

OFDMA-PONにおけるタイミング検出特性について

2009SE254 清水亮吾 2011SE198 西村ひさ子

2011SE290 小川芽生

指導教員：奥村康行

1 はじめに

インターネットなどの通信技術を用いた分野が急速に発展し、データの高速通信に対する需要が高まった。中でも伝送媒体に光ファイバを用いて信号を伝える光通信は、高速かつ長距離伝送を可能にする通信方式として発展し、一般家庭にまで普及が拡大している。光ブロードバンドは、広い周波数帯域幅を持つ光信号を利用して高速かつ大容量のデータ通信を行う回線のことで、この帯域幅拡大技術として OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing) が研究されている。OFDM は、無線通信においても注目される方式で、複数のキャリアを一部重なりあいながらも互いに干渉することなく密に並べることができる技術である。そのため狭帯域を効率的に利用できるという利点がある。このような OFDM 信号の高い周波数利用効率の利点を光の分野に適用し、大容量化する通信方式を OFDMA-PON (Passive Optical Network) と呼ぶ。

OFDMA-PON は、偏波の直交する光信号を同時に伝送するため 2 倍速通信を可能にするが、光ファイバの張力やねじれによって偏波回転が発生し同期はずれが起きやすくなってしまいう課題がある。本研究では、OFDM 受信機で一般に利用されるタイミング検出方式を用いて、受信側で偏波回転が補正できなかった場合、同期はずれはどの程度起きるかシミュレーションし、回転角度が何度までであれば補正する必要がないか検討する [1]。

2 OFDMA-PON の構造

OFDMA-PON は、多くの狭帯域の直行するサブキャリアを用いており周波数効率の高い高速伝送ができること、サブキャリアを利用した ONU への柔軟な帯域割り当てが可能なことなどを利点とする。しかしその一方で、光ファイバの張力やねじれにより偏波回転が発生してしまうという課題がある。

2.1 OFDMA-PON の構造 (OLT)

図 1 に偏波多重方式 OFDMA-PON における Optical Line Terminal(OLT) の構造を示す。Optical Line Terminal とは、光ファイバ通信網における電話局側の終端装置である。CWLD (Continuous Wave Laser Diode) は、X と Y の 2 つの光キャリアを生成する。外部共振器レーザの波長を選択することで、50GHz 光インターリーブは X と Y の 2 つの光キャリアを垂直方向に分離する。その後光搬送波は IM に送られ、それぞれ高周波 OFDM 信号によって変調される。直交偏波を有する 2 重偏波多重キャリア OFDM 信号を生成するため、IM の出力は偏光ビームコンバイナ (PBC) によって組み合わせられる。その後、OFDM 信号が 25GHz 光インターリーブによって抑圧さ

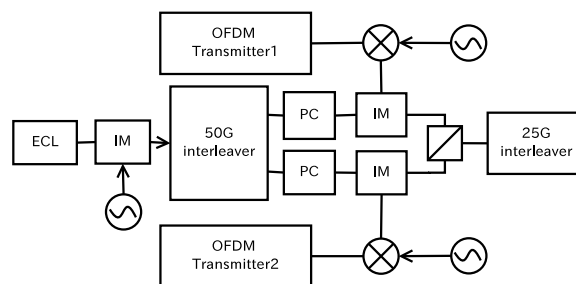


図 1 OFDMA-PON の構造 (OLT)[2]

れ、出力信号が生成される。

2.2 OFDMA-PON の構造 (ONU)

図 2 に偏波多重方式 OFDMA-PON における Optical Network Unit(ONU, 光回線終端装置) の構造を示す。Optical Network Unit とは、光ファイバ通信網においてパソコンなどの端末機器をネットワークに接続するためのユーザ側の装置である。二重偏波多重キャリア OFDM 信号は PBS により 2 つに分割され、それぞれ 2 つの PD (フォトダイオード) によって検出される。この段階では、OFDM 信号は依然として高周波信号であるので、2 つの OFDM 受信機でベースバンドにダウンコンバートされる。最後に MIMO PolDeMux 受信機により、DSP アルゴリズムを介して各偏光の元のデータが復元される [2]。

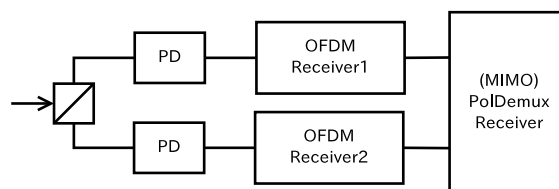


図 2 OFDMA-PON の構造 (ONU)[2]

3 OFDM 送受信機の構成と OFDMA について

OFDM 送信機の構成を図 3 に、受信機の構成を図 4 に示す。

送信機では、PSK や QAM 変調されたデータが N_{sp} 個のシンボル S として入力されると、それを並列化し、同時に出力する (S/P 変換)。出力されたシンボル $S_0, S_1, \dots, S_{N_{sp}-1}$ は異なるサブキャリア $e^{j2\pi f_0 k}, e^{j2\pi f_1 k}, \dots, e^{j2\pi f_{N_{sp}-1} k}$ によってそれぞれ変調される。ここで f_1 をサブキャリアの周波数間隔とすると、 $f_0 = 0, f_2 = 2f_1, f_3 = 3f_1, \dots, f_{(N_{sp}-1)} = (N_{sp}-1)f_1$ のように書き表せる。これらにチャネル推定用系列を付

加し、IFFTを施した後、GI（ガードインターバル）を付加する。これをベクトル化（P/S変換）したものがOFDMシンボルであり、これが連続したものがOFDM信号である。OFDM信号 $S_{OFDM}[k]$ は、式(1)で表される。

$$S_{OFDM}[k] = \sum_{n=0}^{N_{sp}-1} S_n[k] e^{j2\pi n f_1 k} \quad (1)$$

ただし、 k は何番目のOFDMシンボルか示している。

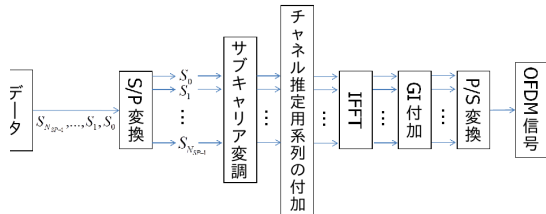


図3 OFDM送信機の構成

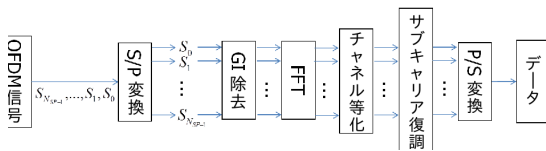


図4 OFDM受信機の構成

ここでGIについて説明する。GIとは、OFDM末尾の N_{GI} サンプルをコピーし、OFDMシンボルの先頭に付加したものである。ここでシンボル S_2 に注目して、そのイメージを図5に示す。

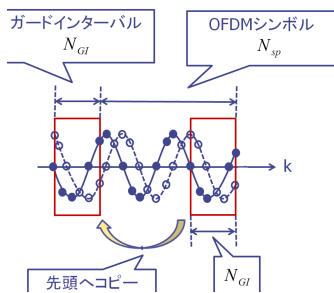


図5 OFDMシンボルにおけるGI付加のイメージ [3]

受信機では、GIの相関値を算出し、その絶対値からピークを検出する（シンボルタイミングの検出）。次にシンボルからGIを除去し、FFTを施した後、チャンネル等化する。最後にサブキャリア復調したものが、データとして出力される [3]。

OFDM送信機で利用するひとつひとつのサブキャリアは、時間毎にいくつ誰に割り当てるか定めることができる。このように異なるタイムスロット内の異なるサービスに対し、サブキャリアを時々刻々と割り当てることができるOFDMと、1つの無線キャリアを時間毎に分割して複数のユーザに割り当てることができるTDMA（Time

Division Multiple Access）を組み合わせたハイブリッド技術がOFDMAであり、これを図6に示す。OFDMAを利用することで、1つの伝送路を複数のユーザーで共有することができる [2]。

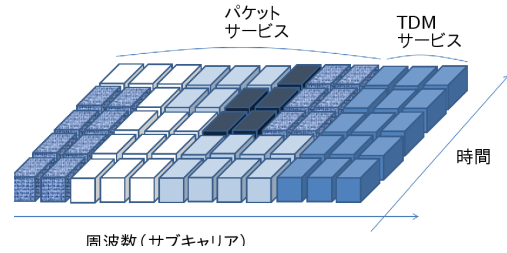


図6 OFDMAの周波数領域と時間領域の振り分け

4 タイミング検出方式

OFDMでは送信時にガードインターバル(GI)を付加する。受信機側で付加されたガードインターバルの除去を行うが、適切なシンボルタイミングの検出が必要とされる。

4.1 ガードインターバルの相関値によるタイミング検出方式

タイミング検出方式として、一般には連続OFDM信号ではOFDMシンボルのGI部分とそのコピー元との相関によりタイミング検出を行う方法が用いられている。相関値が閾値を越えた場合、同期がとれているとする。ここで N はサブキャリア数、 G はガードインターバル長とする。その図を図7に示す。

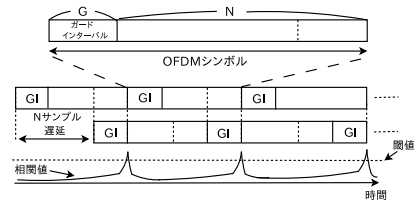


図7 GIの相関値によるシンボルタイミング検出の図式化 [4]

図7に示すように、受信連続OFDM信号と N サンプルだけ遅延させた受信信号から相関値を算出している。相関値は $N + G$ サンプルごとに大きな値となる。最大値に対応する時刻をシンボルタイミングとして出力する。

4.2 同期はずれ

ガードインターバルの相関値からタイミングを検出する方法は、フェージングや偏波回転などの影響で受信電力が大きく変動する環境において受信電力の低下時に相関値が弱くなり正しいタイミング検出が難しくなるという弱点があり、誤ったタイミングを検出してしまう場合がある。この状態を同期はずれと呼ぶ [4]。

5 シミュレーション

本研究ではガードインターバルに M 系列を用いている。OFDMA-PON において、M 系列の相関値のピーク検出によるタイミング出力を用いた時、偏波回転によって同期はずれが起きてしまう場合がある。だが偏波回転の角度がどの程度までであれば回転補償を行わなくて良いかを検討する。そのために計算機シミュレーションツール MATLAB を使用しシミュレーションを行う。

5.1 シミュレーション構成

本研究に使用するプログラムの構成を図 8 に示す。

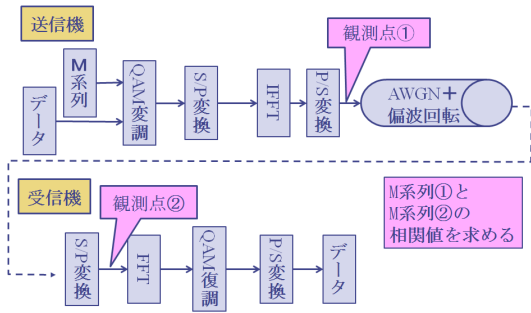


図 8 シミュレーションの流れ

送信機内でデータと M 系列を QAM 変調し S/P 変換する。それを逆高速フーリエ変換 (IFFT) し P/S 変換する。そのデータに光ファイバ内で起こると想定される AWGN と偏波回転を加える。受信機内で S/P 変換し、高速フーリエ変換し QAM 復調する。最後に P/S 変換を行うことによってデータに戻される。本研究においては観測点 1 と観測点 2 の相関値を求め、偏波回転によって同期はずれが起きるかを検討した。

5.2 前提条件

1 フレーム長が M 系列+データ (256 シンボル) とし、そのフレームを 1 回のシミュレーションで 100 フレーム送る。フレーム構成のイメージ図を図 9 に示す。次に変化させるパラメータを表 1 に示す。

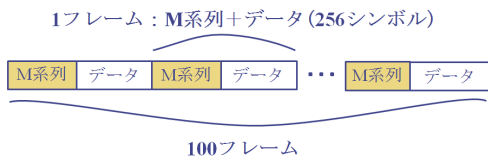


図 9 フレーム構成

表 1 変化させるパラメータ

閾値	未知
M 系列	2 から 8 次
偏波回転角度	0 から $\pi/2$

本研究では変化させるパラメータを閾値、M 系列、偏

波回転の角度の順に一つずつ求めていき、回転補償を行わなくて良い角度を検討した。また、今回のシミュレーションはデータを 256 シンボルと設定したため、M 系列はデータのシンボル数よりも短くなるように 225 シンボルである 8 次までを対象とした。

6 シミュレーション結果

偏波回転補償を行わなくて良い角度を調べる為に、閾値、M 系列、偏波回転の角度の順にシミュレーションを行った結果を順に述べる。

6.1 閾値の設定

M 系列の次数を適当に 2 次から 8 次の間 5 次に設定した、閾値をまず 6 に設定し偏波回転の角度を 0 から開始した。まずシミュレーションを 1000 フレーム行い同期はずれを起こさなければ次の角度へ、同期はずれを起こした場合、その角度で一番低い相関値の半分の値を閾値に設定する。再度新たに設定した閾値でシミュレーションし同期はずれを起こさなければ角度を大きくし、同期はずれを起こした場合その角度で作業を終了した。シミュレーション結果の例として閾値 3、偏波回転の角度 $\pi/6$ の図を図 10 に、全体のシミュレーション結果を図 11 に示す。

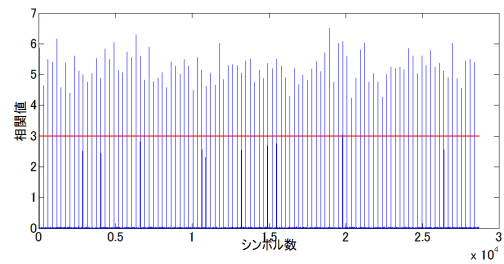


図 10 閾値 3、偏波回転の角度 $\pi/6$ の結果

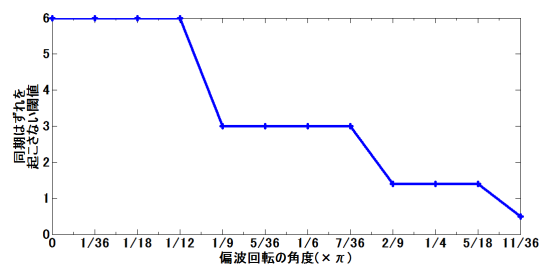


図 11 同期はずれを起こさない閾値の設定

結果 $\pi/3$ の時、閾値 0.5 で同期はずれを起こしたため閾値を 0.1 に変えシミュレーションを再度行ったが同期はずれを起こしたため閾値 0.5 が最適である。

6.2 M 系列の設定

閾値をさきほど設定した 0.5、角度を $\pi/3$ に設定し M 系列の最適次数を求めた。各次数 3000 フレーム、シミュレーションを行った結果、4 次が一番同期はずれを起こさず最適であった。その結果を図 12 に示す。

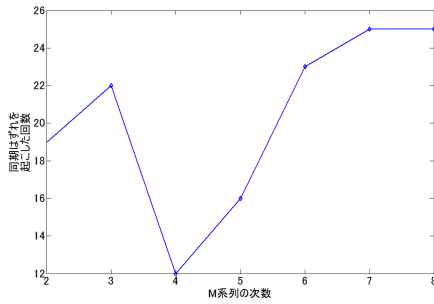


図 12 同期はずれを起こさない M 系列の設定

6.3 偏波回転の角度

閾値を 0.5, M 系列を 4 次に設定し $\pi/3$ から $\pi/180$ ずつ角度を小さくしていき同期はずれを起こさなくなるまでシミュレーションを行った。各角度 90000 フレームシミュレーションを行った。その結果を図 13 に示す。図 13 より $3\pi/10$ で同期はずれを起こさなくなり、 $3\pi/10$ より小さい角度であれば回転補償を行わなくて良い事が分かった。

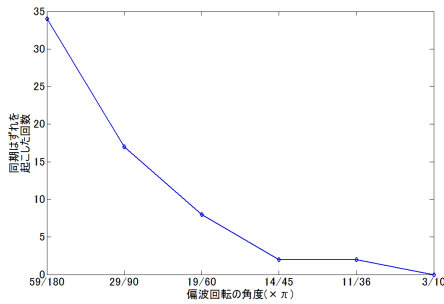


図 13 偏波回転の角度のシミュレーション結果

7 考察

本研究では、閾値の値と M 系列の次数の 2 つについて考えた。

まず、閾値の値についてだが、閾値 0.5 という値は図 11 にあるように、角度と閾値を少しずつ変更しながらシミュレーションを行い定めたものである。閾値は、まず 1 フレームの先頭シンボルの相関値を 100 フレーム分比較して最小値を取り出し、その半分を仮の閾値として設定した。次に角度を $1/36\pi$ 大きくして、その閾値で 1000 フレーム中 1 シンボルも同期はずれを起こさないか調べた。同期はずれを起こさないなら、また角度を $1/36\pi$ 大きくするが、起こした場合、その角度での仮の閾値を上記同様に設定し直す。これを繰り返すことにより本研究における最適閾値を求めた。最小相関値の半分を仮閾値としたのは、閾値を最小相関値に近い値で定めた場合、1 フレームの先頭シンボルの相関値が乱れ様々な値をとると閾値を下回りやすく、閾値を過小にした場合、1 フレームの先頭シンボル以外で相関値が閾値を上回り同期はずれを起こしやすくなると思ったためである。

次に M 系列の次数についてである。図 12 にあるように M 系列が 2 次から 8 次の時、どの次数でも同期はずれを起こしたシンボル数に大差がなかったが、本研究では、誤りシンボル数が最も少ない 4 次の M 系列を利用すると決めた。4 次であれば、シンボル数が短くスピードが求められる通信に適切である。9 次以上の M 系列は、シミュレーション対象外として実行していないが、シンボル数が急激に増加し通信が低速化するため、必要ないと考えた。

以上のように閾値と M 系列の次数を定め、0 から $1/4\pi$ の範囲内で同期はずれを起こさない偏波回転の角度を導いた。

本研究では、偏波回転角が $1/4\pi$ から $1/2\pi$ までもシミュレーションを行い、 $1/4\pi$ から $13/18\pi$, $7/9\pi$ から $1/2\pi$ の時はある程度同期をとることができたが、 $13/18\pi$ から $7/9\pi$ の時、相関値が全体的に異常に高くなり同期はずれを頻繁に起こしてしまったため、データを採ることができなかった。ゆえに、今後の課題として、偏波回転角が $13/18\pi$ から $7/9\pi$ の時全体的に相関値が高くなる原因を解明し、 $1/4\pi$ 以上の偏波回転角であってもタイミング検出を行えるプログラムに改善する必要がある。

8 おわりに

ガードインターバルの相関値を用いてタイミング検出を行う方式を適用し、偏波回転の角度がどの程度までであれば補正を行う必要がないかを導いた。ガードインターバル部分には、通常データの最後尾をコピーしたものを利用するが、本研究は M 系列をガードインターバルとして利用しタイミング検出を行い、各フレームの先頭以外で相関値が判定値を上回った場合と、各フレームの先頭で相関値が判定値を下回った場合を同期はずれが起きたとしてカウントした。このシミュレーションによって初めに閾値を求め、次に M 系列は何次が最適か求め、最後に角度を求めた。結果は、4 次の M 系列が最も性能が良く、 $\pi/3$ までであれば 90000 フレーム中 1 フレームも同期はずれを起こすことがなかった。ゆえに、偏波回転の角度が $\pi/3$ までであれば補正を行う必要がなく、OFDMA-PON を利用できると考えた。

参考文献

- [1] 岡田真人, “適応フィルタを用いた OFDMA-PON における偏波回転補償の研究,” 南山大学大学院数理工学情報研究科 2013 年度修士論文, Jan. 2014.
- [2] Dayou Qian and Neda Cvijetic, “108Gb/s OFDMA-PON With Polarization Multiplexing and Direct Detection,” IEEE J. Lightw. Technol., pp.484-493, Vol.28, No.4, Feb. 2010.
- [3] 神谷幸宏, “MATLAB によるデジタル無線通信技術,” コロナ社, Dec. 2008.
- [4] 宮坂浩平, 長橋崇晴, 野上昌雄, 多田俊一, 大田健紘, 松江英明, “連続 OFDM 信号におけるタイミング検出方式の検討,” 信学技報, RCS2012- 36, pp.85- 90, May. 2012.