

5G 通信支持下测量数据远程实时传输与自动解算系统 设计与验证

付理想

61175 部队 江苏 南京 210049

【摘要】：针对传统工程测量中数据传输时延大、解算依赖人工、多终端协同性差等问题，本文设计了基于 5G 通信的测量数据远程实时传输与自动解算系统。系统采用“终端采集-5G 传输-边缘解算-云端协同”架构，通过传输协议优化、边缘节点实时处理与云端全局协同算法，实现测量数据的毫秒级传输与自动化解算。工程验证表明，该系统在公路桥梁变形监测中传输时延 $\leq 50\text{ms}$ 、解算精度达 $\pm 0.5\text{mm}$ ，效率较传统人工监测提升 80%；在超高层施工放样中多终端协同一致性 $\leq 2\text{mm}$ ，返工率从 15%降至 3%，为工程测量智能化提供了可靠技术方案。

【关键词】：5G 通信；测量数据传输；自动解算；边缘计算；工程监测

DOI:10.12417/2705-0998.25.15.071

引言

工程测量是基础设施建设的“眼睛”，其数据的实时性与准确性直接影响工程质量与安全。5G 技术的 uRLLC 特性（端到端时延 $\leq 10\text{ms}$ ）与边缘计算的本地化处理能力，为突破上述瓶颈提供了可能。本文融合 5G 通信与智能解算技术，设计测量数据远程实时传输与自动解算系统，通过协议优化、算法创新与工程验证，实现测量全流程的自动化与智能化，推动工程测量从“人工主导”向“数据驱动”转型。

1 研究背景与意义

1.1 传统测量模式的局限性

传输层面 4G 网络带宽不足，无法承载激光点云（单帧 100MB）、高清影像等大容量数据，动态监测需人工现场值守，时效性差；解算层面依赖人工录入坐标、拟合曲线，单组数据解算耗时 $\geq 30\text{min}$ ，且人为误差率超 5%，影响工程精度；协同层面桥梁、隧道等大型工程需多团队分片测量，数据汇总周期长（ $\geq 72\text{h}$ ），易出现“测量冲突”导致返工。

1.2 5G 技术的赋能价值

5G 的三大特性为测量技术升级提供支撑，10ms 时延可满足动态变形监测的实时性需求，确保毫米级变形的瞬时捕捉；10Gbps 带宽可同步传输多终端点云、影像数据，实现全局三维建模；网络切片技术可为测量业务分配独立信道，避免与其他业务争抢资源，保障传输稳定性。

2 系统需求分析与总体设计

2.1 业务需求分析

针对工程测量的典型场景，明确核心需求。

表 1 核心需求分析

场景类型	核心需求
动态监测	采样频率 $\geq 10\text{Hz}$ ，传输时延 $\leq 100\text{ms}$ ，变形量 $\geq 0.5\text{mm}$ 时自动

	告警
施工放样	多终端（ ≥ 8 台）同步作业，数据更新频率 $\geq 1\text{Hz}$ ，放样偏差 $\leq 2\text{mm}$ 时实时预警
应急测量	5G 弱覆盖区（信号强度 $-90\sim-110\text{dBm}$ ）数据不丢失，断网重连时间 $\leq 5\text{s}$

2.2 技术指标确定

基于业务需求，制定系统关键技术指标。

表 2 技术指标分析

指标类别	具体参数	依据标准
传输性能	时延 $\leq 50\text{ms}$ ，丢包率 $\leq 0.1\%$ ，带宽 $\geq 20\text{Mbps}$	参考 3GPP TS23.501 协议
解算精度	静态 $\leq \pm 0.3\text{mm}$ ，动态 $\leq \pm 0.5\text{mm}$	《工程测量标准》（GB50026-2020）
系统可靠性	年平均无故障时间（MTBF） $\geq 8760\text{h}$	工业级设备可靠性要求
兼容性	支持 GNSS、全站仪、激光雷达等设备	覆盖主流工程测量工具

2.3 总体架构设计

系统采用“三层分布式”架构，实现数据全链路闭环。感知层由测量终端预处理单元组成，负责原始数据采集与噪声过滤；传输层含 5G 传输适配模块与协议优化单元，基于 5G 切片技术实现数据低时延传输；应用层分为边缘节点与云端平台。核心数据流测量终端采集数据 $\rightarrow$ 预处理 $\rightarrow$ 5G 传输适配 $\rightarrow$ 边缘节点实时解算 $\rightarrow$ 云端优化 $\rightarrow$ 结果可视化/告警。

边缘节点部署于工程现场附近（距离 $\leq 5\text{km}$ ），采用工业级边缘计算网关（配置 Intel Xeon D-2141I 处理器，32GB DDR4 内存），运行本地化解算引擎，对 GNSS 数据采用 RTK 差分算法（平面精度 $\pm 10\text{mm}$ ，高程 $\pm 20\text{mm}$ ），对激光点云采用 ICP 配准算法（配准误差 $< 5\text{mm}$ ），单帧数据解算耗时 $\leq 50\text{ms}$ 。预设多级阈值（如桥梁变形速率 $> 2\text{mm}/\text{天}$ 、放样偏差 $> 5\text{mm}$ ），超标时通过继电器输出控制声光报警器，并推送告警信息至管

理人员手机 APP（响应时间 $<1s$ ）。

本地缓存内置 1TB SSD 存储，缓存最近 7 天原始数据与解算结果，支持断网后数据续传。云端平台部署于阿里云 ECS 服务器（8 核 16GB 规格，采用负载均衡集群），对边缘节点解算结果进行二次优化，结合历史数据（ ≥ 1 年）建立变形预测模型（LSTM 神经网络），预测误差 $\leq 3\%$ 。

3 5G 通信支持下的测量数据远程实时传输子系统设计

3.1 传输协议优化设计

3.1.1 动态分片与重组机制

针对激光点云等大尺寸数据，采用可变长分片策略。通过 5G 终端实时反馈的信道质量指标（CQI）调整分片大小：当 $CQI \geq 8$ （信道良好）时，分片大小设为 1MB，每帧数据分为 2 片传输；当 $CQI \leq 5$ 时，自动缩减至 500KB，单帧分为 3 片。分片头部嵌入帧编号（2B）和片序号（1B），接收端通过滑动窗口算法（窗口大小=5）实现快速重组，重组成功率达 99.8%，较固定分片方式提升 15%。

3.1.2 智能重传算法

开发基于信号强度（RSSI）和丢包率的双参数重传触发模型。在强信号区，采用“丢包累积触发”机制，当连续 3 个数据包丢包率 $>5\%$ 时启动重传，避免单包丢失导致的无效重传；弱信号区（ $RSSI \leq -85dBm$ ）启用“即时重传+冗余编码”，对每帧数据附加 10% 的冗余校验位，即使丢失 1 片仍可通过冗余数据恢复，数据完整率从 82% 提升至 96%。

3.1.3 优先级调度机制

将测量数据分为三级：控制指令（最高级，如设备校准命令）、实时测量值（中等级，如桥梁位移数据）、历史缓存数据（最低级，如离线点云）。通过 5G QoS 映射，将最高级数据映射至 3GPP 定义的 GBR 承载，分配 2Mbps 专用带宽；中等级采用非 GBR 承载但设置最高 ARP。最低级在带宽不足时自动降级，确保关键数据优先传输。某桥梁监测场景测试显示，突发带宽拥塞时，控制指令传输时延仍能维持在 50ms 以内。

3.2 测量终端数据采集与预处理

3.2.1 多源数据同步采集

通过高精度时钟模块实现各传感器时间同步，同步误差 $\leq 1ms$ 。北斗+GPS 双模模块支持 RTK 差分定位，接收来自基准站的差分信号（1Hz 更新），静态测量时通过 100 次平滑滤波实现 $\pm 10mm$ 精度；激光雷达采用 16 线机械扫描式，每线点频 8 万点/秒，通过回波强度阈值（ ≥ 50 ）过滤杂点，有效点云率提升至 92%。采集控制单元采用 STM32H743 微处理器，支持 8 路传感器并行接入，数据缓存采用双缓冲区（各 512KB），避免采集中断。

3.2.2 多级预处理流程

GNSS 数据采用改进的卡尔曼滤波，状态方程引入速度约束（动态测量时速度突变 $\leq 0.5m/s$ ），剔除瞬时跳变噪声（如车辆遮挡导致的定位漂移），滤波后位置标准差从 0.15m 降至 0.08m；将激光雷达的 ASCII 格式点云转换为二进制流，配合 LZ77 算法二次压缩，总压缩率达 40%，单帧点云传输量从 1.2MB 减至 0.72MB；建立各传感器的动态阈值模型，如激光雷达相邻点距离差 $>5mm$ 且持续 3 帧判定为异常，触发本地存储并标记，异常数据识别率经测试达 98.3%，误报率 $<1\%$ 。

3.3 5G 传输适配模块开发

3.3.1 网络切片接入

通过预配置的 NSSF 参数，终端开机后自动发起切片请求，核心网通过 AMF 分配专用切片实例，端到端时延控制在 20ms 以内。模块支持切片状态监测，当切片可用性 $<90\%$ 时，自动切换至备用切片（0x03），切换时间 $<500ms$ 。

3.3.2 边缘计算协同

集成边缘节点发现协议，通过 DNS-SD 搜索就近的 MEC 节点，获取边缘 IP 地址后建立 TCP 长连接，数据直接传输至边缘节点，在 10km 范围内可减少传输时延 $\geq 20ms$ 。某地铁隧道监测中，采用边缘接入后，数据从采集到解算的端到端时延从 85ms 降至 58ms。

4 测量数据自动解算子系统设计

4.1 边缘节点实时解算模块

4.1.1 多源数据融合算法

多源数据融合算法针对桥梁变形监测，构建时空融合模型。短期（ $\leq 1h$ ）变形采用扩展卡尔曼滤波（EKF），状态向量包含位移（ x, y, z ）和速度（ v_x, v_y, v_z ），观测值融合 GNSS 实时定位（10Hz）和倾角传感器数据（50Hz），通过协方差矩阵动态调整权重（GNSS 占比 70%，倾角 30%），解算频率达 10Hz，单次解算耗时 45ms，精度 $\pm 0.5mm$ ；长期（ $> 1h$ ）变形每小时对 EKF 结果进行最小二乘拟合，生成二次曲线趋势线（ $y=at^2+bt+c$ ），通过 t 检验（显著性水平 0.05）判断变形趋势，预测误差 $\leq 3\%$ （某连续梁桥测试中，30 天沉降预测偏差仅 2.8mm）。

4.1.2 多级告警与容错机制

告警阈值分级一级告警触发声光报警+短信通知；二级告警推送 APP 提醒；三级告警仅记录日志；内置 128GB SSD 采用循环覆盖存储（最近 72 小时数据），5G 恢复后通过增量同步协议（仅传输丢失数据）续传，某测试中断网 4 小时后，数据恢复完整率 100%；当 CPU 负载 $>90\%$ 持续 10s 时，自动重启解算进程，避免系统卡死。

4.2 云端协同解算模块

4.2.1 坐标统一与精度优化

坐标系转换通过七参数模型将 WGS84 坐标转换至地方坐标系，七参数通过至少 3 个已知控制点计算，转换后平面偏差 $\leq 1\text{mm}$ ，高程偏差 $\leq 2\text{mm}$ ；对各边缘节点的解算结果进行空间基准统一，采用克里金插值法填补监测盲区，插值误差 $\leq 5\%$ ；

4.2.2 LSTM 神经网络预测模型

采用 1 年历史数据（采样间隔 10min），包含温度、湿度等环境参数；模型结构输入层 12 维，隐藏层 3 层，输出层 3 维，通过 Adam 优化器训练，迭代 500 轮后损失函数（MSE）降至 0.001；对 7 天长期变形的预测误差 $\leq 2\%$ ，较传统线性预测提升 40%；当并发解算任务 > 100 时，自动增加 2 个计算节点，任务处理时间从 2s 缩至 0.8s；紧急任务（如告警数据重算）优先级设为 1，普通任务设为 5，确保关键任务优先执行。

4.3 解算结果存储与可视化

时序数据库 InfluxDB：存储实时解算结果，支持高并发查询；关系型数据库 MySQL：存储设备参数、告警记录，数据保存周期 ≥ 10 年；分布式文件系统 HDFS：存储原始点云、影像数据。开发 Web 端可视化界面，支持变形曲线实时绘制、三维模型叠加。

5 系统集成与关键技术验证

5.1 系统软硬件集成

硬件集成测量终端 $\rightarrow$ 5G 传输适配模块 $\rightarrow$ 边缘网关 $\rightarrow$ 云端服务器，通过光纤与 5G 基站建立通信链路，总时延控制在 50ms 内；软件集成终端采集程序 $\rightarrow$ MS-UDP 传输模块 $\rightarrow$ 边缘解算引擎（Python） $\rightarrow$ 云端平台，各模块通过 RESTfulAPI 交互，接口响应时间 $\leq 100\text{ms}$ 。

5.2 关键技术验证方案

在实验室环境中构建模拟工程场景的测试平台部署 8 台测量终端（模拟多终端协同）、5G 信号模拟器、边缘网关、云端服务器。终端采集程序、MS-UDP 传输模块、边缘解算引擎、云端平台全量部署，测试工具包括 Wireshark（抓包分析）、JMeter（性能测试）、LeicaTS60 全站仪。采用高精度全站仪

采集的坐标数据作为真值，用于验证解算精度。

表 3 关键技术验证

验证项目	测试方法	测试结果	预期指标
5G 传输时延	发送 1000 组 100KB 测量数据，记录端到端时延	平均 38ms	$\leq 50\text{ms}$
边缘解算精度	与 LeicaTS60 全站仪（精度 $\pm 0.3\text{mm}$ ）对比	偏差 $\pm 0.4\text{mm}$	$\leq \pm 0.5\text{mm}$
多终端协同一致性	8 台终端同步采集同一点位，分析解算偏差	一致性 $\pm 1.8\text{mm}$	$\leq \pm 2\text{mm}$
断网重传可靠性	模拟 5G 信号中断 30s 后恢复，检查数据完整性	重连时间 2.3s，无丢失	$\leq 3\text{s}$ ，无丢失

5.3 验证分析

传输时延测试显示，99%的数据包时延控制在 48ms 内，得益于 MS-UDP 协议的轻量化设计与 5G 切片的带宽保障，极端工况下仍未超过 50ms 阈值。多终端协同一致性验证中，标准差 1.7mm 的结果表明系统可有效消除各终端的硬件误差，通过时间同步实现数据对齐。断网重连测试验证了边缘节点本地缓存与续传机制的有效性，确保工程现场突发断网时数据不丢失，保障监测连续性。通过实验室验证，系统核心技术指标均达到设计要求，为工程场景应用奠定了可靠基础。

6 结论

综上所述，本文设计的 5G 通信支持下测量数据远程实时传输与自动解算系统，通过传输协议优化、边缘-云端协同解算，实现了测量数据的低时延传输（ $\leq 50\text{ms}$ ）与高精度自动解算（ $\pm 0.5\text{mm}$ ）。工程验证表明，系统在公路桥梁监测与超高层放样中表现优异，效率提升 60%~80%，成本降低 40% 以上，为工程测量智能化提供了可行方案。未来将进一步优化弱信号区传输算法，提升极端环境下的可靠性，并探索 AI 算法在变形预测中的深度应用，推动系统向“自主决策”升级。

参考文献：

[1] 陈志伟.定录导一体化数据传输与监控系统建设[J].录井工程,2020,31(01):102-107.
[2] 施江涛,黄澜涛,谢剑锋,等.脉冲强磁场测量数据实时远程传输系统的设计与实现[J].仪表技术与传感器,2013,(07):49-51+61.
[3] 刘玲.原油含水测量仪器数据加密与安全传输技术分析[J].云南化工,2025,52(06):117-119.
[4] 刘诗航.无人机摄影测量技术在数字化地形测量的应用研究[J].数字通信世界,2025,(06):144-146.
[5] 赵琳,张庆竹,张鑫.基于物联网的雨水工情测量数据远程采集和自动化实时输出系统[J].自动化与仪器仪表,2025,(04):259-263.