

超宽带多跳无线网络中 ARQ 机制的优化

王 玲 朱光喜 吴伟民 王辰琛

(华中科技大学电子与信息工程系 武汉 430074)

(国家光电实验室光通信与智能网络研究部 武汉 430074)

摘 要 针对超宽带多跳无线网络,对中继节点参与 ARQ 机制的可行性进行了研究。在现有研究的基础上结合部分窗口多拒绝 ARQ 设计出一个能使节点兼顾终端和中继节点 ARQ 机制的 RLC 子层协议。接着在对超宽带室内视距(LOS)信道模型理论分析的基础上,针对典型的两跳网络,对比了使用中继 ARQ 和不使用中继 ARQ 两种情况下得到的仿真结果,证明了中继 ARQ 能提高超宽带多跳无线网络的吞吐率和时延性能。

关键词 超宽带,多跳,中继,ARQ

中图分类号 TN915.04 **文献标识码** A

Optimization of ARQ Mechanism in Multi-hop UWB Network

WANG Ling ZHU Guang-xi WU Wei-min WANG Cen-chen

(Department of Electronics and Information Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China)

(Division of Optical Communication and Intelligent Network, Wuhan National Laboratory for Optoelectronics, Wuhan 430074, China)

Abstract This paper did some researches on the ARQ mechanisms which provides the probability of involving the relay nodes into the mechanisms for ultra-wideband multi-hop wireless network, and based on the researches designed a RLC sublayer combining PWMA and Relay ARQ, which can perform as both of the end node and the relay node. Follow this, this paper made an academic analysis of the ultra-wideband wireless channel models and simulated the network model under ordinary circumstances and the network model which used ARQ mechanism designed in this paper for representative two-hop wireless network. Compared the simulation results, got the conclusion that using ARQ mechanism designed for ultra-wideband multi-hop network in this paper significantly enhances the throughput and time delay characteristic of the system.

Keywords UWB, Multi-hop, Relay, ARQ

超宽带(UWB, Ultra-Wideband)无线通信因其数据传输速率高、功耗低、成本低、隐蔽性高以及对现有无线通信系统干扰低等特点,在建立短距离高速连接和高速无线个域网领域受到广泛关注。但运用超宽带技术的设备覆盖范围受到很大限制,于是在构建超宽带无线网络时必然会考虑使用中继节点转发数据。

自动请求重传(ARQ, Automatic Repeat reQuest)机制是通信中处理信道带来差错的方法之一。无线通信中 ARQ 在数据链路层的应用已经相当成熟,但这些 ARQ 机制多存在于收发节点之间,并没有考虑引入中继对系统带来的影响。本文旨在结合部分窗口多拒绝 ARQ,设计出一种能兼顾终端节点和中继节点的 ARQ 机制的 RLC 子层协议,并对使用中继 ARQ 和不使用中继 ARQ 两种情况下超宽带两跳无线网络的吞吐率和时延性仿真结果进行比较。

1 ARQ 技术研究

ARQ 机制通过接收方请求发送方重传出错的数据帧来恢复错误,是通信中用于处理信道所带来差错的方法之一。传统的 ARQ 机制分为 3 种,即停等式(stop-and-wait) ARQ、回退 n 帧(go-back-n) ARQ 以及选择性重传(selective repeat) ARQ。三者的区别在于对出错的数据帧的处理机制不同^[1]。

部分窗口多拒绝 ARQ 是选择性重传 ARQ 的一种,即针对 3GPP 多拒绝自动请求重传机制存在的确认信息冗余大,没有结合窗口内数据接收特点选取不同确认方式的问题提出的一种高确认效率和高吞吐率确认机制^[2,3]。该机制灵活的 8 种确认方式中不但包含了适合零散误帧的位图确认方式,也包含了适合信道条件长时间好或长时间坏的偏移确认方式,这些都能很好地克服超宽带无线通信环境中存在的无线

到稿日期:2009-07-15 返修日期:2009-09-25 本文受“新一代宽带无线移动通信网”国家科技重大专项;TD-LTE 无线综合测试仪表开发(2009ZX03002-009),IMT-Advanced 新型无线传输技术研发(2008ZX03003-004),十一五 863 计划信息技术领域超宽带无线通信系统研发与应用示范重点项目;UWB 共性技术与验证系统研发(2009AA011202),国际科技合作计划(No. 2008DFA11630),湖北省自然科学基金项目(No. 2008CDB325)资助。

王 玲(1977-),女,博士生,主要研究方向为宽带无线移动通信高层协议,E-mail:lwang@mail.hust.edu.cn;朱光喜(1945-),男,教授,博士生导师,主要研究方向为宽带无线移动通信技术等;吴伟民(1970-),男,博士,主要研究方向为宽带无线移动通信技术等。

链路高误码引起的低信道利用率和高时延的缺点。

通常情况下,链路层 ARQ 协议是为了保证端到端的可靠性,在中继节点加入到数据传输中后,误帧有时只会在某一跳或某几跳之间发生^[4,5],而整个链路的其它部分信道状况良好,数据帧能被正确传输。然而,当发送方链路层对某些数据帧进行重传时,并没有考虑这些数据帧在某些中继节点之间已被正确传输的情况。这些数据帧会在整条链路上被重传,显然数据帧在状况良好的信道部分的重传是对资源的一种浪费。文献[6]提出了一种减少不必要重传的中继 ARQ 的理念。

2 中继 ARQ 技术工作原理

要使中继 ARQ 得以应用,就要让多跳网络中的节点都能够解析中继 ARQ 协议。图 1 是两跳网络中终端节点和中继节点的协议栈示意图。



图 1 两跳网络中的中继 ARQ 协议栈

中继 ARQ 工作在层 2 (Layer2, L2), 当发送方将数据帧通过无线链路发送给中继节点时, L2 Relay 将把中继节点的确认信息反馈给发送方 L2。此时发送方 L2 会取消或延长为数据帧设定的超时重传定时器, 暂时将重传任务交给中继节点, 但并不移动窗口或是丢弃原数据帧副本。中继节点 L2 Relay 将收到的数据帧转发给接收方, 并为此数据帧保留副本。一旦接收方不能正确接收该数据帧请求重传, 或者中继节点为该数据帧启动的超时重传定时器超时, L2 Relay 就代替发送方 L2 在第 2 跳上重传该数据帧。当中继节点发生故障而无法完成重传时, 发送节点 L2 一旦收到否定确认或定时器超时就立刻自己重传数据帧。

上面介绍的是两跳的情况。多跳网络中, 多个中继节点也可以采用相同的形式实现 ARQ。

3 超宽带无线网络 ARQ 方案设计

针对超宽带无线网络中设备覆盖范围小, 需要中继节点支持数据传输的特点, 为多跳网络的终端节点和中继节点设计了 RLC 子层技术方案。

3.1 终端节点技术方案

如图 2 所示, 终端节点的 RLC 子层由 SDU Buffer, Segmentation/Reassemble, Send Window, Receive Window, ACK Waiting List, ACK Build/Parse 以及 RELAY ACK Parse 模块组成, 用部分窗口多拒绝 ARQ 作为 RLC 子层协议。

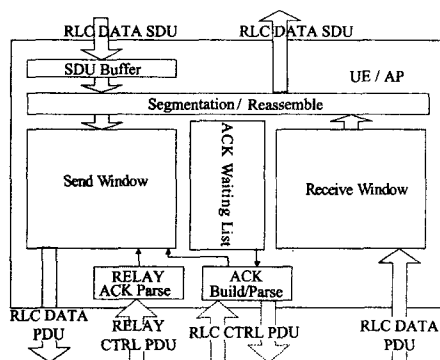


图 2 终端节点 RLC 子层协议框架

上层(IP 层)数据到达 RLC 子层后缓存在 SDU Buffer 模块中, 通过 Segmentation/Reassemble 模块对 SDU 进行分割级联, 组装成要求大小的 PDU。将组装好的 PDU 放入 Send Window, 根据部分窗口多拒绝 ARQ 协议进行状态更新及发送。下层(MAC 子层)数据被提交给 RLC 子层后, 如果在接收窗口中, 就在此为其找到相应位置并更新状态及移动接收窗口。

在 Relay ARQ 没有启动的情况下, 中继会直接转发需要转发的 PDU(包括 DATA PDU 和 CTRL PDU)。终端在收到 CTRL PDU 后, 启用 ACK Build/Parse 模块, 分析 PDU 携带的确认信息, 并对发送窗口状态进行修改; 另一方面, 终端作为接收方, 在一定条件触发下启用 ACK Build/Parse 模块构造 CTRL PDU 进行发送。

在 Relay ARQ 启动的情况下, 终端收到的确认信息将是由中继节点代理发送的 RELAY CTRL PDU。此 PDU 周期性触发, 或在中继节点本身需要发送数据时稍带发送。发送方在收到 RELAY CTRL PDU 后, 启用 RELAY ACK Parse 模块对它携带的确认信息进行分析, 并更新发送窗口的状态及移动发送窗口。

3.2 中继节点技术方案

如图 3 所示, 中继节点的 RLC 子层由 Relay Window, Relay ACK Build/Parse 以及 ACK Parse 模块组成。

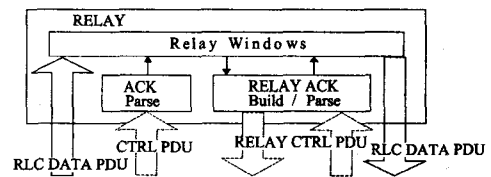


图 3 中继节点 RLC 子层协议框架

在中继 ARQ 没有启动的情况下, 中继节点判断对收到的数据是否需要转发, 如果是, 则直接进行转发。

在中继 ARQ 启动的情况下, 下层(MAC 子层)将数据 PDU 提交给中继的 RLC 子层后, 首先判断该 PDU 是否应该由此节点转发, 如果是, 根据其源和目的 ID 找到相应的转发窗口, 并在该转发窗口中找到其对应的位置, 等待 MAC 子层调度进行转发, 转发时需窗口中保留 PDU 的备份, 并更新窗口状态。

在中继 ARQ 启动的情况下, 下层(MAC 子层)将 CTRL PDU 提交给中继的 RLC 子层后, 中继节点根据其源和目的方 ID 找到相应的转发窗口, 启用 ACK Parse 模块分析 PDU 携带的确认信息, 并对转发窗口状态进行修改, 在一定条件下触发 Relay ACK Build/Parse 模块构造 RELAY CTRL PDU 进行发送。

中继节点在转发窗口状态发生改变时判断窗口是否满足移动条件, 如果满足, 则移动转发窗口。

4 信道模型——超宽带室内视距(LOS)信道模型

在典型的室内 UWB 信道中, 收发机是静止的, 而障碍物(比如人)则是可以移动的。即使持续时间很短, 阴影效应对超宽带信道的影响也是很明显的, 因为 UWB 的数据传输速率可以高达 100Mbps, 一个持续仅半秒的阴影效应都有可能

影响 50Mbps 的数据。这些数据中如果携带对延时和丢包很敏感的高数据速率的多媒体流,则会对用户造成严重影响。

当 LOS 被阻挡时,接收到的功率会下降。由于接收到的功率和信噪比(SNR)是成比例的,因此 SNR 会随之下降。根据角功率谱(APS)和人阻挡模型^[8],把 SNR 分成多个没有重叠的区间,每一个 SNR 区间作为马尔可夫链的一个状态对应一种信道状况,即当障碍物进入一个特定区间,信道就按照阴影处于相应的状态。每种状态下平均 FER 可以由该 SNR 下对应的 BER 计算得到。设每一帧的长度为 L ,则

$$FER = 1 - (1 - BER)^L \quad (1)$$

马尔可夫链的 N 个状态可以按下面的步骤获得:

首先将 LOS 附近的区域分成 N 个区域 Δd_n ,其中 $n=0, 1, \dots, N-1$ (N 为偶数),对应 N 个状态 S_n ,如图 4 所示。

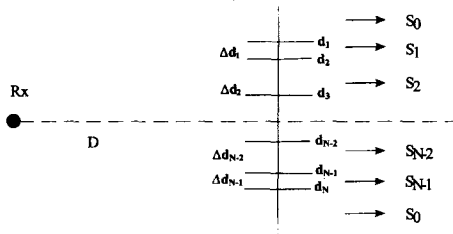


图 4 沿 LOS 的区域划分示意图

由于状态区域关于 LOS 线对称,则状态 S_n 和状态 S_{N-n+1} 的 SNR 一样,状态 $S_{N/2}$ 是最差状态, S_0 是最好状态,每个状态根据阴影对应一个散射指数^[7],即有阴影的条件下接收到的功率和无阴影条件下接收到功率的比值,因此状态 0 的平均散射指数 $S_0 = 0$ dB。其状态转移如图 5 所示。

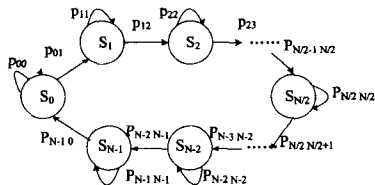


图 5 0-1 状态转移

考虑一个人或障碍物通过 LOS 的过程:从区域 0 进入区域 1 后,他将穿过区域 2 到区域 $N-1$,最后回到区域 0。 S_n 对应的区域是 $[d_n, d_{n+1}]$,在每个状态停留的时间 $t_n = \Delta d_n / v$ 。若设 t_s 是单位时间片长度,则在每个状态停留 $N_n = t_n / t_s$ 个时间单位。假设人在区域 n 呆的时间满足期望值为 N_n 的几何分布^[7],人的穿行满足达到速率为 λ_0 的泊松分布,环境拥挤 λ_0 的取值越大^[9],则离散时间马尔可夫链的转移概率可以表示成

$$p_{i,j} = \begin{cases} \lambda_0, & i=0, j=1, \\ 1-\lambda_0, & i=j=0, \\ \frac{1}{N_i+1}, & i \in [1, \dots, N], j = \text{mod}(i+1, N+1), \\ \frac{N_i}{N_i+1}, & i=j \in [1, \dots, N], \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (2)$$

我们按照最简单的情况将 LOS 穿越的空间划分成 4 个区域,即 $N=4$,则马尔可夫信道模型的状态转移矩阵如式(3)所示。

$$\begin{bmatrix} 1-\lambda_0 & \lambda_0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{N_1}{N_1+1} & \frac{1}{N_1+1} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{N_2}{N_2+1} & \frac{1}{N_2+1} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{N_3}{N_3+1} & \frac{1}{N_3+1} \\ \frac{1}{N_4+1} & 0 & 0 & 0 & \frac{N_4}{N_4+1} \end{bmatrix} \quad (3)$$

如果一个马尔可夫链的所有状态都能相互转移且不会无穷漂移,则系统处于状态 i 的概率 $p_i(n)$ 最终会收敛到一个有限值 π_i ^[9],表示为

$$\pi_i = \sum_{j \in S} \pi_j p_{ji}, i \in S \quad (4)$$

π_i 根据 λ_0 的取值不同而不同。

仿真时间足够长时每两个节点之间的误帧率为

$$P(e) = \sum_{i=0}^4 P(e|S_i) \cdot \pi_i \quad (5)$$

式中, $P(e|S_i) = FER_i$ 。

根据式(5)可以计算相应链路节点之间(每跳之间)的平均误帧率。由于每一跳采用相同参数的信道模型,因此用 $FER_{avr} = P(e)$ 表示每一跳的平均误帧率,整条链路上的误帧率 FER 满足:

$$FER = 1 - (1 - FER_{avr})^N \quad (6)$$

式中, N 为跳数。

5 仿真与分析

5.1 仿真参数设计

仿真网络为如图 6 所示的两跳网络,即 $N=2$ 。Node2 向 Node0 发送一个大小为 100MB 的文件,由 Node1 作为中继转发。仿真过程中设置 MAC 子层每单位时间 $t_s = 0.256$ ms 产生一次中断^[10],每 5 个中断发送一个数据帧,数据帧可以由多个 PDU 组成。

每跳间的区域按照信道模型将空间划分成 4 个区域,即 $N=4$ 。人的步行速度取 0.5m/s, $\Delta d_1 = \Delta d_4 = 0.25$ m, $\Delta d_2 = \Delta d_3 = 0.5$ m,并设 S_0 对应误比特率 $BER_0 = 10^{-6}$, S_1, S_4 对应误比特率 $BER_1 = BER_4 = 10^{-5}$, S_2, S_3 对应误比特率 $BER_2 = BER_3 = 10^{-4}$,每一帧的最大长度 $l = 128000$ bits,则根据式(1)求得每种状态下的误帧率 $FER_0 = 12\%$, $FER_1 = FER_4 = 72\%$, $FER_2 = FER_3 = 100\%$ 。

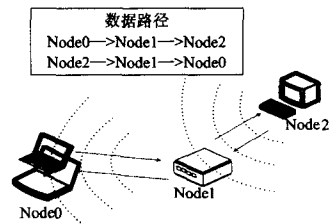


图 6 两跳网络示意图

根据室内障碍物的移动频繁度和多少程度取 3 种情况进行仿真,分别是无障碍物阻挡视距、每 10 秒钟(10s)、每 2 秒钟(2s)有一个障碍物穿过视距的情况,对应 λ 为 0, 0.1 和 0.5,则单位时间 t_s 内,障碍物按 $\lambda_0 = t_s \times \lambda$ 的泊松分布穿过视距。由式(5)得到不同 λ 情况下每跳的平均误帧率分别为

$FER_{avr}=12\%, 15\%, 25\%$,由式(6)可以得出整条链路上的误帧率 FER。

5.2 仿真结果及分析

当 $\lambda=0$ 时,单跳误帧率 $FER_{avr}=12\%$,则整个链路上的误帧率 $FER=23\%$ 。如图7所示,在中继 ARQ 未启动的情况下 RLC 子层的吞吐率在 8Mbps 到 16Mbps 之间波动,平均吞吐率为 10.8Mbps,RLC SDU 的平均时延为 36ms;在中继 ARQ 启动后,RLC 子层吞吐率在 24Mbps 到 31Mbps 之间波动,平均吞吐率 26.7Mbps,RLC SDU 的平均时延减少到 14ms。

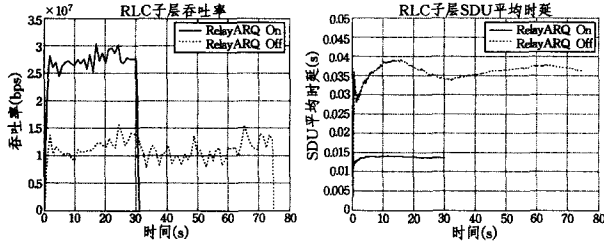


图7 $\lambda=0$ 时 RLC 子层吞吐率及 RLC SDU 平均时延

如图8所示, $\lambda=0.1$ 的情况下,单跳误帧率 $FER_{avr}=15\%$ 。由于人或障碍物的移动会造成短时间内的误帧率,因此吞吐率对应的曲线的抖动较 $\lambda=0$ 时明显。中继 ARQ 未启动时,RLC 子层平均吞吐率为 9.8Mbps,RLC SDU 平均时延为 38ms;中继 ARQ 启动时,RLC 子层吞吐率为 22.2Mbps,RLC SDU 平均时延为 17ms。

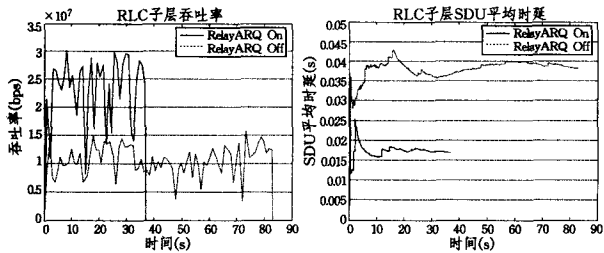


图8 $\lambda=0.1$ 时 RLC 子层吞吐率及 RLC SDU 平均时延

如图9所示, $\lambda=0.5$ 的情况下,单跳误帧率 $FER_{avr}=25\%$ 。中继 ARQ 未启动时,RLC 子层平均吞吐率为 6.9Mbps,RLC SDU 平均时延为 53ms;中继 ARQ 启动时,RLC 子层吞吐率为 15.7Mbps,RLC SDU 平均时延为 22ms。尽管相对于前面几种信道状况,吞吐率和时延特性均有所下降,但同种信道状况条件下使用中继 ARQ 时的 RLC 子层吞吐率和 SDU 时延性能仍好于不使用中继 ARQ 时的性能。

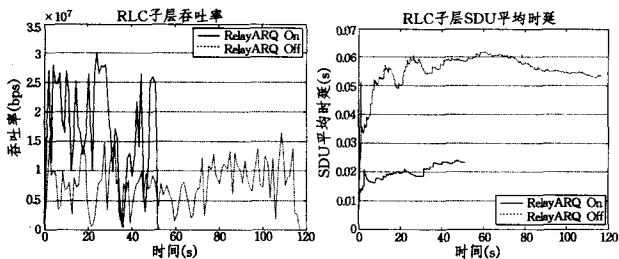


图9 $\lambda=0.5$ 时 RLC 子层吞吐率及 RLC SDU 平均时延

图10比较了4种 λ 取值情况下的 RLC 子层吞吐率。可以看到,随着 λ 的增加(室内环境的拥挤程度增加,或者人和障碍物的活动频繁程度增加),RLC 子层吞吐率也随之下降。

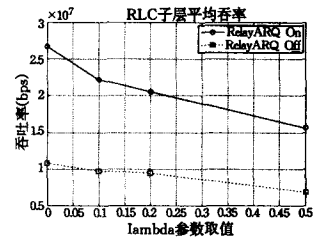


图10 障碍物干扰程度不同时 RLC 子层吞吐率对比

尽管启动中继 ARQ 时吞吐率一直大于未启动中继 ARQ 时的吞吐率,但随着误帧率的加大,两跳之间同时发生误帧的几率也越来越高。在每一跳的平均误帧率为 FER_{avr} 的情况下,两跳都发生误帧占整个链路误帧的比率为

$$\frac{FER_{avr} \cdot FER_{avr}}{1 - (1 - FER_{avr}) \cdot (1 - FER_{avr})} = \frac{1}{\frac{2}{FER_{avr}} - 1} \quad (7)$$

从式(7)可知,随着单跳误帧率的升高,两跳同时发生误帧的概率占误帧率的比重也不断加大。当两跳都发生误帧时,DATA PDU 会在整条链路上被重传,中继 ARQ 的效果会被过度削弱。

图11所示的是 λ 4种取值情况下 RLC 子层吞吐率和发送方链路层吞吐率的比值。由于 RLC 子层吞吐率体现的是有效的数据传输量,而链路层发送的数据体现的是节点收发的数据量,因此这一比值体现出发送方带宽的有效利用率。从图中可以看出,随单跳误帧率的升高,由于链路上重传 PDU 增加,RLC 子层吞吐率和发送方链路层吞吐率的比值出现下降趋势。但是,即使在整条链路误帧达到 43.75%(单跳误帧率为 25%)的情况下,使用中继 ARQ 所得到的 RLC 子层吞吐率也是未使用中继 ARQ 时的 2.3 倍。

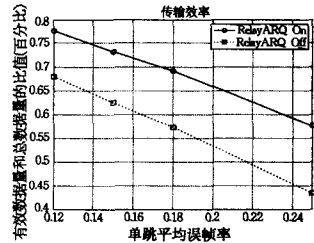


图11 不同 λ 值情况下的传输效率

由式(6)可知,不使用中继 ARQ 的情况下,理论上发送方发送的数据中有效数据占总数据的比例为 $(1 - FER_{avr})^N$,而使用中继 ARQ 的情况下,发送节点(Node2)将数据发送到中继节点(Node1)后,由中继节点代其承担下一跳上发生错误时的重传任务,在理想情况下,发送方发送数据中有效数据所占比例为 $1 - FER_{avr}$,则使用中继 ARQ 时有效利用带宽的比例和不使用中继 ARQ 时相比为:

$$R = \frac{1 - FER_{avr}}{(1 - FER_{avr})^N} = \frac{1}{(1 - FER_{avr})^{N-1}}, N=2, 3, 4, \dots \quad (8)$$

当 $N=2$ 时,

$$R = \frac{1}{(1 - FER_{avr})} \quad (9)$$

将不同 λ 对应的平均误帧率代入式(9),得出不同单跳误帧率下使用中继 ARQ 和不使用中继 ARQ 时有效利用带宽的理论比值,再由图11中的数据计算得到此次仿真过程中的实际值与理论值相比较的曲线,如图12所示。从图中可以看到,仿真中的实际值与理论值接近。

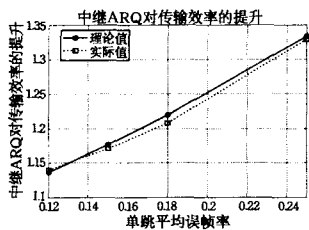


图 12 理论与仿真结果的对比

结束语 本文用部分窗口多拒绝 ARQ 为终端节点设计了 RLC 子层,并用中继 ARQ 的概念为中继节点设计了 RLC 子层。根据超宽带无线网络的应用背景和特点,用马尔可夫链为仿真建立了误帧模型,按照误帧模型参数取值的不同进行了仿真。仿真结果显示,使用中继 ARQ 能提升 RLC 子层吞吐率,降低 SDU 时延。随后分析了单跳误帧率增加对平均吞吐率和发送方带宽有效利用率的影响,并通过仿真结果的对比进行了验证。

本文只对两跳网络收发数据的场景进行了仿真,且中继节点和终端节点分工明确。但在实际的个域网(WPAN)中,每一个多媒体电子设备都需要具有数据收发能力,而且单独存在的中继节点并不能最大限度地发挥其作为一个电子设备带给人们的便利,因此还可以进一步设计针对多跳网络的、能将中继节点和终端节点融合的 RLC 子层方案,并仿真多个用户同时收发数据的场景。

参考文献

[1] Xiao Yang, Shen Xuemin, Jiang Hai. Optimal ACK Mechanisms

of the IEEE 802. 15. 3 MAC for Ultra-Wideband Systems[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2006, 24 (4): 155-156

[2] 武汉汉网高技术有限公司. 多拒绝自动请求重传 ARQ 方法[R]. 中国. 应用型, 02115845, 2004: 7-35

[3] 吴伟民. B3G 系统数据链路层研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2006

[4] Otsuki, Hideki, Yamaoka, et al. A proposal of adaptive protocol relay capability for real-time media with allowable delay[J]. Electronics and Communications in Japan, Part I: Communications, 2005, 88(8): 50-59

[5] Oyman O. End-to-end throughput and latency measures for multi-hop routing in relay-assisted broadband cellular OFDM systems[R]. Long Beach, CA, United States, Institute of Electrical and Electronics Engineers Computer Society, Piscataway, NJ 08855-1331, United States, 2007

[6] Wiemann H, Meyer M, Ludwig R, et al. A novel multi-hop ARQ concept[R]. Stockholm, Sweden, Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., Piscataway, NJ 08855-1331, United States, 2005

[7] Cramer R J, Scholtz R A, Win M Z. Evaluation of an Ultra-wideband Propagation Channel[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2002, 50(5): 561-570

[8] Zhang R, Cai L. A Markov model for UWB indoor channel with shadowing[C]// International Conference on Quality of Service in Heterogenous Wired/Wireless Networks. 2007

[9] Saleh A, Valenzuela R. A Statistical Model for Indoor Multipath Propagation[J]. IEEE JSAC, 1987, SAC-5(2): 128-137

[10] 陈敏. OPNET 网络仿真[M]. 北京: 清华大学出版社, 2006

(上接第 42 页)

资额度区间向高点偏移,这说明随着容忍阈值的增加,将伴随着风险投资可能性的减少。考虑一种极端的情况,信息资产的容忍阈值 ρ 为无穷大时,通过分析可以看出,此时对于信息资产的任何风险管理投资都是毫无意义的。图 2 给出风险管理最佳投资量。

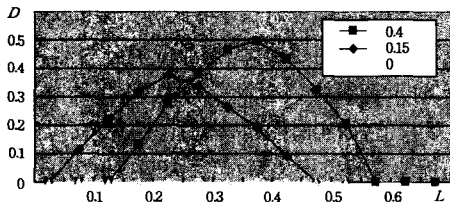


图 2 风险管理最佳投资量

综合分析结果以及文献[8, 10]的综合比较,本模型能够准确描述出风险管理预期损失与最佳绩效信息安全投资量的关系,是行之有效的。

结束语 本文将绩效理论引入到风险管理中,利用风险管理绩效函数和由风险管理投资回报最优引出的风险管理投资与信息资产风险的函数关系式得出风险管理绩效计算模型,评价信息资产进行风险管理方案的合理性,并进行了合理性验证。

本文还有待进一步研究的工作包括:(1)对于不同业务资产的容忍阈值的计算没有标准的计算模型,这对于本文关系模型的准确性造成了一定的偏差;(2)在本文中,对于信息资产的预期风险损失也只是采用了文献中的现有数据,在实际问题的研究中,这是进行风险管理效率研究的重要内容,合理的风险损失预测对本文的关系模型乃至整个信息安全风险

管理领域都会产生比较大的现实意义。

参考文献

[1] 冯登国,张阳,张玉清. 信息安全风险评估综述[J]. 通信学报, 2004, 25(7): 10-18

[2] ISO/IEC 17799. Information Technology-Security Techniques-Code of Practice for Information Security Management [S]

[3] CRAMM. Managing CRAMM Reviews Using PRINCE [EB/OL]. <http://www.cramm.com>, 2005-10-13

[4] COBRA. Framework for Cumulative Risk Assessment [EB/OL]. <http://www.riskworld.com>, 2003-5-27

[5] Standish Group International. Trends in IT Investments [EB/OL]. <http://www.marketresearch.com/>, 2008

[6] de Klerk, Antonie M. The Value of Project Risk Management [C]//Portland International Conference on Management of Engineering and Technology. IEEE, July-August 2001: 570-576

[7] Lu Zhigang. Study on Efficiency of Risk Management for Information Security Based on Transaction[C]//Second International Symposium on Electronic Commerce and Security. IEEE, 2009: 1006-1011

[8] Gordon L A. The Economics of Information Security Investment [J]. ACM Transactions on Information and System Security, 2002, 5(4): 438-457

[9] HOO K. How much is enough? A risk-management approach to computer security[D]. Consortium for Research on Information Security Policy (CRISP) Working Paper. Stanford, Calif: Stanford University, June 2000

[10] Huang C D, Hu Qing. An economic analysis of the optimal information security investment in the case of a risk-averse firm[J]. Int. J. Production Economics, 2008, 114, 793-804