

Espectro de sinais caóticos com validação experimental

Rafael Alves da Costa¹ e Marcio Eisencraft²

Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, SP

No presente trabalho, utiliza-se Radio Definido por Software (SDR - *Software Defined Radio*) para validar a densidade espectral de potência (DEP) da modulação por chaveamento caótico (CSK - *Chaos Shift Keying*) [1, 2].

Utiliza-se o mapa linear por partes $x(n+1) = f(x(n))$, com

$$f(x) = \beta_j \left[\frac{2x - (\alpha_j + \alpha_{j-1})}{\alpha_j - \alpha_{j-1}} \right], \quad \text{para } \alpha_{j-1} \leq x < \alpha_j, \quad (1)$$

$1 \leq j \leq r \geq 2$, $n \in \mathbb{N}$, $x(0) \in [-1, 1[$ e $\alpha_0 = -1 < \alpha_1 < \dots < \alpha_{r-1} < \alpha_r = 1$, $\beta_j \in \{-1, 1\}$ [3].

Como mensagem toma-se $m(n) = \sum_{\ell=0}^{\infty} a_{\ell} \Pi(n - \ell N_b)$ sendo que o símbolo a_{ℓ} assume um de dois valores possíveis (c ou d) para cada ℓ e $\Pi(n)$ é um pulso retangular de duração N_b . O sinal CSK transmitido é então $s(n) = x(n)m(n)$.

Usando os resultados de [3] e a definição do CSK, pode-se mostrar que a DEP dos sinais CSK transmitidos é

$$\mathcal{S}(\omega) = \frac{2}{3} \sum_{k=0}^{\infty} g(k) \psi^k \cos(k\omega) - \frac{(\lambda^2 + \mu^2)}{3}, \quad \text{com } g(k) \triangleq \begin{cases} \lambda^2 \left(1 - \frac{k}{N_b}\right) + \mu^2, & 0 \leq k \leq N_b - 1 \\ \mu^2, & k \geq N_b \end{cases} \quad (2)$$

em que $\lambda = \frac{c-d}{2}$, $\mu = \frac{c+d}{2}$ e $\psi = \frac{1}{4} \sum_{j=1}^r \beta_j (\alpha_j - \alpha_{j-1})^2$.

O aparato experimental para medir $\mathcal{S}(\omega)$ é composto por duas placas SDR³ e um Host PC. Um diagrama de blocos da ligação dos componentes é mostrado na Figura 1. Foram empregados os *softwares* livres GNURadio⁴ em que programou-se o modulador usando linguagem Python e o SDRAngel⁵ que possui um analisador de espectro embarcado. A comunicação com o SDR é feita por meio da conexão USB 3.0, em que, os dados dos sinais em banda base são transmitidos para o controle TX. O controle TX faz parte da matriz de portas programáveis (FPGA) que também possui um conversor digital interpolador (CDI) e um conversor digital analógico (CDA) e, por fim, um circuito de radio frequência (RF), composto por oscilador local, *mixer* e amplificadores. A transmissão é feita no Canal 1 do padrão *Bluetooth*⁶, centrada em $f_c = 2.404$ GHz com 2 MHz de banda. No receptor tem-se um conversor analógico digital (CAD) e um conversor digital dizimador (CDD) e finalmente, o sinal é enviado para *Host PC* usando o controle RX.

Para gerar os sinais caóticos, utiliza-se (1) com $r = 2$, $\alpha_1 \triangleq \alpha$, $\beta_1 = 1$ e $\beta_2 = -1$, o que corresponde a um mapa tenda inclinada. Os resultados obtidos são mostrados na Figura 2 para diversos valores de α .

As medidas obtidas aproximam-se das curvas teóricas esperadas para todos os valores de α mensurados, a menos das bordas da faixa de frequência em que filtros da placa limitam a banda dos sinais⁷.

¹rcosta@usp.br

²marcioft@usp.br

³Utilizaram-se os SDRs USRP-B200 da Ettus Research.

⁴<https://www.gnuradio.org/>

⁵<https://www.sdrangel.org/>

⁶<https://www.bluetooth.com/learn-about-bluetooth/tech-overview/>

⁷Um vídeo ilustrativo das medições realizadas está disponível em <https://youtu.be/of3lhi-6lJg>.

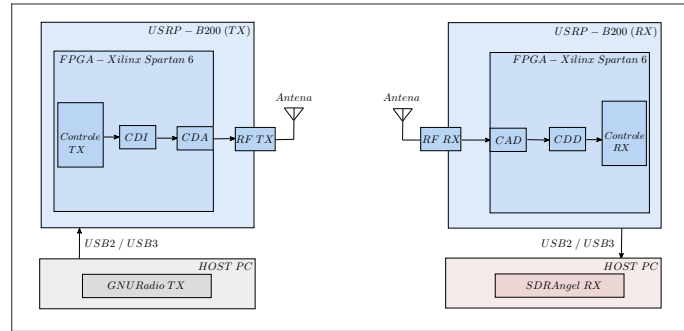


Figura 1: Diagrama de blocos dos componentes do experimento.

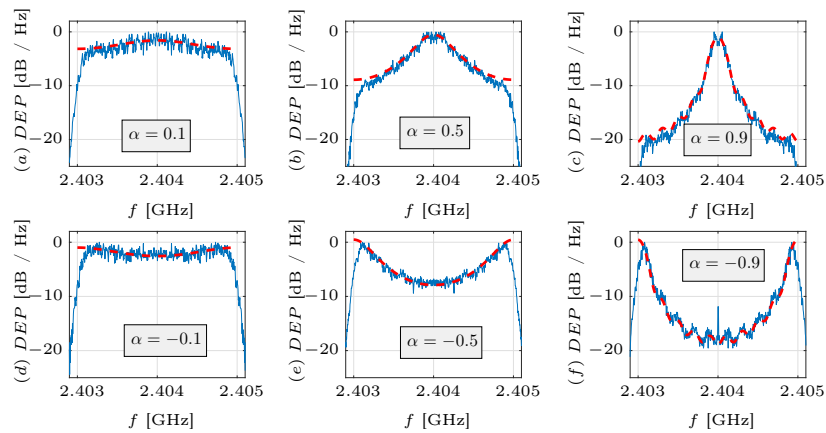


Figura 2: DEP do CSK normalizada com $N_b = 10$ e $f_c = 2.404$ GHz. Em linha tracejada tem-se os resultados teóricos de (2) e em linha contínua os resultados experimentais medidos.

Agradecimentos

ME recebeu apoio financeiro do CNPq (Processo 311039/2019-7).

Referências

- [1] G. Kolumban, M.P. Kennedy e L.O. Chua. “The role of synchronization in digital communications using chaos. II. Chaotic modulation and chaotic synchronization”. Em: **IEEE Transactions on Circuits and Systems I: Fundamental Theory and Applications** 45.11 (1998), pp. 1129–1140. ISSN: 1057-7122. DOI: 10.1109/81.735435.
- [2] Rafael Alves da Costa e Marcio Eisenkraft. “Densidade espectral de potência de sinais transmitidos pelo CSK”. Em: **Anais do XXXIX Simpósio Brasileiro de Telecomunicações e Processamento de Sinais**. Sociedade Brasileira de Telecomunicações, 2021. DOI: 10.14209/sbrt.2021.1570730844.
- [3] R. A. Costa e M. Eisenkraft. “Spectral characteristics of a general piecewise linear chaotic signal generator”. Em: **Communications in Nonlinear Science and Numerical Simulation** 72 (2019), pp. 441–448. DOI: 10.1016/j.cnsns.2019.01.002.