# 平成 16 年度 学士学位論文

## 実時間実行時の適応等化器の評価

Evaluation of adaptive equalizer on real-time processing

1050340 谷本 真紀

指導教員 福本 昌弘

2005年3月11日

高知工科大学 情報システム工学科

## 要旨

## 実時間実行時の適応等化器の評価

### 谷本 真紀

適応等化器を実時間実行させるためには演算量の削減が必要である.過去の研究において,パラメータの更新頻度を調節することにより実時間実行性を確保することが提案されている.しかし,適応等化器の調整パラメータと更新頻度との関係については検証が行われておらずパラメータの収束特性については未検討である.

本論文では,実時間実行を可能にする適応等化器を雑音の環境下で用いた場合の収束性についてステップゲインと更新頻度の関係を計算機シミュレーションにより検証し,適応等化器の性能評価を行い様々な場合において提案されたアルゴリズムの有効性の検討を行っている.適応等化器のパラメータを変化させた結果,推定精度に大きく変化が起きていることは確認できるが,パラメータの決定までには至っていない.

キーワード 適応等化器 実時間処理 歪み補償

## Abstract

Evaluation of adaptive equalizer on real-time processing

### MASAKI Tanimoto

Adaptive equalizer necessaries to reduce in the amount of the operation to real-time processing. In the past research, it was suggested that make sure of real-time to refresh of the parameter. But, it isn't verified about the adjustment parameter of the adaptive equalizer and the relation to the refresh frequency, the focusing characteristic of the parameter is a unexamination.

In this paper, the relation between the step gain and the refresh frequency is verified by the computer simulation about focusing when the adaptive equalizer that enables execution is used in real-time on the environment of the noise, the performance of the adaptive equalizer is evaluated and the effectiveness of the suggested algorithm in various cases is examined.

key words Adaptive filter Realtime processing compensation of distortion

## 目次

第1章	序論	1
1.1	背景と目的	1
1.2	構成	2
第 2 章	適応等化器	3
2.1	まえがき	3
2.2	歪み補償	3
2.3	適応信号処理	4
	2.3.1 適応アルゴリズム	4
	2.3.2 適応フィルタ	8
2.4	計算機シミュレーション	9
	2.4.1 入力信号	10
	2.4.2 シミュレーション条件	10
2.5	まとめ	11
第 3 章	適応等化器の実時間への適用	14
3.1	まえがき	14
3.2	適応アルゴリズムの演算量....................................	14
3.3	実時間実行の問題点	14
	3.3.1 実時間実行を考慮した適応アルゴリズム	15
3.4	計算機シミュレーション	15
	3.4.1 シミュレーション条件	15
	3.4.2 シミュレーション結果	16
3 5	まとめ	16

## 目次

第4章	適応等化器のパラメータの検討	19
4.1	まえがき	19
4.2	適応等化器のパラメータ	19
4.3	計算機シミュレーション	20
	4.3.1 シミュレーション 1	20
	4.3.2 シミュレーション 2	20
	4.3.3 シミュレーション結果	21
4.4	まとめ	21
第5章	結論	28
5.1	まとめ	28
5.2	今後の課題	28
謝辞		30
参考文献	<b>t</b>	31

## 図目次

2.1	適応フィルタを用いたブロック図	9
2.2	システム図	10
2.3	BPSK <b>変調波</b>	12
2.4	入力信号	12
2.5	伝送路インパルス応答	13
2.6	正規化二乗ノルム誤差・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	13
3.1	従来のアルゴリズムの正規化ノルム 2 乗誤差	17
3.2	改良したアルゴリズムの正規化ノルム 2 乗誤差	17
3.3	従来のアルゴリズム	18
3.4	改良したアルゴリズム	18
4.1	雑音がなく毎回更新の場合の正規化ノルム2乗誤差	22
4.2	$S/N$ が $10{ m db}$ で毎回更新の場合の正規化ノルム $2$ 乗誤差 $\dots$	22
4.3	雑音がなく $100/1$ 回更新の場合の正規化ノルム $2$ 乗誤差 $\dots$	23
4.4	$S/N$ が $10{ m db}$ で $100/1$ 回更新の場合の正規化ノルム $2$ 乗誤差 $\dots$	23
4.5	雑音がない場合の正規化ノルム二乗誤差とステップゲインの関係	24
4.6	正規化ノルム二乗誤差とステップゲインの関係 $(10dB$ の場合 $)$	24
4.7	正規化ノルム二乗誤差とステップゲインの関係 $(20dB \ {\sf o}$ 場合 $)$	25
4.8	正規化ノルム二乗誤差とステップゲインの関係 (30dB の場合)	25
4.9	雑音がない場合の正規化ノルム二乗誤差と更新頻度の関係	26
4.10	正規化ノルム二乗誤差と更新頻度の関係 (10db の場合)	26
4.11	正規化ノルム二乗誤差と更新頻度の関係 (20db の場合)	27
4 12	正規化ノルム 乗誤差と更新頻度の関係 (30db の場合)	27

## 表目次

2.1	適応アルゴリズムの比較				•		•			•				•	•	5
2.2	図 2.1 における変数の説明															9

## 第1章

## 序論

## 1.1 背景と目的

近年,LSI 技術を基盤とするディジタル信号処理の発展によって適応的な処理を高精度で行うことが可能となり,情報通信の分野にも活用されている.現在,情報通信に対する要求はなるべく質の良い(情報量が多い)データをなるべく早く送りたいへと変わって来ている.このような場面において信号処理の1つであるディジタル信号処理は非常に有効である.

情報通信を行う際に,送信された信号は伝送路の影響により歪んだ信号となる.歪みは,符号間干渉や減衰等の原因となり本来受信しようとしていたデータとは異なったデータが観測されてしまう.さらに,高ビットレート通信を行えば符号間干渉により誤り率の増加にもつながる.こうした事態を回避するために現在,様々な信号処理を用いた研究が行われており,有効な方法の1つに適応信号処理がある.また,適応アルゴリズムの演算量の多さからくる問題として,リアルタイム処理が保障されていない.以前は適応信号処理はその計算量の多さから実用化には遠いと言われていたが,近年 DSP の進化に伴い,実用化を前提とした研究が多く行われるようになった.本稿では,雑音の影響下での実時間実行時の適応等化器のパラメータの検討を行う.

#### 1.2 構成

## 1.2 構成

本稿の概要について述べる.

まず,第2章では歪み補償に有効な手法である適応等化器について述べ,適応等化器の基礎 技術である適応アルゴリズムについて解説する.さらに,適応等化器を用いた歪み補償の計 算機シミュレートを行い,その有効性を示す.

次に,第3章では実時間実行時に起こる問題とそれに対する解決方法について述べる.また アプリケーションとして無線通信を想定した場合の適応等化器のパラメータ推定精度の変化 を計算機シミュレートを用いて評価を行う.

第4章では,実時間実行時での適応等化器に利用している適応アルゴリズムののパラメータ について計算機シミュレートで検討する.

最後に,第5章では研究の評価を行い,今後の課題の提案を行う.

## 第2章

## 適応等化器

## 2.1 まえがき

情報通信を行う場合に送信された信号は伝送路の影響により歪んだ信号となる.歪みは,符号間干渉や減衰等の原因になるために歪み補償を行う必要がある.本章では,歪み補償のために有効な方法の一つである適応等化器の有効性について述べる.また,適応等化器に利用する適応アルゴリズムについても述べる.さらに,適応アルゴリズムを実時間で利用する場合に起こる問題を説明する.

## 2.2 歪み補償

伝送路中で信号が受けたノイズを完全に除去することは不可能であるが、伝送路で付加された雑音に対しては信号の帯域だけを通過させる帯域通過型フィルタである程度の除去が行える.しかし、伝送路歪みによる信号の劣化に対しては歪み補償を行う必要がある.一般の伝送システムでは伝送特性が変動するために干渉や減衰等による信号の劣化が起こり本来受信しようとしていたデータとは異なったデータが観測されてしまう.この現象はフェージングと呼ばれディジタル伝送において符号間干渉という形で伝送品質の劣化を招くこととなる.このような伝送品質の劣化を補償する方法のひとつに等化器を用いる方法がある.等化器は、伝送路を通過して来た信号に対して伝送路の逆特性を算出することで伝送路の影響を打ち消そうとする.

等化器を分類すると,まず固定等化器と可変等化器に分類される.固定等化器は係数を固

定するために係数の調整が逐次的に行えない.それに対して可変等化器は係数の調整が可能という特徴がある.さらに,可変等化器として自動等化器,適応等化器,ブラインド等化器に分類される.実際に利用される自動等化器,適応等化器は,一般に非再帰形等化器で,勾配法の原理に基づいたアルゴリズムによって係数の調整を行う場合が多い.可変等化器は伝送路が時間的に変化する場合にも,絶えずチューニングを行い時間の変動に伴い,パラメータの変化に追従できるという特徴がある.

## 2.3 適応信号処理

信号処理では、観測された信号にフィルタを作用させることによって、望ましい信号が出力されるように処理を行う.このとき、フィルタの特性を決めるパラメータが固定である場合、つまり、観測信号の統計的性質が時間と共に変化しない場合は、時間の変化に関係なく処理を行うことが可能である.しかし、観測信号の統計的性質が時間と共に変化する場合には、固定的な処理では正確に対応できない.そこで、時間と共に変化する信号の性質に応じて、パラメータを更新することのできる適応フィルタを用いる.このような処理を行うために、Widrow の先駆的な研究により始められたのが適応信号処理である.

近年では,移動通信システムの分野の飛躍的な成長により,適応エコーキャンセラ,適応 ノイズキャンセラ,適応干渉キャンセラ,適応等化器などの適応信号処理技術が多く利用されている.ここでは,適応アルゴリズムの説明を行い,適応フィルタの構成法を説明する.

## 2.3.1 適応アルゴリズム

適応アルゴリズムとは,各時刻で観測される入力信号と所望信号に基づいて,出力誤差を 最小にするようパラメータを更新していく方法である.しかし,その入力信号の情報が完全 に既知でない場合に,ある基準のもとで最適となるように逐次的に処理する機能を持ったシ ステムが必要となる.信号処理過程で必要に応じてシステムの特性を変化させる機能を持っ た信号処理を適応信号処理と呼び,その解を求めるために適応アルゴリズムを用いる.ここ

適応アルゴリズム	特徴	演算量
LMS アルゴリズム	安定性があり,演算量が少ない	2N
	有色信号で収束特性が劣化する	
学習同定法	入力信号に依存しない収束特性	3N
	有色信号で収束特性が劣化する	
m RLS アルゴリズム	最も収束が速い	$2N^2$
	パラメータが変化すると不安定	

表 2.1 適応アルゴリズムの比較

では、代表的な適応アルゴリズムについて述べる。適応アルゴリズムに関する研究の始まりは、1960年にWidrowと Hoff が適応スイッチング回路の研究において、LMS アルゴリズムと呼ばれるアルゴリズムを開発した。LMS アルゴリズムは、二乗平均誤差を最急降下法に基づいて最小にする方式で、安定性があり、演算量が少ないという特徴から代表的な適応アルゴリズムとなっている。一方、1967年に野田と南雲が、学習同定法を開発した。これは、アルゴリズムとして LMS に比べると複雑ではあるが、収束速度が入力信号の大きさに依存しないという特徴を持っており、演算量も少ない。しかし、これらのアルゴリズムは有色信号の場合に収束速度が劣化するという欠点を持つことが問題となっている。これらのアルゴリズムに比べて、1950年に Plackett により始めて導かれた RLS アルゴリズムは、入力信号が有色の場合でも他のアルゴリズムに比べて収束速度がそれ程遅くはならない。LMS アルゴリズムでは適応フィルタのタップ数 N に比例するだけであるのに対して、RLS アルゴリズムは N の 2 乗に比例する乗算回数を必要とするため、現在のディジタル信号処理装置に実装することが困難となっている。

次に、適応アルゴリズムの基本的なパラメータ更新方法についての手順を示す、

1. 時刻 t=0 として,パラメータの初期値  $h_N$  を設定する (通常  $h_N=0$ ).

2. 時刻 t における出力 y(t) と誤差 e(t) を次式により計算する .

$$y(t) = h_N^T x_N(t) (2.1)$$

$$e(t) = y(t) - x(t) \tag{2.2}$$

 $3. \; x_N(t)$  , e(t) を用いて各種アルゴリズムで修正量  $\Delta h_N(t)$  を計算し,次式によりパラメータ  $h_N(t)$  を修正して  $h_N(t+1)$  を得る.

$$h_N(t+1) = h_N(t) + \alpha \cdot \Delta h_N(t) \tag{2.3}$$

ここで,  $\alpha$  はパラメータ修正の大きさを制御する量であるステップゲインを表す.

これらの代表的なアルゴリズムの特徴とフィルタタップ数 N の場合の演算量を比較したもの表 2.1 に示す.表 2.1 の演算量は,LMS アルゴリズムでは積和の計算が 2N 必要になる.また学習同定法では入力信号のノルム 2 乗和の計算に N,推定系フィルタ係数の更新に 2N の計算が必要であり合わせて積和が 3N 必要となる.さらに,RLS アルゴリズムでは積和に  $2N^2$  必要とする.本研究では,実時間実行に適しているアルゴリズムを選ぶ必要があり,演算量が他のアルゴリズムに比べて小さいものを選ぶ必要がある.よって,RLS アルゴリズムは本研究には不向きと考え,LMS アルゴリズムと学習同定法が適している.本研究では,LMS アルゴリズムと学習同定法の中でも性能が良い学習同定法を適応等化器に利用する.

学習同定法 [4] は,LMS アルゴリズムとは独立に導かれたアルゴリズムである.しかし, 別名 NLMS(Normalize LMS) アルゴリズムと呼ばれ,LMS アルゴリズムのパラメータ修 正項をフィルタの状態ベクトルで正規化されたものとみなすことができる.

ある時刻 k において,推定系の出力信号 y(t) が入力信号 x(t) に等しいとすると

$$x(t) = h_N^T x_N(t) (2.4)$$

と表すことができる.

しかし, $h_N=b_N$  を満たすためには,すべての入力信号 x(t) に対して式 (2.14) が成りたたなければならない.

そこで,式 (2.14) を満たす解集合の代表ベクトルを  $h_N(t)$  とする.この解集合は,式 (2.14) より,入力ベクトル  $x_N(t)$  に直交しているといえる.更に, $b_N$  はこの解集合に含まれているので, $h_N(n)$  にはる点から  $x_N(t)$  方向にパラメータ修正したとき,もっとも  $b_N$  に近い点といえる.

したがって, $h_N(t)$  を  $b_N$  に更に近づけるためには,適当に定めたある点よりも  $b_N$  により近い  $h_N(t+1)$  を次の修正パラメータの初期値とすればよい.以下のことより

$$h_{N}(t+1) = h_{N}(t) + (h_{N}(t+1) - h_{N}(t))$$

$$= h_{N}(t) + \frac{(b_{N} - h_{N}(t))^{T} (h_{N}(t+1) - h_{N}(t))}{\|h_{N}(t+1) - h_{N}(t)\|}$$

$$\cdot \frac{h_{N}(t+1) - h_{N}(t)}{\|h_{N}(t+1) - h_{N}(t)\|}$$
(2.5)

となる.但し, $\|\cdot\|$  はベクトルのユークリッドノルムを表し,要素の 2 乗和の平方根と定義する.また式 (2.5) において

$$\frac{(b_N - h_N(t))^T (h_N(t+1) - h_N(t))}{\|h_N(t+1) - h_N(t)\|}$$

はパラメータ修正量を示し

$$\frac{h_N(t+1) - h_N(t)}{\|h_N(t+1) - h_N(t)\|}$$

はパラメータ修正方向を示す.

ここで

$$\frac{h_N(t+1) - h_N(t)}{\|h_N(t+1) - h_N(t)\|} = \frac{x_N(t)}{\|x_N(t)\|}$$
(2.6)

$$(b_N - h_N(t))^T x_N(t) = x(t) - y(t)$$
  
=  $e(t)$  (2.7)

が成立するので式 (2.5) は

$$h_N(t+1) = h_N(t) + \frac{x_N(t)}{\|x_N(t)\|^2} e(t)$$
(2.8)

と変形できる. 学習同定法では,式 (2.8) の修正ベクトルにステップゲイン  $\alpha$  を掛け

$$h_N(t+1) = h_N(t) + \alpha \frac{x_N(t)}{\|x_N(t)\|^2} e(t)$$
(2.9)

で算出される.

#### 2.3.2 適応フィルタ

次に,FIR 形で構成された未知システムの逆特性を推定することを考える.図 2.1 にシステムのブロック図を示す.ただし,図における変数についての説明は表 2.2 に示す.

このとき , 未知系の出力信号 d(t) と推定系の出力信号 y(t) は

$$d(t) = \sum_{i=1}^{N-1} b(i)x(t-i+1)$$
(2.10)

$$y(t) = \sum_{i=1}^{N-1} h(i)x(t-i+1)$$
 (2.11)

と表すことができる.また,入力誤差e(t)は

$$e(t) = x(t) - y(t)$$
 (2.12)

と表される。

式 (2.10), 式 (2.11) において

$$b(i) = h(i); i = 0, 1, \dots, N - 1$$
 (2.13)

であれば、常に同じ出力を得ることができる.したがって、未知システムのインパルス応答 長が有限で、その個数が既知であるならば、同一の入力信号に対して完全に等しい出力結果 を与える FIR ディジタルフィルタを構成することが可能である.

しかし,一般に未知システムのインパルス応答長は無限に続くものである.この場合,式 (2.12) のような仮定が成り立たないために,同一の入力信号に対して完全に等しい出力結果が得られるような FIR ディジタルフィルタを構成することはできない.

未知系システムのインパルス応答のうち最初の適当な N 個の値を推定することによって,推定系出力信号を未知系出力信号に近付けることが可能である.

このようにして,推定システムの出力 y(t) が未知システムの出力 d(t) に近付くように,推定パラメータ  $h_N$  を逐次的に推定する学習機能を持ったフィルタのことを,適応フィルタという.

### 2.4 計算機シミュレーション

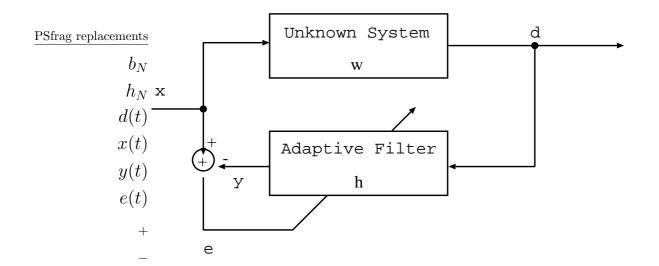


図 2.1 適応フィルタを用いたブロック図

表 2.2 図 2.1 における変数の説明

t	時期
N	インパルス応答長 (フィルタタップ数)
x(t)	入力信号
$b_N$	未知システムのフィルタ係数 $(b_N = [b(0), b(1), \cdots, b(N)]^T)$
$h_N$	適応フィルタのフィルタ係数 $(h_N = [h_N(0), h(1), \cdots, h_(N)]^T)$
d(t)	未知系の出力信号
y(t)	推定系の出力信号
e(t)	出力誤差

## 2.4 計算機シミュレーション

ここでは通信モデルにおいて, 歪み補償に対する適応等化器の有効性を示す. 本研究で用いたシステム図を図 2.2 に示す.

#### 2.4 計算機シミュレーション

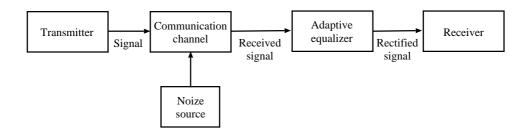


図 2.2 システム図

### 2.4.1 入力信号

過去の研究では,入力信号の周波数成分が多く存在している箇所でしかパラメータ推定が正しく行われないことが確認されている.これに対してスペクトル拡散を用いることにより,信号のスペクトルを最低限必要な帯域より広い帯域に広げることで対処できる.よって,図 2.3 で示される BPSK 変調を 1 次変調とした信号をさらに直接拡散で周波数帯域を広げた信号を用いる.

#### 2.4.2 シミュレーション条件

所望信号として,スペクトル拡散させた図 2.4 の信号を用いる.ここでは,伝送路上での S/N を  $10\mathrm{dB}$  とし,適応フィルタのインパルス応答長を 256,修正率を示すステップゲイン を 0.1.図 2.5 に示す伝送路のインパルス応答長 512 の伝送路特性を用いる.この適応フィルタのパラメータ推定精度を正規化ノルム 2 乗誤差を用いて評価を行う.これは,伝送路の 逆特性を適応フィルタのフィルタ次数 N で表現した際のインパルス応答 r(n) と適応フィルタが推定したパラメータ a(n) とのそれぞれの誤差をとり 2 乗平均誤差をとったものであり,

$$e = \frac{\sum_{n=1}^{N} \{r(n) - a(n)\}^{2}}{\sum_{n=1}^{N} r(n)^{2}}$$
(2.14)

#### 2.5 まとめ

で表される. 結果を,図3.1 に示す. これより,適応フィルタは誤差を最少にするよう推定されていることがわかる.

## 2.5 まとめ

本章では,適応等化器の必要性と適応アルゴリズムについて述べた.実際に,適応等化器を用いた歪み補償の有効性を計算機シミュレーションにより示した.また,実時間へ適用させる時に起こる適応等化器の演算量の大きさからくる問題点を示した.

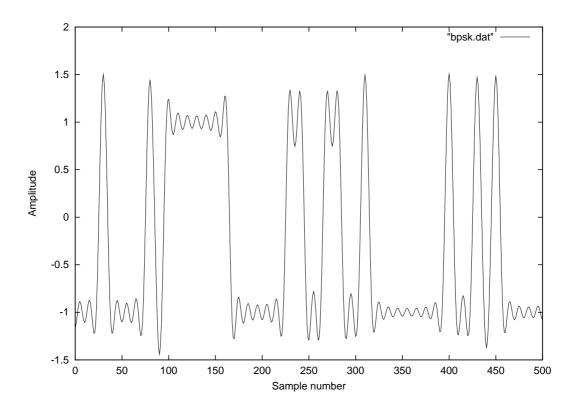


図 2.3 BPSK 変調波

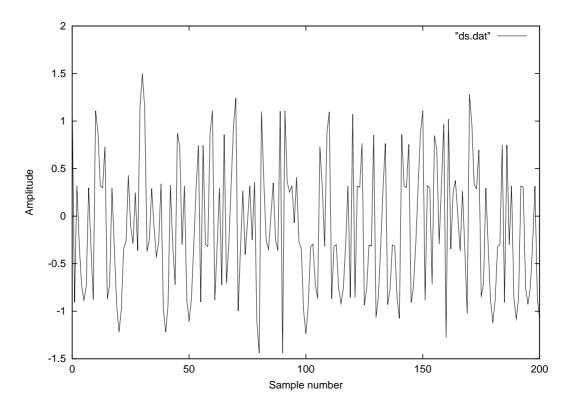


図 2.4 入力信号

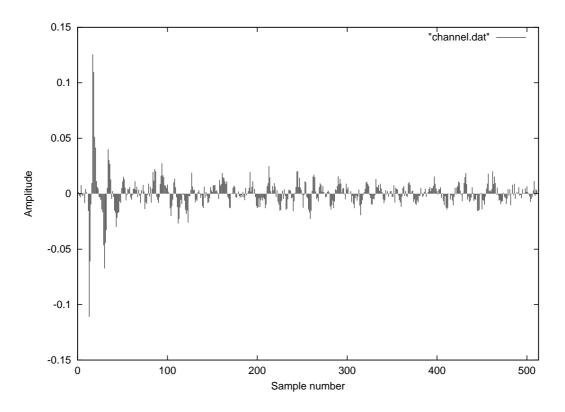


図 2.5 伝送路インパルス応答

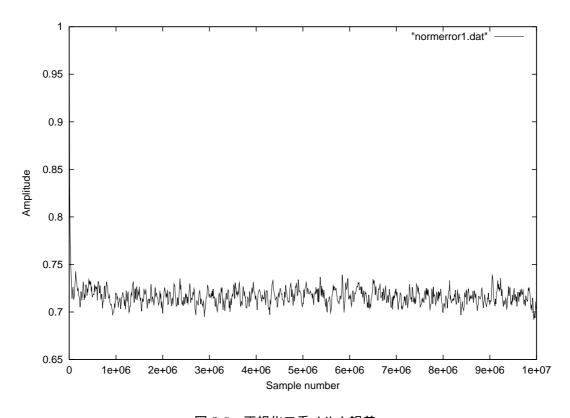


図 2.6 正規化二乗ノルム誤差

## 第3章

## 適応等化器の実時間への適用

## 3.1 まえがき

前章において、伝送路歪みに対する適応等化器を用いた歪み補償の有効性を示した.しかし、実際に適応等化器の構築を行い実時間実行を行うことは様々な制約から困難である.本章では適応等化器の実時間実行について問題点を明らかにしその対処法について述べる.

## 3.2 適応アルゴリズムの演算量

すでに述べられているように,適応アルゴリズムの一つであり実装が比較的容易であるといわれる学習同定法を用いて適応フィルタを構成する際,パラメータ更新を行うためには適応フィルタのインパルス応答長を N とした場合 3N の演算量が必要となる.これは,入力信号のノルムの 2 乗和の計算に N,推定系フィルタ係数の更新に 2N の演算量が必要なためである.

## 3.3 実時間実行の問題点

適応アルゴリズムを実時間で利用する場合に一番問題となるのが,その演算量の大きさによりリアルタイム性を確保できないことである.DPS はデジタル信号処理で頻繁に用いられる積和計算を効率的に行えるよう設計がなされており,積和処理を 1 クロック程度で行える.このことを考慮し学習同定法を用いて適応フィルタを構成する場合,3N の演算は最低でも 3 クロックの演算が必要である.さらに,推定誤差の算出,推定フィルタ更新の係数演

### 3.4 計算機シミュレーション

算に2つの演算が追加され,合計で5クロック程度の演算が要求される.このような条件下で実際に適応信号処理を行う場合には1サンプルに対して5クロック必要であることから5/(DSPの駆動周波数)の演算時間がかかることになる.そのため,入力信号が高サンプリングレートになるほど次入力までの演算終了が困難となり,適応フィルタ自体のパラメータ更新に遅延が発生し,運用時には大きな問題となる.

### 3.3.1 実時間実行を考慮した適応アルゴリズム

前述した適応アルゴリズムの実時間実行時の問題を解決するためには,演算量の少ない適応アルゴリズムを選択し,1 入力に対しての演算時間を削減する方法がある.しかし,この手法は演算量を減らしているために推定精度を犠牲とすることになり,精度を維持したまま演算量を減らす事は非現実的である.過去の研究において,適応アルゴリズムのパラメータ更新を毎回行わず全体の時間当りの演算量を削減する手法が提案された [5].この手法はパラメータの推定精度と演算量を更新頻度により調節することが可能であり適応フィルタの実時間実行を可能にする構築法として有効であると考えられる.従来の適応フィルタのパラメータ更新と提案された手法のアルゴリズムを図 3.3,図 3.4 に示す.入力信号は,それまでにパラメータが推定されている適応等化器を通過する.その後,[Refresh rate Judgement] 部において更新の判定を行い,更新タイミングであればパラメータの更新を行う.

## 3.4 計算機シミュレーション

適応等化器の構成法として実時間実行を考慮したアルゴリズムを用いる有効性の検証を計 算機シミュレーションにより行う.

#### 3.4.1 シミュレーション条件

入力信号, 伝送路を前章で用いたものと同様とし, 実時間実行を考慮したアルゴリズムを 用いた適応フィルタを構成する. また係数の更新頻度を 100 サンプル毎とする. 評価はパラ

#### 3.5 まとめ

メータの推定精度を正規化2乗誤差を用いて行う.

### 3.4.2 シミュレーション結果

結果を図 3.2 に示す.また,比較するために適応フィルタ係数の更新を毎回行う場合も併せて図 3.1 に示す.適応フィルタ係数の更新頻度を下げることで毎回更新する場合に比べると収束速度が遅くなる.これはパラメータの更新頻度を下げることによりパラメータ推定に時間がよりかかるようになるためである.しかし,更新頻度を下げてもパラメータは正常に推定されていることがわかる.

### 3.5 まとめ

適応フィルタ係数の更新頻度を下げることで,毎回更新する時よりも収束速度が低下する.これは,更新を毎回行っていないため伝送路による時間的変化に正しく対処できていないためから起こるものだと考えられる.しかし,適応フィルタ係数の更新頻度を低くしても,速度は低下するが正常に推定されていることがわかった.適応等化器の最適なパラメータを検討する必要がある.

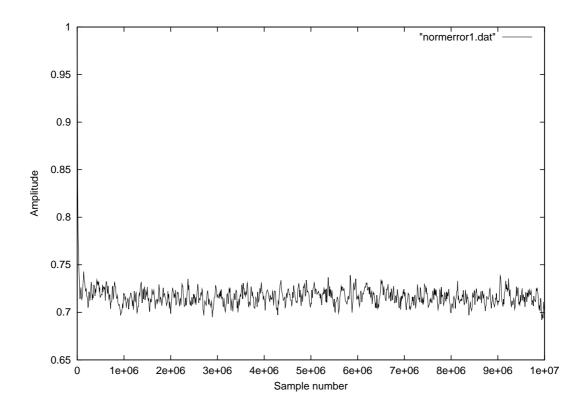


図 3.1 従来のアルゴリズムの正規化ノルム 2 乗誤差

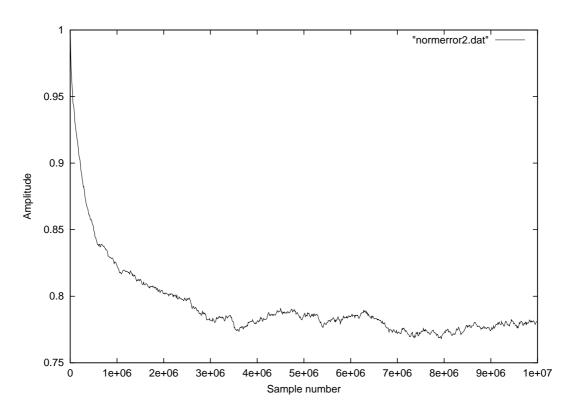


図 3.2 改良したアルゴリズムの正規化ノルム 2 乗誤差

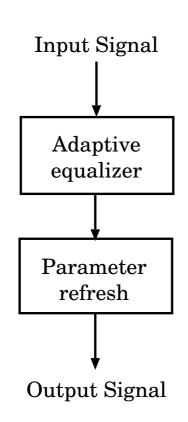


図 3.3 従来のアルゴリズム

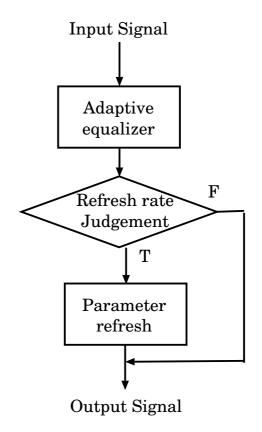


図 3.4 改良したアルゴリズム

## 第4章

## 適応等化器のパラメータの検討

## 4.1 まえがき

適応等化器の実時間実行を実現させるために、前章において適応等化器に用いるアルゴリズムのパラメータ更新部分の変更を行い演算量を削減する有効性を示した.しかし、パラメータ更新回数を削減することによって収束速度の低下が起こることがわかった.適応等化器に用いるパラメータであり推定精度に大きく影響するものにステップゲインがある.また、提案されているアルゴリズムには更新頻度を調節するパラメータも存在する.本章では、これらのパラメータが適応等化器の推定精度にどのような影響を与えるか検討を行っていく.

## 4.2 適応等化器のパラメータ

適応等化器に用いているアルゴリズムである学習同定法のパラメータとしてステップゲインがある.ステップゲインは,パラメータの修正量の大きさを制御し,収束速度を決定する.また,ステップゲインのサイズによって雑音に対する特性も変化する.図 4.1,図 4.2 に学習同定法を用いた適応等化器のパラメータの推定精度を示す.図 4.1 は雑音の影響は受けておらず,3 種類のステップゲインを用いた結果である.図 4.2 は図 4.1 に対して S/N が 10dB となるよう加法性白色雑音を加えた結果である.雑音の影響がない場合には,ステップゲイン 1.0 が最も早く収束し,推定精度も良好である.雑音が加わった場合には,ステップゲインが大きいほど収束速度は高くなるが,推定精度が低くなる傾向がみられる.

#### 4.3 計算機シミュレーション

## 4.3 計算機シミュレーション

実時間実行を実現するためのアルゴリズムを用いた場合,追加されるパラメータとして更新頻度がある.過去の研究では,更新頻度と適応等化器のパラメータとの関係が明らかにされていない.この関係が推定精度や収束速度にどのように影響するかを検証するために計算機によるシミュレーションを行う.

#### 4.3.1 シミュレーション1

図 4.1,図 4.2 で示されたものと同様の環境でパラメータの更新頻度を 100 サンプル毎とした.この結果を図 4.3 と図 4.4 に示す.雑音の影響がない場合では,毎回更新したものに比べステップゲインの違いによる推定速度の変化が小さくなっている.また,雑音の影響下ではステップゲインと推定精度の関係が大幅に変化している.

#### 4.3.2 シミュレーション 2

シミュレーション 1 での結果をふまえ雑音の影響下での推定精度をステップゲイン,更新 頻度それぞれを変化させ正規化ノルム 2 乗誤差を用いて評価を行う.

#### シミュレーション条件 1

ステップゲインを 0.1 から 1.0 の間で変化させる . 適応フィルタ係数の更新頻度を 100 サンプルの 1 回とする . それぞれ雑音を受けていない場合 , S/N が  $10\mathrm{dB}$  ,  $20\mathrm{dB}$  ,  $30\mathrm{dB}$  の場合で検討した . この結果を図 4.5 から図 4.8 に示す .

#### シミュレーション条件 2

適応フィルタ係数の更新頻度を 10 サンプルから 100 サンプルの範囲で検討する.ステップゲインはシミュレーション条件 1 の結果より推定精度や収束速度が比較的良好だった 0.4 とした.雑音はシミュレーション条件 1 と同様に検討した.この結果を図 4.9 から図 4.12 に示す.

#### 4.4 まとめ

### 4.3.3 シミュレーション結果

図 4.5 から図 4.8 より雑音の大きさにかかわらずステップゲインが大きいほど,収束速度は向上するが推定精度が悪くなる.逆に,ステップゲインが小さいほど,収束速度は遅くなるものの推定精度はよくなる.ステップゲインを小さく取れば,雑音を受けた信号を大きく修正することができる.雑音がない場合では,ステップゲインを大きくとればとるほど推定精度,収束速度は向上していく.しかし,雑音の影響を受けているために誤差は大きく除去することには至っていない.また図 4.9 から図 4.12 より,更新頻度は間隔があけばあくほど収束速度,推定精度共に悪くなっていく傾向がみられた.これは更新間隔をあけることで,伝送路の時間変化に対してパラメータ更新が遅れ誤った信号補正を行っていることからだと考えられる.

今回用いた環境は1つだけであるが,他の環境ではシミュレーションを行っていない.ス テップゲイン,更新頻度を検討したが,他の環境になるとまた違った結果になると考える. よって,環境にあったパラメータの設定が必要になってくるだろう.

### 4.4 まとめ

本章では、適応等化器のパラメータであるステップゲインと適応フィルタ係数の更新頻度について検討を行い、性能評価を行った、パラメータの最適な値を発見できたとしても、現状では誤差は大きく出ている、これは、伝送路歪み以外の雑音の影響だと考える、今後、様々な環境下での適応アルゴリズムのパラメータの検討が必要になってくるだろう、

### 4.4 まとめ

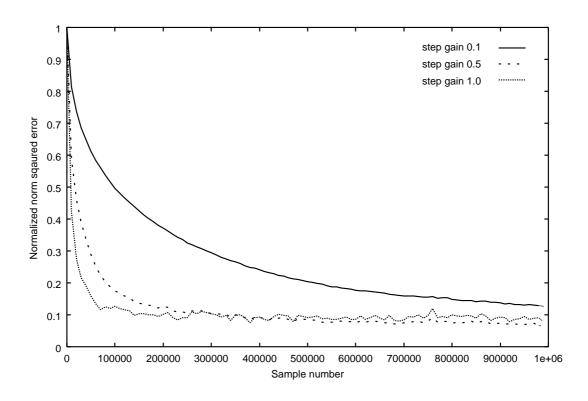


図 4.1 雑音がなく毎回更新の場合の正規化ノルム 2 乗誤差

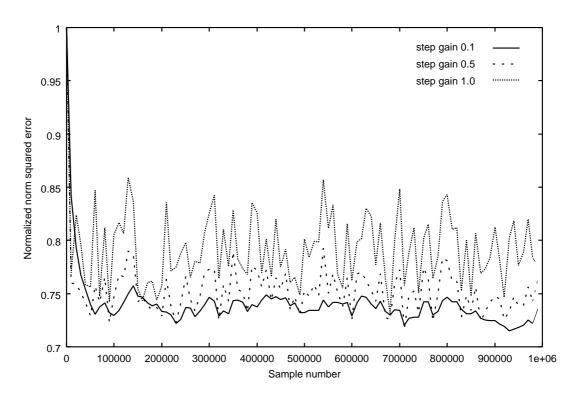


図 4.2 S/N が  $10{
m db}$  で毎回更新の場合の正規化ノルム 2 乗誤差

### 4.4 まとめ

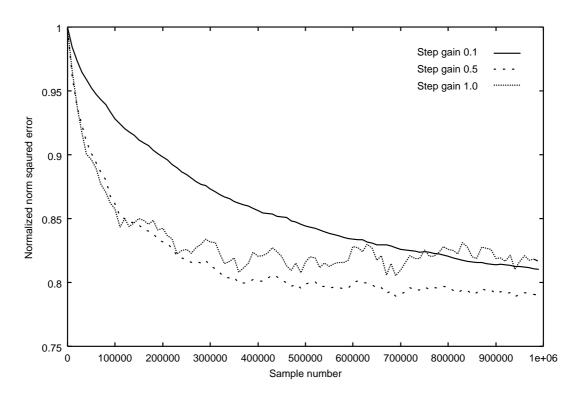


図 4.3 雑音がなく 100/1 回更新の場合の正規化ノルム 2 乗誤差

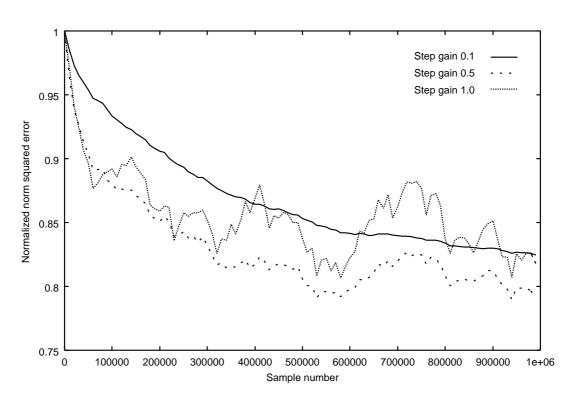


図 4.4~S/N が  $10{
m db}$  で 100/1 回更新の場合の正規化ノルム 2 乗誤差

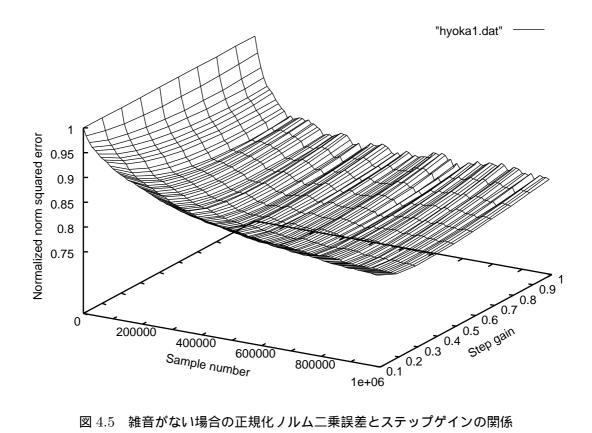


図 4.5 雑音がない場合の正規化ノルム二乗誤差とステップゲインの関係

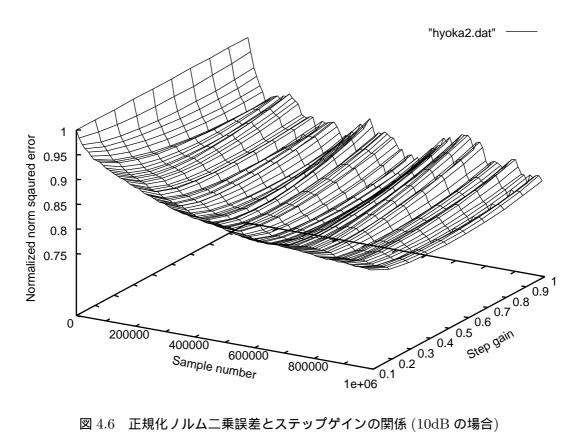


図 4.6 正規化ノルム二乗誤差とステップゲインの関係  $(10dB \ \text{の場合})$ 

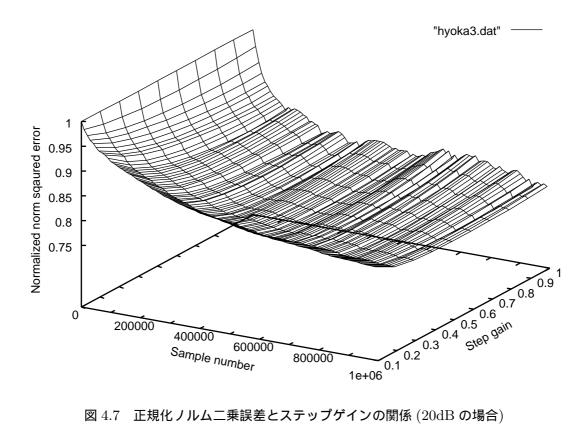


図 4.7 正規化ノルム二乗誤差とステップゲインの関係  $(20dB \ \text{の場合})$ 

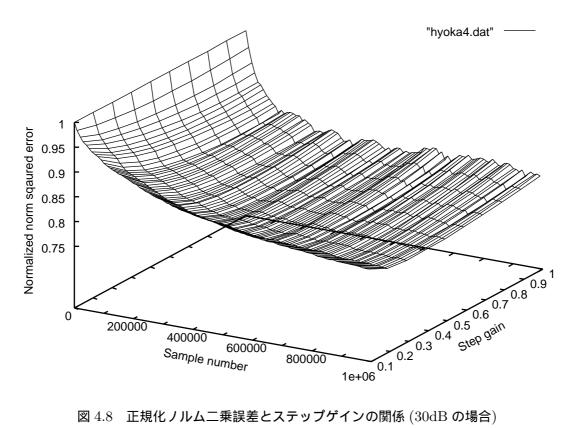


図 4.8 正規化ノルム二乗誤差とステップゲインの関係 (30dB の場合)

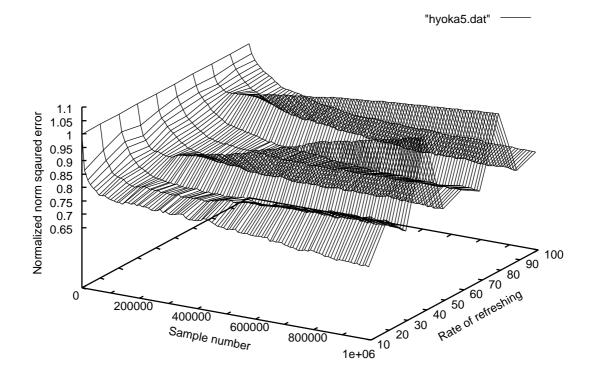


図 4.9 雑音がない場合の正規化ノルム二乗誤差と更新頻度の関係

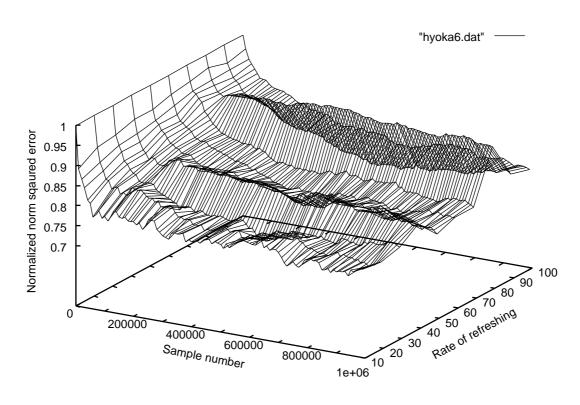


図 4.10 正規化ノルム二乗誤差と更新頻度の関係 (10db の場合)

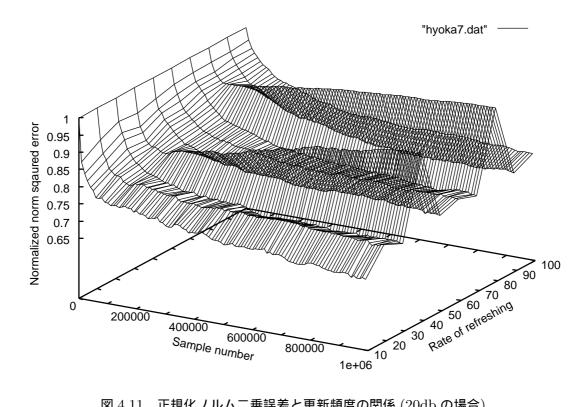


図 4.11 正規化ノルム二乗誤差と更新頻度の関係 (20db の場合)

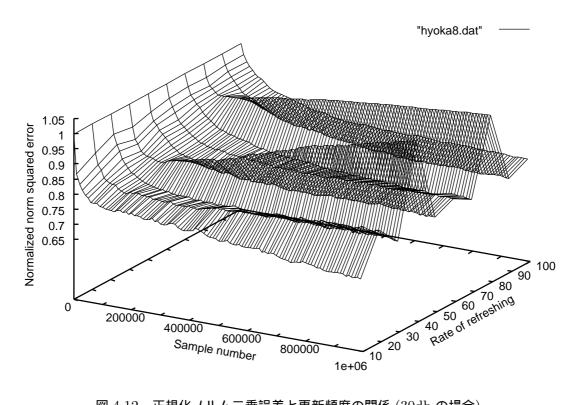


図 4.12 正規化ノルム二乗誤差と更新頻度の関係 (30db の場合)

## 第5章

## 結論

### 5.1 まとめ

実時間実行を可能にした適応等化器を用いて歪み補償に対する有効性を計算機シミュレーションにより示した.また,その時の適応等化器のパラメータの検証を行った.結果,パラメータの設定を適切に行うことにより,収束特性の改善が行われた.しかし,適応フィルタ係数の更新頻度を下げると毎回更新の場合より収束速度が悪くなる.これは伝送路による雑音の影響を受けるために起こるものだと考えられる.本研究では通信を想定した場合で考えており,誤差は減ってはいるが実用化にはほど遠いものだと考える.これまでに,様々な雑音除去方法の提案,研究がされてきている.適応フィルタは雑音の影響に貧弱であり,雑音除去フィルタとの併用が必要になってくるだろう.また,雑音に強い信号への変調方法も提案されており,その中でも特に広帯域化がよく利用されている.現在の通信の分野では広帯域化が進んでおり,OFDM(直交周波数分割多元通信)を拡張したMB-OFDM(マルチバンド直交周波数分割多元通信)や直接拡散方式,FH(周波数ホッピング)方式等が実用かされており今後適応等化の活躍場所が広がっていくだろう.

## 5.2 今後の課題

今回,様々な環境設定を行っていないため環境にあった最適なパラメータの設定までは至っていない.よって,環境に応じたパラメータの設定基準を明確にする必要がある.さらに,広帯域信号を用いて実用的にできるかを考慮しながら.推定精度,収束速度の向上を目

## 5.2 今後の課題

的とし適応等化器と併用した高度なノイズ除去方法を実現していくかが課題である.

## 謝辞

本研究を行うにあたり、御助言を頂き、またご家庭があるにもかかわらず早朝まで御指導して下さった福本昌弘助教授に心から感謝致します。本研究の審議をして頂いた浜村昌則講師、島村和典教授に深く感謝致します。

へたれの私に最後の最後まで御指導ならびに御助言を頂き,たくさんの御迷惑をおかけした佐伯幸郎様,浜崎真二様に心から感謝致します.また,同じ部屋で共に過ごした坂本研究室の河内友彦様,御指導ならびに御助言を頂いた清水研究室の福富英次様に心から感謝致します.

日々の研究活動に際し,お互いの時間を共有し共に戦った福本研究室の一同に深く感謝致 します.

最後に,現在の私を支えて頂いている全ての方に感謝致します.

## 参考文献

- [1] 辻井重男, 適応信号処理, 昭晃堂, 1995.
- [2] 高畑文雄, ディジタル無線通信入門, 培風館, 2002.
- [3] 丸林元,中川政雄,河野隆二,スペクトル拡散通信とその応用,電子情報通信学会,1998.
- [4] 半谷精一朗, ディジタル信号処理 基礎から応用, コロナ社, 2000.
- [5] 佐伯幸郎, "高速通信に適した適応等化器," 平成 15 年度 学士学位論文, 2004.