniste A. and Goursat M.: "Blind equalizers", IEEE Trans. Commun., **COM-32**, 8, pp. 871-883 (Aug. 1984).
- (4) Picchi G. and Prati G.: "Blind equalization and carrier recovery using a "stop-and-go" decision-directed algorithm", IEEE Trans. Commun., **COM-35**, 9, pp. 877-887 (Sept. 1987).
- (5) 小田弘良, 佐藤洋一: "ブラインド等化の高速化について", システム制御情報学会論文誌, **6**, 7, pp. 305-318 (1993-07).
- (6) Ross F. J. and Taylor D. P.: "An enhancement to blind equalization algorithms", IEEE Trans. Commun., **COM-39**, 5, pp. 636-639 (May 1991).
- (7) Ding Z., Kennedy R. A., Anderson B. D. O. and Johnson C. R.: "Ill-convergence of Godard blind equalizers in data communication systems", IEEE Trans. Commun., **COM-39**, 9, pp. 1313-1327 (Sept. 1991).
- (8) Ding Z., Johnson C. R. and Kennedy R. A.: "On the (non) existence of undesirable equilibria of Godard blind equalizers", IEEE Trans. Signal Process., **SP-40**, 10, pp. 2425-2432 (Oct. 1992).
- (9) Ding Z., Kennedy R. A., Anderson B. D. O. and Johnson C. R.: "Local convergence of the Sato blind equalizer and generalizations under practical constraints", IEEE Trans. Info. Theory, **IT-39**, 1, pp. 129-144 (Jan. 1993).
- (10) Chiang H. and Nikias C. L.: "Adaptive deconvolution and identification of nonminimum phase FIR systems based on cumulants", IEEE Trans. Automat. Contr., **AC-35**, 1, pp. 36-47 (Jan. 1990).
- (11) Hatzinakos D. and Nikias C. L.: "Blind equalization using tricepstrum-based algorithm", IEEE Trans. Commun., **COM-39**, 5, pp. 669-681 (May 1991).
- (12) Porat B. and Friedlander B.: "Blind equalization of digital communication channels using high-order moments", IEEE Trans. Signal Processing, **SP-39**, 2, pp. 522-526 (1991).
- (13) Widrow B., McCool J. M., Larimore M. G. and Johnson



- C. R.: "Stationary and nonstationary learning characteristics of the LMS adaptive filter", Proc. IEEE, **64**, pp. 1151-1162 (1976).
- (14) Weerackody V., Kassam S. A. and Laker K. R.: "Convergence analysis of an algorithm for blind equalization", IEEE Trans. Commun., **COM-39**, 6, pp. 856-865 (June 1991).
- (15) Haykin S.: "Adaptive filter theory", Englewood Cliffs, N. J., Prentice-Hall (1986).
- (16) 佐藤洋一: "線形等化理論: 適応ディジタル信号処理", 丸善 (1991).

(平成 6 年 3 月 31 日受付, 6 月 20 日再受付)



伊藤 克子

平 4 埼玉大・工・情報卒。平 6 同大大学院修士課程了。同年キリンビール(株)入社。在学中ディジタル信号処理に関する研究に従事。



島村 徹也

昭 61 慶大・理工・電気卒。平 3 同大大学院博士課程了。工博。同年埼玉大・工・情報助手。スペクトル解析および適応信号処理に関する研究に従事。計測自動制御学会、日本音響学会、IEEE 各会員。



鈴木 誠史

昭 30 東工大・工・電気卒。同年郵政省電波研究所(現。通信総合研究所)入所。昭 42 同通信機器部音声研究室長。昭 57 同情報処理部長。昭 60 同総合通信部長。昭 63 通信総合研究所長。平 1 埼玉大・工・教授。現在に至る。昭 41~42, MIT 客員研究員。工博。この間、音声合成、音声認識、通話品質の改善、音声伝送方式などの音声情報処理、通信システムの研究に従事。IEEE、アメリカ音響学会、日本音響学会、テレビジョン学会、情報処理学会各会員。