

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 5 月 23 日現在

機関番号：12601

研究種目：基盤研究(A) (一般)

研究期間：2013～2015

課題番号：25249038

研究課題名(和文) コヒーレント光ファイバ通信方式の伝送限界に関する研究

研究課題名(英文) Study on Transmission-Capacity Limit in Coherent Optical Communication Systems

## 研究代表者

菊池 和朗 (Kikuchi, Kazuro)

東京大学・工学(系)研究科(研究院)・教授

研究者番号：50134458

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 33,800,000円

研究成果の概要(和文)：多次元パーミュテーション変調方式のコヒーレント光通信システムへの導入について検討した。パワー効率とスペクトル効率を用いて、この変調方式の性能を系統的に論じた。従来から知られていた偏波スイッチQPSK方式や偏波QAM方式は4次元パーミュテーション変調として分類できることを示したのち、パワー効率とスペクトル効率に優れた新しい4次元変調方式を見出した。さらに、次元を上げることにより、シャノン限界に近づくことができることが示された。

研究成果の概要(英文)：We introduce the multi-dimensional permutation-modulation format in coherent optical communication systems and analyze its performance in a systematic manner, focusing on the power efficiency and the spectral efficiency. Other than the polarization-switched quadrature phase-shift keying (PS-QPSK) modulation format and the polarization quadrature-amplitude modulation (POL-QAM) format, we find novel 4-dimensional modulation formats which have better trade-off relations between the power efficiency and the spectral efficiency. In addition, we find that we can approach the Shannon limit as the signal dimension is increased.

研究分野：光通信

キーワード：光ファイバ通信

## 1. 研究開始当初の背景

近年、デジタルコヒーレント光通信方式が実用化され、一波長あたり 100Gbit/s の伝送容量が達成された。波長多重技術を用いれば、総伝送容量は 8Tbit/s にも及ぶ。このようなデジタルコヒーレント光通信方式を用いれば、複素平面上の IQ 軸、偏波軸、周波数軸での、自由な多値化・多重化が可能となるので、光周波数帯域の利用効率を向上させることができる。任意に多値化・多重化された光信号を歪みなく長距離伝送できる技術が開発されれば、光ファイバ通信システムの伝送特性は飛躍的に向上する可能性がある。

## 2. 研究の目的

コヒーレント光通信の性能限界を追求するには、信号光電界の持つ全ての情報、すなわち振幅、位相、偏波、周波数を、効率的に多値化および多重化する技術が不可欠である。

その一つの形態として、多次元変調方式に関する研究が重要である。これは、通常 2 次元の平面に配置される信号点を、多次元空間に拡張することで、よりパワー効率の高い変調方式を見出そうとするものである。特に、4 次元空間を用いた 4 次元変調方式は、光の複素振幅と偏波を用いることで実現され、光通信に適した方式であるといえる。

本研究の目的は、この 4 次元空間、あるいはそれ以上の多次元空間を用いることで、より通信路容量に接近し得る変調方式を見つけ出し、その有効性を確かめることである。ここでは特に、パーミュテーション変調を多次元空間に適用することで、より通信路容量に接近しうることを示す。

## 3. 研究の方法

これまでコヒーレント光通信では、IQ 軸を用いた多値直交振幅変調(QAM)と偏波軸を用いた偏波多重に基づく変調フォーマットが用いられてきた。これに対して本研究では、IQ 軸の 2 自由度と偏波軸の 2 自由度を組み合わせ

せ、4 次元空間で多値信号を組み立てる方法を検討する。さらに周波数軸を用いて次元を拡大する方法を検討する。次に、多次元変調フォーマットのパワー効率、スペクトル効率などの基本特性を、計算機シミュレーションにより解析し、新たな多次元高効率変調フォーマットの可能性を探る。

## 4. 研究成果

(1) パーミュテーション変調信号の構成法

パーミュテーション変調信号を  $(n, m)$  と表すことにする。この時、 $n, m$  はそれぞれ整数であり  $n \geq m \geq 1$  を満たす。 $(n, m)$  に属するベクトル集合は、以下のように生成される。まず、 $n$  次元ベクトルのうち  $m$  個の要素に +1 あるいは -1 を割りあて、残りの要素を 0 とする集合を作る。どの  $m$  個の場所に、+1 あるいは -1 を割りあてるかの組み合わせの分だけ、シンボル数が存在する。したがって  $(n, m)$  のシンボル数は以下の式で表される。

$$M = 2^m {}_n C_m \quad (1)$$

ただし、 ${}_n C_m = n! / (m!(n-m)!)$  である。

さて、このように定義されたパーミュテーション変調における特別な状況として、 $n$  と  $m$  が等しい、すなわち  $m = n$  の場合が挙げられる。この場合、すべての次元が独立に変調されており、 $n = 4$  の場合は DP-QPSK に他ならない。

一方で、 $m = 1$  の時も特別な場合であり、陪直交変調と呼ばれる変調方式に対応する。陪直交変調は、ある  $n$  次元における変調方式の中で最も高い電力効率を有する方式であることが知られている。しかし、周波数利用効率をかなり犠牲にしなければならない。 $n = 4$  の陪直交変調は PS-QPSK と等価である。

このように、 $m = n$  及び  $m = 1$  の場合には、パーミュテーション変調はよく知られた変調方式に帰着されるが、 $1 < m < n$  の範囲ではどのような性能を持った変調方式になるのかという考察はほとんど行われていない。

表 1 では 4 次元空間上でのパーミュテーション変調信号 4 つの集合が示されている。ただし表の下段のベクトルは、要素に関する全ての配置の仕方を代表して示している。

表 1. 4 次元パーミュテーション変調信号のベクトル集合

$C_1=(4,1)$	$C_2$	$C_3=(4,3)$	$C_4=(4,4)$
	$= (4,2)$		
$(\pm 1, 0, 0, 0)$	$(\pm 1, \pm 1, 0, 0)$	$(\pm 1, \pm 1, \pm 1, 0)$	$(\pm 1, \pm 1, \pm 1, \pm 1)$

## (2) パワー効率と周波数利用効率

多次元空間上での変調方式を論ずる際、議論を簡略化するためパワー効率及び周波数利用効率の 2 つのパラメータを使用する。まずパワー効率(power efficiency)を定義しよう。

$$\gamma = \frac{d_{min}^2}{4E_b} \quad (1)$$

$d_{min}$  は変調方式のシンボル間の最小距離、 $E_b$  は 1 ビットあたりのエネルギーを表している。パワー効率はこれらの比によって定義されているが、直観的には以下のような意味合いを持つ。まず、パワー効率の高い変調方式とは、誤りの発生しにくい方式である。SNR が十分に高ければ誤りはシンボル間の最小距離間のみで発生するため、最小距離が大きければ誤りが発生しにくく、パワー効率が高いといえる。これはパワー効率が、シンボル間の最小距離の二乗の項に比例することに対応する。一方、1 ビットあたりに費やすエネルギーが少なくてもパワー効率は高い。これはパワー効率が  $E_b$  に反比例することに対応する。また分母の 4 により、パワー効率は BPSK または QPSK に対して正規化されている。

一方で、周波数利用効率 (spectral efficiency: SE) は以下のように定義される。

$$SE = \frac{R}{WD/2} \quad (2)$$

$R$  は情報伝送速度、 $W$  は使用帯域幅、 $D$  は次元数である。多くのデジタル変調方式は IQ 平面上、すなわち 2 次元上で定義されること

が多い。したがって IQ 平面で定義される変調方式と比較するために、 $D/2$  で正規化している。

ところで情報伝送速度は、伝送路の状況によって変化する。しかしノイズに対して信号パワーが十分に大きい状況では、この値は収束する。これは各変調方式固有の値であり、周波数利用効率の定義では、この収束した情報伝送速度を使用する。変調方式のシンボル数を  $M$  とすると、情報伝送速度は以下のように書き換えられる。

$$R = \log_2 M / T \quad (3)$$

$T$  はシンボル長である。さらに帯域幅に関しては、ナイキストレートを仮定する。光周波数帯ではナイキスト帯域は  $W = 1/T$  となるので、これらをすべて考慮した周波数利用効率は

$$SE = \frac{\log_2 M}{D/2} \quad (4)$$

となる。

## (3) パワー効率と周波数利用効率及び通信路容量の相互関係

$C$  を通信路容量とすると、周波数利用効率が  $SE = C / (W (D/2))$  であることを考慮して、シャノンの定理は

$$SE = \log_2 \left( 1 + \frac{E_b}{N_0} SE \right) \quad (5)$$

とあらわされる。

ところで、誤り率が十分に低い場合にはその誤りのほとんどが、最小符号間距離を有するシンボル間同士のみでしか起こらない。シンボル誤り率 (symbol-error rate: SER) は  $d_{min}^2 / 4N_0$  で決定され、例えば SER が  $10^{-5}$  を仮定した場合、この値は 9.09 となる。一方、

$$SE = \log_2 \left[ 1 + SE \frac{d_{min}^2}{4N_0} \frac{1}{\gamma} \right] \quad (6)$$

であるので、SERの値を仮定することにより、シャノン限界も  $SE - 1/\gamma$  平面上に表現できることがわかる。以下では  $SER = 10^{-5}$  を仮定する。

#### (4) 4次元パーミュテーション変調信号の周波数利用効率とパワー効率

ここで、 $C_1$ と $C_3$ の和集合 $C_1 \cup C_3$ をシンボルとする変調方式を考える。 $C_1 \cup C_3$ のパワー効率と周波数利用効率を求めると、それぞれ 0.1 dB 及び 2.7 bit/s/Hz/pol となる。これは DP-QPSK と同程度のパワー効率で、より多くの情報が伝送できることを意味する。 $C_1 \cup C_3$ を含む、4次元パーミュテーション変調のパワー効率と周波数利用効率の関係を図1に示す。図1からも、 $C_1 \cup C_3$ はDP-QPSKと比較して、よりシャノン限界に接近した変調方式であることがわかる。

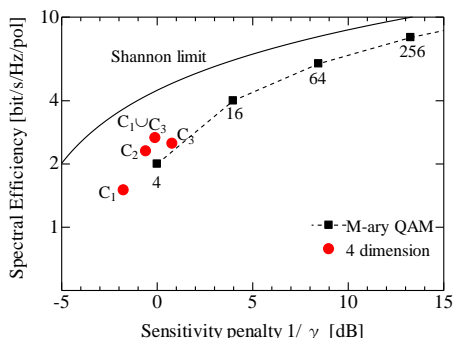


図1. 4次元パーミュテーション変調の周波数利用効率とパワー効率の関係

#### (5) 多次元パーミュテーション変調信号の周波数利用効率とパワー効率

本章では、以上で考察してきたパーミュテーション変調をより多次元化する。その一例として12次元パーミュテーション変調(12,m)を考える。 $m$ は $1 \leq m \leq 12$ であり、12種類の変調方式が存在する。12次元パーミュテーション変調のパワー効率と周波数利用効率の関係を、図2に示す。4次元の場合に比べて、よりシャノン限界に接近する方式が存在することが見て取れる。次元の拡大は周波数軸を用いて実現できる。

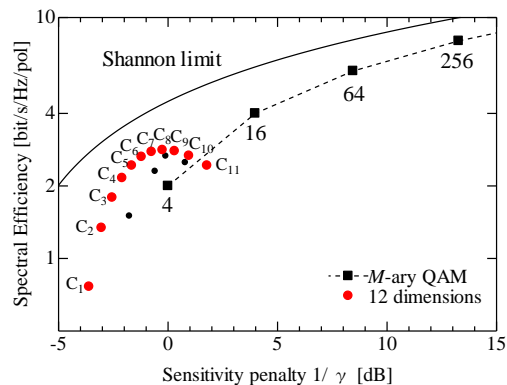


図2. 12次元パーミュテーション変調の周波数利用効率とパワー効率の関係

#### (6) まとめ

多次元パーミュテーション変調方式を提案した。次元を上げていくことで、よりシャノン限界に接近し得る方式が存在することを明らかにした。

#### 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 3 件)

- (1) K. Kikuchi, "Fundamentals of coherent optical fiber communications," J. Lightwave Technol., vol.32, no.1, pp.157-179, 2016, 査読有, DOI: 10.1109/JLT.2015.2463719
- (2) S. Ishimura and K. Kikuchi, "Multi-dimensional permutation-modulation format for coherent optical communications," Optics Express, vol.23, no.12, pp.15587-15597, June 2015, 査読有, DOI: 10.1364/OE.23.015587
- (3) S. Ishimura and K. Kikuchi, "Eight-state trellis-coded optical modulation with signal constellation of four-dimensional M-ary quadrature-amplitude modulation," Optics Express vol. 23, no. 5, pp. 6692-6704, Feb. 2015, 査読有, DOI:10.1364/OE.23.006692

[学会発表] (計 11 件)

- (1) K. Kikuchi, "Coherent optical communication technology," Opto-Electronics and Communication Conference/ Conference on Photonics in Switching (OECC/PS 2016), July 3-7, 2016, 朱鷺メッセ(新潟県新潟市)
- (2) K. Kikuchi, "Coherent optical communications: Past, present and future," Conference on Optoelectronics & Optical Communications (COOC2016), June 1-3, 2016, Busan, Korea
- (3) S. Ishimura and K. Kikuchi, "Fast decoding and LLR-computation algorithms for high-order set-partitioned 4D-QAM

- constellations," European Conference on Optical Communication (ECOC2015), P.3.1, Sept. 27-Oct. 1, 2015, Valencia, Spain
- (4) K. Kikuchi, "The past, present, and future of coherent optical fiber communications," Advanced Photonics Congress, June 27- July 1, 2015, Boston, MA, USA
  - (5) K. Kikuchi, "Coherent optical communication technology," Optical Fiber Communications Conference (OFC 2015), Th4F.4, March 22-26, 2015, Los Angeles, CA, USA
  - (6) K. Kikuchi, "The past, present, and future of coherent optical fiber communications," International Conference on Photonics (ICP 2014), Sept. 2-4, 2014, Kuala Lumpur, Malaysia
  - (7) S. Ishimura and K. Kikuchi, "8-State Trellis-coded optical modulation schemes with 4-dimensional set partitioning," OptoElectronics and Communication Conference and Australian Conference on Optical Fibre Technology 2014 (OECC/ACOFT 014), TH12B-2, July 6-10, 2014, Melbourne, Australia
  - (8) 石村昇太, 菊池和朗, “セット分割 4次元 QAM 信号の高速復号アルゴリズムの提案,” 電子情報通信学会, 2015年3月10日-13日, 立命館大学 (滋賀県草津市)
  - (9) 菊池和朗, “デジタルコヒーレント通信を支える変復調技術とその最新動向—多次元光変復調技術—,” 電子情報通信学会第二種研究会 EXAT 研究会, 2015年2月15日, 宝山ホール (鹿児島県鹿児島市)
  - (10) 石村昇太, 菊池和朗, “8 状態トレリス符号化 4D-QPSK 光変調方式の実験的検証,” 電子情報学会光通信システム研究会, 2014年11月13日-14日, NHK 広島放送局 (広島県広島市)
  - (11) 菊池和朗, “多次元光変調方式,” 電子情報通信学会 OCS 第二種研究会, 2014年7月31日, 東工大大岡山キャンパス蔵前会館 (東京都目黒区)

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

菊池 和朗 (KIKUCHI, Kazuro)

東京大学・大学院工学系研究科・教授

研究者番号 : 50134458