

# QAMとOOK信号の共存する光アクセス網の伝送特性改善法

M2013SC007 加藤万貴

指導教員：奥村康行

## 1 はじめに

現在、インターネットなど様々なサービスを提供する光アクセスネットワークにPON(passive optical network)が用いられている。近年、光アクセスネットワークを用いたサービスの普及や急増する無線トラフィックを収容するため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おり、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できるサービスの多様化など広がりを持ったシステムが求められている [1]。そこで現在、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]。このとき、高価な波長多重方式を用いず、1つの波長だけでOOK(on-off keying)信号とPSK(phase-shift keying)信号やQAM(quadrature amplitude modulation)信号を共存させる。しかし、OOK信号がOFF状態(消光比が大きい時)ではPSK信号やQAM信号の誤りが増大してしまうという課題がある。そのため、本研究ではこの課題の解決策として signal shaping という技術を用いてOOK信号を作成し、OOK信号が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(bit error rate)特性を改善する方法を検討する。

## 2 デジタルソフトウェアPONシステムの構成

従来のPONシステムのアクセス系のネットワーク構成を図1に示す。OLT(optical line terminal)とは光加入者線終端装置で通信局内に置かれ、ONU(optical network unit)とは光加入者線ネットワーク装置で各家庭内に置かれる。PONシステムでは、図1のように一本の光ファイバをパワースプリッタを用いて分岐し、複数の加入者で共有するため経済的なネットワークを実現できる。従来のPONシステムではOOK信号だけを使用しているため、通信品質を確保するために高い消光比が必要となる。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。先行研究 [3] では、OOK信号とPSK信号を共存させる原理を確認しているがBERの確認はされていない。デジタルソフトウェアPONの構成を図2に示す。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、変調方式や多

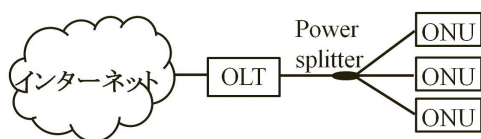


図1 従来のPONシステムの構成

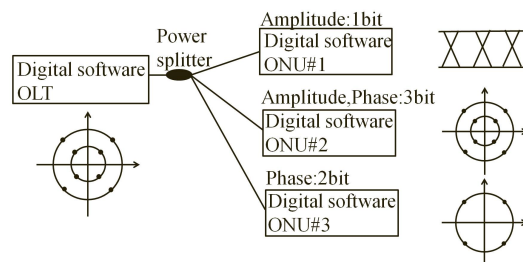


図2 デジタルソフトウェアPONシステムの構成 [3]

重化技術を変更することができる。図2のようなデジタルソフトウェアPONを用いることでOOK信号に対してPSK信号を重畳することができる。この時、従来のPONシステムのONUを交換せずに使うことができる。

従来のPONシステムでは、通信品質を確保するために消光比を大きくする必要はあるが、デジタルソフトウェアPONを用いた場合消光比を大きくすると、コンスタレーションより、共存させたPSK信号やQAM信号のBERが悪くなると考えられる。そのため、本研究では消光比が大きい場合のPSK信号やQAM信号のBERをsignal shapingという技術を用いて改善する。

## 3 OOK信号との共存方法

OOK信号とPSK信号の共存方法とOOK信号とQAM信号の共存方法について説明する。

### 3.1 OOK信号とPSK信号の共存方法

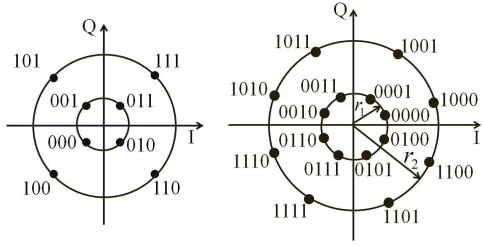
OOK信号とQPSK信号を共存させる場合、OOK信号1ビットとPSK信号2ビットを合わせて3ビットの信号とする。この時のコンスタレーションを図3(a)とする。また、OOK信号と8PSK信号を共存させる場合、OOK信号1ビットとPSK信号3ビットを合わせて4ビットの信号とする。この時のコンスタレーションを図3(b)とする。図3の各シンボルを表すビットの内、最上位ビットはOOK信号とする。例えば、最上位ビットが0なら内側の円とし、1なら外側の円とする。残りのビットはPSK信号であり、図3(a)ならそれぞれ4つの位相を表し、図3(b)ならそれぞれ8つの位相を表す。

### 3.2 OOK信号とQAM信号の共存方法

OOK信号とQAM信号を共存させる場合のコンスタレーションを図4とする。図4の各シンボルを表すビットの内、最上位ビットをOOK信号とする。例えば、最上位ビットが0なら内側のシンボルとし、1なら外側のシンボルとする。

## 4 誤り訂正符号を用いた signal shaping

signal shaping はBERを増大させることなく少ない平均信号電力の信号を生成する技術である [5][6]。誤り訂正



(a)OOK と QPSK の共存 (b)OOK と 8PSK の共存

図 3 OOK 信号と PSK 信号の共存

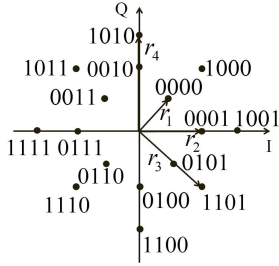


図 4 OOK 信号と QAM 信号の共存 [4]

符号を用いた汎用的な構成法を用いて signal shaping を行う方法を以下に述べる [5][7]. 図 5 に signal shaping の構成を示す. 図 5 の  $G$  は生成行列であり,  $H$  はパリティ検査行列である. この時,  $G$  と  $H$  には (1) 式の関係が成り立つ.

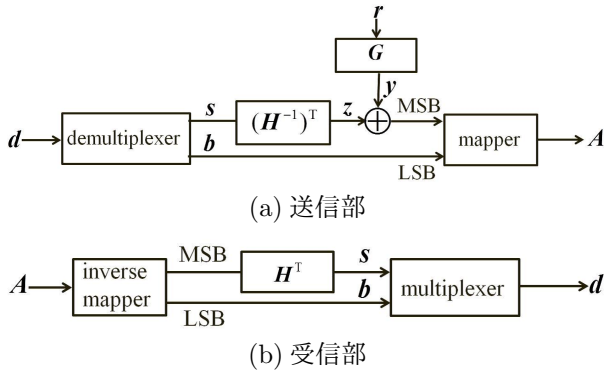


図 5 signal shaping の構成 [8]

$$GH^T = 0 \quad (1)$$

図 5(a) の  $s$  は signal shaping を行うビットであり, 本研究では OOK 信号とする. また, 図 5(a) の  $b$  は signal shpaing を行わないビットであり, 本研究では PSK 信号または QAM 信号とする.  $s$  を  $(H^{-1})^T$  を用いて符号化し,  $z$  を生成する. そして,  $z \oplus y$  のハミング重みが最大になるように  $y$  を選ぶ. このとき  $\oplus$  は排他的論理和である. その後,  $z \oplus y$  と  $b$  を合わせて送信する. 図 5(b) の受信側では  $z \oplus y$  に  $H^T$  をかけることで元の  $s$  に戻すことができる.

本研究では, 畳み込み符号と 7-4 ハミング符号を用いて signal shaping を行った. 畳み込み符号を用いた場合を 4.1 節, 7-4 ハミング符号を用いた場合を 4.2 節に示す. どちらの方法でも signal shaping は OOK 信号のみに施す.

#### 4.1 畳み込み符号を用いた signal shaping

畳み込み符号を用いて signal shaping を行い OOK 信号を作成する時の構成を図 5 を用いて説明する. 本研究では, 符号化率  $\frac{1}{2}$ , 拘束長 3 の畳み込み符号器を用いる. 生成行列  $G$  は (2) 式とする. また, パリティ検査行列  $H^T$  は (3) 式とし,  $(H^{-1})^T$  は (4) 式とする [5][7]. (2)~(4) 式の  $D$  は遅延要素である. この時,  $G$  と  $H^T$  には (5) 式の関係が成り立つ.

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

$$H^T = [1 + D + D^2 \quad 1 + D^2]^T \quad (3)$$

$$(H^{-1})^T = [D \quad 1 + D] \quad (4)$$

$$GH^T = 0 \quad (5)$$

$s$  として 4 ビットごとにデータを区切り,  $(H^{-1})^T$  を用いて符号化する. その後,  $z \oplus y$  のハミング重みが最大になるように  $y$  を選ぶ. 作成された  $z \oplus y$  を一ビットずつ切り出して OOK 信号とし, 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 ハミング符号を用いた signal shaping

7-4 ハミング符号を用いて signal shaping を行い, OOK 信号を作成するための構成を図 5 を用いて説明する. この時, 生成行列  $G$  は (6) 式とする. また, パリティ検査行列  $H$  は (7) 式とし,  $(H^{-1})^T$  は (8) 式とする [6].

$$G = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (6)$$

$$H = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 1 & 1 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} \quad (7)$$

$$(H^{-1})^T = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (8)$$

$s$  として元の OOK 信号のデータを 3 ビットずつに区切り, (8) 式の  $(H^{-1})^T$  を用いて符号化する. この時  $z$  は 7 ビットとなる. 次に  $r$  として 4 ビット用意し, (6) 式の  $G$  を用いて  $y$  を生成する.  $y$  は 16 通りあり, その中から  $z \oplus y$  のハミング重みが最大になるように選ぶ. この時,  $\oplus$  は排他的論理和である. その後, 作成された  $z \oplus y$  を一ビットずつ切り出して OOK 信号とし, 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. このように 7-4 ハミング符号を用いて OOK 信号を作成することで, 1 の出る確率が 0.5 から 0.875 となる. また, 外側のシンボルを内側のシンボルより約 7 倍多く使うことができるようになる. 7-4 ハミング符号を用いて signal shaping を行うことにより元のデータ 3 ビットを 7 ビットにするため伝送効率は低くなるが, 外側のシンボルを使う確率が 0.5 から 0.875 と高くなる.

表 1 シミュレーション条件

データ変調方式	AM-PM(OOK+PSK のとき) QAM(OOK+QAM のとき)
シンボル数	$6 \times 10^5$ (畳み込み符号) $7 \times 10^5$ (7-4 ハミング符号)
伝送路への雑音	AWGN
波形整形フィルタ	root raised cosine (roll-off factor 0.5)
消光比 $\epsilon$ [dB]	20
畳み込み符号の 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)

## 5 シミュレーション

シミュレーション条件やシミュレーション結果について説明する。

### 5.1 シミュレーション条件

シミュレーション条件を以下に示す。4.1 節と 4.2 節の 2 通りの方法でシミュレーションを行う。シミュレーション条件を表 1 に示す。シミュレーションでは伝送路への雑音として、雑音に対する余裕度を評価できる AWGN を用いる。OOK 信号と PSK 信号を共存させた場合の消光比  $\epsilon$  は (9) 式のように表される。この時、 $r_1$  は図 3(b) の内側の円の半径であり、 $r_2$  は図 3(b) の外側の円の半径である。

$$\epsilon[\text{dB}] = 10 \log_{10} \frac{r_2^2}{r_1^2} \quad (9)$$

また、OOK 信号と QAM 信号を共存させた場合の消光比  $\epsilon$  は (10) 式のように表される。この時、 $R_i^2$  は図 4 の内側のシンボルの平均の距離であり (11) 式のように表され、 $R_o^2$  は図 4 の外側のシンボルの平均の距離であり (12) 式のように表される。

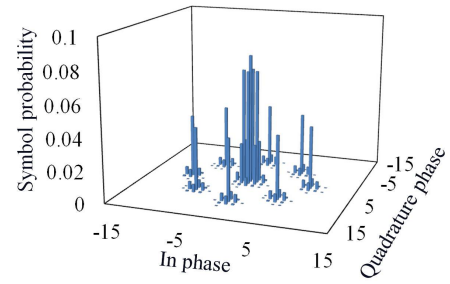
$$\epsilon[\text{dB}] = 10 \log_{10} \frac{R_o^2}{R_i^2} \quad (10)$$

$$R_i^2 = \frac{r_1^2 + r_2^2}{2} \quad (11)$$

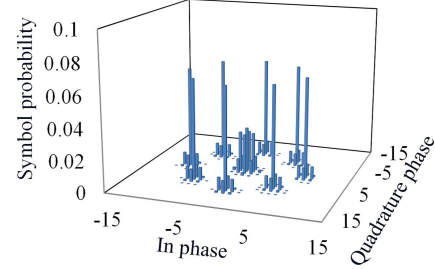
$$R_o^2 = \frac{r_3^2 + r_4^2}{2} \quad (12)$$

### 5.2 畳み込み符号を用いた場合の結果

畳み込み符号を用いてシミュレーションを行った結果を示す。始めに、OOK+QAM の時の各シンボルの生起確率を図 6 に示す。これは  $E_b/N_0 = 18\text{dB}$  のときの結果である。図 6 より、signal shaping を用いることで外側のシンボルの生起確率が高くなっていることが確認できる。OOK+QPSK と OOK+8PSK の場合でも signal shaping



(a) signal shaping 無



(b) signal shaping 有

図 6 OOK+QAM のときの各シンボルの生起確率

を用いることで外側のシンボルの生起確率が高くなっていることが確認できた。次に BER を比較した結果を図 7 に示す。図 7(a), (b) は OOK+8PSK, 図 7(c), (d) は OOK+QAM の結果である。signal shaping を用いることにより、図 7(a) より、PSK 信号の BER が  $10^{-2}$  の時、 $E_b/N_0$  が約 2.6dB 改善され、図 7(c) より、QAM 信号の BER が  $10^{-2}$  の時、 $E_b/N_0$  が約 2.4dB 改善されている。しかし、signal shaping を用いることにより、OOK 信号の BER は図 7(b), (d) より BER が  $10^{-2}$  の時、 $E_b/N_0$  が約 1.0dB 劣化している。

### 5.3 7-4 ハミング符号を用いた場合の結果

7-4 ハミング符号を用いてシミュレーションを行った結果を示す。7-4 ハミング符号を用いて signal shaping を行ったときも signal shaping を用いることで外側のシンボルの生起確率が高くなっていることが確認できた。次に BER を比較した結果を図 8 に示す。図 8(a), (b) は OOK+8PSK, 図 8(c), (d) は OOK+QAM の結果である。signal shaping を用いることにより、図 8(a) より、PSK 信号の BER が  $10^{-2}$  の時、 $E_b/N_0$  が約 4.1dB 改善され、図 8(c) より、QAM 信号の BER が  $10^{-2}$  の時、 $E_b/N_0$  が約 3.6dB 改善されている。しかし、signal shaping を用いることにより、OOK 信号の BER は図 8(b), (d) より、BER が  $10^{-2}$  の時、 $E_b/N_0$  が約 1.0dB 劣化している。

### 5.4 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。畳み込み符号を用いた場合は最大で、OOK 信号と共存させた信号の BER が  $10^{-2}$  の時、 $E_b/N_0$  が約 2.6dB 改善された。また、7-4 ハミング符号を用いた場合は最大で、OOK



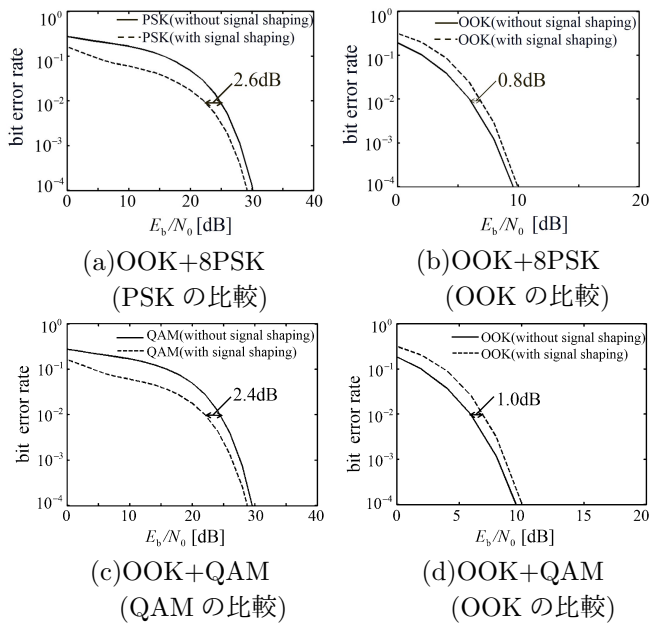


図 7 畳み込み符号を用いたときの BER 特性

信号と共存させた信号の BER が  $10^{-2}$  の時、 $E_b/N_0$  が約 4.1dB 改善された。畳み込み符号と 7-4 ハミング符号を比較すると 7-4 ハミング符号を用いた場合の方が BER が改善されているが、伝送効率は 7-4 ハミング符号の方が低くなっている。そのため、7-4 ハミング符号は伝送効率を犠牲にして、BER を改善していると考えられる。これより、伝送効率が低いと改善度合いが高くなるといえる。また、畳み込み符号を用いた場合も、7-4 ハミング符号を用いた場合も OOK 信号の BER は  $10^{-2}$  の時、 $E_b/N_0$  が約 1.0dB 劣化した。signal shaping を用いることで畳み込み符号の場合では、元のデータ 4 ビットを 8 ビットに拡張し、7-4 ハミング符号の場合では、元のデータ 3 ビットを 7 ビットに拡張するため、1 つでも誤ると元のデータに復調できないため BER が劣化したのだと考えられる。

表 2 シミュレーション結果のまとめ

	符号化方法	伝送効率	OOK の BER	PSK の BER
OOK+QPSK	畳み込み符号	0.75	0.9dB 劣化	2.2dB 改善
	7-4 ハミング符号	0.69	0.8dB 劣化	3.4dB 改善
OOK+8PSK	畳み込み符号	0.8	0.8dB 劣化	2.6dB 改善
	7-4 ハミング符号	0.75	0.8dB 劣化	4.1dB 改善
OOK+QAM	畳み込み符号	0.8	1.0dB 劣化	2.4dB 改善
	7-4 ハミング符号	0.75	1.0dB 劣化	3.6dB 改善

## 6 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 信号や QAM 信号の BER が悪くなるという課題を signal shaping という技術を用いて改善する方法を検討した。具体的には、畳み込み符号や 7-4 ハミング符号を用いて signal shaping を行い OOK 信号を作成し、OOK 信号が OFF 状態の確率が低減するような signal shaping を適用した。シミュレーションの結果より、signal shaping を用いることにより、共存させた信号の BER が改善されるという結果が得られた。

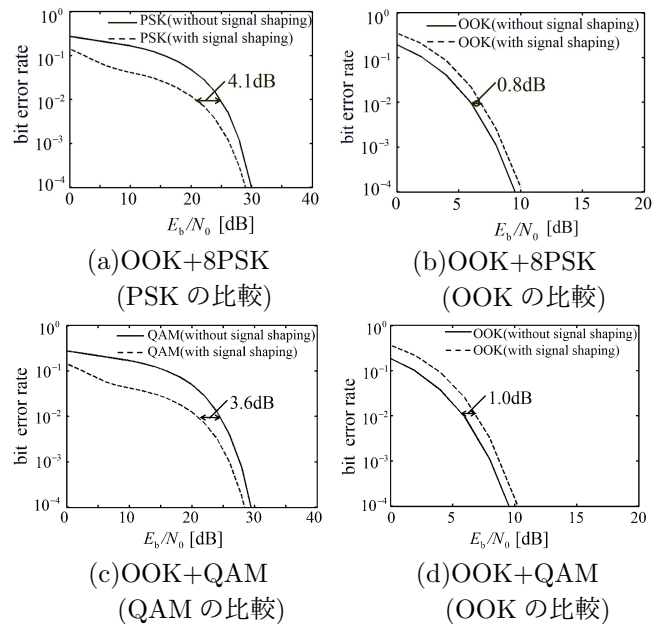


図 8 7-4 ハミング符号を用いたときの BER 特性

## 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] 兩宮正, 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. 2015).
- [5] G. D. Forney Jr., “Trellis Shaping,” IEEE Trans. Inform. Theory, Vol. 38, pp. 281-300, March 1992.
- [6] R. F. H. Fischer, Precoding and Signal Shaping for Digital Transmission, IEEE Press, 2002.
- [7] 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.
- [8] 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.