

OptSim・MATLAB連携を用いた次世代PONの誤り率特性に関する研究

M2014SC018 大脇康平

指導教員：奥村康行

1 はじめに

近年、FTTHサービスの普及や急増する無線トラフィックのバックボーン回線としての活用が期待されていることから光アクセスネットワークが注目されている。現在、通信事業者は光アクセスネットワークに光分岐技術であるPON(passive optical network)を用いてインターネットなど様々なサービスを提供している。将来の光アクセスネットワークには、更なる高速・大容量化とともに柔軟性や収容サービスの多様化など、拡がりを持ったシステムが求められている[1]。そこで、デジタルソフトウェアPONを用いて既存の光ブロードバンドサービスに新しいシステムを追加する研究が行われている[2][3]。この時、コストがかかる波長多重方式を用いず、1本の光ファイバに1つの波長だけでOOK(on-off keying)信号とPSK(phase-shift keying)信号を共存させる。しかし、消光比が大きい時には共存するPSK信号のBER(bit error rate)特性が劣化してしまうという課題がある。そのため、本研究ではOOK信号にsignal shapingという技術を用いて、OFF状態の確率を低減することにより、共存させた信号のBER特性を改善する方法の提案がされている[4]。先行研究では、BER対SNRで特性の評価を行っており、光ファイバ伝送路の特性を考慮していない。本研究では、OptSim・MATLAB連携シミュレーションにより、光通信システム的设计・解析を行う。光ファイバで伝送を行い、OOK信号と共存するPSK信号、またはQAM信号の特性をBER対受信電力で評価する。

2 デジタルソフトウェアPONシステム

PONシステムは、事業者側に設置されるOLT(optical line terminal)と加入者側に設置されるONU(optical network unit)及び、光ファイバとパワースプリッタで構成される。光ファイバをパワースプリッタで分岐させることで、OLTを複数のONUと接続することができるため経済的なネットワークを実現できる。そこで先行研究[3]では、デジタルソフトウェアPONを用いたOOK信号とPSK信号の共存方法が提案されている。図1にデジタルソフトウェアPONシステムの構成を示す。デジタルソフトウェアPONでは、OLTとONUにそれぞれデジタル信号処理部を持っているため、ONUを交換せずに変調方式や多重化技術を変更することができる。従来のPONシステムではOOK信号を使用しているため、高い消光比が必要となるが、その際共存するPSK信号のBER特性が劣化してしまう課題がある。そこで本研究ではsignal shapingを用いて、BER特性を改善する。

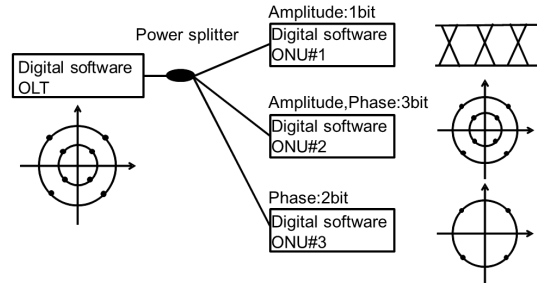
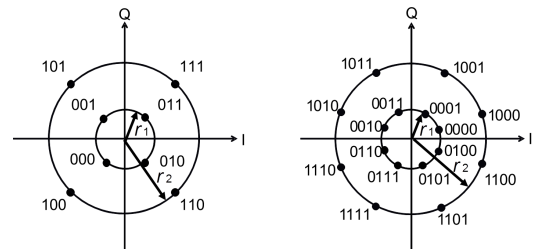


図1 デジタルソフトウェアPONシステムの構成 [3]



(a)OOKとQPSKの共存 (b)OOKと8PSKの共存

図2 OOK信号とPSK信号の共存

3 信号の共存方法

OOK信号とPSK信号、またはQAM信号の共存方法を述べる。

3.1 OOK信号とPSK信号の共存方法

OOK信号とQPSK信号を共存させるとき、OOK信号1ビットとPSK信号2ビットを合わせて3ビット1シンボルとして送る。このときのコンスタレーションを図2(a)に示す。また、OOK信号と8PSK信号を共存させるときは、OOK信号1ビットとPSK信号3ビットを合わせて4ビット1シンボルとして送る。このときのコンスタレーションを図2(b)に示す。MSBはOOK信号とする。また、消光比 ϵ [dB]は(1)式のように表される。

$$\epsilon = 10 \log_{10} \frac{r_2^2}{r_1^2} \quad (1)$$

3.2 OOK信号とQAM信号の共存方法

OOK信号とQAM信号を共存させるとき、OOK信号1ビットとQAM信号3ビットを1シンボルとして送る。このときのコンスタレーションを図3に示す。また、消光比 ϵ [dB]は(2)式のように表される。 R_i^2 は図3の内側のシンボルの平均の距離であり(3)式のように表され、 R_o^2 は図3の外側のシンボルの平均の距離であり(4)式のように表される。

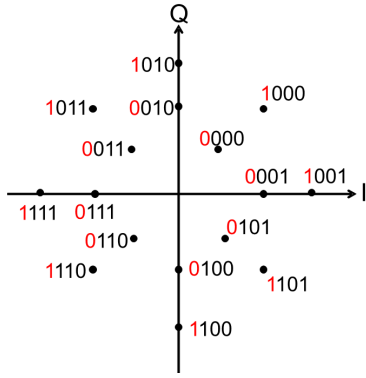


図3 OOK と QAM の共存方法 [5]

$$\varepsilon = 10 \log_{10} \frac{R_o^2}{R_i^2} \quad (2)$$

$$R_i^2 = \frac{r_1^2 + r_2^2}{2} \quad (3)$$

$$R_o^2 = \frac{r_3^2 + r_4^2}{2} \quad (4)$$

4 signal shaping

signal shaping は性能を犠牲にすることなく最小平均電力で信号を生成する技術である [6][7]. signal shaping の構成を図4に示す. 図4(a)の s は signal shaping を行うビットであり, OOK 信号とする. また, 図4(a)の b は signal shaping を行わないビットであり, PSK 信号とする.

4.1 畳込み符号の適用

畳込み符号を用いて signal shaping を行う方法を以下に述べる [6][8]. 本研究では, 符号化率 $\frac{1}{2}$, 拘束長3の畳込み符号器を用いる. G は畳込み符号の生成行列であり (5) 式とする. H^T はそれに対応するシンドロームであり (6) 式とする. この時, G と H^T には (8) 式の関係がある. s に $(H^{-1})^T$ をかけて z を生成する. このとき, $(H^{-1})^T$ は (7) 式となる. r を用いて, 符号語 y を生成する. この時, ハミング重みが最大のものを選ぶようにする.

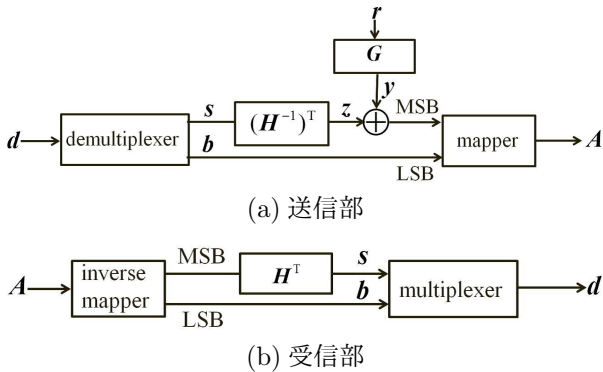


図4 signal shaping の構成 [9]

$$G = [1 + D^2 \quad 1 + D + D^2] \quad (5)$$

$$H^T = [1 + D + D^2 \quad 1 + D^2]^T \quad (6)$$

$$(H^{-1})^T = [D \quad 1 + D] \quad (7)$$

$$GH^T = 0 \quad (8)$$

そして, z と y を用いて排他的論理和で加算する. 受信側では z に H^T を掛けることで元の情報 s を受信できる. $z \oplus y$ を一列に並べ OOK 信号とする. OOK 信号1ビットと PSK 信号または QAM 信号を合わせて送信する.

4.2 7-4 ハミング符号の適用

7-4 ハミング符号を用いて signal shaping を行う方法を以下に述べる.

図4の G は生成行列であり, H はパリティ検査行列である. 生成行列 G は (9) 式, パリティ検査行列 H は (10) 式, $(H^{-1})^T$ は (11) 式とする [7].

s として OOK 信号のデータを3ビットずつに区切り, $(H^{-1})^T$ を掛けて, 7ビットに変換する. 次に r として4ビット用意し, G を用いて y を生成する. y は16通りあり, $z \oplus y$ のハミング重みが最大になるように y を選択する. その後, $z \oplus y$ を1列に並べ, PSK 信号または QAM 信号を合わせて送信する.

$$G = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (9)$$

$$H = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 1 & 1 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} \quad (10)$$

$$(H^{-1})^T = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (11)$$

5 OptSim・MATLAB連携シミュレーション

OptSim と MATLAB ソフトウェアを用いてシミュレーションを行う. それぞれ, OptSim は光部品, ファイバ, ミキサ, 変調器等のアナログ部品の処理を行い, MATLAB は signal shaping の適応, 重畳等のデジタル処理を行う. これらの連携シミュレーションにより, BER 特性の改善方法を検討する. 一例として, AM-PM 信号 (OOK 信号+QPSK 信号) を用いたときのシミュレーション構成について説明を行う.

表 1 シミュレーション条件

データ変調方式	AM_PM(OOK+QPSK) AM_PM(OOK+8PSK) 16QAM(OOK+QAM)
シンボル数	2.5×10^4
ファイバ長 [km]	1
送信電力 [dBm]	-3
消光比 ϵ [dB]	20
畳込み符号の 伝送効率	0.75(OOK+QPSK) 0.8(OOK+8PSK) 0.8(OOK+QAM)
7-4 ハミング符号の 伝送効率	0.69(OOK+QPSK) 0.75(OOK+8PSK) 0.75(OOK+QAM)

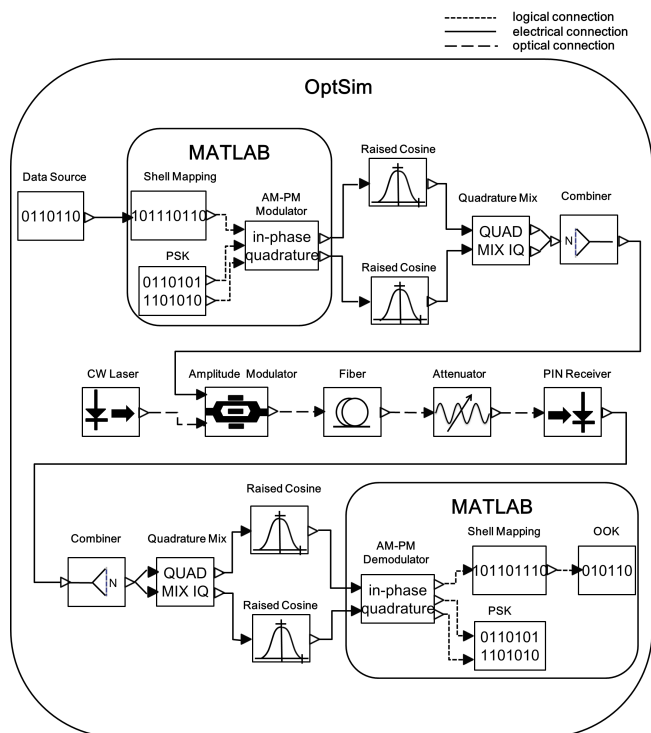


図 5 シミュレーション構成

シミュレーションの構成図を図5に、シミュレーション条件を表1に示す。10 G symbol/sでOOK信号を生成し、MATLABライブラリでOOK信号にsignal shapingを行いPSK信号と共存させたAM_PM信号を出力させる。送信側と受信側に2組のレイズドコサインフィルタを用いて帯域制限を行うことで符号間干渉を防ぐ。AM_PM信号の位相と振幅情報を送るため、直交ミキサを用いて中心周波数10GHzの搬送波で乗算する。振幅変調器で電気信号を光信号に変換し、光ファイバによって1km伝送させる。伝送後に光減衰器を設置し、減衰レベルを調整することで受信機に入る信号レベルの調節を行う。PINフォトダイオードで光信号から電気信号に変換され受信部へ送られる。送信側で用いた搬送波を受信信号に乗算し、高周波をカットすることでAM_PM信号を取り出す。受信したAM_PM信号は、MATLABライブラリによってOOK信号とPSK信号に復調される。光減衰器で受信電力を減衰させ、BER対受信電力で特性の評価を行う。

6 シミュレーション結果

シミュレーション結果と考察について述べる。

6.1 畳込み符号を用いたときの結果

畳込み符号を用いたときの結果を図6に示す。図6(a)より、QPSK信号のBERが 10^{-2} の時、受信電力が約2.3dB改善され、 10^{-3} の時、受信電力が約0.9dB改善されている。図6(b)より、8PSK信号のBERが 10^{-2} の時、受信電力が約2.5dB改善され、 10^{-3} の時、受信電力が約1.0dB改善されている。図6(c)より、QAM信号のBERが 10^{-2} の時、受信電力が約2.5dB改善され、 10^{-3} の時、受信電力が約1.0dB改善されている。

6.2 7-4 ハミング符号を用いたときの結果

7-4 ハミング符号を用いたときの結果を図7に示す。図7(a)より、QPSK信号のBERが 10^{-2} の時、受信電力が約3.3dB改善され、 10^{-3} の時、受信電力が約1.7dB改善されている。図7(b)より、8PSK信号のBERが 10^{-2} の時、受信電力が約3.8dB改善され、 10^{-3} の時、受信電力が約1.7dB改善されている。図7(c)より、QAM信号のBERが 10^{-2} の時、受信電力が約3.5dB改善され、 10^{-3} の時、受信電力が約1.3dB改善されている。

6.3 シミュレーション結果のまとめ

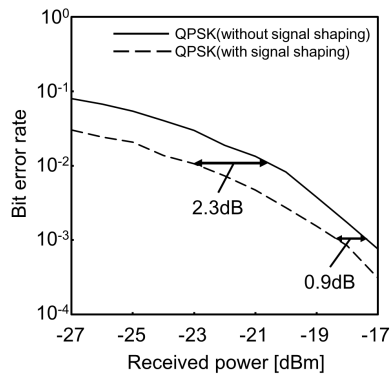
シミュレーション結果をまとめたものを表2に示す。表2より、OOK信号と共存させたPSK信号やQAM信号のBERは改善されているということが確認できる。畳込み符号と7-4ハミング符号を比較すると、伝送効率は7-4ハミング符号の方が低いですが、改善度合いは7-4ハミング符号の方が高い結果となった。これは7-4ハミング符号の方が伝送効率を犠牲にして多く外側のシンボルを使っているため改善度合いが高くなったと考えられる。

7 おわりに

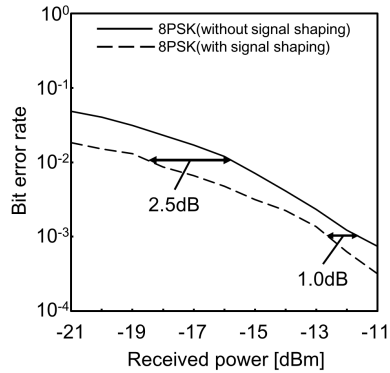
本研究では、消光比が大きい場合にOOK信号と共存させたPSK信号のBERが劣化してしまう課題をsignal shapingという技術を用いて改善する方法を検討した。OptSim・MATLAB連携シミュレーションにより、signal shapingを用いた光通信システムの設計、解析を行った。光通信システムの設計により、誤り率に対する受信機に必要な入力電力が分かった。シミュレーション結果より、signal shapingを用いることで、共存するPSK信号、またはQAM信号のBERが改善される結果を得た。

表 2 受信電力改善量のまとめ

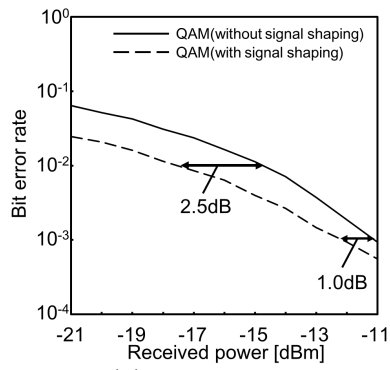
	符号化	伝送効率	BER 10^{-2}	BER 10^{-3}
OOK+QPSK	畳込み符号	0.75	2.3dB改善	0.9dB改善
	7-4ハミング符号	0.69	3.3dB改善	1.7dB改善
OOK+8PSK	畳込み符号	0.8	2.5dB改善	1.0dB改善
	7-4ハミング符号	0.75	3.8dB改善	1.7dB改善
OOK+QAM	畳込み符号	0.8	2.5dB改善	1.0dB改善
	7-4ハミング符号	0.75	3.5dB改善	1.3dB改善



(a)OOK+QPSK

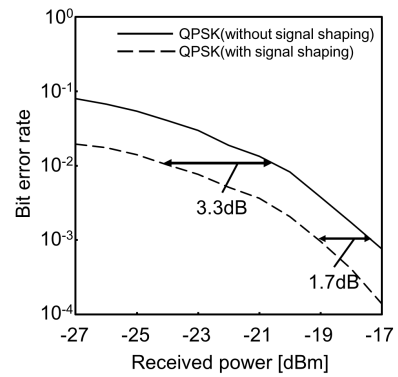


(b)OOK+8PSK

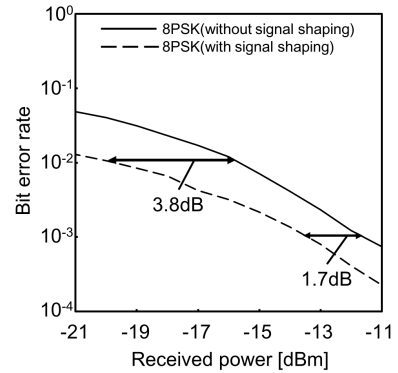


(b)OOK+8PSK

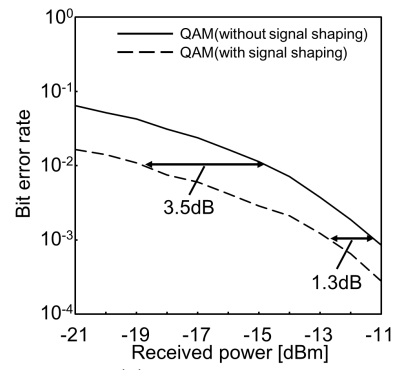
図 6 畳込み符号を用いたときの BER 特性



(a)OOK+QPSK



(b)OOK+8PSK



(c)OOK+QAM

図 7 7-4 ハミング符号を用いたときの BER 特性

参考文献

- [1] 西原真人, “[招待講演]ECOC2014 報告 -光アクセス関連-,” 信学技報, OCS2014-42, pp.5-8, Oct. 2014.
- [2] N. Yoshimoto, J. Kani, S. Y. Kim, N. Iiyama, and J. Terada, “DSP-Based Optical Access Approaches for Enhancing NG-PON2 Systems,” IEEE Commun. Magazine, Vol.51, pp.58-64, March 2013.
- [3] N. Iiyama, S. Y. Kim, T. Shimada, S. Kimura, and N. Yoshimoto, “Co-existent Downstream Scheme between OOK and QAM Signals in an Optical Access Network using Software-defined Technology,” IEEE/OSA Opt. Fiber Commun. Conf (OFC/NFOEC) 2012, OSA Technical Digest, paper JTh2A.53, 2012.
- [4] 加藤万貴, “QAM と OOK 信号の共存する光アクセス網の伝送特性改善法,” 南山大学大学院理工学研究科 2014 年度修士論文, 2015.
- [5] 雨宮正, 佐藤憲一, モデム設計・応用のための基礎理論, <http://www.catnet.ne.jp/triceps/cdr/sample/ex019.pdf> (accessed Jan. 2016).
- [6] G. D. Forney Jr., “Trellis Shaping,” IEEE Trans. Inform. Theory, Vol.38, pp.281-300, March 1992.
- [7] R. F. H. Fischer, Precoding and Signal Shaping for Digital Transmission, IEEE Press, 2002.
- [8] 北川裕之, 棚橋誠, 落合秀樹, “トレリスシェイピングを用いた PSK 信号のピーク電力低減法の FPGA 実装及び性能評価,” 信学技報, RCS2008-214, pp.13-18, March 2009.
- [9] H. Ochiai, “A Novel Trellis-Shaping Design With Both Peak and Average Power Reduction for OFDM Systems,” IEEE Trans. Commun., Vol. 52, pp.1916-1926, Nov. 2004.