

一种适配数据速率的 IEEE 802.16e 休眠机制算法

薛建彬¹, 朱延峰², 袁占亭¹

(1. 兰州理工大学 计算机与通信学院, 兰州 730050; 2. 清华大学 信息科学技术学院, 北京 100084)

摘要:研究了 IEEE 802.16e 休眠模式机制的能量效率。通过设立时间门限建立的休眠模式的马尔可夫链分析模型,分析了能量效率和数据包延时,提出了一种适配实时网络负载的启发式的时间门限设置算法。NS2 仿真结果表明,本文提出的算法比标准中的能量效率获得了明显的提高,并且其数据包的延时也获得了小幅的改善。

关键词:通信技术;检测时间;能量效率;平均延时

中图分类号: TN915.04 **文献标识码:** A **文章编号:** 1671-5497(2009)02-0519-06

Adaptive data rate algorithm in IEEE 802.16e sleep mode operation

XUE Jian-bin¹, ZHU Yan-feng², YUAN Zhan-ting¹

(1. School of Computer and Communication, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, China; 2. School of Information Science and Technology, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: The energy efficiency of the IEEE 802.16e sleep mode mechanism was studied. The analysis of the energy efficiency and data package delay was made by the use of a Markov chain model in sleep mode with time threshold. Then a heuristic time threshold setting algorithm was presented to adapt network real time traffic load. NS2 simulation results show that this proposed algorithm can achieve higher efficiency in power consumption and less data package delay in the comparison with the traditional sleep mechanism.

Key words: communication; check time; energy efficiency; mean delay

为了节省电池供电的移动站(Mobile station, MS)的能量资源, IEEE 802.16e^[1]规范采用了休眠模式的节能机制。休眠模式的设置主要目的是在 MS 没有数据传输时降低功率损耗,同时在众多用户竞争空中接口的情况下,提高空中资源的使用效率。但在休眠类别上仅仅区分了主动提供服务(Unsolicited grant service, UGS)、实时轮询业务(Real time polling service, RT-PS)、非实时轮询业务(Non-real time polling service, NRT-PS)和尽力而为(Best effort, BE)四种业务^[1-2],未考虑用户业务量的随机性问题,而文献

[3]的研究表明,模式转换的能量损耗是不容忽视的。当 MS 工作于较高负载时,由于使用休眠机制而在频繁的模式转换中消耗了有限的能量资源,导致此节能机制在一定范围的数据速率时并不是有效的。文献[4-11]主要集中在初始休眠窗口的设置、休眠中数据包的到达时间和清醒后新包在不同接收期到达时的延时分析。分析随机化业务并考虑休眠模式启动前的研究还比较欠缺。

本文通过设立启发式检测时间门限的策略建立了马尔可夫分析模型,研究了 MS 工作在此机制中的工作行为,分析了 MS 的能量效率和数据

收稿日期: 2007-09-29.

基金项目: 国家自然科学基金项目(30670529);“十一五”国家科技支撑计划项目(2006BAF01A21);甘肃省自然科学基金项目.

作者简介: 薛建彬(1973-),男,博士研究生.研究方向:无线城域网络技术. E-mail: xuejb@lut.cn

包在基站(Base station, BS)中的平均滞留时间,提出了一种适配系统实时负载的动态调整时间门限设置的节能方案,最后用 NS2 进行了仿真验证。

1 IEEE 802.16e 中的休眠机制

由于上行链路的能量和延时是独立于休眠模式的,因此本文主要分析下行数据包在休眠机制中的工作行为。

IEEE 802.16e^[1]协议规定了 3 种休眠类型,分别为被推荐用于连接 NRT-VR、BE 的 Type I (本文只讨论 Type I),UGS、RT-VR 的 Type II 及点对多点和管理操作的 Type III^[2]。在 Type I 中,MS 有清醒和休眠两种模式(如图 1 所示)。清醒模式为 MS 处在正常接收和发送 PDU 的收

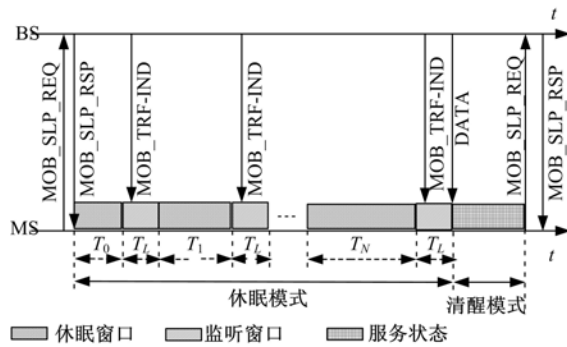


图 1 IEEE 802.16e 休眠模式机制简图

Fig. 1 Illustration of the sleep mode operation in IEEE 802.16e

发状态。在清醒模式结束前,MS 和 BS 协商休眠参数(包括初始休眠窗口、最后休眠窗口、监听窗口以及清醒触发标志等),MS 先发休眠请求消息(MOB_SLP_REQ)到 BS,BS 查验若没有从网络发向 MS 的数据,则发休眠响应消息(MOB_SLP_RSP),MS 开始休眠。休眠模式由一个或多个休眠周期组成,每个休眠周期包括一个可变休眠窗口和一个固定监听窗口。休眠窗口指的是 MS 从进入休眠状态到开始监听状态或两个监听状态之间的持续时间,休眠窗口内 MS 不发送和接收任何 PDU,同时会关掉收发接口电源。监听窗口 MS 暂时清醒,接收 BS 的广播消息(MOB_TRF_IND),判断 BS 缓存中是否有网络发给 MS 的数据包,若有,MS 从休眠模式清醒,接收缓存于 BS 的数据包;反之,MS 两倍休眠窗口后继续休眠,直到达到协商的最后休眠窗口(T_{final}),以后的休眠窗口将以 T_{final} 保持到清醒。休眠窗口更新过

程描述公式为

$$T_i = \begin{cases} 2^i T_0, & 2^i T_0 < T_{final} \\ T_{final}, & \text{其他} \end{cases} \quad (1)$$

式中: T_0 为 IEEE 802.16e 初始休眠窗口; T_i 为第 i 个休眠窗口。

2 分析模型

针对较高负载 MS 在频繁的模式转换中出现的问题^[3],本文提出了一种启发式检测时间门限以解决此问题。该算法的目的是,如果休眠机制在一定负载下不能节省 MS 能量资源,在此负载范围就不启动休眠模式,而轻负载下又可以正常启动休眠模式(即只用一个时间参数,不对协议做其他修改)。通过建立基于动态调整检测时间的马尔可夫分析模型,分析 MS 在整个休眠机制中的工作行为。图 1 中,MS 服务完所有数据后,并不立即启动休眠,而是以一个动态检测时间 τ_i 为调度参数,如果 τ_i 时间内没有数据包到达,MS 和 BS 协商休眠参数,然后休眠,反之进行数据处理。

假设数据包从网络到达 BS 的过程服从速率为 λ 的泊松过程,服务时间服从概率密度函数为 $v(t)$ 的一般分布,监听时隙为固定值 T_L ,定义 $G_i = T_i + T_L$ 为第 i 个休眠阶段的总时间。

MS 工作在节能机制下的行为可以用一个二维的函数 $\{s(t), m(t)\}$ 描述。其中 $m(t)$ ($0 \leq m(t) \leq M$) 表示一个 MS 在时刻 t 所处于休眠阶段的随机过程($m(t) = i$ 表示 MS 在时间 t 处于第 i 个休眠阶段); $s(t)$ 表示一个 MS 在时刻 t 所处的休眠模式的随机过程($s(t) = 'S'$ 即为 MS 处于休眠模式, $s(t) = 'W'$ 意味着 MS 处于清醒模式, $s(t) = 'D'$ 表示 MS 正在检测状态, $s(t) = 'T'$ 显示 MS 在服务检测状态从网络到达的数据)。建立的分析模型的状态转移图如图 2 所示。

图中, α_i 表示在第 i 个休眠间隔没有数据到达时从状态 (S, i) 到状态 $(S, i+1)$ (或者从 (S, M) 到 (S, M) , 当 $i = M$ 时)的转移概率

$$\alpha_i = e^{-\lambda G_i}, 0 \leq i \leq M \quad (2)$$

β_i 表示 MS 服务完所有 BS 缓存中的数据, τ_i 时间内没有数据到达时从状态 (D, i) 到状态 $(S, 0)$ 的转移概率

$$\beta_i = e^{-\lambda \tau_i}, 0 \leq i \leq M \quad (3)$$

为了简化表述,用 $P(k, i | j, i)$ 代替 $P\{s(t+1) = k, m(t+1) = i | s(t) = j, m(t) = i\}$, 则图 2 表示的马尔可夫链的不归零一步转移概率为

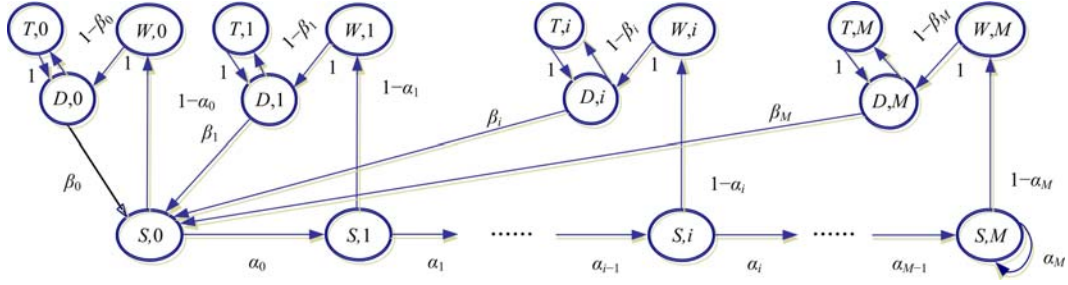


图 2 基于启发式检测时间的休眠机制的马尔可夫链模型

Fig. 2 Markov chain model for the sleep mechanism in IEEE 802.16e based on heuristic check time

$$\begin{cases} P(S, i+1 | S, i) = \alpha_i, 0 \leq i \leq M-1 \\ P(S, 0 | D, i) = \beta_i, 0 \leq i \leq M \\ P(W, i | S, i) = 1 - \alpha_i, 1 \leq i \leq M \\ P(T, i | D, i) = 1 - \beta_i, 1 \leq i \leq M \\ P(D, i | W, i) = 1, 0 \leq i \leq M \\ P(D, i | T, i) = 1, 0 \leq i \leq M \\ P(S, M | S, M) = \alpha_M \end{cases} \quad (4)$$

用 $\pi_{i,j} = \lim_{t \rightarrow \infty} (P\{m(t) = j, s(t) = i\})$, ($0 \leq i \leq M, j \in \{W, S, D, T\}$) 表示稳定状态的状态概率, 则有

$$\begin{cases} \pi_{W,i} = \pi_{S,i}(1 - \alpha_i), 0 \leq i \leq M \\ \pi_{S,0} = \sum_{i=0}^M \pi_{D,i}\beta_i \\ \pi_{S,i} = \pi_{S,0} \prod_{k=0}^{i-1} \alpha_k, 1 \leq i \leq M-1 \\ \pi_{T,i} = \pi_{W,i} + \pi_{D,i}, 0 \leq i \leq M \\ \pi_{D,i} = \pi_{D,i}(1 - \beta_i), 0 \leq i \leq M \\ \pi_{S,M} = \pi_{S,M-1}\alpha_{M-1} + \pi_{S,M}\alpha_M \end{cases} \quad (5)$$

通过迭代, 有

$$\begin{cases} \pi_{S,i} = \pi_{S,0} \prod_{k=0}^{i-1} \alpha_k, 0 \leq i \leq M-1 \\ \pi_{S,M} = \frac{1}{1 - \alpha_M} \pi_{S,0} \prod_{k=0}^{M-1} \alpha_k \\ \pi_{W,i} = (1 - \alpha_i) \pi_{S,0} \prod_{k=0}^{M-1} \alpha_k, 0 \leq i \leq M-1 \\ \pi_{W,M} = \pi_{S,0} \prod_{k=0}^{M-1} \alpha_k \\ \pi_{D,i} = \frac{1 - \alpha_i}{\beta_i} \pi_{S,0} \prod_{k=0}^{i-1} \alpha_k, 0 \leq i \leq M-1 \\ \pi_{D,M} = \pi_{S,0} \prod_{k=0}^{M-1} \frac{\alpha_k}{\beta_M} \\ \pi_{T,i} = \frac{(1 - \alpha_i)(1 - \beta_i)}{\beta_i} \pi_{S,0} \prod_{k=0}^{i-1} \alpha_k, 0 \leq i \leq M-1 \\ \pi_{T,M} = \left(\frac{1}{\beta_M} - 1 \right) \pi_{S,0} \prod_{k=0}^{M-1} \alpha_k \end{cases} \quad (6)$$

联合 $1 = \sum_{i=0}^M \pi_{W,i} + \sum_{i=0}^M \pi_{S,i} + \sum_{i=0}^M \pi_{D,i} + \sum_{i=0}^M \pi_{T,i}$, 则稳定状态 $\pi_{S,0}$ 的概率为

$$\pi_{S,0} = \left[\left(1 + \frac{2(1 - \alpha_i)}{\beta_i} \right) \left(1 + \sum_{i=1}^{M-1} \prod_{k=0}^{i-1} \alpha_k + \frac{1}{1 - \alpha_M} \prod_{k=0}^{M-1} \alpha_k \right) \right]^{-1} \quad (7)$$

相应地, 由式(6)可以得到稳定状态 $\pi_{S,i}$ 的概率。

当 $1 \leq i = M-1$ 时

$$\pi_{S,i} = \left[\left(1 + \frac{2(1 - \alpha_i)}{\beta_i} \right) \left(1 + \sum_{i=1}^{M-1} \prod_{k=0}^{i-1} \alpha_k + \frac{1}{1 - \alpha_M} \prod_{k=0}^{M-1} \alpha_k \right) \right]^{-1} \prod_{k=0}^{i-1} \alpha_k \quad (8)$$

当 $i = M$ 时

$$\pi_{S,M} = \left[\left(1 + \frac{2(1 - \alpha_i)}{\beta_i} \right) \left(1 + \sum_{i=1}^{M-1} \prod_{k=0}^{i-1} \alpha_k + \frac{1}{1 - \alpha_M} \prod_{k=0}^{M-1} \alpha_k \right) \right]^{-1} \frac{1}{1 - \alpha_M} \prod_{k=0}^{M-1} \alpha_k \quad (9)$$

则其他所有稳定状态的状态概率都可以计算得到。

3 性能分析

3.1 能量效率分析

动态调整检测时间时, 必须获得负载与能量效率的关系、检测时间的设置对平均延时的影响以及 QoS 的恶化程度等。

基于启发式检测时间节能机制下的 MS 下行链路的能耗主要由三部分组成: 接收数据和空闲时间的功率 P_w ^[4]、休眠模式下的功率(包括休眠期 P_s 和监听期 P_w)以及两种模式相互转换时产生的能耗 E_s (包括进、出休眠模式两部分)。在这几部分能耗中, 有效功率为 MS 接收数据时消耗

的功率。根据以上分析,MS 能量效率为接收数据时消耗的有效功率与总消耗功率的比值。若定义 $E[T_{T_i}] = \lambda \tau_i E[v(t)]$ 为 MS 在状态 (T, i) 停留的平均时间, $E[T_{W_i}] = \lambda E[v(t)] \sum_{k=0}^i G_k$ 为在状态 (W, i) 停留的平均时间。则能量效率的表达式为

$$\eta = \frac{\{P_W \sum_{i=0}^M (\pi_{w,j} E[T_{W_i}] + \pi_{T,i} E[T_{T_i}])\}}{\{ \sum_{i=0}^M \pi_{S,i} (P_W T_L + P_S T_i + E_S) + P_W \sum_{i=0}^M (\pi_{w,j} E[T_{W_i}] + \pi_{D,i} \tau_i + \pi_{T,i} E[T_{T_i}]) \}} \quad (10)$$

值得注意的是,MS 的负载越小,能量效率 η 越低;负载越大,MS 有效耗能时间越长, η 越接近 1。因此,能量效率不仅与休眠参数关联,而且与所设计的检测时间 τ_i 及其状态概率关系密切,稳定状态时 τ_i 越大 η 越小。

为了更准确地分析检测时间对能量效率的影响,本文通过分析 MS 在整个负载范围内的行为,得出了理论计算所获取的能量效率数据(见图 3)。图中,三条曲线分别代表轻负载、稍高负载和高负载在固定检测时间时的能量效率变化情况。

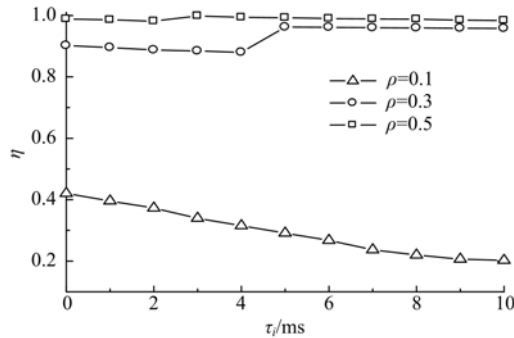


图 3 固定检测时间的能量效率

Fig. 3 Power consumption versus the fix check time

当检测时间为 0 ms 时(原标准算法),MS 接收完缓存于 BS 中的数据后立即启动休眠模式。数据包到达率较小时,这种不考虑业务随机性的节能机制是高效率的,因为这时包的到达太稀疏,检测时间内基本没有包到达,也就没有增益,只有能量的消耗,检测时间的设置反而降低了能量效率,且检测时间越长 η 越低。稍高负载($\rho=0.3$)时,设置较小的检测时间未能进一步提高 η ,而是检测时间较大时(高于 4 ms)的 η 普遍高于小检测时间下(4 ms 及以下)的 η ,但是最大的 η 并非

出现在长的检测时间,因此设置适配的检测时间参数至关重要。在本文所设置的计算参数中,负载为 0.3 时理论计算数据显示 5 ms 的检测时间 η 最高,可以作为设置检测时间的参考数据。

3.2 平均延时

数据包的平均延时为数据包从网络到达 BS 时刻到从 BS 成功传出时刻的时间平均。设在第 i 个体眠期 BS 为 MS 缓存了 j 个数据包,则每个包的平均等待时间为 $(G_i + (j+1)E(v))/2$ 。当 MS 服务这 j 个数据包时可能有新的数据包到达,在服务新到达的包时,可能会有更新的数据包到达,这种情况下的计算量比较复杂。MS 在清醒状态服务完所有的数据包后直接转移到等待的检测状态,若在 τ_i 时间内又有新的包抵达,则转入其服务状态,MS 服务完新包后返回检测状态,检测状态和服务状态可能交替多次,主要取决于参数 τ_i 和 λ 的大小。

为了简化计算过程,本文只考虑 MS 清醒服务缓存与 BS 中 j 个数据包时一次有新包到达的情况。第 i 个体眠期有 j 个数据包缓存于 BS 中的概率为

$$P_{i,j} = \frac{(\lambda G_i)^j}{j!} e^{-\lambda G_i} \quad (11)$$

由于在空闲检测期间到达的数据包能够立即得到服务,其数据包延时为无线传输延时,可以忽略。如果在 j 个数据包服务期间一直有新包到达,则第 i 个服务状态平均包的数量(包括 j 个缓存于 BS 中的初始包)为

$$N_{i,j} = j(1 + \lambda E[v(t)]) + \lambda \tau_i (1 + \lambda E[v(t)]) \quad (12)$$

综合以上分析,在第 i 个服务状态,所有数据包的平均延时为

$$T_{D,i,j} = \frac{1}{N_{i,j}} \left[j \frac{G_i + (j+1)E[v]}{2} + (N_{i,j} - j) \frac{(N_{i,j} - j + 1)E[v(t)]}{2} \right] \quad (13)$$

因此,所有数据包的平均延时为

$$T_D = \left[\sum_{i=0}^M (\pi_{S,i}) \sum_{j=1}^N (P_{i,j} T_{D,i,j}) \right] / \sum_{i=0}^M \pi_{W,i} \quad (14)$$

式中: N 为 BS 为每个 MS 设置的存储容量的大小。

从 MS 的 QoS 方面考虑降低数据包的平均延时的最好方法是,数据包到达 BS 就立即能够

通知 MS 接收。如式(14)所示,当不进入休眠模式时,数据包的平均延时也为零(未考虑系统重负载下的排队延时)。但是为了减小 MS 无效时的能量损耗,就必须增加休眠时间。增加检测时间显然有利于减小平均延时。图 4 为不同检测时间时理论分析的平均延时数据,其中无线传输延时为 2 ms^[4]。

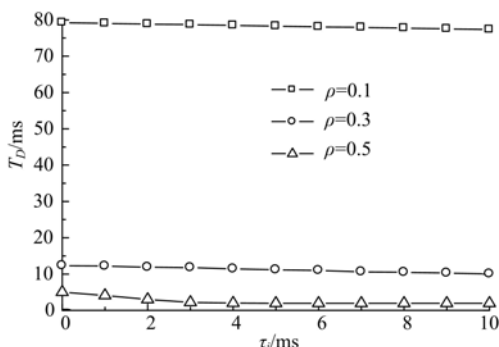


图 4 固定检测时间的平均延时

Fig. 4 Mean delay versus the fix check time

由图 4 观察可知,检测时间对延时的影响较小。负载较低时,包的到达太稀疏,一般在检测时间内基本没有包到达,由于少量降低了 MS 处于休眠模式时的时间,对延时只有轻微的影响。高负载时,设置较小的检测时间参数下休眠机制不启动,延时主要由无线传输延时决定。中度负载时,随着检测时间的增加,平均延时逐渐降低。因此,从延时角度分析,设置检测时间是完全允许的。

4 确定启发式检测时间 τ_i

根据以上分析,要使 IEEE802.16e 节能机制在 MS 工作于任何业务负载下都有效,需要调整时间 τ_i 。低业务情况下,MS 在接收完 BS 缓存中的数据后直接启动休眠模式休眠;高负载时,只有在 τ_i 时间内没有数据包到达时才休眠。设 τ' 为稳定状态下使用休眠模式节省的能量与从休眠模式转到清醒模式时启动收音机消耗的能量平衡时间点,则

$$\tau' = \sum_{i=0}^m G_i \quad (15)$$

式中: $m = \arg \min_k (\sum_{i=0}^k ((P_W - P_S) T_i) - E_{\text{switch}})$,

且 $\sum_{i=0}^k ((P_W - P_S) T_i) - E_{\text{switch}} \geq 0, 0 \leq k \leq M$ 。

显然,由式(2)、式(3)可以计算 G_i ,它与业务

到达率 λ 密切相关,对于给定的系统,由式(15)可以计算出 τ' ,进而获得 $\lambda'(\tau')$ 。基于以上分析,启发式检测时间设置为

$$\tau_i = \begin{cases} 0, & \lambda < \lambda' \\ \tau', & \lambda \geq \lambda' \end{cases} \quad (16)$$

5 性能评价

为了评价所提出的启发式算法的性能,以理论分析时的数据为参数^[3],即 $T_0 = 10 \text{ ms}$, $M = 5$, $T_L = 5 \text{ ms}$, $P_W = 1 \text{ W}$, $P_S = 0.05 \text{ W}$, $E_S = 0.001 \text{ J/次}$,以离散事件仿真软件 NS2 为工具,作了大量的仿真,仿真时间为 50 h,以 10 个不同的种子的仿真结果取平均值获得每个点。分析中不但与理论分析结果作了对比,也与原标准的性能作了对比,仿真结果如图 5、图 6 所示。

图 5 中,理论分析的性能均比仿真结果更好,这是因为理论分析数据比较理想,因此其计算结果优于仿真结果。当负载较小时,原标准和所提算法没有差别,这是由于当包到达率较小时,由于 MS 启动休眠模式所节省的能量比模式转换消耗的能量多,因此启发式算法并没有启动检测模式,MS 接收完休眠时缓存于 BS 中的数据后直接进

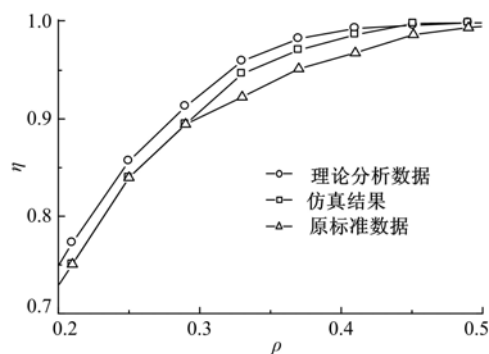


图 5 启发式检测时间的能量效率

Fig. 5 Power consumption versus heuristic check time

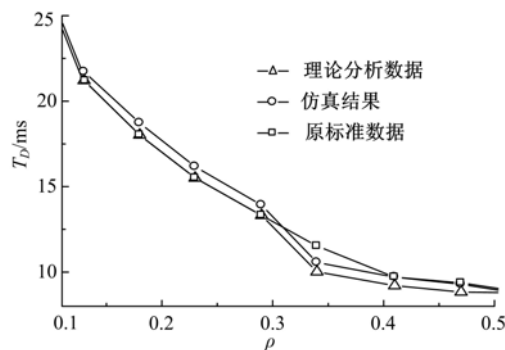


图 6 启发式检测时间的平均延时

Fig. 6 Mean delay versus heuristic check time

入休眠模式;当 λ 增加到门限值以后,新的节能机制启动,所提算法性能明显好于标准。

图 6 为所提算法与 IEEE 802.16e 的平均延时的对比情况。随着数据速率的增加,算法的延时从一致到逐渐低于标准,并在 $\rho=0.35$ 附近显示出比较明显的优势,显然在此数据速率下,系统启动休眠模式节约的 MS 能量已经低于模式转换所消耗的能量,所以启发式算法开始启动,原来要进入休眠时间的数据全部在清醒时间到达,并立即得到服务,因此数据包的平均延时明显减小。

6 结束语

本文提出了在 MS 服务完 BS 缓存中的数据后,设置动态调整检测时间参数的方法,通过建立马尔可夫链模型,从理论上分析了所提出的算法与原算法的能量效率和平均响应时间,分析结果显示了所提算法的优异性。进一步的仿真分析验证了所提算法在能量效率和平均响应时间两方面都较原标准有优越的表现,可以作为 WiMAX 商用时的重要参考。

参考文献:

- [1] IEEE802.16e-2006, IEEE standard for local and metropolitan area networks[S].
- [2] IEEE802.16-2004, IEEE standard for local and metropolitan area networks[S].
- [3] Langendoen Koen, Halkes Gertjan. Energy efficient medium access control [R/OL]. Technical report [2005-07-07]. <http://www.isa.ewi.tudelft.nl/oen/papers/MAC-chapter.pdf>.
- [4] Niu Zhi-sheng, Zhu Yan-feng, Benetis Vilius. A phase-type based Markov chain model for IEEE 802.16e sleep mode and its performance analysis[C] // 20th International Teletraffic Congress, Ottawa, Canada, 2007.
- [5] Xiao Jun-feng, Zou Shi-hong, Ren Biao, et al. An enhanced energy saving mechanism in IEEE 802.16e [C] // IEEE GLOBECOM 2006, California, USA, 2006.
- [6] Kong Lei, Tsang Danny H K. Performance study of power saving classes of type I and II in IEEE 802.16e[J]. IEEE Comm Letters, 1999, 3(3): 63-65.
- [7] Xiao Yang. Energy saving mechanism in the IEEE 802.16e wireless MAN[J]. IEEE Communications Letters, 2005, 9(7):595-597.
- [8] Zhang Yan, Fujise Masayuki. Energy management in the IEEE 802.16e MAC[J]. IEEE Communications Letters, 2006, 10(4):311-313.
- [9] Fall K, Varadhan K. Ns notes and documentation [EB/OL]. <http://www-mash.cs.berkeley.edu/ns/>.
- [10] Chiasserini C F, Rao R R. Improving energy saving in wireless systems by using dynamic power management[J]. IEEE Trans Wireless Comm, 2003, 2(5):1090-1100.
- [11] Ye Wei, Heidemann J, Estrin D. Medium access control with coordinated adaptive sleeping for wireless sensor networks[J]. IEEE/ACM Trans Networking, 2004, 12(3):493-506.