

IEEE 802.16j 中继站睡眠模式的研究

赵 莉, 张春业, 曹永绍

ZHAO Li, ZHANG Chun-ye, CAO Yong-shao

山东大学 信息科学与工程学院, 济南 250100

School of Information Science and Engineering, Shandong University, Jinan 250100, China

E-mail: dyzhaoli@mail.sdu.edu.cn

ZHAO Li, ZHANG Chun-ye, CAO Yong-shao. Research on IEEE 802.16j relay station sleep mode. *Computer Engineering and Applications*, 2008, 44(36): 126-129.

Abstract: The IEEE 802.16j standard introduces Relay Station(RS) based on the IEEE 802.16d/e standard. RS sleep mode is essential for power saving, especially power constrained RS like client owned RS, nomadic RS or mobile RS, which relies on battery or solar power. It is both necessary and useful to research on IEEE 802.16j RS sleep mode. In this paper, the RS sleep mode in IEEE 802.16j is studied, and the system models for the energy consumption and the average frame delay affected by RS sleep mode are built using statistics. The influence of parameters on average energy consumption and average frame delay is analyzed at last of the paper.

Key words: IEEE 802.16j; Relay Station(RS); sleep-mode; energy consumption; frame delay

摘 要: IEEE 802.16j 标准在 IEEE 802.16d/e 标准的基础上引入了中继站。由于有的中继站具有便携、游牧,甚至移动的特性,往往采用电池或者太阳能供电的方式,中继站的能量节省问题也随之而来。中继站睡眠模式作为能量节省的重要手段,对其进行研究是十分必要和有用的。介绍了 IEEE 802.16j RS 睡眠机制,并构建了中继站睡眠模式下的能量消耗模型和帧时延模型。然后用概率统计的方法对模型进行了仿真,并就各参数对平均能量消耗和平均帧时延的影响进行了分析。

关键词: IEEE 802.16j; 中继站; 睡眠模式; 能量消耗; 帧时延

DOI: 10.3778/j.issn.1002-8331.2008.36.035 **文章编号:** 1002-8331(2008)36-0126-04 **文献标识码:** A **中图分类号:** TP393

1 引言

IEEE 802.16j 移动多跳中继(Mobile Multihop Relay, MMR)标准作为 IEEE 802.16d/e 标准的扩展集,在网络中引入了中继站(Relay Station, RS),负责将无线信号做一次或者多次转发,也就是说,无线信号要经过“多跳”才能到达终端。RS 的引入可以扩大网络覆盖范围,提高数据吞吐量以及降低网络运营成本等。

中继站睡眠模式作为 802.16j 的可选技术^[1],是多跳中继网络节省能量的重要手段。RS 睡眠模式对于提高中继站的功率效率以及节省多跳中继基站(MR-BS)的空中接口资源是非常有效的,尤其是对于电池供电的移动中继站(Mobile RS)或者是靠太阳能供电的低功率固定中继站(Fixed RS),以及游牧式(Nomadic)和客户拥有的(Client Owned Fixed)中继站。同时,睡眠模式还降低了干扰。802.16j 规定 RS 的睡眠模式不能影响 IEEE 802.16e-2005 中定义的移动台(Mobile Station, MS)的正常工作,且睡眠模式只适用于透明 RS,RS 睡眠机制与 802.16e 中的 MS 睡眠机制一样^[2]。文献[3,4]均对 IEEE 802.16e MS 的睡眠模式进行了分析,文献[3]建立了仅考虑下行帧情况下的 MS 睡眠模式下能量消耗模型,文献[4]考虑了上下行帧对 MS

睡眠模式的影响,并对能量消耗和帧时延进行了考查。本文在分析总结了上述文献的 MS 睡眠模式模型的基础上,构建了 RS 睡眠模式能量消耗模型和 RS 睡眠模式下的流入帧时延模型,并着重分析了各参数对平均能量消耗和平均帧时延的影响,最后给出仿真结果。

2 IEEE 802.16j RS 睡眠机制简介

IEEE 802.16e 定义了三种 MS 功率节省类型^[5]。本文以集中调度下,适用于对时延不敏感的尽力而为服务(BE)和非实时可变速率业务(NRT-VR)的第一类型为例进行分析。

当所有从属的 MS 都进入睡眠模式后,RS 才能进入睡眠模式。也就是说,RS 的睡眠窗口应处在所有从属于它的 MS 睡眠窗口的重叠部分。RS 向 MR-BS 发送睡眠请求消息 MOB-SLP_REQ,MR-BS 以 MOB-SLP_RSP 消息回应,回应的内容包括起始睡眠窗口的起始帧号(RS_start_frame_number),初始睡眠窗口(RS_initial_sleep_window),最大睡眠窗口基数(RS_final_sleep_window_base),监听窗口(RS_listening_window)以及最大睡眠窗口指数(RS_final_sleep_window_exponent)等参数^[6]。一个 RS 睡眠周期包括一个睡眠窗口和一个监听窗口。睡眠时间间

作者简介: 赵莉(1982-),女,硕士研究生,主要研究方向:宽带无线通信技术;张春业(1951-),男,副教授,硕士生导师,主要研究方向:微波通信、WLAN 中的关键技术等;曹永绍(1982-),男,硕士研究生,主要研究方向:宽带无线通信系统。

收稿日期: 2008-05-30 **修回日期:** 2008-08-18

隔结束后,RS 将进入监听状态,监听所属的 MR-BS 广播的指示消息 MOB-TRF-IND 是否有指向该 RS 的分组,如果 MOB-TRF-IND 是否定的,那么在监听窗口结束后 RS 继续睡眠,且睡眠窗口加倍,但是不能超过规定的最大值,如图 1。否则 RS 将恢复工作状态接收分组。另外,当睡眠模式下的 RS 醒来时,将激活至少一条上行链路。被激活的上行链路上的所有处于睡眠状态的 RS 同时也被激活。也就是说睡眠状态下的 RS 可以被其下行链路的激活。从属的 MS 也可唤醒睡眠状态下的 RS。

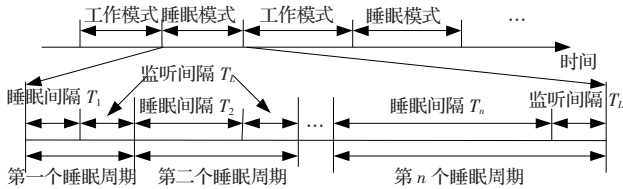


图 1 IEEE 802.16j RS 工作模式与睡眠模式图示

当前睡眠窗口 = min(2 × 前次睡眠窗口, 最大睡眠窗口基数 × 2^{最大睡眠窗口指数})。定义最大睡眠窗口 T_{max} = 最大睡眠窗口基数 × 2^{最大睡眠窗口指数}, 初始睡眠窗口为 T_{min}, 且一定有 T_{min} < T_{max}, 则第 n 个睡眠窗口可由下式表示:

$$T_n = \min(2^{n-1} \times T_{min}, T_{max}), n \geq 1 \quad (1)$$

用 T_l 表示监听窗口,那么第 n 个睡眠周期可表示为 T_n + T_l。

根据功率节省和多跳中继基站和中继站覆盖范围重叠的不同,中继站睡眠模式分为完全睡眠模式(Full RS Sleep Mode)和半睡眠模式(Partial RS Sleep Mode)两种。MR-BS 通过 MOB_SLP-RSP 消息通知 RS 睡眠模式的类型(RS_Sleep_Mode)。

在半睡眠模式下,RS 在有限的功率消耗状态下睡眠。在中继链路或者接入链路没有业务,但为了支持 MS 移动性和 MS 进入网络、重新进入网络或者切换,RS 在预先确定的时间间隔内周期地发送 DL 起始帧前导码(DL Start Frame Preamble)、FCH、DCD、UCD、DL_MAP、UL_MAP 和广播消息。当新进入网络的 MS 不能从 MR-BS 接收到同步或者广播信号,或者它的上行信号不能送达 MR-BS,从而不能与 MR-BS 直接链接时,RS 为其提供基本的接入能力。半睡眠模式适用于 MR-BS 和 RS 的覆盖范围重叠较小,RS 用于扩大网络覆盖范围的情况。

完全睡眠模式下,中继链路和接入链路上均没有业务,RS 在睡眠窗口关闭其无线电收发器,不再监听从 MS 发来的 UL 信号或从 MR-BS 和上游的 RS 发来的 DL 信号。只有当所有从属于 RS 的 MS 进入睡眠模式时,RS 才进入完全睡眠模式。为了满足这个条件,所有从属于 RS 的 MS 的睡眠窗口要同步。否则,即使仅有一个 MS 处于监听状态,RS 也要处于监听状态,准备为 MR-BS 和 MS 之间传送数据或者控制信息。因此,为了能使 RS 进入完全睡眠状态,MR-BS 需要协调从属于 RS 的每一个 MS 的睡眠窗口起始的位置和窗口的大小。

文中考虑 RS 完全睡眠模式的情况。如图 2 所示,来自 RS 所属的 MR-BS、下行链路上的 RS 或从属的 MS 的帧对于 RS 来说是流入的帧。当 RS 处于睡眠模式下有流入的帧到达时,必须等到该睡眠周期完全结束后(该周期的监听窗口结束),RS 才进入工作状态。此时对于流入帧就产生了时延。RS 处于睡眠模式时,也可自我唤醒,本文将此定义为 RS 流出的帧,此时 RS 将立即进入工作状态,因此不存在时延。

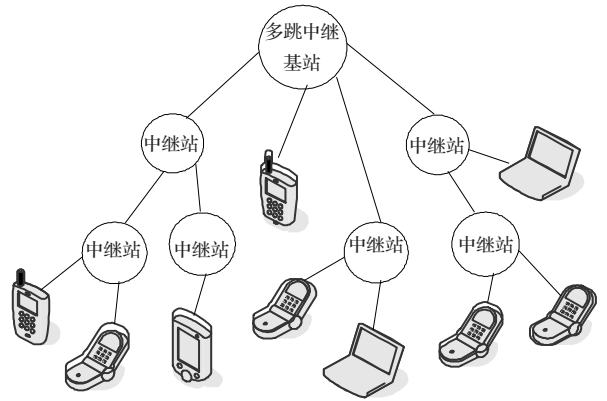


图 2 IEEE 802.16j 网络拓扑结构

3 RS 睡眠模式下的能量消耗模型

假设来自 RS 所属的 MR-BS、通信链路上相邻的 RS 或者从属的 MS 的帧遵循泊松过程,且相互独立,那么 RS 睡眠模式下的流入帧的到达遵循泊松过程,设参数为 λ_o。设流出帧服从参数为 λ_g 的泊松过程。则流入帧和流出帧的到达时间间隔 t_o 和 t_g 分别服从参数为 λ_o 和 λ_g 的指数分布。e_i 表示第 i 个睡眠周期内有帧到达这一事件,那么在第 i 个睡眠周期内没有帧到达的概率为:

$$P(e_i = false) = e^{-(\lambda_o + \lambda_g)(T_n + T_l)} \quad (2)$$

假设 RS 在第 n 个睡眠周期结束了睡眠模式,通过分析,总结了以下三种可能发生的情况,见图 3。用 E_n^(k) (k=1,2,3) 表示第 k 种情况下消耗的能量,用 φ_n^(k) 表示第 k 种情况发生的概率。那么,在整个睡眠过程中消耗的能量可表示为:

$$E = \sum_{n=1}^{\infty} \sum_{k=1}^3 \overline{E_n^{(k)}} \phi_n^{(k)} \quad (3)$$

其中 $\overline{E_n^{(k)}}$ 是 E_n^(k) 的均值。设睡眠窗口和监听窗口单位时间消耗的能量分别是 E_s 和 E_l, 并且定义 $\tau_n = \sum_{i=1}^n (T_i + T_l)$ 。

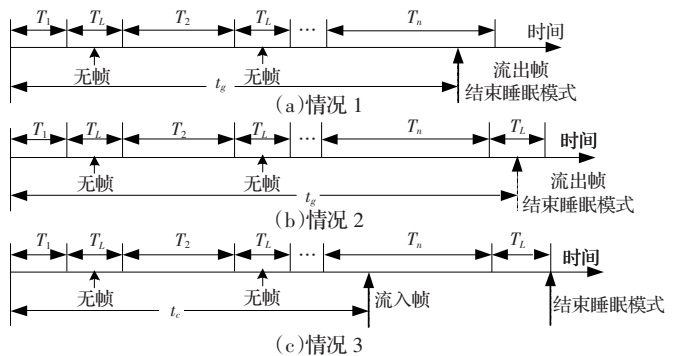


图 3 RS 睡眠模式能量消耗分析模型

(1)情况 1, 在第 n 个睡眠窗口有流出的帧,则立即结束睡眠模式。这也就是说在之前的 n-1 个睡眠周期内没有帧(包括流入帧和流出帧)。则 t_g 满足 $\tau_{n-1} < t_g < \tau_{n-1} + T_n$ 的均值可由下式给出:

$$\overline{t_g} = E[t_g | \tau_{n-1} < t_g < \tau_{n-1} + T_n] = \frac{\int_{\tau_{n-1}}^{\tau_{n-1} + T_n} x \lambda_g e^{-\lambda_g x} dx}{\int_{\tau_{n-1}}^{\tau_{n-1} + T_n} \lambda_g e^{-\lambda_g x} dx} = \frac{(\tau_{n-1} + 1/\lambda_g)(1 - e^{-\lambda_g T_n}) - T_n e^{-\lambda_g T_n}}{1 - e^{-\lambda_g T_n}} \quad (4)$$

则情况 1 消耗的能量表示为:

$$E_n^{(1)} = [t_g - (n-1)T_L]E_S + (n-1)T_L E_L \quad (5)$$

其均值表示为:

$$\overline{E_n^{(1)}} = [\overline{t_g} - (n-1)T_L]E_S + (n-1)T_L E_L \quad (6)$$

其中 $\overline{t_g}$ 由式(4)给出。情况 1 发生的概率为:

$$\phi_n^{(1)} = \prod_{i=1}^{n-1} P(e_i \neq \text{false}) (1 - e^{-\lambda_i T_n}) = e^{-(\lambda_1 + \lambda_2) \tau_{n-1}} (1 - e^{-\lambda_n T_n}) \quad (7)$$

(2)情况 2, 在第 n 个监听窗口有流出的帧, 从而立即结束睡眠模式。这也就是说在之前的 $n-1$ 个睡眠周期内没有帧(包括流入帧和流出帧)到达且第 n 个睡眠窗口内没有流出帧。此时 t_g 满足 $\tau_n - T_L < t_g < \tau_n$, t_g 的均值可由下式给出:

$$\overline{t_g} = E[t_g | \tau_n - T_L < t_g < \tau_n] = \frac{\int_{\tau_n - T_L}^{\tau_n} x \lambda_g e^{-\lambda_g x} dx}{\int_{\tau_n - T_L}^{\tau_n} \lambda_g e^{-\lambda_g x} dx} = \frac{(\tau_n + 1/\lambda_g)(e^{-\lambda_g T_L} - 1) - T_L e^{-\lambda_g T_L}}{e^{-\lambda_g T_L} - 1} \quad (8)$$

则情况 2 消耗的能量表示为:

$$E_n^{(2)} = \sum_{i=1}^n T_i E_S + (t_g - \sum_{i=1}^n T_i) E_L \quad (9)$$

其均值表示为:

$$\overline{E_n^{(2)}} = \sum_{i=1}^n T_i E_S + (\overline{t_g} - \sum_{i=1}^n T_i) E_L \quad (10)$$

其中 $\overline{t_g}$ 由式(8)给出。情况 2 发生的概率为:

$$\phi_n^{(2)} = \prod_{i=1}^{n-1} P(e_i \neq \text{false}) e^{-\lambda_i \tau_n} (1 - e^{-\lambda_i T_i}) = e^{-(\lambda_1 + \lambda_2) \tau_{n-1} - \lambda_n \tau_n} (1 - e^{-\lambda_n T_n}) \quad (11)$$

(3)情况 3, 在第 n 个睡眠周期内有流入的帧而没有流出的帧, 被缓存, 直到 RS 在第 n 个睡眠周期的监听窗口结束后退出睡眠模式。此时消耗的能量均值为:

$$\overline{E_n^{(3)}} = E_n^{(3)} = \sum_{i=1}^n T_i E_S + n T_L E_L \quad (12)$$

情况 3 发生的概率为:

$$\phi_n^{(3)} = \prod_{i=1}^{n-1} P(e_i \neq \text{false}) e^{-\lambda_i (T_n + T_L)} (1 - e^{-\lambda_i (T_n + T_L)}) = e^{-(\lambda_1 + \lambda_2) \tau_{n-1} - \lambda_n (T_n + T_L)} \quad (13)$$

将式(6)、(7)、(10)、(11)、(12)、(13)代入式(3)即可得到睡眠模式下的能量消耗值。

4 流入帧时延模型

前面提到, 在 RS 睡眠状态下, 对于流入的帧, 可能产生时延。当睡眠周期内有流入帧到达而与此同时又没有流出的帧, 那么流入帧就产生了时延。下面将对流入帧的时延模型进行分析。

帧时延可能存在的情况有两种, 见图 4。由于本文考虑的是睡眠模式对帧时延的影响, 不考虑帧的处理时间、分组被缓存排队等待的时间以及 RS 由睡眠状态到工作状态的转换时间。因此帧时延的表达式为:

$$D = \sum_{n=1}^{\infty} (\overline{D_n^{(1)}} \phi_n^{(1)} + \overline{D_n^{(2)}} \phi_n^{(2)}) \quad (14)$$

其中 $\overline{D_n^{(1)}}$ 和 $\overline{D_n^{(2)}}$ 分别表示情况 1 和情况 2 下的帧时延, $\overline{D_n^{(1)}}$ 、 $\overline{D_n^{(2)}}$

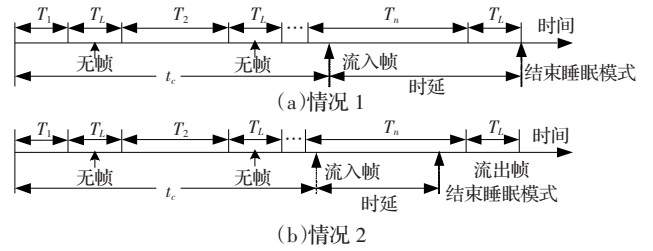


图 4 流入帧时延分析模型

分别是 $\overline{D_n^{(1)}}$ 和 $\overline{D_n^{(2)}}$ 的均值, $\phi_n^{(1)}$ 和 $\phi_n^{(2)}$ 分别表示两种情况发生的概率。

(1)情况 1, 和第 3 章中能量消耗模型的情况 3 是一样的。 t_c 的均值可由下式表示:

$$\overline{t_c} = E[t_c | \tau_{n-1} < t_c < \tau_n] = \frac{\int_{\tau_{n-1}}^{\tau_n} x \lambda_c e^{-\lambda_c x} dx}{\int_{\tau_{n-1}}^{\tau_n} \lambda_c e^{-\lambda_c x} dx} = \frac{\tau_{n-1} + 1/\lambda_c - (\tau_n + 1/\lambda_c) e^{-\lambda_c (T_n + T_L)}}{1 - e^{-\lambda_c (T_n + T_L)}} \quad (15)$$

由图 4 可得

$$\overline{D_n^{(1)}} = \tau_n - t_c \quad (16)$$

$$\overline{D_n^{(2)}} = \tau_n - \overline{t_c} \quad (17)$$

其中 $\overline{t_c}$ 由式(15)给出。此情况发生的概率与第 3 章中能量消耗模型的情况 3 发生的概率是一样的, 即

$$\phi_n^{(1)} = e^{-(\lambda_1 \tau_n - \lambda_2 \tau_{n-1})} (1 - e^{-\lambda_n (T_n + T_L)}) \quad (18)$$

(2)情况 2, 有

$$\overline{D_n^{(2)}} = t_g - t_c \quad (19)$$

因为流入帧与流出帧的到达是相互独立的, 所以有

$$\overline{D_n^{(2)}} = \int_{\tau_{n-1}}^{\tau_n} dx \int_{\tau_{n-1}}^x (x-y) \lambda_g e^{-\lambda_g x} \lambda_c e^{-\lambda_c y} dy = \frac{\lambda_c}{\lambda_g (\lambda_g + \lambda_c)} e^{-(\lambda_1 + \lambda_2) \tau_{n-1}} - \frac{\lambda_g}{\lambda_c (\lambda_g + \lambda_c)} e^{-(\lambda_1 + \lambda_2) \tau_n} + (\tau_{n-1} - \tau_n + \frac{1}{\lambda_c} - \frac{1}{\lambda_g}) e^{-(\lambda_1 \tau_{n-1} + \lambda_2 \tau_n)} \quad (20)$$

这种情况发生的概率为:

$$\begin{aligned} \phi_n^{(2)} &= P(\tau_{n-1} < t_g < \tau_n, \tau_{n-1} < t_c < t_g) = \\ &P(\tau_{n-1} < t_g < \tau_n) P(\tau_{n-1} < t_c < t_g) = \\ &\int_{\tau_{n-1}}^{\tau_n} \lambda_g e^{-\lambda_g x} dx \int_{\tau_{n-1}}^x \lambda_c e^{-\lambda_c y} dy = \\ &\frac{\lambda_c}{\lambda_g + \lambda_c} e^{-(\lambda_1 + \lambda_2) \tau_{n-1}} + \frac{\lambda_g}{\lambda_g + \lambda_c} e^{-(\lambda_1 + \lambda_2) \tau_n} - e^{-(\lambda_1 \tau_{n-1} + \lambda_2 \tau_n)} \end{aligned} \quad (21)$$

将式(17)、(18)、(20)、(21)代入式(14)即可得到睡眠模式下流入帧的时延。

5 仿真结果及分析

下面是对基于上述模型的 RS 睡眠模式下能量消耗和流入帧时延的仿真结果。其中假定 $E_S=1$ 单位能量, $E_L=10$ 单位能量^[8]。

图 5 表示的是在不同的窗口下, λ_g 对平均能量消耗和平均帧时延的影响。仿真中取 $\lambda_c=0.01$ 帧/单位时间。从图中可以看出, 随着 λ_g 的增大, 睡眠模式下的平均能量消耗和平均帧时延都

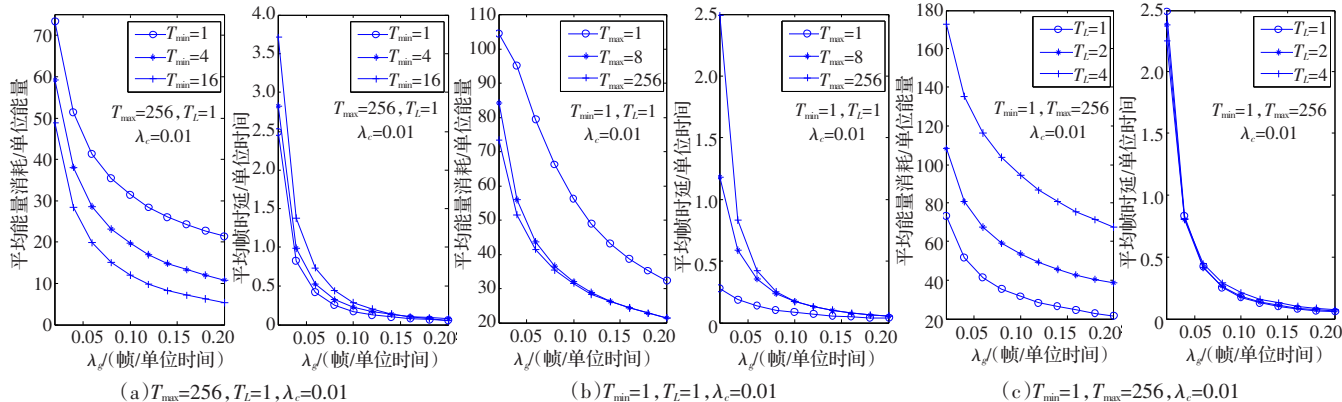


图5 λ_g 对能量消耗和帧时延的影响

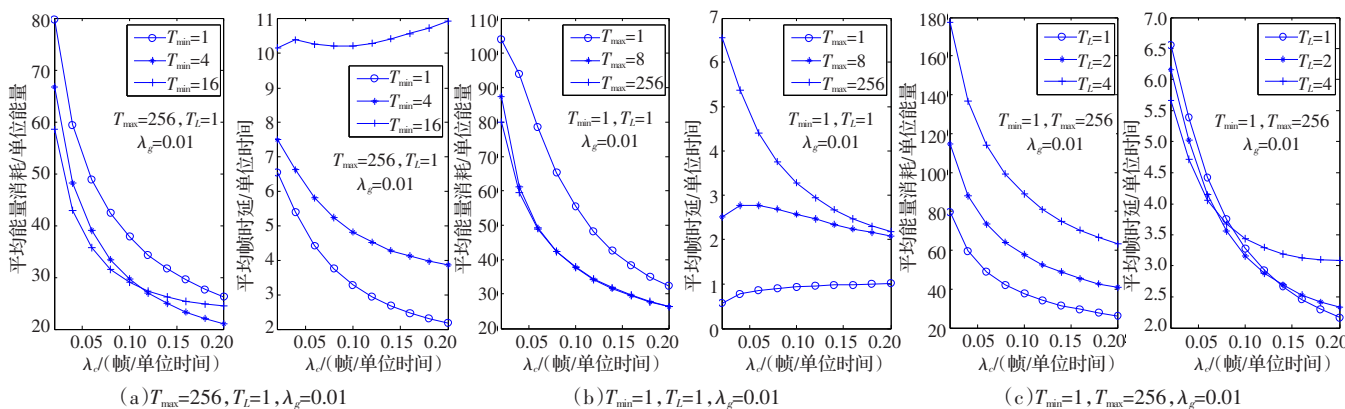


图6 λ_c 对能量消耗和帧时延的影响

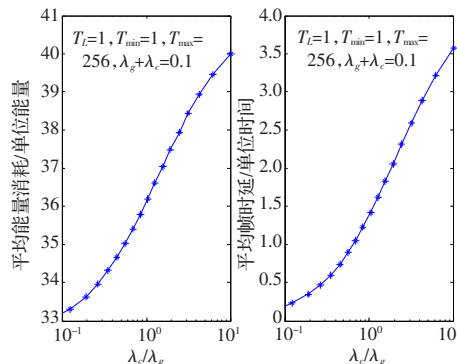
减小,这是因为有流出帧时,RS 会立即结束睡眠模式, λ_g 的增大表示单位时间内的流出帧增多,因而 RS 处于睡眠模式的机率减小,所以睡眠模式下的平均能量消耗和平均帧时延都减小。

图5中(a)表示最大睡眠窗口 $T_{max}=256$ 单位时间,监听窗口 $T_L=1$ 单位时间,初始睡眠窗口 T_{min} 分别等于 1、4、16 单位时间的情况下,平均能量消耗和平均时延的曲线。可以看出,在 λ_g 一定的情况下, T_{min} 越大,RS 睡眠模式下的平均能量消耗越小,而平均帧时延越大。这是符合实际情况的。图5中(b)表示 $T_{min}=1$ 单位时间, $T_L=1$ 单位时间, T_{max} 分别等于 1、8、256 单位时间的情况下,平均能量消耗和平均时延的曲线。同样在 λ_g 一定的情况下, T_{max} 越大,RS 睡眠模式下的平均能量消耗越小,而平均帧时延越大。图5中(c)表示 $T_{min}=1$ 单位时间, $T_{max}=256$ 单位时间, T_L 分别等于 1、2、4 单位时间的情况下,平均能量消耗和平均时延的曲线。同样在 λ_g 一定的情况下, T_L 越大,RS 睡眠模式下的平均能量消耗越大,这是因为 RS 在监听窗口消耗的能量比睡眠窗口大。 T_L 的不同对平均帧时延几乎没有影响,这是因为当有流出帧到达时,RS 立即结束睡眠模式,而不用等到该睡眠周期的监听窗口结束。

图6表示的是在不同的窗口下, λ_c 对平均能量消耗和平均时延的影响。此时取 $\lambda_g=0.01$ 帧/单位时间。从图中可以看出,随着 λ_c 的增大,睡眠模式下的平均能量消耗是减小的,这是因为 λ_c 的增大表示单位时间内的流入帧增多,RS 处于睡眠模式的机率减小。但是帧平均时延的变化规律却因窗口的大小不同而不同。这是因为有流入帧到达时,RS 并不是立即结束睡眠模式,而是等到该睡眠周期的监听窗口结束后才结束睡眠模式,而在功率节省类型 1 机制中,每个睡眠周期的持续时间是不同

的,所以帧时延的大小不仅与 T_{min} 、 T_{max} 、 T_L 等参数有关,还与帧到达的时刻有关。

图7表示在 $T_{min}=1$ 单位时间, $T_{max}=256$ 单位时间, $T_L=1$ 单位时间, $\lambda_g+\lambda_c=0.1$ 帧/单位时间的条件下, λ_c/λ_g 的值不同对 RS 平均能量消耗和平均帧时延的影响。图中可以看出,随着 λ_c/λ_g 的增大,平均能量消耗和平均帧时延都是增加的,这也是由于当流入帧到来时,RS 并不立即结束睡眠模式而造成的。此结果与 RS 睡眠机制相一致。



6 结束语

本文介绍了 IEEE 802.16j RS 睡眠模式的机制,建立了 RS 睡眠机制的数学模型,用概率统计的方法对模型进行了分析,并给出了仿真结果。RS 睡眠模式在减少能量消耗并降低对