

# 合成孔径雷达发展研究

王颖<sup>1,2</sup>, 曲长文<sup>1</sup>, 周强<sup>1</sup>

(1. 海军航空工程学院, 烟台 264001; 2. 解放军 63891 部队, 洛阳 471003)

**摘要:** 简要介绍了合成孔径雷达(SAR)的发展历程, 对合成孔径雷达技术在国外的发展现状和趋势进行了归纳分析。对当前合成孔径雷达技术研究的热点: 多参数(多频段、多极化和多视角) SAR 系统、SAR 干涉测量、超宽带 SAR、聚束 SAR、SAR 的干扰和抗干扰、定标技术及其应用等方面进行了讨论。

**关键词:** 合成孔径雷达; 干涉; 超宽带; 聚束; 调频连续波

中图分类号: TN958

文献标识码: A

文章编号: CN32-1413(2008)06-0059-03

## Research on Development of Synthetic Aperture Radar

WANG Ying<sup>1,2</sup>, QU Changwen<sup>1</sup>, ZHOU Qiang<sup>1</sup>

(1. Naval Aeronautical and Astronautical University, Yantai 264001, China; 2. Unit 63891 of PLA, Luoyang 471003, China)

**Abstract:** This paper briefly introduces the development history of synthetic aperture radar(SAR), concludes and analyzes the development status and trends of SAR technology in foreign countries, discusses the hot spot of present SAR technology research such as the multi-parameter (multi-frequency range, multi-polarization, multi-view angle) SAR system, SAR interferometric measurement, ultra wide band(UWB) SAR, spotlight SAR, interference and anti-interference of SAR, calibration technology and its application, etc.

**Key words:** synthetic aperture radar; interferometric; ultra-wide band; spotlight; frequency modulated continuous wave

## 0 引言

合成孔径雷达(SAR)是一种高分辨率的二维成像雷达,它在军事观察方面有广泛的应用。SAR技术是雷达技术的一个重大突破,它不但使得雷达遥感具有全天候、全日时、高分辨力性能,并且还有多频段、多极化、多视向和多俯角等优点,特别适于大面积的地表成像。

## 1 合成孔径雷达的产生与发展

1952年, C. W. Shervin 第一次提出了采用相位校正的全聚焦阵列概念。1957年8月23日, Michigan 大学与美国军方合作研究的 SAR 实验系统成功地获得了第 1 幅全聚焦的 SAR 图像, SAR 技术由理论走向实践。后来,由 Cutrona 领导为美国军方开发一个高性能的战斗监视雷达,开发了第

一个实用运动补偿系统,他们使用多普勒导航器来测量远程平均偏移并结合陀螺仪矫正近程飞机偏航。此后许多国家都拥有了自己的机载 SAR, SAR 应用也从军事领域扩展到广阔的民用领域。由于 SAR 系统的不断完善和图像处理技术的不断改进,合成孔径雷达对国民经济发挥着越来越重要的作用,尤其在军事领域更居于举足轻重的地位。

星载 SAR 可能是目前应用最为成功的空间微波遥感设备。1978年6月美国宇航局(NASA)成功发射了海洋 1 号卫星(Seasat-A),在卫星上首次装载了合成孔径雷达,对地球表面  $1 \times 10^8$  km 的面积进行了测绘,标志着 SAR 已成功地进入了空间领域。此后,星载 SAR 技术得到飞速发展,一系列星载 SAR 先后升空。

1988年12月美国用“阿特兰蒂斯”号航天飞机投放的“长曲棍球”(Lacrosse) SAR 卫星,其空间分

收稿日期: 2008-04-24

分辨率已达 1 m,在海湾战争中发挥了重要作用。前苏联也于 1991 年 3 月发射成功载有 S 频段 SAR 的 Almaz 卫星;欧空局于 1991 年 7 月发射了 C 波段垂直极化的 ERS-1 星载 SAR;日本于 1992 年 2 月发射了 L 波段水平极化的 JERS-1 星载 SAR;加拿大于 1995 年初发射了 RADAR SAT 等等。到 21 世纪的前五年,一些国家或国家集团包括俄国、日本、加拿大、印度、欧共体和美国的机构都有进一步部署发射 SAR 遥感器的计划。在最近几十年里,通过机载和星载的 SAR 系统,可获得越来越好的 SAR 图像。由 European Space Agency 在 1991 年发射的 ERS-1 卫星和机载多频段偏振测定 SAR 系统的成功可认为是 SAR 技术的两大飞跃。

## 2 合成孔径雷达的发展趋势

为了适应不同的应用,发展了各种不同波段的 SAR。为探测地下物体研制了 100 MHz 以下的超宽带 SAR,在军用中为了发现隐蔽在树丛中的坦克或装甲车,研制了超高频(UHF)超宽带 SAR。为了能装在轻便无人飞机中侦察 50 km 内敌方的军事机场或炮位现状,研制了毫米波 SAR。为了提高对目标的距离和方位分辨能力,SAR 由侧视方式发展到聚束(Spot)方式。SAR 从早期的单频方式发展成多频方式,从早期的单极化方式发展成多极化方式,由此而获得更多的有用信息。

### 2.1 多参数(多极化、多频段、多视角) SAR 系统

当 SAR 系统发射不同波段、不同极化的电磁波和电磁波以不同入射角照射地物时,SAR 系统会接收到不同的地物微波散射信息。不同的极化方式能使被探测的地物具有不同的电磁响应,即具有不同的后向散射特性,地物层次变化对比亦不相同。因此,采用多极化方式,可以显著改善信号和图像的细节性和可靠性,再加上在不同频段和不同的视角下对地观测,就可以完整地定量分析地面目标的雷达散射特性。正是如此,多参数 SAR 系统必将会越来越受到重视。

SIR-C 是第一种采用多频段、多极化 SAR 的空间飞行器。其工作波段有 L、C、X 3 种,L 波段频带为 1.28 GHz,C 波段频带为 5.3 GHz,这 2 个波段都有 4 种极化方式:HH(水平发射、水平接收)、VV(垂直发射、垂直接收)、VH(垂直发射、水平接收)、HV(水平发射、垂直接收);工作在 X 波段(9.6 GHz),极化方式为 VV。采用相控阵天线,视

角  $15^\circ \sim 55^\circ$  可变。俄罗斯 1990 ~ 1995 年研制了多波段多极化机载 SAR。雷达共有 4 个波段,即 VHF 波段、P 波段、L 波段、X 波段,并采用全极化,即 VV,HH,VH 和 HV。

### 2.2 干涉合成孔径雷达(InSAR)

普通 SAR 的一个很大缺点是对地球表面的三维目标只能产生二维的雷达图像。更确切地说,地球表面的三维目标是按照其到 SAR 的斜距和沿航迹的相对位移(或多普勒频率)被投影到二维的 SAR 图像上的,从而丢失了目标的高度信息。1974 年 Graham 首次证实采用干涉模式的 SAR 系统可以实现地形(高程)测绘。从 20 世纪 80 年代后半期开始,该项技术逐渐走向实用化。最近 10 多年来,InSAR 技术已经成为一个新的科研热点。

2000 年底,美、德、意联合研制的 SRTM 卫星发射成功,采用双天线雷达干涉法,在 10 d 飞行中对地球近 80% 的陆地表面进行了干涉成像,在 30 m 的水平网络上高程测量精度可达 6 m,获取的数据产生三维综合地形信息可用于武器制导、导航等。

### 2.3 超宽带合成孔径雷达

超宽带合成孔径雷达(UWB SAR)可实现高分辨力成像,近年来得到了迅速发展。

林肯实验室研制的 UHF SAR 频带为 200 ~ 400 MHz,研制该雷达是为检测在掩体内或埋地不深的物体。雷达重频为 200 MHz,水平极化,在 1995 年 10 月的试验中,该雷达能明显探测到隐蔽在掩体内的军用车辆。海湾战争以来,美研制了 FOPEN SAR 和 GPEN 等超宽带系统,并于 1992 年前后进行系统实验,取得了一系列的成果,验证了 UHF/VHF UWB SAR 良好的穿透力和精细成像的能力,促进了超宽带合成孔径雷达技术的发展。

### 2.4 SAR 的干扰、抗干扰

合成孔径雷达的对抗由两方面组成:合成孔径雷达干扰;合成孔径雷达抗干扰。SAR 的干扰和抗干扰技术的基础是 SAR 的信号处理,目前尚处于前期研究阶段。随着 SAR 在军事用途中发挥作用的加强,对 SAR 的干扰和抗干扰的研究会得到更多的重视。

### 2.5 聚束 SAR

聚束 SAR 的天线波束在合成孔径时间内始终凝视着测绘区域,实现小区域成像。SAR 以聚束模式工作时不能形成连续的地面观测带,但是,它获得

的高方位分辨率,在许多应用场合是非常有价值的。

美国密执安环境研究所(ERIM)与空军共同开发聚束 SAR 数据采集系统,可在几百米到几千米的范围内获得距离和方位分辨率均达到 1 m 的高分辨率图像。ERIM 与海军联合开发的 P-3ASAR 系统,方位分辨率达到 0.66 m。美国诺登公司(Norden)研制的 APG76(V)雷达以聚束照射模式工作时,方位分辨率可以达到 0.3 m。

### 2.6 小型化技术

合成孔径雷达质量体积过大和能耗过高限制了其工作的平台,为了使 SAR 卫星获得更大的发展和更广泛的应用,必须在保持和完善功能的前提下,进一步降低 SAR 的体积、质量、功耗和成本。

2004 年,韩国研发出一套合成孔径雷达系统,重量只有 37 kg,能在 15 km 内对各种复杂地形进行探测,并提供高分辨率图像。美国桑迪亚国家实验室研制的微型合成孔径雷达,重量不超过 14 kg,达到“山猫”雷达 0.1 m 的地面分辨率,探测距离约 15 km。欧洲航空防务系统公司研制的微型合成孔径雷达重量不到 4 kg,图像分辨率为 50 cm。

FM-CW SAR 是新近被提出来的成像雷达体制,它结合连续波与合成孔径成像技术,具有体积小、重量轻、成本低、分辨率高等优点。1988 年,英伦敦大学最先提出调频连续波 SAR 的概念,并将其应用于飞机高度计中。1991 年开始,日本利用调频连续波合成孔径雷达进行滑雪场隐藏物的探测。2004 年,美 Brigham Young 大学研制出用于考古和地质探测的微型调频连续波合成孔径雷达样机。

### 2.7 定标技术

SAR 定标的根本目标就是确定 SAR 图像中的灰度值与地物后向散射系数的精确关系。随着 SAR 技术的发展,定标技术已成为新一代 SAR 系统必不可少的组成部分,广泛应用于机载 SAR 和星载 SAR 以生产 SAR 的精密定量产品。SAR 定标技术是实现 SAR 对地定量观测的关键技术。

### 2.8 动目标检测与动目标成像技术

在合成孔径雷达中,检测动目标并对其成像是一个重要而困难的课题。虽可用动目标与地面静目标回波多普勒频率的差来检测动目标,但在 SAR 中却难达到普通 MTI 雷达中检测动目标的效果。因为 SAR 的运动使得地面静目标回波信号的相关性变差,因此达不到理想的对消效果。已经提出了数

种在 SAR 中检测动目标的方法,从简单的单天线单通道技术到复杂的多天线多通道技术。通过检测动目标,估算运动速度和补偿位移,可形成适于动目标成像的参考函数,从而实现动目标聚焦成像。

## 3 结束语

合成孔径雷达由于具有独特而重要的特性,已取得迅速的发展,而且在未来的空间应用中将起到重要的作用。SAR 可全天候、全天时提供目标信息,开创了主动微波遥感的新时代。无论是在军事还是民用领域,合成孔径雷达正发挥着越来越重要的作用。多频段、多极化、多视角、InSAR、超宽带 SAR、FM-CW SAR 以及动目标检测等新技术仍然处于不断发展完善之中。可以预见,将来合成孔径雷达技术的研究和应用必定会取得更大的突破。

### 参考文献

- [1] 邓湘金,王磊,彭海良,吴一戎.合成孔径雷达的发展历史及趋势[J].华北工学院测试技术学报,2000,14(2):80-86.
- [2] 张强.弹载条带式 SAR 成像算法研究[D].长沙:国防科学技术大学,2005.
- [3] 王强,黄建冲,姜秋喜.合成孔径雷达的主要发展方向[J].现代防御技术,2007,35(2):81-83.
- [4] 李春升,李景文,周荫清.空载合成孔径雷达技术及展望[J].电子学报,1995,23(10):156-159.
- [5] Ellen R Stofan, Diane L Evans, Christianna Schmillius, et al. Overview of results of spaceborne imaging radar-C, X-band synthetic aperture radar (SIR-C/ X-SAR) [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 1995, 33(4):817-828.
- [6] Rolando L. Jordan, Bryan L. Huneycutt, Marian Werner. The SIR-C/ X-SAR Synthetic aperture radar system [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 1995, 33(4):829-839.
- [7] 袁孝康.合成孔径雷达的发展现状与未来[J].上海航天,2002(5):42-47.
- [8] 张直中.合成孔径雷达(SAR)的最新发展[J].现代雷达,2003(1):1-8.
- [9] 吴一戎,朱敏慧.合成孔径雷达技术的发展现状与趋势[J].遥感技术与应用,2000,15(2):121-123.
- [10] 周健,沈成忠.国外雷达卫星的发展概况及发展趋势[J].空间电子技术,1999(1):56-61.
- [11] 常文革.超宽带合成孔径雷达[J].系统工程与电子技术,2000,22(1):55-58.