

星载 SAR 天线方向图在轨测量技术发展现状与趋势

洪峻 明峰* 胡继伟
(中国科学院电子学研究所 北京 100190)

摘要: 合成孔径雷达(Synthetic Aperture Radar, SAR)天线方向图不确定性是影响 SAR 辐射精度的主要误差源, 天线方向图在轨测量技术是星载 SAR 定标的关键技术之一。该文综述了星载 SAR 天线方向图在轨测量技术发展历程, 分析了技术发展趋势, 并对现有的在轨测量技术进行了分析比较, 将为星载 SAR 天线方向图在轨测试方案的设计提供重要参考。

关键词: 合成孔径雷达(Synthetic Aperture Radar, SAR); SAR 定标; SAR 天线方向图在轨测量; 地面接收机; 热带雨林

中图分类号: TN958

文献标识码: A

文章编号: 2095-283X(2012)03-0217-08

DOI: 10.3724/SP.J.1300.2012.20063

Current Situation and Development Trend of Inflight Antenna Pattern Measurement Techniques of Spaceborne SAR

Hong Jun Ming Feng Hu Ji-wei
(National Key Laboratory of Microwave Imaging Technology, Institute of Electronics,
Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

Abstract: The antenna pattern uncertainty is the main error of Synthetic Aperture Radar (SAR) system. The technique for inflight antenna pattern measurement of spaceborne SAR is one of the most important technique of SAR calibration. This paper discusses the development courses of the inflight antenna pattern measurement of spaceborne SAR, analyses its development trend and compares the main inflight antenna pattern measurement techniques. This paper will be an important reference for designing a project of inflight antenna pattern measurement of spaceborne SAR.

Key words: Synthetic Aperture Radar (SAR); SAR calibration; Inflight measurement of spaceborne SAR antenna patterns; Ground receiver; Rain forest

1 引言

星载合成孔径雷达(Synthetic Aperture Radar, SAR)是一种先进的航天遥感手段, 具有全天候、全天时、分辨率高、全球覆盖的优势。SAR 天线方向图对信号的调制是影响 SAR 图像辐射精度的主要误差源, 需要利用天线方向图校正 SAR 图像来消除天线方向图对图像幅度调制的影响^[1]。因此, 星载 SAR 天线方向图的测量是星载 SAR 辐射定标必不可少的环节。星载 SAR 天线方向图作为 SAR 系统的主要性能参数在地面需要测试, 但由于地面测试条件限制, 不可能完全达到实际工作时的远场条件, 也不可能完全模拟空间环境, 还由于卫星发射升空振动, 天线展开, 空间环境温度变化等因素引起天线机械结构变化, 对于相控阵天线, 由

于馈源退化和损坏等原因, 都会造成实际天线方向图的变化, 因此实际应用中必须对天线方向图进行在轨测试。

从 1978 年美国发射第一颗星载 SAR 系统 SEASAT 开始, 美国、俄罗斯、加拿大、日本、欧洲各国纷纷研制并成功发射了各自的 SAR 卫星, 如 SIR-A, SIR-B, ERS-1, ERS-2, JERS-1, RADARSAT-1 等。尤其进入 21 世纪后, SAR 卫星的发射更加频繁, 如 ENVISAT, ALOS, SAR-Lupe, Cosmo-Skymed, TerraSAR-X, Radarsat-2, TanDEM-X 等^[2]。为了实现 SAR 数据的量化, 以上星载 SAR 都开展了天线方向图在轨测试。

近几年发射的星载 SAR 具有新的工作模式和大量波位, 使得天线方向图的在轨测试任务量非常大, 这给卫星发射后的在轨测试和日常定标都提出了更大的要求。国际上针对有源相控阵天线, 研究了基于相控阵天线模型的天线方向图测量方法, 并

2012-09-04 收到, 2012-09-07 改回; 2012-09-11 网络优先出版

国家自然科学基金重大项目(60890070)资助课题

*通信作者: 明峰 mingfengmail@sina.com.cn

在 TerraSAR-X, Radarsat-2 等系统上得到了很好的应用。

本文将围绕星载 SAR 天线方向图在轨测量技术的发展历程、现状和趋势展开论述。第2节回顾星载 SAR 天线方向图在轨测量技术的发展历程,第3节对现有的天线方向图在轨测量方法进行简介并比较分析,第4节对星载 SAR 天线方向图在轨测量技术发展趋势进行探讨,第5节总结全文。

2 技术发展历程回顾

随着星载 SAR 在实际应用中的运行,国际上相应地开展了星载 SAR 天线方向图在轨测试方法研究,并进行了 SAR 定标实验和天线方向图在轨测试工作。

最初的天线方向图在轨测试主要是采用标准反射器方法对卫星发射后天线方向图是否发生变化进行检测,如1986年 M. C. Dobson 等人提出了用标准反射器(经过精确标定的角反射器)进行天线方向图在轨测量的方法,并进行了 SIR-B 天线方向图在轨测量实验^[3]。由于标准反射器方法只能测试距离向天线方向图,测试精度受到多种因素的制约,同时测试成本较高、工作量大,该方法在 ERS-2 后就

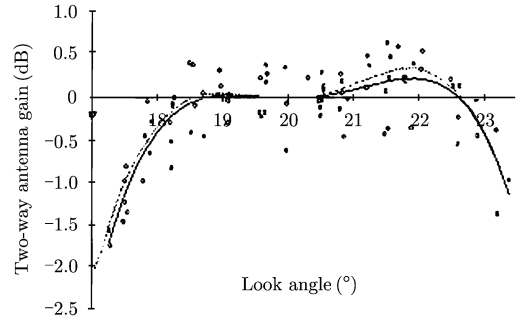


图1 采用角反射器测量的 ERS-2 天线方向图

很少再被采用。图1是欧空局在定标场布设大量角反射器测量得到的 ERS-2 距离向双程天线方向图。

由于标准反射器方法只能测量距离向天线方向图,为了实现对方位向天线方向图的在轨测试,1991年 P. Seifert 等人提出了利用地面接收机测量 SAR 方位向天线方向图的方法,并用机载 SAR 开展了试验研究,图2为定标场内地面接收机布设示意图。之后又采用多台地面接收机测量了 ERS-1 的方位向和距离向天线方向图^[4,5],如图3和图4所示,其方位向单程天线方向图的在轨测量精度可达到 0.3 dB。

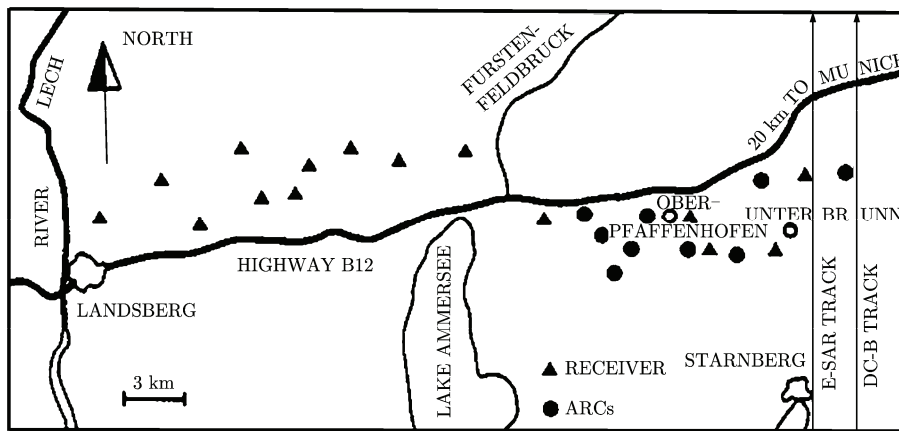


图2 机载 SAR 定标场内地面接收机布设示意图

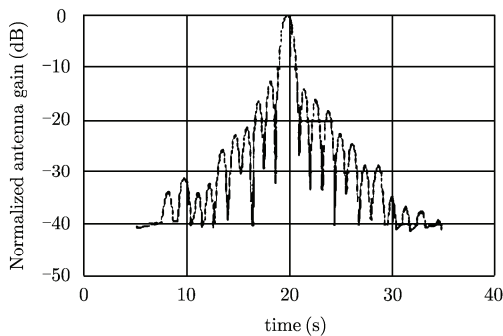


图3 地面接收机记录的 ERS-1 方位向天线方向图

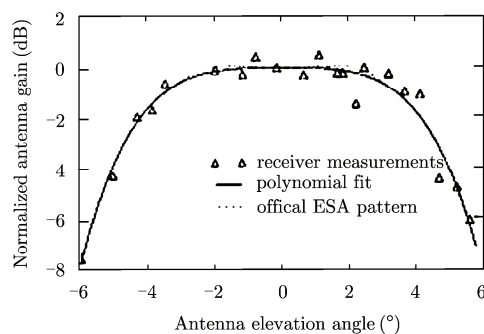


图4 地面接收机测量的 ERS-1 距离向天线方向图

以上两种方法在测量距离向天线方向图时都需要布设一定数量的定标设备,测试成本和工作量都非常大,国外学者提出了利用自然分布目标测量距离向天线方向图的方法,并开始选择合适的自然分布目标。1988年 R. K. Moore 和 M. Hemmat 采用了美国伊利诺斯州的农场、南美洲的亚马逊热带雨林和加拿大的森林等多种分布目标测量了 SIR-B 的距离向天线方向图^[6]。由于亚马逊热带雨林面积大、散射特性非常稳定,逐渐成为星载 SAR 距离向天线方向图在轨测量的理想分布目标,之后发射的星载 SAR 几乎都采用亚马逊热带雨林测量距离向天线方向图,测量精度可达到 0.3 dB^[7-13]。1992 年欧空局采用亚马逊热带雨林进行了 ERS-1 天线方向图的测量,如图 5 和图 6 所示。

上世纪 90 年代后期,星载 SAR 天线开始采用有源相控阵技术,由于有源相控阵天线方向图的收发特性一般不一致,这使得只测量单程天线方向图

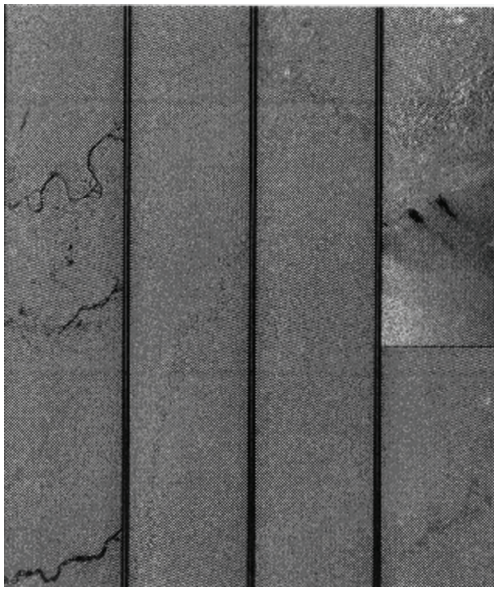


图 5 ERS-1 多幅用于天线方向图测量的热带雨林图像

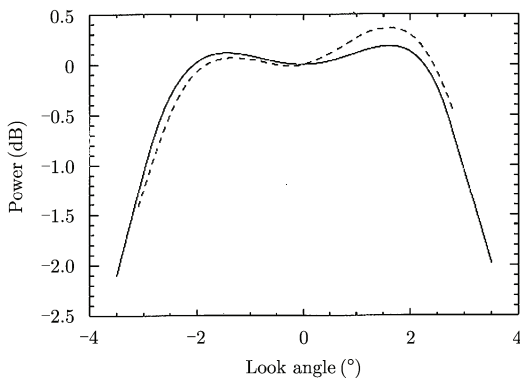


图 6 热带雨林测量的 ERS-1 天线方向图

无法直接合成双程天线方向图,国内外又提出了多种测量方法,如利用地面发射机测量 SAR 接收天线方向图的方法^[14,15]以及 ENVISAT ASAR 采用基于测量有源相控阵天线外部特性因子的方法^[16]。由于以上两种方法对星地同步精度要求高、实现难度大,在当时主要是试验性的。随着 SAR 新体制的发展,SAR 工作模式不断增多,从而导致 SAR 实际工作时波位数量急剧增多,例如 TerraSAR-X 实际工作时,有超过 12000 种不同波束需要进行标定,这使得在轨测试工作量非常大。为此,国际上提出了基于有源相控阵天线数学模型的测量方法,该方法可以基于内定标数据和天线方向图模型快速计算出各波位天线方向图,满足了 TerraSAR-X 天线方向图在轨测试的需要^[17,18]。

3 测量方法简介及比较分析

3.1 测量方法简介

标准反射器测量法是将一定数量的经过精确标定的标准反射器(通常是角反射器)沿距离向分布放置于测绘带内,从图像上分别测量这些反射器对应的响应输出,根据测量的响应输出值重建连续的距离向天线方向图。

地面接收机测量法是将一组经过精确标定的地面接收机沿距离向分布放置于覆盖测绘带的一定区域内,接收机接收雷达脉冲信号经 A/D 采样量化后存贮,并同时记录脉冲采样的时刻,对每个接收机记录的数据处理可得相应的方位向天线方向图,对距离向分布的多个接收机记录的数据处理可得距离向天线方向图。地面接收机测量方法能够完整地测量 2 维(包括距离向和方位向)的单程天线方向图,是目前常用的在轨天线方向图测量方法之一。此外,它还能够测量雷达发射脉冲的特性和天线的绝对增益。因此,地面接收机测量方法具有其它方法不可替代的功能^[26],图 7 为德国宇航局(DLR)研制的地面接收机^[18]。

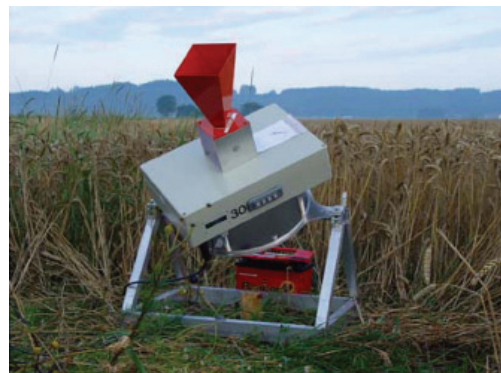


图 7 德国宇航局研制的地面接收机

地面发射机测量法是将一组经过精确标定的地面发射机沿距离向分布放置于覆盖测绘带的一定区域内, 雷达卫星经过时, 同时向雷达发射信号, 雷达接收机接收记录信号, 对接收机下传的信号分离处理生成雷达接收天线方向图。发射机测量方法类似接收机测量方法的逆过程, 由地面发射固定的信号, 星上雷达接收信号测量接收天线方向图, 所不同的是对雷达接收的信号需要分离地面不同发射机的信号, 与接收机测量方法相比技术复杂的多, 需要雷达具有测试的工作模式, 并要求雷达与地面发射机同步, 实际应用该方法的星载 SAR 系统也很少^[19]。为分离雷达接收机记录的来自不同地面发射机的分量信号, 王晓林提出了基于频率分离和编码分离的方法解决了多台发射机信号分离问题^[20]。

热带雨林测量法是利用大范围的散射特性稳定的均匀分布目标(主要是热带雨林), 从图像上测出经过距离校正以后的响应输出来测量测绘带宽内的双程距离向天线方向图, 其计算方法是将热带雨林 SAR 图像沿距离向分割成若干条带并去除图像中的不均匀区域, 将每个条带中的剩余数据按方位向

进行平均处理, 再经过斜距、角度等因素的归一化后即可得到距离向方向图增益曲线。图 8 为用来对 Radarsat-1 的波束进行天线方向图在轨测量的亚马逊热带雨林图像, 图 9 为双程距离向天线方向图测量结果^[10]。

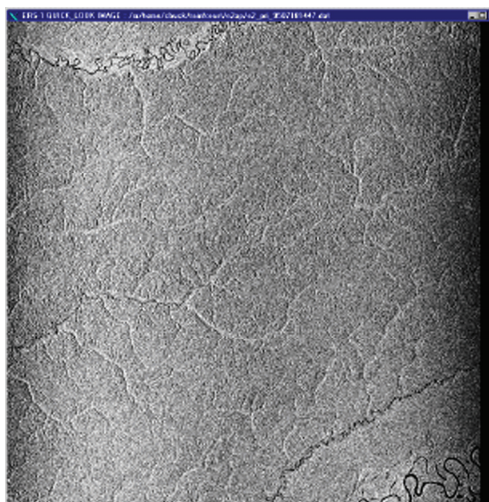


图 8 亚马逊热带雨林图像

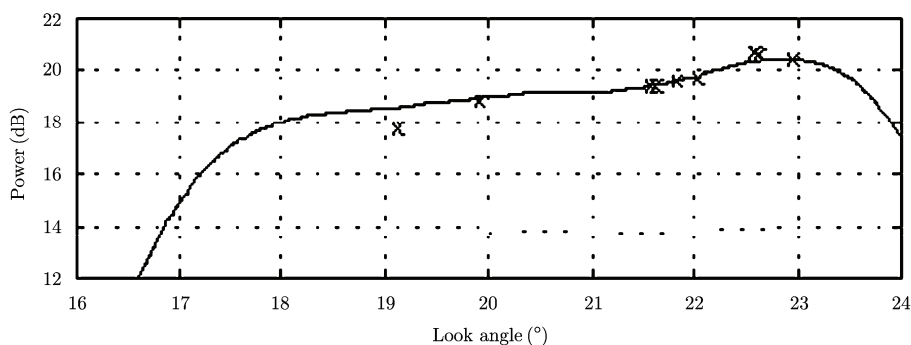


图 9 Radarsat-1 波束 S1 的距离向天线方向图

外部特性因子测量方法是针对有源相控阵天线而发展的一种天线方向图测量方法, 该方法通过测量天线的外部特性因子和内部特性因子来获取天线方向图数据, 其中内部特性由内定标方法测量, 外部特性采用星上和地面接收机同时记录信号的方法, 根据星上和地面接收机同时记录的发射脉冲之间的差异来获取。该方法对地面接收机的要求比较高, 同时要有很高的星上和地面接收机同步控制精度^[16,21]。

基于模型的天线方向图测量方法实际上是一个综合的天线方向图测量策略, 基本原理是卫星发射前建立精确的基于有源相控阵天线具体参数的天线方向图数学模型, 卫星发射后通过星上内定标数据

监测天线 TR 组件幅相特性, 利用天线模型和相关几何参数在轨计算各波位天线方向图, 并采用外定标手段(地面接收机和热带雨林)对有内定标数据计算的天线方向图进行验证, 图 10 为 TerraSAR-X 基于模型测量方法的输入和输出关系。图 11 是 TerraSAR-X 天线方向图的热带雨林测量结果与模型计算结果比较^[22-24]。

3.2 误差源影响分析比较

几种测量方法都受到许多误差源的影响, 可归纳概述为表 1。

3.3 测量功能和成本比较

几种测量方法在测量功能和成本方面的比较可归纳概述为表 2。

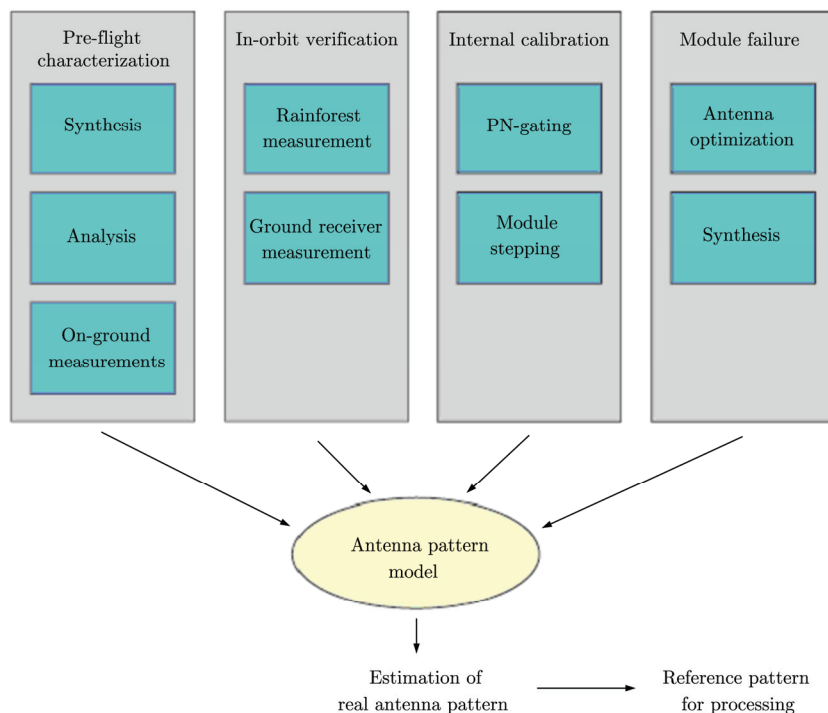


图10 TerraSAR-X 基于模型测量方法的输入和输出关系

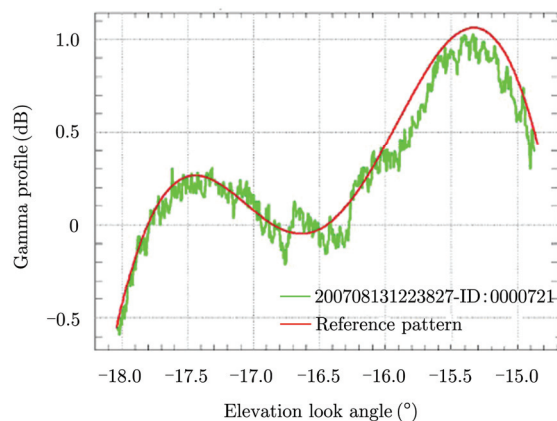


图11 TerraSAR-X 天线方向图测量结果

表1 误差源对测量结果的影响

测量方法	误差源										
	卫星姿态误差	轨道误差	测量设备精度	测量设备数量	雷达发射功率变化	内定标精度	SAR系统噪声	天线数学模型精度	图像质量影响	分布目标散射特性	场地背景影响
标准反射器法	**	**	***	***	**	-	*	-	***	-	***
热带雨林法	**	**	-	-	**	*	**	-	**	***	-
地面接收机法	**	**	***	***	*	-	-	-	-	-	-
地面发射机法	**	**	***	***	-	-	*	-	-	-	**
外部特性因子法	*	*	***	**	*	***	*	-	-	-	-
基于模型的方法	*	*	-	-	-	***	-	***	-	-	-

注：表中“***”表示程度大，“**”表示中等，“*”表示程度小，“-”表示无

表2 测量功能和成本比较

测量方法	测量功能方面	测量工作量和成本方面
标准反射器法	距离向双程天线方向图	需要研制一定数量的反射器, 测量工作量大、成本较高
热带雨林法	距离向双程天线方向图	不需要地面设备, 节约了成本和人力
地面接收机法	天线 2 维发射方向图	测量工作量大、成本很高
地面发射机法	天线 2 维接收方向图	测量工作量大、成本很高
外部特性因子法	有源相控阵天线 2 维双程方向图	测量工作量较大、效率低、成本较高
基于模型的方法	有源相控阵天线 2 维双程方向图	需要外定标手段验证, 测量效率高、成本低

3.4 测量精度比较

不同星载 SAR 系统采用上述几种测量方法在测量精度方面的比较可归纳概述为表 3。

表3 测量精度比较

星载 SAR	采用的测量方法	达到的测量精度(dB)
SIR-B	标准反射器法	1.0
	热带雨林法	0.3
	地面接收机法	0.5
ERS-1	地面接收机法	0.5
	热带雨林法	0.3
SIR-C	地面接收机法	0.3
	热带雨林法	0.3
RADARSAT-1	地面接收机法	0.3
	热带雨林法	0.5
ASAR	地面接收机法	0.3
	热带雨林法	0.5
	外部特性因子法	0.3
TerraSAR-X	地面接收机法	0.2
	热带雨林法	0.2
	基于模型的方法	0.2

4 发展趋势

目前, 星载 SAR 天线方向图在轨测量已成为地面定标系统必不可少的功能。通过对星载 SAR 天线方向图在轨测量技术发展历程的回顾及各种测量方法的分析比较可以看出, 地面接收机方法、热带雨林方法和基于模型的方法将是未来星载 SAR 天线方向图在轨测量的主要方法。随着 SAR 技术的不断发展和 SAR 数据定量应用能力的不断提高, 未来对天线方向图在轨测量的要求也会越来越高。

(1) 热带雨林的可行性需要进一步研究

热带雨林后向散射系数分布的均匀性和稳定性是其能否实现星载 SAR 天线方向图在轨测量的关键, 根据热带雨林与微波的相互作用机制, 其散射

特性的稳定性和均匀性与微波波段有关。目前对热带雨林的应用主要集中在 L, C, X 3 个波段, 这是因为在这 3 个波段, 微波信号对热带雨林有一定的穿透能力, 但又不能完全穿透植被覆盖层, 其体散射常年呈现大面积均匀、稳定特性。为了进一步提高星载 SAR 数据的应用能力, 未来将会研制 P, Ka, Ku 等波段的星载 SAR 系统, 但热带雨林后向散射在这些波段的稳定性和均匀性目前还没有明确的结论, 因此在利用热带雨林开展 P, Ka, Ku 等波段星载 SAR 系统天线方向图测量前, 还需要研究热带雨林稳定性和均匀性是否满足天线方向图在轨测量要求。

(2) 基于模型的测量方法将在新体制星载 SAR 中得到越来越广泛的应用

随着 SAR 新体制的发展, 其工作波位数量将急剧增多, 例如聚束模式一般会采用上万个波位, 这使得天线方向图在轨测量的工作量变得非常大。根据前面对天线方向图测量方法的分析, 基于模型测量方法由于具有快速、高效的特点将会在新体制 SAR 定标中得到越来越多的应用^[27-34]。该方法不仅可以测量天线方向图的形状, 还可以测量各波位天线增益的变化, 在星载 SAR 绝对辐射定标常数的测量中也将发挥非常重要作用。但是该方法的实施将是一个系统性的工程, 需要实验室测试、内定标和外定标紧密配合, 在卫星发射前的实验室测试阶段需要建立高精度的天线方向图模型, 在卫星发射后的在轨阶段需要星上内定标系统精确测量有源相控阵天线各模块幅相特性的变化并根据模型计算天线方向图, 同时还需要采用地面接收机方法和热带雨林方法对模型计算的天线方向图进行定期检验和优化。

(3) 天线指向定标技术将得到越来越多的关注

决定 SAR 天线方向图校正精度的主要因素是天线方向图形状的测量精度以及雷达数据与天线方向图的对准精度。本文主要探讨了天线方向图形状的在轨测量问题, 但 SAR 数据定量应用的不断发

展对 SAR 辐射定标的要求也越来越高,在天线方向图在轨测量方面,未来将不仅要求测量天线方向图的形状,还要求利用外定标手段精确测量天线指向。德国宇航局在 TerraSAR-X 的定标方案中设计并实现了一种基于发射尖锐天线方向图来测量天线距离向和方位向指向偏差的方法,利用该方法可以实现 0.02° 的天线指向测量精度^[25]。

5 结束语

虽然在过去 30 年里,星载 SAR 天线方向图在轨测量技术得到了不断发展和广泛应用,但是在星载 SAR 技术向高分辨率、宽测绘带、多模式不断发展的今天,星载 SAR 天线方向图在轨测量技术也将进入新的发展时期。随着我国星载 SAR 技术的发展,星地一体化、高效率、高精度的天线方向图在轨测量策略将是未来需要攻关的关键技术。

参 考 文 献

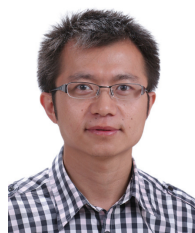
- [1] Freeman A. SAR calibration: an overview[J]. *IEEE Transactions on Geoscience Remote Sensing*, 1992, 30(6): 1107-1121.
- [2] Buckreuss S, Werninghaus R, and Pitz W. German satellite mission TerraSAR-X[C]. Proceedings of IEEE Radar Conference, Rome, Italy, 2008: 1-5.
- [3] Dobson M, Ulaby F, and Brunfeldt D. External calibration of SIR-B imagery with area extended and point targets[J]. *IEEE Transactions on Geoscience Remote Sensing*, 1986, 24(4): 453-461.
- [4] Seifert P, Lentz H, and Zink M. Ground-based measurements of inflight antenna patterns for imaging radar systems[J]. *IEEE Transactions on Geoscience Remote Sensing*, 1992, 30(6): 1131-1136.
- [5] Seifert P, Zink M, and Lentz H. ERS-1 preliminary antenna elevation pattern measured by ground receivers[C]. First ERS-1 Symposium - Space at the Service of our Environment, Cannes, France, 1992: 4-6.
- [6] Moore R K and Hemmat M. Determination of the vertical pattern of the SIR-B antenna[J]. *International Remote Sensing*, 1988, 9(5): 839-847.
- [7] Freeman A and Alves M. SIR-C data quality and calibration results[J]. *IEEE Transactions on Geoscience Remote Sensing*, 1995, 33(4): 848-857.
- [8] Fang Yujun and Moore Richard K. Inflight vertical antenna patterns for SIR-C from amazon rain forest observations[J]. *Remote Sensing of Environment*, 1997, 59(2): 407-414.
- [9] Moore R K and Rediawan H. Further analysis of SIR-C antenna patterns for radiometric corrections: use of new calibration areas[C]. Proceedings of IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium 1999 (IGARSS'99), Seattle USA, Vol.1, June 28-July 2, 1999: 437-439.
- [10] Lukowski T I, Hawkins R K, and Cloutier C. RADARSAT elevation antenna pattern determination[C]. Proceedings of IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium 1997 (IGARSS'97), Vol.3, Singapore, 1997: 1382-1384.
- [11] Shimada M and Freeman A. A technique for measurement of spaceborne SAR antenna patterns using distributed targets[J]. *IEEE Transactions on Geoscience Remote Sensing*, 1995, 33(1): 100-114.
- [12] Hawkins K R. Determination of antenna elevation pattern for airborne SAR using the rough target approach[J]. *IEEE Transactions on Geoscience Remote Sensing*, 1990, 28(5): 896-905.
- [13] Zink M and Rosich B. Antenna elevation pattern estimation from rain forest acquisitions[C]. Proceedings of CEOS SAR Workshop, London, Sept. 24-26, 2002, ESA SP-526, Editor: Lacoste H, Published on CDROM, 2003: 11.1.
- [14] Thompson A A, Racine D, and Luscombe A P. RADARSAT-2 antenna calibration using Ground Receivers/ Transmitters[C]. Proceedings of IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium 2002(IGARSS '02), Vol.3, June 24-28, 2002: 1465-1467.
- [15] Yuhshen Shen, Klein J D, and Freeman A. Tone generators in SAR applications[C]. Proceedings of IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium 1990 (IGARSS'90), May 20-24, 1990: 1121.
- [16] Zink M, Torres R, and Buck C H. Calibration and early results of the ASAR on ENVISAT[C]. Proceedings of IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium 2002 (IGARSS'02), Vol.1, June 24-28, 2002: 596-598.
- [17] Schwerdt M, Hounam D, and Alvarez-Pérez J L. The calibration concept of TerraSAR-X: a multiple-mode, high-resolution SAR[J]. *Canada Journal Remote Sensing*, 2005, 30(1): 30-36.
- [18] Schwerdt M, Bräutigam B, Döring B, *et al.* Final results of the efficient TerraSAR-X calibration method[C]. Proceedings of IEEE Radar Conference, Rome, Italy, May 2008: 1-6.
- [19] Luscombe A P and Thompson A. RADARSAT-2 calibration: proposed targets and techniques[C]. Proceedings of IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium 2001 (IGARSS'01), Sydney Australia, Vol.1, July 9-13, 2001: 496-498.
- [20] 王晓林, 洪峻. 应用编码发射机在轨测量SAR天线方向图[J]. *电子测量技术*, 2006, 29(1): 81.
- Wang Xiao-lin and Hong Jun. Inflight measurement of spaceborne SAR antenna patterns using transmitters[J]. *Electronic Measurement Technique*, 2006, 29(1): 81.

- [21] Zink M and Jackson H. ASAR external characterization[C]. Proceedings of CEOS SAR Workshop, London, Sept. 24–26, 2002, ESA SP-526, Editor: Lacoste H, Published on CDROM, March 2003: 10.1.
- [22] Bräutigam B, Schwerdt M, and Bachmann M. An efficient method for performance monitoring of active phased array antennas[J]. *IEEE Transactions on Geoscience Remote Sensing*, 2009, 47(4): 1236–1243.
- [23] Bachmann M, Schwerdt M, Bräutigam B, *et al.* The TerraSAR-X antenna model approach[C]. 2nd International ITG Confence on Antennas, INICA'07, Munich, Germany, Mar. 28–30, 2007: 139–142.
- [24] Bachmann M, Schwerdt M, and Bräutigam B. TerraSAR-X antenna calibration and monitoring based on a precise antenna model[J]. *IEEE Transactions on Geoscience Remote Sensing*, 2010, 48(2): 690–701.
- [25] Schwerdt M, Bräutigam B, and Bachmann M. Final TerraSAR-X calibration results based on novel efficient methods[J]. *IEEE Transactions on Geoscience Remote Sensing*, 2010, 48(2): 677–689.
- [26] 林捷. 星载合成孔径雷达天线方向图在轨测试技术研究[D]. [硕士学位论文], 中国科学院电子学研究所, 2001.
Lin Jie. Inflight measurement of spaceborne SAR antenna patterns[D]. [Master dissertation], Institute of Electronics, Chinese Academy of Sciences, 2001.
- [27] Werninghaus R and Buckreuss S. The TerraSAR-X mission and system design[J]. *IEEE Transactions on Geoscience Remote Sensing*, 2010, 48(2): 606–614.
- [28] Steinbrecher U, Schulze D, and Böer J. TerraSAR-X instrument operations rooted in the system engineering and calibration project[J]. *IEEE Transactions on Geoscience Remote Sensing*, 2010, 48(2): 633–641.
- [29] Touzi R, Hawkins R K, and Côté S. On the use of transponder measurements for high precision assessment and calibration of polarimetric RADARSAT-2[C]. IEEE Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS), July 25–30, 2010, Honolulu, Hawaii, USA.
- [30] Wang Yiding. A new encoded transponders for SAR calibration[C]. 2007 Asian and Pacific Conference on Synthetic Aperture Radar, Huangshan, China, Nov. 2007: 244–248.
- [31] Snoeij P, Attema E, Davidson M, *et al.* Sentinel-1 radar mission: status and performance[J]. *IEEE Aerospace and Electronic Systems Magazine*, 2010, 25(8): 32–39.
- [32] Recchia A, Guarnieri A M, Miranda N, *et al.* Impact of the antenna stability on the doppler centroid frequency[C]. Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS), 2011 IEEE International, July 2011: 1516–1519.
- [33] Anthony L. RADARSAT-2 calibration and mode optimization[C]. CEOS SAR Calibration and Validation Workshop 2008, Oberpfaffenhofen, Germany, 2008: 1–10.
- [34] Torre A, Cereoli L, and Mecozzi R. Cosmo SkyMed: antenna elevation pattern data evaluation[C]. CEOS SAR Calibration and Validation Workshop 2008, Oberpfaffenhofen, Germany, 2008: 42–45.

作者简介



洪 峻(1960–), 男, 研究员, 博士生导师, 研究方向为 SAR 定标技术、机载 SAR 系统设计。



胡继伟(1982–), 男, 助理研究员, 研究方向为分布式 SAR 定标技术、SAR 图像质量评估。



明 峰(1977–), 男, 副研究员, 研究方向为 SAR 定标技术、SAR 数据定量化处理。