

ビット雑音推定器に適応フィルタを用いた 光 CDMA 方式の提案

M2010MM013 伊藤寛和

指導教員：奥村康行

1 はじめに

近年、インターネットなどの普及は、通信全体のトラフィック量を増大させ、通信キャリアに高速化、大容量化だけでなく多様性をも要求している。こうした背景の下、これからのアクセスシステムにおいては従来の技術に勝る信頼性や柔軟性を特徴とするアクセスシステムが求められる。例えば、既存のシステムが存在する中で、高速新サービスの追加をしたいという要求は大いに考えられる。この場合、新たなシステムに帯域を割り当てようとしても、既存システムが大きく帯域を占有しているため、合間の狭帯域を縫って使用せざるをえない状況になる。つまり、新サービス追加には周波数利用効率の高いアクセスシステムが求められる。

これらの要求を満たすアクセスシステム例として、光 CDMA 方式 [1] [2] が挙げられる。光 CDMA 方式は、各ユーザあるいはサービスごとに符号を割り当て、その符号に基づいて多重・伝送する方式である。しかし、光 CDMA 方式ではビット雑音という特有の信号劣化要因が発生し、多重度を制限してしまうという課題があった。もし、周波数利用効率が高いままで、ビット雑音の影響を低減し多重度を上げることができれば、新サービス追加に見合うアクセスシステムであると考えられる。

一方、信号受信技術として、これまでも最大尤度判定技術が提案されてきた。最大尤度判定技術は、信号判定時に事後確率が最大となる信号を判定値とする技術であり、従来の硬判定と比較すると、ビット誤り率を低下し受信感度を向上させる効果がある。

また、ガウス雑音や熱雑音などの雑音信号の影響を緩和するために挙げられる例として、適応フィルタが用いられる。適応フィルタとは、ある所望の信号に応じてフィルタの係数を調整することで所望信号に適應する技術であり、雑音などの信号を適應処理することが可能である。

そこで、本研究では本提案方式でもある光 CDMA 方式において受信器側にビット雑音推定器を設計し、適応フィルタ (WienerFilter) を用いることでビット雑音を推定し、多重度を高くする最大尤度軟判定受信技術を用いることで受信感度を向上させ、光 CDMA 特有のビット雑音の影響の緩和を図っている。

2 光 CDMA 方式

2.1 システムに対する要求条件

まず初めに、既存システムを考慮して、新システムに求められている要求条件についてまとめる。ここでは、現在 NTT が提供している GE-PON 方式によるフレッツ光システムに、1 ユーザ当たり 1 ~ 10Gbps の帯域占有サービスを追加することを考える。これにより、既存施設の光

ファイバ網や光スプリッタを利用することにより、新たな敷設するコストが削減できる。新システムが利用可能な帯域は、既存システムが上がり用に 1.49 μm 帯、映像用に 1.55 μm 帯、保守用に 1.6 μm 帯を用いているため、それらの合間を縫って狭帯域の部分しか残されていない。よって、帯域が制限されることから、周波数利用効率を高くする必要がある。

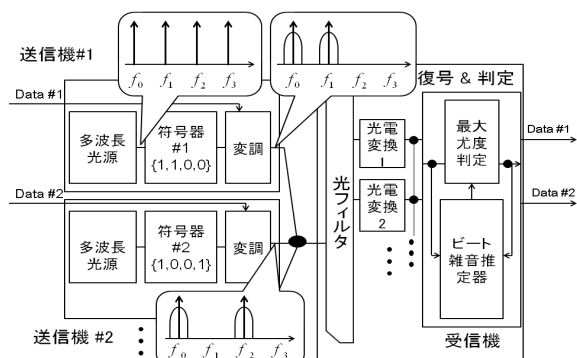


図 1 光 CDMA 方式の構成例

2.2 光 CDMA 方式

本研究で提案する光 CDMA 方式の概要を図 1 に示す。送信部は多波長光源、各ユーザ毎に直交条件を満たすように割り当てられた符号器、ならびに変調器から構成される。符号器の一例として、符号に基づいて使用する波長のみが透過するフィルタを考えている。また、各ユーザの送信器から送信された光信号は、光カプラで多重化され受信側へ送られるものとする。

一方、受信部では光フィルタ、光電変換装置、各ユーザに割り当てられた符号に基づいた復号器、および判定器によって構成されている。光フィルタは多波長光源の波長間隔と同等級以下の分解能を有することを仮定している。復号器では、各波長毎に分波され、光電変換装置において変換された信号を、送信部において割り当てられた符号を基に復号を行い、判定後所望のデータを得られるようにする。この際、受信側では各ユーザ信号のビット位相同期が取れているものとする。

そこで、本提案方式では、符号化する際に複数のユーザがある周波数を共有することを考えている。しかし、受信側においては、複数の光信号を同時に光電変換することでビット雑音が発生する。この雑音は、場合によりガウス雑音やショット雑音などよりはるかに大きな影響を与え、光 CDMA 方式において信号劣化要因の一つとなっている。そこで本提案方式は、ビット雑音の影響低減可能な、最大尤度軟判定受信技術を組み込むことで課題解決を図っている。これは受信部において、復号と信号判定

を同時で行い、確率論を用いることでビット判定の誤り率を下げることである。この技術の詳細は以下に述べる。

2.3 最大尤度軟判定受信技術

本技術による光 CDMA 方式は、これまでに提案されてきた方式と比較すると、新たに開発しなければならない高価な光モジュールを必要とせず、その上で従来方法では不可能であったビート雑音の影響低減を実現し、ビット誤り率を下げることを目的としている。また、本提案方式の大きな特徴として、図 1 に示すように、光電変換後に復号と信号判定を同時に行うことが挙げられる。この符号判定器では、最大尤度判定とビート雑音推定器を組み合わせ、互いに繰り返すことによって復号と判定を行っている。本節では、この目的を達成するために最大尤度軟判定受信技術について、そのアルゴリズムを順に追って説明する。図 1 において、ユーザ i の送信信号は式 $s_{i,tx}(t)$ は (1) のように表せる。

$$s_{i,tx}(t) = a_i(t)A_i \sum_{k=1}^M c_{ik} \cdot \cos(2\pi f_{ik}t + \phi_{ik}) \quad (1)$$

$a_i(t)$ は 1/2 の確率で発生する送信データ信号 0 又は 1, A_i は搬送波の電界強度, c_{ik} は i 番目のユーザに割り当てられた k 番目の波長における直交符号, f_{ik} は周波数, ϕ_{ik} は光の位相, M は使用する波長の数をそれぞれ示す。直交符号はアダマール符号 [1] を想定する。式 (1) より、直接検波し二乗平均を取った場合の k 番目の波長における受信信号 $s_{k,rx}$ は次の式 (2) に示す。

$$s_{k,rx} = \sum_{i=1}^N \frac{c_{ik}^2 a_i^2 A_i^2}{2} + \sum_{i=1}^{N-1} \sum_{j=i+1}^N c_{ik} a_i A_i c_{jk} a_j A_j b_{ijk} + x_k \quad (2)$$

N はユーザ数, 1 番目の項はデータの情報を示しており, 2 番目項内 b_{ijk} は式 (3) で表せるビート雑音である。

$$b_{ijk} = \cos(2\pi(f_{ik} - f_{jk})t + (\phi_{ik} - \phi_{jk})) \quad (3)$$

このビート雑音は, i 番目と j 番目のユーザが k 番目の同じ周波数を共有することで発生する。また, 3 番目の項 x_k は光電変換時に発生する熱雑音 (ガウス雑音) を示す。このガウス雑音の確率密度関数は, 式 (4) に示すガウス関数 $N(0, \sigma)$ で表せる。

$$P_r(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \exp\left(-\frac{x^2}{2\sigma^2}\right) \quad (4)$$

σ はガウス分布の標準偏差を示している。

ビート雑音は複数のユーザが同じ周波数を共有することによって発生するが, もし同じ周波数を, 3 ユーザ以上で共有した場合にはそれぞれのユーザ間に対するビート雑音が発生することになり, 複数のビート雑音による影響はより大きくなる。よって, ビート雑音は独立に推定する必要がある。この推定したビート雑音を用いて, 最大尤度を有する各ユーザのデータ信号の組み合わせ, つまりビットパターンを選択し判定値とすることが最大尤

度軟判定受信技術である。この判定信号は, a_i に対して式 (5) で表せる。

$$\operatorname{argmin}_{\{a_i\}} \left\{ \sum_k (s_{k,rx} - \sum_{i=1}^N \frac{c_{ik} a_i}{2} - \sum_{i=1}^{N-1} \sum_{j=i+1}^N c_{ik} a_i c_{jk} a_j \hat{b}_{ijk})^2 \right\} \quad (5)$$

ここで, \hat{b}_{ijk} は推定したビート雑音である。

このように, 事後確率が最大となるビットパターンを選択し判定値とすることが最大尤度軟判定受信技術であり, これはビット誤り率を小さくする方法としては理論上最適である。

2.4 従来のビート雑音推定器

以下に従来のビート雑音の推定技術と課題について述べる。従来のビート雑音推定器 [2] では, 複数の混合信号からの特定の信号を取り出す方法として, ビート雑音を推定するために特定のビート雑音とビットパターンと相関関係を利用している。

従来のビート雑音推定器では, 特定のビート雑音を推定するために, 相関の強さに基づいて乗算される係数 [2] を求めることによって特定のビート雑音を求めることができる。また, ビート雑音推定器の構成は, 乗算器と積分器の組み合わせによって相関器を構成しており, 積分器には一次の LPF (Low Pass Filter) を用いている。しかし, 従来のビート雑音推定器の課題として, ネットワーク構成が変わると, 設計をやり直す必要がある。この課題から, 光 CDMA 方式において ONU (Optical Network Unit) 数が変わることで柔軟なアクセスシステムではないと考えられる。そこで, 本研究ではネットワーク構成の変更に柔軟に対応できるような光 CDMA 方式の提案を行う。次節では, 従来の方式の課題を解決するために本提案方式におけるビート雑音推定器について述べる。

3 ビート雑音推定器の提案

本提案方式での最大尤度軟判定受信技術は, 光 CDMA 方式特有のビート雑音の影響低減が可能であるが, これはビート雑音推定器を本技術に組み合わせることによって達成することができる。本章では, 提案するビート雑音推定器の構成と推定方法について述べる。図 2 は, 提案するビート雑音推定器の構成を示している。

先ほど述べたように, ビート雑音は複数のユーザが同じ周波数を利用することにより発生し, ユーザが増加することによりその影響は大きくなる。このことから, 推定器に求められる条件として (1) 複数のビート雑音をそれぞれ独立に推定可能であること (2) 回路規模をできるだけ小さくすることの 2 つ挙げられる。

これらの条件を満足するビート雑音推定器を提案する。本提案方式では, 前節で述べた課題を解決するため, 特定のビート雑音推定器に適応フィルタ (Wiener Filter) を用いている。これは, 本提案方式の光 CDMA 方式においてユーザ数の変更にも適応的に対応することが目的である。ビート雑音推定器は先ほど述べた推定器に求められる条件 (2) を満たすために, 乗算器と適応フィルタを用いることでできるだけ回路規模を小さくしている。ビート

雑音推定器に用いる適応フィルタ (Wiener Filter) については次に述べる。

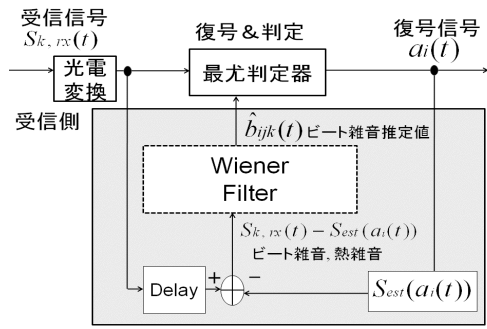


図2 ビート雑音推定器の構成

3.1 適応フィルタ

本章では先ほど述べたビート雑音推定に用いられる適応フィルタについて述べる。適応フィルタ [3] [4] とは、信号処理の過程に応じて特性を変化させる機能を備えたフィルタである。

この適応フィルタを用いることで任意の信号中に雑音を除去することができる。よって、本提案方式に適応フィルタを用いることでビート雑音の除去が期待される。そこで、本研究ではビート雑音推定器に Wiener Filter を用いてビート雑音の推定を行うことを提案する。また、Wiener Filter の適応アルゴリズムとして最小平均自乗 (Least Mean Square : LMS) を用いる。

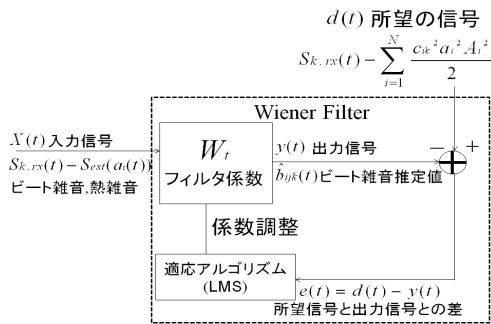


図3 適応フィルタ (Wiener Filter) の構成

3.2 最小平均自乗 (LMS) アルゴリズム

ビート雑音推定器 (図2) における Wiener Filter の適応アルゴリズムである最小平均自乗 (LMS) について、以下に述べる。

LMS アルゴリズムは演算量の点から実時間処理に好適であるため、最も多く使用されている適応アルゴリズムである。図3は適応フィルタ (Wiener Filter) の構成を示している。LMS アルゴリズムは平均自乗誤差 $E[e(t)^2]$ を最小化するアルゴリズムである。 $d(t)$ を所望信号、 $y(t)$ を Wiener Filter の出力信号とし、 $e(t)$ はエラー信号を示し、所望信号 $d(t)$ と出力信号 $y(t)$ との差で表すことができ、次の式 (6) に示す。

$$e(t) = d(t) - y(t) \quad (6)$$

ただし、所望信号 $d(t)$ は、予め送信側から受信側への同期は必要である。 W_t は Wiener Filter のフィルタ係数を示し、 X_t は入力信号を示す。ここで、 μ はステップサイズを示し、正の実パラメータを示している。 t は適応フィルタのタップ長を表している。

$$W_{t+1} = W_t + \mu e(t) X_t \quad (7)$$

μ : ステップサイズパラメータ

$$E[e(t)^2] = E[(d(t) - y(t))^2] \quad (8)$$

このように、式 (6) における所望信号との差 $e(t)$ を小さくするように式 (7) のフィルタ係数 W_t を決定し、式 (8) 平均自乗誤差 $E[e(t)^2]$ を最も小さくすることが LMS アルゴリズムである。このアルゴリズムを用いて、ビート雑音の推定を行う。

4 検証結果

本研究の有効性を検証するために数値シミュレーションを行った結果について述べる。本研究における数値シミュレーションのパラメータを表1に示す。

これらは、実際に実現可能であるかを基に検証するためのパラメータを用いている。適応フィルタ (Wiener Filter) の収束特性を図4, 5に示し、縦軸を $e(t)$ 、横軸を W_t の係数更新回数とし、図4は多重度を3にした場合、図5を多重度を8にした場合である。図4より、適応フィルタ (Wiener Filter) の係数更新回数が約500回で所望の信号とフィルタの出力信号との差 $e(t)$ が0に収束していることが確認できた。よって、多重度3の場合のフィルタにより、ビート雑音が推定されていることが確認できた。図5より、適応フィルタ (Wiener Filter) の係数更新回数が約2500回で所望の信号とフィルタの出力信号との差 $e(t)$ が約0に収束していることが確認できた。しかし、多重度8の場合の図4と比較すると、ビート雑音の推定誤差が確認できた。

また、BER の特性評価を図6, 7に検証結果としてそれぞれ示す。横軸を SNR、縦軸を BER とし、図6は多重度3とした場合、図7は多重度8とした場合である。また、のときのアダマール符号として、多重度が3のときの場合 $\{1, 1, 0, 0\}$ $\{1, 0, 1, 0\}$ $\{1, 0, 0, 1\}$ 、多重度を8にした場合 $\{1, 1, 0, 0, 0, 0, 0, 0\}$ $\{1, 0, 1, 0, 0, 0, 0, 0\}$ $\{1, 0, 0, 1, 0, 0, 0, 0\}$ $\{1, 0, 0, 0, 1, 0, 0, 0\}$ $\{1, 0, 0, 0, 0, 1, 0, 0\}$ $\{1, 0, 0, 0, 0, 0, 1, 0, 0\}$ $\{1, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 1\}$ を用いた。一点鎖線はビート雑音が発生する場合の硬判定による結果を示している。また、破線は、ビート雑音が発生する場合の従来のビート雑音推定器 [2] を用いた結果である。ビート雑音が発生しない場合の従来のビート雑音推定器を用いたときの結果をひし形にてプロットしている。実線は提案方式による結果を示している。図6より、硬判定では BER を小さくすることができない。また、従来のビート雑音推定器 [2] では、多重度が3の場合はビート雑音の影響を低減することができる。また、BER が 0.001 のとき、提案方式では従来のビート雑音推定器より SNR が約 1.5dB 改善された。多重度が8の場合、多重度3の提案

方式(図6)と比較するとSNRを約3~4dBほどのペナルティに抑えることができた。よって、本提案方式により、多重度3,8においてはビート雑音の影響を低減しビット誤り率を小さくすることが確認できた。

表1 シミュレーションパラメータ

	User数 3	User数 8
光の周波数 f [THz]	User1:100 User2:100.0005 User3:100.001	User1:100 User2:100.0005 User3:100.001 User4:100.0015 User5:100.002 User6:100.0025 User7:100.003 User8:100.0035
光の位相 ϕ [°]	すべて各User:0	
電界強度 A_i	1	
本提案方式(適応フィルタ) タップ数 t ステップサイズ μ	10 0.01	10 0.001
データのサンプル間隔[sec]	1×10^{-10}	

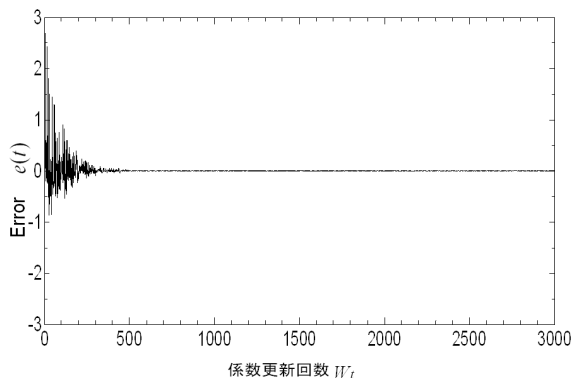


図4 Wiener Filter 収束特性 (user 数 3)

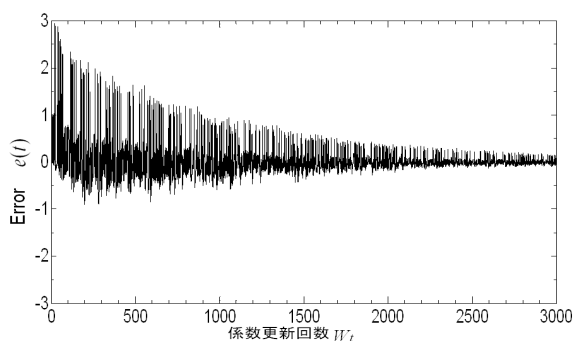


図5 Wiener Filter 収束特性 (user 数 8)

以上より、本提案方式の有効性を検証することができた。よって、本提案方式では多重度を増やすことでビート雑音の影響が大きくなる光CDMA方式[1][2]において、ユーザ数3だけでなくユーザ数8に増加したときも有効であると考えられる。

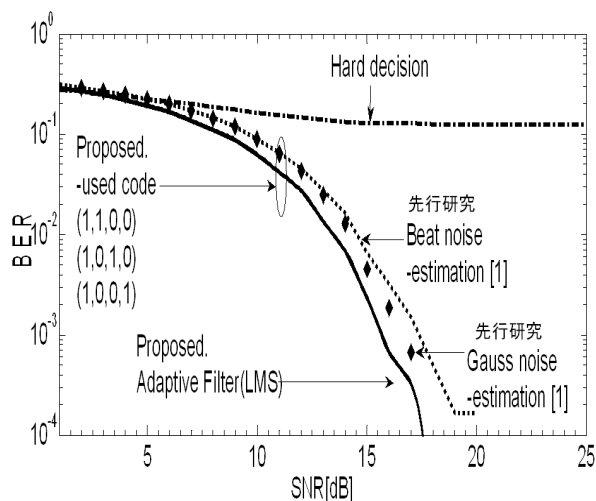


図6 BER 特性 (user 数 3)

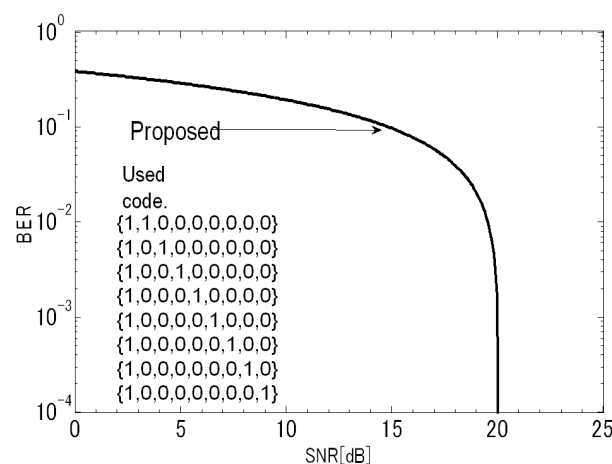


図7 BER 特性 (user 数 8)

5 むすび

本稿において、ビート雑音推定器に適応フィルタ (Wiener Filter) を用いた光CDMA方式を提案した。本提案方式において、光アクセスシステムでの標準的なユーザ数である8ユーザに増加して数値シミュレーションを行い、提案方式の特性を明らかにした。これにより、従来に光CDMA方式におけるボトルネックであったビート雑音の影響を低減し、BER特性を改善することができ、今後光CDMA方式実現に向けて大きく前進することができると考えられる。

参考文献

- [1] Savo Glisic, "Advanced Wireless Communications 4G Technologies," Wiley, pp.167-227, Jun.2004.
- [2] 桐原 誉人, 三鬼 準基, 金子 慎, 木村 秀明, 葉玉 寿弥, "最大尤度軟判定受信技術を用いた光CDMA方式," 信学技報 CS2009-40, Sep.2009.
- [3] 島村 徹也, "MATLABによる~実戦 デジタル信号処理," トリケップス社, Jun.2010.
- [4] 神谷 幸宏, "MALABによるデジタル無線通信技術," コロナ社, Dec.2008.