



**UNIVERSIDADE FEDERAL DA BAHIA
ESPECIALIZAÇÃO AVANÇADA EM SISTEMAS
DISTRIBUÍDOS**

Hugo Vinícius Vaz Braga

**Camadas de Acesso ao Meio para Redes de
Sensores Sem Fio**

Salvador
2011

Hugo Vinícius Vaz Braga

Camadas de Acesso ao Meio para Redes de Sensores Sem Fio

**Texto em formato de artigo apresentado ao Curso de Especialização Avançada em Sistemas Distribuídos do ano de 2009, Departamento de Ciência da Computação, Instituto de Matemática, Universidade Federal da Bahia, como requisito parcial para obtenção do grau Especialista em Sistemas Distribuídos.
Orientador: Prof. Flávio Assis**

Salvador
2011

TERMO DE APROVAÇÃO

Hugo Vinícius Vaz Braga

Camadas de Acesso ao Meio para Redes de Sensores Sem Fio

Texto em formato de artigo apresentado ao Curso de Especialização Avançada em Sistemas Distribuídos do ano de 2009, Departamento de Ciência da Computação, Instituto de Matemática, Universidade Federal da Bahia, como requisito parcial para obtenção do grau Especialista em Sistemas Distribuídos.

Entregue em 16 de fevereiro de 2011

EXAMINADORES

Prof. Flávio Assis (Orientador)
Universidade Federal da Bahia

Prof. Alírio Sá
Universidade Federal da Bahia

Me. Frederico Barbosa
Universidade Federal da Bahia

Camadas de Acesso ao Meio para Redes de Sensores Sem Fio

Hugo Braga¹

¹EASD - Especialização Avançada em Sistemas Distribuídos

LaSiD - Laboratório de Sistemas Distribuídos

DCC - Departamento de Ciência da Computação

UFBA - Universidade Federal da Bahia

Salvador, Bahia, Brasil

Email: hugobraga@ufba.br

Abstract. *Wireless Sensor Networks (WSN) are characterized by the constrained resources, mainly energy resources, and by the wide range of applications, from healthcare monitoring to military applications. One of the forms to reduce energy expenditure in WSN is controlling the access to the physical medium, role played by the MAC (Medium Access Control) protocol. This work aims to present the state of the art for WSN MACs, presenting a classification for them and describing the most important protocols that own them. Beside this, it will be presented the most innovative features that differ some work from the others as well as it will be described the most important protocols that own them.*

Resumo. *Redes de Sensores sem Fio (RSSF) são caracterizadas pela pouca disponibilidade de recursos, principalmente energéticos, e pela ampla aplicação, desde monitoração da saúde das pessoas até aplicações militares. Uma das principais formas de reduzir o consumo energético em RSSF é através do controle de acesso ao meio físico, função desempenhada pelo protocolo de camada MAC (Medium Access Control). Este trabalho consiste num estudo do estado da arte dos protocolos MAC, apresentando uma classificação para os mesmos, destacando os principais protocolos de cada classe. Além disso, serão apresentadas características inovadas que diferenciaram alguns trabalhos dos demais, assim como os principais protocolos que as possuem.*

1. INTRODUÇÃO

Redes de sensores sem fio (RSSF) são formadas por nós caracterizados pela limitação de recursos, visto que são operados por bateria e possuem pouco poder computacional. Este tipo de rede é utilizado com o objetivo de sensoriar e colher dados relacionados a alguma grandeza física (como temperatura), sendo aplicada na monitoração de regiões remotas e de difícil acesso, rastreamento do movimento de animais, dentre outras [Santi 2005]. Além disso, ela também vem sendo utilizada na monitoração da saúde das pessoas [Nabi et al. 2010], aplicações militares [Walker III et al. 2008] e monitoração de incêndios em florestas [Mitchell et al. 2010]. Geralmente estas redes são formadas por milhares de nós espalhados em uma determinada região de difícil acesso, ou muitas vezes a substituição ou recarga destes nós é inviável. Sendo assim, a conservação energética é primordial em RSSF.

A arquitetura dos nós sensores é composta de quatro componentes: unidade de processamento, memória, sensores e/ou atuadores, unidade de comunicação (rádio ou

transceptor) e fonte de energia [Karl and Willig 2005]. Sabe-se que a unidade de comunicação consome mais energia que a unidade de processamento [Karl and Willig 2005]. A camada de acesso ao meio (*Medium Access Control* - MAC) tem grande influência sobre o rádio e consiste na principal forma de influenciá-lo, visando à redução do consumo energético [Kredo and Mohapatra 2007]. Em decorrência disso, esta área de pesquisa tem despertado bastante interesse nos últimos anos [Ansari et al. 2010, Huang et al. 2010, Lai et al. 2010, Le and Takizawa 2010, Misra and Mohanta 2010, Mitchell et al. 2010, Mouzehkesh et al. 2010, Nabi et al. 2010, Yahya and Ben-Othman 2010, Barbosa et al. 2009, Chin 2009, Chowdhury et al. 2009, Merhi et al. 2009, Sha et al. 2009, Zhang et al. 2009a, Zhang et al. 2009b, Zhao et al. 2009, Chalhoub et al. 2008, Decker et al. 2008, Kwong et al. 2008, Li and Mitchell 2008, Rousselot et al. 2008, Walker III et al. 2008, Wan et al. 2008, Wu et al. 2008, Yadav et al. 2008, Yahya and Ben-Othman 2008, Aslam et al. 2006, Nguyen and Kumar 2006]. Em quase todos os trabalhos, a energia é objetivo primordial ou faz parte de uma solução de compromisso quando outros atributos também são considerados diretamente. Em poucos trabalhos, a energia é colocada em segundo plano [Li and Mitchell 2008].

Basicamente o protocolo para MAC (ao longo do texto, o termo protocolo estará relacionado com a camada MAC, a menos que seja definido de outra forma) tem por função gerenciar o acesso ao meio físico, definindo quem e quando tem direito de acessá-lo para participar da comunicação. Além disso, em geral, outras funções também fazem parte da camada MAC: enquadramento, garantir confiabilidade, controle de fluxo e controle de erro [Kredo and Mohapatra 2007].

Os protocolos geralmente são classificados em dois grupos: com acesso aleatório e baseados em escalonamento [Kredo and Mohapatra 2007]. Nos protocolos com acesso aleatório, os nós competem pelo acesso ao meio, previamente monitorando este para checar se está ocupado (tipicamente através do CSMA - *Carrier Sense Multiple Access*), sendo que o acesso é feito sob demanda e sem controle (de forma aleatória). Já no acesso baseado em escalonamento, o acesso é organizado, pois há uma divisão do meio em *slots*, sendo que estes representam uma unidade de tempo, frequência ou código.

Além da classificação acima, alguns protocolos possuem características interessantes que os diferem dos outros trabalhos. Dentre estas, estão: a dinamicidade (do *duty cycle* e do período do ciclo), *design cross-layer*, suporte à mobilidade e baseados em modelo de controle de potência. Estas características serão detalhadas na Seção III assim como serão abordados os principais protocolos que as possuem.

As principais fontes de gasto energético dos nós sensores são [Misra and Mohanta 2010]: escuta ociosa (*idle listening*), colisão, *overhearing* e sobrecarga (*overhead*) das mensagens de controle. *Idle listening* ocorre quando um nó está escutando o meio sem receber mensagem, gastando energia. Colisão ocorre quando um pacote é corrompido pela transmissão de outro nó (corrompido ou não interpretável), sendo descartado e necessitando ser retransmitido. O custo do *overhearing* está relacionado com o custo decorrente de um nó escutar uma transmissão mesmo quando esta não está destinada para o nó. Por último, o gasto com *overhead* de controle está relacionado com as mensagens que são utilizadas pelo protocolo mas que não são considerados dados úteis. No que se refere à redução energética, cada protocolo tem por objetivo reduzir um ou mais destes gastos.

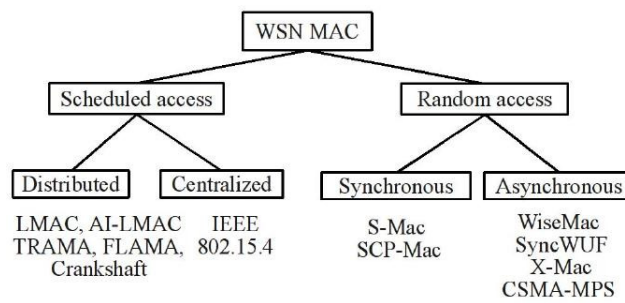


Figura 1. Classificação das camadas MACs [Rousselot et al. 2008]

A redução energética sempre foi vista como o objetivo primordial dos protocolos. Mas, nos últimos anos, outras métricas também têm recebido destaque como: aumento da razão de entrega de mensagens [Barbosa et al. 2009], vazão (*throughput*) [Nguyen and Kumar 2006, Huang et al. 2010, Lai et al. 2010, Mitchell et al. 2010, Sha et al. 2009, Wu et al. 2008], atraso (*delay*) [Lai et al. 2010, Le and Takizawa 2010, Mitchell et al. 2010, Yadav et al. 2008, Zhang et al. 2009a] e, como sendo uma reunião destas duas últimas, qualidade de serviço (*Quality of Service* - QoS) [Aslam et al. 2006, Yahya and Ben-Othman 2010, Zhao et al. 2009, Li and Mitchell 2008, Walker III et al. 2008, Wan et al. 2008, Yahya and Ben-Othman 2008]. Muitas vezes, estas métricas são combinadas com a redução do consumo energético como uma solução de compromisso, mas em muitos casos elas são vistas como os objetivos principais.

Este trabalho está estruturado da seguinte forma: seção II aborda a classificação dos protocolos, destacando os principais trabalhos. A seção III explora características que se destacam nos trabalhos dos últimos anos. A seção IV aborda as principais métricas visadas pelos protocolos. O trabalho finaliza com as considerações finais.

2. CLASSIFICAÇÃO

Como já foi dito anteriormente, os protocolos podem ser classificados em: com acesso aleatório e baseados em escalonamento (ou livres de contenção). Em muitos trabalhos, a classificação adotada é: baseados em contenção e baseados em escalonamento [Mitchell et al. 2010, Chowdhury et al. 2009]. Optou-se pela primeira classificação (adotada em [Kredo and Mohapatra 2007]) pois esta pareceu ser mais clara, como veremos a seguir. Outra classificação foi proposta em [Chowdhury et al. 2009], que divide os protocolos em: baseados em TDMA (escalonadas), baseados em contenção e protocolos multicanais. Optamos por inserir esta última classe das multicanais à classificação, ou seja, mesclamos a primeira e a última classificação. Figura 1 ilustra a classificação (parcial) adotada.

2.1. PROTOCOLOS BASEADOS EM ESCALONAMENTO

Como já foi dito anteriormente, os protocolos baseados em escalonamento organizam o meio físico dividindo-o em slots, geralmente baseado na técnica de TDMA. Tradicionalmente, a opção por este tipo de protocolo pretende evitar problemas como *idle listening*, *overhearing* e colisões [Mitchell et al. 2010]. Na verdade, a divisão em slots não implica que não ocorrerá colisões. Por exemplo, em [Le and Takizawa 2010] a comunicação dentro de cada slot (que representa um *cluster*) se dá através de contenção e em [Walker III

et al. 2008] slots de dado (livre de contenção) podem se transformar em slots de controle (com contenção).

Nos dois casos acima, a colisão pode ocorrer pois estes protocolos são híbridos, ou seja, eles utilizam o melhor das técnicas com o intuito de criar um protocolo mais eficiente [Yahya and Ben-Othman 2008]. Em alguns protocolos escalonados, apesar de estes possuírem um período em que o acesso é aleatório, os autores não deixam claro o porquê desta escolha, ou seja, é como se apenas fosse necessário para o funcionamento do protocolo. Neste caso, nós não consideramos híbrido.

Os protocolos baseados em escalonamento são divididos em dois tipos: distribuído e centralizado.

2.1.1. Distribuído

os protocolos distribuídos híbridos [Le and Takizawa 2010, Yahya and Ben-Othman 2010, Merhi et al. 2009, Zhao et al. 2009, Walker III et al. 2008, Yahya and Ben-Othman 2008, Decker et al. 2008], além dos [Nabi et al. 2010, Chin 2009], são aqueles em que a tarefa de coordenação não é centralizada, ou seja, não existe um nó responsável por distribuir as mensagens de sincronização e definir o momento em que cada um deve se comunicar.

Em [Walker III et al. 2008] é apresentado o protocolo híbrido *Cooperative Wireless Sensor Medium Access Control* (CWS-MAC). Ele foi desenvolvido com o intuito de atender tanto aos requisitos das mensagens de controle como aos do tráfego dos dados. Diferente da forma como o tráfego das RSSF geralmente são caracterizadas, em [Walker III et al. 2008], nas RSSF cooperativas, existem dois tipos de tráfegos: as mensagens de dado que são enviadas periodicamente e requisitam grande largura de banda (como multimídia), sendo estas tolerantes a descartes, e as mensagens de controle, sendo estas curtas, não tolerando descartes e necessitando o mínimo atraso.

As mensagens de dado são transmitidas de forma escalonada e sem colisão (os autores não apresentam o esquema de atribuição de slots, mas referenciam trabalhos), enquanto as mensagens de controle são transmitidas em mini-slots mas com contenção. Para garantir a confiabilidade, *ACKs* são utilizados. Já para garantir o mínimo atraso, o CWS-MAC apresenta uma abordagem nova: o quadro de controle pode ‘roubar’ o quadro de dado, ou seja, caso exista uma mensagem de controle pendente, esta terá prioridade sobre qualquer quadro de dado de qualquer nó, sobrepondo o quadro de dado com um quadro de controle.

Nos resultados apresentados em [Walker III et al. 2008], foram observados que a vazão não degrada com a saturação da rede e o atraso se mostrou menor se comparado às abordagens tradicionais de TDMA. É interessante observar que tipicamente em protocolos híbridos, utiliza-se a reserva para mensagens grandes e que necessitam de vazão, enquanto a contenção é reservada para as mensagens pequenas (de controle), cuja probabilidade de colidir é menor.

2.1.2. Centralizado

Os protocolos centralizados híbridos [Lai et al. 2010, Chalhoub et al. 2008], além do [Mitchell et al. 2010], correspondem ao oposto dos protocolos distribuídos.

O protocolo descrito em [Mitchell et al. 2010] propõe a utilização de uma plataforma aérea de comunicação para auxiliar o trabalho da camada MAC, servindo como um coordenador central, eliminando a função de coordenação da RSSF, e/ou atuando como o próprio nó *sink*. Como coordenador central, o dispositivo capturaria a informação de topologia de todos os nós e definiria o escalonamento de cada nó além de definir o melhor caminho a ser percorrido por cada mensagem até o nó *sink*, eliminando o protocolo de roteamento (consiste em uma solução *cross-layer*, a ser detalhada posteriormente). Isto eliminaria a troca de mensagens de coordenação e roteamento. Atuando como nó *sink*, a comunicação poderia ser direta, eliminando a comunicação *multi-hop*. Figura 2 ilustra os dois casos.

A motivação para a comunicação direta ao invés do caminho *multi-hop* é que com um dispositivo aéreo a 200 metros de altura e os nós sensores com uma determinada angulação (da antena) e com uma certa frequência de interesse, seria possível haver comunicação direta com pouquíssima interferência do meio, ou seja, o modelo de decaimento do sinal *free space* com uma fator de decaimento do sinal (característico do meio) de dois modelaria bem o efeito sobre o sinal. Enquanto isso, na comunicação terrestre, em decorrência à diversos efeitos, medidas mostram que o fator de decaimento fica entre três e quatro, ou seja, transmitindo uma mensagem com a mesma potência de transmissão nas duas situações, seria possível alcançar uma distância no ar muito maior se comparado com a comunicação terrestre.

Para dar suporte às duas funcionalidades citadas anteriormente, são apresentados dois protocolos em [Mitchell et al. 2010]: APRMAC e APMAC. O APRMAC é baseado no TRAMA [Rajendran et al. 2003], sendo responsável por definir o escalonamento de todos os nós, para que as mensagens sejam encaminhadas com o menor atraso possível. Os nós obtêm os vizinhos de um salto e enviam esta informação para o dispositivo. O APRMAC define para cada nó e em cada slot de tempo, o estado em que o nó deve estar: transmitindo, recebendo (para posteriormente encaminhar) ou dormindo. O APMAC é responsável por organizar para que cada nó transmita suas mensagens, livre de colisão, para o dispositivo aéreo, sendo que o protocolo se adapta ao tráfego.

2.2. PROTOCOLOS DE ACESSO ALEATÓRIO

Como já foi dito, nos protocolos de acesso aleatório, o acesso não é regulado e ocorre sob-demanda. Neste tipo de protocolo, um dos principais benefícios consiste na extensibilidade [Mitchell et al. 2010], visto que *overhead* de coordenação não existe, diminuindo inclusive o gasto energético em decorrência disso. Entretanto, ela sofre com *idle listening*, *overhearing* e colisão.

Como já foi dito, *overhearing* consiste em uma das principais formas de gasto energético em RSSF. Muitos protocolos estão sujeitos ao *overhearing*. Todos os protocolos que se baseiam na técnica denominada *low power listening* (LPL), também conhecida por amostragem de preâmbulo (*preamble sampling*) [Polastre et al. 2004, El-Hoiydi and Decotignie 2004, Buettner et al. 2006, Zhang et al. 2009b, Ansari et al. 2010], estão su-

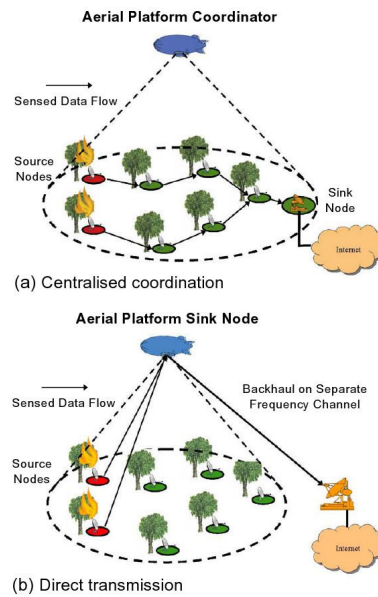


Figura 2. Suporte aéreo para protocolo MAC [Mitchell et al. 2010]

jeitos ao efeito do *overhearing*, basicamente pelo fato de serem protocolos assíncronos. Em particular, B-MAC [Polastre et al. 2004], um protocolo baseado em amostragem de preâmbulo, consiste no protocolo padrão para o *TinyOS* [Buettner et al. 2006], um dos sistemas operacionais mais importantes para RSSF. Além disso, o protocolo para MAC especificado no padrão IEEE 802.15.4 [IEEE 2006], o padrão *de facto* para camada MAC e física para dispositivos de baixo consumo, está sujeito ao *overhearing*.

Os protocolos de acesso aleatório podem ser divididos em: síncrono e assíncrono.

2.2.1. Síncrono

Nos protocolos síncronos [Aslam et al. 2006, Mouzehkesh et al. 2010, Yadav et al. 2008, Misra and Mohanta 2010, Zhang et al. 2009a], mecanismos de sincronização entre os nós são adotados. Geralmente, esta sincronização proporciona aos nós tomarem conhecimento dos escalonamentos dos vizinhos, objetivando reduzir o *idle listening*.

Em [Yadav et al. 2008], é proposto um protocolo que consiste numa variação do S-MAC [Wei et al. 2002] além de conter algumas otimizações. O protocolo tem por objetivo a eficiência energética e latência, baseado nas limitações do S-MAC e T-MAC [van Dam and Langendoen 2003].

A sincronização dos nós é semelhante ao S-MAC. Os endereços de origem e destino foram removidos das mensagens de dado. Além disso, as mensagens de sincronização e de RTS foram convertidas em um único pacote de controle. Tudo isso com o intuito de diminuir o *overhead*, consequentemente diminuindo o atraso. Diferente do S-MAC, o nó se adapta ao tráfego variando o *duty cycle*. O *duty cycle* consiste em, para cada ciclo de operação, a relação entre o tempo que o nó permanece acordado pelo tempo total do ciclo. Quando a quantidade de pacotes na fila é maior que um limite, o *duty cycle* é incrementado (por um fator de dois). Quando está abaixo de um limite, é decrementado

(também por um fator de dois).

Em [Mouzehkesh et al. 2010], também é proposta uma variação do S-MAC. O objetivo dos autores é reduzir o *idle listening* do S-MAC. Para isso, o protocolo varia o tamanho da janela de contenção (*Contention Window* - CW) dependendo do tráfego. A quantidade de tráfego é percebida através das trocas de RTS e CTS, dando indício da possível quantidade de nós que irão futuramente participar da contenção. O tráfego é estimado a partir do número de colisões, tamanho médio das colisões e tamanho médio dos tempos no estado ocioso.

A lógica para calcular o CW consiste no seguinte: à medida em que o tráfego torna-se menos intenso, a probabilidade de colisão é menor, logo o valor do CW pode ser menor, reduzindo energia. Caso o tráfego aumente, aumenta-se o CW, fazendo com que a colisão diminua. Observe que apesar de ajustar o CW a partir do tráfego, o protocolo não se adapta ao tráfego, pois o *duty cycle* continua fixo.

2.2.2. Assíncrono

O protocolo *Game-theoretic* (G-MAC) é apresentado em [Zhao et al. 2009]. Assim como o CWS-MAC, o G-MAC tem por fim garantir vazão e mínimo atraso (outros protocolos que também consideram QoS como objetivo final serão apresentados na Seção IV). A motivação do trabalho consiste no fato de que as aplicações estão começando a ter requisitos de tempo-real. Em [Zhao et al. 2009], o autor tenta otimizar vazão e atraso levando em consideração as restrições energéticas.

O autor modela como um problema de otimização com restrição baseado em um jogo (*Teoria dos Jogos*) cooperativo incompleto. O autor modela como um jogo, pois há uma situação de conflito (entre energia e requisitos de QoS), além de haver cooperação, que neste caso é incompleta. O jogo é considerado incompleto pois a estratégia de cada jogador é tomada baseada no estado dos outros jogadores sem haver troca de estados. Esta é uma inovação do trabalho. Além disso, o problema foi modelado com restrições energéticas, diferentemente de trabalhos anteriores. A estratégia de equilíbrio de cada jogador consiste em três ações: transmitir, escutar ou dormir. O autor propõe uma heurística que, para cada estado corrente do jogo, calcula o tempo no estado ativo, o tempo no estado inativo (*sleep*) e a probabilidade de enviar uma mensagem, caso esteja no estado ativo. O autor definiu como sendo o estado do jogo a quantidade de nós disputando o acesso ao meio, sendo que esta quantidade é estimada através da probabilidade de transmitir e de colisão.

Por fim, em [Zhao et al. 2009] é proposto o G-MAC. Neste protocolo, o tempo é dividido em super-quadros, formados por duas partes: ativa e inativa. O tamanho destas duas partes é ajustada pela estratégia de equilíbrio de cada jogador. O acesso na parte ativa é feita de forma aleatória e alguns parâmetros da contenção, como o tamanho da janela de *backoff*, são ajustados também pela estratégia de equilíbrio. Nos resultados obtidos, G-MAC se mostrou melhor em termos de vazão e latência quando comparado com S-MAC e T-MAC, enquanto a energia consumida foi considerada pelo autor relativamente baixa.

2.3. Protocolos Multicanais

Os protocolos multicanais [Chowdhury et al. 2009, Decker et al. 2008, Wu et al. 2008] são aqueles que utilizam mais de um canal para transmitirem as mensagens de controle e de dados.

Em [Chowdhury et al. 2009], a motivação para o trabalho é que, com o avanço do *hardware*, nós sensores agora podem se comunicar em mais de um canal. Dado isso, há a necessidade de utilizar os canais de comunicação que provoquem o mínimo de interferência possível. Este problema equivale ao problema de colorir em grafos, onde cores que separam nós com até dois saltos de distância devem ser diferentes. Eles propõem uma heurística para resolver este problema, denominada *Alocação Dinâmica de Canal* (*Dynamic Channel Allocation* - DCA).

Além do DCA, em [Chowdhury et al. 2009] é proposto um protocolo multicanal, o CMAC. O objetivo principal de CMAC é conservar energia. No desenvolvimento do protocolo, eles objetivaram reduzir o *idle listening*, visto que este corresponde à principal fonte de gasto energético [Reason and Rabaey 2004]. Eles pressupõem que o sensor é equipado com dois tipos de transceptores (rádios): um com funções reduzidas (o LR) e um mais robusto (MR) capaz de transmitir em qualquer canal (dentro do conjunto definido). Além disso, assumem que o MR transmite à potência constante (inviabiliza o uso de controle de topologia). Este rádio é responsável pela transmissão dos dados. O LR consiste em um rádio de menor potência (*low-power radio*), sendo este responsável por emitir e receber sequências de pulsos que codificam as mensagens de controle.

No protocolo, existem três tipos de mensagens: *REQ*, *CON* e *WAIT*. A comunicação ocorre em duas fases: fase de negociação e a fase da comunicação do dado. Quando um nó *S* deseja enviar uma mensagem para *R*, o LR de *R* monitora o canal de *S* e, caso este esteja livre (o procedimento de *backoff* e de prevenção de colisão do 802.11 é adotado), LR de *R* transmite *REQ* no canal de *S*, sendo que *REQ* identifica o canal de *R*. Figure 3 ilustra a troca de mensagens. Caso o canal de *S* esteja livre, *S* envia no seu próprio canal a mensagem de *CON*, sendo que esta identifica o canal de *S*. Isto é necessário para identificar o vencedor, caso haja mais de um concorrente. Caso o canal estivesse ocupado, *S* receberia um *WAIT* que identificaria por quanto tempo ele deve aguardar até a comunicação finalizar. Caso *S* receba *CON*, MR de *S* será ligado e a fase de transmissão do dado iniciará no canal de *S*. Observe que MR de *R* também deverá ligar e mudar para o canal de *S*. Ao fim da comunicação, um *ACK* é enviado pelo MR de *R* no canal de *R*, ou seja, *S* deve aguardar o *ACK* no canal de *R*.

Ainda em [Chowdhury et al. 2009], os autores justificam a necessidade desta última troca de canal, além de mostrar como colisões e *overhearing* são tratados. A comunicação do dado útil é livre de colisão. Resultados mostram que quando comparado com o S-MAC, CMAC obtém significativa redução do consumo de energia e de atraso além do aumento da vazão.

3. CARACTERÍSTICAS

Nos trabalhos mais recentes, alguns trabalhos apresentam características interessantes que os diferem dos demais. Estas características são: suporte à mobilidade, *design cross-layer*, protocolos baseados em modelo de controle de potência e dinamicidade.



Apenas um protocolo foi encontrado que fornece suporte à mobilidade [Nabi et al. 2010]. Em [Mitchell et al. 2010], os autores apenas mencionam que o suporte à mobilidade é fornecido diminuindo o tamanho do quadro (reduzindo o tempo do ciclo) para que atualizações frequentes possam ocorrer.

Na motivação para o trabalho, os autores dão destaque às aplicações ligadas à área de saúde, como por exemplo aplicações para monitorar o estado de saúde de pessoas idosas. Um tipo de rede com esta característica é a *Wireless Body Area Network* (WBAN). Este tipo de aplicação é caracterizado pela movimentação de *cluster* de nós. Nas WBANs, um conjunto de nós sensores são posicionados ao longo do corpo do paciente para sensoriar e atuar de diversas formas. O consumo energético dos nós da WBAN deve ser muito baixo. Neste tipo de cenário, em complemento às WBANs, existem também as redes fixas. Os nós das redes fixas se comunicam com as WBANs tanto para capturar informação como para passar informação. Tipicamente neste cenário, os protocolos de roteamento são baseados em *gossiping*. Este tipo de técnica visa a confiabilidade pois as mensagens são transmitidas com redundância.

Em [Nabi et al. 2010], os autores propuseram o *Mobile Cluster MAC* (MCMAC), sendo este baseado em um outro protocolo que dá suporte à técnica de *gossiping*. No MCMAC, os autores incorporaram a característica de mobilidade dos nós.

No MCMAC, o quadro é dividido em duas partes: ativo e inativo. Este quadro se assemelha ao quadro do GMAC, protocolo do qual ele retirou esta estrutura. Figura 4 ilustra o quadro do MCMAC. A primeira parte dos slots ativos (*Static Active Slots* - SAS) são utilizados pelos nós estáticos para comunicarem entre si. Esta parte foi herdada do GMAC. A segunda parte ativa é conhecida como *mobile cluster slots* (MCS) sendo utilizada pelos nós móveis. Assim como no SAS, no MCS deve-se garantir que cada slot

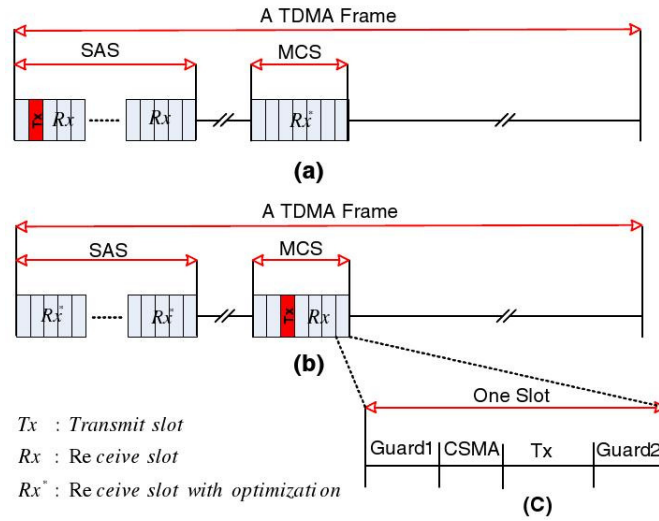


Figura 4. Frame do MCMAC [Nabi et al. 2010]

seja atribuído a apenas um nó.

Para os nós estáticos receberem mensagens dos nós móveis, eles precisam escutar durante o MCS, e para os nós móveis receberem mensagens dos nós estáticos, eles precisam escutar o SAS. Quando um *cluster* está próximo de outro, pode ocorrer colisão (devido à sobreposição). Eles resolvem isso adicionando o CSMA dentro de cada slot, como está ilustrado na Figura 4.

Os autores também propõem várias otimizações com o intuito de reduzir o consumo energético.

3.2. DESIGN CROSS-LAYER

Alguns protocolos possuem a característica de extrapolar a região que lhe concerne. Em alguns protocolos como em [Walker III et al. 2008, Yahya and Ben-Othman 2008], para que seja possível priorizar uma classe de tráfego, é necessário ter conhecimento da prioridade dos mesmos, que é definida pela aplicação. Em outros casos, o protocolo elimina a camada de roteamento, seja porque ele mesmo realiza esta função [Mitchell et al. 2010] ou porque força uma determinada topologia na rede, eliminando a necessidade de decisão por parte do roteamento [Chalhoub et al. 2008, Decker et al. 2008].

Em [Chalhoub et al. 2008] é proposto o protocolo MaCARI, que faz parte de um outro projeto citado em [Chalhoub et al. 2008]. MaCARI consiste em um protocolo híbrido, onde seu período é dividido em três partes: sincronização, um período escalonado que está relacionado com a árvore que representa a topologia da RSSF, ou seja, a comunicação entre os nós segue uma estrutura fixa e, por último, um período não escalonado.

No período de sincronização, todos os nós da árvore necessitam ser sincronizados, ou seja, requer sincronização global. No período escalonado, o acesso ao meio é feito livre de colisão. Cada nó da árvore que possui um filho é considerado um coordenador, sendo que o período escalonado, para o coordenador, é dividido em duas partes: uma para se comunicar com os nós filhos que não são coordenadores e outra para se comunicar com os nós coordenadores com os quais possui algum vínculo na árvore. Já no período não

escalonado, cada coordenador pode se comunicar com qualquer outro coordenador ao seu alcance, utilizando CSMA/CA.

3.3. PROTOCOLOS COM CONTROLE DE POTÊNCIA

Em [Sha et al. 2009] é apresentada C-MAC, um protocolo que tenta explorar o fato que transmissões concorrentes, ou seja, transmissões que interferem umas nas outras, podem ser realizadas com sucesso. O autor mostra um exemplo com dois enlaces de comunicação, sendo que um interfere no outro, e foi visto que a vazão é maior quando o CSMA não está habilitado, ou seja, há a possibilidade de comunicação mesmo quando enlaces interferem uns com os outros.

Modelos de interferência são estudados em [Sha et al. 2009] e os autores mostram que existe uma relação entre a razão de recebimento de pacote (*Packet Reception Ratio* - PRR) e o SINR (*Signal-to-Interference-plus-Noise-Ratio*). O objetivo da C-MAC é maximizar a vazão mesmo na presença de interferência, desabilitando totalmente o CSMA. A partir da relação PRR-SINR, C-MAC tenta estimar qual o melhor momento e a melhor potência de transmissão para que a vazão possa ser maximizada.

Uma das vantagens do trabalho é que os modelos adotados são empíricos ao invés de modelos simplistas que assumem que a atenuação da potência é simétrica. Resultados mostraram que, comparado com outros protocolos baseados em CSMA, o C-MAC conseguiu resultados melhores em termos de vazão, atraso e consumo de energia.

3.4. DINAMICIDADE

Algumas protocolos têm a capacidade de variar o *duty cycle* e/ou o tempo do ciclo do quadro com intuito de se adaptar ao tráfego [Aslam et al. 2006, Lai et al. 2010, Yadav et al. 2008, Chin 2009, Zhao et al. 2009, Zhang et al. 2009a]. Isto permite o aumento da vazão, assim como a redução do atraso. O consumo energético também tende a diminuir, pois o *idle listening* é reduzido.

Em [Misra and Mohanta 2010] é proposto um protocolo denominado *Fuzzy Logic-based Adaptive Listen for Medium Access Control* (FLAMAC) que tem por fim a redução do consumo energético através da redução do *idle listening*. Diferente das outras MACs deste grupo, FLAMAC reduz o *idle listening* variando o tempo do ciclo do quadro ao invés do *duty cycle*, sendo que este último fica fixo. O protocolo, como o próprio nome diz, é baseado em lógica *fuzzy*, pois os autores consideram esta técnica versátil e que requer baixo poder computacional, sendo adequada para as RSSF. Além disso, eles utilizam lógica *fuzzy* pois acreditam que o problema consiste em um sistema de controle que identifica a energia corrente e o tráfego atual e toma a decisão para mudar o tempo do ciclo.

Lógica *fuzzy* também é adotada em [Zhang et al. 2009a]. Neste trabalho, os autores adotam *fuzzy* para ajustar o momento em que a difusão de mensagens de escalonamento deve ocorrer. Quando muitas mensagens estão sendo perdidas em decorrência do desvio dos relógios ou pelo fato de os tempos do estado ativo e inativo terem sido mal escolhidos, é necessário encurtar a periodicidade de divulgação do escalonamento. Caso contrário, a periodicidade deve ser aumentada. Desta forma, através da lógica *fuzzy*, o overhead das mensagens de escalonamento é gerado na medida adequada.

4. MÉTRICAS VISADAS

Como já foi dito anteriormente, nos últimos anos, além da redução do consumo energético, outras métricas têm sido priorizadas pelos pesquisadores na elaboração dos protocolos, dentre elas vazão, atraso e aumento da razão de entrega de mensagens. Muitos trabalhos buscam melhorar estas métricas mas não as colocam como objetivos principais. Isto pode ser visto, com relação ao atraso, em [Wan et al. 2008, Mouzehkesh et al. 2010, Zhang et al. 2009a]. Muitos trabalhos colocam o atraso e/ou vazão como objetivos principais, no mesmo patamar ou acima da redução de gasto energético, objetivando garantir *Qualidade de Serviço* [Aslam et al. 2006, Yahya and Ben-Othman 2010, Zhao et al. 2009, Li and Mitchell 2008, Walker III et al. 2008, Wan et al. 2008, Yahya and Ben-Othman 2008].

Em [Yahya and Ben-Othman 2008] é apresentado o EQ-MAC, um protocolo que tem por objetivo prover Qualidade de Serviço através dos *Serviços Diferenciados*, ao passo que reduz energia. EQ-MAC é formada por dois componentes: *Classifier MAC* (C-MAC) e *Channel Access MAC* (CA-MAC).

C-MAC é responsável por fazer a classificação do tráfego para que o mesmo possa ser tratado de forma diferenciada. C-MAC requer que a camada de aplicação indique a prioridade do dado no cabeçalho do mesmo, para que cada pacote de dado seja encaminhado para uma fila diferente. Figura 5 ilustra o C-MAC e a estrutura do EQ-MAC como um todo.

O EQ-MAC consiste em um protocolo híbrido, utilizando o acesso aleatório para as mensagens de controle e o período escalonado para as mensagens de dado. Para o CA-MAC, existem dois tipos de nós: os nós comuns e os chefes (*heads*). O *head* é responsável pela função de coordenação. Cada quadro do CA-MAC é formado por duas partes: *mini slot* e *slot normal*. Os mini slots servem para transmitir mensagens de controle enquanto os slots normais transmitem dados. A comunicação ocorre em quatro fases, sendo estas necessárias para que os nós normais possam requisitar slots de dado, informando a prioridade das mensagens que os mesmos possuem, para que então o *head* possa alocar os slots de dado para estes nós, levando em consideração a prioridade das mensagens.

O trabalho de [Yahya and Ben-Othman 2010] consiste numa continuidade e melhora do trabalho em [Yahya and Ben-Othman 2008].

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os protocolos para MAC continuam sendo bastante pesquisadas em RSSF principalmente por serem a principal forma de interferir no consumo energético. Além disso, em decorrência da peculiaridade de cada aplicação, não existe uma camada padrão, fazendo com que objetivos diferentes sejam visados pelos pesquisadores.

Os protocolos têm optado por soluções híbridas, objetivando reunir o melhor das duas técnicas, ou melhor, utilizando cada uma no momento adequado ou para o elemento adequado (por exemplo, o tipo de tráfego).

Quando existe mais de um objetivo ao mesmo tempo, ou seja, uma solução de compromisso deve existir, técnicas como lógica *fuzzy* e Teoria dos Jogos têm sido adotados.

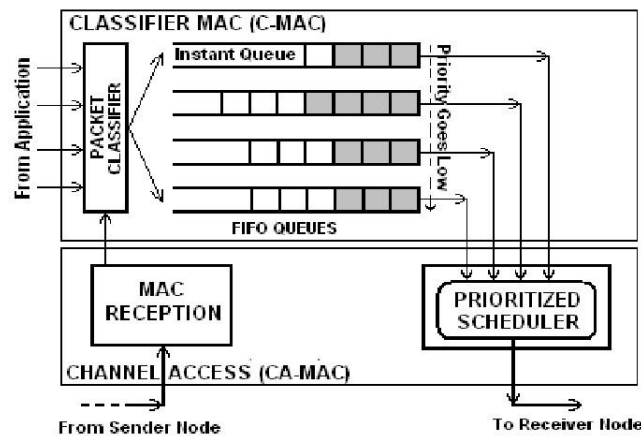


Figura 5. Estrutura do EQ-MAC [Yahya and Ben-Othman 2008]

Os protocolos também têm relevado adaptação ao tráfego, seja variando o *duty cycle*, seja variando o tempo do ciclo do quadro.

A adoção de mais de um canal de comunicação tem surgido, assim como *design cross-layer*. Outra característica interessante são os protocolos que assumem que é possível haver comunicação mesmo na presença de interferência.

O suporte à mobilidade não tem sido incorporado à grande maioria dos protocolos. Este suporte passa a ser necessário em redes WBAN.

Muitos trabalhos têm por fim a obtenção de Qualidade de Serviço (representado pela reunião das métricas de vazão e atraso). QoS deixa de ser objetivo secundário à medida que novas aplicações vão surgindo (multimídia, sistemas com restrições temporais).

Referências

aaaa.

Ansari, J., Ang, T., and Mahonen, P. (2010). Spectrum agile medium access control protocol for wireless sensor networks. In *SECON 2010 - 2010 7th Annual IEEE Communications Society Conference on Sensor, Mesh and Ad Hoc Communications and Networks*, Boston, MA, United states.

Aslam, N., Robertson, W., Sivakumar, S. C., and Phillips, W. (2006). Reservation based medium access control protocol for wireless sensor networks. In *2006 3rd IEEE Consumer Communications and Networking Conference, CCNC 2006*, volume 2, pages 969 – 973, Las Vegas, NV, United states.

Barbosa, P., White, N., and Harris, N. (2009). Medium access control in large scale clusters for wireless sensor networks. In *Proceedings - International Conference on Advanced Information Networking and Applications, AINA*, pages 771 – 777, Bradford, United kingdom.

Buettner, M., Yee, G. V., Anderson, E., and Han, R. (2006). X-mac: a short preamble mac protocol for duty-cycled wireless sensor networks. In *Proceedings of the 4th international conference on Embedded networked sensor systems, SenSys '06*, pages 307–320, New York, NY, USA. ACM.

- Chalhoub, G., Guitton, A., Jacquet, F., Freitas, A., and Misson, M. (2008). Medium access control for a tree-based wireless sensor network: Synchronization management. In *2008 1st IFIP Wireless Days, WD 2008*, Dubai, United arab emirates.
- Chin, K.-W. (2009). Pairwise: A time hopping medium access control protocol for wireless sensor networks. *IEEE Transactions on Consumer Electronics*, 55(4):1898 – 1906.
- Chowdhury, K. R., Nandiraju, N., Chanda, P., Agrawal, D. P., and Zeng, Q.-A. (2009). Channel allocation and medium access control for wireless sensor networks. *Ad Hoc Networks*, 7(2):307 – 321.
- Decker, E. B., Rajendran, V., Obraczka, K., and Garcia-Luna-Aceves, J. (2008). The multi-channel flow-aware medium access control protocol for wireless sensor networks. In *IEEE International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications, PIMRC*, Poznan, Poland.
- El-Hoiydi, A. and Decotignie, J. D. (2004). WiseMAC: an ultra low power MAC protocol for the downlink of infrastructure wireless sensor networks. In *Proceedings of the International Workshop on Algorithmic Aspects of Wireless Sensor Networks (Algosensors)*, volume 1, pages 244–251.
- Huang, P., Wang, C., Xiao, L., and Chen, H. (2010). Rc-mac: A receiver-centric medium access control protocol for wireless sensor networks. In *IEEE International Workshop on Quality of Service, IWQoS*, Beijing, China.
- IEEE (2006). IEEE std 802.15.4 2006 - part 15.4: Wireless medium access control (MAC) and physical layer (phy) specifications for low-rate wireless personal area networks (WPANs).
- Karl, H. and Willig, A. (2005). *Protocols and Architectures for Wireless Sensor Networks*. John Wiley & Sons.
- Kredo, II, K. and Mohapatra, P. (2007). Medium access control in wireless sensor networks. *Comput. Netw.*, 51(4):961–994.
- Kwong, K.-H., Wu, T.-T., Mchic, C., and Andonovic, I. (2008). A self-organizing multi-channel medium access control (smmac) protocol for wireless sensor networks. In *Proceedings of the Second International Conference on Communications and Networking in China, ChinaCom 2007*, pages 845 – 849, Shanghai, China.
- Lai, K. R., Sahoo, P. K., Chang, C.-Y., and Chen, C.-C. (2010). Reduced idle listening based medium access control protocol for wireless sensor networks. In *2010 WRI International Conference on Communications and Mobile Computing, CMC 2010*, volume 3, pages 329 – 333, Shenzhen, China.
- Le, H. and Takizawa, M. (2010). A hybrid technique for efficient medium access control in wireless sensor networks. In *Proceedings - International Conference on Advanced Information Networking and Applications, AINA*, pages 880 – 887, Perth, WA, Australia.
- Li, H. and Mitchell, P. D. (2008). Reservation packet medium access control for wireless sensor networks. In *IEEE International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications, PIMRC*, Poznan, Poland.

- Merhi, Z., Elgamel, M., and Bayoumi, M. (2009). Eb-mac: An event based medium access control for wireless sensor networks. In *7th Annual IEEE International Conference on Pervasive Computing and Communications, PerCom 2009*, Galveston, TX, United states.
- Misra, S. and Mohanta, D. (2010). Adaptive listen for energy-efficient medium access control in wireless sensor networks. In *Multimedia Tools and Applications*, volume 47, pages 121 – 145, Van Godewijckstraat 30, Dordrecht, 3311 GZ, Netherlands.
- Mitchell, P. D., Qiu, J., Li, H., and Grace, D. (2010). Use of aerial platforms for energy efficient medium access control in wireless sensor networks. *Computer Communications*, 33(4):500 – 512.
- Mouzehkesh, N., Noordin, N. K., and Rasid, M. F. A. (2010). Proactive traffic adaptive tuning of contention window for wireless sensor network medium access control protocol. *International Review on Computers and Software*, 5(1):6 – 13.
- Nabi, M., Blagojevic, M., Geilen, M., Basten, T., and Hendriks, T. (2010). Mcmac: An optimized medium access control protocol for mobile clusters in wireless sensor networks. In *SECON 2010 - 2010 7th Annual IEEE Communications Society Conference on Sensor, Mesh and Ad Hoc Communications and Networks*, Boston, MA, United states.
- Nguyen, C. K. and Kumar, A. (2006). Medium access control with adjustable sleeps for wireless sensor networks. In *Proceedings - International Symposium on Computers and Communications*, pages 270 – 275, Cagliari, Sardinia, Italy.
- Polastre, J., Hill, J., and Culler, D. (2004). Versatile low power media access for wireless sensor networks. In *Proceedings of the 2nd international conference on Embedded networked sensor systems*, SenSys '04, pages 95–107, New York, NY, USA. ACM.
- Rajendran, V., Obraczka, K., and Garcia-Luna-Aceves, J. J. (2003). Energy-efficient collision-free medium access control for wireless sensor networks. In *Proceedings of the 1st international conference on Embedded networked sensor systems*, SenSys '03, pages 181–192, New York, NY, USA. ACM.
- Reason, J. M. and Rabaey, J. M. (2004). A study of energy consumption and reliability in a multi-hop sensor network. *SIGMOBILE Mob. Comput. Commun. Rev.*, 8:84–97.
- Rousselot, J., El-Hoiydi, A., and Decotignie, J.-D. (2008). Low power medium access control protocols for wireless sensor networks. In *EW2008 - 14th European Wireless Conference 2008, Electronic Proceedings*, Prague, Czech republic.
- Santi, P. (2005). Topology control in wireless ad hoc and sensor networks. *ACM Comput. Surv.*, 37(2):164–194.
- Sha, M., Xing, G., Zhou, G., Liu, S., and Wang, X. (2009). C-mac: Model-driven concurrent medium access control for wireless sensor networks. In *Proceedings - IEEE INFOCOM*, pages 1845 – 1853, Rio de Janeiro, Brazil.
- van Dam, T. and Langendoen, K. (2003). An adaptive energy-efficient mac protocol for wireless sensor networks. In *Proceedings of the 1st international conference on Embedded networked sensor systems*, SenSys '03, pages 171–180, New York, NY, USA. ACM.
- Walker III, T. O., Tummala, M., and McEachen, J. (2008). Distributed medium access control with flow-based priority for cooperative multi-hop wireless sensor networks. In

Proceedings of the Annual Hawaii International Conference on System Sciences, Big Island, HI, United states.

Wan, Z., Zhang, J., Zhu, H., Makki, K., and Pissinou, N. (2008). On energy-efficient and low-latency medium access control in wireless sensor networks. In *IEEE Wireless Communications and Networking Conference, WCNC*, pages 1905 – 1910, Las Vegas, NV, United states.

Wei, Y., Heidemann, J., and Estrin, D. (2002). An energy-efficient mac protocol for wireless sensor networks. *INFOCOM 2002. Twenty-First Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Societies. Proceedings. IEEE*, 3:1567–1576.

Wu, T.-T., Kwong, K.-H., Michie, C., and Andonovic, I. (2008). Self-organize multi-channel random selection medium access control protocol for wireless sensor networks. In *2008 5th IEEE Consumer Communications and Networking Conference, CCNC 2008*, pages 569 – 570, Las Vegas, NV, United states.

Yadav, R., Varma, S., and Malaviya, N. (2008). Optimized medium access control for wireless sensor network. *IJCSNS International Journal of Computer Science and Network Security*, 8:334–338.

Yahya, B. and Ben-Othman, J. (2008). An energy efficient hybrid medium access control scheme for wireless sensor networks with quality of service guarantees. In *GLOBECOM - IEEE Global Telecommunications Conference*, pages 123 – 127, New Orleans, LA, United states.

Yahya, B. and Ben-Othman, J. (2010). Energy efficient and qos aware medium access control for wireless sensor networks. *Concurrency Computation Practice and Experience*, 22(10):1252 – 1266.

Zhang, B., Wang, X., Li, S., and Dong, L. (2009a). An adaptive energy-efficient medium access control protocol for wireless sensor networks. In *MSN 2009 - 5th International Conference on Mobile Ad-hoc and Sensor Networks*, pages 124 – 129, Fujian Province, China.

Zhang, X., Ansari, J., and Mahonen, P. (2009b). Traffic aware medium access control protocol for wireless sensor networks. In *MobiWac'09 - Proceedings of the 7th ACM International Symposium on Mobility Management and Wireless Access*, pages 140 – 148, Tenerife, Canary Islands, Spain.

Zhao, L., Guo, L., Zhang, J., and Zhang, H. (2009). Game-theoretic medium access control protocol for wireless sensor networks. *IET Communications*, 3(8):1274 – 1283.