

高次元カオスを利用した通信システムに関する研究

西 尾 芳 文 徳島大学 工学部電気電子工学科 助教授

1 まえがき

近年、カオスを工学システムに応用しようという機運が高まっており、様々な基礎的研究が行われてきている[1][4]。中でもカオスを利用したカオス通信方式に関する研究は、カオス信号のもつ特徴を積極的に利用したもので、カオスの工学的応用の中で最も期待されているものの一つである[5][9]。カオス発生システムは、通常、1パラメータの調整のみで、様々な統計的性質をもつ時系列を生成することができる。また、同じパラメータでも、初期値を変化させれば発生する時系列は大きく異なり、理論上は無限個の系列を生成させることが可能である。相関特性の優れた多数の時系列を生成できればスペクトル拡散通信システムの拡散系列への応用が可能である。また、カオスを生成する確定的なダイナミクスを利用した、ノイズ除去や同期獲得の簡単化についても研究がなされている。

一方、位相空間内で複数の不安定な方向をもつカオスはハイパーカオスと呼ばれ、通常のカオスより複雑な現象として注目を集め、その発生メカニズムや通常のカオスからハイパーカオスに遷移する分岐ルートについての研究が行われている[10][11]。ハイパーカオスを含む高次元カオスは広いスペクトル特性をもち、また、同時に信号の不安定性を増やすことから、カオス通信システムに適用することにより、より干渉に強い通信システムが実現できることが期待できる。

本研究では、高次元カオスを利用した干渉に強い通信システムを実現することを念頭に置き、

- ・高次元システムに発生するカオスのマルコフチェインによるモデリング手法
- ・高次元カオスを用いたカオスシフトキーイング通信システム
- ・高次元カオスを利用した UWB レーダ
- ・高次元カオスを利用した暗号方式

を提案し、その特徴、及び、性能についての調査を行った。本報告では、「高次元カオスを用いたカオスシフトキーイング通信システム」と「高次元カオスを利用した UWB レーダ」についての結果を示す。

2 高次元カオスを用いたカオスシフトキーイング通信システム

本研究では、離散数学モデルより生成されるカオス系列を拡散系列として用いたスペクトル拡散通信方式について調査を行う。

2.1 カオス系列

カオス系列としては、一次元写像と二次元写像の二種類の離散写像より生成される時系列を用いる。

一次元写像としては、よく知られた Logistic Map を用いる。Logistic Map は次式で表すことができる。

$$x_{n+1} = 1 - 2x_n^2 \quad (1)$$

Logistic Map と生成されるカオス系列の例を図 1 に示す。

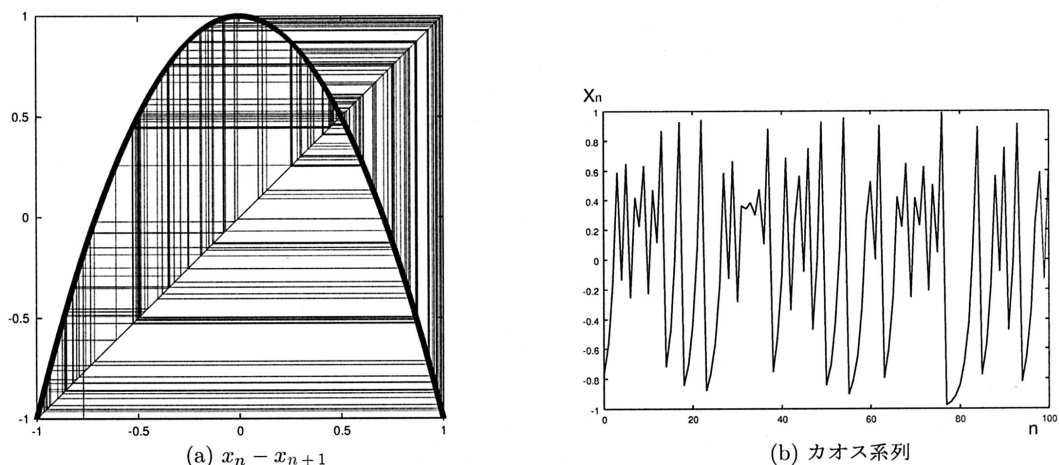


図 1 : Logistic Map

二次元写像としては、やはり二乗項を含む非線形方程式

$$x_{n+1} = 1 - 0.45x_n - 1.2x_{n-1}^2 \quad (2)$$

により記述される 2 D マップを用いる。この 2 D マップにより生成されたカオス系列を二次元平面に射影したアトラクタと時間軸に沿って表示した系列を図 2 に示す。

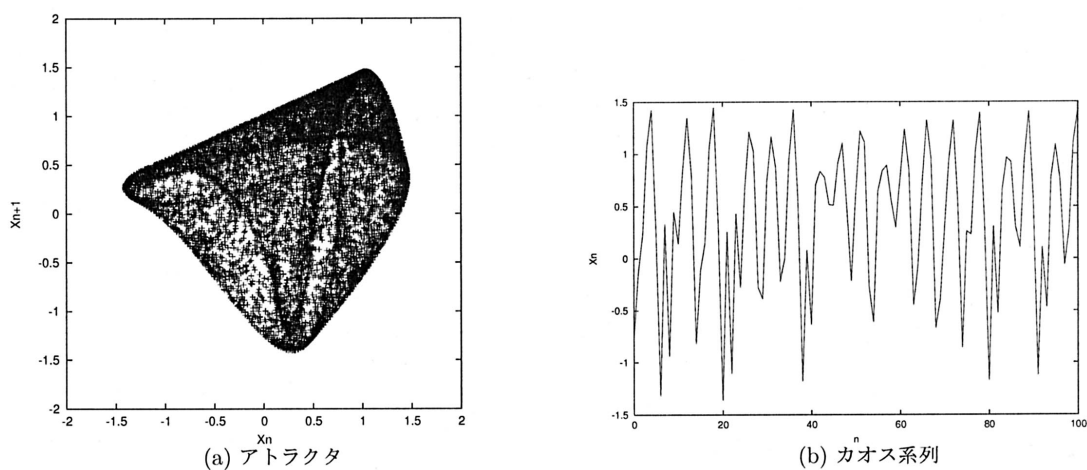


図 2 : 2D マップ

2.2 通信システム

図 3 に通信システムのブロック図を示す。各ブロックの説明を以下に示す。

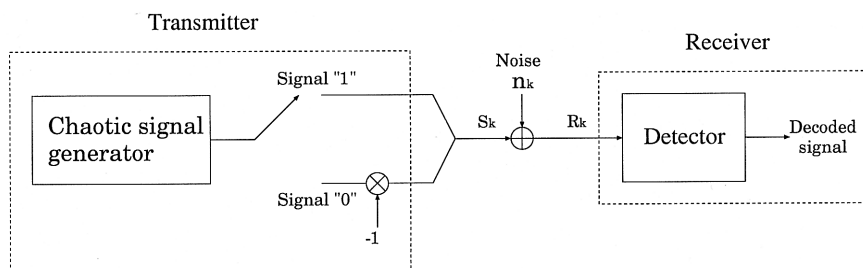


図 3 : 通信システム

2.2.1 送信機

カオス信号発生器には、上で述べた二種類の離散写像を用いる。情報信号“1”を送信する場合、カオス生成離散写像より得られるカオス系列で信号を拡散する。そして、情報信号“0”を送信する場合は、カオス生成離散写像より得られるカオス系列が $[-1, 1]$ 区間で反転するように作られた写像から得られる系列で信号を拡散する。1bit の情報を送信するために、 N 個のカオス信号が作られる。ここで N はカオス系列長である。よって、送信信号は

$$\mathbf{S} = (S_1 S_2 \cdots S_N) \quad (3)$$

と書くことができる。

2.2.2 伝送路とノイズ

本研究では、伝送路でのノイズは、図4に示す付加的白色ガウス雑音 (additive white Gaussian noise; 以下 AWGN) のみと仮定する。送信信号に付加されるノイズを

$$\mathbf{n} = (n_1 n_2 \cdots n_N) \quad (4)$$

書くと、受信信号は

$$\mathbf{R} = (R_1 R_2 \cdots R_N) = \mathbf{S} + \mathbf{n} \quad (5)$$

と表すことができる。

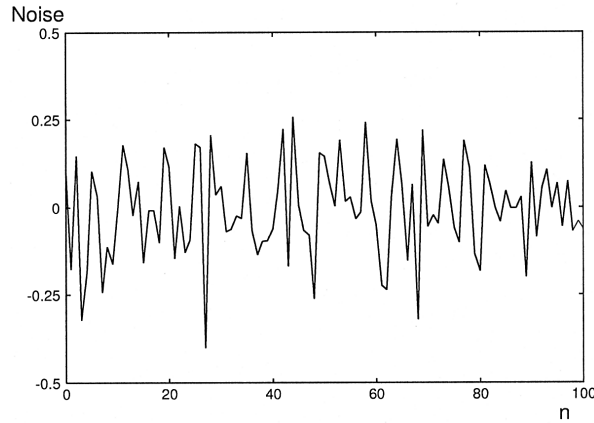


図4：Additive White Gaussian Noise (AWGN)

2.2.3 受信機

本研究では、時系列を生成するカオスダイナミクスを利用することにより、同期を必要としないで信号を検出するシンプルな受信機を提案する。すなわち、信号を受信する度に、以下に示す判定値を計算し、系列長分足し合わせる。最終的に、 L_0 の和と L_1 の和を比較し、小さい方が、受信シンボルであるという判定を行う。

Logistic Map の判定

$$\begin{cases} L_1 = |R_{k+1} - 1 + 2R_k^2| \\ L_0 = |R_{k+1} + 1 - 2R_k^2| \end{cases} \quad (6)$$

2 Dマップの判定

$$\begin{cases} L_1 = |R_{k+1} - 1 - 0.45R_k - 1.2R_{k-1}^2| \\ L_0 = |R_{k+1} + 1 - 0.45R_k + 1.2R_{k-1}^2| \end{cases} \quad (7)$$

2.3 シミュレーション結果

シミュレーション条件を以下のように設定した。

- ・ 情報信号は 10000bit
- ・ 系列長 N は, 4, 8, 16, 32, 64, 128 に変化

系列長 N を固定し, E_b/N_0 を 1~25[dB] に変化させてシミュレーションを行った。ここで, E_b は情報 1bit あたりの平均電力であり, N_0 はノイズの平均電力である。ビット誤り率 (以下 BER) の結果を図 5 と図 6 に示す。

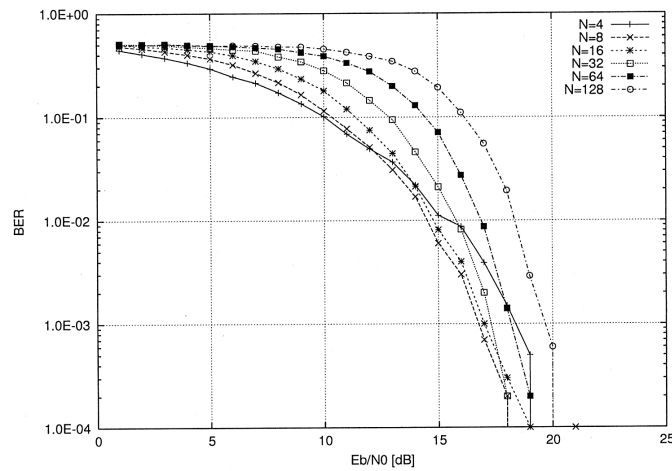


図 5 : Logistic map

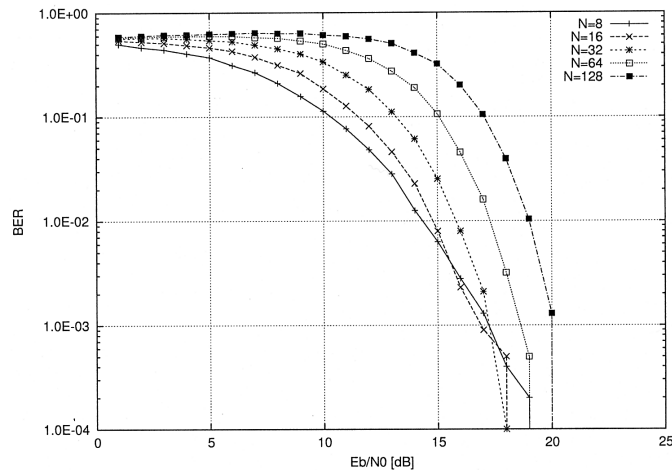


図 6 : 2d-map

詳細は省略するが, 従来のカオスダイナミクスを利用した最適受信機では, 系列長を長くすると品質が極端に劣化することが問題視されていたが, 本方式では, Logistic Map, 2 Dマップのどちらも, 系列長を長くしたときの品質の劣化が改善されている。

また, 本研究では, カオス写像を高次元化することにより, 通信品質が改善されることを期待したが, 結果は逆で, わずかながら, Logistic Map の方が, 良い結果となった。しかしながら, 利用している写像の特性を完全に公平にすることは困難であり, 高次元化による品質向上の可能性を否定することはできない。さらに, 現在, 本研究の結果を踏まえて, より通信品質を向上させる 2 Dマップ用の受信機的设计を行っているところであり,

詳細な比較は今後の課題としたい。

3 高次元カオスを利用した UWB レーダ

近年、UWB 技術を用いてレーダを実現する UWB ランダムノイズレーダが研究されている。本研究では、離散数学モデルより生成されるカオス系列を超広帯域信号として利用したカオス UWB レーダを提案し、その調査を行う。

3.1 システム

図 7 にシステムモデルを示す。OSC1 で 1-2GHz の帯域をもつ高次元カオス系列を生成する。カオス系列を生成するシステムとしては、簡単な二次元写像を用いる。OSC1 からの出力は、PD1 により二つに分けられる。一方は、ある一定の遅延を持たせた DL (delay line) を通り、OSC2 で生成した 160MHz の正弦波と MXR1 に入力する。この部分では周波数変換が行われており、下側波帯のみを用いる。もう一方の信号はアンテナから放出する AMP1 へ入力され、送信アンテナによりターゲット方向に放出される。レーダシステムに反射してくるエコー信号は受信アンテナから受信される。エコー信号には、検出の対象となる物体からの反射波の他に、さまざまな物体からの反射波（クラッタ）が含まれる。受信アンテナからの信号と MXR1 の出力を MXR2 に入力する。MXR2 で周波数変換が行われ、その出力は 160MHz を中心に 5MHz の帯域幅をもつ BPF を通した後、Detector へと入力される。

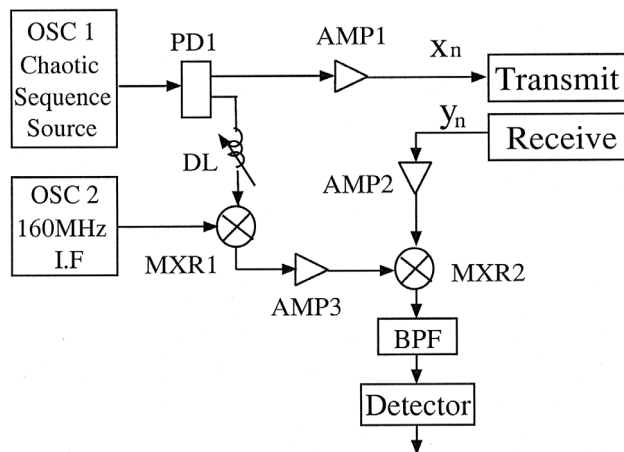


図 7：カオス UWB レーダシステム

3.2 シミュレーション結果

送信信号である高次元カオス系列の系列長 N を $N=100$ に固定し、シミュレーションを行った。ただし、クラッタは、AWGN のみであると仮定している。

受信信号 y_n に送信信号 x_n が含まれている比率を以下のようにパラメータ ρ で示す。

$$\rho = \frac{\sigma_1}{\sigma_2} \quad (8)$$

σ_1 : 送信信号 x_n の分散

σ_2 : 受信信号 y_n の分散

ただし、受信信号がターゲットからの反射波のみで理想的な通信の場合は、 $\rho=1.0$ とする。また、 $\rho=0.0$ は、エコー信号がクラッタのみの場合に対応する。本レーダでは、ターゲットの存否の判定は、確率密度分布にスレッシュホールドを設けて、スレッシュホールドを超える確率で判定する。従って、 $\rho=0.0$ においてスレッシュホールドを超える確率は、誤警報確率となる。また、 $\rho=0.0$ 以外のときに、スレッシュホールドを超える確率は、検出確率となる。

図 8(a) に ρ を変化させて、シミュレーションを行ったときの BPF 通過後の確率密度分布を示す。シミュレー

ションでは、初期値を毎回変化させ、1000回の試行を行っている。シミュレーション結果より、カオス UWB レーダにおいて二つの分布は互いに重なりがなく、すなわち、スレッショルドを適当な値に設定することで、ターゲットの検出確率を 1 とすることができる。図 8(b)には、広帯域ノイズを送信信号として用いた UWB ランダムノイズレーダの結果を示す。両者を比較すると、本システムが UWB ランダムノイズレーダとほぼ同様の性能をもつことがわかる。現在、カオスダイナミクスを利用したノイズクリーニング手法を、本レーダで受信した信号に適用する手法を組み込んだシステムを設計中であり、この手法が有効に働けば、UWB ランダムノイズレーダよりも検出確率が高く、かつ、誤警報確率の低い UWB レーダとなることが期待される。

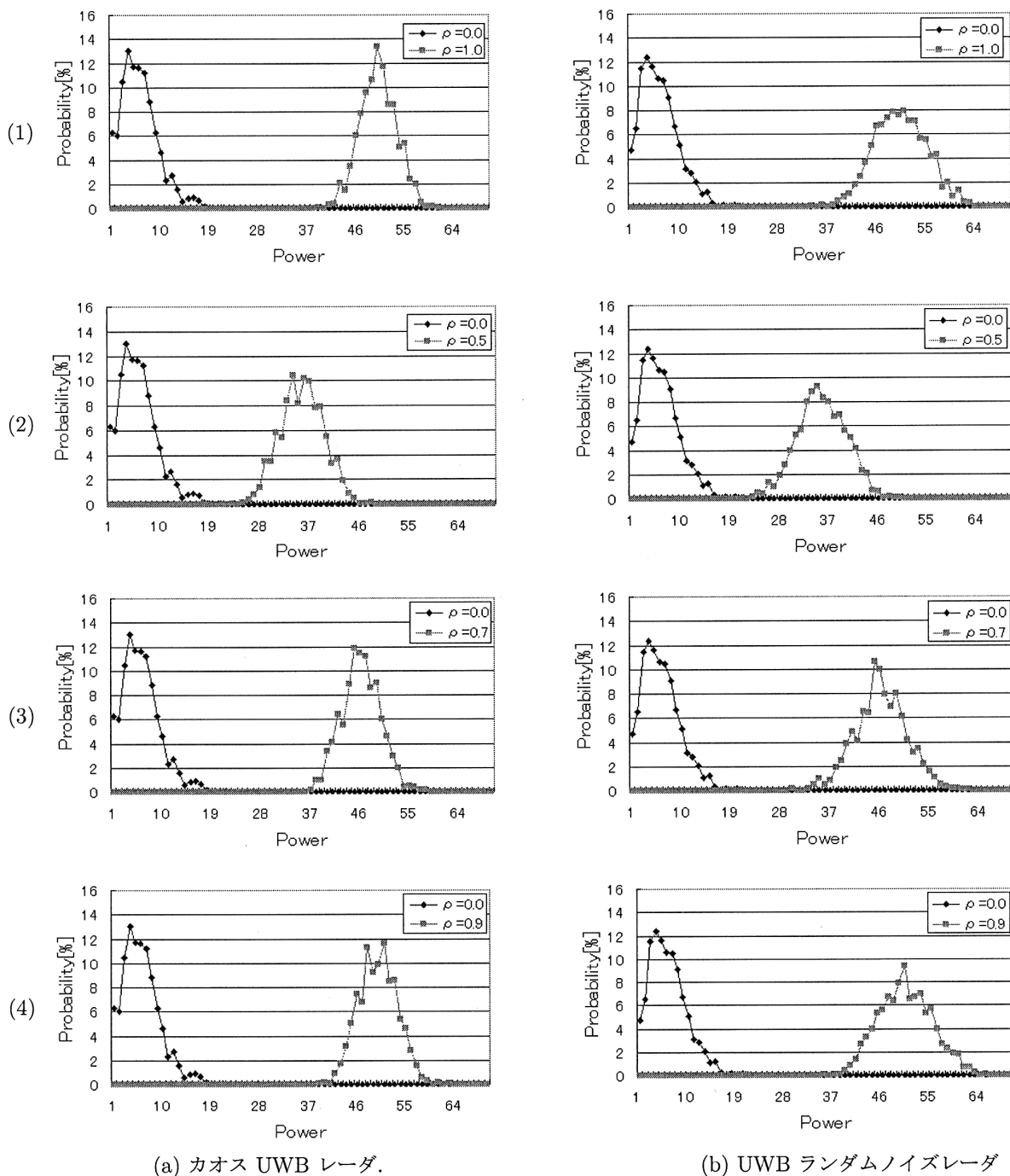


図 8：確率密度分布 (N=100)

4 あとがき

本研究では、高次元カオスを利用した干渉に強い通信システムを実現することを念頭に置き、

- ・高次元システムに発生するカオスのマルコフチェーンによるモデリング手法
- ・高次元カオスを用いたカオスシフトキーイング通信システム
- ・高次元カオスを利用した UWB レーダ
- ・高次元カオスを利用した暗号方式

を提案し、解析を行った。回路実験、及び、様々な条件下での計算機シミュレーションを行い、これらのシステムの有効性、また、その特徴や性能を明らかにした。同時に、これらのシステムのもつ問題点も明らかにすることができた。本研究で得られた成果は、そのほとんどが基礎的なものであり、直ちに既存の通信システムに組み込まれたりするものではないが、将来、カオス通信システムが利用されるときには、参考とされることが期待できる。

参考文献

- [1] Tohru Ikeguchi, Keiichi Sato, Mikio Hasegawa and Kazuyuki Aihara, "Chaotic Optimization for Quadratic Assignment Problems," Proc. IEEE International Symposium on Circuits and Systems, vol. 3, pp. 469-472, May 2002.
- [2] Alexander L. Baranovski and Wolfgang Schwarz, "Chaotic and Random Point Processes: Analysis, Design, and Applications to Switching Systems," IEEE Transactions on Circuits and Systems I, vol. 50, no. 8, pp. 1081-1088, Aug. 2003.
- [3] Di He and Henry Leung, "A Novel CFAR Intrusion Detection Method Using Chaotic Stochastic Resonance," Proc. IEEE International Symposium on Circuits and Systems, vol. 4, pp. 589-592, May 2004.
- [4] Ding Liu, Haipeng Ren and Xiaoyan Liu, "Chaos Control in Permanent Magnet Synchronous Motor," Proc. IEEE International Symposium on Circuits and Systems, vol. 4, pp. 732-735, May 2004.
- [5] Sergio Allegari, Riccardo Rovatti and Gianluca Setti, "Spectral Properties of Chaos-Based FM Signals: Theory and Simulation Results," IEEE Transactions on Circuits and Systems I, vol. 50, no. 1, pp. 3-15, Jan. 2003.
- [6] Ljupco Kocarev and Goce Jakimoski, "Pseudorandom Bits Generated by Chaotic Maps," IEEE Transactions on Circuits and Systems I, vol. 50, no. 1, pp. 123-126, Jan. 2003.
- [7] K. Li, Y. C. Soh and Z. G. Li, "Chaotic Cryptosystem with High Sensitivity to Parameter Mismatch," IEEE Transactions on Circuits and Systems I, vol. 50, no. 4, pp. 579-583, Apr. 2003.
- [8] Francis C. M. Lau, Kai Y. Cheong and Chi K. Tse, "Permutation-Based DCSK and Multiple-Access DC-SK Systems," IEEE Transactions on Circuits and Systems I, vol. 50, no. 6, pp. 733-742, Jun. 2003.
- [9] Anthony J. Lawrance and Gan Ohama, "Exact Calculation of Bit Error Rates in Communication Systems with Chaotic Modulation," IEEE Transactions on Circuits and Systems I, vol. 50, no. 11, pp. 1391-1400, Nov. 2003.
- [10] Yoshifumi Nishio, Shinsaku Mori and Toshimichi Saito, "Extremely Simple Hyperchaos Generators Including One Diode," Proc. IEEE International Symposium on Circuits and Systems, vol. 6, pp. 2797-2800, May 1992.
- [11] T. Kapitaniak, K.-E. Thylwe, I. Cohen and J. Wojewoda, "Chaos-Hyperchaos Transition," Chaos, Solitons and Fractals, vol. 5, pp. 2003-2011, 1995.

〈発 表 資 料〉

題 名	掲 載 誌 ・ 学 会 名 等	発 表 年 月
インターミッテンシー・カオスのマルコフ・チェーンによるモデリング	回路とシステム軽井沢ワークショップ論文 集, pp.13-18	2003年 4 月
カオス系列を利用したメモリに関する研究	電子情報通信学会技術研究報告 WBS2003-27 & SAT2003-19, pp.21-24	2003年 6 月
Markov Chain Modeling of Intermittency Chaos and its Application to Hopfield NN for QAP	Proceedings of European Conference on Circuit Theory and Design (ECCTD'03), vol.2, pp.57-60	2003年 9 月
Signal Detection by Coupled Chaotic Circuits	Proceedings of European Conference on Circuit Theory and Design (ECCTD'03), vol.2, pp.414-417	2003年 9 月
カオス系列を利用した測位システム	電気関係学会四国支部連合大会講演論文 集, no.1-20, p.20	2003年10月
カオス写像を利用した暗号システムに関する研究	電気関係学会四国支部連合大会講演論文 集, no.1-21, p.21	2003年10月
Markov Chain Model of Synchronization States in Coupled Chaotic Circuits	電気関係学会四国支部連合大会講演論文 集, no.1-23, p.23	2003年10月
Multiplexed Chaotic Signal Detection by Coupled Chaotic Circuits	電気関係学会四国支部連合大会講演論文 集, no.17-9, p.349	2003年10月
Markov Chain Model of Phase Transition in Coupled Chaotic Circuits	電子情報通信学会技術研究報告 NLP2003-141, pp.17-20	2003年12月
Analysis of a Cryptosystem Using a Chaotic Map Extended to Two Dimensions	Proceedings of RISP International Workshop on Nonlinear Circuits and Signal Processing (NCSP'04), pp.73-76	2004年 3 月
Research on Suboptimal Receivers for Chaos Shift Keying	Proceedings of RISP International Workshop on Nonlinear Circuits and Signal Processing (NCSP'04), pp.265-268	2004年 3 月
Research on a Positioning Using Chaotic Sequence	Proceedings of RISP International Workshop on Nonlinear Circuits and Signal Processing (NCSP'04), pp.269-271	2004年 3 月
Response of Coupled Chaotic Circuits to Various Type Signals	Proceedings of RISP International Workshop on Nonlinear Circuits and Signal Processing (NCSP'04), pp.273-276	2004年 3 月
カオス信号を利用した UWB レーダシステム	電子情報通信学会総合大会講演論文 集, no.SA-2-6, pp.S11-S12	2004年 3 月
Markov Chain Modeling of Intermittency Chaos and its Application to Hopfield NN	IEICE Transactions on Fundamentals, vol.E87-A, no.4, pp.774-779	2004年 4 月