

Efeito da Interferência Epidêmica na Probabilidade de Erro de um Sistema Celular

Effect of Epidemic Interference on the Probability of Error in a Cellular System

DOI:10.34117/bjdv7n3-452

Recebimento dos originais: 08/02/2021

Aceitação para publicação: 18/03/2021

Marcelo Sampaio de Alencar

Formação acadêmica mais alta: Doutorado

Instituição: University of Waterloo

Endereço: Rua Maria de Sousa Ribeiro, 129, Catolé, Campina Grande PB, CEP 58.410-475

E-mail: malencar@iecom.org.br

Luiz Fernando Taboada Gomes Amaral

Formação acadêmica mais alta: Mestrado em Engenharia Elétrica

Instituição: UFBA

Endereço: Avenida Orlando Gomes, Piatã, 1845, Salvador BA, CEP 41.650-010

E-mail: luiz.amaral@fieb.org.br

Tulio Freitas Simões de Castro

Formação acadêmica mais alta: Mestrado em Engenharia Elétrica

Instituição: UFBA

Endereço: Avenida Orlando Gomes, Piatã, 1845, Salvador BA, CEP 41.650-010

E-mail: tuliofreitas_@hotmail.com

Rafael Andrade Vieira

Formação acadêmica mais alta: Graduação Engenharia Elétrica

Instituição: Universidade Federal da Bahia - UFBA

Endereço: Avenida Orlando Gomes, Piatã, 1845, Salvador BA, CEP 41.650-010

E-mail: ravieirann@gmail.com

Esmael Caliman Filho

Formação acadêmica mais alta: Especialista (Pós-Graduação)

Instituição: Faculdade ÁREA1

Endereço: Avenida Orlando Gomes, Piatã, 1845, Salvador BA, CEP 41.650-010

E-mail: calimanfilho@gmail.com

Osmar Pinto Oliveira Junior

Formação acadêmica mais alta: Bacharel em Ciências e Tecnologia

Instituição: UFBA

Endereço: Avenida Orlando Gomes, Piatã, 1845, Salvador BA, CEP 41.650-010

E-mail: osmarpinto2@gmail.com

RESUMO

Este artigo introduz o conceito de interferência epidêmica, para determinar o efeito do acesso intempestivo de usuários ao sistema de comunicações móveis celulares em redes 5G, causando aumento na probabilidade de erro do canal.

palavras-chave: Comunicações sem fio, Interferência endêmica, Probabilidade de erro, Modulação digital, Sistema celular.

ABSTRACT

This article introduces the concept of epidemic interference, to determine the effect of users' untimely access to the cellular mobile communications system on 5G networks, causing an increase in the likelihood of channel error.

Keywords: Wireless communications, Endemic interference, Probability of error, Digital modulation, Cellular system.

1 SISTEMA MÓVEL CELULAR DE QUINTA GERAÇÃO

Uma rede 5G pode ser dividida em duas partes principais, a *5G Radio Access Network* (RAN), que é responsável pelos aspectos da interface de comunicação sem fio da rede, e a *5G Core Network* (CN), que é o centro computacional da rede, responsável pelos aspectos de segurança, mobilidade e acesso ao ambiente externo, como a Internet, por exemplo.

Diversas técnicas foram implementadas no 5G para aumentar a eficiência da transmissão do sinal e quantidade de dispositivos conectados simultaneamente, como *Quadrature Amplitude Modulation* (QAM), *Orthogonal Frequency Division Multiplexing* (OFDM), técnicas de *massive Multiple Input Multiple Output* (m-MIMO) em conjunto com o *beamforming*. Também foi implementado o *Network Slicing*, técnica utilizada para separar redes virtuais dentro de uma mesma rede física.

2 MODELAGEM DO SISTEMA CELULAR EM ESTADO EPIDÊMICO

Assumir a estacionariedade na análise da probabilidade de erro de símbolo ou *bit* é usual, porque um ambiente não estacionário tem uma modelagem complexa, o que complicaria muito o desenvolvimento matemático.

Devido ao 5G RAN permitir que mais usuários se conectem simultaneamente, em comparação às redes anteriores, as interferências causadas pelo estado epidêmico da rede poderão resultar em diversos problemas de interferência devido às flutuações repentinas do tráfego telefônico decorrentes da entrada e saída imprevisível de diversos usuários e dispositivos da rede.

Para processos não estacionários, como o aumento repentino no tráfego telefônico, as ferramentas usuais, como é o caso de correlação para processos estocásticos básicos, têm utilidade reduzida, mas a ferramenta matemática mais recente, conhecida como integração estocástica, pode ser útil para atacar o problema.

3 CÁLCULO DA POTÊNCIA INSTANTÂNEA DE INTERFERÊNCIA

O processo estocástico que define a interferência em um sistema de comunicações móveis celulares que entra em um estado epidêmico, isto é, quando muitos usuários tentam telefonar ao mesmo tempo, é geralmente não estacionário. Isto implica que suas médias estatísticas variam com o tempo.

Para o problema, o que importa é a potência instantânea relativa do sinal, $dP(t)/dt = \alpha P(t)$ e como ela reage às flutuações do canal, à medida que mais usuários têm acesso ao sistema móvel celular.

Neste caso, a variação de potência deve ser também proporcional a um processo de Wiener, $W(t)$, que é função da interferência, isto é, a combinação de sinais de outros usuários que interferem no sinal considerado $dP(t) = \beta P(t)dW(t)$ [6].

Isso levanta a questão sobre o processo de Wiener não ser diferenciável em todos os intervalos de tempo. Mas isso foi contornado com o uso da integral estocástica, proposta por Itô, que definiu a equação estocástica geral como $dP(t) = \alpha P(t)dt + \beta P(t)dW(t)$, em que $\alpha P(t)dt$ é a função de deslocamento, ou tendência, e $\beta P(t)dW(t)$ representa a dispersão, ou volatilidade do processo estocástico.

4 DETALHAMENTO DO MODELO PARA O PROBLEMA DA INTERFERÊNCIA

Na formulação do modelo, é importante ressaltar que a taxa de variação da potência interferente é proporcional à quantidade de interferência presente no canal, $P(t)$, considerando que ela é epidêmica.

Por outro lado, a variação da interferência também é proporcional à variação diferencial do processo estocástico, cuja distribuição é geralmente de Gauss, e que representa a soma de usuários interferentes, $dW(t)$, que é um processo de Wiener, conforme mencionado.

O processo $W(t)$ é o resultado da combinação dos fatores independentes de interferência, $W_i(t)$, que podem ser encontrados em um sistema de comunicações móveis celulares

$$W(t) = \sum_{i=1}^N W_i(t), \quad (1)$$

portanto, pelo Teorema Central do Limite, $W(t)$ tem uma distribuição de probabilidade gaussiana. Para processos estocásticos estacionários, os momentos são independentes do tempo, isto é $m_W(t) = m_W e^{\sigma_W^2(t)} = \sigma_W^2$.

Seguindo procedimento similar ao descrito em [5], a potência de interferência instantânea pode ser escrita como

$$P(t) = P_0 \cdot e^{\left(\alpha - \frac{\beta^2}{2}\right)t + \beta W(t)} = P_0 \cdot e^{\left(\alpha - \frac{\beta^2}{2}\right)t} \cdot Y(t), \quad (2)$$

em que P_0 representa a potência medida no início do intervalo de medição.

Esta solução mostra, para o processo estocástico proposto, que a interferência cresce exponencialmente com o tempo, controlada pelos parâmetros α e β , que devem ser determinados. Percebe-se uma variação aleatória da curva, como resultado do processo estocástico $W(t)$.

Caso o processo, $W(t)$, que corresponde à interferência total, tenha distribuição gaussiana, tendo em vista que é a combinação de diversos outros processos, é possível calcular a distribuição da interferência associada, usando o método de transformação de função densidade de probabilidade.

5 A INFLUÊNCIA DA INTERFERÊNCIA COMBINADA

Como discutido na seção anterior, o processo estocástico $W(t)$ resulta da combinação de vários efeitos de interferência causados pelos sinais dos usuários que decidem fazer chamadas telefônicas no mesmo intervalo de tempo. Inserindo a Fórmula 1 na Equação 2, resulta em

$$Y(t) = e^{\beta W(t)} = e^{\sum_{i=1}^N \beta W_i(t)} = \prod_{i=1}^N e^{\beta W_i(t)}, \quad (3)$$

que representa a natureza exponencial da interferência endêmica na distribuição final.

Para simplificar a análise, assume-se que o crescimento exponencial é compensado por um subsistema de controle automático de ganho, que ajusta os parâmetros de maneira

a se obter $\alpha = \frac{\beta^2}{2}$. Essa assunção ressalta que o termo $Y(t)$, é uma função não linear da interferência combinada que, como visto, tem distribuição de Gauss, em virtude de ser o resultado de um número grande de sinais produzidos pelos usuários do sistema celular.

O desenvolvimento a seguir demonstra a distribuição real resultante. Considere que $W(t)$ é um processo aleatório, com distribuição Normal, tendo em vista que resulta da composição de vários efeitos.

Pode-se obter a distribuição de probabilidade do processo aleatório $Y(t)$, que resulta da transformação da distribuição de probabilidade da combinação das interferências, usando a técnica a seguir.

Considere que o processo composto $W(t)$ tem função densidade de probabilidade, $f_W(w)$, gaussiana em que, o valor médio de $W(t)$ é dado por $m_W = E[W(t)] = 0$, e a variância é $\sigma_W^2 = E[W^2(t)]$.

Supondo que o processo resultante, $Y(t)$ tenha distribuição $f_Y(y)$, então é possível usar a propriedade de transformação da função densidade de probabilidade, para obter

$$f_Y(y) = \frac{e^{-\frac{(\ln y)^2}{2\beta^2\sigma_W^2}}}{\beta y \sigma_W \sqrt{2\pi}}, \text{ se } y > 0, \text{ e nulo caso } y \leq 0. \quad (4)$$

$$f_Y(y) = \frac{e^{-\frac{(\ln y)^2}{2\beta^2\sigma_W^2}}}{\beta y \sigma_W \sqrt{2\pi}}, \text{ if } y > 0, \text{ e nulo no caso } y \leq 0.$$

(4)

que representa a distribuição Lognormal que, diferente da distribuição de Gauss, é assimétrica.

A distribuição de probabilidade da potência de interferência, $P(t)$, pode ser encontrada seguindo passos similares, a partir da Equação 2,

$$f_P(p) = \frac{P_0 e^{-\frac{[\ln p - \ln P_0]^2}{2\beta^2\sigma_W^2}}}{\beta p \sigma_W \sqrt{2\pi}}, \text{ se } p > 0, \text{ e nulo caso } p \leq 0. \quad (5)$$

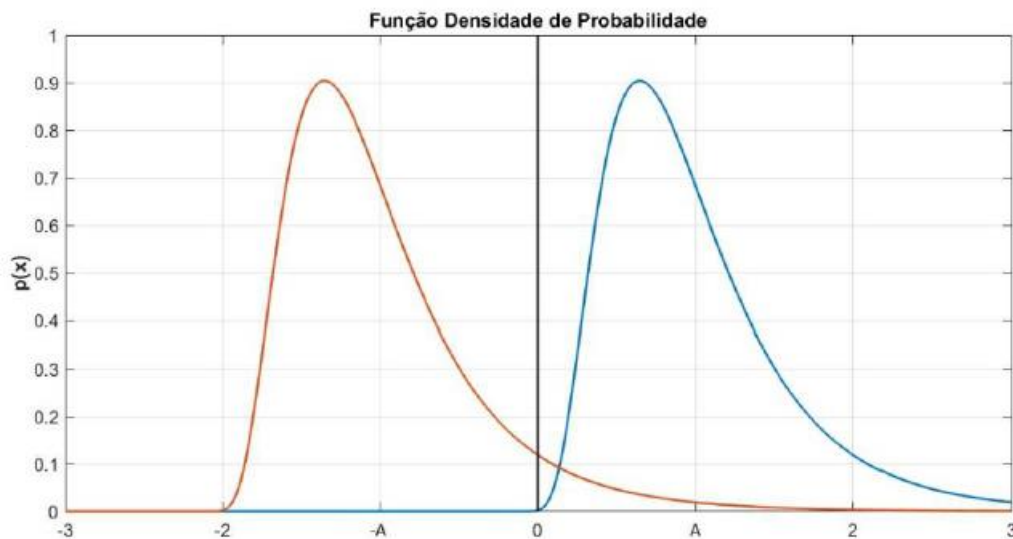
Em outras palavras, o processo aleatório que representa a interferência em um sistema de comunicações móveis celulares, que sofre com um ataque de tráfego epidêmico, tem uma distribuição Lognormal, em vez da assunção típica de uma distribuição de Gauss.

6 CÁLCULO DA PROBABILIDADE DE ERRO

A Fig. 1 ilustra o efeito da interferência Lognormal sobre um sinal BPSK, mostrando a assimetria da distribuição, em que os pontos da mediana, da moda e da média não mais coincidem.

Nota-se que a interferência causada pelo símbolo transmitido no semi-eixo negativo é maior que aquela do sinal do semi-eixo positivo, em função do efeito de cauda longa da distribuição Lognormal, como discutido. As médias estão localizadas em $+A$ e $-A$.

Figura 1. Sinal BPSK sob efeito de interferência Lognormal.



Para uma distribuição Lognormal, que é assimétrica, a influência da interferência que afeta o símbolo A no cálculo da probabilidade de erro é maior, podendo ser tomada, em uma primeira análise, como a probabilidade de erro da transmissão do sinal, caso a potência de transmissão seja elevada.

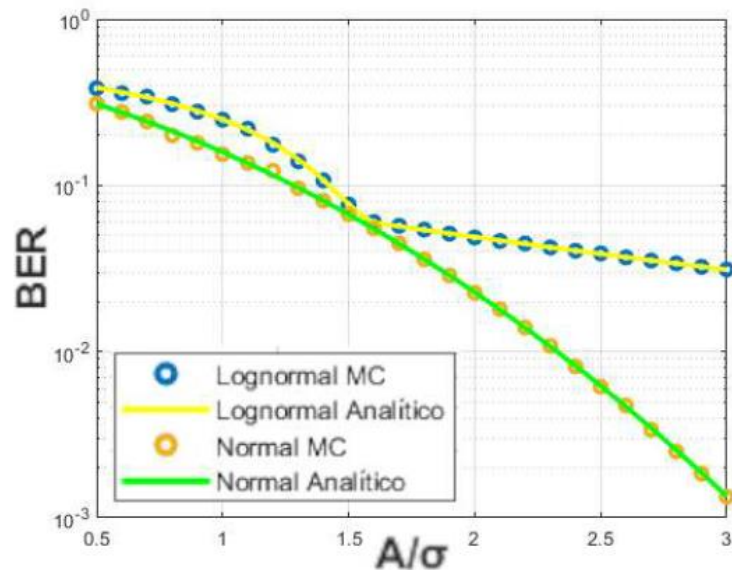
Para potência de transmissão baixa, a influência da interferência que atinge o símbolo $-A$ se torna mais evidente, porque o gráfico da distribuição Lognormal, se desloca para a esquerda e pode ultrapassar o eixo das coordenadas. Neste caso, a probabilidade de erro aumenta bruscamente, provocando uma descontinuidade na curva.

A probabilidade de erro para a transmissão do símbolo $-A$ é dada por

$$P_E(-A) = \frac{1}{2} \int_0^\infty \frac{1}{(x+A)\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\left(\frac{\ln(x+A)}{2\sigma}\right)^2} dx. \quad (6)$$

Foram realizadas simulações de Monte Carlo para testar os resultados, em comparação com a curva analítica. Nota-se que a distribuição Lognormal, que é fruto de interferência endêmica, apresenta piores resultados de taxa de erro de bit (BER) para diversos valores de A/σ .

Figura 2. BER em função de A/σ na modulação BPSK com $\sigma^2 = 1,00$.



Esse resultado é apresentado na Fig. 2, para a modulação BPSK. É possível notar, para todos os valores da variância σ^2 simulados, que a probabilidade de erro obtida com a distribuição Lognormal está sempre acima daquela resultante da distribuição de Gauss, obtida para o ruído comum, e cai mais lentamente, indicando uma maior BER em comparação com a curva da distribuição normal.

7 CONCLUSÃO

Este artigo apresentou um modelo matemático para o efeito da acumulação de interferência, causada por um repentino aumento no número de usuários na rede celular, também chamada de epidemia de interferência.

Para tal processo não estacionário, a integração de Itô foi usada, resultando em uma distribuição de probabilidade Lognormal para o sinal composto. Diferente da distribuição

gaussiana, a Lognormal é assimétrica. Além disso, ela é uma distribuição de cauda longa, o que explica a maior probabilidade de erro encontrada.

Essa seria uma das razões para a queda na qualidade das chamadas, e da eventual queda nas ligações, durante o crescimento repentino de usuários na rede, com efeito superior aquele que seria esperado apenas considerando o ruído estacionário. A média e a variância de longo prazo da interferência seguem curvas exponenciais, que dependem de certos parâmetros do sistema.

Agradecimentos

Os autores gostariam de agradecer ao CNPq, ao SENAI CIMATEC, Salvador/BA e ao Iecom, pelo apoio e financiamento à pesquisa.

REFERÊNCIAS

- [1] Sakagushi, Kei. et al. Millimeter-Wave Wireless LAN and Its Extension toward 5G Heterogeneous Networks. *IEICE Trans. Commun.*, vol. E98–B, no.10, 2015.
- [2] Frederico, F. P. and Sabino, C. Á. V.5G New Radio Evolution, Challenges and Solutions. Rohde & Schwarz, 2019.
- [3] National Instruments. Dispositivo de Rádio Definido por Software USRP. National Instruments Corporation, 2020.
- [4] Kottkamp, M. and Pandey A. and Raddino D. and Roessler A. and Stuhl AUTH R 5G New Radio – Fundamentals, procedures, testing aspects. Rohde & Schwarz GnbH & Co.KG. München, Germany, 2019.
- [5] Alencar, M. S. and Mesquita, H. M. Aplicação da Integral de Itô em Processos Estocásticos Retroalimentados. *Revista de Tecnologia da Informação e Comunicação, Iecom*, vol. 7, no. 2., (Agosto 2017), p. 61–64.
- [7] Brzezniak, Z., and Zastawniak, T. *Basic Stochastic Processes*. Springer, London, Great Britain, 2006.