

支持 WiMAX 节点灵活休眠的两阶段可靠多播策略

朱艺华^{1,3}, 周 标², 李燕君¹

(1. 浙江工业大学计算机科学与技术学院, 浙江杭州 310023;

2. 浙江工业大学信息工程学院, 浙江杭州 310023; 3. 浙江省可视媒体智能处理技术研究重点实验室, 浙江杭州 310012)

摘 要: 节能是无线网络的一个重要课题. 针对 IEEE 802.16e 标准第 2 类节能模型中监听窗口长度固定会导致一些空闲移动站因得不到及时休眠而浪费能量这一不足, 该文提出“两阶段可靠多播策略”, 让基站在第 1 阶段多播数据包, 在第 2 阶段对第 1 阶段丢失的数据包进行网络编码并重播. 该策略让移动站一旦空闲就进入休眠, 实现了时延约束下数据包的可靠传递. 仿真试验表明, 该策略可以降低能耗, 且移动站的占空比、能耗、吞吐率、丢包率等指标均优于传统的重传与确认方案.

关键词: 节能; 可靠数据传递; IEEE802.16e 标准; 多播

中图分类号: TN92 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2012) 08-1552-06

电子学报 URL: <http://www.ejournal.org.cn> **DOI:** 10.3969/j.issn.0372-2112.2012.08.009

Two-Stage Reliable Multicasting Scheme to Support Flexible Sleeping for Mobile Stations in WiMAX

ZHU Yi-hua^{1,3}, ZHOU Biao², LI Yan-jun¹

(1. School of Computer Science and Technology, Zhejiang University of Technology, Hangzhou, Zhejiang 310023, China;

2. School of Information engineering, Zhejiang University of Technology, Hangzhou, Zhejiang 310023, China;

3. Zhejiang Provincial Key Laboratory of Intelligent Processing Technology for Visual Media, Hangzhou, Zhejiang 310012, China)

Abstract: Power-saving is significant in wireless networks. To remedy the shortcoming in the power-saving class II of the IEEE 802.16e standard that energy is unnecessarily expended by the idle mobile stations (MSs) that are prevented from sleeping by the fixed length of the listening window, a two-stage reliable multicasting scheme (TRMS) is proposed, which lets a base station (BS) multicast during the first stage and remulticast, in the second stage, the network coded packets that contains the lost packets in the first stage. The TRMS enables MSs to sleep as soon as they become idle and realizes reliable packet delivery under delay constraint. Simulation shows that TRMS achieves power saving and outperforms the traditional retransmission and acknowledgement mechanism in terms of duty cycle, energy consumption, throughput, and packet loss rate.

Key words: power saving; reliable packet delivery; IEEE 802.16e standard; multicasting

1 引言

WiMAX (Worldwide interoperability for Microwave Access) 支持两种网络结构: PMP (point-to-multipoint) 结构和 mesh 结构. 前者以基站为中心, 移动站收发数据需要通过基站中继; 后者是无中心的网状结构.

IEEE 802.16e 标准^[1]引入了节能模式 (Power Saving Mode), 让无数据传输任务的移动站切换到低功耗状态, 以降低能耗. 移动站的工作模式可分为两类: 活跃模式和休眠模式. 当它处于休眠模式时, 它关闭无线电接口, 这时, 它与基站之间不能传递数据. IEEE 802.16e 给出

了 3 类节能: 类型 I、类型 II 和类型 III^[1]. 其中, 类型 II 是为 UGS (Unsolicited grant service) 和 RT-VR (Real-Time Variable Rate) 等连接制定的, 其主要特征为: 休眠窗口固定不变.

在 PMP 网络中, 一个基站经常需要把相同内容的数据发送给多个移动站. 对此, 如果采用单播 (Unicast) 方式, 则基站需要重复操作, 把相同的数据包发送给各移动站, 只有在每个移动站均收到这个数据包之后, 基站才能发送下一个数据包. 这样, 当移动站数目较大时, 单播会带来较大的数据包传递时延, 从而会降低网络的吞吐率. 显然, 多播 (Multicast) 可以克服这一不足. 本文

着重研究时延约束下 PMP 结构中节能类型 II 的能耗和数据包可靠多播问题。

在节能类型 II 中,监听窗口长度是固定的.因此,在基站多播时,如果在接收方中存在一个链路可靠性较其他移动站差的移动站,则在这个移动站接收到全部数据包时,其他移动站可能早已收到数据包而一直处于空闲状态.于是,让这些空闲移动站尽早进入休眠,可以降低能耗.本文正是基于这种思想,主要贡献与创新之处在于:(1)提出了“两阶段可靠多播策略”,让移动站根据数据包接收情况灵活缩短监听窗口且延长休眠窗口长度,以此降低能耗;(2)利用网络编码对丢失的数据包进行编码再重传,这种方法不需要重传和确认,可以在时延约束下使接收方通过解码还原所丢失的数据包,让链路可靠性高的移动站提前进入休眠;(3)所提出的方案比传统的重传与确认方案节能。

2 相关工作

国内外学者对 WiMAX 的节能类型 II 已经做了一些研究.Hsu 等人^[2]提出了自适应监听窗口方案,根据到达的数据包数量、重传数据包数量以及时延约束动态地调整监听窗口长度,以降低数据包丢失率,同时降低能耗.Chen 等人^[3]用中国剩余定理得到最大不可用区间,提高了能量的效率.Huang 等人^[4]利用 OFDM(Orthogonal Frequency Division Multiplexing)帧的空闲片断来平衡能耗和带宽使用.当单播数据和多播数据共存时,Tian 等人^[5]提出基于调度集合的集成调度算法,根据能耗最小原则,将所有的移动站划分到多播调度集合或单播调度集合中,以达到降低终端能耗的目的.Cohen 等人^[6]考虑了能耗和吞吐量的权衡问题,以优化信道吞吐量和系统的能耗.卢文伟等人^[7]提出一种利用网络编码的免重传路由算法,以降低能耗.本文的“两阶段可靠多播策略”采用网络编码技术,允许移动站在直接接收到或者通过解码间接得到基站多播的所有数据包时就切换到休眠模式(不管其他移动站是否仍在接收数据包),以此达到节能的目的。

3 两阶段可靠多播灵活休眠策略

采用节能类型 II 时,移动站的操作时间由监听时间段和休眠时间段交替组成.本文称监听窗口长度与休眠窗口长度之和为移动站的操作周期,记为 $T_C = T_L + T_S$,其中 T_L 和 T_S 分别表示监听窗口和休眠窗口长度。

IEEE 802.16 支持全双工通信,常用时分复用和频分复用.从移动站到基站的通信链路称为上行链路 UL(Up Link),而相反方向的链路称为下行链路 DL(Down Link).

本文基于以下假设:

(1)网络中有一个基站 BS 和 m 个移动站 $MS_1, MS_2, \dots, MS_m (m > 1)$;

(2)移动站均采用节能类型 II 进行休眠,且具有相同的操作周期;

(3)各个移动站与基站之间建立基于时分复用模式的无线通信链路,基站用 DL 链路多播数据包,移动站用 UL 链路对所接收到的数据包进行确认(Acknowledgement, ACK)或者对错误数据包进行负确认(Negative ACK, NACK);

(4)以 DL_i 表示 BS 到 MS_i 的 DL 链路, UL_i 表示 MS_i 到 BS 的 UL 链路,设 DL_i 链路数据包传递失败概率为 $p_i (i = 1, 2, \dots, m)$,且 $p_1 \leq p_2 \leq \dots \leq p_m$;考虑到 ACK 和 NACK 包所占的字节数很小,出错的概率可以忽略,本文假设 UL_i 链路可以无差错地传递 ACK 和 NACK 包。

把移动站的监听窗口(即监听时间段)分成多个称为帧(frame)*的时间片段,且每一个帧由 DL 帧和 UL 帧组成(如图 1).在 DL 帧内,BS 多播数据包给 MS_i ,而在 UL 帧, MS_i 将各自的 ACK 或者 NACK 传递给基站($i = 1, 2, \dots, m$).

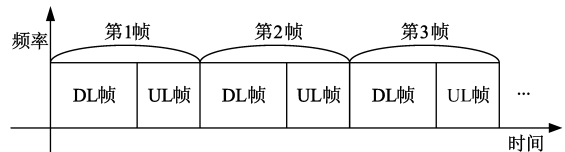


图1 TDD模式的帧结构

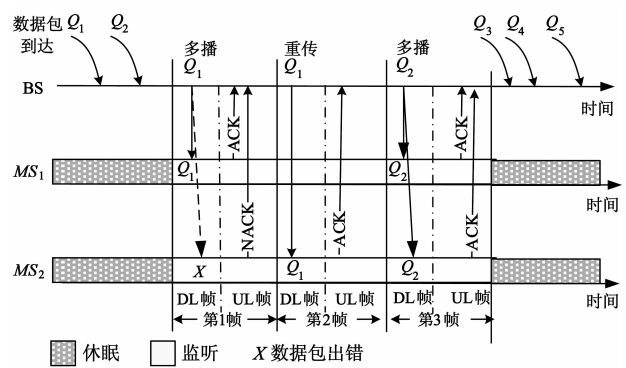


图2 BS多播及移动站接收数据包示例

例如,在图 2 所示的具有两个 MS 的 PMP 多播模型中, Q_1, Q_2, \dots 表示到达基站 BS 的数据包,节点的监听窗口由 3 个帧构成,且 BS 在 DL 帧内广播数据包, MS_1, MS_2 在 UL 帧内发送 ACK 或 NACK 给 BS;虚线箭头表示移动站接收数据包出错,实线箭头表示正确接收.图 2 中,BS 在多播 Q_1 时, MS_1 接收正确,但 MS_2 接收出错,于是 MS_1 和 MS_2 在 UL 帧内分别向 BS 发送 ACK 和

* 在 IEEE 802.16e 标准中, frame(本文译为“帧”)表示一个时间段。

NACK 包.

很明显,在图 2 中, MS_1 在第 1 帧内已经正确接收到 Q_1 ,但它在第 2 帧内处于空闲状态,因为第 2 帧用于重传 Q_1 给 MS_2 . 这样,导致 MS_1 的能量浪费. 事实上,此时让 MS_1 提前休眠,就可以降低能耗. 例如,让 BS 采用以下两阶段多播策略: 第 1 阶段,不管 MS 是否正确接收,把所缓存的数据包(即 Q_1 、 Q_2)逐一多播出去;第 2 阶段,对接收到 NACK 的数据进行重播(重传). 如图 3 所示,BS 把 Q_1 、 Q_2 逐一多播出去之后,再对 Q_1 进行重播. 这样, MS_1 可以提前休眠,即从监听窗口的第 3 帧开始休眠,比图 2 节省能量.

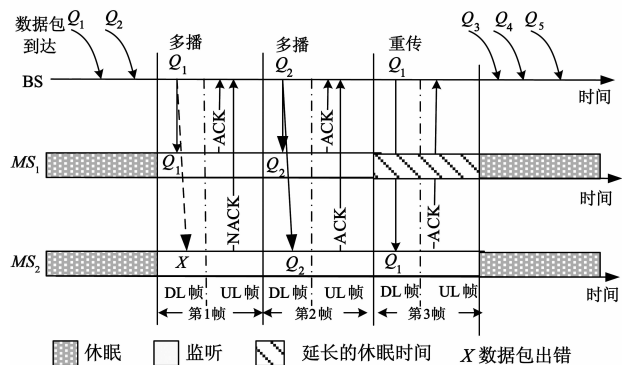


图3 “两阶段可靠多播”策略

本文提出的“两阶段可靠多播灵活休眠策略”(简称“两阶段可靠多播策略”)正是基于上述思想,而且在第 2 阶段采用基于线性网络编码的免重传与确认方案^[7],让 BS 把多个需要重播的数据包进行编码,形成多个编码包以确保各移动站可通过解码获得所丢失的数据包,然后将编码包进行多播.

在操作周期为 T_c 时,休眠窗口长度为 $T_c - T_L$,其中, T_L 是监听窗口长度,它由 RT-VR 的最大速率设定. 基本要求是,在操作周期到达的所有实时业务数据包在监听窗口内都能发送给移动站. 诚然,在采用“两阶段可靠多播”策略时,数据包传递时延可能会增大,而且,数据包到达 BS 越早,其传递时延就越大. 因此,需要充分考虑数据包的时延问题. 设 D 为数据包的时延约束(单位:帧). 在操作周期 T_c 不变的情况下,可以动态调整 T_L 的大小,使时延约束 D 生效.

如图 4, MS_1 和 MS_2 的休眠窗口均为 4(帧),监听窗口均为 2(帧),即操作周期为 6 个帧,且时延约束 $D = 4$ (帧). 为便于说明,假设在每一帧内 BS 可发送 2 个数据包. 图中,第 1 个操作周期内到达了数据包 Q_1 和 Q_2 ,因到达时刻移动台正在休眠,它们等到第 2 个操作周期开始时在监听窗口的第 1 个帧发送. 显然,其时延不大于 D . MS_1 和 MS_2 在成功接收到 Q_1 和 Q_2 后从监听窗口的第 2 个帧开始进入第 2 次休眠,这样休眠窗口增大了一个帧. 在第 2 次休眠期间,数据包 Q_3 、 Q_4 、 Q_5 、 Q_6 到达;

在第 3 个操作周期的监听窗口的第 1 帧发送 Q_3 和 Q_4 且在第 2 帧发送 Q_5 和 Q_6 . 假如在 BS 多播 Q_3 和 Q_4 时, MS_2 全部正确接收,但 MS_1 接收 Q_3 正确且接收 Q_4 出错;在 BS 多播 Q_5 和 Q_6 时, MS_2 接收 Q_5 出错、 Q_6 正确,但 MS_1 接收 Q_5 正确、 Q_6 出错. 因此,需要重传 Q_4 、 Q_5 和 Q_6 . 如果采用常规重传方法,需要占用 1.5 个帧. 但是,本文采用网络编码,只需 1 个帧. 方法如下: BS 将 Q_4 、 Q_5 和 Q_6 进行线性网络编码,生成两个编码包之后再重播(即以多播方式进行重传). MS_1 利用之前收到的 Q_5 与两个编码包(用高斯消元法)可解出 Q_4 和 Q_6 . 而 MS_2 仅丢失 Q_5 ,所以只需要成功接收一个编码包就可以利用之前接收到的 Q_4 和 Q_6 解出 Q_5 . 至于如何进行线性编码并确保接收方能够解码,我们将在下一节进行详细叙述.

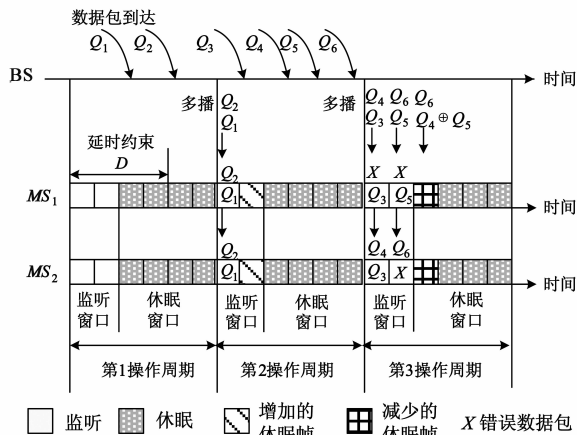


图4 基于网络编码两阶段可靠多播

4 利用网络编码的可靠重播方法

设在 T_s 时间内有 N 个数据包到达 BS. 在 BS 多播完 N 个数据包之后,用 S_i 表示 MS_i 丢失的数据包集合,由于链路 DL_i 的失败率为 p_i ,则 $|S_i| = Np_i$,其中, $|S_i|$ 表示集合 S_i 的元素个数. 为了使 MS_i 接收到 $|S_i|$ 个数据包,BS 的平均重播次数 $R_i = \lceil |S_i| / (1 - p_i) \rceil$. 其中符号 $\lceil x \rceil$ 表示取不小于 x 的最小整数. 由上述假设(4)可知, $|S_1| \leq |S_2| \leq \dots \leq |S_m|$,且 $R_1 \leq R_2 \leq \dots \leq R_m$.

现在,考虑在时延约束 D (帧)下 BS 对所有丢失的数据包进行重播问题. 称 BS 在平均一个帧内发送的数据包个数为“服务率”,记为 μ ,则第 2 阶段可用的最长时间为 $K = D - \lceil N/\mu \rceil$ (帧),且在这段时间内 BS 可发送 $K\mu$ 个数据包. 以 S_R 表示 BS 在第 2 阶段重传数据包的集合, L 表示把 S_R 的数据包进行网络编码之后所生成的编码包个数. 为了使 BS 在时间长度 K 内尽可能多地重播数据包,我们采用以下免重传与确认可靠重播算法:

步骤 1 如果 $R_m \leq K\mu$ (意味着在第 2 阶段,可以确

保证链路失败率最高的 MS_m 接收到所有丢失的数据包), 则取 $S_R = \cup_{i=1}^m S_i$, 且 $L = R_m$, 转到步骤 3.

步骤 2 如果存在整数 $j < m$ 满足: $R_j \leq K\mu$ 且 $R_{j+1} > K\mu$, 则取 $S_R = \cup_{i=1}^j S_i$, 且 $L = R_j$, 转到步骤 3. 否则, 转到步骤 6.

步骤 3 在有限域 F_2^a 内取 L 个不同元素 $a_i, i = 1, 2, \dots, L$; 生成 L 组一维编码向量 $(a_i^0, a_i^1, \dots, a_i^{L-1})$, $i = 1, 2, \dots, L$; 则其中任何 $|S_R|$ 个向量是线性无关的, 这是因为它们组成了值不为 0 的范得蒙行列式^[7].

步骤 4 不妨设 $S_R = \{Q_1, Q_2, \dots, Q_{|S_R|}\}$. 对 S_R 的所有数据包进行线性网络编码, 生成编码包:

$$P_i = a_i^0 Q_1 + a_i^1 Q_2 + \dots + a_i^{L-1} Q_{|S_R|} \quad (1)$$

$i = 1, 2, \dots, L$

步骤 5 BS 多播编码包 $P_i (i = 1, 2, \dots, L)$.

步骤 6 结束.

对于任一个 $MS_i (i = 1, 2, \dots, m)$, 它在接收到 $|S_i|$ 个编码包之后, 把在第 1 阶段已经正确接收到的数据包代入式(1), 可以得出含 $|S_i|$ 个变量的满秩线性方程组, 依此可解出在第 1 阶段未能成功接收的所有数据包. 之后, 它不再接收别的数据包而进入休眠. 在 BS 重播阶段, 所有无丢失数据包的 MS_i 直接进入休眠模式. 这就是本文“两阶段可靠多播策略”的核心所在.

值得说明的是, 在 BS 所发送的编码包中, 需要把编码向量以及 S_R 包含进去, 使得接收方据此顺利解码.

5 基于网络编码的两阶段可靠多播策略性能分析

首先, 考虑上节提出的免重传确认重播算法(下称“本文方法”)的复杂度. 在算法的步骤 1 和步骤 2 中, 最多需要比较 $|S_R|$ 次, 即复杂度为 $O(|S_R|)$; 在步骤 3 中, 为了取得 L 个不同的元素 a_i , 需要比较的次数为 $L(L-1)/2$, 即复杂度为 $O(L^2)$; 步骤 4 仅涉及 L 次线性运算. 因此, “本文方法”的复杂度为 $O(L^2)$.

其次, 对“本文方法”与传统重传与确认方法(简称“传统方法”)的数据包重传次数进行比较. 在“传统方法”中, BS 需要对每一个有丢包的移动站进行重传且移动站需要进行确认. 为了把一个数据包发送给 MS_i , BS 平均发送次数为 R_i , 因此, BS 需要发送 $|S_i| R_i$ 次才能把 $|S_i|$ 个数据包逐一发送给 MS_i ; 而且, MS_i 在接收到 BS 的数据之后, 共需要发送 ACK 包 $|S_i|$ 次. 因此, “传统方法”对所有移动站重传数据包的总次数为

$$N_0 = \sum_{i=1}^m (|S_i| R_i + |S_i|) \quad (2)$$

“本文方法”总共发送次数为 L , 由上节步骤 1 和步骤 2

可知 $L \leq R_m$. 由此及式(2)可得: $L < N_0$, 也就是说, 在重传数据包次数方面, “本文方法”优于“传统方法”.

最后, 利用仿真对“本文方法”和“传统方法”的每个移动站每个操作周期的平均能耗(一个操作周期内总能耗与节点数 m 的比值)、占空比(节点的活跃时间与总时间的比值)、吞吐率(单位时间成功传递数据包个数)、丢包率(丢弃的数据包数与到达 BS 的数据包总数的比值)等指标进行对比. 本文从 BS 角度, 按如图 5 所示的逻辑对“两阶段可靠多播策略”进行仿真. 其中, t 用于推进时间, 每次推进一个时间单位; $doze$ 表示 MS 所处的状态: $doze = 0$ 表示活跃状态, $doze = 1$ 表示休眠状态; CPN 用于记录在一个操作周期内到达 BS 缓存的所有数据包数; $BufferNum$ 表示当前操作周期内监听窗口需要多播的数据包数; $ElapsedTime$ 记录算法执行的总时间; $Wtime$ 和 $Stime$ 分别表示累积活跃时间和休眠时间; T_{tot} 表示算法需要执行的总时间; D 是时延约束; PN_{Tot} 和 PN_{Succ} 分别表示到达 BS 的数据包总数和 BS 成功传递到 MS 的数据包总数; E_W 和 E_S 分别为 MS 在活跃状态和休眠状态单位时间的能耗. 此外, 对

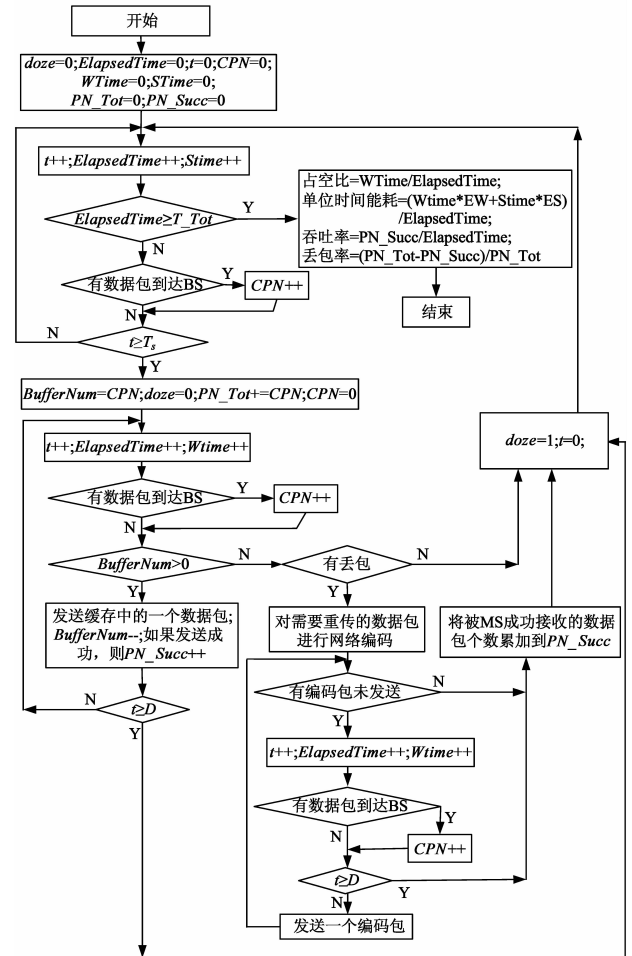


图5 仿真逻辑

于给定的链路失败概率 p , 本文采用产生一个随机数 r 的方法模拟数据包是否被成功传递: 在 $r > p$ 时, 认为数据包传递成功. 以下各图所给出的仿真结果是根据图 5 的逻辑, 对 $T_{tot} = 500\text{s}$ 运行 1000 次的平均值.

固定帧时间长度 $5\text{ms}^{[1,2]}$, $T_C = 30$ 帧, $T_L = 2\lambda T_C/\mu$ (即监听窗口长度与 λ 成正比)^[2], 其中 λ 为数据包到达速率; $D = T_L + 1$; $E_W = 280\text{mW}/\text{帧}^{[2]}$, $E_S = 10\text{mW}/\text{帧}^{[2]}$, $\mu = 2$. 此外, 假设数据包到达符合泊松过程^[8]. 固定各节点的链路失败概率为 0.1, 让 $\lambda = 0.1, 0.2, \dots, 0.5$, 取 $m = 32$ 和 $m = 64$, 得到图 6~9. 图中, PSCII 表示采用节能类型 II 的“传统方法”, TRMS 表示“本文方法”. 从图 6 和图 7 可以看出: (1) 随着数据包到达率的增大, “本文方法”和“传统方法”的占空比和能耗也随着增大, 这与直观是吻合的, 因为数据包到达率的增大会引起节点接收更多的数据包, 从而引起节点的活跃时间延长; (2) 对于占空比和能耗, “本文方法”均优于“传统方法”; (3) 节点数 m 的变化对两种方法的占空比和能耗影响甚微. 从图 8 和图 9 可以看出: 随着数据包到达率的增大, “本文方法”和“传统方法”的吞吐量增大但丢包率减小, 这是因为: 数据包到达率 λ 的增大, 会引起单位时间内到达系统的数据包数增大, 从而导致吞吐量增大; 同样会使监听窗口 T_L 增大, 从而延长了监听时间, 使丢包率得以减小.

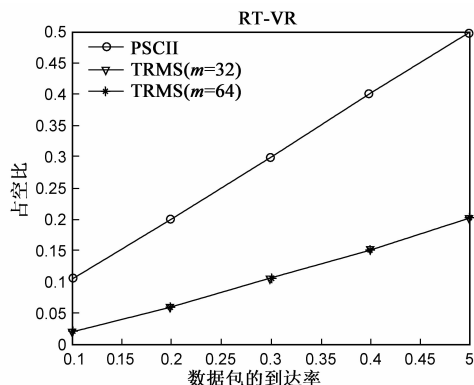


图6 数据包到达率对占空比的影响

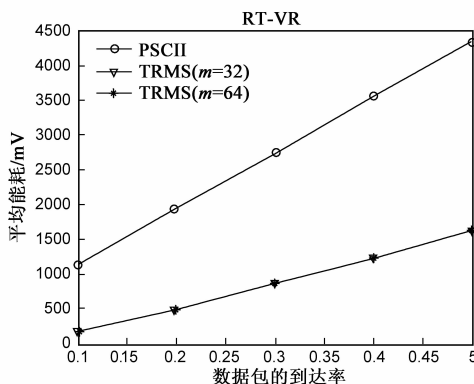


图7 数据包到达率对能耗的影响

此外, 在固定数据包到达率 $\lambda = 0.3$, 让链路失败概率取 0.1, 0.2 和 0.3, MS 的个数分别取为 $m = 32$ 和 $m = 64$ 的情况下, 仿真结果表明: (1) “本文方法”的占空比、能耗、吞吐量、丢包率均优于“传统方法”; (2) 随着链路失败概率的增大, “本文方法”和“传统方法”的占空比、能耗和丢包率也随着增大, 而吞吐量逐渐减小, 这与直观是吻合的; (3) 在数据包到达率 λ 给定的情况下, 链路失败概率的变化对“传统方法”的占空比、能耗影响甚微, 这是因为 λ 给定意味着 T_L 与 T_S 均给定, 这就确定了“传统方法”中各移动站的占空比及能耗. 此外, 移动站个数 m 的变化对各个移动站的平均能耗影响甚微 (因篇幅所限, 此处省略结果图).

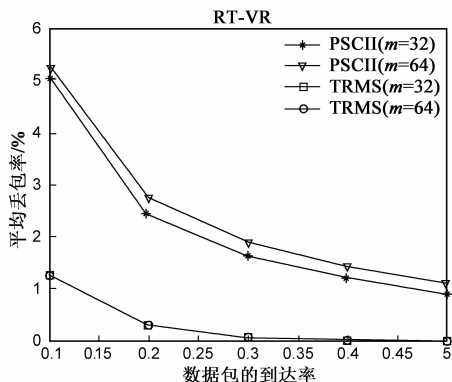


图8 数据包到达率对丢包率的影响

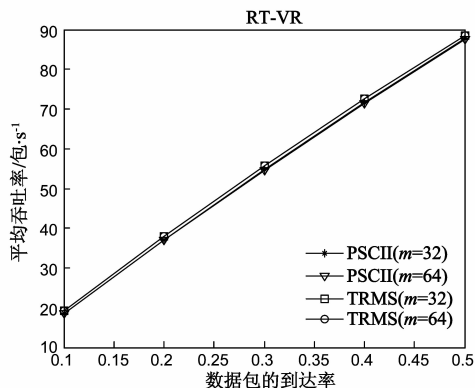


图9 数据包到达率对吞吐率的影响

总而言之, 不管是数据包到达率变化, 还是链路失败概率变化, “本文方法”在移动站占空比、能耗、系统吞吐量、丢包率等方面均优于“传统方法”.

6 结束语

节能对延长基于 IEEE 802.16e 标准无线网络的生存时间是非常重要的, 本文所提出的“两阶段可靠多播策略”可以克服 IEEE 802.16e 标准第 2 类节能模式因监听窗口长度固定浪费能量这一不足, 可以降低能耗, 并且在时延约束下实现数据包的可靠传递. 所提出的策略使用了网络编码, 使得基站在重传数据包时不需要接收站点的确认, 可以确保接收站点成功解码, 达到了

节能与提高吞吐率的目的。

参考文献

- [1] IEEE Computer Society. IEEE Standard for Local and Metropolitan Area Networks-Part 16: Air Interface for Fixed and Mobile Broadband Wireless Access Systems [S]. 2006.
 - [2] C -H Hsu, K -T Feng. Performance enhancement and analysis for IEEE 802.16e/m sleep mode operations with unsolicited grant service/real-time variable-rate connections[J]. IET Communications, 2010, 4(9): 1083 - 1094.
 - [3] T -C Chen, J -C Chen, Y -Y Chen. Maximizing unavailability interval for energy saving in IEEE 802.16e wireless MANs [J]. IEEE Transactions on Mobile Computing, 2009, 8(4): 475 - 487.
 - [4] S -C Huang, R -H Jan, C Chen. Energy efficient scheduling with QoS guarantee for IEEE 802.16e broadband wireless access networks[A]. The 2007 International Conference on Wireless Communications and Mobile Computing [C]. New York: Association for Computing Machinery, 2007. 547 - 552.
 - [5] L Tian, Y Yang, J Shi, E Dutkiewicz, G Fang. Energy efficient integrated scheduling of unicast and multicast traffic in 802.16e WMANs [A]. IEEE Telecommunications Conference, GLOBECOM[C]. Washington, DC, 2007. 3478 - 3482.
 - [6] R Cohen, L Katzir. 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.
 - [7] 卢文伟, 朱艺华, 陈贵海. 无线传感器网络中基于线性网络编码的节能路由算法[J]. 电子学报, 2010, 38(10): 2309 - 2314.
- Lu Wen-wei, Zhu Yi-hua, Chen Gui-hai. Energy-efficient routing algorithms based on linear network coding in wireless sensor

networks[J]. Acta Electronica Sinica, 2010, 38(10): 2309 - 2314. (in Chinese)

- [8] Yi-hua Zhu, Victor C M Leung. Efficient power management for infrastructure IEEE 802.11 WLANs [J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2010, 9(7): 2196 - 2205.

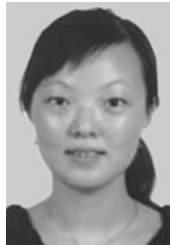
作者简介



朱艺华 男, 1961年生, 博士, 教授, 博士生导师, 主要研究方向无线网络协议、算法与性能分析. E-mail: yhzhu@zjut.edu.cn



周 标 男, 1984年生, 硕士生, 主要研究方向为无线网络节能算法.



李燕君 女, 1982年生, 博士, 副教授, 主要研究方向传感器网络算法、协议及服务质量.