

COPS:802.16e 中一种协作节能算法

朱 斌,薛开平,洪佩琳,卢汉成

(中国科学技术大学电子工程与信息科学系,安徽合肥 230027)

摘 要: 该文首先对多业务场景下移动站休眠模式的能量消耗情况进行了理论分析,发现由于不同功率节省类之间侦听窗口的不同步,移动站的节能效率很低;然后提出了一种多功率节省类的协作节能算法(COoperative Power Saving Mechanism, COPS),通过调整功率节省类 I 的休眠参数,同步功率节省类 I 和 II 的侦听窗口,从而提高节能效率.理论分析和仿真实验结果显示 COPS 不仅提高了节能效率还降低了 MAC 帧的反应时间.

关键词: IEEE 802.16; WiMAX; 休眠模式; 协作节能算法

中图分类号: TP393 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2010) 07-1683-05

COPS: A COoperative Power Saving Mechanism in IEEE 802.16e

ZHU Bin, XUE Kai-ping, HONG Pei-lin, LU Han-cheng

(Department of Electronic Engineering and Information Science, University of Science and Technology of China, Hefei, Anhui 230027, China)

Abstract: This paper theoretically analyzes the performance of the sleep mode for the mobile station with multi-services, and finds that the energy-saving efficiency is very poor due to the asynchrony of the listening windows of different power saving classes. Then it proposes a COoperative Power Saving Mechanism (COPS) which tries to synchronize the listening windows of different power saving classes cooperatively to improve the energy-saving efficiency. Both theoretical results and simulation results show that COPS not only improves the energy efficiency but also reduces the average MAC frame response time.

Key words: IEEE 802.16e; WiMAX; Sleep Mode; COPS

1 引言

IEEE 802.16e^[1]是 IEEE 制定的移动宽带无线接入的标准.为了节省移动站(Mobile Station, MS)的能量,802.16e 标准引入了节能机制.与其它无线多跳网络的节能机制如功率控制^[2]、节能路由^[3]等不同,802.16e 定义的节能机制是基于休眠模式的.所谓休眠模式,其实就是 MS 和基站(Base Station, BS)协商一系列交替出现的休眠时间间隔和侦听时间间隔——称之为休眠窗口和侦听窗口,在休眠窗口上,BS 不能向 MS 发送数据,因为此时 MS 可能关闭网络接口以节省能量,在侦听窗口上,MS 处在清醒状态,可以接收数据.802.16e 针对非实时连接和实时连接定义了两种不同的休眠模式即功率节省类(Power Saving Class, PSC):PSC I 和 PSC II. PSC I 的侦听窗口大小是固定的,休眠窗口大小是变化的,从最小休眠窗口 T_{min} 开始以 2 的倍数递增,直至达到最大休眠窗口 T_{max} ,然后保持不变.有数据到达时,BS 在该连接的侦听窗口通知 MS 退出休眠模式以接收数据. PSC II 的休眠窗口和侦听窗口大小都是固定的,BS 可以在

侦听窗口上直接为该 MS 调度数据.

802.16e 的休眠模式是基于连接的,当 MS 上有多条不同的连接时,MS 需要激活多个 PSC.图 1 给出一个例子,拥有实时连接和非实时连接的 MS 同时激活一个 PSC I 和一个 PSC II,只有在这两个 PSC 休眠窗口的重叠部分即在不可用间隔上,MS 才能真正的处在节能状态,然而由于两个 PSC 之间不同步,MS 的不可用间隔很少,从而导致 MS 的节能效率不高.已有的针对 802.16e 休眠模式的研究很少关注这个问题,他们基本上都是针对单业务情况的 PSC 进行研究,或者利用排队论或带休假的排队系统对 PSC I 的性能进行了分析^[4,5],或者基于流量模式对 PSC I 的参数进行了优化^[6,7].Chen Tuan-che 等^[8,9]虽然考虑了一个 MS 同时激活多个 PSC 的情况,但是这多个 PSC 都是 PSC II,即他们只考虑了实时业务的情况.只有文献[10]同时考虑了 PSC I 和 PSC II,但是它直接去除了 PSC I 的侦听窗口而使用 PSC II 的侦听窗口为非实时连接传输数据,由于 802.16 MAC 层的调度是基于连接的,所以它需要改变 802.16 MAC 层的调度机制才能到达自己的目的.



图1 一个拥有两个功率节省类的MS状态示意图

在实际应用中,MS上拥有多种业务的情况是更为普遍的现象,对这种场景下休眠模式的性能进行分析和改进应该具有很大的使用价值.本文将在第2节中对这种多业务场景下MS休眠模式的能量消耗情况进行理论分析;然后针对其存在的问题在第3节中提出一种协作休眠算法(COoperative Power Saving mechanism, COPS).

2 多业务场景下 802.16e 休眠模式性能分析

分析的场景如图1所示,一个MS上运行着一个PSC I和一个PSC II.根据802.16e协议,PSC I有四个主要的参数:初始休眠窗口 T_{\min} 、最大休眠窗口 T_{\max} 、侦听窗口大小 L_1 和休眠模式启动时间 δ ,其中 $T_{\max} = 2^{M-1} \cdot T_{\min}$ ($M \in \mathbb{Z}^+$).PSC I的第 k 个休眠窗口的大小 T 为:

$$T_k = \begin{cases} 2^{k-1} T_{\min} & , 1 \leq k \leq M \\ T_{\max} & , k > M \end{cases} \quad (1)$$

PSC II有三个主要参数:休眠窗口 T_S 、侦听窗口 L_2 和休眠模式启动时间 δ_2 .由于PSC II在其侦听窗口上能够接收和发送数据而不需要退出休眠过程,能够持续很长的时间,而PSC I有数据到达时必须退出休眠过程才能接收数据,持续时间相对较短,所以假设在我们分析的场景下,PSC II一直都处在激活状态.令PSC II的某个休眠窗口的开始时刻为时间0,在时间 δ PSC I被激活,开始第一个休眠窗口.不失一般性,可以认为 δ 是在区间 $[0, T_S + L_2]$ 上均匀分布的随机变量.

同已有的研究^[4~7]相同,假设PSC I的MAC帧的到达过程服从参数为 λ 的泊松分布.用 e_k 表示事件“在PSC I的第 k 个休眠周期中至少有一个MAC帧到达”, n 表示PSC I被终止激活之前经历的休眠循环的个数,则有:

$$\begin{aligned} \Pr(n = k) &= \prod_{i=1}^{k-1} \Pr(e_i = \text{false}) \Pr(e_k = \text{true}) \\ &= e^{-\lambda \sum_{i=1}^{k-1} (T_i + L_i)} (1 - e^{-\lambda(T_k + L_k)}) \end{aligned} \quad (2)$$

因为PSC I和PSC II同时运行,所以MS网络接口消耗的能量应该由这两个PSC共同决定.用 $Energy_k$ 表示MS的网络接口在PSC I的第 k 个休眠循环上消耗的能量,则 $Energy_k$ 可以分为两个部分:一部分是PSC II消耗的能量,用 $Energy_k^H$ 表示;另一部分是PSC I额外消耗的能量,用 $Energy_k^{ex}$ 表示.可得网络接口平均消耗的功率为:

$$\begin{aligned} E[\text{Power}] &= \sum_{k=1}^{\infty} P(n = k) \sum_{l=1}^k (E[Energy_l^H] \\ &\quad + E[Energy_l^{ex}]) / \sum_{l=1}^k (T_l + L_l) \end{aligned} \quad (3)$$

由于PSC II的休眠窗口和侦听窗口的大小都是固定的,因此可以认为PSC II消耗的功率是固定的, $E[Energy_k^H]$ 取决于PSC I的第 k 个休眠循环的长度:

$$E[Energy_k^H] = (T_k + L_1)(T_S E_S + L_2 E_L) / (T_S + L_2) \quad (4)$$

其中 E_S 和 E_L 分别是网络接口在休眠状态下(休眠窗口上)和唤醒状态下(侦听窗口上)消耗的功率.

$Energy_k^{ex}$ 则取决于PSC I的第 k 个侦听窗口与PSC II的侦听窗口不重复的部分,用 R 表示.而 R 又取决于 δ 、 T_{\min} 和 T_{\max} .如前文所述, δ 是在区间 $[0, T_S + L_2]$ 上均匀分布的变量,对于确定的 T_{\min} 和 T_{\max} ,易得 R 也是一个均匀分布的随机变量,其数学期望为:

$$E[R] = L_2 L_1 / (T_S + L_2) \quad (5)$$

这样就可以得到PSC I在它的第 k 个休眠循环上平均消耗的额外能量 $E[Energy_k^{ex}]$ 为:

$$\begin{aligned} E[Energy_k^{ex}] &= L_1(E_L - E_S) - L_2 L_1(E_L - E_S) / (T_S + L_2) \\ &= T_S L_1(E_L - E_S) / (T_S + L_2) \end{aligned} \quad (6)$$

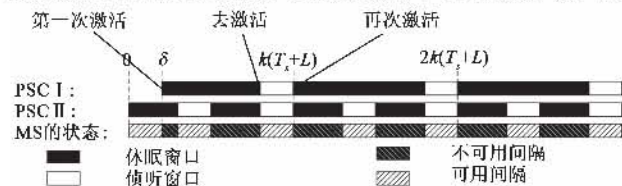
将式(2)(4)(6)代入式(3)可得网络接口平均消耗的功率,将式(2)、(4)、(6)代入式(7)可得因为两个PSC侦听窗口的不同步而浪费的功率:

$$E[\text{Power}_{wasted}] = \sum_{k=1}^{\infty} P(n = k) \sum_{l=1}^k E[Energy_l^{ex}] / \sum_{l=1}^k (T_l + L_l) \quad (7)$$

3 多业务场景下的协作休眠算法 COPS

上一节的分析表明,在本文考虑的多业务场景下,PSC I额外消耗的能量是由于PSC I的侦听窗口中不与PSC II的侦听窗口重合而造成的.为了提高休眠的效率,本文提出一种协作休眠算法COPS,COPS的基本思想是同步PSC I和II的侦听窗口,最大限度降低PSC I消耗的额外能量.为了与802.16e协议兼容,COPS只调整休眠模式的参数,而不改变标准休眠模式的操作机制.

图2显示了COPS的操作流程.由于PSC II是为UGS、RT-VR等类型的实时连接推荐的,它的参数设置通常和业务的流量模式有关,不能随便调整,因此COPS只调整PSC I的参数.为了最大化两个PSC侦听窗口的

图2 COPS操作流程示意图($k=2$)

重叠部分,需要为 PSC I 寻找一组合适的参数: T_{\min} , T_{\max} 和 L_1 . 首先,我们设定 $L_1 = L_2$,这也许会增加了 PSC I 休眠窗口的长度,但是如果能够完全同步 PSC I 和 II 的侦听窗口,它并不会增加休眠模式的能耗. 然后我们再计算 T_{\min} 和 T_{\max} , 易得 T_{\min} 和 T_{\max} 可能的取值只有两组:

$$T_{\min} = T_{\max} = k(T_S + L_2) - L_2, k = 1, 2, 3 \dots \quad (8)$$

$$\text{和} \quad \begin{cases} T_{\min} = [k(T_S + L_2) - L_2]/2 \\ T_{\max} = 2T_{\min} \end{cases}, k = 1, 2, 3 \dots \quad (9)$$

COPS 使用式(8)来设置参数 T_{\min} 和 T_{\max} 的值,因为比较简单,但式(9)同样可以使得 PSC I 和 II 的侦听窗口完全同步. 而 k 可以认为是 COPS 引入的系统变量.

除了 T_{\min} , T_{\max} 和 L_1 外,我们还需要再考虑 PSC I 启动时间 δ 的影响,在 T_{\min} 和 T_{\max} 已经由式确定的情况下, δ 也有一组固定的值,这就意味着 MS 只能在指定的时间上激活 PSC I 才能使得两个功率节省类的侦听窗口完全同步. 但是在实际应用中,这样做会造成 MS 能量的浪费——在 MS 需要激活 PSC I 的时候告诉它要等到指定的时刻才能激活,则 MS 在等待的这段时间内多消耗的能量可能比使用 COPS 算法能够节约的能量还要多. 为解决这个问题我们引入一个两步激活的机制:如图 2 所示,假设 MS 在某一时刻向 BS 发出申请,希望在时刻 δ 激活 PSC I, BS 不会改变 δ 的值,只是为该 BS 选择一个特定的初始休眠窗口值 $T_{\min} = k(T_S + L_2) - L_2 - \delta$, 这样 PSC I 在时刻 δ 开始第一个休眠窗口后,在时刻 $k(T_S + L_2) - L_2$ 就进入侦听窗口,此时 PSC II 也正好进入侦听窗口;然后 BS 通知 MS 去激活 PSC I,并在时刻 $k(T_S + L_2)$ 重新激活它,而这次使用参数 T_{\min} 和 T_{\max} 则由式确定. 这样就可以保证 PSC I 的侦听窗口和 PSC II 的侦听窗口完全同步,又不会浪费额外的能量.

4 COPS 性能分析

下面我们从两个方面对 COPS 的性能进行分析:平均消耗功率和 MAC 帧的反应时间. MAC 帧的反应时间指的是因休眠而导致 MAC 帧增加的传输时延. 由于 COPS 没有改变 PSC II 的参数,并且 PSC II 所对应的实时连接拥有最高的调度优先级,所以改变 PSC I 的参数不会对 PSC II 的 MAC 帧的反应时间有任何影响,因此我们只分析 PSC I 的 MAC 帧的反应时间. 由于 COPS 引入了一个两步激活策略,所以 COPS 中 PSC I 的休眠模式实际上是由两个休眠过程组成,但是由于这两个休眠过程之间只隔着一个侦听窗口且第一个休眠过程只有一个长度小于 $k(T_S + L_2)$ 的休眠窗口,为了分析方便,我们把这两个休眠过程看成是一个连续的休眠过程. 定义休眠循环为一个休眠窗口和它后面的一个侦听窗口,则在 COPS 中 PSC I 的第 k 个休眠循环的长度

C_k 可以表示为:

$$C_k = \begin{cases} k(T_S + L_2) - \delta, & k = 1 \\ k(T_S + L_2), & k > 1 \end{cases} \quad (10)$$

依然假设 PSC I 的 MAC 帧的到达过程服从参数为 λ 的泊松分布,用 n 表示 PSC I 被终止激活之前经历的休眠循环的个数,则有:

$$\Pr(n = j | \delta) = \begin{cases} 1 - e^{-\lambda \delta} e^{-\lambda k(T_S + L_2)}, & j = 1 \\ e^{-\lambda \delta} (e^{-\lambda(j-1)k(T_S + L_2)} - e^{-\lambda j k(T_S + L_2)}), & j > 1 \end{cases} \quad (11)$$

不失一般性,可以认为 PSC I 的开始时间 δ 是在区间 $[0, T_S + L_2]$ 上均匀分布的随机变量. 这样可以通过式(12)计算出休眠过程中消耗的平均功率为:

$$E[\text{Power}] = \frac{1}{T_S + L_2} \int_0^{T_S + L_2} \sum_{j=1}^{\infty} \{P(n = j | \delta)\} \frac{jk(T_S E_S + L_2 E_L) - \delta E_S}{jk(T_S + L_2) - \delta} d\delta + \frac{1}{T_S + L_2} \int_{T_S}^{T_S + L_2} \sum_{j=1}^{\infty} \{P(n = j | \delta)\} \frac{jk(T_S E_S + L_2 E_L) - T_S E_S - (\delta - T_S) E_L}{jk(T_S + L_2) - \delta} d\delta \quad (12)$$

用 t_j 表示 PSC I 第 j 个休眠循环开始的时间:

$$t_j = \begin{cases} \delta, & j = 1 \\ (j-1)k(T_S + L_2), & j > 1 \end{cases} \quad (13)$$

可以得到在 PSC I (开始时间为 δ) 第 j 个休眠循环中到达的 MAC 帧的平均反应时间 $E[\text{Delay}_j | \delta]$ 为:

$$E[\text{Delay}_j | \delta] = \frac{\int_{t_j}^{t_{j+1} - \delta} \lambda e^{-\lambda t} [t_{j+1} - t] dt}{e^{-\lambda(t_j - \delta)} - e^{-\lambda(t_{j+1} - \delta)}} = \frac{(t_{j+1} - t_j) e^{-\lambda t_j}}{e^{-\lambda t_j} - e^{-\lambda t_{j+1}}} - \frac{1}{\lambda} \quad (14)$$

对式(14)进行加权累加,然后计算基于 δ 的数学期望,就可以得到 COPS 中 MAC 帧的平均反应时间:

$$E[\text{Delay}] = \frac{2k-1}{2}(T_S + L_2) + \frac{k(e^{\lambda(T_S + L_2)} - 1)}{\lambda(e^{\lambda k(T_S + L_2)} - 1)} - \frac{1}{\lambda} \quad (15)$$

5 性能评估实验

为了验证分析结果和 COPS 的性能,本文进行了仿真实验. 实验参数设置如下: BS 带宽 10Mbps, 每个 OFDM 的帧的持续时间 5ms; MS 上同时运行 PSC I 和 PSC II, PSC I 中有一个非实时连接,其数据采用泊松数据流,即数据包的到达间隔服从均值为 λ 的负指数分布, λ 的值在实验中是变化的,以衡量不同流量速率下 COPS 的性能, PSC II 中有一个实时连接,其承载的是恒定比特流业务,数据速率固定为 100kbps. 与已有的研究^[4,6]相同,为了计算两种休眠机制下消耗的能量和平均功率,仿真中将网络接口在休眠状态下的功率设为 1mW, 唤醒状态下的功率为 10mW, 即 $E_S = 1 \text{ mW}$, E_L

= 10mW. 根据 802.16e 标准, 实验中 T_{min} 、 T_{max} 、 L_1 、 T_S 和 L_2 等参数的值都是以 OFDM 帧单位的. 实验分为三个部分: 验证实验、COPS 性能评估实验、COPS 与 802.16e 标准休眠模式 (Standard Power Saving scheme, SPS) 的性能对比实验.

(1) 验证实验

本实验的目的是验证上文理论分析的正确性. 实验参数设置如下: $T_{min} = 4$, $T_{max} = 256$, $L_1 = 2$, $T_S = 16$, $L_2 = 4$, $k = 3$. 图 3 显示了 SPS 和 COPS 的消耗功率的理论值和仿真值随业务流量速率的变化曲线. 图上可见仿真值和理论值吻合的很好, 说明了本文对 SPS 和 COPS 所做理论分析的正确性.

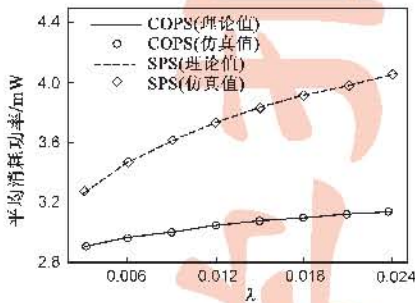


图3 理论值与仿真值对比图

(2) COPS 性能评估实验

本实验的目的是揭示 COPS 的三个参数对其性能的影响. 图 4 和图 5 分别显示了 COPS 的平均消耗功率和 MAC 帧平均反应时间在不同 T_S 和 L_2 下随业务流量速率 λ 的变化曲线, 实验中其他另外一个参数 $k=2$. 图中可见, 在相同的 λ 下, COPS 的平均消耗功率随 T_S 的增大而减少, 随着 L_2 的增大而增大, MAC 帧的反应时间随着 T_S 和 L_2 的增大而增大. 这是因为 COPS 同步了 PSC I 和 PSC II 的侦听窗口, 休眠过程消耗的功率完全取

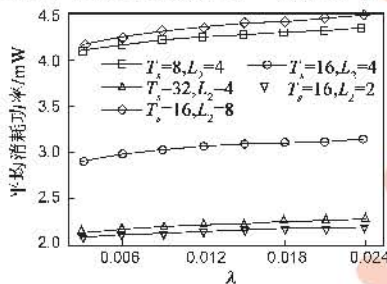


图4 COPS平均消耗功率(k=2)

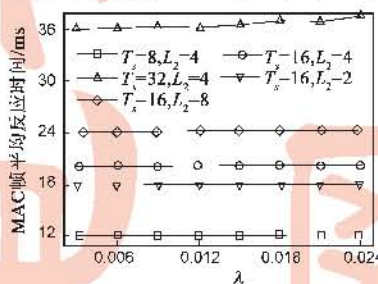


图5 COPS反应时间(k=2)

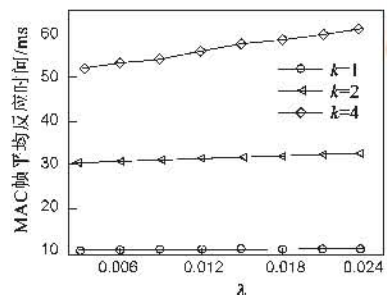


图7 COPS反应时间($T_S=16, L_2=4$)

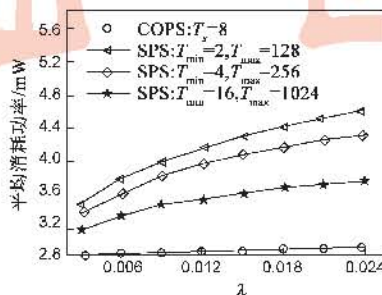


图8 COPS与SPS平均消耗功率对比

决于 PSC II, 而 PSC II 的消耗的功率取决于它的休眠窗口 T_S 和侦听窗口 L_2 的比值 T_S/L_2 , T_S/L_2 越小, 消耗的功率越大. 而 MAC 帧的反应时间则取决于休眠循环的长度即 $T_S + L_2$, $T_S + L_2$ 越大, MAC 帧的反应时间就越大.

图 6 和图 7 分别显示了 COPS 的平均消耗功率和 MAC 帧平均反应时间在 k 等于 1、2 和 4 的情况下随业务流量速率 λ 的变化曲线, 实验中其他两个参数设置如下: $T_S = 16$, $L_2 = 4$. 图 7 显示 COPS 中 MAC 帧的平均反应时间随着 k 的增大而增大, 这是因为 PSC I 的休眠循环的长度与 k 的值成正比, 而 MAC 帧的反应时间又近似正比于休眠循环的长度, 所以 k 越大, MAC 帧的反应时间就越大. 但图 8 显示 COPS 平均消耗的功率却随着 k 的增大而增大, 似乎与前文所述的 COPS 平均功率取决于 PSC II 有所矛盾, 这其实是由于 PSC I 的第一个休眠循环造成的. 在 PSC I 的第一个休眠循环中, MS 处在唤醒状态的时间为 kL_2 , 而处在休眠状态的时间为 $kT_S - \delta$, 通过简单的计算, 不难得到第一个休眠循环消耗的功率为 $E_S + L_2(E_L - E_S)/(T_S - \delta/k + L_2)$, k 越小, 消耗的功率越大, 这也导致了 COPS 的平均消耗功率随着 k 的减小而增大. 另外, 随着数据到达速率 λ 的增大, 越来越多的 MAC 帧在第一个休眠循环内到达, 使得休眠过程在第一休眠循环结束后就终止了, 这也导致了 COPS 的平均消耗功率随着 λ 增大而增大, 在 k 较小的时候尤为明显.

(3) COPS 与 SPS 性能对比实验

本实验的目的是在相同的实验参数设置下对 COPS 和 SPS 的性能进行比较. 实验中 COPS 参数设置如下: $T_S = 8$, $L_2 = 2$, $k = 3$; SPS 参数设置如下: $T_S = 8$, $L_2 = 2$,

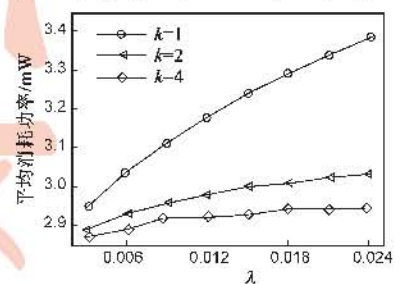


图6 COPS平均消耗功率($T_S=16, L_2=4$)

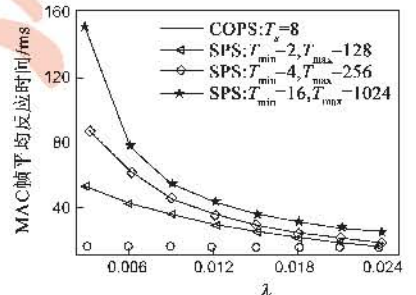


图9 COPS与SPS反应时间对比

$L_1 = 2$, T_{\min} 和 T_{\max} 则分别取 2 和 128、4 和 256、16 和 1024 这三组不同的值. 图 8 和图 9 分别给出了 COPS 和 SPS 在功耗与 MAC 帧反应时间上的性能对比. 对于 SPS 来说, T_{\min} 和 T_{\max} 取 16 和 1024 这组值时, 它的平均消耗功率最小, 但是依然比 COPS 要高出 10% 以上. COPS 的 MAC 帧反应时间也比 SPS 要小很多, 尤其是在业务量较轻的时候. 因此可以认为, 在本文考虑的多业务场景下 COPS 不仅提高了休眠模式的节能效率, 还降低了 MAC 帧的平均反应时间.

6 结论

本文首先对多业务场景下 802.16e 标准休眠模式的能量消耗情况进行了理论分析, 发现由于不同功率节省类之间侦听窗口不同步, 移动站的节能效率很低; 然后提出了一种多功率节省类的协作休眠方法 COPS, 通过调整 PSC I 的休眠参数, 使得 PSC I 的侦听窗口完全被 PSC II 的侦听窗口所覆盖, 从而提高节能效率. COPS 没有改变 802.16e 休眠模式的操作规程, 对 MS 完全透明, 具有很好的扩展性与实用性. 理论分析和仿真实验显示 COPS 不仅能够提高节能效率, 还能够降低 MAC 帧的反应时间. 但是本文考虑的场景还是一个简化的多业务的场景: MS 上其实只有一个 PSC I 和一个 PSC II, 如何将 COPS 扩展到更复杂的场景中是我们进一步工作的目标.

参考文献:

- [1] IEEE Std 802.16e-2005. IEEE Standard for Local Metropolitan Area Networks-Part 16: Air Interface for Fixed and Mobile Broadband Wireless Access Systems[S]. February 2006.
- [2] 文凯, 郭伟, 黄广杰. 无线 Ad hoc 网络中的随机功率控制[J]. 电子学报, 2008, 36(7): 1304 - 1308.
WEN Kai, GUO Wei, HUANG Guang-jie. Random power control in the wireless Ad hoc networks[J]. Acta Electronica Sinica, 2008, 36(7): 1304 - 1308. (in Chinese)
- [3] 朱艺华, 沈丹丹, 吴万登, 等. 无线传感器网络优化生存时间的动态路由算法[J]. 电子学报, 2009, 37(5): 1041 - 1045.
ZHU Yi-hua, SHEN Dan-dan, WU Wan-deng, et al. Dynamic routing algorithms optimizing lifetime of wireless sensor networks[J]. Acta Electronica Sinica, 2009, 37(5): 1041 - 1045. (in Chinese)
- [4] Yang Xiao. Energy saving management in the IEEE 802.16e wireless MAN [J]. IEEE Communications Letters, 2005, 9(7): 595 - 597.
- [5] Hsu Yu-Pin, Feng Kai-Ten. Performance modeling of power saving classes with multiple connections for broadband wireless networks[A]. Proceedings of WCNC 2008 [C]. Las Vegas:

IEEE Communications Society, 2008. 1477 - 1482.

- [6] Kim Min-Gon, Choi JungYul, Minho Kang. Adaptive power saving mechanism considering the request period of each initiation of awakening in the IEEE 802.16e system [J]. IEEE Communications Letters, 2008, 12(2): 106 - 108.
- [7] Lee Jung-Ryun, Cho Dong-Ho. Performance evaluation of energy-saving mechanism based on probabilistic sleep interval decision algorithm in IEEE 802.16e [J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2007, 56(4): 1773 - 1780.
- [8] Chen Tuan-che, Chen Ying-yu, Chen Jyh-cheng. An efficient energy saving mechanism for IEEE 802.16e wireless MANs [J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2008, 7(10): 3708 - 3712.
- [9] Chen Tuan-che, Chen Jyh-cheng, Chen Ying-yu. Maximizing unavailability interval for energy saving in IEEE 802.16e wireless MANs [J]. IEEE Transactions on Mobile Computing, 2009, 8(4): 475 - 487.
- [10] Sixian Zheng, Kuochen Wang, Shiao-Li Tsao, et al. Enhanced sleep mode operations for energy saving in IEEE 802.16e [A]. Emerging Directions in Embedded and Ubiquitous Computing [C]. Taipei: Springer Berlin, 2007. 261 - 272.

作者简介:



朱 斌 男, 1980 年出生于江苏徐州, 博士在读, 主要研究领域为无线宽带接入网络.
E-mail: zhubin@mail.ustc.edu.cn



薛开平 男, 1980 年出生于江苏东台, 博士, 讲师, 主要研究领域为下一代网络体系结构与网络安全.
E-mail: kpxue@ustc.edu.cn



洪佩琳(通信作者) 女, 1961 年出生于浙江宁波, 博士生导师, 教授, 主要研究领域为下一代网络体系结构与网络安全.
E-mail: plhong@ustc.edu.cn

卢汉成 男, 1977 年出生于湖北黄石, 副教授, 主要研究领域为下一代移动互联网. E-mail: hclu@ustc.edu.cn