

文章编号: 1001-0920(2012)05-0731-05

用于传感网功率控制的并行传输 MAC 协议

赵学健, 庄毅

(南京航空航天大学 计算机科学与技术学院, 南京 210016)

摘要: 针对无线传感网(WSNs)中节点间不对称的发射功率引起的隐藏节点和暴露节点问题, 提出一种用于传感网功率控制的MAC协议(MAC4PC)。该协议采用邻节点向量表对邻节点的状态及当前会话的信息进行记录, 并设计了相关的控制帧收发时序和干扰度判断准则, 以保证新建立会话与当前会话互不干涉, 从而实现暴露节点的并行传输。仿真结果表明, 与802.11 DCF协议、SB-FSMA/CA协议以及GLPCB-PMAC协议相比较, MAC4PC协议提高了网络平均吞吐量, 降低了节点平均能耗和数据分组的平均传输时延。

关键词: 传感网; MAC协议; 功率控制; 并行传输; 暴露节点

中图分类号: TP393

文献标识码: A

Parallel transmission MAC protocol used for power control in wireless sensor networks

ZHAO Xue-jian, ZHUANG Yi

(College of Computer Science and Technology, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing, 210016, China. Correspondent: ZHAO Xue-jian, E-mail: zhaoxuejian@nuaa.edu.cn)

Abstract: Aiming at the hidden node and exposed node problem caused by asymmetry transmit power in wireless sensor networks(WSNs), an MAC protocol for power control(MAC4PC) is proposed, which adopts a neighbor vector to record the status of neighbor nodes and the information of current conservations. Furthermore, a time schedule of the control frames and an interference degree criterion are designed to ensure the feasibility of parallel transmission in this protocol. Simulation results show that, in comparison with 802.11 DCF, SB-FSMA/CA and GLPCB-PMAC, MAC4PC protocol not only improves the average network throughput, but also reduces the average energy consumption and the average delivery delay.

Key words: wireless sensor network; MAC protocol; power control; parallel transmission; exposed terminal

1 引言

无线传感网(WSNs)具有广阔的应用前景,它在环境监测、探险救灾、智能家居等领域具有重要的应用价值。近年来,在WSNs领域出现了众多的研究分支,包括功率控制、节点定位、路由协议和数据管理等^[1-2],其中功率控制技术作为WSNs面向实际应用的核心技术之一,对网络的能量效率、吞吐量、实时性等性能具有显著影响^[3]。因此,为降低网络能耗,增大网络容量,研究者提出了众多的功率控制策略^[4-8]。在具有理想MAC协议的假设前提下,这些协议取得了良好的理论和仿真效果。但是,现有的MAC协议并不能很好地解决功率控制策略中由隐藏节点和暴露节点带来的通信冲突严重、网络空间利用率低、吞吐

量下降等问题。对于隐藏节点问题,大多数无线网络MAC协议都使用类似IEEE 802.11 DCF^[9]所采用的预留机制进行处理。然而,暴露节点问题在802.11 DCF协议中并没有得到有效解决。为了解决暴露节点问题,研究者提出了不同的并行传输方案^[10-14],但仍存在以下遗留问题: 1) 仅适用于节点发送功率一致的场景; 2) 没有考虑多个会话的积累干扰问题; 3) 由于暴露节点的并行传输没有严格采用RTS/CTS预留机制,可能引起新的隐藏节点问题; 4) 无法解决多个ACK帧之间或者ACK帧与DATA帧的冲突; 5) 需要节点添加额外硬件; 6) 仅允许一次并行传输。因此,用于传感网功率控制的并行传输MAC协议设计是功率控制策略走向实用化亟待解决的问题之一。

收稿日期: 2010-10-29; 修回日期: 2010-12-20.

基金项目: 国家863计划项目(2008AA706103); 国家自然科学基金项目(61100213).

作者简介: 赵学健(1982-),男,博士生,从事无线传感器网络与分布式算法的研究; 庄毅(1957-),女,教授,博士生导师,从事信息安全、分布式算法和计算机网络等研究。

基于以上分析,并考虑到功率控制策略中的节点实际采用的发射功率通常远小于节点的最大发射功率,本文提出一种用于功率控制的并行传输 MAC 协议(MAC 4PC).该协议中节点间的数据通信保留了 802.11 DCF 协议的 RTS-CTS-DATA-ACK 的 4 次握手机制,并且在发送请求帧 RTS 和清除帧 CTS 时采用最大发射功率,以解决隐藏节点问题;其次,该协议对 RTS 帧和 CTS 帧格式进行了适当修改,使得节点在侦听到 RTS 帧和 CTS 帧时能够采用邻节点向量表(NV)对邻居节点的状态和当前存在的会话进行记录;此外,该协议设计了相关的控制帧收发时序和干扰度判断准则,用以保证暴露节点并行传输的可行性.该协议能够增加网络空间利用率,提高网络吞吐量,降低网络能耗和数据传输时延.

2 系统模型

定义 1 节点 a 最大发射功率 P_{\max} 覆盖范围内的节点称为节点 a 的邻节点,节点 a 邻节点组成的集合称为邻节点集,记为 N_a .

定义 2 节点 a 与节点 b 之间以 RTS-CTS-DATA-ACK 机制完成一次数据传输的过程称为一次会话.若节点 a 为发送节点,节点 b 为接收节点,则会话记为 $C(a, b)$;反之,记为 $C(b, a)$.

定义 3 如果会话 C_i 的存在使得会话 C_j 由于不能满足信噪比的要求而不能顺利进行时,则称会话 C_i 干涉了会话 C_j .

2.1 无线传播模型

无线传播模型采用对数距离路径损耗模型^[15],该模型可用以下公式描述:

$$P_r(a \rightarrow b) = \lambda \frac{P_t}{d^\alpha}, 1 \leq \alpha \leq 4. \quad (1)$$

式中: $P_r(a \rightarrow b)$ 为节点 b 接收节点 a 的信号强度; P_t 为节点 a 的发射功率; d 为节点 a 与节点 b 之间的欧式距离; α 为路径损耗指数,是与网络环境相关的常数; λ 为比例系数,与节点无线收发器的硬件特性及工作频段相关.

假设 1 网络中所有节点为同构节点,具有相同的最大发射功率 P_{\max} ,即所有节点具有相同的最大覆盖半径 R_{\max} .

假设 2 无线传播模型具有对称性,即 $P_r(a) = P_r(b)$.

2.2 节点接收模型

当传感器节点接收的信噪比(SINR)^[15]大于某个阈值时,节点才能正确接收信号.该阈值与无线收发器的硬件特性及数据传输速率相关.信噪比指节点接收到的有效信号强度与噪声强度的比值,当节点 a 接

收节点 b 发送的信号时,信噪比 γ 可表示为

$$\gamma(b \rightarrow a) = 10 \lg \frac{P_r(b \rightarrow a)}{\phi + N_0}. \quad (2)$$

式中: N_0 为环境噪声, ϕ 为网络中其他节点对节点 a 的积累干扰,即

$$\phi = \sum_{(x \in S) \wedge (x \neq b)} P_r(x \rightarrow a), \quad (3)$$

式中 S 为网络中所有当前发射信号节点的集合.需要注意,对于一次会话而言,发射信号的节点可以是发送节点也可以是接收节点.比如,当传输 RTS 帧时,发射信号的节点是发送节点,但当传输 CTS 帧时,发射信号的节点便是接收节点.

假设 3 功率控制策略下,考虑到节点实际采用的发射功率通常小于节点的最大发射功率,因此假设节点的侦听半径为 R_{\max} ,即网络中任意节点 u 受到的积累干扰仅考虑其邻居节点集 N_u 中当前发射节点产生的干扰, N_u 之外其他发射节点产生的干扰很小,视为环境噪声的一部分.因此,式(3)中 S 表示 N_b 中所有当前发射节点的集合.

3 MAC 4PC 协议

为了对邻节点的状态及当前会话的信息进行记录,MAC 4PC 协议为每个节点设置了邻节点向量表 NV 和变量 ϕ, ϕ' . NV 表包括 ID 字段、RSSI 字段、IS 字段和 IR 字段. ID 字段为邻节点 ID; RSSI 字段记录邻节点以发射功率 P_D 发射信号时,节点的接收信号强度 P_r ; IS 字段用于判断邻节点是否为发送节点; IR 字段用于判断邻节点是否为接收节点.变量 ϕ 表示节点当前受到发送节点的积累干扰;变量 ϕ' 表示节点当前受到接收节点的积累干扰.

在网络运行过程中,节点间的会话,包括暴露节点的并行传输都遵循 802.11 DCF 协议的 RTS-CTS-DATA-ACK 的 4 次握手机制.其中: RTS 和 CTS 帧的传输使用节点最大发射功率 P_{\max} ,以避免隐藏节点问题的出现; DATA 和 ACK 帧的传输使用功率控制策略所决定的发送功率 P_D ,以节省能耗,增大网络的容量. MAC 4PC 协议对 802.11 DCF 协议控制帧进行了适当修改,在 RTS 帧及 CTS 帧中添加了 dataPower 字段,以记录节点间会话发送 DATA 帧及 ACK 帧使用的发射功率 P_D .此外,该协议还引入了 FAL 帧和 CEL 帧, FAL 帧用于邻居节点向发起会话节点反馈并行条件不满足消息, CEL 帧为广播类型帧,用于发起会话节点撤销所发起会话.

由于在解决隐藏节点问题的过程中, RTS 和 CTS 帧的发送采用了最大发射功率 P_{\max} ,为避免 RTS 和 CTS 帧对 DATA 和 ACK 帧的传输产生干扰, MAC 4PC 协议设计了相应的控制帧收发时序,如图 1 所示.

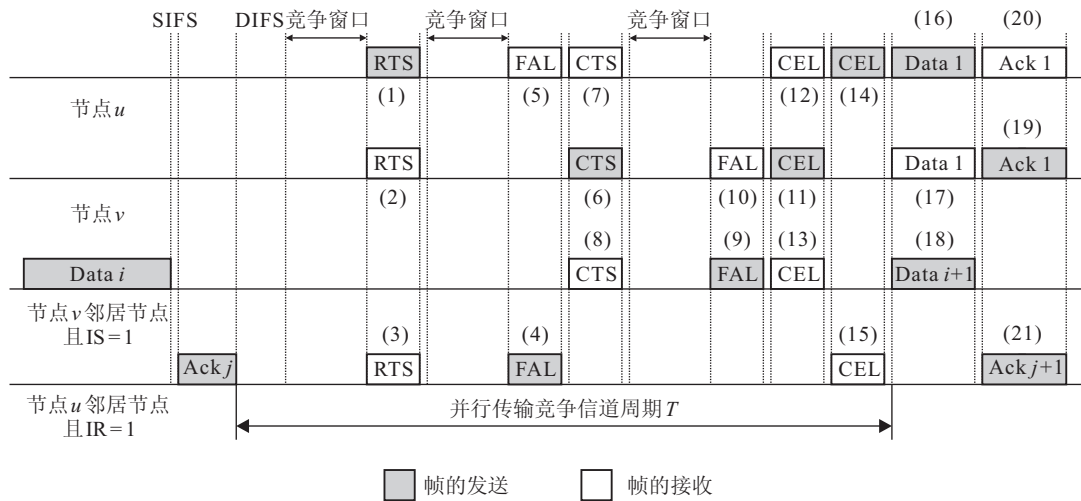


图1 MAC4PC协议MAC帧收/发时序

图1所示时序保留了802.11 DCF协议的SIFS和DIFS两种基本帧间间隔及退避机制, 借鉴了S-MAC协议^[16]的消息传递机制, 将1个长消息分割成若干个短消息后在预约时间内突发送, 2个相邻短消息之间预留了时间段 T , 使暴露节点能够完成信道的竞争, 从而进行并行传输. 该时序需要时间同步算法的支持, 现有的时间同步算法如TPSN (timing-sync protocol for sensor networks) 时间同步平均误差是 $16.9 \mu\text{s}$ ^[17], 小于 T_{DIFS} , 可满足精度要求.

在图1所示时序的基础上, 为使暴露节点能够进行并行传输, 即节点新建的会话与网络中当前会话保持互不干涉, 只需满足以下4个条件:

条件1 网络中当前会话DATA帧的传输不干涉所建立会话DATA帧的传输;

条件2 新发起会话DATA帧的传输不干涉网络中当前会话DATA帧的传输;

条件3 网络中当前会话ACK帧的传输不干涉所建立会话ACK帧的传输;

条件4 新发起会话ACK帧的传输不干涉网络中当前会话ACK帧的传输.

在MAC4PC协议中, 当网络中节点 u 请求建立会话 $C(u, v)$ 时, 节点 u 需首先确定节点 v 状态为空闲 (既不是发送节点也不是接收节点), 并根据

$$\gamma(v \rightarrow u) = 10 \lg \frac{P_r(v \rightarrow u)}{\sum_{(n_u \in N_u) \wedge (IR_{n_u}=1)} P_r(n_u \rightarrow u) + N_0} \geq \gamma_0 \quad (4)$$

判断并行传输的条件3是否满足. 若满足, 则进行物理载波侦听, 当侦听到信道空闲时发送RTS帧; 否则, 放弃发送.

节点 u 完成RTS帧发送后, 立即设置定时器 t . 在定时器 t 触发前, 如果节点 u 没有收到邻居节点返回

的FAL帧, 也没有收到目的节点 v 返回的CEL帧, 但收到了节点 v 返回的CTS帧, 则说明节点 u 与节点 v 之间的会话满足并行传输的条件, 接下来便可以发送DATA帧; 否则, 节点 u 广播CEL帧取消该次会话.

当节点 u 的邻居节点 $n_u (n_u \neq v)$ 收到RTS帧时, 首先设置定时器 t_R , 并扫描NV表. 如果NV表中没有节点 u , 则将节点 u 添加到NV表中. 在定时器 t_R 触发前, 如果没有收到CEL帧, 则节点 n_u 将标注节点 u 为发送节点, 更新NV表中相关字段及变量 ϕ , 并根据RTS帧中的duration字段为会话 $C(u, v)$ 设置定时器 t_C ; 当定时器触发时, 表明会话 $C(u, v)$ 完成, 需再次更新NV表中相关字段和变量 ϕ . 此外, 若节点 n_u 当前为接收节点, 即 $IR_{n_u} = 1$, 则在收到RTS帧后还需根据下式判断并行传输的条件2是否满足:

$$\gamma(\text{node} \rightarrow n_u) = 10 \lg \frac{P_r(\text{node} \rightarrow n_u)}{\phi_{n_u} + P_r(u \rightarrow n_u) + N_0} \geq \gamma_0, \quad (5)$$

其中node为节点 n_u 当前会话对应的发送节点. 若不满足, 则向节点 u 返回FAL帧.

当节点 v 收到RTS帧时, 节点 v 根据下式判断并行传输的条件1是否满足:

$$\gamma(u \rightarrow v) = 10 \lg \frac{P_r(u \rightarrow v)}{\sum_{(n_v \in N_v) \wedge (IS_{n_v}=1)} P_r(n_u \rightarrow v) + N_0} \geq \gamma_0. \quad (6)$$

当式(6)成立时, 表明条件1成立, 节点 v 向节点 u 返回CTS帧.

当节点 v 的邻居节点 $n_v (n_v \neq u)$ 收到CTS帧时, 首先设置定时器 t_C , 并扫描NV表. 如果NV表中没有节点 v , 则将节点 v 添加到NV表中. 在定时器 t_C 触发前, 如果没有收到CEL帧, 则节点 n_v 将标注节点 v 为接收节点, 更新NV表中相关字段及变量 ϕ' , 并根据CTS帧中的duration字段为会话 $C(u, v)$ 设置定时器

t_C ; 当定时器触发时, 表明会话 $C(u, v)$ 完成, 需再次更新 NV 表中相关字段和变量 ϕ . 此外, 若节点 n_v 当前为发送节点, 即 $IS_{n_v} = 1$, 则在收到 CTS 帧后还需根据下式判断并行传输的条件 4 是否满足:

$$\gamma(\text{node} \rightarrow n_v) = 10 \lg \frac{P_r(\text{node} \rightarrow n_v)}{\phi_{n_v} + P_r(v \rightarrow n_v) + N_0} \geq \gamma_0, \quad (7)$$

其中 node 为节点 n_v 当前会话对应的接收节点. 若不满足, 则向节点 v 返回 FAL 帧.

当节点 v 收到邻居节点的 FAL 消息时, 说明新发起会话 ACK 帧的传输将会干涉网络中当前会话 ACK 帧的传输, 节点 v 广播 CEL 帧, 从而拒绝建立会话的请求.

4 仿真结果与分析

为验证 MAC 4 PC 协议的性能, 本文用 OMNeT++ 仿真平台对网络平均吞吐量、节点平均能耗和平均传输时延 3 个性能指标进行分析, 并与 802.11 DCF, SB-FSMA/CA^[13] 以及 GLPCB-PMAC^[14] 协议进行比较.

本仿真实验设置 100 个节点, 随机撒播在 $8R \times 5R$ 的矩形区域, 数据模型均采用 CBR (constant bit rate) 模型, 时间同步采用 TPSN 算法, 功率控制策略采用 XTC 算法^[8], 网络层采用定向扩散路由协议, 设置汇聚节点位于矩形区域的中心位置, 其余仿真参数如表 1 所示.

表 1 仿真参数设置表

参数名	参数值
仿真时间/s	200
数据包产生间隔/ms	50
协议控制帧大小/bit	144
DATA 帧大小/byte	1024
信道比特率/kbps	115.2
$P_{\max}/(\text{dB}\cdot\text{m})$	15
R_{\max}/m	150
γ_0/dB	10
N_0/W	5×10^{-10}
aSlottime/ μs	20
CW_{\min}	31
CW_{\max}	127
$t_{\text{SIFS}}/\mu\text{s}$	10
$t_{\text{DIFS}}/\mu\text{s}$	50

4 种协议下网络平均吞吐量随 R 的变化情况如图 2 所示. 由图 2 可看出, 在节点密度相同的情况下, MAC 4 PC 协议具有最大的网络吞吐量. 当 R 为 100 m 时, MAC 4 PC 协议的网络吞吐量分别比 802.11 DCF, SB-FSMA/CA 以及 GLPCB-PMAC 协议提高了 72.5%, 31.42% 和 9.52%. 当 R 逐渐减小, 即网络节点密度逐渐增大时, 由于节点覆盖范围内存在的暴露节点逐渐增多, 4 种协议的网络吞吐量都逐渐减小. 当 R 由 150 m 减小到 50 m 时, 802.11 DCF, SB-FSMA/CA 和

GLPCB-PMAC 协议的网络吞吐量分别减小 67.8%, 43.51% 和 28.27%, 但 MAC 4 PC 协议的网络吞吐量仅减小 19.48%.

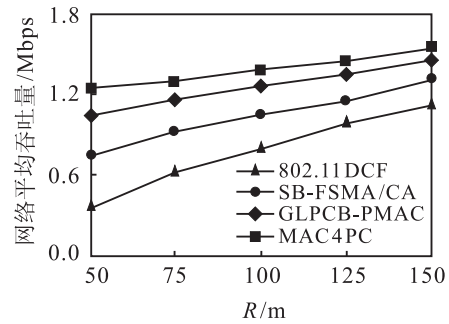


图 2 网络平均吞吐量随 R 变化曲线

图 3 描述了 4 种协议数据分组的平均传输时延随 R 的变化情况. 由图 3 可以看出, 在节点密度相同的情况下, MAC 4 PC 协议具有最小的平均传输时延. 当 R 为 100 m 时, MAC 4 PC 协议的平均传输时延分别比 802.11 DCF, SB-FSMA/CA 以及 GLPCB-PMAC 协议降低了 42.79%, 30.65% 和 19.27%. 当 R 逐渐减小, 即网络节点密度逐渐增大时, 由于信道竞争激烈, 信号冲突严重, 4 种协议数据分组的平均传输时延都逐渐增大. 当 R 由 150 m 减小到 50 m 时, 802.11 DCF, SB-FSMA/CA 和 GLPCB-PMAC 协议的平均传输时延分别增大 195.91%, 164.30% 和 159.51%, 但 MAC 4 PC 协议的平均传输时延仅增大 117.78%.

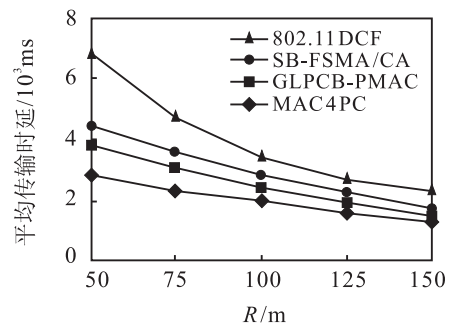
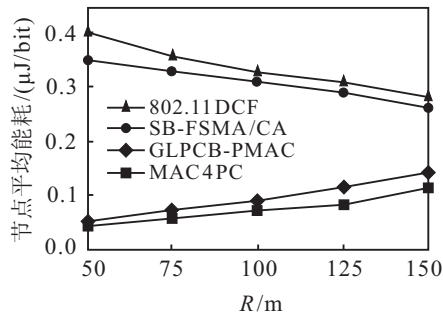


图 3 平均传输时延随 R 变化曲线

4 种协议下节点的平均能耗随 R 的变化趋势见图 4. 由图 4 可以看出: 当 R 逐渐减小, 即网络节点密度逐渐增大时, 802.11 DCF 协议和 SB-FSMA/CA 协议由于通信冲突严重, 大量数据重传导致节点平均能耗逐渐增大; GLPCB-PMAC 协议和 MAC 4 PC 协议下节点的平均能耗却呈现减小趋势, 即网络节点密度越大, 节能效果越明显, 充分体现了功率控制策略的节能效果. 当 $R = 150$ m 时, MAC 4 PC 协议下节点平均能耗约为 $0.116 \mu\text{J}/\text{bit}$, 分别比 802.11 DCF, SB-FSMA/CA 及 GLPCB-PMAC 协议降低了 58.86%, 55.72% 和 18.30%.

图4 节点平均能耗随 R 变化曲线

5 结 论

针对 WSNs 功率控制策略引起的隐藏节点和暴露节点问题, 本文提出了一种用于 WSNs 功率控制的并行传输 MAC 协议. 该协议为传感网中功率控制策略所需的理想 MAC 协议提供了初步的解决方案, 有利于功率控制策略的实用化, 具有一定的工程实用价值. 但是, 该协议的控制帧收发时序较复杂, 而且在节点发射功率接近最大发射功率时易引起信号冲突. 在进一步的研究工作中, 将尝试对控制帧收发时序进行简化, 并考虑如何解决由于节点发射功率较大而引起的信号冲突问题.

参考文献(References)

- [1] Jennifer Y, Biswanath M, Dipak G. Wireless sensor network survey[J]. *Computer Networks*, 2008, 52(12): 2292-2330.
- [2] Akyildiz I F, Su W, Sankarasubramanian Y, et al. A survey on sensor networks[J]. *IEEE Communications Magazine*, 2002, 40(8): 104-112.
- [3] Kawadia V, Kumar P R. Principles and protocols for power control in wireless ad hoc networks[J]. *IEEE J on Selected Areas in Communications*, 2005, 23(1): 76-88.
- [4] Ramanathan R, Rosales-Hain R. Topology control of multihop wireless networks using transmit power adjustment[C]. *Proc of 9th Joint Conf on IEEE Computer and Communications Societies(INFOCOM)*. Tel-Aviv, Israel, 2000: 404-413.
- [5] Li N, Hou J C. Topology control in heterogeneous wireless networks: Problems and solutions[C]. *Proc of the IEEE Conf on Computer Communications(INFOCOM)*. New York: IEEE Press, 2004: 232-243.
- [6] Li L, Halpern J Y, Bahl P, et al. Analysis of a cone-based distributed topology control algorithm for wireless multihop networks[C]. *Proc of ACM Symposium on Principles of Distributed Computing(PODC)*. Newport, 2001: 264-273.
- [7] Kubish M, Karl H, Wolisz A. Distributed algorithms for transmission power control in wireless sensor networks[C]. *Proc of the IEEE Wireless Communications and Networking Conf(WCNC)*. New York: IEEE Press, 2003: 16-20.
- [8] Wattenhofer R, Zollinger A. XTC: A practical topology control algorithm for ad-hoc networks[C]. *Proc of the Int'l Parallel and Distributed Processing Symp(IPDPS)*. New Mexico: IEEE Press, 2004: 216-223.
- [9] IEEE Computer Society LAN MAN Standards Committee. Wireless LAN medium access control(MAC) and physical layer(PHY) specifications[C]. *ANSI/IEEE Std*. New York: IEEE Press, 1999: 29-138.
- [10] Phil K. MACA — A new channel access method for packet radio[C]. *Proc of the ARRL/CRRL Amateur Radio 9th Computer Networking Conf*. Ontario, 1990: 134-140.
- [11] Haas Z J, Jing D. Dual busy tone multiple access (DBTMA) — A multiple access control scheme for ad hoc networks[J]. *IEEE Trans on Communications*, 2002, 50(6): 975-985.
- [12] Sunil K, Vineet S R, Jing D. Medium access control protocols for ad hoc wireless networks: A survey[J]. *Elsevier Ad Hoc Networks*, 2006, 4(3): 326-358.
- [13] Zhang K W, Zhang D Y, Jiang W H. Mitigation of exposed terminal problem using packet sensing[C]. *2008 6th Annual Communication Networks and Services Research Conf*. Halifax, 2008: 263-269.
- [14] 雷磊, 许宗泽. 基于地理位置信息和功率控制的 ad hoc 网络并行 MAC 协议[J]. *通信学报*, 2008, 29(9): 81-90.
(Lei L, Xu Z Z. Parallel MAC protocol based on geographical location information and power control in ad hoc networks[J]. *J on Communications*, 2008, 29(9): 81-90.)
- [15] David T. *Fundamentals of wireless communication*[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2005: 49-55.
- [16] Ye W, Heidemann J, Estrin D. An energy-efficient MAC protocol for wireless sensor networks[C]. *Proc of 21st Int'l Annual Joint Conf IEEE Computer and Communications Societies(INFOCOM 2002)*. New York, 2002: 1567-1576.
- [17] Ganeriwal S, Kumar R, Srivastava M B. Timing-sync protocol for sensor networks[J]. *Proc of the 1st Int Conf on Embedded Networked Sensor Systems*. New York, 2003: 138-149.