

MAC 层实时业务满意度评价模型及基于满意度的包调度与资源分配方法

刘 涛 邱 玲

(中国科学技术大学个人通信与扩频实验室 合肥 230027)

摘 要: 该文给出了无线通信系统中 MAC 层可实现的评价用户 VoIP 业务和实时视频业务满意度的方法, 该方法根据 MAC 层统计的丢包率及丢包模式等信息计算当前业务的用户满意度。基于文中的业务满意度评价准则, 该文进一步提出一种在 WiMax 系统中基于满意度的包调度和资源分配算法。仿真结果表明, 该方法在保证系统获得较高吞吐率的同时, 能够更好的保证实时业务的满意度。

关键词: 无线通信; 服务质量; 满意度; 多用户调度; 资源分配

中图分类号: TN92

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2009)08-1908-06

MAC Layer Real-time Traffic Satisfaction Evaluation Model and a Satisfaction Based Packet Scheduling and Resource Allocation Algorithm

Liu Tao Qiu Ling

(Personal Communication Network and Spread Spectrum Lab.,
University of Science and Technology of China, Hefei 230027, China)

Abstract: In this paper, a practicable user traffic satisfaction evaluation model of the VoIP traffic and the real-time video traffic is proposed. This method calculates the user's traffic quality of experience according to the packet loss rate and the packet loss pattern measured in MAC layer. Using the proposed traffic satisfaction evaluation criterion, a satisfaction based packet scheduling and resource allocation algorithm is proposed. The simulation results show that, the proposed algorithm can provide better traffic satisfaction to users while keeping a high system throughput.

Key words: Wireless communication; Quality of Service(QoS); Traffic satisfaction; Multi-user scheduler; Resource allocation

1 引言

随着宽带无线接入技术的发展, 无线网络需要向用户提供语音、视频、互联网浏览、文件传输等多种业务并保证其服务质量(QoS)。不同的业务有不同的服务质量需求, 如何针对不同的业务给予相应的调度及资源分配以保证其 QoS, 是影响无线网络整体性能的关键因素之一。在以 WiMAX 为代表的新型宽带无线通信系统中, MAC 层的调度、无线资源分配及准入控制等机制是保证 QoS 的主要手段。作为调度与准入控制等算法的依据, 合理评价用户对业务服务的满意程度, 尤其是在无线网络 MAC 层准确评价用户获得服务的主观满意度, 以便进行更有效的调度与资源分配, 也成为一个问题。

E-Model^[1]是由 ITU-T 推荐的一种评价语音类业务用户体验的方法, 其通过大量的听众实测和分

析, 给出了一种通过客观参数计算 VoIP 业务用户主观体验的方法。文献[2]对 E-Model 进行了扩展, 并加入了人类对突发丢包及感官延迟效应的考虑。然而, E-Model 的评价模型中, 包含诸如语音强度, 单向链路时延, 设备编码失真及丢包率等众多因素, 不适合在无线 MAC 层中分析和评价当前 VoIP 业务的用户满意度。

对于视频类业务, 有许多文献研究其满意度评价方法, 并已经给出了多种评价视频业务质量的准则, 如 PSNR(Peak Signal to Noise Ratio), RMSE(Root Mean Squared Error), Peak Error^[3]等客观评价准则, DVQ(Digital Video Quality)、VQM(Video Quality Metric)^[3]等主观评价准则。文献[4]给出一种通过业务平均时延和平均速率来评价视频业务质量的方法, 但该方法没有考虑到视频业务自身的帧依赖特性; 文献[5]提出一种根据业务统计信息评价视频业务的方法。已有的评价方法, 往往需要在接收端对视频数据进行解码或者预先知道特定视频序列的统计信息, 在无线 MAC 层中, 这些都是难以

2008-08-28 收到, 2009-04-20 改回

国家 863 计划项目(2006AA01Z266), 国家自然科学基金(60496314)和国家 973 计划项目(2007CB310602)资助课题

实现的。

因此, 本文给出一种在无线 MAC 层根据丢包率(PLR)及丢包事件模式等信息评价语音和视频业务满意度的方法, 并采用该方法提出一种 WiMAX 系统中基于业务满意度准则的调度和资源分配方法。仿真结果表明, 该方法可以在保持系统较高吞吐率的情况下, 更好的满足用户 QoS 需求。

2 系统模型

本文所考虑的系统模型如图 1 所示。分类器将到达的 IP 数据包根据 5 元组(源、目的地址, 源、目的端口和协议类型)进行分类, 并分别存储到不同的业务流队列中, 各业务流队列长度有限; 分类器对各业务流进行类型辨识, 将获得的业务流类型与特征汇报至调度与资源分配模块。包调度与资源分配模块可以获得各业务队列的信息和物理层的信道信息。

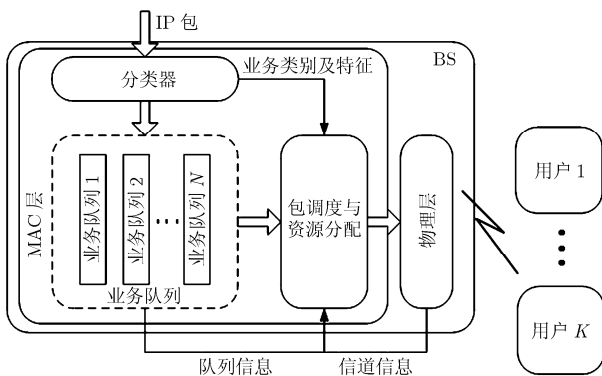


图 1 基于满意度调度的 WiMax 下行系统模型

考虑 WiMAX 系统下行链路, 包含一个基站和 K 个移动台。采用 WirelessMan- OFDMA^[6]的物理层。载波排列方式为“相邻载波排列方式”(“adjacent subcarrier permutation”)。最小频域资源为子信道(subchannel), 最小时域资源为时隙(slot)。自适应编码调制方式如表 1^[6]所示。表中对应的信噪比下, 当信道为加性高斯白噪声信道时, 经解码后的误码率小于 10^{-6} 。假设基站物理层可以获得各用户在每个子信道上的平均信噪比, 且设信道在一帧内保持不变。

3 业务的满意度评价

3.1 VoIP 业务的满意度

目前对 VoIP 业务语音质量的评价分为主观评价和客观评价两类。主观评价模型主要是 MOS 模型(Mean Opinion Score)^[7]; 客观评价方法主要有 PSQM 模型(Perceptual Speed Quality Measure)^[8]、

表 1 802.16e OFDMA 物理层编码调制方式

调制方式	码率	比特/符号	信噪比(dB)
QPSK	1/2	1	5
QPSK	3/4	1.5	8
16QAM	1/2	2	10.5
16QAM	3/4	3	14
64QAM	2/3	4	18
64QAM	3/4	4.5	20

PESQ (Perceptual Evaluation of Speech Quality)^[9]模型和 E-Model^[1]。

传统的测量方式不能反映延时、抖动和丢包等数据网络特有的问题。如在 ITU-T P.800^[7]中给出的平均主观值(MOS)。该主观评测把人接听和感知语音质量的行为进行调研和量化, 并由收听者进行打分。一般情况下 MOS 值为 4 或更高被认为是比较好的语音质量, 而若平均主观值 MOS 低于 3.6, 则大部分接听者不能满意语音质量。平均主观测试虽然准确有效, 但该方法需要有大量的听众打分实现, 无法在 MAC 层在线评价业务质量。ITU-T 的 G.107 推荐的 E-Model 考虑了延时、噪声、回音、编码器性能、丢包、抖动等因素对语音质量的影响, 是目前被广泛应用的语音业务评价方法。

在 E-Model 中, 将 VoIP 业务的质量 $R \in [0, 100]$ 定义为

$$R = R_0 - I_s - I_d - I_e + A \quad (1)$$

其中 R_0 表示语音信号的信噪比, I_s 表示由语音响度及量化噪声等因素带来的影响, I_d 表示由链路单向时延带来的影响, 包括发送端回音, 接收端回音等因素。 I_e 表示由网络设备带来的影响, 主要是语音编码及数据包丢失带来的影响。 A 是一个补偿因子, 表示听众的主观补偿作用。

通常情况下, 式(1)可以简化表达为^[2,10]

$$R = 94 - I_d - I_e \quad (2)$$

在文献[11]中, 给出了单向传输时延与 I_d 的关系。当单向传输时延小于 150 ms 时, I_d 所造成的影响可以忽略。在实际的 VoIP 业务传输中, 由于接收端缓冲区的限制, 对 VoIP 数据包的时延要求较严格。作为整个单向链路的一部分, 如果无线网络的 MAC 层能够保证更严格的时延要求, 例如保证时延小于 50 ms, 则可以忽略 I_d 对 VoIP 通话质量的影响。即式(1)中 R_0 , I_s , I_d 等因素对 VoIP 业务质量的影响与 MAC 层无关。因此, VoIP 业务的服务质量评价在 MAC 层中仅与 I_e 有关。

在 ITU 的 G.108 文档中, 给出了通过实测获得

的典型编解码器(Codec)中 I_e 与丢包率(Packet Loss Rate, PLR)的关系, 如表 2^[10]所示:

表 2 典型 Codec 中 I_e 与丢包率的关系

PLR(%)	I_e for G.729-A+VAD	I_e for G.723.1-A+VAD
0	11	15
0.5	13	17
1	15	19
1.5	17	22
2	19	24
3	23	27
4	26	32
8	36	41
16	49	55

表 2 中 G.729-A+VAD 即被广泛使用的 Skype 系统所采用的 Codec。已有许多文章采用该表中的结果来计算 I_e 对 VoIP 业务质量带来的损失, 如文献[2,12]。由于表 2 中的 I_e 与 PLR 的对应关系是离散的, 且 PLR 最大取值仅为 16%。要给出无线网络中 MAC 层 VoIP 业务满意度损失与 PLR 在整个 [0,1] 区间的关系, 需要对表中数值进行合理的拟合。

文献[12]中, 作者用 4 阶多项式对该组数据进行拟合并给出了表达式:

$$I_e = -0.009436x^4 + 0.1954x^3 - 1.458x^2 + 5.16x - 0.8902 \quad (3)$$

如图 2 所示, 多项式拟合的结果在 PLR 小于 16%时, 可以和实测结果吻合; 而随着 PLR 的增长, 其增长过快, 远超过 I_e 可能的最大值 100。因此, 需要采用其他合理的函数形式拟合实测值。

物理心理学的韦伯-费希纳定理(Weber-Fechner law)^[13]表明: 在一定的刺激范围内, 当物理刺激量呈指数变化时, 人类的心理感受呈线性变化。该类研究表明, 人类对声音的响度、对视觉的亮度、压力等物理刺激的反应与物理量的 log 函数成线性关系。由此, 本文对 VoIP 业务的丢包率对用户所

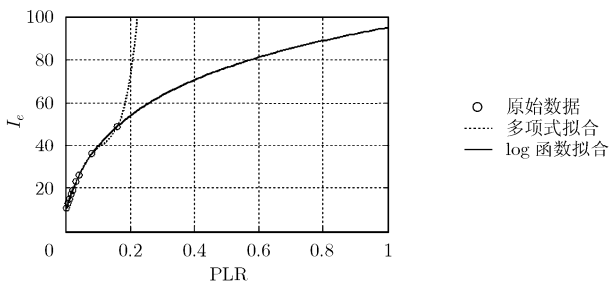


图 2 I_e 与 PLR 的关系及拟合结果

造成的感官损失用 log 函数的形式进行拟合, 其表达式为

$$f(x) = 29.09 \log(34.1x + 1.981) - 9.258 \quad (4)$$

其中自变量 x 即业务的丢包率。

拟合曲线如图 2 所示, 在 PLR 为 1 时, 其取值为 94.5, 可以与 E-Model 中的通常假设吻合。在无线通信系统中, 不同 Codec 所造成的损失与 MAC 层无关, 因此 VoIP 业务的满意度仅与 MAC 层中丢包率有关。将 I_e 与 PLR 的关系映射到 [0,1] 区间以表示不满意程度, 相应的 VoIP 业务的满意度与 PLR 的关系可表示为

$$s_{voip} = 1 - \frac{f(x) - f(0)}{f(1) - f(0)} = 1.236 - 0.3446 \log(34.10x + 1.981) \quad (5)$$

其中 x 即为该业务流的丢包率(PLR)。

3.2 实时视频业务的满意度评价

已有的研究视频业务服务质量的文章通过统计视频业务传输时所造成的失真, 并将其换算为 PSNR 等客观量来表示该类业务的满意度, 如文献[14, 15]。其在计算视频传输造成的失真时需要进行视频解码, 并与视频信源进行比较。这种评价方法无法在 MAC 层实现。文献[5]给出了一种通过视频的长时统计特性及丢包率获得视频服务质量的方法, 但是该方法需要知道所传输视频的统计特性, 如视频序列中帧间最大失真, 最小失真等, 这些参数亦无法在无线网络 MAC 层获得。

为此, 本文根据视频类业务的特点, 给出一种在 MAC 层能够获得的近似表达视频业务服务质量的评价方法。对视频类业务, 其传输的数据都采用了视频编码, 为了获得更高的压缩率, 在编码时会采用单向或双向预测编码, 典型的视频帧依赖关系如图 3 所示^[16]。

图 3 中所示为一个 GoP(Group of Pictures)中各帧的依赖关系。对用户而言, GoP 中的每一帧对用户体验的影响相同; 而对于视频解码器而言, 丢失不同类型的帧, 所导致的影响不同。如 I 帧丢失,

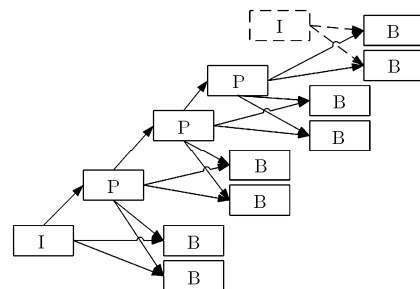


图 3 典型 GoP 依赖关系

则整个 GoP 中所有的帧都将无法解码;如 P 帧丢失,则依赖于它的帧将无法解码;如 B 帧丢失,则对其他帧的解码没有影响。设 B 帧丢失对一个 GoP 造成的损失为 Δ 。对如图 3 所示的 GoP 结构,即 IBBPBBPBBPBB 结构,丢失 I 帧所造成的损失为 12Δ ,丢失 3 个 P 帧造成的损失分别为: 11Δ , 8Δ , 5Δ ,各 B 帧丢失的损失均为 Δ 。若设整个 GoP 的损失为 1,则

$$\sum_{i=1}^{12} L_i = 44\Delta = 1 \quad (6)$$

其中 L_i 即第 i 帧丢失造成的损失。在一个 GoP 中,平均每丢一帧的损失为 $L_{average} = 44\Delta / 12 \approx 0.3056$ 。在码率较低的实时视频业务中,每个帧的编码数据一般由一个 IP 包承载,由此,我们可以根据 MAC 层传输中的丢包事件来推断当前传输的视频业务的相对传输质量。考虑到视频业务的数据帧间的依赖关系,其满意度不能简单的以 PLR 表示,还需考虑丢包的模式,即:连续丢包或独立丢包。这里连续丢包即指在一个 GoP 中丢失了多帧,而独立丢包则指丢包发生在不同的 GoP 间。至此,我们定义实时视频业务的短时平均损失 $L_{gop-aver} \in [0,1]$ 为

$$L_{gop-aver} = \frac{\sum_{i=1}^M L_{gop}(i)}{M} \quad (7)$$

其中 M 为进行平均的 GoP 个数, $L_{gop}(i)$ 为第 i 个 GoP 的损失:

$$L_{gop}(i) = \begin{cases} 1, & n_i \times L_{average} > 1 \\ n_i \times L_{average}, & \text{其他} \end{cases} \quad (8)$$

其中 n_i 为在该 GoP 中丢失的包数目。

文献[17]通过对现有的 IPTV 网络进行用户实测,证明了用户的体验与丢包频率呈 log 关系。考虑人类对视觉刺激的 log 特性,则用户对实时视频业务的短时平均满意度 $s_{rt-video}$ 应为 $L_{gop-aver}$ 的 log 函数值:

$$s_{rt-video} = \begin{cases} 1, & L_{aver_gop} < \nabla \\ \log(L_{aver_gop}) / \log(\nabla), & \text{其他} \end{cases} \quad (9)$$

其中 ∇ 是一个小正数,用以归一化满意度;同时,由于 log 函数在自变量为 0 时为负无穷,因此,令 $L_{aver-gop}$ 小于 ∇ 时,满意度为 1。

VoIP 业务的满意度与丢包率和实时视频业务与短时平均损失的关系如图 4 所示:

3.3 FTP 业务的满意度评价

FTP 业务是一种典型的未指定速率业务,其传输速率由 TCP 协议的拥塞控制和流控机制决定,与链路误码率和单向链路时延有关。在无线 MAC 层,仅考虑其丢包率。

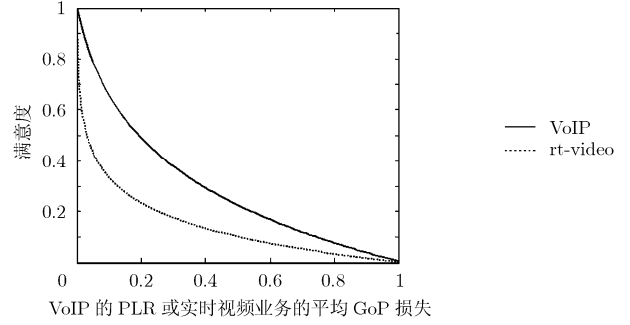


图 4 VoIP 业务的满意度与丢包率和实时视频业务与短时平均损失的关系

即 FTP 业务的满意度为

$$s_{FTP} = x \quad (10)$$

其中 x 即该业务流的丢包率。

4 基于满意度的包调度及资源分配方法

在此,根据上文所述的满意度评价方法,本文给出一种 WiMAX 系统中基于满意度的包调度和资源分配方法,简称 SBS-W。

调度器工作时,以 IP 包为单位,测量各业务流的丢包率和丢包模式,根据上文所述的满意度计算方法,求出各业务流的满意度,并根据各业务流中数据包的等待时间,分别计算出各 IP 包的 QoS 优先级。为了减少因考虑用户 QoS 满意度而带来的系统吞吐率损失,在调度时还应考虑业务流所属用户的信道质量。因此,本文用归一化可传输速率 r_k 对各用户的优先级进行加权,以获得多用户分集。 r_k 的表达式如下:

$$r_k = \frac{R_k}{R_{max}} \quad (11)$$

其中 R_k 为该用户本帧可以发送的比特数, R_{max} 是采用最高编码调制方式时,一帧可以发送的比特数。

设系统中每个用户只有一种业务,具体调度方法如下:

步骤 1 根据第 3 节所述的方法,计算各业务流的满意度 s_k ;

步骤 2 对 VoIP 和实时视频业务而言,第 k 个队列中的第 i 个 IP 包的权重为

$$w_{k,i} = \begin{cases} r_k \times (1 + \alpha - s_k), & \tau_{k,tar} - t_{k,i} \leq 2\tau_{frame} \\ r_k \times (1 + \alpha - s_k) \times \frac{t_{k,i}}{\tau_{k,tar}}, & \text{其他} \end{cases} \quad (12)$$

其中 r_k 为该业务流用户归一化可传输速率; $\tau_{k,tar}$ 为该业务流数据包超时门限; τ_{frame} 为物理层一帧的时间长度。 $t_{k,i}$ 是该 IP 包已经在队列中等待的时长; α 是一个小正数,用以保证在用户已经获得满意调度

时, 数据包权重不为 0。

对于 FTP 业务, 由于 TCP 协议 IP 包超时时间远大于 MAC 层帧长, 故不考虑数据包的等待延时, 而是考虑该业务流的队列长度。因此, FTP 业务队列中各 IP 包的权重为

$$w_{k,i} = r_k \times (1 + \alpha - s_k) \beta \times \frac{q_k - i + 1}{Q_k} \quad (13)$$

其中 β 是一个小正数, 用于降低 FTP 业务的权重, 以保证实时业务获得优先调度; i 是该数据包在队列中的序号, q_k 是该业务流当前队列长度, Q_k 是该用户队列最大长度。

步骤 3 对各业务流中的各 IP 包权重 $w_{k,i}$ 进行排序, 即得到需要发送数据包的顺序: $\{k_1, k_2, \dots: w_{k_1} > w_{k_2} > \dots\}$ 。

获得了调度顺序后, 开始为各 IP 包进行相应的资源分配, 算法如下:

步骤 1 选择当前发送优先级最高的数据包。

步骤 2 如果剩余的全部时频资源可以将该 IP 包发送完, 则转至步骤 3; 如果剩余的时频资源不足以发送任何一个 IP 包, 则跳出, 结束资源分配; 否则, 跳过该数据包, 转至步骤 1。

步骤 3 选择该 IP 包对应用户信噪比最高的子信道, 如果该子信道上可用的时频资源能够发送该数据包, 则将该包标记为已发送, 将其从发送队列中移除, 并更新该子信道上剩余的时隙数, 转至步骤 1。如果该子信道剩余的时隙无法将该包发完, 则将该子信道上的可用时隙数标为 0。更新该数据包需要发送的比特数, 转至步骤 3。

以上调度与分配过程, 综合考虑用户的满意度与其信道状况, 优先将资源分配给满意度权重高且信道状况好的用户, 在保证用户服务质量的同时, 还可以获得多用户分集增益。

5 仿真结果与分析

考虑 WiMAX 系统的信道带宽为 10 MHz, 载波频率为 2.5 GHz, 信道多径模型采用 WiMAX 协议推荐的信道 3 GPP2 traffic model C.R1002^[18] 的参数。系统包含共 1024 个子载波, 其中除去左右保护带、直流子载波及导频子载波后, 共剩余 720 个数据子载波, 分为 30 个子信道, 每个子信道包含 24 个相邻的数据子载波。下行子帧共 30 个数据 OFDM 符号, 采用 PUSC 模式, 每个时隙含 2 个 OFDM 符号。因此最小时频资源块为: $24 \times 2 = 48$ 个子载波。

仿真时采用 3 种业务, VoIP, FTP 和实时视频业务。其中 VoIP 与实时视频业务数据采集自

Polycom 公司的视频会议系统^[19]。假设 FTP 业务没有流控机制, 业务速率为固定值。3 种业务参数如表 3 所示:

表 3 仿真业务参数

	VoIP	RT-Video	FTP
速率	70 kbps	160 kbps	2 Mbps
业务数	10	10	10

图 5 是在 SNR 为 9 dB 到 20 dB 时, 采用最大化信噪比(MAX-SNR)的方法、基于满意度的方法(SBS-W)和采用正比公平性(PF)准则调度及资源分配得到的各类业务的平均满意度。可以看到, 采用基于满意度的方法调度时, 实时视频和 VoIP 业务获得的满意度较高, 均高于 PF 方法, 远高于 MAX-SNR 方法, 且在平均信噪比达到 14 dB 后基本为 1, 即完全满意; 而采用 MAX-SNR 方法, FTP 业务满意度高于两个实时类业务, 这是因为 FTP 业务的数据包超时时间远大于实时业务, 其因超时而丢包的数目基本为 0。因此, FTP 业务在采用 MAX-SNR 方法时, 丢包率远低于实时业务, 即其满意度高于实时业务。图中实时视频业务在较低信噪比下, 满意度低于 VoIP 业务, 这是因为实时视频类业务的包长大于 VoIP 类业务, 其平均包长为 1000 Byte 左右, 而 VoIP 业务固定为 520 Byte。在用户信道较差时, 会出现将全部资源分配给某个用户也无法发出一个完整包的情况, 而由于信道的变化存在时间相关性, 因此各用户都会有一段时间信道较差, 导致该时段内用户出现连续丢包, 进而显著的影响用户满意度。

图 6 是几种方法获得的吞吐率对比。基于满意度的方法(SBS-W)吞吐率低于 MAX-SNR 方法, 但高于 PF 方法。作为对比, SBS-only 方法为调度和资源分配时, 不考虑用户信道状况, 完全根据 IP 包

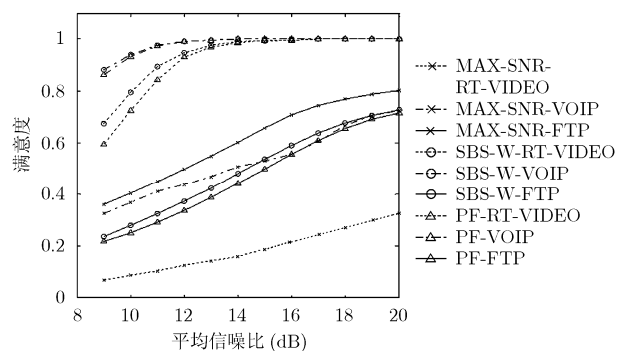


图 5 不同调度方法的平均业务满意度

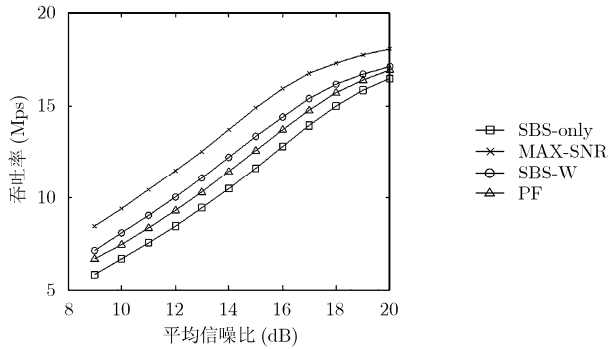


图 6 不同调度方法吞吐率性能

的 QoS 的优先级顺序进行资源分配。该方法与 SBS-W 方法间吞吐率的差异即 SBS-W 方法考虑用户信道状态而获得的多用户分集增益。MAX-SNR 方法完全不考虑用户的 QoS 需求, 仅根据用户信道情况来发送非空队列中的数据, 因此可以获得最佳的吞吐率性能。PF 方法为了保证用户间公平性, 会带来吞吐率损失。而本文提出的 SBS-W 在保证用户满意度的情况下, 优先调度信道状况更好的用户, 从而获得更好的吞吐率性能, 也因此可以在保证 VoIP 和实时视频业务的同时, 提供更多带宽给 FTP 业务, 从而提高了 FTP 业务的满意度和系统吞吐率。

6 结束语

本文根据研究无线网络中调度及资源分配等方法的需求, 给出一种在 MAC 层评价实时业务满意度的方法, 并依据该方法, 提出一种 WiMAX 系统中基于满意度的包调度及资源分配方法。由于该方法可以更准确的评价 VoIP 和实时视频业务的用户满意度, 从而可以更好的满足业务的 QoS 需求; 同时, 由于在调度中增加了对用户瞬时传输速率的考虑, 该调度方法可以保持较高的系统吞吐率。

参考文献

- [1] ITU-T Recommendation G.107. The E model: A computational model for use in transmission planning[S]. 2003.
- [2] Clark A D. Modeling the effects of burst packet loss and reency on subjective voice quality[C]. Proc. IP Telephony Workshop, New York, USA, March 2001, 1: 1-5
- [3] Xiao F. DCT based video quality evaluation[C]. Final Project for EE392J, 2000.
- [4] Liu T, Qiu L, and Liu Y P. A satisfaction based scheduling scheme with multi-beam zero-forcing Beamforming[C]. Proc. IEEE International Conference on Communication, Beijing, China, 2008, 1: 4250-4254.
- [5] Choi L U, Ivrlac M T, Steinbach E, and Nossek J A. Analysis of distortion due to packet loss in streaming video transmission over wireless communication links[C]. Proc. IEEE International Conference on Image Processing, Genoa, Italy, Sept. 2005, 1: 189-192.
- [6] IEEE Std. 802.16Rev2/D0d. Standard for local and metropolitan area networks - part 16: air interface for fixed and mobile broadband wireless access systems[S]. 2007.
- [7] ITU-T Recommendation P.800.1. Mean opinion score (MOS) terminology[S]. 2006.
- [8] ITU-T Recommendation P.861. Objective quality measurement of telephone band (300-3400Hz) speech codecs[S]. 1998.
- [9] ITU-T Recommendation P.862.3. Application guide for objective quality measurement based on Recommendations P.862, P.862.1 and P.862.2 [S]. 2007.
- [10] ITU-T Recommendation G.108. Application of the E-model: A planning guide[S]. 1999.
- [11] ITU-T Recommendation G.113. Transmission impairments due to speech processing [S]. 2007.
- [12] Bohnert T M, Staehle D, Kuo G S, Koucheryavy Y, and Monteiro E. Speech quality aware admission control for fixed IEEE 802.16 wireless MAN[C]. Proc. IEEE International Conference on Communication, Beijing, China, May 2008, 1: 2690-2695.
- [13] Ekman G. Weber's law and related functions[J]. *Journal of Psychology*, 1959, 47(1): 343-351.
- [14] He Z, Zeng W, and Chen C W. Low-pass filtering of rate-distortion functions for quality smoothing in real-time video communication[J]. *IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology*, 2005, 15(1): 973-981.
- [15] Liang Y J, Apostolopoulos J G, and Girod B. Model-based delay-distortion optimization for video streaming using packet interleaving[C]. Proc. Asilomar Conference on Signals, Systems and Computers, Monterey, CA, 2002, 1: 1315-1319.
- [16] Chou P, Miao Z. Rate-distortion optimized streaming of packetized media[J]. *IEEE Transactions on Multimedia*, 2006, 8(2): 390-404.
- [17] Yamagishi K and Hayashi T. Parametric packet-layer model for monitoring video quality of IPTV services[C]. Proc. IEEE International Conference on Communication, Beijing, China, 2008, 1: 110-114.
- [18] ITU-R Recommendation M.1225.Guidelines for Evaluation of Radio Transmission Technologies for IMT-2000[S]. 1997
- [19] NLANR Measurement and Network Analysis Group. Video Conferencing Trace Data I. <http://pma.nlanr.net/Special/vtce1.html>.

刘 涛: 男, 1982 年生, 博士生, 研究方向为多天信号处理、无线资源管理。

邱 玲: 女, 1963 年, 教授, 博士生导师, 研究方向为无线通信、移动通信、扩频通信、MIMO 中的信号处理、多用户 MIMO 等。