

单片机系统数据远程低延时传输方法研究

刘 军¹ 李伟权²
LIU Jun LI Weiquan

摘 要

在长距离传输中, 发射端天线信号易受动态变化的跟踪干扰影响。这类干扰具有时变特性, 且与通信信号存在延时差, 导致信号中同时存在受干扰和未受干扰时段, 显著增加了干扰抑制的难度。这不仅会降低信号准确性, 提高误码率, 还可能导致数据丢失或传输失败。为此, 文章提出一种单片机系统低延时传输方法。该方法采用多输入多输出 - 正交频分复用技术, 构建单片机系统数据远程低延时传输架构。架构设计完成后, 采用自适应滤波算法抑制干扰, 将发射端天线信号作为输入信号, 基于更新权重向量输出信号消除跟踪干扰, 并提出二次自适应滤波对消模型, 对跟踪子载波信号二次过滤实现干扰抑制。为进一步降低数据传输延时, 采用自适应延时公平调度法, 在每个调度所分配的时隙范围内, 依据通信节点所处的信道环境状况以及分组数据的具体长度, 挑选出具备最低延时的通信节点, 并对其数据进行传输, 实现单片机系统数据远程低延时传输。经实验证明, 该设计方法平均延时仅为 98.15 ms, 比特率在 197.15~247.68 Mbit/s 范围内, 能够实现单片机系统数据远程超低延时传输。

关键词

单片机系统; 远程; 低延时; 传输; 自适应滤波算法; 自适应延时公平调度法

doi: 10.3969/j.issn.1672-9528.2026.01.035

0 引言

短波通信凭借其低廉的通信成本和广阔的覆盖范围, 在单片机系统应用中占据重要地位, 但其数据传输的实时性仍面临严峻挑战。在远程传输过程中, 高延时和低可靠性问题严重制约系统性能, 特别是在工业控制和无人系统等对实时性要求极高的应用场景中, 传输延时可能导致控制指令执行滞后或监测数据失效, 进而引发严重的安全隐患。虽然传统短波通信具有覆盖广、成本低的优势, 但由于多径效应和动态干扰等因素的限制, 难以同时实现低延时、高可靠性和大容量的传输目标^[1]。近年来, 相关学者针对这一问题展开了深入研究并取得一定成果。朱国耀等^[2]提出基于 MIMO 技术的传输方法, 通过优化 MIMO 系统架构与信号处理算法, 实现数据超低延时传输。该方法虽能提升抗干扰能力, 但针对时变跟踪干扰缺乏自适应机制。当干扰信号与通信信号存在时延差时, 固定的信号处理参数无法实时匹配干扰的动态变化, 导致受干扰时段残留, 误码率升高。夏元轶等^[3]提出

一种低延时传输方法, 通过合理分配网络资源、优化数据传输路径等手段, 满足不同业务对低延时的需求。该方法通过预定义的业务优先级分配网络资源, 但未考虑动态干扰对信道质量的实时影响。当跟踪干扰导致信道状态突变时, 固定的资源分配策略无法及时调整, 可能造成高优先级业务仍被分配到受干扰严重的路径。鉴于现行方法存在的不足与缺陷, 本研究提出一种单片机系统数据远程低延时传输方法。

1 单片机系统数据远程低延时传输架构设计

单片机系统应用场景中, 远程数据传输需求常见, 但传统方式存在延时高、可靠性差和容量不足等问题。特别是在实时性要求较高的工业控制和远程监测等场景中, 数据传输的高延时会导致控制指令执行不及时和监测数据反馈滞后, 这不仅影响系统整体性能, 还可能造成安全隐患。因此, 为满足单片机系统对数据远程传输在低延时、高可靠性和大容量等方面的严苛要求, 需要进行数据远程低延时传输架构设计。

采用多输入多输出 - 正交频分复用技术, 构建单片机系统数据远程低延时传输架构, 具体架构如图 1 所示。假设在某一特定区域内, 存在 N 个通信节点。在该通信系统中, 发射端配有 k 根天线, 同时, 每个用户都拥有 k 根接收天线, 以此来实现多天线间的信号传输与接收, 以此增强通信的可靠性和容量。多输入多输出 - 正交频分复用技术采用 k 个子载波进行数据传输, 并且为每个用户分配一个专属的子载波。

1. 厦门市集美职业技术学校 福建厦门 361022

2. 厦门海洋职业技术学院 福建厦门 361022

[基金项目] 2024 年福建省职业教育研究课题阶段成果“新质生产力视域下电子专业中职生职业核心素养提升策略与实践研究”(ZJZB2024219)

若该区域内的用户分布较为均匀,则各用户之间的通信接入网信道可近似认为是相互独立的^[4]。

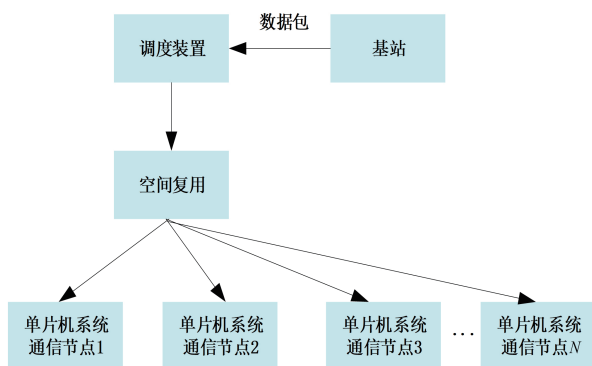


图1 单片机系统数据远程低延时传输架构

在通信过程中,对该区域的用户与通信接入网之间的信道状态信息进行估计,将估计结果反馈给通信网基站。但在实际传输过程中,反馈环节不可避免地会出现延时情况,导致基站获取到的信道状态信息并非当前时刻的实时数据,而是已经超时的信息。鉴于单片机系统数据传输系统以实现低延时为目标,采取一系列措施优化数据传输过程^[5]。通过调制技术将原始数据转换为调制符号,并利用空时编码技术增强信号的抗干扰能力与传输可靠性。通过波束形成技术,将信号能量集中在特定的方向上进行传输,提高信号的传输效率。经过上述处理后,再通过逆快速傅里叶变换(IFFT)将子载波上的数据转换为发射端天线的时域信号,该过程用公式表示为:

$$x(k) = \sum_{k=1}^N S(k)A(k)V(k) \quad (1)$$

式中: $x(k)$ 表示第 k 个子载波的发射端天线信号; $S(k)$ 表示两个波束之间的功率分配矩阵; $A(k)$ 表示空时编码字; $V(k)$ 表示复用矩阵。

2 单片机系统数据远程低延时传输

2.1 单片机远程数据传输干扰抑制

在完成单片机系统数据远程低延时传输架构设计后,为确保数据传输质量与完整性并维持低延时特性,需解决长距离传输中发射端天线信号易受外界干扰的问题。这类干扰会破坏信号准确性、增加传输错误率,甚至导致数据丢失或传输失败。为此,本研究采用自适应滤波算法进行干扰抑制,通过减少干扰影响来保障数据准确、及时地传输至接收端,从而满足单片机系统对远程传输的严格要求。

将发射端天线信号 $x(k)$ 作为自适应滤波算法输入信号;输出信号 $z(k)$ 即为经过自适应滤波器处理后得到的信号;期望信号 $e(k)$ 是理想中希望得到的第 k 个子载波的发射端天线

信号;误差信号 $u(k)$ 用于衡量输出信号与期望信号之间的差异程度;阶数 r 反映了滤波器的复杂程度和处理能力;滤波器的权重值 $\omega(k)$ 决定了滤波器对不同输入信号成分的响应程度,在对子载波信号滤波过程中, $\omega(k)$ 不断更新,其更新公式为:

$$\omega(k+1) = \omega(k) + 2\eta e(k)x(k) \quad (2)$$

式中: η 表示滤波器的迭代步长^[6]。基于更新的权重向量对输入的子载波信号滤波,其输出信号计算公式为:

$$z(k) = \omega(k+1)x(k) - u(k) \quad (3)$$

如上述公式所示,将输入信号输入至自适应滤波器后,数字滤波器依据其内部的算法和权重值对输入信号进行处理,输出信号 $z(k)$,以此消除跟踪干扰。在消除跟踪干扰时,跟踪干扰会随着时间或信号的变化而动态变化,其特性较为复杂^[7]。由于技术限制,跟踪干扰与单片机系统数据远程通信信号之间存在一定的延时,导致被干扰信号中存在部分未受跟踪干扰的时段^[8]。基于这一特点,本文提出一种改进的方法,即二次自适应滤波对消模型。在首次误差信号提取过程中,通过误差信号获取干扰信号,其公式为:

$$u(k) = p(k) - b(k) = d(k) \quad (4)$$

式中: $p(k)$ 表示混入干扰信号的原始子载波信号; $b(k)$ 表示信道干扰信号; $d(k)$ 表示经过首次干扰对消处理后的参考信号。通过以上步骤提取到误差信号后,对干扰信号进行二次过滤,得到新的误差信号,其计算公式为:

$$z(k) = p(k) - d(k) \quad (5)$$

采用二次自适应滤波对消模型对跟踪子载波信号进行滤波后,实现单片机系统数据远程传输跟踪干扰抑制。

2.2 基于自适应延时公平调度的单片机系统低延时传输

在完成单片机系统数据远程传输的跟踪干扰抑制后,虽然信号质量和传输准确性得到显著提升,但数据传输延时问题仍需解决。为满足系统对低延时传输的严格要求,本研究采用自适应延时公平调度法,该方法基于实时信道状态和分组数据长度,在每个调度时隙内动态选择最优通信节点进行数据传输。同时,通过持续更新各节点的平均传输延时指标,确保调度策略的公平性和适应性,最终实现高效稳定的低时延远程数据传输。

假设 F 为均衡矩阵,用于对信道进行均衡处理,以补偿信道对信号的影响; M 为通信节点的信噪比(SNR)执行估计操作。信噪比是衡量信号质量的重要指标,反映信号功率与噪声功率的比值,其公式为:

$$M = \frac{[z(k)|F \cdot w|^2]}{\sum_{k=1} F \cdot z(k)} \quad (6)$$

式中： w 表示信号方差。求解通信节点在获得的 SNR 条件下所拥有的传输速率，其公式为：

$$P=\sqrt{\ln(M^2-1)}\tag{7}$$

式中： P 表示在 SNR 条件 M 下通信节点数据传输速率。按照通信节点所拥有的分组数据长度以及传输速率，求解通信节点数据传输需要的等待传输性延时，即通信节点数据从开始准备传输到实际开始传输所需要的时间。

通过调度选定最优通信节点并建立链路，实现数据包的低延时传输。

3 实验验证

3.1 实验设计

以下检验本文提出的单片机系统数据远程低延时传输方法在实际场景中应用的可行性与有效性，将其集成到一个单片机系统通信网络中进行实地测试，单片机系统采用 STM32F103 系列处理器，ARM Cortex-M3 内核，搭载 128 KByte 存储器，I/O 端口 37 个。通过传输线缆将通信模块与计算机进行物理连接，构建两组独立的数据收发设备。单片机系统交换机分别与两台计算机连接，形成两组收发终端。根据实际应用场景和通信协议要求，单片机系统参数如表 1 所示。

表 1 单片机系统参数表

序号	参数	参数值
1	信道	5
2	频率	72 MHz
3	波特率	9 600
4	节点数量	10
5	调试接口	SWD/JTAG

3.2 实验流程

完成单片机系统交换机与计算机的线缆连接后，验证物理链路连通性。具体操作步骤为：在计算机端软件界面中选择“电台检测”选项，自动检测单片机系统与计算机之间的通信链路状态。若连接成功，软件界面将弹出“电台检测成功”的提示信息，表明硬件连接与基础通信功能正常。硬件检测通过后，对通信参数进行配置。在单片机系统软件界面中选择对应的电台类型并设置基频参数。根据预设的电台类型自动加载默认参数配置。当所有模块的硬件连接与参数配置完成后，自动建立模块间的通信链路。此时，进行单片机系统与计算机双向数据传输，传输量为 2 000 条，传输距离为 0~1 700 m。随机选取 8 个单片机系统数据包，其传输结果如表 2 所示。

表 2 单片机系统数据远程低延时传输结果

数据包序号	链路	接收端是否接收
1	2→4→5→6→7	接收
2	3→5→8→9→10	接收
3	1→3→4→7→9	接收
4	2→3→6→8→10	接收
5	1→4→6→8→9	接收
6	5→8→9→6→7	接收
7	1→4→6→5→7	接收
8	6→2→7→4→9	接收

如表 2 所示，每个单片机系统数据包均能够按照可行链路传输到接收端，设计方法可以完成单片机系统数据远程传输任务。为了使此次研究具有一定的参考性和学术性价值，在实验中将本文方法与文献 [2] 提出的基于 MIMO 技术的传输方法、文献 [3] 提出的一种低时延传输方法比较。传输方法性能评价指标选择延时和比特率，评价本文方法在单片机系统数据远程低延时传输场景中的应用性能。

3.3 实验结果与分析

按照以上实验流程，在数据采集器上收集实验数据，通过数据处理绘制不同方法在 1 000 m~1 600 m 通信距离场景下，单片机系统数据远程传输延时对比图 and 不同方法在 1 000 m~1 700 m 通信距离场景下，单片机系统数据远程传输比特率对比图，如图 2~3 所示。

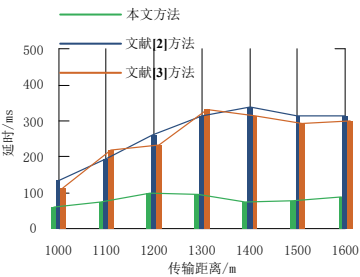


图 2 单片机系统数据远程传输延时

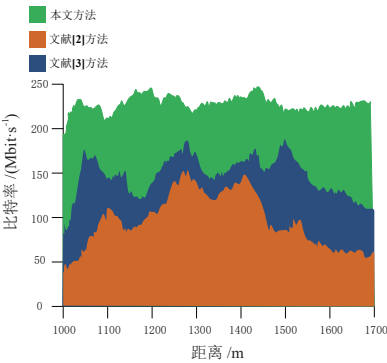


图 3 单片机系统数据远程传输比特率

对比图 2 可以看出，本文方法的平均延时稳定在 98.15 ms，并且在整个通信距离范围内（1 000 m~1 600 m），

延时几乎不受通信距离增加的影响。这主要得益于本文方法所采用的自适应延时公平调度法,该方法能够在每个调度所分配的时隙范围内,依据通信节点所处的信道环境状况以及分组数据的具体长度,动态地挑选出具备最低延时的通信节点,并对其数据进行传输,从而避免了因信道环境恶化导致的延时累积。相比之下,文献[2](MIMO技术)和文献[3](资源分配优化)的延时显著高于本文方法。因为文献[2]可能仅依赖MIMO技术本身的多天线特性,但缺乏对节点延时的动态优化,在信道环境变化时,无法及时选择最优节点进行传输,导致延时增加。文献[3]虽然进行了资源分配优化,但未充分考虑节点的实时信道状态和分组数据长度等因素,使得在长距离通信时,延时性能不如本文方法。此外,本文方法中的二次自适应滤波对消模型有效消除了跟踪干扰,减少了信号重传需求,进一步降低了传输延时。跟踪干扰会随着时间或信号的变化而动态变化,其特性较为复杂,且与单片机系统数据远程通信信号之间存在一定的延时,导致被干扰信号中存在部分未受跟踪干扰的时段。二次自适应滤波对消模型能够针对这一特点,更好地适应动态变化的跟踪干扰,从而保障了低延时传输。

对比图3可以看出,本文方法的比特率稳定在197.15~247.68 Mbit/s,较文献[2](49.53~148.25 Mbit/s)和文献[3](84.15~176.35 Mbit/s)提升显著。这表明本文方法所采用低延时传输架构充分利用了频谱资源,并且自适应技术减少了信道资源浪费。低延时传输架构的容量优势在于多天线与多子载波的并行传输,大幅提升了数据吞吐量。本文方法根据信噪比(SNR)和分组长度调整传输速率,优化了带宽利用率。在通信过程中,通过均衡矩阵对信道进行均衡处理,补偿信道对信号的影响,同时对通信节点的信噪比进行估计,依据估计结果计算传输速率,再结合分组数据长度确定等待传输延时,从而实现了传输速率和带宽的有效管理。

综上所述,通过图2和图3的对比实验结果,充分证明了本文方法可以实现单片机系统数据远程超低延时传输,能够满足单片机系统数据远程传输实时性和有效性的需求。

4 结语

本研究聚焦于单片机系统数据远程低延时传输问题,针对传统传输方式在延时、可靠性和容量等方面存在的不足,提出了一套综合性的解决方案,并通过实验验证了其有效性和优越性。得出以下结论:

(1) 低延时性能显著优化

实验表明,本文方法平均传输延时稳定在98.15 ms,且在1 000 m~1 600 m范围内不受距离影响。相较于文献[2]和文献[3]方法,本文方法通过自适应延时公平调度法动态选择最优通信节点,并结合二次自适应滤波对消模型有效抑制干扰,避免了信道环境恶化导致的延时累积。

(2) 高比特率与频谱效率提升

本文方法的比特率稳定在197.15~247.68 Mbit/s,远高于对比方法。低延时传输架构充分利用多天线与多子载波并行传输的优势,结合信噪比(SNR)动态调整传输速率,显著提高了频谱利用率和数据吞吐量。

(3) 干扰抑制与可靠性增强

采用二次自适应滤波对消模型,有效消除了动态变化的跟踪干扰,减少了信号重传需求,进一步保障了低延时与高可靠性。实验数据(表2)显示,所有测试数据包均能通过优化后的链路稳定传输至接收端,验证了方法的鲁棒性。

本文方法适用于工业控制、远程监测等对实时性要求严苛的单片机系统场景,能够解决传统传输方式中延时高、容量不足的问题。通过硬件实验(STM32F103平台)验证了方法的可行性与工程适用性,为单片机系统远程数据传输提供了有效的技术参考。

参考文献:

- [1] 陈禹岐. 基于5G技术的MIMO通信网络数据超低延时传输方法[J]. 自动化与仪器仪表, 2023(10):1-5.
- [2] 朱国耀, 何洋军, 何鸣涛. 基于MIMO技术的通信接入网数据超低延时自动化传输系统[J]. 电子设计工程, 2024, 32(19):94-97.
- [3] 夏元轶, 滕昌志, 徐波, 等. 面向电力系统差异化业务的数据处理架构与低延时传输方法研究[J]. 南京邮电大学学报(自然科学版), 2024, 44(5):37-46.
- [4] 郑静雅, 安军社. SpaceFibre星载数据网络低延时确定性调度算法[J]. 国防科技大学学报, 2023, 45(2):179-187.
- [5] 农佳明, 陈孟臻. 基于流量延时调度的无线传感网数据传输拥塞控制方法[J]. 传感技术学报, 2024, 37(8):1441-1447.
- [6] 陈星延, 张雪松, 谢志龙, 等. 面向“云-边-端”算力系统的计算和传输联合优化方法[J]. 计算机研究与发展, 2023, 60(4):719-734.
- [7] 杜晓岚, 赵革委. 复杂工况下航空电子通信网络数据传输延时补偿研究[J]. 微型电脑应用, 2024, 40(9):22-25.
- [8] 杨迪. 跨域通信网络中多级传输延时补偿方法研究[J]. 现代电子技术, 2023, 46(18):152-156.

【作者简介】

刘军(1984—), 男, 福建松溪人, 本科, 高级讲师, 研究方向: 电子技术、职业教育。

李伟权(1971—), 男, 福建建阳人, 本科, 副教授, 研究方向: 电子技术、集成电路、职业教育。

(收稿日期: 2025-06-26 修回日期: 2026-01-15)