

Xiong Weiming, Xie Chunjian, Liang Xianfeng, Bai Yunfei, Qu Chenyang, Wang Zhugang, Guo Lili, Geng Hao, Deng Yongsheng, Jiang Yaxiang, Wang Wei, Cao Zhiyu, Zhao Tao. Deep space TT&C equipments of YH-1. *Chin. J. Space Sci.*, 2009, **29**(5): 490-494

萤火一号深空测控设备^{*}

熊蔚明 谢春坚 梁显锋 白云飞 屈晨阳 王竹刚
郭丽莉 耿浩 邓永生 姜亚祥 王蔚

(中国科学院空间科学与应用研究中心 北京 100190)

曹志宇 赵涛

(上海航天技术研究院)

摘要 深空测控通信是实施深空探测的关键技术, 萤火一号探测器是中国第一个深空探测器. 本文介绍了深空测控通信的特点、存在的技术困难及需要攻克的关键技术, 描述了萤火一号火星探测器的测控通信技术方案及星载测控设备的功能分配, 给出了星载测控设备的基本配置情况及主要技术指标. 萤火一号探测器的测控和数传采用一体化设计方案, 在 10 kg 重量约束条件下, 实现了上行遥控通道及下行遥测通道, 具备科学数据传输通道及测定轨信号发送的功能, 而且每个通道均具有冗余备份设备.

关键词 深空通信; 火星探测; 遥控; 遥测

中图法分类号 P 35

Deep Space TT&C Equipments of YH-1

XIONG Weiming XIE Chunjian LIANG Xianfeng BAI Yunfei
QU Chenyang WANG Zhugang GUO Lili GENG Hao
DENG Yongsheng JIANG Yaxiang WANG Wei

(Center for Space Science and Applied Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190)

CAO Zhiyu ZHAO Tao

(Shanghai Academy of Space Flight Technology)

Abstract A new upsurge of deep space exploration has arisen internationally during the 21th century. The TT&C (Tracking, Telemetry, Control) technologies of deep space are very important. The YH-1 microsatellite is the first deep space explorer of China. In this article, the deep space TT&C characteristics, the key technologies of the YH-1 TT&C sub-system are introduced. The configuration and technical performance are provided concisely. The functions of TT&C for YH-1 microsatellite are: the telemetry link (downlink: from the microsatellite to the ground station) that transmits engineering data (spacecraft and instrument health and status measurements) and science data (including image data); the telecommand link (uplink: from the ground station to the

* 国家重大项目资助

2009-06-03 收到原稿

E-mail: xwm@cssar.ac.cn

microsatellite) that transmits the control information and commands to the microsatellite. The orbit parameters can be measured by one-way tracking, one-way Doppler frequency and VLBI. The microsatellite TT&C is working of X-band. In order to simplify the TT&C sub-system of the microsatellite, a transmitter and a receiver are used, instead of a transponder. The TT&C equipments onboard are designed with redundancy, which total weight is about 10 kg.

Key words Deep space TT&C, Mars exploration, Telecommand, Telemetry

1 引言

面向太阳系行星的深空科学探测在中国刚刚起步, 萤火一号火星探测器是中国第一个真正意义上的深空探测器。实施远至火星的深空测控通信工程尚有大量技术问题需要解决^[1-5]。

在萤火一号火星探测器运行期间, 火星与地球相距 3.0~3.6 亿公里, 星载测控通信系统要在这样的超远通信距离上, 克服巨大的信号衰减和传输时延等困难, 实现深空环境下的有效通信。它的主要任务是协助地面测控站完成对探测器的跟踪测轨, 提供探测器与地面测控站之间的遥控、遥测数据传输通道。

1.1 深空测控通信的特点

按照空间数据系统咨询委员会 (CCSDS) 提出的划分标准, 距地球 2×10^6 km 以内活动的航天器都将在地球引力作用下环绕地心飞行, 不属于深空任务, 只有在距离地球大于 2×10^6 km 的轨道上执行的任务才属于深空探测。与地球轨道卫星相比, 人类开展深空探测活动将面临以下主要技术困难。

- 随着探测器运动距离的增大, 无线电波信号损失明显增加, 如环绕火星轨道与地球同步轨道相比较信号衰减增加了 80 dB, 必须在通信链路设计上设法进行补偿。
- 因为无线电波的传播速度有限, 信息传输的单程时延将增加到几分钟甚至几十分钟, 一切追求实时响应的控制操作都不可能实现, 要求深空探测器必须具有自主控制能力。
- 在地球轨道测量中常用的单脉冲测角方法, 因其测角精度低不能作为定位元素使用, 需研究其他新方法完成探测器的测定轨任务, 但测距和测速方法还可以使用。
- 为克服地球自转对探测器测控弧段的影响, 需要在全局陆基布设测控站, 以保持对探测器的连续观测。

1.2 深空测控通信关键技术

火星探测器与地球的最远通信距离达 3.6 亿公里, 为了克服巨大的信号衰减, 仅依靠提高星载设备或地面站的发射机功率和天线口径是不现实的, 必须采取综合技术措施来解决, 以确保探测器与地面之间的有效通信。通常可以采用以下技术措施。

- 加大深空站和探测器的天线口径, 以增加信号接收面积。地面站采用口径达 35 m 以上的天线, 星上采用口径 1.0 m 以上的天线。
- 提高射频频段, 以改善天线性能。采用 X 波段射频, 链路增益比 S 波段提高 11 dB; 如果采用 Ka 波段射频, 链路增益比 X 波段提高 12 dB。
- 降低接收系统噪声温度, 以提高接收信号 P_r/N_0 值。探测器上接收机采用高性能低噪声放大器; 地面站采用致冷低噪声放大器, 要求地面站接收系统 G/T 值达到 50 dB/K 以上。
- 采用信道编码技术, 以获取编码增益, 降低解调门限值。例如, 利用卷积码与 RS 码级联, 在误码率为 10^{-5} 条件下, 使解调门限 E_b/N_0 从 9.6 dB 降低到 2.6 dB。
- 利用信源压缩技术, 以降低图像数据传输速率。如采用小波变换技术, 实现图像数据压缩率达到 1:16。
- 提高地面站及星载设备的频率稳定度及准确度, 保证接收机在弱信号条件下正确捕获与跟踪载波频率、实现低码速率数据的解调。
- 采用数据存储转发技术, 在星上设置大容量数据存储器, 缓存高速科学探测数据, 一方面保证科学数据的完整性, 另一方面适应低速下行数据传输通道的工作状况, 从而减轻有效载荷对数据通道传输码率的需求压力。

2 萤火一号测控通信方案

测控通信是萤火一号火星探测器的重要分系统,在执行科学探测任务期间需要完成遥控指令接收、遥测数据传输、科学数据传输、测轨信标发送等任务。

萤火一号探测器与地面系统的无线链路连接通过星载测控通信设备来实现,从图1可以看出萤火一号探测器与地面系统的关系,萤火一号火星探测器在地面系统的支持下,完成火星科学探测任务。

地面系统包括三类地面站: 遥控数据发送站、遥测数据接收站、VLBI 信标接收站。相应地,萤火一号探测器与地面系统之间设置了三个微波无线电通道: 地面站到探测器的上行遥控通道、探测器到地面站的下行遥测通道、探测器到地面站的 VLBI 信标通道。这三个通道除了具备无线电信号物理链路以外,遥控、遥测通道还需要具备数据传输协议。

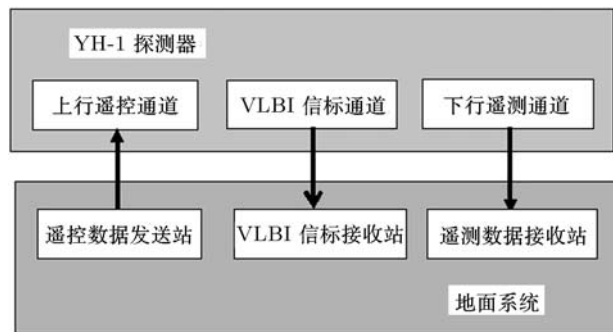


图1 萤火一号火星探测器与地面站之间的通信链路

Fig.1 Communication links between the ground station and YH-1 microsatellite

在与 Phobos-Grunt 探测器分离之前,萤火一号探测器的轨道参数由俄罗斯提供,在与 Phobos-Grunt 探测器分离之后,萤火一号探测器的轨道参数通过地面 VLBI 测量网与单程 Doppler 方式,由中国地面测控系统来实现探测器轨道测量^[6]。VLBI 测轨是多站测量模式,通常要求同时有 3~4 站参加,测量探测器在垂直于视线方向上的二维空间位置和速度; Doppler 方式是单站测量,测量探测器在视线方向上的速度,通过动力学方法确定探测器轨道。

卫星平台及科学探测要求数据传输的基本指标是,上行指令码速率在 10 bit/s 量级,误码率在 10^{-5} 量级;下行数据码速率在 1000 bit/s 量级,误码率

在 10^{-5} 量级。

为了实现地面站与萤火一号探测器之间的测控通信,需要星载设备与地面站设备达到的主要技术指标如下。上行遥控链路: 地面站等效全向辐射功率 (EIRP) 为 137 dBm (最小值), 星载接收机解调灵敏度为 -140 dBm (最低要求), 信道传输码速率为 7.8 bit/s , 链路余量为 6 dB 。下行遥测链路: 星载发射机等效全向辐射功率 (EIRP) 为 72 dBm (最小值), 地面站接收品质 G/T 值为 50 dB/K (最小值), 信道传输码速率 2048 bit/s , 链路余量 3 dB 。

3 萤火一号测控通信设备

为简化星载设备配置,对萤火一号探测器的测控和数传功能进行了一体化设计,在一条 X 波段双向通信链路上传输上行遥控指令及下行遥测数据,工程遥测数据与科学探测数据以分包方式共用一个副载波信道传输,测轨信标与遥测载波共享同一个频率,使用高稳定频率源产生测轨信标向地面 VLBI 测量网发送,完成探测器轨道测量任务。

考虑到萤火一号探测器是一颗小型卫星,载荷能力十分有限,应尽可能减小星上的设备规模。如图2所示,星载设备主要由指令接收机、遥控指令译码器、X 波段发射机、低增益接收天线、低增益发射天线、高增益发射天线、微波切换开关、高稳定频率源、信道编码器组成。通过对测控通信分系统的任务

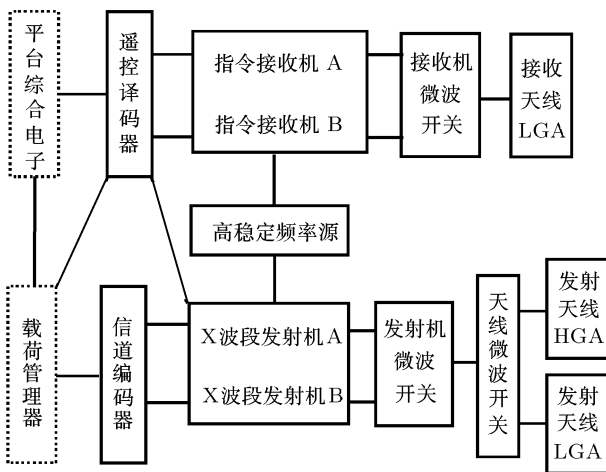


图2 萤火一号探测器测控通信设备

Fig.2 Configuration of TT&C equipments on board of YH-1 microsatellite

进行分解, 落实到具体部件上, 对星载设备部件功能设计要求如下.

① 指令接收机完成上行链路的载波锁定与数据解调, 两台接收机采用交替工作方式实现热备份.

② 遥控译码器完成上行链路的数据帧解包及译码, 生成指令控制信号和分发注入数据, 遥控译码器采用双模块热备份工作方式.

③ X 波段发射机完成下行链路的数据调制及信号放大, 提供 VLBI 测轨的信标. 两台发射机采用冷备份工作方式.

④ 高稳定频率源输出稳定度达到 10^{-12} s^{-1} 量级的频率标准信号, 为发射机、接收机提供高稳定频率信号, 主要提供 VLBI 测轨所需信标.

⑤ 低增益发射天线用于卫星对日定向及应急状态传输工程遥测参数, 高增益天线用于卫星对地精确定向后传输科学探测数据.

4 关键技术及主要指标

萤火一号探测器测控通信设备在 10 kg 重量约束条件下, 配合地面站实现了上行遥控通道及下行遥测通道, 同时具备科学数据传输通道及测定轨信号发送的功能, 而且每个通道均具有冗余备份设备. 在星载设备研制过程中需要克服以下关键技术难点, 达到所需的主要技术指标.

4.1 火星探测小型化及高灵敏度接收机技术

在萤火一号探测器的测控通信任务中, 由于 3.6 亿公里通信距离造成高达 280 dB 的巨大信号衰减, 要求指令接收机具备极高灵敏度, 需要信号解调灵敏度达到 -140 dBm 以上. 由于接收机收到的信号很微弱, 信噪比很差, 只能工作在 10 bit/s 量级的极低码率上, 上行指令的数据解调将是设备研制的一个难点.

实际上, 数据传输速率愈低, 对应的信噪比愈低, 这就要求载波锁相环的带宽愈窄, 而窄带特性将降低锁相环的动态性能; 同时, 由于探测器与地球相对运动引起的高动态 Doppler 频移 (从几 Hz/s 到几十 Hz/s), 要求载波锁相环具备良好的动态性能, 否则会引入较大的相位误差, 使 BPSK 的解调性能变差. 因此, 在低信噪比与高动态 Doppler 频移同时存在的条件下, 数据解调将面临很大的困难. 这就要求

接收机解决微弱信号检测及载波捕获、极低码率数据的解调等技术困难.

由于指令接收机研制技术难度较大, 故分别采用现代数字信号处理技术和传统模拟信号接收技术研制了两台产品. 目前, 指令接收机产品在 1.2 kg 重量、 $160 \text{ mm} \times 140 \text{ mm} \times 49 \text{ mm}$ 体积及 8 W 功耗的资源开销, 在载波使用 X 波段、码速率为 7.8125 bit/s 的条件下, 在 $-35 \sim +45^\circ \text{C}$ 范围的温度下达到载波捕获灵敏度优于 -150 dBm (数字)/ -147 dBm (模拟)、数据解调灵敏度优于 -145 dBm (数字)/ -140 dBm (模拟) 的关键技术指标, 能够满足火星探测器上行指令接收的任务要求. 指令接收机飞行件如图 3 所示.

4.2 火星探测小型化及大功率 X 波段发射机技术

萤火一号探测器下行信号发送任务全部由 X 波段发射机完成, 包括传输遥测数据和科学数据、发送测轨信标和掩星试验信标等. 发射机具有 4 种工作模式, 包括无调制载波、数据传输、VLBI 测轨信标、掩星试验信标. 3.6 亿公里的通信距离加上大量的科学数据要求发射机具有足够大的微波输出功率. 在单机重量、体积、功耗严重受限的条件下, X 波段发射机要达到小型化、大功率、高可靠及多功能的要求, 而且单机热控技术保证发射机连续工作 12 h.

目前, X 波段发射机产品技术指标达到: 单机重量 1.5 kg、体积 $160 \text{ mm} \times 140 \text{ mm} \times 48 \text{ mm}$ 、微波输出功率 10 W、直流功耗 68 W. X 波段发射机能够在 $-40 \sim +55^\circ \text{C}$ 范围的温度下正常工作, 连续开机时间大于 12 h. X 波段发射机飞行件如图 4 所示.



图 3 指令接收机飞行件

Fig. 3 FM product of the receiver on board

4.3 火星探测集成化及小型化遥控指令译码器技术

为了完成地面上行遥控指令的译码及执行,在萤火一号探测器上配置了遥控译码器,该设备完成上行数据帧的解帧译码,产生直接遥控指令控制信号,完成相关间接遥控指令和数据注入的分发;从指令接收机输入数据帧、输出数据到载荷数管计算机及综合电子计算机,接收从载荷数管、综合电子计算机发回的间接指令并产生相关指令控制信号。

在单机重量、体积、功耗严重受限的条件下,为了实现上述功能要求,遥控指令译码器必须实现小型化、低功耗、高可靠、多功能,采取相关措施如下。

①采用高集成度的现场可编程阵列 (FPGA) 超大规模电路技术,把上行数据解帧、指令译码、指令控制脉冲信号产生、数据传输接口等功能,全部用单

片 FPGA 实现,大大压缩了遥控指令译码器电路板规模,达到了火星探测器使用要求。

②遥控指令译码器在同一块电路板上实现双冗余功能模块,两套译码器电路处于热备份工作状态,可以相互监控,工作互补,大大提高了遥控指令译码器的工作可靠性。

目前,遥控指令译码器产品技术指标达到:单机重量 1.0 kg,体积 230 mm×230 mm×20 mm,直流功耗 6 W,具备执行 45 条指令及注入数据的能力。遥控指令译码器飞行件如图 5 所示。

5 结语

萤火一号探测器测控通信系统的设计与实施,将提高中国在深空测控、测轨与定轨及数据传输的工程实施能力,为今后独立自主开展火星等行星的深空探测工作奠定了良好的技术基础。

参考文献

- [1] Liu Jiaxing. Features and main technical issues in deep space TT&C and telecommunication systems [J]. *Chin. J. Space. TT&C Tech.*, 2005, **24**(6):1-8. in Chinese (刘嘉兴. 深空测控通信的特点和主要技术问题 [J]. 飞行器测控学报, 2005, **24**(6):1-8)
- [2] Guo Lihong. An Introduction for DSN development of ESA and NASA [J]. *Chin. J. Space. TT&C Tech.*, 1999, **18**(3):56-59. in Chinese (郭丽红. ESA 及 NASA 测控通信网最新发展简介 [J]. 飞行器测控学报, 1999, **18**(3):56-59)
- [3] Shi Shuji. Deep space exploration with TT&C technology [J]. *Chin. J. Telecomm. Tech.*, 2001(3):1-4. in Chinese (石书济. 深空探测与测控通信技术 [J]. 电讯技术, 2001(3):1-4)
- [4] Li Ping, Zhang Jisheng. The development and status of the TT&C and telecommunication technology of Russia [J]. *Chin. J. Telecomm. Tech.*, 2003(4):1-8. in Chinese (李平, 张纪生. 俄罗斯深空测控通信技术的发展及现状 [J]. 电讯技术, 2003(4):1-8)
- [5] Wu Ling. The development route of deep space TT&C equipments in China [J]. *Chin. J. Spacecraft TT&C Technology*, 1999, **18**(1):64-70. in Chinese (吴岭. 我国深空测控设备的发展途径探索 [J]. 飞行器测控学报. 1999, **18**(1):64-70)
- [6] Yu Yinong, Li Haitao, Li Guomin. Principle and realization of broadband VLBI [J]. *Chin. J. Telecomm. Tech.*, 2002(3):5-8. in Chinese (于益农, 李海涛, 李国民. 宽带 VLBI 的原理与实现 [J]. 电讯技术, 2002(3):5-8)

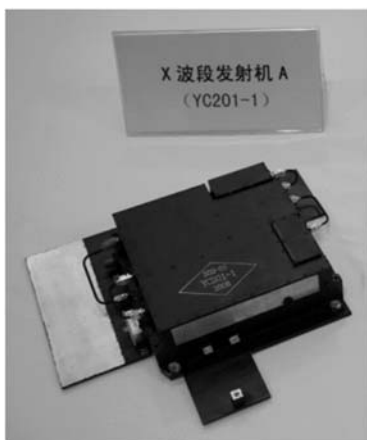


图 4 X 波段发射机飞行件

Fig. 4 FM product of the transmitter on board



图 5 遥控译码器飞行件

Fig. 5 FM product of the command-detector on board