

阵列激光合成孔径雷达高分辨成像技术研究

汪丙南^{①②} 赵娟莹*^① 李威^{①②} 施瑞华^{①②} 向茂生^{①②} 周煜^③ 贾建军^④

^①(中国科学院空天信息创新研究院 北京 100094)

^②(中国科学院大学 北京 100049)

^③(中国科学院上海光学精密机械研究所 上海 201800)

^④(中国科学院上海技术物理研究所 上海 200081)

摘要: 激光合成孔径雷达将合成孔径技术应用于激光频段, 分辨率不受观测距离的限制, 可实现远距离、超高分辨率成像。然而, 受激光衍射极限限制, 观测视场制约着激光合成孔径雷达对地观测实际应用。该文提出一种阵列激光合成孔径雷达技术体制, 通过大功率阵列发射、阵列平衡探测接收、逐脉冲动态内定标实现了激光多路相干收发, 成倍地扩大了成像视场。地面转台成像试验表明, 成像分辨率优于3 cm(距离)×1 cm(方位), 该项技术可为激光合成孔径雷达对地观测应用奠定基础。

关键词: 阵列; 激光合成孔径; 高分辨率; 大幅宽

中图分类号: TN958.98

文献标识码: A

文章编号: 2095-283X(2022)06-1110-09

DOI: 10.12000/JR22204

引用格式: 汪丙南, 赵娟莹, 李威, 等. 阵列激光合成孔径雷达高分辨成像技术研究[J]. 雷达学报, 2022, 11(6): 1110–1118. doi: 10.12000/JR22204.

Reference format: WANG Bingnan, ZHAO Juanying, LI Wei, *et al.* Array synthetic aperture ladar with high spatial resolution technology[J]. *Journal of Radars*, 2022, 11(6): 1110–1118. doi: 10.12000/JR22204.

Array Synthetic Aperture Ladar with High Spatial Resolution Technology

WANG Bingnan^{①②} ZHAO Juanying*^① LI Wei^{①②} SHI Ruihua^{①②}

XIANG Maosheng^{①②} ZHOU Yu^③ JIA Jianjun^④

^①(Aerospace Information Research Institute, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100094, China)

^②(University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

^③(Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China)

^④(Shanghai Institute of Technical Physics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200081, China)

Abstract: By extending synthetic aperture technology from the microwave band to the laser wavelength, Synthetic Aperture Ladar (SAL) has long-distance imaging and extremely high spatial resolution independent of the target distance. Presently, the small field of view is the key constraint in SAL ground observation because of the laser diffraction limitation. In this paper, an array SAL technology is proposed. With high-power array transmission, array-balanced detection, and pulse-wise dynamic internal calibration, a multichannel coherent laser transceiver is realized. Meanwhile, the field of view has multiplied. The results of turntable experiments show that the imaging resolution is better than 3 cm (distance) × 1 cm (azimuth). This technology provides a scientific and technical approach to SAL with wider swath imaging in ground observation.

Key words: Array; Synthetic Aperture Ladar (SAL); High resolution; Wide swath

收稿日期: 2022-10-14; 改回日期: 2022-11-25; 网络出版: 2022-12-05

*通信作者: 赵娟莹 zhaokuanying@163.com *Corresponding Author: ZHAO Juanying, zhaokuanying@163.com

基金项目: 国家高分辨率对地观测系统重大专项

Foundation Item: The Major Project of High-Resolution Earth Observation System of China

责任主编: 邢孟道 Corresponding Editor: XING Mengdao

1 引言

自从20世纪70年代开始激光合成孔径(Synthetic Aperture Ladar, SAL)成像的研究^[1], SAL即成为国内外研究热点。SAL是将合成孔径技术扩展到激光波段的技术,利用一个小光学镜筒“运动”方式合成一个等效“大镜筒”,突破了传统光学成像口径对分辨率的限制,且SAL更短的工作波长使其具备比合成孔径雷达(Synthetic Aperture Radar, SAR)更短的成像时间和更高的分辨率,在军事目标探测、电力巡线等方面有着广阔的应用前景。

1994年,美国MIT林肯实验室的Marcus等人^[2]采用钕-钇固态激光器为信号源,进行合成孔径实验,获取了目标的一维成像结果,并于次年采用非对称望远镜口径对目标进行二维SAL成像试验^[3]。2002年,美国海军研究实验室(NRL)实验验证了SAL的二维成像能力,其对30 cm处合作目标的成像效果达到了距离分辨率170 μm ,方位分辨率90 μm ^[4]。2005年,美国航空航天公司的Beck等人^[5]通过移动望远镜口径对2 m外的固定漫散射目标进行真正意义上的二维SAL成像,图像的距离分辨率为60 μm ,方位分辨率优于50 μm 。2011年美国洛克希德-马丁公司报道了机载合成孔径激光雷达演示样机的飞行试验情况,对距离1.6 km的地面目标(洛马公司徽标)实现了幅宽1 m,分辨率优于3.3 cm的成像结果^[6]。2013年,在DARPA的Long View项目支持下,雷声公司和美国空军实验室联合开展了针对地球同步轨道目标的逆合成孔径激光雷达(Inverse SAL, ISAL)成像研究,其EAGLE计划中用于开展近地轨道物体激光合成孔径实验的ISAL实验卫星系统已于2018年4月成功发射,目前未见公开的成像结果。

国内SAL研究的主要机构有西安电子科技大学、中国科学院上海光学精密机械研究所、中国科学院空天信息创新研究院(原中科院电子所)等单位。2008年,西安电子科技大学搭建了实验室内激光合成孔径雷达实验装置^[7],该设备采用转台模型进行ISAL实验。2011年,中国科学院上海光学精密机械研究所采用大孔径SAL方案,实现了室内距离为14 m的激光合成孔径成像演示,实现了方位分辨率1.4 mm,距离分辨率1.2 mm的效果^[8]。中国科学院空天信息创新研究院在2011年底实现了实验室平台SAL成像实验演示,目标距离2.4 m,成像分辨率达到233 μm (方位向) \times 170 μm (距离向)^[9]。2017年,中国科学院空天信息创新研究院进行了机载SAL侧视成像试验,实现了对2.5 km外合作目标厘米量级成像^[10]。

我国SAL方向的研究工作还处于起步阶段,经

过十余年的发展,国内上述单位相继开展了机载原理性验证试验,完成了单个光斑激光频段合成孔径成像试验,验证了SAL相干成像的技术体制。由于激光波长短,受限于衍射极限,无法实现大幅宽成像,为了解决单个光斑观测视场受限的难题,2017年中国科学院空天信息创新研究院相关人员开展了扫描成像SAL,通过距离向扫描实现大幅宽,由于扫描过程减小了方位向合成时间,方案有待进一步完善^[11]。2018年,中国科学院上海光学精密机械研究所开展了多通道宽幅度SAL的收发装置优化研究,建立了发射光纤排布模型^[12]。2021年,中国科学院空天信息创新研究院进行了一发三收的逆合成孔径激光雷达(ISAL)成像实验,验证了顺轨干涉运动补偿成像方法^[13]。本文提出阵列激光合成孔径雷达技术体制,从理论原理和地面转台实验两方面,验证系统的成像效果和阵列扩展功能,为SAL系统在对地观测的应用奠定基础。

2 理论原理

2.1 工作模式

阵列SAL条带工作模式如图1所示,下视角为45°,在不改变单个光斑成像的情况下,增加多个阵列光斑,分别对不同区域独立成像,且光斑在远场穿轨向首尾相接分布,随飞机运动形成斜距上分开的阵列条带,对每个阵列条带进行拼接得到成倍的大幅宽图像。与单路不同,发射光源为多路光纤阵列,经过同一个准直扩束光学镜筒,接收为多路平衡探测器阵列。

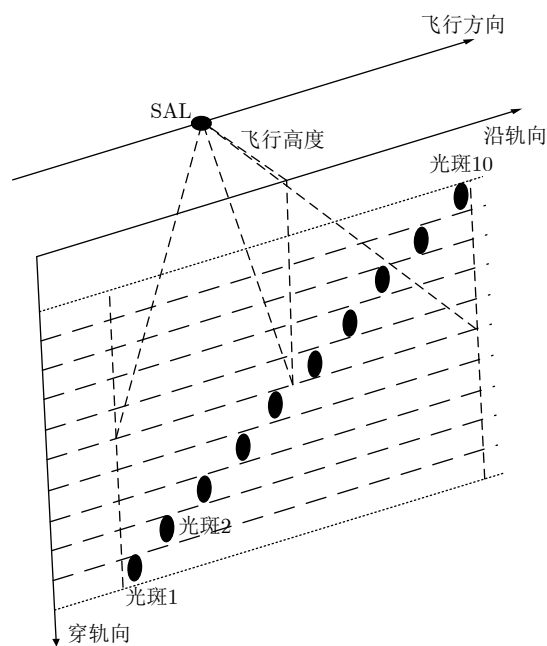


图1 阵列SAL几何示意图

Fig. 1 Geometric diagram of array SAL

在地面逆合成孔径成像模式下, 雷达保持不动, 将目标放置于光斑照射的转台上, 利用转台旋转模拟目标于雷达的相对运动, 对点目标、面目标等进行逆合成孔径激光雷达(ISAL)成像。图2描述的是逆合成孔径激光雷达地面实验中转台成像投影在二维平面上的模型。目标到旋转中心的距离是 R_a , 绕 O 点以角速度 ω 匀速转动, 目标上点 (x_a, y_a) 到雷达的距离 R 为

$$R = \sqrt{R_0^2 + x_a^2 + y_a^2 + 2R_0\sqrt{x_a^2 + y_a^2}\sin(\theta + \omega t)} \quad (1)$$

2.2 调频连续波相干探测模型

系统采用调频连续波体制, t 时刻激光雷达发射信号表示为

$$s_t(t) = w(t)\exp(j2\pi(f_c t + 0.5Kt^2)) \quad (2)$$

式中, f_c 为发射信号中心(center)频率, $w(t)$ 为信号包络, K 为调频率。

距离为 R 的目标接收的回波为

$$s_r(t) = w(t - \tau)\exp(j2\pi(f_c(t - \tau) + 0.5K(t - \tau)^2)) \quad (3)$$

式中, $\tau = 2R/c$ 为目标的回波延时, c 为光速。

将目标回波与发射中的本征信号混频, 经滤波放大后, 得到混频后的中频(Intermediate Frequency, IF)信号

$$s_{if}(t) = s_t(t)s_r^*(t) = w(t)w^*(t - \tau) \cdot \exp(j2\pi(f_c\tau + Kt\tau - 0.5K\tau^2)) \quad (4)$$

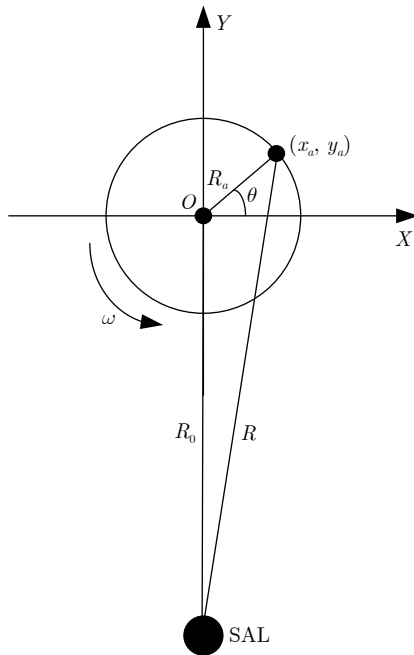


图 2 单个光斑地面ISAL成像模型

Fig. 2 The ISAL imaging model of single spot

式中, $*$ 表示复共轭。将式(4)进行傅里叶变换得到

$$s_{if}(f) = w\left(\frac{f_{if}}{K}\right)w^*\left(\frac{f_{if}}{K} - \tau\right) \cdot \exp(-j2\pi f_c\tau - j2\pi f_{if}\tau + j\pi K\tau^2) \quad (5)$$

式中, $f_{if} = K\tau$ 为目标的差频。通过分析频谱峰值位置, 可将频率信息转换为目标的距离:

$$R = \frac{cf_{if}}{2K} \quad (6)$$

式(5)表明差频信号的频带范围与目标距离相关, 根据探测目标位置以及参考距离的变化, 快速傅里叶变换(Fast Fourier Transform, FFT)后的有效信号具有不同频率, 方位向FFT后得到二维聚焦图像, 理想的距离分辨率和方位分辨率为

$$\rho_r = \frac{c}{2B} \quad (7)$$

$$\rho_a = \frac{\lambda}{2\omega T} \quad (8)$$

式中, B 为线性调频信号带宽, λ 为激光波长, ω 是转台转速, T 是相干积累时间。在此实验系统中, 系统带宽 $B=5$ GHz, 理论的距离向分辨率为3 cm。

3 阵列激光SAL系统

合成孔径激光成像雷达光学系统方案如图3所示, 整个光学部分主要包含阵列相干激光源、内定标、阵列光学天线以及多通道接收阵列平衡探测单元。窄线宽的种子激光源分为发射光和本征光, 分别在射频源的激励下, 采用光电调制器将激光调为5 GHz带宽的调频连续波, 之后经过放大器, 并分为多路阵列光, 阵列发射光束分别进入光纤放大器, 合束并准直, 一部分作为内定标信号返回阵列平衡探测器, 另一部分光束发射出去, 射向远场目标, 回波返回后, 通过接收主镜缩束, 并聚焦于阵列平衡探测器; 阵列本征光直接返回, 一部分与回波信号光混频后进入阵列平衡探测器, 另一部分与内定标信号混频后进入阵列平衡探测器。经过阵列采集, 进行成像处理, 其中内定标信号用来补偿和校正回波信号相位。

相比于单个光束, 阵列光束具有成像幅宽大, 相互独立成像的优势, 系统采用10路光纤阵列激光器产生阵列收发光束, 通过激光准直发射头与收发光纤连接, 用于激光的发射和准直; 内定标单元主要包含相干激光的发射、通道接收、阵列相干探测等, 主要用于补偿系统的相位信息; 平衡阵列探测器主要实现阵列的相干平衡探测; 前端光学主要进行收发光束的扩束和缩束, 以及光束的指向对准功能。

10路发射光源由光纤并列排布, 由平面V形槽

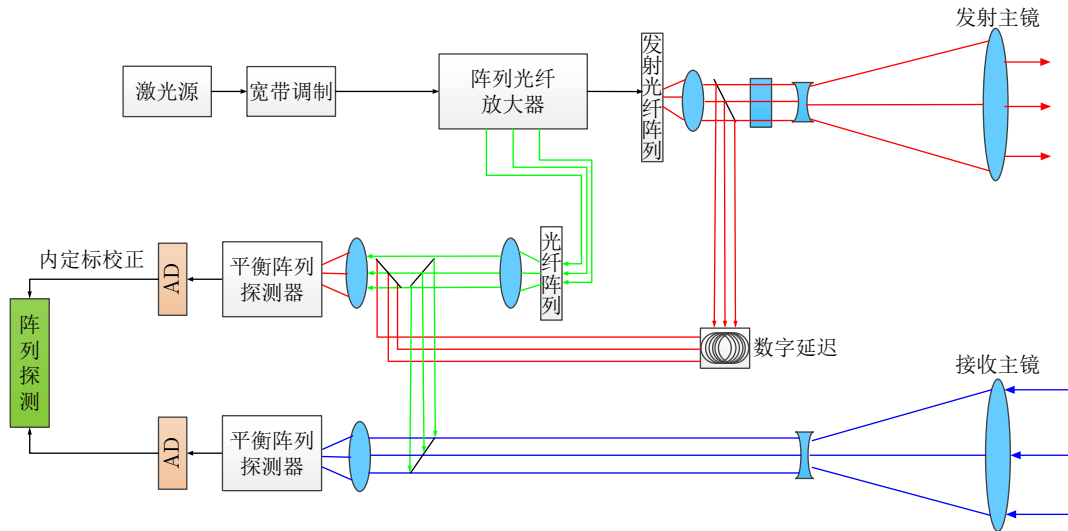


图3 阵列光学系统示意图

Fig. 3 Schematic diagram of array optical system

基板精确定位，每个光源为波长 $1.55\ \mu\text{m}$ 的连续调制频光，调制带宽 $5\ \text{GHz}$ ，调制脉宽 $32\ \mu\text{s}$ ，线宽 $1\ \text{kHz}$ ，发射功率约为 $20\ \text{W}$ ，如图4所示，光纤间距 $127\ \mu\text{m}$ ，光纤纤芯对远场目标的照射(图5)相当于其在远场的成像，之后再一一对应地成像到阵列探测器(图6)，考虑到阵列光纤、远场光斑发散角及阵列探测器的位置对应关系，阵列光源发射端面是共平面的，设计阵列光源在沿轨方向以一定的倾斜角度分布，倾斜夹角 $\theta=0.045\ \text{rad}$ 。之后由图3所示的同一个大视场光纤准直器准直，形成圆形对称准直光束，直径大约 $6\ \text{mm}$ ，然后由前端光学扩束镜在沿轨向8倍，穿轨向2倍扩束，实现椭圆形光斑发射，发射光学镜筒口径约为 $20\ \text{mm}\times 80\ \text{mm}$ ，发散角为 $120\ \mu\text{rad}\times 30\ \mu\text{rad}$ ，在近场形成沿轨向宽穿轨向窄的光斑，在远场形成沿轨向窄穿轨向宽的椭圆光斑，扩大幅宽的同时优化照明光斑强度。

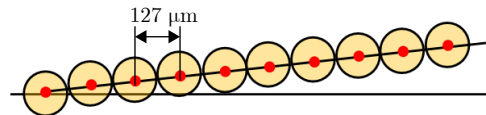


图4 光纤阵列排布方式

Fig. 4 Configuration of optical fiber array

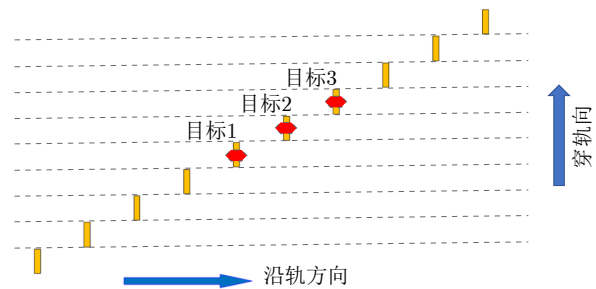


图5 10路阵列激光远场椭圆光斑分布示意图

Fig. 5 Schematic diagram of far field array elliptical laser beam distribution

准直透镜焦面的10路光纤阵列基板倾斜一定角度以保证远场多光束光斑在穿轨向覆盖范围互相交叠，完成多光束成像视场拼接，如图5所示。在沿轨方向，每个光斑之间有一定的间距，在垂直于轨道方向，每个光斑首尾连接，形成10路拼视场，这样在机载飞行时，光斑沿着沿轨方向推扫，在垂直于轨道方向能够无缝隙的覆盖所要求的测绘带。

在远场 $4.3\ \text{km}$ 目标位置时，单个光斑大小为 $0.48\ \text{m}\times 0.12\ \text{m}$ ，在图5所示的多个光斑照射区域内，目标1、目标2、目标3分别放置于不同光斑区域的旋转转台上，进行逆合成孔径的地面转台成像。

3个接收光学天线(约 $80\ \text{mm}$)将大口径透镜收集的入射光缩束为中介光束，之后经过聚焦透镜进入阵列平衡探测器，图6为其中一个光学镜筒后面

对应的阵列平衡探测器模块和其上的10个阵列平衡探测器芯片，每个方形芯片区域上有4组探测器，对应接收一个光斑的信号，单个探测器的接收视场角为 $30\ \mu\text{rad}\times 30\ \mu\text{rad}$ ，拼接得到的单个光斑视场角为 $120\ \mu\text{rad}\times 30\ \mu\text{rad}$ ，两个光斑之间的方位向发散角为 $666.7\ \mu\text{rad}$ ，单个接收镜头视场内一共40个探测器，3个镜筒对应120个阵列探测器，4个探测器通道接收的信号拼接得到单个光斑的成像结果，10个阵列光斑成像拼接得到大幅宽的成像。

根据成像关系，发射光斑在远场为椭圆成像区域，之后反射回光经过接收口径 $80\ \text{mm}$ ，等效焦距 $2\ \text{m}$ 的接收镜头，聚焦到探测器的椭圆接收区域，光斑尺寸恰好覆盖探测器。

接收的椭圆光斑经过晶体分为两束椭圆形光束，分别进入平衡探测器的左右两端，如图6所示，每个光斑覆盖4个探测器，分别探测信号，4个探测器再拼接得到整个光斑的图像。通过控制探测器之间间隙，实现尽量无盲区的全覆盖。

4 地面成像试验结果

4.1 地面成像试验系统

整个系统分为光学子系统、电子学子系统和光子子系统部分，图7为实验室内ISAL远场成像试验的场景，吊在架子上的为光学收发镜头，收发光束倾斜45°角射出，通过一面大的反射镜，水平照射到远场4.3 km目标。架子旁边为激光器部分，其包括电源、种子激光源、光放大器、水冷箱。光学镜头包含发射扩束镜、接收准直聚焦镜、阵列发射与探测。对阵列探测器的输出，采用图7(a)的多通道

采集与数据记录单元进行数据采集和记录，系统监控用来监测探测器输出的回波信号。

信号处理时，先独立处理每个通道的成像信号，通过测量各个通道对应的内定标相位，在距离向对回波信号进行非线性相位补偿，内定标信号被用作短延时线处理，基于延时线技术与相位积分思想对调频连续波雷达系统的频率非线性进行估计，并通过残余视频相位(Residual Video Phase, RVP)滤波器去除系统非线性误差的距离空变性，校正非线性[14]。之后在方位向对各个通道独立自聚焦成像。

基于上述成像结果，根据图6所示的探测器和光斑的对照关系，对同一个光斑内部4个通道的成像结果进行空间拼接，一个椭圆形光斑由4个平衡探测器接收，理论上每个探测器对应此光斑的不同区域，假设光斑照射到一个目标上，不同的探测器接收到的部分光斑是目标不同位置返回来的信息，

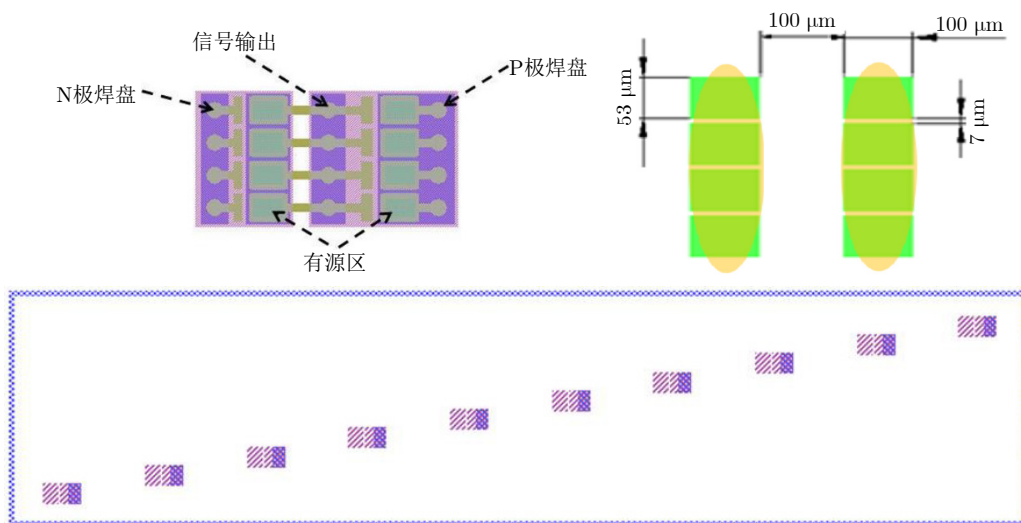
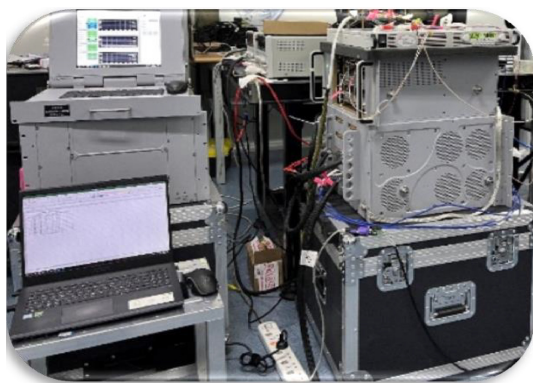
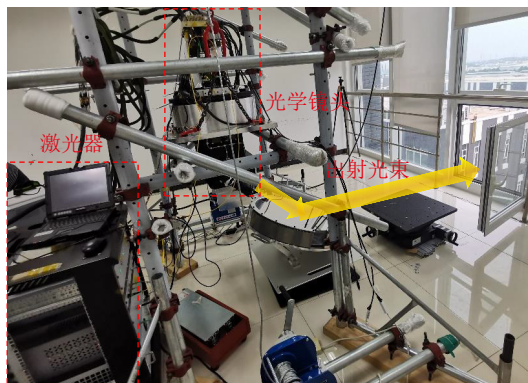


图 6 10路阵列平衡探测单元(每个单元包含4组探测器，共同接收远场1个光斑)

Fig. 6 Ten channels array balanced detection unit (each unit contains four detectors, which receive a laser beam from the far field)



(a) 电子学子系统
(a) The electronic system



(b) 激光器和光学镜头在成像时的场景
(b) Laser and optical lens

图 7 ISAL实验室雷达样机
Fig. 7 ISAL prototype in lab

但两个相邻探测器接收的回波有位置重合的区域，对于同一个光斑区域，设立一个基准坐标，根据单个通道图像的距离信息和方位信息，将多个阵元接收的回波在空间位置上对齐，进行幅度相位分别叠加处理成像，实现单个光斑照射区域完整成像。

对于多个不同的阵列光斑，在同一个基准坐标系下，每个光斑在沿轨向推扫出的成像区域不同，根据单个光斑成像的距离信息和方位信息，确定单幅条带图像的空间坐标位置，根据GPS的信号时间，将各子带信号的成像图像沿时间对齐，在同一时刻，不同条带成像图像幅度相位分别叠加处理，即可得到拼接后的整幅图像，实现10个光斑的空间拼接，扩大成像幅宽。

4.2 单个光斑成像

基于脉冲压缩和自聚焦的算法，实验对4.3 km处点目标成像，图8(a)为角锥摆放场景照片，图中有5个直径为1.2 cm的角锥，两两相距最近3 cm，转速设置为0.019375 rad/s，成像的相干积累时间为6.4 ms，计算可得理论的方位向分辨率为0.62 cm。图8(b)为直接脉冲压缩的成像结果，其中点目标未进行距离向非线性补偿和自聚焦，可以看出点目标

在距离向和方位向散焦，成像效果一般。利用系统内定标信号对图中点目标进行距离向非线性补偿和方位向自聚焦，得到图8(c)对应的成像结果，图中5个点目标能清晰地成像，距离向和方位向分辨率提高。在距离向和方位向切片，分析图8(c)图像距离分辨率和方位分辨率，如表1所示，从5个点目标的分辨率及峰值旁瓣比计算结果，得到平均距离向分辨率约2.79 cm，与理论的距离分辨率3 cm一致，平均方位向分辨率约为0.69 cm，与理论分辨率一致。

试验结果表明，对于4.3 km远处目标，ISAL目前已经实现了距离分辨率2.79 cm，方位向分辨率0.69 cm，即成像角分辨率达到6.93 μrad和1.4 μrad。

根据衍射极限的公式 $\sin \theta = 1.22\lambda / D$ ，其中， θ 是角分辨率， λ 是波长， D 是镜筒直径。根据系统参数，可以求出衍射极限时的光束角分辨率 θ 为23.6 μrad，远大于图8的成像角分辨率。通过对比，ISAL目前已经超过了衍射极限时系统分辨率，实现了超衍射分辨率成像。

4.3 阵列光斑成像

基于4.2节单个光斑的成像，分别在远场多个

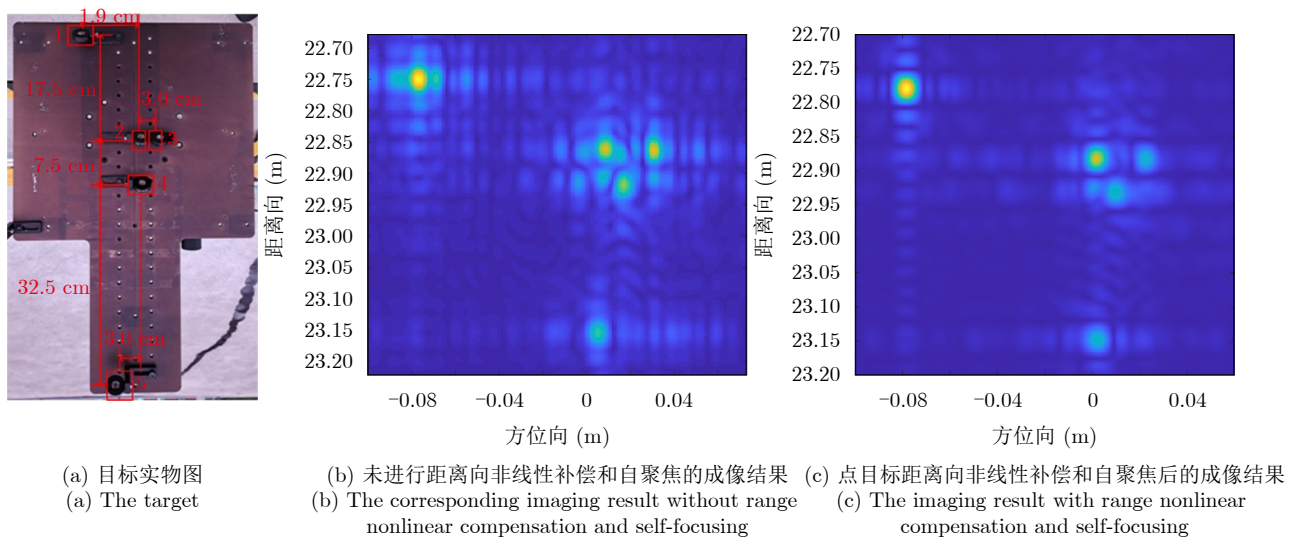


图8 点目标成像场景

Fig. 8 The imaging scene of point target

表1 点目标切片分析

Tab. 1 Slice analysis of point target

序号	距离向分辨率(cm)	距离向PSLR	方位向分辨率(cm)	方位向PSLR
点目标1	2.79	-13.35	0.68	-18.96
点目标2	2.70	-13.97	0.65	-11.39
点目标3	2.79	-14.55	0.63	-9.47
点目标4	2.88	-14.39	0.69	-5.21
点目标5	2.79	-12.98	0.81	-12.75

光斑位置布置转台目标, 进行阵列ISAL成像。如图9所示, 实验分别在沿轨向5, 6和7号3个光斑位置放置汉字“月”, 字母“E”和“AIRCAS”等转台目标, 同时对这3个目标进行成像, 并设计多种复杂图形来验证阵列光斑成像时系统分辨率和相参性。

基于图6中接收光斑与4个阵列探测器的对应关系, 每个光斑对应4个接收平衡探测器, 如光斑照射到图10(a)汉字“月”, 整体宽度20 cm, 长度60 cm, 中间条宽为3 cm, 周围条宽4 cm, 4个探测器通道分别成像的试验结果如图10(b1-b4), 由于4个通道对汉字“月”的不同位置进行成像, 其图像分别对应于汉字“月”不同位置的图像。如图10(b1)所示, 最上端的探测器对“月”的上端成像, 图10(b2-b4)为从上到下的3个探测器所成的图像, 图10(b4)为“月”的最下端区域。对这4个图像按照其所在距离和方位位置进行相加拼接, 如图10(c)所示, 得到“月”的整个图像, 相比于单个探测器, 观测视场扩大4倍, 实现成像幅宽的扩展。理论上方位



图9 地面成像的ISAL雷达和转台装置示意图

Fig. 9 Schematic diagram of ISAL and turntable device

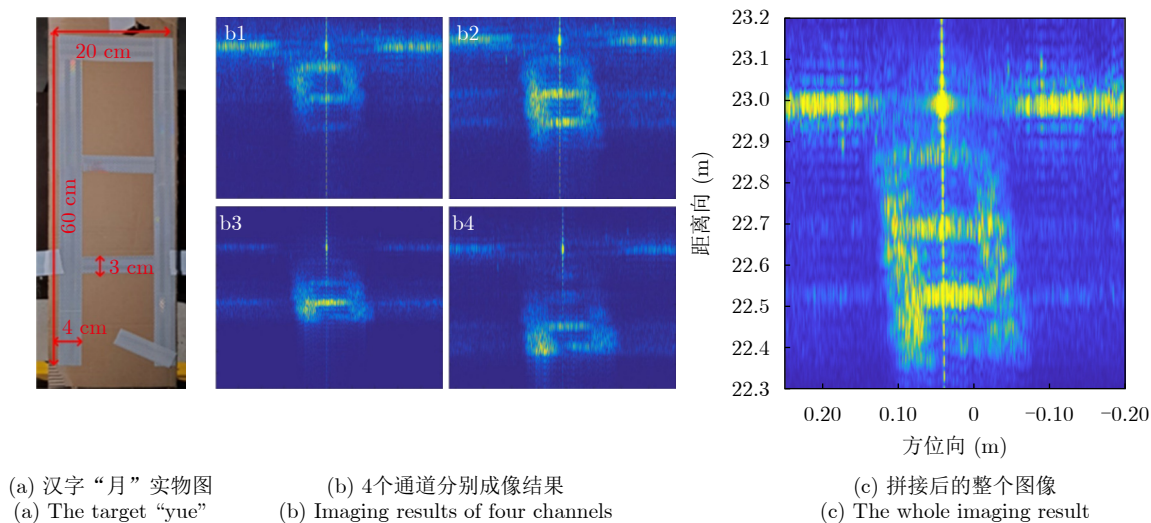
向分辨率1.25 mm, 图10能够清晰分辨距离向3 cm的条宽, 与理论的距离分辨率3 cm一致, 与场景中汉字“月”符合得很好。

阵列光束对其他目标进行成像, 图11(a)为反光条贴的字母E成像图像, 从图中可以清晰地看出字母“E”的轮廓, 可计算得到字母E的条宽4 cm, 总体宽18 cm, 高27 cm, 与图11(d)实物图一致。

图11(b)为沿着距离向红色线的切片图像, 可以清晰地分辨出字母E在距离向的3个横线, 由于字母“E”与水平面夹角为 45° , 4 cm横向条宽在距离向的投影约为2.83 cm, 即距离方向实现了2.83 cm目标的清晰分辨, 与理论的距离分辨率3 cm一致。由于采样率的限制, 相对于发射的信号光, 本征光的延迟时间为 $28.95 \mu\text{s}$, 对应于4339.5 m, 距离向由近到远, 在距离雷达4360.9 m处, 第1个峰值旁瓣比是-30 dB, 在距离雷达4361 m处, 第2个峰值出现, 峰值旁瓣比是-14.9 dB, 在距离雷达4361.1 m处, 第3个峰值出现, 峰值旁瓣比是-21.49 dB, 距离向能够清晰地分辨出E的3条横线。

图11(c)为字母“E”沿着方位向红色线的切片图像, 方位向理论分辨率为0.62 mm。其中方位向0 m对应图2中的旋转轴中心位置, 即此点与雷达无相对径向方向速度, 方位向0.05 m至0.07 m之间幅度较强, 对应于字母“E”的竖线位置, 幅度达到0 dB, 远离竖线方向时, 幅度逐渐降低, 方位向小于-0.05 m或者大于0.07 m时幅度低于-40 dB, 与真实目标场景中字母“E”符合得很好。

对于复杂图像如图12(a)的合作目标“AIRCAS”, 字母宽度2 cm, 高度12 cm, 图12(b)为对应的成像结果, 理论上方位向分辨率为0.62 mm, 可以看到



(a) 汉字“月”实物图
(a) The target “yue”

(b) 4个通道分别成像结果
(b) Imaging results of four channels

(c) 拼接后的整个图像
(c) The whole imaging result

图10 汉字“月”成像场景

Fig. 10 The imaging scene of “yue”

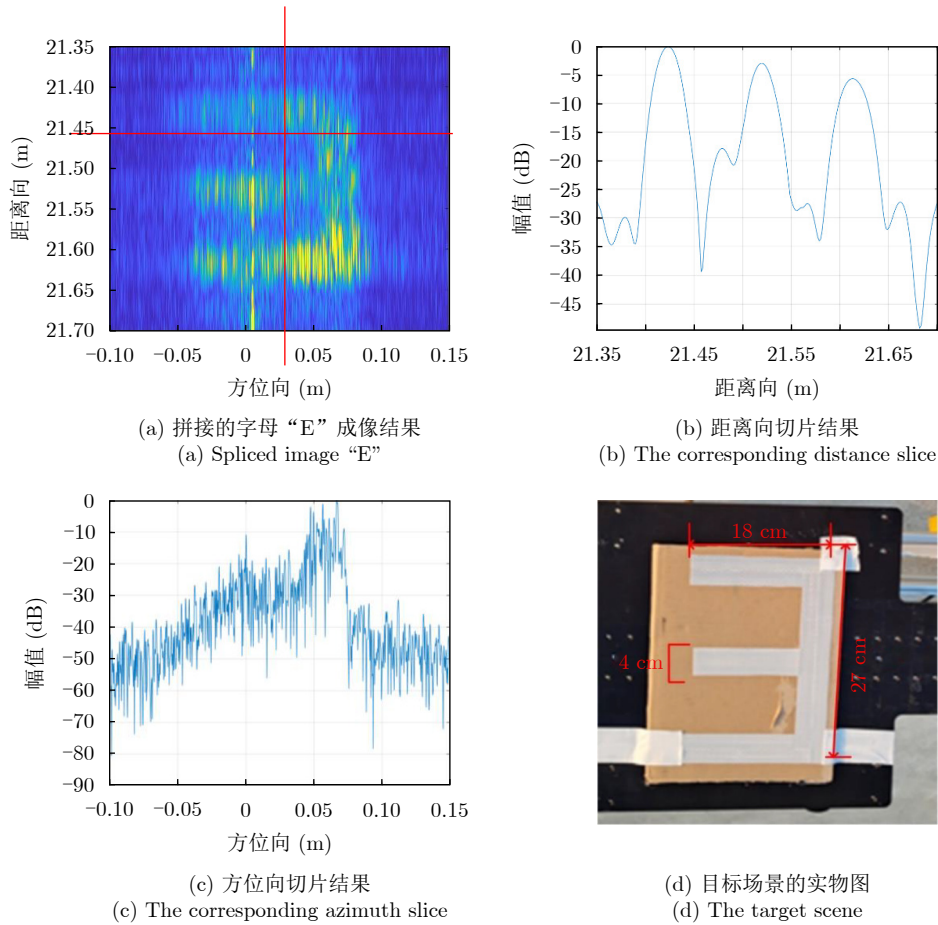


图 11 字母“E”成像场景
Fig. 11 The imaging scene of “E”

6个字母在竖直方位向上延展开，在横向距离向分辨率为3 cm，可以看出6个字母被区分开，由于字母宽度2 cm，有一些字母设计的间隔过小导致距离向粘连，如字母“A”。

基于上述单个阵列成像试验结果，由于ISAL成像过程中，雷达保持不动，两个阵列光束的间距较大，单个光斑处于离散分布状态，且成像区域固定，对每个光斑分别成像后拼接得到结果如图13所示，在4.3 km目标处，E的像与AIRCAS的像在距离上首尾相接，方位向间隔2.8 m左右。可以推测在对地观测SAL飞行状态时，10路光斑对地成像，且光斑沿飞行轨道方向推扫成像，10路阵列成像区域在距离向首尾连接，拼接得到大幅宽的成像，实现阵列激光SAL成像幅宽的扩展。

5 结语

本文从阵列激光合成孔径雷达原理出发，研究其工作模式、信号模型等，通过地面转台实验，验证此系统的ISAL成像效果和阵列扩展功能，分析了距离分辨率、方位分辨率、峰值旁瓣比和成像幅

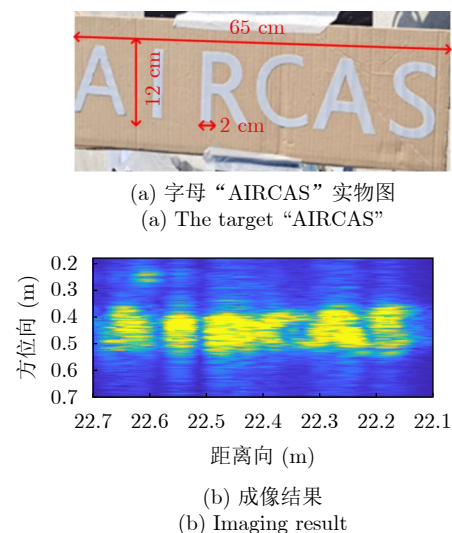


图 12 目标“AIRCAS”成像场景
Fig. 12 The imaging scene of “AIRCAS”

宽等特性。理论及实验结果表明：此系统具备超衍射极限高分辨率和阵列大幅宽的成像特点，能成倍扩展现有SAL的成像幅宽，推进了SAL系统在对地观测等方面的实用化进程。

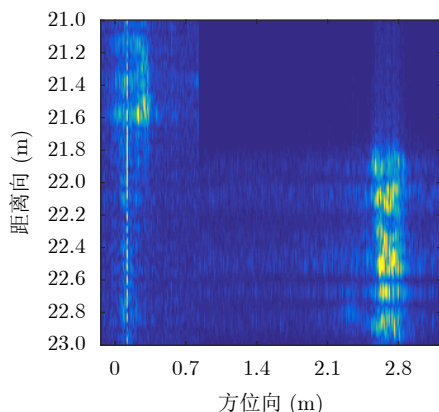


图 13 拼接得到的“E”和“AIRCAS”两个目标成像结果
Fig. 13 The imaging result of target “E” and “AIRCAS”

参 考 文 献

- [1] LEWIS T S and HUTCHINS H S. A synthetic aperture at optical frequencies[J]. *Proceedings of the IEEE*, 1970, 58(4): 587–588. doi: [10.1109/PROC.1970.7698](https://doi.org/10.1109/PROC.1970.7698).
- [2] MARCUS S, COLELLA B D, and GREEN T J. Solid-state laser synthetic aperture radar[J]. *Applied Optics*, 1994, 33(6): 960–964. doi: [10.1364/AO.33.000960](https://doi.org/10.1364/AO.33.000960).
- [3] GREEN T J, MARCUS S, and COLELLA B D. Synthetic-aperture-radar imaging with a solid-state laser[J]. *Applied Optics*, 1995, 34(30): 6941–6949. doi: [10.1364/AO.34.006941](https://doi.org/10.1364/AO.34.006941).
- [4] BASHKANSKY M, LUCKE R L, FUNK E, *et al.* Two-dimensional synthetic aperture imaging in the optical domain[J]. *Optics Letters*, 2002, 27(22): 1983–1985. doi: [10.1364/OL.27.001983](https://doi.org/10.1364/OL.27.001983).
- [5] BECK S M, BUCK J R, BUELL W F, *et al.* Synthetic-aperture imaging laser radar: Laboratory demonstration and signal processing[J]. *Applied Optics*, 2005, 44(35): 7621–7629. doi: [10.1364/AO.44.007621](https://doi.org/10.1364/AO.44.007621).
- [6] KRAUSE B W, BUCK J, RYAN C, *et al.* Synthetic aperture Ladar flight demonstration[C]. *Laser Science to Photonic Applications*, Baltimore, USA, 2011: 1–2.
- [7] 郭亮. 合成孔径成像激光雷达实验与算法研究[D]. [博士学位论文], 西安电子科技大学, 2009: 43–62.
GUO Liang. Study on experiment and algorithm of synthetic aperture imaging Lidar[D]. [Ph. D. dissertation], Xidian University, 2009: 43–62.
- [8] 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室验证[J]. *光学学报*, 2011, 31(9): 0900112. doi: [10.3788/AOS201131.0900112](https://doi.org/10.3788/AOS201131.0900112).
LIU Liren, ZHOU Yu, ZHI Ya`nan, *et al.* A large-aperture synthetic aperture imaging Ladar demonstrator and its verification in laboratory space[J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, 31(9): 0900112. doi: [10.3788/AOS201131.0900112](https://doi.org/10.3788/AOS201131.0900112).
- [9] 吴谨, 杨兆省, 赵志龙, 等. 单程远场衍射合成孔径激光雷达成像实验室演示[J]. *红外与毫米波学报*, 2013, 32(6): 514–518. doi: [10.3724/SP.J.1010.2013.00514](https://doi.org/10.3724/SP.J.1010.2013.00514).
WU Jin, YANG Zhaosheng, ZHAO Zhilong, *et al.* Synthetic aperture Ladar imaging with one-way far-field diffraction[J]. *Journal of Infrared and Millimeter Waves*, 2013, 32(6): 514–518. doi: [10.3724/SP.J.1010.2013.00514](https://doi.org/10.3724/SP.J.1010.2013.00514).
- [10] LI Guangzuo, WANG Ning, WANG Ran, *et al.* Imaging method for airborne SAL data[J]. *Electronics Letters*, 2017, 53(5): 351–353. doi: [10.1049/el.2016.4205](https://doi.org/10.1049/el.2016.4205).
- [11] 张珂殊, 潘洁, 王然, 等. 大幅宽激光合成孔径雷达成像技术研究[J]. *雷达学报*, 2017, 6(1): 1–10. doi: [10.12000/JR16152](https://doi.org/10.12000/JR16152).
ZHANG Keshu, PAN Jie, WANG Ran, *et al.* Study of wide swath synthetic aperture Ladar imaging technology[J]. *Journal of Radars*, 2017, 6(1): 1–10. doi: [10.12000/JR16152](https://doi.org/10.12000/JR16152).
- [12] 张波, 周煜, 孙建锋, 等. 多通道宽幅度合成孔径激光成像雷达收发装置优化研究[J]. *光学学报*, 2018, 38(5): 0528002. doi: [10.3788/AOS201838.0528002](https://doi.org/10.3788/AOS201838.0528002).
ZHANG Bo, ZHOU Yu, SUN Jianfeng, *et al.* Optimization research on multi-channel wide-swath synthetic aperture imaging Ladar transceiver system[J]. *Acta Optica Sinica*, 2018, 38(5): 0528002. doi: [10.3788/AOS201838.0528002](https://doi.org/10.3788/AOS201838.0528002).
- [13] 李道京, 周凯, 崔岸婧, 等. 多通道逆合成孔径激光雷达成像探测技术和实验研究[J]. *激光与光电子学进展*, 2021, 58(18): 1811017. doi: [10.3788/LOP202158.1811017](https://doi.org/10.3788/LOP202158.1811017).
LI Daojing, ZHOU Kai, CUI Anjing, *et al.* Multi-channel inverse synthetic aperture Ladar imaging detection technology and experimental research[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2021, 58(18): 1811017. doi: [10.3788/LOP202158.1811017](https://doi.org/10.3788/LOP202158.1811017).
- [14] META A, HOOGEBOOM P, and LIGTHART L. Range non-linearities correction in FMCW SAR[C]. 2006 IEEE International Symposium on Geoscience and Remote Sensing, Denver, USA, 2006: 403–406. doi: [10.1109/IGARSS.2006.108](https://doi.org/10.1109/IGARSS.2006.108).

作 者 简 介

汪丙南, 博士, 副研究员, 主要研究方向为新体制SAR处理方法。

赵娟莹, 博士, 副研究员, 主要研究方向为SAL成像、光束传输与变换。

李 威, 博士生, 研究方向为机载调频连续波激光雷达信号处理。

施瑞华, 博士生, 研究方向为合成孔径激光雷达信号处理。

向茂生, 博士, 研究员, 博士生导师, 主要研究方向为双天线干涉、多基线干涉、极化干涉、阵列天线干涉等理论与方法以及干涉SAR面向高精度测绘、复杂地物定位与识别、组合导航等应用技术。

周 煜, 博士, 研究员, 硕士生导师, 主要研究方向为激光雷达探测、激光通信。

贾建军, 博士, 研究员, 博士生导师, 主要研究方向为空间光电跟瞄系统、激光通信、激光遥感系统等。

(责任编辑: 高华)