

3M: Um protocolo de enlace multicanal para redes de sensores com alto grau de mobilidade

Filippe C. Jabour^{1,2} and Eugênia Giancoli^{1,2} and Aloysio C. P. Pedroza²

¹ CEFET-MG Campus Leopoldina

² UFRJ - PEE/COPPE/GTA - DEL/POLI
{jabour, eugenia, aloysio}@gta.ufrj.br

Abstract. This paper presents the protocol 3M – Multichannel Mobile MAC. It is suited to wireless sensor networks with high mobility. The protocol presents low latency and is robust in scenarios where all nodes move at high speeds. The protocol also provides dynamic channel allocation for communication between pairs of nodes. It is presented a performance analysis of the protocol.

keywords: wireless sensor networks, mobility, MAC.

1 Introdução

Uma rede de sensores sem fio (RSSF) é uma rede composta por dispositivos autônomos, espacialmente distribuídos, usando sensores para monitorar condições ambientais, tais como temperatura, som, vibrações, pressão, movimento ou poluentes, em diferentes localizações. Em RSSF móveis, os sensores, os sorvedouros ou o fenômeno são móveis. Alguns exemplos são: sensores usados para estudo do movimento de tornados [1]; sensores conectados a veículos, em grandes cidades, para estudo das condições de tráfego e planejamento de rotas [1]; sensores fluando em correntes fluviais [2]; projeto da NASA para exploração de Marte, com sensores dirigidos por correntes eólicas [3]. Existem diversas propostas voltadas para aplicações de RSSF móveis [4][5][6][7][8]. Nas RSSF móveis, a descoberta e manutenção dos vizinhos é fundamental. A alocação de canais de comunicação é também um requisito importante. Em ambientes com alto grau de mobilidade dos nós, estas tarefas ganham uma complexidade adicional.

Este trabalho apresenta o protocolo 3M. Trata-se de um protocolo de descoberta e manutenção do conjunto de vizinhos que apresenta baixo tempo de resposta, mesmo em ambientes onde os nós se movem com grandes velocidades. Ele executa a alocação de canais de comunicação em diferentes faixas de frequência.

2 Trabalhos relacionados

O padrão IEEE 802.15.4 [9] tem sido muito adotado nas RSSF. Uma implementação muito difundida deste padrão é o ZigBee [10]. Não são encontradas na literatura aplicações do padrão em ambientes de alta mobilidade. O padrão especifica que uma PAN (*Personal Area Network*) deve incluir pelo menos um

dispositivo operando como coordenador. Isto é inapropriado para redes com alto grau de mobilidade, já que associações e desassociações entre coordenadores e “coordenados” serão frequentes. Segundo Dutta e Culler [11], o desempenho das redes IEEE 802.15.4 cai rapidamente com aumento da mobilidade na rede.

Sohrabi *et al.* [12] apresentam 2 algoritmos para auto-organização de RSSF: SMACS (*Self-Organizing Medium Access Control for Sensor Networks*) e EAR (*Eavesdrop-And-Register*). O SMACS executa a tarefa de descoberta de vizinhos, mas aplica-se apenas às redes estáticas. O objetivo do protocolo EAR é prover a conectividade de nós móveis com a rede estacionária. As simulações dos protocolos foram feitas com deslocamento de um nó, a $0,1\text{ m/s}$, por um campo de 45 nós estáticos. O protocolo 3M suporta mobilidade de todos os nós da rede e velocidades muito maiores.

Uma rede 802.11 [13] é baseada em uma arquitetura celular. Cada célula é controlada por um ponto de acesso (*Access Point* - AP). A presença centralizadora do AP e as operações de associação, desassociação e reassociação tornam este esquema inapropriado às redes com alta mobilidade generalizada. Operando no modo *ad hoc*, o padrão fica mais apropriado a estes ambientes. Entretanto, apesar da infraestrutura descentralizada, existe a formação da célula, difusão de *beacons* de sincronização, varredura de canais para adesão à célula, geração de identificador local da rede e resposta às requisições de inclusão. Estes custos e atrasos não podem ser desconsiderados. Além disso, para as RSSF, é melhor a disponibilidade de muitos canais de menores taxas, do que poucos canais de alta capacidade, como no 802.11.

O padrão IEEE 802.15.1 [14] derivou-se das especificações do *Bluetooth*. Ele usa *slots* sincronizados e possui 79 canais. São criadas picorredes de até 8 nós, sendo um deles o mestre e os demais escravos. Em função do baixo alcance de comunicação, da centralização em um mestre, da limitação do nº máximo de nós, o *Bluetooth* não se adequa ao cenários dinâmicos.

Dutta e Culler [11] apresentam o protocolo Disco. Trata-se de um mecanismo de descoberta assíncrona de vizinhos para aplicações móveis de sensoriamento. O protocolo garante que 2 nós terão algumas sobreposições dos períodos de atividades dos seus transceptores, dentro de um tempo limitado, mesmo que escolham de forma independente os ciclos de trabalho do rádio. Os valores de latência apresentados são altos. Para atingir o conhecimento de 50% do vizinhos, a latência é de 4,44s. Para 85%, de 10s. O protocolo tem pouca escalabilidade, consumindo entre 10s e 80s para a descoberta de 5 vizinhos.

Kohvakka *et al.* [15] propõem a descoberta de vizinhos com eficiência energética em RSSF móveis. O protocolo proposto deve ser executado sobre outro protocolo de enlace que produza sincronização local, como IEEE 802.15.4 ou S-MAC [16]. A descoberta de vizinhos é feita através da varredura de todos os canais de frequência em uso. As simulações foram feitas com apenas um nó móvel, em um cenário de sensores estáticos. A velocidade deste único nó móvel variou de $0,1$ a 10 m/s . Os experimentos reais foram feitos também com um único nó móvel e velocidades de 1 a 3 m/s .

O protocolo MS-MAC (Mobility-aware Sensor MAC) [17] ajusta o intervalo de varredura da rede de acordo com a mobilidade observada. Os nós não precisam ter o mesmo escalonamento de atividade/inatividade (*wakeup/sleep*) em toda a rede, mas eles precisam estar divididos em *clusters* virtuais com estes períodos sincronizados. As simulações mantiveram 100 nós estáticos, enquanto apenas um nó se moveu pela área de sensoriamento.

O protocolo IMEP (*Internet MANET Encapsulation Protocol*) [18] incorpora mecanismos de suporte ao monitoramento de enlaces e conectividade de vizinhos, dentre outros, em ambientes de comunicações sem fio. Trata-se, entretanto, de um protocolo da camada de rede, não dispensando o protocolo de enlace.

3 3M: *Multichannel Mobile MAC*

3M é um protocolo que aloca e libera canais de frequência sob demanda e destina-se a ambientes com alto grau de mobilidade. Existe um canal de frequência, chamado **canal de controle**, usado para anúncio de presença e seleção de outros canais para comunicação em *unicast*. Todos os nós da rede enviam quadros de anúncio de presença durante todo o tempo. Antes de enviar estes quadros, o nó “escuta” o canal. Estando ele disponível, o nó aguarda um período de tempo aleatório e envia seu anúncio de presença para todos os demais (*broadcast*). Todos os nós recebem e processam estes anúncios e incluem o emissor em sua tabela de vizinhos. Esta entrada na tabela de vizinhos é excluída após um determinado período de tempo. Caso um novo anúncio de presença do mesmo emissor chegue, o contador de tempo para a exclusão do vizinho é reinicializado. O canal de controle é utilizado em um esquema de melhor esforço. Não há garantia de entrega, reconhecimentos (ACKs) ou alocação prévia do canal.

A necessidade de comunicação em *unicast* com um vizinho inicia um processo de alocação (sintonia) de um canal específico, chamado de **canal de trabalho**. O iniciador da comunicação envia, pelo canal de controle e em *unicast*, uma mensagem de alocação de canal. Pode-se optar por enviar mais de uma mensagem de alocação de canal, para uma maior probabilidade de recebimento. Imediatamente após receber esta mensagem, o destinatário ajusta seu transceptor para operar na nova frequência. Após enviar sua última mensagem de alocação de canal, o iniciador também ajusta seu rádio para o mesmo canal. A partir daí, estes nós podem se comunicar com exclusividade nesta faixa de frequência. A comunicação no canal exclusivo pode falhar por alguma destas razões: perda de todas as mensagens de alocação de canal; falha do nó destino; ou o nó destino saiu do alcance do emissor após a transação de ajuste de canal. Caso o iniciador identifique a impossibilidade de comunicação por uma destas razões, 2 ações podem ser tomadas. Ele pode retornar ao canal de controle, consultar novamente a lista de vizinhos e decidir por enviar novas mensagens de alocação de canal. Outra opção é executar novamente o algoritmo do nível de aplicação que gerou a necessidade de comunicação no canal exclusivo. Cabe à aplicação definir o canal exclusivo a ser usado. Uma alternativa, por falta de canais disponíveis, é a sobreposição de uso para um mesmo canal. Neste caso, haverá a possibilidade de

colisão quando o mesmo canal de trabalho for alocado na mesma região de cobertura. Trata-se de um compromisso entre a quantidade de canais e a quantidade de alocações iniciadas pela aplicação. Um mecanismo secundário de acesso ao meio nos canais de trabalho pode ser implementado. O protocolo pode ser facilmente estendido para canais de trabalho que operem com outras técnicas. Por exemplo, ajustando um código específico (*chipping code*) para uso de CDMA ou uma sequência de salto específica para FHSS ou DSSS. Nota-se que não há qualquer menção a *slots* de tempo, sincronização local ou global, ou à necessidade de qualquer recurso adicional de protocolos de outras camadas. Observa-se ainda que o protocolo é totalmente descentralizado, produzindo um conhecimento local de vizinhança e alocação de recursos para comunicação direta entre 2 nós, sem a existência de qualquer entidade centralizadora ou coordenadora. O protocolo 3M não depende de endereços ou processamento das camadas superiores e implementa mecanismos de acesso ao meio que minimizam as colisões e maximizam a vazão. 3M maximiza os períodos de desligamento (inatividade) do transmissor de rádio, reduzindo o consumo de energia.

O protocolo não previne o problema do terminal oculto. Entretanto, este existe apenas no canal de controle, inexistindo nos canais de trabalho. No canal de controle, o caráter aleatório e a curta duração das transmissões faz com que este problema não seja crítico. 3M pressupõe escuta permanente do canal de controle. O custo energético da escuta ociosa é inferior ao da recepção de dados, que, por sua vez, é inferior ao da transmissão de dados. Este é um custo do protocolo e existem outras propostas que implementam a camada de enlace com períodos de inatividade também na escuta do canal. Esta característica do protocolo 3M é consequência da mobilidade constante dos nós. Com períodos de inatividade na escuta do canal, um certo nº de vizinhos não seria detectado, o que prejudicaria todo o funcionamento das aplicações e da rede como um todo.

O formato da mensagem de anúncio de presença e o tamanho dos campos, totalizando 38 *bytes*, estão na Figura 1. **SHR** é o cabeçalho de sincronismo (preâmbulo + **SFD** (*Start-of-frame Delimiter*)). **PHR** é o cabeçalho do pacote físico, contendo apenas o campo **FL** (*Frame Length*), com o tamanho do pacote. **C** é o campo de controle. Não é utilizado e foi mantido por coerência com o padrão IEEE 802.15.4. **S** e **D** correspondem aos endereços MAC de origem e destino do quadro. No caso, o destino é o endereço de *broadcast*. Os dados do quadro carregam informações passadas pela camada superior, no caso, consideramos 13 *bytes* de dados. **FCS** (*Frame Check Sequence*) para verificação e correção de erros.

SHR		PHR		PHY <i>payload</i>				MFR
<i>Preamb.</i>	SFD	FL	C	S	D	MAC <i>payload</i>		
				Dados . . .				
4	1	1	1	8	8	13	2	

Fig. 1. Mensagem de anúncio de presença

Cada nó controla um variável chamada *beaconInterval* que determina o intervalo com que um anúncio de presença deve ser enviado. Este intervalo é relativamente grande se comparado ao tempo em que o canal ficará ocupado com a mensagem enviada. Cada vez que o intervalo expira, o nó inicia o processo de envio do anúncio de presença. Somente quando esta transmissão estiver concluída, o intervalo de anúncio é restaurado ao valor original, para que nova espera seja iniciada. Operando a uma taxa de 250 *kbps*, uma das taxas recomendadas pelo padrão IEEE 802.15.4, a ocupação do canal (*duty cycle*) variará de 0,24% a 1,22%, para os intervalos de *beacon* entre 0,1 e 0,5 *s* e quadros de 38 *bytes*. Estes valores são eficientes em termos de consumo de banda e energia. Uma vez expirado o intervalo de anúncio, o nó verifica se o canal está disponível, ou seja, o nó escuta o canal para verificar se há alguma transmissão em curso. Caso o canal esteja livre, o nó inicia o decréscimo de outro temporizador, chamado *backoff*. Quando o *backoff* chega a zero, o canal inicia a transmissão. Este procedimento faz com que os diversos nós que estejam aguardando a disponibilidade do meio de transmissão não iniciem as transmissões todos juntos, logo que o meio se torne livre. A variável *backoff* de cada nó é gerada de forma aleatória, dentro de uma faixa pré-estabelecida. Existe um parâmetro chamado *backoffBase*, sendo o *backoff* um múltiplo aleatório deste parâmetro, segundo a equação 1, sendo k um n° aleatório: $backoff = backoffBase \times k$ ($k \in \mathbb{N}^*$) (1). Durante o período de decréscimo da variável *backoff*, a cada ciclo, o canal é verificado novamente (lembrando que o evento “canal livre” que iniciou a fase de *backoff*). A qualquer momento que o canal seja detectado ocupado, a variável *backoff* é gerada novamente, segundo a Equação 1. Quando ocorre o acesso ao meio e a transmissão propriamente dita, um novo valor é atribuído ao *backoff* também pela Equação 1. Quando um nó recebe um anúncio de presença de um vizinho até então desconhecido, este é inserido na lista de vizinhos conhecidos, e um tempo de vida (TTL) é atribuído a esta entrada. Caso o vizinho já seja conhecido, ou seja, caso já conste da lista de vizinhos conhecidos, o TTL é restaurado ao valor padrão. Periodicamente, o nó varre o seu conjunto de vizinhos, decrementando o TTL de todas as entradas e excluindo do conjunto aquelas com valor zero.

Segundo Kohvakka *et al.* [15], com altas taxas de transmissão a probabilidade de colisões entre *beacons* e quadros de dados é significativa. Deste modo, o uso de múltiplos canais na rede é factível e justificável. Os autores ressaltam que o rádio pode ser sintonizado muito rapidamente para uma nova frequência. Para Zhou *et al.* [19], uma vez que os sensores atuais utilizam de forma muito limitada uma única banda de frequência, 19.2Kbps no MICA2 e 250Kbps no MICAz e Telos, é imperativo o projeto de protocolos da camada MAC que utilizem múltiplos canais. Estes protocolos poderão obter uma maior vazão através de comunicações paralelas. Além disso, o rádio CC2420 [20] utilizados no MICAz e nos sensores Telos, já prevê múltiplos canais físicos, abrindo caminho para o projeto desta família de protocolos. Le *et al.* [21] desenvolveram e avaliaram um protocolo de alocação dinâmica de múltiplos canais. Segundo os autores, o uso de apenas uma banda de frequência é fonte de ineficiência. Padrões de comunicação sem fio com o 802.11 e o 802.15.4 consideram que a operação da rede pode migrar de um canal

para outro, o que demonstra a capacidade dos dispositivos de suportarem estas variações. Sohrabi *et al.* consideram a alocação de um novo canal logo após o estabelecimento do enlace por um par de nós. Considera-se, no referido trabalho, que o novo canal é escolhido de forma aleatória, dentre um numeroso conjunto de opções. Os autores consideram a farta disponibilidade de canais segundo o seguinte exemplo: com rádios operando na faixa ISM (Industrial, Scientific, and Medical) de 902 a 928MHz e taxas de 10kbps, tem-se algo na ordem de 2600 bandas de frequência distintas disponíveis.

Por estas razões, o projeto do 3M considera o uso de outros canais para as comunicações de trabalho da rede.

4 Avaliação de desempenho

Para avaliar o desempenho do protocolo 3M foi desenvolvido na linguagem Java um simulador *multithread* de eventos discretos. Vizinhos reais (**VR**) são aqueles que, em um dado momento, estão no raio de cobertura do rádio de um nó. O conjunto de vizinhos conhecidos (**VC**) é computado pelo protocolo 3M em execução em todos os nós, durante toda a simulação. Os falsos positivos são aqueles que constam da lista de vizinhos conhecidos, mas, na verdade, estão fora do alcance de rádio deste. Este conjunto é chamado de conjunto dos vizinhos conhecidos não reais (**VCNR**). Os nós que são VR, mas são desconhecidos pelo nó estão no conjunto de vizinhos reais desconhecidos (**VRD**). Os conjuntos VCNR e VRD se constituem em erros do protocolo e devem ser minimizados. Na situação ideal temos $VC_X \equiv VR_X$ e $VCNR_X = VRD_X = \emptyset$. Temos ainda, contido ou igual ao conjunto VR, o conjunto dos vizinhos reais conhecidos (**VRC**). O chamado conjunto de vizinhos não reais (**VNR**), com o perdão do termo, contém todos os nós que estão fora do alcance de comunicação de um nó.

As métricas utilizadas para análise das simulações foram a cardinalidade dos conjuntos VRC e VCNR, além do percentual de colisões entre mensagens de anúncio de presença. Estes conjuntos foram amostrados a cada 0,1 s. Para se obter um índice de sucesso do protocolo, calculou-se, com base nos conjuntos VRC e VR, o percentual de elementos de VR que estavam em VRC: $VRC(\%) = \frac{|VRC|}{|VR|} \times 100$. Para os falsos positivos, calculou-se o percentual de VCNR sobre a soma de elementos de VRC com VCNR, ou seja, a proporção dos erros do protocolo sobre o total de vizinhos conhecidos: $VCNR(\%) = \frac{|VCNR|}{|VCNR|+|VRC|} \times 100 = \frac{|VCNR|}{|VC|} \times 100$.

Nas simulações, o nível físico de transmissão foi considerado ideal. Petrova *et al.* [22] mostram, para a camada física do Zigbee (802.15.4), que a taxa de erros para pequenas distâncias é muito reduzida, se mantendo abaixo de 1% para distâncias de até 20m. Este patamar de 1% também é recomendado pelo padrão IEEE 802.15.4.

Os parâmetros da simulações foram: nº de nós: 50; duração: 100s; raio de alcance do rádio: 10m; área: 56m X 56m. Os cenários de mobilidade foram criados com o aplicativo *setdest* que acompanha o simulador *ns-2* [23], segundo os parâmetros: velocidade: distribuição normal entre 1 e 30m/s; períodos de pausa:

distribuição uniforme entre 0 e 20s, 0 e 4s, e entre 0 e 0,2s, conforme o caso; velocidade média dos nós (em função dos períodos de pausa): 2,33m/s, 6,41m/s e 10,99m/s, respectivamente. Parâmetros do protocolo 3M: *beaconInterval*): de 0,5 a 0,1s; tamanho da mensagem de anúncio de presença (*beacon*): 38 bytes; taxa de transmissão do canal de controle: 250 kbps; *backoffBase* (Equação 1): 0,0001s; *k* (Equação 1): n° inteiro aleatório no intervalo [1, 10]; TTL: de 50 a 160% do valor do *beaconInterval*.

Em uma 1ª rodada de simulações foi executada com os parâmetros mencionados acima (parâmetros padrão) e com as seguintes variações: período de pausa do nó distribuído entre 0 e 20s (o que produz uma velocidade média de 2,33 m/s); TTL variando de 0,5 a 0,75 s. Deve-se observar que a velocidade média leva em conta os períodos de pausa. Quando em movimento, as velocidades estarão entre a faixa de 0 a 30 m/s. Pode-se ter, por exemplo, um nó se movendo a 25 m/s, o que equivale a 90 km/h. Levando-se em conta ainda a mobilidade relativa entre 2 nós, temos um cenário de alta mobilidade, o que exige muito do algoritmo de descoberta e manutenção de vizinhos. O protocolo obteve uma média de 91,47% de sucesso no conjunto VRC. Para uma ocupação do canal da ordem de apenas 0,24% por nó e com escuta permanente do canal, obteve-se mais de 90% de sucesso no conjunto VRC. Os resultados, para o mesmo cenário, com relação aos falsos positivos, são mostrados na Figura 2(a). Como esperado, com o aumento do TTL das entradas na tabela de vizinhos conhecidos, o erro aumenta.

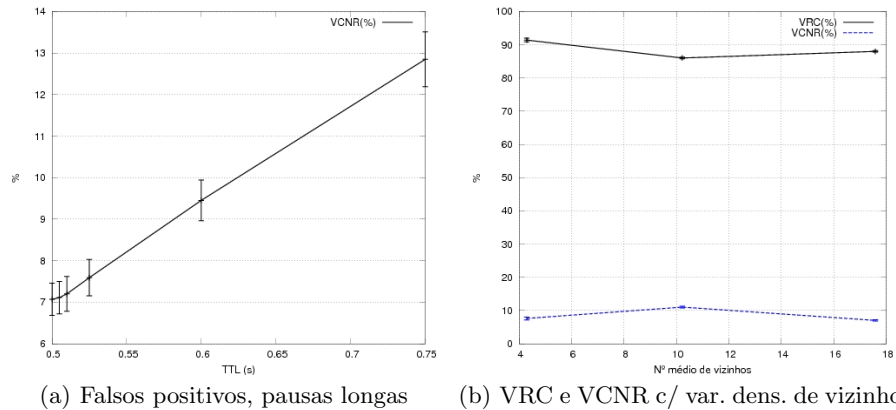


Fig. 2. VCNR c/ pausas longas. VRC e VCNR c/ variação da densidade de vizinhos

Novas simulações foram feitas com variações. Na 1ª delas reduziu-se os períodos de pausa para a faixa de 0 a 4 s (velocidade média de 6,41 m/s) e aumentou-se a densidade de nós para 11,2 e 18,6. Isto foi feito através do aumento do raio de comunicação dos nós para 15 e 20 m, respectivamente. O TTL foi mantido em 0,525 s. Com isso, temos mais mobilidade e maior densidade, situações mais

severas para o protocolo. Os resultados estão na Figura 2(b), onde se observa a robustez do protocolo diante do aumento da densidade de nós.

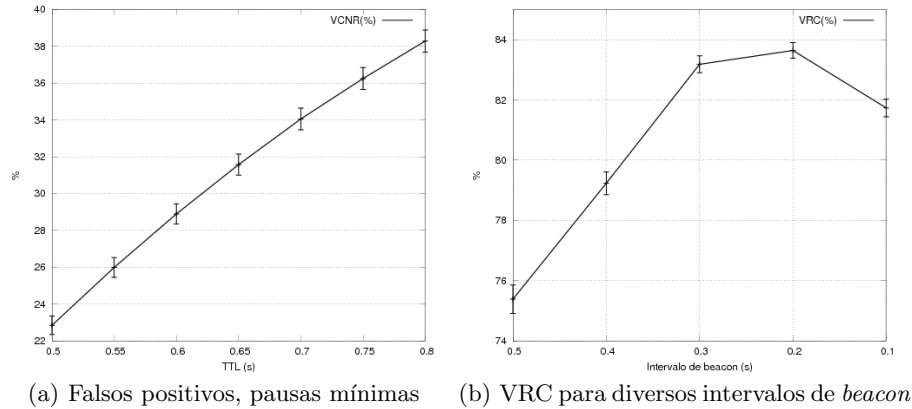


Fig. 3. VCNR c/ pausas mínimas e VRC p/ diversos *beaconInterval*

Acentuando ainda mais a mobilidade, simulações foram feitas com períodos de pausa praticamente nulos, com pausas entre 0 e 0,2 s, o que gera uma velocidade média de 10,99 m/s. Variou-se o TTL de 0,5 a 0,8 s. O raio de comunicação foi de 10 m, o que retorna a densidade de nós para a faixa inicial. O protocolo obteve uma média de 75,84% de sucesso no conjunto VRC. Com uma maior mobilidade, o desempenho do protocolo cai consideravelmente, deixando de identificar um quarto dos vizinhos. Neste caso, já se torna necessário diminuir o intervalo entre anúncios de presença. A Figura 3(a) mostra que os falsos positivos já partem de um valor elevado para TTL de 0,5 s e aumentam ainda mais com valores maiores de TTL. Além de mais anúncios de presença, valores menores de TTL são necessários. A Figura 3(b) mostra o desempenho do protocolo com o aumento da frequência de anúncios de presença. Pode-se observar que com este aumento, mesmo com o alto grau de dinamismo dos nós, o protocolo obteve bons resultados. Existe, entretanto, um teto para o cenário simulado, em torno de 83,64%, para *beacon Interval* = 0,2 s. Acima deste valor, as colisões aumentam, reduzindo o desempenho (Figura 4(a)).

Os últimos resultados a serem apresentados se referem ao TTL das entradas nas tabelas de vizinhos. Pelos eventuais custos impostos pelos falsos positivos, foram feitos testes com valores de TTL menores que o intervalo de *beacon*. Trata-se de uma ação conservadora. Considera-se melhor excluir prematuramente uma entrada da tabela de vizinhos e receber um novo anúncio logo em seguida, do que mantê-la, criando um período de incerteza para as aplicações em execução. A Figura 4(b) mostra resultados de simulações feitas com *beaconInterval* = 0,4 s e *TTL* < *beaconInterval* (0,39 s (98%), 0,3 s (75%) e 0,2 s (50%)). Neste gráfico, optou-se por representar o conjunto de vizinhos reais **desconhecidos** em lu-

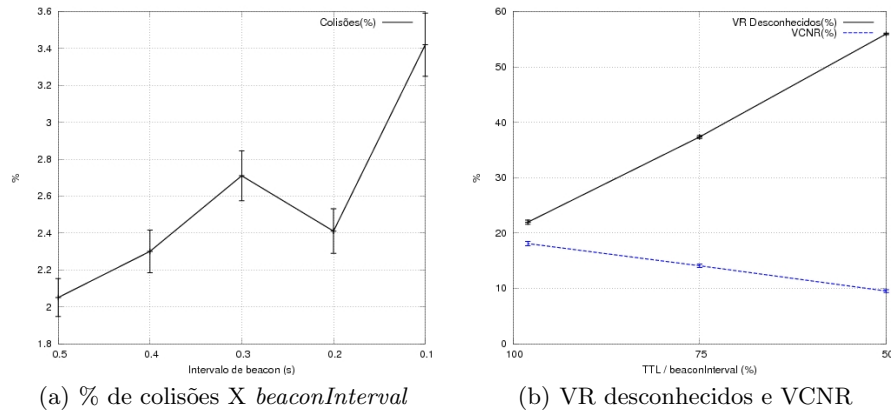


Fig. 4. % de colisões. VR desconhecidos e VCNR p/ $TTL < beaconInterval$

gar de VRC. De fato, valores de TTL menores que o *beaconInterval* reduzem o n° de falsos positivos de quase 20% para menos de 10%. Observa-se, entretanto, que o n° de vizinhos reais desconhecidos aumentou muito. Torna-se necessário, então, balancear estes 2 parâmetros de modo a obter os melhores resultados. O valor de VRC na Figura 3(b), para *beaconInterval* = 0,2 s, apresenta um bom resultado para o conjunto VRC: 83,64%. Nas mesmas simulações, com $TTL = 0,95 \times beaconInterval = 0,19$ s, (95%), obtem-se $VCNR = 8,96\%$, também um bom desempenho. Como vimos também na Figura 3(b), com *beaconInterval* = 0,1 s tivemos apenas uma pequena queda no VRC. Entretanto, para esta mesma situação, com $TTL = 0,9 \times beaconInterval = 0,09$ s, (90%), obteve-se o melhor resultado para VCNR, 4,24%. O caminho, então, é ajustar o valor do *beaconInterval* com base no conjunto VRC e no percentual de colisões. Este ajuste poderá ser mais ou menos “agressivo” em função de maior ou menor mobilidade na rede. Em seguida, ajusta-se o TTL, entre 90 e 98% do intervalo entre anúncios de presença, para minimizar o conjunto VCNR.

5 Conclusões

Este trabalho apresenta o protocolo 3M. Ele atende aos requisitos de alta mobilidade e permite uma alocação eficiente de canais de frequência. O protocolo tem um baixo ciclo de trabalho, com reduzida ocupação do canal de controle e obtém altos índices de sucesso na descoberta e manutenção do conjunto de vizinhos. São apresentados diversos direcionamentos de calibragem do protocolo para variados cenários de mobilidade e densidade de nós.

Referências

1. Tilak, S., Abu-Ghazaleh, N.B., Heinzelman, W.: A taxonomy of wireless micro-sensor network models. ACM SIGMOBILE Mobile Computing and Communica-

- tions Review **6**(2) (April 2002) 28–36
2. Hu, L., Evans, D.: Localization for mobile sensor networks. MobiCom '04 ACM.
 3. Antol, J., Calhoun, P., Flick, J., Hajos, G.A., Kolacinski, R., Minton, D., Owens, R., Parker, J.: Low cost mars surface exploration: The mars tumbleweed. (August 2003) NASA Langley Research Center. NASA/TM-2003-212411.
 4. Jabour, F.C., Giancoli, E., Pedroza, A.C.P.: Mobility support for wireless sensor networks. International Conference on Computer and Electrical Engineering (ICCEE) (December 2008)
 5. Jabour, F.C., Jabour, E.G., Pedroza, A.: Redes de sensores móveis: análise da velocidade, comunicação e esforço computacional. (December 2008)
 6. Howard, A., Mataric, M.J., Sukhatme, G.S.: An incremental self-deployment algorithm for mobile sensor networks. (2002) Kluwer Academic Publishers.
 7. Vahdat, A., Becker, D.: Epidemic routing for partially-connected ad hoc networks. (April 2000) Technical Report CS-200006, Duke University, April 2000.
 8. Choksi, A., Martin, R.P., Nath, B., Pupala, R.: Mobility support for diffusion-based ad-hoc sensor networks. Technical report, Rutgers University (April 2002)
 9. IEEE: Standard 802, part 15.4: Wireless MAC and physical layer (PHY) specifications for low rate WPANs. (September 2006) IEEE Computer Society.
 10. Myers, S.: Zigbee/ieee 802.15.4 (2007) Electrical and Computer Engineering University of Wisconsin Madison.
 11. Dutta, P., Culler, D.: Practical asynchronous neighbor discovery and rendezvous for mobile sensing applications. In: SenSys '08: Proceedings of the 6th ACM conference on Embedded network sensor systems, New York, NY, USA, ACM (2008) 71–84
 12. Sohrabi, K., Gao, J., Ailawadhi, V., Pottie, G.J.: Protocols for self-organization of a wireless sensor network. Personal Communications, IEEE **7**(5) (2000) 16–27
 13. IEEE: Standard 802, part 11: Wireless LAN MAC and physical layer (PHY) specifications (June 2007) IEEE Computer Society.
 14. IEEE: Standard 802, part 15.1: Wireless MAC and physical layer (PHY) specifications WPANs (June 2005) IEEE Computer Society.
 15. Kohvakka, M., Suhonen, J., Kuorilehto, M., Kaseva, V., Hännikäinen, M., Hämäläinen, T.D.: Energy-efficient neighbor discovery protocol for mobile wireless sensor networks. Ad Hoc Netw. **7**(1) (November 2007) 24–41
 16. Ye, W., Heidemann, J., Estrin, D.: An energy-efficient MAC protocol for wireless sensor networks. In: 21st Conference of the IEEE Computer and Communications Societies (INFOCOM). Volume 3. (June 2002) 1567–1576
 17. Pham, H., Jha, S.: Addressing mobility in wireless sensor media access protocol. In: Intelligent Sensors, Sensor Networks and Information Processing Conference, 2004. Proceedings of the 2004. (2004) 113–118
 18. Corson, M.S., Papademetriou, S., Papadopoulos, P., Park, V., Qayyum, A.: An Internet MANET encapsulation protocol (IMEP) specification. INTERNET-DRAFT (August 1999) IETF MANET Working Group.
 19. Zhou, G., Stankovic, J.A., Son, S.H.: Crowded spectrum in wireless sensor networks. 3rd Workshop on Embedded Networked Sensors(Em-Nets) (May 2006)
 20. GHz, C.: Ieee802.15.4/zigbee-ready rf transceiver <http://www.chipcon.com>.
 21. Le, H.K., Henriksson, D., Abdelzaher, T.: A practical multi-channel media access control protocol for wireless sensor networks. In: IPSN '08: Proceedings of the 7th international conference on Information processing in sensor networks, Washington, DC, USA, IEEE Computer Society (2008) 70–81
 22. Petrova, M., Riihijarvi, J., Mahonen, P., Labella, S.: Performance study of IEEE 802.15.4 using measurements and simulations. Volume 1. (April 2006) 487–492
 23. ns 2: Network simulator. <http://www.isi.edu/nsnam/ns> (1998)