

OOK と PSK が共存する光アクセス下り通信への TCM とクリップ送信方式の適用と評価

M2019SC005 久野佑貴

指導教員：奥村康行

1 はじめに

近年ネットワークに接続するデバイスは変化しており、ユーザが所有するデバイス数は増加している。世界人口に占めるネットワークユーザ数は 2023 年に 66% となり、一人あたりのデバイス数および接続数の平均は 3.6 となることが予測されている [1]。他にも M2M 接続数が 2018 年と比較して 2.4 倍になることやビデオデバイスによりトラフィックが乗数的増加する可能性にも言及している [1]。このように端末や利用者数の増大、コンテンツの大容量化によりネットワークトラフィックは増加の一途を辿っている。

そうした中、光アクセスネットワークでも大容量化や高速化に向けた様々な手法が研究されており、本研究ではデジタル変調技術を利用した次世代通信への移行期に従来の通信方式の機器と共存することで生じる、コンスタレーション共有による誤り率の課題に着目する。

2 技術課題と解決法

本節では、次世代ネットワークへの移行期に生じる課題について論じる。

2.1 次世代通信方式と従来通信方式の共存

現在利用されている PON(Passive Optical Network) 環境は ONU(Optical Network Unit) と OLT(Optical Line Terminal) を光ファイバ及び光スプリッタで接続した構成となっている。また、ONU と OLT の間は光の強度による変調を行う OOK(On-Off-Keying) を用いて通信が行われている。しかし、今後は高速化や大容量化にとめない PSK(Phase Shift Keying) や QAM(Quadrature Amplitude Modulation) といった次世代ネットワークに移行することが予測される [2, 3]。このとき、一度にすべての端末を次世代ネットワークに対応したものに更新することは難しく、従来の通信方式を用いる端末と次世代の通信方式を用いる端末が一時的に共存する環境(移行期)が生まれる。新旧の通信方式の端末が共存する移行期のネットワークの概要を図 1 に示す [4]。

2.2 共存時の技術課題と解決法

異なる複数の変調方式の信号が共存した状態で通信を行う手段としてコンスタレーション共有という手法がある [2, 3]。これは下り方向の通信で有効な手段で複数の変調方式に対応可能な信号点の配置を利用するものである。図 2 に、従来通信方式の OOK と次世代通信方式であり本研究で使用する 8-PSK が共存した場合の信号点配置を示す。

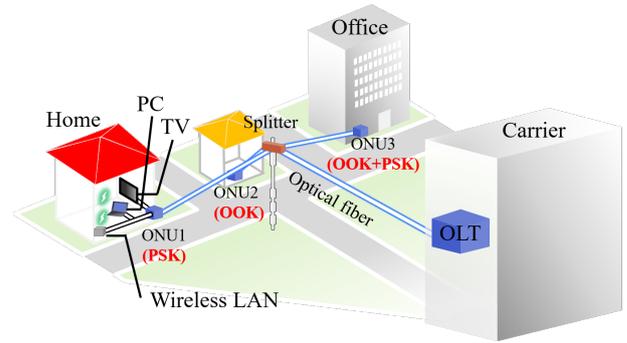


図 1 移行期のネットワーク [4]

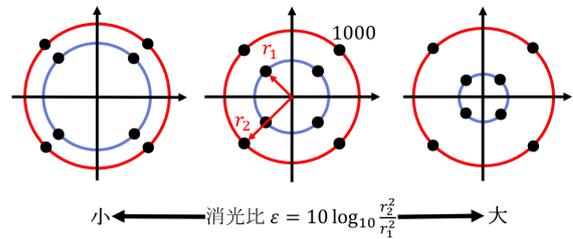


図 2 OOK と PSK が共存した場合の信号点配置 [5]

ここで、図 2 のように OOK と PSK が共存した状態では高い誤り率になってしまうという課題が先行研究によって報告されている [5]。図 2 は内側の円が OOK の OFF 信号、外側の円が OOK の ON 信号に相当し、位相が PSK に対応している。つまり、OLT から OOK 対応の ONU へ “1” という信号を、PSK 対応の ONU に “000” という信号を同時に送りたい場合、外側の円の 45 度の信号点となる。また、図 2 は消光比 ε と呼ばれる ON 信号と OFF 信号の半径比によって 3 つに分かれており、右に行くほど消光比が大きくなり、左に行くほど消光比が小さい場合を表している。ここで、OFF 信号の半径を r_1 、ON 信号の半径を r_2 とすると消光比は $\varepsilon = 10 \log_{10} (r_2^2 / r_1^2)$ で定義できる。消光比が大きいか小さいかによって、内側信号の半径が小さくなるため PSK 同士が近接し結果的に PSK 信号の誤り率が高くなってしまったり、一方で消光比が小さい場合、ON 信号と OFF 信号の距離が短くなるため、ON/OFF の境界までの距離が短くなってしまい結果的に OOK が誤りやすくなってしまったり、このように消光比をどのように設定してもトレードオフの関係となり誤り率が高い状態になってしまう [5]。

そうした課題に対して本研究では衛星放送などの無線通信で利用されている誤り訂正手法のトレリス符号化変調 (TCM) を光アクセスネットワーク、特に技術の移行期とい

う特殊な環境へ適用した場合の有効性を確認する．TCMは多値変調，畳み込み符号，ピタビ復号，Set partitioningと呼ばれる4つの構成要素によって成り立っている．

加えて，従来の通信方式よりも送信電力を削減することが可能なクリップ送信方式も適用する．これは，電気信号から光信号に変換する際に従来のようにバイアスをかけるのではなく，負の成分をクリップしてしまう技術である[6]．クリップ後の電気信号 $e^+(t)$ はクリップ前の電気信号を $e(t)$ を用いて式 (1) で定義できる．

$$e^+(t) = \begin{cases} e(t) & (e(t) > 0) \\ 0 & (\text{otherwise}) \end{cases} \quad (1)$$

以上，2つの技術をOOKとPSKの共存環境という特殊な環境に適用し効果を確認する．

3 シミュレーション環境

本研究ではTCMとクリップ送信方式の効果を確認するため数値計算ソフトであるMATLABと光シミュレータのOptSimを用いてシミュレーションを行った．図3にシミュレーション環境を，表1に符号化器の構成を示す．なお，図3の符号化器は例として拘束長3の場合を表している．加えて，表2に本研究で使用したワークステーションのスペックを示す．

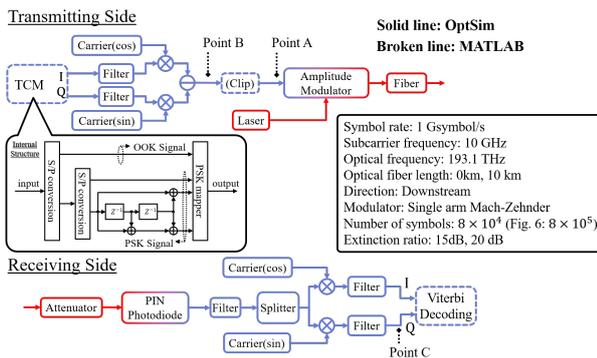


図3 シミュレーション環境及び条件

表1 使用する符号化器の詳細 (符号化率 1/2)[7]

符号化器の拘束長 (k)	符号器の結線 (8進数)
3	5, 7
4	15, 17
5	23, 35

伝送路には1550nm帯のシングルモード光ファイバを使用し，伝送路長は10km，損失は0.2dB/km，分散スロープは0.07ps/nm²/kmに設定した．また変調器にはsin²特性を持つシングルアームのマッハ・ツェンダー振幅変調器を使用し損失は3dB，チャープは無しとした．そして受信側にはPINフォトダイオードを設定し，量子効率は0.7とした．

表2 使用するコンピュータのスペック

項目	スペック
OS	Windows 10
CPU	Intel Core i7 7800X
メモリ	DDR4 128GB
GPU	NVIDIA GeForce GTX 1050 Ti

ここで，OOKおよびPSKのMSBは誤り訂正処理をせずに符号化されることに注意されたい．また，OOKのON/OFFの判定には受信信号の最大値と最小値の平均を使用している．そして，コンピュータ及びシミュレータの都合上誤り率の評価地点は10⁻³とする．

4 シミュレーション結果

まずは，構築した環境の動作確認を兼ねて信号波形を確認した．図4にクリップ送信方式適用時と非適用時の電気信号および光信号の波形を示す．なお，電気信号の波形は図3のPoint A及びPoint Bで評価を行った．

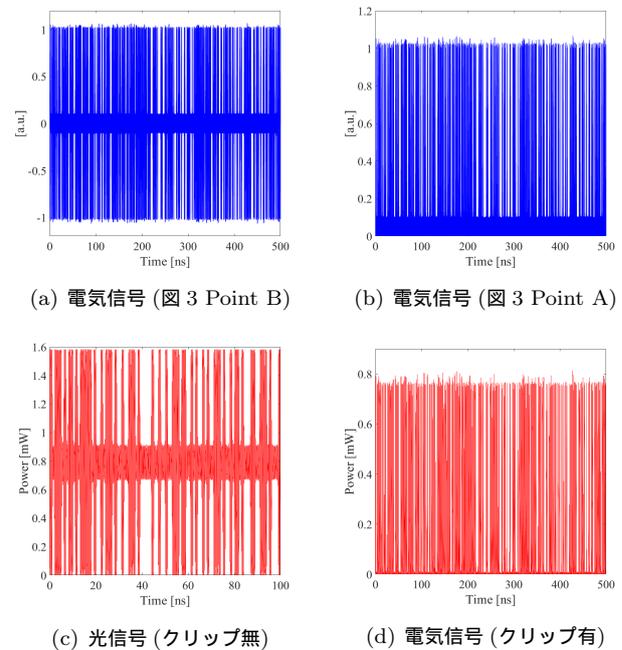


図4 各種信号波形

図4の電気信号波形からクリップ処理を適用することで電気段の段階で負の成分がカットされていることが確認できる．そのため，光信号についてもバイアスが加えられず振幅変調されている様子が確認できる．続いて図3のPoint Cでのコンスタレーションを図5に示す．なお，受信電力は約15dBmに揃えた．

コンスタレーションを比較するとクリップ送信方式適用時は非適用時に比べて内側の信号半径が小さくなっていることが分かる．これはsin²特性を有する光変調器を使用しているためである．一方，クリップ送信方式非適用時に外側の信号半径が適用時に比べて小さいのは，信号電力の

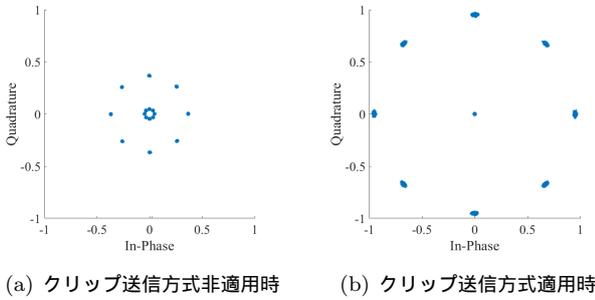
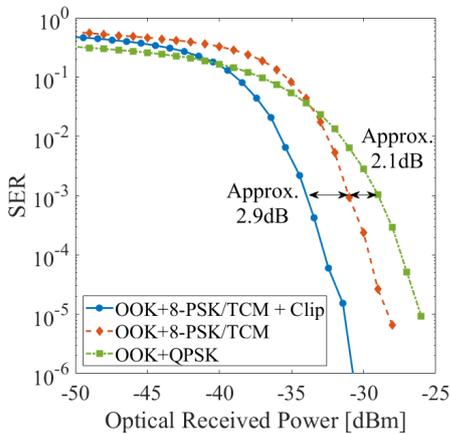


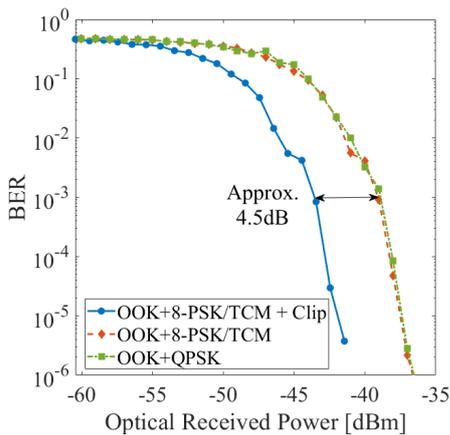
図5 受信側コンスタレーション (図3 Point C)

大部分を直流成分が占めているためであり、復調側では半径が小さくなってしまふのだと考えられる。

シミュレーション環境の確認ができたため、拘束長3の場合のシミュレーション結果を確認した。8-PSKのシンボル誤り率 (SER) 特性を図6(a)にOOKのビット誤り率 (BER) 特性を図6(b)にそれぞれ示す。



(a) PSK の SER 特性



(b) OOK の BER 特性

図6 誤り率特性 (拘束長:3, 消光比:20dB)

図6(a)より、TCM適用により受信電力が約2.1dB低い状態でも非適用時と同じ誤り率を得られることが分かる。更にクリップ送信方式を適用することで約2.9dB受信電力

が小さくても非適用時と同じ誤り率が得られることもわかる。また、OOKに関してはTCMは適用していないため効果が見られるのはクリップ送信方式を適用した場合のみである。結果は約4.5dB受信電力が小さくても適用前と同様の誤り率を得られるというものである。ここで、クリップ送信方式適用時の改善効果がPSKよりもOOKのほうが高い理由について検討する。その理由は図5からも分かるとおり、クリップ送信方式適用時は内側信号の半径が非常に小さくなるためであると考えられる。つまり、OOKのON信号とOFF信号の距離は長くなりOn/Off判定の境界までの距離が長くなるため改善効果が高くなったと考えられる。

次に、バイアス送信方式の平均送信電力 \bar{P}_b とクリップ送信方式の平均送信電力 \bar{P}_c から電力削減効果の理論値を計算すると $10 \log_{10} \bar{P}_c / \bar{P}_b = -9.97 \text{dB}$ となる。つまり光段ではクリップの適用で非適用時と比べて平均送信電力が約-10dBとなっていればよいということになる。しかし実際にクリップ送信方式による改善効果を確認すると3dB程度となった。この理由として考えられるのは高調波による雑音や位相歪、またクリップした信号をもとに戻すために通すフィルタによる歪などが考えられる。しかしながら、歪や雑音の影響よりもクリップによる電力削減効果のほうが上回っているため今回のような結果が得られたのだと考えられる。

以上の結果からOOKとPSK共存環境へのTCMとクリップ送信方式の適用は有効であることが確認された。そのため、今度は拘束長、消光比を変化させ特性がどのように変化するか確認した。まずは符号化器の拘束長を3, 4, 5と変化した場合のPSKの誤り率特性を図7に示す。

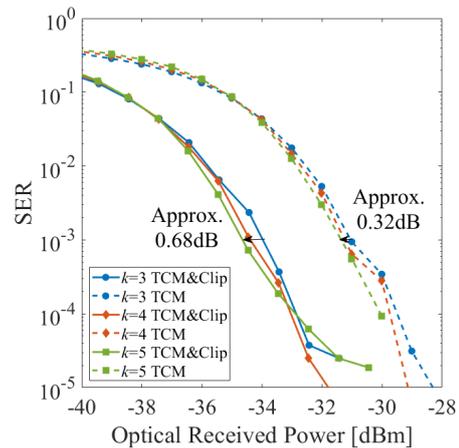
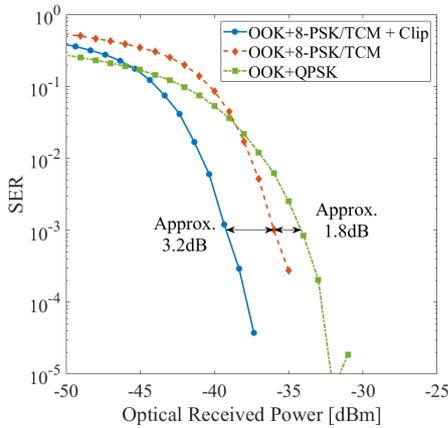


図7 拘束長変更時のPSKの誤り率特性

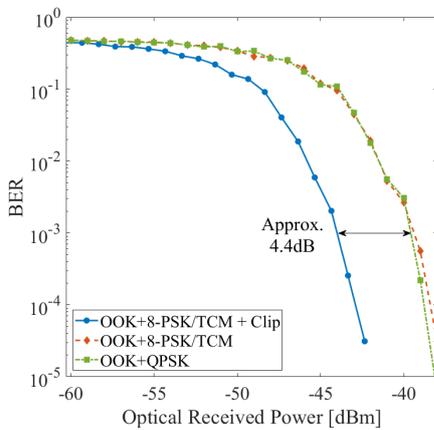
実線がTCMとクリップを適用した場合、破線がTCMのみを適用した場合である。図7より拘束長を長くすると徐々に誤り率曲線の落ち方が急激になることが分かる。これは、一般的に畳み込み符号器の拘束長を長くすることで誤り訂正能力が向上することと一致する。しかし、計算時間も長くなることから使用する環境に応じて柔軟に設定す

る必要があると考えられる。

最後に消光比を 15dB へと小さくした場合の結果を図 8 に示す。なお、外側信号の半径は固定し内側信号の半径を調整することで消光比を調整している。



(a) PSK の SER



(b) OOK の BER

図 8 消光比変更時の誤り率特性 (消光比:15dB)

結果は OOK の誤り率特性を悪化させずに PSK の誤り率特性を改善するというものであった。この理由は、外側信号の半径を固定した状態で消光比を小さくする、すなわち内側信号の半径を大きくするため隣接する PSK 信号の間隔が広がり特性が改善したのだと考えられる。一方 OOK は動的な判定方法であるため特性が悪化せず保たれたのだと考えられる。

以上の結果から、拘束長を伸ばすことで計算時間とトレードオフで誤り訂正能力を向上させられることが確認された。また、消光比は小さくすることで OOK の特性を変化させず PSK の特性を改善することが確認された。いずれの場合についても、光アクセスネットワークの技術の移行期という特殊な環境において TCM は有効であることが分かった。また、クリップ送信方式を適用することで送信電力も削減できることも分かった。よって誤り率及び電力の削減の面から TCM とクリップ送信方式の OOK と 8-PSK の共存環境への適用は有効であるといえる。

5 おわりに

本研究では、次世代ネットワークへの移行期に生じる従来技術との共存に伴う誤り率上昇という課題に対し、誤り訂正手法である TCM と電力削減を目的としたクリップ送信方式を適用し評価を行った。TCM を適用した PSK では 2.1dB 程度受信電力が減少しても同程度の誤り率を実現できることが分かった。また、クリップ送信方式を適用することで PSK だけでなく OOK でも 2.9dB 以上受信電力が小さくても同じ誤り率を実現できることを確認した。加えてパラメータを変更した場合の特性についても確認し、拘束長は環境に応じて伸ばし、消光比は小さく設定することが望ましいことも確認した。

以上より、技術の移行期ともなっていて生じる OOK と PSK の共存環境において TCM 及びクリップ送信方式を適用することは有効であるという結論が得られる。今後の課題は、低誤り率領域である 10^{-4} から 10^{-5} あたりの結果にばらつきが大きいいため送信データ数を増やしより低誤り率領域について検討することである。

参考文献

- [1] “Cisco Annual Internet Report - Cisco Annual Internet Report Highlights Tool,” Cisco, <https://www.cisco.com/c/en/us/solutions/executive-perspectives/annual-internet-report/air-highlights.html>, Accessed: July 5, 2020.
- [2] N. Yoshimoto, J. Kani, S. Kim, N. Liyama and J. Terada, “DSP-based optical access approaches for enhancing NG-PON2 system,” *IEEE Communications Magazine*, vol. 51, no. 3, pp. 58–64, March 2013.
- [3] Yasuyuki Okumura, Maki Kato and Katsuyuki Fujii, “Signal Shaping to Achieve OOK and PSK Co-Existence for Improved Optical Access Network Performance,” *American Journal of Networks and Communications*. Vol. 3, No. 4, 2014, pp. 56–62.
- [4] “Access network technology,” NTT Access Network service systems Laboratories, <https://www.anst.ntt.co.jp/e/global/overview/overview01.html>, Accessed: Jan. 9, 2021.
- [5] 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,” *OFC/NFOEC*, Los Angeles, CA, 2012, pp. 1–3.
- [6] 本間拓哉, 覺張佑亮, 上田裕巳, “クリップ送信方式に基づく SDM-PON に関する伝送特性評価,” *信学技報 CS2012-134*, pp. 187–192, 2013.
- [7] 神谷幸宏, “MATLAB によるデジタル無線通信技術,” コロナ社, 東京, 2009.