

Otimização de Algoritmos de Localização baseados no RSSI para Redes de Sensores Sem Fio

Crístian Müller, Dimas Irion Alves, Renato Machado e Bartolomeu F. Uchôa-Filho

Resumo—Neste trabalho, um método é apresentado para reduzir o desvio padrão das estimativas de distância baseadas na medida da potência do sinal de radiofrequência (RF) recebido. O método faz uso da informação da taxa de recepção de pacotes. Através de simulações computacionais, mostra-se que o método proposto apresenta uma redução no desvio padrão das estimativas que cresce de forma aproximadamente linear com a distância. Para diferentes modelos de propagação do sinal e diferentes configurações do receptor de rádio, esta redução pode ser ainda mais significativa. Assim, o método proposto pode ser utilizado em algoritmos de localização para melhorar o custo-benefício entre o número de mensagens transmitidas e a precisão/variação das estimativas.

Palavras-Chave—Redes de Sensores Sem Fio, Algoritmos de Localização, Indicador da Potência do Sinal Recebido, Taxa de Recepção de Pacotes

Abstract—This paper presents a method to reduce the standard deviation of the distance estimations based on the measurement of the received radio frequency signal power. The method makes use of the packet reception rate information. Through computer simulations, it is shown that the proposed method presents a reduction in the standard deviation of the estimates that increases approximately linearly with distance. For different signal propagation models and different radio receiver configurations, this reduction may be even more significant. Thus, the proposed method can be used in location algorithms to improve the tradeoff between the number of transmitted messages and estimates accuracy/variance.

Keywords—Wireless Sensor Networks, Location Algorithms, Received Signal Strength Indicator, Packet Reception Rate

I. INTRODUÇÃO

As redes de sensores sem fio (RSSF) passaram por um grande progresso na última década e, devido a desenvolvimentos tecnológicos recentes, tornaram-se viáveis e estão cada vez mais presentes em aplicações de segurança, de vigilância, médica, industrial e militar, entre outras. Uma RSSF consiste basicamente em uma rede formada por nodos sensores, organizados de tal maneira a desempenhar uma tarefa específica. Os nodos caracterizam-se por serem autônomos, ou seja, podem desempenhar tarefas de sensoriamento, processamento e comunicação de dados, além de possuírem alimentação própria, geralmente baterias.

Dentre as tarefas que uma RSSF pode desempenhar, podem ser destacadas as de vigilância, coleta de dados

e rastreamento. Em várias aplicações, o conhecimento da localização dos nodos é muito importante, podendo isto ser uma necessidade da própria aplicação ou um requisito para aumentar a economia de energia no roteamento de pacotes, ou ainda para aumentar a segurança da rede [1]. No entanto, essas redes são formadas por nodos sensores que possuem recursos extremamente limitados, como baixa capacidade de processamento e de armazenamento, tanto de dados quanto de energia, o que resulta em uma baixa capacidade de transmissão. Tais fatores devem ser levados em consideração para uma análise dos requisitos do projeto [2]. Portanto, em redes com centenas ou mesmo milhares de nodos, seria inviável localizar cada um deles com um módulo do sistema de posicionamento global (GPS) [3], devido ao elevado custo financeiro e ao grande consumo de energia [4]. Outro problema relacionado à utilização do GPS em RSSF está relacionado ao fato de esse não operar de forma confiável em regiões encobertas como edificações, solos ou matas densas.

Nesse contexto, foram desenvolvidos algoritmos de localização que buscam otimizar parâmetros como precisão, custo de *hardware* e consumo de energia. Dentre os tipos de algoritmos encontrados na literatura, existe um muito importante que determina a localização através de um cálculo de trilateração sobre distâncias estimadas entre o nodo em questão e os de referência, cujas posições são supostamente conhecidas. Estas distâncias podem ser estimadas a partir da potência do sinal recebido [5], do tempo de propagação de um sinal de radiofrequência (RF) [3] ou de um sinal acústico [6].

A principal vantagem do método de estimação das distâncias entre nodos utilizando a informação da potência do sinal recebido (*Received Signal Strength Indicator* - RSSI), se comparado aos outros, é o fato de que a maioria dos circuitos de rádio utilizados em nodos calcula automaticamente esta informação em todas as transmissões. Assim, utilizando-se esse método não há necessidade de se adicionar módulos especiais aos nodos, permitindo uma redução do custo de *hardware* e do consumo de potência. Porém, como o sinal de RF está sujeito a uma série de interferências, como sombreamento, desvanecimento de multipercursos e ruído aditivo Gaussiano branco [7], as distâncias estimadas estão sujeitas a uma grande variação, a qual aumenta com o aumento do espaçamento entre os nodos.

Assim, neste trabalho, apresenta-se um novo método para reduzir a variação das distâncias estimadas por meio da informação do RSSI entre nodos com o auxílio da informação da taxa de recebimento de pacotes (*Packet Reception Rate* - PRR). O restante deste trabalho está organizado da seguinte maneira. Na Seção II, apresentam-se os modelos

Crístian Müller e Dimas Irion Alves, Universidade Federal do Pampa, Alegrete-RS, Brasil, E-mails: cristianmuller.50@gmail.com, dimasirion977@gmail.com.

Crístian Müller, Dimas Irion Alves e Bartolomeu F. Uchôa-Filho, Grupo de Pesquisa em Comunicações, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis-SC, Brasil, E-mail: uchoa@eel.ufsc.br.

Renato Machado, Grupo de Processamento de Sinais e Comunicações, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria-RS, Brasil, E-mail: renatomachado@ieee.org.

teóricos utilizados para a estimação das distâncias a partir da potência do sinal recebido. Na Seção III, apresenta-se o novo método para estimação da distância. Os resultados de simulação e discussões são apresentados na Seção IV. Na Seção V, conclui-se o trabalho ressaltando-se as principais características e ganhos alcançados com o novo método.

II. ESTIMAÇÃO DA DISTÂNCIA POR MEIO DO RSSI

O modelo mais utilizado para descrever o comportamento do canal de comunicação sem fio em RSSF é o log-normal com sombreamento [8], [9]. Segundo esse modelo, a potência do sinal recebido (em dB) a uma distância d do transmissor é dada por

$$P_r(d) = P_t - PL(d_0) - 10\eta \log_{10} \left(\frac{d}{d_0} \right) + X_\sigma, \quad (1)$$

em que P_t é a potência do sinal transmitido e $PL(d_0)$ é a perda de potência a uma distância de referência d_0 do transmissor, ambas expressas em dB. O parâmetro η é o fator de desvanecimento de larga escala e X_σ é uma variável aleatória, Gaussiana de média zero e desvio padrão definido por σ , representando os efeitos do sombreamento.

As variáveis desse modelo são determinadas de acordo com o *hardware* e o ambiente, através do ajuste de curvas sobre dados obtidos experimentalmente. Para facilitar o entendimento do método de redução de variância nas medidas de distância, proposto neste artigo, baseamo-nos em um sistema específico em [8], [10], que consideram valores e faixas típicas para ambientes internos e externos.

Então, com base nas simulações e experimentos realizados em [8], [10], neste artigo adotaram-se $P_t = 0$ dBm, $PL = 55$ dB, $d_0 = 1$ m, $\eta = 3$ e $\sigma = 4$ para o modelo. Na Fig. 1, apresentam-se os resultados da simulação desse modelo, na qual os círculos representam valores de potência recebida instantânea e a linha contínua, o valor médio, \overline{P}_r^* . No restante deste artigo, o sobrescrito (*) indicará “obtido a partir de um número infinito de transmissões”.

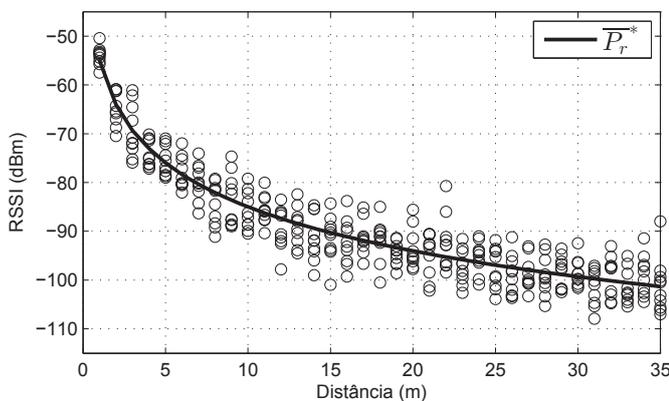


Fig. 1. Potências instantânea e média em função da distância, conforme (1), para $P_t = 0$ dBm, $PL = 55$ dB, $d_0 = 1$ m, $\eta = 3$ e $\sigma = 4$.

Em relação ao nodo sensor, aqui adotou-se o modelo MICA2 apresentado em [11], com modulação FSK (*Frequency-Shift Keying*) não coerente, taxa de transmissão

$R = 19,2$ kbps, largura de banda $B_N = 30$ kHz, tamanho de frame $f = 50$ bytes e nível de ruído $P_n = -105$ dBm. Nesse caso, para uma dada razão sinal-ruído (SNR) média, γ , obtida a partir de (1), e do nível de ruído, P_n , a probabilidade de receber um certo *frame* de dados sem erros é dada por

$$p_f(\gamma) = \left(1 - \frac{1}{2} e^{-\frac{\gamma}{2} \frac{B_N}{R}} \right)^{8f}, \quad (2)$$

que é mostrada da Fig. 2.

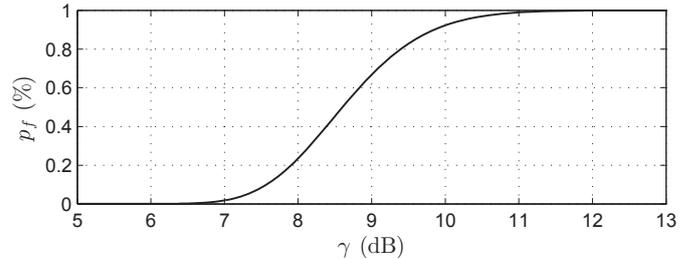


Fig. 2. Probabilidade de receber um determinado *frame* de dados sem erros em função da SNR média, dada em (2), considerando o nodo MICA2.

Na prática, os algoritmos de localização geralmente consideram apenas a potência dos pacotes recebidos corretamente para realizar as estimativas de distância entre os nodos, pois nos pacotes são informados a posição e o identificador do respectivo nodo de referência. Por meio de (1) e (2), pode-se determinar o valor esperado da PRR para uma dada distância [11], dado por

$$\Psi^*(d) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{\infty} p_f \left(10^{(x-P_n)/10} \right) e^{-\frac{(x-\mu(d))^2}{2\sigma^2}} dx, \quad (3)$$

em que

$$\mu(d) = P_t - PL(d_0) - 10\eta \log_{10} \left(\frac{d}{d_0} \right). \quad (4)$$

Então, a partir de (1)-(4), pode-se determinar a potência média dos pacotes recebidos com sucesso por

$$\overline{P}_s^*(d) = \frac{1}{\Psi^*(d)\sigma\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{\infty} x p_f \left(10^{(x-P_n)/10} \right) e^{-\frac{(x-\mu(d))^2}{2\sigma^2}} dx. \quad (5)$$

Para exemplificar a recepção apenas dos pacotes recebidos corretamente, foi realizada uma simulação de (1) considerando (2) como restrição para a recepção dos pacotes. O resultado desta simulação é apresentado na Fig. 3, na qual os círculos representam a potência dos pacotes recebidos corretamente e as linhas contínua e tracejada representam \overline{P}_r^* e \overline{P}_s^* , respectivamente. Destaca-se que as curvas das potências médias permanecem próximas até $d \sim 15$ m. A partir desta distância relativa entre o transmissor e o receptor, a potência \overline{P}_r^* se aproxima de P_n , ou seja, tem-se uma baixa SNR, fazendo com que uma quantidade considerável de pacotes recebidos sejam descartados. Este efeito é mostrado na Fig. 4, na qual os círculos representam o Ψ calculado a partir da transmissão de 10 pacotes para cada distância simulada, e a

linha representa Ψ^* . Assim, para $d > 15$ m, a curva de \overline{P}_s^* na Fig. 3 se torna mais plana do que \overline{P}_r^* , o que se traduz em uma maior sensibilidade em termos de estimativas de distâncias a partir da medida do RSSI.

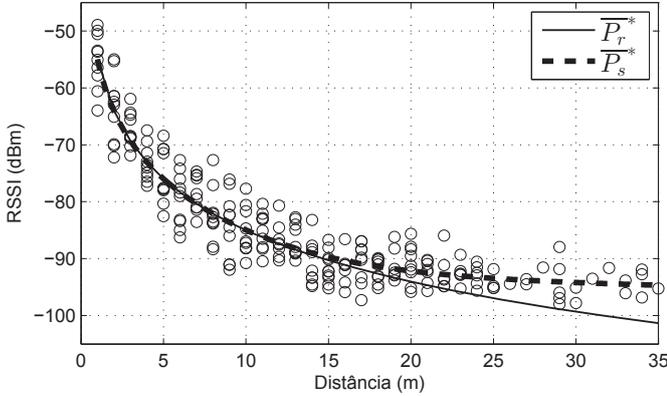


Fig. 3. Potências instantânea e médias (incondicionada e condicionada ao sucesso) em função da distância.

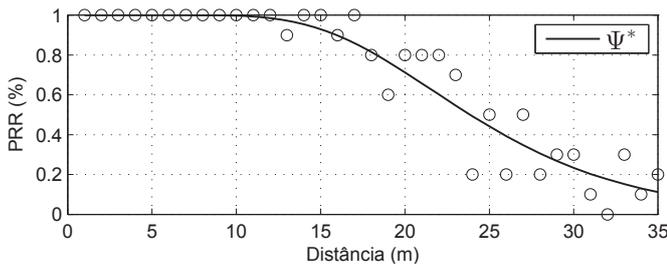


Fig. 4. Ψ^* e Ψ , esse último sendo calculado a partir da transmissão de 10 pacotes por passo de distância simulada.

Uma primeira abordagem para se estimar a distância entre transmissor e receptor é, partindo-se da média das potências de pacote recebido com sucesso, \overline{P}_s , isolar a distância d em (1) desconsiderando-se X_σ , resultando em [8]:

$$d(\overline{P}_s) = 10^{\frac{P_t - PL(d_0) - \overline{P}_s}{10\eta}}. \quad (6)$$

Esta abordagem é válida apenas para pequenas distâncias, pois assim Ψ^* será próxima de 100%, e (1) retrata mais fidedignamente a potência recebida. Entretanto, para grandes distâncias, haverá uma discrepância entre \overline{P}_s e \overline{P}_r (mostrada na Fig. 3), causando consequentemente um desvio significativo entre a distância estimada e a real.

Uma solução para eliminar esse desvio intrínseco entre a distância estimada e a real, seria isolar $d(\overline{P}_s)$ a partir de (5). Porém, isso traria um aumento de complexidade. Uma possível maneira de se viabilizar tal solução seria utilizar uma tabela relacionando valores de \overline{P}_s^* e $d(\overline{P}_s^*)$ nos nodos. Solução semelhante, apresentada em [5], utiliza um modelo aproximado à curva média obtida de modo empírico.

Porém, conforme já ressaltado anteriormente, o grande problema que ocorre nos métodos apresentados é a variância das distâncias estimadas, a qual se torna cada vez maior

conforme o espaçamento entre transmissor e receptor aumenta. Modificando (6), pode-se obter uma estimativa de distância a partir de apenas uma mostra do RSSI,

$$d'(P_s) = 10^{\frac{P_t - PL(d_0) - P_s}{10\eta}} 10^{\frac{X_\sigma}{10\eta}}, \quad (7)$$

em que percebe-se que o erro $10^{\frac{X_\sigma}{10\eta}}$ causado pelo sombreamento log-normal sobre o sinal recebido é multiplicativo, ou seja, quanto maior a distância, maior a variação entre estimativas consecutivas. Tal comportamento faz com que seja necessária uma quantidade muito grande de amostras do RSSI para minimizar a variância das potências médias calculadas para grandes distâncias. Tal tarefa é dificultada ainda mais pelo fato de que quanto maior a distância, menor será a taxa de recebimento de pacotes, conforme visto na Fig. 4.

III. MÉTODO PROPOSTO

Neste trabalho, procura-se tirar proveito do fato de que, a partir de uma certa distância entre os nodos transmissor e receptor, a estimação da distância se torna cada vez menos sensível às variações de Ψ^* do que às variações de \overline{P}_s^* . Este comportamento pode ser visualizado nas Figs. 3 e 4. Assim, a fim de reduzir o desvio padrão na estimação das distâncias entre nodos pelo método da potência do sinal recebido, neste trabalho, a informação da taxa de recepção de pacotes será incorporada à estimativa.

Um dos maiores desafios remanescentes nas RSSF é a avaliação da confiabilidade dos *links* entre nodos, ou seja, estimar a PRR de determinada transmissão de modo que protocolos de roteamento possam dar vazão e aumentar a confiabilidade na entrega de dados. Porém, segundo [12], um dos maiores problemas nesta tarefa é a interferência entre diferentes padrões de comunicação, que ocorre de maneira intensa em ambientes urbanos, principalmente devido ao compartilhamento espectral [13], como é o caso dos padrões 802.15.1 (Bluetooth), 802.11b e 802.15.4, sendo esse último amplamente utilizado em RSSF. Ainda, em [12], mostrou-se que em ambientes com baixa interferência, como é o caso do meio rural para o qual existem várias aplicações de RSSF, verifica-se uma forte correlação entre o espaçamento dos nodos e a PRR, evidenciando a aplicabilidade do método proposto.

O método de estimação de distância proposto consiste na adição de um fator de correção $f(\Psi)$ em (6). A distância estimada proposta é dada por

$$d_{prop}(\overline{P}_s, \Psi) = d(\overline{P}_s) + f(\Psi), \quad (8)$$

em que

$$f(x) = x^3 c_3 + x^2 c_2 + x c_1 + c_0. \quad (9)$$

Neste trabalho, considerou-se suficiente a utilização de um polinômio de 3ª ordem na função de correção, sendo que seus coeficientes foram calculados com o auxílio da função *polyfit* do software Matlab com base nas curvas de \overline{P}_s^* e Ψ^* , desse modo havendo dependência da configuração dos modelos de propagação do sinal e do rádio. Os coeficientes são mostrados na Tabela I, destacando-se que esses também

foram arredondados visando reduzir ainda mais a quantidade de memória necessária para um nodo executar esse método.

TABELA I

COEFICIENTES CALCULADOS PARA A FUNÇÃO DE CORREÇÃO EM (9).

c_3	c_2	c_1	c_0
-19	45	-44	18

Na Fig. 5, apresentam-se a estimativa da distância entre os nodos proposta neste trabalho (Eq. (8)) e a estimativa da Eq. (6). A reta de inclinação 1 (distância real) é também mostrada como referência. Devido aos arredondamentos e ao número limitado de coeficientes utilizados na função de correção (9), existe um erro de aproximação intrínseco entre a distância obtida pela estimativa proposta e a real, conforme mostrado na Fig. 6. Porém, devido à alta variância nas estimativas de distância, tal erro é considerado irrelevante.

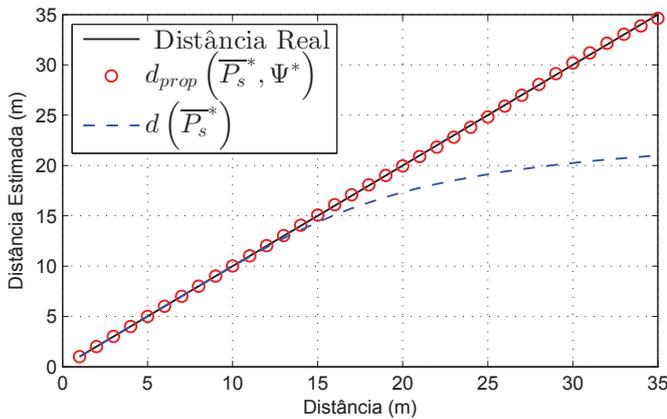


Fig. 5. Distância estimada pelo método proposto e aquela baseada em (6).

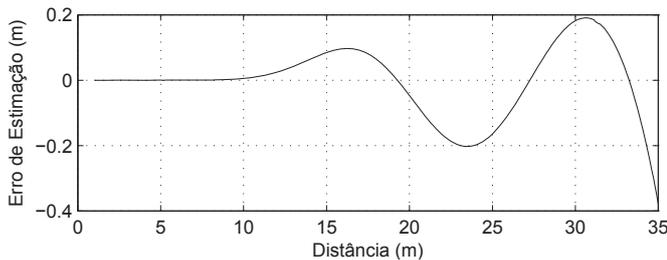


Fig. 6. Erro de aproximação intrínseco entre a estimativa do método proposto e a distância real.

IV. RESULTADOS DE SIMULAÇÃO

O método de estimação da distância entre nodos proposto é comparado por meio de simulações computacionais com o considerado convencional. Neste artigo, considera-se como método convencional aquele que estima uma distância a partir da potência média do sinal recebido através de uma função ou tabela que relaciona estas duas grandezas [5], [7]. Neste

trabalho considerou-se para esse fim a curva teórica de $\overline{P_s^*}(d)$, descrita em (5) e mostrada na Fig. 3.

O procedimento desta simulação consiste em aumentar a distância entre transmissor e receptor de 1 a 35 m com passos de 1 m. Para cada passo são realizadas 10^6 estimativas com cada método. Para que o nodo receptor possa determinar a PRR, necessita-se fixar um número de pacotes transmitidos (nPac) para a realização de cada estimativa. Nas simulações deste trabalho, foram definidos os valores de 10, 20, 40 e 80 pacotes.

O resultado da simulação computacional apresentado na Fig. 7 mostra a diferença média entre as distâncias estimadas pelos métodos convencional e proposto, e a distância real entre os nodos transmissor e receptor. Percebe-se que, conforme o esperado, o módulo da diferença média ou erro médio de ambos os métodos diminui com o aumento do número de pacotes transmitidos por estimativa. Destaca-se que o erro do método proposto é menor que o do convencional em muitos casos, porém esse não é o objetivo deste trabalho, e uma análise mais detalhada desse quesito é dificultada pelo erro intrínseco do método proposto.

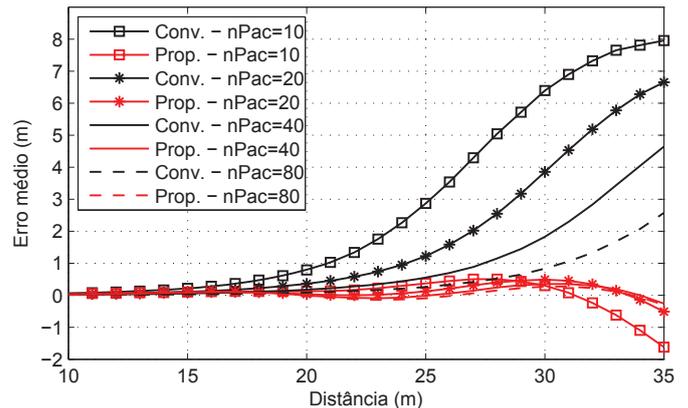


Fig. 7. Diferença média entre as distâncias estimadas pelos métodos convencional (destacado em preto) e proposto (destacado em vermelho) e a distância real entre os nodos.

Já na Fig. 8, apresenta-se o desvio padrão das estimativas de distância de ambos os métodos. Nota-se que o desvio padrão do método proposto é consideravelmente menor para distâncias maiores do que 15 m. Desse modo, na Fig. 9, mostra-se a redução percentual do desvio padrão do método proposto em relação ao convencional neste trabalho, percebendo-se que esta cresce de forma quase linear com a distância e alcança cerca de 80% para a distância de 35 m. Ainda na Fig. 9, pode-se visualizar que a redução do desvio padrão varia significativamente com a mudança do número de pacotes transmitidos.

V. CONCLUSÕES

Este trabalho apresentou um método de estimação de distância entre nodos a partir da medida da potência do sinal recebido. A novidade do método é a utilização da informação da taxa de recepção de pacotes, como uma forma de reduzir o desvio padrão das estimativas de distância

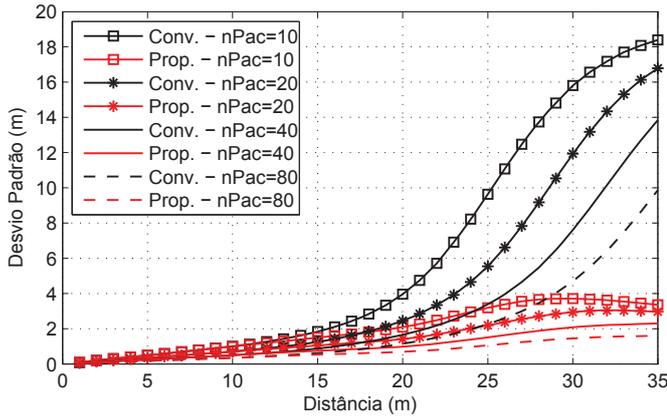


Fig. 8. Desvio padrão das distâncias estimadas pelos métodos convencional (destacado em preto) e proposto (destacado em vermelho).

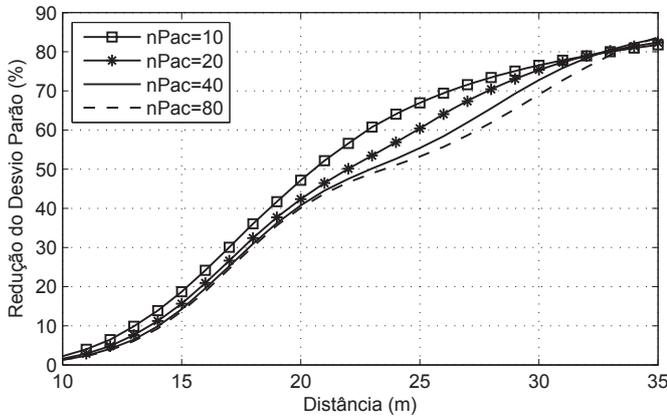


Fig. 9. Redução percentual do desvio padrão das estimativas de distância do método proposto em relação ao convencional.

entre nodos quando comparado ao método convencional que utiliza apenas a informação da potência recebida. Através de simulações computacionais mostra-se que o método proposto apresenta redução de desvio padrão das estimativas, crescente com o aumento da distância. Esta redução é dependente da configuração adotada nos modelos, sendo que seria possível obter ganhos ainda maiores em diferentes modelos que não foram avaliados neste trabalho. Desse modo, o método proposto pode ser utilizado em algoritmos de localização para aumentar a precisão das estimativas, para reduzir os efeitos

de sombreamento a níveis aceitáveis e para reduzir o número necessário de mensagens transmitidas, sendo que esta última acarreta em uma redução de tempo de processamento e de consumo de energia.

AGRADECIMENTOS

Esse trabalho é parcialmente financiado pela Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Ensino Superior (CAPES/PROEX), pelo Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) e pelo Exército Brasileiro.

REFERÊNCIAS

- [1] L. Hu and D. Evans, "Localization for mobile sensor networks," in *Proceedings of the 10th annual international conference on Mobile computing and networking*, ser. MobiCom '04. New York, NY, USA: ACM, 2004, pp. 45–57.
- [2] I. Akyildiz, W. Su, Y. Sankarasubramaniam, and E. Cayirci, "A survey on sensor networks," *IEEE Commun. Mag.*, vol. 40, no. 8, pp. 102–114, 2002.
- [3] H. L. B. Hofmann-Wellenhof and J. Collins, *Global Positioning System: Theory and Practice*, 4th ed. Springer Verlag, 1997.
- [4] H. Guo, K.-S. Low, and H.-A. Nguyen, "Optimizing the localization of a wireless sensor network in real time based on a low-cost microcontroller," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 58, no. 3, pp. 741–749, 2011.
- [5] P. Bahl and V. Padmanabhan, "RADAR: an in-building RF-based user location and tracking system," in *Proc. IEEE Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Societies*, 2000, pp. 775–784.
- [6] C. Peng, G. Shen, and Y. Zhang, "Beepbeep: A high-accuracy acoustic-based system for ranging and localization using cots devices," *ACM Trans. Embed. Comput. Syst.*, vol. 11, no. 1, pp. 4:1–4:29, 2012.
- [7] L. M. Trevisan, M. E. Pellenz, M. C. Penna, R. D. Souza, and M. S. P. Fonseca, "A simple iterative positioning algorithm for client node localization in w lans," *EURASIP J. Wireless Comm. and Networking*, vol. 2013, pp. 276:1–276:11, 2013.
- [8] K. Yedavalli and B. Krishnamachari, "Sequence-based localization in wireless sensor networks," *Mobile Computing, IEEE Transactions on*, vol. PP, no. 99, pp. 1–1, 2009.
- [9] T. Rappaport, *Wireless Communications: Principles and Practice*, 2nd ed. Upper Saddle River, NJ, USA: Prentice Hall PTR, 2001.
- [10] M. Zuniga and B. Krishnamachari, "Analyzing the transitional region in low power wireless links," in *Sensor and Ad Hoc Communications and Networks, 2004. IEEE SECON 2004. 2004 First Annual IEEE Communications Society Conference on*, 2004, pp. 517–526.
- [11] M. Z. Zamalloa and B. Krishnamachari, "An analysis of unreliability and asymmetry in low-power wireless links," *ACM Trans. Sen. Netw.*, vol. 3, no. 2, Jun. 2007.
- [12] B. Raman, K. Chebrolu, D. Gokhale, and S. Sen, "On the feasibility of the link abstraction in wireless mesh networks," *Networking, IEEE/ACM Transactions on*, vol. 17, no. 2, pp. 528–541, April 2009.
- [13] K. Srinivasan, P. Dutta, A. Tavakoli, and P. Levis, "An empirical study of low-power wireless," *ACM Trans. Sen. Netw.*, vol. 6, no. 2, pp. 16:1–16:49, 2010.