

# 无线实时多播系统中混合纠错方案性能分析与评估

谭国平, 徐立中, 严锡君, 花再军  
(河海大学 计算机与信息学院, 江苏 南京 210098)

**摘要:** 为了对无线实时多播系统中纠错方案的性能进行精确的分析与评估, 提出基于 GE(Gilbert-Elliot)信道模型与实际实验数据的精确分析与统计评估方法。提出一种分析混合纠错方案性能的闭式表达式, 并设计基于 WLAN 的实时多播验证与评估系统, 在此基础上, 采用极大似然估计方法对实验数据进行统计评估。结果表明, GE 模型能精确匹配实际删除错误信道, 且待评估纠错方案的理论分析结果与实际测试结果基本一致, 验证了该方法的精确性, 提出的方法对精确分析评估各种纠错方案在无线实时多播系统中的性能具有参考和借鉴意义。

**关键词:** 无线网络; 实时多播; 混合纠错; GE 信道模型

中图分类号: TN919.3

文献标识码: A

文章编号: 1000-436X(2012)01-0017-07

## Performance analysis and evaluation of a hybrid erasure error correction scheme in wireless real-time multicast systems

TAN Guo-ping, XU Li-zhong, YAN Xi-jun, HUA Zai-jun  
(College of Computer and Information Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China)

**Abstract:** In order to analyze and evaluate accurately the performance of erasure error correction (EEC) schemes in wireless real-time multicast (WRM) systems, A method which relying on the Gilbert-Elliot (GE) channel model and the practical experimental data was proposed. Namely, a closed-form expression for analyzing the performance of a hybrid EEC scheme over GE channel was contributed. Then, a validating and evaluating system with real-time multicast services over WLAN was designed. Based on the system, the maximum likelihood estimation method was adopted for statistical evaluations. The results show that the GE model can match the practical erasure error channel accurately. Both the analysis results of the hybrid EEC scheme and the experimental results are basically coincident, which validates the accuracy of the method. This method is of reference significance for analyzing and evaluating accurately all kinds of EEC schemes in WRM systems.

**Key words:** wireless networks; real-time multicast; hybrid error correction; Gilbert-Elliott channel model

### 1 引言

随着无线宽带网络的高速发展, 实时多媒体多播业务已吸引了越来越多研究者的注意。众所周知, 基于 IP 多播的数字视频广播(DVB)<sup>[1]</sup>系统通常

采用传统的实时传输协议(RTP)来提供关于接收端与接收质量等信息。然而, 传统 RTP 不提供任何机制保证实时多播业务的 QoS。由于无线信道受衰落、干扰等影响, 应用层分组丢失无法避免。因分组丢失错误为典型的删除错误, 因而可利用各种纠

收稿日期: 2010-09-06; 修回日期: 2011-04-12

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(61001068); 教育部博士点基金资助项目(20100094120017); 中央高校基本科研业务费基金资助项目(2009B04014)

**Foundation Items:** The National Natural Science Foundation of China (61001068); The Specialized Research Fund for the Doctoral Program of Higher Education (20100094120017); The Fundamental Research Funds for the Central Universities (2009B04014)

删技术进行恢复。现有研究发现，这种删除错误的严重程度会随着多播数据速率的变化而变化<sup>[2]</sup>。因此，有必要在应用层采用特定的纠删控制策略来保证 DVB 业务的目标分组丢失率 (PLR) 要求。

有鉴于此，文献[3]提出了一种基于纯自动请求重传技术 (ARQ) 的纠删方案，该方案在一定程度上可以改善系统的性能，但效率较低。文献[4]提出了一种基于 ARQ 技术的改进方案：基于分组重复技术的混合纠错方案 (HEC-PR)，该方案可有效地保证实时多播业务在严格时延限制下 (如 100ms) 的目标 PLR 要求 (如  $10^{-6}$ )。理论分析和仿真结果表明，与简单 ARQ 方案相比较，HEC-PR 方案具有更好的性能，且所需冗余信息也更少，从而可有效地节省带宽<sup>[4]</sup>。

值得注意的是，文献[4]对 HEC-PR 的性能评估基于以下假设条件：无线信道在应用层被视为简单的独立同均匀随机分布 (即 i.i.d) 删除错误信道模型。然而，研究者发现基于 2 种状态的 Markov 模型非常适合对无线环境中的删除错误信道进行建模<sup>[2,5,6]</sup>。此类模型实质上属于 Gilbert<sup>[7]</sup>和 Elliott<sup>[8]</sup>提出的具有突发错误记忆效应的隐 Markov 模型 (简称 GE 模型)。显然，删除错误信道模型的准确性对具体纠删方案的性能评估具有直接而深刻的影响。实际上，准确评价许多算法的性能都需要建立精确的信道模型。移动通信系统中的调度算法<sup>[9]</sup>与移动自组网中的可用带宽估计技术<sup>[10]</sup>均需要对信道质量进行准确的估计或预测，因而对信道模型的精确性均有所依赖。在本文中，为了对 HEC-PR 方案的性能做出准确评估，必须采用更加精确的 GE 模型进行评估。鉴于此，本文提出基于 GE 信道模型的分析方法，研究提出一种分析 HEC-PR 方案在 GE 信道中的闭式表达式。此外，有别于文献[4]采用的仿真研究方法，本文还将采用基于实际实验数据的统计分析方法，用于评估 GE 信道模型的精确性以及各种具体纠删方案的性能。为此，本文设计了基于 IEEE 802.11a 的实际 DVB 实验验证系统，并在该系统中实现了 HEC-PR 方案。通过测量实际系统中的突发删除错误长度和连续无删除错误长度，采用极大似然参数估计方法，探讨 GE 模型是否匹配 IEEE 802.11a 中承载实时多媒体多播业务时的删除错误模型。在此基础上，对采用 HEC-PR 方案的理论分析结果与实际测试结果进行了比较研究，从而对本文提出的性能分析表达式的准确性进

行实际验证。最后，虽然本文是以 WLAN 为对象进行研究，但其提出的性能分析与评估方法同样适用于对其他无线实时多播系统 (例如 LTE 中的 MBMS 系统<sup>[11]</sup>等) 进行类似的研究。

## 2 纠删方案性能分析

本节将首先介绍 GE 信道模型的主要特征，然后，推导出分析 HEC-PR 方案在 GE 信道中性能的闭式表达式。

### 2.1 GE 信道模型

GE 信道模型本质上是一种具有 2 种状态 (“Good” (G) 状态和 “Bad” (B) 状态) 的隐 Markov 模型。这 2 种状态之间的概率转移关系如图 1 所示。

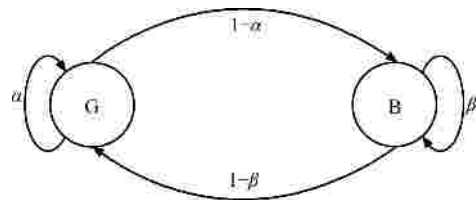


图 1 GE 信道模型中的隐 Markov 模型

在图 1 中，每种状态对应一定的实际信道质量：即在 “Good” (G) 状态，链路 PLR 可视为非常低 (用  $PLR(G)$  表示)；而在 “Bad” (B) 状态，链路 PLR 可视为非常高 (用  $PLR(B)$  表示)。在以往的研究中大多假设  $PLR(G)$  为 0 且  $PLR(B)$  为 1 (例如文献[5,6])，因该假设符合绝大多数实际情况，所以本文将继续采用该假设进行参数估计。此外，为了研究方便，假设信道状态跃迁总是发生每个分组传输的间隔。由图可知，信道状态越迁的概率如下：从 G 状态越迁到 B 状态的概率为  $1-\alpha$ ，而停留在 G 状态的概率为  $\alpha$ ；从 B 状态越迁到 G 状态的概率为  $1-\beta$ ，而停留在 B 状态的概率为  $\beta$ 。利用该模型的参数  $\alpha$  和  $\beta$ ，其  $m$  步状态转移矩阵可由式 (1) 计算<sup>[12]</sup>。

$$\begin{aligned}
 &P_i(m) \\
 &= \begin{bmatrix} \frac{1-b+(1-a)(a+b-1)^m}{2-a-b} & (1-a)(2-a-b)^{m-1} \\ (1-b)(2-a-b)^{m-1} & \frac{1-a+(1-b)(a+b-1)^m}{2-a-b} \end{bmatrix} \quad (1)
 \end{aligned}$$

现用  $P_G(m)$  表示 GE 信道在  $m$  时刻处于 G 状态的概率；且用  $P_B(m)$  表示 GE 信道在  $m$  时刻处于 B 状态的概率。信道初始状态处于 G 或 B 的概率由向量  $\vec{p}_s(0)$  表示：

$$\mathbf{V}_{P_s}(0) = [p_G(0), p_B(0)] \quad (2)$$

结合式(1)和式(2),可立即获得 GE 信道在  $m$  时刻处于 G 或 B 状态的概率,即

$$\mathbf{V}_{P_s}(m) = [p_G(m), p_B(m)] = \mathbf{V}_{P_s}(0)\mathbf{P}_1(m) \quad (3)$$

注意通过计算 GE 信道处于稳态时的概率,可推导出信道中的平均分组丢失率表达式<sup>[12]</sup>,即

$$PLR_{GE} = \frac{1-a}{2-a-b} \quad (4)$$

现用随机变量  $X$  和  $Y$  分别表示连续删除错误长度(即连续丢失 RTP 分组的个数)与连续无删除错误长度(即连续正确接收 RTP 分组的个数)。依据 GE 信道模型中隐 Markov 链的特征, $X$  和  $Y$  的概率分布函数(PDF)符合二次分布<sup>[5,12]</sup>,即有:

$$P_X^j = Prob[X = j] = b^{j-1}(1-b), \quad j \in \{1, 2, L\} \quad (5)$$

$$P_Y^i = Prob[Y = i] = a^{i-1}(1-a), \quad i \in \{1, 2, L\} \quad (6)$$

根据式(5)和式(6),可计算随机变量  $X$  和  $Y$  的期望值  $E(X)$ 和  $E(Y)$ <sup>[5]</sup>:

$$E(X) = \sum_{j=1}^{\infty} jP_X^j = \frac{1}{1-b} \quad (7)$$

$$E(Y) = \sum_{i=1}^{\infty} iP_Y^i = \frac{1}{1-a} \quad (8)$$

## 2.2 HEC-PR 方案性能分析

本节将推导出文献[4]提出的 HEC-PR 方案在 GE 信道中的性能。注意给定系统参数与 HEC-PR 方案的参数,衡量其性能必须包含以下 2 个指标:一是最终在接收端所获得的 PLR 性能;另一个是付出的代价,即所需的冗余信息。根据文献[4],可知 HEC-PR 方案的性能主要取决于参数 RTT 和每次重传过程中的重传拷贝个数。因此,下面将集中于根据该方案中每次重传过程中重传次数的分布来分析其性能。为了便于理解,以下分别介绍 HEC-PR 方案中发送端与接收端的操作过程。

1) 发送端操作:发送端以多播方式向多播组中的所有接收端发送带序号的实时数据分组,如果发送端接收到某个或者某几个接收端的 NACK 消息,发送端将向全部接收端重发所有 NACK 消息中要求重传的数据分组,在重传过程中,发送重传数据分组的拷贝个数允许大于 1。

2) 接收端操作:接收端通过检测接收到的数据分组的序号进行分组丢失检测,如果发现分组序号

不是连续的,将判定有分组丢失发生;分组丢失发生时,接收端将根据实时业务的时延要求判断是否允许重传,如果时延不允许,接收端将放弃请求发送端重传数据分组;如果时延允许,接收端将立即构造包含丢失分组序号的 NACK 消息,然后尽快将该消息反馈给发送端,因此,该 HEC-PR 方案本质上是一种基于选择重发和 NACK 消息机制的多播传输方案。

此外,为简化分析,对系统作如下假设:反馈信道中 NACK 消息的传送完全可靠,没有丢失情况发生;在无线多播场景中的接收端之间相互独立。

为便于分析 HEC-PR 方案的性能,分别定义系统参数和方案的参数,如表 1 和表 2 所示。

表 1 系统参数定义

参数	定义
$rtt$	系统往返延迟,不失一般性,单向延迟段定为 $rtt/2$
$t_s$	发送端发送 2 个连续 RTP 分组的平均时间间隔
$t_{rw}$	接收端平均等待延时;该延时表示接收端从发现 RTP 分组丢失(即删除错误时刻开始,到相应的 NACK 消息发送时刻之间的延时
$t_{sw}$	发送端平均等待延时;该延时表示发送端从接收到 NACK 消息的时刻开始,到重传该消息要求重传的 RTP 分组的时刻之间的延时

表 2 HEC-PR 方案参数定义

参数	定义
$N_r$	HEC-PR 方案中最大允许重传过程的重传次数
$N_n^j$	在第 $j$ 轮重传过程中,发送端重传每个请求的重传数据分组拷贝的个数,这里 $0 \leq j \leq N_r$ 且 $N_n^0 = 0$
$N_T$	每个重传数据分组最大可能的重传拷贝个数,显然,据此定义,有: $N_T = \sum_{q=0}^{N_r} N_n^q$

根据表 1 的定义,可知接收端从发现 RTP 分组丢失开始,到接收到相应的 RTP 分组,其时间间隔至少为  $t_p$ ,即

$$t_p = rtt + t_{rw} + t_{sw} \quad (9)$$

因 RTP 分组将在单位时间  $t_s$  内被传送,因此  $t_p$  可离散化为  $t_s$  的个数,即

$$T_p = \left\lceil \frac{t_p}{t_s} \right\rceil \quad (10)$$

其中,  $\lceil x \rceil$  表示大于等于  $x$  的最小整数。因此,根据式(3),在接收端发现 RTP 分组丢失开始,经过  $T_p$  个时间片后,信道处于状态 G 或 B 的概率可计算如下:

$$\mathbf{V} P_s(T_{lp}) = [P_G(T_{lp}) \quad P_B(T_{lp})] = \mathbf{V} P_s(0) P_t(T_{lp}) \quad (11)$$

注意式(11)中的起始点表示接收端发现 RTP 分组丢失(即删除错误)开始, 因此  $\mathbf{V} p(0) = [0, 1]$ 。根据式(11)和式(1), 得:

$$p_B(T_{lp}) = \frac{1-a + (1-b)(a+b-1)^{T_{lp}}}{2-a-b} \quad (12)$$

因多播场景中接收端之间的独立性, 任意接收端的性能仅取决于 HEC-PR 方案所采用的参数, 而与其他接收端无关。此外, 在本文中, 假设重传分组按序号先后顺序进入重传缓冲区, 且按 FIFO 规则以单位时间  $t_s$  为间隔被重传。因此, 在 FIFO 缓冲区中, 第  $j$  个重传分组丢失的概率将为  $p_B(T_{lp} + j)$ 。根据  $X$  的概率密度函数  $P_X^i$  和  $p_B(T_{lp} + j)$ , 便可计算出经过  $M$  次重传轮数后的平均分组丢失个数。最终, 依据式(10)并结合  $E(X)$  和  $E(Y)$ , 任意接收端在经历  $M$  次重传轮数后的 PLR 性能便可通过下式计算得到:

$$P_e^{H-PR}(M) = \frac{\sum_{i=1}^{\infty} \sum_{j=1}^i P_X^i \prod_{q=0}^M (p_B(T_{lp} + j))^{N_{\pi}^q}}{E(X) + E(Y)} = \frac{\sum_{i=1}^{\infty} \sum_{j=1}^i P_X^i (p_B(T_{lp} + j))^{\sum_{q=0}^M N_{\pi}^q}}{E(X) + E(Y)} \quad (13)$$

其中,  $0 < M < N_{\pi}$ 。注意  $P_e^{H-PR}(0) = PLR_{GE}$ , 且有:

$$P_e^{H-PR}(N_{\pi}) = \frac{\sum_{i=1}^{\infty} \sum_{j=1}^i P_X^i (p_B(T_{lp} + j))^{N_{\pi}}}{E(X) + E(Y)} \quad (14)$$

注意在第  $q$  次重传时, 接收端的 PLR 为  $P_e^{H-PR}(q-1)$ , 且 HEC-PR 方案中重传的拷贝次数为  $N_{\pi}^q$ 。因此, 对多播场景中的任意接收端, 在所有  $N_{\pi}$  重传轮数中所需的总冗余信息为

$$RI_{H-PR} = \sum_{q=1}^{N_{\pi}} N_{\pi}^q P_e^{H-PR}(q-1) \quad (15)$$

显然, 对多播场景中的所有接收端, 其计算相似。最终, 系统的总冗余信息为针对每个接收端的独立计算之和。至此, 推导出了计算 HEC-PR 方案在 GE 信道中的 PLR 性能与所需冗余信息的 2 个闭式表达式, 即式(14)和式(15)。因此, 给定系统参数与 HEC-PR 方案的参数, 可通过这 2 个表达式立即计算出该方案的性能。

### 3 极大似然参数估计方法

本节将介绍一种基于极大似然估计(MLE)理论的参数估计方法, 即通过统计实验过程中的连续删除错误长度与连续无删除错误长度来估计出 GE 信道模型的参数。本文采用的参数估计方法与文献[5]类似, 不同之处在于: 本文研究的是基于 IEEE 802.11a 的实时多播场景; 而文献[5]研究的是基于 IEEE 802.11g 的单播场景。具体地, 本文建立的实验平台采用的是基于改进的 RTP 及 UDP/IP/802.11a 的协议栈, 因而可在接收端通过统计连续发生删除错误而被丢弃的 RTP 分组的个数以及连续正确接收 RTP 分组的个数, 分别获得随机变量  $X$  和  $Y$  的观测值。现假设  $X$  和  $Y$  均符合二次分布, 根据 MLE 的理论且结合式(5)或式(6), 便可从充分的实验统计数据中估计出 GE 信道模型的参数(即  $\hat{a}$  和  $\hat{b}$ )。

不失一般性, 现以通过随机变量  $X$  的统计观测值来估计参数  $\hat{b}$  为例进行阐述。根据 MLE 的理论, 参数  $\hat{b}$  的似然函数可通过其概率分布函数来表示, 即

$$L = \prod_{i=1}^N P_{X;\hat{b}}^{n_i} \quad (16)$$

其中,  $n_i (i=1, 2, \dots, N)$  表示  $X$  的观察值的集合,  $N$  表示总的观察次数。将式(5)代入式(16), 即有:

$$L = \prod_{i=1}^N P_{X;\hat{b}}^{n_i} = (1-\hat{b})^N \prod_{i=1}^N (\hat{b})^{n_i-1} = (1-\hat{b})^N (\hat{b})^{\sum_{i=1}^N n_i - N} \quad (17)$$

对式(17)两边取自然对数, 即有:

$$L = \ln(L) = N \ln(1-\hat{b}) + \left( \sum_{i=1}^N n_i - N \right) \ln(\hat{b}) \quad (18)$$

然后, 计算函数  $L$  关于参数  $\hat{b}$  的偏微分, 即得到:

$$\frac{\partial L}{\partial \hat{b}} = -\frac{N}{1-\hat{b}} + \frac{\sum_{i=1}^N n_i - N}{\hat{b}} \quad (19)$$

设式(19)等于 0, 即有:

$$\frac{\partial L}{\partial \hat{b}} = -\frac{N}{1-\hat{b}} + \frac{\sum_{i=1}^N n_i - N}{\hat{b}} = 0 \quad (20)$$

最终, 整理式(20), 即得:

$$\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N n_i = \frac{1}{1-\hat{b}} \quad (21)$$

根据式(21)可看出，参数  $b$  的极大似然估计实际上取决于随机变量  $X$  的期望值表达式(7)。类似地，参数  $a$  的极大似然估计也将取决于随机变量  $Y$  的期望值表达式(8)。显然，GE 信道模型可由以下 2 个二次分布函数来描述： $P_X^j$  和  $P_Y^j$ 。因此，根据充分的实验观察次数及关于  $X$  和  $Y$  的统计观测值，便可通过类似式(21)对参数  $a$  或  $b$  进行极大似然估计。

#### 4 信道模型与纠错性能评估

首先，为了验证 GE 信道模型是否匹配 WLAN 中实时多媒体多播系统的实际删除错误信道，设计了基于 IEEE802.11a 的实际测试验证系统。该系统由 2 个移动工作站和一个无线接入点(即 AP)组成，2 个移动工作站将通过 AP 接收实时的多媒体多播数据流。在该验证系统中，采用的协议栈为改进后的 RTP 与 UDP/IP/IEEE 802.11a，且传送实际的实时多媒体多播业务数据流(本实验采用的是标准 DVB 数据流)。为了实现 HEC-PR 方案，对原始 RTP 协议的改进如下：增加了一条 RTCP 控制消息，用于传送 NACK 信息；为了适应实时多播的需求，去掉了原始 RTP 协议中的 5s 停等机制，而改为在尽可能短的时间内传送 RTCP 控制消息，将重传延时控制在尽可能小的范围。

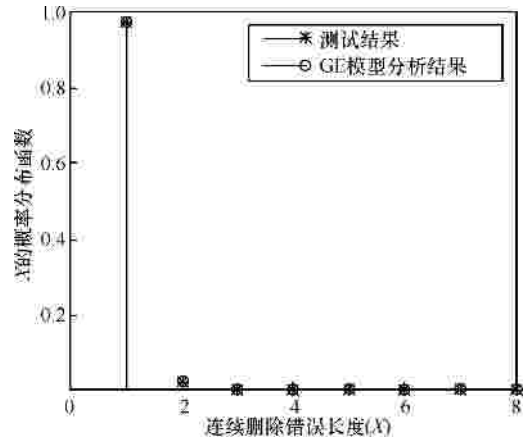
##### 4.1 删除错误信道模型评估

为评估实际实时多播场景中的删除错误信道模型是否与 GE 模型相匹配，本实验将多播速率分别设为 7Mbit/s、9Mbit/s 和 13Mbit/s。在每次实验过程中，发送 RTP 分组的总数为  $2 \times 10^7$ 。通过在接收端统计连续分组丢失的个数(即连续删除错误长度  $X$ )以及连续正确接受分组的个数(即连续无删除错误长度  $Y$ )的值，便可通过第 3 节介绍的 MLE 方法估计出 GE 模型的参数，表 3 列出在 2 个接收端的参数估计值。

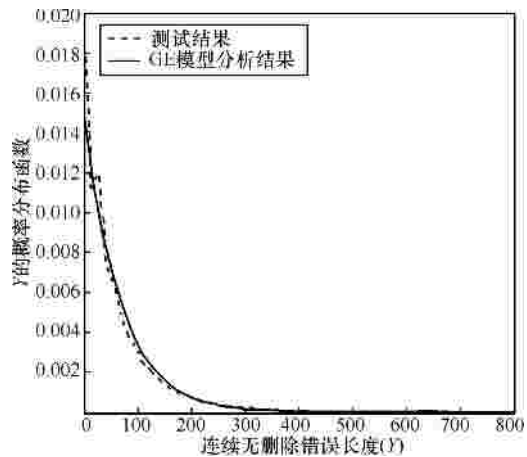
表 3 GE 模型的参数估计

多播数据速率/ (Mbit·s <sup>-1</sup> )	接收端1		接收端2	
	$a$	$b$	$a$	$b$
7	0.985 2	0.028 6	0.995 7	0.044 1
9	0.985 7	0.031 5	0.994 5	0.046 0
13	0.984 0	0.034 1	0.993 5	0.047 4

从表 3 可以看出，由于 2 个接收端位置不同，其无线环境会有差异，因此其 GE 模型的参数明显不同，且差异较大。因此，在无线实时多播场景中，不同的接收端与发送端之间的无线链路状况可认为是相互独立的。此外，为了验证实际分组丢失模型是否与 GE 模型相一致，将 GE 模型关于  $X$  以及  $Y$  概率分布与实际实验数据进行了比较。不失一般性，以接收端 1 为例，多播速率为 7Mbit/s 的比较结果如图 2 所示。实际上，对其他多播速率可得到类似的图。限于篇幅，本文仅以此图为例进行说明。



(a) 随机变量  $X$  的概率分布分析图



(b) 随机变量  $Y$  的概率分布分析图

图 2 随机变量  $X$  与  $Y$  的概率分布分析图(多播数据速率为 7Mbit/s)

在这组图中，GE 模型的分析结果是依据表 3 中的估计参数，然后通过式(5)和式(6)计算所得；而测试结果是依据实验结果，通过统计  $X$  与  $Y$  的实验数据计算所得。从这些图可以看出，GE 模型的分析结果与实际系统的测试数据非常匹配。特别是关于  $X$  的概率分布，其模型值与实际值几乎完全一致，而纠错方案的性能分析主要建立在  $X$  的概率分布的

表 4 HEC-PR 方案的性能分析

接收端序号	链路PLR		接收端在经过不同重传轮数后的PLR				总的所需RI		最大延迟		
	测试结果	分析结果	测试结果		分析结果		测试结果	分析结果	测试结果 <sub>ms</sub>	限制 <sub>ms</sub>	
			第1轮	第2轮	第1轮	第2轮					
1	7Mbit/s	$1.52 \times 10^{-2}$	$1.50 \times 10^{-2}$	$5.02 \times 10^{-4}$	$1.24 \times 10^{-5}$	$2.25 \times 10^{-4}$	$5.07 \times 10^{-8}$	$1.62 \times 10^{-2}$	$1.55 \times 10^{-2}$	100	100
	9Mbit/s	$1.47 \times 10^{-2}$	$1.45 \times 10^{-2}$	$3.75 \times 10^{-4}$	$9.30 \times 10^{-6}$	$2.12 \times 10^{-4}$	$4.48 \times 10^{-8}$	$1.55 \times 10^{-2}$	$1.49 \times 10^{-2}$	100	100
	13Mbit/s	$1.66 \times 10^{-2}$	$1.63 \times 10^{-2}$	$4.01 \times 10^{-4}$	$1.01 \times 10^{-5}$	$2.66 \times 10^{-5}$	$7.05 \times 10^{-8}$	$1.74 \times 10^{-2}$	$1.68 \times 10^{-2}$	100	100
2	7Mbit/s	$4.46 \times 10^{-3}$	$4.44 \times 10^{-3}$	$6.96 \times 10^{-5}$	$8.50 \times 10^{-7}$	$2.01 \times 10^{-5}$	$4.02 \times 10^{-10}$	$4.60 \times 10^{-3}$	$4.48 \times 10^{-3}$	90	100
	9Mbit/s	$5.79 \times 10^{-3}$	$5.76 \times 10^{-3}$	$5.33 \times 10^{-5}$	$1.00 \times 10^{-7}$	$3.29 \times 10^{-5}$	$1.08 \times 10^{-9}$	$5.90 \times 10^{-3}$	$5.83 \times 10^{-3}$	80	100
	13Mbit/s	$6.83 \times 10^{-3}$	$6.78 \times 10^{-3}$	$4.54 \times 10^{-5}$	$4.50 \times 10^{-7}$	$4.59 \times 10^{-5}$	$2.11 \times 10^{-9}$	$6.92 \times 10^{-3}$	$6.87 \times 10^{-3}$	80	100

基础上,因此,以 GE 模型为基础进行分析,将会对性能做出比较准确的评估。换句话说,该 GE 模型非常匹配 IEEE 802.11a 中承载实时多媒体多播业务时的删除错误信道模型,因此可用于对该环境中采用的各种纠删方案进行准确的性能评估与分析。

#### 4.2 HEC-PR 方案性能评估

为了评估 HEC-PR 方案在实际环境中的性能是否与分析结果一致,在上述验证系统中实现了 HEC-PR 方案,下面将对测试结果与分析结果进行比较研究。与文献[4]相似,这里将目标 PLR 设置为  $10^{-6}$ ,端到端的时延限制设置为 100ms;因系统中原始链路 PLR 通常小于 10%,这里将最大的可能重传次数  $N_T$  设置为 3;为使所需的 RI 最小,HEC-PR 方案中的最大可能重传轮数设置为 2,且  $[N_{\pi}^1, N_{\pi}^2] = [1, 2]$ 。

根据测试结果,发现发送端与接收端之间的 RTT 平均为 10ms 左右。对不同的数据速率,其发送分组的间隔  $t_s$  分别为 1.6ms、1.2ms 和 0.8ms。为简化分析,这里假设  $t_{sw}$  和  $t_{rw}$  可忽略不计。显然,依据上述实测参数与 2.2 节得到的性能分析表达式,便可获得关于 HEC-PR 方案在 GE 信道中性能的分析结果。表 4 展示了测试结果和分析结果。在分析结果中,链路 PLR 为根据表 3 和式(4)计算所得;最终的 PLR 及所需冗余信息为根据表 3 和式(14)、式(15)分别计算所得。

根据表 4,可看出链路 PLR 的分析结果和测试结果非常一致,这再次说明 GE 模型非常符合实际场景中的删除信道模型。这里值得特别说明的是,因 i.i.d 信道可视为相关系数<sup>注</sup>为 0 的特殊 GE 信道,

而本实验中 GE 信道的相关系数小于 0.1,因此,该结果与采用 i.i.d 信道非常相近。但是,当 GE 信道的相关系数很大时,将不能采用简单的 i.i.d 模型模拟近似。因此,GE 模型的相关系数对纠删方案性能评估的影响值得深入探讨和研究。

此外,在第 2.2 节的分析中总是假设反馈信道是完全可靠的。但是,在实际测试中,当 NACK 消息以多播模式传送时,并不能被看成是完全可靠的。主要原因在于:IEEE 802.11a 处于多播模式时,没有任何机制保证消息传送的可靠性,因而造成许多 NACK 消息的丢失。因此,在实际测试过程中,采用了单播模式传送 NACK 消息,以保证其传输的可靠性。因而,实际系统中的反馈信道可视为近似完全可靠。

从表 4 中还可看出,在第 1 轮重传后,测试结果和分析结果基本相符。然而,在第 2 轮重传后,实际测试结果比分析结果要差很多。其中的主要原因在于:没有对重传的 RTP 分组采用任何保护机制,由于重复传送的 RTP 分组是连续发送,因此将以很大的概率经历同样的信道状态。特别是处于强干扰或衰落状态时,信道可能长时间处于“Bad”状态,导致这些在该时间端内连续发送的所有重传数据分组都将会发生删除错误而被丢弃。为此,需要继续研究一种可靠的机制来保证重传分组的可靠性。最直接的思路是采用比较精确的信道预测方法,通过对信道质量的预测,可避免在信道处于“Bad”状态时发送数据分组。

另一方面,从表 4 可以看出,在测试中所需的总的 RI 要稍大于分析结果。由于在第 2 轮重传过程发生后,在第 2 轮重传过程中所需要重传的数目非常少,因此分析结果和测试结果的区别将很小。最后,测试结果表明最大的端到端的延时可以控制

注 相关系数可通过  $a+\beta-1$  进行计算,根据表 3 可知该系数在本实验中小于 0.1。

在目标规定的 100ms 以内，达到了实时多播业务的特定业务质量要求。

## 5 结束语

针对无线实时多播系统中的纠错方案，本文提出基于 GE 信道模型的性能分析方法，推导出了一种混合纠错方案的性能分析闭式表达式。此外，采用基于从实际系统中获取的实验数据的统计分析方法，对 GE 信道的精确性以及各种纠错方案的性能进行了准确的评估。本文设计了基于 IEEE 802.11a 的实际 DVB 测试验证系统，并在实际系统中实现了待评估的混合纠错方案。一方面，利用从实际系统中获得的充分测试数据，本文采用极大似然的参数估计方法，对实时多媒体多播系统中的实际删除错误信道进行了评估。研究结果发现 GE 信道模型与系统中的实际删除错误信道非常匹配，因而验证了 GE 信道模型的精确性。另一方面，通过比较分析待评估纠错方案的理论分析结果与实际测试结果，发现两者基本一致，从而验证了通过 GE 信道模型评估纠错方案性能的精确性。最后，本文提出的基于 GE 模型的性能分析方法与基于实际实验数据的统计分析评估方法，显然适用于对其他无线实时多播系统进行类似的性能分析与评估研究，因而具有普遍参考与借鉴意义。

## 参考文献：

- [1] ETSI DVB Standard, Digital Video Broadcasting(DVB): Transport of MPEG-2 TS Based DVB Services over IP Based Networks, ETSI TS 102 034 v1.4.1[S]. 2009.
- [2] FUJISAWA H, AOKI K, *et al.* Estimation of multicast packet loss characteristic due to collision and loss recovery using FEC on distributed infrastructure wireless LAN[A]. IEEE Wireless Communications and Networking Conference[C]. 2004.
- [3] JOHANSSON I, WESTERLUND M. Support for Reduced-Size Real-Time Transport Control Protocol (RTCP): Opportunities and Consequences, RFC 5506[S]. 2009.
- [4] TAN G, HERFET T. Optimization of an RTP level hybrid error correction scheme for DVB services over wireless home networks under strict delay constraints[J]. IEEE Trans Broadcasting, 2007,53(1): 297-307.
- [5] CARVALHO L, ANGEJA J, *et al.* A new packet loss model of the IEEE 802.11g wireless network for multimedia communications[J]. IEEE Tran on Consumer Electronics, 2005, 51(3):809-814.
- [6] BADIA L. On the effect of feedback errors in markov models for SR ARQ packet delays[A]. IEEE Global Telecommunications Conference, 2009 (GLOBECOM 2009)[C]. 2009.
- [7] GILBERT E N. Capacity of a burst-noise channel[J]. Bell Syst Tech J, 1960, 39: 1253-1265.
- [8] ELLIOTT E O. Estimates of error rate for codes on burst-noise channels[J]. Bell Syst Tech J, 1963, 42: 1977-1997.
- [9] 崔杰, 常永宇, 刘淑慧等. 基于 TD-HSDPA 系统的新型调度算法[J]. 通信学报, 2010, 31(3): 75-81.  
CUI J, CHANG Y Y, LIU S H, *et al.* Novel scheduling algorithm for TD-HSDPA systems[J]. Journal on Communications, 2010, 31(3): 75-81.
- [10] 吴大鹏, 武穆清, 甄岩. 移动自组织网络可用带宽估计方法研究进展[J]. 通信学报, 2010, 31(4): 103-115.  
WU D P, WU M Q, ZHEN Y. Survey on available bandwidth estimation in ad hoc network[J]. Journal on Communications, 2010, 31(4): 103-115.
- [11] 3GPP TS 36.440 v9.1.0: LTE: General Aspects and Principles for Interfaces Supporting Multimedia Broadcast Multicast Service (MBMS) within E-UTRAN[S]. 2010.
- [12] TRIVEDI S K. Probability and Statistics with Reliability, Queuing and Computer Applications[M]. Prentice-Hall, Englewood Cliffs, NJ, 1982.

## 作者简介：



谭国平 (1975-), 男, 湖南澧县人, 博士, 河海大学副教授, 河海大学通信与信息系统研究所副所长, 主要研究方向为移动自组网、无线多媒体通信、随机网络优化与控制和网络信息论等。



徐立中 (1958-), 男, 山东东营人, 博士, 河海大学教授、博士生导师, 河海大学计算机与信息学院副院长, 主要研究方向为多传感器系统与信息融合、遥测遥感技术、图像处理与分析、复杂性系统与社会计算。



严锡君 (1963-), 男, 江苏南通人, 博士, 河海大学副教授, 主要研究方向为无线传感器网络、嵌入式系统、计算机测量与控制等。



花再军 (1983-), 男, 江苏姜堰人, 硕士, 河海大学助理实验师, 主要研究方向为无线通信技术。