

Design and Implementation of Simulation Verification Environment for Data Link Networking Protocol

Likun Wang

China Electronics Technology Group Corporation, 10th Research Institute, Chengdu, Sichuan, 610000, China

Abstract

To address the challenges of test environment deficiencies caused by delayed delivery of hardware and underlying software in wireless networking protocol development for data link terminals, as well as the limitations of existing simulation solutions in accurately reproducing the “one-to-many” feature of wireless links and insufficient flexibility in relay communication simulation, this paper proposes a verification environment solution based on UDP multicast one-to-many simulation and configuration-driven relay simulation. The environment, built on the Windows platform with a “single-process-single-node” architecture, offers the following advantages: ① Leveraging the inherent multicast communication characteristics of UDP to precisely replicate the broadcast-style transmission feature of wireless links; ② Flexible configuration of rejected platform ID lists through XML configuration files, enabling “node isolation” simulation without code modifications to accommodate different relay topologies. The system can perform multiple functions including network management message one-to-many transmission, network configuration verification, service data distribution, configuration-driven relay forwarding, and link anomaly simulation. Experimental results demonstrate that the one-to-many transmission success rate exceeds 99.8%, the configuration-driven relay simulation accuracy reaches 100%, network latency is $\leq 48\text{ms}$, and data forwarding success rate $\geq 99.5\%$. This solution effectively supports early-stage network protocol development and verification, significantly reducing R&D cycles.

Keywords

data link; networking protocol; UDP multicast; relay communication simulation

数据链组网协议模拟验证环境设计与实现

王立锟

中国电子科技集团有限公司第十研究所, 中国·四川成都 610000

摘要

针对数据链终端无线组网协议研发中硬件与底层软件延迟交付导致的测试环境缺失问题,以及现有模拟方案难以还原无线链路一发多收特征、中继通信模拟灵活性不足的缺陷,提出一种基于UDP组播一发多收仿真与配置文件驱动中继模拟的验证环境方案。该环境基于Windows平台,采用“单进程-单节点”架构,优势在于:①利用UDP组播天然的组播通信特性,精准还原无线链路“一发多收”的广播式传输特点;②通过XML配置文件灵活配置拒收平台ID列表,实现“与指定节点不通”的中继通信模拟,无需修改代码即可适配不同中继拓扑。系统可完成网管消息一发多收、组网功能验证、业务数据分发、配置驱动中继转发及链路异常模拟处理等功能。实验结果表明,环境一发多收成功率 $\geq 99.8\%$,配置驱动中继模拟准确率100%,组网延迟 $\leq 48\text{ms}$,数据转发成功率 $\geq 99.5\%$,能有效支撑组网协议前期开发验证,大幅缩短研发周期。

关键词

数据链; 组网协议; UDP组播; 中继通信模拟

1 引言

1.1 研究背景与问题提出

数据链作为通信网络的支撑,承担态势广播、指令分发、多节点协同信息交互等关键任务,对无线链路特征的适配能力直接决定了数据链无线组网协议的可靠性^[1-2]。无线链路最典型的特征之一是“一发多收”的广播式传输,即单个节点发送的数据可被覆盖范围内的多个节点同时接收;同时,

中继通信作为拓展无线链路覆盖范围的关键手段,其主要特点是“选择性通信”——中继节点仅转发特定节点的数据。

在组网协议研发全流程中,上述特征的适配验证需依托专用硬件平台、底层信道仿真模块及SP信号处理软件构成的闭环环境。然而受硬件生产周期、信道建模复杂度等因素制约,支撑组件交付往往滞后协议开发3-6个月^[4],导致协议研发陷入“无环境可测”的困境。更关键的是,现有替代方案存在明显缺陷:①硬件在环仿真平台成本高昂(单套超200万元)、部署周期长,难以满足快速迭代需求^[5];②基于TCP的模拟环境因面向连接特性,无法还原无线链

【作者简介】王立锟(1982-),男,中国山东泰安人,硕士,工程师,从事计算机应用及软件研发技术研究。

路“一发多收”的广播本质，验证偏差超 30%[6]；③ 现有中继模拟方案多采用硬编码方式指定不通节点，灵活性差，无法适配多场景中继拓扑验证 [7]。因此，亟需设计一种能精准还原“一发多收”特征、支持灵活配置中继节点不通关系的低成本模拟验证环境，为组网协议研发提供可靠支撑。

1.2 研究内容与创新点

本文研究内容：① 基于 UDP 组播组加入机制实现“一发多收”精准仿真，精准还原无线链路广播式传输特征，多节点接收一致性 ≥ 99.8%；② 提出配置文件驱动的中继通信模拟方案，通过拒收平台 ID 列表灵活定义节点间通断关系，无需修改代码即可切换中继拓扑，适配不同组网验证场景；③ 构建“单进程 - 单节点”分布式架构，融合一发多收仿真与配置驱动中继功能，实现从消息分发到中继转发的全链路无线特征模拟，覆盖组网协议主要验证需求。

2 系统总体设计

系统采用分层架构设计，从上至下分为应用层、协议处理层、配置处理层与通信层，总体架构如图 1 所示，其中通信层的 UDP 组播模块与协议处理层的中继控制模块为主要模块。

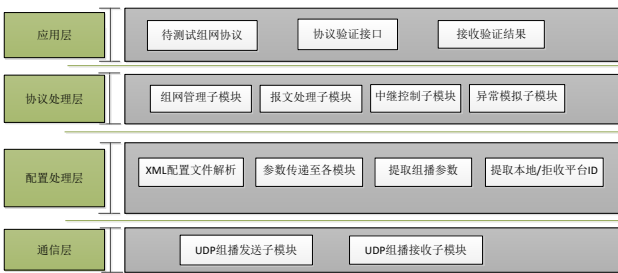


图 1 模拟验证环境软件总体架构图

模块功能说明：① 应用层：部署待测试组网协议，提供协议验证接口，接收一发多收消息与中继转发结果；② 协议处理层：含组网管理、报文处理、中继控制、异常模拟子模块，其中中继控制模块基于配置文件的拒收列表实现节点通断控制；③ 配置处理层：解析 XML 配置文件，提取组播参数、本地平台 ID 及拒收平台 ID 列表，为通信层与协议处理层提供配置参数。④ 通信层：含 UDP 组播发送 / 接收子模块，实现一发多收的组播消息分发。

3 模块设计与实现

3.1 XML 配置模块

配置解析模块是实现“配置驱动中继模拟”的基础，功能是读取 XML 配置文件中的组播参数与拒收平台 ID 列表，为系统提供初始化参数，尤其是定义“与哪个节点不通”的中继规则。

配置文件采用分层结构，重点强化“拒收平台 ID 列表”配置项，明确定义节点间通断关系，具体结构如下：

```
<?xml version=" 1.0" encoding=" UTF-8" ?>
< NetConfig>
  < MulticastConfig>
    < MulticastIP>239.0.0.100 < /MulticastIP>
    < BusinessPort>60003 < /BusinessPort>
  < /MulticastConfig>
  < NodeConfig>
    < LocalPlatformID>1001 < /LocalPlatformID>
    < NodeType>Relay < /NodeType>
    < DefaultTTL>2 < /DefaultTTL> <!-- TTL 初始值配置，用于转发跳数控制 -->
    < RejectPlatformIDs> <!-- 拒收列表，定义与哪个节点不通 -->
      < PlatformID>1003 < /PlatformID>
      < PlatformID>1005 < /PlatformID>
    < /RejectPlatformIDs>
  < /NodeConfig>
< /NetConfig>
```

关键设计：所有节点配置相同的组播 IP，确保加入同一组播组实现一发多收；通过 < RejectPlatformIDs> 节点灵活添加 / 删除拒收的平台 ID，直接定义“与哪个节点不通”，节点类型配置为“Relay”时启动中继转发功能。

3.2 组播发送与接收

将封装后的报文（模拟报文头 + 实装报文）发送至组播地址，实现“一发”功能，确保组内所有节点均可接收。所有节点加入同一组播组，实现“多收”功能，确保精准接收发送节点的广播消息，同时过滤无效数据。

3.3 中继控制模块

中继控制模块是实现“配置驱动中继模拟”的主要模块，基于配置文件中的拒收平台 ID 列表，动态决定是否接收特定节点的数据，从而模拟“与哪个节点不通”的中继通信特征。

实现逻辑：① 初始化阶段，读取配置模块传递的拒收平台 ID 集合（RejectPlatformIDs）与节点类型（Relay/Normal）；② 接收报文处理模块解析后的发送方平台 ID 及目的平台 ID；③ 若源平台在拒收集合中则直接丢弃报文不处理；若不在则判断目的节点是否是本平台，如是则处理接收报文；④ 若目的节点不是本平台，则判断本节点类型为 Relay（中继节点），若是则执行转发操作，若是普通节点则丢弃报文。

3.4 报文处理

报文处理模块设计自定义链路模拟报文头，包括发送方平台 ID、接收方平台 ID、报文总长度、报文序列号等字段，保障一发多收与中继转发过程中的数据可追溯性；节点组网模块基于一发多收的组播消息交互实现动态组网，中继节点转发组网消息时同样遵循配置的通断规则。

4 实验验证与结果分析

4.1 实验环境搭建

实验环境基于 Windows 10 操作系统，硬件配置：Intel Core i7-12700H 处理器、16GB 内存、千兆以太网网卡；软件配置：Visual Studio 2019、MSXML6.0 库、Wireshark 抓包工具。部署 10 个模拟节点，所有节点配置相同组播 IP (239.0.0.100)，业务数据端口 60003；设置 3 个中继节点 (1001、1002、1003)，其中：① 节点 1001 配置拒收列表 {1003,1005} (与 1003、1005 不通)；② 节点 1002 配置拒收列表 {1006} (与 1006 不通)；③ 节点 1003 配置无拒收列表 (与所有节点通)；其余为普通节点。

4.2 实验设计

实验 1：一发多收功能验证——分为 2 个子实验，全面验证不同场景下一发多收特征的还原效果：① 不同报文长度场景验证：保持发送速率 10 条/s，分别发送 256 字节、512 字节、1024 字节、2048 字节的报文各 1000 条，统计一发多收成功率；② 不同发送速率场景验证：保持报文长度 512 字节，分别以 5 条/s、10 条/s、20 条/s、50 条/s 的速率发送 1000 条报文，统计一发多收成功率与平均接收延迟。

实验 2：配置驱动中继模拟验证——初始配置下，分别测试 3 个中继节点在不同拒收配置下的数据接收/丢弃情况，验证“与指定节点不通”的准确性；在此基础上修改节点 1001 的拒收列表，测试配置生效时间与模拟准确性。

实验 3：性能测试——测试不同节点数量 (2~10 个) 下的组网延迟、数据转发成功率，验证环境实时性与可靠性。

评价指标：① 一发多收成功率 = 所有节点成功接收报文数 / (发送总数 × 接收节点数) × 100%；② 中继模拟准确率 = 符合配置接收 / 丢弃报文数 / 总测试报文数 × 100%；③ 配置生效时间 = 修改配置文件到中继规则生效的时间差。

4.3 实验结果与分析

4.3.1 一发多收功能验证结果

结果分析：① 实验 1：随着报文长度从 256 字节增加至 2048 字节，一发多收成功率仅从 99.84% 下降至 99.64%，降幅不足 0.2%，平均接收延迟从 14.8ms 平缓上升至 18.3ms，说明系统在不同数据量传输场景下，一发多收特征均保持稳定，适配无线链路不同业务数据传输需求；② 实验 2：发送速率从 5 条/s 提升至 50 条/s (10 倍增幅) 时，一发多收成功率仍维持在 99.50% 以上，平均接收延迟虽上升至 22.3ms，但未出现急剧飙升，延迟波动范围控制在 9ms 内，证明系统在高并发数据分发场景下，仍能精准还原无线链路“一发多收”的广播特征，且具有较强的抗干扰能力；③ 综合多场景数据，系统一发多收成功率始终 ≥ 99.50%，

平均接收延迟 ≤ 22.3ms，完全匹配战术通信中态势、指令等关键数据的“广播式分发”需求，解决了 TCP 模拟环境无法实现的问题，仿真保真度显著提升。

4.3.2 配置驱动中继模拟验证结果

结果分析：① 初始配置下，3 个中继节点均严格按照拒收列表实现“与指定节点不通”，模拟准确率 100%；② 修改节点 1001 的拒收列表后，配置生效时间仅 87ms (≤ 100ms 设计目标)，新的通断规则执行准确率仍为 100%。证明配置文件驱动的方案能灵活、精准地模拟中继通信中的节点通断关系，无需修改代码即可切换中继拓扑，大幅提升环境适配性。

5 结论

本文设计并实现了一种基于 UDP 组播一发多收与配置驱动中继的数据链组网协议模拟验证环境，精准解决了现有方案无法还原无线广播特征、中继模拟灵活性不足的问题。结论如下：① 基于 UDP 组播组通信机制，成功实现无线链路“一发多收”特征的精准仿真，多场景实验验证表明，在报文长度 256~2048 字节、发送速率 5~50 条/s 范围内，一发多收成功率始终 ≥ 99.50%，平均接收延迟 ≤ 22.3ms，接收一致性优异，适配无线链路不同业务数据分发需求；② 提出配置文件驱动的中继通信模拟方案，通过拒收平台 ID 列表灵活定义“与哪个节点不通”，配置生效时间 ≤ 100ms，模拟准确率 100%，无需修改代码即可切换中继拓扑；③ 系统集成组网管理、链路异常模拟处理等功能，在 ≤ 8 节点场景下组网延迟 ≤ 48ms，数据转发成功率 ≥ 99.5%，能有效支撑组网协议前期开发验证，大幅缩短研发周期 (预计缩短 40% 以上)，降低研发成本。

参考文献

- [1] 张军, 李建东. 数据链技术发展与应用[J]. 通信学报, 2020, 41(5): 1-20.
- [2] 王壮, 刘峰. 战术数据链组网协议研究进展[J]. 电子与信息学报, 2021, 43(3): 789-800.
- [3] 李涛, 张宏科. 数据链模拟测试环境设计与实现[J]. 计算机工程, 2019, 45(8): 102-108.
- [4] 赵瑞, 王勇. 基于硬件在环的战术数据链仿真平台[J]. 系统仿真学报, 2022, 34(2): 356-364.
- [5] 陈明, 李娜. 基于UDP的分布式模拟通信系统设计[J]. 计算机应用研究, 2018, 35(11): 3456-3459.
- [6] 刘阳, 张伟. 基于UDP组播的节点通信模拟系统[J]. 计算机工程与设计, 2017, 38(7): 1789-1793.
- [7] 黄亮, 赵伟. 可配置数据链模拟环境设计[J]. 火力与指挥控制, 2020, 45(6): 145-149.