

文章编号:1000-582X(2009)01-0100-05

## IEEE802.16e 的新型节能机制分析与仿真

唐朝伟,傅明怡,邵艳清,杨永齐,赵丽娟

(重庆大学 通信工程学院,重庆 400030)

**摘要:**IEEE802.16e 的移动站点接收到的数据是随机到达的,在到达率较小时,较小的  $T_{\min}$  (初始睡眠长度)和  $T_{\max}$  (最大睡眠长度)将使移动站点不断被唤醒,使平均侦听次数增大,导致移动站点的能耗过大;在到达率较大时,较大的  $T_{\min}$ 、 $T_{\max}$  将使响应时间变长。为改进这种情况,提出了一种新的自适应节能机制,首先对  $T_{\min}$  以及与之对应的  $T_{\max}$  赋值,一个睡眠模式里  $T_{\max}$  持续的个数定义为  $J$ ;当进入一个睡眠模式时,其实时  $T_{\min}$  定义为  $R(T_{\min})$ ,由上一个睡眠模式的  $T_{\max}$  持续个数  $J$  决定,从而达到动态调节  $T_{\min}$ 、减少平均侦听次数的目的,采用马尔可夫链模型对上述机制进行了分析。仿真结果验证了该节能机制的有效性。

**关键词:**IEEE802.16e;移动站点;节能机制;睡眠模式

**中图分类号:**TN915.04

**文献标志码:**A

### Analysis and simulation of a novel energy saving mechanism based on IEEE802.16e

TANG Chao-wei, FU Ming-yi, SHAO Yan-qing, YANG Yong-qi, ZHAO Li-juan

(College of Communication Engineering, Chongqing University, Chongqing 400030, P. R. China)

**Abstract:** The arrival time of data received by a mobile station in IEEE 802.16e is stochastic. When the arrival rate is low, the shorter initial sleep time ( $T_{\min}$ ) and the maximal sleep time ( $T_{\max}$ ) will lead to the mobile station being awakened frequently, which increases the average listening times and consumes more energy. On the other hand, when the arrival rate is high, longer  $T_{\min}$  and  $T_{\max}$  lead to longer response times. To address these problems, a novel adaptive energy saving mechanism is proposed. Firstly,  $T_{\min}$  and its corresponding  $T_{\max}$  are initialized. The number of  $T_{\max}$  which the mobile station lasted in a sleep mode is denoted as  $J$ . The real-time  $T_{\min}$  is defined as  $R(T_{\min})$  when the mobile station is in a sleep mode.  $R(T_{\min})$  is determined by  $J$  which representd the  $T_{\max}$  of the former sleep mode. As a result,  $T_{\min}$  is adjusted adaptively, and the average listening times are reduced. A Markov chain is adopted to analyze the above adaptive energy saving mechanism. The simulation results demonstrate the effectiveness of the proposed energy saving mechanism.

**Key words:** IEEE802.16e; mobile station; energy saving mechanism; sleep mode

最初的 IEEE802.16 标准是作为固定宽带无线接入系统的空中接口进行定义的,它规定了点对多

点宽带无线接入系统的空中接口,包括 MAC 层和物理层,还包括一个特殊的物理层实现方案,而

收稿日期:2008-08-12

基金项目:重庆市自然科学基金资助项目(CSTC2006BB2163)

作者简介:唐朝伟(1966-),男,重庆大学副研究员,主要从事宽带无线接入技术,下一代互联网技术方向的研究,  
(Tel)15826190246;(E-mail)williamcq@163.com。

IEEE802.16e 正在发展以对工作于 2~6 GHz 主要支持固定无线网络的站点,增加其移动性,可实现用户站以车载速度移动,结合固定和移动宽带无线接入以及在基站之间或扇区之间支持高层切换的功能。被称为移动 Wimax 的 802.16e 在大规模配置上可以对抗基于码分多址的 3G<sup>[1]</sup>。

随着无线通信标准——包括广域 3G、B3G 和局域 802.11 的扩展,未来无线器件和无线终端将要支持多种空中接口和调制格式。软件无线电(SDR)技术采用可重配置的多标准硬件平台,为新标准重新编程,动态更新由软件定义的无线接口的结构,从而满足上述功能要求。而当今移动通信系统正向高数据速率、高度移动性和大范围覆盖方向发展,这就要求基于软件无线电的移动终端具有较强的适应能力,既要求能够处理低速数据业务和语音业务,还需要能够处理以数据业务为主的高速数据业务。在硬件选定的情况下,移动终端的系统资源即已确定。电池作为移动终端最重要的系统资源之一,由于能量有限,且电池技术进展缓慢,为了延长无线设备的使用时间,有必要研究终端设备的节能技术,因此,节能的通信协议成为近年来研究的热点之一。目前这方面的研究在 MAC 层、路由层和传输层都有进行。在 MAC 层节能分功率控制和能量管理两种路线。在能量管理方面,IEEE802.16e 协议<sup>[2]</sup>为规定的四种服务类型(主动授权服务(UGS)、实时轮询服务(rtPS)、非实时轮询服务(nrtPS)和尽力而为服务(BE))提供了三种节能类型,在只考虑 nrtPS 和 BE 的节能模式下,规定节能机制 ESM(energy saving mechanism)通过睡眠以减小移动站点在无数据通信时的能量消耗。Yang Xiao 对 ESM 进行了理论建模分析<sup>[3-4]</sup>,通过仿真验证了该模型,并指出当 MAC 服务数据单元(service data unit,SDU)到达率升高时,移动终端在睡眠模式中的能量消耗将下降。这是因为 SDU 到达时间间隔小,导致移动站点在睡眠模式中的总时长减小,从而减少了侦听次数,降低了睡眠模式中的能量消耗。Jun-Bae Seo 等通过分析 IEEE802.16e 中睡眠模式操作的排队特性<sup>[5]</sup>,把睡眠模式操作构建成 M/G/1/Nd 的排队模型,讨论了 ESM(saving mechanism energy)对基站中分组丢失率和分组平均等待时间的影响。Neung-Hyung Lee 和 Saewoong Bank 建议了一种 IEEE 802.16e 中基于下行业务流模式的睡眠时间控制算法<sup>[6]</sup>,该算法同时考虑多小区切换时的影响,对下行业务流模式预测的准确性,直接影响到该算法的节能效果及分组延迟性能。Apostlis 在文献[7]中对无线

网络终端节能,建议了一种非连续的侦听方式,该侦听方式要求终端在每个时刻根据概率  $p$  随机醒来侦听寻呼信道,而  $p$  是由终端的电池能量状况决定,当电力很弱时, $p$  取较小值,从而延长电池的寿命。肖俊峰在 ESM 基础上提出的 EESM(enhanced saving mechanism energy)算法<sup>[8-9]</sup>对 ESM 进行了改进,并通过仿真验证了 EESM 的性能。Xu Fangmin 等提出了一种基于到达率的节能算法<sup>[10]</sup>,在到达率高的时候采用较小的初始睡眠时间和最大睡眠时间,到达率低的时候采用较大的初始睡眠时间和最大睡眠时间,得到了更好的节能效果。刘利等提出的休眠模式线性增长算法与 ESM 相比节能效果不明显,只是减少了平均等待时间<sup>[11]</sup>。董国军等对 IEEE802.16e 的休眠模式的性能作了评估与优化<sup>[12]</sup>。Seungkwon Cho 等提出根据接收突发数据包的到达时间自适应地改变初始睡眠时间,具有较好效果<sup>[13]</sup>。

在完整考虑减小时延、可实现性等因素之后,在现有能量管理节能机制<sup>[14]</sup>的基础上提出一种新的节能机制,以改善移动终端的节能效果。在第 1 节中介绍 ESM,在第 2 节中对 IEEE802.16e 节能机制与改进的节能机制进行性能分析,在第 3 节中对新的自适应节能算法仿真验证,进行了数据分析,最后进行总结。

## 1 IEEE 802.16e 的睡眠模式 ESM

在进入睡眠模式之前,MS(mobile station)必须向基站(base station,BS)发送一个睡眠请求报文,在获得 BS 的睡眠响应报文后,MS 进入睡眠模式<sup>[15]</sup>。睡眠请求报文包含如下参数:初始睡眠长度、侦听时长等。睡眠响应报文包含的参数有睡眠起始时间,最小睡眠长度( $T_{\min}$ ),最大睡眠长度( $T_{\max}$ )和侦听时段长度( $T_L$ )。获得睡眠响应报文的 MS 进入睡眠时段,在一个睡眠时段结束后,MS 醒来侦听 BS 是否有服务数据单元(SDU)发送给它,若有,则转入唤醒模式,反之则继续睡眠模式,进入下一个睡眠时段。MS 反复执行这个过程直到 MS 进入唤醒模式。在 IEEE802.16e 中,睡眠模式定义如下:在第一个睡眠时段,睡眠时间为最小睡眠时间长度  $T_{\min}$ ,之后的每一个睡眠时间为前一个睡眠时间长度的 2 倍,可表示为  $2^{k-1} T_{\min}$ ,其中  $k$  表示第  $k$  个睡眠时段,如图 1 所示。

当  $2^{k-1} T_{\min}$  大于最大睡眠长度  $T_{\max}$  时,取  $T_{\max}$  为睡眠长度。即有

$$T_k = \begin{cases} 2^{k-1} T_{\min}, & (2^{k-1} T_{\min} < T_{\max}); \\ T_{\max}, & (2^{k-1} T_{\min} \geq T_{\max}); \end{cases} \quad (1)$$

此外,当 MS 有数据向外发送时可以随时终止睡眠模式。

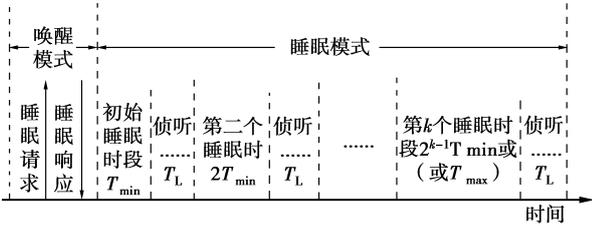


图 1 睡眠模式示意图

## 2 IEEE802.16e 节能机制与改进的节能机制性能分析

### 2.1 现有节能机制性能分析

在 IEEE802.16e 中,将一个睡眠时段和与之对应的侦听时段定义为一个睡眠周期,则第  $k$  个睡眠周期时间长度定义为<sup>[4]</sup>

$$S_k = T_k + T_L. \quad (2)$$

假定 SDU 的到达过程服从泊松分布,到达率为  $\lambda$ ,则其到达时间服从负指数分布。若在第  $k$  个睡眠周期有至少一个 SDU 到达,将之定义为事件  $e_k$ ,那么有

$$\Pr(e_k = \text{true}) = 1 - e^{-\lambda S_k}. \quad (3)$$

侦听次数定义为  $n$ ,有

$$\Pr(n=1) = \Pr(e_1 = \text{true}) = 1 - e^{-\lambda S_1}, \quad (4)$$

$$\begin{aligned} \Pr(n=k) &= \prod_{i=1}^{k-1} \Pr(e_i = \text{false}) \Pr(e_k = \text{true}) \\ &= e^{-\lambda} \sum_{i=1}^{k-1} S_i (1 - e^{-\lambda S_k}), \quad (k > 1). \end{aligned} \quad (5)$$

平均侦听次数  $E[n]$  为

$$\begin{aligned} E[n] &= \sum_{j=1}^{\infty} j \Pr(n=j) \\ &= 1 - e^{-\lambda S_1} + \sum_{j=2}^{\infty} j e^{-\lambda} \sum_{i=1}^{j-1} S_i (1 - e^{-\lambda S_j}). \end{aligned} \quad (6)$$

睡眠模式持续时间长度设为  $S$ ,则平均睡眠长度为

$$\begin{aligned} E[S] &= \sum_{j=1}^{\infty} \Pr(n=j) \sum_{i=1}^j S_i \\ &= (1 - e^{-\lambda S_1}) S_1 + \sum_{j=2}^{\infty} e^{-\lambda} \sum_{i=1}^{j-1} S_i (1 - e^{-\lambda S_j}) \sum_{i=1}^j S_i. \end{aligned} \quad (7)$$

### 2.2 改进节能机制及其性能分析

经分析发现,在到达率较小的情况下,  $T_{\min}$ 、 $T_{\max}$

较小将使平均侦听次数增大,在到达率较大的情况下,  $T_{\min}$ 、 $T_{\max}$  较大将使时延变长,为改进这种情况,提出一种改进的节能机制,动态调节  $T_{\min}$  以达到节能的目的。具体实现方法为:定义最小初始睡眠长度  $T_{\min}$  以及与之对应的最大睡眠长度  $T_{\max}$ ,其中,  $T_{\max} = 2^{M-1} T_{\min}$  ( $M$  为自然数),取一个  $T_{\min}$ 、 $T_{\max}$  的中间值  $\text{mid}(T_{\min})$ ,定义如下

$$\text{mid}(T_{\min}) = \begin{cases} 2^{M/2} T_{\min}, & (M \text{ 为偶数}); \\ 2^{(M-1)/2} T_{\min}, & (M \text{ 为奇数}). \end{cases} \quad (8)$$

一个睡眠模式最大睡眠长度持续的个数定义为  $J$ ,当进入一个睡眠模式时,其实时初始睡眠长度定义为  $R(T_{\min})$ ,由上一个睡眠模式的最大睡眠长度持续个数  $J$  决定,示意如下:

$$R(T_{\min}) = \begin{cases} T_{\min}, & (J < 1); \\ \text{mid}(T_{\min}), & (1 \leq J \leq 2); \\ T_{\max}, & (J \geq 3). \end{cases} \quad (9)$$

以初始睡眠长度不同划分为不同的睡眠模式,  $T_{\min}$  对应  $S_1$ ,  $\text{mid}(T_{\min})$  对应  $S_2$ ,  $T_{\max}$  对应  $S_3$ 。

$S(i)$  ( $1 \leq i \leq m$ ) 为睡眠模式  $S$  的第  $i$  个状态,睡眠时间  $T(i)$ ,每个睡眠模式对应  $m$  种状态,即:

$$T(i) = \begin{cases} 2^{i-1} T_{\min}, & (2^{i-1} T_{\min} < T_{\max}); \\ T_{\max}, & (2^{i-1} T_{\min} \geq T_{\max}); \end{cases} \quad (10)$$

$$S(i) = T(i) + T_L. \quad (11)$$

其中  $S(i)$  的中间值定义为  $S(\text{mid})$  (对应  $\text{mid}(T_{\min})$ ),移动终端(MS)状态转移模型如图 2 所示,其中以  $\mu$  代表状态间的条件转移概率,  $\mu(i, j)$  为睡眠时段  $i$  转移到睡眠时段  $j$  的条件转移概率。

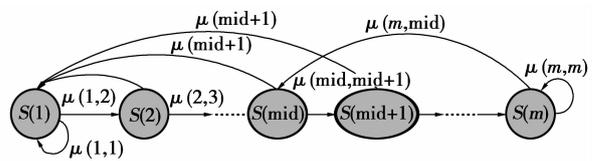


图 2 移动终端(MS)状态转移模型

同上,假定 SDU 的到达过程服从泊松分布,则有

$$\begin{aligned} \mu(i, j) &= \Pr(S(j) | S(i)) = \\ &= \begin{cases} e^{-\lambda S(m)}, & (i=j=m); \\ e^{-\lambda S(i)}, & (j=i+1); \\ 1 - e^{-\lambda S(i)}, & (i \neq m, j=1) \text{ 或 } (i=m, j=\text{mid}); \\ 0, & \text{其他。} \end{cases} \end{aligned} \quad (12)$$

把各初始睡眠长度不同的睡眠模式之间的状态转移构建成一个马尔可夫链,  $P_{i,j}$  为初始状态转移概率,其初始状态转移如图 3 所示。

$P_{i,j}$  表示为:

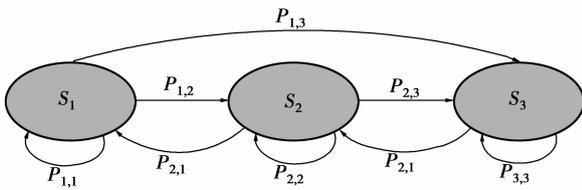


图 3 初始状态转移模型

$$P_{i,j} = \Pr(S_j | S_i) = \begin{cases} 1 - e^{-\lambda(S_i - S(m))}, & (j=1); \\ e^{-\lambda S_i} e^{\lambda S(m)} - e^{-\lambda S(m)}, & (j=2); \\ e^{-\lambda(S_i + S(m))}, & (j=3); \\ 0, & \text{其他。} \end{cases} \quad (13)$$

由此可得初始睡眠状态的转移概率矩阵  $\phi$ ,

$$\phi = \begin{bmatrix} P_{1,1} & P_{1,2} & P_{1,3} \\ P_{2,1} & P_{2,2} & P_{2,3} \\ P_{3,1} & P_{3,2} & P_{3,3} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 - e^{-\lambda(S_1 - S(m))} & e^{-\lambda S_1} (e^{\lambda S(m)} - e^{-\lambda S(m)}) & e^{-\lambda(S_1 + S(m))} \\ 1 - e^{-\lambda(S_2 - S(m))} & e^{-\lambda S_2} (e^{\lambda S(m)} - e^{-\lambda S(m)}) & e^{-\lambda(S_2 + S(m))} \\ 0 & 1 - e^{-2\lambda S_3} & e^{-2\lambda S_3} \end{bmatrix} \quad (14)$$

在式(12)中  $S_3 = S(m)$ , 用  $\bar{\omega} = \{\bar{\omega}_1, \bar{\omega}_2, \bar{\omega}_3\}$  表示各状态稳态概率,  $\bar{\omega} = \bar{\omega} \cdot \phi$ , 由归一化条件, 即

$$\sum_{i=1}^3 \bar{\omega}_i = 1. \quad (15)$$

可以求得各初始睡眠时段的稳态概率。平均侦听次数即为

$$E[n] = \sum_{i=1}^3 \bar{\omega}_i \cdot E[n | S_i]. \quad (16)$$

### 3 数据分析

在相同的空闲时间内侦听次数越多则侦听消耗的时间越长, 而单位侦听时间内消耗的能量远大于单位睡眠时间消耗的能量, 因此用平均侦听次数的大小来衡量能耗大小。

下面的仿真中侦听时间均设定为 1, 仿真时长为 400。当  $(T_{\min} = 1, T_{\max} = 8)$  时, 新节能机制与 ESM 平均侦听次数比较, Matlab 仿真结果如图 4 所示。

由图 4 可知, 当  $(T_{\min} = 1, T_{\max} = 8)$  时, 新机制的平均侦听次数比 ESM 机制对应的平均侦听次数要小。

当  $(T_{\min} = 2, T_{\max} = 32)$  的新节能机制与 ESM

平均侦听次数仿真结果如图 5 所示。

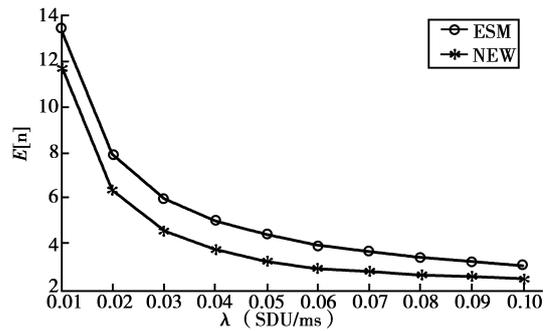


图 4  $(T_{\min} = 1, T_{\max} = 8)$  ESM 与新节能机制平均侦听次数比较

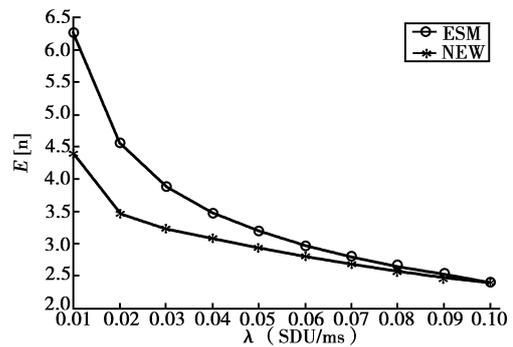


图 5  $(T_{\min} = 2, T_{\max} = 32)$  ESM 与新节能机制平均侦听次数比较

当  $(T_{\min} = 2, T_{\max} = 64)$  的新节能机制与 ESM 平均侦听次数仿真结果如图 6 所示。

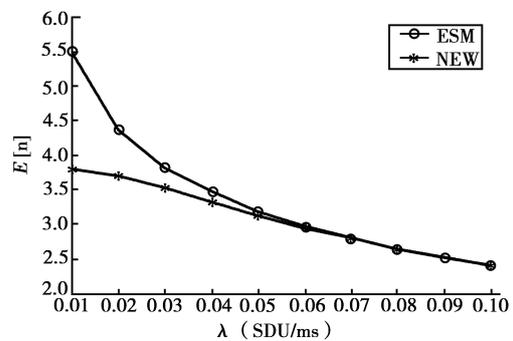


图 6  $(T_{\min} = 2, T_{\max} = 64)$  ESM 与新节能机制平均侦听次数比较

从仿真结果可以看出, 在  $T_{\min}$  和  $T_{\max}$  分别设定为  $(T_{\min} = 1, T_{\max} = 8)$ 、 $(T_{\min} = 2, T_{\max} = 32)$  和  $(T_{\min} = 2, T_{\max} = 64)$  的情况下, 采用新节能机制的平均侦听次数与 IEEE802.16e 规定的现有节能机制的平均侦听次数都有较大程度的减小。

## 4 结 语

对现有的 IEEE802.16e 节能机制进行了分析并提出了一种改进的自适应节能机制,通过动态调整每一次休眠模式时的初始休眠时间,减少了平均侦听次数,从而达到了降低能量消耗的目的。通过对不同参数设置情况的仿真,得到的结果表明,采用该机制使睡眠模式的平均侦听次数与相同参数时 IEEE802.16e 规定的节能机制(ESM)的平均侦听次数相比都有较大程度的减小,且要实现新的自适应节能机制只需要在 ESM 的基础上稍作改动,与文献提出的节能机制相比实现更加简便。

### 参考文献:

- [1] 刘辉,李国庆. 基于 OFDM 的无线宽带网络设计与优化[M]. 西安:西安交通大学出版社,2008.
- [2] IEEE802.16e. D5-2004 Part 16: Air interface for fixed and mobile broadband wireless access system-amendment for physical and medium access control layers for combined fixed and mobile operation in licensed bands [S]. New York: IEEE-SA,2004.
- [3] YANG X. Energy saving mechanism in the IEEE 802.16e wireless MAN [J]. IEEE Communications Letters, 2005, 9(7): 595-597.
- [4] YANG X. Performance analysis of an energy saving mechanism in the IEEE 802.16e wireless MAN[C]// Consumer Communications and Networking Conference. [S.l.]:CCNC, 2006: 406-410.
- [5] SEO J B, SEUNG Q. Performance analysis of sleep mode operation in IEEE802.16e [C] // Vehicular Technology Conference. US: Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc,2004:1169-1173.
- [6] LEE N H, BAHK S. MAC sleep mode control considering downlink traffic pattern and mobility [C]// Vehicular Technology Conference. Sweden: Institute of Electrical and Electronics Inc, 2005: 2076-2080.
- [7] APOSTOLIS K, SALKINTZIS. An in-band power-saving protocol for mobile data networks [J]. IEEE Transactions on Communications, 1998, 46 (9): 1194-1205.
- [8] 肖峻峰,无线网络 MAC 协议性能分析与改善[D]. 北京:北京邮电大学,2006.
- [9] XIAO J F, ZOU S H, REN BIAO, et al. An enhanced energy saving mechanism in IEEE 802.16e[C]//Global Telecommunications Conference, New York: Springer Verlag, 2006:1-5.
- [10] XU F M, ZHONG W, ZHOU Z. A novel adaptive energy saving mode in IEEE 802.16e system [J]. Military Communication, 2006, 10:1-6.
- [11] 刘利,李津生. IEEE 802.16e 睡眠模式算法的研究和改进[J]. 计算机学报,2007,30(1):146-152.  
LIU LI, LI JIN-SHENG. Research and improvement of sleep mode algorithm in IEEE 802.16e [J]. Chinese Journal of Computers, 2007,30(1):146-152.
- [12] 董国军,戴丰居. IEEE802.16e 的休眠模式性能评估与优化[J]. 计算机工程,2007,33(19):10.  
DONG GUO-JUN, DAI FENG-JU. Performance evaluation and enhancement of sleep mode in IEEE 802.16e [J]. Computer Engineering, 2007,33(19):10-12.
- [13] CHO S K, KIM Y. Improving power savings by using adaptive initial-sleep window in IEEE802.16e [C] // Vehicular Technology Conference. Dublin: Institute of Electrical and Electronics Inc, 2007:1321-1325.
- [14] COHEN R, KATZIR L, RIZZI R. On the trade-off between energy and multicast efficiency in 802.16e-like mobile networks [J]. IEEE Transactions on Mobile Computing, 2008, 7(3):346-357.
- [15] SHI J L, FANG G F. Improving mobile station energy efficiency in IEEE802.16e WMAN by burst scheduling [J]. Global Telecommunications Conference, 2006, 1-5.

(编辑 侯 湘)