

无线局域网上 IP 语音传输的容量分析

陈立全¹, 胡爱群¹, 周雪莉²

(1. 东南大学无线电工程系, 南京 210096; 2. 山东省电子职业技术学院, 济南 250014)

[摘要] 由于无线媒介的易变性, IP 语音在无线局域网上传输受到极大的限制。通过对无线局域网媒体接入层机制的分析, 考虑了碰撞概率因素, 提出了采用马尔可夫链模型来推导在 IEEE 802.11b/a/g 标准下单个接入点同时支持 IP 语音用户最大容量的方法, 计算出针对不同 IP 语音编码标准如 G.711, G.729 和 G.723.1 下的用户容量上限。并在 NS2 仿真环境下进行结果验证。

[关键词] 无线局域网; IP 语音; 容量; 马尔可夫链

[中图分类号] TN925.93; TP393.1 **[文献标识码]** A **[文章编号]** 1009-1742(2005)07-0081-05

1 引言

利用无线局域网 (WLAN, wireless LAN) 技术进行数据传输已在家庭、企业和公共热点地区得到广泛应用。IEEE 802.11 系列标准支持从 1 Mb/s 到 11 Mb/s 和 54 Mb/s 的数据接入能力。在有线网络中得到广泛应用的 IP 语音 (VoIP, voice over IP) 技术必然会拓展到无线局域网。

IP 语音是通过将数字编码的语音打包后, 在实时传输协议 (RTP) 的控制下以 UDP 的模式传送。文献 [1] 对 UDP 数据在 WLAN 上传输进行了深入的分析。IP 语音的传输必须满足一定的时延、时延抖动和丢包率等服务质量 (QoS) 要求^[2]。由于 WLAN 无线媒介是工作在 2.4 GHz 或 5 GHz 的开放空间的媒体, 容易受到外界的干扰, 加上无线信道多径衰落及多普勒效应的影响, 使得 VoIP 在 WLAN 上传输受到了极大的限制。同时 WLAN 上分布式协调模式 (DCF) 中采用的载波侦听多路接入/冲突避免 (CSMA/CA) 机制来传输实时媒体时的效率问题也是影响 VoIP 在 WLAN 上传输的因素之一。

采用静态估计链路容量的方法或在不同时延约束条件下和不同链路误码率条件下, 对 WLAN 上 VoIP 传输的容量问题进行了分析和研究^[3,4]。都是基于静态条件进行的估计过程。在文献 [5] 提出的基于概率分析马尔可夫链 (Markov chain) 传输模型的基础上, 考虑了接入概率和碰撞概率因素, 得出不同编码方式下 IP 语音在 WLAN 上传输的最大容量。

2 IEEE 802.11 MAC 协议

IEEE 802.11 MAC 层提供了 2 种不同功能的接入方法: DCF 分散式协调功能和 PCF 集中式协调功能^[6]。协调功能是指一个用来决定什么时候哪个工作站能收发数据的机制。DCF 是 IEEE 802.11 MAC 的基本接入方法, 主要是利用 CSMA/CA 方法来决定站点收发异步数据的过程。PCF 提供工作站收发具有实时性要求的数据, 在使用上属于无竞争方法, 只能应用在基础架构模式的无线局域网中。在一个 BSS 中, PCF 和 DCF 协调过程交替使用, 形成超级帧的传输过程。无线局域网的 DCF 接入过程中, CSMA/CA 利用载波侦

[收稿日期] 2004-06-21; **修回日期** 2004-10-18

[基金项目] “八六三”国家高技术研究发展计划资助项目 (2003AA143040)

[作者简介] 陈立全 (1976-), 男, 广西容县人, 东南大学无线电系博士研究生

测技术来判断某一信道的忙碌或空闲。如果信道是忙碌的，工作站必需延迟一个随机的时间直到发现传输媒介是空闲的，才能传送帧。IEEE 802.11 中还有帧间隔概念，如短帧间隔时间 SIFS，PCF 帧间隔时间 PIFS，DCF 帧间隔时间 DIFS 和扩展帧间隔时间 EIFS，其中 SIFS < PIFS < DIFS < EIFS。CSMA/CA 规定在等候帧间隔时间后，再等待一段随机退避时间后才发送帧。

3 理论分析

分析首先基于一个理想的假设，即无隐藏站点、无第三方截取的理想信道条件。接入方式考虑基本接入方式、RTS/CTS 方式的情况。假设系统中站点数量 n 不变，且每个站点总有需要传送的数据，系统处于饱和状态。用到的参数中 p 指数数据包在信道中传送的碰撞概率； τ 为站点在一个随机 slot 时间内传送数据的概率； $c(t)$ 描述了给定站点在任一时刻 t 的退避时间计数器值的随机过程； $i(t)$ 描述了给定站点在任一时刻 t 的退避阶数的随机过程。另外 W 指竞争时间窗最小值即 $W = W_{\min}$ ； m 指最大退避阶数； i 指取值在 $[0, m]$ 的退避阶数，站点每发生一次数据重传则 i 值加 1，直到最大值 m ； W_i 是退避阶数取 i 时的竞争时间窗，即 $W_i = 2^i W$ 。而最大竞争时间窗 W_{\max} 为 $2^m W$ 。根据 802.11 基本接入方式下的 CSMA/CA 机制，站点退避时间的二维随机过程 $\{i(t), c(t)\}$ 可定义为一个离散时间的马尔可夫过程，其状

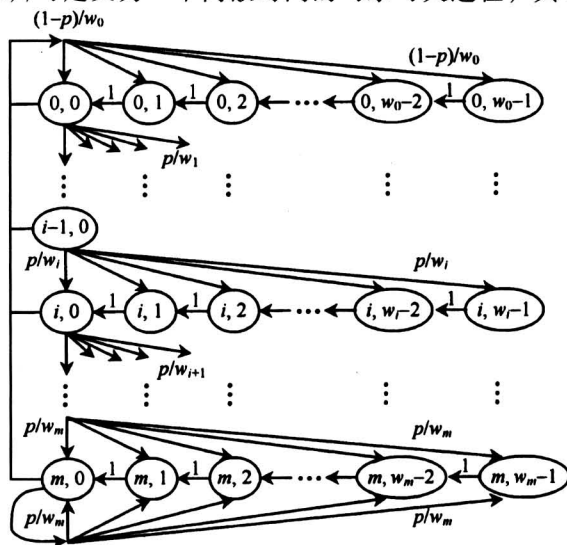


图 1 Markov 链状态转移图

Fig.1 State transferring Markov chain model

态转移过程如图 1 所示。

根据包传送概率 τ 的定义，由于每一个站点都是在退避时间结束即退避时间计数器为 0 时才发送数据，根据文献 [5] 通过运算得到方程组

$$\begin{cases} \tau = \sum_{i=0}^m a_{i,0} = \frac{a_{0,0}}{1-p} = \\ \frac{2(1-2p)}{(1+w)(1-2p) + pw(1-(2p)^m)}, \\ p = 1 - (1-\tau)^{n-1} \end{cases} \quad (1)$$

并用数学方法求解，得到包传送概率 τ 的唯一解。

定义 T_h 为系统吞吐量，即信道上单位时间里成功传输的比特数。

$$T_h = (\text{一个 slot 时间内成功传输比特的平均值}) / (\text{一个 slot 时间时长的平均值}) \quad (2)$$

假设系统由 n 个站点组成，则每个 slot 时间内有 n 个站点参与竞争信道，且每个站点均以概率 τ 发送数据，则一个任意 slot 时间内系统中至少有一个站点发送数据的概率 P_{tr} 和恰好有一个站点发送数据且成功发送的概率 P_s 为

$$P_{tr} = 1 - (1-\tau)^n \quad (3)$$

$$P_s = n\tau(1-\tau)^{n-1}/P_{tr} = n\tau(1-\tau)^{n-1}/(1-(1-\tau)^n) \quad (4)$$

用 $E[S]$ 表示发送数据包的平均比特数，则式 (2) 中的分子部分可以用 $P_s P_{tr} E[S]$ 表达。slot 时间占用有 3 种情况，没有数据发送即空闲的 slot 时间、成功发送数据的 slot 时间和发生碰撞的 slot 时间，由此，系统的吞吐量可以进一步表达为

$$T_h = P_s P_{tr} E[S] / ((1-P_{tr})\sigma + P_{tr} P_s T_s + P_{tr} (1-P_s) T_c) \quad (5)$$

式中 σ 为没有数据发送的 slot 时间， T_s 是信道中成功发送数据时占用信道的平均时长， T_c 是信道中发生碰撞时占用信道的平均时长，设置 σ, T_s, T_c 为同一单位的数值。对不同的接入方式而言， T_s, T_c 的不同而得到了不同的饱和吞吐量的值。在基本接入模式中，

$$\begin{aligned} T_s^{bas} &= H + E[S] + SIFS + 2\delta + ACK + DIFS, \\ T_c^{bas} &= H + E[S^*] + \delta + ACK + DIFS \end{aligned} \quad (6)$$

式中 δ 是传输延迟时间， $E[S^*]$ 是传送发生碰撞时的最大数据包长度的平均值， H 为包括物理帧头和 MAC 层帧头在内的负载时间，ACK 为 ACK 帧传输占用的时间。在 RTS/CTS 机制中，考虑的碰撞只发生在 RTS 帧的情况，可得到

$$T_s^{rts} = RTS + CTS + 3SIFS + 4\delta + H + E[S] + ACK + DIFS \quad (7)$$

$$T_c^{rts} = RTS + DIFS + \delta,$$

式中 RTS 和 CTS 分别为 RTS 帧和 CTS 帧传输占用的时间。对式 (5) 进一步整理得到

$$T_h = E[S] / (T_s - T_c + (\sigma(1 - P_{ur})/P_{ur} + T_c)/P_s) \quad (8)$$

WLAN 上 VoIP 传输的容量上限值 N (也即是在无线局域网中可以同时允许接入网络实现语音通话的最多用户数) 的计算公式为

$$N = [(饱和吞吐量 T_h) /$$

$$2(\text{成功传送一个 IP 语音包所需带宽})] - 1 \quad (9)$$

式中成功传送一个 IP 语音包所需带宽包括 IP/UDP 和 RTP 报头带宽。减 1 是把 AP 节点减去。

4 容量结果分析

VoIP 的传输根据不同的语音编码方式而占用不同的带宽。而不同的编码方式中, 不同打包长度的传输占用的带宽也不一样。考虑常用的 G.711, G.729, G.723.1 (6.3 kb/s) 编码方式 VoIP 语音在 WLAN 中传输的过程, 同时考虑在基础接入模式和 RTS/CTS 接入模式下的 VoIP 容量过程。在 802.11b 中, 主要考虑采用 11 Mb/s 速率传输时的最大 VoIP 容量; 在 802.11a 和 802.11g 中, 则考虑采用 54 Mb/s 速率传输时的最大 VoIP 容量。

对式 (8), 可以证明它的最大值是与接入的站点数无关的^[7]。对于确定的接入数据包长和其他参数, 不同的站点接入时, 可以在不同的接入概率 τ 上得到最大的饱和吞吐量值, 而这个饱和的吞吐量值大致不变。图 2 和图 3 画出不同站点接入时 3808 b 大小数据包传输的最大吞吐量过程, 可见两图中不同站点接入时的最大吞吐量值大致相等。

根据以上的原理, 对不同编码方式的 VoIP 语音在 WLAN 中传输进行分析。IEEE 802.11b/a/g 的参数如表 1 所示。理论分析和仿真实验得到如表 2 所示的最大容量结果, 其中 G.711, G.729 和 G.723.1 (6.3 kb/s) 不同的打包长度下有不同的容量上限值。(表 2 中括号外的值为理论分析值, 括号内的值为从第 5 节得到的仿真数值)

从表 2 看到, 随着语音包打包长度的加大, WLAN 中能支持的 VoIP 链路容量也加大。VoIP 打包的数据长度影响容量值, 大的数据包能够支持更多 VoIP 链路的传输。得到这个结果的原因之一

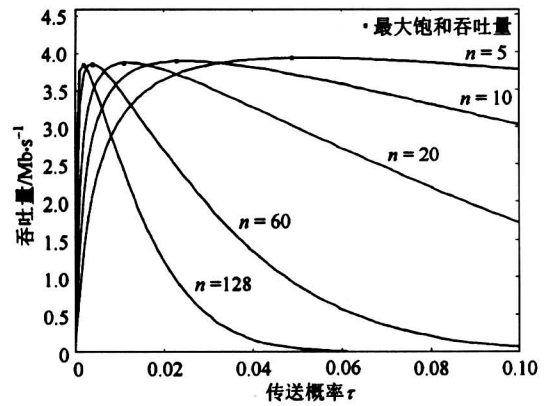


图 2 基本接入机制下吞吐量随传送概率 τ 的曲线

Fig.2 Throughput versus transmission probability τ for the basic access mode

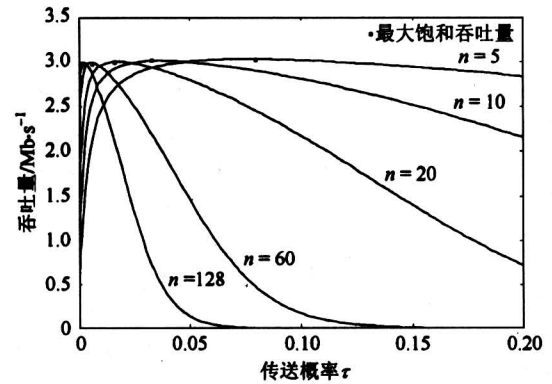


图 3 RTS/CTS 下吞吐量随传送概率 τ 的曲线

Fig.3 Throughput versus transmission probability τ for the RTS/CTS transmission mode

表 1 IEEE 802.11b/a/g 使用的主要参数列表

Table 1 Parameters set in IEEE 802.11b/a/g

参数	IEEE 802.11b	IEEE 802.11a	IEEE 802.11g (OFDM)
Physical / μ s	192	20	20
SlotTime / μ s	20	9	9
SIFSTime / μ s	10	16	16
DIFSTime / μ s	50	34	34
ShortRetryLimit	7	7	7
LongRetryLimit	4	4	4
W_{min}	31	15	15
W_{max}	1023	1023	1023

是当语音包长度较小时语音净荷数据和其他帧头负载的比例较小; 而当数据帧加大时, 这个比例变

大, 净荷数据的传输效率增大。另外更主要的原因是当采用小的打包长度时, 单位时间内需要传输的包数量增大, 由此引起数据传输时帧头的开销和 MAC 层协议的开销变大, 效率变低; 而当采用大

的打包长度传输时, 相应的开销会变小, 效率增加。当然, 采用长帧传送 VoIP 语音时需要考虑传输延时会变大, 而且在 WLAN 中长帧更容易受外界干扰而产生丢包。

表 2 IEEE 802.11b/a/g 标准下 VoIP 的容量值

Table 2 VoIP capacities in IEEE 802.11b/a/g wireless LANs

语音包 大小/ms	IEEE 802.11b (Basic 模式)			IEEE 802.11b (RTS/CTS 模式)			IEEE 802.11a (Basic 模式) IEEE 802.11g (DSSS-OFDM 模式)		
	G.711	G.729	G.723.1	G.711	G.729	G.723.1	G.711	G.729	G.723.1
	10	6 (6)	6 (6)		3 (3)	4 (3)		30 (30)	31 (31)
20	12 (11)	14 (14)		7 (7)	8 (8)		56 (56)	64 (64)	
30	17 (17)	22 (22)	22 (21)	11 (11)	13 (13)	13 (13)	79	95	96 (96)
40	21 (21)	29 (29)		14 (14)	17 (17)		98	126	
50	25 (25)	36 (36)		17 (17)	22 (22)		116 (116)	156 (156)	
60	28 (28)	43 (42)	44 (43)	20 (20)	26 (25)	26 (25)	132	186	188 (187)
70	31 (31)	50 (49)		23 (23)	30 (29)		146	215	
80	33 (32)	56 (55)		25 (24)	35 (34)		159 (158)	245 (244)	
90	36 (35)	63 (62)	65 (63)	27 (26)	39 (38)	39 (38)	170	271	276
100	38 (37)	68 (67)		29 (28)	43 (42)		181	299	

IEEE 802.11a/g 采用了 54 Mb/s 的传送速率得到更高的 VoIP 容量。其中 IEEE 802.11g 工作在 54 Mb/s 的 DSSS-OFDM 模式, 除工作频段外, 在 MAC 层上可认为与 IEEE 802.11a 一样。

在 WLAN 中, 物理前导码和帧头的大小是额外的负载。减少这个负载可以使 WLAN 系统支持更多的 VoIP 用户同时传输。实验表明, 使用 G.729 编码以 10 ms 打包发送时, 在一个 IEEE 802.11b 的接入点覆盖范围内, 使用短帧头模式可以将 VoIP 容量的值从 6 个增加到 8 个。其他的实验也证明了 IEEE 802.11b 中采用短帧头模式能使支持的 VoIP 的容量增加 30% 到 40%, 这需要所有通信的站点都支持短帧头传输模式。在 802.11g 标准中, 支持短帧头的传输模式是强制性的。

5 仿真分析和验证

选用 VINT 组织的 NS2 (Network Simulator ver. 2) 工具在 Linux 下进行仿真^[8]。遵循 IEEE 802.11b/a/g 的标准, 速率选择为 11 Mb/s 或 54 Mb/s。仿真主要考虑基础接入模式的情况, 同时考虑 RTS/CTS 的传输模式。仿真使用的无线信道参数如表 1 所示, 以理论计算值为参考, 选取临近的 VoIP 节点数目进行时延、时延抖动、丢包率和获

得带宽等方面进行仿真。根据 VoIP 传输的性能要求^[2], 在有回波抵消器的基础上, 获得可接受质量语音的时间延时不能超过 300 ms, 时延抖动不超过 10 ms, 丢包率不超过 1%。以此为基准对图 4 和图 5 中的 G.711 20 ms 的 VoIP 传输的时延和丢包率性能进行分析, 可以知道 n 为 11 是这个实验中的最大容量上限。其他模式下得到的实验结果如表 2 中括号中所示。在 802.11a/g 中, 只选择了部分的模式进行仿真验证。

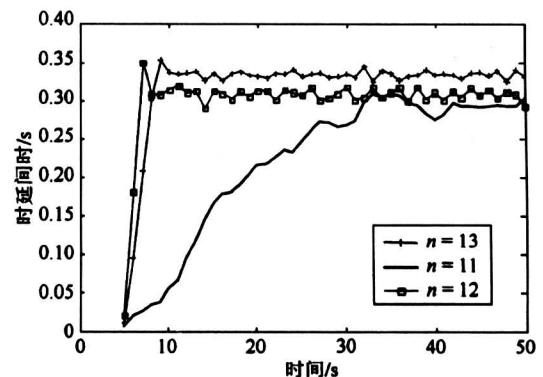


图 4 G.711 编码语音的仿真时延比较图

Fig. 4 Delay simulation results of G.711 codes

仿真的结果与理论分析数值之间存在小的误

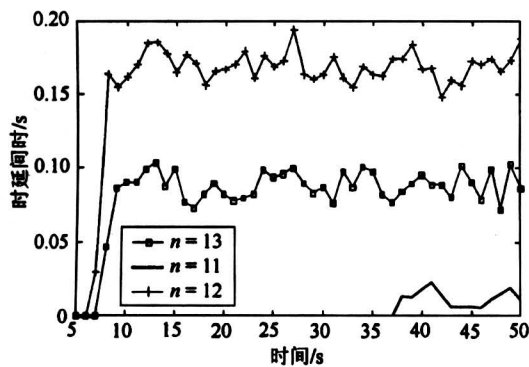


图 5 G.711 编码语音的仿真丢包率比较图

Fig.5 Drop rate simulation results of G.711 codes

差, 一方面是由于最大 VoIP 容量理论值是根据最大吞吐量来求出的值, 它是一个理论上限, 在实际情况下一般难以达到, 这也是该数据与文献 [3] 中的数据之间存在小误差的原因。另一方面, 仿真中的多个 VoIP 节点之间的源的启动时间是人为定义的, 没有达到随机化, 当多个站点都处于同一时刻开始发送和传送时, 必然使碰撞的概率增大。采用随机的源启动时间就能减少这个误差了。

6 结语

提出了基于概率分析的马尔可夫链传输模型对 VoIP 在 WLAN 上传输的容量进行分析, 得出不同编码方式 IP 语音在 WLAN 上传输的最大容量值。它为继续研究 VoIP 技术在 WLAN 上传输和为公共无线局域网 (Public WLAN) 的布网工作提供有效的帮助。由于 VoIP 在 WLAN 上传输的容量受

限和无线媒介的变动性, 需要更多的研究来改进 VoIP 在 WLAN 上的传输过程, 包括增加容量方法, 提出有效的 WLAN 上 VoIP 接纳控制方法等。

参考文献

- [1] Garg S, Kappes M. An experimental study of throughput for UDP and VoIP traffic in IEEE 802.11b networks [A]. IEEE WCNC, Vol 3 [C]. New Orleans, Louisiana, 2003. 1748~1753
- [2] 黄永峰, 李 星. VoIP 的语音质量分析与控制 [J]. 控制与决策, 2003, 4 (18): 475~478
- [3] Garg S, Kappes M. Can I add a VoIP call [A]. IEEE Int Conf on Communications (ICC) [C], Anchorage, Alaska, 2003
- [4] David P H, Fouad A T. Capacity of an IEEE 802.11b wireless LAN supporting VoIP [A]. to appear in Proc IEEE Int Conf on Communications (ICC) [C]. Paris, 2004
- [5] Banchi G. Performance analysis of the IEEE 802.11 distributed coordination function [J]. JSAC, 2000, 18 (3): 535~547
- [6] IEEE 802.11 WG, Wireless LAN medium access control (MAC) and physical layer (PHY) specifications [S]: 1999
- [7] Peng Y, Wu H T, Cheng S D, et al. A new self-adapt DCF algorithm [A]. IEEE GLOBECOM [C]. Taipei, Taiwan, 2002. 87~91
- [8] Kavin F, Kannan V. The ns manual [EB/OL]. <http://www.isi.edu/nsnam/ns/ns-documentation.html>, 2003-06-06/2004-06-12

Capacity of VoIP in IEEE 802.11 Wireless LAN

Chen Liquan¹, Hu Aiqun¹, Zhou Xueli²

(1. Radio Engineering Department, Southeast University, Nanjing 210096, China;

2. Shandong College of Electronic Technology, Jinan 210096, China)

[Abstract] Voice transmitted over wireless LAN faces serious challenge because of the fluctuation of the wireless channel. In this paper, the transmission of voice over wireless LAN is firstly analyzed. Taking collision probability into account, the stochastic analysis based on a Markov chain to calculate the upper bound number of simultaneous VoIP calls that can be supported in a single cell of an IEEE 802.11b/a/g network is proposed. The upper bound capacities of G.711, G.729 and G.723.1 code transmitted over 802.11b/a/g are figured out. The simulation results from NS2 simulator have validated the analysis values.

[Key words] wireless LAN; voice over IP; capacity; Markov chain