

## 研究速報

## マルチパス通信路に沿った高次元カオス同期通信

中村 一彦<sup>†</sup> (学生員) 宮嶋 照行<sup>††</sup> (正員)山中 一雄<sup>††</sup>Chaotic Synchronization Based Communications along  
Multipath ChannelsKazuhiko NAKAMURA<sup>†</sup>, Student Member,Teruyuki MIYAJIMA<sup>††</sup>, Member, andKazuo YAMANAKA<sup>††</sup>, Nonmember<sup>†</sup> 茨城大学大学院理工学研究科, 日立市

Graduate School of Science and Engineering, Ibaraki University, 4-12-1 Naka-narusawa-cho, Hitachi-shi, 316-8511 Japan

<sup>††</sup> 茨城大学工学部システム工学科, 日立市

Department of Systems Engineering, Faculty of Engineering, Ibaraki University, 4-12-1 Naka-narusawa-cho, Hitachi-shi, 316-8511 Japan

あらまし 通信路に符号間干渉がある場合に, 送受信機の高次元カオスを同期させることのできる通信方式を用いると, pre-RAKE により符号間干渉による劣化を防ぐことができる. 提案方式の有効性を計算機シミュレーションにより示している.

キーワード カオス同期, カオス通信, pre-RAKE

## 1. ま え が き

ランダムで広帯域なカオス信号を用いるカオス通信には, 干渉に強くセキュアな通信が期待できる. また, 送受信機が比較的簡易な構成となる利点をもつ. 近年盛んに検討されているカオス同期通信とは, 送信側と受信側のカオスシステムを同期させることで情報データの変復調を行う方法である [1]~[3].

カオス同期通信に関する問題の一つに, マルチパス通信路のような符号間干渉がある通信路における, カオス同期の困難性が挙げられる. この問題に対し, 文献 [2] では 1 次元カオスシステムの場合について, 送信側のフィードバック信号を通信路特性に基づいて修正することで, カオス同期を達成する方法が検討されている. 高次元カオスを利用したカオス同期通信についてはまだ検討されていないが, 高次元カオスを利用できれば, 多重通信 [3] が可能となり, より多くの種類のカオスシステムが利用可能となる.

ところで, カオス同期が達成されても, 符号間干渉による劣化が生じる. スペクトル拡散通信では, 分散した信号成分を合成する RAKE を用いることで, 符号間干渉による性能劣化を防ぐことができる [2], [4]. 更に, 送信側で通信路特性が既知ならば, pre-RAKE [5] を利用することで, 可搬性や省スペース性が求められる

受信側において簡易な装置構成が可能になる.

本論文では, 高次元カオスを利用した通信路特性に加え pre-RAKE combiner 出力によるフィードバック信号の修正を行うカオス同期通信を提案する.

## 2. 通信システムの構成

本論文では, 次のような符号間干渉のある通信路について検討する.

$$r(k) = \sum_{m=0}^M c_m s(k-m) \quad (1)$$

ここで,  $r(k)$  は受信信号,  $s(k)$  は送信信号,  $c_m$  は各到来波の強さ,  $M$  は直接波以外の到来波の数である. また, 雑音は無視できると仮定する.

図 1 に, 提案するカオス通信システムのブロック図を示す. 2 値情報データ  $b(l) \in \{-1, +1\}$ ,  $l = 1, 2, \dots$  を 1 bit 送信するごとに  $L$  サンプルのカオス信号を用いる. 送信側では, 次のような  $n$  次元離散時間カオスシステムを用いてカオス信号を生成する.

$$x_i(k+1) = a_i x_i(k) + f_i(u(k)), \quad i \in D, \quad (2)$$

$$x_j(k+1) = a_j x_j(k) + f_j(u(k), \mathbf{x}_I(k)), \quad j \notin D \quad (3)$$

ここで,  $D = \{1, 2, \dots, p\}$ ,  $p \leq n$ ,  $a_i$  と  $a_j$  は絶対値が 1 未満の定数,  $\mathbf{x}_I(k) = [x_1(k) \ x_2(k) \ \dots \ x_p(k)]$ ,  $f_i: R^1 \rightarrow R^1$  と  $f_j: R^{p+1} \rightarrow R^1$  は有界な 1 価の非

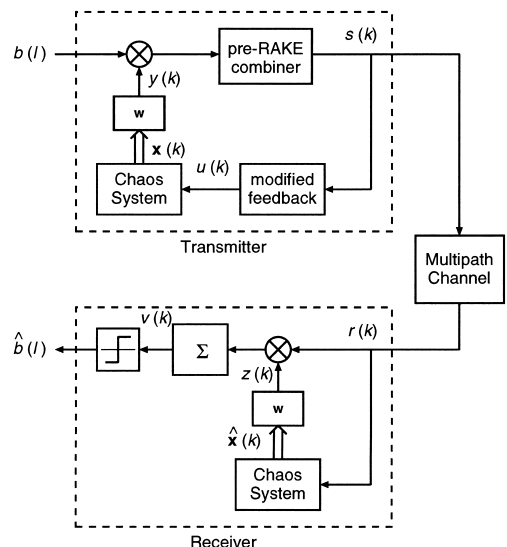


図 1 提案システムのブロック図

Fig. 1 Block diagram of proposed system.

線形写像であり,  $x_i(k)$  と  $x_j(k)$  がそれぞれカオスになるよう決定する.

符号間干渉がない場合は, フィードバック信号  $u(k)$  を,

$$u(k) = b \left( \left\lfloor \frac{k}{L} \right\rfloor \right) \sum_{d=1}^n x_d(k) \quad (4)$$

と選ぶことで同期する [2], [3]. ここで,  $\lfloor x \rfloor$  は  $x$  を超えない最大整数を表す. しかしながら, 符号間干渉があると同期しない. そこで, フィードバック信号を次のように修正することを提案する.

$$u(k) = \sum_{m=0}^M c_m s(k-m), \quad (5)$$

$$s(k) = \sum_{h=0}^M c_{M-h} b \left( \left\lfloor \frac{k-h}{L} \right\rfloor \right) y(k-h), \quad (6)$$

$$y(k) = \mathbf{w}\mathbf{x}(k) \quad (7)$$

ここで,  $y(k)$  はカオスシステムの出力信号,  $\mathbf{x}(k) = [x_1(k) \ x_2(k) \ \cdots \ x_n(k)]$ ,  $\mathbf{w} \in R^{1 \times n}$  はカオスシステムの出力係数,  $s(k)$  は送信信号であり, pre-RAKE combiner の出力である. 受信側におけるカオス同期の達成と, 単一の相関器による最大比合成を可能にするために, pre-RAKE combiner の影響も考慮されている.

受信側では, 送信側と等しいカオスシステムを用意する.

$$\hat{x}_i(k+1) = a_i \hat{x}_i(k) + f_i(r(k)), \quad i \in D, \quad (8)$$

$$\hat{x}_j(k+1) = a_j \hat{x}_j(k) + f_j(r(k), \hat{\mathbf{x}}_I(k)), \quad j \notin D, \quad (9)$$

$$z(k) = \mathbf{w}\hat{\mathbf{x}}(k) \quad (10)$$

ここで,  $\hat{\mathbf{x}}_I(k) = [\hat{x}_1(k) \ \hat{x}_2(k) \ \cdots \ \hat{x}_p(k)]$ ,  $\hat{\mathbf{x}}(k) = [\hat{x}_1(k) \ \hat{x}_2(k) \ \cdots \ \hat{x}_n(k)]$  である. カオス同期は 2 段階で行われ, まず  $\hat{x}_i(k)$  が  $x_i(k)$  に同期した後,  $\hat{x}_j(k)$  が  $x_j(k)$  に同期する. まず,  $i \in D$  について  $x_i(k)$  と  $\hat{x}_i(k)$  の誤差は修正フィードバック (5) により  $r(k)$  と  $u(k)$  が等しいので,

$$\hat{x}_i(k+1) - x_i(k+1) = a_i(\hat{x}_i(k) - x_i(k)) \quad (11)$$

となり,  $|a_i| < 1$  であることから,

$$\lim_{k \rightarrow \infty} \{\hat{x}_i(k) - x_i(k)\} = 0 \quad (12)$$

となる. 次に  $j \notin D$  について  $x_j(k)$  と  $\hat{x}_j(k)$  の誤差は, 式 (11) により  $\hat{\mathbf{x}}_I(k) - \mathbf{x}_I(k) \rightarrow 0$  となることから

$$\lim_{k \rightarrow \infty} \{\hat{x}_j(k) - x_j(k)\} = 0 \quad (13)$$

となる.

情報データの推定に相関検波を利用する. 相関器出力  $v(k)$  は次のように表される.

$$v(k) = \sum_{d=\lfloor \frac{k-M}{L} \rfloor L+M}^k r(d)z(d-M). \quad (14)$$

情報データの推定値  $\hat{b}(l)$  は次のように得られる.

$$\hat{b}(l) = \text{sgn}(v(lL-1+M)) \quad (15)$$

ここで,  $\text{sgn}(x)$  は  $x < 0$  で  $-1$ ,  $x \geq 0$  で  $+1$  となる関数である. カオス同期が達成されると  $z(k) \rightarrow y(k)$  となるので, 推定時点  $k = lL-1+M$  における相関器出力  $v(k)$  は

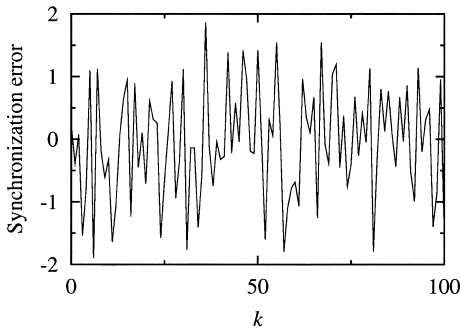
$$\begin{aligned} v(lL-1+M) &= b(l) \sum_{m=0}^M c_m^2 \cdot \epsilon_M(l) \\ &+ \sum_{m=0}^M \sum_{\substack{h=0 \\ h \neq M-m}}^M c_m c_{M-h} \cdot \epsilon_{m+h,M}(l) \end{aligned} \quad (16)$$

$$\begin{aligned} \epsilon_i(l) &= \sum_{d=(l-1)L+M}^{lL-1+M} y^2(d-i) \\ \epsilon_{i,j}(l) &= \sum_{d=(l-1)L+M}^{lL-1+M} b \left( \left\lfloor \frac{d-m-h}{L} \right\rfloor \right) \\ &\times y(d-i)y(d-j) \end{aligned} \quad (17) \quad (18)$$

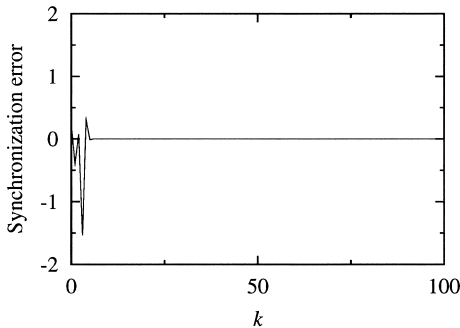
となる. 式 (16) において, 第 1 項は希望信号成分, 第 2 項は干渉成分である. カオスのランダム性から  $\epsilon_{i,j}$  が  $\epsilon_i$  よりも十分小さくなるので, 情報データが正しく推定できると期待できる. また, 式 (16) の第 1 項から, 相関器出力の最大比合成 [4] を行っていることが分かる.

### 3. 計算機シミュレーション

提案システムの動作を確認するために, 計算機シミュレーションを行う. パラメータは  $n = 2$ ,  $a_1 = -0.1$ ,  $a_2 = -0.1$ ,  $M = 1$ ,  $c_1 = 0.5$ ,  $\mathbf{w} = (1 \ 1)$ ,  $f_1(u) = 1 - 2|g(u)|$ ,  $f_2(u) = 2g(u) - \text{sgn}(g(u))$ ,



(a) Feedback signal (4)



(b) Modified feedback signal (5)

図2 同期誤差  $\hat{x}_1(k) - x_1(k)$ .  $M = 1$ ,  $L = 50$ ,  $c_0 = 1$ ,  $c_1 = 0.5$ Fig. 2 Synchronization error  $\hat{x}_1(k) - x_1(k)$ .  $M = 1$ ,  $L = 50$ ,  $c_0 = 1$ ,  $c_1 = 0.5$ .

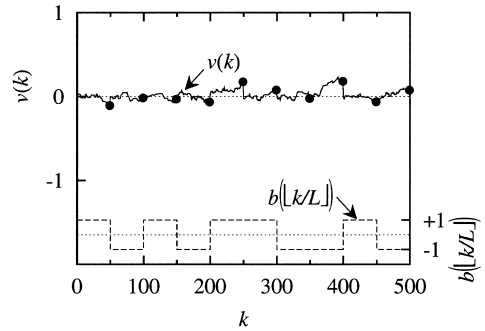
$g(u)$  は  $u$  の小数部分を返す関数である. 図2にカオス同期誤差  $\hat{x}_1(k) - x_1(k)$  を示す. なお, 比較のためフィードバック信号を修正しない場合として式(4)による結果も併せて示す. 図2を見ると, 修正フィードバック信号(5)を用いると速やかに同期が達成されていることが分かる. 次に相関器出力を図3に示す. なお図3内の“●”は情報データの推定時点での相関器出力  $v(k)$  を表している. 図3より, 情報データに対応した相関器出力が得られていることが分かる.

#### 4. む す び

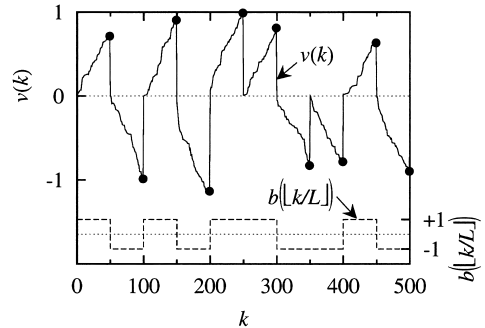
本論文では, マルチパス通信路における高次元カオス同期通信方式を提案し, その動作を計算機シミュレーションにより確認した. pre-RAKE による効果には, 相関器出力の SNR 改善も期待でき, そのような通信路雑音のある場合についての検討が今後の課題となる.

#### 文 献

- [1] T. Ushio, T. Innami, and S. Kodama, “Chaos shift



(a) Feedback signal (4)



(b) Modified feedback signal (5)

図3 相関器出力  $v(k)$  と情報データ  $b(\lfloor k/L \rfloor)$ .  $M = 1$ ,  $L = 50$ ,  $c_0 = 1$ ,  $c_1 = 0.5$ , “●” は情報データの推定時点を表すFig. 3 Correlator output  $v(k)$  and information data  $b(\lfloor k/L \rfloor)$ .  $M = 1$ ,  $L = 50$ ,  $c_0 = 1$ ,  $c_1 = 0.5$ . “●” indicates the point for estimating information data.

keying based on in-phase and anti-phase chaotic synchronization,” IEICE Trans. Fundamentals, vol.E79-A, no.10, pp.1689–1693, Oct. 1996.

- [2] K. Nakamura, T. Miyajima, N. Suzuki, and K. Yamanaka, “Communication systems using chaotic synchronization in multipath channels,” Proc. 1999 NOLTA, vol.1, pp.223–226, Nov. 1999.
- [3] 中村一彦, 宮嶋照行, 山中一雄, “カオスを用いたデジタル多重通信方式,” 信学論 (A), vol.J82-A, no.9, pp.1483–1485, Sept. 1999.
- [4] J.G. Proakis, Digital communications, McGraw-Hill, New York, 1989.
- [5] R. Esmailzadeh and M. Nakagawa, “Pre-RAKE diversity combination for direct sequence spread spectrum mobile communications systems,” IEICE Trans. Commun., vol.E76-B, no.8, pp.1008–1015, Aug. 1993.

(平成 15 年 7 月 22 日受付, 10 月 29 日再受付,  
16 年 1 月 23 日最終原稿受付)