

“长征五号”火箭大容量调频遥测系统研制

林 敏, 张佳宁, 徐林丰, 祝 伟, 任 宁

(北京宇航系统工程研究所, 北京 100076)

摘 要: 遥测系统负责获取全箭飞行遥测数据, 是事后评定火箭综合性能的关键。介绍了应用于“长征五号”(CZ-5)运载火箭的新一代大容量调频遥测系统的总体方案与组成。重点针对10 Mbps高码率调频遥测关键技术应用面临的问题, 从调频遥测增强技术应用、分级基带数据综合与传输、高增益天馈系统三个方面给出了技术攻关情况与飞行试验应用验证结果。结合研制历程, 总结了新一代火箭大容量调频遥测系统的研制经验以及拓展应用情况。

关键词: 大容量; 调频; 遥测系统

中图分类号: V421

文献标识码: A

文章编号: 2096-9287(2021)04-0372-08

DOI: 10.15982/j.issn.2096-9287.2021.20210040

引用格式: 林敏, 张佳宁, 徐林丰, 等. “长征五号”火箭大容量调频遥测系统研制[J]. 深空探测学报(中英文), 2021, 8(4): 372-379.

Reference format: LIN M, ZHANG J N, XU L F, et al. Development of large capacity FM telemetry system for Long March 5 launch vehicle[J]. Journal of Deep Space Exploration, 2021, 8(4): 372-379.

引 言

“长征五号”(CZ-5)运载火箭作为中国新一代大型运载火箭, 采用全新的三型发动机及5 m大直径箭体结构^[1], 对飞行遥测的需求从中国在役火箭的遥测码率最大4 Mbps提高到了15 Mbps。基于中国航区测控能力和建设规划, 2005年“长征五号”运载火箭预发展阶段, 首次提出了10 Mbps与5 Mbps双点频高码率调频遥测数据综合与信道传输方案, 大幅提高了中国运载火箭的测量能力。

10 Mbps高码率调频遥测技术的首次工程应用, 面临无线信道传输距离下降与箭上基带数据可靠综合两方面难题, 是“长征五号”运载火箭立项以来的十大关键技术之一。经过10年的关键技术攻关与工程应用研制, 于2016年11月, 在“长征五号”运载火箭首飞中, 10 Mbps高码率调频遥测系统得到了全面验证。

1 国内外运载火箭遥测技术现状

调频遥测体制是一种非相干检测系统, 与调相体制相比, 具有很强的抗火焰、抗衰落、抗射频系统相位非线性与群路幅度非线性产生的交叉干扰的能力^[2]。因此, PCM-FM调频遥测体制一直是国内外运载火箭遥测的主要手段^[3]。

国外大型运载火箭采用以PCM-FM为主, 多种调制体制并存的遥测体制。以日本H-II A火箭为例, 箭上共装有3套遥测, 兼容1~5 Mbps码率传输容量; 以“阿里安5”(Ariane 5)运载火箭为例, 箭上共装有2套遥测, 均为PCM-FM体制, 遥测总容量约1~4 Mbps^[4]。

中国运载火箭遥测技术发展经历了引进、仿制、独立研制、提高发展四个阶段。从90年代开始, 在频率与体制上采用了IRIG106推荐的标准S波段PCM-FM调频遥测体制^[5], 逐步与国际遥测接轨形成了技术成熟、性能可靠的运载火箭遥测体系。中国现有在役运载火箭的遥测采用S频段、1 k~2 Mbps码率可编程、PCM-FM体制^[6]。各个发射场对应的航区具备双点频遥测接收能力。

在“长征五号”运载火箭研制阶段, 提出了10 Mbps高码率调频遥测方案, 成为中国新一代火箭大容量调频遥测系统。

国内外运载火箭遥测主要技术参数见表1。

2 新一代火箭大容量调频遥测系统总体方案与组成

2.1 总体方案及组成

“长征五号”运载火箭遥测参数大于5 500路, 其中总线参数约3 000路, 非总线参数约2 500路, 箭上的图

表 1 国内外运载火箭遥测主要技术参数

Table 1 Main telemetry technical parameters of domestic and foreign carrier rockets

项目	日本	欧洲	中国
火箭	H-II A	“阿里安5”	在役火箭
遥测体制	PCM-FM和PAM-FM-PM	PCM-FM	PCM-FM
参数规模	1 040路	约1 000路	不大于1 000路
点频数	3个	2个	2个
遥测总码率	不大于5 Mbps	不大于4 Mbps	不大于4 Mbps
单点频遥测码率	不大于2 Mbps	—	不大于2 Mbps
			10 Mbps

像测点共计21路。为充分利用中国航区测控资源，遥测系统采用高码率双点频调频遥测方案。具体为：

1) 10 Mbps码率点频：安装在火箭的芯一级箭体上，传输体制为PCM-FM、S波段，用于传输芯一级、4个助推、整流罩所有遥测参数，以及一级与助推发动机舱的10路图像数据。同时，完成二级部分关键参数的冗余传输。助推分离后，采用变码率技术将码率减半，完成除助推外的剩余参数以及芯一级2路图像数据的下传。

2) 5 Mbps码率点频：装在火箭的仪器舱，传输体制为PCM-FM、S波段，用于传输二级和仪器舱上的所有参数、图像数据。同时完成一级部分关键参数的冗余传输。

整个系统的组成框图见图1。

两个遥测点频相对独立设计可以提高系统的可靠性。每一个点频负责所在部段的遥测参数测量、采集、综合编帧与调制、射频功率放大。

2.2 系统的可靠性设计措施

为提高二级飞行段遥测信道传输的可靠性，对一级遥测点频资源采用了分时复用方式，具体实施方式为：

1) 在火箭一级飞行段，位于一级的10 Mbps遥测信道与位于仪器舱的5 Mbps二级遥测主信道（具体见图1中所示）工作，完成全箭遥测参数的采集与传输。

2) 仪器舱5 Mbps二级遥测备份信道（具体见图1中所示）采用一级遥测点频资源。火箭一二级分离后，通过飞行供电控制方式给10 Mbps一级遥测信道设备断电、给二级备份信道设备加电，二级备份开始工作。在二级飞行段，二级全部遥测数据通过双点频冗余传输。

为进一步提高全箭关键遥测参数获取的可靠性，在火箭一二级分离之前，采用一二级双点频对关键遥测参数进行冗余互传。具体实施方式为：

1) 在一级10 Mbps数据综合环节，将一级关键遥测参数挑路形成规定的帧格式传输给二级数据综合环节，进入二级遥测数据流，通过二级遥测信道传输到地面。

2) 在二级数据综合环节，将二级关键遥测参数进行挑路形成规定的帧格式传输给一级数据综合环节，进入一级遥测数据流，通过一级遥测信道传输到地面。

遥测码率提高到10 Mbps，相比2 Mbps遥测系统，信号码元宽度变窄，多径效应对无线信号的可靠接收影响更为严重。尤其当火箭在密闭厂房或发射塔架工况下进行无线测试时，箭上无线遥测信号在传输过程中，电磁波会因周围建筑物而发生反射、绕射和散射等情况，地面站实际接收到的信号存在严重的码间干扰，致使误码率增大，表现为遥测数据丢帧现象，无法稳定锁定。为提高地面测试阶段遥测数据的可靠获

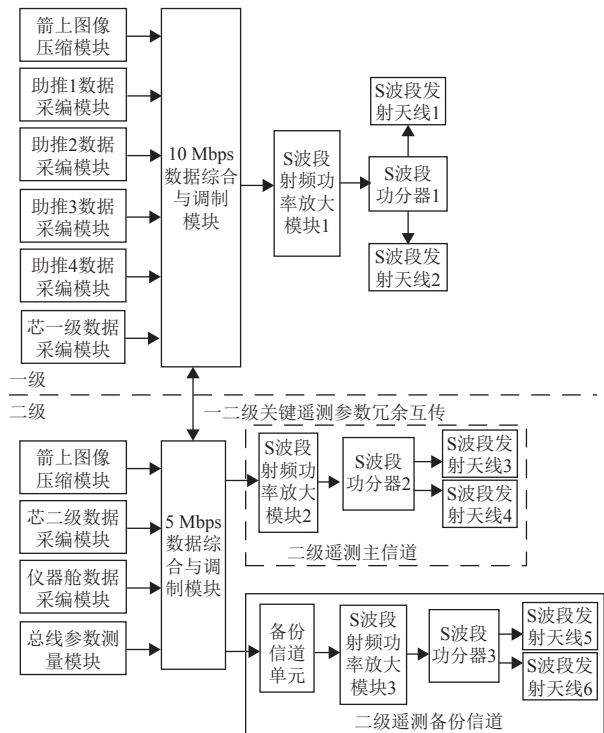


图 1 遥测系统组成示意图

Fig. 1 The diagram of LM-5 telemetry system composition

取,箭上形成的10 Mbps与5 Mbps PCM数据流在进入无线信道的同时,将其以有线形式传输到地面,提高火箭在地面测试阶段以及射前阶段遥测数据的可靠获取以及判决。

PCM有线传输组成见图2。

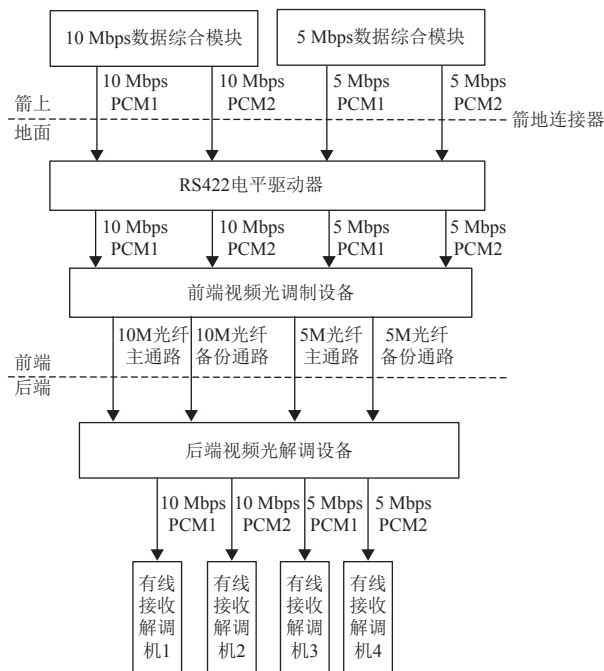


图2 PCM有线传输组成

Fig. 2 PCM wired transmission composition

箭上一二级数据综合模块综合编帧后形成10 Mbps与5 Mbps高码率PCM数据流后,分别输出2路并通过箭地连接器到RS422电平驱动器。

图中RS422电平驱动器用于RS422电平整形与箭地“信号地”的隔离;前端视频光调制设备用于将PCM信号调制成光信号;后端视频光解调设备用于将光信号解调为PCM信号;有线接收解调机用于将PCM信号解调恢复为原始遥测数据。

3 新一代火箭大容量调频遥测系统关键技术攻关与工程应用

3.1 10 Mbps高码率遥测技术应用面临的问题

与传统2 Mbps码率遥测系统相比,高码率遥测系统需要解决两方面问题^[7]:

1) 高码率下无线信道的传输,即在现有航区地面测控站接收天线口径及箭上发射功率不变的条件下,满足无线信道的作用距离。

2) 高码率下基带信号的可靠传输及综合,即从数据采集编环节到数据综合环节之间的基带信号可靠传输

及综合编帧方法。

3.2 调频遥测增强技术应用

在PCM-FM体制下,遥测码率由2 Mbps提高到10 Mbps后,在箭上发射设备及航区测控设备天线口径不变的条件下,遥测信道增益降低7 dB^[8],相应的无线作用距离下降到2 Mbps的63%,相当于测控作用距离下降63%。

综合考虑海南文昌发射场为邻海发射场、中国海上测控资源实际情况,在传输体制PCM-FM、箭上发射机功率、航区地面站接收天线口径不变的情况下,“长征五号”火箭遥测系统采用调频遥测增强技术^[9-10],将Turbo乘积码信道编码技术(简称TPC编码)及多符号检测技术(简称MSD检测)应用到调频遥测系统中。

具体的系统应用模式见图3^[11]。

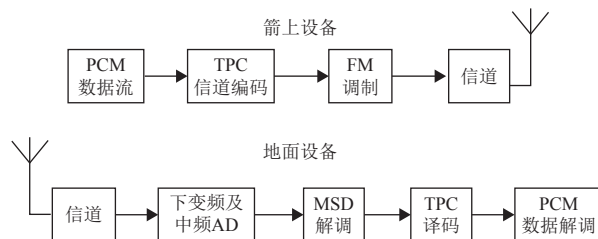


图3 调频遥测增强技术应用模式

Fig. 3 Application mode of FM telemetry enhancement technology

由图3知,调频遥测增强技术应用过程为:

1) 箭上形成10 Mbps PCM基带数据流后,先进行TPC信道编码,再经过FM调制变为70 MHz中频信号,70 MHz中频信号经信道模块进行二次变频和功率放大后,由天线将遥测信号发射出去。

2) 地面接收到无线信号后,将S波段遥测射频信号下变频为70 MHz中频信号,并完成中频数字采样,采用MSD方法对70 MHz中频信号进行解调后,再进行TPC译码,最后通过PCM解调恢复出箭上原始数据^[12-13]。

将TPC与MSD技术组合应用到遥测PCM-FM信道后,在占用125%的系统信道带宽、 1×10^{-4} 误码率下,相对于传统FM解调技术接收机可以获取不小于6 dB信道增益^[14-15]。仅采用MSD解调技术, 1×10^{-4} 误码率下,相对于传统FM解调技术接收机可获得3 dB的信道增益。受限于中国海上测控资源以及无线链路余量,实际工程实施时采用了TPC与MSD组合技术。

将TPC与MSD技术组合应用到调频遥测系统后,分别在码率为1 Mbps、2 Mbps、10 Mbps下,从传统FM调频系统、采用MSD解调技术、采用TPC与MSD组合技术3方面,对比实测了性能。具体对比曲线见图4。

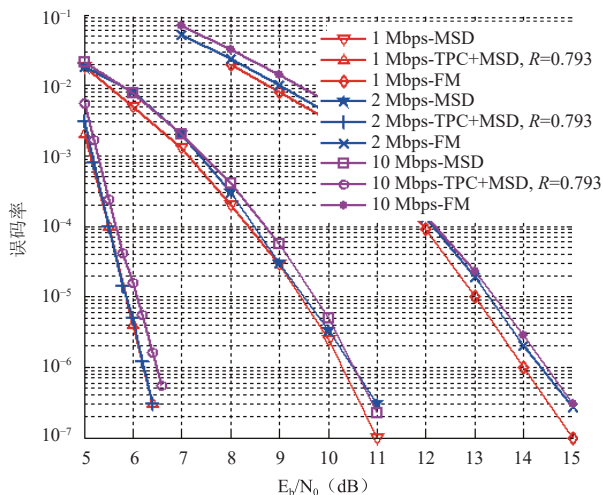


图4 TPC与MSD技术组合应用实测性能曲线

Fig. 4 Measured performance curve of combined application of TPC and MSD technology

图4中,横坐标为 E_b/N_0 (dB),纵坐标为误码率。为实现上述指标,综合考虑系统性能与硬件复杂度,采用了以下技术:

1) 综合考虑增益性能、编码效率和实现复杂度,箭上采用扩展汉明乘积码。

2) 对70 MHz中频信号进行解调时,应用非相干最大似然序列检测算法,对相邻5个码元进行联合判决。

3) 采用延迟锁定符号定时同步技术,对经数字下变频的PCM-FM基带信号直接进行处理,精确获取符号定时误差,大幅度地降低符号定时捕获和跟踪门限。

4) 采用平衡检测技术,对AD采样后的中频PCM-FM信号直接进行处理,精确获取载波多普勒误差,使得载波捕获和跟踪的门限更低,精度更高。

5) TPC译码时,采用基于CHASE的软入软出迭代译码算法,基于FPGA实现,增加并行度,充分获取编码增益。

3.3 分级基带数据综合技术

基带数据综合是将遍布在火箭各个部位的遥测参数可靠地采集与传输,并形成便于天地通信与处理的遥测数据流。

考虑到系统使用灵活性以及飞行数据对比判读需求,基带数据综合方案设计时应确立如下几个原则:

- 1) 全箭的遥测帧周期必须相同;
- 2) 各个采编单元的工作码速率可以依据系统需求进行任意设计;
- 3) 航区及地面测试时的数据处理相对简单。

在上述原则约束下,“长征五号”火箭遥测系统基带数据综合采用了基于“子帧请求”、按照“数据块”编帧的分级数据综合技术^[16-17]。具体的基带拓扑结构见图5。

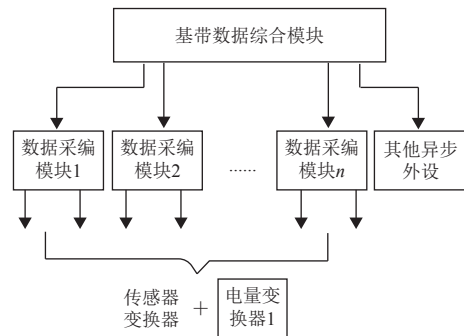


图5 基带拓扑结构图

Fig. 5 Baseband topology diagram

在图5中的数据采编模块,完成第一级数据综合,编帧模式同现有在役火箭一致,基于GJB21.2A标准推荐的IRIG固定帧格式^[18-19]。在图5中的基带数据综合模块,完成第二级数据综合形成最终的遥测总码流,具体综合过程为:

1) 数据采编模块每收到基带数据综合模块发出的一个子帧请求同步,启动本子帧数据采集,同时将上一子帧采集到的数据按照数据块形式发送给数据综合模块;

2) 基带数据综合模块收到数据采编模块发送的数据后先进行缓冲,等待下一个子帧直接编入总帧内。

因此,数据的总缓冲时间为2个子帧周期。

其中,各个数据采编模块采用就近采编原则,工作速率与其所在部段的参数总数、参数类型、采样频率等密切相关。系统按最优设计后,各个数据采编模块的工作速率与数据综合模块之间的工作速率不存在2ⁿ关系。因此,各个数据采编模块必须具有独立的时钟系统,不受数据综合模块的时钟约束,由此将带来各个数据采编模块之间异步工作的现状。

为了避免各个数据采编模块之间参数采集以及数据综合模块编帧异步带来的漂移,采用对时处理方法,将相互之间的时漂控制在一个子帧周期之内,确保全箭参数在数据综合模块一个时钟控制下进行“同源时钟控制”采编。

这种基带数据分级综合方案的优点为:

- 1) 简化了基带时序控制的复杂性;
- 2) 提高了系统编帧的灵活性;
- 3) 对技术状态的变化适应性强;
- 4) 简化了航区及地面测试阶段的数据处理。

不足之处:

- 1) 实时性稍差,比原2 Mbps系统延时 $\frac{2}{3}$ ms;与异步系统相比,在一定程度上保证了数据获取的实时性;
- 2) 每个数据采编单元具有一套帧格式,系统需要管理的帧格式状态多。

3.4 基带传输介质的优化选型

基带传输介质的性能直接影响10 Mbps高码率基带信号远距离传输时的信号完整性^[20]。

立足中国自主可控,同时适用于现有火箭遥测设备的结构形式,在标准RS422接口下,开展了适应箭载环境的基带传输介质优化选型研究工作^[21],并通过眼图直接指导传输线的选用。从工程使用角度出发,从绕包层、绝缘层、屏蔽层等传输线的结构进行了多轮优化,优化后的线缆柔软性提高、外径减小,且能在10 Mbps下可以可靠传输60 m。测试示例见图6。

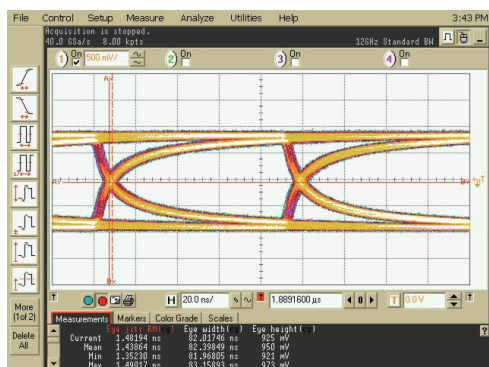


图6 眼图
Fig. 6 Eye pattern

在图6眼图中(THSPF-100线、60 m、单点单线、中间两级转接、11 MHz),眼高说明线缆对被传信号的衰减程度,眼宽与抖动大小衡量线缆对被传信号的相位畸变程度^[22]。

3.5 高增益天馈系统

中国原有发射场位于内陆地区,一般采用多个陆地测控站+箭上配置固态存储器的数据获取方案^[23],火箭直径不大于3.35 m,箭上一般采用单天线,无线信号传输链路裕度较大。

海南文昌发射场为邻海发射场,无法采用固态存储回收方案,海上测控资源有限,为实现航区可靠测控,箭上需采用全向天馈系统。

在5 m直径舱段上实现全方向辐射必须解决以下难点:安装在柱体上单元天线的位置偏差产生的程差因子带来辐射场合成过程中产生的干涉和绕射现象,会形成庞大的干涉区和盲区。尤其当天线工作频率升高,柱体的直径波长比加大,盲区和干涉区将会加大^[24]。

为消除直径增大带来的干涉区和盲区增加,实现基于5 m大直径箭体结构的全向高增益天线方向图,由一个弯曲振子天线和一个十字交叉振子天线组成天馈系统。两个天线均为线极化天线,极化方向垂直,对

称安装在与火箭箭轴垂直的同一截面。其中,弯曲振子天线在箭体上安装时,使弯曲振子中与天线底板平行的臂垂直于箭轴,具有较强的轴向辐射特点,以垂直极化分量为主,实现半球覆盖后的纵向增益 $G \geq 6 \sim 8$ dB。十字交叉振子由圆极化衍生的以水平分量为主,方向图宽。弯曲横振子天线和十字交叉振子天线组合后的能量通过不同极化相互弥补,有效消除了干涉区^[25-26]。

弯曲横振子天线的外形见图7。由于采用 $\frac{\lambda}{2}$ 振子,一端馈电,一端短路接地,双臂垂直,形成 $L1$ 和 $L2$ 最大电流同向辐射,垂直电流叠加必须超过 $\frac{\lambda}{4}$ 谐振点小天线或单极垂直振子辐射效率,而电压节点将落在 $\frac{\lambda}{4}$ 处,也即双曲振子中间部位,从而有效地抑制了电晕击穿。

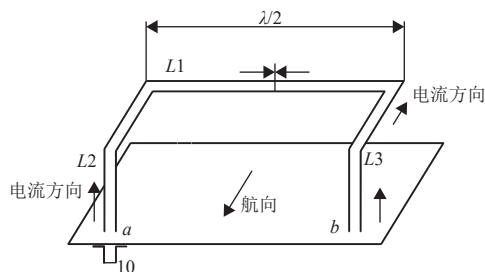


图7 弯曲振子天线外形
Fig. 7 The shape of the curved dipole antenna

交叉水平极化天线的外形见图8。十字交叉振子天线为十字交叉振子与天线底板的组合体。其中,十字交叉振子包括相互垂直的两个振子 $d1$ 、 $d2$,并且两个振子 $d1$ 、 $d2$ 通过连接柱与天线底板连接,十字交叉振子天线与天线底板另一侧的高频插座连接。经过与弯曲横振子型天线组合,达到了不同极化分量的相互抵消和补偿,实现了消除干涉的主要目的。

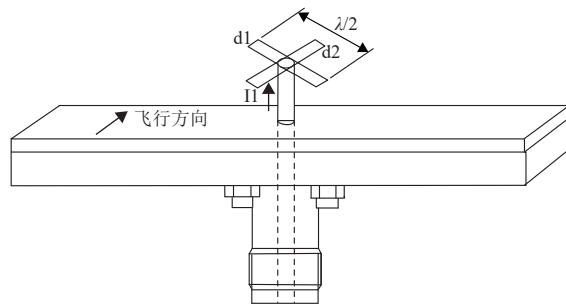


图8 十字交叉振子天线外形
Fig. 8 The shape of the crossed dipole antenna

采用上述天馈方案研制的组合天线安装在 $\Phi 5 \text{ m} \times 2 \text{ m}$ 的铝合金工装上,1:1实测方向图结果为合格率不小于97%。

图9为沿箭体周向60°极坐标增益天线方向图。

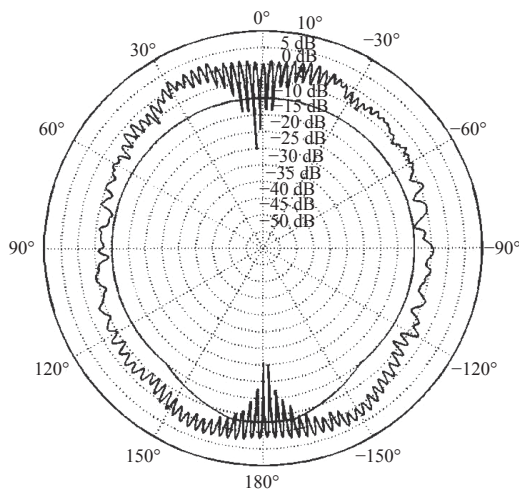


图9 二级点频60°极坐标增益天线方向图
Fig. 9 Antenna pattern

3.6 遥测同步码组的选型

遥测帧同步码组是天地之间进行通信的必要条件,直接影响遥测飞行数据接收性能,减少遥测数据丢失与误码的概率。

根据同步码组的选择原则^[27-28]以及航天飞行过程无线信号传输环境变化相对复杂,“长征五号”运载火箭10 Mbps遥测系统直接选用GJB21.2A-1992《遥测标准多路信号格式》中推荐的24 bit同步码组。

4 新一代火箭大容量调频遥测系统研制历程

新一代火箭大容量遥测系统的研制先后经历了预发展阶段、方案阶段、初样阶段、试样阶段。其中,初样研制阶段较长,为部分关键技术工程应用研究打下了较好基础。研制过程中,突破了以10 Mbps高码率遥测为代表的多项关键技术,全面验证了系统设计的正确性、合理性、先进性,系统性能技术指标满足型号总体要求。圆满完成了以动力系统试车和靶场合练为代表的多项大型地面试验。2016年11月圆满完成Y1飞行试验任务,成功获取全部遥测数据。

5 研制中存在的不足

1) 系统测试性考虑不足

主要体现在系统测试方法及手段上没有提升、测试覆盖性上也没有本质上的提升。当前的测试覆盖性主要依靠测试项目设置的全面性、合理性、规范性来保证。

大部分测试功能实现需要在系统设计初期就考虑。

2) 数据判读效率有待提高

遥测总码率提高后,箭地产生大量的测试数据,目前采用自动判读与人工判读相结合的方法,判读方法、判据的确定等还不够规范。试验后数据的快速判读、判读准确性应引起重视。这是提高测试效率重要因素之一。

6 飞行结果及应用拓展

2016年11月,CZ-5 Y1火箭首飞;2017年7月,CZ-5 Y2火箭发射;2019年12月,CZ-5 Y3火箭发射;2020年5月,CZ-5B Y1火箭首飞;2020年7月,CZ-5 Y4火箭发射;2020年12月,CZ-5 Y5火箭发射。遥测系统成功获取全部遥测数据,为评定中国新一代大型运载火箭综合性能提供了宝贵的飞行试验数据。在CZ-5 Y2飞行试验中遥测系统工作正常,完整获取的遥测数据为型号故障归零奠定了坚实基础。

“长征五号”火箭大容量调频遥测系统研制大幅提高了中国运载火箭的测量能力,研制成果已经应用到中国新一代中型运载火箭“长征七号”“长征八号”等多个型号的研制中,为后续重型运载火箭研制积累了宝贵的工程经验。

随着测控技术发展,后续系统将在优化信道资源分配与优化信道利用方面进行改进,适当降低对S波段测控资源的占用。其次,逐步推进靶场自动测发与无人值守功能的实现,提升靶场测试效率。

7 结束语

从2005年预发展阶段至今,新一代火箭大容量高码率调频遥测系统的研制,依次经历了预发展阶段的方案论证及单项技术仿真分析、方案阶段的关键技术攻关、初样阶段的关键技术全面工程应用以及试样阶段的工程应用优化,取得了具有完全自主知识产权的一系列关键技术与宝贵的工程经验。截至目前,经过“长征五号”系列运载火箭7次飞行试验的验证,基于10 Mbps高码率的调频遥测系统已经走向成熟,使中国运载火箭遥测系统整体能力得到了大幅提升,取得了良好的工程效果,对中国航天测控事业发展具有重要意义。

参 考 文 献

- [1] 李东,王珏,何巍,等. 长征五号运载火箭总体方案及关键技术[J]. 导弹与航天运载技术,2017(3):1-5.
LI D, WANG J, HE W, et al. The general scheme and key technologies of CZ-5 launch vehicle[J]. Missiles And Space Vehicles, 2017(3): 1-5.
- [2] 吴海洲,王治国,王鹏毅. 基于帧格式的调频遥测信号检测方法分

- 析[J]. 无线电工程, 2012(5): 18-20.
- WU H Z, WANG Z G, WANG P Y. Analysis on frequency modulated telemetry signal detection method based on frame format[J]. Radio Engineering, 2012(5): 18-20.
- [3] 卢欣. 基于数字波形合成的PCM/FM调制技术[J]. 遥测遥控, 2005, 26(4): 3, 5-8, 36-40.
- LU X. PCM/FM modulation based on DWS[J]. Telemetry & Telecontrol, 2005, 26(4): 3, 5-8, 36-40.
- [4] HEYDON, DOUGLAS A. Ariane 5 - ready for service[C]//AIAA International Communications Satellite Systems Conference, 16th. Washington, DC: AIAA, 1996.
- [5] Telemetry Group of the Range Commanders Council. IRIG-106, the standard for digital flight data recording[S]. [S. l.]: RCC, 2019.
- [6] 林涓, 贺峥光. 载人火箭的遥测系统[J]. 导弹与航天运载技术, 2006(4): 5-10.
- LIN J, HE Z G. Telemetry system of manned launch vehicle[J]. Missiles and Space Vehicles, 2006(4): 5-10.
- [7] 李安顺, 邢威, 谢立. 一种运载火箭高码率遥测系统设计方案[J]. 计算机测量与控制, 2015(6): 1915-1918.
- LI A S, XING W, XIE L. Design of launch vehicle high bit-rate measure system[J]. Computer Measurement & Control, 2015(6): 1915-1918.
- [8] 林敏, 蓝鲲, 蒋玉萍. 运载火箭遥测系统高码率应用技术研究[C]//2008年运载器总体技术学术研讨会. 北京: [s. n.], 2008.
- LIN M, LAN K, JIANG Y P. Research on high bit rate application technology of launch vehicle telemetry system[C]//Proceedings of the Symposium on General Technology of Launch Vehicles. Beijing: [s. n.], 2008.
- [9] 王晓波, 吴岭, 徐松艳. MSD与TPC技术在PCM-FM遥测系统中的应用研究[J]. 遥测遥控, 2007(11): 49-53.
- WANG X B, WU L, XU S Y. Application of MSD and TPC technology in PCM-FM telemetry system[J]. Telemetry and telecontrol, 2007(11): 49-53.
- [10] 顾小宇, 李景伟, 李登清. FM遥测性能增强组合技术靶场试验与应用研究[J]. 中国航空武器训练靶场, 2008(2): 1-8.
- GU X Y, LI J W, LI D Q. Research on range test and application of FM telemetry performance enhancement combined technology[J]. China Air Weapons Test Training Range, 2008(2): 1-8.
- [11] GEOGHEGAN M S. Improving the detection efficiency of conventional PCM/ FM telemetry by using a multi- symbol demodulator[J]. International Telemetry Conference Proceedings, 2000: 675-682.
- [12] GEOGHEGAN M S. Experimental results for Multi- Symbol detection of PCM/ FM[C]//Proceedings of the International Telemetry Conference. USA: [s. n.], 2001: 413-422.
- [13] GEOGHEGAN M S. Extending the range of PCM FM using a multi-symbol detector and turbo coding[C]//Proceedings of the International Telemetry Conference. USA: [s. n.], 2002: 511-519.
- [14] 郝建民. 两项技术使PCM/FM遥测系统信噪比增益提高9 dB[J]. 遥测遥控, 2004(6): 6-8.
- HAO J M. Increasing PCM/FM telemetry SNR up 9dB with two techniques[J]. Telemetry & Telecontrol, 2004(6): 6-8.
- [15] PICMG. Compact PCI specification 2.0 R 3.0[S]. [S. l.]: PICMG, 1999.
- [16] 白学勤, 解英健. 弹载遥测传输设备回顾与展望[J]. 遥测遥控, 2007, 28(S): 21-25.
- BAI X Q, XIE Y J. Retrospect and prospect of telemetry transmission equipments for rocket carrier of missile[J]. Journal of Telemetry, Tracking and Command, 2007, 28(S): 21-25.
- [17] 周彬, 郭亮杰, 田鸿瀛, 等. 我国箭载遥测传输设备发展现状及展望[J]. 遥测遥控, 2017(6): 7-9, 16.
- ZHOU B, GUO L J, TIAN H Y, et al. Development status and prospect of chinese telemetry transmission equipments on rockets[J]. Journal of Telemetry, Tracking and Command, 2017(6): 7-9, 16.
- [18] 国家军用标准. GJB21.2A-91, 遥测标准多路信号格式[S]. 北京: 国家军用标准, 1992.
- [19] 李琼海. 从IRIG106遥测标准看遥测新发展[J]. 遥测遥控, 2017, 38(1): 1-7.
- LI L H. New development of telemetry technology viewed from IRIG standard 106-15[J]. Journal of Telemetry, Tracking and Command, 2017, 38(1): 1-7.
- [20] 张立伟. 电线电缆在电磁兼容方面的设计要点[J]. 电气技术, 2010(6): 81-84, 88.
- ZHANG L W. Design key of the wires and cable in the aspect of EMC[J]. Electrical Engineering, 2010(6): 81-84, 88.
- [21] 郭巧莲, 任勇峰, 贾兴中. 长线422传输的可靠性设计[J]. 科学技术与工程, 2013(14): 4028-4032.
- GUO Q L, REN Y F, JIA X Z. The reliable design of long-distance 422 transmission[J]. Science Technology and Engineering, 2013(14): 4028-4032.
- [22] LeCory Corporation. Creating eye diagrams for low speed serial signals using Wave Scan[DB/OL]. <http://teledynelecroy.com/doc/creating-eye-diagrams-for-low-speed-serial-signals-using-wavescan>, 2011.
- [23] 张迦卫, 张会新, 杨慧. 基于LVDS的固态存储器与地面综合测试台通信系统设计[J]. 计算机测量与控制, 2015(5): 1448-1450.
- ZHANG J W, ZHANG H X, YANG H. Communication system between data memory and integrated test platform design based on LVDS[J]. Computer Measurement & Control, 2015(5): 1448-1450.
- [24] 夏国江, 韩明, 王星来, 等. 飞行器高码率网络化无盲区测控需求与技术[J]. 遥测遥控, 2018(2): 1-8.
- XIA G J, HAN M, WANG X L, et al. The requirements and technologies of spacecraft high rate TT & C network without blind area[J]. Journal of Telemetry, Tracking and Command, 2018(2): 1-8.
- [25] 钟顺时. 天线理论与技术[M]. 北京: 电子工业出版社, 2011.
- ZHONG S S. Antenna theory and technology[M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2011.
- [26] 宁高利, 王星来, 韩明, 等. 基于地面站跟踪的飞行器测控天线方向图精细化分析方法[J]. 导弹与航天运载技术, 2018(6): 116-120.
- NING G L, WANG X L, HAN M, et al. A refined analysis method of radiation pattern of the spacecraft-borne TT & C antenna based on the tracking of ground station[J]. Missiles and Space Vehicles, 2018(6): 116-120.
- [27] 谢求成, 雷仲魁. 关于N=31~64位最佳PCM群同步码的研究[J]. 遥测遥控, 1991(10): 1-17.
- XIE Q C, LEI Z K. Study on N=31~64 bit nearest PCM group synchronization codes[J]. Telemetry and Telecontrol, 1991(10): 1-17.
- [28] 谢求成, 雷仲魁. 航天遥控系统最佳地址同步码研究[J]. 遥测遥控, 1994(12): 17-25.
- XIE Q C, LEI Z K. Research on optimum address synchronization code of space remote control system[J]. Telemetry and Telecontrol,

1994(12): 17-25.

作者简介:

林敏(1974-),女,研究员,主要研究方向:运载火箭遥测与测控。

通讯地址:北京市9200信箱10分箱15号北京宇航系统工程研究所
(100076)

电话:(010)88036648

E-mail: yechengmin@aliyun.com.cn

Development of Large Capacity FM Telemetry System for Long March 5 Launch Vehicle

LIN Min, ZHANG Jianing, XU Linfeng, ZHU Wei, REN Ning

(Beijing Institute of Astronautics Systems Engineering, Beijing 100076, China)

Abstract: The telemetry system is responsible for obtaining the telemetry data of the whole rocket flight, which is the key to evaluate the comprehensive performance of the rocket afterwards. This paper introduces the overall scheme and composition of a new generation of large capacity FM telemetry system applied to Long March 5 carrier rocket. Focusing on the problems faced by the application of the key technology of 10 Mbps high bit rate FM telemetry, the technical breakthrough and flight test result are given from the aspects of the application of FM telemetry enhancement technology, the synthesis and transmission of hierarchical baseband data and the high gain antenna feed. Combined with the development process, the development experience and application of a new generation of large capacity FM telemetry system for rockets are summarized.

Keywords: large capacity; FM; telemetry system

Highlights:

- The overall scheme and composition of a new generation of large capacity FM telemetry system applied to Long March 5 carrier rocket are introduced.
- A hierarchical baseband data synthesis technique is proposed.
- A high gain antenna composed of a curved dipole antenna and a cross dipole antenna is designed.

[责任编辑: 高莎, 英文审校: 宋利辉]