



# 合成孔径雷达的现状与发展趋势

盖旭刚

陈晋汶

韩俊

王惠斌

**摘 要** 简要介绍了合成孔径雷达的基本原理与应用情况,讨论了当前国内外合成孔径雷达研究的一些主要热点方向,并给出了部分具有代表性的合成孔径雷达系统主要参数,最后,对未来合成孔径雷达发展趋势进行了探讨性研究。

**关键词** 合成孔径雷达 应用领域 研究现状 发展趋势

## 引 言

合成孔径雷达(SAR)是一种高分辨率成像雷达,可以在能见度极低的气象条件下得到类似光学照相的高分辨雷达图像。合成孔径雷达的首次使用是在20世纪50年代后期,装载在RB-47A和RB-57D战略侦察飞机上。经过近60年的发展,合成孔径雷达技术已经比较成熟,各国都建立了自己的合成孔径雷达发展计划,各种新型体制合成孔径雷达应运而生,在民用与军用领域发挥重要作用。

## 1 基本原理

### 1.1 工作原理

与其它大多数雷达一样,合

成孔径雷达通过发射电磁脉冲和接收目标回波之间的时间差测定距离,其分辨率与脉冲宽度或脉冲持续时间有关,脉宽越窄分辨率越高。合成孔径雷达通常装在飞机或卫星上,分为机载和星载两种。合成孔径雷达按平台的运动航迹来测距和二维成像,其两维坐标信息分别为距离信息和垂直于距离上的方位信息。方位分辨率与波束宽度成正比,与天线尺寸成反比,就像光学系统需要大型透镜或反射镜来实现高精度一样,雷达在低频工作时也需要大的天线或孔径来获得清晰的图像。由于飞机航迹不规则,变化很大,会造成图像散焦。必须使用惯性和导航传感器来进行天线运动的补偿,同时对成像数据反复处理以形成具有最大对比度图像的自动聚焦。因此,合成孔径雷达成像必须以侧视方式工作,在一个合成孔径长度内,发射相干信号,接收后经相干处理从而得到一幅电子镶嵌图。雷达所成图像像素的亮度正比于目标区上对应区域反射的能量。总量就是

雷达截面积,它以面积为单位。后向散射的程度表示为归一化雷达截面积,以分贝(dB)表示。地球表面典型的归一化雷达截面积为:最亮+5 dB,最暗-40 dB。合成孔径雷达不能分辨人眼和相机所能分辨的细节,但其工作的波长使其能穿透云和尘埃。

### 1.2 波段分布

现今世界上已有各种频段的合成孔径雷达以满足不同用途。有HF、VHF、P、L、S、C、X及毫米等波段。瑞典研制了一个超宽带合成孔径雷达,其波段自HF(20 MHz)延伸至VHF(90 MHz)。机载合成孔径雷达多数用三个频段,按不同用途选定,例如L、S、X三频段或P、L、C三频段等。国外研制成功的三频段全极化机载合成孔径雷达已经很多,林肯实验室用Ka波段(33 GHz)进行高分辨力0.3 m×0.3 m和多极化进行了目标自动识别试验。星载合成孔径雷达在20世纪90年代前期是单频段的,之后也发展成三频段的。例如美国在1999年发射的EOS-合

本文2011-11-26收到,盖旭刚、王惠斌均系空军驻京丰地区军事代表室工程师,陈晋汶、韩俊分别系空军雷达学院训练部讲师、博士生



成孔径雷达采用 L、C、X 三频段。

## 2 应用情况

由于合成孔径雷达采用了许多先进技术,因而具有许多常规雷达不具有的能力。如:远距离全天候成像能力、高分辨能力、自动目标识别能力、穿透丛林能力以及机上处理能力。正是由于合成孔径雷达具有了如此多的先进性能,使其在民用与军用领域都能发挥重要的作用。

### 2.1 民用领域

机载合成孔径雷达容易实现较高的分辨力。当然,对分辨力的要求要视具体的用途而定。通常民用距离和方位二维分辨力  $10\text{ m} \times 10\text{ m}$  即可。二维成像合成孔径雷达民用领域有:

- 1) 区域性(例如数十万平方公里)大面积小比例尺寸全貌图;
- 2) 水文学应用(例如水灾区实时成像);
- 3) 农作物监测和森林监测;
- 4) 降雨量估计;
- 5) 土壤含水量估计和冬季积雪面积判断;
- 6) 大城市及其四周城镇的规划布局;
- 7) 对地面岩石分析,可初步估计地下是否有石油或其它矿产资源;
- 8) 能对考古作贡献,例如古城遗址、黄河故道等;
- 9) 对海洋中船只监测和海难救援;
- 10) 高纬度地区海洋中的冰层流动,并判定新生成易破冰层。

为更准确满足上列某些要求,现代机载合成孔径雷达均采用多频段多极化的手段。

### 2.2 军用领域

合成孔径雷达在军事领域应用广泛,各类星载和机载合成孔径雷达成为监视、侦察的中坚力量。军用合成孔径雷达要求的分辨力高,带条成像  $1.0\text{ m} \times 1.0\text{ m}$ ,聚束成像  $0.3\text{ m} \times 0.3\text{ m}$ 。二维成像的主要军用领域有:

- 1) 探测敌方纵深军情;
- 2) 侦察敌方炮兵阵地、坦克和部队集结区;
- 3) 侦察敌方较前沿机场和场内飞机类型;
- 4) 侦察敌方交通枢纽,例如火车站及军港;
- 5) 经过导弹或飞机轰炸敌方军事设施后评估敌方损失;
- 6) 从地杂波中发现敌方运动目标。

## 3 技术研究热点

1952 年,Shervin C W 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合成孔径雷达实验系统成功地获得了第 1 幅全聚焦合成孔径雷达图像,合成孔径雷达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,并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合成孔径雷达,合成孔径雷达的应用也从军事领域拓展

到更为广阔的民用领域。

美国是发展合成孔径雷达的先驱,技术最成熟且装备最先进。至 20 世纪 70 年代,美国的机载合成孔径雷达就发展了四代,其分辨率从最初的  $10\text{ m}$  提高到小于  $1\text{ m}$ ,广泛用于军用侦察/监视/目标指示及地形测绘。美国的星载合成孔径雷达是 20 世纪 70 年代以后才得以发展的,1978 年 6 月美国宇航局成功发射了海洋 1 号卫星(Seasat-A),在卫星上首次装载了合成孔径雷达。该雷达对地球表面  $1 \times 10^8\text{ km}^2$  的面积进行了测绘,标志着合成孔径雷达已成功地进入了空间领域。此后,星载合成孔径雷达技术得到飞速发展,俄罗斯、日本、加拿大、印度、欧共体等国家的一系列星载合成孔径雷达升空。1991 年欧洲宇航局成功发射 ERS-1 卫星和机载多频段偏振测定合成孔径雷达系统的成功研制可认为是合成孔径雷达技术的两大飞跃。目前,国外合成孔径雷达研制的新技术很多,并产生了许多新体制合成孔径雷达。表 1 所列为近几年国外具有代表性的合成孔径雷达卫星系统。

### 3.1 多参数合成孔径雷达系统

多参数包含多极化、多频段及多视角等内容。当合成孔径雷达系统发射不同波段、不同极化的电磁波且电磁波以不同入射角照射地物时,合成孔径雷达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



表 1 国外典型合成孔径雷达卫星系统

	德国放大镜系统( 5 颗)	以色列 TecSar	印度 RISAT-2	意大利 COSMO -SkyMed 星座( 4 颗)
发射时间	2006 ~ 2009 年	2008 年 1 月	2009 年 4 月	2007 ~ 2008 年
频段	X 波段	X 波段	多波段	X 波段
分辨率 /m	0.5 ~ 1	1	1	1
工作模式	聚束模式、条带模式、扫描合成孔径雷达模式	广域覆盖、条带模式、点状模式、马赛克模式、水平/垂直多种极化组合成像模式	多模式	多种不同的地面分辨率模式, 分辨率在 1 m ~ 100 m 之间
用途	全天时、全天候侦察能力	军事情报搜集、敌方重点设施监视	军事监视	农业、林业、城市规划、灾害管理、地质勘测、海事管理、环境保护

表 2 国外几种多参数合成孔径雷达系统

系统名称	国家	时间	极化方式	频段	入射角/( ° )
SIR-C	美国	1994 年	HH ,HV ,VH ,VV	L ,C	15 ~ 60
IMARC	俄罗斯	1990 ~ 1995 年	HH ,HV ,VH ,VV	L ,C ,P ,HF	60 ~ 83
EMI SAR	丹麦	1997 年	HH ,HV ,VH ,VV	L ,C	20 ~ 80
Radarsat-II	加拿大	2002 年	HH ,HV ,VH ,VV ,LHC ,RHC	C	20 ~ 50
ALOS-PLA SAR	日本	2004 年	HH ,HV ,VH ,VV	L	18 ~ 48

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详细性和可靠性。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。可见, 多参数合成孔径雷达系统必将会越来越受到重视。当前, 具有代表性的多参数合成孔径雷达系统相关参数如表 2 所示。

3.2 干涉合成孔径雷达

干涉式合成孔径雷达( In-SAR) 技术是在合成孔径雷达基础上发展起来的一种新技术, 普通合成孔径雷达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。地球表面的

三维目标是按照其到合成孔径雷达的斜距和沿航迹的相对位移( 或多普勒频率) 被投影到二维的合成孔径雷达图像上的, 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合成孔径雷达系统可以实现地形( 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, 干涉式合成孔径雷达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。星载雷达采用双天线雷达干涉法, 在 10 天的飞行中对地球近 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, 由获取数据产生的三维综合地形信息可用于武器制导、导航等。

3.3 超宽带合成孔径雷达

超宽带合成孔径雷达( UWB SAR) 是将超宽带技术和合成孔径技术结合起来, 使其同时具有很高的距离分辨率和方向分辨率。林肯实验室研制的 UHF-合成孔径雷达频带为 200 MHz ~ 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。伊拉克战争中, 美军飞航导弹 2011 年第 3 期

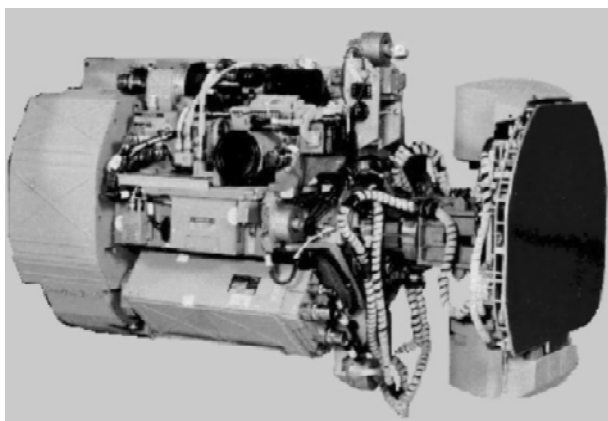


图1 AN/APG-76 雷达



图2 NanoSAR

利用 FOPEN 合成孔径雷达和 GPEN 等超宽带系统对伊军地下军事设施进行探测,取得了一定的效果。

### 3.4 聚束合成孔径雷达

聚束合成孔径雷达是指在合成孔径雷达飞行过程中,通过调整天线波束的指向,使波束始终“聚焦”照射在同一目标区域,实现小区域成像。合成孔径雷达以聚束模式工作时不能形成连续的地面观测带,但它可获得很高的方位分辨率,这在许多场合是非飞航导弹 2011 年第 3 期

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合成孔径雷达数据采集系统,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-3A 合成孔径雷达系统,方位分辨率达到 0.66 m。美国诺登公司研制的 APG-76(V)雷达(见图 1)以聚束照射模式工作时,方位分辨率可以达到 0.3 m。

当前,合成孔径雷达实现聚

束模式工作需要解决如下几项关键技术:天线波束控制、运动补偿和高分辨率成像处理算法等。

### 3.5 小型化合成孔径雷达

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,为了使合成孔径雷达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,进一步降低合成孔径雷达的体积、质量、功耗和成本。小型合成孔径雷达卫星工作在 ka、X、C 和低频等多种频段,能提供从 1 m ~ 10 m 或再粗糙些的空间分辨率。工作模式包括条状图、光电扫描和配合动目标指示扫描,以及特殊的海上模式。小型化合成孔径雷达可广泛用于全天候侦察、目标瞄准定位、地面移动目标跟踪显示和搜救活动。

2004 年,韩国研发出一套合成孔径雷达系统,其质量只有 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。2006 年 8 月美国 ImSAR 公司和 Insitu 公司声称合作研发了世界上体积最小、质量只有 0.45 kg 的最小合成孔径雷达样机——NanoSAR(见图 2)。

### 3.6 逆合成孔径雷达

逆合成孔径雷达(ISAR)与合成孔径雷达一脉相承,都是利用雷达与目标间相对运动所产生的合成孔径对目标成像。不同的是逆合成孔径雷达通常对非合作运动目标(如飞机、舰船、导弹等)进行成像。逆合成孔径雷达具有产生目标像的能力,它通过显示及存储中、高分辨率的图像来提供目标的位置、距离、方向



和外观信息。

在现阶段,逆合成孔径雷达成像已经应用于目标分类、辨识和战场上的敌我识别以及精确武器制导等军事领域,如美国的 AN/APS21378(V)5 和俄罗斯的 Sea Dragon 潜艇监视系统配备的逆合成孔径雷达可以探测地面、水面目标的二维成像,以检测、分类和跟踪目标。逆合成孔径雷达的高分辨成像将应用于武器发射系统,在发射前先利用逆合成孔径雷达产生目标像,然后根据目标属性发射导弹,以利于导弹的寻的与识别。国内对于逆合成孔径雷达的研究也获得了许多理论成果,特别是其成像的改进算法已经比较成熟。

#### 4 未来发展趋势

过去的五十多年中,合成孔径雷达技术取得了突飞猛进的发展,在成像方法上由非聚焦处理发展为聚焦处理,在处理方式上由光学处理发展到数字式实时处理,工作波段从单频单极化发展到多频多极化,雷达平台由机载发展到星载,分辨率由几十米发展到现在的 1 m 以下(最高达 0.1 m),工作模式由单一的条带模式发展为聚束模式、扫描模式、干涉合成孔径雷达等多种成像模式集成。进入 21 世纪的第二个十年,上述当前各种研究热点将会得到进一步的发展,并将更大程度地从理论走向实践,与此同时,有关合成孔径雷达的新研究领域也将得到发展。

##### 4.1 装备综合一体化

未来太空中,各种各样的平

台越来越多,太空空间的争夺也越来越严重。为此,星载合成孔径雷达系统可以在其平台上加载其它装备,实现装备一体化。如:现在各国的反卫星技术越来越多,卫星平台的生存面临巨大威胁,因此应该加装自卫武器(如激光武器等),提高合成孔径雷达的空间生存能力。另外,星载平台合成孔径雷达的侦查任务也不应该仅仅局限在地面目标,空间中其它卫星系统也应该成为侦察目标。可以在其平台加装具有干扰、窃听甚至具有摧毁功能的武器系统,实现对他方卫星系统的侦察监视,直接截获他方卫星系统获取的情报,省时省力。

##### 4.2 微型化

目前有关合成孔径雷达的小型化技术越来越成熟,但仅限于雷达的小型化。未来战场环境日趋复杂,机载雷达受到平台技术参数的限制,不可能深入敌后开展侦察活动。因此,合成孔径雷达与搭载平台都应该不断减小体积与质量,不断向微型化发展,就像国外“蝇眼”照相侦查机一样,将微型合成孔径雷达直接装载到微型无人机上,发挥其穿透烟雾、高分辨率等优势,实现对纵深战场的持续秘密侦查。

##### 4.3 抗干扰

合成孔径雷达具有作用距离远、工作频带宽以及不受国界、空间以及地理位置的限制等诸多优势,因此在对其干扰方面具有一定的难度。但随着世界各国对合成孔径雷达的重视,关于合成孔径雷达对抗技术的研究也越来越多,俄罗斯、美国、瑞典、加

拿大等国家的研究机构都研究了对合成孔径雷达的电子干扰技术,取得了相应的成果,有的还形成了装备。

目前,对合成孔径雷达实施的干扰大致可分为:对有效载荷的干扰、对数据传输链路的干扰和对卫星平台的干扰。因此,应该从干扰的角度出发,研究相应的合成孔径雷达抗干扰技术,确保其在电磁干扰的环境下不受影响。加紧反干扰措施研究,提高合成孔径雷达生存能力。

##### 4.4 多合成孔径雷达组网

分辨率越高,扫描波束越窄,合成孔径雷达的成像空间就越有限。因此,在实现工作模式多变的情况下,可以按空间位置进行多星组网,采取星座或星队侦察方式,提高侦察情报的时效性,实现对特定战场的持续监控。不同体制的合成孔径雷达有不同的特点与优势。因此,可以在多种不同体制的合成孔径雷达之间进行相互组网,实现优势互补。还可以将合成孔径雷达与其它种类卫星组网,如与可见光卫星组网,发挥合成孔径雷达具有的穿透能力、不受天气影响和可见光卫星成像率更高的优势,从而更好的监视侦查目标。此外,合成孔径雷达还可以与地面雷达组网,如现在飞机的隐身欺骗技术越来越高,特别是等离子隐身技术,其超强的对电磁波的散射作用使目标后向散射面积变得非常小,对地面任何体制雷达都有很强的隐身能力,因而可以利用低轨道合成孔径雷达系统接收方向改变的电磁波,(下转第 95 页)



- [6] Turner ,Susan. X-37 project overview: successfully achieve orbit and return to earth safely. NASA 20000112931
- [7] Chaudhary , Ashwani , Nguyen , Viet , Tran. Dynamics and stability and control characteristics of the X-37. NASA 20020023442
- [8] Manley , David J , Cervisi , Richard T. How X-37 technology demonstration supports reusable launch vehicles. NASA 20000040788
- [9] Rasky , Daniel J , Pittman , Bruce R , Newfield , Mark E. The reusable launch vehicle challenge. AIAA 2006-7208
- [10] Turner , Susan. Flight demonstration of OSP technologies- orbital flight test of the X-37. AIAA 2003-2710
- [11] Chiesa S , Grassi M , Russo G. A small-scale low-cost technology demonstrator of a reusable launch vehicle. AIAA 2005-3346
- [12] 晓雨. NASA 和波音联合实施 X-37 试验机计划. 中国航天 , 1999( 12)
- [13] David E Glass. Ceramic matrix composite ( CMC ) thermal protection systems ( TPS ) and hot structures for hypersonic vehicles. AIAA 2006-2682
- [14] Kevin Rivers H , David E Glass. Advances in hot-structure development. NASA 20060020757
- [15] David A , Stewart and Daniel B Leiser. Lightweight TU-FROC TPS for hypersonic vehicles. AIAA 2006-7945
- [16] Craig Covault. Air force X-37B wings into space. Aerospace America , 2010( 11)
- [17] 吴国庭. 哥伦比亚号隔热系统概貌. 国际太空 , 2003 ( 6)
- [18] 许红英, 侯丹, 陈杰, 等. 美空军发射 X-37B 飞行器简析. 中国航天 , 2010( 6)

( 上接第 86 页)

实现对其的反隐身。

## 5 结束语

合成孔径雷达作为一种新型工作体制的雷达, 凭借自身的优势, 得到了迅速发展, 在未来战场上也将起到重要的作用。随着研究的深入与各项软硬件技术的提高, 更多新体制的合成孔径雷达系统将会不断问世, 合成孔径雷达的研究与应用也会取得重大的突破。

## 参考文献

- [1] 张直中. 合成孔径雷达遥感技术及其应用. 电子工程师, 1997 , 23 ( 4 ) : 2-11
- [2] 谭显裕. 合成孔径雷达的特点及其军用探测. 航天电子对抗 , 2002( 1 ) : 31-35
- [3] 全寿文. 合成孔径雷达的应用与发展. 外军电子战 , 1999 ( 3 ) : 34-40
- [4] 孙佳. 国外合成孔径雷达卫星发展趋势分析. 装备指挥技术学院学报 , 2007 , 18( 1 ) : 67-70
- [5] 王颖, 曲长文, 周强. 合成孔径雷达发展研究. 舰船电子对抗 , 2008 , 31( 6 ) : 59-61
- [6] 王敬, 季新源. 合成孔径雷达 ( SAR ) 的独特功能及发展概况. 桂林空军学院学报 , 2000 , 17( 3 ) : 35-38
- [7] 马永华. 合成孔径雷达对抗技术研究. 成都: 电子科技大学 , 2004
- [8] 余琳, 陶欢. 星载合成孔径雷达对抗方法研究. 航天电子对抗 , 2005
- [9] Covault C. Secret mission surge. Aviation Week & Space Technology , 2005 , 162( 19 ) : 24-25
- [10] Naftaly U. TecSAR-performance , design and status. Berlin: EURO-SAR 2004 5th European Conference on Synthetic Aperture Radar , 2004: 27-30
- [11] Wernigghaus B , Balzer W , Buck Reusss , etal. TerraSAR-X mission. Berlin: EUROSAR 2004 5th European Conference on Synthetic Aperture Radar , 2004: 19-22