

保障流媒体时间结构的网络时延分析

邱 菡^① 李玉峰^{①②} 邬江兴^①

^①(国家数字交换系统工程技术研究中心 郑州 450002)

^②(防空兵指挥学院信息控制系 郑州 450052)

摘 要: 流媒体同步对端到端时延和时延抖动提出了确定的要求, 而终端抖动缓存一方面能消除时延抖动的影响, 一方面却增加了端到端时延, 流媒体同步保障对网络时延的要求不明确。论文从概率保障流媒体同步的角度, 确定了保障流媒体同步的抖动缓存容量范围, 提出了流媒体同步网络保障的充分条件, 针对基于 Internet VoIP(Voice over IP)业务的实际网络测试结果, 给出了应用流媒体同步网络保障充分条件进行同步保障评价的应用实例并验证了其正确性。

关键词: 流媒体; 流媒体同步; 抖动缓存; 时延

中图分类号: TP393

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2009)10-2287-07

Analysis on Network Delay for Temporal Structure Guarantee of Streaming Media

Qiu Han^① Li Yu-feng^{①②} Wu Jiang-xing^①

^①(National Digital Switching System Engineering & Technological Research Center, Zhengzhou 450002, China)

^②(Department of Information and Control, Air Defense Command College, Zhengzhou 450052, China)

Abstract: Media synchronization puts forward determinate requirements on end-to-end delay and delay jitter. The jitter buffers at the destination site can eliminate the effect of the delay jitter but increase the end-to-end delay. Then, the requirements of media synchronization guarantee on the network delay are not clear. From the point of view of statistical guarantee, this paper determines the range of the jitter buffer size for guaranteeing media synchronization, provides the sufficient condition for the network to guarantee the media synchronization, presents an synchronization guarantee evaluating examples with the sufficient condition and validates the sufficient condition by the actual network testing results on VoIP(Voice over IP) based on Internet.

Key words: Streaming media; Streaming media synchronization; Jitter buffer; Delay

1 引言

随着宽带接入技术在互联网上的推广, 流媒体应用呈现出持续高增长, 未来几年中将扮演越来越重要角色。与传统的文本数据不同, 流媒体具有连续性、实时性和时序性 3 个特点, 即时间结构, 因此要求播放之前保持原有的时间结构。流媒体同步是指当流媒体系统存储、传送和播映流媒体业务时, 维护一个或多个媒体流时间顺序的过程。测量表明时延抖动不超过一定值时, 流看起来是“同步”的^[1], 如音频流允许的最大时延为 250 ms, 时延抖动为 10 ms, 从可感知的 QoS 角度来看, 流媒体同步直接对端到端的时延和时延抖动提出了确定的要求。

由于 IP 网络的基本特点是分组交换、存储转发和尽力传送, 其传输过程中的时延和时延抖动可能

损害流媒体的时间结构。为了修复传输过程对流媒体时间结构的损伤, 终端在播放过程前引入了抖动缓存技术。一方面, 抖动缓存能够修复时延抖动对媒体流时间结构的损伤; 另一方面, 抖动缓存的使用引入了额外的端到端时延。抖动缓存反映到流媒体同步质量相关的两个 QoS 参数的作用截然相反, 因此, 流媒体同步保障对网络时延的要求并不明确。相关缓存控制对流媒体传输影响的研究也很多, 但是它们只是针对时延抖动或者时延单独进行的^[2-4], 或者在确定的抖动缓存容量下研究网络时延对流媒体业务 QoS 的影响^[5,6], 无法揭示流媒体业务的端到端时延和时延抖动保障对网络时延的实际要求。

本文从概率保障流媒体同步的角度, 确定提供流媒体同步保障的抖动缓存容量范围, 提出流媒体同步网络保障的充分条件, 针对基于 Internet VoIP 业务的实际网络测试结果, 给出流媒体同步网络保

2008-11-24 收到, 2009-04-10 改回

国家 973 计划项目(2007CB307102)和国家 863 计划项目(2007AA01Z2a1)资助课题

障的充分条件进行同步保障评价的应用实例并验证其正确性。

2 抖动缓存与传输层 QoS 参数

在流媒体系统中, 每个媒体流由一系列有序的信息单元组成, 称为媒体单元(MUs, Media Units)。不失一般性, 本文采用文献[3]对网络时延和时延抖动的定义, 并重写如下。

定义 1 定义媒体流经历的网络时延 d 为媒体流的任意媒体单元所在分组经历的网络时延, 媒体流经历的网络时延抖动 $J = d - E(d)$ 。

从统计角度看, 定义 1 中 d , J 都是随机序列。在网络环境一定的情况下, 网络平均时延 $E(d)$ 是确定的, 网络时延抖动的均值 $E(J)$ 为 0, 其方差等于网络时延的方差, 即 $D(J) = D(d)$, 网络时延抖动分布 $f_J(x)$ 由网络时延分布 $f_d(x)$ 唯一确定, 即 $f_J(x) = f_d(x - E(d))$ 。

缓存控制的重要参数是抖动缓存容量和播放启动时间, 二者决定了缓存控制对媒体流时间结构的作用。当缓存容量与播放启动时间的差值较大时, 可以吸收的正的时延抖动值和补偿的负的时延抖动值将严重不对称, 造成丢弃事件或者空播事件的增加, 因此, 缓存容量和播放时间的合理选择对于控制缓存上溢事件和下溢事件的发生都是至关重要的。一般而言, 在抖动缓存占用水平达到一半时开始播放媒体单元是很好的选择^[3], 此时, 缓存容量或者播放启动时间可以作为缓存控制的唯一参数。假设抖动缓存的容量为 b (此处缓存容量由缓存时间来表示), 播放启动时间为 $b/2$, 媒体流经过抖动缓存后的时延为 d_r , 时延抖动为 J_r (本文分别称其为残余时延和残余时延抖动)。那么, 以终端播放时刻为时间起点, 媒体流残余时延和残余时延抖动与网络时延和时延抖动的关系如下所示:

$$d_r = \begin{cases} d - b/2, & J > b/2 \\ d - J, & |J| \leq b/2 \\ d + b/2, & J < -b/2 \end{cases} \quad (1)$$

$$J_r = \begin{cases} J - b/2, & J > b/2 \\ 0, & |J| \leq b/2 \\ J + b/2, & J < -b/2 \end{cases} \quad (2)$$

以传输层时延 d_e 和时延抖动 J_e 为传输层 QoS 参数, 以终端播放时刻为时间起点, 设编解码时延、封装时延等终端固定时延为 d_0 , 传输层时延和时延抖动与缓存容量关系如下^[7]:

$$d_e = d_r + b/2 + d_0 = \begin{cases} E(d) + J + d_0, & J > b/2 \\ E(d) + b/2 + d_0, & |J| \leq b/2 \\ E(d) + J + b + d_0, & J < -b/2 \end{cases} \quad (3)$$

$$J_e = J_r = \begin{cases} J - b/2, & J > b/2 \\ 0, & |J| \leq b/2 \\ J + b/2, & J < -b/2 \end{cases} \quad (4)$$

3 流媒体同步网络保障的充分条件

目前, 实现同步保障的方法可以分为确定保障和概率保障两种^[3], 确定保障是指网络出现极端情况时——网络时延达到最大或最小, 仍然确保同步, 而概率保障则是以一定的概率保障同步。确定保障要求更多的缓存资源, 同时还会引入额外的时延, 而目前的媒体解码技术能够容忍一定丢弃而不影响主观质量, 如 VoIP 能够忍受 3% 的丢弃^[8]。因此, 概率保障是实现同步保障的合理方法^[2]。

如本文第 1 章所述, 用户可接受的同步质量直接对传输层时延和时延抖动提出了明确的要求, 基于概率保障方法, 同步保障的衡量指标可描述如下: 流媒体业务允许的最大端到端时延为 d_{\max} , 最大时延抖动为 J_{\max} , 则同步保障对传输层 QoS 参数—— d_e 和 J_e 的要求如下:

$$P(d_e > d_{\max}) \leq \varepsilon_d, \quad 0 < \varepsilon_d < 1 \quad (5)$$

$$P(|J_e| > J_{\max}) \leq \varepsilon_j, \quad 0 < \varepsilon_j < 1 \quad (6)$$

其中 ε_d 和 ε_j 称为百分点要求。由此, 定理 1 给出了流媒体同步网络保障的充分条件。

定理 1 设媒体流允许的最大端到端时延为 d_{\max} , 最大时延抖动为 J_{\max} , 网络平均时延为 $E(d)$, 网络时延方差为 $D(d)$, 终端固定时延为 d_0 , 以概率保障端到端时延和时延抖动为流媒体同步保障要求 (百分点要求分别为 ε_d 和 ε_j), 则流媒体同步网络保障的充分条件为

$$E(d) + \max \left\{ \sqrt{\frac{D(d)}{\varepsilon_d}}, \sqrt{\frac{D(d)}{\varepsilon_j}} - J_{\max} \right\} + d_0 \leq d_{\max}, \quad (7)$$

$$0 < \varepsilon_d < 1, \quad 0 < \varepsilon_j < 1$$

且终端抖动缓存容量 b 满足

$$2 \left\lfloor \sqrt{\frac{D(d)}{\varepsilon_j}} - J_{\max} \right\rfloor \leq b \leq 2 [d_{\max} - d_0 - E(d)] \quad (8)$$

证明 要证明不等式(7)和式(8)是网络提供媒体流同步保障的充分条件, 在概率保障方法下, 即要证明不等式(7)和式(8)是不等式(5)和式(6)成立的充分条件。

首先, 不等式(7)成立, 则不等式(8)所示范围不

为空，且必有不等式(9)和式(10)成立

$$E(d) + \sqrt{\frac{D(d)}{\varepsilon_d}} + d_0 \leq d_{\max} \quad (9)$$

$$E(d) + \sqrt{\frac{D(d)}{\varepsilon_j}} - J_{\max} + d_0 \leq d_{\max} \quad (10)$$

不等式(8)成立时，对不等式(10)进行变换可得

$$E(d) + b/2 + d_0 \leq d_{\max} \quad (11)$$

$$\frac{b}{2} + J_{\max} \geq \sqrt{\frac{D(d)}{\varepsilon_j}} \quad (12)$$

依据式(3)和式(11)， $P(d_e > d_{\max})$ 可以表示如下：

$$\begin{aligned} P(d_e > d_{\max}) &= P(E(d) + J + d_0 > d_{\max}) \\ &= P(J > d_{\max} - E(d) - d_0) \end{aligned}$$

依据式(4)， $P(|J_e| > J_{\max})$ 可以表示为

$$P(|J_e| > J_{\max}) = P(|J| > J_{\max} + b/2)$$

由网络平均时延为 $E(d)$ ，网络时延方差为 $D(d)$ 可知，网络时延抖动存在期望和方差。依据 Chebyshev 不等式^[9]， $P(d_e > d_{\max})$ 和 $P(|J_e| > J_{\max})$ 满足如下关系

$$\begin{aligned} P(d_e > d_{\max}) &< P(|J| > d_{\max} - d_0 - E(d)) \\ &\leq \frac{D(d)}{(d_{\max} - d_0 - E(d))^2} \\ &\cdot P(|J_e| > J_{\max}) < \frac{D(d)}{(J_{\max} + b/2)^2} \end{aligned}$$

依据不等式(9)和式(12)， $P(d_e > d_{\max})$ 和 $P(|J_e| > J_{\max})$ 必然满足

$$\begin{aligned} P(d_e > d_{\max}) &< \frac{D(d)}{(d_{\max} - d_0 - E(d))^2} < \varepsilon_d \\ P(|J_e| > J_{\max}) &\leq \frac{D(d)}{(J_{\max} + b/2)^2} \leq \varepsilon_j \quad \text{证毕} \end{aligned}$$

即不等式(5)和不等式(6)成立。

定理 1 表明，对于确定的百分点要求 ε_d 和 ε_j ，当网络时延均值和时延方差满足不等式(7)时，存在着适当的抖动缓存容量值(不等式(8)成立)协助实现流媒体同步保障。

推论 1 设媒体流允许的最大端到端时延为 d_{\max} ，最大时延抖动为 J_{\max} ，网络平均时延为 $E(d)$ ，网络时延方差为 $D(d)$ ，终端固定时延为 d_0 ，以概率保障端到端时延和时延抖动为流媒体同步保障要求(百分点要求均为 ε_d)，则流媒体同步网络保障的充分条件为

$$E(d) + \sqrt{\frac{D(d)}{\varepsilon_d}} + d_0 \leq d_{\max}, \quad 0 < \varepsilon_d < 1 \quad (13)$$

且终端抖动缓存容量 b 满足

$$2 \left[\sqrt{\frac{D(d)}{\varepsilon_d}} - J_{\max} \right] \leq b \leq 2[d_{\max} - d_0 - E(d)] \quad (14)$$

证明 依据定理 1，令 $\varepsilon_j = \varepsilon_d$ ，表达式(8)即为表达式(14)，不等式(7)转化为

$$E(d) + \max \left[\sqrt{\frac{D(d)}{\varepsilon_d}} - J_{\max}, \sqrt{\frac{D(d)}{\varepsilon_d}} \right] + d_0 \leq d_{\max} \quad \text{证毕}$$

即为不等式(13)。

推论 1 表明，对于相同的百分点要求 $\varepsilon_j = \varepsilon_d$ ，无论流媒体允许的最大时延抖动如何，只要网络满足时延要求，都可通过抖动缓存实现时延抖动保障，这一结论也与事实直观吻合。

定理 1 及推论 1 的推导并不依赖于网络时延的具体分布，在已知流媒体同步保障要求、网络时延均值和方差的情况下，可用于对任何实际网络能够提供流媒体同步保障进行评价。

定理 1 和推论 1 的不同在于对时延和时延抖动保障的百分点要求不同。相比于时延，时延抖动对用户层 QoS 参数具有更显著影响^[6]，一般 $\varepsilon_d \geq \varepsilon_j$ ，则推论 1 对网络时延要求更严格。

4 应用实例及验证

本节首先基于 Internet 对 VoIP 业务进行了大量测试，并基于测试的网络时延统计特征数据，应用定理 1 及推论 1 进行时延保障评价，随后通过比较评价结果和测试结果，对定理 1 及推论 1 进行验证。下面首先给出基于 Internet 的 VoIP 业务测试环境及测试结果。

4.1 基于 Internet 的 VoIP 业务测试

本文作者利用 brixnetwork 公司的 www.testyourvoip.com^[10]网站进行了基于 Internet 的 VoIP 业务测试。受限于实验环境及网站服务，测试在实验终端与 Boston, Helsinki, London, Montreal, San Jose 和 Sydney 等地的服务器间进行。实验终端位于中国河南省郑州市，采用 ADSL/VDSL 接入 Internet，上/下行带宽为 2 M/512 kbit/s，服务提供商为河南网通。测试 VoIP 系统基于 SIP^[11] 呼叫信令协议，通话模式属于 PC-PC。测试中分别采用两种编码方式 G.711 算法^[12]和 G.729 算法^[13]进行语音编码，测试网站提供的各编码方式的具体参数如表 1 所示。测试时间从 2008 年 9 月 5 日到 2008 年 9

表1 编码算法参数

编码标准	MOS	编码类型	编码速率 (kbit/s)	IP 带宽 (kbit/s)
G.711	4.4	PCM	64	80
G.729	4.2	CS-ACELP	8	40

月 20 日, 共进行 540 次, 相同区域两种不同编码的测试连续进行。测试终端抖动缓存容量均设置为 40 ms(以缓存时间为单位), 播放启动时间为 20 ms。每次测试均给出测试区域间“会话”的双向测量结果, 共收集数据 1080 例。

根据 www.testyourvoip.com 网站提供的跟踪数据, 表 2 给出了各区域间网络时延、时延均方差、网络分组丢弃率及网站评估 MOS 值的统计结果,

其中正向是实验终端→服务器方向, 为上行, 而反向是服务器→实验终端方向, 为下行。受限于网站提供的跟踪数据, 表 2 未能分别给出正向、反向的网络平均时延。从表 2 可看出, 实验终端上/下行带宽无论对于 G.711 编码还是 G.729 编码的 VoIP 业务都是充分的, 而且网络提供的双向带宽也是充分的。

4.2 同步保障评价

由于上述测试中网站采用 MOS 值作为“会话”

表2 VoIP业务测试统计结果表

区域参数	实验终端 -Boston	实验终端 -Helsinki	实验终端 -London	实验终端 -Montreal	实验终端 -San Jose	实验终端 -Sydney
网络时延(G.711)(ms)	Ave: 158.13	Ave: 199.375	Ave: 212.77	Ave: 157.24	Ave: 122.46	Ave: 181.54
	Min: 140.13	Min: 192.63	Min: 193.63	Min: 150.13	Min: 109.13	Min: 165.13
	Max: 167.63	Max: 207.63	Max: 309.63	Max: 185.13	Max: 130.63	Max: 200.63
正向时延均方差 (G.711)(ms)	Ave: 6.0909	Ave: 5.8333	Ave: 5.8571	Ave: 5.8889	Ave: 6	Ave: 5.5
	Min: 5	Min: 5	Min: 5	Min: 5	Min: 5	Min: 5
	Max: 8	Max: 9	Max: 8	Max: 11	Max: 8	Max: 7
反向时延均方差 (G.711)(ms)	Ave: 6.5455	Ave: 6	Ave: 6.5714	Ave: 6.8889	Ave: 6.1667	Ave: 6
	Min: 6	Min: 6	Min: 6	Min: 6	Min: 6	Min: 6
	Max: 8	Max: 6	Max: 8	Max: 11	Max: 7	Max: 6
正向分组丢弃率 (G.711)	Ave: 0.0005	Ave: 0.0033	Ave: 0.0008	Ave: 0.0004	Ave: 0.0027	Ave: 0.0007
	Min: 0.0	Min: 0.0	Min: 0.0	Min: 0.0	Min: 0.0	Min: 0.0
	Max: 0.005	Max: 0.015	Max: 0.005	Max: 0.004	Max: 0.019	Max: 0.004
反向分组丢弃率 (G.711)	Ave: 0.0007	Ave: 0.0	Ave: 0.0	Ave: 0.0	Ave: 0.0	Ave: 0.0
	Min: 0.0	Min: 0.0	Min: 0.0	Min: 0.0	Min: 0.0	Min: 0.0
	Max: 0.007	Max: 0.0	Max: 0.000	Max: 0.00	Max: 0.0	Max: 0.0
正向 MOS(G.711)	Ave: 3.909	Ave: 3.6667	Ave: 3.7333	Ave: 4.0111	Ave: 3.8714	Ave: 3.9167
	Min: 2.8	Min: 3.0	Min: 3.3	Min: 3.3	Min: 3.2	Min: 3.5
	Max: 4.3	Max: 4.1	Max: 4.2	Max: 4.3	Max: 4.4	Max: 4.0
反向 MOS(G.711)	Ave: 4.155	Ave: 4.05	Ave: 4.0333	Ave: 4.1778	Ave: 4.3143	Ave: 4.15
	Min: 3.8	Min: 3.8	Min: 3.6	Min: 3.7	Min: 4.2	Min: 4.0
	Max: 4.3	Max: 4.2	Max: 4.2	Max: 4.3	Max: 4.4	Max: 4.2
网络时延(G.729)(ms)	Ave: 138.07	Ave: 182.58	Ave: 197.80	Ave: 130.17	Ave: 95.30	Ave: 169.0
	Min: 121.0	Min: 175.0	Min: 164.5	Min: 96.0	Min: 89.5	Min: 162.0
	Max: 181.0	Max: 194.5	Max: 285.0	Max: 159.5	Max: 101	Max: 177.0
正向时延均方差 (G.729)(ms)	Ave: 6	Ave: 6.6667	Ave: 6.6	Ave: 6.3333	Ave: 5.6	Ave: 6
	Min: 5	Min: 5	Min: 5	Min: 5	Min: 5	Min: 5
	Max: 9	Max: 8	Max: 8	Max: 9	Max: 7	Max: 7
反向时延均方差 (G.711)(ms)	Ave: 6.2857	Ave: 6	Ave: 7.4	Ave: 6.1667	Ave: 6.6	Ave: 6.75
	Min: 6	Min: 6	Min: 6	Min: 6	Min: 6	Min: 6
	Max: 8	Max: 6	Max: 11	Max: 7	Max: 9	Max: 7
正向分组丢弃率 (G.729)	Ave: 0.0012	Ave: 0.0008	Ave: 0	Ave: 0.0	Ave: 0.0	Ave: 0.0018
	Min: 0.0	Min: 0.0	Min: 0.0	Min: 0.0	Min: 0.0	Min: 0.0
	Max: 0.007	Max: 0.005	Max: 0.0	Max: 0.0	Max: 0.0	Max: 0.007
反向分组丢弃率 (G.729)	Ave: 0.0	Ave: 0.0	Ave: 0	Ave: 0.0006	Ave: 0.0	Ave: 0.0
	Min: 0.0	Min: 0.0	Min: 0.0	Min: 0.0	Min: 0.0	Min: 0.0
	Max: 0.0	Max: 0.0	Max: 0.0	Max: 0.003	Max: 0.0	Max: 0.0
正向 MOS(G.729)	Ave: 3.6667	Ave: 3.1	Ave: 3.2	Ave: 3.52	Ave: 3.9	Ave: 3.275
	Min: 3.4	Min: 2.4	Min: 2.7	Min: 3.1	Min: 3.7	Min: 2.8
	Max: 4.0	Max: 3.2	Max: 3.8	Max: 4.0	Max: 4.1	Max: 3.5
反向 MOS(G.729)	Ave: 3.9	Ave: 3.6333	Ave: 3.54	Ave: 3.78	Ave: 4.06	Ave: 3.7
	Min: 3.8	Min: 3.4	Min: 3.1	Min: 3.4	Min: 4.0	Min: 3.7
	Max: 4.0	Max: 4.7	Max: 3.8	Max: 4.0	Max: 4.1	Max: 3.7

质量的衡量指标，而定理 1 及推论 1 是以端到端时延和时延抖动作为衡量指标，因此，需要建立端到端时延和时延抖动与 MOS 值的对应关系。ITU G.114^[14]给出了语音业务的单向时延、时延抖动和丢弃率与语音业务主观 MOS 分数的对应关系，如表 3 所示。本文以表 3 中第 2、3 行给出的最大端到端时延值、时延抖动值作为衡量指标，与对应列给出的最差 MOS 值形成对应关系，从而进行评估。

表3 语音业务QoS参数

QoS 参数	好	可接受	差
MOS	4.0-5.0	3.6-4.0	<3.6
时延(ms)	0-150	150-300	>300
抖动(ms)	0-20	20-50	>50
丢弃率(%)	0-0.5	0.5-1.5	>1.5

推论 1 是定理 1 特例，应用定理 1 可同时获得定理 1 和推论 1 的评价结果。为了分析方便，重写定理 1 中不等式(7)如下：

$$E(d_{IP}) + \max \left\{ \sqrt{\frac{D(d_{IP})}{\epsilon_d}}, \sqrt{\frac{D(d_{IP})}{\epsilon_j}} - J_{\max} \right\} \leq d_{\max} - d_0$$

其中 d_{IP} 表示测试区域网络时延， d_{\max} 和 J_{\max} 为语音业务允许的最大端到端时延和时延抖动，由表 3 可得。 d_0 是编/解码时延、封装/解封装时延等终端固定时延，表 4 给出了语音编码算法下的编码时延及封装时间。依据表 4，按照 ITU G.114 关于 IP 应用每分组封装一帧时的编/解码时延建议，可得 G.711 编码下 d_0 的最大值为 20.375 ms，G.729 编码下 d_0 的最大值为 55 ms。

表4 语音编码时延指标

编码标准	类型	速率 (kbit/s)	封装时间 (ms)	帧长度 (ms)	算法时延 (ms)	编码时延 (ms)
G.711	PCM	64	20	0.125	0	0.125
G.729	CS-ACELP	8	20	10	5	15

在定理 1 中，抖动缓存容量为有限值，此时 ϵ_j 表示抖动缓存最多可能产生的分组丢弃率，假设语音业务允许的最大分组丢弃率为 L_{\max} ，则网络丢弃率 L_{IP} 应满足如下要求：

$$\epsilon_j (1 - L_{IP}) + L_{IP} \leq L_{\max}$$

由表 3 可知， ϵ_j 数量级应不大于 10^{-2} 才能避免抖动缓存丢弃造成的 QoS 下降。

针对 G.711 编码的 VoIP 业务，依据表 3，IP

网络提供 MOS 值 3.0 以上服务的充分条件：

$$E(d_{IP}) + \max \left\{ \sqrt{\frac{D(d_{IP})}{\epsilon_d}}, \sqrt{\frac{D(d_{IP})}{\epsilon_j}} - 0.05 \right\} \leq 0.279625 \tag{15}$$

注意到测试中 G.729 算法对应 MOS 值为 4.2，表 3 中第 3 列的最小 MOS 值比第 2 列低 0.4，鉴于网络时延均值相对时延方差对用户可感知的 QoS 影响较小^[5]这一事实，针对 G.729 编码 VoIP 业务，依据表 3，IP 网络提供 MOS 值 3.0 以上服务的充分条件如下：

$$E(d_{IP}) + \max \left\{ \sqrt{\frac{D(d_{IP})}{\epsilon_d}}, \sqrt{\frac{D(d_{IP})}{\epsilon_j}} - 0.02 \right\} \leq 0.245 \tag{16}$$

针对 G.711 编码和 G.729 编码下的测试结果，运用不等式(15)和式(16)，表 5 分别给出了测试区域能够提供端到端时延和时延抖动保障的最小百分点要求，其中，NA 表示不存在合理的值，即出现不能提供保障的情况。540 次实验中，出现 2 次网络平均时延大于端到端时延要求的情况，分别为实验终端-London(9 月 7 日 10: 23, G.711)和实验终端-London(9 月 7 日 10: 26, G.729)，共有 4 例数据(正、反向)无法获得合理的时延和时延抖动百分点要求。除此之外，共有 108 例数据无法提供数量级为 10^{-2} 以下的百分点要求，36 例为 G.711 编码，72 例为 G.729 编码，其中，只有 36 例 G.729 编码的数据是无法提供数量级为 10^{-2} 以下的 ϵ_j 。因此可认为：运用定理 1 评价时，1080 例数据中有 40 例无法提供 MOS 值 3.0 以上的服务；运用推论 1 时，1080 例数据中有 122 例无法提供 MOS 值 3.0 以上的服务。

表 6 给出了测试区域能够提供 MOS 值在 3.0 以上的语音服务测试统计结果以及定理 1 和推论 1 给出的评估统计结果。从表 6 中可以看到，由推论 1 给出的各项评价结果均低于定理 1 和测试结果，而定理 1 给出的 G.711 算法下的评价结果略高于测试结果。查看定理 1 评价结果高于测试结果所对应的跟踪数据，本文作者发现，这 7 例数据的网络平均时延均较小，时延均方差值较大，MOS 值的下降主要源于缓存满产生了较大的分组丢弃(最高达到 2% 以上)。由于测试环境采用了确定的抖动缓存容量，网络时延方差较大时容易出现缓存满溢的情况，从而产生丢弃。而定理 1 是基于可变抖动缓存容量的，在网络平均时延较小的情况，依据不等式(8)，可以采用较大的抖动缓存，从而将满溢丢弃控制在较小的范围。定理 1 对 G.711 算法下网络时延保障的评价结果略高于测试结果表明：若在终端按照不等式

表5 网络可提供的最小百分点要求表

区域参数	实验终端 -Boston	实验终端 -Helsinki	实验终端 -London	实验终端 -Montreal	实验终端 -San Jose	实验终端-Sydney
正向 ε_j (G.711)	Ave: 0.0014	Ave: 0.0022	Ave: 0.0146	Ave: 0.0014	Ave: 0.0009	Ave: 0.0015
	Min: 0.0007	Min: 0.0013	Min: 0.0014	Min: 0.0008	Min: 0.0005	Min: 0.0009
	Max: 0.0033	Max: 0.0054	Max: 0.09	Max: 0.0058	Max: 0.0018	Max: 0.0029
正向 ε_d (G.711)	Ave: 0.0029	Ave: 0.0060	Ave: 0.0054	Ave: 0.0031	Ave: 0.0016	Ave: 0.0035
	Min: 0.0013	Min: 0.0033	Min: 0.0007	Min: 0.0015	Min: 0.0009	Min: 0.0019
	Max: 0.0065	Max: 0.0156	Max: NA	Max: 0.0135	Max: 0.0033	Max: 0.0079
反向 ε_j (G.711)	Ave: 0.0015	Ave: 0.0021	Ave: 0.0151	Ave: 0.0017	Ave: 0.0009	Ave: 0.0017
	Min: 0.0011	Min: 0.0019	Min: 0.0018	Min: 0.0011	Min: 0.0007	Min: 0.0013
	Max: 0.0024	Max: 0.0024	Max: 0.09	Max: 0.0040	Max: 0.0014	Max: 0.0022
反向 ε_d (G.711)	Ave: 0.0030	Ave: 0.0057	Ave: 0.0069	Ave: 0.0035	Ave: 0.0016	Ave: 0.0039
	Min: 0.0018	Min: 0.0048	Min: 0.0042	Min: 0.0021	Min: 0.0012	Min: 0.0027
	Max: 0.0051	Max: 0.0069	Max: NA	Max: 0.0079	Max: 0.0025	Max: 0.0058
正向 ε_j (G.729)	Ave: 0.0027	Ave: 0.0074	Ave: 0.0067	Ave: 0.0024	Ave: 0.0011	Ave: 0.0041
	Min: 0.0012	Min: 0.0031	Min: 0.0025	Min: 0.0012	Min: 0.0009	Min: 0.0028
	Max: 0.0051	Max: 0.0129	Max: NA	Max: 0.0055	Max: 0.0018	Max: 0.0063
正向 ε_d (G.729)	Ave: 0.0040	Ave: 0.0134	Ave: 0.0073	Ave: 0.0034	Ave: 0.0014	Ave: 0.0065
	Min: 0.0051	Min: 0.0051	Min: 0.0039	Min: 0.0017	Min: 0.0010	Min: 0.0045
	Max: 0.0017	Max: 0.0251	Max: NA	Max: 0.0079	Max: 0.0024	Max: 0.0106
反向 ε_j (G.729)	Ave: 0.0028	Ave: 0.0055	Ave: 0.0083	Ave: 0.0023	Ave: 0.0016	Ave: 0.0050
	Min: 0.0017	Min: 0.0044	Min: 0.0036	Min: 0.0013	Min: 0.0012	Min: 0.0040
	Max: 0.0051	Max: 0.0072	Max: NA	Max: 0.0033	Max: 0.0030	Max: 0.0040
反向 ε_d (G.729)	Ave: 0.0041	Ave: 0.0098	Ave: 0.0143	Ave: 0.0032	Ave: 0.0020	Ave: 0.0080
	Min: 0.0023	Min: 0.0073	Min: 0.0056	Min: 0.0016	Min: 0.0015	Min: 0.0065
	Max: 0.0088	Max: 0.0141	Max: NA	Max: 0.0049	Max: 0.0039	Max: 0.0106

表6 MOS值统计情况(%)

	MOS 值 3.0 以上	MOS 值 3.0 以上(G.711)	MOS 值 3.0 以上(G.729)
测试结果	96.7	98.33	97.5
评价结果 (定理 1)	96.3	99.63	92.3
评价结果 (推论 1)	89.63	92.3	86.3

(8)设置缓存容量,测试区域能够提供更好的语音业务的同步保障。

由此可见,定理 1 及推论 1 能够正确地评价网络能够提供确定要求的流媒体同步保障情况,推论 1 的评价条件相对于定理 1 更加严格,测试结果验证了定理 1 及推论 1 的正确性。

另外,定理 1 及推论 1 的评价结果表明,受测 Internet 区域内的网络基本上满足了 VoIP 业务 MOS 值在 3.0 以上的 QoS 要求,这也在一定程度上揭示了 VoIP 业务在 Internet 上能够广泛开展的原因。对比表 3 可知,MOS 值 3.0 以上并不是用户可接受的服务质量,仅属于可建立连接级,远低于可

收费电信级的要求。可见,尽管终端采用了抖动缓存技术,网络仍需进行相应的时延控制才能将网络对媒体流时间结构的损伤控制在用户可接受的范围。

5 结论

本文以概率保障流媒体同步的角度,通过分析抖动缓存与传输层 QoS 参数的关系,在网络时延 1 阶、2 阶统计分布特性一定的情况下,确定了提供流媒体同步保障的抖动缓存容量范围,给出了流媒体同步网络保障的充分条件,针对基于 Internet VoIP 业务的实际网络测试结果,给出了应用流媒体同步网络保障的充分条件进行同步保障评价的应用实例,评价结果与测试结果相吻合,验证了流媒体同步网络保障的充分条件的正确性,同时也在一定程度上揭示了 VoIP 业务能够在 Internet 上大量开展的原因。

本文给出了流媒体同步保障对网络时延统计特性的要求,为实现流媒体业务 QoS 保障的 IP 网络设计提供了理论指导。下一步研究将以网络时延统

计特性为主要研究对象, 研究 IP 网络提供流媒体同步保障的相关技术和必要条件。

参 考 文 献

- [1] Steinmetz R. Human perception of jitter and media synchronization[J]. *IEEE Journal on Selected Areas in Communication*, 1996, 14(1): 61-72.
- [2] Kouvelas I, Hardman V, and Watson A, *et al.* Lip synchronization for use over the Internet: Analysis and implementation[C]. IEEE GLOBECOM'96, London, UK, Nov. 18-22, 1996, 2: 893-898.
- [3] Xu Yan, Chang Yi-lin, and Liu Zeng-ji, *et al.* Calculation and analysis of compensation buffer size in multimedia systems[J]. *IEEE Communication Letters*, 2001, 5(8): 355-357.
- [4] Sun L and Ifeachor E, *et al.* Voice quality prediction models and their application in VoIP networks[J]. *IEEE Transactions on Multimedia*, 2006, 8(4): 809-820.
- [5] Ito Y, Tasaka S, and Fukuta Y, *et al.* Psychometric analysis of the effect of end-to-end delay on user-level QoS in live audio-video transmission[C]. IEEE ICC2004, Paris, France, June 20-24, 2004, 4: 2214-2220.
- [6] Ribadeneira A F. An analysis of the MOS under conditions of delay, jitter and packet loss and an analysis of the impact of introduction piggybacking and reed solomon for FEC FOR VOIP[D]. Georgia State: College of Arts and Sciences Georgia State University, 2007.
- [7] Baronak I and Halas M, *et al.* Mathematical representation of VoIP connection delay[J]. *Radioengineering*, 2007, 16(3): 77-85.
- [8] Amir Y, Danilov C, and Goose S, *et al.* 1-800-Overlays: Using overlay networks to improve VoIP quality[C]. the 15th International Workshop on Network and Operating Systems Support for Digital Audio and Video (NOSSDAV). New York, 2005: 51-56.
- [9] 盛骤, 谢式千, 潘承毅. 概率论与数理统计[M]. 第四版, 北京: 高等教育出版社, 2008: 第 4 章.
Sheng Zhou, Xie Shi-qian, and Pan Cheng-yi, *et al.* Probability and Statistics[M]. The fourth edition, Beijing: China Higher Education Press, 2008, Chapter 4.
- [10] TestYourVoIP.com. <http://www.testyourvoip.com>, 2008, 09.
- [11] IETF. SIP: Session Initiation Protocol[S]. USA, The Internet Society, July 1997.
- [12] ITU. ITU-T Recommendation G.711. Pulse code modulation (PCM) of voice frequencies[S]. ITU, 1990.
- [13] ITU. ITU-T Recommendation G.729. A silence compression scheme for G.729 optimized for terminals conforming to Recommendation V.70[S]. ITU, 2007.
- [14] ITU. ITU-T Recommendation G.114. One-way transmission time[S]. ITU, 2003.
- 邱 菡: 女, 1981 年生, 博士, 研究方向为宽带信息网络、流媒体业务 QoS.
- 李玉峰: 男, 1976 年生, 博士, 讲师, 研究方向为宽带信息网络、高速路由器核心技术.
- 邬江兴: 男, 1953 年生, 教授, 中国工程院院士, 博士生导师, 研究方向为信息网络与交换.