

IEEE802.11b 无线局域网的 VoIP 通信容量计算及分析

傅鹤岗 周振东

(重庆大学计算机学院 重庆 400044)

摘要 针对用 IEEE 802.11b 网络建立低成本的无线 VoIP 网络进行分析研究,本文评估在不同的时延限制、信道质量参数和语音音质指标下运载语音通话的能力,并比较 G.711 和 G.729 两种语音编码方案下不同的语音数据分组长度时的效果,为在无线环境下以 IP 方式构造移动语音通信网络奠定了良好的基础。

关键词 无线局域网,VoIP,时延,信道质量,语音音质

Calculation and Analysis of the Capacity of an IEEE802.11b Wireless LAN

FU He-Gang ZHOU Zhen-Dong

(College of Computer Science, Chongqing University, Chongqing 400044)

Abstract In order to build the low-cost wireless VoIP network constructed by IEEE 802.11b LAN, the capacity of an 802.11b network carrying voice calls under various delay constraints, channel conditions and voice quality requirements is evaluated in this paper. At the same time, the different effects using G.711 and G.729 voice encoding schemes and a range of voice packet sizes are compared. This paper provides the theoretical foundation for constructing the mobile voice communication network by IP mode under wireless environment.

Keywords Wireless LAN, VoIP, Delay, Channel condition, Voice quantity

1 引言

随着移动电话在世界范围内的普及,在无线通信链路上传输语音信号的技术已经被广泛应用了很多年,但移动电话网络覆盖的建设成本较高。近年来,随着 Internet 的迅速发展,基于 IP 网络的多媒体技术,如在 IP 网络传输音频或视频信号的 VoIP(Voice over IP)技术得到了广泛应用;另一方面,基于 IEEE802.11 的宽带无线 IP 网络作为支持移动计算的技术手段之一也得到迅速发展和普及,其中 IEEE802.11b 无线局域网的成本近年来已经显著下降。把这两项技术结合起来,利用基于 IEEE802.11b 网络上的 VoIP 技术实现无线语音通话,已成为一种新的发展趋势,有望建立低成本的无线语音网络,与传统移动电话网络竞争。

为了研究这项技术的可行性,以确定其是否能与有线语音 IP 网络无缝地整合,或者是直接连接到移动电话网络上,需要对其细节实现参数做研究。本文就是针对各种情形的 802.11b 网络,估算其能够承载的最大同时通话路数(通信容量),从而通过需要的通信容量来确定诸如时延限制这样一些具体的参数。

2 分析基础

研究的情形如图 1 所示。网络包含了一个 IEEE 802.11 基础服务设施(BSS, Basic Service Set), BSS 上带有一个服务接入点 AP(Access Point),在 BSS 周围有一群无线用户。AP 连接到有线网络,其他用户也直接连接到这个有线网络。语音通话发生在一个 BSS 的用户与一个连接到无线网络的用户之间,例如在图中的 A 用户和 A' 用户之间。

通信容量指在最低的语音音质要求下,网络中同时发生的双向语音通话数目的最大值。通信容量是无线语音网络的性能的主要衡量标准,这个标准不仅对网络的部署很重要,也

会是各种协议和技术比较的重要手段。

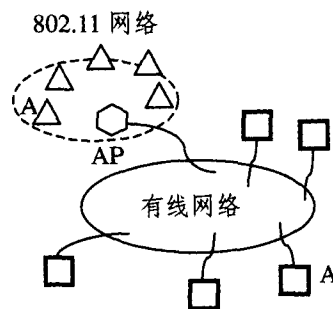


图 1 网络状况

网络中语音数据通信的基础是对语音编码器的输出进行数据分组(对于语音编码器,只考虑在不使用静音抑制下的 G.711 和 G.729 两种方案),每个分组包含固定数量的语音数据。这里研究 10、20、30 和 50ms 几种情况的分组大小,语音数据分组由 UDP/IP 网络上的 RTP 协议传送。目前 VoIP 应用的一个例子是 Cisco 7960,它支持 G.729 和 G.711 两种编码/解码器,其语音数据的每组缺省长度为 20ms。

各种不同的 IEEE802.11 协议^[1]提供的都是“最大努力交付”服务:为尽量减小延时,分组在网络上的传送不经过任何确认步骤,这样就有丢失的可能性。对于 802.11 无线网络,可假设使用分布调和函数 DCF(Distributed Coordination Function)MAC 协议(未采用 RTS/CTS 机制)。从设计原理上,尽管端点调和函数(Point Coordination Function, PCF)协议更适合处理流类型的数据通信,但在实际中应用很少。DCF 协议是基于 CSMA/CA 的,每个站点必须检测到介质空闲时才能发送信息。由于存在碰撞和数据解码错误的可能性(例如在信道状况不佳的情况下就有可能发生),数据帧可能需要经过多次重传才能被成功接收。在一次失败的传送之后

(标志为接收不到确认帧),每个站点将选择一个随机数作为退避时间,这个随机数产生的范围将随着重传次数的增加呈指数增长;经过一定次数的重传以后,发送站点将丢弃这个帧。这样,MAC 协议会产生明显的随机性分组延迟,甚至还

有可能产生分组丢失。
一方面,接收端的播放缓冲器对变化的时延效应有一个缓解作用,而分组丢失的掩饰算法 PLC(Packet Loss Concealment)也能减轻分组丢失的效应;另一方面,也必须考虑时延(这里指的是播放缓冲器设置的端到端延迟)和分组丢失(可以是网络传送引起的分组丢失,也可以是由于过多次延迟引起的在播放缓冲器发生的分组丢失)的组合效应给音质带来的影响。为此,我们引入“期望平均分 MOS(Mean Opinion Score)”来作为度量标准,话音音质由 1(最差)到 5(最好)范围内的一个分值来评价。一般来说,3.6 分以上的分值被认为是可以接受的。目前的研究^[2]使分组损失和分组延迟的效果可以以通话的 MOS 分值的减少来量化。即使没有分组损失和分组延迟,语音的编码方案也会引入部分音质损耗,即一个编码方案的“内在”MOS。

目前,研究 IEEE802.11 的 DCF 协议支持语音通信的能力的文献还不是很多。在少数的几个例子中,文^[3]只研究了支持 1Mbps 和 2Mbps 的物理层;文^[4]研究了范围更广的数据率和变化的信道条件,但是该文中度量的单位是平均信道访问时间,而不是信道的通信容量;文^[5]计算了 IEEE 802.11a 网络的通信容量,并考虑到了播放缓存的分组丢失,但不足之处是只考虑了一种时延限制条件。

本文的研究很大程度上是基于 Garg 和 Kappes 的文^[6,7]的。他们的文章提出了一种算法,估算仅运载语音的 802.11b 网络的通信容量,并以有限的实验验证了这种算法。

以下的章节在简化的假定条件下对 MAC 协议作出分析,得出通信容量的上界,然后以仿真试验来测算无错误情况下这个容量上界的极小值;在第 4 节中,再用仿真实验来演示时延限制和信道条件怎样影响通信容量。

3 网络通信容量的数学分析

在这一节里,首先对网络的性能做一定的假定。这些假定是:(1)不发生分组碰撞;(2)帧总是被无错地接收;(3)所有的帧都能在其播放截止时限之前到达。这样的条件,称之为受吞吐量限制。

本节基于以下论据来分析。任何时刻,在无线网络中总是发生下面几种情况之一:

- 自 AP 到站点的数据传输的各帧按照一定的时序进行。我们定义的帧的时序为:语音数据帧的传输(传输时间为 T_{VOICE}),帧间时隙 SIFS(Short Interframe Space),确认帧的传输(T_{ACK}),然后是 DCF 帧间时隙 DIFS(DCF Interframe Space)。

- 自站点到 AP 的数据传输的各帧按照一定的时序进行。

- 介质空闲时,AP 对时间片进行计数,这是退避算法的一个部分。每次传输之后,必须等待(“退避”)一个随机数目的空闲时间片后才能重新唤醒那个站点。

- 介质空闲时,AP 不进行空闲时间片的计数。

考虑一个任意长的时间段 T 秒,在此期间进行着 N 个通话,每个编码器每秒钟产生数目为 R 的压缩分组。

在 T 秒内,传到 AP 和自 AP 传出的帧的一个时序所需

时间为 $2NRT(T_{VOICE} + SIFS + T_{ACK} + DIFS)$;同样,AP 用来完成其退避过程所需的最短空闲时间为 $\lfloor \sum_{i=1}^{NRT} CW_i \rfloor \times T_{SLOT}$,在此 T_{SLOT} 为时间片长度, CW_i 为第 i 次传输在 $(0, CW_{MIN})$ 之间统一分配的一个时间片数目。对于较大的 T ,这个表达式的值趋近于 $NRT(T_{SLOT} \times CW_{MIN}/2)$ 。

只考虑前面 3 种情况可能使用的时间长度,来支持前面所述的负载:

$$T = [2NRT(T_{VOICE} + SIFS + T_{ACK} + DIFS) + [NRT(T_{SLOT} \times CW_{MIN}/2)] \quad (1)$$

在没有被计入 AP 的退避时间的空闲时长 T_{IDLE} 为零时,这个表达式成为等式。

要找到一个关于 T_{IDLE} 的表达式是非常困难的,因为它既取决于网络的负载,也取决于每个站点各自运行的退避程序的形式。不过,当讨论接近于容量上限的负载的情况时,这个值就会变得非常小,因为各个站可能会几乎同时计算退避时间片,这种情况下网络的利用效率是最高的。在这样的网络中,有一个节点——AP,占用了整个网络通信量的一半,所以它也是需要最多的不重叠空闲时段的一个节点。这样就可以得出一个结论,即当网络负载(也就是通话数目 N)增长时,其它站点可以利用 AP 需求的空闲时间来完成它们所有需要的退避时间,使得介质没有被计入 AP 的退避需要的空闲时间趋于最小。如果假定在满容量负载的情况下 $T_{IDLE} = 0$,就可以得到 N 值的上限表达式:

$$N = \left[\frac{1}{R \left[2(T_{VOICE} + SIFS + T_{ACK} + DIFS) + (T_{SLOT} \times CW_{MIN}/2) \right]} \right] \quad (2)$$

对于 802.11b 网络而言, CW_{MIN} 、SIFS、 T_{SLOT} 和 DIFS 分别是 31、10 μ s、20 μ s 和 50 μ s。假定数据率为 11Mbps, T_{VOICE} 和 T_{ACK} 由表 1 所给出的因子组成。

表 1 数据率为 11Mbps 时 T_{VOICE} 和 T_{ACK} 的组成时间

T_{VOICE}	PLCP 前导码及首部	192.0 μ s
	MAC 首部+FCS	20.4 μ s
	IP/UDP/RTP 首部	29.1 μ s
	语音数据	(语音字节数 \times 8/11) μ s
T_{ACK}	PLCP 前导码及首部	192.0 μ s
	ACK 帧	10.2 μ s

以前面公式得到的理论上界值与按照既定的假设条件(2)和(3)进行的仿真试验得到的结果进行比较,可得表 2。从表中可以看到,实验结果与理论上界值非常接近。注意,这里的容量的数值是与音质需求因素无关的:负载没有超过容量上限时不会出现分组丢失,分组丢失都是负载高出容量上限时,在 AP 节点的队列溢出引起的(典型值为高出 10%)。

表 2 仿真(分析)的通信容量结果

	每帧数据量			
	10ms	20ms	30ms	50ms
G. 711	6(6)	12(12)	17(18)	25(26)
G. 729	7(7)	14(14)	21(22)	34(35)

实验结果也证明了前述的理论分析,即负载增长时, T_{IDLE} 趋近于 0,表明此时站点之间的碰撞效果很小。实际上,观察结果表明,在网络负载达到最大容量时,传输中的碰撞百分比对 AP 约为 1.5%至 4%,对其它站点则为 2%至 9%。

在这样低的碰撞率下,在 MAC 层就不会发生由于过多次数的重传引起的丢帧(默认的重传次数为 7 次)。

同时从实验结果还能看出,在物理层和 MAC 层的帧维护段的高额开销的效应也很突出。帧的维护开销大部分是由 PCLP 前导码和首部组成,大约占据了总时间的 50%;也包含没有任何站点传输的介质空闲时间,大约占总时间的 20%~30%。这样造成的结果是:容量受分组的产生速率 R(由此决定了每分组的语音数据量)的影响更多,而不是编码器的比特率。例如,尽管 G. 711 编码器的比特率是 G. 729 编码器的 8 倍之多,容量的下降却不足 50%。

使用短的 PLCP 前导码可以显著减小维护段的长度,从而提高通信容量。在仿真中,这个结果提高了约 25%~50%。不过不能依赖这个条件,因为这是一个可选的功能,实际应用中并不能保证每个站点会使用此功能。因此,在后面的部分中,一律假设只使用长的前导码。

4 时延限制、非理想信道条件和不同音质要求下的综合效果

在文[6]和本文的前面部分中,均假设所有语音数据分组都在播放截止时间前无错误地被接收。实验和计算结果表明,在这样的假设前提下,要使通信容量最大,选择 G. 729 比选择 G. 711 更好,并且每个分组应该包含尽可能多的语音数据。然而,一旦考虑了有限的信道质量语音质量要求和延迟限制,情况就会变得复杂起来。

首先,由于 802. 11b 中用到了码型和调制,因此分组错误率与分组的长度高度相关:分组越长,出错的可能性越大。当信道质量下降时,重传次数增加,网络由于受吞吐量限制容量将更低,分组延迟也将增加。

其次,尽管 G. 729 能提供更大的通信容量,但其通话质量受编码方案内在的 MOS 值 3. 65 的限制,而 G. 711 则可以达到 4. 15^[2]。此外 G. 729 算法还需要 5ms 的预留时间,从而使分组相对 G. 711 多 5ms 的延迟。

最后,对于一个给定的编码方案来说,较大的分组处理所需时间较长,也更不容易使用 PLC 算法对分组丢失进行掩饰^[8]。

下面一节首先计算理想信道条件下的时延限制效果,再以图表显示时延限制和非理想信道条件的组合效果。

4. 1 时延限制

时延限制值是在接收端的播放缓冲器设置的,这个设置的作用是使那些端到端延迟过长,超过播放截止时间到达的分组被丢弃。在本节中,假定所有分组的截止时间都是固定的,最大允许 150ms 的端到端延迟。这个延迟包含了编码器的算术和分组处理(封装/去封)延迟、有线网络电磁传播延迟、在无线网络交界处的队列延迟、无线介质的信道访问延迟和电磁传播延迟。

由于 150ms 的端到端延迟引起的音质下降几乎可忽略^[9],那么 MOS 分数自内在值的减少将完全由分组丢失效果决定。在文[2]中,分别对 G. 729 和 G. 711 给出了在 10ms 和 20ms 分组长度的分组丢失对 MOS 的影响,表 3 列出了对应 MOS 值 3. 6 和 4. 0 的最大分组丢失率限制。

在图 2 和图 3 中,分别对 G. 711 和 G. 729 画出了无线网络内的时延之和加理想信道中多种情形下的分组处理延迟的补偿累积分布函数 CCDF(Complementary Cumulative Distribution Function)。图中,y 坐标值表示一个分组的延迟大于

x 坐标给出的时延值的概率(图中画出的是用有线节点传向无线站点的分组的 CCDF,由于需要在 AP 端排队,这个方向上分组的延迟几乎都比其逆向传输要高)。

表 3 最小 MOS 要求下的最大分组丢失率(%)

	最小 MOS	
	4. 0	3. 6
G. 711(10ms)	1	4. 9
G. 729(10ms)	N/A	0. 33
G. 711(20ms)	1	3
G. 729(20ms)	N/A	0. 19

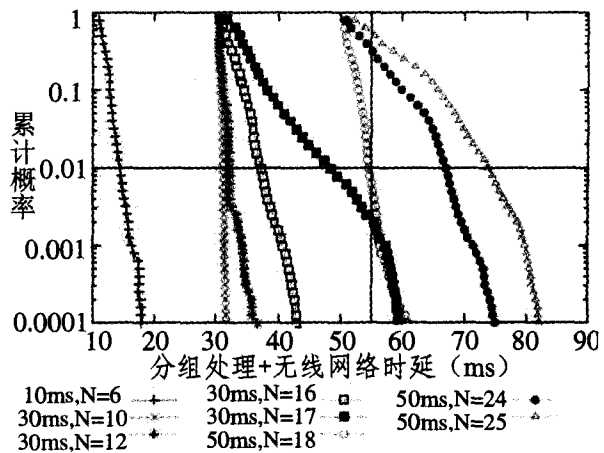


图 2 各种分组长度和通话数目下 G. 711 的时延 CCDF 函数

这两个图形可以用来确定在播放缓存由于分组的迟到造成的分组丢失率,它是一个关于时延预算的函数,这个时延预算分配给分组处理(包含 G. 729 的 5ms 预留时间)无线网络中的排队和传输(假定在有线网络中的时延为常数)。例如,使用 G. 711 编码协议 50ms 的分组大小,给定时延预算为 55ms,由图 2 可以看出,在限定分组丢失率为 1% 以下时可支持同时 18 路电话。

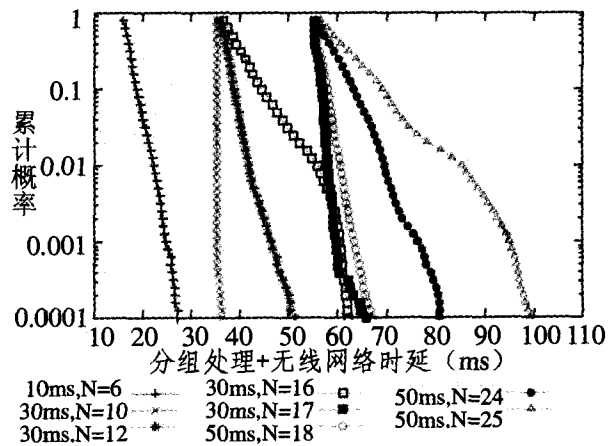


图 3 各种分组长度和通话数目下 G. 729 的时延 CCDF 函数

利用表 3 给出的分组丢失率要求,结合时延的统计,可以计算出各种分组长度与延迟预算下的通信容量,这个结果是对吞吐量限制(对较大的分组较好)和时延限制(对较小的分组较好)的一个折衷。表 4 列出的通信容量是通过根据无线网络状况选择最适当的分组长度而得到的容量值,与其对应的分组处理时延预算、分组长度的最佳值(以 ms 为单位)在

容量值后面的括号内给出(注意 G. 729 不能用于 MOS 为 4.0 的最小通话音质需求)。

表 4 理想信道假定下 802.11b 网络的容量

时延预算 (ms)	MOS=3.6		MOS=4.0
			G. 711
	G. 711	G. 729	
=10	0	0	0
20	6(10)	6(10)	6(10)
30	11(20)	11(20)	11(20)
40	16(30)	16(30)	16(30)
50	17(30)	20(30)	17(30)
60	23(50)	23(50)	22(50)
70	25(50)	31(50)	24(50)
80	25(50)	33(50)	25(50)
=90	25(50)	34(50)	25(50)

从表中可以看到,对 3.6 的 MOS,在时延预算小于 20ms 的情况下,G. 711 和 G. 729 提供了相同的容量。一般来说,G. 711 受吞吐量限制,G. 729 受时延限制,特别是 5ms 的预留时间使 G. 729 在这些情况下受时延限制相当突出。在时延预算更高的环境中,吞吐量限制占据主要因素,这种情况下 G. 729 能提供更高的容量。

比较 3.6 和 4.0 两种 MOS 下的容量,显而易见,MOS 越高,容量受到限制越大。但是,两种不同音质要求下容量的差别也是非常小的,尽管最大分组丢失率从 4.9% 降到了 1%。

4.2 非理想信道条件

为了估算非理想信道条件的效果,此处使用一个简化的信道模型,采用一个常数误码率 BER(Bit Error Rate),假定每对节点之间的信道误码率都为此常数,并假定其彼此间的比特错误都独立发生。在这里使信道维持相同的误码率,而不是维持一定的信噪比 SNR(Signal-to-Noise Ratio),是因为 SNR 到 BER 的对应关系跟网络的具体实现有关。最后,我们还假定,除非发生碰撞,否则 PLCP 前导码和首部都能被正确接收并解码。

前面已经提到,较差的信道质量会导致较高的 BER 值,引起每个分组时延的增长。这个情况的说明见图 4: 通话量为 10、使用 30ms 的 G. 711 分组长度、BER 值范围从 0 至 10^{-4} 的时延 CCDF 函数图形。表 5 列出了最小 MOS 为 3.6 时的吞吐量限制(没有时延限制)的容量。跟在理想信道下一样,分组丢失仅出现在 AP 的接口队列处。

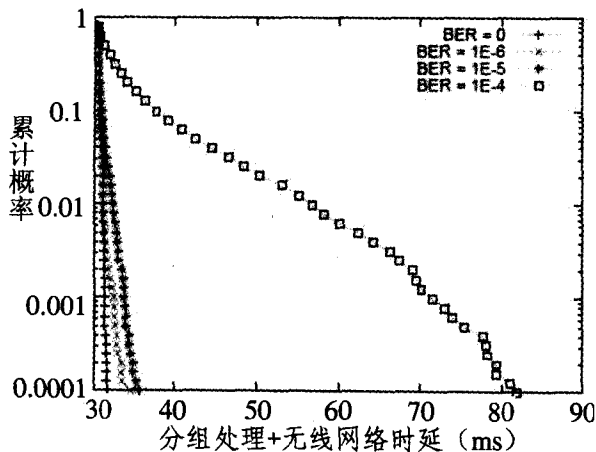


图 4 30ms G. 711 分组长度、10 路通话下的时延 CCDF

表 5 各种 BER 取值下受吞吐量约束的通信容量

BER	每帧数据量							
	G. 711				G. 729			
	10	20	30	50	10	20	30	50
0	6	12	17	25	7	14	21	34
10^{-6}	6	12	17	25	7	14	21	34
10^{-5}	6	12	16	24	7	14	20	33
10^{-4}	5	9	12	15	6	12	18	29
2×10^{-4}	4	7	8	7	5	11	16	25

不难看到,在 $BER \leq 10^{-6}$ 时,G. 711 与 G. 729 两者的分组错误率都非常低,跟假定的无误码理想信道差别小到可以忽略;对于 $10^{-6} \leq BER \leq 2 \times 10^{-4}$ 的情况,根据数据分组包含的数据量不同,信道容量有不同程度下降;如果 $BER \geq 10^{-3}$,那么网络的分组错误率会大到一路通话也不能够承载了,因为太大的误码率会导致过多的重传,从而分组丢失现象就显著增加。

从前面的理想信道情况中可以看到,适当选择预算时延,可以使在一个给定的 MOS 要求下的通信容量达到最大;如果根据信道条件和时延预算两者的效果来选择参数,则可以在非理想信道条件下得到网络容量的最大值。表 6 列出了 $BER = 10^{-4}$ 、时延预算最高达 110ms 的分组长度对应的最大线路容量,图 5、6 和 7 展示了在 MOS 要求分别为 3.6 和 4.0 的各种 BER 取值情况下 G. 711 和 G. 729 分别取最优化参数时对应的最大容量。

表 6 $BER = 10^{-4}$ 时 802.11b 的通信容量

时延预算 (ms)	MOS=3.6		MOS=4.0
	G. 711	G. 729	G. 711
=10	0	0	0
20	4(10)	5(10)	4(10)
30	7(20)	6(10)	5(10)
40	9(30)	11(20)	7(20)
50	10(30)	16(30)	9(30)
60	11(30)	17(30)	10(30)
70	11(30)	21(50)	10(30)
80	11(30)	27(50)	11(30)
90	11(50)	28(50)	11(30)
100	13(50)	29(50)	11(30)
110	13(50)	29(50)	11(50)

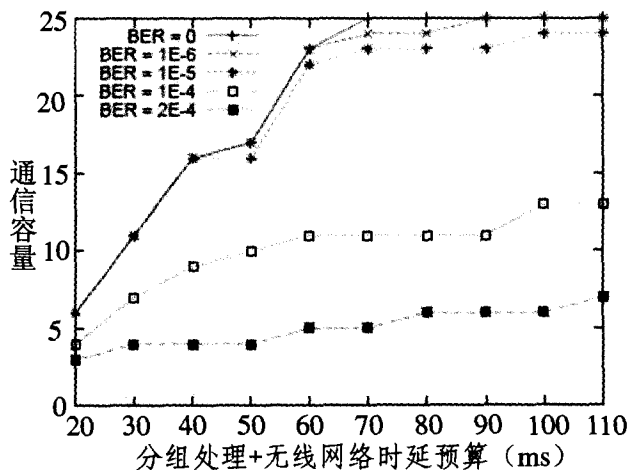


图 5 $MOS \geq 3.6$ 时 G. 711 支持的话路数

(下转第 70 页)

参考文献

- 1 Shenker S. Fundamental design issues for the future internet. IEEE J-SAC, 1995, 13(7): 1176~1188
- 2 RFC 1633. Integrated Services in the Internet Architecture: An Overview
- 3 RFC 2475. An Architecture for Differentiated Services
- 4 RFC 2474. Definition of the Differentiated Services Field (DS Field) in the IPv4 and IPv6 Headers
- 5 RFC 2702. Requirements for Traffic Engineering Over MPLS

- 6 张维迎. 博弈论与与信息经济学. 上海: 上海人民出版社, 1996. 82~85
- 7 Lee W. Mcknight, Jahangir Boroumand, Pricing Internet services: approaches and challenges. Computer, 2000, 33(2)
- 8 Gibbens R J, Kelly F P. Resource pricing and the evolution of congestion control. Automatica, 1999, 35
- 9 贝克尔. 人类行为的经济分析. 上海: 上海三联书店, 1993
- 10 周惠中. 微观经济学. 上海: 上海人民出版社, 1997
- 11 张远超, 董长瑞. 微观经济学. 山东: 山东人民出版社, 1998

(上接第 54 页)

从这些图中不难发现, 对 3.6 的 MOS 要求来说, G. 729 在各种情况下都能提供与 G. 711 相等或者更高的通信容量。这是由于在一个给定的 BER 情况下, 由于 G. 729 产生的分组长度比 G. 711 更短, 因此分错误率更低, 重传的机率更小。虽然理论上说, 可以把分组成得更小, 以进一步降低分组错误率, 但是在 802.11 网络的应用中, 这个方法要受到限制, 因为 802.11 的 MAC 数据报大小不得低于门限值 256 字节。实际上, 仿真试验也证明, 把分组成得更小, 并不能提供比最佳分组长度更高的通信容量。

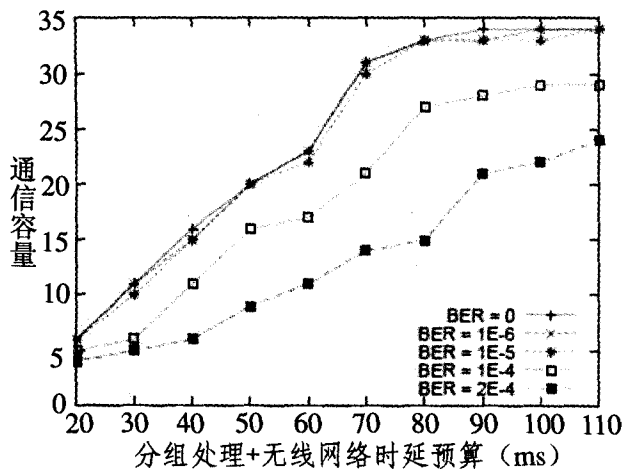


图 6 MOS \geq 3.6 时 G. 729 支持的话路数

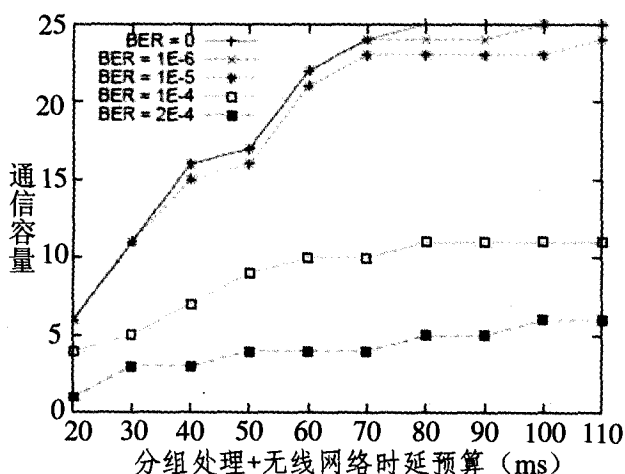


图 7 MOS \geq 4.0 时 G. 711 支持的话路数

在大多数信道条件下, BER $<10^{-4}$, 时延主要是分组处理延迟。这种情况下, 最佳分组长度的选择可以不考虑信道质量, 直接选择小于时延预算的最大分组长度。但是在表 6 中可以看到, 对于更高的 BER, 情况就不是这样了。

4.3 讨论

从前面给出的结果来看, 语音网络可以假定一种固定的播放方案, 其端到端时延为 150ms。但这个值并不总是最组合值。文[9]中指出, 如果对这个时延取值的增加量在 50ms 之内, MOS 的下降将会非常小。例如, 如果时延增为 170ms, MOS 下降则不到 0.1。

从前面还可以看到, 通信容量与时延限制关系非常大。如果放松时延限制条件, 即增加播放时限, 则可以在尽可能不降低 MOS 的情况下, 增加通话路数。为了最大程度提高通话容量和保证足够高的音质, 实际应用中需要仔细制定播放方案, 但对这个论题的讨论就已经超出本文的范围了。

结论 本文首先计算了运载语音 IP 电话的 IEEE 802.11b 网络的通信容量上界, 并证明了在信道质量很好、时延限制很低甚至没有的情况下, 网络的实际容量非常接近这个上限。

其后, 本文用仿真试验演示了信道容量与分配给分组处理和无线网络延迟的时延预算呈高度相关。在非理想信道质量情况下, 实验演示了对 BER 值小于 10^{-5} 时, 容量接近于无错信道; BER 高于这个数值时, 随着信道质量下降, 通信容量也显著下降; 当 BER $\geq 10^{-3}$ 时, 通信容量降到零。根据时延预算和信道质量适当选择分组长度, 可以使通信容量达到最大。不过, 在大多数情况下, 最佳分组长度的选择可以忽略信道条件。

所有的情形下, G. 729 编码方案都可以比 G. 711 提供更高的通信容量, 除非要求 MOS 大于 3.65 的通话质量, 这时不能使用 G. 729 编码器。

参考文献

- 1 ISO/IEC and IEEE Standard. Part 11: Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) specifications (as supplemented). 1999
- 2 ETSI Technical Report. Actual measurements of network and terminal characteristics and performance parameters in TIPHON networks and their influence on voice quality. ETSI TR 101 329-6, V2. 1. 1 (2002-02), 2002
- 3 Crow B P, Widjaja J, Kim J G, et al. IEEE 802.11 Wireless Local Area Networks. IEEE Communications Magazine, September 1997
- 4 Kopsel A, Wolisz A. Voice transmission in an IEEE 802.11 WLAN based access network. In: Proc of ACM Workshop on Wireless Mobile Multimedia, July 2001
- 5 Smavatkul N, Chen Y, Emeott S. Voice Capacity Evaluation of IEEE 802.11a with Automatic Rate Selection. Proc. of GLOBECOM, 2003
- 6 Garg S, Kappes M. Can I add a VoIP call?. IEEE Int Conf on Communications, 2003 (ICC '03)
- 7 Garg S, Kappes M. An experimental study of throughput for UDP and VoIP traffic in IEEE 802.11b networks. IEEE Wireless Communications and Networking, 2003
- 8 Rosenberg J G. 729 Error Recovery for Internet Telephony; [Technical Report]. CU-CS-01. Columbia University 6-01, 2001
- 9 ITU-T Recommendation G. 107 The Emodel, a computational model for use in transmission planning. 1998