

基于复杂信道服务模型的高效可靠链路控制方法

韩明钢¹, 周智勇², 张金贵¹

(1. 中国电子科技集团公司第54研究所, 石家庄 050081;

2. 中国人民解放军第61846部队, 河北保定 072750)

摘要: 面向无线通信网络化应用发展趋势, 针对无线链路容错概率高、实时变化大、信道带宽窄导致链路可靠控制难的问题, 提出了基于复杂信道服务模型的高效可靠链路控制方法; 分析了无线传播复杂信道服务模型的多种特点, 提出了基于无线信道服务模型紧密耦合高效适配的控制机制, 设计了无线链路层自适应分组反馈控制流程, 结合帧结构设计给出了数据分组长度、最大重数次数等关键参数演算方法; 在物理层最小分组长度对应传输成功率 85%~99% 条件下, 仿真给出最佳分组长度为最小分组的 2~9 倍, 最大重数次数为 9 次缩减至 4 次; 仿真验证表明: 在业务数据包长度为最小分组长度的 10~100 倍时, 相比无线链路控制状态, 传输成功率由 1%~90% 改进至 99.99% 以上, 平均吞吐量可提升两倍以上。

关键词: 无线信道; 服务模型; 链路控制; 自适应反馈

Efficient and Reliable Link Control Method Based on Complex Channel Service Model

HAN Mingyue¹, ZHOU Zhiyong², ZHANG Jingui¹

(1. The 54th Research Institute of CETC, Shijiazhuang 050081, China;

2. No. 61846 Unit of PLA, Baoding 072750, China)

Abstract: Towards the development trend of wireless communication network applications, there are the issues of high fault tolerance probability, large real-time variations, and narrow-bandwidth in wireless links, which results in link reliability difficult. An efficient and reliable link control method basing on complex channel service model is proposed. Firstly, the characteristic of wireless channel service model is analyzed. Secondly, a tightly coupled and efficient adaptive control mechanism based on wireless channel service model is presented, and an adaptive feedback control process in wireless link is designed. Then, the key parameter calculation methods such as group length and maximum number of retransmissions are provided with the frame structure. Simulation shows that with the transmission success rate of 85% to 99% for the minimum group length at the physical level, the best data group length is 2 to 9 times the minimum group length, and the maximum number of retransmissions reduces from 9 to 4. Simulation verification shows that when the length of the packet is 10 to 100 times the minimum group length, compared with the no link control status, the transmission success rate is upgraded from 1%~90% to over 99.99%, and the average throughput is increased by more than twice.

Keywords: wireless channel; service model; link control; adaptive feedback control

0 引言

各种无线通信手段持续发展并越来越受到重视, 应用方式逐渐由传统点对点通信演变至网络化通信。在无线通信链路组网应用场景下, 提升业务可靠性及系统效率始终是系统追求重要目标, 如何在无线信道下提高链路适配控制能力备受关注。

链路层控制方法在低误码高平稳的有线类信道中已经获得了发展应用, 文献 [1-4] 重点研究面向 TCP 协议的链路层重传方法, 提高了无线链路上的 TCP 吞吐量, 但未考虑无线信道实时变化及自适应调整, 难以适应恶劣信道环境, 使得信道利用率不足。文献 [5-6] 基于链路状态感知进行跨层交互协议处理, 有效改进了网络吞吐量, 主要解决高负荷网络条件下链路冲突及拥塞控制问题, 但未考

虑信道状态影响及自适应重传适配。文献 [7-9] 研究了物理层联合纠错编码的反馈重传机制, 改进了系统吞吐量及延时, 未能结合数据包进行分组自适应设计, 在传输成功率及系统效率方面还需进一步改进提升。文献 [10-12] 结合无线网络信道接入特点针对网络效能参数分析, 为无线拥塞控制提供了高效设计方法, 但未进行信道实时变化特点进行链路适配。文献 [13-14] 分析了低信道差错率条件下的帧长优化, 对参数优化匹配设计具有参考价值, 有待结合信道差错率不断实时变化特性深入优化改善。

针对多种无线链路容错概率高、实时变化大、信道带宽窄等多种特点, 提出了基于复杂信道服务模型的高效可靠链路控制方法, 通过无线传播复杂信道服务模型的紧密耦合与适配, 采用自适应分组反馈控制策略, 设计了关键

收稿日期: 2024-05-19; 修回日期: 2024-06-10。

作者简介: 韩明钢(1982-), 女, 硕士, 高级工程师。

引用格式: 韩明钢, 周智勇, 张金贵. 基于复杂信道服务模型的高效可靠链路控制方法[J]. 计算机测量与控制, 2024, 32(10): 132-138.

参数的演算分析方法, 验证实现了该种控制方法在无线通信链路层传输成功率与吞吐量方面的突出优势。

1 复杂信道服务模型分析

无线通信采用地波、视距传播、对流层散射、电离层反射、平台中继转发等多种模式实现信号传输, 相比光纤类有线传输方式, 具有带宽资源稀缺珍贵、传输信息容错概率较高等特点^[15-17]。无线信道传输效果与各种传播介质状态密切相关, 受到地理环境、气候类型、天气变化、电磁噪声等多种复杂因素共同影响, 使得信道接收电平、衰落特性、多径分布等大幅度波动, 导致链路传输容量、数据成功率、传输延时等多种通信能力形成大差异、高偶发不断随机变化^[18-20]。因此, 对于无线传输信道链路组网控制, 为实现信道资源高匹配利用、成功率高性能提升、吞吐量大幅度改进, 需要紧密结合无线信道传播机理与特点进行自适应耦合式匹配设计。

结合无线信道传播特点, 聚物理层传输成功率、链路信噪比两种关键要素, 联合分析链路多种因素制约关系, 构建无线信道服务模型, 形成服务等级映射表, 指导无线链路反馈优化控制。

传输成功率对于可靠度敏感型业务至关重要, 因受到信道传播环境多种综合因素共同影响, 导致不同链路、不同时段将会呈现出剧烈波动变化。考虑物理层设计, 传输成功率采用短时不同状态下判决物理层传输数据正确与否的最小分组 (设长度 N_{\min}) 作为统计分析单元, 结合各种无线信道最小分组传播可靠度大幅度变化范围, 重点分析成功率 $p_{N_{\min}}$ 分布范围 70%~99.9% 条件下的服务模型。经过无线信道不同链路不同时段传输成功率分布规律统计分析, 短时段主要呈现均匀随机分布特点, 虽然也会出现偶发异常波动, 但偶发概率相对较低且偶发性非规律难以预测, 为此主要采用均匀随机分布模型进行分析。在数据分组长度 N_{\min} 时传输成功率为 $p_{N_{\min}}$ 条件下, n 个数据分组同时传输成功概率设为 $p_{nN_{\min}}$, 具体计算^[21-22]如式 (1) 所示:

$$p_{nN_{\min}} = (p_{N_{\min}})^n \quad (1)$$

同一数据分组经过 m 次传输之后, 可提高传输成功率, 如式 (2) 所示:

$$p'_{N_{\min}} = \sum_{i=1}^m i(1-p_{N_{\min}})^{i-1} p_{N_{\min}} \quad (2)$$

链路信噪比决定了物理层传输关键性能, 能够联合传输成功率对链路服务能力提供更加精确评估数据。目前无线通信系统中, 一方面能够利用调制信号、导频序列进行信噪比估计, 给出实时评估结果 snr_{EST} ; 另一方面, 结合物理层传输技术体制的误码性能变化规律, 给出在相应成功率条件下的信噪比门限 $snr_{Thresh-p}$; 依据上述两个信噪比参数, 计算分析给定链路成功率条件下信噪比余量 $snr_{Margin-p} = snr_{EST} - snr_{Thresh-p}$ 。

结合无线信道链路变化规律特性, 针对无线信道服务等级采用近似均匀划分方法, 选取传输成功率为基准映射参数, 信噪比余量为辅助优化参数, 构建形成无线信道服

务模型, 如表 1 所示。

表 1 信道服务模型评估

名称	评估方法
传输成功率	按照 70、80、85、90、95、99、99.5、99.9% 近似均匀地划分为 9 个等级, 根据当前成功率统计评估数据划分至对应等级。
信噪比余量	对应某传输成功率条件, 判断信噪比余量 $snr_{Margin-p}$ 正、负状态。
双参数联合	对应传输成功率等级条件下, 判断信噪比余量 $snr_{Margin-p}$ 为正, 则最终判定为该等级, 否则降一个等级判断, 直至信噪比余量 $snr_{Margin-p}$ 为正。

综合上述分析给出了无线传播复杂信道服务模型基础参考, 具体等级评估标准与信道变化规模及物理层体制设计密切相关, 实际应用设计可结合具体系统具体参数进一步精细设计与优化完善。

2 链路层自适应分组反馈重传控制方法

2.1 无线传播复杂信道服务模型适配控制机制

结合无线信道服务能力随着传播环境大幅变化的模型特性, 为有效解决信道服务能力变差导致成功率及吞吐量大幅降低的问题, 同时充分利用链路稀缺的信道资源, 尽量考虑传输成功率、数据吞吐量、端到端时延等应用需求, 开展链路层无线信道服务模型紧耦合、信道资源弹性高适配性设计, 采用分组传输方式, 基于当前信道服务能力自适应调整分组数量与分组长度, 提出无线链路自适应分组反馈重传控制机制。

无线链路自适应分组反馈重传控制主要包括发送信息缓存与流量控制、无线信道服务能力评估、数据自适应分组适配、自动反馈重传控制、物理信道接入控制等。

2.1.1 发送信息缓存与流量控制

无线链路层采用基于发送数据包的缓存与控制。无线链路层接收来业务数据包, 长度 L 字节, 业务传输成功率要求不小于 p_{data} 。首先进行数据包缓存, 并根据缓存区空闲容量实时控制上一层数据包发送流量。链路层接收对每一个接收到的分组帧均反馈应答 (确认) 信号, 发送端在确认发送成功一个报文后再发送下一个报文, 根据缓存区空闲容量实时控制上一层数据包发送流量。

2.1.2 无线信道服务能力评估

物理层传输信道保障质量进行评估, 通常采用给定分组长度下的传输成功率进行估算, 设最小数据包分组长度为 N_{\min} , 对应信道传输成功率为 $p_{N_{\min}}$ 。此外在物理层传输设计中, 通常对当前信道信噪比进行估计并用以指示当前信道服务能力。综合上述情况, 根据传输成功率、信噪比联合进行无线信道服务等级映射, 形成自适应分组及反馈重传控制的决策变量。

2.1.3 数据自适应分组适配

无线信道服务能力实时变化, 传输成功率及有效带宽产生巨幅波动, 随着数据包传输长度增加使得成功率明显

降低,极大影响了整体传输质量及效率,应采用分组传输方式缓解此问题,但采取固定分组参数仍然无法适配不断变化的无线信道服务模型。

为适应无线传输成功率、带宽容量等敏感特性,根据当前评估的无线信道服务能力选取最佳分组长度 N_{best} ,据此拆分业务数据包(长度 L),形成多个数据分组帧,分组数量为 $\lfloor \frac{L}{N_{best}} \rfloor$ 。

接收端将分组数据帧按照拆分适配状态进行重组,形成业务数据包并送交给上一层。

2.1.4 自动反馈重传可靠控制

为提高无线信道传输成功率,改进信道恶劣时段的有效业务吞吐量,链路层数据分组帧采用两端确认型反馈控制机制。

链路层接收到来自对端的数据分组帧,采用校验信息验证解析,判断该帧数据是否存在错误,对传输正确链路帧解析恢复数据,对传输错误帧直接丢弃。每个数据分组帧解析完成后,将该帧接收状态及时向发送端反馈接收状态指示信号。对于错误的分组帧,或者传输超时未收到对端确认回复的分组帧,考虑到无线信道出现错误分组帧概率随机性,发送端依托选择式重传方式自动进行该帧重发控制,根据无线信道服务能力映射最佳重传次数、

最佳传输超时时间,可保障信息传输的及时性、减少分组重传数量。

2.1.5 物理信道接入控制

物理信道接入控制主要保障报文在链路层与物理信道之间握手信息的交互,结合物理信道工作方式完成层间握手、链路建立、链路结束等过程,控制数据在两层接入的起止时间,进行数据在层间准确传送,物理信道处于有效传输状态。

通过上述无线链路控制机制设计,依托近实时的信道服务能力评估数据,引导自适应分组适配与自动反馈重传控制,获得信道传输状态的紧密耦合与高效运用,为大幅提高传输成功率及改进有效吞吐量提供了自适应控制策略。

2.2 无线链路层自适应分组反馈控制流程

基于无线信道服务模型适配控制的关键策略机制,构建了无线链路层自适应控制流程,具体如图 1 所示。

1) 链路层接收来自网络系统上一层的数据包,并存储在发送业务包缓冲区,在缓存未小时允许上一层继续进行业务发送,若缓存容量已满则向上一层发送指示,暂时进入发送等待。

2) 根据无线信道服务等级映射表,选定当前最佳分组长度 $N_{best} = n_{best} N_{min}$ (其中 n_{best} 为整数),将发送数据包拆分为长度为 N_{best} 的分组。

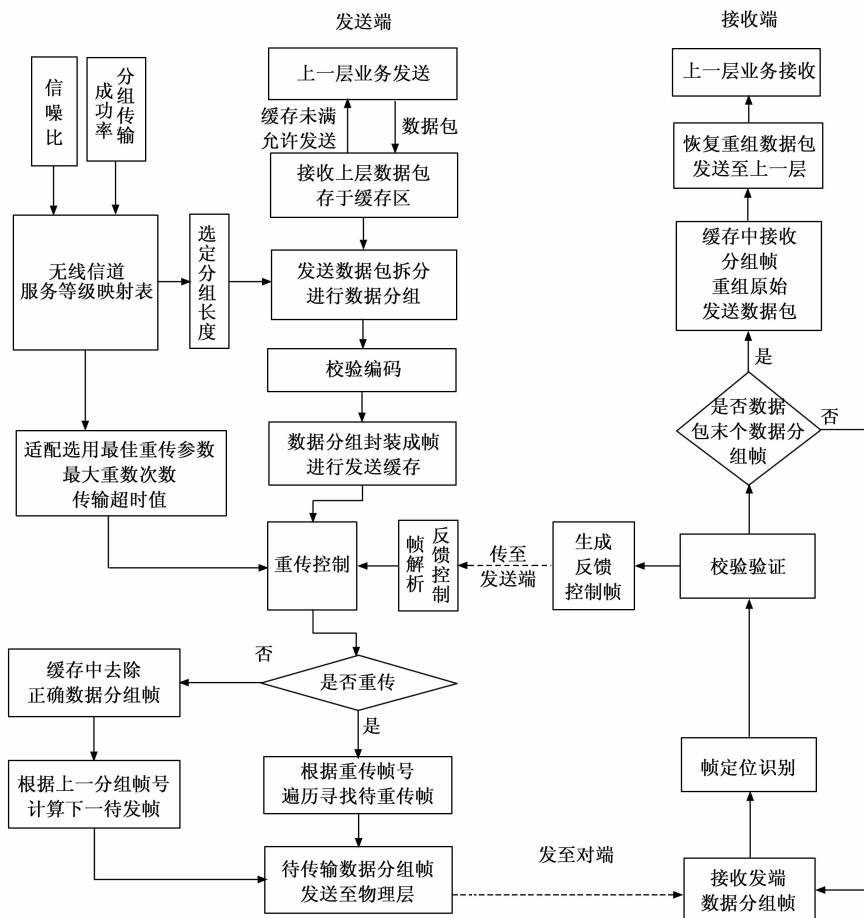


图 1 无线链路层自适应分组反馈控制流程

3) 分组帧进行校验编码, 并根据数据分组帧结构设计, 填入帧辅助信息, 封装成分组数据帧, 并放入待传送缓存区。

4) 根据无线信道服务等级映射表, 选定当前最佳重传控制参数, 包括最大重传次数 W_{\max} 、超时时间 T_{ARQ} 等, 同时解析来自对端的反馈控制帧, 一是判断分组帧传输是否正确, 二是对比是否已达传输超时时间, 若不正确或已达传输超时时间则进一步计算该分组帧重传次数是否已经达到最大值, 若未达最大值则控制该帧需要进行重传并将重传次数增加 1; 当重传次数已达最大值时, 则启动下一帧发送, 同时重传次数计数器清零重新计算。

5) 若当前帧需要重传, 按照待重传帧从缓存区进行搜索, 读取帧信息, 并发至物理层; 若当前帧无需重传, 删除缓存区内已传送正确帧, 同时计算读取下一待传送帧。

6) 将待传送帧发至物理层接口, 通过信道传输至对端。

7) 接收端接收发端数据分组帧, 并进行帧定位识别分析, 解析得到分组帧的各种信息组成。

8) 数据分组信息进行校验验证, 判断该帧是否接收正确, 并根据校验结果, 封装形成反馈控制帧传送至发送端。

9) 判断当前数据包是否全部帧已接收完整, 则恢复数据包; 否则继续接收来自对端的分组数据帧, 直至全部接收完成。

10) 将恢复完整的数据分组帧传送至上一层, 则整个过程处理结束。

3 自适应控制参数设计

3.1 帧结构设计

为实现错误重传高可靠传输控制, 链路层采用拆分小型化分组反馈重传方法, 将业务数据包结合数据长度情况进行适配化分解, 形成多个链路层数据分组帧进行发送, 同时针对每个链路层数据分组帧采用反馈控制帧进行链路传输状态确认。

链路层数据分组帧与反馈控制帧设计, 综合考虑无线信道最小传输分组长度, 采取整倍数长度变化步进, 保证无线信道帧长度匹配衔接、降低控制信息复杂度; 帧辅助信息结合无线信道带宽资源稀缺受限特点, 秉承最小化开销原则简化设计, 提高有效业务信息传输效率。链路层两种类型帧结构设计如图 2 所示, 发送端按照顺序依次发送数据分组帧, 根据对端回复的反馈控制帧信息选择未成功分组重新发送; 接收端根据链路层数据分组帧校验解析, 判断是否接收成功, 并据此向发送端回复反馈控制帧。

链路层数据分组帧包括组帧头、分组控制、数据、校验、组帧尾等组成。组帧头、组帧尾, 能够支持标识分组帧开头及结束。分组控制主要包括分组帧类型、业务数据包号、链路层数据分组长度及组号; 分组帧类型主要识别数据分组帧、反馈控制帧两种类型; 业务数据包号主要对接收上一层的数据包进行编号, 编号范围应大于链路层缓存容量包数, 为充分避免编号边界冲突, 可覆盖两倍缓存

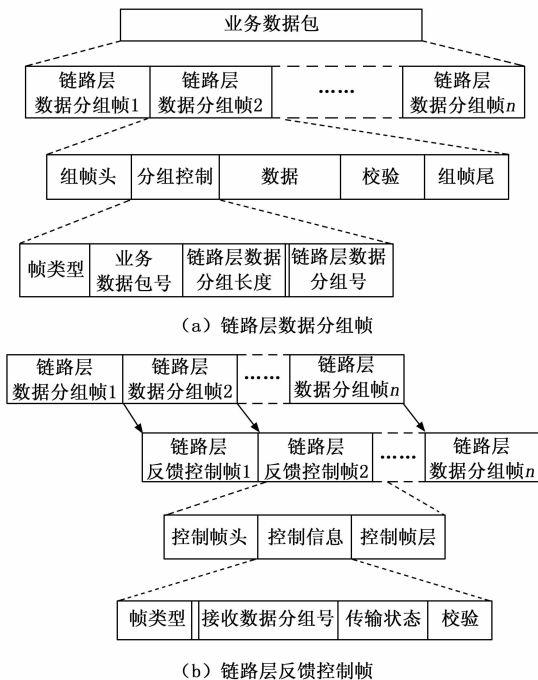


图 2 链路层两种帧组成设计

容量包数; 链路层数据分组长度及组号, 考虑链路层数据分组数量最多达 100 帧。数据分组长度为 nN_{\min} (n 为整数系数), 根据信道质量状态进行自动适配调整, 按照最小分组长度的整数倍步进, 既能满足适配精度又便于降低实现复杂度, 亦即 $n \in \left[1, 2, \dots, \left\lfloor \frac{L}{N_{\min}} \right\rfloor \right]$ 。校验采用循环冗余校验方式, 满足分组帧正确与否可靠判决要求。综上分析各类开销估计需达 5 字节。

链路层反馈控制帧包括 3 种组成。控制帧头尾均与前述数据分组帧相同。控制信息主要包括帧类型、接收数据分组号、传输状态、校验, 帧类型与前述相同; 接收数据分组号, 主要为解析得到的数据分组帧编号; 传输状态主要表示该数据分组帧接收成功、失败; 校验信息进行正确性核。该类帧长度一般也达 5 字节。

结合上述两种帧结构的主要组成, 实际设计时可根据具体参数与要求进行适应调整, 目前基本辅助开销考虑可用于提供初步范围参考, 每个数据分组帧及对应的反馈控制帧, 合计形成帧辅助开销 N_{spend} , 共计不小于 10 字节。

3.2 最佳适配参数演算

根据链路控制流程及帧结构设计, 为实现信号状态自适应最佳化适配, 优先确保数据传输成功率并设目标成功率为 p_{data} , 同时实现较高信道效率及低传输时延, 针对分组长度、重传次数、超时时间等关键参数进行详细设计, 具体流程方法如下。

1) 根据信道数据包最小分组长度 N_{\min} 时对应成功概率为 $p_{N_{\min}}$, 采用不同分组长度 N_{sel} 适配控制对应成功率为 $p_{N_{\text{sel}}}$, 具体关系如式 (3) 所示:

$$p_{N_{\text{sel}}} = p_{N_{\min}}^i \quad (3)$$

2) 结合不同分组长度下的传输成功概率, 通过多次重传提高成功率确保可靠传输, 按式 (4) 计算平均传输次数, 通常考虑错误概率分布情况, 保证接近百分百可靠传输效果, i 取值不小于 100 时累积计算即可逼近实际值。

$$C_{avg} = \sum_{i=1}^{\infty} i(1 - p_{N_{sel}})^{i-1} p_{N_{sel}} \quad (4)$$

3) 根据平均传输次数 C_{avg} , 结合分组长度 N_{sel} 以及对应辅助开销 N_{spend} , 其中辅助开销 N_{spend} 采用帧结构分析所需为 10 字节, 计算信道平均效率 η , 如式 (5) 所示:

$$\eta = \frac{N_{sel}}{(N_{sel} + N_{spend})C_{avg}} \quad (5)$$

4) 重复上述 3 步, 迭代计算分组长度 N_{sel} 分别选取 $N_{min}, 2N_{min}, 3N_{min}, \dots, \lfloor \frac{L}{N_{min}} \rfloor N_{min}$ 条件下所对应平均次数及信道效率, 从中选取信道效率最优时的分组长度值, 即为最佳分组长度 N_{best} , 并给出对应的分组数据一次传输成功率 $p_{N_{sel}}$ 、平均传输次数 C_{avg} 、信道平均效率 η 。

5) 重复 1) ~ 4), 分别计算不同信道可靠度 $p_{N_{min}}$ 条件下对应的最佳分组长度 N_{best} 及相关参数。

6) 根据发送数据目标成功率 p_{data} , 计算不同信道可靠度 $p_{N_{min}}$ 、分组长度 N_{best} 条件下的近似最大重传次数 W_{max} , 如式 (6) 所示:

$$W_{max} = \log_{(1-p_{N_{min}})}(1 - p_{data}) - 1 \quad (6)$$

7) 超时时间应该大于待确认分组开始发送至接收回执时间, 应该小于接收下一分组回执时间, 主要考虑所需信道传输时间为数据分组长度 N_{best} 与信道容量 R_B 之比, 缓存处理时间 T_{ARQ} 近似为一个数据分组的信道传输时间, 则具体范围如式 (7) 所示:

$$\frac{2N_{best}}{R_B} \leq T_{ARQ} \leq \frac{3N_{best}}{R_B} \quad (7)$$

8) 按照最大重传次数, 计算长度 L 时可达到的最佳分组传输成功率 $p_{N_{min}-ARQ}$ 及业务数据包传输成功率 p_{data} , 分别如式 (8) (9) 所示, 其中 $p_{N_{min}}$ 为最佳分组一次传输成功率, 按照式 (3) 计算。根据式 (9) 结果验证设计参数能否满足使用可靠性要求。

$$p_{N_{min}-ARQ} = 1 - (1 - p_{N_{min}})^{W_{max}} \quad (8)$$

$$p_{data} = p_{N_{min}-ARQ}^{\lfloor L/N_{min} \rfloor} = p_{N_{min}-ARQ}^{\lfloor \frac{L}{N_{best}} \rfloor} \quad (9)$$

通过上述步骤循环分析与参数优选计算, 在给定发送数据包长度 L 及数据包成功率不小于 p_{data} 的应用条件下, 根据无线信道当前传输质量状态评估, 得到最佳分组长度 N_{best} 、最大重传次数 W_{max} 、超时时间 T_{ARQ} 等设计结果, 运用于无线信道链路控制协议。

4 设计示例及仿真验证

针对无线信道链路控制参数进行设计, 考虑不同信道环境条件变化, 最小分组传输可靠度近似等间隔选取 85%、90%、95%、99%, 数据分组长度选取范围 $N_{min} \sim 30N_{min}$, 按照整倍数步进分别仿真信道效率及平均传输和最大重传次数。

信道效率仿真结果如图 3 所示。通过各条曲线顶点分

析, 在最小分组传输成功率 85%、90%、95%、99% 条件下, 最佳分组数据长度分别为 $2N_{min}$ 、 $3N_{min}$ 、 $4N_{min}$ 、 $9N_{min}$ 可达到最佳信道效率。随着最小分组传输成功率逐渐增加, 最佳分组长度也随之不断增大, 能够有效降低辅助开销, 且不增加重数次数, 因此获得更优系统效率。

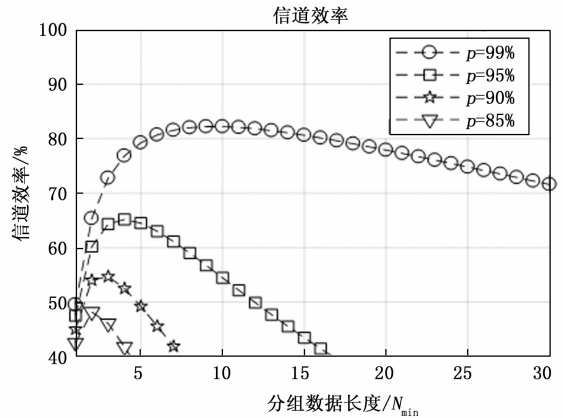


图 3 不同分组长度条件下的信道效率分析

不同分组长度条件下传输次数分析如图 4 所示。平均传输次数随着分组长度增加呈现明显增加趋势, 直接影响信道效率。随着最小分组传输成功率逐渐增加, 在前面所述 85% ~ 99% 四种最小分组传输成功率条件下, 最大重数次数随着分组长度明显增大, 且最佳分组长度状态时分别为 9、9、6、4。

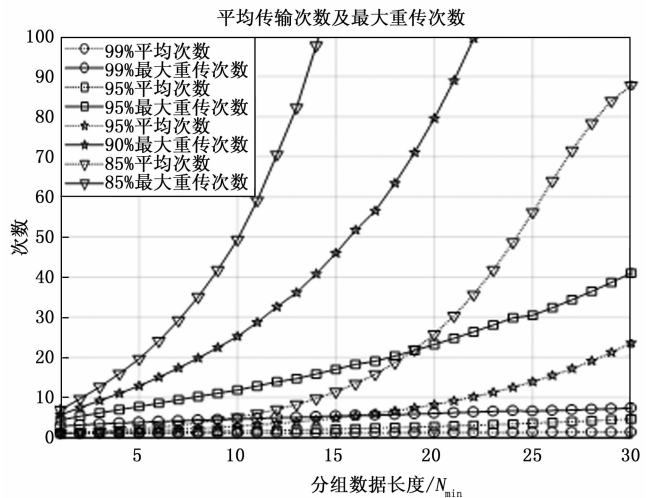


图 4 不同分组长度条件下的传输次数分析

基于无线链路控制流程及重传控制方法, 业务数据包长 $L_1 = 10 N_{min}$ 、 $L_2 = 50 N_{min}$ 、 $L_3 = 100 N_{min}$, 最小数据分组条件下成功率从 70% 变化至 99%, 按照演算得到最佳分组长度、最大重传次数进行链路重传控制, 并设置重数次数上限不超过 15 次。基于 Rayleigh 信道分集合并模型构建无线传播信道, 采用网络仿真软件进行效能验证。仿真过程中, 采用不少于 10 000 包数据进行验证, 发送端按照断续发送方式, 在接收到前一包发送完成后再启动发送下一数

据包, 接收端一方面针对反馈重传后的数据分组进行合并恢复数据包, 并进行数据包成功率统计得到 p_{data} , 为便于对比, 将未进行分组重传处理控制的数据包也进行统计。

业务数据包传输成功率仿真结果如图 5 所示, 物理层最小分组成功率 80%~99%, 若无分组重传控制, 业务数据包长度由 $10 N_{min}$ 变化至 $100 N_{min}$, 传输成功率大幅下降至 90% 甚至 1%, 最差状态近似中断; 采用无线链路自适应分组反馈控制方法, 业务数据包传输成功率可提升至 99.99%, 使得传输成功率获得数量级改善。

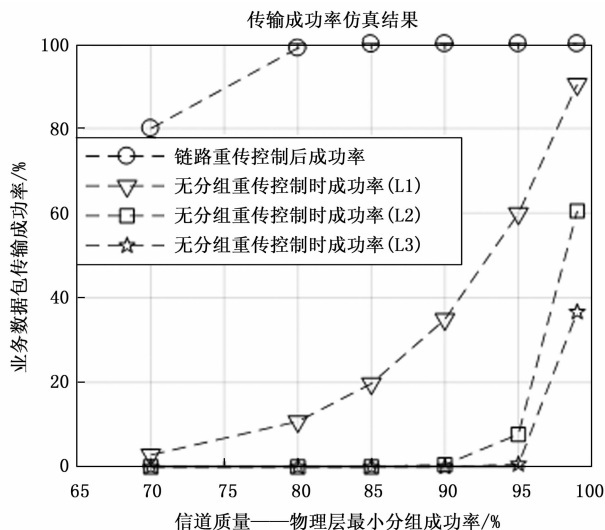


图 5 相比无自适应反馈控制时的成功率对比

业务数据包吞吐量仿真结果如图 6 所示, 最小分组传输成功率 80% 时, 可将业务吞吐量由 0.5%~10% 提升至 40% 以上; 最小分组传输成功率 90% 时, 业务吞吐量由 0.5%~35% 提升至 55%; 随着该成功率增至 99%, 业务数据包 $50 N_{min}$ 、 $100 N_{min}$ 时吞吐量可由 36%~60% 提升至 82%, 虽然 $10 N_{min}$ 业务包状态下吞吐量出现了 8% 下降, 但下降幅度相对较小, 而且此时获得了传输可靠度显著改善。综合上述各种信道状态进行统计分析, 平均吞吐量提升至少两倍以上。

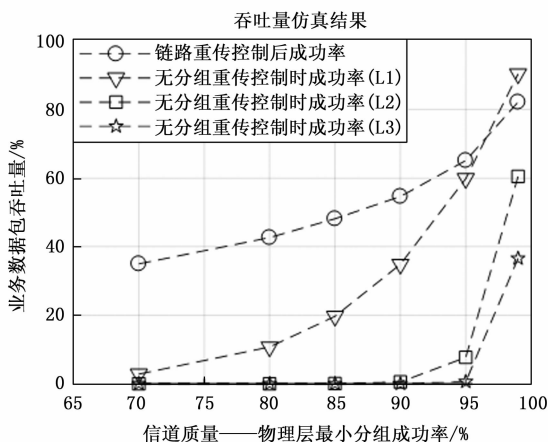


图 6 相比无自适应反馈控制时的吞吐量对比

5 结束语

针对多种无线链路容错概率高、实时变化大、信道带宽窄导致链路层可靠控制难的问题, 提出了基于复杂信道服务模型的高效可靠链路控制方法。基于无线信道服务模型设计了链路层紧耦合高适配自适应控制机制, 给出了无线链路自适应分组反馈控制流程, 进一步结合帧结构组成分析, 设计了分组长度、重传次数演算方法。基于最小分组成功率 85%~99%, 仿真演算给出最佳分组数据长度选取最小分组长度的 2~9 倍, 最大重传次数可选 9 次缩减至 4 次; 在数据包长度为最小分组长度的 10、50、100 倍时, 与无链路控制传输相比, 传输成功率由 1%~90% 改进至 99.99% 以上, 平均吞吐量提升两倍以上, 为恶劣时变无线信道链路层高效可靠控制提供解决方案。该方法既可应用于单种类无线信道组网链路层控制, 也可适用于多种类无线信道联合组网链路层综合控制, 未来还可进一步结合无线信道大量数据精确模型, 深入优化改进关键控制参数与自适应反馈策略, 提升网络系统整体运行效能。

参考文献:

- [1] 铁玲, 周天翔, 李建华. 重传确认延迟——一种改进无线传输控制协议性能的链路层重传方案 [J]. 上海交通大学学报, 2002, 36 (12): 1795-1798.
- [2] WALINGO T, TAKAWIRA F. TCP over wireless with differentiated services [J]. IEEE Transaction on Vehicular Technology, 2004, 53 (6): 1914-1926.
- [3] HARI B, SESHAN S, RANDY K. Improving reliable transport and handoff performance in cellular wireless networks [J]. Wireless Networks, 1995, 1 (4): 469-481.
- [4] HARI B, VENKATA N P, SESHAN S, et al. A comparison of mechanisms for improving TCP performance over wireless links [J]. IEEE Transactions on Networking, 1997, 5 (6): 756-769.
- [5] 陈庆华, 徐子平, 沈越泓. 基于链路状态感知的跨层协议设计与仿真 [J]. 系统仿真学报, 2009, 21 (11): 3416-3419.
- [6] HUANG J W, BERRY R A, HONIG M L. Wireless scheduling with hybrid ARQ [J]. IEEE Transaction on Wireless Communication, 2005, 4 (6): 2801-2810.
- [7] LIU Q, ZHOU S, GIANNAKIS G B. Cross-layer combining of adaptive modulation and coding with truncated ARQ over wireless links [J]. IEEE Transaction on Wireless Communication, 2004, 3 (5): 1746-1755.
- [8] WU D, NEGI R. Effective capacity: a wireless link model for support of quality of service assurance [J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2004, 53 (5): 1547-1557.
- [9] TANG J, ZHANG X. Cross-layer modeling for quantity of service guarantees over wireless Links [J]. IEEE Transaction on Wireless Communication, 2007, 6 (12): 4504-4512.
- [10] 牛大伟, 于卫波, 王海. 窄带 Ad hoc 网络端到端拥塞控制机理分析 [J]. 计算机科学, 2010, 37 (3): 57-60.
- [11] CEN S, COSMAN P C, VOELKER G M. End-to-end differ-

entiation of congestion and wireless losses [J]. IEEE Transactions on Networking, 2003, 11 (5): 703-717.

[12] KANG J, ZHANG Y, NATH B. Tara: topology-aware resource adaptation to alleviate congestion in sensor networks [J]. IEEE Transactions on Parallel and Distributed Systems, 2007, 18 (7): 919-931.

[13] SAMIR K. Analysis of memory and incremental red-undancy ARQ schemes over a nonstationary channel [J]. IEEE Transactions on Communications, 1992, 40 (9): 220-226.

[14] 孙翔, 陈松明. 数据链路层停等 ARQ 协议的最佳帧长近似解 [J]. 电子科技大学学报, 2007, 36 (5): 854-857.

[15] PU Y R, YANG H J, WANG L L, et al. Analysis and modeling of temporal variation properties for LF ground-wave propagation delay [J]. IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, 2019, 18 (4): 641-645.

[16] 周丽丽, 郑悦, 穆中林. 昼夜过渡区低频一跳天波中不同模式区分及特性分析 [J]. 电子学报, 2023, 51 (7): 244-249.

[17] 王红光, 张利军, 孙方. 基于抛物方程的短波电离层传播

数值模拟研究 [J]. 电波科学学报, 2009, 34 (5): 545-551.

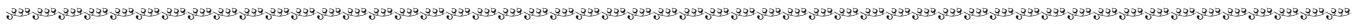
[18] International Telecommunication Union. Recommendation ITU-R P. 533-11: Method for the prediction of the performance of HF circuits [S]. Geneva: ITU, 2012; 9-21.

[19] LI L, LIN L K, WU Z S, et al. Study on the maximum calculation height and the maximum propagation angle of the troposcatter wide-angle parabolic equation method [J]. IET Microwaves Antennas and Propagation, 2016, 10 (6): 686-691.

[20] SHENG N, LIAO C, LIN W, et al. Modeling of mili-meter-wave propagation in rain based on parabolic equation method [J]. IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, 2014, 13 (2): 3-6.

[21] 胡建军, 郭显, 高翔. 卫星链路上的 SR 协议性能分析 [J]. 电子技术应用, 2011, 37 (9): 126-128.

[22] KIM S R, UN C K. Throughput analysis for two ARQ schemes using combined transition matrix [J]. IEEE Transactions on Communications, 1992, 40 (11): 1679-1683.



(上接第 131 页)

保证 5G 通信网的正常运行, 从而推动通信产业的发展。在此次研究中, 利用云计算技术设计并开发了 5G 通信信道传输控制系统, 能够在保证信道传输质量的同时, 提高信道的传输速度, 对于提高 5G 通信数据的时效性具有重要作用。然而此次系统测试实验主要针对的 5G 通信信道中的部分信道进行测试分析, 得出的实验结果存在一定的局限性, 因此在优化设计系统投入使用前, 还需要对相关的实验数据进行补充。

参考文献:

[1] 秦久人, 许长桥, 杨树杰, 等. 基于深度增强学习与子流耦合感知的多路传输控制机制 [J]. 电子学报, 2022, 50 (2): 346-357.

[2] 赵凤, 王伟, 朱晓荣, 等. 基于自适应网络编码的异构无线链路并发传输控制方法研究 [J]. 电子与信息学报, 2022, 44 (8): 2777-2784.

[3] 薛培, 官剑, 邵春伟, 等. 基于 FPGA 的 SRIO 多通道控制系统设计与实现 [J]. 电子技术应用, 2023, 49 (1): 107-113.

[4] 高尚蕾, 张治中, 段浴, 等. 5G 系统中基于解调参考信号的信道估计方法 [J]. 电讯技术, 2021, 61 (2): 191-196.

[5] 梁瑜. 基于 E 类放大器的新型无线电能传输控制策略 [J]. 科学技术与工程, 2021, 21 (13): 5369-5373.

[6] 魏贵明, 张翔, 郭宇航, 等. 5G 信道建模与性能测试方法 [J]. 电信科学, 2021, 37 (2): 15-21.

[7] 李欢, 许越, 孟凡博, 等. 变电站内 5G 终端通信信道建模与分析 [J]. 光通信研究, 2021 (1): 63-66.

[8] 方如举, 葛瑜, 孙伟, 等. 基于 WSNs 的智能配电网通信数据传输带宽的优化分配策略 [J]. 电力系统保护与控制,

2021, 49 (23): 88-95.

[9] 陈可扬, 郭爱红. 基于网关转换与分域控制的数据传输技术 [J]. 火力与指挥控制, 2022, 47 (3): 150-155.

[10] 陈丽琴, 顾静军. 基于无线传感器网络的地铁通信传输延迟优化方法 [J]. 传感技术学报, 2022, 35 (5): 698-702.

[11] 金久一, 邱恭安. C-V2X 通信中资源分配与功率控制联合优化 [J]. 计算机工程, 2021, 47 (10): 147-152.

[12] 舒帅, 汤宝平, 黄艺, 等. 机械振动 WSN 大量数据自适应传输控制方法 [J]. 振动与冲击, 2023, 42 (4): 263-269.

[13] 常梦磊, 罗述翔, 李幸睿, 等. 低时延传输的 ERDQN 数据调度算法 [J]. 哈尔滨工业大学学报, 2021, 53 (8): 132-136.

[14] 曾孝平, 李诗琪, 杨凡, 等. D2D 通信中一种基于非数据辅助误差适量幅度的同信道干扰控制方法及其性能分析 [J]. 电子与信息学报, 2021, 43 (9): 2663-2671.

[15] 杨戈, 朱永豪. 基于负载预测的车联网信道拥塞控制策略 [J]. 电子技术应用, 2022, 48 (3): 64-67.

[16] 杜欣军, 刘鹏飞. WFRFT 认知通信系统控制参数联合优化方法研究 [J]. 计算机工程, 2021, 47 (12): 177-184.

[17] 王博文, 孙彦景. 基于联盟图博弈的地下空间无人机应急通信网络拓扑控制算法 [J]. 电子与信息学报, 2022, 44 (3): 996-1005.

[18] 倪启南, 杨明, 李云嵩, 等. 全闭环伺服驱动系统位置控制通信延时补偿技术 [J]. 电工技术学报, 2022, 37 (10): 2513-2522.

[19] 向敏, 饶华阳, 张进进, 等. 基于图卷积神经网络的软件定义电力通信网络路由控制策略 [J]. 电子与信息学报, 2021, 43 (2): 388-395.

[20] 张士兵, 陈超, 李业. 基于能效和时延的多跳中继通信系统功率控制算法 [J]. 南京邮电大学学报 (自然科学版), 2021, 41 (1): 1-8.