

PROC: Um Protocolo Pró-ativo com Coordenação de Rotas em Redes de Sensores sem Fio

Daniel Fernandes Macedo¹, Luiz Henrique Andrade Correia^{1,2},
Antonio Alfredo Ferreira Loureiro¹, José Marcos Nogueira¹

Departamento de Ciência da Computação
Universidade Federal de Minas Gerais

²Departamento de Ciência da Computação
Universidade Federal de Lavras

{damacedo, lcorreia, loureiro, jmarcos}@dcc.ufmg.br

Abstract. *This paper presents a new, proactive routing protocol with route coordination for Wireless Sensor Networks¹. It uses the concept of a backbone, which is composed of elected coordinators. The backbone ensures that the sensed information will be forwarded to the Base Station. The routes are constructed based on local information. The protocol was compared to TinyOS Beaconing, a protocol which establishes least-distance paths to the Base Station. The results show a high delivery rate, with low energy consumption, when varying the number of nodes on the network.*

Um dos grandes desafios em RSSF é o estabelecimento de rotas entre os nós sensores através de caminhos *multi-hop*. Este artigo trata do problema de roteamento para RSSFs onde os nós possuem as mesmas composições de hardware e capacidades físicas [Ruiz et al., 2003]. Os dados são coletados periodicamente pelos nós e enviados para a Estação Base (EB), como nas aplicações de monitoramento ambiental. Na literatura são propostos vários protocolos de roteamento para este tipo de aplicação.

O protocolo LEACH [Heinzelman et al., 2000] tem por objetivo reduzir o consumo de energia em RSSFs. Este foi desenvolvido para redes homogêneas (nós com a mesma composição de hardware), e utiliza ciclos durante os quais são formados *clusters*. O líder do *cluster* é responsável por repassar os dados do seu *cluster* para a EB com um único passo, o que limita o tamanho da rede em função do raio de alcance do rádio. Para uma rede que está em atividade durante um longo período, a dessincronização dos relógios pode fazer com que os nós entrem no período de eleição de líderes em momentos inoportunos.

O TinyOS Beaconing é o protocolo padrão utilizado pelos nós sensores na plataforma Mica da Universidade de Berkeley [Karlof and Wagner, 2003]. O protocolo constrói periodicamente uma árvore de caminho mínimo (Minimum Spanning Tree) a partir da EB. Por se tratar de um protocolo de roteamento genérico, o seu desempenho é inferior ao dos protocolos desenvolvidos para uma aplicação específica.

Na busca de soluções para os problemas encontrados nestes protocolos, foi desenvolvido um novo protocolo de roteamento. O PROC (Proactive ROUTing with Coordination) é um protocolo pró-ativo, pois atualiza todas as rotas periodicamente. Ele constrói uma árvore de roteamento, chamada de *backbone*. O conceito de *backbone* é baseado no protocolo Span [Chen et al., 2002] para controle de topologia em redes ad-hoc. O Span constrói um *backbone*, baseado em informações locais, para determinar quais nós da rede irão rotear dados. No PROC, os nós que não pertencem ao *backbone* se ligam diretamente a um nó coordenador, que repassa os dados coletados pelo nó até a estação base. Os nós que participam do *backbone*, ou nós coordenadores, são eleitos através

¹Trabalho parcialmente financiado pelo CNPq, processo número 55.2111/02-3, projeto SensorNet.

de um algoritmo semelhante ao utilizado para eleição de um líder de *cluster* no protocolo LEACH [Heinzelman et al., 2000]. Periodicamente, os nós que pertencem ao *backbone* são revezados, e as rotas são recalculadas.

1. O Protocolo PROC

O protocolo constrói um *backbone* periodicamente, formando uma árvore de roteamento com a raiz localizada na EB. Os dados coletados pelos nós sensores são enviados para a raiz do *backbone*.

Para construir o *backbone*, os nós utilizam informações obtidas de seus vizinhos. Essas informações são obtidas das mensagens de controle do roteamento, que contêm o estado do nó emissor (se coordenador, distância à EB). A construção do *backbone* é feita em duas partes. Na primeira parte, chamada de eleição de coordenadores, cada nó executa uma heurística para determinar se será coordenador. Na segunda parte, chamada de complementação do *backbone*, os nós coordenadores podem indicar outros nós para se integrarem ao *backbone*, caso este não esteja completamente formado. Este processo é executado periodicamente, reconstruindo o *backbone*, podendo haver revezamento de coordenadores.

Entre as atualizações de coordenadores, são realizadas atualizações de rotas, que têm como objetivo adaptar as rotas às mudanças na topologia da rede. O intervalo de tempo entre a reconstrução do *backbone* é chamado de tempo de ciclo. Os ciclos são divididos em intervalos, no início dos quais são feitas as atualizações de rotas.

1.1. Eleição de coordenadores

A EB periodicamente envia uma mensagem de sincronização para a rede. Esta mensagem tem como objetivo determinar o início de um ciclo, assim como iniciar a reconstrução do *backbone*. Ao receber uma mensagem de sincronização, o nó executa o algoritmo de eleição de coordenadores.

O algoritmo de eleição de coordenadores determina se um nó será um coordenador ou não durante o ciclo atual. Para tanto, cada nó possui uma probabilidade de se tornar coordenador no ciclo. Esta probabilidade é calculada por uma heurística que utiliza o algoritmo de eleição de líderes do LEACH [Heinzelman et al., 2000]. O algoritmo tem como objetivo balancear o consumo de energia entre os nós. Com isso, aumenta-se o tempo de vida da rede. Depois de definido se será ou não um coordenador, o nó repassa para os seus vizinhos a mensagem de sincronização, propagando o início do ciclo. A eleição de coordenadores não garante que o *backbone* formado esteja completo. Desta forma, faz-se necessária a introdução de coordenadores adicionais, através do algoritmo de complementação do *backbone*.

1.2. Complementação do *Backbone*

A fase de complementação do *backbone* tem como objetivo designar novos nós coordenadores para completar a árvore de roteamento quando esta não foi construída completamente na fase anterior. Após a fase inicial de definição dos nós coordenadores, os nós sensores aguardam um tempo aleatório e, em seguida, iniciam a complementação do *backbone*. Para determinar se é necessário indicar um novo coordenador, o nó calcula o seu pai na árvore de roteamento através do algoritmo de estabelecimento de rotas (seção 1.3). Caso o pai calculado não seja um coordenador, o nó não se conecta diretamente ao *backbone*, e portanto é necessário forçar o seu pai a ser coordenador.

Uma vez determinado que o nó pai deve ser coordenador, o nó envia uma mensagem de anúncio para o seu pai, para que este seja notificado da sua nova função. Ao receber esta mensagem, o nó pai atualiza o seu estado para coordenador e em seguida comunica a mudança para a sua vizinhança.

A espera de um tempo aleatório antes do início do processo de complementação do *backbone* tem como objetivo minimizar o número de nós coordenadores na rede. Durante o tempo entre as fases

de eleição de coordenadores e de complementação do *backbone*, é possível que um nó receba uma notificação da existência de um novo coordenador na vizinhança, o que lhe permite encontrar uma conexão direta para o *backbone*.

1.3. Estabelecimento de Rotas

O algoritmo de estabelecimento de rotas tem como objetivo determinar qual nó da vizinhança será responsável por repassar os dados do nó corrente para a EB, chamado de nó pai. Caso o nó corrente seja coordenador, será selecionado o nó com menor distância em *hops* até a EB, sempre priorizando os nós coordenadores. Desta forma, garante-se que a árvore de roteamento não contenha ciclos.

Caso o nó não seja coordenador, o pai selecionado será o coordenador da vizinhança que possuir a menor distância até a EB. Caso não hajam nós coordenadores na vizinhança, o nó escolhe como pai o seu vizinho com a menor distância até a EB.

2. Análise via Simulações

Para avaliar o protocolo PROC, foram realizadas simulações no simulador NS-2, versão 2.26 [NS-2, 2003]. Os parâmetros utilizados para consumo de energia e largura de banda são baseados em nós reais e foram retirados de [Wei Ye and John Heidemann and Deborah Estrin, 2002]. Assume-se que o alcance do rádio é fixo em 15 metros. Na camada de enlace utilizamos o protocolo IEEE 802.11. No modelo considerado, não foi contabilizado o consumo de energia proveniente do processamento de dados, visto que este é muito inferior ao consumo do rádio [Powers, 1995]. Não foram consideradas falhas de nós.

O cenário utilizado na simulação considera uma rede com organização plana, nós com composição homogênea e sem mobilidade, distribuídos de forma irregular (aleatória). A comunicação entre os elementos da rede é simétrica. Para avaliar o protocolo PROC, foi utilizada para comparação uma versão simplificada do TinyOS Beaconing, baseada em [Karlof and Wagner, 2003]. Esta versão simplificada é chamada de TREE.

As simulações têm como objetivo avaliar a escalabilidade do protocolo. Variamos o número de nós de 25 para 36, 49, 64, 81 e 100, mantendo a densidade constante. Devido ao alto tempo de simulação, não foram realizadas simulações para um número maior de nós. O tempo de simulação neste cenário foi de 400 segundos. A energia média consumida pelos nós da rede teve um comportamento quase linear para os dois protocolos, conforme pode ser observado no gráfico da figura 1 (a). As taxas de entrega média encontradas nas simulações, apresentadas na figura 1 (b), mostram que o protocolo PROC obteve taxas de entrega superiores às do protocolo TREE por uma diferença entre 1 a 3%. Também foi verificado que a taxa de entrega decresce com o aumento do número de nós na rede.

3. Conclusões e Trabalhos Futuros

Neste trabalho foi proposto um protocolo de roteamento pró-ativo com coordenação de rotas, apropriado para aplicações que enviam dados periodicamente para a Estação Base. O protocolo foi avaliado para topologias irregulares, variando o número de nós sensores proporcionalmente à área. Os resultados obtidos mostram que o protocolo obteve uma boa taxa de entrega (entre 74 e 98%) com baixo consumo. Foi verificado que grande parte das perdas encontradas foram devido às colisões, o que indica a necessidade do uso de um protocolo MAC específico para RSSF com algumas centenas de nós.

Atualmente estamos trabalhando na extensão do protocolo para cenários com topologias dinâmicas, como mobilidade, falhas intermitentes e interferências. O hardware utilizado em RSSF

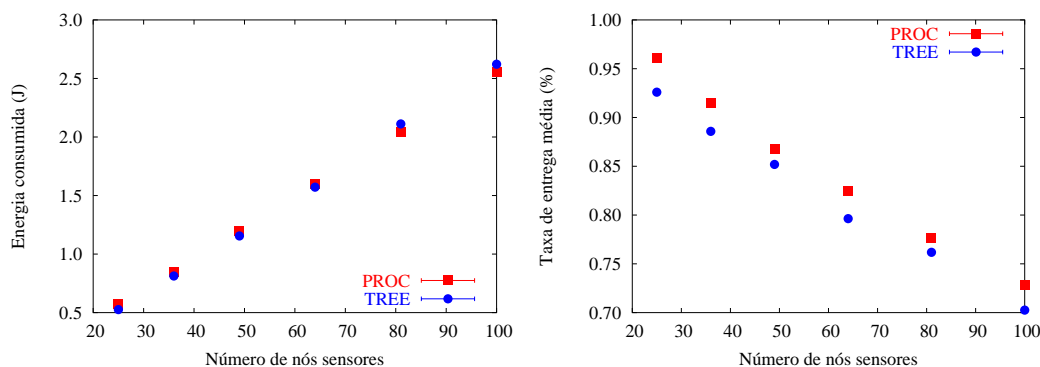


Figura 1: Simulação: (a) Energia Média consumida (b) Taxa de Entrega Média

possui limitações de recursos que podem impedir a utilização de cálculos mais complexos, como os utilizados para a eleição de coordenadores. Este fato justifica o desenvolvimento de um algoritmo de eleição de coordenadores que requeira menor capacidade computacional. A camada de enlace utilizada nas simulações mostrou-se inadequada para RSSFs, o que justifica o desenvolvimento de um protocolo MAC específico.

Referências

- Chen, B., Jamieson, K., Balakrishnan, H., and Morris, R. (2002). Span: an energy-efficient coordination algorithm for topology maintenance in ad hoc wireless networks. *Wireless Networks*, 8(5):481–494.
- Heinzelman, W. R., Chandrakasan, A., and Balakrishnan, H. (2000). Energy-Efficient Communication Protocol for Wireless Microsensor Networks. In *Proceedings of the 33rd Hawaii International Conference on System Sciences*.
- Karlof, C. and Wagner, D. (2003). Secure routing in wireless sensor networks: Attacks and countermeasures. In *IEEE International Workshop on Sensor Network Protocols and Applications*, pages 113–127.
- NS-2 (2003). Network simulator. <http://www.isi.edu/nsnam/ns/>.
- Powers, R. A. (1995). Batteries for low power electronics. In *Proceedings of the IEEE*, volume 83, pages 687–693.
- Ruiz, L. B., Loureiro, A. A. F., and Nogueira, J. M. (2003). Functional and information models for the manna architecture. In *GRES03*, pages 455–470. GRES03 - Colloque Francophone sur la Gestion de Reseaux et de Services.
- Wei Ye and John Heidemann and Deborah Estrin (2002). An Energy-Efficient MAC protocol for Wireless Sensor Networks. In *Proceedings of the IEEE Infocom*, pages 1567–1576, New York, NY, USA. USC/Information Sciences Institute, IEEE.