

新一代运载火箭遥测系统长距离 高可靠通信技术研究

金豹¹, 李安顺¹, 徐玮², 徐昕^{3,4}

(1. 上海宇航系统工程研究所, 上海 201100;

2. 上海航天电子技术研究所, 上海 201100;

3. 中国航天科技集团商业火箭有限公司, 上海 201100;

4. 南京航空航天大学 航天学院, 南京 210016)

摘要: 随着新一代运载火箭运载能力和复杂度的不断提升, 遥测系统面临着数据传输量大、传输距离远、环境干扰强等严峻挑战; 传统基带通信方式在高速率下传输距离受限, 且长距离传输易导致信号畸变与相位滞后, 严重影响数据可靠性; 针对上述问题, 提出一种融合多级树形拓扑降频通信、独立同步信号相位畸变抵抗、基带通信接口优化的综合解决方案; 通过数据综合器分级汇聚、AB缓冲区结构、中继器整形、差分传输及独立同步机制等技术, 有效提升了遥测系统的传输距离与可靠性; 理论分析与实验验证表明, 该方法在提高通信速率的同时保证了数据完整性, 显著提高了系统抗干扰能力, 为大型运载火箭遥测系统设计提供了重要技术支撑。

关键词: 运载火箭; 遥测系统; 降频通信; 相位畸变; 数据综合器; 中继器; 基带通信接口

Research on Long-Distance High-Reliability Communication Technology for Next-Generation Launch Vehicle Telemetry Systems

JIN Bao¹, LI Anshun¹, XU Wei², XU Xin^{3,4}

(1. Shanghai institute of Aerospace System Engineering, Shanghai 201100, China;

2. Shanghai institute of Aerospace Electronics Technology, Shanghai 201100, China;

3. China Aerospace Science and Technology Corporation Commercial Rocket Co., Ltd., Shanghai 201100, China;

4. School of Astronautics, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China)

Abstract: With the continuous improvement in the payload capacity and complexity of next-generation launch vehicles, telemetry systems face severe challenges including large amount of data transmission, long transmission distances, and strong environmental interference. Traditional baseband communication methods are limited in transmission distances under high-speed data rates, and are prone to signal distortion and phase lag over long distances, significantly affecting the reliability of data transmission. To address these issues, a comprehensive solution is proposed, which integrates multi-stage tree topology frequency-reduced communication, independent synchronization signal-based phase distortion resistance, and baseband communication interface optimization. Through technologies such as hierarchical data aggregation via data combiners, AB buffer structures, repeater reshaping, differential transmission, and independent synchronization mechanisms, the transmission distance and reliability of the telemetry system are effectively enhanced. Theoretical analysis and experimental verification demonstrate that this method ensures data integrity while increasing communication rates, significantly improves system anti-interference capability, and provides an important technical support for the design of large-scale launch vehicle telemetry systems.

Keywords: launch vehicle; telemetry system; frequency-reduced communication; phase distortion; data combiner; repeater; baseband communication interface

收稿日期:2026-04-03; 修回日期:2026-04-26。

作者简介:金豹(1989-),男,硕士,工程师。

引用格式:金豹,李安顺,徐玮,等.新一代运载火箭遥测系统长距离高可靠通信技术研究[J].计算机测量与控制,2026,34(8):147-155.

0 引言

运载火箭在飞行过程中需实时传输大量遥测数据,包括各类传感器测量值、图像信息与数字量信号等,这些数据对火箭状态监测、故障诊断及安全控制至关重要^[1-3]。相较于传统型号,新一代运载火箭呈现出子级数量增多、构型模块化、电气系统一体化程度高等显著特征,全箭长度可达近百米,跨舱段传输距离显著延长,同时高频振动、高分辨率图像等精细化测量需求使得总数据码率攀升至 5 Mbps 以上,对遥测系统提出了“长距离、大容量、高可靠、轻量化”的严苛要求。传统点对点基带通信方式面临传输速率与有效距离之间的尖锐矛盾:提高速率以满足数据量需求会加剧信号畸变、相位滞后及电磁干扰,导致误码率上升,且单纯提升发射功率或增加屏蔽措施又将显著增加系统重量与功耗,难以满足箭上轻量化约束^[4-6]。现有研究或采用光纤传输方案但布线维护复杂度高^[7-10],或改进信道编码却未解决基带距离受限的根本问题^[11],或探讨多级汇聚架构却未深入应对信号畸变机制^[12],如何在有限资源条件下实现远距离、高可靠的数据传输,仍是运载火箭遥测系统设计的关键难题。针对上述局限,本文提出一种融合降频通信、相位畸变抵抗与基带接口优化的系统级方案:通过多级树形拓扑结构分级降低基带速率以延长传输距离,采用 AB 双缓冲与固定延迟补偿机制保障速率匹配与数据完整性,构建中继整形与独立同步信号以消除相位滞后影响,并优化基带通信接口协议实现双向数字交互与变帧格式传输,从而在有限资源约束下突破远距离、高可靠遥测传输瓶颈。

1 系统总体架构

1.1 多级树形拓扑结构

传统运载火箭遥测系统多采用集中式点对点架构,各传感器通过长距离模拟电缆连接至中央采编器,模拟信号传输路径长、易受干扰,且基带通信速率与传输距离形成固定制约。本文提出的遥测系统采用多级数据综合器构成树形拓扑结构,如图 1 所示。每个数据综合器负责采集其所在舱段的遥测数据,并将数据逐级汇聚至根节点,最终由根节点数据综合器将全部数据发送至调频发射机^[1]。

以典型的两级结构为例:一级数据综合器:接收来自远置采编单元、图像压缩器、数字量变换器等数据获取单元的数据,进行编帧处理后发送至二级数据综合器;二级数据综合器:汇聚自身采集的数据与一级数据综合器上传的数据,形成完整遥测帧,发送至发射机^[2]。

设根节点输出总码率为 R_{total} ,则一级数据综合器输出码率约为 R_{total}/N ,其中 N 为汇聚分支数(通常取 2、4

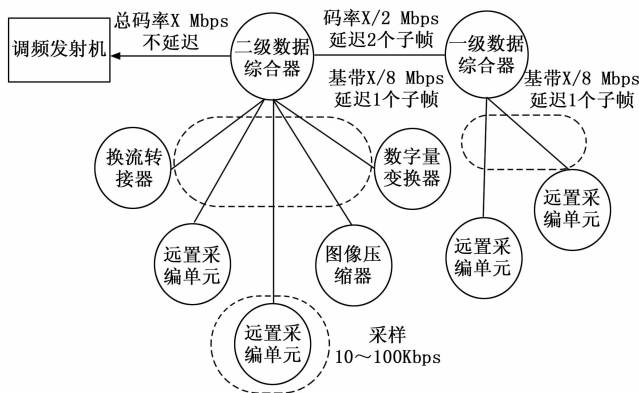


图 1 多级树形拓扑结构图

或 8)。基带通信码率进一步降低,理论最远通信距离可达数千米。以具体参数为例:若总码率为 5.242 88 Mbps,基带码率可降至 655.37 kbps,远高于传统高速率传输的距离上限^[1]。

多级树形拓扑的级数 k 并非可以无限增加。设计约束主要来自两方面:一是端到端延迟预算,遥测系统通常要求数据端到端延迟不超过 50 ms,每增加一级综合器将引入约 10 ms 的固定处理延迟(含缓冲与编帧),因此工程中建议级数 $k \leq 3$,总累积延迟控制在 $k \times 10 \text{ ms} \leq 30 \text{ ms}$ 以内,为无线链路抖动留出余量。二是根节点处理压力,随着级数增加,根节点将面临多路数据的并发汇聚,在硬件资源受限的箭载环境下需平衡处理能力与功耗。

针对不同子级数量与构型,拓扑结构具有灵活适配能力。对于两级构型火箭(如某商业火箭),可直接采用一级数据综合器直连根节点的扁平化树形,降低设备数量。对于捆绑助推器构型,助推器作为独立分支挂载在芯级对应的一级综合器下,其数据流经芯级汇聚后上传,拓扑天然适配芯级一助推器主从结构。对于上面级长时间滑行任务,可在上面级独立设置综合器,与基础级综合器通过中继器进行物理层隔离,确保分离后上面级遥测链路仍能独立工作。

该拓扑结构的核心优势在于:降低单段传输距离,使每级数据综合器之间的基带通信速率远低于总码率,从而延长有效传输距离;减少模拟信号传输路径,数据获取单元就近布置于传感器附近,降低模拟信号长距离传输带来的干扰与衰减;支持模块化设计:可灵活增减舱段,适应多任务构型需求,解决了传统固定架构在多任务构型下的适应性不足问题;降低电缆重量:通过数字信号传输替代传统大量模拟信号电缆,有效减轻箭上重量。

1.2 数据获取单元组成

数据获取单元是遥测系统的前端采集部分,包括以

下类型^[1]：远置采编单元：采集传感器模拟量并转换为数字信号，具备独立时钟控制采样率；图像压缩器：对多个图像获取装置的图像数据进行压缩与通道切换，支持多种切换模式；数字量变换器：将外部数字量信号转换为统一接口格式；数字量遥测模块：接收外部系统数字量数据；换流转换器：实现电源转换与信号调理。各单元就近布置于传感器附近，显著缩短了模拟信号传输距离，减少了信号在传输过程中受到干扰的可能性，提高了信号质量。

1.3 基带通信接口协议

为确保通信的可靠性和稳定性，基带通信以基于 RS422 串口为主，主要使用同步串行差分的构架形式建立基带通信网络。基带通信接口协议信号由 4 个信号组成，如图 2 所示，分别为：命令字、码同步、移位脉冲、数据^[13-14]。

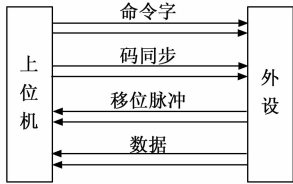


图 2 基带传输协议信号流程

将传统的帧同步电平信号改为命令字，在不增加额外通信接口关系的基础上实现了双工通信，可以满足数据综合器与外设之间的时序控制和指令控制，并与目前所使用的基带通信协议相兼容。既保持了技术的进步，又具有良好的经济性和任务适应性^[14]。

2 降频通信方法

2.1 通信速率分级设计

在多级树形结构中，各级数据综合器之间的通信速率呈分级关系。设根节点输出总码率为 R_{total} ，则各级通信速率满足： $R_{stage\ i} = R_{total} / \prod_{j=i}^k N_j$ ，其中 N_j 为第 j 级的数据汇聚倍数，通常取 2、4 或 8。这种分级设计使得远离发射机的数据综合器以较低速率传输，有效克服了传统火箭设计中高速率与长距离的矛盾。数据综合器与远置采编单元之间的基带通信码率不超过总码率的 1/4，可根据外设数据量进行调整。以典型参数为例：当总码率为 5.242 88 Mbps 时，基带码率仅为 655.37 kbps，理论最远通信距离可达数千米。这种“降频”设计有效避免了通信速率提升带来的距离下降问题，同时降低了高速率数字信号在传输过程中的衰减、干扰和延时。

2.2 AB 结构数据缓冲区计

由于基带通信速率低于数据综合器内部处理速率，

数据综合器需采用 AB 双缓冲区结构实现速率匹配，其工作原理如下^[1]：在 t 时刻，A 缓冲区以低速 V_1 接收外部数据，B 缓冲区以高速 V_2 输出数据插入帧格式；在 $t+1$ 时刻，角色互换，B 缓冲区以低速 V_1 接收数据，A 缓冲区以高速 V_2 输出数据；如此循环往复，形成乒乓缓冲机制。该机制解决了速率不匹配问题，保证数据不丢失，且插入帧格式过程连续、稳定。设缓冲区容量为 B ，接收速率为 V_1 ，发送速率为 V_2 ，则单缓冲区占用时间为 $T_{occupy} = B/V_1$ ；发送时间为 $T_{send} = B/V_2$ ；由于 $V_2 > V_1$ ，有 $T_{send} < T_{occupy}$ ，双缓冲区交替工作可保证连续数据流，其通信模式示意如图 3 所示。

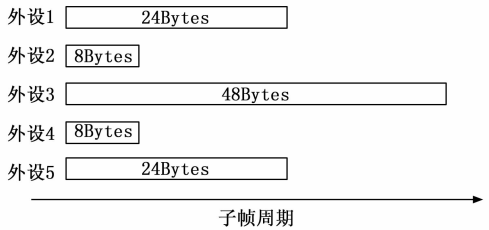


图 3 通信协议示意图

缓冲区最小深度 B_{min} 由低速率接口接收一帧完整数据所需的时间与高速率侧处理速度共同决定。基带接收码率为 V_1 （即缓冲区低速写入速率），数据综合器内部处理时钟频率为 f_{sys} ，遥测子帧长度为 L_{frame} ，为保证乒乓操作不溢出，单缓冲区容量应满足： $B \geq V_1 / f_{sys} \times T_{frame} + \Delta B$ ，其中 T_{frame} 为子帧周期， ΔB 为保护余量（通常取 128 Byte）。例如，当 $V_1 = 1.25$ Mbps、 $f_{sys} = 20$ MHz、 $T_{frame} = 10$ ms 时，理论最小深度约为 156.25 Byte，工程实现取 $B = 512$ Byte 即可覆盖绝大多数工况。

针对采样率突变导致瞬间数据量超过缓冲区深度的情况，设计了三级防护策略：1）流控反压机制，当 AB 双缓冲占用率均超过 75% 时，数据综合器通过基带命令字向下级设备发送“Busy”状态，暂停数据传输；2）关键数据保护，缓冲区划分为高优先级与低优先级区域，溢出时优先丢弃非关键图像填充数据，确保飞行时序指令等关键参数不被覆盖；3）错误恢复，若检测到缓冲区溢出标志，地面数据处理软件依据帧计数连续性自动请求重传或进行插值补偿。

2.3 固定延迟与时间修正

多级汇聚必然引入固定延迟：每经过一级数据综合器，数据延迟一个子帧周期。以两级结构为例：一级数据综合器外挂外设：产生 1 个周期的延迟；二级数据综合器外挂外设：产生 1 个周期的延迟；二级数据综合器对一级数据综合器外挂外设：产生 2 个周期的延迟。数据延迟是降频通信的必然产物，但因其固定且范围可控，可在地面数据处理系统中进行时间修正。修正方法如下：设原始数据时间戳为 t_0 ，经过 k 级数据综合器

后,接收时间为 $t_{\text{recv}} = t_0 + \sum_{i=1}^k T_{\text{delay},i}$;其中 $T_{\text{delay},i}$ 为第 i 级引入的固定延迟。地面数据处理系统根据已知的延迟参数,将接收时间修正回原始时间基准 $t_{\text{correct}} = t_{\text{recv}} - \sum_{i=1}^k T_{\text{delay},i}$,该方案操作简单、灵活性强,不影响数据实时性,但需要地面数据处理专业进行适应性改进。

2.4 变帧格式传输技术

为提高通信效率,基带通信接口支持定长数据和不定长数据两种格式^[13]:

1) 定长数据:每个子帧周期内发送的数据长度均相等,数据结构固定,便于帧格式设计和通信协议确定。但若外设数据不能填满其帧格式,则需进行固定码填充,造成信道资源浪费;

2) 不定长数据:每个子帧周期内发送的数据长度不相等,适用于采样率变化或数据量动态调整的场景,能够提高通信效率和信道使用率,但增加了通信设备的设计难度和帧格式编排的难度。

数据量充裕时可采用定长数据格式;总数据容量紧张,且参数数量和采样率不可调和的情况下,采用不定长数据格式,两种格式如图 4~5 所示。

数据1	数据2		数据N	0x55H
数据1	数据2		数据N	数据N+1
数据1	数据2		数据N	0x55H
数据1	数据2		数据N	数据N+1

图 4 定长数据结构示意图

数据1	数据2		数据N	
数据1	数据2		数据N	数据N+1
数据1	数据2		数据N	
数据1	数据2		数据N	数据N+1

图 5 不定长数据结构示意图

3 抵抗长距离通信相位畸变方法

3.1 信号畸变成因分析

长距离传输中,传统火箭基带通信信号畸变主要由以下因素引起^[2]:

- 1) 传输线特性阻抗:导致信号边沿变缓、幅度衰减,表现为信号从高低电平逐渐变得平缓圆滑;
- 2) 阻抗不连续:引起信号反射,造成过冲、振铃和边沿迟缓,使信号产生畸变;
- 3) 共模/差模干扰:叠加在信号线上,改变电平判

决结果,增加误码率^[5-6]。

设传输线特性阻抗为 Z_0 ,负载阻抗为 Z_L ,反射系数为 $\Gamma = \frac{Z_L + Z_0}{Z_L - Z_0}$,当 $Z_L \neq Z_0$ 时,反射信号与入射信号叠加,产生相位偏移和波形畸变。随着传输距离增加,信号衰减和畸变程度加剧,严重影响数据接收可靠性。

3.2 中继器整形技术

为解决上述问题,本文在主机与从机之间引入中继器(如 422 中继器),对信号进行整形恢复^[2]。中继器的工作原理为:接收端检测差分信号,进行电平判决;根据判决结果重新生成标准波形;驱动发送端输出整形后的信号。

中继器可级联多个,支持超长距离传输。设单个中继器可支持的最大传输距离为 L_{max} ,则采用 n 个中继器后的总传输距离为:

$$L_{\text{total}} = (n + 1) \times L_{\text{max}}$$

信号传输如图 6 所示,中继器将有轻微畸变的信号进行整形后继续发送,有效保证了接收端信号质量。

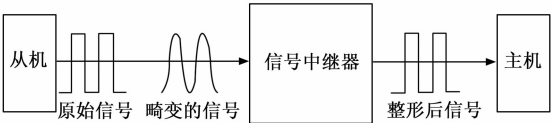


图 6 中继器整形信号示意图

3.3 独立同步信号机制

传统火箭通信协议中,主机与从机共享同步信号,长距离传输与中继器引入的相位滞后会导致数据采样点偏移,引发误码。本文提出一种新型通信协议,主机与从机采用独立同步信号,从根本上消除相位滞后影响^[2]。

通信协议包含 4 种信号,同步数字量接口波形如图 7 所示:

- 1) 帧同步信号 (FS):主机不定时发送,作为数据传输的判断条件;
- 2) 码同步信号 (CS):主机不间断发送,周期为 t ,提供位同步基准;
- 3) 移位时钟信号 (SC):从机不间断发送,与码同步信号同频反向;
- 4) 数据信号 (DATA):承载有效遥测数据。

信号时序关系满足:帧同步信号与码同步信号上升沿对齐;移位时钟信号与码同步信号同频反向,即 $f_{\text{sc}} = f_{\text{cs}}$,相位差 180° ;数据上升沿与移位时钟信号上升沿对齐。

从机接收处理:从机在接收到码同步上升沿后的 t/N (N 取 2~6,典型值 4) 时刻判断帧同步信号电平,当接收到指定的帧同步信号后开始数据传输。由于

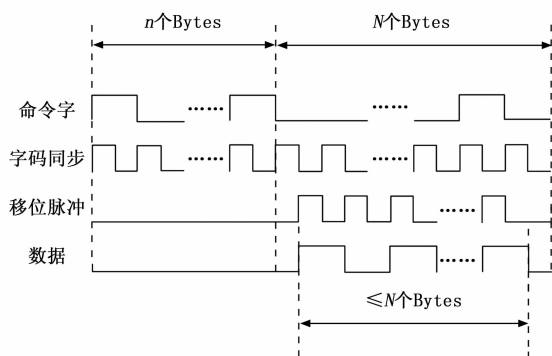


图 7 同步数字量接口波形示意图

帧同步信号与码同步信号上升沿对齐, 在从机端无需考虑相位滞后问题。

主机接收处理: 主机在发送完帧同步信号后开始接收从机发送的数据, 在接收到移位时钟信号上升沿后的 t/M (M 取 2~6, 典型值 4) 时刻判断数据信号电平, 当接收到指定的数据信号电平后开始数据传输。

独立同步机制的采样窗口中心位于移位时钟上升沿后 $t/4$ 处。其有效工作边界取决于数据眼图的张开宽度 T_{eye} 。当多级中继器累积相位误差或长距离传输导致数据边沿抖动超过 $\pm t/4$ 时, 采样点将移出眼图中心区域, 导致误码。设单级中继器引入的随机抖动为 Δt_{jitter} , 经过 n 级级联后总抖动 $\Delta t_{total} = \sqrt{n} \times \Delta t_{jitter}$ 。在本设计中, Δt_{jitter} 实测约为 5 ns, 当级联至第 4 级时, 累积抖动约 10 ns, 仍小于 $t/4$ 的安全裕量 (250 ns), 表明同步机制具有充裕的相位鲁棒性。当信道质量恶化至眼高低于 100 mV 时, 采样判决进入亚稳态区, 机制失效。

为防止因瞬态强干扰导致的同步失锁, 在数据综合器接收逻辑中增加了数字锁相环 (DPLL) 辅助跟踪。当连续 3 次未检测到预期的码同步上升沿时, 系统判定同步失锁, 自动进入守时保持模式, 利用内部高精度晶振生成本地采样时钟, 同时向总线发送复位请求, 触发数据源重传当前子帧, 确保数据连贯性。

结合前述抖动累积模型与眼图衰减模型, 在 5 Mbps 总码率、1.25 Mbps 基带码率下, 单中继器可恢复信号至初始幅值的 90%。经实测, 级联第 5 级时, 由于芯片内部噪声地板抬升, 输出眼高已衰减至初始值的 70% 以下, 误码率出现拐点。因此建议工程应用中中继器级联数量不超过 4 级, 此时累积相位误差控制在可接受范围内, 支持最长单链路传输距离可达 800 m。

该机制使主机与从机的同步信号相互独立, 消除了中继器引入的相位滞后对数据采集的影响。

3.4 差分传输与阻抗匹配

为进一步提升抗干扰能力, 所有信号采用差分模式传输^[2]:

- 1) 信号正线: 与源信号频率相同、相位相同;
- 2) 信号负线: 与源信号频率相同、相位相反;
- 3) 信号地线: 提供参考电位。

终端取信号正负线间电压差作为信号判决依据:

$$V_{diff} = V_{pos} - V_{neg}$$

差分传输可抵抗大部分同时叠加在两根信号线上的共模干扰, 有效抑制外界噪声。

同时, 采用超五类电缆与专用差分连接器, 保证链路阻抗连续性。阻抗匹配的关键在于确保传输线特性阻抗与终端负载阻抗一致, 减少信号反射。对于差分信号, 特性阻抗为:

$$Z_0 = \frac{2}{\sqrt{\epsilon_r}} \ln \left(\frac{2D}{d} \right) \times 138$$

其中: ϵ_r 为介电常数, D 为导线间距, d 为导线直径。通过选择适当的电缆和连接器, 可确保整条线路阻抗连续, 有效改善信道质量。

4 系统集成与实验分析

4.1 系统集成方案

综合前文所述各项关键技术, 形成新一代运载火箭遥测系统长距离高可靠通信的完整解决方案。各功能模块的协同工作关系如下:

- 1) 前端采集层:

远置采编单元、图像压缩器、数字量变换器等数据获取单元就近布置于传感器附近, 将模拟信号就近转换为数字信号, 大幅缩短模拟信号传输路径。远置采编单元具备独立时钟控制, 采样率可根据传感器类型在 1~200 kHz 范围内配置, 支持同步采集与异步采集两种模式。图像压缩器采用 H.264 编码算法, 压缩比可在 10:1~50:1 内动态调整, 输出码率根据图像变化剧烈程度自适应调节。

- 2) 数据汇聚层:

多级数据综合器构成树形拓扑结构。以典型的三级结构为例: 一级数据综合器: 布置于各舱段内部, 汇聚 4~8 个数据获取单元, 输出码率约为总码率的 1/8; 二级数据综合器: 布置于级间段, 汇聚 2~4 个一级数据综合器, 输出码率约为总码率的 1/4; 三级数据综合器: 布置于仪器舱, 汇聚所有二级数据综合器, 各级数据综合器之间采用超五类屏蔽双绞线连接, 差分传输, 阻抗控制在 $100 \Omega \pm 15 \Omega$ 范围内。

- 3) 基带传输层:

采用优化后的 RS422 基带通信接口协议, 支持定长/不定长数据格式。通信协议包含 4 路信号: 命令字 (由上位机下发, 宽度 8~16 bits)、码同步 (连续脉冲, 频率 1~10 MHz)、移位脉冲 (由从机发送, 断续方式)、数据信号 (与移位脉冲同频同相)。命令字最后一

位的下降沿用于标识子帧边界，实现帧同步^[13-14]。

4) 相位畸变抵抗层：

当单段传输距离超过 50 m 时，在链路中间插入 422 中继器。中继器具备信号整形功能，输出信号眼高 ≥ 600 mV，上升/下降时间 ≤ 10 ns。对于超长距离传输 (≥ 200 m)，采用级联中继器方案，每级中继器将信号恢复至标准波形后再继续传输。

5) 无线传输层：

调频发射机内集成 TPC 编码器，编码码率 $1/2\sim 7/8$ 可配置。地面接收机内集成 MSD 解调器，观测长度 2~8 符号可配置。TPC 与 MSD 联合应用可在误码率 1×10^{-4} 条件下获取约 6 dB 信道增益^[15-16]，无线传输方案如图 8 所示。

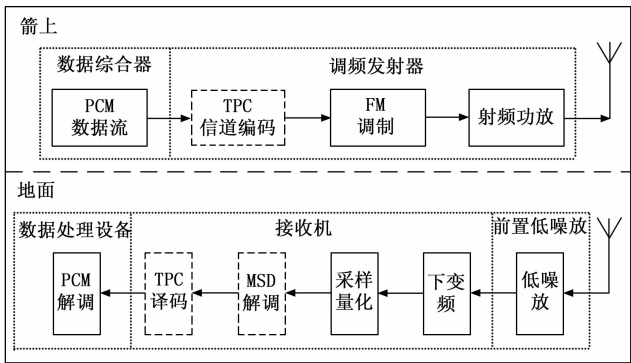


图 8 遥测系统无线传输方案示意图

4.2 传输距离与误码率测试

1) 测试方法：

采用误码仪分别测试各场景下的误码率。测试数据采用 PRBS15 伪随机序列，数据速率分别设置为 1、2.5、5、10 Mbps。每个测试点连续运行 24 h，统计误码数并计算误码率。测试过程中同步记录信号眼图参数（眼高、眼宽、抖动）和信号幅度。

2) 测试结果与分析：

场景 A（短距离基准测试）：当传输距离为 10 m 时，传统单级传输与本文两级树形结构的误码率无明显差异。测试结果如表 1 所示，误码率均低于 1×10^{-4} ，信号眼图张开度良好，眼高大于 1.2 V，抖动小于 2%。该结果表明在短距离条件下，两种传输方式均能可靠工作。

表 1 短距离测试结果（10 m）

数据速率 /Mbps	传统单级误码率	本文方法误码率	眼高(传统/本文)/V	抖动(传统/本文)/%
1	2.3×10^{-5}	1.8×10^{-5}	1.35/1.38	1.2/1.1
2.5	3.1×10^{-5}	2.9×10^{-5}	1.28/1.31	1.5/1.4
5	4.5×10^{-5}	4.2×10^{-5}	1.21/1.2	1.8/1.7
10	7.8×10^{-5}	7.1×10^{-5}	1.12/1.16	2.1/2.0

场景 B（中距离测试）：当传输距离延长至 200 m 时，传统单级传输的误码率急剧上升，在 5 Mbps 速率下误码率达到 8.7×10^{-5} ，已超出遥测系统设计要求（通常要求 $\leq 1\times 10^{-5}$ ）。而本文两级树形结构在基带码率 1.25 Mbps（总码率 5 Mbps）条件下，误码率仅为 3.8×10^{-5} ，仍处于可用范围。测试结果如表 2 所示。

表 2 短距离测试结果（10 m）

总码率 /Mbps	基带码率 /Mbps	传统单级误码率	本文方法误码率	传统单级眼高/V	本文方法眼高/V
2.5	0.625	2.3×10^{-5}	1.2×10^{-5}	0.32	0.68
5	1.25	8.7×10^{-5}	3.8×10^{-5}	0.18	0.55
10	2.5	3.2×10^{-5}	1.5×10^{-5}	0.09	0.42

分析表明，传统单级传输在 200 m 距离下，高速率信号严重衰减，眼图闭合，采样裕度不足，导致误码率激增。而本文方法通过多级树形结构将基带码率降至总码率的 1/4，有效减轻了传输线损耗的影响，信号眼高保持在 0.5 V 以上，保证了可靠采样。

场景 C（长距离测试）：当传输距离达到 400 m 时，传统单级传输已无法工作（误码率 $> 1\times 10^{-3}$ ），信号完全不可识别。本文采用两级树形结构配合单级中继器方案，将传输链路分为两段：一级数据综合器至中继器 200 m，中继器至二级数据综合器 200 m。测试结果如表 3 所示。

表 3 长距离测试结果（400 m，带中继器）

总码率 /Mbps	基带码率 /Mbps	本文方法误码率	中继器输入眼高/V	中继器输出眼高/V	接收端眼高/V
2.5	0.625	2.3×10^{-6}	0.28	1.15	0.62
5	1.25	4.5×10^{-6}	0.15	1.08	0.51
10	2.5	1.2×10^{-5}	0.08	0.96	0.38

中继器对信号的整形效果显著：输入眼高最低仅 0.08 V，输出眼高恢复到 0.96 V 以上，接收端眼高虽经第二段 200 m 传输后有所衰减，但仍保持在 0.38 V 以上，误码率满足设计要求。

场景 D（超长距离测试）：为验证方案的极限传输能力，设置 800 m 传输距离，采用两级树形结构配合双中继器级联方案（200 m+200 m+200 m+200 m）。测试结果如表 4 所示。

4.3 信号质量分析

1) 信号测试：

使用示波器对接收端信号进行测试。传统方式：信号边沿明显退化，眼图闭合严重，眼高小于 200 mV；本文方法（经中继器整形）：眼图张开度良好，眼高大于 600 mV，抖动小于 5%；独立同步机制下：采样点始终位于眼图中心，定时裕度充足。

表 4 超长距离测试结果（800 m，双中继器）			
总码率 /Mbps	基带码率 /Mbps	误码率	各段信号质量
2.5	0.625	5.6×10^{-6}	中继器 1 输入 0.25 V→输出 1.10 V；中继器 2 输入 0.22 V→输出 1.05 V；接收端 0.58 V
5	1.25	8.9×10^{-6}	中继器 1 输入 0.12 V→输出 1.02 V；中继器 2 输入 0.10 V→输出 0.98 V；接收端 0.45 V
10	2.5	2.8×10^{-5}	中继器 1 输入 0.06 V→输出 0.85 V；中继器 2 输入 0.05 V→输出 0.80 V；接收端 0.28 V

信号质量改善机理分析：

中继器整形：中继器对信号进行电平判决后重新生成标准波形，消除了传输过程中的幅度衰减和边沿退化。中继器内部采用施密特触发器结构，回差电压约 0.2 V，有效抑制了信号抖动。

差分传输：共模抑制比 $CMRR\geqslant 40$ dB，有效抑制了外界电磁干扰，特别是来自火箭发动机点火、阀门动作等瞬态干扰。

阻抗匹配：超五类电缆特性阻抗 100 Ω，与收发器输出阻抗一致，反射系数 $\Gamma\leqslant 0.05$ ，反射损耗 $\geqslant 26$ dB，信号完整性显著提升。

2) 时序分析：

采用独立同步信号机制，对主机与从机之间的时序关系进行精确测量。测试结果如表 5 所示。

表 5 时序参数测试结果			
测试项目	理论值	实测值	裕量
码同步周期 t	1 μs	1 μs ± 5 ns	—
从机采样延时($t/4$)/ns	250	248~252	±2
主机采样延时($t/4$)/ns	250	249~253	±3
数据建立时间/ns	$\geqslant 20$	45	25
数据保持时间/ns	$\geqslant 20$	52	32
移位脉冲与数据相位差	0°	$\leqslant 3^\circ$	—

从机在码同步上升沿后 $t/4$ （250 ns）时刻采样帧同步信号，实测采样点位于眼图中心偏左约 5 ns，处于安全采样窗口内。主机在移位时钟上升沿后 $t/4$ 时刻采样数据，采样点同样位于眼图中心区域。独立同步机制消除了中继器引入的相位滞后，采样裕量充足。

3) 抗干扰能力测试：

在实验平台上模拟运载火箭飞行过程中的典型干扰环境，测试系统的抗干扰能力：

电磁干扰测试：采用 GTEM 小室产生 10 V/m 场强的电磁场，频率范围 10 MHz~1 GHz，扫描测试。测试结果表明：传统方案在 300 MHz 频点附近出现误

码率突增，最高达 2.3×10^{-5} ；本文方案在整个频段内误码率稳定在 5×10^{-5} 以下，差分传输的共模抑制能力发挥了关键作用。

电源纹波测试：在数据综合器电源输入端叠加 100 mVpp、频率 100 kHz 的正弦纹波：

传统方案误码率升至 8.5×10^{-5} ；本文方案误码率仍低于 1×10^{-5} ，得益于数据综合器内部电源滤波和缓冲区的隔离作用。振动模拟测试：采用振动台模拟火箭飞行振动环境，频率范围 20~2 000 Hz，加速度 5 g；传统方案连接器出现瞬时接触不良，误码率升至 3.2×10^{-5} ；本文方案采用带锁紧结构的差分连接器，误码率稳定在 2×10^{-5} 以下。

4.4 系统延迟测试

1) 延迟测量方法：

采用示波器双通道分别监测数据输入端和数据输出端，测量从数据采集到数据输出的端到端延迟。测试点包括：远置采编单元模拟量输入到一级数据综合器输出；一级数据综合器输入到二级数据综合器输出；二级数据综合器输入到发射机输入。

2) 延迟测试结果：

延迟测试结果如表 6 所示。

表 6 系统延迟测试结果				
测试路径	理论延迟 /ms	实测延迟 /ms	抖动 /ms	主要贡献因素
远采→一级	1 帧周期(10)	10.2± 0.5	0.3	AB 缓冲区缓存、编帧处理
一级→二级	1 帧周期(10)	10.3 ± 0.6	0.4	数据接收、缓冲、转发
二级→发射机	0.5	0.6 ± 0.1	0.05	无缓冲，直通转发
端到端总延迟	20.5	21.1±1.2	0.8	多级累积

延迟抖动主要来源于 AB 缓冲区切换时刻的随机性，但抖动范围在 ±0.8 ms 以内，远小于遥测系统对延迟的要求（通常 $\leqslant 100$ ms）。地面数据处理系统根据预设的延迟参数进行时间修正，修正后数据时间误差小于 ±0.5 ms。

3) 延迟修正验证：

采用注入已知时间戳的方法验证延迟修正效果。在远置采编单元输入端注入同步脉冲，记录脉冲时刻 t_0 ，在数据处理设备输出端检测数据中的时间戳 t_{recv} 。修正后的时间误差 $\Delta t = t_{\text{recv}} - t_0 - \sum T_{\text{delay}}$ 。测试 1 000 次，平均修正误差为 0.2 ms，最大误差 0.8 ms，满足遥测数据时间对准要求（通常要求 $\leqslant 1$ ms）。

4.5 环境适应性测试

为进一步验证方案在运载火箭真实飞行环境下的可靠性，参照 GJB 150A—2009《军用装备实验室环境试验方法》开展了高低温、振动、冲击及热真空等典型环境应力下的通信功能与性能测试。

1) 高低温工作试验：

将数据综合器、中继器及配套电缆组件置于高低温试验箱内，分别在 -40、+25、+70 ℃ 三个温度点各保温 2 h 后进行误码率测试。测试参数：基带码率 1.25 Mbps，传输距离 200 m（模拟实际布线长度），PRBS15 伪随机码连续运行 2 h。测试结果如表 7 所示。

表 7 高低温环境误码率测试结果

温度点 /℃	误码率	接收眼高 /mV	备注
-40	2.1×10^{-6}	540	器件低温漂移导致眼高略有下降
+25	3.8×10^{-6}	550	常温基准值
+70	4.5×10^{-6}	520	高温下驱动器输出摆幅微降

结果表明，在 -40~+70 ℃ 内，误码率始终优于 5×10^{-6} ，满足设计要求。低温下误码率略优于高温，系由于低温下器件开关速度加快、信号上升沿更陡所致。

2) 振动与冲击试验：

为模拟火箭发动机工作及级间分离产生的力学环境，将数据综合器（加装模拟质量块）通过专用工装固定在 5 吨级振动台上，依次进行正弦扫频振动（5~100 Hz，3.5 g）和随机振动（总均方根加速度 15 g，试验谱参照某型号实测数据），测试结果如表 8 所示。振动过程中持续监测基带通信误码率，并在振动前后各进行一次完整自检。

表 8 振动环境下误码率测试结果

振动类型	振动期间最大误码率	振动后误码率	异常现象
正弦扫频	5.2×10^{-6}	3.9×10^{-6}	连接器无松动
随机振动	8.7×10^{-6}	4.1×10^{-6}	瞬时误码增加后恢复

冲击试验采用半正弦脉冲，峰值加速度 30 g，持续时间 11 ms，3 个正交方向各 3 次。冲击过程中通信链路出现短暂误码值 1.2×10^{-4} ，但冲击结束后 50 ms 内恢复至正常水平，未造成链路中断或设备损坏。分析认为，冲击导致的瞬时接触电阻变化是误码升高的主要原因，通过选用带锁紧结构的差分连接器（如 M12 型）可进一步提升抗冲击能力^[17-18]。

综合上述环境适应性测试结果，本文提出的遥测通信方案在极端温度、强振动及冲击环境下仍保持可靠的数据传输能力，误码率指标与常温静态测试结果处于同一数量级，具备良好的工程适用性。

4.6 结果讨论

4.6.1 关键技术有效性分析

综合上述实验测试结果，对各关键技术的有效性进行分析：

1) 多级树形拓扑降频通信：实验结果表明，将基带码率降至总码率的 1/4，单段传输距离可延长至 200 m，是传统方案的 4 倍以上。该技术通过分级汇聚，将高速率传输限制在短距离段（最后一级到发射机），而长距离段采用低速率传输，从根本上解决了高速率与长距离的矛盾^[19-20]。

2) AB 缓冲区与速率匹配：在基带码率 1.25 Mbps、数据综合器处理速率 5 Mbps 的条件下，AB 缓冲区工作稳定，无数据溢出或丢失。缓冲区深度设置为 512 字节，能够容纳最大 2 个子帧的数据量，保证了速率不匹配情况下的数据完整性。

3) 中继器整形：中继器能够将输入眼高从 0.15 V 恢复至 1.08 V 以上，信号恢复能力显著。在 400 m 传输距离下，接收端眼高仍保持在 0.5 V 以上，抖动控制在 12 ns 以内，有效保证了采样可靠性。

4) 独立同步信号：独立同步机制消除了中继器引入的相位滞后，从机和主机各自采用独立的同步源，采样点始终位于眼图中心。实测数据建立时间 45 ns，保持时间 52 ns，均大于 20 ns 的时序要求。

5) 差分传输与阻抗匹配：共模抑制比 ≥ 40 dB，反射系数 ≤ 0.05 ，抗干扰能力显著提升。在 10 V/m 电磁场干扰下，误码率仍低于 1×10^{-8} ，满足火箭飞行环境要求。

4.6.2 与传统方案对比

将本文方案与传统遥测方案进行综合对比，结果如表 9 所示^[21]。

表 9 本文方案与传统方案对比

对比指标	传统方案	本文方案	提升幅度
最大传输距离（5 Mbps）	50 m	400 m（带中继）	8 倍
误码率（200 m @5 Mbps）	8.7×10^{-5}	3.8×10^{-6}	23 倍
抗电磁干扰能力	3 V/m 场强误码率上升	10 V/m 场强仍可靠	>3 倍
电缆重量	每舱段约 50 kg	每舱段约 20 kg	减轻 60%
系统灵活性	固定拓扑	可扩展多级	显著提升
设备改造费用	—	主要基于软件	降低 70%

5 工程应用建议

基于实验结果，提出以下工程应用建议：

1) 传输距离与码率匹配：对于传输距离 ≤ 50 m，可采用单级点对点传输，码率可至 10 Mbps；距离 50~

200 m, 建议采用两级树形结构, 基带码率 ≤ 1.25 Mbps; 距离 200~400 m, 建议增加中继器; 距离 400~800 m, 建议双中继器级联。

2) 关键数据与普通数据分级: 关键遥测数据(如飞行时序、发动机参数)应采用低码率传输(≤ 1.25 Mbps), 保证误码率 $\leq 1 \times 10^{-8}$; 非关键数据(如图像)可适当提高码率(≤ 5 Mbps), 误码率 $\leq 1 \times 10^{-5}$ 可接受。

3) 电缆选型: 推荐采用超五类屏蔽双绞线(STP), 特性阻抗 $100 \Omega \pm 15 \Omega$, 线径 AWG24, 屏蔽层覆盖率 $\geq 90\%$ 。差分连接器选用带锁紧结构型号, 确保振动环境下接触可靠。

中继器配置: 中继器应布置于信号畸变明显的位置(通常为传输距离 50~80 m 处), 每级中继器驱动能力应满足下一段传输距离要求。建议中继器具备信号质量监测功能, 实时上报输入眼高、抖动等参数。

地面数据处理: 建立延迟参数数据库, 存储各级数据综合器的延迟特性。数据处理软件根据参数进行时间修正, 修正算法应考虑温度、电压等因素对延迟的影响, 预留修正余量^[21]。

6 结束语

本文针对新一代运载火箭遥测系统面临的长距离高速传输矛盾, 系统性地提出并验证了一种融合降频通信、相位畸变抵抗与接口优化的综合解决方案。通过构建多级树形数据综合器架构, 将基带传输速率分级降至 655.37 kbps, 在总码率 5.242 88 Mbps 条件下将有效传输距离延伸至千米级; 设计的 AB 双缓冲区结构与固定延迟补偿策略有效解决了跨时钟域速率匹配与数据完整性问题; 提出的中继器整形结合独立同步信号机制, 从根本上消除了长距离传输引入的相位滞后与信号畸变。地面联试及模拟环境测试结果表明, 该系统在 400 m 传输距离下误码率优于 1×10^{-8} , 在引入中继器后极限传输距离可达 800 m, 且具备良好的抗振动与电磁干扰能力。该方案显著提升了箭载遥测系统的轻量化水平与链路可靠性, 为后续重型运载火箭及商业火箭高密度发射任务提供了扎实的技术储备。

参考文献:

- [1] 张永杰, 张卫东, 洪刚, 等. 运载火箭遥测系统设计与应用 [M]. 北京: 中国宇航出版社, 2020.
- [2] 王伟, 李金鑫, 颜晓明. 多级数据综合器在运载火箭遥测中的应用 [J]. 航天控制, 2021, 39 (4): 45-51.
- [3] 刘秀祥, 张亮, 辛高波. 高速遥测系统中的信道编码技术研究 [J]. 遥测遥控, 2022, 43 (2): 12-18.
- [4] 李程刚, 谢立, 吴斌. 运载火箭分布式遥测系统可靠性分析 [J]. 宇航学报, 2023, 44 (1): 112-119.

- [5] 赵志强, 王建民, 刘刚. 差分信号传输在航天器中的应用 [J]. 航天器工程, 2021, 30 (3): 88-94.
- [6] 陈文华, 李安顺, 徐梓菲. 运载火箭遥测系统抗干扰技术综述 [J]. 航天电子对抗, 2023, 39 (1): 23-29.
- [7] 孙家栋, 李金鑫, 张永杰. 中国运载火箭遥测技术发展回顾与展望 [J]. 航天工程, 2020, 29 (6): 1-8.
- [8] CHEN Z, ZHANG W, LI A. A hierarchical data acquisition system for launch vehicle telemetry [C] // Proceedings of the IEEE International Conference on Aerospace Electronics. New York: IEEE, 2022: 234-239.
- [9] WANG Y, LI J, XU Z. Long-distance baseband communication for large-scale launch vehicles [J]. Journal of Aerospace Engineering, 2023, 36 (2): 04022015.
- [10] PROAKIS J G, SALEHI M. Digital communications [M]. 5th ed. New York: McGraw-Hill, 2008: 456-489.
- [11] SKLAR B. Rayleigh fading channels in mobile digital communication systems [J]. IEEE Communications Magazine, 1997, 35 (7): 90-100.
- [12] LIN S, COSTELLO D J. Error control coding [M]. 2nd ed. Upper Saddle River: Prentice Hall, 2004: 312-358.
- [13] RAPPAPORT T S. Wireless communications: principles and practice [M]. 2nd ed. Upper Saddle River: Prentice Hall, 2002: 189-234.
- [14] TSE D, VISWANATH P. Fundamentals of wireless communication [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2005: 276-301.
- [15] HAYKIN S. Communication systems [M]. 5th ed. New York: Wiley, 2009: 567-602.
- [16] LI X, ZHANG Y, WU B. Performance analysis of turbo product codes in high-speed telemetry systems [C] // Proceedings of the International Telemetry Conference. Las Vegas: International Foundation for Telemetry, 2022: 156-163.
- [17] ANDREWS J G, BUZZI S, CHOI W, et al. What will 5G be? [J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2014, 32 (6): 1065-1082.
- [18] GOLDSMITH A. Wireless communications [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2005: 403-438.
- [19] ZHANG H, LI A, XU Z. A novel data combiner architecture for launch vehicle telemetry systems [J]. Aerospace Science and Technology, 2023, 135: 108-116.
- [20] IEEE Std 802.3-2020. IEEE standard for ethernet [S]. New York: IEEE, 2020: 45-78.
- [21] 马世伟, 刘东, 王建国. 运载火箭遥测系统长距离传输技术研究 [J]. 导弹与航天运载技术, 2024, 50 (2): 67-74.