

基于 CQI 辅助的协作 HARQ 实现策略*

戴翠琴, 苏 适, 张 刚, 张祖凡

(重庆邮电大学 移动通信重点实验室, 重庆 400065)

摘要: 传统的中继 HARQ 通信方案中, 目的端会对源端和中继端首次传输的数据进行最大比合并译码, 但是 Turbo 译码是一个非常繁杂的迭代译码, 会消耗用户大量的时间和功率, 当目的端在译码失败请求重传时, 这一次译码将直接导致系统的时延增加。针对这一问题, 提出了在传统中继 HARQ 通信系统中引入 CQI 辅助译码的 HARQ 通信策略, 并在此基础上给出了门限自适应设定方法, 解决了 CQI 辅助中继 HARQ 通信方案中难以在瑞利衰落信道下准确设定辅助门限的问题。该策略在译码前通过 CQI 信息对数据包的好坏作出预判, 从而确定下一步是直接译码数据包还是跳过译码环节直接发送 NACK 请求重传, 进而减少系统时延。通过理论和仿真分析, 比较了 CQI 辅助中继 HARQ 通信方案的时延和误包率等系统性能指标, 验证了 CQI 辅助中继 HARQ 通信方案有着更好的时延性能。

关键词: 混合自动重传请求; 协作中继; 信道状态指示; 时延; 误包率

中图分类号: TN929.5

文献标志码: A

文章编号: 1001-3695(2012)03-1024-04

doi:10.3969/j.issn.1001-3695.2012.03.061

Cooperative HARQ implementation strategy based on CQI

DAI Cui-qin, SU Shi, ZHANG Gang, ZHANG Zu-fan

(Key Laboratory of Mobile Communication, Chongqing University of Posts & Telecommunications, Chongqing 400065, China)

Abstract: In traditional cooperative HARQ communication system, signal from source and relay would be maximal ratio combined by destination. However, turbo decoding that consumes a large number of UE's time and power is very complicated. The decoding will directly cause delay of the system when destination requires retransmission after decoding fails. To solve this problem, this paper introduced the channel quality information (CQI) to assist the HARQ decoding, and proposed an auxiliary threshold adaptive set method. It judged the quality of packet before decoding by the scheme, in order to determine whether directly decode the packet or skip the decoding and feedback NACK, for reducing transfer delay. At the same time, solving the difficulty of accurately setting the auxiliary channel threshold in the CQI auxiliary relay HARQ scheme. At last, analyzed the performance of the CQI auxiliary relay HARQ scheme such as delay, package error rate and so on, it is verified that the CQI auxiliary relay HARQ scheme has a better delay performance.

Key words: HARQ; cooperative relay; CQI; delay; PER

0 引言

为了满足下一代移动通信技术中对更高 QoS 的需求, 混合自动重传请求(HARQ)和协作传输技术作为无线通信中保证通信传输质量的关键技术, 通过人们多年的研究形成了相对成熟的理论体系, 并在下一代移动通信 LTE-Advanced 系统中得到了应用。

Sendonaris 等人在文献[1, 2]中提出协作分集以对抗衰落, 其基本思想是在系统中每个终端都有一个或多个协作伙伴, 终端向目的端发送信息的同时, 将信息发送给协作端, 再由协作端处理之后转发给目的端, 以获取更好的空间分集增益。研究发现: 在衰落环境下, 协作分集可以有效改善系统性能。Laneman 等人在文献[3]中提出了多种中继方式, 其中: 放大转发(AF)以其简单的工作方式受到广泛关注, 同时证明了 AF 具有较好的分集阶数。文献[4]提出了中继 HARQ 通信方案

的时延式, 对比分析了中继 HARQ 系统和非中继 HARQ 系统两种情况下的系统性能。

在现有的蜂窝通信系统的 HARQ 通信方案中, 目的端成功接收数据包之后将会进行纠错译码, 而纠错所用的 Turbo 码译码过程十分繁杂, 一旦译码失败将导致不必要的系统时延增加; 同时, 传统的 III 型 HARQ 通信方案规定重传包必须和首次传输数据包进行最大比合并之后才能译码, 然而能够正确译码的重传包和出错的首次传输数据包合并译码将导致误码率增加。为了解决以上问题, 文献[5]提出了一种利用信道质量预测数据包质量的 HARQ 策略, 假设蜂窝系统中目的端在 Turbo 译码之前就能在一定程度上预测数据包的好坏, 从而让目的端能够跳过无效译码过程, 减少系统时延。文献[6]提出了改进 III 型 HARQ 方案, 规定目的端先对重传包进行直接译码, 如果译码失败则再对重传包与首次传输数据包进行最大比合并译码; 但是如果重传包直接译码失败转而进行合并译码

收稿日期: 2011-07-09; 修回日期: 2011-08-13 基金项目: 国家自然科学基金资助项目(60972070); 重庆市科技攻关计划资助项目(2010AC2143); 重庆市自然科学基金重点资助项目(2009BA2090)

作者简介: 戴翠琴(1976-), 女, 甘肃泾川人, 讲师, 硕士, 主要研究方向为宽带无线移动通信网络关键技术(daicq@cqupt.edu.cn); 苏适(1989-), 男, 重庆人, 主要研究方向为协作通信系统中的 HARQ 技术; 张刚(1989-), 男, 重庆人, 主要研究方向为协作通信系统中的 HARQ 技术; 张祖凡(1964-), 男, 教授, 博士, 主要研究方向为无线移动通信理论与技术、无线资源管理和网络编码。

又会增加系统时延,如果能够通过接收信噪比与预设门限之间的对比来决定是直接译码,还是跳过直接译码进行最大比合并译码就能够很好地解决这一问题。

以上这些问题同样存在于现有的中继 HARQ 系统中,因此将信道状态指示(CQI)信息引入到现有中继 HARQ 通信过程中,通过 CQI 辅助完成协作 HARQ 通信,有效地降低了系统时延;同时,提出了一种可行性较好的门限自适应设定方法,较好地解决了 CQI 辅助策略中难以准确设定信噪比门限的问题。

1 系统模型

1.1 传统的放大转发协议模型

基于单中继的协作传输模型如图 1 所示,由源端 S、中继端 R、目的端 D 组成,通过正交信道发送消息。这里假设发射总功率为 P ,源端功率为 P_s ,中继端发送功率为 P_r ,则总发送功率满足 $P = P_s + P_r$,下文中源端和中继端采取等功率分配。

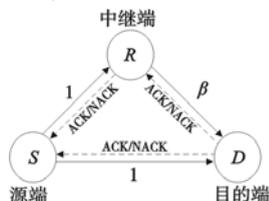


图1 S-R-D单中继模型

a) 源端通过广播形式发送给目的端和中继端,两者接收到的信号 $y_{s,d}$ 和 $y_{s,r}$ 分别为

$$y_{s,d} = h_{s,d}x + N_0 \quad (1)$$

$$y_{s,r} = h_{s,r}x + N_0 \quad (2)$$

其中: x 为源端发送信号; N_0 为均值为 0、方差为 N_0 的加性高斯白噪声。

b) 中继端将接收到的源端信号放大 β 倍之后转发给目的端,目的端接收中继端发送信号为

$$y_{r,d} = h_{r,d}(\beta y_{s,r}) + N_{r,d} \quad (3)$$

$$\beta = \sqrt{\frac{P_r}{|h_{(s,r)}|^2 P_s + N_0}} \quad (4)$$

$$N_{r,d} = \beta h_{r,d} N_{s,r} + N_{r,d} \quad (5)$$

其中: β 是放大倍数, $N_{s,r}$ 和 $N_{r,d}$ 是信道等效噪声。

c) 目的端将中继端放大转发的信号与源端的信号进行最大比合并,获得时间和空间上的分集增益。

假设:所有信道为窄带频率非选择性慢衰落信道,噪声为加性高斯白噪声,收发端能随时确定信道的状态信息。 $h_{i,j}$ 表征信道衰落系数,则其包络 $|h_{i,j}|$ 满足瑞利分布, $|h_{i,j}|^2$ 满足指数分布。

1.2 基于 CQI 辅助的中继 HARQ 系统模型

根据文献[4~7]的相关介绍并结合 III 型中继 HARQ 系统,下面分阶段给出基于 CQI 辅助的中继 HARQ 通信过程。

a) 源端通过广播形式将数据包发送给目的端和中继端。发送完成后,源端在反馈时隙接收来自目的端的反馈信号,如果接收到 ACK,则删除存储器中的数据包同时在下一个时隙发送新数据包;如果接收 NACK 则重发存储器中的数据包,达到最大重传次数后删除存储器中的数据包转而发送新的数据包。

b) 中继端成功接收来自源端的数据包后,在下一个时隙,进入协作传输状态,中继端把数据包放在存储器中并放大转发到目的端。在反馈时隙时,中继端接收来自目的端的反馈信

号,如果接收到 ACK,则等待接收来自源端的下一个数据包;如果接收到 NACK,则重发存储器中的数据包,达到最大重传次数后,中继端停止重传协作,等待源端发送新的数据包。

c) 如图 2 所示,目的端首先对数据包是否为重传包进行判断。如果是重传包则进行 CQI 辅助软合并判定,即判定重传数据包在和首次传输数据包进行最大比合并之前是否先对重传数据包进行直接译码,下一步目的端通过 CQI 信息中获取的瞬时接收信噪比在每一次译码前对是否需要译码进行 CQI 辅助译码判定;如果是首次传输数据包则不需要进行 CQI 辅助软合并判定,直接对其进行 CQI 辅助译码判定,通过 CQI 辅助译码判定跳过可能失败的译码,直接发送 NACK 通知源端重传数据包,从而降低译码失败所导致的时延。

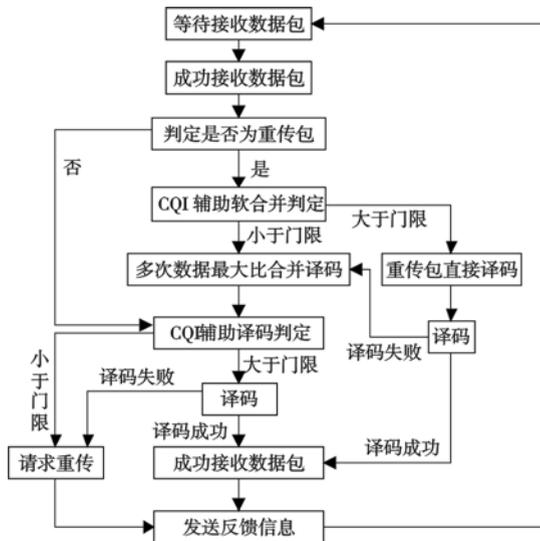


图2 CQI辅助的中继HARQ系统目的端行为

2 CQI 辅助的 HARQ 实现策略

2.1 CQI 辅助策略中两种判定方式的实现

为了帮助目的端更高效地完成译码过程,下面结合系统模型,将 CQI 辅助策略应用中继 HARQ 策略中目的端的软合并和译码两个阶段。

a) 将 CQI 辅助策略应用于 III 型 HARQ 数据合并过程中,以改善目的端重传数据和首次传输数据的软合并过程,称其为 CQI 辅助软合并策略。在传统的中继 HARQ 通信方案中,这一过程规定不论重传数据包自身能否正确译码都要与首次传输数据包合并后进行译码。当重传数据包能够独立地正确译码时,合并译码将会导致接收机性能下降。针对这一问题,文献[6]提出了先将重传包直接译码,译码失败后再进行最大比合并译码的改进方案。但是这一方案将导致译码时延大大增加,特别是重传包正确译码率很低时译码时延几乎较传统方案增加 50%。在 CQI 辅助中继 HARQ 方案中,目的端通过 CQI 信息获得实时接收信噪比 γ_i ,当 γ_i 大于预设软合并门限 γ_c 时(可以理解为高信噪比时直接译码成功率较高),则采用直接译码,译码失败后再与首次传输数据包进行最大比合并译码;反之,当 γ_i 小于预设软合并门限 γ_c 时,目的端跳过直接译码过程,进行最大比合并译码。

b) 将 CQI 辅助策略应用中继 HARQ 系统目的端的每一次译码前,称其为 CQI 辅助译码策略。即当 CQI 信息中获取的瞬时接收信噪比低于预设的译码门限 γ_t 时,目的端直接跳过这一次译码,向源端发送 NACK 请求重传,直到达到最大重

传次数 T_{\max} 。

这里需要特别说明的是:预设软合并门限必须高于预设译码门限。假如预设软合并门限低于预设译码门限,重传包有可能被 CQI 软合并策略判定为先进进行直接译码,但是重传包直接译码时又会被 CQI 译码策略判定为跳过直接译码转而进行最大比合并译码。明显地可以看出,此时两种策略作出了相互矛盾的判定,这一情况会浪费系统的资源。

2.2 CQI 辅助策略的门限自适应设定方式

从系统模型中可看出,能否准确地设定预设信噪比门限,对于系统的性能有着极为重要的影响。已有的很多研究提出了利用 CQI 信息中的信道特性以及瞬时接收信噪比来辅助中继 HARQ 系统的方式,但却没有提及如何高效准确地设定预设信噪比门限。下面提出一种简单的信噪比门限自适应设定方式,可以根据信道的时变快速调整信噪比门限,从而达到系统所需性能的最优化。

以 CQI 辅助软合并策略为例,首先将预设信噪比门限范围规定为 γ_1 到 γ_2 ,其中, $\gamma_1 < \gamma_2$ 。然后根据需求将 γ_1 到 γ_2 以等间隔 $\Delta\gamma$ 等分为 M 份,所得信噪比门限等级如表 1 所示。

表 1 信噪比门限等级

1	2	...	$M-1$	M
γ_1	$\gamma_1 + \Delta\gamma$...	$\gamma_2 - \Delta\gamma$	γ_2

根据 CQI 辅助软合并策略可知,当预设软合并门限上升时,系统将减少译码次数,从而通过增加误包率以换取更好的时延特性;相反,当预设软合并门限降低时,系统则增加直接译码,从而通过增加时延来换取较低的误包率。由此提出,当目的端开始接收数据时,自动预设一个信噪比门限,目的端通过判断接收数据误包率从而对信噪比门限进行自适应的选择:当此预设软合并门限下系统的时延高于期望的时延时,则在接收下一个数据包时将预设软合并门限上调一个等级,以换取更好的时延特性;反之,当预设门限下系统的误包率高于期望的误包率时,则在接收下一个数据包时将预设软合并门限下调一个等级以换取更低的误包率。由此,可通过软合并门限自适应设定来获得时延与误包率的优化组合,满足不同场合的需求。

同样,门限自适应设定方法也可以应用在译码门限上。通过对译码时延和传输时延的比较,改变预设译码门限等级来改变译码次数和传输次数的比例,从而获得最佳的时延效果。

3 系统性能分析

文献[4]讨论了两用户协作通信的误包率和时延表达式,给出了传统 III 型中继 HARQ 通信方案中每个数据包的平均单位时延为

$$D[T] = \sum_{n=1}^{T_{\max}+1} nP\{T=n\} \quad (6)$$

$$P\{T=n\} = [1 - p_{\text{per}}(k)] \prod_{k=1}^{n-1} p_{\text{per}}(k) \quad (7)$$

其中: $P\{T=n\}$ 为单个数据包传输 n 次的概率; T_{\max} 为最大重传次数; $p_{\text{per}}(k)$ 为第 k 次传输的误包率。

3.1 CQI 辅助译码策略性能分析

由于增加了 CQI 辅助译码策略,所以传统中继 HARQ 和 CQI 辅助中继 HARQ 的时延式推导的主要区别在于后者存在跳过无效译码的情况。根据上式的原理得 CQI 辅助中继 HARQ 通信方案的时延表达式可分为两种情况,即 $\gamma_1 < \gamma_i$ 和 $\gamma_1 > \gamma_i$ 。其中, γ_1 为 CQI 信息中获取的瞬时信噪比, γ_i 为预设

的译码门限。

当 $\gamma_1 > \gamma_i$ 时, CQI 辅助中继 HARQ 方案中,每一次重传都需要经过一次 Turbo 译码和 CRC 校验,单位平均时延为

$$D_1[T] = D[T] = \sum_{n=1}^{T_{\max}+1} nP\{T=n\} \quad (8)$$

当 $\gamma_1 < \gamma_i$ 时, CQI 辅助译码策略因为跳过了部分无效的译码,从而降低了译码时延。但是,由于 CQI 辅助译码策略存在一定的误判断率,又会额外增加部分传输时延。由此,在不考虑误判断的情况下,平均译码时延为

$$D_2[T] = \sum_{n=1}^{T_{\max}+1} nP\{T=n\} [1 - f_{\text{SNR}}(\gamma)]^{n-1} \quad (9)$$

同样,在不考虑误判断情况下, CQI 辅助中继 HARQ 的时延(减少的译码次数)为

$$D_i[T] = \sum_{n=1}^{T_{\max}+1} nP\{T=n\} - \sum_{n=1}^{T_{\max}+1} nP\{T=n\} [1 - f_{\text{SNR}}(\gamma)]^{n-1} \quad (10)$$

其中: $f_{\text{SNR}}(\gamma)$ 表示为瞬时接收信噪比大于预设译码门限的概率。

但是,由于实际系统中也会出现判断错误的情况,此时,错误判断会导致可以正确译码的情况被判定为跳过译码。误判对时延分析的影响可能性很多,但从总体上来说,只要译码门限设置适当,就可以将误判率控制在较低水平。当误判导致跳过译码的情况发生时,由于下一次重传的数据包译码通过率很高,所以出现一次误判导致多次重传的可能性很小。这种情况下译码次数没有增加,而传输次数增加了一次。所以,在考虑有误判情况下的平均传输时延可表示为式(11)。其中, $P_b\{T=n\}$ 可表示为式(12),式(12)中的 $f_b(x)$ 为瞬时信噪比下对应的误判断率。

$$D_3[T] = \sum_{n=1}^{T_{\max}+1} nP_b\{T=n\} \quad (11)$$

$$P_b\{T=n\} = [1 - p_{\text{per}}(k)] \prod_{k=1}^{n-1} \{p_{\text{per}}(k) [1 - f_b(x)] + f_b(x) [1 - p_{\text{per}}(k)]\} \quad (12)$$

由于误判断增加的平均传输时延(传输次数)为

$$D_s[T] = \sum_{n=1}^{T_{\max}+1} nP_b\{T=n\} - \sum_{n=1}^{T_{\max}+1} nP\{T=n\} \quad (13)$$

这里需要说明的是, D_2 、 D_3 分别是通过对 Turbo 译码次数和由于误判断增加的传输次数进行统计而获得的时延表达式,两者的单位时延并不一致,不能混为一谈。所以总的时延变化为

$$D_{\text{total}}[T] = D_i[T] \times T_i - D_s[T] \times T_s \quad (14)$$

其中: T_i 表示每次的单位译码时延,单位 s/次; T_s 表示单位传输时延,单位为 s/次; $D_{\text{total}}[T]$ 的单位为 s。由式(14)可以看出,当 $T_1 > T_2$ 且 $f_b(x) \ll 1$ 时, CQI 辅助译码策略可以较大地降低系统时延。根据文献[6,7],当门限设置合理时,上述条件在实际系统中往往是能够得到满足的。

3.2 CQI 辅助策略应用于中继 HARQ 软合并性能分析

由传统 III 型中继 HARQ 通信方案的平均单位时延式可得改进 III 型中继 HARQ 时延式为

$$D_s[T] = \sum_{n=1}^{T_{\max}+1} nP_s\{T=n\} \quad (15)$$

$$P_s\{T=n\} = [1 - p_{\text{per}_s}(k) p_{\text{per}_r}(k | p_{\text{per}_s})] \times \prod_{k=1}^{n-1} \{p_{\text{per}_s}(k) p_{\text{per}_r}(k | p_{\text{per}_s})\} \quad (16)$$

其中: $P_{\text{per}_s}(k)$ 表示第 k 次传输时直接译码通过率; $P_{\text{per}_r}(k | p_{\text{per}_s})$ 表示第 k 次传输时,在直接译码失败后软合并译码的通

过率,其中, $k=1$ 时, $P_{\text{per},L}(1) = 1$ 。

当瞬时接收信噪比大于软合并门限时, CQI 辅助中继 HARQ 的软合并过程可以等效为改进 III 型中继 HARQ 的软合并过程, 小于软合并门限时等效为传统 III 型中继 HARQ 的软合并过程。因此, CQI 辅助中继 HARQ 的软合并的时延可以等效为关于瞬时接收信噪比大于等于软合并门限的概率 $f_{\text{SNR}}(r)$ 求数学期望的问题, 由此可得 CQI 辅助中继 HARQ 软合并的时延式为

$$D_c [T] = \sum_{n=1}^{T_{\text{max}}+1} n P_c \{ T = n \} \quad (17)$$

$$P_c \{ T = n \} = [1 - f_{\text{SNR}}(\gamma)] P \{ T = n \} + f_{\text{SNR}}(\gamma) P_s \{ T = n \} \quad (18)$$

其中, $f_{\text{SNR}}(\gamma)$ 为瞬时接收信噪比大于等于软合并门限的概率。

4 仿真结果分析

下面主要针对 CQI 辅助译码策略和 CQI 辅助软合并策略的时延、误包率以及不同的译码门限和软合并门限对系统的影响进行仿真分析。仿真参数如表 2 所示。

表 2 仿真参数

参数项	取值	参数项	取值
传输数据包个数	10 000	调制编码	QPSK
最大重传次数 T_{max}	1	传播条件	AGWN 信道
检错码	CRC 码	合并方式	Chase 合并
纠错码	Turbo 码		

图 3 中, 发送信噪比在 0 ~ 16 dB, CQI 辅助中继 HARQ 通信方案跳过了部分译码过程, 所以其译码次数低于传统中继 HARQ 通信方案, 且信噪比越低差距越大。其中在 0 ~ 13 dB, 随着发送信噪比的增加, 目的端的瞬时接收信噪比大于译码门限从而进行译码的概率逐渐增加, 但是首次译码失败转而进行重传译码的概率依旧很大, 所以此时 CQI 辅助中继 HARQ 通信方案的译码次数会逐渐上升, 并在 13 dB 左右达到峰值。当大于 13 dB 时, 随着发送信噪比的提升, CQI 辅助中继 HARQ 通信方案的瞬时接收信噪比大于译码门限的概率逐步接近于 1, 此时大部分的数据会进行首次译码, 同时较高的发送信噪比也会使首次译码的通过率较高。综合上述原因, 此时 CQI 辅助中继 HARQ 通信方案的译码次数曲线开始下降, 并略低于传统中继 HARQ 通信方案。当大于 16 dB 时, 目的端瞬时接收信噪比都大于译码门限, 两条曲线完全贴合。

图 4 表明传输次数总体上随着信噪比的增加而减少。在发送信噪比低于 17 dB 时, CQI 辅助中继 HARQ 通信方案由于误判断的存在会增加额外的传输次数, 表现为传输时延相对较高。其中传输时延在 12 ~ 14 dB 这一段增量最为明显, 说明在接近译码次数峰值时, 误判断的影响最为明显, 传输时延增量最大。大于 17 dB 时, 由于瞬时接收信噪比始终大于译码门限, 所以两条曲线几乎完全贴合。

由图 5、6 可以看出, 预设不同的译码门限对系统的性能有着较大的影响。从图 5 中可以看出, 预设译码门限越高, 往往能够跳过的无效译码次数越多; 瞬时接收信噪比小于 16 dB 时系统的译码次数越少, 译码时延越低。但是从图 6 中可以看出, 提高译码门限又会导致传输时延的增加。通过门限自适应设定方式, 可以自动调节译码门限, 从而调节译码次数和传输次数之间的比例, 最终实现系统时延的最优化。

图 7、8 反映了 CQI 辅助软合并策略对误包率的影响。从图 7 中可以看出三种通信系统都是随着信噪比的增加, 误包率逐步降低。同时也能看出改进型中继 HARQ 通信方案由于采用了两次译码的方式, 误码率较其他两者更低; 传统的中继

HARQ 通信方案则由于直接采用合并译码的方式导致接收机性能下降, 所以其误包率最高; 而 CQI 辅助中继 HARQ 通信方案通过 CQI 辅助软合并策略使得前两者的特点相结合, 从曲线上可以看出其误包率居于两者之间。

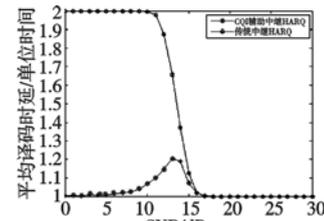


图3 CQI辅助中继HARQ与传统中继HARQ的译码时延对比

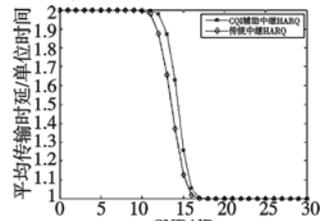


图4 CQI辅助中继HARQ与传统中继HARQ的传输时延对比

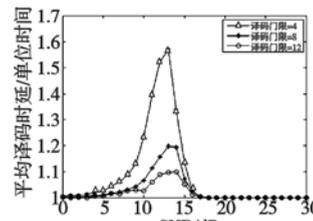


图5 不同译码门限对译码时延的影响

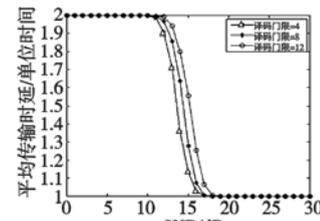


图6 不同译码门限对传输时延的影响

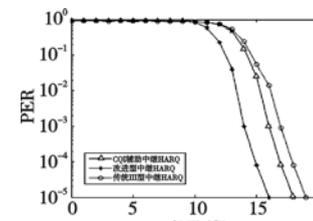


图7 中继HARQ通信方案中三种软合并方式误包率

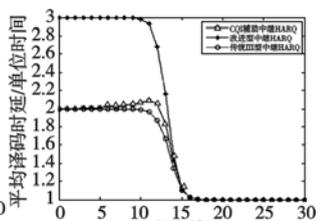


图8 中继HARQ通信方案中三种软合并方式的译码时延特性

图 8 中改进型中继 HARQ 通信方案采用了将重传包先进行直接译码再进行合并译码的方式, 所以在发送信噪比小于 15 dB 时, 由于译码通过率较低, 其译码时延减少量较其他两种方案明显, 其中译码时延的大小由译码次数决定。在 CQI 辅助中继 HARQ 通信方案中, 随着发送信噪比增加, 瞬时接收信噪比大于软合并门限而进行直接译码的概率和译码通过率都会上升, 然而直接译码依旧有着一定错误概率而导致译码次数增加, 但是译码通过率的上升又会使得重传次数减少, 两种因素综合使得译码时延在低发送信噪比阶段呈上升趋势并在 11 dB 时达到峰值。在发送信噪比大于 11 dB 时, 由于译码通过率进一步增加, 三种方案的译码时延总体上呈下降趋势, 在发送信噪比大于 18 dB 时, 高信噪比下的高译码通过率极大地降低了重传次数, 这使得三条曲线除略有波动外总体上贴合。

图 9、10 通过设定不同的软合并门限来对不同软合并门限下的系统性能加以分析。由图 9 可以看出, 软合并门限设置降低时误包率随之有一定的下降。同时, 从图 10 可以看出, 不同的软合并门限对译码次数有着较大的影响。小于 12 dB 时, 软合并门限设置越高, 其出现的译码次数峰值越低, 减少的译码时延越多; 大于 12 dB 时, 较高的通过率使得三条曲线总体上呈现下降趋势, 在大于 14 dB 时三条曲线总体上贴合。另一方面可以看出, 随着软合并门限的升高, 译码时延随之降低。所以通过软合并门限的自适应设定, 可以很好地在误包率性能和时延性能中获取系统所需要的性能平衡点。由此可以说明门限自适应设定方式有着较高的可行性, 同时也反映了系统采用门限自适应设定方式后对不同工作环境的自适应能力会有所提高。

播模型进行仿真,如图 3 所示。

分析图 3 可以看出,被感染主机 I 的数量在时间步为 30 的时候开始迅速增加,并在接近时间步 60 的时候达到最大值,为 600 000 台,与图 1 相似。但是该种僵尸程序开始大规模传播的时间比图 1 更早,是因为这种僵尸网络在传播时没有根据节点度的多少来进行感染,是比较理想的一种情况,对僵尸网络在无尺度网络下的传播没有很好地描述。

综上所述,要对当今网络中的僵尸网络进行很好的描述与设计,就需要考虑无尺度网络的特点以及僵尸网络传播过程中的免疫特性,因此图 1 更加符合真实的僵尸网络传播。

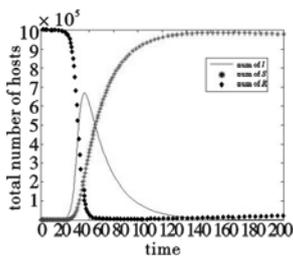


图2 无尺度网络下的僵尸网络传播模型

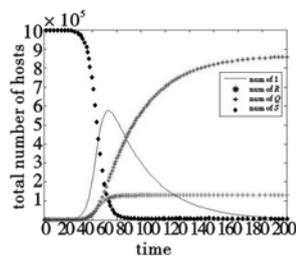


图3 具有免疫特征的僵尸网络传播模型

4 结束语

随着科技的发展,计算机网络的不断扩大,对于僵尸网络的研究与分析也需不断进行。鉴于当今网络的无尺度性,考虑僵尸网络在无尺度网络下的传播具有重要意义。由于僵尸程序的传播继承自蠕虫病毒,因此了解无尺度网络下的僵尸网络就需要从蠕虫的传播模型着手,传统的蠕虫模型并不能很好地反映出僵尸网络的特征,本文提出的传播模型,结合了无尺度网络的增长性和择优连接性,以及部分主机未被感染前就已经进行了免疫措施,从脆弱状态成为免疫状态的情况。虽然这种模型比传统的僵尸网络传播模型更符合真实网络,但是尚未考虑到僵尸程序在感染过程中的流量阻塞等问题。

(上接第 1027 页)

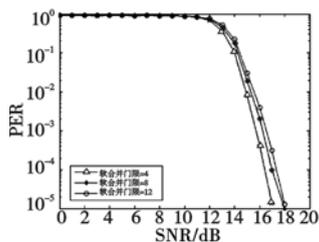


图9 不同软合并门限对误包率的影响

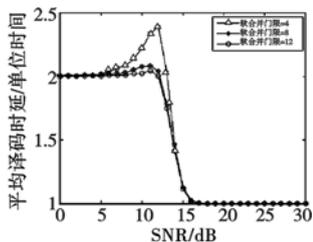


图10 不同软合并门限对译码时延的影响

5 结束语

本文通过对 CQI 辅助中继 HARQ 通信方案的时延和误包率等系统性能进行了分析和仿真,结合门限自适应设定方式,给出了 CQI 辅助中继 HARQ 的具体实现策略,且获得了比以往系统更好的时延特性;同时,通过门限自适应设定方式自动满足不同的性能需求,解决了 CQI 辅助策略中预设门限难以设定的问题。由此可以论证基于 CQI 辅助策略和门限自适应设定方式的中继 HARQ 实现策略较传统的中继 HARQ 有着更加优越的性能。

参考文献:

[1] SENDONARIS A, ERKIP E, AAZHANG B. User cooperation diversi-

参考文献:

[1] BARABASI A L, ALBERT R. Emergence of scaling in random networks[J]. *Science*, 1999, 286(5439): 509-512.

[2] WATTS D J, STROGATZ S H. Collective dynamics of "small-world" networks[J]. *Letters to Nature*, 1998, 393(6684): 440-442.

[3] LIU Li-juan. Research on dynamic networking of scale-free network [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2007.

[4] ZHENG Hong, WU Li-fa, WANG Yuan-yuan. Three worm propagation models to establish scale-free worm network[J]. *Journal of Jilin University: Engineering and Technology Edition*, 2008, 38(5).

[5] 孙彦东, 李东. 僵尸网络综述[J]. *计算机应用*, 2006, 26(7): 1628-1630, 1633.

[6] GUO Hong-gang, FANG Yang. On current situation an harm of botnet crime [D]. Shijiazhuang: Hebei Normal University, 2008.

[7] <http://www.isc.org.cn/20020417/ca290326.htm> [EB/OL].

[8] STREFTARIS G, GIBSON G J. Statistical inference for stochastic epidemic models[C]//Proc of the 17th IWSM. 2002: 609-616.

[9] FRAUENTHAL J C. *Mathematical modeling in epidemiology* [M]. New York: Springer-Verlag, 1980.

[10] ZOU C C, GONG W, TOWSLEY D. Worm propagation modeling and analysis under dynamic quarantine defense [C]//Proc of ACM CCS Workshop on Rapid Malcode. 2003: 51-61.

[11] DAGON D, ZOU C C, LEE W. Modeling botnet propagation using time zones [C]//Proc of the 13th Annual Network and Distributed System Security Symposium. 2006.

[12] LIU Hao-guang, CAI Shao-hong, ZHANG Yu-qiang. The research on the scale-free networks model [J]. *Journal of Hebei Vocational College of Public Security Police*, 2008, 8(1).

[13] LI Tao, GUAN Zhi-hong, WU Zheng-pin. Research on simulation of virus propagation and control in scale-free networks [D]. Wuhan: Huazhong University of Science & Technology, 2007.

[14] 刘俊, 金聪, 邓清华. 无标度网络环境下 E-mail 病毒的传播模型 [J]. *计算机工程*, 2009, 35(21): 131-134, 137.

[15] 刘浩广, 蔡绍洪, 张玉强. 无标度网络模型研究进展 [J]. *大学物理*, 2008(4): 43-47.

ty-part I: system description [J]. *IEEE Trans on Communications*, 2003, 51(11): 1927-1938.

[2] SENDONARIS A, ERKIP E, AAZHANG B. User cooperation diversity-part II: implementation aspects and performance analysis [J]. *IEEE Trans on Communications*, 2003, 51(11): 1939-1948.

[3] LANEMAN J N, TSE D N C, WORNELL G W. Cooperative diversity in wireless networks: efficient protocols and outage behavior [J]. *IEEE Trans on Information Theory*, 2004, 50(12): 3062-3080.

[4] LI Gui-bin, ZHU Jin-kang. A HARQ scheme based on two user's cooperation [J]. *Journal of the Graduate School of the Chinese Academy of Sciences*, 2009, 26(4): 490-496.

[5] LEE D, KO K, NAM C H, et al. A hybrid ARQ scheme using packet error prediction on OFDM based HSDPA systems [C]//Proc of the 16th Mobile and Wireless Communications Summit IST Conferences. 2007: 1-5.

[6] KWAN R, LEUNG C. Adaptive modulation and coding with multi-codes over Nakagami fading channels [C]//Proc of IEEE Wireless Communications and Networking Conference/WCNC. 2005: 927-932.

[7] PARK M, KEUM B, LEE M, et al. A selective HARQ scheme operating based on channel conditions for high speed packet data transmission systems [C]//Proc of IEEE Personal Indoor and Mobile Radio Communications Conference. 2007: 1-5.