

光アクセスネットワークにおける OOK と位相変調の重畳手法に関する研究

M2018SC007 小川翔輝

指導教員：奥村康行

1 はじめに

現在の通信ネットワークを支える技術として、光ファイバーを用いて通信を行う光アクセスネットワークが広く普及している。光アクセスネットワークは図1のようなPON(Passive Optical Network)を用いることで経済的に利用されており、今日ではGE(Gigabit Ethernet)-PONやG(Gigabit)-PONなどを用いたネットワークサービスが提供されている。将来的に第5世代通信システム(5G)の提供開始や最大10Gbpsを有する10G-EPONやXG(10Gigabit Capable)-PONなども普及しつつあるなか、通信量の更なる増加が予想される[1]。

更なる高速通信を実現するためには既存の光バンド伝送方式であるOOK(On-Off Keying)を用いる方式では課題が生じる。そのため、光ファイバ無線のようなRF(Radio Frequency)信号をIM/DD(Intensity Modulation/Direct Detection)を用いて光に変換して通信を行う方式にて大容量通信を実現させる研究が多数報告されている。しかし、将来RF信号を用いたデジタル信号を利用した光通信を普及させるにあたり、現在使用しているOOK方式を用いた通信方式から移行させるために基地局やユーザー宅に設置してある機器の交換が必要になり多額の設備投資が必要になる。そのため、先行研究[2][3][4]では既存のOOK方式を用いた通信方式とRF信号を用いた通信方式を共存させて同時に利用できる通信方式が報告されている。これらの研究は下り方面に対してのアプローチ方法を提案していた。本研究は上り方向に対してOOK信号と位相変調信号の新たな多重分離方式を提案し、評価を行う。

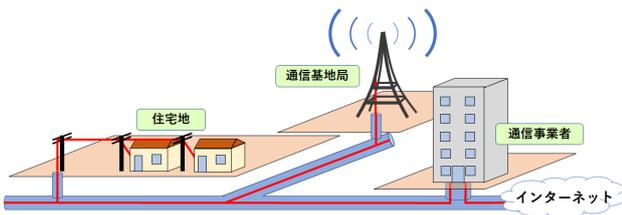


図1 PONの概要図

2 OOK信号と位相変調の重畳と課題

同一光アクセスネットワーク内においてOOK方式と位相変調方式を共存させて効率よく通信を行えるようにする研究が幾つか報告されているが、OLTからONUへの下り方向に関する研究のみにとどまっている。先行研究[2]で

は、図2(a)に示すようにOLT側で位相変調信号にOOK信号のOnとOffを割り当てることで両方の信号を表現していた。しかし、上り方面では図2(b)に示すようにONUがそれぞれ対応する伝送方式を送信すると光スプリッタにて重畳されてしまう。重畳された信号からOOK信号や位相変調信号をそれぞれ復調しても多くの誤りを含んだデータとなってしまふ。

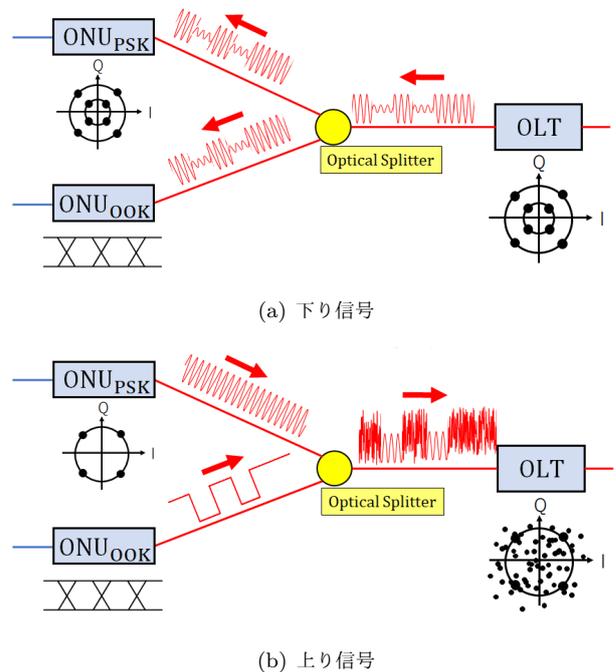


図2 OOKと位相変調の共存

3 OOK信号と位相変調信号の多重分離方式の提案

OOK信号と位相変調信号の重畳信号の特徴として、図3に示すようにOOK信号がON状態の場合はOOK信号と位相変調信号が重畳されるがOOK信号がOFF状態の場合はOOK信号側の光信号が出力されていないため位相変調信号のみとなり重畳されない。本研究ではこれらの特徴を用いてOOK信号と位相変調信号との重畳手法及び再現手法を提案する。但し、OOK信号には現在日本で広く普及している伝送規格として、GE-PON環境では8B/10B伝送符号を適用し、10G-EPON環境では64B/66B伝送符号を適用する[5]。

3.1 OOK 信号と位相変調信号の重畳手法

OOK 信号と PSK 信号の光信号強度比を OOK 信号が PSK 信号に対して ε [dB] 大きくなるようにして送信する [3]. これにより重畳信号は図 3 のように OOK 信号と断片的な位相変調信号 (OOK 信号が Off 状態のときの位相変調信号) の両信号を保持することができる. OOK データに関しては受信した重畳信号から光信号の強度 (On と Off) を判定することで OOK データを復調することができる. 本研究では, ε を先行研究より 20[dB] に設定する.

3.2 重畳信号から位相変調信号の再現手法

GE-PON, 10G-EPON の両環境にて, 1 シンボルあたりの位相変調信号の信号長を T_{ns} 出力する. このときの重畳信号を図 4(a) に示す. この重畳信号から OOK データを復調した後, OOK 信号の On 状態の部分を除く. 重畳された位相変調信号は重畳されていない位相変調信号に比べて波形歪が発生するため完全に切り捨てる. このときの断片的な位相変調信号を図 4(b) に示す [4]. 図 4(c) のように 1 シンボル T_{ns} の位相変調信号に対して $T_{\tau ns}$ ごとに T 分割し, 図 4(d) のように信号の先頭から位相変調信号を重ねていく. このとき, ① + ② のように重複した部分に関しては先頭の位相変調信号を優先して使用することで最適化を図る. これらの手順を図 4(e) のように最後の位相変調信号まで重ね合わせていく. 最終的に図 4(f) の ① + ②... + ⑩ のように位相変調信号が生成される. もとの位相変調信号の信号長は T_{ns} あるので, 生成された位相変調信号を T_{ns} 分まで複製することで重畳信号から位相変調信号を再現する. もし再現信号が完全に再現されず欠損が生じた場合, 図 4(g) のように再現信号から位相変調信号の周波数に対して 2π ずつずらして欠損部分を補完する. 10G-EPON 環境ではこれらの手順を経ても部分的に信号が欠損してしまう可能性がある. このとき, 位相変調信号の周波数に対して 2π の波長を窓とした移動平均をとることで欠損値を補完することで信号を再現する. 本来ならば GE-PON 環境の伝送速度は 1.25Gbps, 10G-EPON 環境の伝送速度は 10.3125Gbps であるが, 本研究では原理確認のため GE-PON 環境の伝送速度を 1Gbps, 10G-EPON 環境の伝送速度を 10Gbps に設定する. 本研究による PSK 信号の再現手法を適用したときの PSK 信号の再現率と PSK 信号のビットレートとのトレード・オフにより本研究では GE-PON 環境を基準にして両環境にて T_{ns} を 10ns に, $T_{\tau ns}$ を 1ns に設定する.

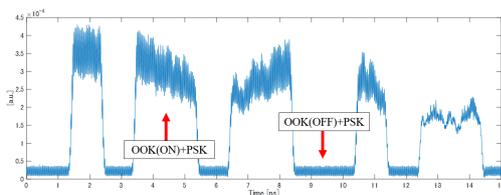
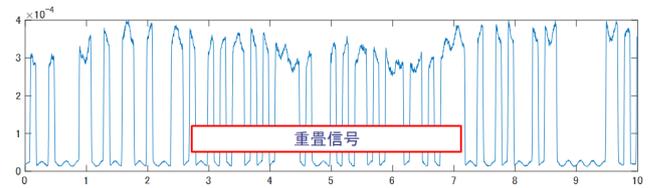
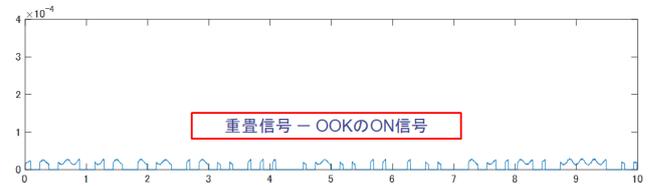


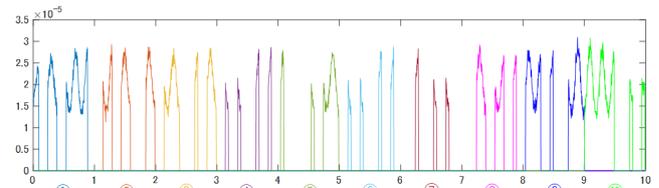
図 3 重畳信号の特徴



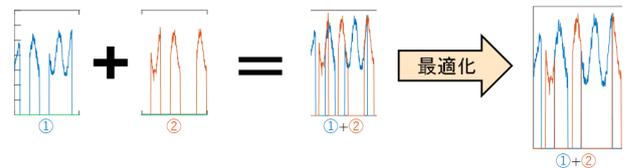
(a) OOK 信号と位相変調信号の重畳信号



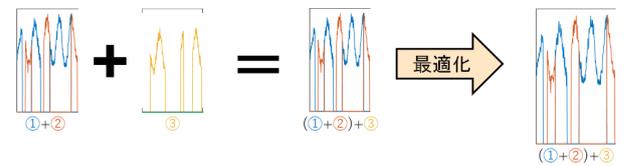
(b) 重畳信号から OOK 信号の On 部分を削除した位相変調信号



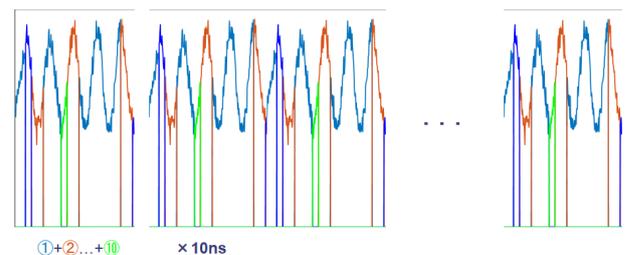
(c) 拡大 & 1ns ごとに番号振り分け



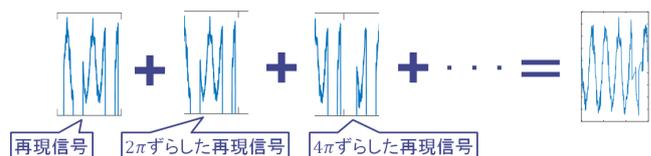
(d) 断片的な位相変調信号から元の位相変調信号を再現 1



(e) 断片的な位相変調信号から元の位相変調信号を再現 2



(f) 再現した位相変調信号をもとの PSK の信号長だけ複製



(g) 再現信号が不完全だった場合

図 4 位相変調信号の再現手法

4 シミュレーション概要

シミュレーション設定は表 1 に従う。使用するソフトウェアは MATLAB と OptSim である。図 5 にシミュレーション構成を示す。OptSim にて光アクセスネットワークを構築し、MATLAB を連携させることで任意の信号の生成や重畳信号から位相変調信号の再現、復調を行う。OOK 信号は現行システムに従い 1Gbps の場合に 8B/10B 符号を適用し、10Gbps の場合は 64B/66B 符号を適用する。位相変調信号は QPSK 信号とし、ランダムデータを使用する。評価対象は QPSK 信号のシンボル誤り率である。

表 1 シミュレーション条件

光波長	GE-PON 環境 1310[nm][6] 10G-EPON 環境 1270[nm][6]
送信 bit 数	GE-PON 環境 OOK: 1.0×10^5 [bit] QPSK: 2.0×10^4 [bit] 10G-EPON 環境 OOK: 1.0×10^6 [bit] QPSK: 1.0×10^4 [bit]
QPSK の伝送速度	0.2[Gbps]
データ変調方式	OOK QPSK
OOK 伝送符号	GE-PON 環境 NRZ(8B/10B) 10G-EPON 環境 NRZ(64B/66B)
サブキャリア周波数	1, 2, 5, 30[GHz]
ファイバ長	1km
送信電力	OOK: 0[dBm] QPSK: -2.28319[dBm]
伝送路条件	AWGN
評価方法	SER/AWGN Spectral density

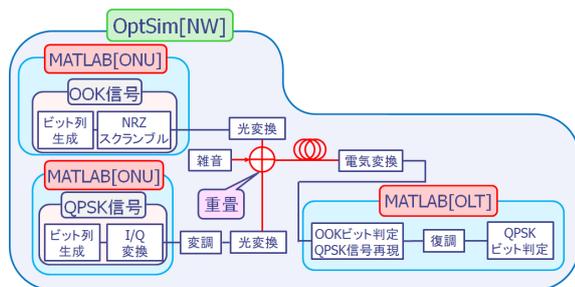


図 5 シミュレーション構成

5 シミュレーション結果

本章では、GE-PON 環境と 10G-EPON 環境それぞれのシミュレーション結果を述べる。本誌の都合上、QPSK 信号の変調周波数が 2GHz の場合のみ示す。

5.1 OOK 信号が 1Gbps の場合

図 6 に信号減衰や雑音付加をしていないときに重畳信号から再現された QPSK 信号のコンスタレーションを示す。図 6 より、コンスタレーションは良好であることが分かる。また、図 7 は SER を示す。それぞれ、緑線が OOK 信号を重畳されていない QPSK 信号、赤線が OOK 信号が重畳された状態で再現手法を適用していない QPSK 信号、青線が OOK 信号が重畳された状態から本研究による再現手法を適用した QPSK 信号の SER である。OOK 信号が重畳された QPSK 信号について、再現手法の適用により再現手法を適用していない場合と比べてビット誤りが大幅に改善されていることが分かる。また、OOK 信号が重畳されていない QPSK 信号のシンボル誤り率と OOK 信号が重畳された状態で再現手法を適用した QPSK 信号を比較すると、重畳された QPSK 信号のほうが 10^{-3} で約 3dB 劣っている。しかし、重畳された QPSK 信号は復調困難であるが、本研究の手法を用いることで復調が可能になることが分かる。

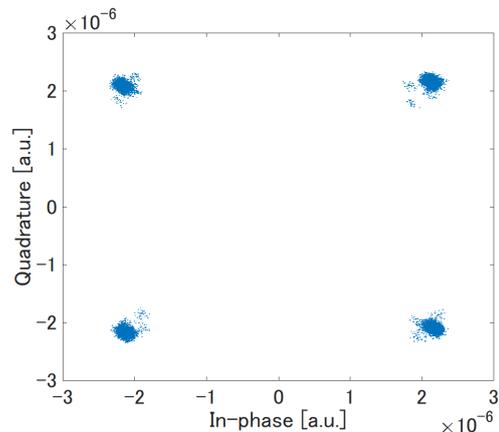


図 6 コンスタレーション

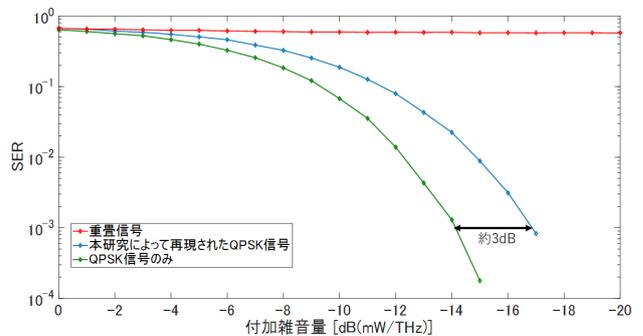


図 7 再現手法適用結果 (SER 特性)

5.2 OOK 信号が 10Gbps の場合

図 8 に重畳信号から再現された QPSK 信号のコンスタレーションを示す。図 6 は図 8 と同じ雑音環境のコンスタレーションであるが、OOK 信号が 10Gbps の環境だと散らばりが多くなっていることが分かる。また、図 9 は SER を示す。緑線が OOK 信号を重畳されていない QPSK 信号、赤線が OOK 信号が重畳された状態で再現手法を適用していない QPSK 信号、青線が OOK 信号が重畳された状態から本研究による再現手法を適用した QPSK 信号の SER である。再現手法の適用により重畳信号から QPSK 信号を再現し、シンボル誤り率が改善されたことが分かる。OOK 信号が重畳されていない QPSK 信号のシンボル誤り率と OOK 信号が重畳された状態で再現手法を適用した QPSK 信号を比較すると、重畳された QPSK 信号のほうが 10^{-3} で約 5dB 劣っている。GE-PON 環境と比較して再現手法による SER 改善度が劣化した原因として、OOK 信号の伝送速度が高速であるほど再現可能な QPSK 信号波が少なくなるため、QPSK 信号の精度に差異が生じたためであると考察する。

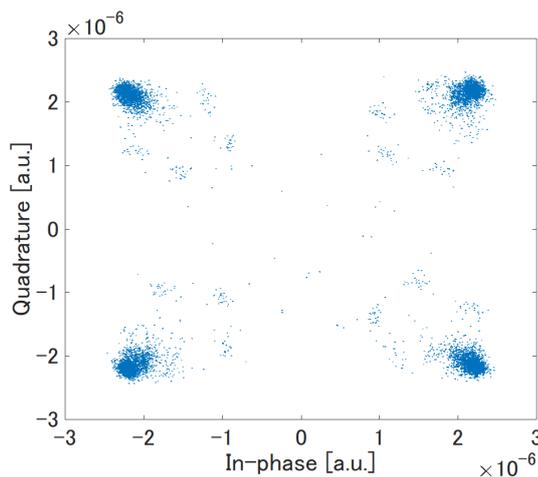


図 8 コンスタレーション

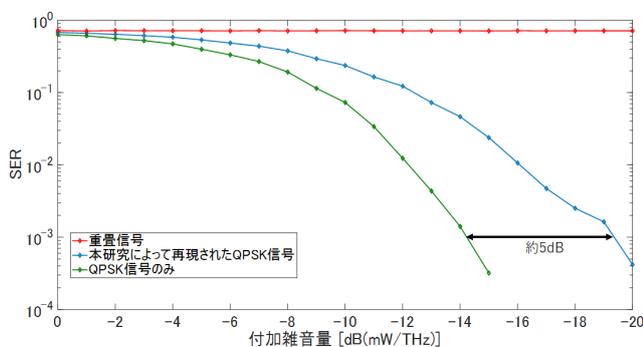


図 9 再現手法適用結果 (SER 特性)

6 まとめと今後の課題

本研究では OOK 信号と位相変調信号が光アクセスネットワークの上り伝送において新たな多重分離方式を提案、評価を行った。重畳信号から位相変調信号を再現する手法は、シミュレーションより多くのビット誤りを含む状態からビット誤りを大幅に改善が可能であることが確認された。しかし、本手法では位相変調信号の改善度合いは OOK 信号の伝送速度に依存し、OOK 信号の伝送速度が高速であるほど位相変調信号のシンボル誤り率の改善効果が低くなることが明らかとなった。今後の課題として挙げられるのは、位相変調信号を QPSK 信号だけでなく QAM(Quadrature Amplitude Modulation) 信号等を適用したときの特性の評価、位相変調信号のシンボルレートの改善、位相変調信号の変調周波数を 4G, 5G 通信などで使用される 800MHz 帯や 4GHz 帯付近の周波数帯について多重分離方式の検討を行うことが挙げられる。

参考文献

- [1] Cisco Systems, “Cisco Visual Networking Index (VNI): 予測とトレンド、2017 ~ 2022 年 ホワイトペーパー,” https://www.cisco.com/c/ja_jp/solutions/collateral/service-provider/visual-networking-index-vni/white-paper-c11-741490.html, Jun 2017. 最終閲覧日 Aug 22, 2019.
- [2] 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.
- [3] 大脇康平, “OptSim・MATLAB 連携を用いた次世代 PON の誤り率特性に関する研究,” 南山大学大学院理工学研究科 2015 年度修士論文, 2016.
- [4] Yuya Kaneko, Takeshi Higashino, Minoru Okada, “Experimental Demonstration of Interference Suppression in Radio over Fiber Simultaneously Transmitted with Optical On-Off Keying,” First PEM International Workshop, vol.1, no.1, SA-2, 2015.
- [5] 石田修, 瀬戸康一郎, “改訂版 10 ギガビット Ethernet 教科書,” インプレス, Apr 2005.
- [6] LAN/MAN Standards Committee of the IEEE Computer Society, “IEEE Standard for Ethernet,” IEEE Std 802.3TM-2018 (Revision of IEEE Std 802.3-2015), Jun 2018.