

DOI:10. 20079/j. issn. 1001-893x. 220624002

低轨卫星 L 频段中继通信载荷技术研究*

刘 冕^{1,2},赵 晖^{1,2},胡一皓^{1,2},刘才瑞^{1,2},薛 晟^{1,2},王晋阳^{1,2},梁显锋¹

(1. 中国科学院国家空间科学中心,北京 100190;2. 中国科学院大学,北京 100049)

摘 要:针对深远海和陆基间高速率实时数据通信需求,完成了一种应用于低轨卫星的高集成度、低成本、低功耗 L 频段中继通信载荷的设计和实现。该中继通信载荷将通信天线、射频前端、信号处理单元、电源变换单元和接口单元等集成化设计。接收前端采用有源相控阵天线设计,发射前端设计了 GaN 功率放大器以提高接收单元 G/T 值和发射单元等效全向辐射功率 (Effective Isotropic Radiated Power, EIRP)。信号处理单元集成了零中频接收结构和直接射频调制结构,可完成反向链路 8Mb/s 载荷数据接收解调及前向链路数据处理转发的功能。载荷单机和装星后的环境模拟测试以及星地通信回路模拟测试结果表明,装星载荷可实现 L 频段卫星通信。整机质量为 12.87 kg,在工作温度 $-25^{\circ}\text{C} \sim +55^{\circ}\text{C}$ 范围内,发射端功率放大器输出大于 30 W 时,最大功耗为 91.2 W (3.04 A/30 V)。

关键词:低轨卫星;L 频段中继通信;相控阵天线

开放科学(资源服务)标识码(OSID):  微信扫描二维码
听独家语音释文
与作者在线交流
享本刊专属服务

中图分类号:TN927 文献标志码:A 文章编号:1001-893X(2024)01-0043-08

Research on L-band Relay Communication Payload Technology for LEO Satellites

LIU Mian^{1,2}, ZHAO Hui^{1,2}, HU Yihao^{1,2}, LIU Cairui^{1,2}, XUE Sheng^{1,2}, WANG Jinyang^{1,2}, LIANG Xianfeng¹

(1. National Space Science Center, Chinese Academy of Science, Beijing 100190, China;
2. University of Chinese Academy of Science, Beijing 100049, China)

Abstract: To support the real-time high data rates communications between sea and land-based systems, a highly integrated, low-cost and low-power L-band relay communication payload is designed and implemented for low Earth orbit (LEO) satellites. The relay communication payload integrates the communication antenna, radio frequency (RF) front-end, signal processing unit, power conversion unit and interface unit. The receiving front-end is designed with an active phased array antenna, and the transmitting unit is designed with a GaN power amplifier to improve the G/T value of the receiving unit and the effective isotropic radiated power (EIRP) of the transmitting unit. The signal processing unit integrates a zero intermediate frequency (IF) receiving structure and a direct RF modulation structure to complete the functions of receiving and demodulating 8 Mb/s data in the reverse link and processing and forwarding data in the forward link. The space environment simulation experiments in individual and followed with the satellite situations are done and the simulation tests of the communications link between the satellite and the ground systems are finished. The payload on board enables L-band satellite communications. Its mass is 12.87 kg and power consumption in more than 30 W RF power is 91.2 W (3.04 A/30 V) in $-25^{\circ}\text{C} \sim +55^{\circ}\text{C}$ conditions.

Key words: LEO satellite; relay communication; phased array antenna

* 收稿日期:2022-06-24;修回日期:2022-09-12
基金项目:中国科学院战略性先导科技专项(A类)(XDA22000000)
通信作者:梁显锋 Email:liangxf@nssc.ac.cn

0 引 言

最近,美国铱星系统(Iridium Satellite)建设的“下一代”卫星网络在 L 频段系统可支持终端间最大 1.5 Mb/s 数据率的通信业务^[1]。我国建设的“天通”一号卫星移动通信网络利用 S 频段链路可支持端到端之间最大 384 kb/s 的数据通信^[2]。上述卫星通信网络可在海洋作业与科学考察等领域帮助海上浮标终端或船上科考人员及时回传数据,提升工作效率与安全性。但是,我国“天通”一号卫星移动通信网络属于高轨地球同步卫星,数据链路时延大且数据传输速率过小。随着英国的 OneWeb 星座系统、美国 SpaceX 公司的 StarLink 卫星通信网络系统以及中国的“鸿雁星座”和“虹云工程”等全球低轨卫星移动互联网系统的陆续布局和在轨测试的成功^[3-4],利用这些延时损耗小、成本低的低轨通信卫星建设广域无缝覆盖的通信网络实现海陆空一体化信息传输具备可行性。这些低轨卫星网络主要采用 Ku 和 Ka 频段星地链路完成数百 Mb/s 至 Gb/s 速率的高速数据通信服务。显然,受水汽衰减等影响,Ku 和 Ka 频段的卫星通信终端如果安装在依靠蓄电池供电的海面小型移动浮标上,很难保证通信链路的稳定性,相应的卫星通信链路不适用于海面移动浮标到陆基间的高速数据通信^[5]。随着我国越来越重视在深远海开展相关的科学探测等活动,采用天基覆盖手段,则可以很大程度上解决这些无人平台与陆基站之间信息交互的实时性,从而在低成本方式下保证系统的可靠性或稳定性。

低轨通信卫星有效载荷主要由天线分系统和转发器分系统组成。转发器将天线系统接收到的上行射频信号进行放大、处理、变频及交换等操作后,再送回天线分系统下行转发至地面站。根据是否进行星上信号处理转发器可分为透明转发器和处理转发器两种。目前的卫星载荷大部分采用实现简单的透明转发器^[6],处理转发器由于技术较为复杂且依赖物理层,仅在特定的场合使用。本文设计的载荷具备信号收发和星上处理功能,是一种典型的处理转发器。

1 关键技术

1.1 关键参数

图 1 所示的通信链路中,低轨卫星上的 L 频段中继通信载荷(后文简称载荷)在卫星过境三亚等

海域时开机工作,完成既定的工作模式。初始模式载荷发射低速率卫星星历数据到海面(卫星到海面浮标端的通信链路定义为前向链路),在水深大于 1 000 m 海域的海面浮标端通信系统接收到低速率前向链路信号后即启动跟踪卫星波束,同时浮标端对星发射高码率信号(浮标到卫星载荷端的通信链路定义为反向链路)。载荷收到海面浮标端信号后,启动高速率通信工作模式,对船端转发 8 Mb/s 高速率信号。图 1 所示通信链路试验测试中,卫星轨道高度为 500 km,海面浮标和船端/陆基端跨距 500 nmile。

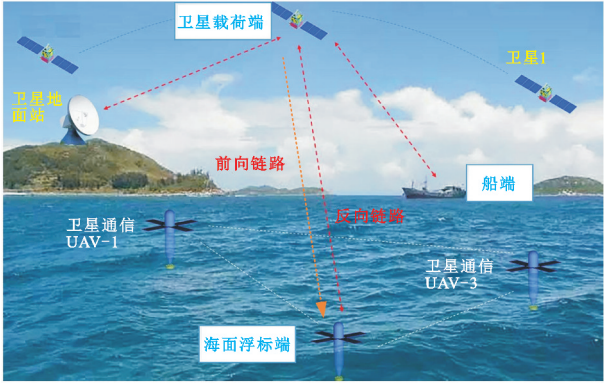


图 1 海面小型浮标-低轨卫星-船基/陆基通信链路示意图
Fig. 1 Schematic diagram of ocean buoy-LEO satellite-ship-based/land-based communication link

根据海面通信信号频率与大气等衰减特点,中继通信载荷前向与反向链路工作频段选择国际电信联盟组织(International Telecommunication Union, ITU)分配给卫星移动业务应用的 L 频段,前向链路和反向链路频率范围分别为 1 518~1 525 MHz 和 1 668~1 675 MHz,频段带宽为 7 MHz^[7]。载荷内部可实现前向与反向链路工作模式自动切换。载荷接收前端采用 L 频段有源相控阵天线,可实现±60°范围的波束扫描,提供最高 15.6 dBi 的接收天线增益。发射前端由单振子天线集成 GaN 固体功率放大器,发射大于 30 W 的 L 频段调制信号。

前向链路初始模式依据 CCSDS 132.0-B-2 蓝皮书^[8]的建议和要求,采用(255,233)里所-卷积(Reed-Solomon-Convolution coding)编码、差分正交相移键控(Differential Quadrature Reference Phase Shift Keying, DQPSK)调制体制,传输速率为 512 kb/s。前向链路和反向链路中高码率模式数据传输帧格式依据 CCSDS 732.0-B-2^[9]的建议和要求,采用(8 160,7 136)低密度奇偶校验码(Low Density Parity Check Code, LDPC)编码、DQPSK 调制

体制,数据传输速率为 8 Mb/s。

海面浮标端和船端通信系统的天线选用直径分别为 0.6 m 和 1.2 m 抛物面天线。前向链路及反向链路特性预算结果以表 1 所列浮标端和船端通信系统基本参数为依据,最终确定了星载 L 频段中继通信载荷发射单元的等效全向辐射功率(Effective Isotropic Radiated Power, EIRP)和接收单元的品质因数 G/T 值等关键参数。

表 1 浮标端船端通信系统基本参数

Tab. 1 Basic parameters of the communication system between the buoy and ship ends

参数	浮标端	船端
发射天线 EIRP/dBW	36.8	
接收天线增益 G/dBi	17	25
接收机噪声系数 F/dB	2	2
接收机 G/T 值/(dBi/K)	-9.8	-1.8

1.2 链路分析

低轨卫星轨道高度为 500 km,过境期间,海面浮标端通信系统天线和卫星之间视角大于 25°时,星地通信链路建立。中继通信载荷对海面浮标端进行数据传输时的自由空间损耗值 L_{fs1} 可由公式(1)计算得到:

$$L_{fs1} = \left(\frac{4\pi Rf}{c}\right)^2 \approx 92.44 + 20\lg R + 20\lg f \quad (1)$$

式中:R 为卫星离地球距离,单位 km;f 为传输信号频率,单位 GHz;c 为光速。因此, $L_{fs1} = 156.3$ dB。根据链路计算公式(式(2)),一定误码率门限下反向链路发射单元 EIRP 指标由海面系统接收端载噪比 C/N_0 、接收系统 G/T 和传输损耗 L 的余量等参数确定。

$$[P_{EIR}] = [C/N_0] - [G/T] + [L] + [k] \quad (2)$$

载噪比与单个比特能量与噪声功率密度之比 E_b/N_0 转换公式如(3)所示:

$$[E_b/N_0] = [C/N_0] - [R_b] \quad (3)$$

公式(2)、(3)中各参数单位均为 dB, R_b 为信号传输速率,玻尔兹曼常数 $k = 1.38 \times 10^{-23}$ J/K。

前向链路中浮标端接收端通信系统误码率 $P_e \leq 10^{-6}$ 时,接收端采用非相干解调的 E_b/N_0 解调门限理论值为 13.6 dB^[10],根据公式(3), C/N_0 门限理论值为 19.3 dB。

受高复杂海洋环境影响,为确保四级海况下星地通信链路稳定可靠,链路余量预留 10 dB,远大于航天器下行链路的最小预留 3 dB 余量要求^[11]。根

据公式(2),要建立稳定的通信链路,载荷端发射单元 EIRP 要求大于 12.3 dBW。

发射单元的 EIRP 由功率放大器的发送功率 P_t 、发射天线增益 G_t 以及馈线损耗 L_c 决定:

$$[P_{EIR}] = [P_t] + [G_t] - [L_c] \quad (4)$$

式中: P_{EIR} 和 P_t 单位为 dBm; G_t 和 L_c 的单位为 dB。

功率放大器的输出功率为 30 W,馈线损耗为 1 dB 时,发射天线的增益 G_t 最小应为 -1.5 dBi,该值对应天线方向图最差的情况。

同理可得浮标端至卫星端至船端的反向链路的链路损失计算结果,卫星载荷端接收系统的 G/T 值 ≥ -15.5 dBi/K,可确保链路余量大于 10 dB。

接收系统的等效噪声温度 T 与背景温度和天线、传输线及接收机的噪声温度等有关。载荷接收端噪声系数取 2.0 dB,将接收系统等效噪声温度 T 带入 G/T 计算,接收天线增益 G 需大于 11.9 dBi。

1.3 系统方案设计

为了覆盖不小于 1 000 km 半径范围区域,中继通信载荷的天线波束角范围需达到 $\pm 60^\circ$ 。由于星载天线设计时阵面尺寸存在大小限制,根据实际应用需求计算的链路需求中对接收性能要求较高,需优先确保接收功能。载荷接收前端方案采用有源相控阵天线接收系统。相比于传统的抛物面天线,相控阵天线的电扫描特性能更好的实现自主控制和快速空间扫描的功能^[12],且在相同直径下具有更高的接收增益,更利于轻小型化设计。

同时为了缩短研制周期和设计复杂度,减少暗室校准阵列天线的时间,发射前端设计了一个单振子天线级联输出功率大于 30 W 的 GaN 固体功率放大器,以确保充足的通信链路余量。

信号处理单元将直接射频调制单元与零中频接收单元集成化设计,完成调制解调等各项信号处理功能。

2 载荷系统实现

L 频段中继通信载荷通过优化电路和结构设计,实现了整机的轻小型化。载荷采用层叠方式装配,其结构和组成如图 2 所示。相控阵天线单元和接收放大单元在最上层,滤波器组件在中间层;信号处理单元、发射单元 GaN 功率放大器和电源变换单元放置在最下层。同时为了确保星上设备工作温度正常,在载荷外侧安装散热器。

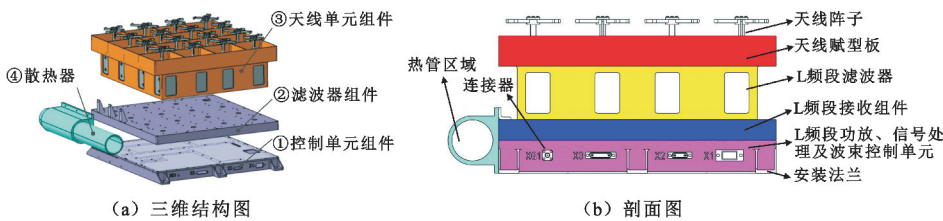


图 2 载荷结构及组成
Fig. 2 Structure and composition of the payload

载荷内部各单元电路组成框图如图 3 所示。DC/DC 电源变换单元将来自卫星配电器的 30 V 一次电压转换为系统各部分所需电压。反向链路相控阵接收天线接收海面浮标端通信系统的 L 频段射频信号,经过接收前端的低噪声放大等处理后送入信号处理单元。信号处理单元完成反向链路零中频

解调信号接收、前向星历数据的 RS-CC 编码、前向与反向链路工作模式切换、天线波束角计算和卫星星务计算机间数据接口协议等功能。完成上述功能的主芯片选用 Xilinx 公司高性能的 Virtex-5 系列现场可编程逻辑门阵列 (Field Programmable Gate Array,FPGA) 芯片。

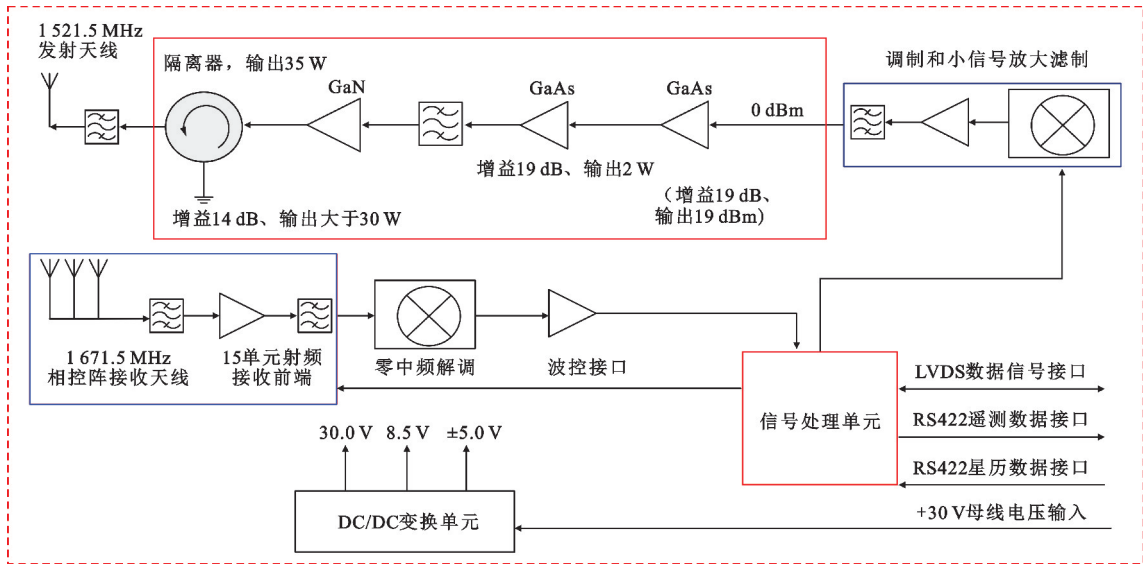


图 3 载荷各单元电路组成框图
Fig. 3 Block diagram of the circuit composition for each unit of the payload

2.1 有源相控阵接收天线

有源相控阵天线单元包括天线阵列、R 组件、功分馈电网络、波束控制单元和电源模块。相控阵接收天线构成示意图如图 4 所示。

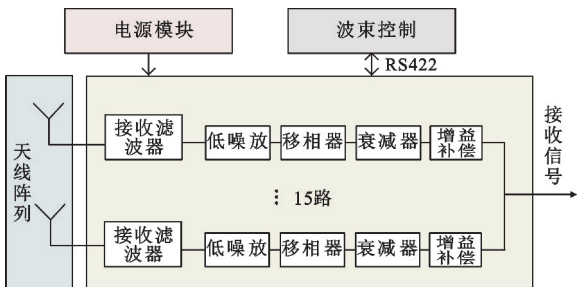


图 4 相控阵天线构成示意图
Fig. 4 Phased array antenna configuration schematic

接收天线阵元布局采用二次圆极化排列方式,收发天线阵面采用 4×4 的阵列布局。如图 5 所示,接收天线 15 个,发射天线 1 个,安装在整阵的一角。以 4 个阵元为一组,阵元依次旋转 90°,使 4 个阵元相位依次为 0°,90°,180°,270°,从而降低阵元间互耦并提高圆极化。阵元间距 $dx = 85\text{ mm}$, $dy = 85\text{ mm}$,整个阵列的尺寸为 340 mm×340 mm。由于载荷搭载于低轨卫星上,粒子空间环境较为复杂,振子采用同轴开槽巴伦实现平衡馈电,通过改变振子与底板间距来改变其波束特性。仿真结果表明,在接收频率范围内,接收阵列天线驻波比小于 1.3 dB,具备较好的匹配性能。接收天线阵面增益最大为 12.8 dBi;单振子单元增益最大为 4.5 dBi,在±60°处衰减约为 6 dB。

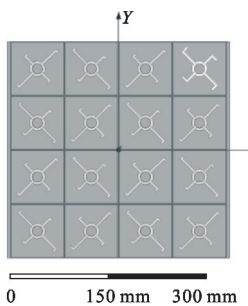


图 5 天线阵面设计图
Fig. 5 Antenna array design diagram

一个天线振子与一路射频组件组成一路接收单元,接收前端共有 15 路接收单元,每路接收单元包括滤波器、低噪放、移相器、衰减器和增益补偿放大器等。天线输入端接收到 L 频段射频信号后,由腔体滤波器进行初步的预选滤波以及对发射信号高强度隔离,再由低噪声放大器对滤波后的信号进行放大,随后通过带通滤波器抑制镜像噪声。最终信号经增益补偿放大后,通过 15 合路合成一路信号输出给信号处理单元进行下变频及非相干解调处理。15 路接收单元可提供 63 dB 增益。

接收端单个腔体滤波器插损最大值为 0.8 dB,结合第一级低噪声放大器噪声系数,最终接收链路噪声系数约为 1.43 dB。

波束控制单元通过解析波束指向信息,控制 15 路接收通道信号的相位和幅度变化,实现空间波束合成。为了提高相控阵天线波束切换的响应速度,波束角计算在信号处理单元的 FPGA 内完成。FPGA 通过坐标解算,将星历数据换算为相控阵坐标系下的波束指向方位角。已知各个阵元在天线阵列坐标系下的坐标和校准码,FPGA 根据公式(5)计

算出各个阵元所需的移相值,再将计算得到的移相值转化成对应的相位控制码,相位控制码和校准码依据数控移相衰减芯片协议形成波束控制字,FPGA 通过串口将其传输给相控阵接收天线阵列的多功能移相衰减芯片,控制波束合成实现天线对准。

$$P_{e_i} = \frac{(X_i \cos \varphi + Y_i \sin \varphi) \sin \theta}{\lambda} \cdot 2\pi \tag{5}$$

式中: X_i 为第 i 阵元中心的横坐标; Y_i 为第 i 阵元中心的纵坐标; φ 为合成波束方位角; θ 为合成波束俯仰角; λ 为信号的波长。

2.2 射频发射前端

载荷前向发射前端采用单振子天线集成固态功率放大器方案。发射天线波束角范围为 $\pm 60^\circ$,对应发射单元的 EIRP 值范围为 28.4~35.4 dBW。

L 频段固态功率放大器和天线组成的射频发射链路如图 2 所示。固态功率放大器为三级放大结构,前级小信号放大、驱动级选用 GaAs 器件,末级放大器选用高效率 GaN 功率放大器件。固态功率放大单元输出功率大于 30 W。为了避免射频发射端干扰接收端,放大器在级间设计了滤波器。放大器的输入输出端口设计了隔离器,保证了放大器的工作稳定性。最终功率放大器可将 0 dBm 调制信号放大为 35.7 W 的调制信号。高效率放大器在保证前向链路余量的同时严格控制了载荷整机功耗。

2.3 信号处理单元

信号处理单元整体电路包括时钟单元、射频正交调制单元、电源模块、数据交换接口以及零中频接收单元,具体的设计结构如图 6 所示。

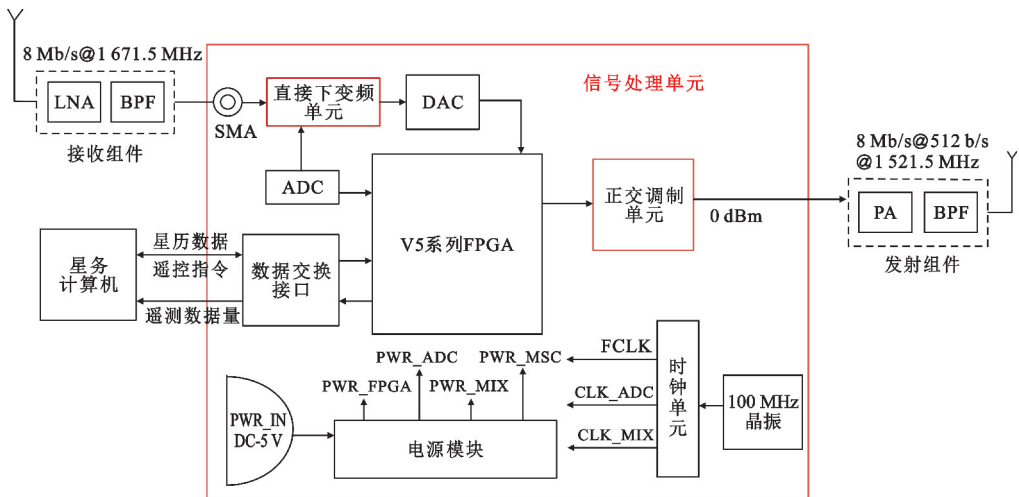


图 6 信号处理单元设计结构框图
Fig. 6 Structural diagram of signal processing unit

前向链路初始低码率模式下,信号处理单元接收卫星星务计算机通过串口传输的星历数据。星历数据在 FPGA 内进行 RS-CC 编码、加扰、组帧以及差分编码后输入内部集成有可调频率源的正交调制单元。信号以 DQPSK 直接调制的方式被调制到 1 517~1 525 MHz 的载波频率上,速率为 512 kb/s。最终正交调制单元输出 0 dBm 的调制信号至功率放大器进行放大。

反向链路中,相控阵接收前端接收 8 Mb/s 的载荷数据后,经过低噪放处理进入直接下变频单元。该单元继承成熟设计,采用零中频结构^[13],将接收到的射频信号直接下变频得到 16 MHz 的低中频信号,中频信号经 ADC 采样后输出两路差分基带信号至 FPGA 进行非相干解调处理。所选用的零中频接收芯片内部集成了可变增益放大器,通过外部控制实现数字自动增益控制 (Automatic Gain Control, AGC),动态增益范围可达 79 dB。

完成解调处理后,信号处理单元不对载荷数据进行 LDPC 译码,FPGA 内切换工作模式为前向链路高码率模式,直接将解调后的载荷数据通过正交调制单元再调制,放大转发至船端。

前向链路两种工作模式切换依据为 FPGA 是否检测到解调帧同步信号。载荷开机以初始低码率模式持续发送星历数据,FPGA 内部检测到解调模块输出的帧同步信号时证明已完成对浮标端上发的载荷数据的解调,此时载荷工作模式切换至 8Mb/s 的高码率发送模式。帧同步信号失锁后切换回初始发送模式,具体的切换流程如图 7 所示。FPGA 通过设定计数器判断载荷数据是否发完。

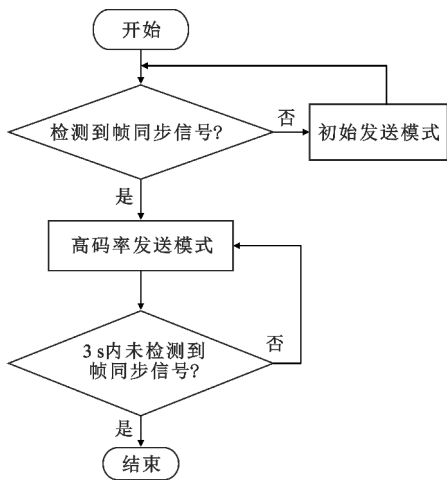


图 7 工作模式切换流程

Fig. 7 Flowchart of work mode switching process

3 关键特性结果

L 频段中继通信载荷实物照片如图 8 所示。载荷机壳密封,以屏蔽设备的电磁波辐射及外部电磁波的干扰。载荷内部电源电路及各部分功放电路在结构上都采用各自独立的电路板,安装在互相隔离的屏蔽间内,最大程度减小了各电路单元之间的干扰和功放单元对卫星系统的干扰,具有很好的电磁兼容性能。

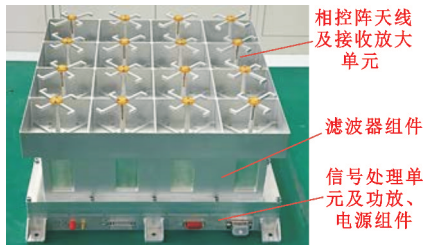


图 8 载荷实物

Fig. 8 Photo of the developed payload

3.1 天线指向性特性

天线、滤波器组装集成后在暗室中完成了校准和性能测试。通过测量每个通道的幅度和相位,利用衰减器和移相器来消除通道不一致性带来的影响。测试得到发射天线方向图如图 9 所示。发射天线增益最大为 5 dBi,波束角在 $\pm 60^\circ$ 处,增益为-1.4 dBi。

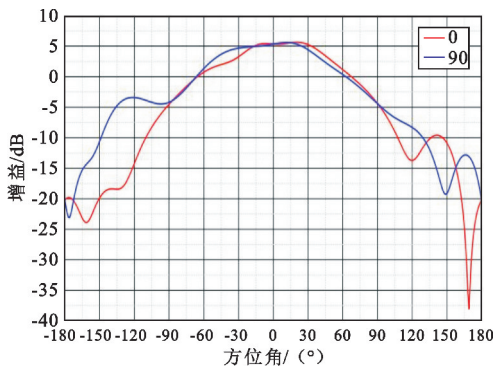
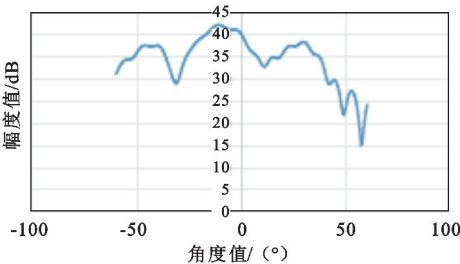


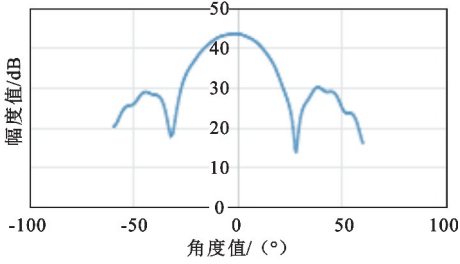
图 9 单振子发射天线方向图

Fig. 9 Radiation pattern of single radiator transmit antenna

接收阵列天线校准采用场校准法。首先测试各阵元之间的幅相误差得到校准表,波控算法程序利用校准表输出幅度相位校准码字至移项衰减芯片进行补偿,从而优化天线波束的指向精度。校准完成后再利用球面近场测试法完成天线的方向图扫描。接收天线校准后的 2D 方向图如图 10 所示。接收天线阵列合成增益大于 15.6 dBi,接收系统的 G/T 值实测值为-12.7 dBi/K,均能满足设计要求。



(a) 未校准时的 2D 方向图



(b) 校准后的 2D 方向图

图 10 接收天线阵列校准方向图

Fig. 10 Calibration direction diagram of the receiver antenna array

由图 10 可知,相控阵接收天线单元未校准时波束切面主瓣不明显,两侧旁瓣均较高;校准后,天线阵波束两侧旁瓣降低十几 dB,在波束扫描时,主瓣增益可达 43 dB 左右,进一步验证了波束控制程序的合理性。

3.2 载荷主要特性指标

在中国航天科技集团五院 503 所的帮助下,完成天线校准后对载荷整机进行性能测试,利用频谱仪对发射信号矢量误差幅度 (Error Vector Magnitude,EVM) 进行测试分析。误码率测试则借助运行在电脑端的模拟数据发送软件和数据解帧软件完成。经过测试和计算后得到载荷主要性能指标如表 2 所示。

表 2 载荷主要性能指标		
Tab. 2 Main performance indicators of the payload		
参数		实际值
尺寸(长×高×宽)/mm		399.77×340.10×176.15
谐波和带外杂散抑制/dBc	二次谐波抑制	+61.1
	三次谐波抑制	+54.4
	带外杂散抑制	> 55.5
相控阵接收天线端	天线增益/dBi	15.6
	G/T 值/(dBi/K)	-12.7
单振子发射天线端	天线增益/dBi	最大 5.3 最小-1.8(±60°)
	EIRP/dBW	最大 35.4 最小 28.4(±60°)

经测试和计算,载荷整机质量为 12.87 kg,总功耗最大值为 91.2 W(3.04A/30V),实现了低功耗和轻小型化设计。前向链路发射单元 8 Mb/s 和 512 kb/s 码率的调制信号 EVM 分别为 4.5% 和 7.6%,幅度误差分别为 3.42%(0.29 dB)和 2.57%(0.22 dB),相位不平衡度分别为 1.63°和 4.09°,满足 CCSDS 标准下幅度误差需小于 0.5 dB 和相位不平衡度需小于 5°的要求。接收单元灵敏度为 -113 dBm,动态范围大于 65 dB,误码率优于 10⁻⁵,符合中继通信链路预算指标要求。载荷其他指标见表 1。

载荷完成了正弦振动、随机振动、冲击等力学试验以及热循环和热真空试验等卫星总体要求的验收级环境试验测试。在-25℃~55℃温度范围,载荷各部分单元均正常工作。同时根据低轨卫星总体要求,载荷也随整星进行了电磁兼容试验等测试工作。

4 结 论

本文对一种低轨卫星应用的低成本、高集成度高效率 L 频段中继通信载荷的关键技术进行研究并完成了设计和实现工作。根据低轨卫星总体要求,载荷在搭载阶段完成了电磁兼容试验等测试工作,各项性能指标满足低轨卫星通信前向和反向链路的要求。载荷随卫星发射入轨后将开展海试试验测试,完成海面-低轨卫星-船基/陆基通信链路的建立、可靠通信试验。本文的研究工作为我国进一步布局建设深海-低轨卫星网络-陆基间大回路信息互耦合等信息网络等奠定了技术基础。

参考文献:

[1] National Oceanic and Atmospheric Administration. Summary of DART II performance characteristics/specifications [EB/OL]. (2008-04-01)[2022-05-25]. https://www.ndbc.noaa.gov/dart/dart2_pc_1.shtml.

[2] 李明光. 天通一号数传终端在海洋浮标上的应用[J]. 信息通信,2017(8):24-26.

[3] INIGO D P,BRUCE G C,EDWARD F C,et al. Telesat、One Web 及 Space X 三个全球宽带低轨卫星星座系统的技术对比[J]. 卫星与网络,2019(7):48-61.

[4] 赵鹏. 我国低轨卫星通信产业发展现状及趋势分析[J]. 卫星应用,2021(8):20-23.

[5] 饶浩,张岩,张津舟,等. 一种应用于海上浮标的卫星中继通信终端[J]. 电讯技术,2019,59(10):1145-1150.

[6] 张玲玲,南小回. 空间信息网络星载转发器体制研究 [J]. 山东工业技术,2016(16):126.

[7] ITU. Radio regulations [EB/OL]. [2022 - 05 - 25]. <http://www.itu.int/pub/R-REG-RR-2020/zh>.

[8] CCSDS. CCSDS TM space data link protocol;132.0-B-2[S]. Washington DC:CCSDS,2015.

[9] CCSDS. CCSDS AOS space data link protocol;732.0-B-2[S]. Washington DC:CCSDS,2006.

[10] YOU H,GARRISON J L,HECKLER G. Stochastic voltage model and experimental measurement of ocean-scattered GPS signal statistics[J]. IEEE Transaction on Geoscience and Remote Sensing,2004,42(10):2160-2169.

[11] CCSDS. Blue book; radio frequency and modulation systems-Earth stations and spacecraft;CCSDS 401.0-B [S]. Washington DC:CCSDS,2014.

[12] 陈晓洁,周海京. 宽角扫描卫星通信相控阵天线[J]. 微波学报,2014,30(S2):93-96.

[13] 宋嵩,饶浩,梁显锋. 一种宽带零中频接收前端的设

计[J]. 电讯技术,2019,59(12):1398-1403.

作者简介:

刘 冕 女,1998 年生于湖北沙洋,硕士研究生,主要研究方向为电子与通信工程。

赵 晖 男,1996 年生于河北石家庄,硕士研究生,主要研究方向为天线设计。

胡一皓 男,1998 年生于湖北宜昌,硕士研究生,主要研究方向为空间通信数字信号处理。

刘才瑞 男,1998 年生于湖北武汉,硕士研究生,主要研究方向为阵列信号处理、天线。

薛 晟 男,1998 年生于湖北武汉,硕士研究生,主要研究方向为射频信号处理。

王晋阳 男,1998 年生于山西忻州,硕士研究生,主要研究方向为数字信号处理。

梁显锋 男,1972 年生于湖北荆门,2004 年获博士学位,现为研究员,主要研究方向为卫星通信载荷及通信系统技术。