

Qualidade da Medição de Intensidade de Sinal nas Comunicações de uma Rede de Sensores Sem Fios: uma Abordagem da Camada Física

João Carlos Giacomini¹, Flávio Henrique Vasconcelos²

¹ Departamento de Ciência da Computação
Universidade Federal de Lavras (UFLA), Lavras – MG – Brasil
giacomini@dcc.ufla.br

² Departamento de Engenharia Elétrica
Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG), Belo Horizonte – MG – Brasil
fvasc@cpdee.ufmg.br

Resumo: A medida da intensidade de sinal de rádio nas comunicações em uma rede de sensores sem fios (RSSF) é utilizada para diversas funções vitais, especialmente para a localização dos nós sensores dentro da rede e para a estimação da qualidade de suas ligações. Este trabalho apresenta uma descrição de algumas arquiteturas de rádio utilizados por nós sensores comerciais e os métodos empregados por estes para a medição da intensidade do sinal captado pelo receptor. É sugerido um tratamento estatístico dessas medições e são apresentados resultados experimentais que confirmam esta abordagem.

Palavras-Chave: Redes de sensores sem fios, intensidade de sinal de rádio, qualidade de medição, modulação

Measurement Quality of Signal Strength in the Wireless Sensor Network's Communications: a Physical Layer Approach

Abstract: The measurement of radio signal strength in the wireless sensor network (WSN) communication is used for a great number of important functions, especially for node localization inside the network and for their link quality estimation. This paper describes some radio architectures used in commercial sensor nodes and the methods employed for measurement of the strength of radio signal that reaches the receiver. It is proposed a statistic treatment for this measurements and experimental results are presented confirming this approach.

Keywords: Wireless sensor Networks, radio signal strength, measurement quality, modulation

(Received January 27, 2006 / Accepted April 6, 2006)

1. Introdução

O conhecimento da potência do sinal eletromagnético recebido pelo rádio é de primordial importância em uma rede de sensores sem fio (RSSF), visto que este é o ponto de partida para importantes serviços próprios dessas redes. Entre estes serviços pode-se citar a identificação da qualidade da ligação entre os nós sensores, a determinação da localização espacial dos nós e a coordenação do acesso ao canal de comunicação [2,11,12,14]. Porém as incertezas envolvidas na medição da intensidade do sinal recebido pelo rádio conduzem a imprecisões nos resultados obtidos em tais serviços executados pela rede [2,14,17]. É necessário que se conheçam os métodos de medição de intensidade de

sinal pelos receptores utilizados nos nós sensores, para que se faça uma descrição estatística do comportamento desta medida. Esta descrição permitirá a construção de modelos matemáticos mais apurados para a realização daqueles serviços necessários às RSSF.

Uma RSSF é um caso especial de rede de comunicação de dados composta por um grande número de nós (os nós sensores), os quais se comunicam por múltiplos saltos (*multi-hop*) através de minúsculos rádios, e são equipados com processadores embarcados, memória e sensores [7]. Em alguns casos a comunicação é feita por sinais óticos (luz ou laser). O objetivo de uma rede de sensores é medir (sensoriar) e coletar dados do ambiente em pontos distintos de uma região e transmitir

esses dados até um ponto de coleta (ponto de acesso) [3]. As RSSF encontram aplicações em diversas áreas: militar, industrial, doméstica, ambiental, agrícola e outras. Para todas estas aplicações, é importante que se conheça a localização (absoluta ou relativa) dos nós sensores e a qualidade das ligações entre eles. Para isto se deve ter um bom sistema de medição de intensidade de sinal de rádio.

Normalmente, as redes de sensores são constituídas de um número muito grande de nós, podendo ser milhares, os quais são lançados no campo sem posicionamento definido. Estas redes devem possuir mecanismos para auto-configuração e adaptação, visto que os nós são depositados, geralmente, de uma forma aleatória e não planejada. Além disso, durante a operação da rede, alguns nós podem ser danificados, movidos, desligados, ou perderem a capacidade de comunicação [12].

A existência da conectividade entre os rádios e a atenuação do sinal de rádio frequência (RF) com a distância são propriedades atrativas que podem ser exploradas para se estimar a distância de um nó sensor relativamente aos seus vizinhos e sua posição dentro da rede de sensores [4]. Para tanto, os receptores de rádio dos nós sensores disponibilizam uma informação da intensidade do sinal recebido (RSSI). A RSSI é utilizada por muitos pesquisadores de RSSF como uma ferramenta para a estimação de posição dos nós sensores. Alguns algoritmos baseados em RSSI têm sido propostos para resolver problemas de descoberta de localização e de organização das redes sensores, como é o caso do projeto Calamari [17] e dos algoritmos HEAP e STROBE [2].

O uso da RSSI para estimação da distância entre os nós sensores é um método impreciso, uma vez que um pequeno desvio no valor medido pode causar um grande desvio no valor da distância calculada em relação à real. Os algoritmos desenvolvidos para a estimação de posição dos nós sensores se baseiam na existência de nós cujas localizações sejam conhecidas (são os nós âncoras) e na redundância de medições, isto é, na existência de mais de três nós vizinhos do nó a ser localizado [17]. Outros métodos de descoberta de localização existem, como os que utilizam GPS (sistema de posicionamento global) e os que empregam ultrassom, mas todos têm suas limitações. A utilização da RSSI é preferível em RSSF por ser um método simples que não necessita de *hardware* adicional [2].

Nas próximas seções, os seguintes assuntos serão tratados: dispersão e atenuação de sinais de rádio (RF), tipos de modulação, arquitetura de receptores, medição de intensidade de RF, imunidade a ruído, filtragem, propagação, interferências e aplicações da medição de RSSI. Na seção 2 são apresentados os 3 tipos básicos de

modulação de ondas de rádio utilizados para a transmissão de dados. A seção 3 apresenta um modelo básico de atenuação dos sinais de RF no meio de propagação. Na seção 4 é feita uma revisão sobre o processamento de sinais na modulação e demodulação dos sinais de rádio. Na seção 5 são descritos aspectos construtivos dos transmissores e receptores de RF e são descritas as características desses elementos, bem como são apresentados os métodos de medição de intensidade de sinal. Um método de tratamento dos dados obtidos das medições de intensidade de sinal de RF recebido é proposto na seção 6. Na seção 7 são apresentados resultados experimentais. As conclusões são apresentadas na seção 8.

2. Transmissão não guiada de dados

A transmissão de dados através de ondas eletromagnéticas iniciou-se na segunda metade do século XIX, quando um grande número de pesquisadores procuravam uma forma de transmitir sinais telegráficos sem a necessidade da utilização de fios elétricos. Neste grupo encontram-se Maxwell, Edison, Hertz, Marconi, Popoff, Branly, o russo Popov e o padre Landell, do Brasil. O princípio da transmissão de dados através de ondas de rádio (RF) consiste em se utilizar uma onda eletromagnética de alta frequência, a qual é produzida por uma fonte denominada transmissor (Tx) e capturada por um receptor (Rx), sendo estes dois elementos separados por uma certa distância. O uso de uma onda de alta frequência é necessário para que se possa estabelecer a comunicação empregando-se menor potência elétrica e utilizando-se antenas de dimensões reduzidas.

Denomina-se modulação o processo de se inserir uma informação de baixa frequência em uma onda de RF [6]. O sinal elétrico que contém a informação é denominado modulante e a onda de alta frequência é a portadora. A modulação consiste na modificação de alguma característica da portadora de forma proporcional ao sinal modulante. A informação é recuperada no Rx pelo processo conhecido como demodulação, ou detecção. Quando a modificação ocorre na amplitude da portadora, tem-se a modulação em amplitude, ou AM; quando ocorre modificação na frequência da portadora, tem-se FM; quando modifica-se a fase, tem-se PM.

Na transmissão de dados digitais, a onda modulante varia aos saltos, entre valores discretos. A modulação de uma onda de RF por um sinal digital é chamada chaveamento (*keying*). O chaveamento em amplitude é ASK (*amplitude shift keying*); o chaveamento em frequência é FSK (*frequency shift keying*); e o chaveamento em fase, PSK (*phase shift keying*). A figura 1 apresenta um esquema dos três tipos de modulação.

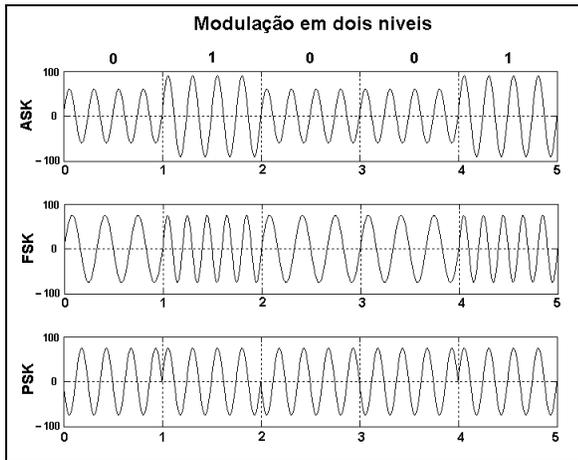


Figura 1 – Modulação binária

3. Propagação de ondas de rádio

Uma rede de sensores sem fios (RSSF) que estabelece comunicação através de RF emprega rádios de muito baixa potência, visto que seus nós sensores são alimentados por pequenas baterias, tendo, portanto, pouca disponibilidade de energia. A maioria dos rádios dos nós sensores realizam FSK, PSK, ou alguma combinação das três formas básicas de modulação. A transmissão é feita com uma potência máxima de 10mW (10 dBm), mas normalmente é prevista alguma forma de se reduzir esta potência [4,5]. O receptor normalmente consegue identificar sinais de muito baixa potência, até mesmo de -100 dBm (10^{-10} mW). A unidade dBm é uma referência em decibéis a uma potência de 1 mW. Portanto, a potência dada em dBm é calculada da seguinte forma:

$$P[dBm] = 10 \cdot \log\left(\frac{P[mW]}{1mW}\right) \quad (1)$$

Como exemplos pode-se indicar uma potência $P = 5mW$ como $P = 6,99$ dBm, ou pode-se dizer $P = -100mW = -20$ dBm. Dizer que o rádio do nó sensor, operando como receptor, tem sensibilidade para -100 dBm, significa que ele é capaz de captar sinais tão fracos como 0,1 pico watt ($P = 0,1$ pW).

Esta grande sensibilidade dos receptores é importante porque os sinais de RF se dispersam e se atenuam no caminho de propagação, o que faz com que a potência recebida seja sempre muito menor do que a potência despendida pelo transmissor. Os modelos matemáticos utilizados para descrever a propagação das ondas eletromagnéticas (RF) são derivados das equações de Maxwell [6,13]. Inicialmente, pode-se

considerar um modelo simples, dado pela fórmula de transmissão de Friis, a qual descreve a propagação de ondas eletromagnéticas no espaço livre [16]:

$$\frac{P_R}{P_T} = \left(\frac{\lambda}{4\pi d}\right)^2 G_T G_R = L_{FS} \cdot G_T \cdot G_R \quad (2)$$

onde P_R e P_T são as potências recebida e transmitida, G_T e G_R são os ganhos das antenas do transmissor e do receptor, λ é o comprimento de onda e d é a distância entre o transmissor e o receptor. L_{FS} é denominada “perda de transmissão no espaço livre” (*free space transmission loss*).

Um transmissor que utiliza uma antena isotrópica transmite ondas de rádio igualmente em todas as direções do espaço, o que é o fenômeno denominado dispersão. A distribuição espacial da irradiação de uma antena real, não isotrópica, é não uniforme, e é descrita por sua função de ganho direcional, G . O ganho direcional é a relação entre a intensidade de sinal irradiado por uma antena e a intensidade de sinal que seria irradiado por uma antena isotrópica, em uma determinada direção.

Pela aproximação de Friis conclui-se que um receptor colocado no espaço livre a uma distância (d) do transmissor, como representado na figura 2, perceberá uma potência de RF que é proporcional ao inverso do quadrado dessa distância [1]. Isto pode ser escrito, em decibéis, como:

$$P_R - P_T = -20 \cdot \log(d) + 20 \cdot \log(d_0) [dB] \quad (3)$$

onde as contribuições de G_T , G_R e $(\lambda/4\pi)$ estão reunidas no termo $20 \cdot \log(d_0)$

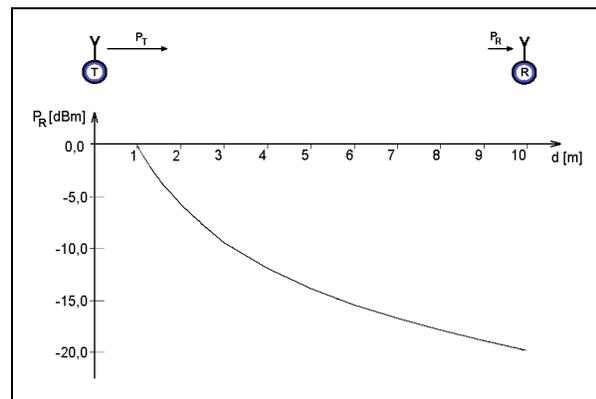


Figura 2 – Tx distante (d) de Rx.

Um transmissor que utiliza modulação FSK codifica a informação digital na forma de desvio da frequência da portadora (RF). Se a frequência de portadora for de 916 MHz, um desvio para 915,5 MHz pode significar um bit **zero** (0) e um desvio para 916,5 MHz pode significar um bit **um** (1). Após ser gerado o sinal a ser transmitido, este será enviado a um amplificador de potência (PA) para o sinal de RF atingir a intensidade necessária para a comunicação. O PA envia o sinal de RF para a antena.

No receptor, é feita a retirada da informação contida no sinal de RF captado pela antena. O primeiro estágio do receptor é um amplificador de baixo ruído (LNA – *Low Noise Amplifier*) capaz de identificar sinais de muito baixa intensidade. Antes de se fazer a demodulação (recuperação da informação), o sinal de entrada é convertido para uma frequência mais baixa, denominada frequência intermediária (FI), para que as etapas subsequentes possam ser realizadas com maior facilidade. Isto é feito pelo misturador e por um filtro passa baixas (baixas frequências), no “Estágio de FI”.

Quando o transceptor estiver em modo de recepção, o oscilador local opera em uma frequência próxima da frequência de portadora, de forma que a diferença seja a frequência intermediária (FI). Tipicamente o oscilador local é controlado de forma que a frequência intermediária seja da ordem de 1 MHz. Após passar pelo estágio misturador e se fazer a filtragem, o sinal de FI mantém a informação recebida. Na etapa de amplificação o sinal de FI é amplificado para níveis de tensão da ordem de 1V e é feita a medição da intensidade do sinal recebido (RSS). O bloco Demodulador recebe o sinal de FI amplificado e retira a informação contida. Esta informação passa por um

conversor analógico/digital (ADC) e o bloco controlador disponibiliza esses dados em formato binário.

A figura 4 apresenta o esquema da modulação e demodulação na forma de espectros de frequências. O transmissor (Tx) executa a modulação de um sinal elétrico de alta frequência (f_o), o que faz a informação de baixa frequência (BB – Banda Base) ser deslocada para a banda de f_o . O sinal modulado, em seguida, é amplificado e transmitido via RF. O receptor (Rx) executa a demodulação. O sinal de RF que chega à antena é misturado ao sinal do oscilador local resultando na transposição da informação para duas bandas distintas, uma acima e uma abaixo de f_o . O filtro passa-baixas descarta a componente de frequência mais alta e mantém a informação da frequência intermediária (FI). Após isto, a informação é recuperada pelo circuito detector. Em um rádio comum, a detecção é feita por circuitos analógicos; nos rádios integrados utilizados pelos nós sensores, a detecção é feita por um circuito digital, após a digitalização do sinal de FI.

Em alguns receptores, os quais são projetados para modulações mais complexas, como QPSK (PSK em quadratura), existem duas etapas de FI.

Uma vez que o sinal de RF recebido tem uma faixa de potência muito grande (tipicamente 80 dB), é conveniente que o sinal RSSI (informação da intensidade do sinal recebido – *Received Signal Strength Information*) siga uma escala de decibéis, no lugar de uma escala linear, para indicar a potência do sinal recebido (P_R). Para este fim, foram desenvolvidos amplificadores logarítmicos integrados de grande velocidade, excelente linearidade e exatidão [15]. Estes amplificadores possuem circuitos analógicos próprios para a medição de intensidade de sinal.

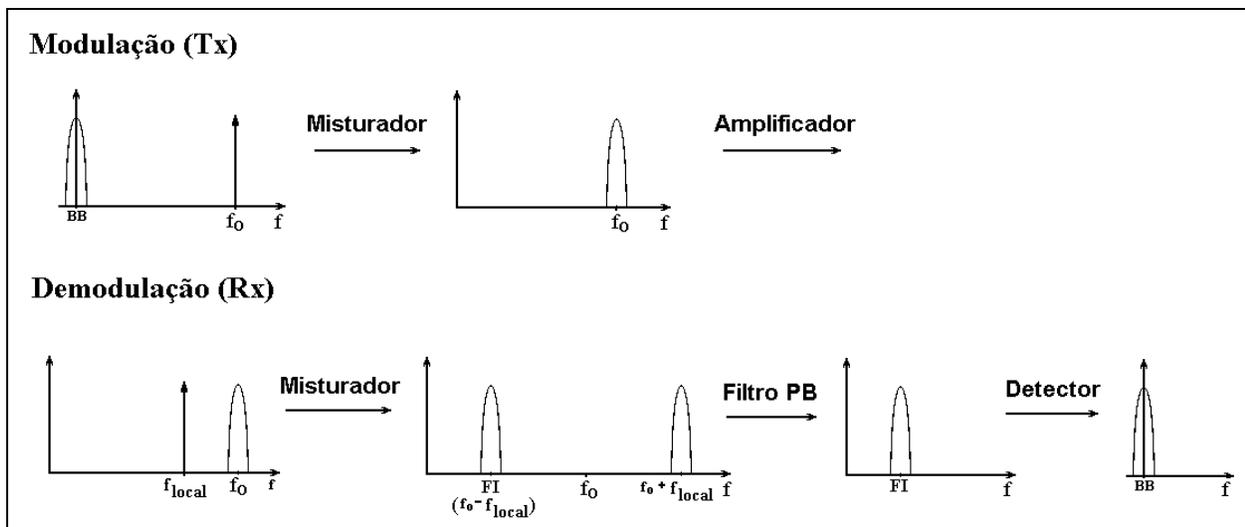


Figura 4 – Modulação e demodulação

5. Rádios integrados

Os transceptores utilizados pelos nós sensores são fabricados em um único circuito integrado (CI), utilizando a tecnologia CMOS. Isto é feito para se conseguir um dispositivo compacto e de muito baixa potência. São apresentadas aqui as características de dois transceptores utilizados por muitos fabricantes de nós sensores: o CC1000 [4] e o CC2420 [5]. O primeiro opera na banda ISM de 916 MHz e o segundo na banda ISM de 2,4 GHz.

As bandas ISM são muito utilizadas neste tipo de aplicação porque não há exigência das autoridades de telecomunicações por licença de operação de aparelhos nessas faixas de frequências. No Brasil, as bandas de 916 MHz e de 2,4 GHz são destinadas a aplicações ISM (industriais, científicas e médicas), sendo que a primeira cobre a faixa de 902-928 MHz e a segunda a faixa de 2,400-2,500MHz. A banda de 2,4 GHz é dedicada às aplicações ISM em quase todo o mundo, e coincide com a frequência de operação dos fornos de microondas.

O transceptor CC1000 é construído em um único circuito integrado, utilizando tecnologia CMOS de 0,35 μm . Este transceptor pode ser configurado para operar em frequências que vão de 300 a 1000 MHz. A potência de saída do transmissor pode ser programada para valores de -20 dBm até 10 dBm, e o receptor tem sensibilidade para captar sinais de até -110 dBm. É utilizada a codificação FSK, e taxas de transmissão de até 76,8 kbps (quilo-bits por segundo) podem ser alcançadas. O circuito integrado pode ser alimentado por tensões entre 2,1 e 3,6 V, faixa adequada para ligação por um par de pilhas. O consumo máximo de corrente é de 25,4 mA.

Internamente, o CC1000 utiliza um amplificador logarítmico capaz de amplificar o sinal de entrada, entre -110 dBm e -20 dBm, para níveis de tensão da ordem de 1 V. A medição da intensidade do sinal recebido é feita neste amplificador e é processada sobre 8 bytes. É especificado um desvio máximo de ± 6 dB no valor de RSSI informado pelo medidor. A RSSI é informada em um nível de tensão contínua (V_{RSSI}) cujo valor se situa entre 0 e 1,2V. V_{RSSI} varia linearmente em relação à potência (em dBm) do sinal de entrada. É indicado o ajuste de 50 dB/V, sendo que a potência do sinal recebido pode ser calculada como [4]:

$$P_R = -50 \cdot V_{\text{RSSI}} - 45,5 \quad [\text{dBm}] \quad (5)$$

O transceptor CC2420 é construído em um único circuito integrado, utilizando tecnologia CMOS de 0,18 μm . Este transceptor foi projetado para operar na faixa de 2,4GHz, atendendo à norma IEEE

802.15.4 [8], e às especificações do grupo ZigBee [18]. A potência do transmissor pode ser programada para níveis entre -25 dBm e 0 dBm (1 mW). O receptor tem sensibilidade para sinais de até -94 dBm. É utilizada a modulação OQPSK (*offset quadrature phase-shift keying*) e a codificação em DSSS (espalhamento espectral em seqüência direta). A modulação OQPSK permite maior eficiência na transmissão, atingindo uma taxa de transferência de dados de 250 kbps, neste rádio. O uso de DSSS dá mais robustez ao sinal de rádio, combatendo a interferência de sinais externos e os efeitos de propagação por caminhos múltiplos (*multi path*). A faixa de tensão de alimentação do CI é de 2,1 a 3,6 V e o consumo máximo de corrente é de 17,4 mA.

A detecção do sinal de RF é feita em duas etapas, uma analógica e uma digital. Na etapa analógica a informação é deslocada em frequência para uma FI de 2 MHz. Após esta etapa, o sinal de FI é amplificado e digitalizado. Diferentemente do CC1000, o receptor do CC2420 utiliza um amplificador logarítmico de ganho programável digitalmente. A digitalização do sinal é feita por um ADC do tipo *pipeline* (estágios em cascata), o qual executa conversões em alta velocidade. Na etapa digital é feita a identificação da intensidade de sinal através do sistema de controle automático de ganho, que controla o amplificador logarítmico. Na etapa digital são também executadas as funções de filtragem do sinal e correlação (decodificação do espalhamento espectral e sincronização de bytes). A execução destas operações no domínio digital permite maior precisão e maior eficiência. Outras funções foram incluídas na etapa digital do CC2420, como geração de código CRC de erro [8] e sua decodificação, criptografia de dados usando o padrão AES-128, e armazenamento em *buffers* de 128 bytes dos dados para transmissão e dos dados recebidos.

A RSSI é disponibilizada em formato digital codificada em complemento de 2 de 8 bits. É especificada um desvio máximo de ± 6 dB no valor de RSSI informado pelo medidor. A intensidade do sinal recebido é calculada diretamente de acordo com [5]:

$$P_R = \text{RSSI_DIG} + \text{RSSI_OFFSET} [\text{dBm}] \quad (6)$$

onde *RSSI_DIG* é o valor digital indicado na forma de complemento de 2 e *RSSI_OFFSET* tem um o valor de -45 dBm.

Como exemplo pode-se calcular a potência do sinal recebido, quando for indicado um valor digital de 11101100 (binário), que corresponde a -20 em decimal. Logo $P_R = -65$ dBm.

6. Modelagem da medição

Para se conseguir uma melhor estimativa da intensidade de sinal recebido (RSS), conhecendo-se as formas de medição indicadas na seção anterior, é preciso que se faça uma descrição estatística da RSSI dos diferentes tipos de rádio.

6.1. Aproximação pelo valor médio

Devido às características internas dos transceptores e à influência do ambiente externo sobre a propagação das ondas de RF entre os nós sensores, a indicação da intensidade do sinal recebido (RSSI) sofre variações, apresentando uma distribuição aleatória. Estes desvios na medição de RSSI dificultam sua utilização em alguns serviços de RSSF, como a descoberta de localização e a determinação da qualidade de ligação (LQ). Para que se possa obter um valor de RSSI mais adequado para estas funções é preciso se conhecer, pelo menos de forma aproximada, a qualidade dos resultados apresentados pelo medidor.

É freqüente a apresentação de medições de algum fenômeno físico na forma de um conjunto de valores distribuídos em torno de um ponto central. Quando esta distribuição segue a distribuição normal, considera-se como representativa a média dos valores medidos. O valor médio de uma amostra estará tão mais próximo da média de uma população quanto maior for o número de amostras [10,13]. Desta forma, espera-se que a média de 1000 medições seja um valor mais exato do que a média calculada sobre 100 medições. Será mostrado adiante, que as medições de intensidade de sinal (RSS) seguem de forma aproximada a distribuição normal.

Infelizmente, não se pode aumentar indefinidamente o número de amostras para a estimação de uma medida, pois isto demandaria um tempo muito longo, inviabilizando a utilização do resultado. Especificamente no caso de redes de sensores, ocorre outro problema, qual seja o pouco espaço de memória disponível para armazenar os dados coletados e a pequena capacidade de processamento dos nós sensores. Além disso, seria necessária uma grande taxa de transferência de dados (*throughput*) para se enviar todas as medições a um ponto de acesso, o que implica em aumento do consumo de energia pelos nós sensores. Para amenizar estes problemas, algumas propriedades da distribuição normal são utilizadas como forma de se fazer agregação de dados antes da transmissão. Isto só é possível devido à capacidade de processamento local, isto é, devido à existência de um microcontrolador no nó sensor. Em primeiro lugar, observa-se que uma função de distribuição normal é descrita por apenas dois elementos, sua média e seu desvio padrão. Em segundo, encontra-se o fato de que as médias obtidas de séries de medições serão valores próximos entre si. Isto

é, se forem feitas M seqüências com N medições cada, os valores das M médias encontradas estarão próximos uns dos outros. Finalmente recorre-se ao teorema do limite central.

6.2. Teorema do limite central

Se uma população tem uma distribuição normal, a distribuição das médias de amostras obtidas desta população será também normal, com a mesma média da população total [10].

O desvio padrão das médias amostrais relativamente à média da população total é reduzido por um fator igual à raiz quadrada do número de amostras. Esta propriedade é válida mesmo para populações cuja distribuição não segue perfeitamente a distribuição normal.

A utilidade deste teorema é encontrada quando não se conhece ou não se tem acesso à população total. Assim, são tomadas várias amostras e calculados seus valores médios. À medida que o número de amostra cresce, tem-se a certeza de que o valor médio dessas médias se aproxima da média real da população. Portanto, aproxima-se do valor que melhor representa a população. Por exemplo, são feitas 16 séries de medições de potência de um equipamento elétrico, cada uma com 50 amostras. Segundo o teorema do limite central, pode-se afirmar que a média final obtida está 4 vezes mais próxima do valor real do que qualquer dos valores obtidos em cada uma das 16 amostras. Isto é expresso matematicamente como:

$$M = \frac{1}{16} \sum_{i=1}^{16} M_i \quad ; \quad SD_M = \frac{SD}{\sqrt{16}} = \frac{SD}{4} \quad (7)$$

onde M é a média das 16 médias M_i , SD é o desvio padrão das médias M_i e SD_M é o desvio padrão da média M .

A equação (7) informa que, no processo de medição, à medida que se aumenta o número de amostras, aumenta-se a confiabilidade dos resultados obtidos, visto que o aumento no número de amostras resulta no aumento da probabilidade da média calculada estar mais próxima do valor real do mensurando.

Baseado nesta propriedade, propõe-se utilizar um grande número de amostras de medições de RSSI, para se calcular a atenuação do sinal de RF na comunicação entre dois nós de uma rede de sensores sem fios. Considerando-se constante a potência transmitida (P_T), utiliza-se a média das medidas de RSSI como o valor de potência recebida (P_R) e calcula-se a atenuação sofrida pelo sinal de RF. Para que esta proposta possa ser utilizada, é necessário fazer um estudo experimental do sinal de RSSI para verificar se a distribuição dos valores

medidos se aproxima da distribuição normal. Desta forma, pode-se utilizar o valor médio de RSSI como representativo de P_R , e o desvio padrão obtido das amostras como incerteza de medição de P_R . O valor médio de RSSI poderá então ser utilizado para a estimação da qualidade da ligações entre os nós sensores, para a estimação da distância entre eles, e para outras operações próprias das RSSFs.

Na próxima seção serão apresentadas algumas distribuições de RSSI obtidas de medições feitas com os rádios CC1000 e CC2420, em diferentes ambientes, e será mostrado que esta medida segue, de forma aproximada a distribuição normal.

7. Resultados

Com o intuito de se conhecer a qualidade da medição de RSSI dos nós sensores que empregam os rádios CC1000 e CC2420, foram feitas medições desses valores durante a transmissão de pacotes em uma rede de sensores. Os experimentos foram conduzidos em dois ambientes distintos: área livre (sem obstáculos), e área ocupada com uma cultura vegetal.

Os nós foram colocados a distâncias fixas de 10 metros, distantes 1,5 metro do solo. As transmissões foram feitas sempre a 0 dBm (1 mW). Foram feitas séries de 200 medições de RSSI, e registradas as distribuições de seus valores. A altura de 1,5 metro em relação ao solo foi escolhida a fim de se reduzir a influência do solo na propagação das ondas de RF utilizadas na comunicação entre os nós sensores. A distância de 10 metros entre os nós sensores foi utilizada porque este é o alcance médio dos rádios em um meio dispersivo, com obstáculos, como é o caso de um campo de cultura vegetal.

Os nós sensores construídos com o CC1000 empregam conversores A/D de 10 bits, para o qual o fabricante especifica um desvio correspondente a 1 LSB (bit menos significativo). Isto significa que o valor analógico de entrada estaria entre -1 LSB e $+1$ LSB em torno do valor digital apresentado na saída. Segundo o fabricante do nó sensor, a intensidade de sinal recebido pode ser calculada a partir do valor digital apresentado, conforme indicado abaixo [4]:

$$P_R = -50 \cdot \frac{RSSI_DIG}{1024} \cdot V_{BAT} - 45,5 \quad [dBm] \quad (8)$$

onde $RSSI_DIG$ é o valor indicado pelo conversor analógico/digital (ADC) e V_{BAT} a tensão de alimentação do nó sensor. Durante o experimento realizado, as tensões das baterias dos nós sensores foram medidas, sendo encontrado $V_{BAT} = 3,12V \pm 0,01V$.

Os nós sensores que utilizam o CC2420 [5] recebem a informação de intensidade de sinal na forma digital, permitindo a imediata conversão para o valor medido:

$$P_R = RSSI_DIG - 45 \quad [dBm] \quad (9)$$

A figuras 5 apresenta a distribuição de valores de RSSI obtidos de duas séries de medições de intensidade de sinal de RF de um par de nós sensores que utilizam o rádio CC1000. A primeira série foi realizada com comunicação em caminho livre, sem obstáculos. A segunda série foi realizada com os nós sensores instalados em meio à vegetação, uma cultura de milho neste caso. Sobre os histogramas foram traçadas curvas de distribuição normal correspondentes aos valores médios e aos desvios padrões encontrados em cada amostra. A média de valores de RSSI da primeira série foi maior que a média da segunda série, resultando em uma diferença aproximada de 10 dB. A figura 6 apresenta resultados semelhantes, para o mesmo tipo de experimentos realizados utilizando-se o rádio CC2420.

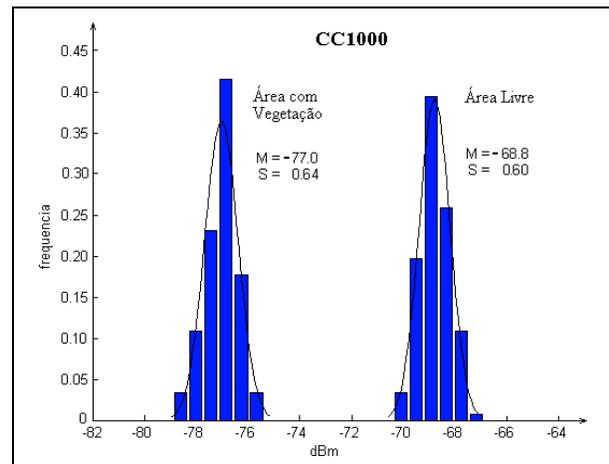


Figura 5 – Medições feitas com CC1000

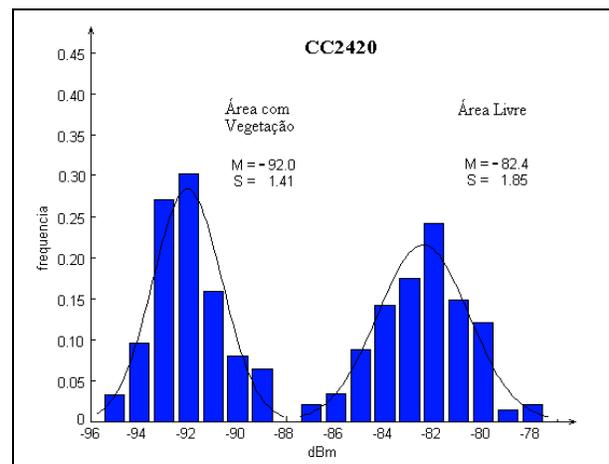


Figura 6 – Medições feitas com CC2420

Pode ser observado nas figuras 5 e 6 que a presença da vegetação causou uma diminuição na intensidade do sinal recebido. Esta diferença entre os valores medidos se deve principalmente à atenuação das ondas eletromagnéticas causada pela água contida no interior das plantas, e está em concordância com valores citados na literatura [16].

Os valores de potência recebida (P_R) medidos com o rádio CC2420 são menores do que os valores obtidos com o CC1000, mas as diferenças entre os valores de P_R obtidos sob as diferentes condições (caminho livre e caminho com vegetação) foram semelhantes para os dois rádios. Estes fatos sugerem que não há diferença significativa na atenuação do sinal de RF nas duas faixas frequências (2400 MHz e 916 MHz). As diferenças nos valores de P_R obtidos com os dois diferentes rádios se deve aos desvios entre os valores nominais e reais da potência transmitida (P_T) e aos desvios dos medidores de RSSI de cada receptor.

As curvas de distribuição normal traçadas sobre os histogramas das figuras 5 e 6 demonstram que a medição de RSSI em ambos os transceptores pode ser aproximada por esta função. Portanto, o teorema do limite central pode ser aplicado nas medições de intensidade de sinal recebido feitas com estes dispositivos, sendo suficientes os valores da média e do desvio padrão para descrever o conjunto de medições de potência recebida (P_R).

8. Conclusão

Foi apresentada aqui uma descrição do funcionamento dos transceptores (Tx e Rx) de rádios utilizados em equipamentos que compõem as redes de sensores sem fios atuais. Foi feita uma revisão sobre métodos de modulação e de medição de intensidade de sinal de rádio (RF). Foi proposto um estudo do sinal de RSSI disponível nos receptores dos nós das RSSFs com o intuito de se conhecer este parâmetro, o qual é extensamente utilizado em diversas funções dessas redes. Os testes feitos com dois transceptores de uso comum em nós sensores comerciais demonstraram que o tratamento estatístico dos sinais de RSSI pode seguir as propriedades da distribuição normal, o que significa dizer que os valores médios obtidos de séries de medições poderão ser utilizados para se calcular um valor representativo da intensidade de sinal recebido, conseqüentemente, da qualidade das ligações entre pares de nós sensores. Este valor é também adequado para se fazer a descoberta de posição do nó sensor e pode ser utilizado na estimação de parâmetros do meio de propagação. As diferenças encontradas nas medições realizadas com os dois pares distintos de nós sensores sugere a necessidade de uma calibração prévia dos transmissores e os medidores de intensidade de sinal.

9. Bibliografia

- [1] Andersen, J. B.; Rappaport, T. S.; Yoshida, S.; **Propagation Measurements and Models for Wireless Communications Channels**; IEEE Communications Magazine, vol. 33, pp. 42-49, 1995
- [2] Bulusu, N.; Heidemann, J.; Estrin, D.; **GPS-less Low-Cost Outdoor Localization for Very Small Devices**; IEEE Personal Communications, pp. 28-34, 2000
- [3] Cerpa, A. et alii; **Habitat Monitoring: Application Driver for Wireless Communications Technology**, ACM SIGCOMM Workshop on Data Communications in Latin America and the Caribbean, Costa Rica, 2001
- [4] **Chipcon; CC1000 – Single Chip Very Low Power RF Transceiver**; Manual do fabricante, 48 p., retirado de <<http://www.chipcon.com>>, em dezembro de 2004
- [5] Chipcon; **CC2420 – 2,4 GHz IEEE 802.15.4 / ZigBee-ready RF Transceiver (rev. 1.2)**; Manual do fabricante, 87 p., retirado de <<http://www.chipcon.com>>, em abril de 2005
- [6] Eskelinen, P.; **Introduction to RF Equipment and System Design**; Artech House, Boston, London, 263p. - ISBN 1-58053-665-4
- [7] Heidemann, J. & Govindan, R.; **Embedded Sensor Networks**. In *Handbook of Networked and Embedded Control Systems*, D. Hristu-Varsakelis and W.S. Levine, editors. Springer Verlag, 18p., 2004
- [8] IEEE – Institute of Electrical and Electronics Engineers; **IEEE 802.15.4 – Wireless Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications for Low-Rate Wireless Personal Area Networks (LR-WPANs)**; 679p., 2003, retirado de <www.IEEE.org> em março de 2004.
- [9] Lymberopoulos, D. et al.; **An Empirical Analysis of Radio Signal Strength Variability in IEEE 802.15.4 Networks using Monopole Antennas**; ENALAB Technical Report 050501, obtained from <http://www.eng.yale.edu/enalab/publications.htm>, in September/2005
- [10] McClave, J.T. & Sincich, T.; **Statistics**; Prentice Hall, 8 ed., 848 p., 2000

- [11] Santi, P & Blough, D.M.; **The Critical Transmitting Range for Connectivity in Sparse Wireless Ad Hoc Networks**; IEEE Transactions on Mobile Computing, vol. 2, n° 1, pp. 25-39, Mar/2003
- [12] Savvides, A. et alii; Localization in sensor networks Source; in Raghavendra, C.S. (Ed.), Sivalingam, K. M. (Ed.), Znati, T. (Ed.); **Wireless sensor networks**; Springer Science, New York, ISBN:1-4020-7883-8, cap. 15, pp. 327-349, 2005
- [13] Schnell, L.; **Technology of Electrical Measurements**; Ed. John Willey & Sons, Inglaterra, 409 p., 1993
- [14] Slijepcevic, S. et alii; **Location Errors in Wireless Embedded Sensor Networks: Sources, Models, and Effects on Applications**; Mobile Computing and Communications Review, vol. 6, pp. 67-78, 2002
- [15] Rudell, J. C. et alii; **A 1.9-GHz Wide-Band IF Double Conversion CMOS Receiver for Cordless Telephone Applications**; IEEE Journal of Solid-State Circuits, vol. 32, No 12, pp. 2071-2086, Dec/1997
- [16] Ulaby, F. T., Moore, R. K. and Fung, A. K.; **Microwave Remote Sensing: Active and Passive**; vol. 1, Artech House, London, UK, 456 p., 1981
- [17] Whitehouse, C. D.; **The Design of Calamari: an Ad-Hoc Localization System for Sensor Networks**; Trabalho de mestrado sob orientação de D. Culler, University of California, Berkeley, 65 p., 2002
- [18] **ZigBee**; <<http://www.zigbee.org>>