

基于端点设备的城市轨道交通视频单向传输技术*

张立东¹ 许子恒¹ 王 坤²

(1. 上海应用技术大学轨道交通学院, 201418, 上海; 2. 上海金电网安科技有限公司, 201203, 上海)

摘 要 [目的] 为了满足城市轨道交通系统不同安全等级网络之间视频传输的完整性、机密性和可用性等要求, 有必要创新一种安全、可靠的视频单向传输方案, 确保视频数据仅从低密级网络向高密级网络单向流动。[方法] 提出了基于2台端点设备的视频单向传输方案, 介绍了该方案的整体架构, 设计了基于以太网的私有协议。采用UPET(单向专用交换通道)技术进行了单向传输联络设计, 采用FEC(前向纠错)技术进行了纠错及校验设计, 在此基础上建立了所提方案的数据传输流程。配备了相关的软硬件, 进一步验证了所提方案的测试效果, 并统计了该方案在上海多条城市轨道交通线路上运行1个月的实际效果。[结果及结论] 与常规UDP(用户数据包协议)传输方式相比, 使用所提方案进行视频单向传输时, 数据传输的速度更为稳定, 延时更低, 可以满足城市轨道交通业务的实时传输需求。该方案中的私有协议设计方案可以有效规避既有通用协议的漏洞, 有效抵御网络攻击, 确保跨密级网络的视频同步传输。

关键词 城市轨道交通; 通信系统; 视频数据传输; 协议单向化

中图分类号 U239.5; U284

DOI:10.16037/j.1007-869x.20245795

One-way Video Transmission Technology for Urban Rail Transit Based on Endpoint Devices

ZHANG Lidong¹, XU Ziheng¹, WANG Kun²

(1. School of Rail Transit, Shanghai Institute of Technology, 201418, Shanghai, China; 2. Shanghai Golden Power Grid Security Technology Co., Ltd., 201203, Shanghai, China)

Abstract [Objective] To meet the integrity, confidentiality and availability requirements for inter-network video transmission of different security levels in urban rail transit system, it is necessary to develop a secure and reliable one-way video transmission scheme that ensures video data flows only from low security networks to high security networks. [Method] A one-way video transmission scheme based on two endpoint devices is proposed. The overall architecture of the scheme is introduced, and a proprietary Ethernet-based protocol is designed.

UPET (unidirectional private exchange tunnel) technology is employed for the design of one-way transmission channels, and FEC (forward error correction) technology is used for error correction and verification design. Based on these, the data transmission process of the proposed scheme is established. Relevant software and hardware are integrated to validate the testing effectiveness of the proposed scheme, and the actual performance of the scheme is evaluated over a one-month operational period on multiple urban rail transit lines in Shanghai. [Result & Conclusion] Compared with conventional UDP (user datagram protocol) transmission methods, the proposed one-way video transmission scheme demonstrates more stable data transfer rates and lower latency, meeting the real-time transmission requirements of urban rail transit services. The proprietary protocol design in the proposed scheme effectively avoids the vulnerabilities associated with general-purpose protocols and enhances resistance to network attacks, thereby ensuring synchronous video transmission across classified networks.

Key words urban rail transit; communication system; video data transmission; one-way protocol

为了应对城市轨道交通系统网络中各子系统间复杂接入带来的潜在威胁, GB/T 22239—2019《信息安全技术网络安全等级保护基本要求》(以下简称“等保2.0”) 对工业控制系统扩展项提出了要求: 工业控制系统与企业其他系统之间应划分为2个区域, 区域间应采用单向隔离技术手段^[1-2]。

城市轨道交通的业务系统庞大而复杂, 高密级网络对于应急响应、调度指挥等功能的实现均需依赖低密级网络的视频监控数据^[3-5], 而低密级网络的视频数据量大, 传输实时性要求高, 现有技术方案均使用网闸进行视频数据摆渡。现有的传输技术存在明显缺陷: 单向网闸传输速度慢、可靠性差且无敏感内容识别; 光盘数据摆渡受存储介质限制, 传输效率低; 码图类数据摆渡时效性不足^[6-7]。而城市轨道交通对数据保密性及业务时效性的要

* 上海市科学技术委员会项目(20511106400)

求非常严苛,因此,有必要创新一种安全、可靠的视频单向传输方案,以确保数据仅从低密级网络向高密级网络单向流动,支撑运营决策并保障列车运行安全。

1 视频单向传输的设计方法

本文提出一种基于 2 台端点设备的视频单向传输方案,每个端点设备均具有接收及发送功能。其处理流程如下:① 端点设备拦截 SIP(会话发起协议)的 INVITE 请求,分析请求中的 SDP(会话描述协议)消息;② 通过解析 SDP 信息,回复接收视频流的 IP(互联网协议)地址,将 SDP 中的消息替换为端系统上实际存在的地址(IP1);③ 监听 SDP 报文中对应的端口,从中读取 RTP(实时传输协议)数据流数据;④ 将数据编码转为单向传输私有数据,并选择正确的单向链路发送数据。

1.1 视频单向传输方案的整体架构

视频单向传输方案的整体架构如图 1 所示。

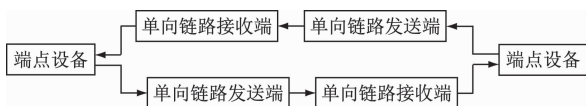


图 1 视频单向传输方案的整体架构示意图

Fig. 1 Diagram of one-way video transmission scheme overall architecture

1.1.1 端点设备

端点设备是一种用于连接城市轨道交通不同密级网络且具有发送数据及接收数据能力的设备,能够对城市轨道交通业务数据进行安全策略分析,确保业务数据的安全封装和解封装。在不同密级网络的两侧,均采用端点设备作为视频交换的前置服务器。端点设备负责与视频平台、流媒体服务器连接,接收来自视频平台的信令请求,将请求封装为私有协议并发送到正向单向链路。此外,端点设备还负责接收来自反向单向链路的数据包,将私有协议还原为 SIP、RTP 等视频平台能处理的协议。端点设备负责选择正确的单向链路发送数据,以确保视频流单向传输。端点设备的功能如图 2 所示。

1.1.2 单向链路发送端

单向链路发送端负责接收端点设备发送过来的数据,并将网络数据转换为光信号,发往单向链路接收端。

1.1.3 单向链路接收端

单向链路接收端负责接收单向光信号,并将光

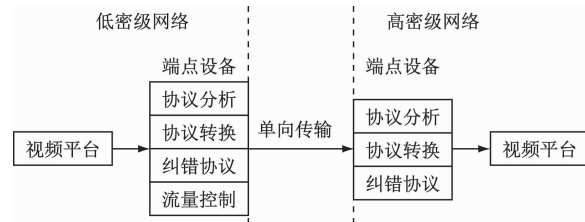


图 2 端点设备功能示意图

Fig. 2 Diagram of endpoint device functionality

信号转换为网络协议,发送到端点设备。

1.2 私有协议设计

为了实现业务系统的低耦合,使业务系统无须为了适配单向传输需求而重新开发或调整,端点设备采用标准视频协议与视频平台^[8],并设计了基于以太网的第三层和第四层私有协议,以与单向收发链路对接。以太网帧的默认 MTU(最大传输单元)为 1 500 字节,所以需要对视频流数据进行分片发送。第三层协议运行在以太网之上,负责数据包的分割和重组。第四层协议负责视频流数据的验证工作。

在第三层协议中,具体的协议内容包括:① “version”表示数据包版本,发送方和接收方的通信必须建立在版本一致基础上;② “type”表示消息类型,用来设置本系统定义的消息类型,以确保某些类型的消息数据只能单向传输;③ “flag”表示标志,用来控制和识别分片;④ “identification”表示标识,标识相同的数据包默认为同一数据包的某一个分片;⑤ “offset”表示分片偏移,用来表示被分片的数据包相对于原始数据包首部的偏移量,接收端凭借标识符和分片偏移对所收到的数据包进行按顺序重组;⑥ “length”表示总长度,即 IP 报文首部和数据的长度之和;⑦ “data”表示数据内容。

在第四层协议中,具体的协议内容包括:① “length”表示总长度,即 IP 报文首部和数据的长度之和;② “checksum”表示校验和,用来识别首部信息及标记数据包顺序的序列号,并负责 FEC(前向纠错)技术的解码及校验,验证数据包在传输过程中的完整性;③ “data”表示数据内容。

端点设备负责对收到的数据流进行落地转换,将其编码为便于在单向传输链路中传输的私有数据流。经过转换后,应用数据流被编码成具有特定格式的数据包,并被发送至另一侧端点设备。

上述协议只适用于本文所提方案中使用的端点设备,以防止视频流在传输过程中遭受攻击。

1.3 单向传输链路设计

本文所提方案采用了 UPET(单向专用交换通道)技术。该技术基于物理单向光传输介质构建可信信道,确保了数据仅能从发送端流向接收端,彻底阻断了反向通信,解决了不同密级网络间视频传输的信息泄漏风险。

UPET 在数据包中绑定了唯一序列号校验丢包与乱序,嵌入了加密 Magic 标记,以拦截非法数据,并基于数据类型分类对数据进行预处理,以提升数据处理效率。针对大流量传输场景,接收端支持数据包落地配置,以缓解网络堵塞,并减少高并发情况下的丢包。此外,UPET 消除了传统 TCP(传输控制协议)/IP 的漏洞,强化了用户认证与访问控制机制,实现了安全性能与传输性能的双重优化,有效满足了城市轨道交通等高保密性业务的传输需求^[9-10]。

UPET 的工作流程如图 3 所示。

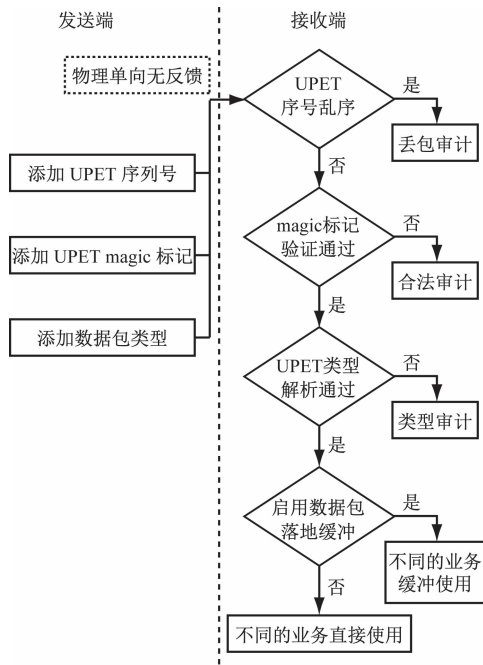


图 3 UPET 工作流程示意图

Fig. 3 UPET work flow chart

1.4 纠错与校验设计

视频数据单向传输虽然可以实现不同网域间的物理隔离要求,但给数据容错、纠错带来较大的挑战^[11]。为了提高视频数据在传输时的稳定性,本文所提方案采用了 FEC 技术,即:发送端对数据包进行编码时添加冗余信息,接收端通过解码算法定位并纠正传输错误,避免数据重传,提高传输效率。此外,本文所提方案还引入了 FC(流量控制)组件,

用以动态调节发送端与接收端的传输速率,确保发送端的传输速率不大于接收端的传输速率,避免信道阻塞,保障数据传输的可靠性^[12-13]。

由于光信道传输具有高突发误码特性,本文所提方案选用了 RS(Reed-Solomon)编码算法。RS 码在伽罗华域中构造,每组编码数 n 包含了 k 个信息元及 $2t$ 个校验元(t 为可纠正误码数),即 $n = k + 2t$ 。RS 码可高效纠正连续误码,其核心原理为:设 x 为多项式的自变量,发送端生成 1 个信息码元多项式 $f(x)$,并对信息码进行编码,进而生成冗余校验包;接收端检测码字是否为 $f(x)$ 的倍式,如不是,则对丢失数据进行定位并纠正错误。RS 码兼具快速编码能力及强纠错性能,适用于高实时性、低延时的城市轨道交通视频传输场景^[14-15]。

$f(x)$ 的计算式一般为:

$$f(x) = \sum_{i=0}^{k-1} (x - a^{K+i}) \quad (1)$$

式中:

K ——偏移量,通常取值为 0 或 1,用于调整生成多项式根的位置;

a ——伽罗华域的本原元;

i ——自然数列。

设 $G(x)$ 为信息码元多项式。在构造 RS 码时,将 $G(x)$ 乘以 x^{n-k} ,然后除以 $f(x)$,可得到余式 $r(x)$,即:

$$x^{n-k}G(x)/f(x) = F(x)f(x) + r(x) \quad (2)$$

式中:

$F(x)$ ——倍数多项式。

取 $r(x)$ 作为校验码元,则编译后的码字多项式 $C(x)$ 的计算式为:

$$C(x) = x^{n-k}G(x) + r(x) \quad (3)$$

RS 译码及纠错只需 3 个步骤:计算矫正因子、确定错误位置及计算错误值。RS 解码主要利用范特蒙特矩阵或柯西矩阵的特性,设 $c_{n-1}, c_{n-2}, \dots, c_0$ 为多项式 $C(x)$ 的系数,若 $C(x)$ 的计算式为:

$$C(x) = c_{n-1}x^{n-1} + c_{n-2}x^{n-2} + \dots + c_0 \quad (4)$$

则信道产生的错误图样多项式 $E(x)$ 的计算式为:

$$E(x) = e_{n-1}x^{n-1} + e_{n-2}x^{n-2} + \dots + e_0 \quad (5)$$

式中:

$e_{n-1}, e_{n-2}, \dots, e_0$ ——多项式 $E(x)$ 的系数。

则译码器收到的信息多项式 $R(x)$ 的计算式为:

$$R(x) = C(x) + E(x) \quad (6)$$

将 $R(x)$ 与检验矩阵 H 的转置矩阵 H^T 相乘, 可得到伴随多项式 $S(x)$, 即:

$$S(x) = R(x)H^T \quad (7)$$

由 $S(x)$ 得到的估计错误图样 $E_{\text{error}}(x)$, 则输出的估计码 $C_{\text{out}}(x)$ 为:

$$C_{\text{out}}(x) = R(x) - E_{\text{error}}(x) \quad (8)$$

若 $C_{\text{out}}(x) = C(x)$, 则表明译码正确。若 $C_{\text{out}}(x) \neq C(x)$, 则表明译码存在错误, 需要进行纠错。纠错通常使用迭代算法, 由伴随矩阵 S 来确定错误值及错误位置。

1.5 数据传输流程

本文所提方案的数据传输流程如图 4 所示。当有视频流数据传输请求发起时, 请求会被系统一侧的端点设备拦截, 端点设备通过 SIP 协议解析, 获取 SIP 消息中的“method”“URL”和“version”等信息^[16-17], 并解析 SIP 请求中的 SDP 消息, 获取接收视频流的 IP 和端口, 判断是否要通过该请求。若该请求被通过, 则将 SDP 中的消息替换为实际存在的 IP1, 并保持监听接收视频流的端口, 从中读取基于 RTP/RTCP(实时传输协议)的视频流数据。端点设备将数据编码为基于私有协议的私有数据, 同时引入 FEC 机制, 将数据包添加一定数量的冗余码, 与原有数据包一起选择正确的单向链路发送至另一侧端点设备。另一侧端点设备接收到数据包后进行 FEC 解码, 解码后的数据包若能正常还原, 则将其发送给对应视频平台^[18-19]。

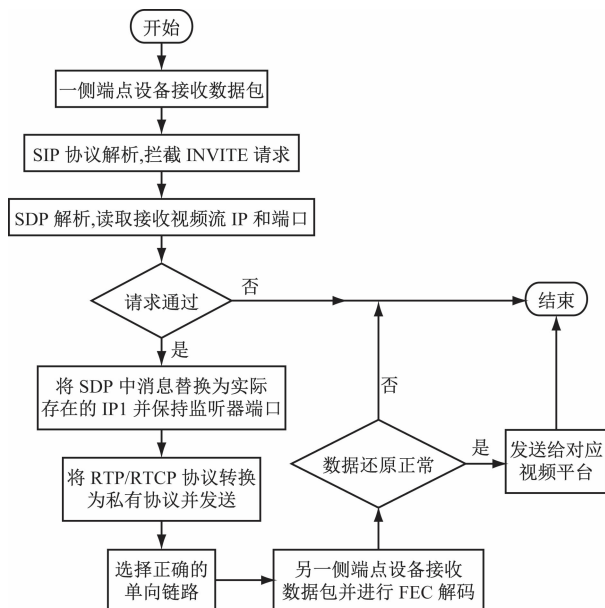


图 4 数据传输流程图

Fig. 4 Data transmission flow chart

2 试验验证

进一步验证本文所提方案的实际效果。试验的软硬件配置如下:

- 1) 操作系统为 CentOS 7; CPU(中央处理器)型号为 Intel I7-7700, 内存为 16 G; 硬盘容量为 1 T。
- 2) 配置了 2 台服务器, 1 台为视频流的发送设备, 另 1 台为视频流的接收设备。

试验时, 发送设备分别以 4 M、8 M 带宽(分 10 路)向一侧端点设备发送视频流数据包, 接收设备则接收由另一侧端点设备发送过来的视频流, 并记录数据的延时及丢包率。将测试数据分别采用常规 UDP(用户数据包协议)、本文方案封装后的私有协议进行传输。以 4 M 带宽传输的测试结果如表 1 所示。以 8 M 带宽传输的测试结果如表 2 所示。

表 1 以 4 M 带宽传输的测试结果

Tab. 1 Testing results of transmission with 4 M bandwidth

传输方式	平均传输速度/ (Mbit/s)	延时/ms	丢包率/%
采用常规 UDP 传输	40	300	1.3
采用本文方案封装后的 私有协议传输	40	20	0

表 2 以 8 M 带宽传输的测试结果

Tab. 2 Testing results of transmission with 8 M bandwidth

传输方式	平均传输速度/ (Mbit/s)	延时/ms	丢包率/%
采用常规 UDP 传输	80	135	2.4
采用本文方案封装后的 私有协议传输	78	7	0

由表 1、表 2 可知: 与常规 UDP 传输相比, 使用本文所提方案进行视频单向传输时, 数据传输的速度更为稳定, 延时更低。引入 FEC 机制后, 本文所提方案有效解决了使用 UDP 协议传输时易丢包的问题, 保障了视频传输的可靠性。

本文所提方案已经在上海轨道交通 5 号线、14 号线、15 号线及 18 号线的 SCADA(电力监控)系统中得以应用。将本方案在上述城市轨道交通线路上使用 1 个月的数据进行统计分析, 结果如下:

- 1) 系统稳定性: 在 200 次的数据传输中, 传输成功率约为 99%。

- 2) 系统安全性: 网络内未发现病毒、恶意代码及木马, 未发生非法数据传输事件。

综合上文的测试结果和上线应用情况, 可以认

为本文提出的视频单向传输方案实现符合预期,满足城市轨道交通系统业务传输的特殊需求,安全防护措施到位,方案具有可行性。

3 结语

本文提出一种基于端点设备的城市轨道交通视频单向传输技术,通过物理单向链路实现了高密级网络与低密级网络间视频流的可靠传输。所提方案融合了 FEC 技术及 RS 编码算法,提高了数据的容错能力。

试验表明:本文所提方案能够显著降低数据传输的延时及丢包率,满足等保 2.0 安全要求,满足城市轨道交通业务的实时传输需求。该方案中的私有协议设计方案可以有效规避既有通用协议的漏洞,结合光信道的物理隔离特性,有效抵御网络攻击,确保跨密级网络的视频同步传输。

参考文献

- [1] 张菁博. 新型城市轨道交通网络间安全单向传输技术[J]. 城市轨道交通研究, 2022, 25(增刊1): 110.
ZHANG Jingbo. Safe one-way transmission technology between new urban rail transit networks[J]. Urban Mass Transit, 2022, 25(S1): 110.
- [2] 许子恒,李王睿,张立东,等. 基于信息备份技术提升城市轨道交通数据单向传输可靠性的设计方法[J]. 城市轨道交通研究, 2024, 27(9): 227.
XU Ziheng, LI Wangrui, ZHANG Lidong, et al. A design method for improving the reliability of urban rail transit one-way data transmission based on information backup technology[J]. Urban Mass Transit, 2024, 27(9): 227.
- [3] 周建宁,吴陈龙,戴欣宇. 公安跨网络数据交换系统设计和实现[J]. 中国公共安全(学术版), 2019(2): 81.
ZHOU Jianning, WU Chenlong, DAI Xinyu. Design and implementation of cross-network data exchange system for public security[J]. China Public Security (Academy Edition), 2019(2): 81.
- [4] 朱珺,关广东. 基于二维码的跨域信息安全交换系统设计[J]. 电子产品可靠性与环境试验, 2021, 39(3): 19.
ZHU Jun, GUAN Guangdong. Design of information security exchange system between different domains based on two-dimensional bar code[J]. Electronic Product Reliability and Environmental Testing, 2021, 39(3): 19.
- [5] 林利祥,刘旭东,刘少腾,等. 前向纠错编码在网络传输协议中的应用综述[J]. 计算机科学, 2022, 49(2): 292.
LIN Lixiang, LIU Xudong, LIU Shaoteng, et al. Survey on the application of forward error correction coding in network transmission protocols[J]. Computer Science, 2022, 49(2): 292.
- [6] 胡绍方,陈闯闯. 基于属性加密的网间数据安全交换技术优化[J]. 网络安全技术与应用, 2021(9): 27.
HU Shaofang, CHEN Chuangchuang. Optimization of data security exchange technology between networks based on attribute encryption[J]. Network Security Technology & Application, 2021(9): 27.
- [7] 陈志军,洪莎莎. 跨网络信息安全交换平台建设方案研究[J]. 数字通信世界, 2021(5): 80.
CHEN Zhijun, HONG Shasha. Research on the construction scheme of cross-network information security exchange platform[J]. Digital Communication World, 2021(5): 80.
- [8] 赵荣康,孔祥瑞,梁蓉蓉. 不同安全等级网络之间的数据交换方案研究与实现[J]. 信息安全研究, 2020, 6(4): 338.
ZHAO Rongkang, KONG Xiangrui, LIANG Rongrong. Research and implementation of data exchange scheme between different security level networks[J]. Journal of Information Security Research, 2020, 6(4): 338.
- [9] 陈涛,黄柳. 云存储在地铁视频监控系统中的应用研究[J]. 机电信息, 2023(22): 36.
CHEN Tao, HUANG Liu. Research on the application of cloud storage in subway video surveillance system[J]. Mechanical and Electrical Information, 2023(22): 36.
- [10] 冬萌. SVAC 标准在地铁视频监控系统中的运用研究[J]. 电脑知识与技术, 2023, 19(17): 112.
DONG Meng. Research on the application of SVAC standard in subway video monitoring system[J]. Computer Knowledge and Technology, 2023, 19(17): 112.
- [11] 王鹏. 地铁视频监控系统云平台承载方案浅析[J]. 城市轨道交通研究, 2022, 25(6): 225.
WANG Peng. Analysis on cloud platform carrying scheme of metro CCTV system[J]. Urban Mass Transit, 2022, 25(6): 225.
- [12] 杜琦骏. 上海轨道交通音视频统一信息服务系统与信号系统的接口内容优化[J]. 城市轨道交通研究, 2024, 27(11): 133.
DU Qijun. Optimization of interface content between Shanghai rail transit audio video unified information service system and signaling system[J]. Urban Mass Transit, 2024, 27(11): 133.
- [13] 张万康. 基于软件定义网络技术与网络功能虚拟化技术的城市轨道交通视频监控系统新型网络架构[J]. 城市轨道交通研究, 2024, 27(11): 141.
ZHANG Wankang. New network architecture for urban rail transit video surveillance system based on SDN and NFV technologies[J]. Urban Mass Transit, 2024, 27(11): 141.
- [14] 张春杰. 基于高清技术的地铁视频监控系统的應用[J]. 电子技术与软件工程, 2019(23): 127.
ZHANG Chunjie. Application of metro video monitoring system based on HD technology[J]. Electronic Technology & Software Engineering, 2019(23): 127.
- [15] 赵彦芳. 地铁视频监控系统可靠性研究[J]. 工程建设与设计, 2019(18): 250.

- ZHAO Yanfang. Research on the reliability of metro video surveillance system[J]. Construction & Design for Engineering, 2019(18): 250.
- [16] 李三江. 地铁视频监控系统互联互通研究与实践[J]. 机电信息, 2017(18): 51.
- LI Sanjiang. Research and practice on interconnection of subway video surveillance system[J]. Mechanical and Electrical Information, 2017(18): 51.
- [17] 陈礼云. 地铁视频监控系统高清摄像机接入方案[J]. 中国新技术新产品, 2015(4): 17.
- CHEN Liyun. Access scheme of high-definition camera in subway video monitoring system[J]. New Technology & New Products of China, 2015(4): 17.
- [18] 周峰. 对科学运营地铁视频监控的思考[J]. 信息通信, 2013, 26(2): 276.
- ZHOU Feng. Thoughts on scientific operation of subway video surveillance[J]. Information & Communications, 2013, 26(2): 276.
- [19] 付强. 地铁视频监控系统存储架构研究[J]. 中国新技术新产品, 2013(3): 43.
- FU Qiang. Research on storage architecture of subway video surveillance system[J]. China New Technologies and Products, 2013(3): 43.
- [20] 黄向军, 王君. 视频流报文优化的实时视频传输带宽探测方法[J]. 广播电视网络, 2023, 30(9): 108.
- HUANG Xiangjun, WANG Jun. Real-time video transmission bandwidth detection method for video stream message optimization[J]. Radio & Television Network, 2023, 30(9): 108.
- [21] 孙磊, 徐剑荣, 柳士伟, 等. 基于光电视频鸟类区域帧级码率控制优化算法研究[J]. 软件, 2023, 44(9): 49.
- SUN Lei, XU Jianrong, LIU Shiwei, et al. Research on frame-level code rate control optimization algorithm in bird area with frequent photoelectric illumination[J]. Software, 2023, 44(9): 49.
- [22] 朱志强, 徐朝农, 朱东辉. 多基站无线非正交多址接入的平滑视频流传输算法[J]. 计算机工程, 2024, 50(5): 313.
- ZHU Zhiqiang, XU Chaonong, ZHU Donghui. Smooth video stream transmission algorithm for multi-basis wireless non-orthogonal multiple access[J]. Computer Engineering, 2024, 50(5): 313.
- [23] 孙晋, 柏松. 基于 IGMP 的视频传输模型[J]. 中国传媒科技, 2023(8): 146.
- SUN Jin, BAI Song. Video transmission model based on IGMP[J]. Media Science and Technology of China, 2023(8): 146.
- [24] 毛锦鑫, 何坤金, 陈金旺, 等. 基于 GA-BP 的实时视频通信自适应前向纠错码[J]. 计算机应用研究, 2023, 40(12): 3760.
- MAO Jinxin, HE Kunjin, CHEN Jinwang, et al. Research on adaptive forward error correction codes for real time video communication based on GA-BP[J]. Application Research of Computers, 2023, 40(12): 3760.
- [25] 夏宁, 连锦波, 何桃桃, 等. PowerPC + FPGA 视频传输设备设计方法[J]. 无线互联科技, 2023, 20(12): 87.
- XIA Ning, LIAN Jinbo, HE Taotao, et al. PowerPC + FPGA video transmission equipment design method[J]. Wireless Internet Technology, 2023, 20(12): 87.
- [26] 孙金凯, 王安红, 李素月. 基于自适应 STBC 的多天线 HDA 视频传输方案[J]. 太原科技大学学报, 2023, 44(3): 193.
- SUN Jinkai, WANG Anhong, LI Suyue. Adaptive STBC scheme for hybrid digital analog video transmission with multiple antennas[J]. Journal of Taiyuan University of Science and Technology, 2023, 44(3): 193.
- [27] 陈乃海. 基于边缘云的在线监测系统模型构建与实现[J]. 粘接, 2023, 50(4): 173.
- CHEN Naihai. Establishment and implementation of online monitoring system model based on edge cloud[J]. Adhesion, 2023, 50(4): 173.
- [28] 张帆. 基于全 IP 的新型列控系统数据传输实时性研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2021.
- ZHANG Fan. Research on real-time data transmission of new train control system based on all IP[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2021.
- [29] 姜彬. 增强型 MSTP 在城市轨道交通通信系统中的应用[J]. 电气化铁道, 2017, 28(5): 75.
- JIANG Bin. Application of enhanced MSTP in communication system of urban mass transit[J]. Electric Railway, 2017, 28(5): 75.
- [30] 田洪. 电力线载波通信在铁路数据传输通信中的应用[J]. 科技情报开发与经济, 2011(11): 132.
- TIAN Hong. The application of power line carrier communication in railway data transmission communication[J]. Sci-Tech Information Development & Economy, 2011(11): 132.
- [31] 董玉圻. LTE-R 关键技术研究及应用分析[J]. 中国设备工程, 2021(20): 173.
- DONG (Yu)(QiYin). Research and application analysis on key technologies of LTE-R[J]. China Plant Engineering, 2021(20): 173.
- [32] 李潇. 高速运行环境下 GPRS 数据传输可靠性研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2017.
- LI Xiao. Research on reliability of GPRS data transmission in high-speed operation environment[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2017.
- 收稿日期:2024-08-17 修回日期:2024-12-18 出版日期:2025-07-10
Received:2024-08-17 Revised:2024-12-18 Published:2025-07-10
• 通信作者:张立东,正高级工程师,820498977@qq.com
• ©《城市轨道交通研究》杂志社,开放获取 CC BY-NC-ND 协议
© Urban Mass Transit Magazine Press. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license