

# 毫米波合成孔径雷达的发展及其应用

王 辉, 赵凤军, 邓云凯  
(中国科学院电子学研究所, 北京 100190)

**摘要:**分析了毫米波 SAR 高分辨成像的基本原理, 阐述了毫米波 SAR 的优点, 并结合目前国际上典型的毫米波 SAR 系统, 综述了毫米波 SAR 技术与系统的发展状况, 讨论了毫米波 SAR 的应用前景、存在的问题以及未来的发展趋势。

**关键词:**毫米波; 合成孔径雷达(SAR); 成像; Ka 波段  
**中图分类号:**TN959 **文献标识码:**A

## Development and application of the millimeter wave SAR

WANG Hui, ZHAO Feng-Jun, DENG Yun-Kai  
(Institute of Electronics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

**Abstract:** Synthetic aperture radar (SAR) is a microwave remote sensing radar with capability of all-day and all-weather imaging. Millimeter-wave SAR has become important for development of SAR with the advantage of small volume, light weight, and high resolution. The basic principle for high resolution imaging of millimeter-wave SAR is analyzed, and the advantage of millimeter-wave SAR is present. The state-of-art in the development of millimeter-wave SAR technologies and systems are illustrated with some typical millimeter-wave SAR systems. The application prospects, some issues, and future development trend of millimeter-wave SAR are also discussed.

**Key words:** millimeter wave, synthetic aperture radar(SAR), imagine, Ka-band  
**PACS:** 84.40.Xb

### 引言

合成孔径雷达(Synthetic Aperture Radar, SAR)是一种高分辨率相干成像雷达<sup>[1]</sup>。它采用多普勒频移理论和雷达相干为基础的合成孔径技术来提高雷达的方位向分辨率;而距离向分辨率的提高则通过脉冲压缩技术来实现<sup>[2]</sup>。如今, SAR 在军事侦察、军事测绘及诸多民用领域都发挥了重要作用。

目前 SAR 使用的频段主要集中在 L、S、C、X 波段<sup>[3]</sup>。随着军事侦察和民用微波遥感应应用对 SAR 性能的要求越来越高, 低频段 SAR 逐渐不能满足日益增长的新的应用需求。通常所说毫米波的范围从 30 ~ 300 GHz 有四个大气窗口, 35 GHz(Ka 波段)、94 GHz(W 波段)、140 GHz 和 220 GHz。由于毫米

波(波长 1 ~ 10 mm, 对应频率 30 ~ 300 GHz)频谱介于微波与红外之间的特点, 使得毫米波 SAR 具有体积小、重量轻, 分辨率高, 俯视角好, 目标轮廓效应明显以及电子对抗性能强等优点, 逐渐成为雷达成像技术发展的重要方向<sup>[4]</sup>。

由于毫米波频段在 140 GHz 与 220 GHz 的两个大气窗口内存在严重的大气衰减问题, 而 W 波段的功率源技术如今尚不成熟, 因此国际上目前对毫米波 SAR 的研究主要集中在 Ka 波段这个大气窗口频段。本文首先分析了毫米波 SAR 的技术特点及其高分辨成像的基本原理, 然后结合典型的毫米波 SAR 系统, 阐述国际上毫米波 SAR 技术与系统的发展状况及存在的主要问题, 最后讨论毫米波 SAR 的应用前景及未来发展趋势。

收稿日期:2013-07-16, 修回日期:2014-10-20

Received date: 2013-07-16, revised date: 2014-10-20

基金项目: 星载毫米波 SAR 数字波束合成(DBF)技术研究(9140A21030114ZK13)

Foundation items: Supported by Study on Spaceborne Millimeter Wave SAR Digital Beamforming (DBF) Technology(9140A21030114ZK13)

作者简介(Biography): 王 辉(1972-), 女, 副研究员, 博士, 主要研究领域为微波成像技术. E-mail: wanghui@mail.ie.ac.cn

## 1 毫米波 SAR 高分辨率成像的原理

为了既提高信噪比,又能降低发射信号的峰值功率,SAR 采用脉冲压缩获取高的距离向分辨率. SAR 的距离向分辨率取决于系统带宽,理论上 SAR 的斜距分辨率为:

$$\rho_r = \frac{c}{2B} \quad (1)$$

其中  $B$  为雷达系统的工作带宽, $c$  为真空中的光速. 由于雷达的硬件带宽通常百分比受限于系统工作频率,因此当雷达工作在频率较高的毫米波段时,容易获得大的相对带宽,因此能够得到距离向的高分辨率.

在方位向,区别于实孔径雷达,SAR 是采用孔径合成工作原理和相干成像处理方法来提高角分辨率(或方位向分辨率)的一种雷达成像技术. 设雷达天线沿航迹方向的实际尺寸为,那么在正侧视情况下天线角分辨率近似为:

$$\rho_a = \frac{D}{2} \quad (3)$$

上式表明,正侧视 SAR 的方位向分辨率近似为天线物理尺寸的一半,理论上与工作波长等因素无关. 相对于微波波段的 SAR,毫米波 SAR 的工作波长更短,雷达系统天线的实孔径尺寸更小,因此毫米波 SAR 可以实现更高的方位向分辨率.

此外,在相同干涉基线条件下,毫米波 SAR 相对于低频段 SAR,其高度维分辨精度更好.

## 2 毫米波 SAR 的优点

与低频段的 SAR 相比,毫米波 SAR 具有如下优点:

(1)分辨率高. 从前面的分析可以看到,毫米波 SAR 可以比较容易地获得比低频段 SAR 更高的距离向和方位向分辨率.

(2)体积小、重量轻. 这表现在以下三个方面:一是在相同波束宽度时,Ka 波段天线的尺寸仅为 X 波段的 1/4,对移动平台的要求也相应降低;二是在相同条件下与低频段相比,毫米波 SAR 的极限成像分辨率高,仅用条带方式即能实现高分辨率成像,可避免采用聚束成像方式,使伺服系统进一步小型化;三是对于干涉 SAR 而言,毫米波 SAR 的基线比低频段 SAR 要小很多.

(3)目标轮廓效应明显. 雷达工作频段越高,目标轮廓效应就越明显. 在 Ka 波段,目标几何外形

的轮廓能产生更强的回波,有利于获取清晰的目标几何特征.

(4)俯视角好. 毫米波 SAR 有较好的俯视角,可以覆盖更近的区域,减少盲区.

(5)合成孔径时间更短,可实现 SAR 成像.

(6)穿透力较弱. 毫米波对植被、雪和土壤等的穿透力较弱,信号反射大部分发生在雪和树冠等的顶部,因而毫米波 SAR 可实现对其高度的精确测量.

(7)抗干扰能力强. 由于目前大量电子战装备的工作频率尚未完全覆盖毫米波频段,因此毫米波 SAR 的电子对抗性能相对更强.

## 3 毫米波 SAR 典型系统评述

针对不同的应用需求,目前正在发展的毫米波 SAR 系统包括了机载、星载、弹载和车载等多种平台. SAR 的发展规律一般都是从机载开始,再发展到星载及其他平台. 与星载毫米波 SAR 相比,机载毫米波 SAR 实验系统更简单,且在进行机载系统验证时包含了所有毫米波 SAR 可能面临的技术挑战,且成本和技术风险相对较低,所以针对毫米波 SAR 系统性能的验证工作都是首先在机载平台上进行的. 本文重点介绍机载和星载毫米波 SAR 系统.

### 3.1 机载毫米波 SAR

自从美国马丁公司于 1994 年研制成功小型便携式 Ka 波段毫米波双极化 SAR 并进行飞行试验<sup>[5]</sup>以来,美国林肯实验室又于 1997 年利用 Ka 波段的高分辨率(0.3 m × 0.3 m)多极化机载 SAR 进行了目标自动识别实验<sup>[6]</sup>,结果显示高分辨率多极化成像明显比低分辨率单极化清晰.

由于毫米波 SAR 在无人机平台上应用时距离徙动小,所以它不但具有前面所述的特点,而且还具有成像算法简单的优点<sup>[11]</sup>. 因此,未来毫米波无人机实时 SAR 成像技术将在军用和民用中产生巨大价值. 德国夫琅和费高频物理和雷达技术研究所的 MEMPHIS 雷达是一种试验用脉冲多普勒毫米波雷达,该雷达同时工作在 35 GHz 和 94 GHz. 2006 年 C. Magnard 等人<sup>[10]</sup>基于 MEMPHIS 雷达采用多基线干涉合成孔径雷达(InSAR)技术实现了高分辨率毫米波 SAR 的干涉测量. 系统使用一套完整的数据处理链对雷达初始数据进行处理,从而产生数字高程模型(DEM). 在高分辨率模式下(对应 800 MHz 带宽),距离分辨率可小于 0.2 m,方位分辨率可小于 0.05 m,结合这两个分辨率并通过多基线技

术,理论上可以获得 0.2 m 左右的高度分辨率. 图 2 是该系统在瑞士的实际飞行测量结果.



图2 MEMPHIS 雷达 Ka 波段 InSAR 技术合成图像(瑞士辛维尔地区)

Fig. 2 Ka-band geocoded InSAR image of the test area Swiss "Hinwil" from MEMPHIS

2004 年,中国西南电子技术研究所的任培宏等人报导了一种适用于无人机、固定翼飞机以及直升机等多种平台的 Ka 波段高分辨机载 SAR 系统及其飞行成像试验的结果<sup>[12]</sup>. 该系统采用三轴天线稳定转台带动天线在空间转动,在安装于天线附近的 INS/GPS 惯性测量单元的数据控制下,能消除无人机航向、姿态变化带来的影响,使天线相位中心保持稳定. 同时利用该数据进行实时成像处理器的运动补偿. 图 3 给出了该系统对黄河渔场的飞行图像.



图3 黄河渔场

Fig. 3 Fishing ground of Yellow River

MiSAR 是 EADS 防务电子公司 2004 年研制完成的一种小型化合成孔径雷达<sup>[13]</sup>,其工作频率为 35 GHz,采用调频连续波(FMCW)技术,在条带成像模式下,它的覆盖宽度为 500 ~ 1000 m,分辨率为

0.5 m. 雷达重约 4kg,功耗低于 60 W. MiSAR 天线采用收发分置方式,置于万向支架上的 2 副天线分别用于发射和接收. 德国陆军在“月神”无人机上成功地完成了一系列的 MiSAR 演示成像试验. 测试目标包括德国陆军的自行走榴弹炮、4 × 4 全地形车辆、武装人员运输车、卡车和其它出现在试验区域的随机目标. MiSAR 对威胁目标的检测距离达到 5 ~ 10 km,方位角覆盖范围达到 200°,俯仰角为 20°.

毫米波 SAR 的另一个典型应用是地面动目标显示(GMIT). 毫米波系统工作波长短,可带来高的目标显示灵敏度. 另外,由于毫米波 SAR 具有较小的合成孔径,因此可相应减小目标的拖尾效应和散焦现象,尤其是对于高速运动的目标. 但是在该波段存在很大的对流层衰减,同时较高的载频会引起较大的目标多普勒频移,因此在不引起模糊的前提下只能测量较小的目标速度<sup>[15]</sup>. 这就需要对系统结构和相应算法进行改进以适应对高速运动目标的显示测量. 设想的解决方案为使用多基多模式 SAR 来增大系统的自由度,以达到提高动目标可测速范围的目的<sup>[2]</sup>.

瑞士的 Maurice Rüegg 等人<sup>[16]</sup>在 2006 年使用 35GHz 的 SAR GMTI 系统,实现了对移动目标的成像,并与 L 波段 SAR 数据进行了对比. 试验结果发现(图 4),使用毫米波 SAR 对公路上以 15 m/s 正方向行驶的汽车进行显示时其分辨率可以达到 0.19 m.

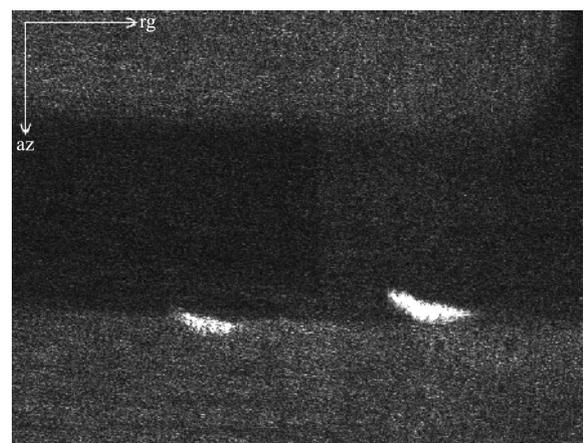


图4 两辆以 15 m/s 的速度在路上正方向行驶的汽车 Ka 波段 SAR 图像

Fig. 4 Ka-band SAR image of two vehicles moving on a road at 15 m/s in positive range direction

2012 年 G. A. Sadowy 等人<sup>[17]</sup>首次给出了 Ka 波段基于 SweepSAR 及数字波束形成(DBF)技术的机

载 SAR 试验结果. SweepSAR 是一种能够同时获得宽测绘带和高分辨率的 SAR 技术,系统仿照 11 m 的 L 波段反射器设计了 40 cm 的 Ka 波段 16 通道阵列馈电反射器,并在接收时使用 DBF 技术,从而给出了一种机载雷达验证系统的设计方法. 图 5 给出的是该系统的阵列馈电反射器的结构图,图 6 给出了校准场地合成后的 DBF 图像.

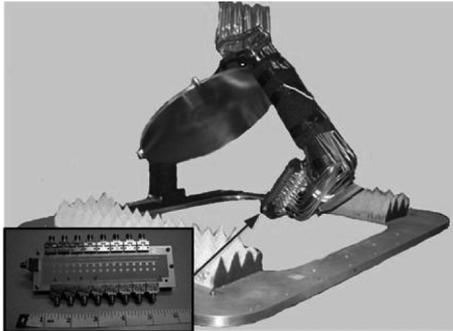


图 5 系统反射面和馈源的主要结构(小图显示了 16 单元主动接受馈源的详情)

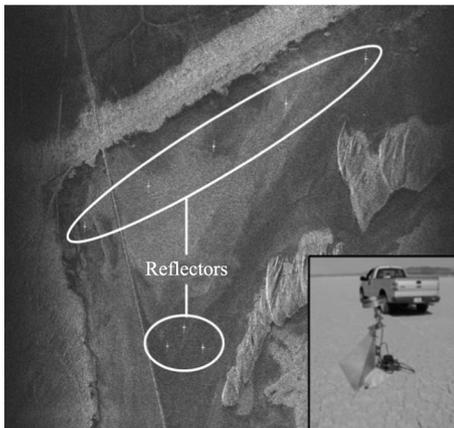


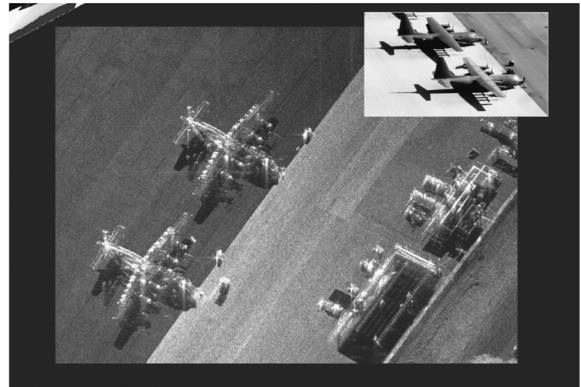
图 6 校准场地的数字波束形成图像(小图:湖床上的角反射器照片)  
Fig. 6 DBF image of calibration site (Inset: Photo of corner reflector on lake bed)

总的来看,机载毫米波 SAR 目前正进入快速发展时期. 下面给出了几张美国 Sandia 国家实验室最新的 Ka 波段机载 SAR 在 2 000 ~ 1 5000 m 高空的高分辨率实时成像照片<sup>[18]</sup>,分辨率达到了惊人的 0.1 m.

### 3.2 星载毫米波 SAR

尽管关于机载毫米波 SAR 的研究屡见报端,但是有关星载毫米波 SAR 的研究报导较少,这主要是因为毫米波 SAR 在星载平台上的应用尚未成熟.

2003 年美国洛克希德马丁公司的 K. Tomiyasu<sup>[19]</sup>首次给出了 Ka 波段星载可重构孔径聚束 SAR



(1) 跑道上的 C130 飞机



(2) 导弹发射台

图 7 美国 Sandia 国家实验室 Ka 波段机载 SAR 高分辨率图像

Fig. 7 High-resolution images from the Ka-band airborne SAR of Sandia National Laboratory, USA (1) C-130s on flight line; (2) missile launcher static display

的设计方法. 卫星轨道高度设定为 700 km. 系统馈源选择高功率固态收发(TR)阵列器件,当掠射角从 15 度到 70 度变化时,可通过开关部分 TR 模块来重构 SAR 的孔径,以维持器件的高效率,同时也能产生较大的类圆形波束. SAR 的距离和方位向分辨率都为 1m,辐射孔径上的发射功率密度维持在  $25.5 \text{ W/m}^2$ . 系统选用具有椭圆形反射面的卡塞格伦天线,面积为  $19.38 \text{ m}^2$ .

在 2006 年美国 NASA 的地球科学年会 (ESCTC2006)上<sup>[20]</sup>,加州理工学院喷气推进实验室 (JPL)的 D. Moller 等人报导了 NASA 正在开展的“冰川和陆地冰面地貌干涉仪”(GLISTIN)论证工作,该系统主体是 Ka 波段的单通道单平台 InSAR. 在 Ka 波段,雪的穿透性较小并且兼顾了大气损耗的影响<sup>[23]</sup>. 该系统的两个关键技术是天线孔径和集成数字接收机. GLISTIN 拟采用波导缝隙阵列天线,其  $1 \text{ m} \times 4 \text{ m}$  的星载孔径将会被细分为 4 个  $1 \text{ m} \times 1 \text{ m}$  的波导缝隙阵列面板,且每个面板包含  $160 \times$

160 个缝隙;DBF 理念需要小的高配置的数字接收机,具有高数据率和多通道配置,采用带通采样的定制接收机能达到很小的尺寸. 该工作不但证明了 GLISTIN 系统的技术性能,还验证了整个干涉 DBF 的概念.

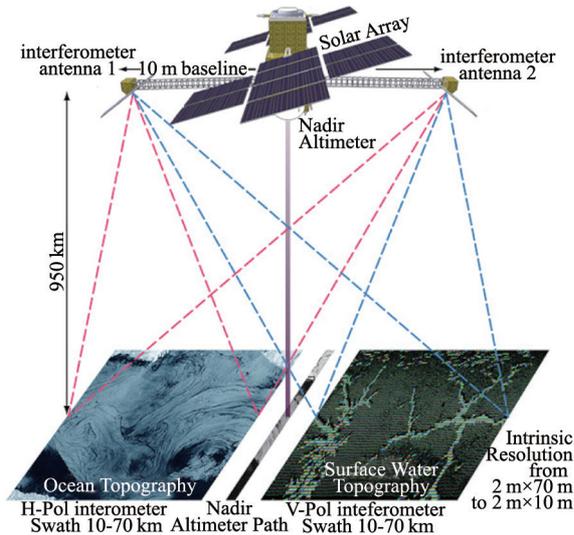


图8 SWOT 任务测量示意图  
Fig. 8 SWOT mission concept configuration

2007 年 7 月,美国发布了第一个有关地球科学和应用的十年空间观测计划,SWOT (the Surface Water and Ocean Topography) 是其中有关地表水和海洋地形的一个科学研究项目,计划 2016 年发射<sup>[9]</sup>. SWOT 的主载荷之一为 Ka 波段的 InSAR,其工作频率 35 GHz,信号带宽 200 MHz,距离向分辨率 0.75 m,角向分辨率 5 m. SWOT 系统采用 4 m × 0.2 m 的相控阵天线,干涉基线长度为 10 m. 利用该系统,可实现海面的高精度和宽测绘带测量,从而对海洋中小范围的变化进行研究;同时也可测量陆地水体高度,对陆地水体的储存和流失造成的空间和时间分布进行研究.

2008 年,欧空局的 M. Ludwig 等人给出了一个基于扫描接收技术 (Scan-on-Receive, SCORE) 的 Ka 波段星载 SAR 的设计方案<sup>[21]</sup>. 鉴于系统组件在高频段容易产生较大的损耗,因此在设计时采用收发分离的双天线系统:发射时选用高增益的反射面天线,接收时选用 8 通道的主动相控阵天线,并采用基于 DBF 的扫描接收技术. 采用这种系统架构,能在降低对发射功率需求的同时,保证功率器件的高效率,但它需要更复杂的星上信号处理过程. 此外,采用扫描接收技术还能减小雨水的后向散射对成像性

能的干扰.

2010 年欧空局又进行了 Ka 波段 SAR 实现高分辨率干涉的验证工作<sup>[22]</sup>. 因为 Ka 波段 SAR 能够在单一平台上实现干涉测量,所以未来在星载干涉仪方面的应用极具潜力. 该系统同样使用了基于高增益天线的扫描接收技术. Ka 波段 InSAR 的硬件配置结构如图 9 所示. 该系统工作频率为 35.75 GHz,发射带宽为 300 MHz,利用 2 m × 0.35 m 的发射天线,2.25 m 直径的接收天线,能够获得 1 m × 1 m 的分辨率. 同时该雷达具有 12 m 的干涉基线长度. 实验结果表明,Ka 波段的 12 m 基线具有非常好的效果.

在 2012 年的 EUSAR 会议上,德国宇航中心 (DLR) 和 Astrium 公司报导了在欧空局资助下 Ka 波段 InSAR 的研发情况<sup>[24]</sup>. 该系统以前述 M. Ludwig 等人的工作为基础,卫星轨道高度 550 km,测绘带宽 12 ~ 15 km,采用 DBF 技术. 方位向两发两收,采用多孔径处理 (MAPS) 方法,降低脉冲重复频率,同时获得宽测绘带;距离向采用 SCORE 技术获得高增益. 发射天线 2 m × 0.4 m,接收天线 2 m × 2 m,峰值功率 3500 W,基线长 20 m (两边杆子各 10 m). 为进一步提升性能,考虑将轨道高度降低到 550 km 以下,可以改善噪声等效后向散射系数 NESZ 和减小高度模糊.

从毫米波星载 SAR 的国际研究现状来看,尽管还没有实际在轨运行的星载毫米波 SAR,但美国和欧盟都有相关研发计划,并正在紧锣密鼓地发展中. 可以预期,待美国 SWOT 项目搭载的 Ka 波段 InSAR 在 2016 年发射升空后,星载毫米波 SAR 的发展必将掀起一个新的高潮,使星载毫米波 SAR 成为未来对地观测领域重要的发展方向.

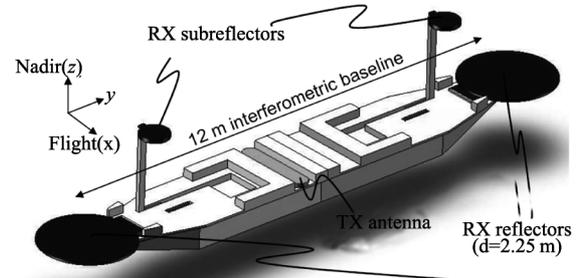


图9 卫星上硬件配置结构  
Fig. 9 Satellite configuration

## 4 毫米波 SAR 的应用前景及发展趋势

### 4.1 应用前景

毫米波 SAR 独特的技术特点,使其在军事和民

应用领域都具有广阔的应用前景<sup>[22,23,25]</sup>;

(1) 高分辨率成像. 由于毫米波 SAR 能够产生高分辨率图像(机载 Ka 波段 SAR 的分辨率已优于 0.1 m),而且采用调频连续波(FMCW)体制还可使 SAR 系统进一步轻小型化,非常适用于无人机平台. 因此,毫米波 SAR 在军事侦查、自然资源普查和灾害监测等领域都有重要应用.

(2) 毫米波干涉成像和三维成像. 毫米波 InSAR 可以较短的基线获得较高的地形高程测量精度(交轨模式)和运动目标的测速精度(顺轨模式),利用星载双天线 InSAR 可以形成立体侦察能力,从而大大丰富对目标及其环境信息的感知,生成更为准确的军事情报,为作战指挥、精确打击等军事行动提供可视化的地理环境和战场态势地图等. 此外毫米波较弱的穿透能力使毫米波 SAR 特别适于提取地物的表面信息,在获取森林树高或植被厚度,形成植被蓄积量信息以及海洋和冰川地形测绘等领域都具有广阔的应用前景.

(3) 毫米波成像导引头. SAR 通常工作在侧视成像方式,但对地攻击的战斗机和空地导弹对前斜视/前视工作方式具有强烈需求. 在精确对地攻击方面,空地导弹的毫米波 SAR 成像导引头发展很快,表明 SAR 的军事应用正从传统的情报侦察向精确打击武器领域扩展.

(4) 毫米波辐射计. 机载单天线毫米波成像辐射计的空间分辨率较高,为无源战场侦察提供了有效手段,若和毫米波 SAR 集成在一起配合使用,可获得很好的图像解译效果. InSAR 技术可有效提高毫米波成像辐射计的空间分辨率,并适于星载实现.

#### 4.2 存在的问题

尽管毫米波 SAR 在实际应用和方案论证时表现出了其特有的优势,但是这并不是说毫米波 SAR 就没有缺陷. 目前,毫米波 SAR 的发展也存在一些亟待解决的问题:

(1) 毫米波段存在着严重的大气衰减,所以在系统设计时不得不考虑大气和雨水衰减的影响<sup>[26]</sup>;

(2) 毫米波 SAR 的数据率高,因而其采集和处理的成本也较高;

(3) 毫米波系统对电磁兼容(EMC)和功放的要求更高;

(4) 毫米波 SAR 的遮挡效应明显;

(5) 现阶段国际上毫米波 SAR 采用的功率源主要是扩展相互作用速调管(EIK),而目前国内 EIK 的研制基础较弱;

(6) 毫米波 SAR 在工作时要求高精度的平台运动补偿和天线指向稳定<sup>[11]</sup>,因为平台不稳定因素而引起的速度误差和加速度误差都与波长的倒数成正比,波长越短误差越大,否则就会引起图像的几何失真. 以上这些问题在进行毫米波 SAR 系统的设计时都必须认真考虑.

#### 4.3 发展趋势

通过对国际上相关毫米波 SAR 系统及其应用前景的分析可以看出,现阶段毫米波 SAR 的发展趋势主要包括以下几个方面:

(1) 从机载向星载平台发展. 经过近 20 年的发展,毫米波 SAR 的理论、关键技术及面临的各类风险已在机载平台上获得了充分的验证,国际上已发展出从 Ka 波段到 W 波段的机载 SAR 系统,并取得了分米级别的超高分辨率. 目前,美国和欧洲对 Ka 波段星载 SAR 的论证工作均已接近完成,在未来 3 年内将实现在轨运行,这必将加速推动国际上星载毫米波 SAR 系统的发展.

(2) 从二维向三维成像发展. 常规 SAR 通过距离向脉冲压缩与方位向合成孔径技术,只能获取 2 维平面信息,却不能获取地面的高度信息. InSAR 技术通过比较两幅 SAR 图像的相位信息可以获取大范围、高精度的地表三维信息和变化信息,使得人们从空间对全球地表进行长时间序列的监测成为可能. 由于毫米波的波长短,获得相同测高精度所需的干涉基线较短,因此相比低波段 InSAR,毫米波 InSAR 的优势非常明显.

(3) 高分辨率宽测绘带毫米波 SAR 成像技术. 为增大 SAR 图像中所包含的信息量,快速了解宏观信息,需要 SAR 具有宽幅成像能力;另一方面,在进行地震与灾害情况评估、军事目标识别和军事打击效果评估时又都需要对所指定的区域进行高分辨率成像. 因此提高 SAR 分辨率与测绘带宽对实际应用具有巨大的意义. 由于毫米波的波长短,传统 SAR 设计很难在合理的输出功率水平上获得大的测绘带宽,因此需要采用数字波束形成(DBF)技术. 在距离向采用扫描接收(SCORE)技术获得高增益,从而可采用较小的发射天线获得较大的测绘带宽,并能改善信噪比和减小雨水的散射;方位向采用多孔径处理(MAPS)方法,可降低脉冲重复频率和扩展可用测绘带宽. 因此,采用 DBF 技术是当前毫米波 SAR(特别是星载 SAR)系统发展的重要趋势.

(4) 调频连续波(FMCW)无人机载 SAR. 由于无人机载 SAR 系统在大多数情况下的距离徙动不

过一个距离分辨单元,即在方位压缩前,目标的脉冲响应在一个距离分辨单元之内是一条直线,可以不考虑距离徙动补偿,由此使信号处理运算步骤大大减少.另一方面,采用调频连续波(FMCW)体制后,峰值功率小、信号处理简单、易于小型化,因此非常适用于无人机平台.目前,X波段的FMCW SAR的重量已经能够控制到2 kg以下.

(5)超小型毫米波 SAR.超小型 SAR 系统具有体积小、重量轻、制造费用低、发射灵活和不易被摧毁等一系列优点,而且能较快地采用新技术成果、容易改型、研制规模小、生产效率高、适应性强,具有广阔的发展和应用前景.在毫米波段,由于较短的工作波长可以实现较小的天线口径,同时极限分辨率的提高可以降低系统对伺服系统的苛刻要求,因而能减小伺服系统的尺寸,进一步实现系统的小型化,因此毫米波 SAR 在实现系统小型化方面展现出相当的潜力.而且,由于空间应用时没有大气衰减问题,超小型毫米波 SAR 特别适用于深空探测.

#### (6)高效实时成像算法.

实时成像能够帮助人们在复杂的背景环境下快速做出反应,但这反过来要求高效的算法以减少运算量和缩短相关匹配模板的检索时间,提高实时性.为此,毫米波 SAR 系统的设计除硬件构架方案外,还必须匹配高效合理的算法.除了考虑算法对不同应用背景的适应性外,特殊情况还需要考虑算法的复杂程度.因此,高效实时成像算法也是毫米波 SAR 系统发展的关键.

## 5 结论

对毫米波 SAR 的发展及其应用进行了全面评述.可以看到,国外毫米波 SAR 技术的发展非常迅速,正在从机载走向星载应用.鉴于毫米波 SAR 成像技术在军事和民用遥感领域的巨大应用潜力,我们有理由相信,未来毫米波 SAR 的发展将会把人类带入一个高分辨率、宽测绘带、多维、多角度、多模式协同工作的对地观测新时代.

近年来,国内在毫米波 SAR 技术领域也开展了一些研究工作,如中科院电子所在2012年研制成功了我国在毫米波段的第一个基于中低空飞行平台的三基线 InSAR 原理样机.但总体来看,我国毫米波 SAR 的研究尚处于起步阶段,特别是星载毫米波 SAR 的研究尚未开展起来.为此,有必要尽快开展星载毫米波 SAR 的研究与论证工作.

## 致谢

作者感谢中国科学院电子学研究所禹卫东研究员对本文提出的宝贵意见.

## References

- [1] Curlander J C, Robert N M. Synthetic aperture radar systems and signal processing[M]. John Wiley & Sons, New York, 1991, Chapter 1.
- [2] DENG Yun-Kai, ZHAO Feng-Jun, WANG Yu. Brief analysis on the development and application of spaceborne SAR [J]. *Journal of Radars* (邓云凯,赵凤军,王宇.星载 SAR 技术的发展趋势及应用浅析. *雷达学报*), 2012, 1(1):1-9.
- [3] Ludwig M, D'Addio S, Perez P S. Ka-Band SAR for spaceborne applications based on scan-on-receive techniques[C]. *Proceedings of 7th European Conference on Synthetic Aperture Radar (EUSAR2008)*, June 2-5, 2008, Friedrichshafen, Germany, pp. 1-4.
- [4] TONG Wu-Qin, FAN Xiang. Millimeter wave synthetic aperture radar imaging[J]. *Fire Control and Command Control* (同武勤,樊祥.毫米波合成孔径雷达成像技术. *火力与指挥控制*), 2006, 31(3):78-81.
- [5] Hughen J H, Baker A B, Sullivan D J. Demonstration of a SAR mode for a lightweight 35 GHz MMW radar[C]. *Record of the 1994 IEEE National Radar Conference*, 29-31, March 1994, Atlanta, USA, pp. 23-28.
- [6] Novak L M, Halversen S D, Owirka G, et al. Effects of polarization and resolution on SAR ATR[J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 1997, 33(1):102-116.
- [7] Schimpf H, Essen H, Boehmsdorff S, et al. MEMPHIS - A fully polarimetric experimental radar. *Proceedings of 2002 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS2002)*, June 24-26, 2002, Toronto, Canada, pp. 1714-1716.
- [8] M. Edrich. Lessons learnt from the design and flight-testing of a highly miniaturised MMW SAR sensor system[C]. *Proceedings of 6th European Conference on Synthetic Aperture Radar (EUSAR2006)*, May 16-18, 2006, Dresden, Germany.
- [9] Fu L, Alsdorf D, Rodriguez E, et al. The surface water and ocean topography (SWOT) mission[C]. In Hall J, Harrison DE, Stammer D (eds) *Proceedings of OceanObs'09: Sustained Ocean Observations and Information for Society*, vol 2, Sept. 21-25, 2009, Venice, Italy, ESA Publication WPP-306.
- [10] Magnard C, Meier E, Ruegg M, et al. High resolution millimeter wave SAR interferometry[C]. *Proceedings of IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS2007)*, July 23-27, 2007, Barcelona, Spain, pp. 5061-5064.
- [11] SONG Wan-Zhong. UAV millimeter wave synthetic aperture radar technique[J]. *Telecommunication Engineering* (宋万忠.无人机电载毫米波合成孔径雷达技术, *电讯技术*), 2002, 42(6):4-7.
- [12] REN Pei-Hong, YU Guang-Zheng, SONG Wan-Zhong. An 8 mm high resolution airborne synthetic aperture radar[J]. *Telecommunication Engineering* (任培宏,喻光正,宋万

- 忠,等. 8 mm 高分辨机载合成孔径雷达. *电讯技术*), 2004, **44**(5):77-79.
- [13] SHI Xing. Application and development of millimeter-wave radars[J]. *Telecommunication Engineering*(石星. 毫米波雷达的应用和发展. *电讯技术*), 2006, **46**(1):1-9.
- [14] Stanko S, Johannes W, Sommer R, *et al.* SUMATRA-A UAV based miniaturized SAR system[C]. *Proceedings of 9th European Conference on Synthetic Aperture Radar (EUSAR2012)*, Apr. 23-26, 2012, Nuremberg, Germany, pp. 437-440.
- [15] Ruegg M, Meier E, Nuesch D. Capabilities of dual-frequency millimeter wave SAR with monopulse processing for ground moving target indication[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2007, **45**(3): 539-553.
- [16] Rüegg M, Meier E, Nüesch D, *et al.* High resolution millimeter wave SAR for moving target indication[C]. 6th European Conference on Synthetic Aperture Radar (EUSAR2006), May 16-18, 2006, Dresden, Germany.
- [17] Sadowy G A, Ghaemi H, Hensley S C. First results from an airborne Ka-band SAR using SweepSAR and digital beamforming[C]. *Proceedings of 9th European Conference on Synthetic Aperture Radar (EUSAR2012)*, Apr. 23-26, 2012, Nuremberg, Germany, pp. 3-6.
- [18] Doerry A W, Dubbert D F, Thompson M E, *et al.* A portfolio of fine resolution Ka-band SAR images: part I[C]. *SPIE Defense and Security Symposium*, March 28-April 1, 2005.
- [19] Tomiyasu K. Conceptual spaceborne Ka-band spotlight synthetic aperture radar with reconfigurable aperture[C]. *Proceedings of 2003 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS2003)*, Vol. 1, Jul. 21-25, 2003, Toulouse, pp. 539-541.
- [20] Ludwig M, D'Addio S, Saameno-Perez P. Ka-band SAR for spaceborne applications based on scan-on-receive techniques[C]. *7th European Conference on Synthetic Aperture Radar (EUSAR2008)*, Jun. 2-5, 2008, Friedrichshafen, Germany.
- [21] Ludwig M, D'Addio S, Aguirre M, *et al.* Imaging Ka-band SAR interferometer[C]. *3rd International Asia-Pacific Conference on Synthetic Aperture Radar (APSAR)*, Sept. 26-30, 2011, Seoul, Korea.
- [22] Moller D K, Heavey B, Hodges R, *et al.* The Glacier and Land Ice Surface Topography Interferometer (GLISTIN): A novel Ka-band digitally beamformed interferometer[C], *6th Annual NASA Earth Science Technology Conference (ESCTC2006)*, 26-28, Jun. 2006, College Park, MD, USA.
- [23] Moller D K, Heavey B, Rignot E, *et al.* A novel Ka-band digitally beamformed interferometric synthetic aperture radar for glacier and ice-sheet topographic mapping: concept and technology[C]. *Proceedings of 7th European Conference on Synthetic Aperture Radar (EUSAR2008)*, Jun. 2-5, 2008, Friedrichshafen, Germany, pp. 1-4.
- [24] Schaefer C, Dekker P L. Interferometric Ka-band SAR with DBF capability[C]. *Proceedings of 9th European Conference on Synthetic Aperture Radar (EUSAR2012)*, Apr. 23-26, 2012, Nuremberg, Germany, pp. 7-10.
- [25] QIAO Ming, PAN Zhou-Hao, LIU Bo, *et al.* Analysis and compensation method research on the channel leakage error for three-baseline MMWInSAR[J]. *Journal of Radar* (乔明,潘舟浩,刘波,等. 毫米波三基线 InSAR 通道泄露误差分析和补偿方法研究. *雷达学报*), 2013, **2**(1): 68-76.
- [26] Capsoni C, Guarnieri A M, Riva C, *et al.* Impact of atmospheric propagation in a Ka-band space-borne sar for imaging and interferometry[C]. *Proceedings of 2012 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS2012)*, Jul. 22-27, 2012, Munich, Germany, pp. 3815-3818.