

冗長度可変トレリス符号化による適応変調

中村 達也 ル・タンデ イェ・トウ・ガホリ エマニエル 野口 栄実 安部 淳一 福知 清

日本電気株式会社 IoT デバイス研究所
IoT Devices Research Laboratories, NEC Corporation

1. はじめに

近年光通信において 4 次元符号化変調を用いて、伝送距離に応じた最適な周波数利用効率(SE)を選択可能な手法が注目されている。4 次元符号化変調による SE 選択の例として、既存のシンボル集合において情報ビットの一部をパリティビットに割り当てシンボルを間引くことによってシンボル間距離を伸ばす、セット分割法(SP)が挙げられる[1]。さらに SP を利用して、1 シンボルあたり 1 ビットの冗長ビットを割り当て、時間軸上で複数の冗長ビットに相関を持たせて符号化利得を得て受信感度を向上させる 4 次元トレリス符号化光変調(4D-TCM)方式が提案されている[2]。

SP によって SE の細密な切替は可能となるが、伝送距離-SE 比の観点からは、PM 変調のトレードオフ点に過ぎない[1]。一方、4D-TCM は前述のトレードオフ点を越えることが可能である一方で、冗長ビットが 1 ビットであるため適用範囲が狭く、SE の切替の自由度は低い。

本稿では、PM-16QAM に対するセット分割の異なる階層を用いる複数の畳み込み符号化器の適用、および新たな 4 次元変調方式 4D-128-12QAM の導入と TCM の適用により、TCM において冗長度を可変とすることで、SE の細密な切替と、4D-TCM による符号化利得による受信感度の向上を両立する方法を述べる。本手法により、PM-16QAM と PM-QPSK の間の SE として、7,6,5 bit/4D-symbol の 3 つの動作モードが新たに実現可能となる。また符号化利得による恩恵として伝送距離延伸が可能であることを示す。

2. 符号化器の構成

図 1(a)~(c)に検討した畳み込み符号化器を示す。それぞれの符号化器について(入力ビット,拘束長,符号化率)=(7,4,7/8),(6,4,6/8),(5,4,5/8)となっており、これらを用いることで、7,6,5 bit/4D-symbol を実現することが可能となる。

これら 3 つの畳み込み符号化器のうち、(a),(c)については同じ PM-16QAM に対する符号化を施しているが、(d)に示すセット分割の異なる階層(a)に対しては T0~T7,(c)に対しては U0~U31)を用いることで冗長度可変とし、7,5 bit/4D-symbol を実現している。畳み込み符号化器の拘束長及び形状は、最小二乗ユークリッド距離(MSED)が最大となる条件下で拘束長が最小となるように最適化されている。符号化器(a)については PM-16QAM に対し、MSED が 4 倍、符号化率が 7/8 なので漸近的符号化利得は $10 \times \log_{10}(4 \times 7/8) = 5.44$ dB となる。同様に(c)については MSED が 8 倍、符号化率が 5/8 なので漸近的符号化利得は $10 \times \log_{10}(8 \times 5/8) = 6.99$ dB となる。

符号化器(b)については、新たに 4 次元変調方式 4D-128-12QAM[3]を導入し、これに対して(a)と同じ TCM 方式を適用することで 6bit/4D-symbol を実現している。4D-128-12QAM は PM-16QAM に対し、0.39 dB の漸近的符号化利得を有する。4D-128-12QAM に対して、MSED は 4 倍、符号化率は 6/7 となるため、PM-16QAM に対する漸近的符号化利得は $10 \times \log_{10}(4 \times 6/7) + 0.39 = 5.74$ dB となる。

3. 長距離伝送系を用いた WDM 伝送実験結果

図 2 に提案する 3 方式に加え PM-16QAM および PM-8QAM について 100 km スパンの純シリカコアファイバ長距離伝送系を用いた WDM 伝送実験結果を示す。SD-FEC リミット[4]に 2dB のマージンを加えた Q 値 8.4dB を基準とした場合、PM-16QAM,4D-TCM128-16QAM,4D-TCM64-12QAM,4D-TCM32-16QAM の伝送距離はそれぞれ 1400 km, 2200 km, 5000 km, 5900 km となっており、距離に応じて最適な SE での伝送が可能であることがわかる。また PM-8QAM と 4D-TCM64-12QAM は同じ SE を有しており直接比較することができる。その伝送距離は 3700 km, 5000 km となっており、TCM 方式を用いることで 1300 km の伝送距離延伸が可能であることがわかる。

4. まとめ

本論文では、PM-16QAM をベースのコンスタレーションとして、7,6,5 bit/4D-symbol の SE となる冗長度の異なる 3 つの TCM 方式を考案し、伝送距離に応じて最も適した SE を有する方式で適応的に通信を行うことを提案した。また、長距離光ファイバ伝送系を用いた WDM 伝送によりその有効性を実証した。また、符号化利得の効果により、PM-8QAM 相当となる 4D-TCM64-12QAM が、より長い伝送距離を実現可能であることを示した。

文献

- [1] J. K. Fischer *et al.*, J. Lightwave. Technol. **32**,2586-2595(2014).
- [2] S. Ishimura *et al.*, OECC 2014, TH12B-2 (2014).
- [3] 中村他, 信学技報, pp. 11-15, OCS2016-11(2016).
- [4] E. Yamazaki *et al.*, Opt. Exp. **19**, pp.13179-13184(2011).

謝辞

伝送実験は NICT テストベッドにて行われた。

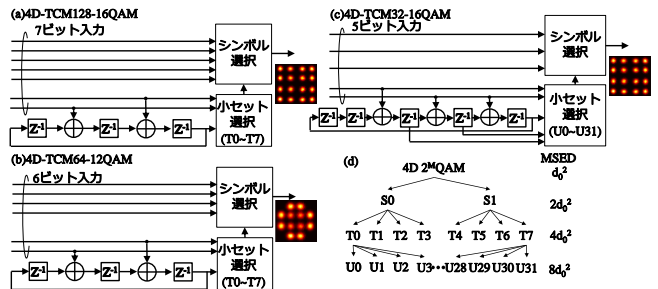


図 1. (a)~(c)7,6,5bit/4D-symbol となる畳み込み符号化器. (d)セット分割ツリー.

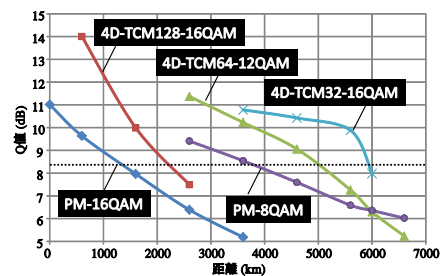


図 2. 純シリカコアファイバ伝送系を用いた WDM 伝送実験結果.