

基于信道状态的 WiMAX 系统实时调度算法^{*}

冯慧芳, 赵亮, 陈媛媛

(西北师范大学 数学与信息科学学院, 兰州 730070)

摘要: 介绍了 M-LWDF、EXP 和 CD-EDD 三种经典的实时调度算法, 并在此基础上提出一种基于信道状态的 WiMAX 系统的实时调度算法 CBRTS(channel-based real-time scheduling)。该算法核心思想是在数据链路层中考察物理层信道的传输条件, 从而进一步将有限的无线资源更加合理地分配给用户。仿真结果表明, 提出的算法具有更高的吞吐量、更小的时延和丢包率, 能满足实时业务的 QoS 要求。

关键词: WiMAX; 实时调度; 服务质量; 信道状态

中图分类号: TP393.01; TP301.6

文献标志码: A

文章编号: 1001-3695(2013)01-0224-03

doi:10.3969/j.issn.1001-3695.2013.01.057

Channel-based real-time scheduling algorithm for WiMAX system

FENG Hui-fang, ZHAO Liang, CHEN Yuan-yuan

(College of Mathematics & Information Science, Northwest Normal University, Lanzhou 730070, China)

Abstract: This paper introduced three classic real-time scheduling algorithm named M-LWDF, EXP and CD-EDD. Then it proposed a real-time scheduling algorithm called CBRTS which based on the channel condition. The main idea of the algorithm was to find a more reasonable distribution of limited wireless resources for the users by analyzing the transmission conditions of the physical layer. The simulation results show that the CBRTS algorithm can reach higher throughput, smaller delay and packet loss rate, and are able to meet the QoS requirements of real-time businesses.

Key words: WiMAX; real-time scheduling; QoS; channel condition

0 引言

WiMAX(worldwide interoperability for microwave access)属于新一代宽带无线城域网(wireless metropolitan area networking, WMAN)的接入技术, 特指以 IEEE 802.16 系列标准为基础的宽带无线接入技术, 也叫做 802.16 无线城域网或 802.16^[1]。WiMAX 以高传输带宽、多类型业务支持能力以及灵活高效的组网方式, 成为当前通信领域发展的热点。

作为有竞争力的下一代无线网络技术, WiMAX 对不同业务提出了 QoS(quality of service)保证服务。WiMAX 技术定义了四种类型的业务^[2]: 主动授权业务(unsolicited grant service, UGS)、实时轮询业务(real-time polling service, RTPS)、非实时轮询业务(non real-time polling service, NRTPS)和尽力而为业务(best effort, BE)。各类服务连接的优先级按照从高到低的顺序可排列为 UGS、RTPS、NRTPS、BE。

IEEE 802.16 标准支持点到多点(point to multipoint, PMP)和 Mesh 网络两种拓扑结构^[3]。PMP 结构即一个基站(base station, BS)为多个子站(sub station, SS)提供服务, 从 BS 到 SS 的链路称为下行链路, 从 SS 到 BS 的链路称为上行链路, 业务仅在 BS 和 SS 之间传送。Mesh 网络采用多个基站以网状网方式扩大无线覆盖区。其中, 有一个基站作为业务接入点(SAP)与核心网相连, 其余基站以无线链路与该 SAP 相连。作为

SAP 的基站既是业务的接入点又是接入的汇聚点, 而其余基站并非简单的中继站(relay station, RS)功能, 同时也是业务的接入点。

与非实时业务相比, 实时业务除了同样对传输带宽具有一定要求以外, 更重要的是对传输时延有严格要求, 如果一个实时业务分组无法在特定的超时期限内完成端到端的传输, 对终端用户来说就很可能已经失效, 从而严重影响了用户的 QoS。另外, 由于无线信道的带宽相对有限, 并且还具有时变衰落落的特性, 在实时业务分组调度算法的设计过程中必须综合考虑实时用户的信道条件、发送队列状态、用户 QoS 要求等多种因素。本文研究 WiMAX 系统实时业务的调度算法。

目前, 虽然有很多基于无线网络分组调度算法研究的文献资料^[4-10], 但大部分仍处在有待完善的阶段。对于实时调度算法, 比较经典的是 Andrews 和 Elsayed 等人^[5,6]提出的 M-LWDF(modified largest weighted delay first)、EXP(exponential rule)算法。这两种算法在调度过程中同时考虑了队首分组等待时间与用户信道条件。虽然这种综合的考虑能够提高用户的分组时延性能, 但是由于算法过分强调了队首分组等待时间的重要性, 削弱了用户信道条件的影响力。在此基础上文献[7,8]分别提出了改进算法 M-EXP(modified exponential rule)和 CD-EDD(channel-dependent earliest-due-date)算法。然而, 通过实际的仿真分析发现, 与 EXP 算法相比, 这些算法并没有

收稿日期: 2012-04-24; **修回日期:** 2012-06-11 **基金项目:** 国家自然科学基金资助项目(61072063); 甘肃省科技计划资助项目(1107RJZA234); 西北师范大学青年教师科研能力提升计划资助项目(NWNU-LKQN-11-4)

作者简介: 冯慧芳(1971-), 女, 甘肃古浪人, 副教授, 博士, 主要研究方向为计算机网络性能评价(fenghuifang2003@163.com); 赵亮(1986-), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为计算机网络性能评价; 陈媛媛(1983-), 女, 硕士, 主要研究方向为计算机网络性能评价。

获得明显的性能改善^[9]。

本文分析 M-LWDF、EXP 和 CD-EDD 算法,提出一种考虑无线信道状态的实时调度算法。

1 调度算法

1.1 经典的实时业务调度算法

根据实时业务对传输时延十分敏感的特性,Bell 实验室的 Andrews 等人^[5]将分组超时率作为衡量无线分组调度算法性能的主要指标。对于任意的用户 i ,其分组超时率的定义为

$$P(W_i > T_i) \leq \delta_i$$

其中: W_i 为用户 i 的队首分组在发送队列中的等待时间, T_i 为用户 i 所接收实时业务的超时期限; δ_i 是用户 i 所接收实时业务的分组超时率上限。

M-LWDF 算法主要思想是充分考虑分组数据包的时延和如何利用信道信息平衡的考虑,同时考虑用户优先级、用户当前信道质量和数据包的队列时延等因素。

M-LWDF 的表达式为

$$j = \arg \max_i \left\{ -\log(\delta_i) \times \frac{\mu_i(t)}{\bar{\mu}_i} \times \frac{W_i(t)}{T_i} \right\}$$

其中: $\mu_i(t)$ 为用户 i 在 t 时刻的传输速率,反映了用户瞬时信道状态; $\bar{\mu}_i$ 为用户 i 的平均速率,这里同时也考虑了用户的公平性,使得信道条件差的用户都能够得到服务; $W_i(t)$ 为用户 i 的队首分组在 t 时刻的等待时间,由此可见分组数据包在队列等待中等待的时间越久,其传输优先级就越高; T_i 是用户 i 在队列中等待的时延限制,当分组数据包等待时间超过该时延限制,则被基站从队列中丢弃,因此时延要求越大,其传输优先级也就越小; σ_i 是 QoS 参数用来区别不同 QoS 优先级的用户,公式中 $-\log(\delta_i)$ 一项使具有较低分组超时率上限的用户具有较高的调度优先级。

EXP 算法的表达式为

$$j = \arg \max_i \left\{ a_i \times \frac{\mu_i(t)}{\bar{\mu}_i} \times \exp \left(\frac{a_i \cdot W_i(t) - \overline{aW}}{1 + \sqrt{aW}} \right) \right\}$$

其中: $\overline{aW} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N a_i W_i(t)$, $a_i = \frac{-\log(\delta_i)}{T_i}$ 。与 M-LWDF 算法相比,EXP 算法通过使用分组队首延迟 $W_i(t)$ 的指数形式进行调度,当所有用户的 $W_i(t)$ 比较接近时,指数系数接近 1,此时 EXP 与 M-LWDF 算法接近;当一个用户的分组队首延迟比较大时,指数项不再考虑信道状态而直接提高该用户的优先级。

CD-EDD 算法的表达式为

$$j = \arg \max_i \left\{ a_i \times \frac{\mu_i(t)}{\bar{\mu}_i} \times \frac{W_i(t)}{d_i(t)} \right\}$$

其中: $d_i(t) = T_i - W_i(t)$,表示用户 i 的队首分组在 t 时刻到达最大延迟要求前的剩余时间。该算法的基本原理就是选择最早到达 deadline,并且信道状况最好的用户作为被优先调度的对象。不仅考虑了每个实时业务用户之前获得的平均数据速率,以达到用户间的公平性,而且根据信道状况分配资源的策略能获得多用户分集的效果,争取最大化系统的吞吐量。

M-LWDF 和 EXP 算法在调度过程中同时考虑了队首分组等待时间与用户信道条件。虽然这种综合的考虑能够提高用户的分组时延性能,但是由于算法过分强调了队首分组等待时间的重要性、削弱了用户信道条件的影响力,对于因信道质量

很差而无法发送的数据流并没有提供补偿措施,并不利于保持长期的公平性。CD-EDD 是改进算法,然而通过实际的仿真分析发现,与 M-LWDF 和 EXP 算法相比,该算法并没有获得明显的性能改善^[9]。

1.2 CBRTS 算法

以上算法虽然都考虑信道特征,但都存在一定的局限性。为了降低数据包被丢弃的概率,提高系统吞吐量,需要对信道状态差的用户进行优先级补偿。鉴于以上算法的缺点,本文提出一种基于信道状态的 WiMAX 系统的实时调度算法(CBRTS)。该算法的表达式为

$$j = \arg \max_i \begin{cases} -\log(\delta_i) \times \frac{\mu_i(t)}{\bar{\mu}_i} \times \exp \left(\frac{W_i(t)}{d_i(t)} \right)^{\alpha_i} & \alpha_i > 1 \\ -\log(\delta_i) \times \frac{\mu_i(t)}{\bar{\mu}_i} \times \exp \left(\frac{W_i(t)}{d_i(t)} \right)^{\alpha_i} \times \omega_i & 0 < \alpha_i < 1 \\ \text{packetDropped} & \alpha_i = 0 \end{cases}$$

其中: $\alpha_i = \frac{\text{SNR}_i(t)}{\text{SNR}_i}$; $\text{SNR}_i(t)$ 为 t 时刻用户 i 的信噪比; SNR_i 为用户 i 的平均信噪比; ω_i 为用户 i 长期没得到服务的补偿值, $\omega_i = \frac{T_i}{d_i(t)}$ 。

当 $\alpha_i = 0$ 时,说明信道已坏,故丢包;当 $\alpha_i > 1$ 时,说明信道状态好,采用第一个分式进行调度;当 $0 < \alpha_i < 1$ 时,说明信道的状态较差,采用补偿机制的第二个分式进行调度。CBRTS 调度公式使用分部函数的目的是让信道状态差的用户能够得到补偿调度,从而降低丢包率。

指数函数中 $W_i(t)$ 与 $d_i(t)$ 的比值是大于等于 1 的,所以指数函数的增长速率高于相应的直线函数的增长速率。第一、二个分式中都有指数函数,但是信道差的节点 α_i 和节点的速率都会相应地降低很多,第二个分式的值就会降低。这样信道状态好的节点就越容易得到调度。

$\omega_i = \frac{T_i}{d_i(t)}$,当 T_i 的值一定时, $d_i(t)$ 的值越小, ω_i 的值越大,则第二个分式得到调度的机会就越大。即当信道质量差时,优先调度剩余时间小的用户,这样可能会降低系统吞吐量,但是减少系统丢包率,而且能更好地保证公平性。

2 仿真实验

本文采用 NS-2.34 进行仿真实验,WiMAX 模块使用美国 NIST 模块,PMP 拓扑结构为一个 BS 和四个 SS。业务服务类型为 RTPS 和 UGS,其中 UGS 作为背景流。UGS 类业务是主动授权业务,该类业务是用于传输周期性的、包大小固定的实时数据。BS 周期性地强制调度,也就是说 UGS 业务一旦申请成功,在传输过程中就不需要再去申请带宽。

各站各类业务数据包到达服从参数 λ 值的泊松过程,信道的信噪比 SNR 值服从参数为 15 的瑞利分布,仿真时间为 20 s,具体的参数如表 1 所示。

2.1 吞吐量

图 1~3 分别为节点 1、2 和系统的吞吐量,同时将 CBRTS 与 M-LWDF 算法进行比较。从图 1 可看出,CBRTS 算法的吞吐量基本都大于 M-LWDF 算法的吞吐量,CBRTS 算法的吞吐

量平均值为 179.05 kbps, M-LWDF 算法的吞吐量平均值为 173.6 kbps。从图 2 得出,除了个别点外, CBRTS 吞吐量大于 M-LWDF 算法, CBRTS 算法的吞吐量平均值为 84.45 kbps, M-LWDF 算法吞吐量的平均值为 80.8 kbps。在图 3 中, CBRTS 算法的系统吞吐量平均值为 263.5 kbps, 而 M-LWDF 算法的吞吐量平均值为 254.4 kbps。总之, CBRTS 算法的吞吐量明显比 M-LWDF 算法高。

表 1 网络环境参数

参数	值
信道带宽/MHz	5
信道的 SNR 值	参数为 15 的瑞利分布
RTPS 类业务	节点 1 和 2
UGS 类业务	节点 3 和 4
RTPS 类业务的最大延迟/ms	40
UGS 类业务的最大延迟/ms	20
数据包/Byte/个	224
数据包平均到达速率/kbps	200(节点 1、3) 100(节点 2、4)

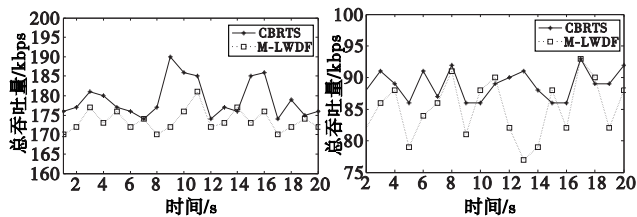


图1 节点1的吞吐量

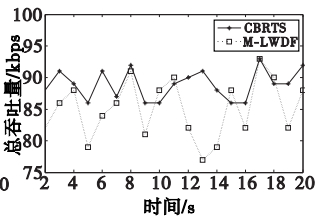


图2 节点2的吞吐量

2.2 丢包率

图 4、5 给出了节点 1 和 2 不同调度算法的丢包率, 明显地, 新算法 CBRTS 的丢包率小于 M-LWDF 算法。图 4 中节点 1 的 CBRTS 算法的丢包率平均值为 13 packets/s, M-LWDF 算法的丢包率平均值为 15.55 packets/s。图 5 中节点 2 的 CBRTS 算法的丢包率平均值为 6.1 packets/s, M-LWDF 算法的丢包率平均值为 8.95 packets/s。事实上, 与 M-LWDF 算法相比, CBRTS 算法对平均速率较低的用户进行优先级补偿, 所以降低了数据包被丢弃的概率。

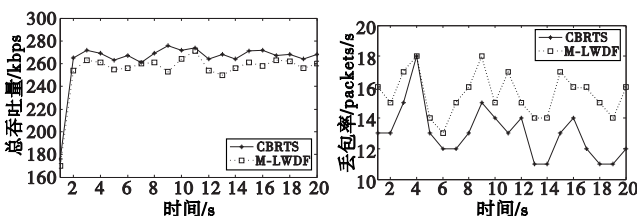


图3 系统吞吐量

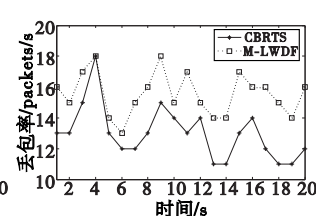


图4 节点1的丢包率

2.3 延迟

图 6 和 7 分别是节点 1 和 2 端到端延迟。从图 6 很难分辨出 CBRTS 和 M-LWDF 算法的优劣。计算得到节点 1 采用 CBRTS 算法的平均延迟为 34.50 ms, 采用 M-LWDF 算法的平均延迟为 33.30 ms, 也就是说 CBRTS 算法的延迟稍高于 M-LWDF 算法。经过计算, CBRTS 算法的延迟抖动(即延迟方差)为 4.578 9, 而 M-LWDF 算法延迟抖动为 11.694 7。

从图 7 可得到节点 2 采用 CBRTS 算法的平均延迟为 33.55 ms, 采用 M-LWDF 算法的平均延迟为 35.65 ms, CBRTS 算法的延迟小于 M-LWDF 算法。计算得到 CBRTS 算法的延迟抖动为 2.786 8, 而 M-LWDF 算法延迟抖动为 11.818 4。

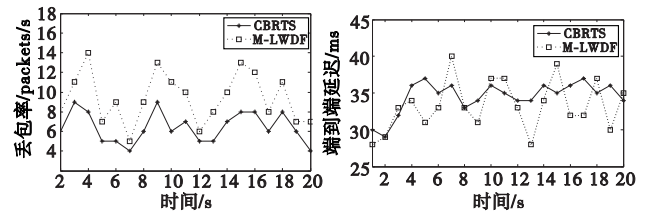


图5 节点2的丢包率

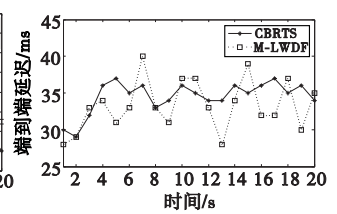


图6 节点1的端到端延迟

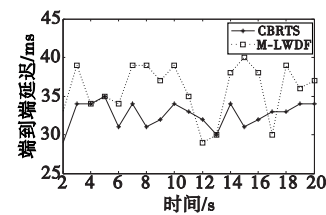


图7 节点2的端到端延迟

总之, 通过仿真实验可知, CBRTS 算法的性能优于 M-LWDF 算法。

3 结束语

本文分析了 WiMAX 系统几种经典的实时调度算法, 并在此基础上提出了一种基于信道状态的实时业务调度算法 CBRTS。仿真结果表明, 与 M-LWDF 算法相比, 该算法具有更高的吞吐量、更小丢包率和延迟抖动, 能满足实时业务的 QoS 要求。今后笔者将在更复杂的网络环境中检验新算法的有效性, 并进一步完成公平性研究。

参考文献:

- [1] 刘丹谱, 郝建军, 乐光新. WiMAX 宽带无线接入技术及其应用[J]. 中兴通讯技术, 2008, 14(1): 57-60.
- [2] IEEE Std 802. 16-2004, IEEE standard for local and metropolitan area networks part 16: air interface for fixed broadband wireless access systems[S]. 2004.
- [3] SO-IN C, JAIN R, TAMIMI A K. Scheduling in IEEE 802. 16e mobile WiMAX networks: key issues and a survey [J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2009, 27(2): 156-171.
- [4] WU S J, HUANG S Y, HUANG Kuo-feng. Efficient quality of service scheduling mechanism for WiMAX networks [J]. Computer Communications, 2012, 35(8): 936-951.
- [5] ANDREWS M, KUMARAN K, RAMANAN K, et al. CDMA data QoS scheduling on the forward link with variable channel conditions [R]. [S. l.]: Bell Laboratories, 2000.
- [6] ELSAYED K M F, KHATTAB A K F. Channel-aware earliest deadline due fair scheduling for wireless multimedia networks[J]. Wireless Personal Communications, 2006, 38(1): 233-252.
- [7] SHAKKOTTAI S, STOLYAR A L. Scheduling for multiple flows sharing a time-varying channel: the exponential rule[J]. Analytic Methods in Applied Probability, 2002, 207: 185-202.
- [8] KHATTAB A K F, ELSAYED K M F. Channel-quality dependent earliest deadline due fair scheduling schemes for wireless multimedia networks[C]//Proc of the 7th ACM International Symposium on Modeling, Analysis and Simulation of Wireless and Mobile Systems. New York: ACM Press, 2004: 31-38.
- [9] 吴宇. 无线网络分组调度算法研究[D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2008.
- [10] XIAN Yong-ju, TIAN Feng-chun, XU Chang-biao, et al. Analysis of M-LWDF fairness and an enhanced M-LWDF packet scheduling mechanism[J]. Science Direct, 2011, 18(4): 82-88.