

HJ-1-C 卫星 SAR 系统的内定标

杨震* 杨汝良

(中国科学院电子学研究所 北京 100190)

摘要: HJ-1-C 卫星是我国环境与灾害监测小卫星星座中的一颗合成孔径雷达(SAR)卫星, 目前已在轨运行。其 SAR 系统采用网状反射面天线和集中式功率放大器, 且具有星上在轨内定标的功能。该文详细介绍了 HJ-1-C 卫星 SAR 系统的内定标模式和算法, 给出内定标器的设计和实现原理, 并对 SAR 系统在轨工作内定标数据进行分析。

关键词: HJ-1-C 卫星; 合成孔径雷达(SAR); 内定标; 内定标器

中图分类号: TN958

文献标识码: A

文章编号: 2095-283X(2014)03-0314-06

DOI: 10.3724/SP.J.1300.2014.14028

Internal Calibration of HJ-1-C Satellite SAR System

Yang Zhen Yang Ru-liang

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

Abstract: The HJ-1-C satellite is a Synthetic Aperture Radar (SAR) satellite of a small constellation for environmental and disaster monitoring. At present, it is in orbit and working well. The SAR system uses a mesh reflector antenna and centralized power amplifier, and has an internal calibration function in orbit. This study introduces the internal calibration modes and signal paths. The design and realization of the internal calibrator are discussed in detail. Finally, the internal calibration data acquired in orbit are also analyzed.

Key words: HJ-1-C satellite; Synthetic Aperture Radar (SAR); Internal calibration; Internal calibrator

1 引言

在合成孔径雷达(SAR)发展的早期, 遥感应应用主要是从合成孔径雷达图像中获取目标的位置、形状和回波强度相对变化等方面的定性信息。随着 SAR 技术的不断发展, 大量全天时全天候、高精度遥感数据的获取使得 SAR 应用领域迅速扩展到包括海洋、森林、海冰监测、行星探测、地质、农作物、环境灾害监测和地形成像等许多方面。在这些应用中, 都要求建立雷达图像强度与目标散射特性之间的定量关系。

SAR 定标技术是实现 SAR 定量遥感的关键技术。定标的目的是测量出影响 SAR 成像质量的各种不确定因素, 在数据处理过程中去除其影响, 建立图像强度与地物后向散射系数的精确关系。按照定标过程的不同, 定标分为内定标和外定标。内定标是利用系统内部设备将定标信号注入到雷达数据流中, 描述雷达系统性能的过程。外定标是使用地面有源目标本身产生的, 或无源目标散射产生的定标

信号来描述合成孔径雷达系统性能的过程。SAR 系统通常将内定标技术和外定标技术结合起来使用: 每经过一段时间利用有参照目标的观测区域对系统进行一次外定标, 其间采用内定标技术监测系统性能的变化^[1]。

HJ-1-C 卫星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, SAR 载荷采用网状反射面天线和集中式功率放大器方案^[2]。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。该卫星具有星上在轨内定标的功能。我国已有星载 SAR 均采用相控阵天线, 其功率源为分布式的 T/R 组件。而 HJ-1-C 卫星 SAR 采用了集中发射式的大功率体制, 在我国卫星中属首次应用。本文主要介绍 HJ-1-C 卫星 SAR 系统的内定标实现。

本文首先介绍星载 SAR 系统定标基本原理。然后详细讨论 HJ-1-C 卫星 SAR 系统的内定标, 包括: SAR 系统的内定标模式及信号通路, SAR 系统的内定标算法, 内定标器的具体设计实现、指标要求和实测结果。最后分析了在轨工作时 SAR 系统内定标数据。对内定标数据的分析结果表明, SAR 系统中央电子设备稳定可靠工作。

2014-02-17 收到, 2014-03-06 改回; 2014-05-13 网络优先出版

国家重大科技专项工程资助课题

*通信作者: 杨震 zhenyang.gm@gmail.com

2 星载 SAR 系统定标原理

由雷达方程, 得到星载 SAR 接收机输出信号功率 P_r 为^[3]:

$$P_r = \frac{P_t \cdot G^2(\theta_i, \phi_i) \cdot K_r \cdot \lambda^2 \cdot \sigma^0 \cdot A_t}{(4\pi)^3 \cdot R^4(\theta_i) \cdot L} + P_n \quad (1)$$

式中 P_t 为发射峰值功率, $G(\theta_i, \phi_i)$ 代表天线增益, K_r 为接收机增益, λ 为工作波长, σ^0 为目标后向散射系数, A_t 为目标照射面积, $R(\theta_i)$ 为斜距, L 为馈线和大气传播损耗, P_n 为接收机输出噪声电平。

目标照射面积是指未压缩处理的地面分辨单元, 即:

$$A_t = \Delta X_a \cdot \Delta R_g = \frac{\lambda R}{L_a} \cdot \frac{c \tau_p}{2 \sin \theta_i} \quad (2)$$

式中 L_a 为星载 SAR 天线长度, c 为光速, τ_p 为发射信号的脉宽。

式(1)中的 λ^2 , $(4\pi)^3$, $R(\theta_i)$ 及式(2)中的 L_a , τ_p 在观测波位确定后是可知的参数或常数, 联合式(1)和式(2), 可得到:

$$P_r = \frac{\lambda^3 c \tau_p}{2(4\pi R)^3 L_a} \cdot \frac{P_t \cdot G^2(\theta_i) \cdot K_r}{L \cdot \sin \theta_i} \cdot \sigma^0 + P_n$$

$$= K_o(R) \cdot K' \cdot \sigma^0 + P_n \quad (3)$$

$$\sigma^0 = \frac{P_r - P_n}{K_o K'} \quad (4)$$

其中 P_n 为系统热噪声, P_r 为总的接收功率电平。

$$K_o(R) = \frac{\lambda^3 \cdot c \cdot \tau_p}{2(4\pi R)^3 L_a} \quad (5)$$

$$K' = \frac{P_t \cdot G^2(\theta_i) \cdot K_r}{L \cdot \sin \theta_i} \quad (6)$$

式(5)为可知的常数; 式(6)受星载 SAR 元器件老化、热应力和卫星平台运动的影响, 将随时间、空间和频域而变化。

把 $K = K_o(R)K'$ 代入式(4), 得到:

$$\sigma^0 = \frac{P_r - P_n}{K} \quad (7)$$

K 称为星载 SAR 系统(包括星载 SAR 和地面成像处理组成的系统)的“端-端传输函数”。

星载 SAR 系统的辐射定标就是利用合成孔径雷达系统可测量地物目标后向散射信号幅度与相位的能力, 描述从发射机输出端到处理器输出端的整个系统性能的过程^[1]。辐射定标的目的就是建立合成孔径雷达图像像素强度与目标真实后向散射系数(σ^0)之间的正确对应关系, 即: 分别通过内定标和外定标测量来估计式(6)中的参数变化, 推出系统传输函数 K , 再由成像并下传得到的 P_r 和 P_n , 通过式(7)得到地面目标的 σ^0 估计值。

根据定标设备(或目标)与雷达系统的位置关系, 将辐射定标分为内定标和外定标^[4]。内定标是利用系统内部设备将定标信号注入到雷达数据流中, 监测雷达系统性能的过程。内定标可以用来估计发射功率和接收机增益因温度变化或元器件老化引起的相对变化, 并测量噪声电平。然而, 内定标的监测范围有限, 不能对内定标回路无法到达的部分(如天线辐射单元)进行定标, 亦无法对天线外部特性、大气传播等进行定标。这些必须依靠外定标获得。外定标是利用地面有源目标本身产生的或无源目标散射产生的定标信号来标定合成孔径雷达系统性能的过程。这些地面目标可以是雷达横截面积已知的人造点目标(如各种角反射器和有源转发器等), 也可以是散射特性已知且均匀稳定的分布目标(如热带雨林、大片的均匀草地等)^[5]。

3 HJ-1-C 卫星 SAR 系统的内定标

HJ-1-C 卫星 SAR 采用集中发射式的大功率体制, 在我国卫星中属首次应用。本节详细研究和讨论内定标技术在这种系统中的具体实现。

3.1 SAR 系统内定标模式及信号通路^[6]

图 1 给出 HJ-1-C 卫星 SAR 系统内定标框图。

HJ-1-C 卫星 SAR 系统共有 3 种内定标模式, 即: 参考定标、发射定标和噪声定标。下面结合图 1, 分别介绍这 3 种内定标模式及其信号通路。

(1) 参考定标: 该模式的内定标信号沿图中虚线 P_c 所示的路径流通, 即: 调频信号源产生的 LFM 信号通过耦合器 C1 进入内定标器, 经内定标器处理后, 通过耦合器 C3 进入微波组合, 最后送至雷达接收机。

(2) 发射定标: 该模式的内定标信号沿图 1 中点划线 P_t 所示的路径流通, 即: 调频信号源产生的 LFM 信号经过固态发射机放大后, 通过耦合器 C2 将一小部分发射信号耦合输出至内定标器, 经内定标器处理后, 通过耦合器 C3 进入微波组合, 最后送至雷达接收机。

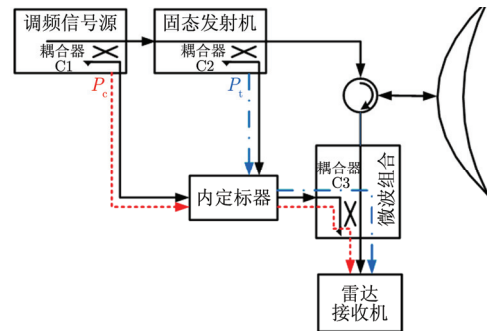


图 1 HJ-1-C 卫星 SAR 系统内定标框图

Fig. 1 Internal calibration block diagram of HJ-1-C SAR system

(3) 噪声定标: 该模式时内定标器工作在成像模式, 即隔离状态。此时内定标信号和 SAR 回波信号都不能进入雷达接收通道和 SAR 接收设备。该模式时, 可以记录 SAR 系统噪声功率电平。

3.2 SAR 系统的内定标算法^[7]

第 2 节已经指出, 内定标技术可以用来估计发射功率和接收机增益因温度变化或元器件老化引起的相对变化, 并记录系统噪声电平。下面具体讨论 HJ-1-C 卫星 SAR 系统中的内定标算法。

由图 1 可以得到发射定标模式时雷达接收机输出的信号功率为:

$$P_{OT} = P_t \cdot G_t \cdot G_{C2} \cdot G_{CT} \cdot G_{C3} \cdot G_{rx} = P_T \cdot G_{CL-T} \cdot G_{rx} \quad (8)$$

其中: P_{OT} 为发射定标模式时雷达接收机输出的信号功率, P_t 为调频信号源发射信号功率, G_t 为固态发射机的增益, G_{C2} 为耦合器 C2 的增益, G_{CT} 为内定标器中发射定标回路引入的增益, G_{C3} 为耦合器 C3 的增益, G_{rx} 为微波组合及雷达接收机增益。 $P_T = P_t \cdot G_t$ 为 SAR 系统发射功率, $G_{CL-T} = G_{C2} \cdot G_{CT} \cdot G_{C3}$ 为 SAR 系统发射定标模式内定标增益。

将式(8)用 dB 形式可表示为式(9):

$$P_{OT}(\text{dB}) = P_T(\text{dB}) + G_{CL-T}(\text{dB}) + G_{rx}(\text{dB}) \quad (9)$$

同样可以得到参考定标模式时雷达接收机输出的信号功率为:

$$P_{OC} = P_t \cdot G_{C1} \cdot G_{CC} \cdot G_{C3} \cdot G_{rx} \quad (10)$$

其中: P_{OC} 为参考定标模式时雷达接收机输出的信号功率, P_t 为调频信号源发射信号功率, G_{C1} 为耦合器 C1 的增益, G_{CC} 为内定标器中参考定标回路引入的增益, G_{C3} 为耦合器 C3 的增益, G_{rx} 为雷达接收机增益。

将式(10)用 dB 形式可表示为式(11):

$$P_{OC}(\text{dB}) = P_t(\text{dB}) + G_{C1}(\text{dB}) + G_{CC}(\text{dB}) + G_{C3}(\text{dB}) + G_{rx}(\text{dB}) \quad (11)$$

由式(8)和式(10), 可得:

$$\frac{P_{OT}}{P_{OC}} = G_t \cdot \frac{G_{C2} \cdot G_{CT}}{G_{C1} \cdot G_{CC}} = G_t \cdot G_{CL-T/C} \quad (12)$$

用 dB 形式表示为:

$$P_{OT}(\text{dB}) - P_{OC}(\text{dB}) = G_t(\text{dB}) + G_{CL-T/C}(\text{dB}) \quad (13)$$

通过成像过程中两个不同时刻发射定标模式的测试, 由式(9)和式(13)可得:

$$\Delta P_{OT}(\text{dB}) = [\Delta P_T(\text{dB}) + \Delta G_{rx}(\text{dB})] + \Delta G_{CL-T}(\text{dB}) \quad (14)$$

$$\Delta P_{OT}(\text{dB}) - \Delta P_{OC}(\text{dB}) = \Delta G_t(\text{dB}) + \Delta G_{CL-T/C}(\text{dB}) \quad (15)$$

其中: $\Delta P_{OT}(\text{dB})$ 和 $\Delta P_{OC}(\text{dB})$ 可以由下传 SAR 数据

处理得到; $\Delta G_{CL-T}(\text{dB})$ 和 $\Delta G_{CL-T/C}(\text{dB})$ 可以由发射前测试获得。这样通过计算就可以得到 SAR 系统发射功率、接收通道增益的相对变化量 $[\Delta P_T(\text{dB}) + \Delta G_{rx}(\text{dB})]$ 和固态发射机增益的相对变化量 $\Delta G_t(\text{dB})$ 。

要进行精确的内定标, 必须实时测量系统发射、接收通道性能的变化。但在实际系统运行过程中, 很难做到正常成像和内定标同时进行。HJ-1-C 卫星 SAR 系统的内定标安排在每次成像的开始和结束时刻进行, 假设成像过程系统发射功率和接收增益近似线性变化, 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, 能够覆盖雷达接收机的整个动态范围。SAR 系统有两种内定标工作情况: 一种是在正常成像的首尾进行内定标, 首尾两次的内定标都包括噪声定标、参考定标和发射定标等所有定标模式; 这样通过噪声定标获得 SAR 系统噪声电平, 通过参考定标和发射定标监测 SAR 系统固态发射机增益和发射功率、接收通道增益的相对变化量。一种是 SAR 系统整个开机时间内都进行连续定标, 即循环进行参考定标和发射定标; 这种连续定标主要用于观测系统性能实际连续变化情况^[6]。

3.3 SAR 系统的内定标器设计和实现^[8,9]

内定标设备是 SAR 系统有效载荷的组成部分, 用于监视和测量 SAR 系统性能随时间的变化, 以补偿和校正由此带来的 SAR 图像辐射性能的不稳定, 保证在轨期间所获得数据产品辐射性能的一致性。星上雷达设备增益稳定性的测量精度主要由内定标精度决定。内定标器作为内定标的核心设备, 要求其具有很高的稳定度, 即它作为测量设备本身, 应尽量引起小的测量误差, 使测量结果尽可能反映系统的变化情况, 而不引入附加的测量误差。

内定标一般有两种实现方式: 一种是非延迟定标, 实现简单, 但定标信号易受到发射信号的影响; 另一种是延迟定标, 把定标信号与发射信号从时间上分开, 避免干扰, 但定标链路复杂, 存在稳定性问题, 需采用补偿措施。HJ-1-C 卫星 SAR 系统的内定标采用延时定标方案。

内定标器是 HJ-1-C 卫星 SAR 系统中的重要分机。它完成各种内定标模式的回路切换和电平转换, 实现 SAR 系统的内定标功能。内定标器的主要功能为:

- (1) 对耦合输入的发射信号进行延时和放大后, 送入接收通道;
- (2) 对耦合输入的调频信号源输出信号进行延

时和放大后, 送入接收通道;

(3) 在监控定时器控制下, 具有对输入射频信号进行增益阶梯衰减的能力;

(4) 在正常成像时, 内定标器不对正常信号通道产生干扰。

HJ-1-C 卫星 SAR 系统内定标器中采用光纤延时线实现射频信号的延时, 图 2 给出实现光延时的原理框图。光发射模块将输入的射频信号转换为光信号, 并送入光纤延时线中进行规定的延时, 然后再由光接收模块转换为射频信号。信号延时时间由光纤的长度决定。射频信号经过电光/光电转换和几公里光纤的传输, 损耗较大, 必须使用多级放大器对延时信号进行放大, 以满足端口电平要求。放大器的使用导致通路插损随温度变化而发生较大变化, 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时回路的稳定性。

根据上述内定标器的功能要求可知, 内定标器的设计难点主要是要求端口电平范围大、隔离度高、稳定性好。图 3 为 HJ-1-C 卫星 SAR 系统内定标器组成框图, 主要由切换开关、延时单元和放大器、衰减器组成。该方案中, 选用隔离度高的开关, 端口处加隔离器, 并通过延时和合理的结构设计来实现高隔离度; 而且通过关断射频输入回路选择开关、射频信号不延时、阶梯衰减设置为最大衰减这 3 个方面的措施来保证成像模式时的高隔离度。选用温度稳定性好的器件, 并在延时、放大通路中增加温补电路, 来提高分机的增益稳定性, 减小内定标器引入的误差。

HJ-1-C 卫星 SAR 系统内定标器的主要技术指标要求和实测结果见表 1^[10]。从表 1 中可以看出, 内定标器的实测指标都优于系统要求。

3.4 SAR 系统的内定标精度^[10]

在 SAR 工作温度范围内, 每隔一定温度, 分别测量内定标器参考定标和发射定标的增益值(dB)。

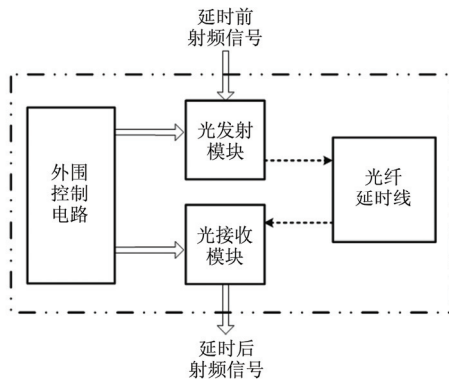


图 2 光延时原理框图

Fig. 2 Block diagram of optical delay

表 1 HJ-1-C 卫星 SAR 系统内定标器主要技术指标要求和实测结果
Tab. 1 Main technical requirements and measured results of HJ-1-C SAR internal calibrator

指标名称	指标要求	实测结果
带内幅度起伏(dB)	≤ 0.5	参考: 0.33 发射: 0.37
带内相位误差($^{\circ}$)	≤ 2	参考: 1.56 发射: 1.35
衰减器衰减范围(dB)	60 ± 1	60.04
衰减器步距(dB)	3	3
衰减精度(dB)	± 0.4 (衰减 ≤ 20) ± 0.6 (衰减 $20 \sim 48$) ± 1.0 (衰减 ≥ 48)	0.14
衰减器步进档数	21	21
定标误差(dB)	≤ 0.5	0.35
隔离态收发隔离度(dB)	≥ 100	102

记录各温度点数据, 并计算其标准偏差, 测试结果见表 2。而定标回路中的耦合器 C1, C2 和 C3 为无源器件, 随温度变化较小, 其测量误差为 0.15 dB, 分别用 σ_{C1} , σ_{C2} 和 σ_{C3} 表示。由于内定标器和耦合器 C1, C2, C3 在卫星舱体中的位置不同, 故同一时刻其所对应温度不同, 认为它们的测量误差是互不相关的随机变量, 则总的测量误差为这些测量误差的均方根值。具体见表 2。

4 在轨内定标数据分析^[11]

2012 年 11 月 19 日, HJ-1-C 卫星发射入轨。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, 固态发射机和雷达接收通道工作正常, 与地面测试结果一致。

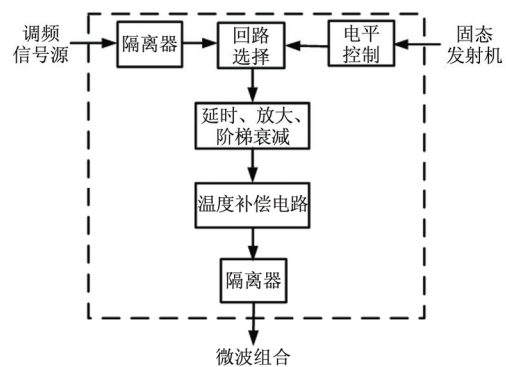


图 3 HJ-1-C 卫星 SAR 系统内定标器组成框图

Fig. 3 Internal calibrator block diagram of HJ-1-C SAR system

表 2 HJ-1-C 卫星 SAR 系统内定标器定标回路测试结果

Tab. 2 Measured results of the calibration loops of HJ-1-C SAR internal calibrator

各测量误差	发射定标	参考定标	发射定标-参考定标	各耦合器
	σ_{CT}	σ_{CC}	$\sigma_{CT/C}$	$\sigma_{C1}=\sigma_{C2}=\sigma_{C3}$
实测结果(dB)	0.28	0.20	0.10	0.15
发射定标回路 定标误差 σ_{CL-T} (dB)	$\sigma_{CL-T} = \sqrt{\sigma_{CT}^2 + \sigma_{C2}^2 + \sigma_{C3}^2} = 0.35$			
参考定标回路 定标误差 σ_{CL-C} (dB)	$\sigma_{CL-C} = \sqrt{\sigma_{CC}^2 + \sigma_{C1}^2 + \sigma_{C3}^2} = 0.29$			
(发射定标-参考定标) 定标误差 $\sigma_{CL-T/C}$ (dB)	$\sigma_{CL-T/C} = \sqrt{\sigma_{CT/C}^2 + \sigma_{C1}^2 + \sigma_{C2}^2} = 0.23$			

图 4 为 2012 年 12 月 9 日雷达在轨首次开机工作时，条带模式首参考/发射定标和尾参考/发射定标数据分析得到的阶梯衰减结果。从图 4 中可以看出，在整个成像工作期间，信号非常稳定，首尾定标的信号电平几乎没有变化。

为了进一步分析比较内定标数据，在表 3 中给出了 HJ-1-C 卫星 SAR 系统 2012 年 12 月 9 日在轨首次开机工作和 2013 年 4 月 17 日成像前后的内定标数据分析结果比对情况。给出了参考定标和发射定标阶梯第 6 档的首尾定标数据，计算得出其在整

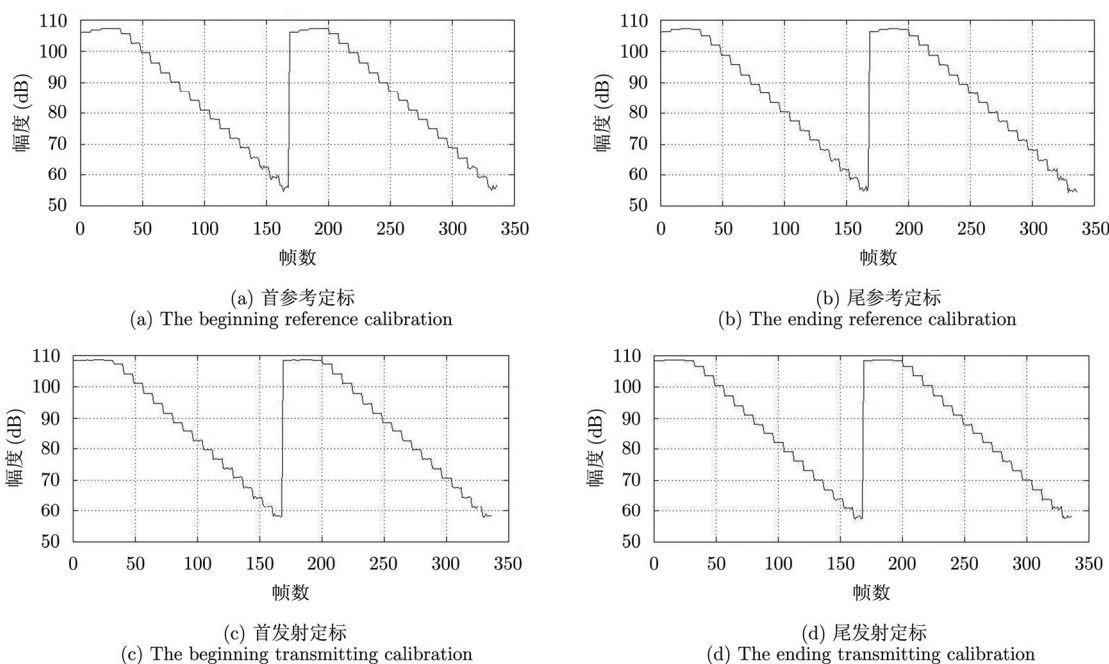


图 4 雷达在轨首次开机条带模式首尾参考/发射定标阶梯衰减分析结果

Fig. 4 Step attenuation of the beginning and ending reference/transmission calibration at SAR first strip mode imaging

表 3 SAR 系统在轨工作首尾参考定标和发射定标阶梯第 6 档数据分析比对

Tab. 3 The six step data analysis of the beginning and ending reference and transmission calibration of the in orbit SAR system

日期	首尾定标	参考定标(dB)	发射定标(dB)	参考定标首尾 变化(dB)	发射定标首尾 变化(dB)
20121209 在轨首次开机工作	首	102.90	104.41	0.68	0.67
	尾	102.22	103.74		
20130417	首	102.51	104.07	0.60	0.63
	尾	101.91	103.44		

个成像前后的变化值。可以看出,在 SAR 系统成像的几分钟内,由于设备工作温度升高,系统增益大约下降了 0.6 dB,与地面测试结果一致。

5 结束语

本文介绍了 HJ-1-C 卫星 SAR 系统的内定标模式、信号通路和内定标算法,给出内定标器的设计和实现,并对在轨工作的 SAR 系统内定标数据进行了分析。通过对内定标信号的幅度进行分析,可以了解在整个成像期间中央电子设备增益的变化情况。分析结果表明, SAR 中央电子设备工作稳定,在轨运行测试结果与地面测试结果一致;国内第 1 颗集中发射卫星 SAR 系统的内定标设备实现了高稳定度,为提高 SAR 数据质量和辐射测量精度提供了手段。

致谢 感谢张华春和陶新为本文提供 HJ-1-C 卫星 SAR 系统在轨内定标测试数据及相关结果。

参考文献

- [1] Curlander J C and McDonough R N. Synthetic Aperture Radar: Systems and Signal Processing[M]. US, John Wiley & Sons, Inc., 1991: 311-326.
- [2] 禹卫东,等. HJ-1-C 卫星 SAR 分系统设计报告[R]. 中国科学院电子学研究所, 2007.
Yu Wei-dong, *et al.*. Design report of HJ-1-C SAR system[R]. IECAS, 2007.
- [3] 张澄波. 综合孔径雷达原理、系统分析与应用[M]. 北京: 科学出版社, 1989: 447-452.
Zhang Cheng-bo. Theory, System Analysis and Application of Synthetic Aperture Radar[M]. Beijing: Science Press, 1989: 447-452.
- [4] Uoshihisa Hara, Chikako Ohno, Masafumi Iwamoto, *et al.*. A

作者简介

杨震,女,中国科学院电子学研究所副研究员,主要研究方向为 SAR 系统的内定标及内定标器研制。

杨汝良,男,中国科学院电子学研究所研究员,博士生导师,主要研究方向为极化合成孔径雷达、高分辨率微波成像技术、超分辨率信息处理、三维微波成像、雷达目标识别系统、混沌信号 SAR 和 SAR 雷达制导技术等微波成像雷达新技术,新体制研究。

study on radiometric calibration of next generation spaceborne SAR[C]. IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium, Singapore, 1997: 1392-1394.

- [5] Freeman A. SAR calibration: an overview[J]. *IEEE Transactions on Geoscience Remote Sensing*, 1992, 30(6): 1107-1121.
- [6] 禹卫东,等. HJ-1-C 卫星合成孔径雷达载荷的设计与实现[R]. 中国科学院电子学研究所, 2007.
Yu Wei-dong, *et al.*. Design and implementation of HJ-1-C SAR system[R]. IECAS, 2007.
- [7] 杨汝良,等. 极化微波成像[M]. 北京: 国防工业出版社, 即将出版, 第6章.
Yang Ru-liang, *et al.*. Polarimetric Microwave Imaging[M]. Beijing: National Defense Industry Press, Being Publishing, Chapter 6.
- [8] 杨震,等. HJ-1-C 卫星 SAR 分系统内定标器单机方案论证报告[R]. 中国科学院电子学研究所, 2002.
Yang Zhen, *et al.*. Internal calibrator scheme design report of HJ-1-C SAR system[R]. IECAS, 2002.
- [9] 杨震,等. HJ-1-C 卫星 SAR 分系统内定标器单机初样设计报告[R]. 中国科学院电子学研究所, 2004.
Yang Zhen, *et al.*. Internal calibrator electric mode design report of HJ-1-C SAR system[R]. IECAS, 2004.
- [10] 杨震,等. HJ-1-C 卫星 SAR 分系统内定标器正样产品验收测试报告[R]. 中国科学院电子学研究所, 2007.
Yang Zhen, *et al.*. Testing report of internal calibrator flying mode product of HJ-1-C SAR system[R]. IECAS, 2007.
- [11] 张华春,等. SAR 首尾参考定标和发射定标历次数据分析比对报告[R]. 中国科学院电子学研究所, 2013.
Zhang Hua-chun, *et al.*. Analysis and comparison of previous data acquired from reference calibration and transmission calibration at the beginning and the end of SAR imaging[R]. IECAS, 2013.