Otimização de Redes de Sensores sem Fio por Processos Markovianos de Decisão

Sóstenes P. Gomes[1], Solon V. de Carvalho[2], Rita de Cássia M. Rodrigues[2]

[1]Programa de Mestrado em Computação Aplicada – CAP/LAC,

[2]Laboratório Associado de Computação e Matemática Aplicada – CAP/LAC,
Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais – INPE,
São José dos Campos – SP – Brazil

{sostenes.gomes,solon,rita}@lac.inpe.br

Abstract. *This work considers the problem of energy conservation in a single node in a wireless sensor network, by changing its status from active to sleeping to reduce consumption. However, the node's inactivity period may compromise the network performance. In this context, it is proposed to model this system as a Discrete Time Markov Decision Process using a fixed point approximation method, in order to assure a good balancing between energy consumption and sensor inactivity.*

Resumo. *Neste trabalho considera-se o problema de conservação de energia em um nó de uma rede de sensores sem fio, que pode mudar seu estado de ativo para desligado, em prol da redução do consumo. Porém, leva-se em conta que um nó em período de inatividade pode comprometer o desempenho de toda a rede. Neste contexto propõe-se modelar este sistema como um Processo Markoviano de Decisão em Tempo Discreto usando um método de aproximação por ponto fixo, para assegurar um balanceamento entre consumo de energia e inatividade de todos os sensores da rede.*

1. Introdução

A tecnologia de redes de sensores sem fio tem evoluído rapidamente [Lewis 2004] com a redução do tamanho dos dispositivos de transmissão de dados e processadores, especialmente com a proliferação dos Sistemas Micro-Eletromecânicos (MEMS).

Redes de sensores sem fio ambientais, geralmente, são compostas por pequenos sensores com pouca capacidade de processamento e que possuem uma fonte limitada de energia. Nas redes de sensores sem fio mais tradicionais, os sensores enviam os dados para uma unidade central (*sink*), que é responsável por processá-los e enviá-los ao receptor final [Verdone e Buratti 2005]. Porém, em redes de sensores sem fio *ad hoc*, os sensores também podem processar os dados cooperativamente [Dyck e Miller 2001].

Neste trabalho, propõe-se modelar um sistema de rede de sensores sem fio *ad hoc*, como um Processo Markoviano de Decisão em um método iterativo de aproximação de ponto fixo. Este método iterativo possui dois passos principais: resolução do Modelo Markoviano de Decisão para todos os nós da rede e estimação dos parâmetros de entrada para esse modelo. Esses dois passos são discutidos nas seções seguintes.

2. Modelo Markoviano de Decisão

Propõe-se a utilização de Processos Markovianos de Decisão para estender o modelo de Chiasserini e Garetto (2004) e obter uma política ótima de controle que determine a quantidade ideal de dados armazenados, até que o sensor seja desligado para economia de energia, em um horizonte de planejamento infinito. Este modelo é resolvido para todos os nós da rede individualmente no primeiro passo do método iterativo.

O modelo de decisão proposto pode ser descrito através da quádrupla (E, L, P, C), onde E é um conjunto finito de estados, L é um conjunto de ações, P é uma função de probabilidades, e C é a função custo. Um estado pertencente a E é representado pela dupla (l, b), sendo:

$$l = \begin{cases} R, \text{ o sensor pode transmitir ou receber, e gerar dados;} \\ N, \text{ o sensor pode apenas transmitir dados;} \\ S, \text{ o sensor não pode receber e nem transmitir dados.} \end{cases}$$

Se o sensor está ativo, b é a quantidade de dados armazenados no *buffer*, caso contrário, b é o tempo em que o sensor esteve inativo.

Para cada estado i em E, uma ação pertencente ao conjunto L(i) = {$0,1$} deve ser escolhida, tal que a ação a é definida por:

$$a = \begin{cases} 0, \text{ desligar ou manter o nó desligado;} \\ 1, \text{ ligar ou manter o nó ligado.} \end{cases}$$

Assim, tem-se: L(R, b) = L(S, b) = {0, 1} e L(N, b) = {0}.

Se no estado i uma ação a é escolhida, no próximo instante de decisão o sistema estará no estado j com probabilidade $p_{ij}(a)$, definida pela função de probabilidades P. As probabilidades de transição são obtidas considerando-se os seguintes parâmetros:

- α, probabilidade de uma unidade de dado ser recebida;
- β, probabilidade de uma unidade de dado ser enviada;
- g, probabilidade de o sensor gerar uma unidade de dado;

Os custos considerados são:

- D, custo de o nó estar ativo em um período de tempo;
- M, penalidade incidida em cada período de tempo em que o nó está desligado; c, o custo de se manter uma unidade de dado armazenada no *buffer*.

Dado que o estado do sistema é i e escolhe-se a ação a, a função custo a ser minimizada é dada por:

$$C_i(a) = \begin{cases} M, & a = 0 \text{ e } l = S \\ M + cb, & a = 0 \text{ e } l = N \\ D + cb, & a = 1 \end{cases} \tag{1}$$

Determinando T, uma política de controle que atribui a cada estado em E uma ação a ser adotada, obtêm-se as probabilidades limites do modelo através da resolução do seguinte sistema de equações:

$$\pi_j(T) = \sum_{i \in E} p_{ij}(T_i)\pi_i(T), \; j \in E \tag{2}$$

$$\sum_{j \in E} \pi_j(T) = 1. \tag{3}$$

onde $\pi_j(T)$ é o vetor das probabilidades limites do sistema quando se utiliza a política T.

Determina-se também $m(T)$, o custo médio esperado a longo prazo do sistema ao se adotar a política T:

$$m(T) = \sum_{j \in E} c_j(T_j)\pi_j(T). \tag{4}$$

Dados os parâmetros do modelo, é de interesse determinar uma regra ou política T^* que prescreva uma ação a ser executada em cada instante de decisão, para todo estado em E, tal que o custo total esperado seja mínimo, isto é, $m(T^*) \leq m(T)$, para cada política estacionária possível. Em relação ao modelo proposto, é sempre possível determinar uma política estacionária [Puterman 1994], já que o espaço de estados e o conjunto de ações são finitos.

Para se obter a política ótima, utilizam-se técnicas de Programação Dinâmica, como o Algoritmo de Iteração de Valores [Tijms 2003].

2.1. Medidas de Desempenho

A partir do cálculo das probabilidades limites do sistema ($\pi(j)$), algumas medidas de desempenho podem ser prontamente obtidas. Definindo B, a capacidade máxima do *buffer* do sensor, tem-se:

- λ, a quantidade média de dados gerados

$$\lambda = \sum_{i=0}^{B} \pi(R,i)\, g; \tag{5}$$

- ρ, a quantidade média de dados enviados pelo sensor

$$\rho = \sum_{i=1}^{B} [\pi(R,i) + \pi(N,i)]\beta; \tag{6}$$

- θ, a ocupação média do *buffer* do sensor

$$\theta = \sum_{i=1}^{B} i\,[\pi(R,i) + \pi(N,i)]. \tag{7}$$

3. Estimação dos Parâmetros de Entrada

No segundo passo do método iterativo, os parâmetros α e β devem ser estimados para todos os nós da rede. Nesta seção são apresentados os modelos utilizados para se obter esses valores.

3.1. Probabilidade de Recepção (α)

Uma rede sensores pode ser modelada como uma rede de filas, admitindo-se que cada *buffer* é uma fila com um único servidor. Pela teoria de filas, se o sistema está em equilíbrio, a quantidade de chegadas na fila é igual ao número de saídas da fila, e, assumindo o equilíbrio do sistema, α pode ser facilmente obtido através de (5) e (6), isto é, através de $\rho = \lambda + \alpha$.

3.2. Probabilidade de Transmissão (β)

É importante destacar que a probabilidade de transmissão é a probabilidade de o sensor utilizar a antena de comunicação para transmitir um pacote, dado que existe ao menos uma unidade de dados armazenada no *buffer*, e ao menos um nó adjacente ao sensor transmissor esteja na fase *R*. Assim, de posse dos valores das probabilidades limites obtidas na resolução do modelo da seção 2.1, o valor de β para um sensor n pode ser computado como:

$$\beta_n = \sum_{u \in U} \left[\gamma_u \prod_{v \in V} (1 - \gamma_v) \right]. \tag{8}$$

onde U é o conjunto dos nós adjacentes ao sensor n, V é o conjunto dos nós adjacentes ao sensor n que possuem maior prioridade que u na tabela de roteamento e γ_u é a probabilidade limite de o nó u estar no estado R e o *buffer* não estar cheio, que pode ser ser obtida por:

$$\gamma_u = \sum_{m=0}^{B-1} \left[\pi_u(R, m) \right], \tag{9}$$

sendo B a capacidade máxima do *buffer*.

No entanto, para que o modelo seja mais realista, é necessário considerar a possibilidade de haver contenção do canal na tentativa de um nó utilizá-lo, ocasionada pela atividade das antenas de comunicação dos demais sensores da rede. Para investigar as conseqüências da existência de contenção do canal, utiliza-se um modelo de interferência [Santi 2005], que será explicado na seção a seguir.

3.2.1. Modelo de Interferência

Considerando uma eventual transmissão entre um nó transmissor u e um nó receptor v, e que suas respectivas antenas de comunicação possuem um raio de alcance r, a transmissão de uma unidade de dados ocorre com sucesso se duas condições forem satisfeitas:

1. a distância d, entre u e v, é menor que o raio de alcance da antena de comunicação de u, ou seja,

   $d_{u,v} \leq r$,
2. e, para qualquer nó n transmitindo simultaneamente

   $d_{n,v} > r$.

Assume-se, ainda, que é utilizado um protocolo de comunicação com *handshaking* e prevenção de colisões como o CSMA/CA, e, por conseguinte, nenhum dado transmitido é perdido.

Em resumo, o modelo leva em conta as condições necessárias para que uma transmissão de dados entre dois nós ocorra com sucesso, isto é, considera a contenção do acesso ao canal compartilhado pelos dois nós. Assim, em um determinado tempo de observação do sistema, *u* transmitirá apenas se ele tiver acesso ao canal antes de um dos sensores pertencentes ao conjunto dos nós adjacentes de *v* (exceto o próprio *u*), definido por A_v. Assumindo que os nós são igualmente prováveis de acessar o canal, este acesso ocorre com probabilidade $1/(f+1)$, sendo *f* a quantidade de nós pertencentes a A_v ativos e preparados para transmitir nesse tempo de observação do sistema. Através das probabilidades limites obtidas, é possível calcular a probabilidade média t_{A_v} de um nó *w* em A_v estar preparado para transmitir:

$$t_{A_v} = \frac{1}{N_{A_v}} \sum_{w \in A_v} \left[\sum_{m=1}^{B} \left(\pi_w(R,m) + \pi_w(N,m) \right) \right], \qquad (10)$$

onde N_{A_v} é a cardinalidade do conjunto A_v.

Assim, utilizando (8) e (10), a probabilidade de um sensor *n* transmitir pode ser estimada por:

$$\beta_n = \sum_{u \in U} \left[\gamma_u \prod_{v \in V} (1-\gamma_v) \sum_{f=0}^{N_{A_u}} \left[\frac{1}{f+1} \binom{N_{A_u}}{f} t_{A_u}^{f} (1-t_{A_u})^{N_{A_u}-f} \right] \right]. \qquad (11)$$

4. Modelo Completo: Aproximação Por Ponto Fixo

No modelo analítico desenvolvido, o modelo markoviano de decisão e os modelos para estimar os parâmetros α e β são utilizados em conjunto em um método de aproximação por ponto fixo, onde os resultados obtidos do modelo markoviano (probabilidades limites) são parâmetros de entrada para os métodos da seção 2.2 e vice-versa.

O método, a cada iteração, resolve o modelo markoviano para todos os sensores da rede, estima os valores dos parâmetros do modelo e reinicia o ciclo utilizando esses novos valores. Este processo continua até que um equilíbrio dos valores dos parâmetros seja obtido. Desta forma, os únicos parâmetros de entrada a serem fornecidos são as probabilidades de geração de dados (g_n) dos nós, que são parâmetros que dependem de eventos externos ao modelo. Na figura a seguir é ilustrado o funcionamento do método de aproximação por ponto fixo.

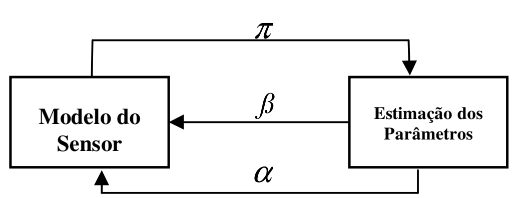

Figura 1. Método aproximativo por ponto fixo

Na primeira iteração do método, o modelo markoviano é resolvido para cada sensor assumindo que apenas o nó considerado gera dados e que seus adjacentes estarão sempre ativos, ou seja, β é igual a 1. Assim, α é igual a 0, já que a antena de comunicação pode ser utilizada apenas para transmitir ou receber em um determinando tempo de observação do sistema ($\alpha + \beta \leq 1$) . Nos resultados obtidos a convergência ocorre, em média, em 10 iterações.

4.1. Medidas de Desempenho da Rede

Através da resolução do modelo geral, algumas medidas de desempenho da rede podem ser obtidas, tais como:

- Γ *,* a taxa de chegadas de dados no *sink* ou a capacidade da rede:

$$\Gamma = \sum_{k=1}^{M} \lambda_k \tag{12}$$

- *D*, o *delay* médio na rede:

$$D = \frac{\sum_{k=1}^{M} \theta_k}{\Gamma} \tag{13}$$

onde *M* é a quantidade de nós da rede.

5. Conclusão

Neste trabalho, é apresentado uma extensão do modelo analítico proposto por Chiasserini e Garetto (2004) a um modelo markoviano de decisão em tempo discreto, que possibilita obter uma política de controle ótima das transições entre seus estados ativo e desligado, visando obter um balanceamento entre consumo de energia e inatividade. O modelo é utilizado em um método de aproximação por ponto fixo, através do qual é possível obter medidas de desempenho de toda a rede.

6. Referências

Chiasserini, C.-F. e Garetto, M. (2004) "Modeling the Performance of Wireless Sensor Networks". IEEE INFOCOM.

Dyck, V. R. E. e Miller, L. E. (2001) "Distributed Sensor Processing Over an Ad-hoc Wireless Network: Simulation Framework and Performance Criteria". IEEE MILCOM.

Lewis, F. L. (2004) "Wireless Sensor Networks. In: Smart Environments: Technologies, Protocols and Applications", ed. D. J. Cook and S. K. Das, John Wiley.

Puterman, M. L. (1994) "Markov Decision Processes: Discrete Stochastic Dynamic Programming". Ed. John Wiley & Sons, Inc.

Santi, P. (2005) "Topology Control in Wireless Ad hoc and Sensor Networks". Ed. John Wiley & Sons, Inc.

Tijms, H. C. (2003) "A First Course in Stochastic Models". Ed. John Wiley & Sons, Inc, 2ª ed.

Verdone, R. e Buratti, C.(2005) "Modelling for Wireless Sensor Network Protocol Design". International Workshop on Wireless Ad-hoc Networks.