

提高宽带固定无线接入系统吞吐量的技术研究^{*}

吴伟民¹ 朱光喜¹ 沈 钊²

(华中科技大学电信系 武汉 430074)¹ (海军工程大学 武汉 430033)²

摘要 本文从现有的一些提高宽带无线接入系统性能的技术出发,分析了它们克服无线通信缺陷的一些解决思路,总结出要提高宽带无线接入系统性能的关键在于提高现有带宽的利用率和增加系统对无线信道误帧的容忍性。然后,有针对性地提出了采用上行带宽集中动态分配策略以提高带宽利用率,采用 MR-ARQ 机制和多速率重传策略以降低系统对 SNR 的要求的解决方案,从而提高系统容量。

关键词 宽带无线接入, 多拒绝自动请求重传, 带宽分配, 无线链路

Research of Improving the Throughput of BWA System

WU Wei-Min¹ ZHU Guang-Xi¹ SHENG Zhao²

(E. I. Depart. Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074)¹ (Navy Engineer Univ., Wuhan 430033)²

Abstract In this paper, we begin with some existing technologies improving capability of BWA system, analyzing some resolvers of overcoming communication defects, and finally summarize that the key of improving the capacity of BWA system is to enhance the utilization ratio of existing bandwidth and the tolerance to the frame error of wireless channel. And then, we adopt the resolvers that centralized and dynamic allocation strategy in uplink to enhance the utilization ratio of bandwidth, and MR-ARQ and multi-rate retransmission strategy to enhance the tolerance to SNR.

Keywords Radio link control(RLC), Reliable mode, Endeavour-reliable mode, NO-aCK mode

1 前言

目前,固定无线接入在国际上一直是一个热门话题。同有线接入系统一样,固定无线接入系统经历了由窄带系统到宽带系统,由面向话音业务到面向数据、多媒体业务的转变。然而由于无线网络的通信信道存在着高误码率、高误帧率、带宽受限的特点,因而在这里高达百分之一的帧丢失率并不是罕见的,并且由于错误是突发的而不是均匀等间隔的分布在数据包流中,这就给该无线系统对 TCP 及语音业务的支持带来了很大的困难。如何使得宽带无线接入系统适应这种复杂的信道环境,减少多径效应、同频干扰、邻频干扰给系统带来的影响,已成为近年来国内外无线通信领域讨论的热点话题之一。目前,主要的解决方案集中在通过改进信道级的 FEC、信息级的 ARQ 和调制方式三个层面上的技术来减少 BER,提高系统容量。

笔者对一些能够改善无线链路上可靠性的技术方案进行了比较分析,发现在数据链路层上的 LLC 子层中采用合理、有效的 ARQ 机制是在保证系统可靠性要求的前提下获得系统高容量的一个突破点。本文将以前人的工作作为突破点,结合 BWA 系统的特性,从带宽利用率、ARQ 机制和业务划分策略等多个方面进行改进型研究,使得 BWA 系统获得更高的容量,满足宽带无线接入的需要。

2 系统容量提高研究

近年来,在宽带无线接入(BWA)系统中保证较高的带宽利用率,提升系统容量,是 BWA 的发展趋势,也是目前研究

的热点之一。同有线接入系统相比,无线接入系统的瓶颈主要在于:可用带宽受限和信道条件差。考虑到这一点,如何提高系统容量的问题便明朗化了,即需要从最大限度地利用有限带宽和降低突发误帧对系统性能的影响两方面入手,采用合理的带宽分配机制和 ARQ 机制来提升系统容量。

2.1 上行集中动态带宽分配

无线信道由于传输条件特殊,造成信号强度的动态范围非常大。这就使发送站无法使用冲突检测的方法来确定是否发生了冲突。因此,当前应用最为广泛的无线局域网(IEEE 802.11 协议)采用了 CSMA/CA 的随机接入技术,来确保信号的无竞争发送。然而,在 802.11 协议中采用了发送 RTS 和 CTS 来实现 CSMA/CA 机制,这就在一定程度上使整个网络的效率有所下降,尤其在点对多点的无线接入系统中,更是会造成带宽的巨大浪费,以及系统性能的急剧下降。于是,为了最大限度地利用有限的带宽资源,可以在无线接入系统中采用以 AP(Access Point)为中心的上行集中动态带宽分配机制。

以 AP 为中心的集中带宽控制,由 AP 根据 CPE 的上行数据分配请求,智能地、主动地为多个 CPE 分配相互不重叠的发送时间区间,同时考虑 CPE 之间的定时偏差可能带来的发送冲突,实现精确到微秒级 CPE 的完全受控发送,保证固定无线接入系统(如 IEEE 802.11a)高的带宽利用率,并避免 CSMA/CA 机制带来的时延不确定性。这样,既减低了发送冲突的概率,又有效地减少了 RTS/CTS 的带宽损耗。此外,我们屏蔽 802.11a MAC 层的 ACK,并在 LLC 子层使用多拒绝 ARQ(MR-ARQ)技术来保证数据的可靠传输,同时降低原

^{*} 基金项目:国家自然科学基金资助项目(60496315),国家 863 计划项目;国家 863 计划十五通信主题项目 B3G 课题资助(2003AA12331005)。

吴伟民 博士,现主要从事宽带无线通信技术研究。

有 MAC 层 ACK 造成的带宽浪费和附加的时延开销。

以 802.11a 固定无线接入系统为例,初步估计采用了上行集中动态带宽分配技术的无线接入系统的带宽利用率为:

$$\eta_B = \frac{T_{MR} - T_{CON} - T_{RES} - (n-1) * T_P}{T_{MR}} \quad (1)$$

其中: T_{MR} : 表示一个基本的带宽分配周期,即一个基本的 beacon 周期; T_{CON} : 表示预留的 beacon 帧发送时间及上下行保护间隔; T_{RES} : 表示两个 beacon 周期间的保护间隔; T_P : 表示两个 CPE 间的保护间隔; n : 表示存在的 CPE 个数。

从上式可得出,采用动态集中带宽分配机制的系统其带宽利用率决定于两个因素,一是 beacon 周期的大小;二是接入 CPE 的个数。在可用带宽固定的条件下,接入 CPE 个数过多,将导致各个 CPE 可用带宽的下降。此外, T_{MR} 的大小也对带宽利用率 η_B 存在直接影响, T_{MR} 增大将会使得 η_B 增加,有利于有效带宽的增加,但另一方面 T_{MR} 的增加将会导致传输时延及时延抖动增大。考虑到语音业务对时延及时延抖动的敏感性,在实际系统中,我们一般设定一个 beacon 周期为 4TU (1TU=1024us),此时通过(1)式,结合其它参数的相应设置 ($T_{CON} = 5BLK$, $T_{RES} = 3BLK$, $T_P = 2BLK$, 1BLK = 64us),不难得出,在接入两个 CPE 的情况下,系统的带宽利用率可以达到 84.4%。

2.2 多拒绝 ARQ 机制

由于无线网络环境存在着 BER 高、带宽低及能量有限等特点,使得它需要一种性能良好的差错控制机制在保证数据可靠传输的同时仍能保证系统的高容量,为此我们在固定宽带接入系统中采用 MR-ARQ 机制来保证系统的可靠传输,减少系统对 SNR 的需求。

自动重传请求 (ARQ) 是一种保证数据包在通信链路端到端之间正确传递的网络协议。在有线环境下,信道传输的错误率较低 (10^{-6} 以下), ARQ 协议如后退 N 步算法 (GBN)、选择性重传 (SR) 算法能以较高质量保证链路对等端之间各种数据的有效传递。而在无线环境下,信道具有误码率高、延迟时间长且不可靠等特点。在此情况下如果仍然采用标准的 ARQ 协议势必造成频谱效率低、系统吞吐量小及数据传输时延大等各种问题。因此,一种能够在无线的不可靠传输环境下进行有效错误控制的传输机制必不可少。为此,我们采用了一种全新的 MR-ARQ 机制来保证不可靠链路上的可靠传输。

简要介绍一下 MR-ARQ 的工作原理,如图 1 所示。标准的 ARQ 协议如 GBN-ARQ 或 SR-ARQ,其应答 (ACK 或 NAK) 都是针对每一个接收数据包而言的,这种方式在有线数据传输中工作得很好。但在无线环境下,接收端如果针对每一个数据包都回传一个应答包势必造成大量的无线资源浪费及过大的延迟进而造成系统吞吐量下降;而 MR-ARQ 协议则基于这样一种方式:存在一个固定的 ARQ 周期 T_{MR} ,发送方每个周期从发送窗口中发送若干数据 PDU,对每个数据 PDU 顺序编号,同时每个周期收到接收方回传的一个 ACK 包,每个 ACK 包采用适当的组织方式表示出当前正确或错误接收到的 PDU 包的序号。而在发送方收到此 ACK 包后采取选择性重传方式将需要重传的数据包在当前位置逐次发送。接收方为了保证正确的向上提交顺序,从接收窗口中收到此重传数据包后可将缓冲区中当前数据包按 PDU 头中的序号顺序向网络层提交。而发送方在等待 ACK 的过程中进行新一轮数据传输,这样不断循环从而使数据能有效地从一个对等端传递到另一个对等端。

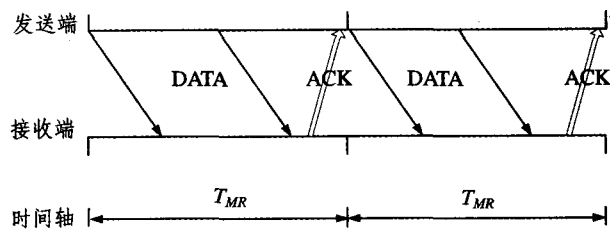


图 1 MR-ARQ 工作原理图

在讨论 MR-ARQ 机制的性能时,为了分析简单,我们仅讨论半双工通信模型。首先考虑控制信道无误帧的情况,并做如下假定:

假定一:数据帧出现差错(包括帧丢失)的概率为 p_f ;

假定二:发送方的发送缓冲区的容量无限大,且保证发送节点处于饱和态,允许重发的次数不受限制;

假定三:发送数据帧长度固定为 l_f ;

假定四:接收缓冲区的容量为无限大而且永远不会溢出;

假定五:确认效率 l_{ACK} 足够大,一次可以确认的数据超过一次发送的数据。

观察图 1 就可以发现,在不出差错时,成功地发送一个数据帧需要的时间是 t_f 。而在固定周期 T_{MR} 中,需要重传帧的平均数为:

$$\delta = \lambda_{max} * p_f \quad (2)$$

其中,每周期最多发送的数据帧数为:

$$\lambda_{max} = \eta_B * \frac{T_{MR}}{t_f} \quad (3)$$

于是,当出现差错时,重发一个数据帧所需的时间为 $\frac{T_{MR}}{\delta}$ 。参照连续 ARQ 协议中关于平均单向时延的公式,本文所采用的 MR-ARQ 协议,在不考虑控制信道误帧的条件下,正确传送一个数据帧所需的平均时间为:

$$t_{AV} = t_f + (1 - p_f) \sum_{i=1}^{\infty} i p_f^i \frac{T_{MR}}{\delta} \quad (4)$$

$$\alpha = \frac{t_{MR}}{\lambda_{max} * t_f} \quad (5)$$

则有,

$$t_{AV} = t_f (1 - p_f + \alpha) / (1 - p_f) \quad (6)$$

所以,在发送节点处于饱和状态的情况下,吞吐量的最大值是:

$$\beta_{max} = 1 / t_{AV} = (1 - p_f) / t_f (1 - p_f + \alpha) \quad (7)$$

归一化的吞吐量为:

$$\rho_{MR} = \beta * t_f \leq (1 - p_f) / (1 - p_f + \alpha) \quad (8)$$

传统的连续 ARQ 中,正确传送一个数据帧所需的平均时间为:

$$t_{AV} = t_f (1 - p_f + \varphi * p_f) / (1 - p_f) \quad (9)$$

归一化吞吐量的表达式为:

$$\rho_C = 1 / t_{AV} = (1 - p_f) / (1 - p_f + \varphi * p_f) \quad (10)$$

其中, $\varphi = t_r / t_f$, t_r 为出现差错时,重发一个数据帧所需的时间。

通过(8)式和(10)式,不难发现在 p_f 较小时,MR-ARQ 机制同传统的连续 ARQ 相比,其归一化吞吐量虽略小,但在 $p_f \rightarrow 0$ 时, $\rho_{MR} \rightarrow \rho_C$;但当信道质量较差,即 p_f 较大时,MR-ARQ 的性能明显优于传统的连续 ARQ,并且其吞吐量和单向时延受 p_f 的影响要小于连续 ARQ 机制。

(下转第 78 页)

因此 $N_{fault}=4$ 被我们认为是探测错误节点合适的值。

总结 本文中,我们提出了 E-BFQ 容忍存储节点的拜占庭失效。相比传统拜占庭 Quorum 系统, E-BFQ 减少了提供正确数据的存储节点数目,利用纠错码提高了存储空间利用率,并且 E-BFQ 可探测故障节点并动态调整故障阈值,从而减少了读 Quorum 规模,提高了效率。

参考文献

- 1 Kim J M, Manabe Y. A Byzantine Fault-Tolerant Mutual Exclusion Algorithm and its Application to Byzantine Fault-Tolerant Storage Systems. In: Proceedings in 25th IEEE Conference on Distributed Computing Systems Workshops, 2005
- 2 Malkhi D, Reiter M K. Byzantine quorum systems. Distributed

- Computing, 1998, 11(4): 203~213
- 3 Alvisi L, et al. Dynamic Byzantine Quorum Systems. In: Proceedings of International conference on Dependable Systems and Networks, 2000
- 4 Goodson R G, et al. Efficient Byzantine-tolerant erasure-coded storage. In: 2004 International Conference on Dependable Systems and Networks, 2004
- 5 Kong L, et al. Agile Store: Experience with Quorum-based Data Replication Techniques for Adaptive Byzantine Fault Tolerance. In: IEEE Symposium on Reliable Distributed Systems, 2005
- 6 Cooley J A, et al. Software-based Erasure Codes for Scalable Distributed Storage. In: Proceedings of the 20 th IEEE/11th NASA Goddard Conference on Mass Storage Systems and Technologies (MSS'03), 2003
- 7 Zhang Z, Lian Q. Reperasure: Replication Protocol using Erasure-code in Peer-to-Peer Storage Network. 2002
- 8 Frolund S, et al. A Decentralized Algorithm for Erasure-Code Virtual Disks. in Dependable Systems and Networks, 2004

(上接第 37 页)

下面我们进一步探讨控制信道存在误帧情况下 MR-ARQ 的性能。假定每个确认帧仅能确认一个周期的发送数据。在 MR-ARQ 机制中,当数据 ω 个周期都未收到确认,则进入超时重传状态,发方自动重发该帧。那么当控制信道的误帧概率为 p_c ,周期仍然为 T_{MR} 时,重发一个数据帧所需的时间为:

$$\begin{aligned}
 t_{RT} &= \frac{T_{MR}}{\delta} (1-p_c) + \left(\frac{T_{MR}}{\delta} + T_{MR} \right) \cdot p_c (1-p_c) + \dots \\
 &+ \left[\frac{T_{MR}}{\delta} + (\omega-1) \cdot T_{MR} \right] \cdot p_c^{\omega-1} (1-p_c) + \\
 &\left[\frac{T_{MR}}{\delta} + (\omega-1) \cdot T_{MR} \right] \cdot p_c^{\omega} \\
 &= \frac{T_{MR}}{\delta} + T_{MR} (1-p_c) \sum_{i=1}^{\omega-1} i \cdot p_c^i + T_{MR} (\omega-1) p_c^{\omega-1} \quad (11)
 \end{aligned}$$

结合式(4)式和(11)式,在考虑控制信道误帧的条件下,正确传送一个数据帧所需的平均时间为:

$$\begin{aligned}
 t_{AV} &= t_f + (1-p_f) \sum_{i=1}^{\infty} i p_f^i t_{RT} \\
 &= t_f [1 + (\Psi-1) p_f] / (1-p_f) \quad (12)
 \end{aligned}$$

其中 $\Psi = \frac{t_{RT}}{t_f}$ (13)

此时归一化吞吐量的表达式为:

$$\begin{aligned}
 \rho_{CE} &\leq t_f / t_{AV} \\
 &\leq (1-p_f) / (1-p_f + \Psi \cdot p_f) \quad (14)
 \end{aligned}$$

可见,控制信道的误帧对系统的吞吐率会产生很大的影响。实际上,我们采用的 MR-ARQ 机制,由于确认效率足够大,一定程度上减小了控制误帧对系统性能的影响。仿真结果表明,采用 MR-ARQ 机制的系统对控制信道误帧的适应性,优于采用传统的 ARQ 机制的系统。

综上,我们可以得出以下结论:在误码率较高、突发误帧较多的无线通信系统中,采用 MR-ARQ 机制要比传统的 ARQ 机制要好。

3 系统级仿真

根据以上分析,我们采用二状态 Markov 的仿真信道模型进行了系统级仿真。着重仿真了采用上行集中动态带宽分配和 MR-ARQ 的系统(优化后的系统)对 TCP 业务的支持性能。

仿真中,设用户数为 5,每个用户一个 TCP 连接,每个 TCP 连接的业务量仍是 10M 字节,则总业务量就是 50M 字节。对于 FTP 下载业务,仿真显示下行信道 10% 误帧率,上行信道零误帧时,进行优化后的系统和未进行优化的系统,在 TCP 业务吞吐量的比较存在一定的差异,如图 2 所示。

图 2 中,优化后的系统平均吞吐率曲线比未进行优化的

系统平均吞吐率有一定的提高。这可以由仿真数据计算出的平均吞吐率来说明,未优化系统的平均吞吐率是 27.2Mbps,进行优化后的系统平均吞吐率是 29.6Mbps,后者比前者增加了 8.82%。且由于出现了大量的多次重传,未进行系统性能优化的系统存在较大抖动,流量不明显。

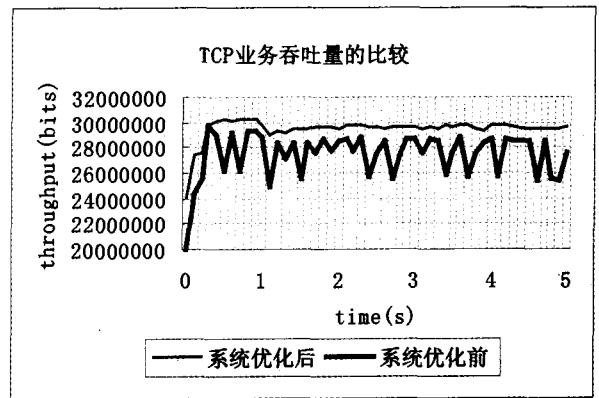


图 2 系统性能优化前后 TCP 业务吞吐量的对比图

此外,采用了上行集中动态带宽分配的系统对带宽资源的有效使用率达到了 82.3% 以上,这相对于现有的 IEEE 802.11a 等固定宽带无线接入系统 60% 左右的带宽利用率来讲,已经有了很大的提高。

结束语 本文所论述的上行集中动态带宽分配和 MR-ARQ 机制已经成功运用于 5.8GHz 固定无线接入系统的项目中,经过验证,改进后的宽带无线接入系统具有如下性能优点:

采用上行集中动态带宽分配的策略后提高了带宽利用率,减少了冲突造成的误帧。

采用多拒绝 ARQ 机制(MR-ARQ),系统对控制信道误帧不敏感,尤其是对采用 TCP 提供的传输服务的业务造成的性能影响基本可以忽略。在 5% 的控制信道误帧率和 10% 的数据信道误帧率条件下,系统吞吐量仍然可以接近理论值。

以上结果表明,采用了上行集中动态带宽分配和多拒绝 ARQ 机制的宽带固定无线接入系统在系统容量上有了较大的提高。

参考文献

- 1 Masamura T. Towards 4th generation mobile communications. In: CIC2002, Monte Carlo Resort, USA, 2002. USA: CSREA Press, 2002
- 2 Kumar V. Wireless communications beyond 3G. Alcatel Telecommunications Review, 1st Quarter 2001
- 3 徐昌彪. 无线应用中 TCP 拥塞裁决技术的研究和分析. 计算机工程, 2001, 27(4): 98~100
- 4 周天翔, 蒋铃鸽, 铁玲, 等. 通过 ARQ 提高无线网络中的 TCP 吞吐量. 上海交通大学学报, 2002, 36(5): 633~636