

## 一种基于路由信息能量有效的无线传感器网 MAC 协议

刘阿娜 李琳 于宏毅 李宏  
(解放军信息工程大学信息工程学院 郑州 450002)

**摘要:** 传感器节点沿树状多跳路径逐级向 Sink 转发数据是无线传感器网络的主要业务模式之一。针对此类业务, 该文的 EBRI-MAC(Energy-efficient MAC protocol Based on Routing Information)协议提出一种对应树状路由转发关系, 由父节点与子节点构成虚拟群的思想; 并设计了连锁邀请与 CSMA/CA 结合的信道接入机制以及基于虚拟群同步的周期休眠机制, 以达到节能的目的。结合节点能耗因素, 定义了能量有效性的性能参数, 并对 EBRI-MAC 的能量有效性进行理论分析。通过 ns-2 仿真结果表明网络业务时间相关性较强时, EBRI-MAC 的能量有效性优于 IEEE802.11DCF 和 S-MAC。

**关键词:** 无线传感器网络; MAC 协议; 能量有效性; 虚拟群

**中图分类号:** TP393.04

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1009-5896(2008)01-0029-04

## An Energy-Efficient MAC Protocol Based on Routing Information for Wireless Sensor Networks

Liu A-na Li Lin Yu Hong-yi Li Hong

(Information Engineering Institute of PLA Information Engineering University, Zhengzhou 450002, China)

**Abstract:** In wireless sensor networks, one of the most significant traffic pattern is data gathering from sensor nodes to sink through multi-hop data-delivery tree. For such pattern, this paper presents EBRI-MAC(Energy-efficient MAC protocol Based on Routing Information), in which the idea of a parent node and its child nodes forming a virtual cluster based on the data-delivery tree is introduced, and a medium access mechanism of a chain-invitation combined CSMA/CA and a period sleep mechanism of synchronization within each virtual cluster are designed in order to save energy. Considering the major sources of energy waste, a performance parameter is defined to evaluate energy-efficient, and theoretical analysis is performed. With ns-2 simulation results, it is verified that EBRI-MAC can win better energy-efficient performance than IEEE802.11 DCF and S-MAC under the traffic pattern of each node being time-correlated.

**Key words:** Wireless sensor networks; Medium Access Control (MAC) protocols; Energy-efficient; Virtual cluster

### 1 引言

能量有效性是当前无线传感器网络 MAC 协议研究的首要问题。能量浪费的主要因素包括空闲监听(idle listening)、碰撞(collision)、侦听(overhearing)和控制开销(control overhead)<sup>[1]</sup>, 现有 MAC 协议的节能策略也基于这四方面。无线传感器网络中, 低业务负载导致节点大部分时间空闲监听浪费能量, 节点交替休眠/激活的周期休眠机制是减少空闲监听能耗的有效策略<sup>[1,2]</sup>。基于 CSMA 竞争式 MAC 协议中, 随机接入性使节点休眠/激活的时间成为关键难题; 而基于 TDMA 预分配的 MAC 协议<sup>[3,4]</sup>虽然具有无碰撞的优势, 预先的时隙安排也便于节点控制激活/休眠切换, 但有效的时隙分配策略却是分布式多跳网络本身的难题。对于一跳群结构的网络, 基于群的局部中心控制方式<sup>[5]</sup>能量有效性较高,

但群结构的建立和维护本身需要额外开销, 且各群的无线资源管理独立, 必然存在群间干扰和群间通信问题。本文的 EBRI-MAC(Energy-efficient MAC protocol Based on Routing Information)引入虚拟群结构, 提出了基于虚拟群集中控制的信道接入和休眠管理机制, 完全避免了上述问题, 有效提高协议的能量有效性。

### 2 EBRI-MAC 协议的主要思想

传感器节点沿树状多跳路径逐级向 Sink 传输数据是无线传感器网络的典型业务模式之一<sup>[6]</sup>, 其特点如下: (1) Sink 是数据传输的唯一目的, 不同源节点到 Sink 的多跳路径构成 Sink 为根的树状结构。(2)单向数据流以多对一的汇聚模式逐级由子节点向父节点转发。(3)只有父子关系的相邻节点存在业务转发。(4)邻近节点的业务时间相关性较强, 且不同源节点逐级向上游交叉点汇聚数据流, 导致局部范围的业务密度增大, 引发较大概率的冲突。

根据上述分析, 子节点与父节点间的数据转发类似传统

2006-06-29 收到, 2007-04-17 改回  
CNGI 示范工程(CNGI-04-10-1D)和河南省自然科学基金  
(0511010700)资助课题

分群协议中成员与群首间的业务模式,本文由此提出一种对应树状路由由转发关系,父节点与子节点组成的虚拟群结构(如图1所示)。从多跳转发的角度看,多个虚拟群依次链接成虚拟群链,一个虚拟群内数据由子节点向父节点转发,在另一个虚拟群内父节点再向祖父节点转发,直至 Sink,避免了群间通信。每个虚拟群内由父节点集中控制:(1)父节点周期广播休眠信息建立与子节点间的休眠/激活同步,保证相邻节点业务转发需求的同时避免分布式休眠同步的开销<sup>[1]</sup>。(2)父节点主动竞争信道,结合 CSMA/CA 机制连锁式依次邀请各个子节点转发,将所有相邻节点的竞争转化为相邻虚拟群的竞争,缓解局部竞争密度。

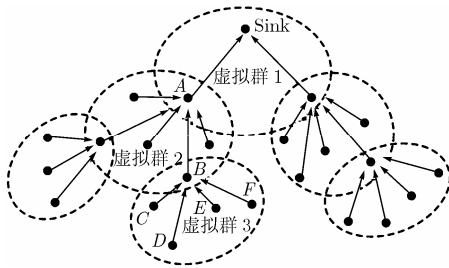


图1 基于多跳转发路径的虚拟群结构

### 3 EBRI-MAC 协议描述

当树状路由的多跳路径建立和更新时,我们认为 MAC 层能以某种方式获知上下游父子节点的拓扑信息。下面将对 EBRI-MAC 进行详细描述。

#### 3.1 虚拟群信息的管理与维护

**定义** 树状多跳路径上,父节点与其子节点构成虚拟群。对于某节点,与父节点构成的虚拟群为上游群,与子节点构成的虚拟群为本群;该节点是上游群的成员,本群的群首。

根据上下游信息,节点维护上游群信息列表(表1)和本群信息列表(表2),分别用于上游群和本群的信道接入及休眠同步管理。上游群信息列表中,Parent\_ID 项为父节点 ID, Sleep\_schedule 项记录收到的父节点休眠信息。本群信息列表中,Child\_ID 项为子节点 ID, Buf\_num 项为子节点缓存待发数据分组的个数; Seq\_NO. 项为当前激活周期邀请子节点接入的次序号, Re\_times 项为握手失败时重新邀请子节点的次数。

表1 上游群信息列表

Parent_ID	Sleep_schedule
-----------	----------------

表2 本群信息列表

Child_ID	Buf_num	Seq_NO.	Re_times
----------	---------	---------	----------

#### 3.2 基于虚拟群同步的周期休眠机制

虚拟群内的节点同时激活,子节点等待父节点邀请进行

数据转发;然后进入休眠直到下一个激活期开始。引起的隐藏终等待邀请的过程中,若先侦听到父节点对其它子节点的邀请,则根据规定的分组长度进入定时休眠,当被邀请子节点发送结束时再次激活。

由父节点建立与子节点间的休眠/激活同步(如图2(b)所示):节点侦听信道,若本群信息列表的 Child\_ID 非空,则根据网络承载业务和时延要求设定激活/休眠占比并随机选择休眠开始时间并进行广播;其它节点收到后,判断源地址是否为父节点 ID,若是,则在上游群信息列表的 Sleep\_schedule 项记录此信息,并与父节点同步;否则丢弃。在此过程中,父节点周期广播休眠信息,一方面继续同步尚未成功接收休眠信息的节点和新加入节点,另一方面校正时钟漂移。当上游转发路径变更时,节点将上游群信息列表的 Parent\_ID 项更新为新的父节点 ID,并置空 Sleep\_schedule 项,保持侦听以等待新父节点的休眠信息。

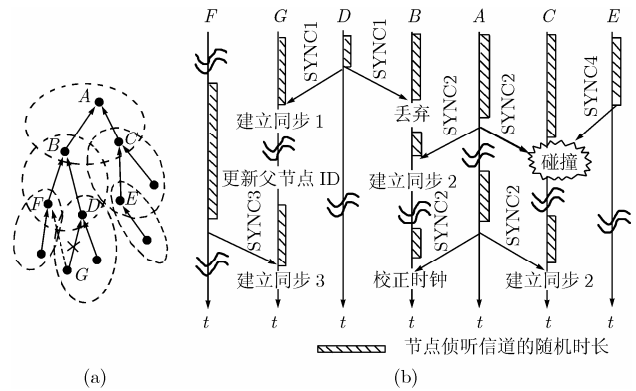


图2 休眠同步的建立

#### 3.3 连锁式邀请机制

激活期,父子节点以 ITS (Invite-To-Send)-DATA-ACK 的握手机制传输数据。如图3所示,父节点按照本群信息列表的 Seq\_NO. 次序先发送 ITS 分组邀请第1个子节点 C,在数据接收结束时,回应嵌入后续邀请子节点 ID 的 ACK [C,D],以确认 C 发送成功并对下一个子节点 D 发起邀请。后续邀请子节点 D 收到嵌有自己 ID 的 ACK 分组就直接开始发送数据,不用等待专门的邀请分组 ITS。依此类推,每次数据收发的成功结束就会触发新的邀请开始,像连锁式反应,直到父节点向最后一个子节点 F 回应后续邀请节点 ID 为零的 ACK [F,0],表示确认 F 发送成功以及本次邀请周期结束。若父节点邀请某一子节点后在规定的时间内没收到的数据分组,就重新发送 ITS 再次邀请并将与其对应的 Re\_times 加一,当 Re\_times 超出规定的重发次数时仍没成功,父节点就放弃当前激活期对该子节点的邀请,将 Re\_times 项重新置零,开始邀请下一个子节点。

作为接收方,父节点根据业务量适时邀请发送是协议有效性的保证<sup>[7]</sup>,这对能量有限的传感器网尤为重要。业务密

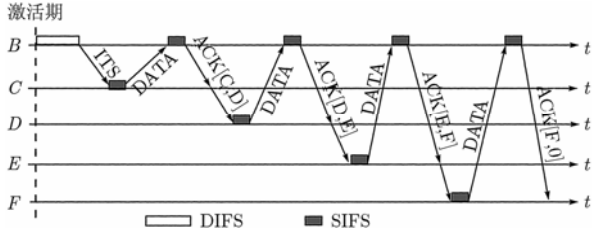


图 3 虚拟群内的连锁式邀请机

度、节点缓存空间、系统时延要求、子节点数据分组携带的待发业务量信息以及父节点本群信息列表的 Buf\_num 项等都可作为估计邀请时机的基本依据。

### 3.4 冲突避免机制

EBRI-MAC 的连锁式邀请机制结合竞争方式常用的冲突避免机制<sup>[1,2]</sup>, 如发送之前先载波侦听, ITS 分组避免隐藏终端问题以及 ACK 分组确认等策略。此外, 与其它采用休眠机制的 MAC 协议<sup>[1]</sup>一样, EBRI-MAC 也存在由休眠机制终端问题。如图 4(b), 对不同休眠时间的两个相邻虚拟群, 休眠的节点 A 没有收到 B 的 ITS 分组。当 A 激活时不知道 B 正在接收数据, 认为信道空闲, 开始发送 ITS 分组, 引起 B 处的碰撞。EBRI-MAC 通过设置较长的 DIFS (Distributed Inter Frame Space)避免这个问题, 如图 4(c)所示, 若发送 ITS 前等待的 DIFS 间隔大于 DATA 分组的传输时间与两倍的 SIFS(Short Inter Frame Space)间隔之和, 使刚激活的节点 A 在发送前保持足够静默时间, 以避免与 B 的 DATA 分组接收发生碰撞。这种避免隐藏终端的方式用于传感器网络负载小、低时延要求的前提下; 否则, 需要折衷考虑时延和吞吐的代价。

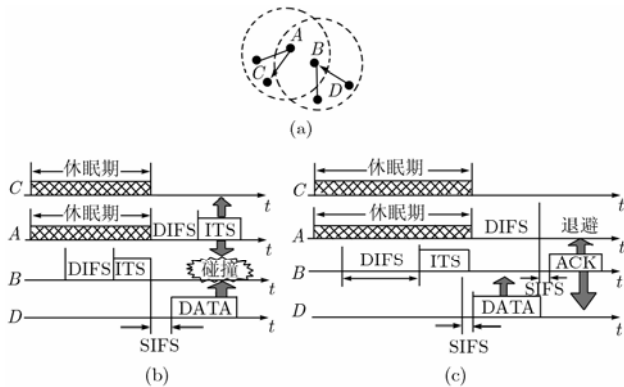


图 4 休眠机制造成的隐藏终端问题及避免策略

## 4 EBRI-MAC 协议性能

### 4.1 性能分析

本文用能量有效性度量 EBRI-MAC 的性能。定义能量有效性的性能参数  $\eta_E$  为成功收发数据分组的平均能耗  $\bar{E}_{data}$  与数据分组传输过程的平均总能耗  $\bar{E}_{tot}$  之比, 若  $\bar{E}_{succ}$  和

$\bar{E}_{fail}$  分别表示数据传输成功时和数据传输失败时收发节点消耗的平均总能耗, 则

$$\eta_E = \frac{\bar{E}_{data}}{\bar{E}_{tot}} = \frac{\bar{E}_{data}}{\bar{E}_{succ} + \bar{E}_{fail}} \quad (1)$$

为简化分析过程, 本文用类似文献[8]的理论分析方法。图 5 为性能分析场景, 假设(1)节点均匀分布; (2)每个节点为泊松业务源, 业务到达率为  $\lambda$ ; (3)节点的无线覆盖范围为  $R$ ; (4) ITS, DATA 和 ACK 的传输时间分别为  $t_{ITS}$ ,  $t_{DATA}$  和  $t_{ACK}$ , 且都以信道速率归一化; (5)传播时延及处理时延忽略不计。

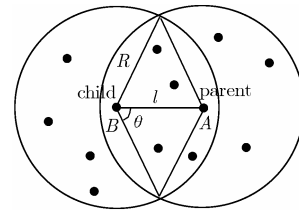


图 5 性能分析场景

节点 A 邀请子节点 B 发送分组的过程中: 若易损区间  $2t_{ITS}$  内 B 的所有相邻竞争节点中 A 唯一发送, B 能够成功接收 A 的 ITS 分组; 若易损区间 SIFS 内, 与 B 相邻且为 A 的隐藏终端的竞争节点发送分组, 导致 B 退避。ITS 和 DATA 分组成功收发后, 收发节点已经成功占用信道, ACK 成功发送的概率为 1。用  $C_n$  表示 B 相邻的竞争节点集合,  $C_h$  表示与 B 相邻且是 A 的隐藏终端的竞争节点集合, 数据分组成功传输的概率为

$$p_s = e^{-\lambda[2t_{ITS}|C_n| + SIFS|C_h|]} \quad (2)$$

用无向图  $G(N, L)$  表示具有对称无线信道的传感器网,  $N$  为网络中所有节点的集合,  $L$  为网络中一跳范围内任何两个节点组成的链路集合。若节点 B 的一跳相邻节点集合为  $\Omega_{node}(B) = \{X | X \in N, \text{and}(B, X) \in L\}$ , 则 B 的一跳相邻群首集合可以表示为  $\Omega_{head}(B) = \{X | X \in \Omega_{node}(B), \text{and } X \text{ have child nodes}\}$ 。若节点 B 的隐藏终端节点集合表示为  $H_{node}(B) = \{Y | Y \notin \Omega_{node}(B), X \in \Omega_{node}(B), \text{and } Y \in \Omega_{node}(X)\}$ , 则 B 的隐藏终端群首集合为  $H_{head}(B) = \{Y | Y \in H_{node}(B), \text{and } Y \text{ have child nodes}\}$ 。EBRI-MAC 中只有群首主动竞争信道, 分组传输过程中的竞争节点应该是群首, 即  $|C_n| = |\Omega_{head}|$ ,  $|C_h| = |H_{head}|$ 。由图 5 的收发范围, 得  $|\Omega_{head}| = \pi R^2 \cdot \rho_{parent} - 1$  和  $|H_{head}| = R(\pi R + l \cdot \sin \theta - 2R\theta) \cdot \rho_{parent}$ , 其中  $\rho_{parent}$  是父节点的平均分布密度, 跟网络拓扑、根节点位置及树状路由的建立算法有关。本文采用广度优先生成树的父节点平均分布密度  $\rho'$ ,  $l \in (0, R)$  为 A 和 B 的距离, 则

$$p_s(l) = e^{-\lambda\{2t_{ITS}(\pi R^2 \rho' - 1) + SIFS[R(\pi R + l \sin \theta - 2R\theta)\rho']\}} \quad (3)$$

本文只限于分析收发节点的能耗, 并未考虑其它相邻节

点的侦听能耗;认为 EBRI-MAC 的周期休眠机制避免了大部分空闲监听,对收发节点的空闲监听能耗也忽略不计。

$E_{ITS}$ ,  $E_{DATA}$  和  $E_{ACK}$  分别表示收发 ITS 分组, DATA 分组及 ACK 分组的能耗,可得到

$$\bar{E}_{data} = E_{DATA}p_s(l) \quad (4)$$

$$\bar{E}_{succ} = (E_{ITS} + E_{DATA} + E_{ACK})p_s(l) \quad (5)$$

$$\begin{aligned} \bar{E}_{fail} = & E_{ITS} \left( 1 - e^{-\lambda^2 t_{ITS} |l_{head}|} \right) \\ & + E_{ITS} e^{-\lambda^2 t_{ITS} |l_{head}|} \left( 1 - e^{-\lambda SIFS |H_{head}|} \right) \end{aligned} \quad (6)$$

综合前面等式可得  $\eta_E(l)$ 。根据本文假设条件近似认为子节点均匀分布,因此,能量有效性的平均值为

$$\bar{\eta}_E = \frac{2}{R^2} \int_0^R l \eta_E(l) dl \quad (7)$$

#### 4.2 仿真结果

通过 ns-2 仿真 EBRI-MAC, IEEE802.11DCF 和 S-MAC 的能量有效性。用均匀分布在(800m×500m)区域的 20 个静止节点模拟;仿真时间为 1200s;任一节点为 Sink,其它节点产生目的地址为 Sink 的 CBR 业务,分组大小 80(byte);控制分组大小 10(byte);采用 AODV 路由,以 tcl 脚本设置路由信息的方式控制虚拟群;能耗计算采用 EYEs 的能耗模型<sup>[4]</sup>,忽略其他组成部分能耗。通过改变业务到达间隔,分析协议在不同业务密度下的能量有效性。

图 6 为 EBRI-MAC 能量有效性理论分析和 ns-2 仿真结果的比较。理论分析的曲线略优于仿真结果曲线,原因在于:理论分析考虑的是两跳拓扑,相当于假设多跳网络中两跳区域内的数据传输不受此区域之外节点的干扰,使计算的碰撞概率低于多跳网络的真实情况。另外,理论分析只计算了碰撞和控制开销的能耗,当碰撞概率随着业务密度的减小而降低到趋于一定值时,能量有效性则随之增大而趋于平稳;仿真结果统计了空闲监听能耗,由于采用固定的激活/休眠占空比,当业务密度较大时,周期休眠机制有效避免了空闲监听,理论分析和仿真结果相近;随着业务密度变小,更多的空闲监听无法避免,加大了两者的差距。

图 7 为不同业务密度下,3 种 MAC 协议能量有效性的仿真结果。业务密度较大时,3 种协议的性能差别很小,因为节点空闲监听较少,EBRI-MAC 和 S-MAC 避免空闲监听能耗的优势不明显。随着业务密度减小,节点空闲监听增加,使 802.11 的性能急剧下降;而 EBRI-MAC 和 SMAC 的周期休眠机制减少了空闲监听,使其性能比较平稳。另外,业务密度逐渐降低的过程中,周期休眠机制先是有效避免了空闲监听,且碰撞概率也在逐渐降低,EBRI-MAC 和 S-MAC 的性能趋于上升;当业务密度低于某值继续下降时,碰撞概率趋于稳定,并且节点空闲监听越来越多,导致 EBRI-MAC 和 S-MAC 的性能下降。此外,基于虚拟群中心控制的信道接入和休眠管理方式使 EBRI-MAC 的性能始终优于 S-MAC。

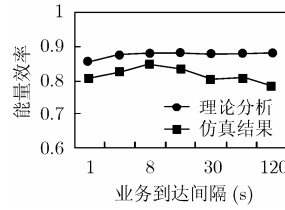


图 6 能量有效性理论分析与仿真结果对比

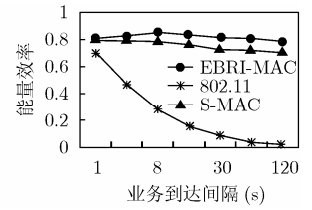


图 7 能量有效性仿真结果对比

#### 5 结束语

EBRI-MAC 基于对应树状路由转发关系的虚拟群结构,提出局部中心控制的连锁式邀请接入和虚拟群同步的周期休眠机制,获得较好的能量有效性。此外,本文提到父节点对邀请时机的估计是影响 EBRI-MAC 性能的关键问题之一,但具体的算法和性能还有待研究。

#### 参考文献

- [1] Ye Wei, Heidemann John, and Estrin Deborah. An energy-efficient MAC protocol for wireless sensor networks. IEEE INFOCOM 2002, New York, June 2002: 1567-1576.
- [2] Dam T van and Langendoen K. An adaptive energy-efficient MAC protocol for wireless sensor networks. 1st ACM Conf. on Embedded Networked Sensor Systems (SenSys 2003), Los Angeles, California, Nov. 2003: 171-180.
- [3] Sohrabi K, Gao J, Ailawadhi V, and Pottie G J. Protocols for self-organization of a wireless sensor network. *IEEE Personal Communications*, 2000, 7(5): 16-27.
- [4] Hoese L van, Nieberg T, Kip H, and Havinga P. Advantages of a TDMA based energy efficient self-organizing MAC protocol for WSNs. IEEE VTC'04-spring, Milan, Italy, May 2004: 1598-1602.
- [5] Li J and Lazarou G. A bit-map-assisted energy-efficient MAC scheme for wireless sensor networks. The 3rd Int. Symp. on Information Processing in Sensor Networks (IPSN04), New York, Apr. 2004: 55-60.
- [6] Krishnamachari B, Estrin D, and Wicker S. The impact of data aggregation in wireless sensor networks. The 22nd International Conference on Distributed Computing Systems Workshops, Vienna, Austria, July 2002: 575-578.
- [7] Talucci F, Gerla M, and Fratta L. MACA-BI (MACA By Invitation) A Receiver Oriented Access Protocol for Wireless Multihop Networks. PIMRC'97, Helsinki, Finland, Sept.1997: 435-439.
- [8] Haas Z J and Deng J. Dual Busy Tone Multiple Access (DBTMA)-Performance Evaluation. IEEE VTC'99-spring, Houston, Texas, May 1999: 17-21.

刘阿娜: 女, 1976 年生, 博士生, 研究方向为无线传感器网、无线自组网等。

李琳: 女, 1980 年生, 硕士生, 研究方向为无线传感器能量有效的 MAC 协议研究。

于宏毅: 男, 1963 年生, 教授, 博士生导师, 主要从事信号处理、第三代移动通信技术、无线自组网以及无线传感器网等方面的研究。

李宏: 女, 1970 年生, 博士生, 研究方向为无线传感器网络、无线自组网等。