

Análise de Redes *Bluetooth Low Energy* em Ambiente *Indoor* Considerando o efeito de *Shadowing*

Fernando S. de Sousa¹, Carlos E. Capovilla² e Ivan R. S. Casella³
^{1, 2, 3} Universidade Federal do ABC – UFABC, Santo André SP, Brasil

e-mail: f.simplicio@ufabc.edu.br

Abstract - *The aim of this study was to analyze, through computational modeling, the impacts of the radio signal attenuation from Bluetooth Low Energy (BLE) wireless networks operating in an indoor environment. The values of received signal strength, signal to noise ratio, data rate and bit error rate were measured for different estimated path loss factors and taking into consideration the shadowing effect. The computational modeling was developed with the assistance of the OPNET Modeler software, and it included an algorithm that simulates the Physical Layer (PHY), Medium Access Control (MAC) and Link Layer (LL) from BLE that allowed us to analyze the behavior of wireless network during the exchange of data packets between mobile devices. In addition to computer simulations, practical experiments were performed with BLE wireless networks located in an indoor environment from urban areas. The field measurements results were compared and set in the computational modeling. Thus, the BLE computer model was created, which partially describe the same behaviors from the wireless networks tested in practical experiments, which provided more realistic simulation results for the computational modeling. Through these new computational models, it was possible to measure, compare and analyze the performance of BLE wireless network in indoor environments.*

Palavras-chave: *Bluetooth, Bluetooth Low Energy, OPNET.*

Introdução

O BLE, também chamado de *Bluetooth Smart*, é uma tecnologia em destaque que está sendo amplamente empregada em *smartphones*, equipamentos hospitalares e industriais. Foi desenvolvida para o envio rápido de pequenos pacotes de dados em baixa latência com suporte a elevados números de nós operando em consumo de energia [1]. O BLE foi introduzido na especificação 4.0 [2] do padrão IEEE 802.15.1 e contempla características que o posiciona como uma tecnologia de rede sem fio *Wireless Personal Area Network* (WPAN), operando na faixa de frequência livre não licenciada *Industrial Scientific Medical* (ISM) em 2.4 GHz, limitada na potência de transmissão de 1 mW a 10 mW [2]. Possui estruturas relativamente simples,

divididas em controlador, *host* e aplicação. O controlador é a camada do BLE capaz de receber e transmitir informações em sinais de rádio, sendo dividido em PHY e LL e utiliza a Interface de Controle *Host* (HCI) para se comunicar com o *host* e com outras camadas superiores e de aplicação.

Materiais e Métodos

As modelagens computacionais desenvolvidas no trabalho de pesquisa [3] se baseiam na especificação 4.0 do BLE e levam em consideração os algoritmos definidos para codificação e decodificação da camada PHY, para endereçamento e controle de acesso da camada MAC e de controle de fluxo da camada LL. Para medir a atenuação do sinal de rádio do BLE, o autor modelou computacionalmente uma rede BLE livre de interferências externas com outras redes, contendo um dispositivo mestre, responsável pelo gerenciamento da rede e pelo envio do pedido de conexão, e um dispositivo escravo, responsável pelo aceite do pedido de conexão do dispositivo mestre. Durante a troca de pacotes de dados entre os dispositivos, no rádio receptor do dispositivo escravo foram medidos, a cada 1 m de distância, por até 300 m, a Potência do Sinal Recebido (P_r), Relação Sinal-Ruído (SNR), Taxa de Transmissão e Taxa de Erro de Bit (BER) para os diferentes fatores de perda de percurso β com a adição do Modelo de Propagação de *Shadowing* (MPS). O MPS é baseado no modelo de espaço livre e acrescenta uma variável aleatória log-normal Gaussiana X_{dB} de média zero e desvio padrão σ_{SH} para representar a incerteza de P_r para diferentes ambientes [4]. Os resultados das simulações feitas por meio das modelagens computacionais expressam o comportamento da rede sem fio BLE em condições ideais. Entretanto, na prática os resultados podem ser bem diferentes. Nas modelagens computacionais do BLE não foram considerados fatores externos que podem influenciar o comportamento da rede, como por exemplo, a interferência por coexistência dos dispositivos BLE frente a outras redes sem fio, tal como o Wi-Fi e o Zigbee e as distribuições físicas dos objetos (obstáculos) localizados dentro de um ambiente *indoor*.

Para tornar estas modelagens computacionais do BLE mais realistas, ou seja, para que forneça resultados próximos aos medidos em campo, foram realizados experimentos práticos com redes sem fio BLE. Nos experimentos práticos foram medidos a P_r à medida que o dispositivo BLE mestre envia dados e se distância do dispositivo BLE escravo. Após as medições, foi calculado o fator de perda de percurso β , o valor da variância da P_r , e encontrado o valor do σ_{SH} . Em seguida, o valor de β e σ_{SH} foram atribuídos nas configurações das modelagens computacionais do BLE. Os resultados, após as simulações feitas por meio das modelagens computacionais BLE, foram comparados com os resultados medidos por meio dos experimentos práticos.

Nos experimentos práticos foi utilizado um kit de desenvolvimento microcontrolado com *Microcontroller Unit* (MCU) PIC18F45K22 [6] em conjunto com o um módulo BLE que contempla o chip BLE nRF8001 [7] e um *smartphone* com Android 5.0. A escolha do chip BLE nRF8001 se deve ao fato de existirem muitos documentos com exemplos práticos que auxiliam no rápido desenvolvimento dos projetos e, principalmente, ao *royalty-free stack* para BLE escritos em linguagem C pela empresa Nordic [7], além da motivação de ser facilmente encontrados no mercado por poucos dólares. A escolha do MCU PIC18F45K22 foi motivada por ter arquitetura simples de 8 bits, possuir ótimo desempenho e capacidade de memória suficiente para armazenar o programa para o controle da rede BLE.

Por limitações físicas, o chip BLE nRF8001 somente pode operar na rede BLE como dispositivo escravo. Assim, na montagem da rede BLE, o chip BLE nRF8001 ficou configurado como dispositivo escravo, e o *smartphone*, como dispositivo mestre. Para estabelecer a conexão e trocar dados entre os dispositivos BLE mestre e escravo foi desenvolvido um *software* para o *smartphone* e um *software* para o MCU. Para realizar as medições da rede sem fio BLE criada, foi utilizado o kit de desenvolvimento CC2540DK-MINI da Texas Instruments [8], pois, por meio deste equipamento, é possível configurá-lo como um analisador de tráfego de rede (*sniffer*) que opera em conjunto com o *software SmartRF Protocolo Packet Sniffer* (SRFPPS) [8], também desenvolvido pela Texas Instruments.

A escolha do ambiente operacional *indoor* para realização dos ensaios experimentais foi motivada por estar num lugar urbano com influências de outras redes sem fio, tal como o Wi-Fi, e pelas disposições das paredes, janela e corredores. A Figura 1 apresenta o *layout* do ambiente *indoor*.

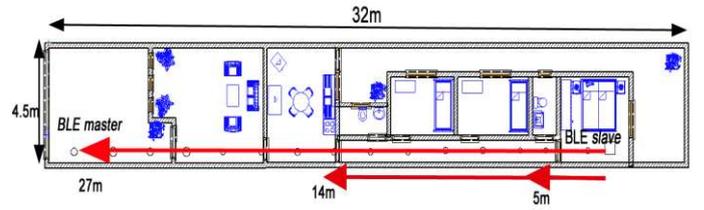


Fig. 1. *Layout* do ambiente *indoor* onde foram realizadas as medições das redes BLE.

Durante todo o experimento prático, os dispositivos BLE permaneceram a 45 cm de altura do chão. Inicialmente o dispositivo BLE mestre foi mantido distante a 1 m do dispositivo BLE escravo. Foram energizados os equipamentos e iniciada a troca de dados entre os dispositivos BLE. As medições da P_r foram realizadas por meio do *sniffer*, mantendo-o distante do dispositivo mestre à 1 m. A cada 1000 pacotes de dados recebidos no *software* SRFPPS, foi extraído aleatoriamente 10 pacotes e calculado a média aritmética simples da P_r . Estes procedimentos foram realizados mantendo sempre o dispositivo BLE escravo em posição fixa e distanciando o dispositivo BLE mestre a cada 1 m, resultando no total de 27 medições. A Figura 1 apresenta o trajeto onde foram feitas as medições da P_r .

Por meio do *software* SRFPPS é possível saber a intensidade da potência de um sinal de rádio recebido por meio do parâmetro *Received Signal Strength Indicator* (RSSI). O RSSI é um indicador de intensidade de sinal e pode ser utilizado para estimar de maneira precisa a distância entre dois sensores [9], e segue a equação 1, conforme apresentado por [10]. O *software* SRFPPS apresenta as medidas do RSSI em dBm, e, conforme suas documentações, RSSI representa o valor da P_r .

$$RSSI = P_r(d) = P_r(d_0) - 10 \cdot \beta \cdot \log\left(\frac{d}{d_0}\right) + X_{dB} \quad (1)$$

É possível calcular o valor de β utilizando o método de Regressão Linear (LR) [11]. Na LR, a diferença entre as medidas e a perda de percurso estimada é usualmente minimizada utilizando a soma quadrática dos erros, representado pela equação 2,

$$e(\beta) = \sum_{i=1}^k \left\{ P_L(d_i) - \hat{P}_L(d_i) \right\}^2 \quad (2)$$

onde $P_L(d_i)$ é a medida da perda de percurso na distância d_i , e $\hat{P}_L(d_i)$ é a perda de percurso estimada obtida pela equação 1, desconsiderando o efeito de *Shadowing*. Substituindo a equação 3, resulta em:

$$e(\beta) = \sum_{i=1}^k \left\{ P_L(d_i) - P_L(d_0) - 10 \cdot \beta \cdot \log\left(\frac{d_i}{d_0}\right) \right\}^2 \quad (3)$$

O valor de β que minimiza a média do erro quadrático pode ser definido igualando-se a derivada da equação 3 para zero e solucionando para β , conforme equação 4.

$$\beta = \frac{\sum_{i=1}^k \{P_L(d_i) - P_L(d_0)\}}{\sum_{i=1}^k 10 \cdot \log\left(\frac{d_i}{d_0}\right)} \quad (4)$$

O cálculo da variância das amostras é dada pela equação 5,

$$\sigma_{sh}^2 = \frac{\sum_{i=1}^k \{P_L(d_i) - P_L(d_i)\}^2}{N} \quad (5)$$

onde N representa a quantidade de amostra analisadas. Portanto, o desvio padrão é dado pela equação 6.

$$\sigma_{sh} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^k \{P_L(d_i) - P_L(d_i)\}^2}{N}} \quad (6)$$

Para calcular β e o desvio padrão σ_{SH} foi considerado a distância de referência $d_0 = 1$ m. As equações foram montadas e simuladas no Matlab e os códigos fontes estão disponibilizados no apêndice deste trabalho. O Matlab [12] é um *software* interativo de alto desempenho dedicado para realização de cálculos numéricos e é amplamente utilizado em grandes centros de pesquisas no mundo todo. As simulações resultaram em $\beta = 2,2170$ e $\sigma_{SH} = 3,3653$. Os coeficientes de atenuação β de 2 a 6, caracterizam desde ambientes sem obstruções (espaço livre) até ambientes com alto grau de obstruções, e σ_{SH} igual a 3, que corresponde ao desvio padrão do *Shadowing* para ambientes *indoor* [4].

Resultados

Após os ensaios, ao comparar os resultados das medições dos experimentos práticos com os resultados dos ensaios da modelagem computacional do BLE foi constatado que existe diferença nos valores da P_r na ordem de -6.8540 dBm. Essa diferença existe, pois, na modelagem computacional estima-se a potência de transmissão do chip BLE nRF8001 seja exatamente a 0 dBm. Entretanto percebeu-se que essa diferença de valores possivelmente é resultante da diferença entre o valor teórico da potência de transmissão e o valor real. Acredita-se que realizando o mesmo ensaio em um

ambiente controlado, esta diferença nas medições pode ser menor. Uma das grande contribuições na utilização de modelos computacionais é a possibilidade de ajustar o sistema. Na modelagem computacional do BLE foi ajustada a potência de transmissão na ordem de -6.8540 dBm (diferença entre a linha teórica das medidas das P_r e a simulada via modelagem computacional). Desta forma foi possível caracterizar a modelagem computacional do BLE para obter as mesmas respostas da linha teórica das amostras, conforme apresentado na Figura 1. Para facilitar o entendimento do leitor, esta adequação da potência de transmissão foi chamado de: fator de ajuste. A Figura 2 apresentam os resultados após a aplicação do fator de ajuste na modelagem computacional do BLE.

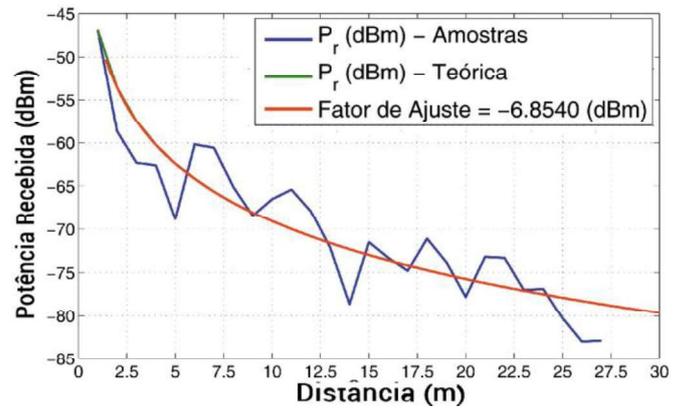


Fig. 2. Potência Recebida (dBm) em função da distância (m).

A Figura 3 apresenta os resultados das medições da P_r , com o efeito de *Shadowing*, quando a antena do transmissor e receptor dos dispositivos BLE estão distantes a 300 m. Este ensaio foi realizado por meio da modelagem computacional do BLE com o fator de ajuste aplicado.

Discussão

Com base na Figura 3 é possível concluir, por exemplo, qual será o máximo alcance do chip BLE nRF8001 usado nos ensaios práticos. Caso seja garantido numa rede BLE as mesmas características das medições em campo, deduz-se que o alcance do BLE esteja em torno de 75 m, visto que, conforme o manual técnico do fabricante, a sensibilidade de recepção do nRF8001 é de até -87 dBm.

A utilização do equipamento de medição *sniffer* nos experimentos práticos permitiu medir o tempo entre a transmissão e recepção de cada pacote de dados trocado entre os dispositivos BLE. O tempo de recepção de um pacote de dados e o início da transmissão de um outro

pelo dispositivo BLE mestre ficou em $48521 \mu s$, enquanto no dispositivo BLE escravo ficou em $230 \mu s$. Esse intervalo é devido a configuração do *Inter Frame Space* (IFS) [1], tempo de processamento dos dados, atraso na propagação do sinal de rádio e da velocidade de transmissão. Os valores dos intervalos encontrados foram configurados na modelagem computacional BLE. Os resultados das simulações são apresentadas na Figura 4 e apresentam as curvas da taxa de transmissão de dados, SNR e BER.

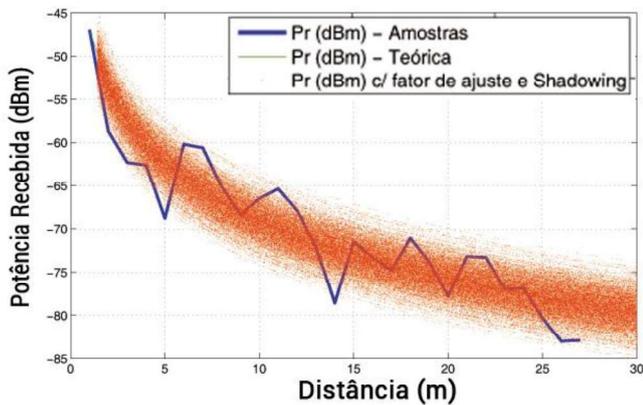


Fig. 3. Potência Recebida (dBm) com efeito de *Shadowing* em função da distância (m).

O valor de BER passa a ser crescente quando SNR é menor que 20 dB, fato que ocorre quando a distância entre as antenas do transmissor e receptor é maior que 60 m.

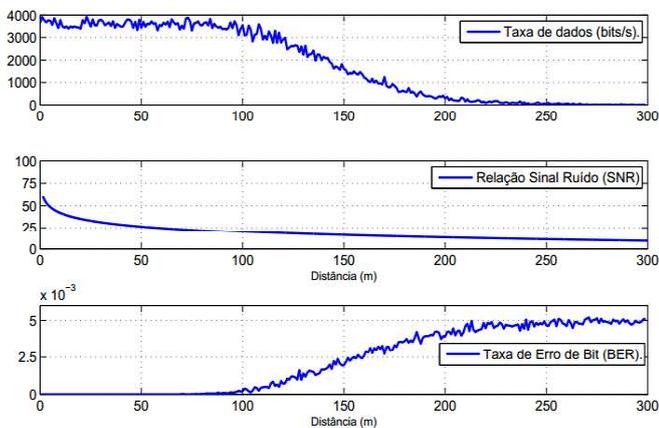


Fig. 4. Taxa de transmissão de dados, SNR e BER em função da distância

Conclusão

O valor de β igual a 2,2170 resulta em um ambiente com poucas obstruções (categorizado por [4] sendo espaço livre) e σ_{SH} igual a 3.3653, corresponde a linha visada para ambientes *indoor*. Portanto, a P_r sofreu pouca

interferência devido as obstruções do ambiente *indoor*, contribuindo com a propagação do sinal de rádio.

Referências

- [1] Gomez, Carles, Ilker Demirkol, and Josep Paradells. "Modeling the maximum throughput of Bluetooth low energy in an error-prone link." *IEEE Communications Letters* 15.11 (2011): 1187-1189.
- [2] B. SIG, "Bluetooth specification version 4.0 [vol 0]," Available at <http://www.bluetooth.org>, June 2010.
- [3] De Sousa, Fernando S., Carlos E. Capovilla, and Ivan RS Casella. "Analysis of Bluetooth low energy technology in indoor environments." *Consumer Electronics (ISCE), 2016 IEEE International Symposium on*. IEEE, 2016.
- [4] S. Y. Seidel and T. S. Rappaport, "914 MHz Path Loss Prediction Models for Indoor Wireless Communications in Multifloored Buildings" *IEEE Trans. On Ant. And Prop.*, vol. 40, no. 2, pp. 207-217, Feb. 1992.
- [5] Al Kalaa, Mohamad Omar; Refai, Hazem H. Bluetooth standard v4. 1: Simulating the Bluetooth low energy data channel selection algorithm. In: *Globecom Workshops (GC Wkshps), 2014. IEEE, 2014. p. 729-733*.
- [6] Panoiu, C., R. Rob, and M. Panoiu. "Microcontroller interrupts in frequency controlling." *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. Vol. 85. No. 1. IOP Publishing, 2015.
- [7] Zhang, Ting, et al. "Bluetooth low energy for wearable sensor-based healthcare systems." *Healthcare Innovation Conference (HIC), 2014 IEEE. IEEE, 2014*.
- [8] Texas Instruments (n.d.a). <http://www.texas.com>. [Accessed 15 Nov. 2017].
- [9] Kajioka, S., Mori, T., Uchiya, T., Takumi, I. e Matsuo, H. (2014). Experiment of indoor position presumption based on rssi of bluetooth le beacon, *Consumer Electronics (GCCE), 2014 IEEE 3rd Global Conference on*, IEEE, pp. 337-339.
- [10] Hu-Sheng, N., Wu-Jun, X., Yuan-Yuan, L., Meng-Yue, T., Shi-Chao, S. e Hong, F. (2012). An improved method of self-adaptive localization for wireless sensor network in dynamic indoor environment, *Control Conf. (CCC), 2012 31st Chinese, IEEE*, pp. 6574-6577.
- [11] Anthony, O. N. e Okonkwo Obikwelu, R. (2014). Characterization of signal attenuation using pathloss exponent in south-south nigeria, *International Journal of Emerging Trends & Technology in Computer Science (IJETTCS)* pp. 100-104.
- [12] Moore, H. (2014). *MATLAB for Engineers*, Prentice Hall Press.