

平成 29 年 5 月 25 日現在

機関番号：13903

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2014～2016

課題番号：26420355

研究課題名（和文）電波を暗号化する安全かつ高品質なカオス変調方式の研究

研究課題名（英文）Research on chaos coded modulation scheme achieving channel coding gain and physical layer security

研究代表者

岡本 英二（Okamoto, Eiji）

名古屋工業大学・工学（系）研究科（研究院）・准教授

研究者番号：10358963

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 4,000,000円

研究成果の概要（和文）：複数アンテナを用いるMIMO（multiple-input multiple-output）多重伝送において、カオス信号を用いることで高信頼、物理層における高秘匿化を実現するカオスMIMO手法を提案し、その高性能化を実現した。これまで受信側の計算量増加が課題であったが、Mアルゴリズムと呼ばれる計算量削減手法を適用し符号計算量を削減した。またターボ符号化と呼ばれる高品質化手法を適用することで、大幅な伝送誤り率削減を実現した。さらに暗号化能力が十分であることを明らかにした。

研究成果の概要（英文）：We have proposed a chaos multiple-input multiple-output (MIMO) transmission scheme that achieves both channel coding gain and physical layer security. In this research, we improved chaos MIMO scheme. To reduce the decoding complexity, we applied M-algorithm into chaos MIMO. In addition, we compose a turbo coding scheme in chaos MIMO with outer channel codes such as low-density parity check (LDPC) code and realize a large channel coding gain. In regard to security, we analyzed the encryption ability of chaos MIMO and showed that chaos MIMO had sufficient security ability.

研究分野：通信工学

キーワード：無線通信 物理層秘匿性 通信路符号化 MIMO カオス通信 ターボ符号 Mアルゴリズム

1. 研究開始当初の背景

無線通信において、複数アンテナ (multiple-input multiple-output: MIMO) 伝送方式は周波数帯域幅を広げることなく伝送容量を増加させることができるため幅広い無線通信システムに用いられている。さらに、セルラにおける端末間 (device to device: D2D) 通信、ZigBee や無線 LAN、車間通信におけるマルチホップ通信など、近年では短距離無線の需要が増加している。一方、スマートフォンを用いた情報検索、レコメンド機能の普及、オンライン決済など、無線による個人情報の伝送が増加し、無線通信における更なる安全性確保が求められている。しかしながら現在の秘匿性確保は、公開鍵暗号方式や IPsec などのスクランプリングなどによる上位層プロトコルによってなされており、物理層の伝送信号は秘匿されない状態である。上記のような背景においては物理層、つまり伝送信号そのものからの秘匿性確保を行うことが必要であった。申請者らは MIMO 伝送の各アンテナ送信信号にカオス信号を乗算することで、伝送の秘匿性を電波の状態で確保し、なおかつカオスと伝送ビットに相関を持たせることにより誤り率特性を向上させるカオス MIMO (C-MIMO) と呼ばれる手法を構築した。図 1 の送受信アンテナ 2 対 2 の例に示すように、提案手法は既存の MIMO 伝送に比べてビット誤り率を改善させており、さらに鍵信号が誤差を含む場合正常に復号できていないことが分かる。すなわち電波の (物理層の) 秘匿性を有している。これらの実現のために本例では復号計算量が既存手法の 8 倍になっており、これがトレードオフとなる。しかしながら、実無線システムに適用するためにはさらなる復号計算量の削減と、外部に接続する通信路符号化技術の適用が必要であるが、この 2 つの検討がまだなされていない。さらに安全性はカオス暗号の原理に基づいており、その安全性の評価もまだ十分なされていなかった。

2. 研究の目的

上で述べたように、無線通信において複数アンテナ伝送方式が広く用いられており、更なる周波数利用効率の向上が期待されている。一方、現在無線物理層の秘匿はなされておらず、より安全な通信実現のためにはこの点の改善が必要であった。そこで、申請者らがこれまで提案してきた、物理層つまり電波の秘匿性を有し伝送効率を落とすことなく伝送品質を向上させることのできる複数アンテナカオス変調方式の更なる性能向上を図ることを目的とする。具体的には復号計算量の削減を行い、外部通信路符号接続による伝送品質の改善を行い、カオス通信の安全性を向上させる。以上により高品質電波暗号化変調方式を実現し、周波数利用効率の高度化、安全な無線通信の進歩に寄与する。

具体的には、物理層の秘匿性を有し、伝送

効率を落とすことなく伝送品質を向上させることのできるカオス MIMO 伝送方式の性能向上を図ることを目的とする。各検討項目は以下の通りである。

(A) 復号計算量の削減手法を適用し、

(B) 標準化技術としても採用されている外部通信路符号接続によるターボ符号化伝送を構築し伝送品質の改善を行う。さらに

(C) カオス通信の安全性評価を行い、安全性を向上させる改善手法を構築する。

以上により高品質電波暗号化変調方式を実現する。

3. 研究の方法

1) 復号計算量削減手法の適用 (目的 A)

提案手法の机上検討と計算機シミュレーションによる復号性能改善を行う。提案手法は変調により物理層秘匿性を付加するという機能追加と、周波数利用効率を向上させることのできる符号化利得を同時に提供できるが、その原理は複数の伝送シンボルを束ねて一括して変調・復調を行うブロック伝送を行うことであるため、そのトレードオフとして復号計算量がブロック長に対して指数関数的に増加するという課題があり、これが実用化に対する障壁となっている。例えば最低でも 1bit/symbol 伝送におけるブロック長 2 で $2^2=4$ 倍の復号計算量が既存の非秘匿 MIMO 伝送に対して必要になる。そこでこの復号計算量を、符号化利得性能を減ずることなく今までの検討から 1/2 に半減させることを目標とする。なおこの復号計算量の削減は、物理層秘匿性の性能に影響を及ぼすことはない。具体的には復号手法に QRM-MLD (complexity-reduced MLD with QR decomposition and M-algorithm) と呼ばれる計算量削減手法を適用し、現在用いている最尤系列推定 (maximum likelihood sequence estimation: MLSE) 復号からの復号計算量を、ビット誤り率性能を落とすことなく半減させる。さらに所要計算量をパラメータにした時の性能劣化量もシミュレーションにより明らかにし、実装時の予想性能を明らかにする。本項の検討結果は国際会議と論文投稿、特許出願により順次発表する。

2) 外部通信路符号接続によるターボ符号化伝送の構築 (目的 B)

現在セルラ方式、デジタル放送などでターボ符号化伝送が幅広く標準化技術として採用されている。ターボ原理を用いた伝送は信号対雑音電力比 (signal to noise ratio: SNR) が低くてもビット誤り率を理論的限界付近まで低減させることができる。さらに符号化率を変動させることで、各設定 SNR 動作点における周波数利用効率を高くすることができる。したがって提案手法におけるターボ伝送の実現により、今までに無い超高品質電波暗号化変調方式を実現することができる。そこで、提案手法への、ターボ伝送に必要な

要素である対数尤度比 (log-likelihood ratio: LLR) の導入を行う。これまでの検討により、カオス変調にそのままビット LLR やシンボル LLR と呼ばれる、ビットやシンボル情報の尤度を導入することは、カオス変調の畳み込み効果が影響して正常に動作しないことが分っている。つまりビット/シンボル LLR は前後のビット/シンボル情報が独立であることが必要条件になっているが、カオス変調ではこれが満たされない。したがって今までカオス変調において暗号化効果を保ったまま LLR を導入した例はなかった。本検討では新たにシーケンス LLR というブロック伝送ごとの LLR を導入することでこれを解決し、秘匿性を保持したまま LLR を導入する。そして外部に LLR を用いる一般的な畳み込み符号か LDPC (low-density parity check) 符号を接続することによりターボ原理を動作させ、ビット誤り率特性を既存手法に比べ向上させる。これにより既存の非秘匿 MIMO ターボ伝送に比べ 3dB 以上の符号化利得を、秘匿性を保ったまま周波数利用効率を損ねることなく達成させる。このとき 1) の成果も導入し、通信装置に実装可能な復号計算量削減手法を計算機シミュレーションにより構築する。なお初期検討として現在シーケンス LLR の有効性はある程度確認できている。本項の検討結果は国際会議と論文投稿、特許出願により順次発表する。

3) 提案手法の安全性評価と安全性改善手法の構築 (目的C)

提案手法の「電波の暗号化」の改善を行う。提案手法はカオス信号による計算量的安全性に基づく暗号化が行われており、その強度はカオス暗号の強度に等しい。これまでの検討では共通鍵の類似度に対する通信路容量により安全性を評価し、情報理論的安全性が確保されていることを示してきたが、計算量的安全性の評価がほとんど行われていなかった。そこで、まず提案手法の計算量的な安全性評価を机上検討と計算機シミュレーションにより実施する。カオス暗号の強度が現行の上位レイヤで実装されている AES (Advanced Encryption Standard) 暗号などに比べて低いことがよく知られている事実であるため、提案手法単体の暗号強度も改善が必要となる評価結果が出るのが予想される。提案手法は物理層秘匿性であり上位レイヤ暗号を併用できることから、このことが通信方式として致命的な問題となるわけではないが、提案手法単体の強度を上げることにより更なる安全性の確保が可能となる、もしくは上位レイヤ暗号プロトコルの省略を可能とするため大いに有効である。したがって、物理層における付加的な暗号化手法の適用を行い、計算量的安全性を向上させる手法を構築する。具体的には、カオス暗号は複数の独立したカオスを用いることで強度が増すという報告がなされているため、カオス

信号の複数化を行う。また既存のスクランプリング技術の適用、情報理論的安全性を確保する既存の伝搬路係数を用いた暗号化手法の適用なども実施する。このとき同時に符号化利得を向上させる機能を付加できないかどうかとも検討する。これにより既存の上位レイヤ暗号化手法と同様の計算量的安全性を、物理層において提案手法単体で保有することを実現する。そして計算機シミュレーションにより安全性の向上を確認する。本項の検討結果は国際会議と論文投稿、特許出願により順次発表する。

4. 研究成果

図 1, 2 にそれぞれ外部符号を接続したカオス MIMO 送信機と軟値を用いてターボ復号を行う受信機の構成を示す。図 1 の送信機において、 K ビットの伝送系列 $\mathbf{u} = \{u_0, \dots, u_{K-1}\}$, $u_i \in \{0,1\}$ を通信路符号化し、 $N (>K)$ ビット符号化系列 $\mathbf{u}' = \{u'_0, \dots, u'_{N-1}\}$, $u'_i \in \{0,1\}$ を得る。

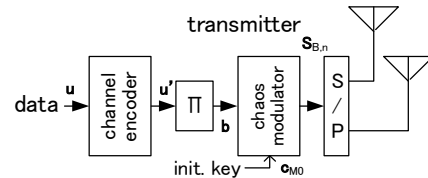


図 1 接続符号化カオス MIMO 送信機[22]

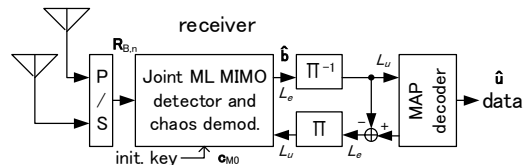


図 2 カオス MIMO 軟値復号器[22]

そして \mathbf{u}' をビットインターリーブにより順序変更した系列を $\mathbf{b} = \{b_0, \dots, b_{N-1}\}$ とする。これを 1 bit/sym/antenna の効率によるブロック長 B のカオス MIMO ブロック伝送により $N_t B$ ビットずつ分割して伝送する。ここで N_t は送信アンテナ数である。ブロック伝送を行うことによりカオス MIMO は伝送レートの低下が無くとも符号化利得を得ることができる。 n 番目 ($0 \leq n \leq (N/N_t B) - 1$) のブロックに対応する送信ビット系列を $\mathbf{b}_n = \{b_{n,0}, \dots, b_{n,N_t B-1}\} = \{b_{n,N_t B}, \dots, b_{(n+1)N_t B-1}\}$ とする。この系列を次小節のカオス変調により複素シンボル系列 $\mathbf{s}_n = \{s_{n,0}, \dots, s_{n,N_t B-1}\}$ に変換する。カオス変調には送受信側で共有した鍵信号を初期値として用いる。したがって本手法は共通鍵暗号方式である。そして MIMO 多重伝送により N_t シンボルずつ B 回に分けて伝送する。時刻 k ($0 \leq k \leq B-1$) における MIMO 送信ベクトル $\mathbf{s}_n(k)$ は

$$\mathbf{s}_n(k) = \{s_1(k), \dots, s_{N_t}(k)\}^T = \{s_{n,kN_t}, \dots, s_{n,(k+1)N_t-1}\}^T$$
 となる。ここで $s_{i_t}(k)$ は時刻 k に i_t ($1 \leq i_t \leq N_t$)

番目のアンテナから送信されるシンボルであり、 T は転置である。すると1送信ブロックは $\mathbf{S}_{B,n} = [s_n(0), \dots, s_n(B-1)]$ と表記できる。

受信側では対応する1送信ブロックごとに軟値最尤系列推定を行い、外部符号とのターボ繰り返し復号により復号する。

1) 復号計算量削減手法の適用 (目的A)

あるカオス進行数 I_{te} に対し、復号側で通常の MLSE を行った場合は探索数が $2^{qN_t B}$ となり、変調指数 q 、送信アンテナ数 N_t とブロック長 B に対して指数関数的に増加する。そのためこれまでの検討では $N_t=2$ 、 $B=4$ 程度の長さのカオス MIMO 伝送ブロック長しか構成できず、符号化利得が制限されていた。そこで M アルゴリズムの適用によりブロック長 B に対する復号計算量を低減させ、 B を伸ばすことを考える。カオス変調においては隣接符号語間距離を延ばすために伝送シンボルに1ブロック内の複数の伝送ビットが割り当てられているため、復号探索時の受信 MIMO ベクトルの進行に対する状態数増加は変則的であり、 k ($0 \leq k \leq B-1$) 番目のベクトル受信時の探索状態数は、 $0 \leq k < B/2-1$ のとき $2^{2q(N_t k + N_t + 1)}$ 、 $k \geq B/2-1$ のとき $2^{qN_t B}$ となる。 $q=1$ のとき各送信シンボルに割り当てられるビット数は4つであり、それぞれ1ビットずつずれている。これにより畳み込み符号化の効果を得ることができ符号化利得が拡大するが、復号探索時はシンボルの進行に対して前半に状態数が増えることとなる。 $q=1$ では初めの3シンボルですべてのビット系列が現れることになる。そのため k に対する状態数が上記のように前半から拡大的になる。このような状態数進行に対し、 B_i ($0 < B_i < B/2-1$) なる最大の状態数をつかさどる変数を設定し、 $B_i < k < B/2-1$ のとき M アルゴリズムによって k の進行に対して毎回状態数を $1/(2^{2qN_t})$ に削減することで計算量を抑え、ブロック長 B を伸ばすことのできる復号法を構築した。提案手法では保持する状態数が最大で $2^{2q(N_t B_i + N_t + 1)}$ に制限される。

例えば $q=1$ 、 $N_t=2$ 、 $B=8$ とすると、既存手法では 65536 状態のものが、 $B_i=1,2$ のときそれぞれ 1024、16384 状態となる。

2) 外部通信路符号接続によるターボ符号化伝送の構築 (目的B)

計算機シミュレーションによって特性を確認する。送受信アンテナ数 N_t 、 N_r はそれぞれ 2 の 2x2 MIMO 通信路とし、ブロック長は $B=2, 4$ および、M アルゴリズムを適用した $B=8$ (残留パス指数 $B=5$ の計算量相当) とした。伝送チャネルはシンボルとアンテナに対する i.i.d. の 1 波レイリーフェージングと仮定した。1 シンボルを生成する際に進行させるカオスの繰り返し数は基本を $I_{te} = 100$ 回と

し、最小 2 乗ユークリッド距離を延ばすために範囲 $M=2$ のカオス進行数可変手法を適用した。ブロック長を $B=4$ とし、外部符号として符号化率 1/2、符号長 2000 の再帰的組織畳み込み (recursive-systematic code :RSC) を接続した場合の特性を算出した。復号は軟値で行い、カオス MIMO 復号と RSC 復号間で 20 回のターボ繰り返し復号を行った。結果を図 3 に示す。

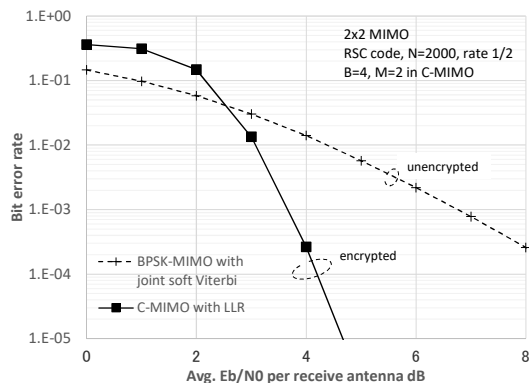


図 3 符号化率 1/2 の再帰的組織畳み込み符号を接続した場合のカオス MIMO 伝送のビット誤り率特性

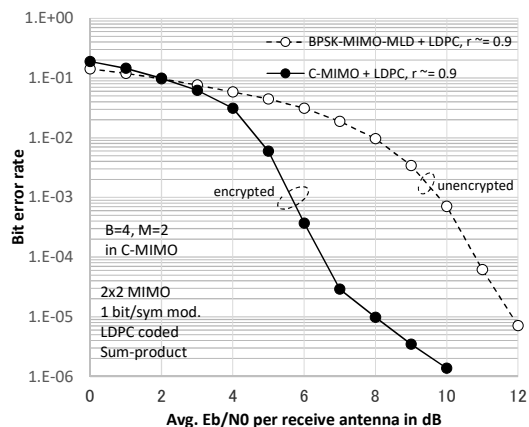


図 4 LDPC 符号を接続した場合のカオス MIMO 伝送のビット誤り率特性

カオス MIMO は BER の低減効果が得られており、 10^{-3} のビット誤り率において既存 BPSK-MIMO 手法と比べておよそ 3 dB の利得が得られていることが分かる。ターボ機構を用いた場合の特性改善は低 E_b/N_0 領域での特性改善につながるため有効であると考えられる。最後に情報ビット長 $K=866$ 、符号長 $N=960$ 、符号化率約 0.9 の low-density parity check (LDPC) 符号を接続した場合の特性も算出した。結果を図 4 に示す。RSC と同様にカオス MIMO 手法の BER 特性が BPSK-MIMO-MLD に比べて大きく改善されている。

3) 提案手法の安全性評価と安全性改善手法の構築 (目的C)

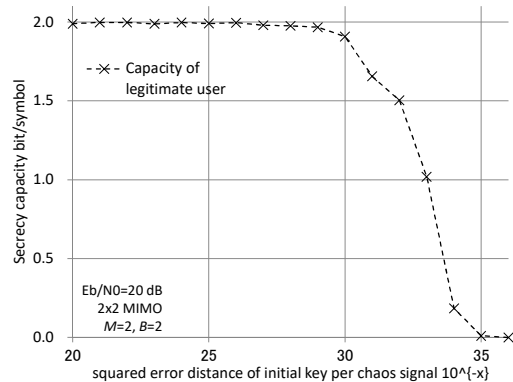


図 5 初期値の近接に対する正規送受信対の秘密容量

カオス MIMO 手法の暗号性能について考察する。double floating 型を仮定したときに、第三者による共通鍵と復号の総当たり探索には $2^{(128N_i B)}$ 回の計算が必要であり、 $N_i = 2$ 、 $B = 4$ とすると $2^{1024} \approx 10^{308}$ 回となり共通鍵の強度として RSA (Rivest-Shamir-Adleman) 暗号基準を満たす計算量を有している。したがって物理層により計算量的安全性を確保していることになる。

次に共通鍵の近接による安全性の低下について確認する。第三者が何らかの手段により正規受信局のカオス初期値 c_{00} に近い値を持っていると仮定する。浮動小数点演算の計算機シミュレーションにおいて $E_b/N_0 = 20$ dB のとき、第三者がカオス初期値 c_{00} の実部と虚部が微小距離だけずれて持っているとする。このときの横軸を実部及び虚部の正規初期値からの 2 乗ユークリッド距離にしたときの、第三者端末のビット誤り率から算出した等価的な正規受信局の秘密容量を図 5 に示す。このように正規の初期値から 2 乗ユークリッド距離が少なくとも 10^{-26} に近接するまでは容量が保たれていることが分かる。すなわち第三者のカオス初期値がごく近隣にあるとき以外は安全であることになる。 10^{-26} は極めて近い値であるため、全く同一の共通鍵が保有されない限り安全性が保持されるといえる。

以上のように、カオスに基づく非線形信号処理を活用することにより、物理層秘匿性と通信路符号化効果を両立する伝送手法を構築できた。

5. 主な発表論文等
〔雑誌論文〕(計 4 件)

1. E. Okamoto and N. Horiike, "Application of MAP decoding for chaos MIMO scheme to improve error rate performance," IEICE Commun. Express, vol. 5, no. 10, pp. 365-370, Oct. 2016. 査読有
2. E. Okamoto and N. Horiike, "Performance improvement of chaos

MIMO scheme using advanced stochastic characteristics," IEICE Commun. Express, vol. 5, no. 10, pp. 371-377, Oct. 2016. 査読有

3. 岡本英二, "無線通信システムにおける非線形信号処理を用いた性能向上," 信学会基礎・境界ソサイエティ Fundamentals Review, vol. 9, no. 4, pp. 350-363, Apr. 2016. 査読有
4. E. Okamoto and Y. Inaba, "A chaos MIMO transmission scheme using turbo principle for secure channel-coded transmission," IEICE Trans. Commun., vol. E98-B, no. 8, pp. 1482-1491, Aug. 2015. 査読有

〔学会発表〕(計 20 件)

1. N. Horiike, E. Okamoto, and T. Yamamoto, "Performance Improvement of Chaos MIMO Transmission scheme by LDPC code Concatenation Using Symbol MAP Detection and STBC," Proc. Int'l Conf. on Information Networking (ICOIN2017), pp. 200-205, Jan. 2017. 査読有
2. 岡本英二, 堀池直登, "[招待講演] 電波暗号化機能を有する即時送信型多数接続 machine type communications (MTC) の性能改善に関する検討," 信学技報, vol. 116, no. 383, RCS2016-217, pp. 47-52, Dec. 2016. 査読無
3. 岡本英二, 國友啓佑, "[依頼講演] 物理層秘匿性を有する SCMA 伝送方式の検討," 信学技報, vol. 116, no. 11, RCS2016-8, pp. 41-46, Apr. 2016. 査読無
4. 堀池直登, 岡本英二, 山本哲矢, "STBC と LDPC 符号を併用したカオス MIMO 伝送システムにおける EXIT チャートを用いた特性解析の検討," 信学技報, vol. 116, no. 383, RCS2016-227, pp. 105-110, Dec. 2016. 査読無
5. 堀池直登, 岡本英二, 山本哲矢, "外部符号と STBC の併用によるカオス MIMO 伝送方式の特性改善の検討," 第 39 回情報理論とその応用シンポジウム (SITA2016), 4.2.4, pp. 220-225, Dec. 2016. 査読無
6. 岡本英二, 堀池直登, 山本哲矢, "Massive machine type communications (mMTC) のための物理層秘匿性を有する grant free 非直交多元接続方式の検討," 信学技報, vol. 116, no. 257, RCS2016-178, pp. 137-142, Oct. 2016. 査読無
7. 堀池直登, 岡本英二, 山本哲矢, 星野正幸, "カオス MIMO 伝送方式へのシンボル MAP 検出を用いた LDPC 符号接続の検討," 信学会 2016 年ソサイエテ

- ィ大会, B-5-18, Sept. 2016. 査読無
8. 岡本英二, 堀池直登, 山本哲矢, 星野正幸, “物理層秘匿性を有するショートパケット伝送方式の検討,” 信学会 2016 年ソサイエティ大会, B-5-19, Sept. 2016. 査読無
 9. 堀池直登, 岡本英二, 山本哲矢, 星野正幸, “符号連接カオス MIMO 伝送方式のスループット性能評価,” H28 年度電気・電子・情報関係学会東海支部連合大会, B4-3, Sept. 2016. 査読無
 10. 堀池直登, 岡本英二, “多値変調カオス MIMO 伝送方式への外部符号連接による特性改善の検討,” 信学技報, vol. 116, no. 110, RCS2016-61, pp. 87-92, June 2016. 査読無
 11. 岡本英二, 國友啓佑, “カオスを用いたセキュア SCMA 伝送方式の検討,” 信学会 2016 年総合大会, B-5-97, Mar. 2016. 査読無
 12. 堀池直登, 岡本英二, “Box-Muller 法を用いたカオス MIMO 伝送における高速伝送化の検討,” 信学会 2016 年総合大会, B-5-98, Mar. 2016. 査読無
 13. 岡本英二, “カオス MIMO 伝送方式に対するシンボル MAP 復号適用の検討,” 信学技報, vol. 115, no. 475, CCS2015-74, pp. 39-44, Mar. 2016. 査読無
 14. E. Okamoto, “An EXIT Chart Analysis of Turbo-Coded Chaos MIMO Transmission Scheme,” Proc. IEICE International Symposium on Nonlinear Theory and its Applications (NOLTA 2015), pp. 341-344, Dec. 2015. 査読有
 15. 岡本英二, “統計的性質の改善によるカオス MIMO 伝送方式の性能向上の検討,” 信学技報, vol. 115, no. 288, RCS2015-195, pp. 31-36, Nov. 2015. 査読無
 16. 岡本英二, “ターボ原理を用いるカオス MIMO 伝送手法の EXIT 解析に関する検討,” 信学技報, vol. 115, no. 113, RCS2015-77, pp. 185-190, June 2015. 査読無
 17. 稲葉悠馬, 岡本英二, “カオス MIMO 伝送における安全な共通鍵伝送の検討,” 信学技報, vol. 114, no. 295, RCS2014-202, pp. 31-36, Nov. 2014. 査読無
 18. 岡本英二, 稲葉悠馬, “カオス MIMO 伝送方式への M アルゴリズム適用による復号計算量削減の検討,” 信学技報, vol. 114, no. 254, RCS2014-181, pp. 141-146, Oct. 2014. 査読無
 19. E. Okamoto and Y. Inaba, “Performance Improvement of Chaos MIMO Transmission Scheme Using Space-Time Block Coding,” Proc.

International Symposium on Nonlinear Theory and its Applications (NOLTA 2014), pp. 707-710, Sept. 2014. 査読有

20. 岡本英二, 稲葉悠馬, “カオス MIMO 伝送方式の復号計算量削減の検討,” 信学会 2014 年ソサイエティ大会, B-5-4, Sept. 2014. 査読無

[その他]

研究協力者の受賞 3 件

1. 堀池直登, 平成 28 年度電子情報通信学会東海支部学生研究奨励賞受賞, June 2017.
2. 稲葉悠馬, 平成 26 年度名古屋工業大学基金学生研究奨励金学長表彰受賞 (学術活動部門), Feb. 2015.
3. 稲葉悠馬, 平成 25 年度電子情報通信学会東海支部学生研究奨励賞受賞, June 2014.

ホームページ等

<http://okamoto.web.nitech.ac.jp>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

岡本 英二 (OKAMOTO, Eiji)
名古屋工業大学・大学院工学研究科・准教授
研究者番号: 10358963

(4) 研究協力者

稲葉 悠馬 (INABA, Yuma)
堀池 直登 (HORIIKE, Naoto)