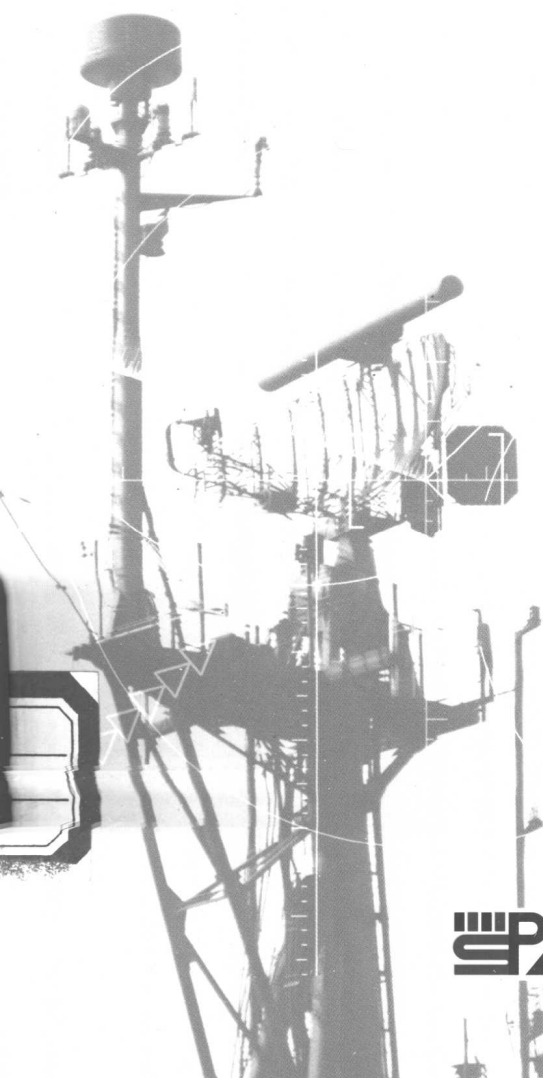


双站合成孔径雷达系统原理

汤子跃 张守融 著



 科学出版社
www.sciencep.com

双站合成孔径雷达系统原理

汤子跃 张守融 著



科学出版社

北 京

内 容 简 介

双站合成孔径雷达是指接收系统和发射系统分置在不同平台上的合成孔径雷达。与常规合成孔径雷达相比,其系统的实现难度和复杂性明显增大,并需要在双站合成孔径雷达的成像理论和收、发系统间的“三大同步”、平台运动误差的补偿等关键技术上有所突破。本书以系统构成的关键技术为主线,阐述双站合成孔径雷达的发展概况、应用前景、系统原理和成像模式。最后,基于双站合成孔径成像原理,提出了海岸成像警戒雷达的应用构想。

本书可供在(合成孔径)雷达理论和技术领域从事教学、科研的工作者和工程技术人员参考阅读,也可作为相关学科的研究生教材和参考书。

图书在版编目(CIP)数据

双站合成孔径雷达系统原理/汤子跃,张守融著. —北京:科学出版社, 2003

ISBN 7-03-011432-9

I. 双… II. ①汤… ②张… III. 合成孔径雷达 IV. TN958

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2003)第 032782 号

责任编辑:段博原 马长芳/文案编辑:彭 斌 姚 晖

责任校对:包志虹/责任印制:刘秀平/封面设计:陈 敬

科 学 出 版 社 出 版

北京东黄城根北街16号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

源海印刷有限责任公司 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

★

2003年6月第 一 版 开本: B5 (720 × 1000)

2003年6月第一次印刷 印张: 8 1/2

印数: 1—1 500 字数: 168 000

定价: 28.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换〈环伟〉)

序

雷达在其诞生后不久即被誉为“千里眼”，但实际雷达能像人眼那样对目标成像，还是在 20 世纪 70 年代合成孔径雷达出现之后。因此，合成孔径雷达是当今从上空观察地面的最主要手段。在军事应用上，机载战场远程雷达侦察系统，已是空-地一体化作战的必要装备；在国民经济应用上，对地面大面积的地图测绘、资源探测、灾情评估等都已依靠机载和卫星的合成孔径雷达系统。因此，近年来合成孔径雷达技术是迅速发展的热门技术，每年有大量关于合成孔径雷达技术新理论与技术及新系统成果的文献出现。

双站(即双基地)合成孔径雷达系统，由于其发射系统和接收系统分置在两个平台上，在运用上有更大的灵活性。特别是在军事应用中，可以把发射平台后置，让不辐射的接收平台靠近战场，这样可使整个系统的抗干扰与抗摧毁能力，亦即系统作战生存能力得到提高。因此双站合成孔径雷达是必然要发展的一种新体制雷达。

但是关于双站合成孔径雷达的技术资料，除有少量在 20 世纪 80 年代美国的试验消息和一些专利申报之外，至今未见国外有有关理论分析文献，国内此前亦没有开展专题研究。

本书作者汤子跃、张守融两位博士具有关于双站合成孔径雷达的坚实的理论基础和丰富的专业知识与实践经验。他们在多年对双站合成孔径雷达系统专题研究的基础上写成本书。书中对双站系统的构成、基本工作原理、成像理论、误差分析，特别是双站间的波束扫描、相位与触发“三大同步”技术的解决途径与同步误差对成像分辨力影响分析等都有较详细的论述。因此，本书首先填补了国际雷达科技文献中的一个空白，是国内雷达系统学科中具有领先水平的研究成果报告。全书文字通顺易读，推理严谨，结论明确。我认为本书的出版既有重大的学术意义，对发展我国双站合成孔径雷达又具备实际指导价值。谨此推荐给雷达界从事合成孔径雷达理论和技术研究、教学的工作者与工程技术人员。



2003 年 3 月 17 日

前 言

合成孔径雷达具有全天候、全天时工作和高分辨力的成像能力,是一种重要的对地观测工具,在军事和国民经济的许多领域有着重要的应用。双站合成孔径雷达(bistatic synthetic aperture radar)是指发射系统和接收系统(含天线)安装在不同平台上的合成孔径雷达。由于收、发系统的分置,一方面,双站合成孔径雷达的收发系统配置更为灵活,有利于获取目标区域的多方向散射信息,有利于以较长的基线实现干涉合成孔径雷达(以获取高精度的高程信息或速度信息),有利于接收平台作为无源系统进行军事(成像)侦察;另一方面,双站合成孔径雷达又必须要解决由收、发系统分置带来的一系列问题,如收、发波束的照射同步,收、发系统之间触发信号的同步,接收机本振信号与发射载波间的相位同步,以及双平台运动误差的测量和补偿,双站合成孔径成像算法等,从而使得双站合成孔径雷达技术更为复杂,系统实现更为困难。

目前,国内外有关双站合成孔径成像理论和技术方面的公开文献和报道并不多。本书是作者对该技术的研究心得和认识的总结,希望能给在该领域从事研究工作的专家、学者和工程技术人员提供参考,也希望能为推动我国双站合成孔径雷达的理论进步和技术发展起到一定的作用。本书在编写上以双站合成孔径雷达的系统构成和关键技术为主线,对双站合成孔径成像的理论、收发系统的同步,以及平台运动误差的补偿等关键技术,在数学建模的基础上,进行了深入浅出的分析,并给出了有关计算机仿真结果。为了兼顾对合成孔径雷达理论不太熟悉的读者,本书另辟一章——第2章,介绍了合成孔径雷达成像的基础理论。

本书的出版得到了空军雷达学院的大力支持。在本书的撰写过程中,我国著名雷达专家郇能敬先生给予了许多具体的指导和帮助;中国科学院电子学研究所王卫延研究员对书稿进行了详细审阅,并提出许多宝贵的意见;空军雷达学院院长郭锡林少将、万山虎少将,中国科学院电子学研究所所长阴和俊博士,720厂董事长谢志成先生等有关领导和专家也对本书的写作提供了支持和帮助;中国科学院电子学研究所任蕾女士和科学出版社马长芳、段博原编辑为本书的编辑出版做了大量具体的工作,在此一并表示感谢。

特别感谢饶红女士、汪惟宝女士给予作者的关怀和鼓励。

最后,限于作者水平,书中不妥之处在所难免,敬请读者批评指正。

汤子跃 张守融

2003年2月

目 录

序

前言

第 1 章 概论	1
1.1 合成孔径雷达	1
1.1.1 合成孔径雷达的基本概念	1
1.1.2 合成孔径雷达技术的发展和应	2
1.2 双站合成孔径雷达	4
1.2.1 双站合成孔径雷达的基本概念	4
1.2.2 双站合成孔径雷达的研究现状	5
1.2.3 双站合成孔径雷达的构成模式	5
1.2.4 双站合成孔径雷达的主要特点	6
1.2.5 双站合成孔径雷达的应用前景	7
参考文献	7
第 2 章 合成孔径雷达成像的基本原理	9
2.1 合成孔径雷达的方位向分辨力	9
2.2 合成孔径雷达的距离分辨力	11
2.3 合成孔径雷达的成像算法	13
附录 A 星载 SAR 的地距分辨力	17
参考文献	18
第 3 章 双站合成孔径雷达系统的基本原理	20
3.1 双站合成孔径雷达的方位向分辨原理	20
3.2 双站合成孔径雷达脉冲重复频率的选择	24
3.2.1 距离模糊对脉冲重复频率的影响	24
3.2.2 方位模糊对脉冲重复频率的影响	26
3.3 双站合成孔径雷达的测绘带宽	27
3.4 双站合成孔径雷达的雷达方程	29
3.5 双站合成孔径雷达的距离特性	31
3.5.1 等距离和方程	31
3.5.2 等距离线上的信噪比变化	34
3.5.3 距离分辨特性	36
3.6 双站合成孔径雷达的回波信号模型与成像处理	40
3.6.1 回波数据格式	40

3.6.2 点目标回波信号模型	41
3.6.3 成像方法	43
3.7 双站合成孔径雷达的系统构成	48
参考文献	49
第 4 章 运动误差对双站合成孔径雷达成像的影响	50
4.1 双站平台运动坐标系	50
4.2 运动误差对成像的影响	52
4.2.1 理想航线方向速度误差的影响	52
4.2.2 视线方向速度误差的影响	60
4.3 收、发天线指向误差对成像的影响	74
4.3.1 天线指向误差模型	74
4.3.2 水平方向天线波束指向误差对成像的影响	76
4.3.3 收发波束指向同步偏差的限制问题	81
4.4 平台运动误差的测量与补偿	83
参考文献	85
第 5 章 双站合成孔径雷达系统的同步	86
5.1 收发波束的照射同步	86
5.2 接收系统与发射系统间的触发同步	87
5.3 接收系统与发射系统间的相位同步	89
5.4 收发系统独立频率源的稳定性要求	91
5.4.1 回波信号相位误差模型	91
5.4.2 频率源频率误差对成像的影响	92
5.4.3 误差影响的仿真	95
5.5 运动误差对锁相环相位同步系统的影响	97
5.5.1 接收机本振信号模型	97
5.5.2 理想航线方向速度误差的影响	98
5.5.3 收发天线相位中心连线方向速度误差的影响	102
参考文献	106
第 6 章 双站合成孔径雷达的成像模式	107
6.1 平飞斜视成像模式	107
6.1.1 几何关系	107
6.1.2 方位向分辨力	108
6.2 斜飞斜视成像模式	111
6.2.1 几何关系	111
6.2.2 方位向分辨力	112
6.3 发射站固定的成像模式	116
6.3.1 几何关系	116
6.3.2 方位向分辨力	116
参考文献	119

第 7 章 海岸成像警戒雷达系统.....	120
7.1 海岸成像警戒雷达的工作原理	120
7.2 海岸成像警戒雷达系统的基本构成	121

第 1 章 概 论

合成孔径雷达(synthetic aperture radar, SAR)是一种高分辨力成像雷达,通常有机载 SAR 和星载 SAR 两种类型。工作时,利用其载体(或称平台)的运动实现孔径综合,获得被观测地域(或者海域)类似光学照片的高分辨力雷达图像。

常规 SAR 的发射机和接收机安装在同一个平台上,并共用一副天线,因此,在工作时只接收地物目标的后向散射信号。本书主要讨论双站(或者双平台)合成孔径雷达(bistatic synthetic aperture radar, 双站 SAR)。双站 SAR 的发射机和接收机安装在不同的平台上,可以有不同的空间位置和运动速度,工作时不限于接收地物目标的后向散射信号,因此其工作原理、成像方式和图像特点也将与常规 SAR 有所不同。

下面,我们先来简单回顾一下 SAR 的发展情况,然后再来具体介绍双站 SAR 的基本概念。

1.1 合成孔径雷达

1.1.1 合成孔径雷达的基本概念

SAR 的基本几何关系如图 1.1 所示^[1], 装载有整个雷达的飞行器作匀速直线

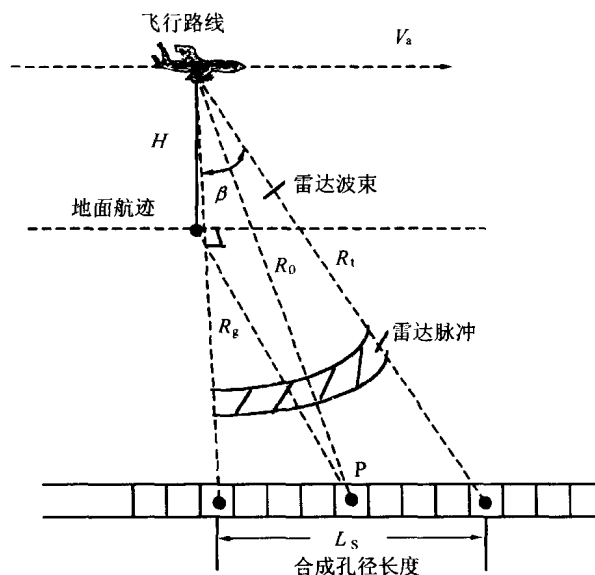


图 1.1 SAR 几何关系图

运动, 雷达向正侧方向发射探测信号并接收地物目标的回波, 然后把接收信号的幅度和相位信息存储起来。随着雷达的前进, 将形成等效的阵列天线, 从而实现方位向(雷达前进方向)的高分辨力。

理论上, SAR 的方位向分辨力 ρ_a 可以达到

$$\rho_a = \frac{d_a}{2} \quad (1.1)$$

式中 d_a 是真实天线水平方向尺寸。从式(1.1)可以看出, SAR 的方位向理论分辨力只和天线的水平方向尺寸有关, 而与观测距离无关。

SAR 的距离向高分辨力是依靠发射宽带信号(采用脉冲压缩技术)来实现的, 其距离向分辨力 ρ_r 由发射信号带宽 B 决定, 即

$$\rho_r = \frac{c}{2B} \quad (1.2)$$

式中 c 是光速。

1.1.2 合成孔径雷达技术的发展和應用

SAR 技术的发展已经有半个多世纪的历史。1951 年 6 月, 美国 Good Year 航空公司的卡尔·威利(Carl Wiley)首先提出了“多普勒波束锐化”的思想, 即通过雷达运载平台与地面目标的相对运动所产生的多普勒频率来提高雷达的方位分辨力。威利的这一概念事实上成了 SAR 技术诞生的标志, 在以后的几十年里, SAR 技术得到了迅速的发展。1964 年, 美国密执安环境研究所(ERIM)成功建造了第一部机载 SAR 系统, 工作频率为 X 波段, 载机采用 C-46 飞机; 1988 年, ERIM 研制成功的 P-3SAR(机载)可以多波段(L、C、X)、全极化工作; 1978 年, 首次装载有 SAR (L 波段)的卫星 Seasat-A 发射成功, 在为期 100 天的运行时间里, Seasat-A 上的 SAR 系统对地球表面大约 1 亿平方公里的面积进行了测绘, 获得了大量过去未曾得到过的信息(Seasat-A 的上天是 SAR 成功进入空间领域的标志); 1994 年, SIR-C/X-SAR 由航天飞机奋进号载入太空, 其合成孔径雷达可以工作于 C、X 两个波段。到现在为止, 世界上多数技术先进国家都已经掌握或者拥有自己的机(星)载 SAR 技术和系统。

我国于 20 世纪 70 年代末就开始了有关 SAR 成像理论与技术的研究。1979 年, 我国自行研制的机载单极化 SAR 成功地获得了第一幅 SAR 图像, 目前正在开展多种机载、星载 SAR 系统的研制。图 1.2 是中国科学院电子学研究所自行研制的 SAR 获得的长江三峡地区雷达图像, 其中, 右上角小图是在 1984 年使用 X 波段 SAR 获得的, 主图是在 1997 年使用 L 波段 SAR 得到的, 比较这两幅图, 可以明显看出三峡工程开工的痕迹。

SAR 技术能够长期受到广泛重视并得到迅速发展, 其基本原因是它用于对地观测时表现出的突出优点。SAR 是一种以微波为探测手段的主动雷达, 工作时不

依赖于直接的光照，对于云层、烟雾有良好的穿透能力，因此可以全天候、全天时工作，在国民安全和国民经济的多个领域得到广泛应用，例如：

在农业方面，可用于农业资源调查、土地利用、农业规划与生产布局、水土保持、农业生态环境与灾害监测、农业作物估产以及草原牧场开发等；

在地质矿产方面，可用于地质勘查、矿产资源探测，以及成矿条件的分析等；

在海洋领域，可以进行浅海水下地形的测绘，海冰的观测和分类，以及海洋污染情况的大范围监测，洋流的时空分布和海面船只的监视、海上交通管理等；

在减灾领域，SAR 是大面积灾害实时监测的有效手段；

在军事领域，可用于战略、战术侦察和测绘等。

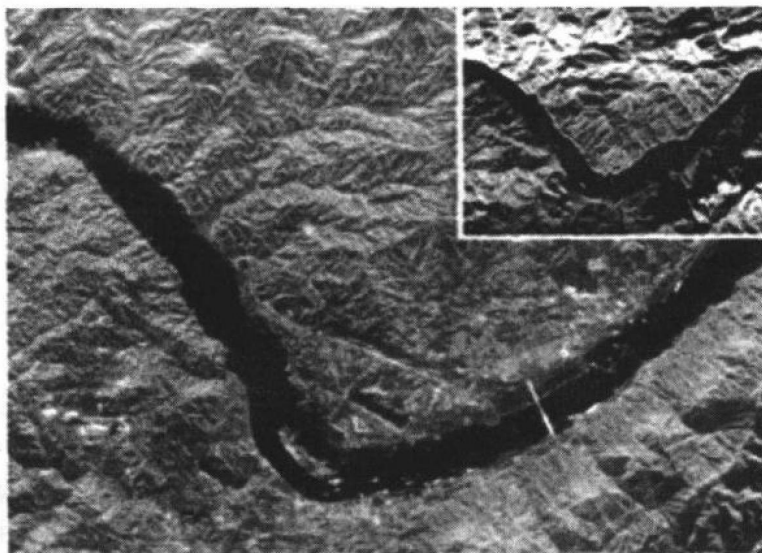


图 1.2 长江三峡地区的 SAR 图像

不过，不同的应用领域对 SAR 的技术指标有着不同的要求。例如，地质矿产领域要求 SAR 有较好的穿透性能，使雷达图像能更好地反映植被覆盖的地层结构；海洋领域要求有更广阔的观测区域，以了解大尺度的海洋参数；军事领域则把高空间分辨力放在重要位置，以便从雷达图像中分辨各种军事目标。

总之，在过去的半个世纪里，SAR 技术得到了长足的进步和发展。目前，在 SAR 系统理论、成像方法以及雷达图像的理解与应用等方面已经有大量的书籍和文献，进行了专门研究；在实践上，也已有不少机载 SAR 和星载 SAR 系统研制成功。随着军事以及民用领域许多新需求的不断提出，各技术发达国家仍然一直在不懈地努力，进一步提高 SAR 的技术性能水平。现阶段，SAR 技术的发展主要有两个方向。

一是基于单一平台的 SAR 技术。目前各国公开研制和使用的机(星)载 SAR，

都是以使用单一平台为基础的, 因此, 我们称之为基于单一平台的 SAR 技术。主要包括:

1) 扩展 SAR 的工作频段。从提高几何分辨力的角度出发, SAR 的工作频段正向高频段发展; 而为了达到提高穿透能力的目的, SAR 一般需要采用较低的频段来工作。

2) 使用多种极化方式。不同的极化方式可能提供地物目标的不同信息, 所以一些先进的 SAR 已经可以或设计有多种极化工作模式。

3) 多种工作模式。如采用聚束模式、扫描模式等, 以获得更高的分辨力或更宽的测绘带。

4) 开发新体制的 SAR。如开发干涉 SAR, 以获取地物目标的高度或速度信息。

SAR 技术发展的另一个主要方向是, 采用两个(或者多个)分置的平台, 以组网的形式进行合成孔径成像, 这其中最基本的、最核心的就是双站合成孔径成像技术。

1.2 双站合成孔径雷达

1.2.1 双站合成孔径雷达的基本概念

双站 SAR 是指发射机和接收机分置在不同平台上的 SAR, 这在概念上类似于双基地雷达, 图 1.3 给出的是机载双站 SAR 的典型工作几何关系。图中, 发射机与接收机由不同的飞机携带, 收、发载机以相同的速度和方向作匀速直线运动, 均以正侧视方式工作; 发射机以一定的脉冲重复频率发射信号, 接收机接收来自地面(目标)的回波信号。这样, 与常规 SAR 的条带成像一样, 双站 SAR 成像的区域(即测绘带)是平行于平台运动轨迹的一条“带”。

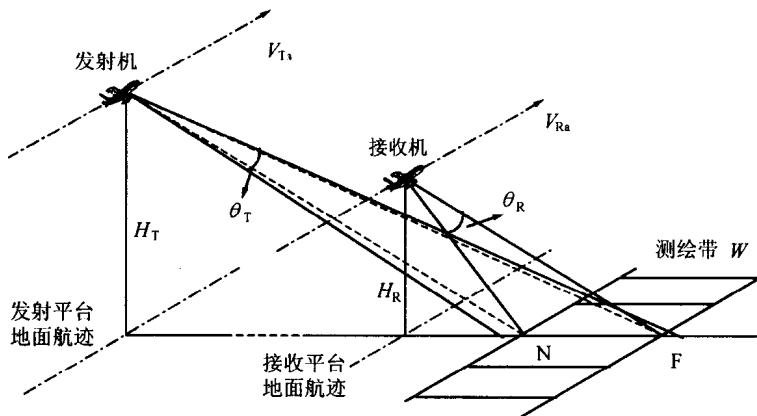


图 1.3 双站 SAR 距离关系图

1.2.2 双站合成孔径雷达的研究现状

前面已经提到, 目前各国公开研制和使用的机载、星载 SAR(包括同平台、双天线的干涉 SAR)都属于常规 SAR(即单站 SAR)的范畴, 涉及双站 SAR 技术的研究最早出现在 20 世纪 70 年代末。1977 年, 美国 Xonics 公司的研究表明^[2], 在双站模式下可以实现动目标检测(MTD)和合成孔径成像, 即可以使得接收机平台在侧视工作时有很窄的杂波频谱, 实现 MTD, 而同时可在前视工作时实现合成孔径成像技术(称为“杂波调谐”); 1979 年, Goodyear 公司和 Xonics 公司与美国空军签订合同, 正式实施“战术双站雷达验证”计划; 在 1983 年 5 月进行的试验中得到了不错的双站 SAR 图像, 并成功地发现了隐蔽在树林中慢速运动的坦克目标。

进入 20 世纪 80 年代后, 美国有人提出了双站成像雷达的成像处理^[3], 双站成像雷达的数据校正处理^[4], 双星 SAR 成像系统^[5], 以及双站 SAR 的自同步技术^[6]等有关专利技术, 这也在一个侧面反映了美国在双站 SAR 系统理论及其技术方面的研究历史。但是, 直到目前为止, 在公开文献中还很少见到有关双站 SAR 系统理论和技术的具体报道。

1.2.3 双站合成孔径雷达的构成模式

按照收、发平台的类型来分, 双站 SAR 主要可以分成以下四大类:

1) 星载双站 SAR: 发射机、接收机分别放置在不同的卫星平台上。这种模式的优点是平台稳定性好, 收、发平台间的相对位置、速度关系大致确定, 成像过程中运动补偿的问题不是很突出。目前, 西方国家正在开展的双星寄生干涉 SAR 的计划就是其中的一种, 其目的是获取地面的三维图像。

2) 星机双站 SAR: 将发射机置于卫星平台上, 而采用飞机作为接收机平台, 或者反之也行。这种模式的优点是可以降低发射机的功率电平, 有利于实现高可靠性和降低成本。缺点是飞机与卫星间存在波束照射和信号相位等同步问题, 并且工作受卫星过顶时间限制。

3) 机载双站 SAR: 发射机与接收机分置在不同的飞机平台上, 这种模式的优点是机动性能好。

4) 地机双站 SAR: 发射机放置在陆基平台上(如高山阵地), 接收机则放置在飞机平台上。这种模式由于方位域的回波多普勒频率全靠接收机平台的运动来产生, 方位向分辨率低。

另外, 无论是星载方式还是机载方式, 都可以采取“一发多收”模式, 即多站 SAR。由于多站 SAR 中的核心问题与双站 SAR 一样, 在本书中将不讨论。

从成像与信号处理角度来讲, 机载双站 SAR 是双站 SAR 各种构成类型中最为典型的。本书的讨论将着重就机载双站 SAR 进行。

1.2.4 双站合成孔径雷达的主要特点

与常规 SAR 相比,双站 SAR 的主要优点有:

(1) 获取信息丰富

常规 SAR 图像所反映的都是目标或地域的后向散射信息,双站 SAR 由于收、发分置,可以利用目标或地域的非后向散射信号来进行成像,其图像所含信息不同于常规 SAR 图像,有利于对成像地区或者目标的分类、识别。

(2) 作用距离远

在机载双站模式下,可以采用“远距发射,近距接收”(或者反之)的工作方式。由于接收距离较近,雷达发射的电磁波信号从发射天线相位中心经地面反射到接收天线的历程(即收发距离和)较短。这样,与常规 SAR 相比,双站 SAR 回波信号的距离衰减量要小。因此,使用双站模式,在同等功率条件下可以增加雷达的作用距离(或者在相同作用距离要求下,可以降低发射机的功率电平)。

(3) 安全性,抗干扰性能,抗截获性能好

在战场条件下,双站 SAR 发射机载机可以在离战区较远或者相对比较安全的区域工作,而接收机载机只接收信号(即无源方式),处于“静默”工作状态,比较隐蔽,因此也比较安全;其次,由于收发分置和接收机的“隐蔽”,敌方也较难对双站 SAR 的接收机实施有效的干扰,这样,双站 SAR 具有较好的抗干扰性能;第三,双站 SAR 的发射功率较低,使得其雷达信号的抗截获性能得到了提高,同时,双站 SAR 发射信号所覆盖的地域与接收波束的覆盖地域并不一致,前者通常要远大于后者,这有助于隐蔽作战意图。

双站 SAR 上面这些好处的获得是以系统复杂性为代价的。双站 SAR 需要突破的关键技术主要有:

(1) 收发系统的同步

由于收发分置,双站 SAR 必须要解决收发系统间的同步问题。主要包括接收波束和发射波束的照射同步,发射系统和接收系统间的触发信号同步,以及接收机本振信号与发射载波信号之间的相位同步等。其中,接收机本振信号与发射载波信号之间的相位同步问题最为突出。

(2) 运动补偿

运动补偿对常规机载 SAR 来说,也是一项必不可少的技术。在双站 SAR 情况下,由于存在有两个载机平台,运动误差本身的测量与分析变得复杂,两个载机运动误差对成像的影响程度又不尽相同。同时,由于其收、发平台的分置,运动误差补偿技术和方法实施起来的难度也随之增大。

(3) 信号处理

双站 SAR 回波信号的多普勒频移由收、发平台运动共同贡献,这使得其方位向分辨力与收发平台的运动和位置关系有关。成像中,由于方位向压缩参考函

数的选取与收发平台到场景中心的距离和, 以及平台运动速度直接有关, 信号处理的难度与复杂度明显增大。

1.2.5 双站合成孔径雷达的应用前景

与常规 SAR 一样, 双站 SAR 的应用包括民用和军用两个大的方面。在民用方面, 常规 SAR 图像所反映的都是目标或地域的后向散射信息, 而双站 SAR 则可以利用目标或地域的非后向散射信号来进行成像, 其图像所含信息可能更为丰富, 这将在农业、地质矿产、海洋以及其他诸多领域有着广泛的应用前景。

在军事上, 星载双站 SAR 与星载常规 SAR 一样有着重要的应用, 而且还可以获得目标或者地域的非后向散射信息, 有利于对敌目标的监视和识别; 机载双站 SAR 以其机动性和隐蔽性更有其广泛的用途。

采用机载双站 SAR 模式的最重要理由是提高军事侦察的隐蔽性, 并增强 SAR 在战争条件下的生存能力。在各种成像侦察手段中, 机载 SAR 无疑有它独特的优势。与各种光学侦察手段相比, 它能够全天候工作, 包括在黑夜和云雾遮盖的条件下获得待侦察地区的图像; 与星载 SAR 比较, 它有良好的机动性能, 能够在指定时间对指定地点进行实时或准实时侦察, 并有较高的几何分辨力。但是, 常规机载 SAR 用于军事侦察时, 几乎没有隐蔽性可言。这是因为 SAR 是一种主动雷达, 在工作时必须不断发射有固定频率的宽带信号, 而且, 雷达载机必须沿直线匀速飞行, 飞行高度约几千米到一万多米, 飞行速度约每小时几百公里, 与被侦察地域的距离约几十公里到二百余公里, 缺乏机动能力。因此, 常规机载 SAR 很容易被发现、跟踪、干扰, 或者遭受攻击, 难以完成侦察任务。机载双站 SAR 系统的发射机和接收机分置在不同的飞机上, 发射机载机可设置在相对安全的位置, 如远离战区或有制空权的地区, 使其较难以遭受攻击(发射机可使用星载方式, 但因受过顶时间影响, 机动性较差); 接收机在工作时不发射信号, 故可采用各种隐身技术, 使其较难以被对方发现, 提高了生存能力。另外, 由于载机双站 SAR 接收机不含大功率器件, 其功耗和体积小, 重量轻, 便于多种类型的(大、小型)飞机携带, 造价较低。

总之, 双站 SAR 作为一项新概念的空间对地观测或侦察手段, 无论在民用还是军事应用领域都有着广泛的发展空间。

参 考 文 献

- [1] 张澄波. 综合孔径雷达原理、系统分析与应用. 北京: 科学出版社, 1989
- [2] 杨振起等. 双(多)基地雷达系统. 北京: 国防工业出版社, 1998
- [3] Caputi Jr. Image Processing for Bistatic Image Radar. US Patent, 4 246 580, January 20, 1981
- [4] Caputi. Jr. Bistatic Imaging Radar Processing for Independent Transmitter and Receiver Flightpaths. US Patent, 4 325 065. April 13, 1982

- [5] Grisham. Method of Satellite Operation Using Synthetic Aperture Radar Addition Holography for Imaging. US Patent. 4 602 257. July 22, 1986
- [6] Powell et al. Autonomous Synchronization of a Bistatic Synthetic Aperture Radar (SAR) System. US Patent . 5 113 193 . May 12, 1992
- [7] Kirk J. Motion Compensation for SAR . IEEE Trans. on AES, 1975, 11(3):338~348
- [8] Curlander. JC R N McDonough. Synthetic Aperture Radar Systems and Signal Processing. John Wiley & Sons, Inc., 1991
- [9] Carrara WG, Goodman RS, Majewski. R M Spotlight Synthetic Aperture Radar Signal Processing Algorithms. Artech House, 1995
- [10] Oliver C, Shaun Quegan. Understanding Synthetic Aperture Radar Images. Artech House, 1998
- [11] Gjessing D T, Saebboe. J. Bistatic Matched Illumination Radar Involving Synthetic Aperture and Synthetic Pulse for Signal to Clutter Enhancement and Target Characterization. 2001 CIE Int. Conf. on Radar Proc., Beijing, China
- [12] Raney RK. Conceptual Design of Satellite SAR. IGARSS, 1984, 11:801~807
- [13] Tomiyasu. K. Tutorial Review of Synthetic-Aperture Radar(SAR) with Application to Imaging of the Ocean Surface. Proc. IEE, 1978, 66(5):563~583
- [14] 郭华东, 徐冠华. 星载雷达应用研究. 北京: 中国科学技术出版社, 1996

第2章 合成孔径雷达成像的基本原理

2.1 合成孔径雷达的方位向分辨率

SAR 是一种高分辨力成像雷达,其距离分辨力是通过增大发射信号的带宽来实现的(一般采用大调频带宽的线性调频信号);而方位向分辨力则是通过增加回波信号的空间多普勒带宽实现的。下面,我们首先分析和介绍 SAR 的方位向分辨力问题。

图 2.1 给出了理想机载 SAR 产生合成孔径的斜距平面几何关系图,载机以速度 V_a 沿 x 方向作匀速直线飞行,雷达以正侧视方式工作。由于载机(平台)的运动,雷达可以在一个比真实天线大得多的口径上对目标区域进行观测。如图 2.1 所示,当载机处在位置 1 时,雷达天线的波束刚开始照射到 P 点;当载机处在位置 2 时,雷达的波束中心刚好指向 P 点;载机处在位置 3 时,雷达波束则刚离开 P 点(即结束对 P 点照射)。这样,对 P 点来说,雷达的合成孔径长度即为位置 1 和 3 之间的距离,当雷达波束宽度较小时,合成孔径长度 L_S 可以近似表示为

$$L_S \approx R_0 \theta_a \quad (2.1)$$

式中: R_0 为 P 点到雷达合成孔径中心的斜距;

$$\theta_a = k \frac{\lambda}{d_a} \quad (2.2)$$

为雷达方位向波束宽度。式(2.2)中, d_a 为天线水平方向尺寸; λ 是雷达工作波长; k 是与激励函数有关的系数,其值接近于 1(在均匀馈电时, $k=0.89$),为了方便起见,通常将式(2.2)近似为 $\theta_a = \lambda/d_a$ 。

不失一般性,假设 $t=0$ 时刻载机横向位置 $x=0$ (即位置 2);在 t 时刻,载机的位置可以表示为

$$x = V_a t, \quad t \leq |T_S/2| \quad (2.3)$$

式中 T_S 为孔径合成时间,其值为

$$T_S = \frac{L_S}{V_a} \quad (2.4)$$

根据图 2.1,当载机位于位置 x 时,雷达天线相位中心到点目标 P 的距离 R_t 为

$$\begin{aligned} R_t &= (R_0^2 + x^2)^{1/2} \\ &= (R_0^2 + V_a^2 t^2)^{1/2} \end{aligned} \quad (2.5)$$