

## 用于地面目标微波特性测量的飞艇 SAR 系统

王岩飞 徐向辉 刘畅 周长义  
(中国科学院电子学研究所 北京 100190)

**摘要:** 针对地面目标微波散射特性的高分辨率成像测量需求, 该文给出了一种基于飞艇平台的合成孔径雷达(SAR)测量系统。介绍了飞艇 SAR 系统的构成和功能, 详细探讨了合成孔径雷达的技术性能, 提出了针对飞艇慢速飞行平台所采取的结合 IMU, DGPS 和自聚焦的成像和运动补偿方案。通过实际飞行试验, 验证了飞艇 SAR 对目标高分辨率成像测量的可行性。

**关键词:** 合成孔径雷达; 飞艇; 慢速平台运动补偿

**中图分类号:** TN958

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1009-5896(2010)01-0028-04

**DOI:** 10.3724/SP.J.1146.2009.00500

## Airship SAR System for Precision Microwave Measurement of Ground Targets

Wang Yan-fei Xu Xiang-hui Liu Chang Zhou Chang-yi  
(Institute of Electronics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

**Abstract:** This paper describes an airship borne SAR developed at the Institute of Electronics, Chinese Academy of Sciences. The airship borne SAR system features high resolution imaging capability of ground targets in the limited area. The function and architecture of the SAR are described in detail. An effective motion compensation method integrated IMU, DGPS and autofocus algorithm is proposed for the low speed airship platform. High quality images formed in the flight tests demonstrate the precision microwave imaging and measurement capacity provided by the airship borne SAR.

**Key words:** SAR; Airship; Motion compensation for low speed platform

### 1 引言

合成孔径雷达(SAR)是一种高分辨率微波成像雷达, 可以对地面目标进行高分辨率的探测, 并且具有全天候、全天时的优势。自上个世纪五十年代, 孔径合成技术出现以来, SAR 系统已经大量装载在飞机、卫星、无人机等飞行平台上用于对地面目标的探测, 在地理资源调查、农作物监测、海洋监测、军事侦察等领域得到了广泛的应用<sup>[1]</sup>。

将短的雷达天线安装在直线运动的平台上, 如卫星、飞机等, 随着平台的运动发射探测信号并记录回波信号, 将收集到的回波信号进行相干处理, 使其等效于一个长的天线在发射和接收信号, 这一技术就是通常所说的孔径合成技术。通过采用孔径合成技术可以使雷达获得高的方位向分辨率, 结合脉冲压缩技术获得高的距离向分辨率, 由此构成了合成孔径雷达技术。

为了保证合成孔径雷达的两维成像, 前提条件是雷达要安装在运动的平台上。为了对地面任意区

域的目标特性进行探测, 可以选择卫星或飞机装载的合成孔径雷达进行测量。然而, 考虑到经济性、测量条件等要求, 如观测时间、角度、空域等, 机载或星载 SAR 系统都有一定的局限性, 而装载于飞艇上的合成孔径雷达系统则具有一定的优势。相对于星载 SAR 雷达系统而言, 飞艇 SAR 系统没有卫星轨道带来的测绘时间、重复性等问题限制; 相对于机载 SAR 系统而言, 飞艇 SAR 系统具有飞行航线灵活、测量角度范围宽等优点, 并且飞艇的起飞场地条件要求低, 运行操作更为经济。因而, 对于有限区域目标进行成像测量而言, 飞艇 SAR 系统具有机动灵活、成本低等优点。

目前, 国内外有关飞艇 SAR 系统的研究报导很少, 文献[2,3]中介绍的是用于地雷探测的飞艇 SAR 系统。本文介绍了中国科学院电子学研究所国内首先研制的一种基于飞艇的高分辨率 SAR 成像系统, 主要用于对地面目标微波散射特性进行高分辨率成像测量。本文重点对这一系统的组成和性能进行介绍和讨论, 并给出了实际系统的试验结果。文中的第 2 节, 详细介绍了系统的组成及其工作模式; 第 3 节介绍了雷达系统的主要性能参数和系统的构

成；第 4 节对有关雷达成像及运动补偿的相关技术进行了讨论并给出了实际试验图像；最后是对本文工作的总结。

## 2 系统构成

对飞艇 SAR 系统的主要要求是：(1)对局部区域目标特性进行成像测量，如范围为  $200\text{ m} \times 200\text{ m}$  的区域目标；(2)高成像分辨率，分辨率为  $0.5\text{ m} \times 0.5\text{ m}$ ；(3)成像参数便于选择调整，如观测目标的入射角、观测目标的方向角、成像的分辨率等。

飞艇 SAR 系统的构成如图 1 所示，包括飞艇、雷达、空地数据链路，地面设备等，分为艇上和地面两大部分。艇上设备包括 SAR 雷达，惯性测量单元(IMU)和 GPS，测控设备等；地面部分包括 SAR 图像实时显示设备，系统状态实时监视和雷达系统控制设备等。

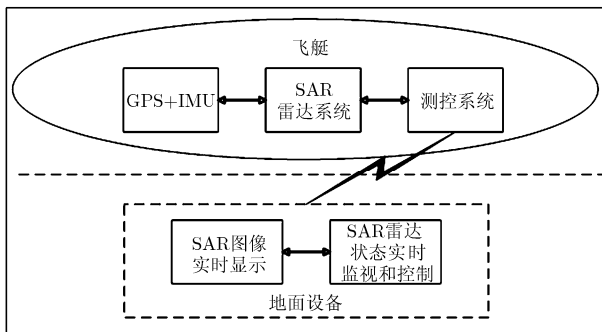


图 1 飞艇 SAR 系统组成框图

飞艇为  $250\text{ m}^3$  的充氦气飞艇，可采用遥控或者程控方式飞行。一次飞行时间为  $2\sim 3\text{ h}$ 。飞行速度为  $36\sim 72\text{ km/h}$ 。雷达载荷约重  $38\text{ kg}$ ，通过吊篮安装在飞艇的底部。雷达所需要的电源为  $400\text{ W}$ ，由飞艇发动机提供直流  $28\text{ V}$  电源。雷达工作高度可以从  $200\text{ m}$  至  $2000\text{ m}$ ，主要根据飞艇的飞行高度来确定。成像条带宽度为  $200\text{ m}$  至  $4000\text{ m}$ 。雷达天线安装在天线稳定平台上，可以选择指向左侧或者右侧扫描成像工作方式。

数据链路用于雷达与地面站之间的通信，上行链路是窄带链路，用来向雷达发送指挥和控制信号，如开机、确定工作模式等。同一链路还以遥控方式向飞艇发送控制信号。下行链路是宽带( $2\text{ Mb/s}$ )链路，用来向地面站传送飞艇上获得的雷达实时图像以及其它与雷达系统相关的信号。

地面站有 4 种功能，(1)监控飞艇的飞行；(2)操纵和控制雷达；(3)监视雷达的工作状态并实时显示获得的雷达图像；(4)对飞艇上记录的原始数据进行进一步的精细成像处理。

飞艇 SAR 的实时成像功能在艇上设备中实现，通过数传链路实时在地面站中显示，用于实时监测所成像的区域。地面成像处理，将结合各种辅助数据，对雷达原始数据进行高精度的成像处理，获得高质量的雷达图像。

## 3 合成孔径雷达系统

飞艇 SAR 雷达从结构上可分为 4 个部分：数据综合处理单元(包括成像处理器、雷达小信号单元、原始数据记录)、发射机单元、天馈线及天线稳定平台、平台驱动单元，图 2 给出了雷达组成框图。

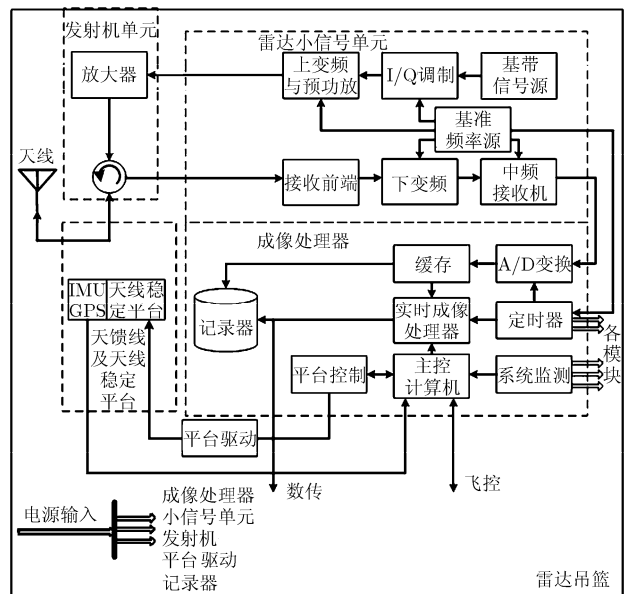


图 2 飞艇合成孔径雷达组成框图

飞艇 SAR 按其完成的功能划分为天线和馈线，天线稳定平台和控制，发射机、接收机、实时处理器、系统监测和控制、原始数据记录器等部门。雷达通过天馈线以尽可能小的损耗，将发射机送来的信号发射出去，将天线接收到的电磁波信号传送到接收机。天线平台和控制部分主要用于控制天线保持稳定，隔离由于大气紊流造成的飞艇的颠簸，对天线相位中心横向和垂直向的运动加速度进行测量，用于 SAR 系统的运动补偿。发射机用来产生雷达系统用于发射的宽带高功率信号。接收机将天线接收到的高频信号进行变频、放大、解调、检波等处理，最后输出基带信号。实时处理器在雷达工作的同时，将回波信号进行快速处理，实时得到观测区域的雷达图像，包括成像处理、运动误差补偿处理，在本系统中还包括雷达数据和辅助数据打包格式化的功能。系统监测和控制部分实现对雷达系统的整机控制和工作状态监测功能。数据记录器用来存储 SAR 原始数据，记录下来的数据可以在地面作

进一步的处理, 以获取成像区域更精确的微波散射信息。

表 1 给出了 SAR 系统的主要参数指标, 由于考虑到飞艇飞行高度和速度相对变化范围比较大, 因而许多参数的设定可以根据任务要求进行调整。

表 1 飞艇 SAR 的主要参数指标

飞艇速度范围	10—30 m/s	接收机噪声系数	$\leq 5$ dB
工作高度范围	200 m —2000 m	IQ 信号采样频率	500 MHz
工作波段	X 波段	采样点数	16384
极化方式	VV 或 HH (可选)	方位向分辨率	$\leq 0.5$ m
天线增益	25.9 dB	距离向分辨率	$\leq 0.5$ m
方位向波束宽度	4.4°	下传数据率	$\leq 2$ Mbps
距离向波束宽度	11.6°	重量	$\leq 38$ kg
发射脉冲宽度	1—8 $\mu$ s(可调)	功耗	$\leq 400$ W
系统带宽	400 MHz	连续工作时间	3 h

#### 4 运动误差补偿及数据成像处理

飞艇相对于飞机而言具有机动灵活等优点, 但飞艇本身的气动结构决定了其对于 SAR 有效成像的运动特性比飞机平台要差。由于飞艇飞行速度慢, 在相同的合成孔径长度内, 合成孔径时间变长, 大气不稳定性对孔径有效合成带来的影响会相应增加; 同时相对较大的浮空艇身更易受到空中横向风的影响, 姿态变化更大。上述因素对飞艇 SAR 的成像结果都会带来不利的影响, 一方面会恶化图像聚焦效果; 另一方面也会降低图像质量, 包括辐射和几何特性。

针对飞艇作为一种浮空慢速运动平台, 更易受到大气湍流的影响这一问题, 系统设计采用了复合运动误差补偿方案, 如图 3 所示。天线稳定平台主要用于隔离飞艇的姿态变化, 根据陀螺等惯性测量单元的测量和杂波锁定处理补偿结果进行精确补偿。惯性测量单元和差分 GPS(DGPS)数据的组合测量结果可实现天线相位中心位置运动误差的补偿<sup>[4,5]</sup>, 一方面有助于聚焦处理, 另一方面用于纠正由于飞艇的非规则运动带来的图像的几何误差。在利用惯性测量单元和 DGPS 提供的导航数据补偿大

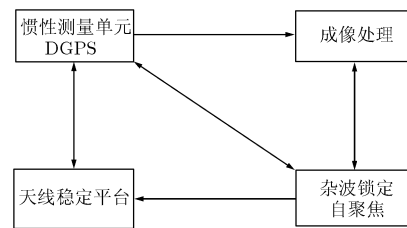


图 3 飞艇 SAR 运动补偿方案

部分非理想运动引入的误差后, 方案中进一步采用自聚焦处理技术<sup>[6,7]</sup>, 有效消除残余误差, 从而获得高质量的雷达图像。

飞艇 SAR 实时成像处理器采用高度并行流水的高性能 ADSP 数字信号处理芯片群组构成, 可以实现输入数据率 50 MB/s 的实时处理能力。考虑实时传输链路数据率的限制, 飞艇 SAR 实时处理采用降分辨率和手动或自动截取有效测绘带的处理方式降低下传实时图像数据率。飞艇 SAR 地面成像处理系统由原始数据回放, 回波数据精细处理和图像显示等模块构成。根据数据处理的不同需求, 可以灵活配置并行处理机群完成处理任务<sup>[8]</sup>。成像处理主要采用融合运动补偿和自聚焦处理的 Chirp-Scaling 算法, 算法流程如图 4 所示<sup>[9]</sup>。

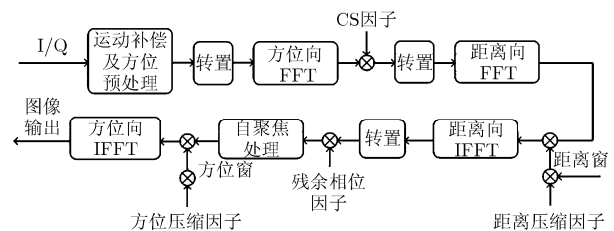


图 4 飞艇 SAR 成像处理流程图

中国科学院电子学研究所自 2006 年启动飞艇 SAR 研制项目, 于 2007 年和 2008 年进行了多次试验和应用飞行, 获得了高质量的雷达图像, 图 5 就是由飞艇 SAR 系统获得的 0.5 m $\times$ 0.5 m 的高分辨率雷达图像。

#### 5 结束语

飞艇 SAR 系统的研制和实际试验表明, 基于飞艇平台装载合成孔径雷达是可行的, 同时, 飞艇 SAR 系统对地面目标微波散射特性的高分辨率测量反演能力也得到了验证。随着众多应用领域对目标特性测量的细化要求, 例如, 对农作物和森林等特定目标的应用观测、星载或机载 SAR 系统仿真测试验证、特定材料的微波特性测量等, 飞艇 SAR 系统作

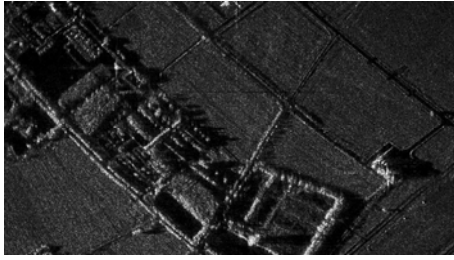


图 5 飞艇 SAR 图像

为一种低成本、方便灵活的测量系统，无疑可以发挥重要的应用。

### 参 考 文 献

- [1] Ulaby F T, Moore R K, and Fung A K. *Microwave Remote Sensing: Active and Passive*, Vol. I, Artech House, Norwood, 1981.
  - [2] Poulter M and Tee H S. Remote minefield detection system (REMIDS): A UK programme for airborne minefield detection. 2001. IGARSS apos;01. IEEE 2001 International Geoscience and Remote Sensing Symposium, Sydney, Australia, 2001: Vol.1: 243-245.
  - [3] Gasson J, Hughes D, Poulter M, and Crisp G. Development of an ultra wide-band SAR for minefield detection. 1999. IGARSS apos;99 Proceedings. IEEE 1999 International Geoscience and Remote Sensing Symposium, Hamburg, Germany, 1999, Vol.5: 2474-2476.
  - [4] Buckreuss S. Motion compensation for airborne SAR based on inertial data, RDM and GPS. 1994. Geoscience and Remote Sensing Symposium. IGARSS '94. Pasadena, California, United States, 1994, Vol.4: 1971-1973.
  - [5] Prats P, Macedo K A, Reigber A, Scheiber R, and Mallorqui J J. Comparison of topography and aperture-dependent motion compensation algorithms for airborne SAR. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2007, 4(3): 349-353.
  - [6] Wahl D E, Eichel P H, Ghiglia D C, and Jakowatz Jr V C. Phase gradient autofocus — A robust tool for high resolution SAR phase correction. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronics Systems*, 1994, 30(3): 827-835.
  - [7] De Macedo K A C, Scheiber R, and Moreira A. An autofocus approach for residual motion errors with application to airborne repeat-pass SAR interferometry. IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium, IGARSS 2007, Barcelona, Spain, July 2007: 4886-4889.
  - [8] Andres C, Keil T, Herrmann R, and Scheiber R. A multiprocessing framework for SAR image processing. 2007, IGARSS IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium, Barcelona, Spain, 2007: 524-527.
  - [9] Moreira A and Huang Yong-hong. Airborne SAR processing of highly squinted data using a chirp scaling approach with Integrated motion Compensation. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 1994, 32(5): 1029-1040.
- 王岩飞：男，1963年生，研究员，博士生导师，主要研究方向包括微波成像雷达系统及其理论、数字信号处理等。
- 徐向辉：男，1974年生，副研究员，研究方向包括 SAR 系统及其相关技术等。
- 刘 畅：男，1978年生，副研究员，研究方向包括 SAR 成像理论及其信号处理等。
- 周长义：男，1975年生，副研究员，研究方向包括 SAR 系统及其相关技术等。