

天基合成孔径激光雷达系统分析

李道京¹, 杜剑波^{1,2}, 马萌^{1,2}, 胡焯^{1,2}, 乔明¹

(1. 中国科学院电子学研究所微波成像技术重点实验室, 北京 100190;

2. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要: 介绍了国内外合成孔径激光雷达的研究现状, 讨论了其技术体制、工作模式和光学系统特点。给出了一个用于空间目标观测的天基合成孔径激光雷达系统方案, 并对其主要的性能指标和关键技术进行了分析。研究表明: 天基合成孔径激光雷达可以在大前斜视角条件下, 以高数据率对目标实现远距离高分辨率成像。

关键词: 激光雷达; 合成孔径成像; 相干探测; 空间目标

中图分类号: TN958.98 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201645.1130002

System analysis of spaceborne synthetic aperture radar

Li Daojing¹, Du Jianbo^{1,2}, Ma Meng^{1,2}, Hu Xuan^{1,2}, Qiao Ming¹

(1. Science and Technology on Microwave Imaging Laboratory, Institute of Electronics, Chinese Academy of Sciences,

Beijing 100190, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: Research status of synthetic aperture radar (SAR) at home and abroad was introduced. Technical system, working mode and optical system characteristics were discussed. The system scheme of spaceborne SAR for space target observation was presented, and its performance and key technology were analyzed. The result shows spaceborne SAR can achieve high-resolution imaging of remote space target with high data rate and large squint angle.

Key words: radar; synthetic aperture imaging; coherent detection; space target

收稿日期: 2016-03-08; 修订日期: 2016-04-14

基金项目: 中国科学院电子学研究所 SAR 技术研究创新项目(Y3Z0120247)

作者简介: 李道京(1964-), 男, 研究员, 博士生导师, 博士, 主要从事雷达系统和雷达信号处理方面的研究。Email: lidj@mail.ie.ac.cn

0 引言

激光雷达成像系统和光学成像系统一样,其空间分辨率都受系统光学孔径的限制,对于一定尺寸的系统光学孔径,其分辨率会随着距离的增加而下降。因此,高分辨率的远距离成像需要很大的系统光学孔径,但实际系统中很多因素限制了系统光学孔径的增加。

由于没有大气的影 响,激光雷达特别适用于外层空间环境的目标探测。在一定的光学孔径条件下,对远距离的空间目标,可考虑使用激光合成孔径成像技术实现目标识别。

合成孔径成像的概念包括雷达平台运动目标静止成像和雷达平台静止目标运动成像两个方面,后者通常称为逆合成孔径成像。两者的工作原理都是基于相对运动产生的大等效孔径获得高的横向分辨率,该横向分辨率的形成也可用信号在慢时间频域的多普勒带宽解释,其基本条件是信号具备高的相干性,故合成孔径成像的概念在原理上适用微波、毫米波和激光信号。

利用合成孔径成像技术,当激光波长为 $10.6\ \mu\text{m}$,发射信号带宽大于 $2\ \text{GHz}$,只要空间目标横向运动和自转使其和雷达之间存在微小的转角 $0.07\ \text{mrad}$ (约千分之四度)时,即可获得分辨率优于 $0.1\ \text{m}$ 的二维图像。假定传统光学系统的角分辨率为 $0.5\ \text{mrad}$,在 $100\ \text{km}$ 距离处对应的横向分辨率为 $50\ \text{m}$,在原理上合成孔径成像有可能将该分辨率提高 500 倍。

激光信号相干性的提高,已使合成孔径激光雷达(SAL, Synthetic Aperture Ladar)的技术实现成为可能,研究天基合成孔径激光雷达技术对基于天基平台的空间目标探测成像系统发展具有重要意义。

1 研究现状

和微波合成孔径成像雷达技术的发展情况类似,激光合成孔径成像的研究工作也是从地基雷达对运动目标的逆合成孔径成像开始的。

地基激光逆合成孔径成像最为典型的应用是对远距离目标成像。自 1964 年第一台 CO_2 激光器问世以来, CO_2 激光技术发展迅速,促进了相干接收体制的 CO_2 激光雷达的起步和发展,比较有代表性的是

Firepond 光学装置^[1]。1981 年,高功率激光雷达放大器系统成功安装在 Firepond 光学装置上,林肯实验室利用上述激光雷达对翻滚运动的空间目标(Agena D 火箭推进器)在距离-多普勒域实现成像。1990 年,林肯实验室利用宽带激光雷达采集到了在轨卫星(LAGEOS)的第一幅距离-多普勒图像,宽带信号为带宽 $150\ \text{MHz}$ 和 $1\ \text{GHz}$ 的线性调频信号。

2006 年 4 月美国诺斯罗普·格鲁门公司采用 CO_2 激光器,在美国国防部先进研究项目局的资助下,成功演示了机载合成孔径激光雷达成像实验^[2],验证了该技术在空间远程探测和高分辨率成像应用中的巨大潜力。在美国军方的继续资助下,该技术正朝实用化方向进展。

2011 年美国洛克希德-马丁公司独立完成了机载合成孔径激光雷达演示样机的飞行试验^[3],对距离 $1.6\ \text{km}$ 的地面目标(观测目标为洛马公司徽标)获得了幅宽 $1\ \text{m}$,分辨率优于 $3.3\ \text{cm}$ 的成像结果。

随着激光合成孔径成像技术的快速发展,将干涉处理的概念引入到激光合成孔径成像中成为新的研究热点。2012 年,美国 Montana 州立大学报道了室内激光干涉合成孔径成像实验结果^[4-5]。该实验在 $1.37\ \text{m}$ 的距离上对一枚印有林肯头像的涂白硬币(涂白以使硬币各处散射特性均匀)进行了单航过和重航过激光合成孔径干涉成像,获得了分辨率在毫米级、高程精度在 $10\ \mu\text{m}$ 级的成像结果。实验表明:相对于二维光学图像,通过干涉处理可以获得关于目标更多的有益信息。

我国的很多大学和科研机构都展开了激光合成孔径成像技术的研究工作,已取得了一定的研究进展,但目前的工作主要是在室内和近距离条件下完成的。西安电子科技大学在 2009 年首次搭建了逆合成孔径激光成像雷达原理性的室内成像系统^[6-7],并在 $20\ \text{cm}$ 距离上获得桌面目标的逆合成孔径激光雷达二维图像。中国科学院上海光学精密机械研究所于 2011 年完成了实验室近距离合成孔径激光成像演示验证实验^[8-9],其采用距离向傅里叶变换和方位向匹配滤波的方法,给出了在 $14\ \text{m}$ 距离上的二维成像结果,方位分辨率优于 $1.4\ \text{mm}$,距离分辨率优于 $1.2\ \text{mm}$ 。

2011 年底,中国科学院电子学研究所室内也完成了距离约 $2.4\ \text{m}$ 的合成孔径激光成像实验^[10],其观测目标为中国科学院电子学研究所徽标,成像分

辨率在毫米级。与此同时,中国科学院上海技术物理研究所等单位也积极开展合成孔径激光成像技术的相关研究工作^[1]。

目前关于天基合成孔径激光雷达的研究工作还停留在概念研究阶段,参考文献[12-14]讨论了合成孔径激光雷达的天基应用问题。

2 技术体制和工作模式

2.1 技术体制

关于合成孔径激光雷达,上述国内外研究工作主要是基于光学和电子学技术结合方案的,即对激光信号的成像处理还是通过光电转换用电子学方法实施二维脉冲压缩的。

但值得注意的是,基于全光学成像处理的研究工作一直在进行。参考文献[15-16]介绍了合成孔径激光雷达光学成像处理技术的研究进展,参考文献[15,17]同时介绍了光学成像处理技术在微波 SAR 成像处理中应用情况。

和基于数字信号处理的电子学成像技术相比,全光学成像处理具有速度快实时性好便于天基应用的特点,但其成像处理精度较低,对实际系统中存在的各种相位误差补偿能力较弱,现阶段合成孔径激光雷达技术实现还是应立足于电子学成像处理技术。针对机载 SAL 的技术体制和系统实现方案,参考文献[18]进行了比较详细的分析。

2.2 工作模式

SAL 采用相干信号体制,通过发射宽带信号获取高的斜距离分辨率,通过相对运动形成的合成孔径获取高的横向分辨率,可用于对地观测或运动目标探测成像,后者通常也称为 ISAL(Inverse Synthetic Aperture Ladar)。

用于对地观测时,SAL 主要工作在正侧视方式,获取的图像在斜距-飞行方向(横向)二维,这和传统的光学成像系统有很大不同。为保证测绘带幅宽,要求斜距向的激光波束宽度和对应的瞬时视场较大。若要进一步扩大观测幅宽,SAL 激光波束需在交轨方向一维扫描。

对运动目标观测时,SAL 获取的图像在斜距-横向二维,横向分辨率由横向合成孔径决定,与目标距离无关,这是 SAL 的重要优点。SAL 选用较大的激光波束宽度和宽视场,有利于目标搜索和捕获。为扩

大目标观测范围,SAL 激光波束需二维扫描并可工作在多普勒波束锐化(DBS,Doppler Beam Sharpening)状态。为获取其运动参数,SAL 还需具备目标跟踪能力,选用较窄的激光波束宽度和窄视场,有利于提高角跟踪精度。为兼顾目标搜索和跟踪成像功能,一个通过分档变焦实现宽窄视场转换的光学系统应是一个合理的选择。

3 光学系统

3.1 传统光学系统

激光雷达通过扩束处理容易形成宽的发射波束,但在大接收孔径下形成宽接收视场并非易事。激光雷达的接收视场,主要由接收望远镜孔径、探测器/探测器组光敏面尺寸、接收孔径与焦距比决定。孔径焦距比越大,光学系统的设计难度越大。在此基础上,激光雷达的接收视场,就转化为由接收望远镜孔径和探测器/探测器组光敏面尺寸决定,接收视场与探测器光敏面尺寸成正比,与接收孔径成反比。

为保证激光雷达具有较远的作用距离,接收望远镜需要足够的尺寸,以获得较多的回波信号能量。由于目前常用的探测器光敏面尺寸较小,在百微米量级,且带宽越大尺寸越小,激光雷达的接收视场也较小,目前基于一个探测器的激光雷达的接收视场通常小于 1 mrad。

为解决激光信号宽视场接收问题,现阶段激光雷达多采用面阵或线阵探测器的接收方式扩大接收视场,这种接收方式具备高的空间角分辨率,但由于需使用光电探测器阵列和多个通道信号处理,对具有高距离分辨率的 SAL 来讲数据量太大,技术实现过于复杂。

3.2 SAL 光学系统

与传统光学系统图像概念不同,SAL 获取的图像在斜距-横向二维。SAL 需要宽的接收视场,但不要求具有高的空间角分辨率,具备采用一个或少量光电探测器实现激光雷达宽视场接收的使用条件,故 SAL 在原理上可使用“非成像光学系统”。

若接收激光信号能收入光纤,则 SAL 相干探测所需的混频及后续信号处理在实现结构上就较为简单。对合成孔径激光雷达需使用单模保偏光纤,单模保偏光纤较小的数值孔径使在宽视场条件下将激光信号收入光纤难度很大。

考虑到光纤准直器和具有合束功能的光纤阵列

都可等效形成大的光敏面,上述问题的解决思路有两个:一是在 SAL 使用传统光路条件下,通过在前置光学系统像面处设置微透镜阵列,将像面上不同方向的入射光转换成近似平行于光轴的光束,收入该微透镜阵列后端的光纤准直器或者光纤阵列,实现宽视场信号收入光纤;另一个是 SAL 前置光学系统采用像方远心光路^[19],像面处直接设置光纤准直器或者光纤阵列,实现宽视场信号收入光纤。假定光纤准直器和光纤阵列等效形成的光敏面在厘米量级,SAL 的接收视场在原理上可达到 20 mrad 量级。

显然,深入研究大接收孔径条件下合成孔径激光雷达的“非成像光学系统”和宽视场信号收入光纤方法具有重要意义。

4 天基系统分析

空间目标观测应是合成孔径激光雷达天基应用的一个主要方向。当激光雷达在天基平台上对空间运动目标观测时,在目标探测和跟踪的基础上,可使用 ISAL 成像技术对目标进行高分辨率成像识别。

和毫米波雷达相比^[20],由于激光雷达波长较短,目标横向运动和自转形成的非常小的角度就可以使 SAL 以高数据率获得高的横向分辨率图像。与此同时,激光波长较短的特点也可使小尺寸目标具有较大的散射截面积,因此,激光雷达更易于观测尺寸较小的空间目标(如小尺寸空间碎片等)。

SAL 将采用脉冲压缩技术实现远距离高距离分辨率探测,可缓解激光器峰值功率和平均功率的矛盾。下面对一个天基空间目标观测 SAL 系统进行分析。

4.1 系统指标

激光波长为 0.5~10.6 μm;成像分辨率为优于 0.1 m;工作模式为 DBS 搜索/跟踪成像;瞬时视场为 0.5 mrad/3 mrad;作用距离为优于 100 km(窄视场)/40 km(宽视场);数据率为优于 10 Hz;前斜视角为优于 80°。

4.2 系统方案

4.2.1 系统组成

SAL 主要由激光光源、定时器、宽带信号产生器、激光信号调制器、功率放大器、发射端和接收端光学系统、在像面 2×2 排列的四组相干探测器、四通道信号处理器、和差探测信号处理器、稳定平台、位置和姿

态测量系统(POS)等组成,系统组成如图 1 所示。

采用接收和发射端光学系统分置方案,有利于提高系统的收发隔离度。其中宽带信号产生器主要由高速 DA 形成,激光信号调制器主要由马赫-曾德干涉仪(MZ)形成,位置和姿态测量系统(POS)用于提供激光雷达的位置、姿态和速度信息,稳定平台用于完成目标搜索与跟踪过程中的激光波束指向控制,为隔离卫星振动对合成孔径成像的影响,稳定平台可选为磁悬浮稳定平台^[21]。

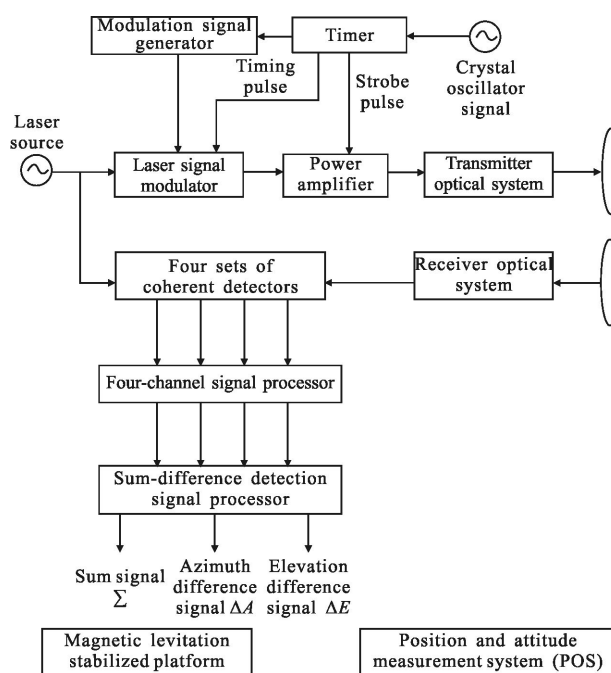


图 1 SAL 系统组成框图

Fig.1 Diagram of SAL system

4.2.2 波形选择

SAL 采用脉冲压缩体制获取高距离分辨率,所需的宽带信号选择为频率调制/相位调制信号,用高速 DA 产生经 MZ^[22]调制到激光载波上。波形选择为宽脉冲或连续波模式时可以降低系统发射信号的峰值功率,而且使用连续波发射信号可避免激光信号脉冲调制引入的频率调制问题。

由于激光信号具有收发隔离度高的特点,系统可适于工作在连续波状态,当发射信号选择为线性调频(LFM)信号^[23]/基于线性调频(LFM)信号的相位调制信号^[24]时,可以采用“去调频”/“去调相”接收方式,以大幅度降低 AD 的采样速率。与此同时,由于 SAL 观测幅宽较窄,也可直接采用数字去斜接收技

术^[25]简化系统光路。

要特别说明的是,使用相位编码信号^[24]虽不能采用去斜接收技术降低 AD 的采样速率,但其不求信号相位连续变化的特点,使其适用于激光信号高功率放大后存在较大相位失真的场合。

4.2.3 信号接收和处理

SAL 采用一发四探测器相干接收体制。激光雷达发射经过高功率放大的宽带信号,目标回波信号经光学系统进入四组探测器(每组探测器都可实现激光信号的相干外差探测解调功能),对四组探测器的信号求和处理实现目标探测,获取目标的距离信息;求差比幅处理获取目标的方位和俯仰角信息,实现对目标的测角和跟踪。

4.2.4 目标搜索和跟踪

SAL 需采用机械扫描扩大观测范围,可工作在 DBS 状态下实现目标搜索。雷达捕获目标进入跟踪阶段后,再进行高分辨率成像处理,其信号接收和处理的过程与目前的 ISAR (Inverse Synthetic Aperture Radar)类似。

为综合解决目标搜索和跟踪成像处理中的大数据量大问题,可考虑在目标搜索时采用窄带信号,目标检测建立跟踪后再发射宽带信号,实现高分辨率成像和目标识别。在宽带信号条件下,可考虑对四组探测器信号进行简单的数字包络检波,形成跟踪所需的和差信号,只对一组探测器的信号进行复杂的成像处理。

4.2.5 探测和成像处理

SAL 工作在 DBS 状态下进行目标搜索时,每个探测器可获得目标的较低分辨率距离-多普勒域图像,在距离-多普勒域实施门限检测和求差比幅处理后可确定目标位置,通过边跟踪边扫描(TWS, Track While Scan)处理可实现同时多目标跟踪。

为缓解目标和雷达相对运动产生的多普勒散焦信噪比下降问题,可对数字包络检波后的信号实施非相干积累,再实施门限检测。

SAL 捕获目标并转入连续跟踪状态后,大前斜视角合成孔径成像处理可采用基于聚束模式的波数域 WK 算法,同时可使用子孔径成像处理以提高图像数据率。

4.3 关键技术

(1) 大口径宽视场变焦光学系统技术

在孔径尺寸约 300 mm、0.5~3 mrad 可变视场条件下,具有波束扫描并能实现高精度目标测角跟踪的光学系统设计难度较大。

(2) 宽带激光信号形成和高功率放大技术

当作用距离 150 km 左右时,相干探测所需的激光信号线宽应优于 1 kHz,激光功率应在千瓦量级,大功率条件下保证激光信号为窄线宽较为困难。

(3) 天基信号和数据处理技术

采用数字去斜技术仅可缓解 SAL 宽带信号带来的数据量大压力,即使不在星上实施复杂的目标成像处理,星上也需具有一定的信号处理能力,以保证目标搜索捕获和连续跟踪功能。为此,高效的天基 DSP+GPU+FPGA 架构实时信号和数据处理技术还需要研究。

(4) 运动目标高分辨率成像探测技术

高分辨率成像处理有助于低信噪比运动目标探测,但其核心是高精度运动和相位误差补偿的实施。由于激光波长较短,目标和雷达存在的相对运动容易产生多普勒模糊和频谱展宽,与此同时,平台的微小振动也会引起信号相位的显著变化,给目标运动参数估计和成像处理带来许多困难。

考虑使用双波长激光信号,通过双频共轭处理^[26]解除多普勒模糊,实现目标运动参数估计。在激光波段,由于目标粗糙度的存在很难产生孤立强点,传统的自聚焦成像方法缺乏使用条件,需研究新的基于四探测器的干涉相位差^[27-28]和空间相关相位差^[29]处理的高精度相位误差补偿方法。

4.4 指标分析

4.4.1 成像分辨率

传统激光雷达的空间分辨率受限于衍射极限,设 λ 为激光波长, D 为光学望远镜孔径, R 为雷达与目标的斜距离,则其衍射极限分辨率为:

$$\rho_{\text{diff}} = \frac{\lambda R}{D} \quad (1)$$

若激光波长为 10.6 μm ,望远镜孔径为 300 mm,斜距离为 100 km,其衍射极限分辨率约为 3.5 m。如果激光波长为 0.5 μm ,则衍射极限分辨率约为 0.2 m。

合成孔径激光雷达发射宽带信号,设 B 为发射信号带宽, C 为光速, k 为加窗展宽系数,斜距离向分辨率为:

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

若发射信号带宽为 2 GHz, 加窗展宽系数为 1.3, 其斜距离向分辨率约为 0.1 m。

利用合成孔径成像技术, 当目标横向运动和自转使其和激光雷达之间产生的成像转角为 θ , 则相对于雷达视线方向的横向分辨率为:

$$\rho_a = \frac{k\lambda}{2\theta} \quad (3)$$

当激光波长为 10.6 μm , 若要求的成像横向分辨率为 $\rho_a=0.1\text{ m}$, 则所需成像转角为 $\theta \approx 0.07\text{ mrad}$ (约千分之四度)。由此可见, 只要空间目标横向运动和自转使其和雷达之间存在微小的转角, 通过合成孔径成像处理即可获得横向分辨率优于 0.1 m 的图像, 且其分辨率优于衍射极限分辨率。

4.4.2 前斜视角

设前斜视成像时可成像的最大前斜视角为 $\theta_{s, \max}$, 根据已知有:

$$\sin \theta_{s, \max} = \frac{1-\Delta}{1+\Delta} \quad (4)$$

式中: $\Delta = \frac{B\lambda}{2C}$ 为相对带宽因子。

显然, 信号波长越小, 越有利于大前斜视角高分辨成像。若雷达发射信号带宽 $B=2\text{ GHz}$, 当激光波长为 10.6 μm 时, $\Delta=3.5 \times 10^{-5}$, 有 $\theta_{s, \max}=89.3^\circ$ 。激光的最大前斜视角接近 90° , 因此, 激光雷达可以实现准前视成像。

4.4.3 数据率

设 θ_s 为激光雷达的前斜视角, T_s 为子孔径成像处理时间, V 为雷达和目标的相对速度。在斜距离 R 处相对于视线方向的横向分辨率为:

$$\rho_a = \frac{k\lambda R}{2VT_s \cos \theta_s} \quad (5)$$

在前斜视波束不扫描工作条件下, 若要求雷达子孔径成像处理的横向分辨率为 $\rho_a=0.1\text{ m}$, 当前斜视角 $\theta_s=80^\circ$, 斜距离 $R=100\text{ km}$, 激光波长 $\lambda=10.6\text{ }\mu\text{m}$, 加窗展宽系数 $k=1.3$, 雷达和目标的相对运动速度 $V=1\text{ 000 m/s}$ 时, 需 $T_s=39.7\text{ ms}$, 对目标可实现数据率优于 25 Hz 的“快视”成像。若要求的前斜视角较小, 激光雷达对目标成像的数据率可以进一步提高。

上述分析表明: SAL 可以在大前斜视角条件下, 以高数据率对目标实现远距离高分辨率成像。

4.4.4 作用距离

与微波雷达类似, 激光雷达的发射增益与发射

波束宽度成反比。设激光雷达的俯仰向和方向向发射波束宽度分别为 θ_r 和 θ_a , 则发射增益 G_t 为:

$$G_t = \frac{4\pi}{\theta_r \theta_a} \quad (6)$$

激光雷达的光学系统较为复杂, 影响光学系统传输效率的因素较多。设激光雷达的发射光学系统传输效率为 η_t , 接收光学系统传输效率为 η_r , 外差探测时视场匹配效率为 η_m , 其他损耗为 η_{oth} , 则光学系统传输效率 η_{sys} 为:

$$\eta_{\text{sys}} = \eta_t \eta_r \eta_m \eta_{\text{oth}} \quad (7)$$

设激光雷达的发射峰值功率为 P_t , 发射信号脉冲宽度为 T_p , 接收望远镜面积为 S_r , 分辨单元对应的目标散射截面积为 σ (为目标散射系数、距离向分辨率、横向分辨率三者之积), 光电探测器的量子效率为 η_D , h 为普朗克常数, ν 为激光频率, 电子学噪声系数为 F_n , 单脉冲信噪比为 SNR_{\min} 。令激光雷达的最大作用距离为 $R_{\max}^{[30]}$, 则有:

$$R_{\max} = \sqrt[4]{\frac{P_t \cdot G_t \cdot \sigma \cdot S_r \cdot \eta_{\text{sys}} \cdot \eta_D \cdot T_p}{4\pi \cdot h\nu \cdot F_n \cdot \text{SNR}_{\min}}} \quad (8)$$

表 1 给出了一个天基 SAL 的主要参数。

表 1 天基 SAL 的主要参数

Tab.1 Main parameters of spaceborne SAL

Item	Value	Item	Value
Wavelength	10.6 μm	Receiving aperture	300 mm
Peak power	1 000 W	Transmitter efficiency	0.9
Pulse width	300 μs	Receiver efficiency	0.8
Bandwidth	1.5 GHz	Matching efficiency	0.5
PRF	1 kHz	Other losses	0.5
Beam width (Wide)	3 mrad	Optical system transmission efficiency	0.18
Beam width (Narrow)	0.5 mrad	Quantum efficiency	0.5
Target scattering coefficient	0.2	Electronic noise factor	3 dB
Range resolution	0.1 m	Single pulse SNR	0 dB
Lateral resolution	0.1 m	Minimum imaging SNR	15 dB

在表 1 参数条件下, 采用多脉冲 (如 100 个) 相干处理, 或将相干处理和非相干处理结合, 当激光发射波束宽度为 0.5 mrad 时, 在约 106.8 km 处可使目标

的探测和成像信噪比优于 15 dB, 并获得 10 Hz 的成像数据率。当激光发射波束宽度为 3 mrad, 则激光雷达的最大作用距离可达到约 43.6 km。

4.4.5 多普勒带宽和脉冲重复频率

当激光雷达的前斜视角为 θ_s , 激光发射波束宽度为 θ_{bw} , 雷达和目标的相对速度为 V 时, 目标的多普勒带宽为:

$$B_a = \frac{2V \cos \theta_s}{\lambda} \theta_{bw} \quad (9)$$

若前斜视角 $\theta_s=0$ (正侧视), 波束宽度 $\theta_{bw}=3$ mrad, 激光波长 $\lambda=10.6 \mu\text{m}$, 雷达和目标的相对运动速度 $V=300$ m/s, 假定在特定距离上目标尺寸覆盖整个波束宽度的 1/3, 所需要的带宽为 $B_a=56.6$ kHz; 如果目标速度更高, 多普勒带宽也相应增大, 对应的脉冲重复频率(PRF)应不低于信号多普勒带宽。

假定斜视角不为 0, 目标运动产生的径向速度也会产生较大的多普勒中心频率, 因此, 在激光波段多普勒模糊问题较为严重。

为避免距离模糊, 需考虑使用适中的 PRF, 并采用双波长双频共轭处理解除多普勒模糊^[26]。若 PRF 设为 1 kHz, 发射激光的波长分别设为 10.6 μm 和 10.5 μm (对应的中心频率分别为 2.830×10^{13} Hz 和 2.857×10^{13} Hz), 则双频共轭处理后等效的波长为 1.1 mm(对应的中心频率为 2.7×10^{11} Hz), 信号的多普勒带宽可降为 545 Hz, 与此同时, 该处理可同时去除信号的多普勒中心频率模糊, 完成目标的运动参数估计, 并满足 1 kHz PRF 的使用要求。

5 结 论

合成孔径激光雷达由于其采用相干体制, 代表着激光雷达的发展方向, 具有重要的研究价值。文中介绍了其研究现状, 讨论了其技术体制、工作模式和光学系统特点, 给出了一个用于空间目标观测的天基合成孔径激光雷达系统方案, 并对其主要的性能指标和关键技术进行了分析。文中对合成孔径激光雷达的天基应用做了有益探索, 天基 SAL 的工程实现具有可行性, 但还有很多关键技术问题亟待解决, 需持续开展研究工作。

感谢中国科学院西安光学精密机械研究所朱少岚研究员, 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所丁亚林研究员、梁静秋研究员、吕金光博士, 北

京理工大学李林教授, 浙江大学徐之海教授, 北京大学李正斌教授, 中国兵器工业第 205 研究所徐小雍研究员对文中研究工作的无私帮助, 与他们关于光学系统方面的讨论使笔者受益匪浅。

参考文献:

- [1] Gschwendtner A B, Keicher W E. Development of coherent laser radar at lincoln laboratory [J]. *Lincoln Laboratory Journal*, 2000, 12(2): 383-394.
- [2] Dierking M, Schumm B, Ricklin J C, et al. Synthetic aperture LADAR for tactical imaging overview[C]//The 14th Coherent Laser Radar Conference(CLRC), 2007.
- [3] Krause B W, Buck J, Ryan C, et al. Synthetic aperture lidar flight demonstration [C]//Optical Society of America/Conference on Lasers and Electro-optics (OSA/CLEO), 2011.
- [4] Crouch S C. Synthetic Aperture Lidar Techniques [D]. US: Motana State University, 2012.
- [5] Crouch S, Barber Z W. Laboratory demonstrations of interferometric and spotlight synthetic aperture lidar techniques [J]. *Optics Express*, 2012, 20(22): 24237-24246.
- [6] Guo L, Xing M D, Zhang L, et al. Research on indoor experimentation of range SAL imaging system [J]. *Science in China Series E: Technological Sciences*, 2009, 52(10): 3098-3104.
- [7] Xing Mengdao, Guo Liang, Tang Yu, et al. Design on the experiment optical system of synthetic aperture imaging lidar [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2009, 38 (2): 290-294. (in Chinese)
邢孟道, 郭亮, 唐禹, 等. 合成孔径激光成像雷达实验系统设计[J]. 红外与激光工程, 2009, 38(2): 290-294.
- [8] Liu Liren, Zhou Yu, Zhi Yanan, et al. A large-aperture synthetic aperture imaging lidar demonstrator and its verification in laboratory space[J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, 31(9): 112-116. (in Chinese)
刘立人, 周煜, 职亚楠, 等. 大口径合成孔径激光成像雷达演示样机及其实验验证[J]. 光学学报, 2011, 31(9): 112-116.
- [9] Liu L R. Coherent and incoherent synthetic-aperture imaging ladars and laboratory-space experimental demonstrations [J]. *Applied Optics*, 2013, 52(4): 579-599.
- [10] Wu Jin. On the development of synthetic aperture lidar imaging [J]. *Journal of Radars*, 2012, 1(4): 353-360. (in Chinese)
吴谨. 关于合成孔径激光雷达成像研究 [J]. 雷达学报, 2012, 1(4): 353-360.
- [11] Hong Guanglie, Wang Jianyu, Meng Zhaohua, et al. Chirped amplitude modulation and range dimension processing of near infrared synthetic aperture lidar[J]. *Journal of Infrared*

- and *Millimeter Waves*, 2009, 28(3): 229–234. (in Chinese)
- 洪光烈, 王建宇, 孟昭华, 等. Chirp 强度调制与近红外激光合成孔径雷达距离向处理[J]. *红外与毫米波学报*, 2009, 28(3): 229–234.
- [12] Ruan Hang, Wu Yanhong, Zhang Shuxian. Geostationary orbital object imaging based on spaceborne inverse synthetic aperture lidar[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2013, 42(6): 1611–1616. (in Chinese)
- 阮航, 吴彦鸿, 张书仙. 基于天基逆合成孔径激光雷达的静止轨道目标成像[J]. *红外与激光工程*, 2013, 42(6): 1611–1616.
- [13] Li Daojing, Du Jianbo, Ma Meng. The research status and the space-based application prospect of the synthetic aperture lidar[C]//The Future Development and Application of Space Technology Academic Conference, 2014: 18–20.
- 李道京, 杜剑波, 马萌. 合成孔径激光雷达的研究现状与天基应用展望 [C]//钱学森实验室首届空间技术未来发展及应用学术会, 2014: 18–20.
- [14] Li Jinming, Hu Yihua, Wang Enhong, et al. Imaging of satellite-to-satellite synthetic aperture lidar [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2011, 40(9): 1668–1672. (in Chinese)
- 李今明, 胡以华, 王恩宏, 等. 星对星合成孔径激光雷达成像[J]. *红外与激光工程*, 2011, 40(9): 1668–1672.
- [15] Marchese L, Doucet M, Bourqui P, et al. A global review of optronic synthetic aperture radar/ladar processing [C]//SPIE Defense, Security, and Sensing. International Society for Optics and Photonics, 2013, 8714: 871416–871416–10.
- [16] Sun Z W, Hou P P, Zhi Y N, et al. Optical image processing for synthetic-aperture imaging lidar based on two-dimensional Fourier transform[J]. *Applied Optics*, 2014, 53(9): 1846.
- [17] Bourqui P, Harnisch B, Marchese L, et al. Optical SAR processor for space application[C]//SPIE, 2008, 6958: 69580J.
- [18] Li Daojing, Zhang Qingjuan, Liu Bo, et al. Key technology and implementation scheme analysis of air-borne synthetic aperture lidar[J]. *Journal of Radars*, 2013, 2(2): 143–151. (in Chinese)
- 李道京, 张清娟, 刘波, 等. 机载合成孔径激光雷达关键技术和实现方案分析[J]. *雷达学报*, 2013, 2(2): 143–151.
- [19] Li Tonghai, Wang Haixia, Zhao Xinliang, et al. Design of the telecentric beam path aerial digital camera lens[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2011, 38(3): 25–28. (in Chinese)
- 李同海, 王海霞, 赵新亮, 等. 像方远心航拍数码相机镜头设计[J]. *光电工程*, 2011, 38(3): 25–28.
- [20] Li Daojing, Liu Bo, Yin Jianfeng, et al. Analysis and design of spaceborne MMW radar for space debris observation system [J]. *Journal of Astronautics*, 2010, 31(12): 2746–2753. (in Chinese)
- 李道京, 刘波, 尹建凤, 等. 天基毫米波空间碎片观测雷达系统分析与设计[J]. *宇航学报*, 2010, 31(12): 2746–2753.
- [21] Lin Z C, Liu K, Zhang W. Inertially stabilized platform for airborne remote sensing using magnetic bearings [J]. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 2015, 99: 1.
- [22] Du Jianbo, Li Daojing, Ma Meng. Research on wideband signal generation for lidar [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2015, 42(11): 1114003. (in Chinese)
- 杜剑波, 李道京, 马萌. 激光雷达宽带信号产生方法研究[J]. *中国激光*, 2015, 42(11): 1114003.
- [23] Gao S, Hui R. Frequency-modulated continuous-wave lidar using I/Q modulator for simplified heterodyne detection [J]. *Optics Letters*, 2012, 37(11): 2022–2024.
- [24] Du Jianbo, Li Daojing, Ma Meng. Performance analysis and image processing of phase-modulated signal on airborne synthetic aperture lidar [J]. *Journal of Radars*, 2014, 3(1): 111–118. (in Chinese)
- 杜剑波, 李道京, 马萌. 机载合成孔径激光雷达相位调制信号性能分析和成像处理[J]. *雷达学报*, 2014, 3(1): 111–118.
- [25] Zhan Xueli, Wang Yanfei, Wang Chao, et al. A digital dechirp approach for synthetic aperture radar [J]. *Journal of Radars*, 2015, 4(4): 474–480. (in Chinese)
- 詹秀丽, 王岩飞, 王超, 等. 一种用于合成孔径雷达的数字去斜方法 [J]. *雷达学报*, 2015, 4(4): 474–480.
- [26] Li Daojing, Liu Bo, Yin Jianfeng, et al. High Resolution Radar Moving Target Imaging Detection Technology [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2014. (in Chinese)
- 李道京, 刘波, 尹建凤, 等. 高分辨率雷达运动目标成像探测技术[M]. 北京: 国防工业出版社, 2014.
- [27] Barber Z W, Dahl J R. Experimental Demonstration of differential synthetic aperture lidar [C]//CLEO: Science and Innovations. Optical Society of America, 2015: STh3O.3.
- [28] Ma Meng, Li Daojing, Du Jianbo. Imaging of airborne synthetic aperture lidar under platform vibration condition [J]. *Journal of Radars*, 2014, 3(5): 591–602. (in Chinese)
- 马萌, 李道京, 杜剑波. 振动条件下机载合成孔径激光雷达成像处理[J]. *雷达学报*, 2014, 3(5): 591–602.
- [29] Ruan Hang, Wu Yanhong, Ye Wei, et al. Algorithm of phase error compensation for inverse synthetic aperture lidar [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2013, 50(10): 178–185. (in Chinese)
- 阮航, 吴彦鸿, 叶伟, 等. 逆合成孔径激光雷达相位误差补偿算法[J]. *激光与光电子学进展*, 2013, 50(10): 178–185.
- [30] McManamon P F. Review of lidar: a historic, yet emerging, sensor technology with rich phenomenology [J]. *Optical Engineering*, 2012, 51(6): 060901.