

合成孔径激光雷达技术综述

李 番, 鄢双阳, 郑永超, 杨红果

(中国电子科技集团公司 第二十七研究所, 河南 郑州 450005)

摘要:合成孔径激光雷达具有大大高于微波合成孔径雷达的分辨力、能够进行远距离、大面积成像等多种优点,正成为国内外的研究热点,并逐渐走向工程化,以此为背景对合成孔径激光雷达技术进行了综述。首先分析了激光雷达的优缺点,说明了研制新体制激光雷达的重要性;介绍了合成孔径激光雷达国内外的技术进展,对其工作原理进行了较为详细的描述,并结合原理介绍了一个典型的合成孔径激光雷达系统;通过对国内现有技术条件的分析,讨论了我国目前研制合成孔径激光雷达的难点,并对其发展前景进行了展望。

关键词:合成孔径激光雷达; 多普勒频移; 相干探测; 自动聚焦

中图分类号:TN24 **文献标识码:**A **文章编号:**1007-2276(2006)01-0055-05

Overview of the development of synthetic aperture lidar

LI Fan, WU Shuang-yang, ZHENG Yong-chao, YANG Hong-guo

(27th Institute, China Electronics Technology Group Corporation, Zhengzhou 450005, China)

Abstract: Because of many advantages, Lidar based on synthetic aperture theory is becoming research hotspot and coming near practicality. Based on this background, an overview of synthetic aperture lidar is given. In this paper, the importance of developing a new type of lidar is briefly analyzed after introducing the advantages and defects of the traditional lidar. The principle and progress of synthetic aperture lidar are introduced and a typical synthetic aperture lidar system is described. Finally, the existed difficulties of developing synthetic aperture lidar are discussed and the application prospect is predicted based on the analysis of the domestic state of the art.

Key words: Synthetic aperture lidar; Doppler frequency shift; Coherent detection; Automatic focus

0 引言

激光雷达作为一种高灵敏度雷达,不仅能探测和跟踪目标,获得目标方位、速度信息及普通雷达不能得到的其他信息,而且还能完成普通雷达不能完成的

任务,如探测隐身飞机、潜艇、生化战剂等,因此它被广泛应用于航空遥感、大气监测、卫星探测、军事侦察等方面。但激光雷达也有波束窄、不适于大面积搜索等缺点,因此研究新体制的激光雷达具有很重要的意义。本文主要对一种新体制的激光雷达—合成孔径激

光雷达(SAL)的工作原理,国际上的技术与应用进展进行了综述,并针对国内在SAL关键技术上的现状进行了探讨。

1 国内外研究现状及发展方向

合成孔径雷达(SAR)是利用与目标做相对运动的小孔径天线探测并采用信号处理方法获得高分辨率的相干成像雷达。利用激光器作辐射源的SAL使用了合成孔径技术,而且由于工作频率远高于微波,对于相对运动速度相同的目标可产生更大的多普勒频移,因此不仅克服了普通激光雷达波束窄、搜索目标困难等缺点,而且能够提供比SAR更高的方位分辨率,适合大面积的地表成像。

20世纪60年代,国外在SAL成像方面就进行了一些最早的尝试,试验多以钟摆为目标,为以后的研究打下了一定的基础。近年来的一些重要进展主要以美国麻省理工学院林肯实验室的固体激光合成孔径雷达系统、美国NASA实验室的扫描式激光合成孔径成像雷达、美国空军实验室的SAIL(synthetic-aperture imaging ladar)及其他一些仿真试验为代表。国内在合成孔径激光雷达研究上起步较晚,目前仍处于原理研究阶段,尚未有试验报道。激光合成孔径技术的发展也带动了激光雷达和数据处理技术的发展,并将其推广到更广泛的科研及实际应用中。

(1) 林肯实验室的固体激光合成孔径雷达^[1]

林肯实验室于1994年首次报导了他们在美国空军支持下研制成功的固体激光合成孔径雷达实验装置,系统以外差方式进行工作。固体激光雷达辐射源为连续运转的Nd:YAG激光器,工作波长 $1.06\ \mu\text{m}$,输出功率10 mW,本振信号通过分束器进行分光。光电探测器为高速低噪的PIN光电二极管,响应波长从400~1100 nm,光敏面直径为 $250\ \mu\text{m}$ 。发射光束传播若干米到达电机驱动的转盘,转盘上固定两个凹面反射镜,将光束反射回探测器,最终得到的多普勒差频信号由数字示波器进行记录,然后送交计算机进行处理。如图1为实验室装置原理图。

由于试验中目标在运动而雷达静止不动,所以严格来说这是一种逆合成孔径雷达测量系统。试验结果证明,未经处理时转盘上两个目标的图像不可区分,

而经过处理后图像清晰可辨,孔径合成作用使分辨率得到明显改善。

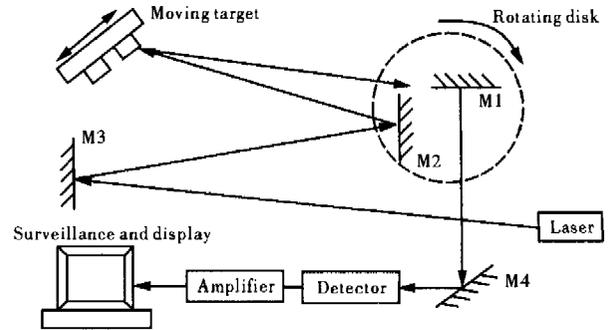


图1 固体合成孔径激光雷达实验室装置

Fig.1 Experimental configuration for solid-laser-imaging SAR demonstration

经过实验室验证后,林肯实验室的研究人员准备把固体激光合成孔径雷达拿到位于美国麻省的汉斯克姆空军基地进行实验。

(2) NASA 扫描式激光合成孔径成像雷达^[2]

NASA的激光合成孔径成像雷达是世界上第一个扫描式二维合成孔径激光雷达验证系统,实际上也是逆合成孔径雷达系统。辐射源采用外腔单模可调激光器,工作波长 $1.55\ \mu\text{m}$,输出功率5 mW,输出为经过线性调频的激光光束(对波长进行调频),带宽为10 nm,光源通过光纤从辐射源引出分束,目标被贴在与发射光成 45° 的铝盘上的“NRL”三个字(字体高度大于1 cm),与雷达的距离为30 cm(实验时采用1 m的距离仿真30 cm实际距离,有效孔径为 $150\ \mu\text{m}$);光电探测器采用InGaAs光电二极管。在与相对运动方向垂直的方向上采用200次/s的频率进行扫描。由于光源调频的线性度问题,相对运动方向的分辨率是 $90\ \mu\text{m}$,大于预测的 $75\ \mu\text{m}$,距离方向的分辨率是 $170\ \mu\text{m}$ 。

(3) 美国空军实验室的SAIL^[3]

空军实验室的激光雷达成像是第一个真正意义上的激光合成孔径成像,也是第一次使用移动的孔径对漫散射目标进行成像。辐射源采用 $1.5\ \mu\text{m}$ 的半导体光纤激光器,目标以 45° 倾斜放置。与以上系统不同的是,空军实验室不仅仅满足于成像,而且通过多次实验在成像算法上进行了研究,实验结果不仅实现了良好的聚焦型合成孔径二维成像,而且对图像的细

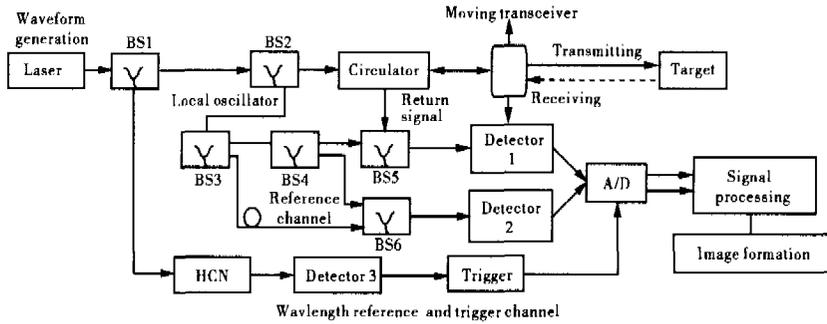


图 2 空军实验室的 SAL 系统原理图

Fig.2 Block diagram of aerospace SAL system

节(图像上的一些模糊的其他成像小物体)进行了较好的处理。最终还对漫反射目标和镜面目标成像进行了对比。图 2 为空军实验室的 SAL 系统的原理图。

(4) 日本通信实验室的红外 SAL^[4]

日本通信实验室于 1998 年使用 CO₂ 激光器对近红外波段二维合成孔径成像的可能性进行了实验室研究,取得了较大的进展。2000 年左右在此基础上研制了一个一维的 10 μm 波段的合成孔径激光雷达系统。系统装载在一个线性移动的平台,在室内短距离范围内对目标发射和接收激光,并进行信号处理。实验结果与仿真得出的理论数据较为一致,对合成孔径成像实现了概念上的验证。研究人员下一步计划研制一个 10 μm 波段的能够进行室外远距离实验的 SAL 系统。

各种实验室的演示实验证实了合成孔径激光雷达成像的可能性^[5-7]。随着一些关键技术的成熟,将合成孔径激光雷达应用于太空探测、军事侦察等方面将成为未来的发展趋势。2003 年 2 月 3 日,诺斯罗普·格鲁曼公司系统开发和技术分部获得美国国防高级研究计划局(DARPA)授予的合同,对合成孔径激光雷达传感器战术成像(SALTI)的机载演示进行设计、建造和概念验证。这种装置如能成功建造,将为有人和无人机载平台提供无与伦比的对防区外目标的探测和识别能力,成为合成孔径激光雷达研究上的一大突破。

2 SAL 工作原理

2.1 SAL 原理

SAL 与 SAR 工作原理类似,只是发射的信号不同,可以通过 SAR 的工作原理来理解 SAL。SAR 分为

聚焦型和非聚焦型,由于一般聚焦型 SAR 的分辨率远高于非聚焦型 SAR,因此这里只对聚焦型 SAR 进行描述。SAR 是从真实孔径天线阵的概念中衍生出来的,真实孔径天线阵雷达的示意图如图 3 所示。有 6 个阵元的天线阵对应目标,对应目标 T 的距离分别为 R1~R6,然后对不同阵元来的信号经过不同的传输延迟(分别为 L1~L6)进行相加,为了能对 T 处的目标进行聚焦,必须保证不同阵元的信号是同相相加^[8]。

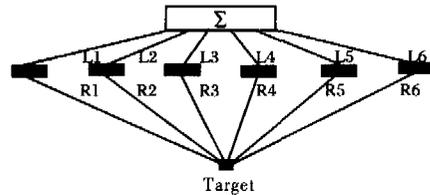


图 3 真实孔径合成阵雷达

Fig.3 Real aperture synthetic array radar

合成孔径的概念与真实孔径天线阵相似,也是通过将各个阵元的信号经过相位补偿后同相相加来实现对目标的聚焦。区别在于这些阵元并不是物理上存在的,而是通过天线与目标间的移动获得的(将天线安装在飞行平台上),飞行在不同时刻到达不同位置,再将不同位置处的信号记录下来。等记录到足够数目的阵元信号后,再对它们进行相位补偿,使对某处目标的信号是同相相加,这时即可实现对该点的聚焦。而等效天线阵列的最大长度,即被定义为合成孔径长度(对每一点目标而言)。

在实际的 SAL 系统中,要实现相位的补偿和叠加是一个复杂的数据处理过程,也是 SAL 成像的关键一步。通常为了提取相位信息,SAL 采用相干探测

体制,当激光雷达相对于地面目标运动时,地面目标上反射回来的信号与本振信号通过混频产生多普勒频移。光电探测器接收来自目标的不同时刻的多普勒差频和距离信号(如果在合成孔径长度内发射 N 个脉冲,则探测器将会输出 N 个多普勒频移项),然后转换成电信号进行数据处理。通常合成孔径时间内的数据处理采用二维相关技术实现,也就是通过匹配滤波器对 SAL 多普勒频谱进行方位向的合成孔径处理,对距离向信号进行脉冲压缩处理得到的。

匹配滤波器实质上包含两个步骤:第一步是对回波信号进行相位加权或相位调整,使每个信号的相位成为同相,这就是聚焦过程;第二步是同相信号相加,相关处理中的延时相乘过程,是对回波信号相位加权使之成为同相的过程。相关中的积分是相加过程。匹配滤波器实际上是一个相位校正网络。它与输入信号的卷积过程既包含了相位加权又包含了同相相加^[9]。在实际处理中,匹配滤波器功能的实现可以通过对光电探测器输出的信号进行采样,然后进行相应的离散傅里叶变换得到。

为简便起见,不再详细推导公式,直接给出结果。最终合成孔径激光雷达在方位向的分辨率经推导可得出:

$$\rho \approx D/2 \quad (1)$$

式中 ρ 为方位分辨率; D 为光学接收孔径。

从以上原理及公式(1)可以得出:

(1) SAL 的方位分辨率等于实际天线孔径的一半,而且由于光学接收孔径远远小于雷达,SAL 可以得到比 SAR 更高的方位分辨率。

(2) 分辨率与波长和目标所在的位置无关。

因此,可以说通过合成孔径处理,激光雷达大大提高了方位分辨率,减小了对目标环境的依赖性,能够形成清晰度较高的图像,实现高性能、远距离的探测。

2.2 典型 SAL 系统

相干探测体制的 SAL 由激光发射部分、外差接收机、合成孔径处理器、收/发光学系统、计算机软件处理等部分组成。其中合成孔径处理部分包括带通滤波器、A/D 转换、匹配滤波电路等。图 4 为一典型的 SAL 系统^[10]。

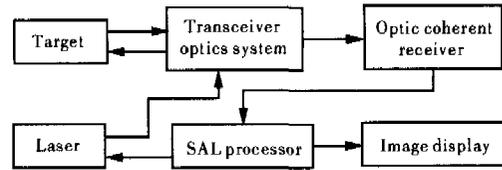


图 4 典型的合成孔径激光雷达系统

Fig.4 Typical SAL system

系统在发射控制系统的作用下激光发射机向目标发射具有一定调制方式的激光光束,其中分出一部分作为光学外差接收机的本振信号。

由于激光雷达与目标之间存在相对运动,目标回波信号与本振信号之间存在多普勒频移信号,这个信号能够被光学外差接收机检测到,并把其转换成电信号。然后输出的电信号在合成孔径处理器中首先进行带通滤波,得到中频多普勒信号和距离信号。这个信号经过匹配滤波器后对合成孔径时间内的回波信号进行相位调整和累加,即进行合成孔径处理和脉冲压缩处理,提取目标的距离和多普勒方位信息。最终可以通过处理后的信号对目标的散射特性进行还原,获得与灰度和散射特性相对应的可视图像信息,经终端进行显示后即可得到所探测目标的高分辨率的图像。

3 SAL 的关键技术及国内技术差距分析

尽管当前我国的技术条件与国外相比有较大的差距,研制 SAL 有一定的难度,但随着 SAL 关键技术的不断发展,开展 SAL 研究已经具备了一定的基础。由于相对 SAR 来说,SAL 的主要难点集中在相干探测技术和数据处理技术方面,因此下面主要针对目前国内这两方面的技术条件对研制 SAL 的可行性进行探讨。

3.1 相干探测技术

SAL 采用相干探测体制,通过光频相干技术检测出多普勒频移。相干探测具有能够大大降低系统噪声、提高雷达作用距离等优点。但由于一般 SAL 探测距离较远和激光的波长较短,相干探测实现起来有一定难度,是目前研制 SAL 急需解决的一项难题。目前我国发展相干探测 SAL 需要相应技术的支持,包括大功率稳频激光器技术、光学接收技术、信号检测技

术。

(1) 激光器技术

一方面由于 SAL 是相干探测体制,为了获得最佳的相干信号,要求参与混频的信号光和本振光应是理想相干的单频单模光,要有稳定的振荡频率和相位。发射激光的相干时间要和合成孔径时间相匹配,达到 10~100 ms。另一方面由于激光的光斑面积较小,要实现较好的孔径合成效果,需要高重频的脉冲激光。

因此为了实现远距离和高性能的探测,需要输出高质量、大功率、高重频激光光束、频率稳定度好的激光器。

目前国外研究采用 1~2 μm 波段的半导体泵浦激光器,技术上比较成熟。我国开展 SAL 研究工作中,建议激光器选用二极管泵浦的单纵模 Ho:YAG 固体激光器。该激光器体积较小,效率较高,全固态结构,是较有潜力的相干激光光源。但目前我国的短波长固体激光器方面的研究发展较慢,距离工程应用仍有一定距离,因此,激光器技术需要攻关^[1]。

(2) 光学技术

要实现相干探测,不仅要求发射的激光满足一定的条件,对于接收光学系统也有严格的限制。首先在光混频器上信号光与本振光偏振方向一致;其次信号光与本振光要求空间波前匹配,即要求空间调准(准直、共轴),波面吻合垂直入射于光混频表面。二光束入射夹角 θ 应满足:

$$\theta \leq \lambda_0 / \pi l \quad (2)$$

式中 λ_0 为本振光波长; l 为光电探测器光敏面尺寸。实现以上条件需要设计复杂的光学耦合系统,包括收发光的合路和隔离、回波信号与本振激光信号的光学混频、差频探测技术等,目前,这方面是国内一项较大的技术难题。

(3) 复杂背景条件下微弱信号的检测技术

SAL 主要用来探测远距离物体,目标回波信号比较弱,容易受到噪声的影响,而且由于目标和 SAL 之间有相对移动,目标的动态范围也较大,要完成对目标的有效作用距离范围内的探测,必须保证接收系统有足够高的灵敏度。因此用于相干探测的光电探测器应有灵敏度均匀的光敏表面,足够的高频响应和稳定

的量子效率。接收电路应具有大动态线性范围。

3.2 合成孔径处理技术

SAL 在方位向高分辨率的获得主要是利用了雷达和目标之间的相对运动多普勒效应,通过数据的存储和移相相加的办法,即合成孔径处理和脉冲压缩等技术来实现的。其中相位的稳定性和算法的有效性对于数据处理结果影响较大,从而也大大影响了 SAL 的系统分辨率。

当前,随着信息处理技术和大规模集成电路的迅速发展,合成孔径激光雷达的成像处理常采用数字电子成像处理方法。这种方法在 SAR 中应用已经比较成熟,能够完成无噪声高精度计算,可靠性好,能灵活地进行自动聚焦、距离徙动校正以及各种校准,从而提供较好的成像质量^[2]。但对于 SAL 来说,由于激光波长较短,受大气等因素的影响较大,相位畸变较为严重,降低了相干探测的效率,聚焦效果较差,从而降低了系统的分辨率。因此从合成孔径的发展趋势来说,目前 SAR 的一些成熟的成像算法如何移植到 SAL 上,或者是发展新校正相位的算法是软件方面一个亟待解决的问题。硬件方面由于 SAL 需要处理的数据量巨大,激光的脉宽较窄,需要极高速的 A/D 转换器件和信号处理器件。因此在系统设计时器件的选择、数据的实时传输和处理等问题都需详细考虑。

4 结束语

由于合成孔径激光雷达具有高分辨率成像能力,且聚焦型合成孔径激光雷达的方位分辨率与距离无关,能够进行远距离、大范围的地表或空间成像,因此如果能够成功研制,在军事、工业生产、科学研究等方面将具有广阔的应用前景。

从研制 SAL 的进展来说,目前国外正从实验室走向应用阶段,而国内由于在关键技术上与国外存在较大的差距,技术实现上有一定的难度。因此我国研制 SAL 需要一个较长的周期,需要较多人力、物力、财力的投入。随着国内外在各项技术上的不断发展和进步,结合我国的应用需求,有理由相信合成孔径激光雷达的研制工作一定能够顺利开展并最终达到预期的效果。

(下转第 65 页)

- generation by passively Q-switched 1.55 μm diode laser [J]. IEEE J Quantum Electron, 1993, 29(6): 1687-1691.
- [2] CHEN Yung-fu, TSAI S W. Diode-pumped Nd:YVO₄-Cr⁴⁺:YAG Laser [J]. IEEE J Quantum Electron, 2001, 37(4): 580-586.
- [3] YANG Ke-jian, ZHAO Sheng-zhi, ZHAO Hong-ming, et al. Characteristic of a laser diode pumped passively Q-switched Nd:YVO₄ laser with Cr⁴⁺:YAG saturable absorber [J]. Infrared and Laser Engineering (杨克建, 赵圣之, 赵宏明, 等. LD 泵浦 Nd:YVO₄ 晶体 Cr⁴⁺:YAG 被动调 Q 激光特性研究. 红外与激光工程), 2004, 33(6): 567-571.
- [4] ZHANG Xing-yu, ZHAO Sheng-zhi, WANG Qing-pu, et al. Optimization of Cr⁴⁺-doped saturable-absorber Q-switched lasers [J]. IEEE J Quantum Electron, 1997, 33(12): 2286-2294.
- [5] YANG Yu-bing, WANG Shi-yu, WEN Jian-guo. Computer simulating of passive Q-switching used in DPL high power pumped [J]. Infrared and Laser Engineering (杨昱冰, 王石语, 文建国, 等. 大抽运功率 DPL 的被动调 Q 模拟计算. 红外与激光工程), 2004, 33(2): 129-132.
- [6] WANG Wei-yu, GONG Ma-li, LIU Xing-zhan. Stability of passively Q-switched solid-state lasers and pre-pumping mechanism [J]. Laser & Infrared (王伟育, 巩马理, 刘兴展, 等. 预抽运被动调 Q 固体激光器的稳定性研究. 激光与红外), 2000, 30(2): 74-77.
- [7] ZHOU Bing-kun, GAO Yi-zhi, CHEN Ti-rong. Principle of Laser [M]. Beijing: National Defence Industry Press (周炳琨, 高以智, 陈倜嵘, 等. 激光原理. 北京: 国防工业出版社), 2000: 225-228.
- [8] KOERCHNER W. Solid-State Laser Engineering [M]. SUN Wen, JIANG Ze-wen, CHENG Guo-xiang. Beijing: Science Press (KOECHNER W. 固体激光工程. 孙文, 江泽文, 程国祥, 译. 北京: 科学出版社), 2002: 90-93.
- [9] SHIMONY Y, BURSHTYIN Z, Ben-Amar Baranga A, et al. Repetitive Q-switching of a CW Nd:YAG laser using Cr⁴⁺:YAG saturable absorbers [J]. IEEE J Quantum Electron, 1996, 32(2): 305-310.
- [10] EILER H, HOFFMANN K R, DENNIS W M. Saturation of 1.064 μm absorption in Cr, Ca:Y₃Al₅O₁₂ crystals [J]. Appl Phys Lett, 1992, 61(25): 2958-2960.

(上接第 59 页)

参考文献:

- [1] MARCUS S, COLELLA B D. Solid-state laser synthetic aperture radar [J]. Appl Opt, 1994, 33(6): 960-964.
- [2] BASHKANSKY M, LUCKE R L, FUNK E. Two-dimensional synthetic aperture imaging in the optical domain [J]. Optics Letters, 2002, 27: 1983-1985.
- [3] BUELL W F, Marechal N J. Synthetic Aperture Imaging Ladar: Lab Demo and Signal Processing [C]// Proceedings of the 2003 Military Sensing Symposium: Active EO Systems, 2003.
- [4] YOSHKADO S, ARUGA T. Feasibility study of synthetic aperture infrared laser radar techniques for imaging of static and moving objects [J]. Appl Opt, 1998, 37(24): 5631-5639.
- [5] THOMAS J K. Synthetic aperture ladar for planetary sensing [C]// in Earth Observing Systems VIII, 2003, 5151: 44-51.
- [6] PARK D, SHAPIRO J. Performance analysis of optical synthetic aperture radar [C]// BECHERER R J, ed. Proc Soc Photo-opt Instrumentation Engineers, Laser Radar III, 1988, 999: 100-116.
- [7] LEWIS T S, HUTCHINS H S. A synthetic aperture at 10.6 μm [C]// Proc IEEE, 1970, 58(10): 1781-1782.
- [8] LIU Yong-tan. Radar Imaging Technology [M]. Harbin: Harbin Institute Technology Press (刘永坦. 雷达成像技术. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学出版社), 1999: 20-55.
- [9] DAI Yong-jiang. Principle of Laser Radar [M]. Beijing: National Defence Industry Press (戴永江. 激光雷达原理. 北京: 国防工业出版社), 2002: 219-224.
- [10] ZHANG Zhi-zhong. Airborne Radar and Spaceborne Synthetic Aperture Radar [M]. Beijing: Publishing House of Electric Industry (张直中. 机载和星载合成孔径雷达导论. 北京: 电子工业出版社), 2004: 1-12.
- [11] LIU Fu-yun, CAO Yu-hui. Development of the solid-state coherent lidar system [J]. Optoelectronic Technology & Information (刘福云, 曹余惠. 固体相干激光雷达系统的发展. 光电子技术与信息), 1996, 9(6): 6-11.
- [12] YUAN Xiao-kang. Introduction to Spaceborne SAR [M]. Beijing: National Defence Industry Press (袁孝康. 星载合成孔径雷达导论. 北京: 国防工业出版社), 2003, (1): 67-69.