

无线局域网中时延感知的电源管理策略

胥琳¹ 朱艺华² 胡华³

(浙江工业大学经贸管理学院 杭州 310023)¹ (浙江工业大学计算机科学与技术学院 杭州 310023)²
(杭州电子科技大学计算机科学与技术学院 杭州 310018)³

摘要 因为移动需求,无线局域网的节点大多采用电池供电,节能对延长节点的工作时间极为重要。IEEE 802.11 标准提出了电源管理策略,即允许无数据传递任务的节点进入休眠模式以节省能耗。对上述策略进行建模与分析,导出了数据包传递时延、节点的连续休眠次数、活跃时间以及节点在活跃与休眠模式之间的切换次数等指标,提出了适用于 IEEE 802.11 基础设施无线局域网的时延感知的电源管理策略并对之进行数值分析,这种方案可以让节点寻找到最优的休眠时间长度以使能耗最低且满足给定的时延约束。

关键词 无线局域网, IEEE 802.11 标准, 电源管理, 节能, 时延

中图分类号 TN92 **文献标识码** A

Delay Aware Power Management Scheme for WLANs

XU Lin¹ ZHU Yi-hua² HU Hua³

(College of Business Administration, Zhejiang University of Technology, Hangzhou 310023, China)¹

(School of Computer Science and Technology, Zhejiang University of Technology, Hangzhou 310023, China)²

(College of Computer Science and Technology, Hangzhou Dianzi University, Hangzhou 310018, China)³

Abstract Most nodes in a wireless local area networks (WLAN) are powered by battery due to mobility requirement. Power conservation is significant for the nodes to prolong their run-time. Power management (PM) is presented in the IEEE 802.11 standard, which allows nodes to enter dozing mode to save power when they are not engaged in data delivery. The PM was modeled and analyzed so that the packet delay, the number of successive dozes, the active time, and the number of switches between active and doze modes were all derived. A delay aware power management (DAPM) scheme, which is suitable for IEEE 802.11 infrastructure WLANs, was proposed and analyzed. The DAPM was able to help nodes seek the optimal dozing period so that the power consumption is minimized while the given delay requirement is met.

Keywords WLAN, IEEE 802.11 standard, Power management, Energy conservation, Delay

1 前言

在基于 IEEE 802.11 标准的无线局域网(Wireless Local Area Network, WLAN)中,节点可以使用免执照(license-free)的无线频带进行通信^[1,2],因而,市场上出售的便携计算设备(如便携电脑、PDA 等)大多配置了 IEEE 802.11 无线网络接口卡,这使无线局域网日益普及。

IEEE 802.11 标准引入了电源管理(Power Management)策略(下称“基本电源管理策略”),即允许无数据传输任务的节点进入休眠模式,以降低节点的能耗。因此,节点有以下 4 种操作模式:“发送”、“接收”、“空闲”和“休眠”,其中休眠模式耗能最低,发送模式能耗最高。例如,Lucent IEEE 802.11 WaveLan 无线网卡在发送、接收、空闲和休眠模式的能耗分

别为 284,190,156 和 10mA^[3]。虽然休眠状态耗能最小,但在休眠状态节点无法发送和接收数据,因而电源管理策略会带来数据包的额外传递时延。

一般地, WLAN 分为两类:基于访问点 AP (Access Point)的基础设施无线局域网(Infrastructure WLAN)和无 AP 的自组织网络(Ad-hoc WLAN)。本文仅对前者进行研究。在基于 AP 的 WLAN 中,一旦节点进入休眠,与之相关联的 AP 就需要为这个休眠节点缓存来自其它节点的数据包。显然,节点的休眠时间越长,其能耗越低,但 AP 为之缓存的数据包就越多,数据包的传递时延也越大。因此,电源管理策略致力于:让节点休眠时间尽可能长以降低能耗,同时使数据包的传递时延尽可能低。诚然,电源管理策略对 WLAN 的能耗、丢包率、吞吐率、通信时延等方面有着重要影响,对延

到稿日期:2011-05-09 返修日期:2011-07-22 本文受国家自然科学基金(61070190, 60873022),浙江省自然科学基金重点项目(Z1100455),浙江省重大科技专项重点国际合作项目(2009C14033)资助。

胥琳(1965-),女,博士生,副教授,主要研究方向为信息系统、决策优化;朱艺华(1961-),男,博士,教授,博士生导师,主要研究方向为无线网络、网络编码、移动计算,E-mail: yhzhu@zjut.edu.cn(通信作者);胡华(1964-),男,博士,教授,主要研究方向为数据处理、算法、系统分析等。

长 WLAN 的工作时间至为重要。

在基础设施无线局域网中,节点需要与一个 AP 进行关联(Association)并获得 AP 的准许之后才能加入到网络^[2]。在关联请求中,有一个称之为侦听时间间隔 LI(Listen Interval)的参数,它决定节点的休眠时间长度。LI 取值为信标时间间隔 BI(Beacon Interval)的整数倍^[2]。由于节点在发出关联请求之前需要确定 LI,因此,如何确定一个最优的 LI 值,使得节点的能耗最小,同时使数据包传递时延控制在事先给定的范围之内,是一个非常重要的研究课题。本文对此进行研究,主要创新之处在于:

1) 导出了“基本电源管理策略”的数据包传递时延、节点的连续休眠平均次数、节点的平均活跃时间以及节点在活跃与休眠模式之间的切换次数等指标;

2) 根据所导出的指标,提出了时延感知的电源管理策略 DAPM(Delay Aware Power Management),这种策略可以让节点寻找最优的休眠时间长度 LI,同时使能耗最低且使时延满足给定的时延条件。

2 相关研究

在基础设施无线局域网中,一旦节点不需要接收/发送(简称“收发”)数据包,它就可以进入休眠模式,休眠时间长度为 LI。AP 负责为所有相关联的休眠节点缓存来自其它节点的数据包,把有数据包缓存在 AP 的节点的关联标识 AID (Association ID)编入 TIM(Traffic Indication Map)帧(本文对帧与数据包不加区别),并在每个无线电信标(Beacon)时刻广播 TIM 帧,以宣布哪些休眠节点有数据包缓存在 AP;节点在休眠时间终了之时,侦听 TIM 帧,如果 TIM 帧声明这个节点有数据包被 AP 缓存,则它醒来接收这些数据包,否则再次进入休眠,休眠时间长度仍然为 LI。

N. Aste 等人通过利用一个代价函数,让 AP 有选择地让 TIM 帧包含一部分被缓存了数据包的节点标识,让其它节点继续休眠,以节省能耗^[5]。Y. He 等人提出了基于时间片的节能协议,安排 AP 在指定的时间片转发缓存的数据包,并相应地调整节点的电源状态^[6]。S. Pollin 等人提出一种两阶段方法,以权衡节点休眠与物理层、链路层之间的能耗^[7]。基于 IEEE 802.11 点协调功能,G. A. Safdar 等人提出一种分配时隙及再同步协议以降低能耗,这种协议不需要节点醒着侦听信道^[8]。Y. Xie 等人提出一种以 AP 为中心的节能策略,让 AP 选择最优参数 BI 和 LI,以优化所有节点的能耗^[9]。J. R. Hsieh 等人把电源管理策略与低开销的 MAC 协议结合在一起,提出一种能耗经济的多轮询(multi-polling)方法,它可以让节点进入休眠状态并确定一个合适的醒来时间,以获得所需要的带宽利用率^[10]。此外,C. H. Gan 等人提出了一种多节点醒来时间的最优调度算法^[11]。本文第二作者提出了基于空闲定时器和休眠定时器的电源管理策略^[12],它可以通过调整空闲定时器的值及休眠时间长度来改变缓存在节点及 AP 的帧的数目、帧的发送时延以及节点的能耗。

上述文献研究电源管理策略的侧重点是不同的,本文所给出的 DAPM 策略主要致力于在给定的数据包时延约束之下求能耗的最小值。

3 DAPM

如前所述,在 802.11 WLAN 中,节点的无线收发器有“发送”、“接收”、“空闲”和“休眠”4 种操作模式,其中发送模式的能耗最大,休眠模式的能耗最小。本文将发送、接收、空闲这 3 种操作模式归并到“活跃状态”,而称休眠操作模式为“休眠状态”。按照 IEEE 802.11 标准规定,节点的休眠时间即侦听间隔 LI 取值为 BI 的整数倍,即 $LI = K\tau$,其中 K 为正整数, τ 为 BI 的时间长度。一般取 $\tau = 0.1s$ ^[2]。

考虑到过长的节点休眠时间会导致数据包传递时延太大,本文所提出的时延感知的电源管理策略 DAPM 致力于在给定的时延约束之下寻求最优的 K 值,以使能耗达到最小值,其中 K 由下述优化问题(见式(18))确定。

在给求解最优 K 值优化模型之前,先推导“基本电源管理策略”的一些关键指标。以 p 表示在任一个 BI 之内有数据包到达节点无线收发器(以下简称“数据包到达节点”)的概率,并记 $q = 1 - p$ 。此外,以 S_i 表示状态“节点连续休眠 i 次”, W_i 表示状态“节点连续活跃 i 个 BI”,它们的概率分别为 P_{S_i} 和 P_{W_i} ($i = 1, 2, \dots$)。

易知,“在节点休眠期间(时间长度 $LI = K\tau$)无数据包到达这个节点”这一随机事件的发生,等价于连续 K 个 BI 无数据包到达,其概率为 q^K 。这是因为,只有在节点休眠期间无数据包到达,节点才能再次休眠,因此,从状态 S_i 转移到状态 S_{i+1} 的概率为 q^K ($i = 1, 2, \dots$)。同理,只有在连续几个 BI 内均有数据包到达,才能使节点连续处于活跃状态。此外,如果在节点休眠期间有数据包到达(其概率为 $1 - q^K$),则节点在休眠终止之后就切换到活跃状态;在节点处于活跃状态时,如果在一个 BI 内无数据包到达,则节点在当前 BI 结束之后就进入到休眠状态。于是,节点在状态 S_i 和 W_i 之间的转移情况可用图 1 表示。

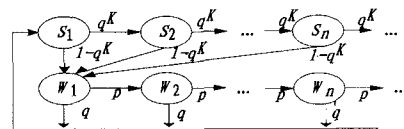


图 1 状态 W_i 和 S_i 之间的转移图

从图 1 可以看出,节点处于状态 W_1 的概率等于以下随机事件的概率之和:节点处于状态 $S_1, S_2, \dots, S_n, \dots$,且在当前休眠期间有数据包到达(概率为 $1 - q^K$)。于是

$$P_{W_1} = (1 - q^K) \sum_{i=1}^{\infty} P_{S_i} \quad (1)$$

节点处于状态 S_1 的概率等于以下随机事件的概率:节点在当前处于状态 $W_1, W_2, \dots, W_n, \dots$ 且在时间间隔 BI 内没有数据包到达(既没有来自其它节点的数据包,也没有本节点要发送给其它节点的数据包到达本节点的无线收发器的发送队列),其概率为 q 。于是

$$P_{S_1} = q \sum_{i=1}^{\infty} P_{W_i} \quad (2)$$

此外,由图 1 可得:

$$P_{S_i} = q^K P_{S_{i-1}}, i = 2, 3, \dots, n \quad (3)$$

$$P_{W_i} = p P_{W_{i-1}}, i = 2, 3, \dots \quad (4)$$

由式(3)和式(4)可以得到:

$$P_{S_i} = q^{(i-1)K} P_{S_1}, i=2,3,\dots,n \quad (5)$$

$$P_{W_i} = p^{i-1} P_{W_1}, i=2,3,\dots \quad (6)$$

将式(6)代入式(2),得:

$$P_{S_1} = q P_{W_1} \sum_{i=1}^{\infty} p^{i-1} = P_{W_1} \quad (7)$$

引入符号: $P_S \equiv \sum_{i=1}^{\infty} P_{S_i}$ 和 $P_W \equiv \sum_{i=1}^{\infty} P_{W_i}$ 。利用式(5)和式(7),得:

$$P_S = \sum_{i=1}^{\infty} q^{(i-1)K} P_{S_1} = P_{S_1} \frac{1}{1-q^K} \quad (8)$$

利用式(6)和式(7),得:

$$P_W = P_{W_1} \sum_{i=1}^{\infty} p^{i-1} = P_{W_1} \frac{1}{1-p} = P_{S_1} \frac{1}{q} \quad (9)$$

由全概率公式 $P_S + P_W = 1$, 并利用式(8)和式(9),得:

$$P_{S_1} = \frac{q(1-q^K)}{q+1-q^K} \quad (10)$$

这样,由式(5)~式(7)及式(10),可得:

$$P_{S_i} = q^{(i-1)K} \frac{q(1-q^K)}{q+1-q^K}, i=1,2,\dots \quad (11)$$

$$P_{W_i} = p^{i-1} \frac{q(1-q^K)}{q+1-q^K}, i=1,2,\dots \quad (12)$$

于是,节点处于活跃状态所包含的 BI 个数的均值(记为 N_W)、节点连续休眠次数的均值(记为 N_S)以及节点的状态切换次数 N_C (包含从活跃状态切换到休眠状态和从休眠状态切换到活跃状态)如下:

$$N_S = \frac{q}{(1-q^K)[q+1-q^K]} \quad (13)$$

$$N_W = \frac{(1-q^K)}{q[q+1-q^K]} \quad (14)$$

$$N_C = \frac{2q(1-q^K)}{q+1-q^K} \quad (15)$$

这样,节点的总活跃时间长度和休眠时间长度分别为 τN_W 和 $K\tau N_S$, 于是节点的总能耗(记为 E_{total})等于节点休眠期间能耗、活跃期间能耗以及状态切换所需的总能耗之和:

$$E_{total} = K\tau N_S E_S + \tau N_W E_W + T_C N_C E_C \quad (16)$$

式中, E_S 、 E_W 和 E_C 分别为节点在休眠、活跃和状态切换过程中单位时间的能耗, T_C 表示节点完成休眠和活跃状态之间的切换所需的时间。

以 T_X 表示数据包到达节点的平均时间间隔,则在节点休眠时间 LI 即 $K\tau$ 内,到达节点的数据包个数为 $M \equiv \lceil K\tau / T_X \rceil$, 其中 $\lceil \cdot \rceil$ 表示取最小上限值。设每个数据包的收发时间为 T_P ,则在采用 FIFO(First In First Out)处理规则时,除第一个到达的数据包之外,其余数据包等待收发的时间(即排队时间)依次为 $T_P, 2T_P, \dots, (M-1)T_P$, 共计 $M(M-1)T_P/2$, 于是各个数据包平均等待收发时间为 $(M-1)T_P/2$ 。考虑到休眠期间到达的第一个数据包的平均等待收发时间为 $K\tau/2$, 我们把两者相加,得到在节点休眠期间所到达的各个数据包的平均时延:

$$T_D \equiv \frac{K\tau}{2} + \frac{T_P}{2} \left(\lceil \frac{K\tau}{T_X} \rceil - 1 \right) \quad (17)$$

本文的 DAPM 策略致力于:在给定的时延约束 D 下,寻求最优 K 值,使得能耗最小。也就是说, K 是式(18)所表示的优化问题的最优解。

$$\text{Min } E_{total} = K\tau N_S E_S + \tau N_W E_W + T_C N_C E_C$$

$w, r. t. K$

$$s. t. \begin{cases} \frac{K\tau}{2} + \frac{T_P}{2} \left(\lceil \frac{K\tau}{T_X} \rceil - 1 \right) \leq D \\ 1 \leq K \leq T/\tau, K \in Z^+ \end{cases} \quad (18)$$

式中, Z^+ 表示正整数的集合, T 是给定的时间长度。

4 性能分析

一般来说,数据包到达节点的时间间隔是一个随机变量,本文以 X 表示。把 X 的概率密度函数记为 $f(x)$, 于是数据包的平均到达时间间隔为:

$$T_X = E[X] = \int_0^{\infty} x f(x) dx \quad (19)$$

而且,在时间间隔 BI 内数据包到达节点的概率 p 满足:

$$p = P\{X \leq BI\} = \int_0^{BI} f(x) dx \quad (20)$$

由于在基于 IEEE 802.11 标准的无线局域网中,链路层帧体长度为 $0 \sim 2346$ 字节^[2],它对网络层 IP 数据包的最大有效载荷为 $2346 - 74 = 2272$ 字节,因此,我们取 IP 数据包长度为 1300 字节^[12]。此外,选择节点在收发数据、空闲、休眠模式的能耗分别为 $E_A = 1W, E_I = 0.83W, E_D = 0.13W$ ^[12,13]。特殊地,本文取活跃状态的能耗为节点收发数据与空闲模式能耗的平均值,即 $E_W = (E_A + E_I)/2$; 取休眠与活跃状态的切换能耗为休眠能耗与空闲能耗的平均值,即 $E_C = (E_D + E_I)/2$; 取切换时间 $T_C = 0.03s$ (例如, Radio Datacom 公司的 RDC-WF1000 无线模块从休眠到活跃所需的时间为 $0.035s$)。目前, IEEE 802.11a/g 标准的 WLAN 理论带宽可达 54Mbps, 因此,本文取数据传输速率为 30Mbps。这样, $T_P = 1300 * 8 / (30 * 10^6) \approx 347\mu s$ 。

让 $p = 0.01, 0.02, \dots, 0.05$ 以及 $K = 1, 10, 20, \dots, 80$, 可以得到图 2 所示的结果。从这个图可以看出,对于给定的 p , K 的变化影响着节点的能耗,而且存在一个 K 使得能耗最小。例如,在图 2 中,对于 $p = 0.02$, 当 $K = 20$ 即休眠时间 $LI = K\tau = 2$ 秒时,能耗最低。值得指出的是,图 2 中显示一个结果:对于给定的 K , 似乎概率 p 越大, 能耗越小。然而,这个结论不对,例如,在 $p = 0.2, 0.3, \dots, 0.5$ 时,上述结论不成立(见图 3)。

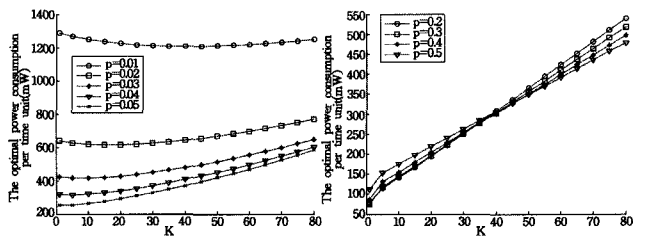


图 2 K 值对能耗的影响 ($p = 0.01 \sim 0.05$)

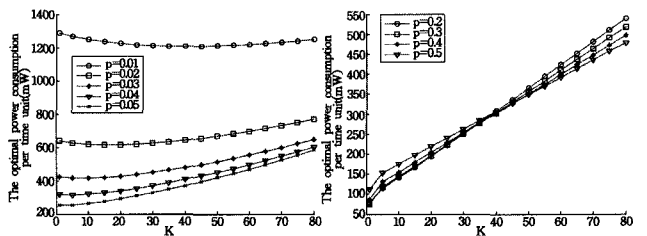


图 3 K 值对能耗的影响 ($p = 0.2 \sim 0.5$)

考虑到 Gamma 分布可以逼近其它的概率分布,我们取到达过程为 Gamma 分布^[14], 即 X 的概率密度函数取为:

$$f(x) = \frac{1}{b^a \Gamma(a)} x^{a-1} e^{-x/b}$$

式中, $\Gamma(a) = \int_0^{\infty} e^{-x} x^{a-1} dx$ 。这个分布的期望值为 ab , 即 $T_X =$

ab。此外,概率 p 由式(20)确定。

取 $b=0.01, a=14, 15, \dots, 22$, 时延约束 $D=1, 5, 10, 15$, 我们得到图 4 和图 5 所示的结果。其中,图 4 反映了时延约束 D 与最优单位时间能耗的关系;时延约束 D 越小,能耗越大。这与我们的直观是一致的。图 5 记录了在时延约束 D 之下当最优单位时间能耗取最小值时相应的 K 值。例如,对 $D=5$ 这种情形,在 $a=22$ 时,最优单位时间能耗约为 200mW (参见图 4 右上方),此时,DAPM 策略取 $K=100$,即休眠时间为 $K\tau=10s$ (参见图 5 中以小正方形表示的曲线)。

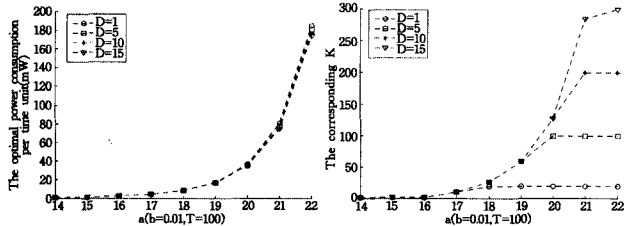


图 4 时延约束下的最优单位时间能耗

接下来,我们将 DAPM 策略与“基本电源管理策略”(下称 BPM, Basic Power Management)进行比较。我们注意到:如果取一个充分大的时延约束,使式(18)的时延约束条件不起作用,DAPM 的计算结果就是 BPM 的最优值。因此,取 $D=10^{17}$,得到 BPM 的最优能耗以及对应的最优 K 值和时延,如图 6—图 8 所示。从这些图可以看出,虽然 BPM 的能耗最优值比 DAPM 小,但是 BPM 的时延比 DAPM 的时延要大得多。例如,在 $a=22$ 时,从图 6 知,BPM 的最优能耗为 180,此时最优 $K \approx 700$ 即休眠时间约为 70s (见图 7)。同时,从图 4 可知,在 $D=1$ 的时延约束下,DAPM 的最优能耗约为 200。因此,BPM 比 DAPM 节约能耗 $(200-180)/200=10\%$ 。然而,从图 6 可见,BPM 的时延约为 35s,而 DAPM 的时延小于时延约束 $D=1s$ 。也就是说,BPM 在把时延增大了 $(35-1)/1=34$ 倍的情况下仅节省能耗 10%。这样,我们得出一个结论:本文所提出的 DAPM 策略可以增加少量的能耗来降低大量的时延。

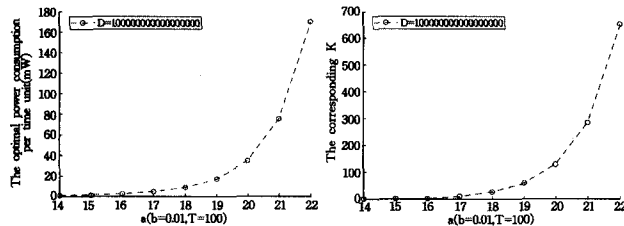


图 6 BPM 的最优单位时间能耗

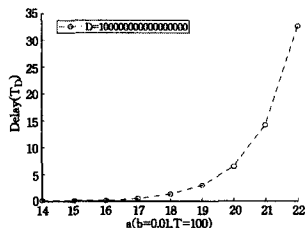


图 8 BPM 的最优 K 值所导致的时延

结束语 节能是无线局域网研究领域的一个重要问题,对延长节点以及网络的生存时间是非常重要的。本文所给出的时延感知的电源管理策略 DAPM,扩展了 IEEE 802.11 电源管理策略,它能够让节点选择合适的休眠时间长度,以达到在数据包传递时延满足事先给定要求的条件下使能耗最小。DAPM 策略适用于基础设施 IEEE 802.11 无线局域网。

参考文献

- [1] Gast M S. 802.11 Wireless Networks: The Definition Guide [M]. O'Reilly Media, Inc., 2005
- [2] LAN MAN Standards Committee of the IEEE Computer Society. IEEE 802.11 Standard - wireless LAN medium access control and physical layer specifications[S]. 1997, 6
- [3] Chao C-M, Sheu J-P, Chou I-C. An adaptive quorum-based energy conserving protocol for IEEE 802.11 ad hoc networks[J]. IEEE Trans. Mobile Computing, 2006, 5: 560-570
- [4] Zhu Yi-hua, Leung V C M. Efficient Power Management for Infrastructure IEEE 802.11 WLANs[J]. IEEE Trans. Wireless Commun., 2010, 7(9): 2196-2205
- [5] Aste N, Atzori L, Randaccio L S. WLC24-2: Selective Power Management in IEEE 802.11 infrastructure WLANs [C] // GLOBECOM '06. 2006: 1-6
- [6] He Y, Yuan R, Ma X, et al. Scheduled PSM for minimizing energy in wireless LANs: IEEE International Conference on Network-protocols, 2007 [C] // ICN2007. 2007: 154-163
- [7] Pollin S, Mangharam R, Bougard B, et al. MEERA: Cross-Layer Methodology for Energy Efficient Resource Allocation in Wireless Networks[J]. IEEE Trans. Wireless Commun., 2008, 7(1): 98-109
- [8] Safdar G A, Scanlon W G. Performance analysis of an improved power-saving medium access protocol for IEEE 802.11 point coordination function WLAN [J]. IEEE Proc. -Commun., 2006, 153(10): 697-704
- [9] Xie Y, Luo X, Chang R K C. Centralized PSM: An AP-centric power saving Mode for 802.11 infrastructure networks [C] // IEEE Sarnoff Symposium, 2009. SARNOFF '09. 2009: 1-5
- [10] Hsieh J-R, Lee T-H, Kuo Y-W. Energy-efficient multi-polling scheme for wireless LANs [J]. IEEE Trans. Wireless Commun., 2009, 8(3): 1532 - 1541
- [11] Gan C-H, Lin Y-B. An effective power conservation scheme for IEEE 802.11 wireless networks [J]. IEEE Trans. Vehi. Technol., 2009, 4(58): 1920-1929
- [12] Zhu Yi-hua, Leung V C M. Efficient power management for infrastructure IEEE 802.11 WLANs [J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2010, 9(7): 2196-2205
- [13] Zheng R, Hou J C, Sha L. Performance analysis of power management policies in wireless networks [J]. IEEE Trans. Wireless Commun., 2006, 5: 1351-1361
- [14] Zhu Yi-hua, Leung V C M. Optimization of distance-based location management for PCS networks [J]. IEEE Trans. Wireless Commun., 2008, 7(9): 3507-3516