 DOI: https://doi.org/10.12349/iser.v7i6.10798

Design and Performance Testing of a 5G-Based IoT Communication Module

Yanan Chen

Yanbian University, Yanbian, Jilin, 133002, China

Abstract

Addressing current challenges in IoT communication module protocols—including poor protocol compatibility, low hardware integration, security vulnerabilities, and power consumption imbalances—we developed 5G IoT communication modules with industrial access capabilities. The hardware and software designs establish an end-edge-cloud communication architecture, enabling comprehensive testing of transmission rates, latency performance, concurrent access support, and interference resistance with power efficiency. Test results demonstrate the module's stable transmission performance, seamless access compatibility, and strong environmental adaptability, positioning it as a standardized communication solution for industrial IoT and smart city applications.

Keywords

5G IoT; communication module; hardware architecture; protocol stack; performance testing

基于 5G 的物联网通信模块设计与性能测试

陈亚楠

延边大学，中国 · 吉林 延边 133002

摘　要

针对目前物联网通信模块协议适配差、硬件集成度低、安全薄弱、功耗失衡等问题，以工业接入为目标，开展5G物联网通信模块硬件和软件设计，建立端-边-云通信链路，完成速率时延、并发接入、抗扰功耗测试。经过测试可知模块传输稳定、接入兼容、环境适应性强，可以作为工业物联网和智慧城市的标准通信支撑。

关键词

5G物联网；通信模块；硬件架构；协议栈；性能测试

1 引言

物联网大规模部署对于通信提出了高速、低时延、高并发的要求，传统的 4G 和窄带方案不能满足高清回传、工业控制、多传感器采集的需求。5G 是通信升级的核心，通信模块的性能决定系统运行效率。目前商用模块接口单一、协议不兼容、轻量化安全缺失、功耗和性能失衡，专用化设计有缺口。因此进行全流程的设计，用技术手段来解决适配、稳定、安全的问题，给同类的研发提供一种方法。

2 5G 物联网通信模块硬件架构设计

2.1 主控芯片选型核心电路优化

主控芯片是通信模块的运算核心，主控芯片的处理能力、接口兼容性、功耗水平等都会影响到整个模块的性能。根据物联网多协议接入和高速数据转发的要求，芯片选型要兼顾多核运算能力、外设接口丰富度和低功耗特性，首先选择支持嵌入式 Linux 系统的高通 IPQ8072A 芯片，该芯片具有四核 64 位结构，双频 WiFi 协同处理，内置的硬件加速单元可以提高数据包的转发速度，整个硬件架构如图 1 所示。

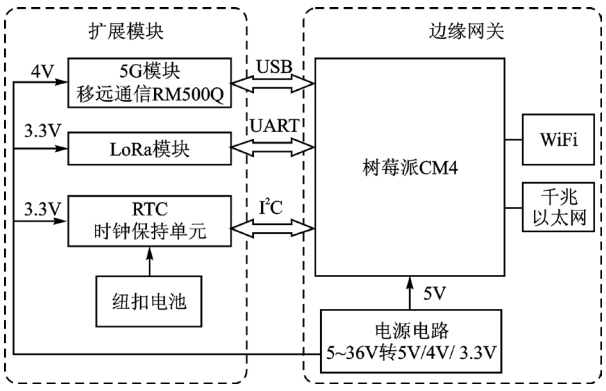


图 1 边缘网关硬件结构示意图

核心电路优化主要是针对信号的完整性以及运行的稳定性展开的，用“主控 + 外设”分隔的方式把电源电路、

【作者简介】陈亚楠（2005–），女，满族，中国吉林吉林人，本科，从事通讯工程研究。

时钟电路、通信接口电路分开，从而降低信号串扰。数据接口电路包含 RJ45 网口、RS485 串口、USB 接口和通用 IO 口，可以连接各种类型的传感器、采集器、工业控制器等终端设备，接口端串联阻抗匹配电阻来减小高速信号的反射损耗。最小系统电路的电源滤波布局就是把芯片的电源引脚就近处设上去耦电容来消除电源纹波干扰。复位电路采用低电平复位方式，加上延时电容使模块上电稳定启动，防止由于瞬时电压波动而造成模块异常重启的现象发生 [1]。经过阻抗匹配、时序优化之后，模块就可以在工况下的各种温度范围内可靠地工作了。

2.2 射频单元集成多制式天线设计

射频单元是实现 5G 信号收发、调制解调的主体，也是保证传输速率和覆盖范围的关键器件。模块集成 Sub-6GHz 频段的 5G 射频模块，支持 SA 和 NSA 两种组网方式，可以向下兼容 4G、3G 通信方式，射频电路使用差分信号传输的方式，减少单端传输造成噪声的影响。射频前端包含功率放大器、低噪声放大器、射频开关等组成，功率放大器用来加强信号发射的功率从而达到远距离传输的效果。接收链路使用低噪声放大器来提高弱信号的接收灵敏度，增大边缘覆盖范围。

多制式天线的设计按照 MIMO 架构标准，采用 4 天线分集接收的方式，主集中包含主集天线和分集天线，主集中用作信号的发射端，分集中用作信号的备份接收端，提高信号抵抗衰落的能力。天线工作在天线频段内，可以同时完成 2.4G 和 5G 两种 WiFi 通讯，采用的是内部的微带天线与外部接口相结合的方式，大大缩小了模块体积，适合嵌入式的安装环境。外置天线接口可以和高增益天线相连接，在遮挡严重的地方也能达到远距离通信的效果。射频单元和天线之间用 50Ω 阻抗馈线相连，全程阻抗匹配减小了信号的回波损耗，射频链路损耗小于 1.2dB。

2.3 电源防护构建时钟备份实现

电源防护为工业复杂的电磁环境下，建立了一种四级电磁兼容防护体系，对浪涌保护、静电防护、过流保护和过压保护进行防护。电源输入级装设压敏电阻和陶瓷放电管，瞬时过电压产生时，压敏电阻的阻抗迅速减小，把浪涌电压限制在安全范围内，防止后级电路被击穿。在输入回路中串联自恢复保险丝，当发生过流时，自恢复保险丝会自动切断回路，在故障消除之后再恢复导通 [2]。经过 EMC 优化后的电源电路可以做静电放电抗扰度、电快速瞬变脉冲群抗扰度测试，满足工业级设备的电磁兼容要求。

时钟备份设计可以防止由于一个时钟源失效造成的系统停运，主时钟使用了 96MHz 无源晶振，通过倍频处理给 WiFi 单元和处理器提供时钟信号。新增加 50MHz 外部晶振做为备用时钟源，形成双时钟冗余结构。时钟切换用寄存器来配置，WiFi 功能开启时加载 96MHz 主时钟的配置参数，WiFi 功能关闭时自动切换到 50MHz 备用时钟，不需要改变硬件电路就可以适应不同的工作模式。时钟备份可以消除时钟单元单点故障的风险，保证模块在没有 WiFi 的应用场景下也能稳定地工作。

3 5G 物联网通信模块软件协议栈开发

3.1 轻量协议适配传输报文优化

轻量协议适配依据物联网终端资源匮乏的特点，达成多种类型物联网协议的轻量化移植和兼容适配，主要包含 MQTT、CoAP、Modbus RTU/TCP 这三种主要协议。MQTT 协议用发布 / 订阅模式来改进，缩减握手步骤和报文头部长度，削减终端的功耗和网络负载，适合低功耗传感器周期性上报情况。CoAP 协议使用 UDP 传输方式来改进，可以实现短报文快速交互，适合于对资源有限的终端进行实时控制。Modbus 协议把串口和网口的协议互相转换起来，使工业采集设备同 5G 网络相衔接无间断。

传输报文优化使用语义抽取和冗余消除技术，应用层只上传对决策有实际意义的数据，去掉重复采集、无效填充的信息，减小上行数据流量。传输层优化重传机制使用短 ACK 应答模式来减少交互报文的数量，根据信道质量动态调节重传次数，信道质量好时减小重传频率，信道质量差时增大重传保证可靠性。

3.2 端边云协同数据调度管控

端边云协同形成了一个三级数据调度系统，终端层做数据采集和初步的数据预处理，边缘层用模块来汇集数据、转储协议并立即作出决定，把结果传送到云端存储并实施控制，云层担任着数据保存、可视化和远控管理的任务，完整的调度架构如图 2 所示。

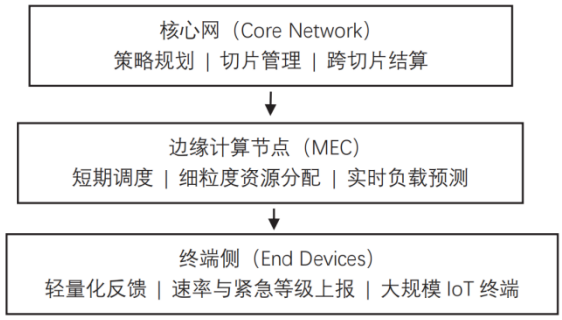


图 2 端 – 边 – 云三级切片协同结构简化示意

模块内置边缘计算单元，可以对采集到的数据进行本地解析、异常判断和阈值告警，在没有上传到云端的情况下就可以执行本地的控制指令下发。数据调度管控采用动态的资源分配策略，按照业务类型划分传输优先级，工业控制指令、紧急告警信息设置成高优先级，保证低时延传输。周期性监测数据设为普通优先级，使用批量传输的方式提高资源利用率。模块对网络负载和信道质量进行实时监测，网络拥塞时将非关键数据分给其他网络设备来处理，空闲时段将被延迟的数据补传回来，从而达到数据传输均衡的目的。协同

调度机制保证了多个业务并行传输的时候不会相互影响，关键业务的时延控制在毫秒级。

3.3 加密认证部署安全接入管控

加密认证部署使用轻量级分层认证方式，安全可靠，又不会因为太复杂而造成计算负担过重。模块上承载云侧授信根证书，创建起云边安全通信通道，运用对称加密算法来达成数据传送的加密工作，密钥可以定时实行自动更新，以此来防止出现数据被偷听或篡改的情形发生。

安全接入管控执行设备身份唯一认证手段，给每一台接入的终端赋予唯一的身份标识，在接入时展开身份合法性审核工作，非法设备直接被拒之门外，创建终端准入黑名单体系。认证流程采取分段方式，初始接入完成身份绑定之后再开始运行，运行阶段使用轻量重认证的方式，降低频繁认证造成的资源耗费。模块自带入侵检测单元，实时监控异常数据流量以及非法访问活动，察觉到有攻击迹象的时候就会立即断开可疑的链接，从而保证模块同接入终端之间的通信安全性。

4 5G 物联网通信模块性能测试与验证

4.1 速率时延测试基准性能验证

速率时延测试采用专业的网络测速平台进行，选取空旷、无遮挡的标准测试环境，对空旷无遮挡标准测试环境中空旷无遮挡标准测试环境测试模块上下行速率和 ping 时延指标，测试结果见表 1。

表 1 5G 模块与 4G 终端通信性能对比

性能指标	本设计 5G 模块	传统 4G 边缘终端
下行速率 (Mbps)	876.7	43.5
上行速率 (Mbps)	93.3	7.8
端到端时延 (ms)	19.6	35.7
速率波动幅度 (%)	2.8	8.5
时延抖动 (ms)	1.7	5.2

基准性能检验 72 小时，观测速率漂移和时间延迟稳定状况，得出模块处在不间断运作情形之下，速率变动范围处于 3% 以下，时间延迟的波动时间维持在 2ms 之内，没有出现断线或者速率突然下跌的情况，符合高清视频回传以及大量数据并行上传这样的高速场景。

4.2 并发接入测试稳定性能验证

并发接入测试模拟高密度终端接入的场景，逐步增大接入终端的数量，测试模块的容量以及运行稳定情况 [4]。测试使用温湿度传感器、电能采集模块、工业控制器等各类物联网终端，终端通过 RS485、WiFi、以太网等方式连接到模块上，不同的负载条件下性能指标如表 2 所示。

表 2 不同负载下模块并发接入性能指标

并发终端数量 (台)	数据传输丢包率 (%)	关键业务平均时延 (ms)	模块 CPU 占用率 (%)
50	0.3	19.8	22
100	0.8	20.5	38
150	1.2	21.3	57
200	1.9	23.7	71

稳定性能测试加入拒接服务、中间人攻击等模拟测试，模块依靠安全认证机制可以很好地阻止非法接入和数据篡改行为，合法终端的通信不会受到影响。并发接入测试结果表明模块可以承载起大的流量终端数目的接入，它的接入成功率以及数据传输的可靠性均合乎对物联网大规模运行的需求。

4.3 抗扰功耗测试环境适应验证

抗扰测试是在电磁干扰环境中进行的，模拟工业现场变频器、电机等设备产生的电磁干扰，模块数据传输稳定，误码率没有明显上升，电源防护和电磁兼容设计起到很好的作用。高低温环境下模块能稳定启动并且正常使用工作，射频性能、数据传输基本不受影响，在野外或者工业环境里也可以正常使用。

功耗测试包含待机电流、数据接收、数据发送三种模式，在待机电流低电耗状态下，数据发送时机电流按照传输速率自动变化，不会出现异常高耗。低功耗设计加上时钟备份和智能调度机制，模块在电池供电的时候可以延长自身的续航时间，适应野外监测、偏远点位采集这些无外接电源的应用场合。

5 结论

本次设计的 5G 物联网通信模块采用硬件结构改良和轻量化协议栈创建的方式，达到高速率、低时延、高安全性和广泛适用性的目的。硬件可以在工业环境里达到稳定运行的标准，软件也可以兼容各种协议并可以协同进行端、边、云的数据处理与控制。经由速率时延、并发接入、抗扰功耗这三项测试来证实，模块的性能指标符合工业级标准，可以支持各种终端设备接入并且可以承受复杂的电磁、温湿度环境的影响，可以给工业物联网和智慧监测场景赋予可靠的通信支持。

参考文献

[1] 胡星辉.5G智能物联网通信网关设计分析[J].通讯世界,2025,32(06):31-33.

[2] 孙云龙.基于5G的物联网高效通信协议优化研究[J].中国宽带,2026,22(01):39-41.

[3] 王伟,黄龙.基于5G网络下的物联网通信技术与挑战[J].中国新通信,2022,24(22):13-15.

[4] 史运涛,孙卫兵,刘大千.5G和LoRa的物联网数据传输系统设计[J].单片机与嵌入式系统应用,2022,22(04):74-77+82.