

アダマール符号を用いた光 CDMA 方式における 雑音推定に関する研究

M2014SC022 山本一貴

指導教員：奥村康行

1 はじめに

近年インターネットの普及により、通信全体のトラフィック量が増加しており、通信キャリアに高速化や大容量化、多様性が要求されている。そのため、これからのアクセスシステムでは、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。以上のことより、既存のシステムが存在する中で、新サービス追加が要求される。すでに既存のシステムが帯域を使用しているため、新サービスでは残されている狭帯域しか使用できない。そのため、新サービスは周波数利用効率の高いアクセスシステムであることが要求される。

これらの条件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] がある。光 CDMA 方式は各ユーザ、サービスごとに符号を割り当て、割り当てた符号を基に多重化を行い、伝送するアクセスシステムである。しかし、この光 CDMA 方式ではビット雑音と呼ばれる特有の信号劣化要因が発生する。そのため、光 CDMA 方式ではビット雑音の影響により、多重度が制限されるという課題がある。周波数利用効率が高い状態で、ビット雑音の影響を低減させ、多重度を上げることが可能となることで、追加する新サービスに適したアクセスシステムであると考えられる。

信号受信技術として、最大尤度判定技術が提案されている。最大尤度判定技術は、信号判定時に事後確立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ことができる。また、他の技術として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、発生している雑音信号を抵抗処理することが可能になる。この適応フィルタにより、ガウス雑音や熱雑音などの雑音信号を緩和させることができる。

本研究では、適応フィルタを用いたビット雑音推定器を用いた光 CDMA 方式において、単純な直交符号ではなくアダマール符号を使用する。アダマール符号を用いることで、信号判定の精度を高め BER の改善を図る。また、ユーザ追加アルゴリズム [3] を用い、ユーザの追加条件に対する BER の変化を調べる。ユーザ追加アルゴリズムでは、あるユーザが通信中の場合に対して別のユーザが通信を開始する場合を考える。

2 光 CDMA 方式

光 CDMA 方式では既存のシステムを考慮する。そのため、新システムに求められる要求条件として、現在主流で

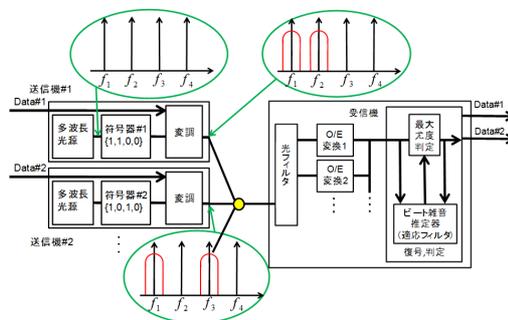


図1 光 CDMA の構成例

ある 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ができる。そのため、新たな機材を敷設する必要がなくなり、コストの削減をすることができる。現在、既存システムが上り用に 1.49 μm 帯、映像様に 1.55 μm 帯、保守用に 1.6 μm 帯を用いている。新システムには合間の非常に狭い帯域部分しか残されておらず、帯域が制限される。そのため、新システムでは周波数利用効率を高くする必要がある。

2.1 光 CDMA 方式

本研究の光 CDMA 方式の構成例を図 1 に示す。送信部はユーザ毎に多波長光源、符号器、および変調器から構成される。符号器は、符号に基づいて使用する波長のみが通過するフィルタを考える。また、各ユーザの送信信号は、光カプラで多重化されて受信側へ送信される。

受信部は、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性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、判定する。ただし、受信側では各ユーザ信号のビット位相同期はとれているものと仮定している。

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いる。そのため、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、ビット雑音が発生する。この雑音はガウス雑音よりも大きな影響を与えるため、光 CDMA 方式における信号劣化要因の一つとなっている。

このビッ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使用する。

2.2 最大尤度軟判定受信技術 [2]

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う技術である。これは、確立論を用いることでビット判定の誤り率を下げることを実現する技術である。

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しない。また、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。本方式の大きな特徴として、復号と判定を同時に行う事が挙げられる。この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、復号と判定を同時に行っている。以下に最大尤度軟判定技術についてアルゴリズムを説明していく。ユーザー i の送信信号、式 $S_{i,tx}(t)$ を次に示す。

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

$a_i(t)$ は 1/2 の確立で発生する送信データ信号、 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している。また、直交符号はアダマール符号 [1] を想定している。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 $S_{k,rx}$ を次の式 (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} は発生しているビート雑音であり、式 (3) で表す。

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

式 (3) 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ビート雑音である。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）である。式 (4) に示すガウス関数で表すことができ、 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ため、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。そのため、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

の判定信号を、 a_i に対して式 (5) に示す。

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

ここで、 b_{ijk} は推定したビート雑音である。このように、事後確立が最大となるビットパターンを判定値とすることが最大尤度軟判定受信技術であり、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 [2] では、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更されることで、設計をやり直す必要があった。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ていた。しかし、図 2 に示す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する。また、ユーザー数が増加することで、ビート雑音の影響が大きくなる。これにより、推定器の条件として、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が要求される。

特定のビート雑音推定器に適応フィルタ (Wiener Filter) を用いることで、ユーザー数の変更対応を目的としていると共に、回路規模を小さくするという要求を満たすことが可能となる。

3.1 ビート雑音推定器に用いる適応フィルタ

適応フィルタ [5], [6] は、信号処理の仮定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。適応フィルタを用いることで、任意の信号中の雑音を取り除くことができる。また、ネットワーク構成が変化した場合においても、設計のやり直しを必要としない。

3.2 LMS アルゴリズム

ビート雑音推定器における適応フィルタのアルゴリズムである LMS アルゴリズムについて述べる。LMS アルゴリズムは演算量の点から時間処理に好適なため、最も多く使用されているアルゴリズムである。図 3 は適応フィルタの構成を示したものである。LMS アルゴリズムは平均自

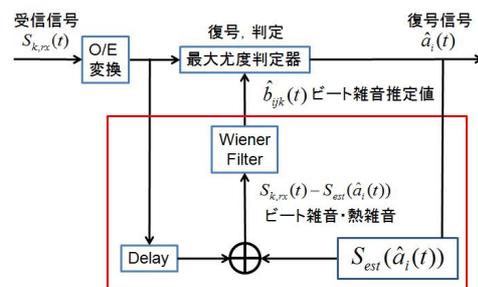


図 2 ビート雑音推定器の構成

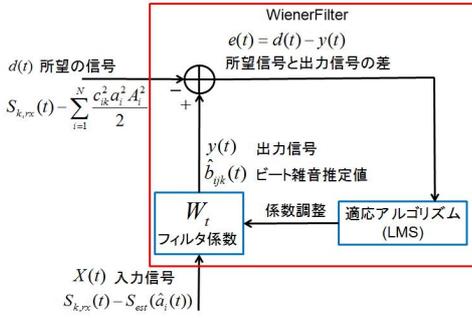


図3 適応フィルタの構成

乗誤差 $E[(t)^2]$ を最小化するアルゴリズムである。

$d(t)$ を所望信号, $y(t)$ を適応フィルタの出力信号とし, $e(t)$ はエラー信号を示す。エラー信号は所望信号 $d(t)$ 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 は適応フィルタ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表しており, 正の実パラメータを示す。 t は適応フィルタのタップ長を示す。

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

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

式 (6) における所望信号と出力信号との差 $e(t)$ を小さくするように式 (7) のフィルタ係数 W_t を決定する。そして, 式 (8) の平均自乗誤差を最も小さくする LMS アルゴリズムを用いてビート雑音の推定を行う。

4 ONU 追加アルゴリズム

実際の通信では全てのユーザが同時に通信を開始するわけではない。あるユーザが通信している所に別のユーザが通信開始する。そのため, 本研究では一つのユーザが通信している所に別のユーザが順次追加される状況を想定してシミュレーションを行う。以下にユーザを追加するアルゴリズムについて説明をする。通信状態の電界強度を 1 とし, 非通信状態の電界強度を 0 とする。追加されるユーザは電界強度を 0 から 1 に変化させることで, 通信開始を設定する。また, 電界強度の増加量は設定で予め決定することができる。

あるユーザの電界強度を 1 の状態に設定する。それにより初期状態から通信中のユーザを設定する。残りのユーザは, データを送受信している中の特定の箇所から電界強度を 0 から 1 に変化させることで, 疑似的に途中から通信を開始させる。電界強度を 0 から 1 に変化させる際, 電界強度の変化量を予め設定することができる。電界強度の変化量を変更できるようにすることで, ユーザが追加され始めの段階から, 完全に通信を開始した瞬間までの状態の変化を確認することができる。

電界強度の変化量と, ユーザの追加される箇所を設定できるため, 同時に通信を開始する場合や, 順次ユーザが通

信を開始する場合など複数の条件でシミュレーションを行うことができるようになる。これらの条件を変更させることで, 様々な場合においても所望信号と出力信号の差 $e(t)$ を抑えつつユーザの追加を行うことが可能か検討する。

5 シミュレーション

本研究のアダマール符号を使用した場合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。本研究では, ユーザ数 8 の条件でシミュレーションを行い, 直交符号とアダマール符号の比較を行う。各ユーザに対するパラメータを以下の表 1 に示し, シミュレーションパラメータを表 2 に示す。各ユーザにそれぞれ周波数, アダマール符号, 通信開始のタイミングを設定している。シミュレーションのデータ数は, データ数 1 万のシミュレーションを 20 回繰り返すことで, 総データ数 20 万とした。そして, 電界強度を 0 から 1 に変化させる変化量は, 0 から 1 までを 1000 分割し緩やかにユーザを追加した場合と分割せず急激にユーザを追加した場合をシミュレーションすることで, ユーザ追加に対する変化を検証した。また, 適応フィルタのステップサイズを 0.038 とし, ユーザ 1 のデータに対する BER を求めた。ビート雑音の発生や, 誤り訂正能力を確認するため, ユーザ 1 のデータに対する $e(t)$ と, 各ユーザの電界強度の変化を示した。エラーと電界強度に対しては, 符号に基づいてユーザ 1 と残りの各ユーザが共有しているものを示す。急激にユーザを追加した場合の BER 特性を図 4, エラーと電界強度の変化を図 5, 図 6 に示す。また, 緩やかにユーザを追加した場合の BER 特性を図 7, エラーと電界強度の変化を図 8, 図 9 に示す。各符号に対し, ビート雑音の発生を確認することができた。ビート雑音がある場合と無い場合で BER が 10^{-2} の箇所に対して, 直交符号では約 1dB, アダマール符号では約 3dB 悪くなっている。しかし, アダマール符号を用いるこ

表 1 ユーザパラメータ

ユーザ	周波数 f [THz]	アダマール符号	通信開始
User1	100	(1,0,1,1,1,0,0,0,1,0,1)	0
User2	100.0005	(0,1,1,1,0,0,0,1,0,1,1)	1000
User3	100.001	(1,1,1,0,0,0,1,0,1,1,0)	2000
User4	100.0015	(1,1,0,0,0,1,0,1,1,0,1)	3000
User5	100.002	(1,0,0,0,1,0,1,1,0,1,1)	4000
User6	100.0025	(0,0,0,1,0,1,1,0,1,1,1)	5000
User7	100.003	(0,0,1,0,1,1,0,1,1,1,0)	6000
User8	100.0035	(0,1,0,1,1,0,1,1,1,0,0)	7000

表 2 シミュレーションパラメータ

データ数	2.0×10^5
位相 [rad]	0
電界強度の分割数	1,1000
タップ数	10
ステップサイズ	0.038

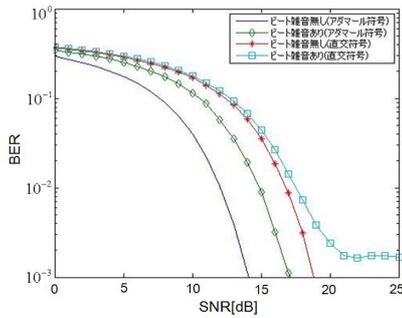


図4 BER特性(分割無し)

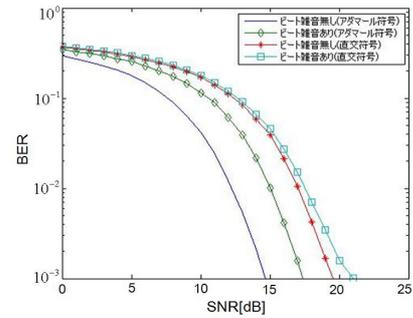


図7 BER特性(分割有り)

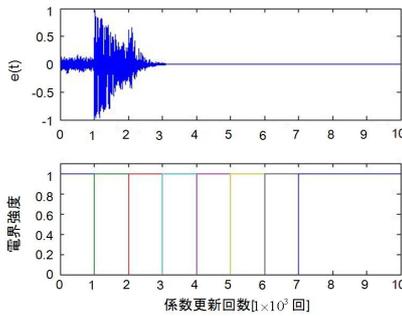


図5 エラー信号と電界強度(直交符号)

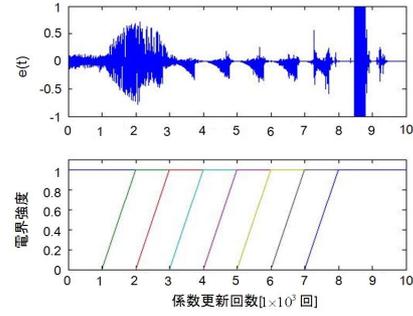


図8 エラー信号と電界強度(直交符号)

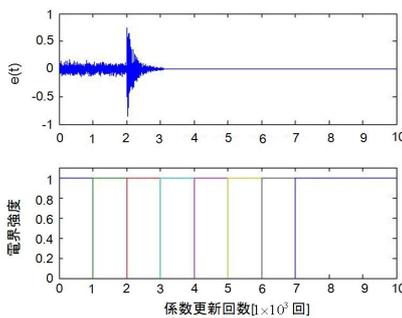


図6 エラー信号と電界強度(アダマール符号)

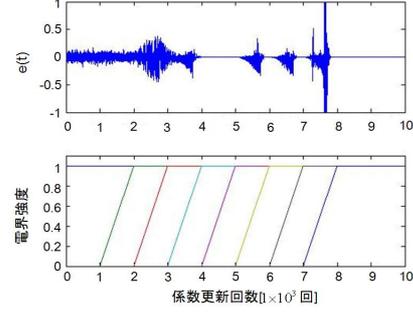


図9 エラー信号と電界強度(アダマール符号)

とにより、直交符号を使用した場合と比較すると BER を約 4dB 改善することが出来ている。また、電界強度を分割して変化させた場合、電界強度の変化に合わせてビート雑音が大きくなる。そのため、エラーの収束まで時間がかかり、電界強度を分割しない場合と比べ BER が約約 1dB 悪くなった。しかし、直交符号では、電界強度を分割した場合 BER が 10^{-3} の値を取ることができた。そのため、電界強度を分割することで BER の値を小さくすることが可能であると考えられる。以上のことから、光 CDMA 方式においてアダマール符号を用いることでビート雑音の影響を低減させることが可能であると考えられる。

参考文献

[1] Savo Glisic, "Advanced Wireless Communications 4G Technologies," pp. 167-227, Wiley, 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] 下村亮二, "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," 2012 年度南山大学大学院数理情報研究科, Mar. 2013.
 [4] 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," 電子情報通信学総合大会講演文集, 2011 年基礎・境界, 125, Feb.2011.
 [5] 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.
 [6] 神谷幸宏, "MATLAB によるデジタル無線通信技術," コロナ社, Dec. 2008.