

COMPORTAMENTO DE SISTEMAS DE COMUNICAÇÃO DIGITAL USANDO SINAIS CAÓTICOS EM CANAL RUIDOSO

Greta Augat Abib e Marcio Eisencraft

Centro de Engenharia, Modelagem e Ciências Sociais Aplicadas
Universidade Federal do ABC, Santo André, Brasil
greta.abib@ufabc.edu.br e marcio.eisencraft@ufabc.edu.br

Palavras chave: Caos, sincronismo, sistema de comunicação digital, mapas, ruído.

Introdução

Os sinais caóticos são determinísticos, aperiódicos e sensíveis às condições iniciais (Alligood *et al.*, 2006). Mostram-se adequados para a utilização em aplicações que requerem segurança, devido à sua dificuldade de predição e a serem confundíveis com o ruído no canal (Tam *et al.*, 2006).

Neste trabalho, avalia-se o desempenho de um sistema de comunicação binário utilizando sincronismo caótico baseado no proposto em (Eisencraft *et al.*, 2009) quando o canal de comunicação apresenta Ruído Branco Gaussiano Aditivo (AWGN - *Additive White Gaussian Noise*). Os resultados são mensurados em termos de Taxa de Erro de Bit (BER - *Bit Error Rate*).

O artigo está dividido da seguinte forma: na próxima sessão o sistema de comunicação digital utilizado é sucintamente descrito. A seguir, na seção Simulações Computacionais, são apresentadas as curvas de BER obtidas. Finalmente, são traçadas algumas conclusões e trabalhos futuros na seção que fecha o trabalho.

Sistema de Comunicação Digital Utilizado Caos

O método de sincronização mestre-escravo de Wu e Chua (Wu & Chua, 1993) adaptado para sistemas de tempo discreto, propõe que o sistema mestre seja descrito pela equação

$$\mathbf{x}(n+1) = \mathbf{A}\mathbf{x}(n) + \mathbf{b} + \mathbf{f}(\mathbf{x}(n)), \quad (1)$$

enquanto o sistema escravo, que é dependente de $\mathbf{x}(n)$, seja escrito como

$$\mathbf{y}(n+1) = \mathbf{A}\mathbf{y}(n) + \mathbf{b} + \mathbf{f}(\mathbf{x}(n)), \quad (2)$$

em que $n \in \mathbb{N}$, $\{\mathbf{x}(n), \mathbf{y}(n)\} \subset \mathbb{R}^K$,

$$\mathbf{x}(n) = [x_1(n), \dots, x_k(n)]^T, \mathbf{y}(n) = [y_1(n), \dots, y_k(n)]^T.$$

A matriz $\mathbf{A}_{K \times K}$ e o vetor $\mathbf{b}_{K \times 1}$ são constantes. A função $f(\cdot)$ de $\mathbb{R}^K \rightarrow \mathbb{R}^K$ é não linear.

O sincronismo é alcançado quando a equação da dinâmica de erro $\mathbf{e}(n) \triangleq \mathbf{x}(n) - \mathbf{y}(n) = \mathbf{A}\mathbf{e}(n)$ tende a zero com a evolução de n . Para isso, basta que os

autovalores λ_i de \mathbf{A} satisfaçam $|\lambda_i| < 1$, $1 \leq i \leq K$ (Eisencraft *et al.*, 2009).

Um sistema de comunicação baseado nas Eqs. (1 e 2) foi proposto em (Eisencraft *et al.*, 2009) considerando que $\mathbf{f}(\cdot)$ depende unicamente da componente $x_1(n)$ de $\mathbf{x}(n)$. Dessa forma $\mathbf{f}(\mathbf{x}(n)) = [f(x_1(n)), \dots, 0]^T$. Para este sistema, a mensagem $m(n)$ é codificada pelo sinal $x_1(n)$ por meio da função $c(\cdot, \cdot)$ gerando o sinal transmitido $s(n) = c(x_1(n), m(n))$.

O canal de transmissão é modelado como AWGN. O sinal $r(n)$ na saída do canal é descrito por $r(n) = s(n) + w(n)$. A mensagem recuperada $\hat{m}(n)$ é decodificada no escravo por $\hat{m}(n) = d(y_1(n), r(n))$ sendo $d = c^{-1}$. O objetivo é que o sistema mestre-escravo gere um sinal recuperado tal que $\hat{m}(n) = m(n)$.

O sistema de comunicação descrito é representado em diagrama de blocos na Figura 1.

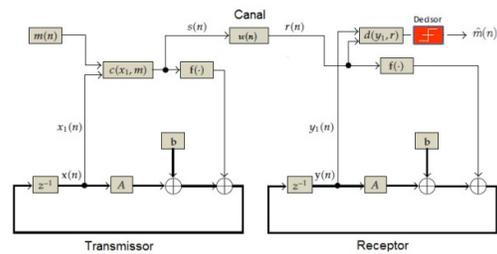


Figura 1. Diagrama de blocos

Neste trabalho, o sistema mestre-escravo foi implementado usando o mapa de Hénon tridimensional empregado em (Eisencraft *et al.*, 2009). Neste artigo mostrou-se que este sistema satisfaz a condição da Eq. (4). O sistema mestre é dado por

$$\begin{aligned} x_1(n+1) &= -ax_1^2(n) + x_3(n) + 1 \\ x_2(n+1) &= -bx_1(n) \\ x_3(n+1) &= bx_1(n) + x_2(n) \end{aligned}, \quad (3)$$

com $a = 1,4$ e $b = 0,3$.

A mensagem binária $m(n)$ assume os valores $+1$ ou -1 para cada n . Foram considerados dois pares de funções de codificação e decodificação:

$$\begin{cases} c_1(x_1, m) = x_1 + 0,001m \\ d_1(y_1, r) = 1000(r - y_1) \end{cases} \quad \begin{cases} c_2(x_1, m) = x_1 \cdot m \\ d_2(y_1, r) = y_1 \cdot r \end{cases} \quad (4)$$

Note-se que, como $m(n) \in \{-1, 1\}$ para cada n , no caso da demodulação d_2 optou-se por multiplicar os sinais envolvidos para evitarem-se divisões. Como a informação está contida no sinal algébrico de $m(n)$, o resultado obtido é o mesmo.

Simulações Computacionais

Na Figura 2 são mostrados os resultados de uma simulação considerando-se canal ideal, ou seja $w(n) = 0$, e utilizando-se o par c_1, d_1 .

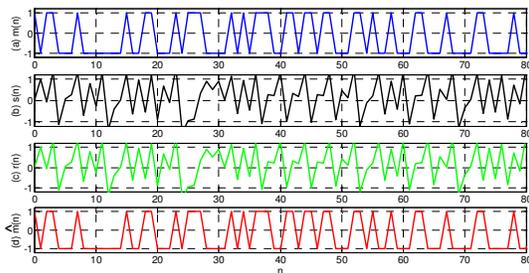


Figura 2. Simulação do sistema de comunicação para canal ideal: (a) mensagem $m(n)$, (b) sinal transmitido $s(n)$, (c) sinal recebido $r(n) = s(n)$ e (d) mensagem recuperada $\hat{m}(n)$.

Neste caso, o sistema de comunicação sincroniza em um número pequeno de amostras e a mensagem é recuperada exatamente no receptor, ou seja, $\hat{m}(n) = m(n)$ como se pode observar nos gráficos da Figura 2(a) e (d). Na Figura 3 apresenta-se os resultados de uma simulação com uma relação sinal-ruído $E_b/N_0 = 80$ dB, e novamente considerando-se c_1, d_1 . Nota-se que, claramente alguns bits são decodificados de forma errada.

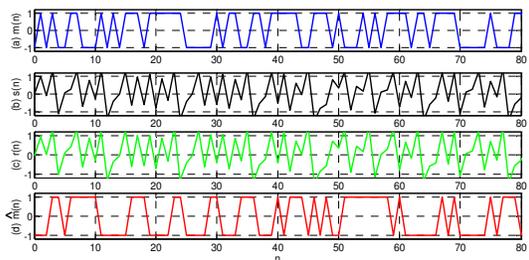


Figura 3. Simulação do sistema de comunicação para uma $E_b/N_0 = 80$ db: (a) mensagem $m(n)$, (b) sinal transmitido $s(n)$, (c) sinal recebido $r(n) = s(n)$ e (d) mensagem recuperada $\hat{m}(n)$.

Para avaliar o desempenho do sistema proposto, obteve-se a BER para diversos valores de E_b/N_0 , considerando-se as duas codificações descritas na Eq. (4). Os resultados são mostrados na Figura 4. Para efeito de comparação, também é mostrado o desempenho de um sistema de comunicação com Modulação de Fase (PSK – *Phase Shift Keying*) convencional (Haykin, 2000).

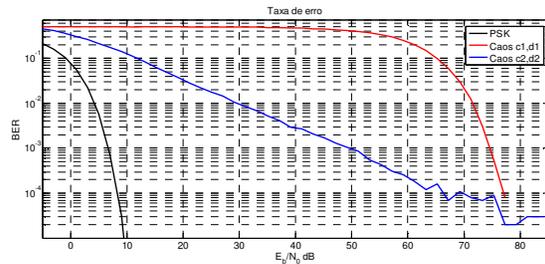


Figura 4. BER em função da E_b/N_0 para o sistema de comunicação estudado.

Nota-se que a codificação utilizando-se o produto apresenta resultados melhores do que a codificação usando c_1, d_1 e mais próximos do desempenho ótimo do PSK.

Conclusões

Neste trabalho, estudou-se o comportamento do sistema de comunicação digital baseado em caos da Figura 1 em canal AWGN. Os resultados ainda estão aquém dos sistemas convencionais, como o PSK, o que mostra que ainda é necessária muita pesquisa para tornar estes sistemas viáveis. Várias alternativas para melhorar este desempenho estão sendo analisadas.

Agradecimentos

M.E. agradece ao CNPq pelo financiamento parcial deste trabalho.

Bibliografia

- K. T. Alligood, T. D. Sauer, J. A. Yorke. **Chaos – An Introduction to Dynamical Systems**, Springer, New York, 1996.
- M. Eisenkraft, R. D. Fanganiello, and L. A. Baccala, **Synchronization of discrete-time chaotic systems in bandlimited channels**. Mathematical Problems in Engineering, vol. 2009, 2009.
- S. S. Haykin, **Communication systems**, 4 ed. New York: Wiley, 2000.
- W. M. Tam, F. C. M. Lau, and C. K. Tse, **Digital Communications with Chaos: Multiple Access Techniques and Performance**. Elsevier Science, New York, NY, USA, 2006.
- C. W. Wu and L. O. Chua. **A simple way to synchronize chaotic systems with applications to secure communication systems**. International Journal of Bifurcation and Chaos, vol. 3, no. 6, pp. 1619–1627, 1993.