

平成 30 年 6 月 20 日現在

機関番号：33903

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2014～2017

課題番号：26420376

研究課題名(和文) 重み分布を用いた直交振幅変調方式の多元符号化とその復号法

研究課題名(英文) Multiple coding and decoding of quadrature amplitude modulation using weight distribution

研究代表者

小西 たつ美 (KONISHI, Tatsumi)

愛知工業大学・工学部・教授

研究者番号：00340159

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,800,000円

研究成果の概要(和文)：多くのデジタル通信システムで、一度に沢山の情報を伝送できる、多値の直交振幅変調(Quadrature Amplitude Modulation: QAM)が用いられている。本研究ではQAMの全ての二点間の距離分布を、一点からの距離(重み)分布で表す手法を提案し、その手法を用いてQAMの距離構造に最適な符号の高速探索を行っている。また得られた符号の性能を評価し、トレリス符号化変調のための非2元畳み込み符号や、MIMOのための時空間符号等において、優れた符号が得られたことを報告している。

研究成果の概要(英文)：Quadrature Amplitude Modulation (QAM) is applied to many digital communications, because it provides high speed transmission. Firstly, a matched mapping technique for QAM has been proposed. The technique allows to be represented the distances between all pairwise signal points in QAM by the distances between the origin and the other points. The technique offers an easy search for good codes. Thus, new non-binary convolutional codes with the largest minimum free distance have been searched for QAM. The performance of the new codes has been evaluated theoretically and compared with a conventional TCM. The results show the proposed codes are effective. In addition, integer space-time block codes for QAM have been presented. They have been searched for using the determinant and trace design criteria calculated by the matched mapping. The codes have been compared with Golden code and Alamouti code. The results show the proposed codes are effective for high spectral efficiencies.

研究分野：通信工学

キーワード：無線通信システム MIMO QAM 符号化変調 畳み込み符号 時空間符号

1. 研究開始当初の背景

携帯電話や無線 LAN など多くのデジタル通信システムでは、限られた周波数を効率よく利用し、一度に沢山の情報を送信できる直交振幅変調(QAM: Quadrature Amplitude Modulation)が主に用いられている。しかし、QAM の各信号点を符号化や通信方式と結び付ける最適な手法は、まだ十分検討されていない。例えば、QAM の代表的な符号化手法に、信号点にビット系列を写像して、二元符号化と組み合わせる手法があるが、これはある距離(例えば下界)では最適であるものの、QAM の全ての信号点間の距離分布を最適化する符号手法ではない。よって、もし全ての信号点間に対する最適化が可能になれば、QAM を用いた最適な符号化方法や通信方式が、容易に見い出せるようになり、周波数資源や送受信装置のような物理的負担の増加なしで、多くのデジタル通信システムの性能の改善が期待できる。

2. 研究の目的

そこで本研究では、QAM の全ての信号点間のユークリッド距離の分布を、原点からのユークリッド重みの分布として表す手法を提案する。そしてその手法を用いて、QAM を用いた各種符号化変調方式や MIMO (Multiple-Input Multiple-Output) のための時空間符号などの最適化を検討し、より優れた性能を持つ符号や方式を提案し、その性能を検討する。

3. 研究の方法

はじめに、 M -QAM の各信号点に、図 1 のように 0 から $M-1$ までの整数値をラベル付けし(これをナチュラルマッピングと呼ぶ)、全ての 2 点間のユークリッド距離を、原点(0 がラベル付けされた点)からの高々 4 通りのユークリッド重みで表す手法を示す。

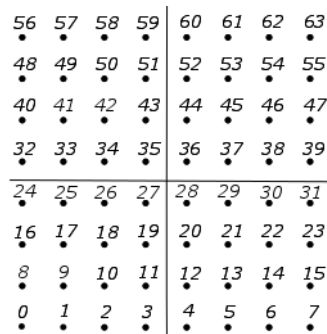


図 1 ナチュラルマッピング (例: 64-QAM)

図 1 の信号点集合において、0 を始点、27 を終点としたベクトルと、そのベクトルと合同で、終点と始点のラベルの差が 27 になるベクトルを、点線で図 2 に示す。この図から分かるように、全ての 2 点間の距離を考慮し計算する場合、24 本の点線のベクトルの始点・終点間の距離は、実線のベクトルの距離で代表して表すことが出来る。しかし、終点と始

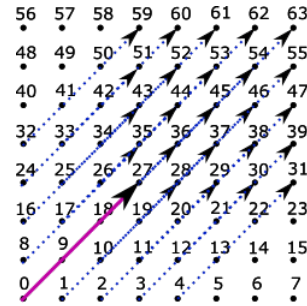


図 2 終点と始点のラベル差が 27 のベクトル

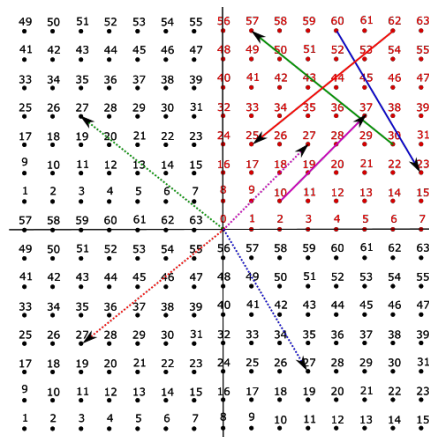


図 3 ラベル差 27 の 4 種類のベクトル

点のラベルの差が 27 になるベクトルは、図 3 の右上の赤のラベルの領域に描かれた、4 本のベクトルが示すように、4 種類存在する。そこで、それらのベクトルを全て原点からのベクトルで表すために、図 3 のように信号点を拡張してみる。ただし、実際の送信信号点集合を表しているのは、軸上の信号点を含んだ第 1 象限であることに注意する。今、終点と始点の座標値の差を (a, b) とすると、各象限のベクトルの大きさ(ユークリッド距離の 2 乗 d^2) は、 M -QAM に対して、 $m = \sqrt{M}$ としたとき

- 第 1 象限: $d^2 = a^2 + b^2$
- 第 2 象限: $d^2 = (m - a)^2 + (b + 1)^2$
- 第 3 象限: $d^2 = (m - a)^2 + (m - b - 1)^2$
- 第 4 象限: $d^2 = a^2 + (m - b)^2$

となり、それぞれの長さのベクトルの本数 n は

- 第 1 象限: $n = (m - a)(m - b)$
- 第 2 象限: $n = a(m - b - 1)$
- 第 3 象限: $n = a(b + 1)$
- 第 4 象限: $n = b(m - a)$

となる。これらの関係式を用いると、全ての 2 点間の距離分布が、原点からの高々 4 通りの距離分布で表すことが可能になる。本研究で

は、この手法を用いることで、各種 QAM のための符号の高速な探索を試みている。

4. 研究成果

本研究課題の主な研究成果には、各種の QAM に対して、(1)トレリス符号化変調方式、(2)MIMO 時空間符号、(3)整数ベクトルを用いた MIMO 空間符号がある。以下にそれらを順に述べる。

(1) 非 2 元畳み込み符号を用いたトレリス符号化 QAM

図 4 に本研究で得られた 64-QAM のトレリス符号器 $C_1 = [5 + 9D, 1 + 2D]$ を示す。この符号器は、ナチュラルマッピングでラベル付けされる元を、符号器の出力元と対応付けるために、64 を法とする整数剰余環上の非 2 元畳み込み符号を用いている。この符号は最小自由ユークリッド距離 15 を持つ。一方、乗算について 65 を法とし、加算については 64 を法とするイレギュラーな演算上の非二元的畳み込み符号に対して、同様に最良符号の探索を行ったところ、最小自由ユークリッド距離が 22 の符号が得られた。その符号器 $C_2 = [1 + 34D, 3 + 51D]$ を図 5 に示す。

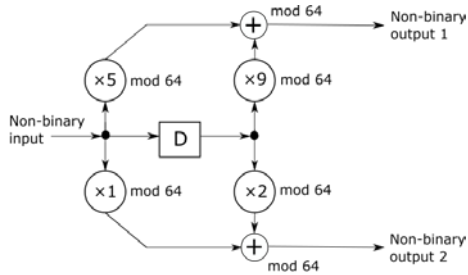


図 4 $C_1 = [5 + 9D, 1 + 2D]$ トレリス符号器

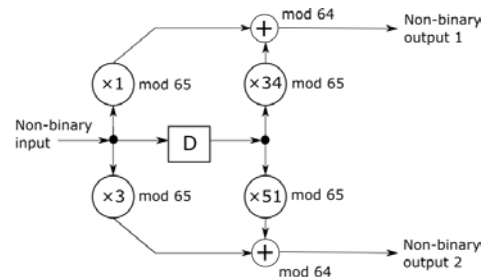


図 5 $C_2 = [1 + 34D, 3 + 51D]$ イレギュラーな乗算を用いたトレリス符号器

次に、白色ガウス雑音において、二つの符号 C_1 と C_2 のシンボル誤り率を比較した結果を図 6 に示す。この図の平均誤り率の理論値は、前章で述べた手法を用いて、全ての誤りパタ

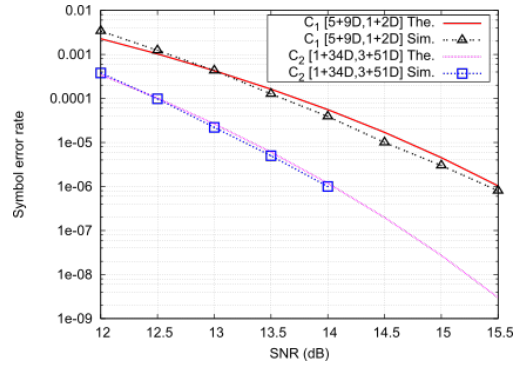


図 6 $C_1 = [5 + 9D, 1 + 2D]$ と $C_2 = [1 + 34D, 3 + 51D]$ のシンボル誤り率の比較

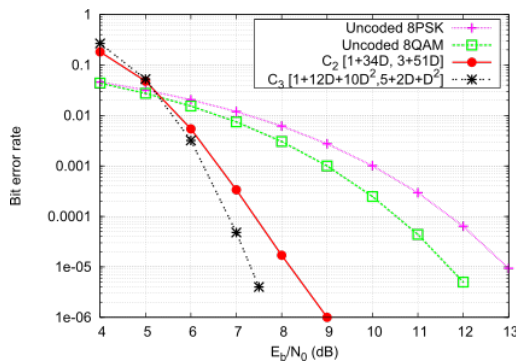


図 7 $C_2 = [1 + 34D, 3 + 51D]$ 、 $C_3 = [1 + 12D + 10D^2, 3 + 51D]$ 符号と無符号化 8PSK、8QAM とのビット誤り率の比較

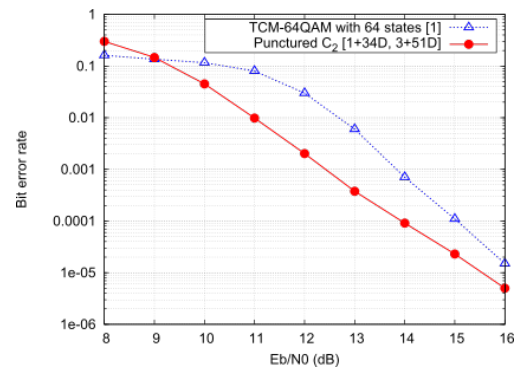


図 8 レート 5/6 の TCM 符号とパンクチャした $C_2 = [1 + 34D, 3 + 51D]$ 符号とのビット誤り率の比較

ーンの誤り率の平均値を計算している。図 6 より、シンボル誤り率が 10^{-6} のとき、イレギュラーな乗算を用いた符号 C_2 が C_1 よりも約 1.5 dB 良い性能を示すことが分かる。

同様に、遅延素子数 $D = 2$ のときの符号では、66 を法とした乗算と 64 を法とした加算から

成る最良符号 $C_3 = [1 + 12D + 10D^2, 3 + 51D]$ が得られている。図 7 に C_2 と C_3 の符号と、無符号化 8PSK、無符号化 8QAM とのビット誤り率を、シミュレーション比較した結果を示す。

最後に、既存の符号化率 5/6 の 64 状態の 64-QAM の TCM 符号と、 C_2 符号をパンクチャし、レートを 5/6 にした 64 状態の 64-QAM 符号のビット誤り率を比較した結果を、図 8 に示す。この結果から、提案符号が従来符号よりも良い性能を持つことが分かった。

(2) MIMO のための整数型時空間符号

次に、提案手法を用いて 16-QAM から 4096-QAM までの信号点集合に対し、送信アンテナ 2 本を用いた 2×2 符号行列の時空間符号を検討した結果を述べる。この符号行列 C_I は、

$$C_I = \begin{bmatrix} g_1 & \beta_2 g_2 \\ g_2 & \beta_1 g_1 \end{bmatrix}$$

と表せる。64-QAM を例に考えると、ここで g_1 と g_2 は、それぞれ 6 ビットの情報ビットを 0 から 63 までの値に変換した値であり、 $\beta_1 g_1$ は、 g_1 に β_1 という固定された値を乗算し、64 で法を取った値となっている。 $\beta_2 g_2$ も同様である。例えば、64-QAM の場合、 $[\beta_1, \beta_2] = [19, 37]$ が良い符号として得られているが、その場合、送信情報ビットから変換した値が $g_1=25$ 、 $g_2=61$ のとき、送信される符号語は、

$$C_I = \begin{bmatrix} 25 & (37 \times 61) \bmod 64 \\ 61 & (19 \times 25) \bmod 64 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 25 & 17 \\ 61 & 27 \end{bmatrix}$$

となり、1 時刻目に 2 本のアンテナから同時に図 1 の 25 と 16 のシンボルが送信され、2 時刻目には 17 と 27 のシンボルが送信される。

最良符号の探索は、提案手法を用いて、全ての符号語ペアの差行列と差行列の共役転置行列との積の最小トレース値を計算し、最大で、かつその式のゼロでない行列式の値の割合が最も少ない符号を選出している。

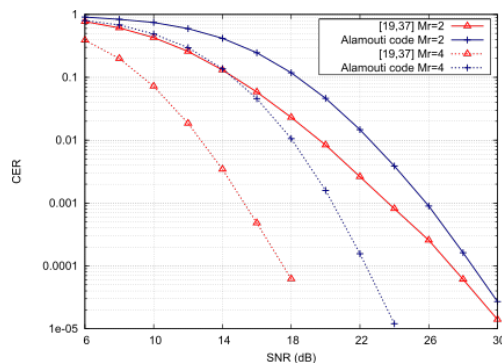


図 9 64-QAM に対する整数型時空間符号と Alamouti 符号の符号誤り率の比較

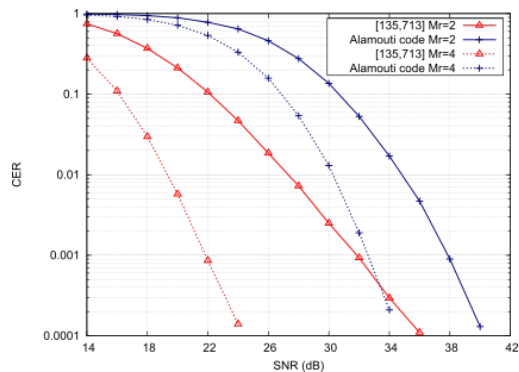


図 10 1024-QAM に対する整数型時空間符号と Alamouti 符号の符号誤り率の比較

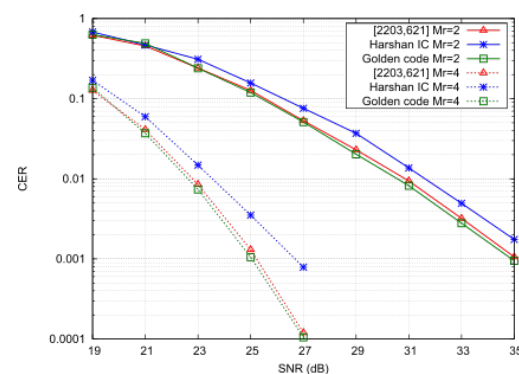


図 11 4096-QAM に対する整数型時空間符号と Harshan 符号、Golden 符号との符号誤り率の比較

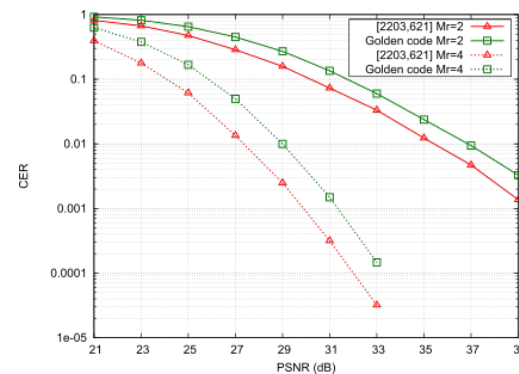


図 12 ピーク電力と雑音電力比を横軸にした場合の提案符号と Golden 符号の比較

図 9 に 64-QAM の符号 $[\beta_1, \beta_2] = [19, 37]$ の符号誤り率を、代表的な時空間符号の一つである Alamouti 符号と比較した結果を示す。Mr は受信アンテナ数を表しており、提案符号は、受信アンテナ数が増えるに従って、より良い性能を示していることが分かる。また図 10 に 1024-QAM の符号 $[\beta_1, \beta_2] = [135, 713]$ のシミュレーション結果を示す。あわせて、

4096-QAM に対する Golden 符号と Hashan 符号との比較を図 11 に示す。Golden 符号にほぼ匹敵する誤り率を示している提案符号 $[\beta_1, \beta_2] = [2203, 621]$ は、Golden 符号よりも、ピーク電力と平均電力の比が小さく、また無理数を用いた演算が必要な Golden 符号と異なり、提案符号は符号化や復号の演算が整数値のみで行えるという利点を持っている。そこで、図 12 に、提案符号と Golden 符号を、ピーク電力対雑音電力比を揃えて横軸に設定し比較した場合の符号誤り率の結果を示す。

ところで、提案符号は Golden 符号と比較すると符号化や復号化の計算量は少ないが、Alamouti 符号のような線形符号と比較した場合、シンボル毎に分離して復号が出来ないというデメリットが存在する。そこで次に、シンボル毎に復号が可能な、ベクトルを用いた MIMO のための空間符号を提案する。

(3) MIMO のための整数型空間符号

ここでは先に提案した 2 行 2 列の時空間符号の対角成分を用いて、以下に示す 2 行 1 列のベクトルを用いた整数型空間符号 C_v について検討した結果を報告する。

$$C_v = \begin{bmatrix} g \\ \beta_1 g \end{bmatrix}$$

この符号のメリットは、シンボル毎に最尤復号が可能である点である。例えば 4096-QAM の符号の場合、時空間符号では、 g_1 と g_2 を同時に復号する必要があるため、各受信符号に対して、 $4096 \times 4096 = 16777216$ 回の比較が必要になるが、シンボル毎の復号が可能な空間符号 C_v では、各受信ベクトルに対し、4096 回の比較で済む。

そこで提案手法を用いて探索した 16-QAM から 4096-QAM までの C_v 符号を同じ ML 復号の計算量を持つ Alamouti 符号と比較した。その結果、シンボル誤り率が 0.001 のとき、256-QAM 以上の多値の場合、受信アンテナ数 2 本と 4 本の双方において、提案する整数空間符号が良い性能を示すことが分かった。また、64-QAM においては、受信アンテナ数が 4 本の場合のみ良い性能が得られた。

図 13 に 256-QAM を送信信号点集合として用いた場合の、Alamouti 符号と整数空間符号のシンボル誤り率を、平均誤り率の理論値と、レイリーフェージング通信路でのシミュレーションで比較した結果を示す。この結果から、2 種類の整数空間符号が、平均誤り率の理論式とほぼ一致した誤り率を示していることが分かる。また、シンボル誤り率が 0.001 で受信アンテナ数が 4 本するとき、Alamouti 符号よりも 6 dB 以上良い結果が得られることがわかった。

同様に図 14 には 1024-QAM の結果を、図 15 には 4096-QAM の結果を示す。これらの結果から、QAM の多値数が増加するにしたがって、整数空間符号の方がさらに良い性能を

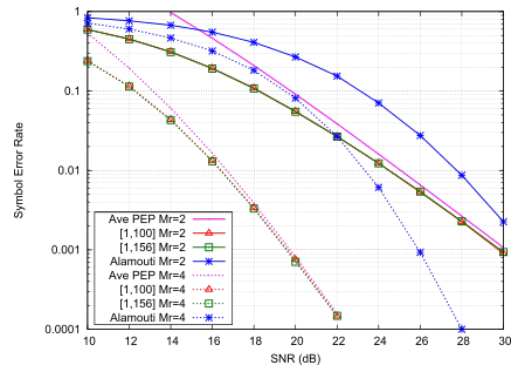


図 13 256-QAM に対する整数型空間符号と Alamouti 符号のシンボル誤り率の比較

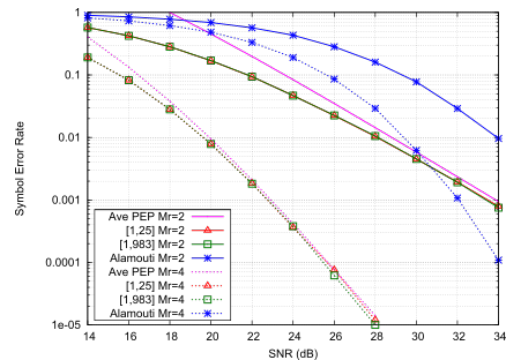


図 14 1024-QAM に対する整数型空間符号と Alamouti 符号のシンボル誤り率の比較

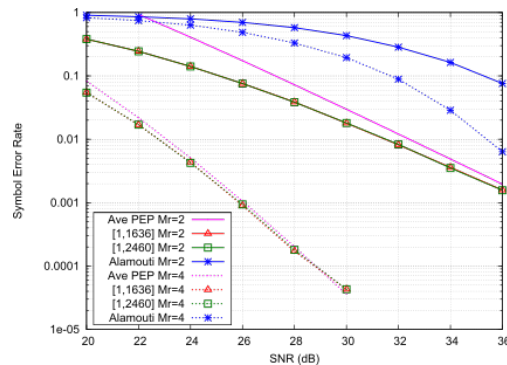


図 15 4096-QAM に対する整数型空間符号と Alamouti 符号のシンボル誤り率の比較

示すようになることがわかった。これは提案手法により、全ての信号点ペアを用いた平均誤り率を用いて、符号の最適化を行っているためである。今後益々求められる情報伝送量が増大するにしがたい、さらに多値化した QAM の需要が増えていくと予想される。よって今後も引き続き、本研究課題で報告した手法に基づく符号の最適化や、提案した符号の実用化への検討を行っていく予定である。

5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 2 件)

① Tatsumi Konishi, “Integer space-time block codes with large trace metrics,” *IEEE Wireless Communications Letters*, vol. 6, no. 5, pp. 686-689, Oct. 2017. (査読有)
DOI: 10.1109/LWC.2017.2731310

② Tatsumi Konishi, “Quasi-linear trellis-coded QAM using a matched mapping,” *IEICE Trans. Fundamentals*, vol. E98-A, no. 4, pp. 1049-1053, Apr. 2015. (査読有)
DOI: 10.1587/transfun.E98.A.1049

[学会発表] (計 18 件)

① Tatsumi Konishi, “A Study on design method of integer codes for providing good transmit diversity,” *IEICE Technical Report RCS2017*, 2018.3.2, YRP (神奈川県)

② Tatsumi Konishi, “Transmit diversity technique using integer codes,” *IEICE SITA 2017*, 2017.11.29, 泉慶 (新潟県)

③ Tatsumi Konishi, “A study on transmit diversity technique using integer vector codes,” *IEICE Technical Report RCS2017*, 2017.10.20, 東北工業大学 (宮城県)

④ Tatsumi Konishi, “Broadcasting in Massive MIMO using integer space-time block codes,” *IEICE Technical Report RCS 2017*, 2017.5.11, 機械振興会館 (東京)

⑤ Tatsumi Konishi, “Space-time block codes with low PAPR,” *IEICE Technical Report RCS2016*, 2017.3.1, 東京工業大学 (東京)

⑥ Tatsumi Konishi, “Full diversity space-time trellis codes for high spectral efficiency MIMO systems,” *IEICE SITA2016*, 2016.12.14, 高山グリーンホテル (岐阜県)

⑦ Tatsumi Konishi, “Efficient integer space-time block codes for PAPR,” *IEICE SITA 2016*, 2016.12.14, 高山グリーンホテル (岐阜県)

⑧ Tatsumi Konishi, “Performance of full diversity space-time trellis codes for 1024-QAM,” *IEICE Technical Report RCS2016*, 2016.5.20, 機械振興会館 (東京)

⑨ 小西 たつ美, 三輪 哲也, “次世代地上放送のための多値 QAM 時空間符号,” 電子情報通信学会, 第 38 回情報理論とその応用シンポジウム *SITA2015*, 2015.11.25, 下電ホテル (岡山県)

⑩ 小西 たつ美, 三輪 哲也, “次世代地上放送のための 4096QAM 時空間符号の検討,” 電子情報通信学会技術研究報告 *RCS2015*, 2015.10.1, YRP (神奈川県)

⑪ Tatsumi Konishi, Tetsuya Miwa, “Performance of 64/256QAM space-time trellis codes using matched mappings,” *IEICE Technical Report IT2015*, 2015.7.13, 東京工業大学 (東京)

⑫ Tatsumi Konishi, Tetsuya Miwa, “Search of 64/256QAM space-time trellis codes using the bit error rate,” *IEICE Technical Report RCS2015*, 2015.5.22, 機械振興会館 (東京)

⑬ Takato Suzuki, Tatsumi Konishi, “High rate MQAM coded modulation scheme,” *IEICE Technical Report RCS2014*, 2015.3.4, 東京工業大学 (東京)

⑭ Tatsumi Konishi, “Error performance and plotkin bound of nonbinary convolutional codes for a trellis coded MQAM,” *IEICE SITA2014*, 2014.12.10, 宇奈月ニューオータニホテル (富山県)

⑮ Tatsumi Konishi, “A coded modulation scheme for 64-QAM with a matched mapping,” *IEICE ISITA2014*, 2014.10.27, メルボルン (オーストラリア) (査読有)

⑯ Tatsumi Konishi, “Distance properties of non-binary convolutional codes for M-QAM coded modulation,” *IEICE Technical Report IT2014*, 2014.9.19, 鳩山荘 (千葉県)

⑰ Tatsumi Konishi, Takato Suzuki, “Design and performance of 64-QAM space-time trellis codes,” *IEICE Technical Report RCS2014*, 2014.8.1, 京都テルサ (京都)

⑱ Tatsumi Konishi, “256-QAM Space-Time Codes using Matched Mapping,” *IEICE Technical Report RCS2014*, 2014.4.18, 名古屋工業大学 (愛知県)

6. 研究組織

(1) 研究代表者

小西 たつ美 (KONISHI, Tatsumi)
愛知工業大学・工学部・教授
研究者番号: 00340159

(2) 研究協力者

三輪 哲也 (MIWA, Tetsuya)
鈴木 貴登 (SUZUKI, Takato)