

適応フィルタを用いた光 CDMA 方式における ONU 追加アルゴリズムの研究

M2011MM064 下村亮二

指導教員：奥村康行

1 まえがき

近年、インターネットの急激な普及により、通信のトラフィック量の増加が顕著である。また、通信キャリアに高速化や大容量化だけでなく、多様性も要求している。これからのアクセスネットワークでは、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要求されている。そのため、既存のシステムが存在する中で、新サービスの追加が要求されることが考えられる。しかし、既存の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。つまり、新サービスの追加には周波数利用効率の高いものが要求されている。

これらの要求を満たすアクセスシステムとして、光 CDMA(Code Division Multiple Access) 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、その符号を元に多重・伝送を行う。しかし、この光 CDMA 方式ではビート雑音という特有の信号劣化要因が発生し、多重度が制限されるという課題があった。もし、周波数利用効率を高い状態で、ビート雑音の影響を低減し多重度を上げることが出来れば、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 [3]。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、ビット誤り率を低下し受信感度を向上させる。また、ガウス雑音や熱雑音などの雑音信号を緩和させるために、適応フィルタが用いられる。適応フィルタを用いることで、ある所望の信号に応じてフィルタの係数を調整し、雑音信号を適応処理することが可能となる。

本研究では、適応フィルタを用いたビート雑音推定器を用いた光 CDMA 方式において、追加アルゴリズムを提案することで、あるユーザが通信を行っているところへ、別ユーザの通信が追加される場合において、雑音を抑えつつユーザの追加が可能かについて研究を行った。

2 光 CDMA 方式

光 CDMA 方式では既存のシステムを考慮して、新システムに求められる要求条件として、現在主流の GE-PON(Gigabit Ethernet -PON) 方式に、1 ユーザ当たり 1~10Gbps の帯域占有サービスの追加を考える。そうすることで、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ができ、新たに敷設するコストの削減が可能となる。また、新システムに利用可能な帯域は、既存システムが上り用に 1.49 μm 帯、映像用に 1.55 μm 帯、保守用に 1.6 μm 帯を用いており、その合間を縫った非常に狭い帯域部分しか残されていない。そのため、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はある。

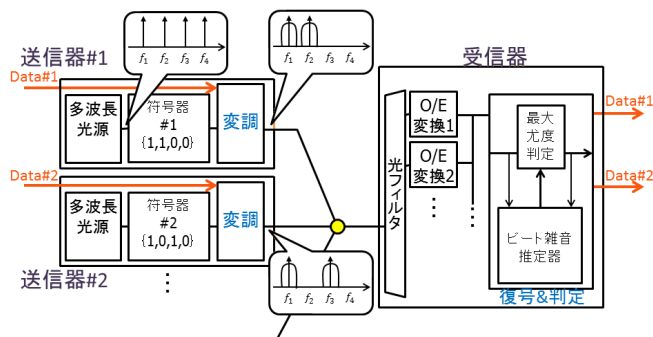


図 1 光 CDMA 方式の構成例

2.1 光 CDMA 方式

本研究の光 CDMA 方式の構成例を図 1 に示す。送信部は多波長光源、各ユーザに割り当てられた符号器、および復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て受信側へ送られる。

一方、受信器では光フィルタ、O/E 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、および判定器で構成される。光フィルタは多波長光源の波長間隔と同等以下の分解能を有することを仮定している。また、復号器では、各波長ごとに分波され、O/E 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し、判定した後に所望データを得られるようにする。ただし、受信側では各ユーザ信号のビット位相同期は取れているものとする。

本研究では、符号化する際に複数ユーザがある周波数を共有することを考えており、受信側において複数の光信号を同時に O/E 変換することで、ビート雑音が発生する。この雑音はガウス雑音やショット雑音などよりもはるかに大きな影響を与え、光 CDMA 方式における信号劣化要因の一つとなっている。

このビート雑音の影響を低減するために最大尤度軟判定受信技術を用いた推定器が提案されており、本研究でもこの推定器を用いる。

2.2 最大尤度軟判定受信技術 [3]

最大尤度軟判定受信技術とは、受信部において復号と判定を同時に行い、確率論を用いることでビット判定の誤り率をさげることができる技術である。

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、その上で従来の方法では

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、本方式の大きな特徴として、図1に示すように、O/E変換後に復号と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ることで復号と判定を行っている。これから、この目的を達成するために最大尤度軟判定技術について、アルゴリズムを順に説明していく。図1において、ユーザー i の送信信号、式 $S_{i,tx}(t)$ は式 (1) のように表される。

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

$a_i(t)$ は1/2の確率で発生する送信データ信号0または1、 A_i は搬送波の電界強度、 c_{ik} は i 番目のユーザーに割り当てられた 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。また、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、二乗平均をとった場合の 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 はユーザー数、1番目の項はデータの情報を示し、2番目の項内の b_{ijk} は式 (3) で表すことのできるビート雑音である

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

このビート雑音は、 i 番目と j 番目のユーザーが k 番目の同じ周波数を共有することで発生する。また、3番目の項である x_k はO/E変換時に発生する熱雑音(ガウス雑音)であり、式 (4) に示すガウス関数で表すことができる。 σ はガウス分布の標準偏差を示している。

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

ビート雑音は複数のユーザーが同じ周波数を共有することによって発生するが、もし同じ周波数を共有した場合にはそれぞれのユーザー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ー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。

$$\arg \min_{\{a_i\}} \left\{ \sum_k (S_{k,rx} - \sum_{i=1}^N \frac{c_{ik} a_i}{2} - \sum_{i=1}^{N-1} \sum_{j=i+1}^N c_{ik} a_i c_{jk} a_j b_{ijk})^2 \right\} \quad (5)$$

ここで、 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。

3 適応フィルタを用いたビート雑音推定器

従来のビート雑音推定器 [3] では、複数の混合信号から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の相関関係を利用している。

しかし、従来の推定器はネットワーク構成が変わると、設計をやり直さなければならないという課題があった。この課題から、光CDMA方式におけるONU数の変化に柔軟に対応することができないアクセスシステムと考えられ、図2の適応フィルタを用いたビート雑音推定器が提案された。ビート雑音は複数のユーザーが同じ周波数を共有することで発生し、ユーザー数が増加することで、その影響が大きくなる。これにより、推定器に要求される条件として、複数のビート雑音をそれぞれ独立に推定すること、回路規模を小さくすることの2つがあげられる。

特定のビート雑音推定器に適応フィルタ (Wiener Filter) を用いることは、ユーザー数の変更対応可能を目的として、前記の回路規模を小さくするという要求も満たしている。ビート雑音推定器に用いる適応フィルタについては次に述べる。

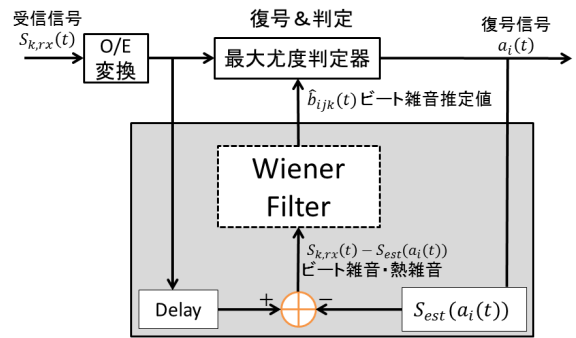


図2 ビート雑音推定器の構成

3.1 ビート雑音推定器に用いる適応フィルタ

本章では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 [4],[5] 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。このフィルタを用いることによって、任意の信号中の雑音を除去することができる。また、ネットワーク構成が変化しても設計のやり直すことなく雑音除去が可能となる。

3.2 最小平均自乗 (LMS) アルゴリズム

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

$d(t)$ 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。 \mathbf{W}_t は Wiener Filter のフィルタ係数を示し、 \mathbf{X}_t は入力信号を示す。ここで μ はステップサイズを

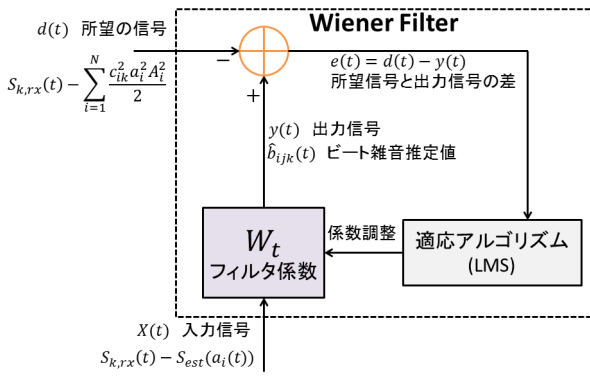


図 3 適応フィルタの構成

表し、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。

$$\mathbf{W}_{t+1} = \mathbf{W}_t + \mu e(t) \mathbf{X}_t \quad (7)$$

μ : ステップサイズパラメータ

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

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 \mathbf{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 LMS アルゴリズムを用いてビート雑音の推定を行う。

3.3 従来のビート雑音推定器の課題

光 CDMA 方式における ONU 数の変化に柔軟に対応することができるアクセスシステムとして提案された適応フィルタを用いたビート雑音推定器だが、先行研究では User 数 3 と User 数 8 の各 ONU がすべて同時に通信を行っている状況でシミュレーションを行っている。ところが実際の通信ではある運用中の ONU が通信しているところへ、別の ONU が追加される。そこで本研究で提案する追加アルゴリズムを適応させることで、ONU が追加される状況においても、フィルタを用いたビート雑音推定器が有効であるかを実験した。

4 ONU 追加アルゴリズム

実際の通信では 8 台がいきなり通信を開始するわけではなく、ある ONU が通信している所へ別の ONU が追加される。先行研究では 8 台が同時に通信されたものでしか実験されていないため、本研究では ONU が追加された場合でも、既通信の ONU への影響を抑えられるような追加アルゴリズムの提案をした。以下にそのアルゴリズムを示す。

- ステップ 1 初期状態
既に通信を行っている ONU の電界強度は 1, 未通信の ONU の電界強度は 0 とする。
- ステップ 2 ONU の追加
追加 ONU の電界強度を 0~1 へ徐々に高めることで ONU を追加する。なお、電界強度の増加量は設定で予め決めることができる。ただし、追加中の信号はトレーニング信号を用いる。そのため、最大尤度判定を

必要としない。トレーニング信号を用いる理由は、電界強度が小さいと信号も小さくなり、信号よりも雑音が大きくなるため正しく判定されず、誤って複号されてしまうためである。

- ステップ 3 ONU 追加後

追加 ONU の電界強度が 1 になったら、トレーニング信号から通常の信号に戻し、最大尤度判定を行う。

以上のステップ 1~3 の手順で、所望の信号と出力信号の差 $e(t)$ を抑えつつ ONU の追加を行う。

そして、追加アルゴリズムでは *division* と *continuation* というパラメータを変更することで追加方法を変化させる。*division* は電界強度が 0 から 1 までの分割数を表し、*continuation* は同じ電界強度を継続する回数である。

また、追加アルゴリズムが適応されてから終了までの係数更新回数は、*division* と *continuation* をかけた値 *iteration* で表すことができる。

5 シミュレーション

本研究のアルゴリズムの有効性を検証するために MATLAB を用いてシミュレーションプログラムを作成し、数値シミュレーションを行った。本節ではその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パラメータを以下の表 1 に示す。

表 1 シミュレーションパラメータ

	User 数 3
光の周波数 f [THz]	User1:100 User2:100.0005 User3:100.001
直交符号 c	User1:(1,1,0,0) User2:(1,0,1,0) User3:(1,0,0,1)
光の位相 ϕ [θ]	すべて各 User:0
電界強度 A	追加アルゴリズムに応じて増加
データ数	10000
ビットレート [bps]	1.0×10^{10}
データのサンプル間隔 [sec]	1.0×10^{-10}
タップ数 t	10
ステップサイズ μ	0.01

5.1 運用中 ONU に ONU 追加が与える影響

本研究では、ONU1 が運用中のところへ、係数更新回数 2000 回のところで ONU2 が、3000 回のところで ONU3 が追加される場合について実験を行った。図 4 には *iteration*=1 すなわち、(*division*, *continuation*)=(1,1) におけるフィルタ収束特性と電界強度を示し、図 5 には、*iteration*=5000 における (*division*, *continuation*)=(5000,1) のフィルタ収束特性と電界強度を示す。なお、縦軸を $e(t)$ 、横軸を係数更新回数 \mathbf{W}_t とする。

図 4 と図 5 を比較すると、エラーの最大値を図 5 の結果では抑えられているだけでなく、追加アルゴリズム適応後

のエラーに大きな差があることがわかる。これは追加アルゴリズム適応中にエラーを収束させていることにより、追加アルゴリズム適応後の誤判定を減少させていることがわかる。

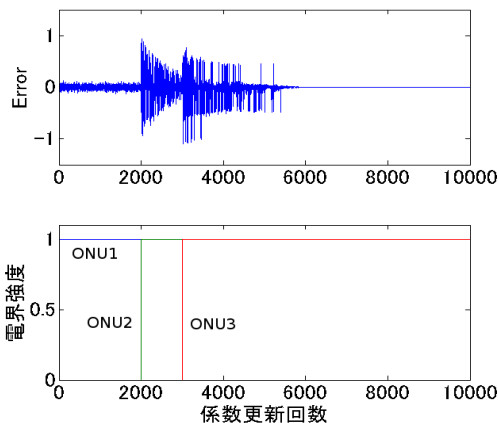


図 4 $(division, continuation)=(1, 1)$ における ONU1 のフィルタ収束特性と電界強度

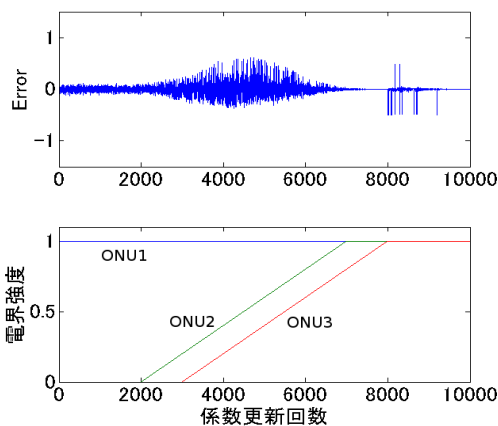


図 5 $(division, continuation)=(5000, 1)$ における ONU1 のフィルタ収束特性と電界強度

5.2 運用中 ONU の BER 特性

図 6 と図 7 では横軸を SNR(Signal-Noise Ratio), 縦軸を BER とし, $(1,1)$ の BER 特性を図 6 に, $(5000,1)$ の BER 特性を図 7 に示す。直線はビート雑音なし, ひし形プロットは追加アルゴリズム適用中, そして, 米印プロットは追加アルゴリズム適応後の係数更新回数 2000 回分の結果である。四角プロットの結果は追加アルゴリズム適用中と係数更新回数 2000 回分の範囲の BER 特性を示す。図 6 と図 7 を比較すると, $(5000,1)$ では追加アルゴリズム適応中にエラーが 0 に収束していたため, BER も同様に抑えられている。また, 追加アルゴリズム適応後の誤判定も減少しているため, BER が大きく抑えられている結果となった。

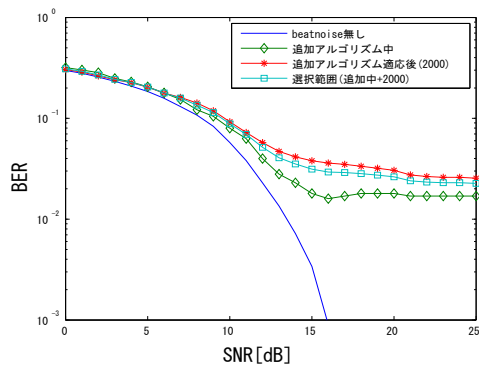


図 6 $(division, continuation)=(1, 1)$ における BER 特性

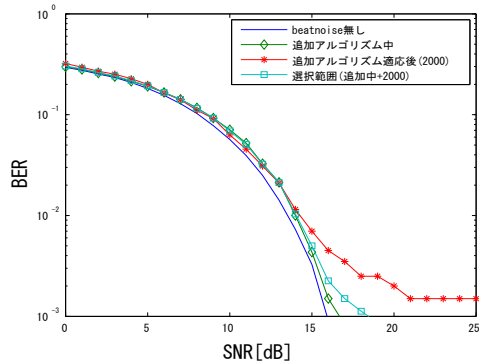


図 7 $(division, continuation)=(5000, 1)$ における BER 特性

6 まとめ

追加アルゴリズムを用いることでエラーを抑えつつ ONU を追加することができた。特に $iteration$ の値が大きいほど, 追加アルゴリズム中のエラーを抑え, 追加アルゴリズム適応後の BER も大きく抑えることが分かった。また, 同じ $iteration$ の値の組み合わせの中でも, $division$ が大きいほど追加アルゴリズム適応中のエラーの最大値を抑え収束させることで, 追加アルゴリズム適応後の誤判定を減少させた結果を得ることが出来た。

参考文献

- [1] Savo Glisic, "Advanced Wireless Communications 4G Technologie", Wiley, pp.167-227, Jun. 2004.
- [2] 伊藤 寛和, "ビート雑音推定器に適応フィルタを用いた光 CDMA 方式の提案", 電子情報通信学会総合大会講演論文集, 2011 年 基礎・境界, 125, 2011-02-28
- [3] 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.
- [4] 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.
- [5] 神谷 幸宏, "MATLAB によるデジタル無線通信技術", コロナ社, Dec. 2008.