

HJ-1-C 卫星合成孔径雷达载荷的设计与实现

禹卫东* 杨汝良 邓云凯 赵凤军 雷宏

(中国科学院电子学研究所 北京 100190)

摘要: HJ-1-C 是我国环境与灾害监测小卫星“2+1”星座中的一颗合成孔径雷达(SAR)卫星,工作于 S 波段,具有 5 m 分辨率。SAR 载荷采用网状反射面天线和大功率放大器方案,具有重量轻、效率高的特点,适合于小卫星平台。目前 HJ-1-C 卫星已在轨运行,获得我国首批 S 波段星载 SAR 图像,图像质量高,地物信息丰富,表明 SAR 载荷的设计合理,试验和测试充分。HJ-1-C 卫星将为我国减灾和环境应用发展做出贡献。该文将对 HJ-1-C 卫星 SAR 载荷的设计和研制进行全面介绍,包括其主要功能和技术指标,各部分的设计,以及研制、测试和试验工程,最后给出其在轨获得的图像。

关键词: HJ-1-C 卫星;合成孔径雷达(SAR);载荷设计;测试试验;在轨运行

中图分类号: TN958

文献标识码: A

文章编号: 2095-283X(2014)03-0256-10

DOI: 10.3724/SP.J.1300.2014.14020

The Load Design and Implementation of HJ-1-C Space-borne SAR

Yu Wei-dong Yang Ru-liang Deng Yun-kai Zhao Feng-jun Lei Hong

(Institute of Electronics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

Abstract: HJ-1-C is a Synthetic Aperture Radar (SAR) satellite in the Constellation of “2+1” for China environment and disaster monitoring. It works at S-band with a resolution of 5 m. SAR payload uses a reflector antenna and a high-power concentrated transmitter. Its light weight and high efficiency is very suitable for a small satellite platform. Now HJ-1-C satellite has been launched into orbit and has acquired Chinese first S-band SAR images from space, which demonstrate excellent quality and rich information about scenes imaged. This success verifies our design, testing and experiment work on the payload. With its following operation, HJ-1-C satellite is expected to make a great contribution to the applications of environment protection and disaster monitoring in China. This paper introduces the design and development of HJ-1-C SAR payload, present its main parameters and performance, describes its device details and its manufacture, testing and experiment process. Some images acquired in the orbit are showed.

Key words: HJ-1-C satellite; Synthetic Aperture Radar (SAR); Payload design; Testing and experiment; Operation in orbit

1 引言

1.1 背景

环境与灾害监测小卫星星座是我国政府规划立项的对地观测卫星系列^[1],由两颗光学卫星 HJ-1-A, HJ-1-B^[2,3]和一颗合成孔径雷达卫星 HJ-1-C 组成,简称“2+1”星座。该星座用于对我国境内的自然灾害进行监测评估,提升减灾防灾能力;同时可对我国日益突出的环境污染进行监视,为环境治理评估提供手段。其中 HJ-1-C 卫星 SAR 工作于微波 S 波段,可全天时、全天候获取地物高分辨率雷达图

像,有效补充 A, B 星受光照和天气影响的观测缺口。HJ-1-A/B/C 构成的星座可初步满足我国对环境监视和灾害监测的需求。

环境与灾害监测小卫星星座中的 3 颗卫星都采用了东方红小卫星平台 CAST2000^[4]。HJ-1-C 卫星 SAR 载荷由中国科学院电子学研究所负责抓总研制。

1.2 系统特点

SAR 是一种微波成像遥感载荷。为了获得高分辨率的 2 维(距离-方位)图像,雷达在距离向上发射宽带信号,在方位向上利用合成孔径原理进行脉冲相关积累^[5]。

HJ-1-C 卫星基于东方红公司的 CAST2000 小卫星平台,整星重量 831 kg,功率为 1280 W。为

2014-01-24 收到,2014-06-09 改回;2014-06-17 网络优先出版

国家重大专项资助课题

*通信作者:禹卫东 ywd@mail.ie.ac.cn

了适应卫星平台的轻型化和低功耗要求，SAR 载荷采用了网状抛物面天线和大功率发射机的体制。

网状抛物面天线具有重量轻、展开收拢比高的优点，已在国内外通讯卫星上得到广泛使用，前苏联和平号空间站的 SAR 探测设备就使用该型天线，以色列 2008 年发射的 TECSAR^[6]和印度 2012 年发射 RiSAT-1 都采用了网状可展开天线。通过国产化攻关，我国突破了 SAR 网状反射面天线的设计、研制、测试和试验技术，并首次将其用在 HJ-1-C 卫星上。

HJ-1-C SAR 首次在我国卫星上采用了集中式的大功率体制，峰值功率超过 3000 W，具有功率密度高、热耗集中的特点。采用了固体发射机产生大功率，发射机由 8 个固态功放模块合成，峰值输出功率大于 3000 W，效率大于 30%。

整个 SAR 载荷体制简单，结构紧凑，天线展开收拢比高，发射效率高，实现了小型化，很好地适应了小卫星平台。

2 SAR 载荷的功能和技术指标

2.1 卫星参数

HJ-1-C 卫星采用了极轨太阳同步晨昏轨道，轨道参数如下：

轨道类型：太阳同步轨道

- 轨道高度：499.226 km
- 轨道半长轴：6870.230 km
- 轨道偏心率： ≈ 0
- 轨道倾角：97.3671°
- 轨道周期：94.4540(min)
- 回归周期：31(day)
- 降交点地方时：6:00AM

2.2 雷达参数

HJ-1-C 卫星 SAR 工作于 S 波段，垂直极化，采用了 6 m×2.8 m 的网状反射面天线。雷达的工作参数见表 1。

2.3 成像性能

HJ-1-C 卫星有条带、扫描两种成像模式，其成像性能见表 2。

3 SAR 成像模式和波位设计

HJ-1-C 卫星 SAR 具有两种成像模式：条带模式和扫描模式^[7]。在缺省情况下，SAR 将工作于视角为 36° 的条带模式。

对于 25°~47° 的观测视角范围，采用机械转角和电控波束结合来实现。天线馈源在距离向采用 12 个喇叭，每相邻 4 个同时照射反射面形成一个波束，这样整个天线可以形成 9 个波束。天线转角在 25°~

表 1 HJ-1-C 卫星雷达主要参数

Tab. 1 The main parameters of HJ-1-C satellite radar

参数	数值
波段	S 波段
中心频率	3200 MHz
极化方式	垂直极化(VV)
天线形式	网状抛物面
天线尺寸	6 m×2.8 m
视角范围	25°~47°
信号带宽	60 MHz
脉冲宽度	27 μs
脉冲重复频率	2600~3700 Hz
发射机峰值功率	≥ 3000 W
接收通道噪声系数	≤ 3 dB
雷达输入动态范围	≥ 60 dB
雷达输出动态范围	≥ 35 dB
MGC/AGC 控制范围	0~50 dB
回波视频采样率	66.66 MHz
数据压缩	BAQ 8:3, 定标 8 bit 不压缩
输出数据率	< 320 Mbps
电源功耗	28 V: <200 W ; 33V: <1280 W
重量	≤ 200 kg
每圈最长工作时间	12 min
在轨寿命	3 yr

表 2 HJ-1-C 卫星 SAR 成像性能

Tab. 2 The image performance of HJ-1-C satellite SAR

参数	指标
成像模式	条带/扫描
分辨率	25 m(扫描模式, 距离向 4 视, 方位向单视) 5 m(条带模式, 单视)
成像幅宽	100 km(扫描模式, 距离向 4 视, 方位向单视) 40 km(条带模式, 单视)
NEσ ⁰	< -19 dB
积分旁瓣比	方位向: 优于 -12 dB 距离向: 优于 -13 dB
峰值旁瓣比	优于 -20 dB
距离向模糊度	优于 -18 dB
方位向模糊度	扫描模式: 优于 -14 dB 条带模式: 优于 -16 dB

47° 度之间连续可调，与 9 个波束结合可以得到大量波位。但考虑到在轨工作时应尽可能减少天线机械转动，我们只利用几个转角位置和几个波束就得到

了全观测视角的覆盖,其中采用1,3,5,7,9波束的波位称为奇数波位,共有11个;采用2,4,6,8波束的波位称为偶数波位,共有10个。奇数波位和偶数波位都可以覆盖 $25^{\circ} \sim 47^{\circ}$ 的视角范围,二者性能相当,可以根据成像区域需要选择使用。仿真分析了每

个波位的分辨率、成像带宽度、模糊比以及 $NE\sigma^0$ 等指标。以奇数波位为例,其参数性能如表3所示。

对于扫描模式,通过对上述相邻波位的组合形成更宽的成像宽度。利用偶数波位设计的扫描模式性能见表4。

表3 奇数波位下条带成像性能仿真结果

Tab. 3 The simulated system performance for strip image mode using odd-number beams

波位序号	天线转角($^{\circ}$)	波束号	中心视角($^{\circ}$)	地距分辨率(m)	AASR (dB)	RASR (dB)	成像带宽(km)	波束中心 NESZ(dB)
1	30.4980	9	26.19	6.38~5.69	-23.47	-33.92	35.55	-24.37
2	33.3105	9	28.65	5.75~5.22	-25.29	-32.80	35.80	-23.80
3	36.0352	9	31.20	5.28~4.84	-25.53	-35.16	38.01	-23.61
4	36.0352	9	34.01	4.91~4.59	-27.42	-35.92	40.94	-24.04
5	38.4082	7	36.33	4.62~4.34	-21.90	-35.84	37.66	-22.87
6	40.7813	7	38.70	4.36~4.12	-27.48	-30.50	40.68	-22.67
7	40.7813	5	40.76	4.15~3.97	-22.07	-31.89	36.44	-23.30
8	40.7813	3	42.44	4.00~3.85	-27.68	-32.61	35.69	-23.16
9	40.7813	1	44.01	3.88~3.75	-20.89	-33.82	36.19	-20.82
10	44.0332	3	45.78	3.77~3.64	-16.23	-32.38	41.21	-21.18
11	44.0332	1	47.35	3.67~3.55	-20.73	-23.78	42.24	-19.67

表4 扫描模式下各波位性能仿真结果

Tab. 4 The simulated system performance for scan image mode using even-number beams

波位序号	天线转角($^{\circ}$)	波束号	中心视角($^{\circ}$)	成像带宽(km)	地距分辨率(m)	AASR(dB)	RASR(dB)	波束中心 NESZ(dB)			
1	29.5313	8	26.42	95.89	25.18~22.69	-24.74	-33.20	-25.18			
		6	28.61						-24.23	-33.46	-26.99
		4	30.45						-18.34	-34.71	-26.43
		2	32.07						-25.51	-41.02	-25.90
2	36.0352	8	32.93	113.77	20.35~18.79	-24.94	-36.46	-23.40			
		6	35.12						-23.81	-36.46	-25.14
		4	36.96						-27.63	-32.05	-25.43
		2	38.58						-24.17	-31.86	-23.92
3	40.6055	6	39.69	95.34	17.04~16.23	-23.37	-31.53	-23.75			
		4	41.53						-27.39	-30.00	-23.97
4	44.4727	2	43.15	104.22	15.81~15.25	-23.22	-32.09	-22.41			
		6	43.55						-20.11	-29.15	-22.27
4	44.4727	4	45.39	104.22	15.18~14.66	-14.16	-31.52	-21.52			
		2	47.01						-18.69	-26.42	-20.74

4 SAR 载荷的设计

4.1 SAR 载荷组成和工作原理

HJ-1-C 卫星 SAR 载荷由中央电子设备和天线两大部分组成，如图 1 所示。中央电子设备包括 9 台分机，监控定时器、电源分配器、基准频率源、调频信号源、固态发射机、雷达接收机、数据形成器、内定标器、微波组合。天线包括反射面、波导馈线组件、转动结构、馈源组件、转动控制器、波束控制器等，以及天线压紧释放部件。

SAR 系统工作过程如下：

调频信号源产生宽带线性调频(LFM)信号，经固态发射机进行功率放大至 3000 W，通过微波组合的环形器，以及天线上的波导、馈线进入多波束馈源，然后辐射到天线抛物反射面上，通过馈源喇叭和天线机械转动位置的组合，大功率辐射信号被指向朝向不同的成像区域，视角范围为 $25^{\circ} \sim 47^{\circ}$ 。

地面反射的回波信号返回到天线，通过与发射相同的路径回到环形器，由于环形器的单向隔离作用，回波信号将进入微波组合的接收机保护开关；在接收状态，接收机保护开关为导通状态；回波信号就进入雷达接收机，经低噪声放大、下变频、中频放大、MGC 和 AGC、正交解调和视频放大，得到视频回波信号；该视频信号进入数据形成器，经 AD 采集、缓存、BAQ 压缩和打包，形成了 SAR 回波数据流；该数据流通过数传分系统传输至地面接收站。地面处理系统对回波数据进行 SAR 成像处理，就可以得到高分辨率地面场景图像。

4.2 SAR 载荷设备的设计

4.2.1 监控定时器 雷达监控定时器包括监控计算机和定时器两部分。监控计算机接收载荷下位机通过 485 总线的指令，对 SAR 分系统各部分进行配置和成像参数设置，控制整个 SAR 成像流程；同时采集 SAR 各部分的遥测参数，一方面将遥测参数上传载荷下位机，另一方面将遥测参数和工作参数送给数据形成器，数据形成器将其作为辅助数据与回波数据一起打包送数传。监控计算机的 CPU 采用 80C52，软件用汇编语言编程。

雷达监控定时器中的定时器产生 SAR 系统工作时的脉冲重复定时信号 PRF，用于发射信号、接收采集和收发转换的时序同步，成像工作时 PRF 范围为 2600~3700 Hz。定时器采用 Xilinx 公司 FPGA，通过对输入的 11.11 MHz 定时时钟进行分频和延迟，形成所需的各路 PRF。

4.2.2 基准频率源 基准频率源用来提供 SAR 系统中频本振信号(200 MHz)、射频本振信号(3000 MHz)、调频信号源 D/A 时钟和数据形成器 A/D 时钟(66.66 MHz)、定时时钟(11.11 MHz)。上述各路信号都是通过对高稳定 50 MHz 晶振产生的基准信号经倍频、分频产生，确保各信号的高度相干性，保证方位向成像性能。

4.2.3 调频信号源 调频信号源采用“基带波形存储直读法”产生线性调频信号(LFM)，即把基带 LFM 的 I, Q 两路信号数字化后存储起来，通过 D/A 读出形成基带 LFM 模拟信号，正交调制到中频，再上混频到射频，就得到射频 LFM 信号。HJ-1-C

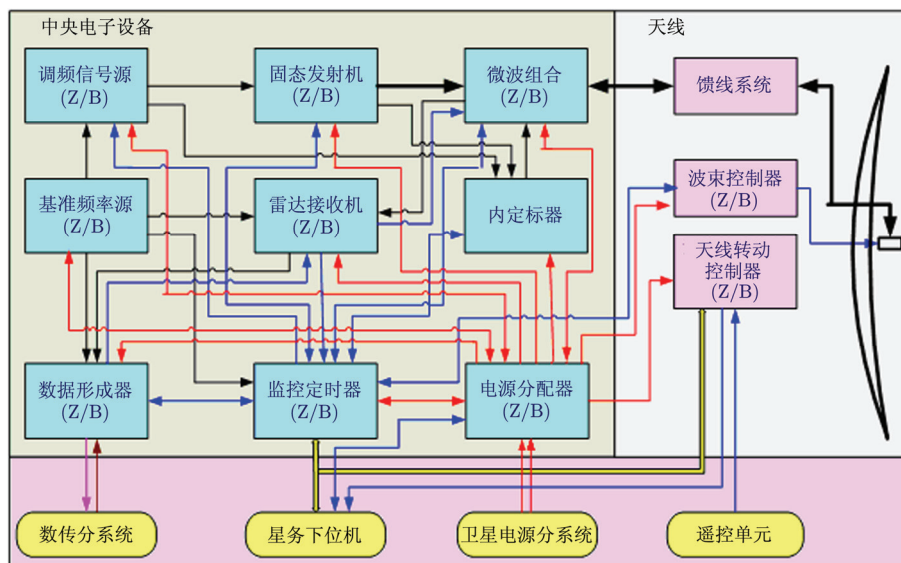


图 1 SAR 载荷组成框图

Fig. 1 The block diagram of HJ-1-C satellite SAR payload

卫星 SAR 调频信号源 LFM 信号带宽为 60 MHz, 时宽为 27 μ s, DA 变换率为 66.66 MHz, 中频为 200 MHz, 射频本振为 3000 MHz, 射频中心频率为 3200 MHz。

使用了 1 片 Xilinx 的 100 万门 FPGA XVR21000, 基带波形存储于 FPGA 内部 RAM 中。为了补偿发射、接收通道中的非线性相位误差, 对基带存储波形采用了预失真技术, 保证接收机最终输出的视频信号为理想线性调频信号, 可以直接按设计参数进行匹配压缩。通道相位误差可以从定标信号中提取。

4.2.4 雷达接收机 接收机采用传统的超外差方式, 包括射频放大和混频、中频放大和 MGC 控制、正交解调和视频放大 3 部分。射频混频的本振为 3000 MHz, 中频为 200 MHz。

整个通道增益设计为 84 dB, 噪声系数优于 1.5 dB, MGC 控制范围 60 dB, 输入动态范围优于 62 dB, P_{-1dB} 为 6 dBm。

4.2.5 数据形成器 数据形成器对接收机输出的视频回波信号进行 AD 采样, 然后进行 BAQ 压缩, 并与监控计算机送来的 SAR 载荷辅助参数复合打包, 按每个脉冲一帧的格式流送给卫星数传。

BAQ 是目前 SAR 领域最常用的一种原始数据压缩方法^[8,9], 其主要原理就是基于 SAR 回波数据局部动态范围小于全局动态范围的特点, 把回波数据沿距离向和方位向分块, 对块内每个数据进行更少位数的量化编码, 比如把原来 8 位量化的数据编码量化为 4 位或 3 位, 通常记做 8:4 或 8:3; 同时用一个均值码来表示整个块的统计特性。HJ-1-C 采用了 8:3 BAQ 数据压缩, BAQ 分块尺寸为 1024(距离向) \times 4(方位向)。

数据形成器采用 1 片 Xilinx 100 万门 FPGA 来完成 BAQ 数据压缩和打包处理, 数据输出采用两个通道, 分别对应回波数据的前半段和后半段, 每个通道都为 16 bit 的并行 LVDS 传输, 时钟为 12.5 MHz。

4.2.6 内定标器 内定标器用来对 SAR 分系统通道在轨工作的稳定性进行监测^[10,11], 包括发射信号功率和接收增益的变化。在 HJ-1-C 卫星 SAR 分系统中, 内定标器采用了光延迟定标, 把调频信号源和固态发射机的耦合输出信号通过光纤延迟后, 馈入接收通道中, 通过记录、监测该信号幅度的变化, 就可得到发射通道和接收通道的变化。延迟定标方式可以很好隔离发射信号泄露对定标信号的干扰, 提高定标精度, 但由于定标回路中包含了光纤、光电转换和放大等环节, 受环境温度影响较大, 必须

加入相应的温度补偿电路, 确保在整个温度范围内光延迟回路的稳定性。另外, 考虑到光纤受空间辐照的影响, 还对其进行了抗辐照加固措施。

内定标安排在每次成像的开始和结束, 假设成像过程功率和增益的近似线性变化, 则可以内插出每个成像时刻值。为了考察不同信号输入情况下接收机的增益情况, 定标信号采用了阶梯衰减的方式, 共有 21 个台阶, 每个台阶相差 3 dB。

4.2.7 固态发射机 发射机由输入分配器、8 个固态功放组件、输出合成器以及二次电源组成, 每个功放组件的输出功率为 500 W, 合成得到大于 3000 W 的峰值功率。卫星平台提供给发射机的输入电源为 33 V。发射机的最大占空比为 10%, 效率超过 30%。

4.2.8 微波组合 微波组合连接发射机、天线和接收机, 如图 2 所示。发射机输出的大功率信号通过微波组合进入天线, 天线接收的微弱回波信号通过微波组合进入接收机, 微波组合在发射机和接收机间起到隔离作用, 隔离度超过 75 dB, 确保大功率发射信号不会损坏接收机前端的低噪声放大器。

微波组合由环形器、波导滤波器、接收机保护开关、定标耦合器和接收机主备开关组成。环形器只允许信号顺时针方向通过, 反向隔离度大于 20 dB。接收机保护开关由三节联动铁氧体开关组成, 在大功率发射时可产生 55 dB 的隔离度; 耦合器将内定标信号耦合到接收通道中。接收通路主备切换开关可将回波信号接入主接收机或备接收机, 由同轴继电器开关实现。

4.2.9 电源配电器 配电器将卫星 28 V 电源分配给 SAR 载荷的各分机, 分机加断电由 OC 指令控制配电器中的继电器通断来实现, OC 指令由监控计算

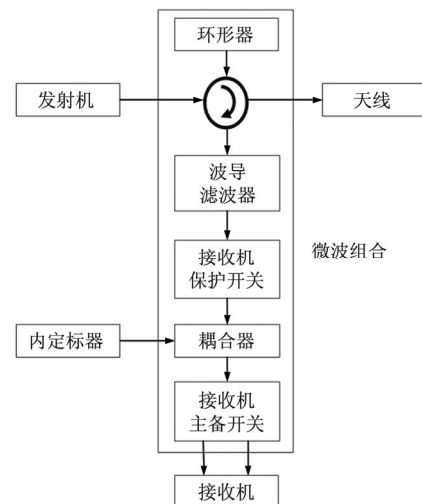


图 2 微波组合组成及连接关系示意图

Fig. 2 The block diagram and connections of microwave assembly

机或载荷下位机发出。监控计算机和基准频率源为长加电，即卫星入轨后一次开机后不再关机；其他分机只在每次 SAR 成像时开机，成像结束后关机。对于由主备冗余的分机，可以分别控制主备机的加断电。

4.2.10 天线 HJ-1-C 卫星天线的组成如图 3 所示，天线在卫星上的安装情况如图 4 所示。转动控制器和波束控制器安装于卫星舱内。

反射面组件由 375 根碳纤维可展开杆件和金属网面构成，展开后形成 6 m×2.8 m 的切割抛物面。多波束馈源馈源由 12 个喇叭组成，居于抛物面

的焦点上。输入到馈源的 3000 W 大功率微波首先被分功放成 4 份，通过 4 组“单刀三掷”电子开关切换，进入 12 个馈源喇叭中的 4 个。在 HJ-1-C 卫星中，采用了每相邻 4 个喇叭同时工作形成 1 个波束的方式，12 个喇叭共形成 9 个波束，相邻波束间的夹角为 1°左右，9 个波束可覆盖 7.6°的视角范围。喇叭和波束之间的对应关系如图 5 所示，9 个波束的方向图见图 6。波束控制器通过控制电子开关实现波束的切换，切换可以在一个脉冲重复周期内完成，满足扫描模式下波束快速切换的要求。

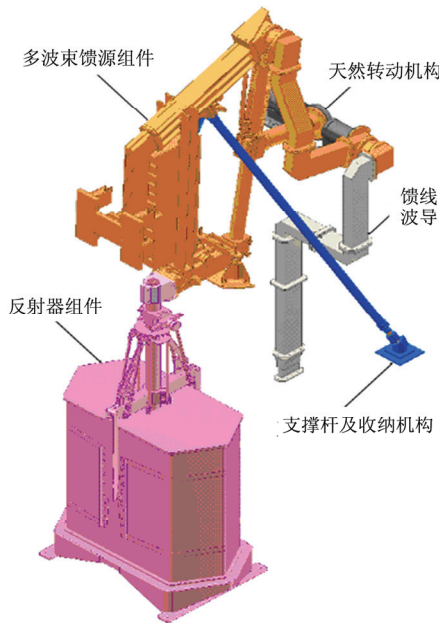


图 3 天线的组成

Fig. 3 The assembly of the antenna

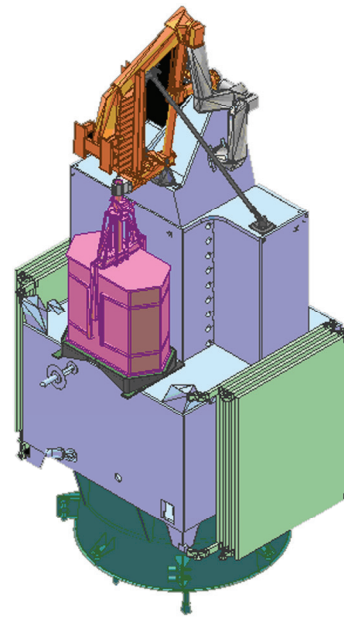


图 4 天线在卫星的安装

Fig. 4 The installation of the antenna on the HJ-1-C satellite

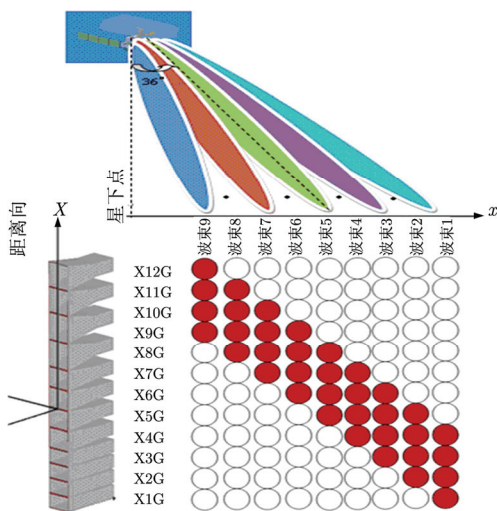


图 5 馈源喇叭与所形成的波束对应关系示意图

Fig. 5 The relation between the feeding horns and antenna beams

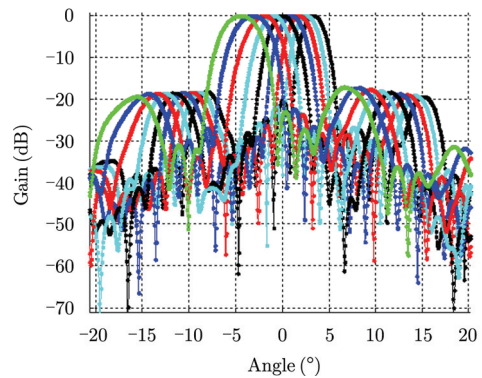


图 6 9 个波束的方向图

Fig. 6 The 9 beam patterns of HJ-1-C radar antenna

转动机构由步进电机驱动，转动范围为 28°～45°，转动速度为 0.1°/s，转动操作由天线转动控制器控制实施，按照地面上发指令中设置的角度执

行。为了保证天线转动的安全性,对转动范围进行软、硬限位。通过机械转角和9个波束组合,可覆盖 $25^{\circ} \sim 47^{\circ}$ 的视角范围。在轨工作时,应尽量减少天线的转动操作,如果成像区域在9个波束的可视范围内,就不需要进行天线转动。

在卫星发射时,天线通过4个支撑点固定在卫星上,反射面由包带缠绕锁定。入轨后,火工品和爆炸螺栓起爆解锁,按照一系列步骤完成天线的展开。如图7所示。

5 SAR的研制、测试和试验

5.1 研制过程

HJ-1-C卫星的研制过程分为初样阶段、正样阶段和国产化阶段。在2002年项目启动,进入初样阶段。初样的天线和发射机由俄罗斯引进,发射机采用行波管放大器。中央电子设备由中科院电子所研制。2005年底完成了SAR载荷和整星联试。

2006年进入正样阶段,国内的电子设备部分进展顺利,但对俄合作遇到困难,俄方行波管放大器由于技术问题而停滞,而天线引进又因俄方出口许可问题受阻。整个项目陷入困境。

为了应对对俄合作出现的问题,2008年启动了发射机的国产化工作,采用了固态发射技术,由电科14所研制;2010年启动了天线国产化工作,可在整星构型、接口基本不变情况下,完全替代俄方

产品,由航天西安分院研制。2012年3月国产化后的SAR载荷完成了集成测试,然后完成整星联试和试验。卫星于2012年9月17日出厂,11月19日成功发射,12月9日在轨开机成像,获得我国第1幅星载S波段SAR图像。

5.2 SAR载荷的集成测试

在SAR载荷中的各分机完成研制后,分别对其进行了验收测试,然后再对整个SAR载荷进行集成测试。集成测试内容包括:供电检查,基准频率源输出各路基准信号测试,调频信号源输出LFM信号测试,接收机噪声系数、输入输出动态范围和MGC测试,固态发射机输出功率和波形测试,系统发射时接收通道的漏功率测试,系统内定标测试,转动控制器和转动机构测试,波束控制器与多波束馈源测试,天线反射面展开后的精度测试,天线方向图测试,系统全功率辐射测试,各种成像模式测试,全系统有线和无线收发闭环测试,SAR工作时与数传、GPS的EMC测试。通过上述集成测试,全面验证和考核了SAR的功能和性能。图8为SAR分系统在微波暗室进行全功率辐射测试的现场照片。

与平板相控阵天线的展开测试相比,网状抛物面天线展开的测试更加复杂。在地面重力环境下,无法在整星条件下完成全部的天线展开操作,只能采用分段测试的方法。要对反射面进行单独的展开

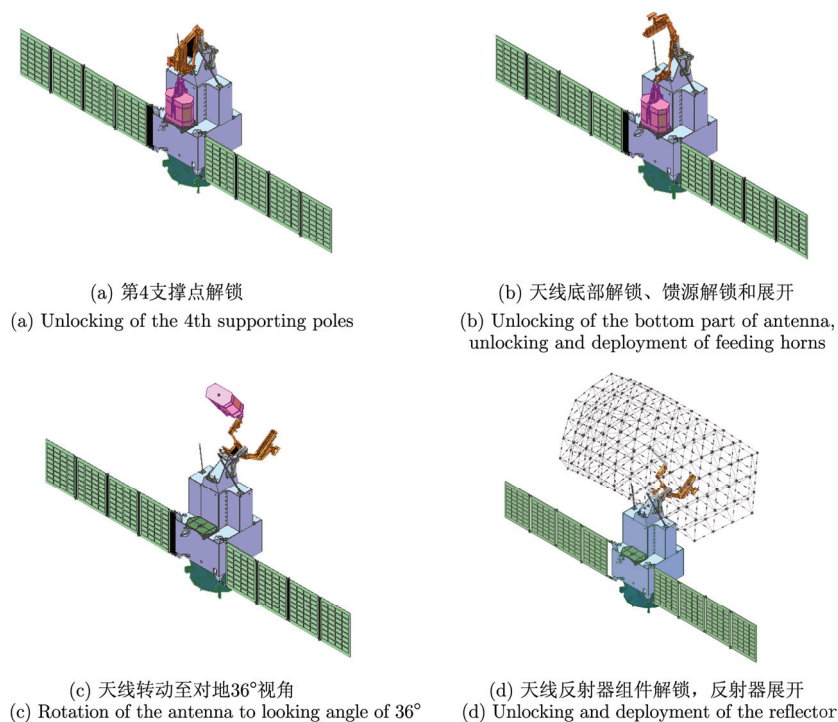


图7 天线展开步骤图

Fig. 7 The procedure of the antenna deployment

测试，采用吊具抵消展开过程重力的影响，而天线上的波导馈线、馈源喇叭和转动机构随整星完成相关测试。天线在无重力吊具上展开的情况见图 9。

5.3 SAR 载荷的试验

SAR 的电子设备都通过 ESS 环境应力试验、随机振动、热真空、热循环和高温老练。

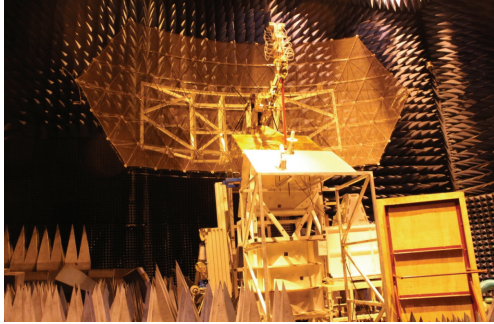


图 8 SAR 分系统在微波暗室进行大功率辐射测试
Fig. 8 The testing of high power radiation of SAR in microwave anechoic chamber

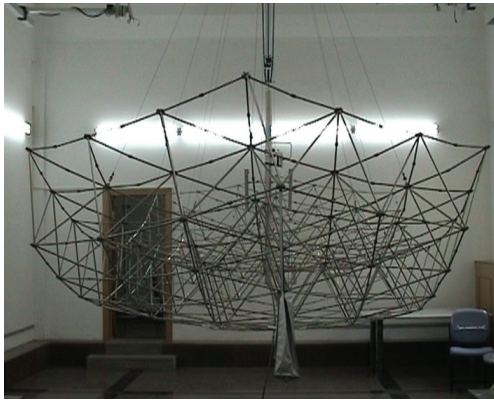


图 9 天线在无重力吊具上展开的情况
Fig. 9 The testing of antenna deployment in lifting slings

针对 HJ-1-C 卫星集中大功率的特点，对大功率通过的各单机部件开展了真空微放电考核试验，包括微波组合中的环行器、滤波器、接收机保护开关，天线上的各段波导馈线、旋转关节、电子开关和馈源喇叭，固态发射机中的功放组件、功放电缆、合成器等，这些部件的微放电余量设计超过 10 dB，鉴定件试验按 6 dB 余量考核，正样产品按 3 dB 余量考核验收。

天线按部件级完成各项试验，反射器进行了常压高低温展开试验，还对转动部件和爆炸螺栓进行了可靠性专项试验。

6 在轨测试成像情况

2012 年 11 月 19 日凌晨 6 点 53 分，HJ-1-C 卫星在太原卫星发射基地由长征二号丙运载火箭发射升空。卫星入轨后先后完成了太阳帆板展开，天线第 4 支撑和底部固定结构解锁，天线整体转动到 36°，天线馈源和反射面解锁，反射器展开等一系列动作。入轨到真空环境后，大功率通道上的波导和关节空腔中的空气会通过放气孔泄露出去，但考虑可能会有残余气体，在大功率通过时造成低气压放电，因此将 SAR 开机成像时间安排到 20 d 后，确保放气过程充分。在此过程中，完成了卫星平台和数传的相关测试。

2012 年 12 月 9 日 HJ-1-C 卫星 SAR 载荷正式开机测试，首先进行连续定标(不成像)，对下传后的定标信号进行分析表明，固态发射机工作和雷达接收通道工作正常，与地面测试结果一致，同时对 SAR 设备各项遥测和温度情况进行监视，均在正常值范围内。然后上注条带成像指令包，天线视角 36°，波束号为 5，成像时间 3 min，成像区域见图 10，

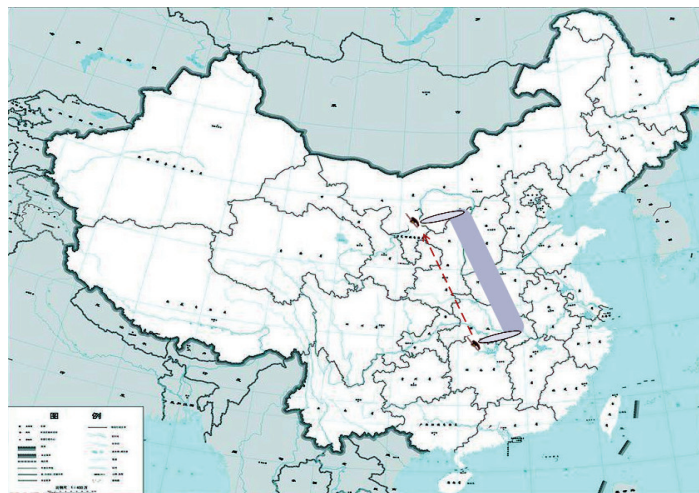


图 10 HJ-1-C 卫星首次开机成像区域
Fig. 10 The first imaging scene of HJ-1-C satellite in orbit

覆盖湖北、河南部分地区。对下传数据进行成像处理, 获取了我国第 1 幅 S 波段星载 SAR 图像, 其中武汉地区的图像见图 11。

从 2012 年 12 月 9 日到 14 日, 共进行了 19 次 SAR 开机成像, 针对条带、扫描两种模式, 天线 3 种典型转角和 9 个波束, 开展了全面的在轨测试。扫描模式图像如图 12 所示(未进行辐射和几何校正)。获取的各种地物图像层次丰富, 纹理细节清楚, 模糊抑制比高, 为 HJ-1-C 卫星的后续应用奠定了良好的基础。

7 总结

本文对 HJ-1-C 卫星 SAR 的设计、研制过程和 在轨初步成像情况进行介绍。目前已完成了大量在 轨测试工作, 结合用户需求, 对其应用能力进行了 全面评估。

历经 10 年, HJ-1-C 卫星获得成功, 并与 2008 年发射 HJ-1-A/B 卫星一起, 完成了我国环境与灾 害监视小卫星星座的部署, 将为我国的灾害与环境 情况动态监测预报发挥重要作用。



图 11 HJ-1-C 卫星 SAR 首次开机获得的武汉地区图像

Fig. 11 The first SAR Image of Wuhan urban area acquired by HJ-1-C satellite

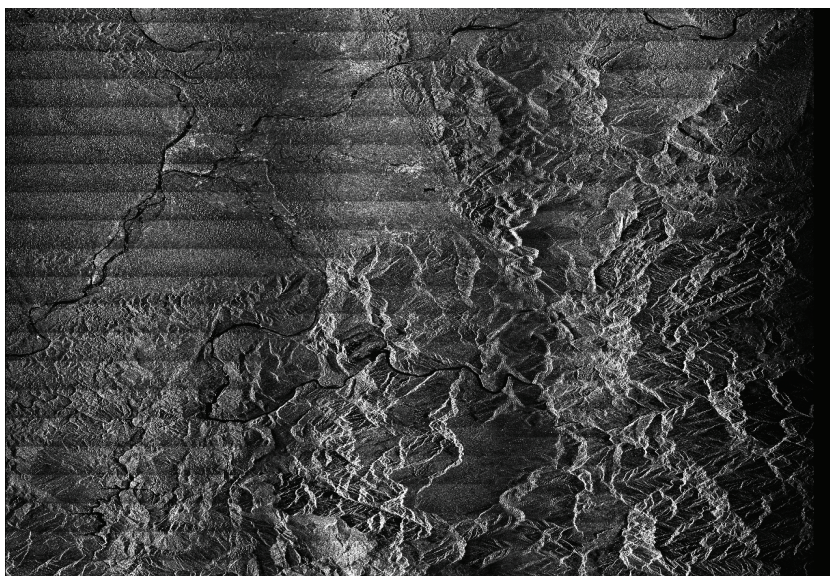


图 12 HJ-1-C 卫星 SAR 扫描模式图像, 100 km×100 km, 未做辐射和几何校正

Fig. 12 The ScanSAR image acquired by HJ-1-C satellite, 100 km×100 km, no radiation and geometric correction

参 考 文 献

- [1] 中华人民共和国国务院新闻办公室. 2011年中国的航天[J]. 航天器工程, 2012, 21(1): 1-6.
- [2] 白照广, 沈中, 王肇宇. 环境减灾-1A, 1B 卫星技术[J]. 航天器工程, 2009, 18(6): 1-11.
- [3] 白照广. 中国的环境与灾害监测预报小卫星星座 A/B 星[J]. 中国航天, 2009, (5): 10-15.
- [4] 王晓耕, 俞伟学. CAST2000 平台小卫星环境试验[J]. 装备环境工程, 2008, 5(6): 56-59.
Wang Xiao-geng and Yu Wei-xue. Environmental tests of CAST2000 satellite[J]. *Equipment Environmental Engineering*, 2008, 5(6): 56-59.
- [5] Curlander J C and McDonough R N. Synthetic Aperture Radar: Systems and Signal Processing[M]. Wiley-InterScience, 1991, Chap. 1.
- [6] Naftaly U and Levy-Nathansohn R. Overview of the TECSAR satellite hardware and mosaic mode[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2008, 46(3): 423-426.
- [7] 袁孝康. 星载合成孔径雷达导论[M]. 北京: 国防工业出版社, 2003: 187.
- [8] Kwok R and Johnson W T K. Block adaptive quantization of magellan SAR data[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 1989, 27(4): 375-383.
- [9] Benz U, Strodl K, and Moreira A. A comparison of several algorithms for SAR raw data compression[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 1995, 33(5): 1266-1276.
- [10] Freeman A. SAR calibration: an overview[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 1992, 30(6): 1107-1129.
- [11] Eberhard S, Friedhelm R, et al. The Sentinel-1 C-SAR internal calibration[C]. 8th European Conference on Synthetic Aperture Radar (EUSAR), 2010: 1-3.

作 者 简 介



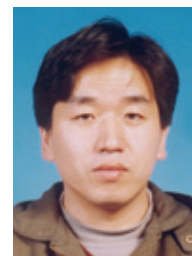
禹卫东(1969-), 男, 研究员, 博士生导师, 研究方向为SAR系统及其信号处理技术。



赵凤军(1963-), 男, 研究员, 博士生导师, 研究方向为星载、机载SAR系统, 新体制SAR理论和信号处理。



杨汝良(1943-), 男, 研究员, 博士生导师, 研究方向为极化SAR、高分辨率微波成像技术。



雷宏(1963-), 男, 研究员, 博士生导师, 研究方向为SAR系统、信号处理和天线技术。



邓云凯(1962-), 男, 研究员, 博士生导师, 研究方向为星载、机载SAR系统, 新体制SAR理论和信号处理。