

聚束模式合成孔径激光雷达实验演示

吴曙东^{1,2} 黄建余³ 赵志龙^{1,2} 王鲲鹏³ 戴泽³ 吴谨¹

¹中国科学院电子学研究所, 北京 100190

²中国科学院大学, 北京 100049

³北京跟踪与通信技术研究所空间目标测量重点实验室, 北京 100094

摘要 采用线性调波长的 1.55 μm 光纤激光和一个控制照明光束方向的旋转平面镜, 建立了聚束模式合成孔径激光雷达(SAL)成像演示实验室装置。该装置运转稳定, 能够产生与其成像理论预期完全相符的高分辨率成像。给出了典型的聚束模式 SAL 高分辨率成像结果, 包括合作目标成像、非合作目标成像、对同一目标的持续跟踪成像以及相干叠加成像与非相干叠加成像。

关键词 遥感; 合成孔径激光雷达; 聚束模式; 成像; 相干叠加; 非相干叠加

中图分类号 TN958 **文献标识码** A

doi: 10.3788/AOS201636.0628001

Experimental Demonstration of Spotlight Mode Synthetic Aperture Ladar

Wu Shudong^{1,2} Huang Jianyu³ Zhao Zhilong^{1,2} Wang Kunpeng³ Dai Ze³ Wu Jin¹

¹*Institute of Electronics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China*

²*University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China*

³*Key Laboratory of Space Object Measurement, Beijing Institute of Tracking & Telecommunications Technology, Beijing 100094, China*

Abstract By using a linearly wavelength-scanning 1.55 μm laser source and a rotating plane mirror to control the direction of the illuminating laser beam, a laboratory-scale spotlight mode synthetic aperture ladar (SAL) is established. The SAL operates stably and the generating high resolution images are in accordance with the prospective results of imaging theory. Typical spotlight mode SAL images are illustrated, including images of a cooperative target, images of a diffusive target, constant tracking images, coherent superposition images and incoherent superposition images of the same target.

Key words remote sensing; synthetic aperture ladar; spotlight mode; imaging; coherent superposition; incoherent superposition

OCIS codes 280.6730; 280.4750; 110.2990

1 引 言

合成孔径激光雷达(SAL)是采用光学合成孔径技术和相干外差探测的高分辨率成像激光雷达,它能够突破传统光学系统中镜头尺寸对成像分辨率衍射极限的限制,可对几百公里甚至几千公里以外的目标实现厘米级分辨率的二维(2D)、三维(3D)成像。这种卓越的成像能力使之有望发展成为远距离目标高分辨率成像观测的新工具,在对地观测、对空监视和空间探测等领域中得到应用^[1-2]。

SAL有两种常用的成像模式:条带式 and 聚束式。在聚束模式下,SAL运动过程中同时转动探测光束,使目标平面上探测光束的光斑脚印保持不变。与条带模式相比,聚束模式 SAL运动过程中总是保持对同一目标的照明,散射回波时间不受光斑脚印尺寸的限制,有更长的相干累积时间,可以实现更高的合成孔径成像

收稿日期: 2015-12-28; **收到修改稿日期:** 2016-02-23

基金项目: 国家自然科学基金(61178071)、空间目标测量重点实验室开放基金

作者简介: 吴曙东(1990—),男,硕士研究生,主要从事合成孔径激光雷达方面的研究。E-mail: wsd9009@sina.cn

导师简介: 吴谨(1965—),男,博士,研究员,博士生导师,主要从事激光雷达及脉冲气体激光器等方面的研究。

E-mail: jwu909@263.net(通信联系人)

分辨率。

到目前为止,对于条带模式 SAL 实验成像(包括 SAL 2D/3D 实验室成像和机载成像)的报道较多^[3-15],而关于聚束模式 SAL 成像资料少^[16-17]。2012 年,Crouch 等^[16]采用 1550 nm 调频激光,首次演示了 1.4 m 距离处蜻蜓标本目标的聚束模式 SAL 成像;2015 年,基于直视 SAL 技术^[17],Zhang 等^[18]完成了室内直视 SAL 聚束模式成像。

具备在运动过程中保持对同一目标进行相干积累这种探测特性的聚束模式 SAL 具有重要的应用潜力。本文基于 SAL 成像原理,给出了一种聚束模式 SAL 成像实验方法,并利用 1550 nm 波长的调频激光建立了实验装置,演示了多种目标的聚束模式 SAL 高分辨率成像。

2 成像原理描述

2.1 基本原理

SAL 合成孔径高分辨率成像的实现依赖于 SAL 与目标之间的相对运动,因此,SAL 运动与目标静止或 SAL 静止与目标运动,都可以实现合成孔径成像。

图 1 为条带模式 SAL 成像示意图。图 1(a)中 SAL 匀速运动,速率为 v ,向正侧视方向发射探测光束照明静止目标,随着 SAL 运动,目标依次被不同光斑位置照明。图 1(b)则相反,SAL 静止,目标以匀速运动,速率 v 运动,目标也将依次被不同的光斑位置照明。已有的 SAL 成像演示中,文献^[4-5,16]采用了图 1(a)的方式,文献^[3,11-15]采用了图 1(b)的方式。

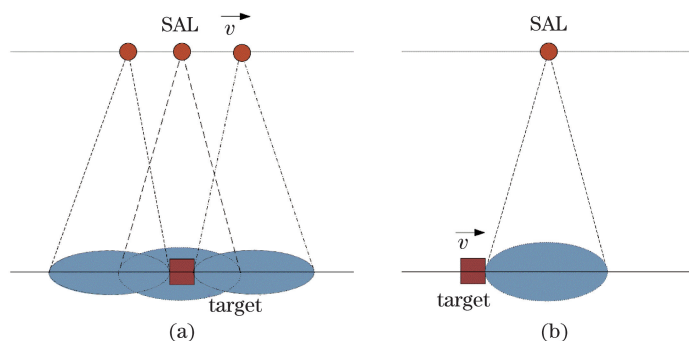


图 1 条带模式 SAL 成像示意图

Fig. 1 Schematic of a strip map mode SAL

图 2 为聚束模式 SAL 成像示意图。图 2(a)中目标静止,SAL 以速率 v 匀速运动,同时转动探测光束的方向,使目标平面上的光斑脚印保持不变。图 2(b)中目标以速率 v 匀速运动,SAL 静止,但通过转动探测光束的光轴使目标上的光斑脚印不随目标运动而变化。这两种情形都可以实现聚束模式 SAL 成像。文献^[16]演示的是图 2(a)的方式。

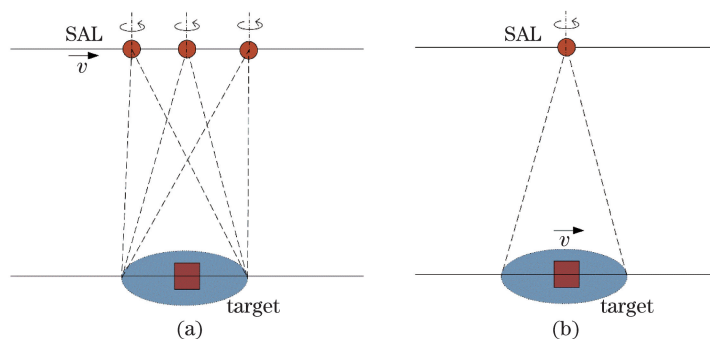


图 2 聚束模式 SAL 成像示意图

Fig. 2 Schematic of a spotlight mode SAL

从图 1 可见,对于条带模式 SAL,目标回波的相干积累时间受限于目标平面光斑脚印的大小。对于聚束模式 SAL,如图 2 所示,由于存在探测光束的转动,目标总是被探测光束照明,目标回波的相干积累时间

不再受限于目标平面光斑脚印尺寸。

根据图 2 所示的聚束模式 SAL 成像原理, SAL 与目标之间的相对运动是高分辨率合成孔径成像的关键,因此,可以采用图 3 所示的方法开展聚束 SAL 成像实验。图 3 中, SAL 静止,目标以速率 v 运动,探测光束经过固定平面反射镜 M1 和可旋转平面反射镜 M2 照明目标。SAL 与目标之间的相对运动由目标运动保证,探测光束对目标的跟踪由 M2 的转动实现。这种方法具备图 2 所示聚束模式 SAL 成像所需要的条件,可以用于聚束模式 SAL 成像实验。

图 3 所示聚束模式 SAL 成像实现方法,对目标的跟踪只需要一个旋转平面反射镜 M2,不需要转动含有复杂光路的 SAL 系统,有利于保持 SAL 系统的稳定性,减少可能引入的相位误差。

另外,图 3 中,如果 M2 静止,图 3 等效于图 1(b)所示的条带模式 SAL。换言之,在条带模式 SAL 光路中,引入图 3 所示的转折镜 M1 和 M2,即可实现聚束模式 SAL 成像演示。

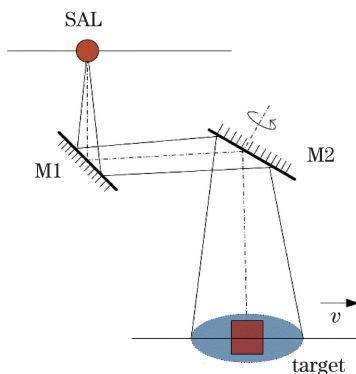


图 3 改进型的聚束模式 SAL 成像光路示意图

Fig. 3 Schematic of the improved spotlight mode SAL

2.2 理论描述

根据图 3 的光路原理,建立图 4 所示的简单二维直角坐标关系。其中, XOZ 为固定的主坐标系,原点 O 为收发口径位置(T_x/T_r); $X_0O_0Z_0$ 为目标坐标系,它以速率 v 沿主坐标系 X 轴方向匀速运动,原点 O_0 为目标上参考点(如质心)。目标坐标系 X_0 轴与主坐标系 X 轴平行,目标距离为 L_0 ($L_0 = L_{01} + L_{02}$);主坐标 Z 轴上的点 O_m 为图 3 中旋转平面镜的转轴位置,它与收发口径位置距离 L_{01} 不随目标运动变化,是固定值,对应于探测光束自发射口径至旋转平面镜的传输距离。

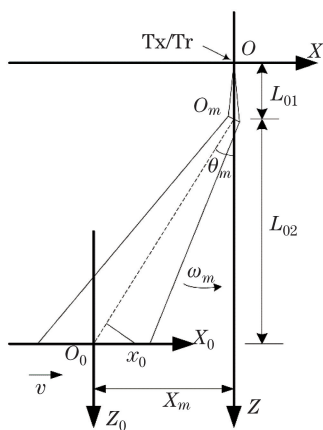


图 4 改进型聚束模式 SAL 几何关系

Fig. 4 Geometry of the improved spotlight mode SAL

假设控制旋转平面镜的转速速率 ω_m 和目标的匀速速率 v 使原点 O_0 处在探测光束光轴上,由图 4 得到

$$\begin{cases} \sin \theta_m = \frac{X_m}{\sqrt{L_{02}^2 + X_m^2}} \\ \cos \theta_m = \frac{L_{02}}{\sqrt{L_{02}^2 + X_m^2}} \end{cases}, \quad (1)$$

式中下标 m 表示方位采样位置, θ_m 、 X_m 、 L_{02} 分别为光轴与 Z 轴间的夹角、原点 O_0 在柱坐标系的 X 轴坐标及旋转轴 O_m 与目标坐标系 X_0 轴的距离。

在采样位置 m , 目标点 $P_0(x_0, 0)$ 相对于收发位置(原点 O) 的光轴长度为

$$L_{0m} = L_{01} + \sqrt{L_{02}^2 + X_m^2} - x_0 \sin \theta_m, \quad (2)$$

在远场近似下, 目标点 $P_0(x_0, 0)$ 对探测激光与散射光的距离近似关系均为

$$L_m(x_0) \approx L_{0m} + \frac{x_0^2 \cos^2 \theta_m}{2L_{0m}}, \quad (3)$$

将(1)式、(2)式代入(3)式, 得到

$$L_m(x_0) \approx L_{01} + \sqrt{L_{02}^2 + X_m^2} - x_0 \sin \theta_m + \frac{x_0^2 \cos^2 \theta_m}{2(L_{01} + \sqrt{L_{02}^2 + X_m^2} - x_0 \sin \theta_m)}, \quad (4)$$

这是图 3 中聚束模式 SAL 成像的基本距离关系。

针对(4)式, 考虑几种特殊情形。

1) 小目标, 即 $x_0 \approx 0$ 。

这时, (4)式可近似为

$$\begin{aligned} L_m(x_0) &\approx L_{01} + \sqrt{L_{02}^2 + X_m^2} - \frac{x_0 X_m}{\sqrt{L_{02}^2 + X_m^2}} + \frac{x_0^2}{2(L_{01} + \sqrt{L_{02}^2 + X_m^2})} \frac{L_{02}^2}{L_{02}^2 + X_m^2} \approx \\ &L_{01} + \sqrt{L_{02}^2 + X_m^2} - \frac{x_0 X_m}{\sqrt{L_{02}^2 + X_m^2}}, \end{aligned} \quad (5)$$

式中 $L_m(x_0)$ 同时与目标位置 X_m 及目标坐标 x_0 有关。根据 SAL 成像理论^[19], (5)式中的 $(\sqrt{L_{02}^2 + X_m^2})$ 项引起距离徙动, 并且运动范围越大, 距离徙动越严重。方位合成孔径处理前, 需要校正距离徙动。另外, (5)式中只存在目标坐标 x_0 的一次项, 距离徙动校正后, 方位合成孔径成像可直接采用傅里叶变换实现。

2) 小运动范围。

这时, (4)式将同时满足如下近似条件

$$\begin{cases} \theta_m \ll 1 \\ \sqrt{L_{02}^2 + X_m^2} \approx L_{02} + \frac{X_m^2}{2L_{02}} \\ \frac{1}{L_{01} + \sqrt{L_{02}^2 + X_m^2} - x_0 \sin \theta_m} \approx \frac{1}{L_{01} + L_{02}} \end{cases}. \quad (6)$$

代入(4)式, 整理得到

$$L_m(x_0) \approx L_{01} + L_{02} + \frac{(X_m - x_0)^2}{2L_{02}} + \left[\frac{1}{2(L_{01} + L_{02})} - \frac{1}{2L_{02}} \right] x_0^2, \quad (7)$$

根据 SAL 成像理论^[11], (7)式表达的距离关系对应的合成孔径成像匹配滤波器为

$$h(X_m) = \exp\left(-\frac{j2\pi X_m^2}{\lambda_0 L_{02}}\right), \quad (8)$$

式中 λ_0 为 SAL 探测激光波长。

3) $L_{01} \ll L_{02} \approx L_0$, 即旋转平面镜靠近收发口径(大多数实际应用情形)。

这时, (4)式可近似为

$$L_m(x_0) \approx L_{01} + \sqrt{L_{02}^2 + X_m^2} - \frac{x_0 X_m}{\sqrt{L_{02}^2 + X_m^2}} + \frac{x_0^2}{2(L_{01} + \sqrt{L_{02}^2 + X_m^2})} \frac{L_{02}^2}{L_{02}^2 + X_m^2} \approx$$

$$L_{01} + \sqrt{L_{02}^2 + X_m^2} - \frac{X_m^2}{2\sqrt{L_{02}^2 + X_m^2}} + \frac{(X_m - x_0)^2}{2\sqrt{L_{02}^2 + X_m^2}}, \quad (9)$$

这个距离关系表明 $\left(\sqrt{L_{02}^2 + X_m^2} - \frac{X_m^2}{2\sqrt{L_{02}^2 + X_m^2}}\right)$ 项会引起距离徙动, 并且运动范围越大, 距离徙动越严重。

方位合成孔径处理前, 需要校正距离徙动。另外, (9) 式中与目标坐标 x_0 有关的项 $\frac{(X_m - x_0)^2}{2\sqrt{L_{02}^2 + X_m^2}}$, 其分母含有 X_m 坐标。一般, $|X_m| \ll L_{02}$, 距离徙动校正后, 方位合成孔径成像可采用匹配滤波实现, 其匹配滤波器近似为

$$h(X_m) = \exp\left(-\frac{j2\pi X_m^2}{\lambda_0 L_{02}}\right) \approx \exp\left(-\frac{j2\pi X_m^2}{\lambda_0 L_0}\right). \quad (10)$$

因此, 采用图 3 所示的方法, 可以实现聚束模式 SAL 成像, 其图像形成理论与通常的条带模式 SAL 基本相同。图 3 中, 由于相对运动仅发生在旋转平面镜与目标之间, 匹配滤波器表达式中的距离参数不是通常收发口径到目标平面的距离 L_0 ($L_0 = L_{01} + L_{02}$), 而是旋转平面镜到目标平面距离 L_{02} , 所以图像方位向和距离向分辨率 (ρ_a, ρ_r) 将表示为

$$\begin{cases} \rho_a = \frac{\lambda_0 L_{02}}{2L_{SA}} \\ \rho_r = \frac{c}{2B \cos \phi} \end{cases}, \quad (11)$$

式中 L_{SA} 、 B 、 ϕ 分别为合成孔径长度、激光成像带宽以及固定坐标系 Z 轴与成像坐标系 Y_0 轴 (图 4 未画出) 的夹角。

3 实验装置设计

3.1 实验装置

基于图 3 光路原理的聚束模式 SAL 成像演示实验装置如图 5 所示。图 5 中, 虚线框内为 SAL 实验系统, 其构成在文献[12]中有详细描述。激光器发射的信号分为三个通道, 其中 CH1 为信号通道, 由探测激光和经过光纤延时的本征光组成, 输出为二者的外差信号; CH2 为参考通道, 用于去除线性调波长光纤激光器的调频非线性误差; CH3 为基准频率通道, 利用 HCN 分子气体吸收池对不同波长的吸收特性来同步成像起始频率。

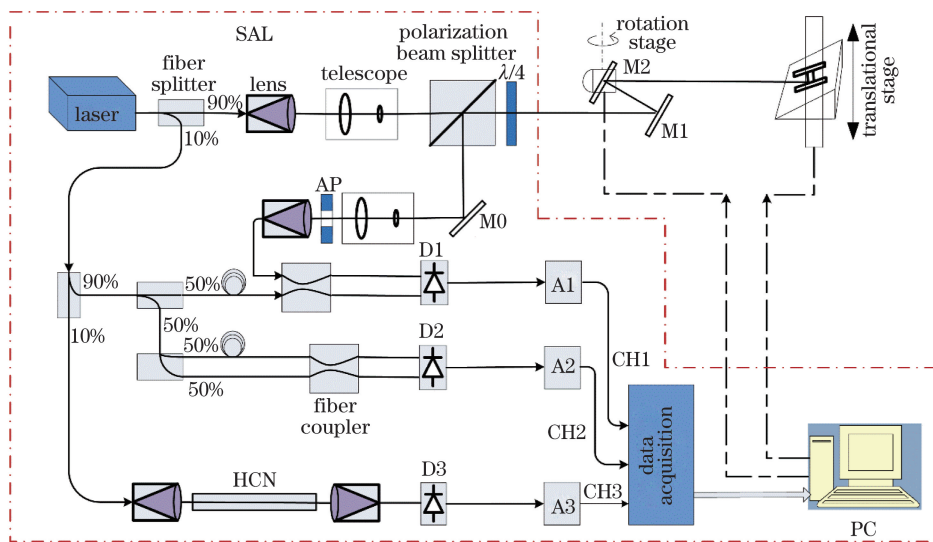


图 5 改进型聚束模式 SAL 成像实验装置

Fig. 5 Experimental setup of the improved spotlight mode SAL

实验目标放置于一个与探测激光光轴夹角为 ϕ (约为 60°) 的平面上, 并由一个平移台控制作直线运动, 探测激光经过固定平面镜 M1、旋转平面镜 M2 至目标平面。M2 安装在一个旋转平台上。平移台、旋转平台及三通道的信号采集均由一台计算机控制。

聚束模式 SAL 成像数据采集过程遵循“一步一停”模式: 在激光器调频及数据采集存储时, 目标静止; 完成后, 目标匀速运动 ΔX_m 至下一个方位采样位置, 同时, 旋转平台转动一定的角度 $\Delta\theta_m$ 。 ΔX_m 与 $\Delta\theta_m$ 满足关系

$$\Delta X_m = L_{02} \cdot \Delta\theta_m, \quad (12)$$

为使成像数据处理简单, 将按照第 2.2 节的情形 1) 和 2) 的条件来开展聚束模式 SAL 实验。

3.2 成像数据处理

聚束模式 SAL 实验的成像数据处理分为四步, 即:

1) 预处理。采用上述装置进行实验, 采集并存储三个通道的原始数据。首先根据 CH3 通道的数据, 得到经过 HCN 气体吸收池的激光输出波长吸收峰谱线, 同步各脉冲间的起始频率; 然后依据文献[4]中的“锐化”的方法, 利用参考通道的数据来补偿信号频率的非线性误差。

2) 距离压缩。通过对步骤 1) 中处理后的 SAL 原始数据矩阵进行距离向的傅里叶变换即可得到距离压缩像。

3) 方位合成孔径。将距离压缩后的数据矩阵与(8)式相乘, 再作方位向傅里叶变换即得到匹配滤波 SAL 图像; 或校正距离徙动后, 直接进行傅里叶变换得到合成孔径 SAL 图像。

4) 相位梯度自聚焦算法(PGA)聚焦成像^[20]。由于不可避免存在相位误差, 合成孔径后的 SAL 图像一般质量不高, 需要进一步采用多次迭代 PGA 处理, 以提高成像质量。

4 成像结果

4.1 实验参数

聚束模式 SAL 成像实验的相关参数可根据表 1 的数据计算得到。

表 1 聚束模式 SAL 实验参数

Table 1 Experimental parameters of the improved spotlight mode SAL

Parameter	Laser power /mW	Wavelength scanning speed / $(\text{nm}\cdot\text{s}^{-1})$	Wavelength / μm	Pulse length /ms	Distance L_{01} /m	Distance L_{02} /m	Step angle of rotation /s	Side looking angle / $(^\circ)$	Equivalent receiving aperture / $(\text{mm}\times\text{mm})$	SAL imaging mode
Value	36.0	100	1.55	160	3.43	0.475	14.4	60	0.5×0.5	spotlight

距离像分辨率为

$$\rho_r \approx 150 \mu\text{m}。 \quad (13)$$

实验所用旋转平台的最小角度分辨率为 $7.2''$, 相应的光束最小转动角度为

$$\Delta\theta_m = 14.4'' \approx 69.81 \mu\text{rad}。 \quad (14)$$

最小方位采样步长为

$$\Delta\theta_m \cdot L_{02} \approx 33.1 \mu\text{m}。 \quad (15)$$

Nyquist 采样定理要求下, 可实现的方位合成孔径成像分辨率为

$$\rho_a \geq 2 \cdot \Delta\theta_m \cdot L_{02} \approx 66.2 \mu\text{m}。 \quad (16)$$

Nyquist 采样定理要求下, 方位合成长度为

$$L_{SA} = \frac{\lambda_0}{2\rho_a} L_{02} \leq \frac{\lambda_0}{4 \cdot \Delta\theta_m} \approx 5.55 \text{ mm}。 \quad (17)$$

4.2 成像结果

图 6 为一个合作目标的成像结果。其中图 6(a)是目标照片, 一个由“3M”钻石反光材料制作的矩形方块, 大小约为 $5.7 \text{ mm}\times 3.9 \text{ mm}$ (距离向 \times 方位向), 目标内有“X”形状的图案, 方位向上分布着一定宽度的亮

条纹,相邻条纹的间隔约为 $220\ \mu\text{m}$ 。

由 4.1 节中的数据和分析可知,目标平面上光斑大小约为 $\Phi 12.1\ \text{mm}$,理论上聚束模式 SAL 合成孔径长度可以远大于光斑脚印尺寸,但是受限于旋转平台的最小角度分辨率,实验中方位合成孔径长度应不超过 $5.55\ \text{mm}$ 。因此,该实验采用的合成孔径长度为 $5.296\ \text{mm}$ (方位采样步进间隔 $33.1\ \mu\text{m}$,共 160 步),得到的成像理论分辨率为 $150\ \mu\text{m} \times 69.5\ \mu\text{m}$ (距离向 \times 方位向)。

图 6(b)为聚束模式 SAL 图像,图中可以看出明显的“X”图案和竖状条纹,展现了聚束 SAL 成像的高分辨率。

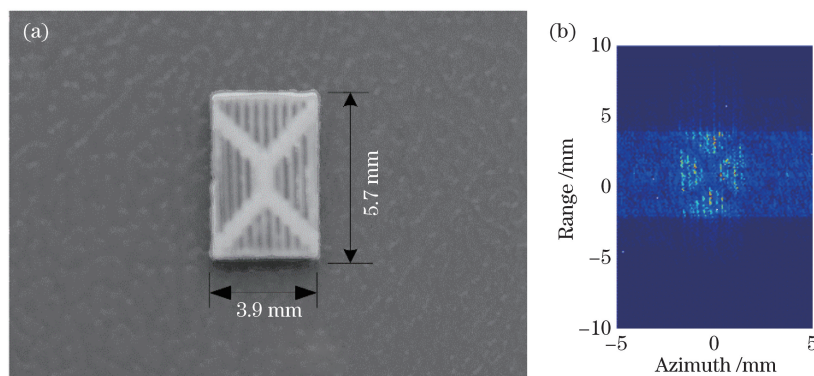


图 6 合作目标聚束模式 SAL 成像。(a)目标照片;(b)SAL 图像

Fig. 6 Spotlight mode SAL images of a cooperative target. (a) Photo of target; (b) SAL image

图 7 是一个漫反射目标的成像结果。图 7(a)为目标照片,是一个表面经过砂纸打磨的铜箔字母“H”,大小约为 $5.7\ \text{mm} \times 3.3\ \text{mm}$ (距离向 \times 方位向)。图 7(b)为聚束模式 SAL 图像,方位合成孔径长度为 $5.296\ \text{mm}$ 。可见,弱回波的漫反射目标也具有较好的成像效果。

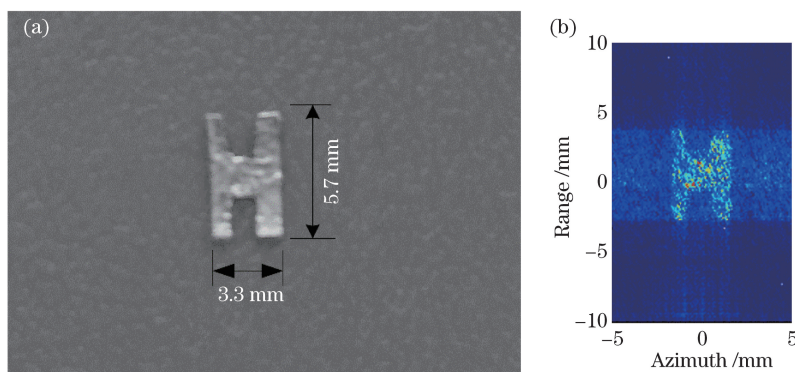


图 7 漫反射目标聚束 SAL 成像。(a)目标照片;(b)SAL 图像

Fig. 7 Spotlight mode SAL images of a diffusive target. (a) Photo of target; (b) SAL image

图 8 为更进一步展示聚束模式 SAL 成像特性的实验结果。在聚束模式 SAL 获取成像数据的过程中,探测光束一直跟踪目标,有效的目标回波数据不受光斑尺寸的限制,其方位合成孔径长度可以大于光斑脚印尺寸,因此,如果方位步长满足允许 Nyquist 采样定理的条件,可以获得比条带模式 SAL 更高的图像分辨率。由表 1 数据可得到目标平面上光斑大小约为 $\Phi 12.1\ \text{mm}$ 。当采样步数为 800 时,方位运动长度为 $26.48\ \text{mm}$,是光斑直径两倍多。由于系统方位采样步长仅支持 $5.55\ \text{mm}$ 的合成孔径长度,理论上, $26.48\ \text{mm}$ 方位运动长度中,任何一段 $5.55\ \text{mm}$ 长度的方位数据均可以形成同样方位分辨率的聚焦图像。

图 8(a)为实验目标照片,是一个普通打印白纸剪成的字母“V”,大小约为 $6.2\ \text{mm} \times 4.9\ \text{mm}$ (距离向 \times 方位向);图 8(b)是采样 800 步得到的目标回波原始数据,图 8(c)是对原始数据傅里叶变换得到的距离压缩像,可以看出在 SAL 的整个运动过程中都存在几乎相同的目标回波信号,这是聚束模式 SAL 的典型数据特点。

将 800 点数据按 160 点(对应合成孔径长度 $5.296\ \text{mm}$)分成 5 组,分别进行方位合成孔径和 PGA 处理,

可以得到五幅目标图像,结果如图 8(d)~(h)所示。可见,五幅图像基本相同,均实现了良好聚焦。

图 8(d)~(h)是同一目标不同时段的五幅图像,可以叠加。SAL 属相干成像,其成像数据含有相位信息,有两种叠加方式:相干叠加或非相干叠加。叠加结果如图 8(i)~(j)所示,其中图 8(i)是非相干振幅叠加图,图 8(j)是相干叠加图。对比图 8(d)~(h)可见,叠加后的图 8(i)~(j)信号强度有所增强,噪声也有一定的减弱,图像质量得到了提升。从图像质量看,图 8(i)比图 8(j)略好,这是因为相干叠加处理时只进行了简单的复图像相加,未进行任何相位调整。如何充分利用图像的相位信息提高叠加后的图像质量,是聚束模式 SAL 成像处理下一步的研究内容。

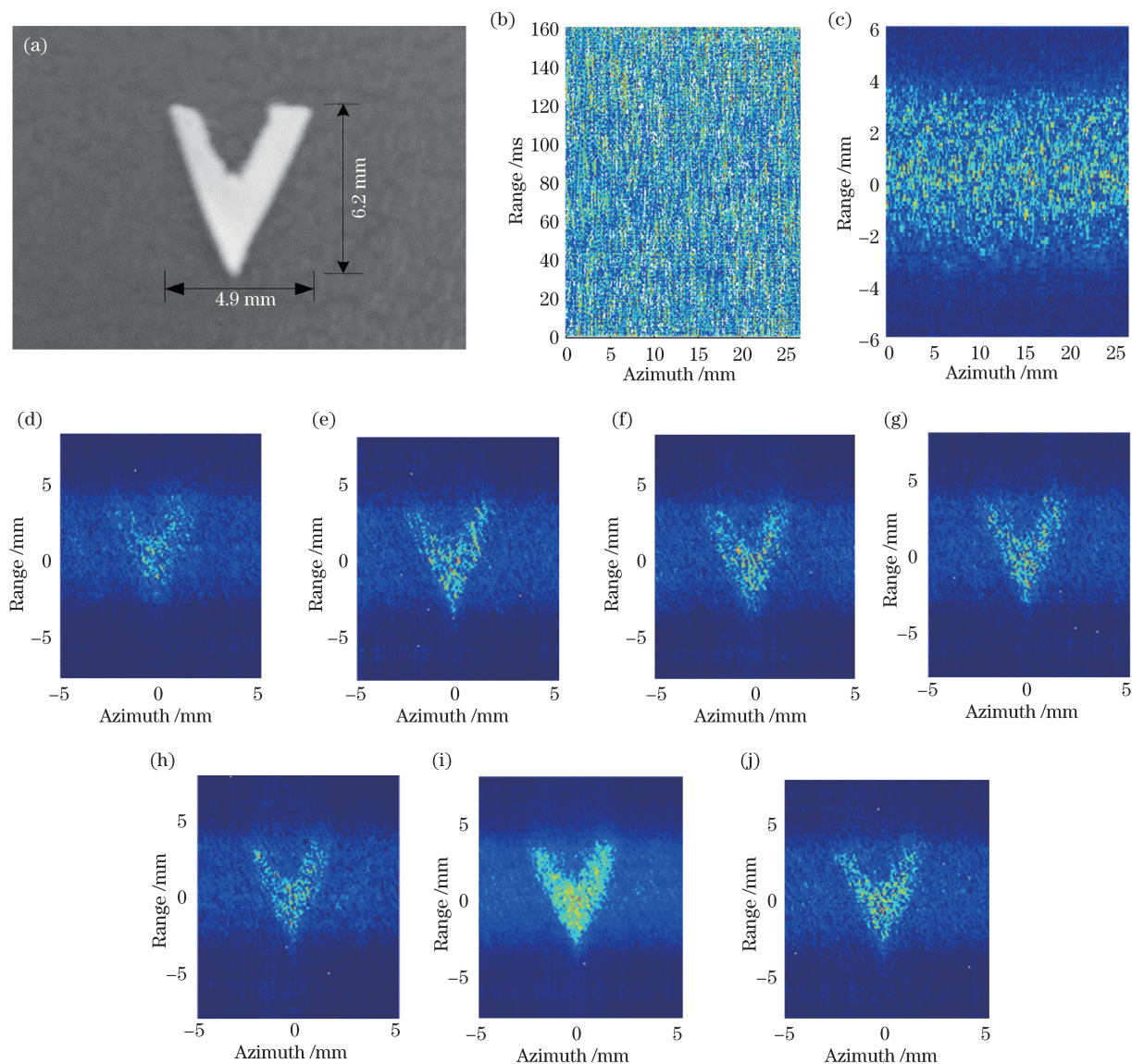


图 8 聚束模式 SAL 跟踪成像与叠加成像。(a)目标照片;(b)~(c)原始数据与距离压缩像;

(d)~(h)SAL 跟踪成像;(i)~(j)非相干叠加与相干叠加 SAL 成像

Fig. 8 Spotlight mode SAL images by tracking and superposition. (a) Photo of target;

(b)~(c) raw data and range compressed image; (d)~(h) SAL images by tracking;

(i)~(j) SAL images by incoherent superposition and coherent superposition

5 结 论

基于 SAL 成像原理,采用线性调波长的 1550 nm 波段激光,建立了聚束模式 SAL 实验室成像实验装置,简要分析了基本成像原理,给出了合作目标和漫反射目标成像演示。实验中系统的理论成像分辨率达到

150 $\mu\text{m} \times 69.5 \mu\text{m}$ (距离向 \times 方位向), 远远高于其真实接收口径尺寸对应的衍射极限分辨率 (约为 12.1 mm), 得到的成像结果与理论分析相符, 体现了聚束 SAL 高分辨成像的特点。文中演示了能够跟踪目标进行连续高分辨成像并实现相干叠加成像的典型聚束模式 SAL 成像特性。

在该聚束模式 SAL 实验装置中, 只有一个旋转平面镜控制探测光束跟踪运动的目标。这种结构方便了光束扫描的控制, 也减少了产生相位误差的因素。如果采用更高分辨率的旋转平台, 还可进一步演示聚束模式 SAL 合成孔径长度大于光斑脚印尺寸的高分辨率成像特点。聚束模式是 SAL 基本成像模式之一, 在对空目标高分辨率成像探测中, 聚束模式 SAL 有一定应用价值。

参 考 文 献

- 1 P F McManamon. Review of lidar: A historic, yet emerging, sensor technology with rich phenomenology[J]. *Opt Eng*, 2012, 51(6): 060901.
- 2 Liu Liren. A new way of high resolution remote sensing——synthetic aperture imaging lidar[J]. *Science*, 2014, 66(6): 25-29.
刘立人. 高分辨率遥感成像新途径——合成孔径激光雷达[J]. *科学*, 2014, 66(6): 25-29.
- 3 M Bashkansky, R L Lucke, E Funk, *et al.*. Two-dimensional synthetic aperture imaging in the optical domain[J]. *Opt Lett*, 2002, 27(22): 1983-1985.
- 4 S M Beck, J R Buck, W F Buell, *et al.*. Synthetic aperture imaging lidar: Laboratory demonstration and signal processing [J]. *Appl Opt*, 2005, 44(35): 7621-7629.
- 5 B Krause, J Buck, C Ryan, *et al.*. Synthetic aperture lidar flight demonstration[C]. *CLEO: Application and Technology*, 2011: PDPB7.
- 6 Z W Barber, J R Dahl. Synthetic aperture imaging demonstrations and information at very low return levels[J]. *Appl Opt*, 2014, 53(24): 5531-37.
- 7 Guo Liang, Xing Mengdao, Zhang Long, *et al.*. Research on indoor experimentation of range SAL imaging system[J]. *Sci China Ser E-Tech Sci*, 2009, 39(10): 1678-1684.
郭亮, 邢孟道, 张龙, 等. 室内距离向合成孔径激光雷达成像的实验研究[J]. *中国科学 E 辑: 技术科学*, 2009, 39(10): 1678-1684.
- 8 Liu Liren, Zhou Yu, Zhi Ya'nan, *et al.*. A large-aperture synthetic aperture imaging lidar demonstrator and its verification in laboratory space[J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, 31(9): 0900112.
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.
- 9 L R Liu. Coherent and incoherent synthetic aperture imaging lidars and laboratory-space experimental demonstrations (invited)[J]. *Appl Opt*, 2013, 52(4): 579-599.
- 10 Z Luan, J F Sun, Y Zhou, *et al.*. Down-looking synthetic aperture imaging lidar demonstrator and its experiments over 1.2 km outdoor[J]. *Chin Opt Lett*, 2014, 12(11): 111101.
- 11 Wu Jin, Yang Zhaosheng, Zhao Zhilong, *et al.*. Synthetic aperture lidar imaging with one-way far-field diffraction[J]. *J Infrared Millim Waves*, 2013, 32(6): 514-525.
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): 514-525.
- 12 Wu Jin, Li Feifei, Zhao Zhilong, *et al.*. Demonstration of stripmap mode synthetic aperture lidar with PGA-independent high resolution images[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2014, 43(11): 3559-3564.
吴谨, 李斐斐, 赵志龙, 等. 条带模式合成孔径激光雷达不依赖 PGA 的高分辨率成像演示[J]. *红外与激光工程*, 2014, 43(11): 3559-3564.
- 13 Z L Zhao, J Wu, Y Y Su, *et al.*. Three-dimensional imaging interferometric synthetic aperture lidar[J]. *Chin Opt Lett*, 2014, 12(9): 091101.
- 14 Zhao Zhilong, Su Yuanyuan, Wu Jin, *et al.*. Synthetic aperture lidar imaging via synthetic frequency-stepped linearly-chirping signal[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2015, 27(5): 051004.
赵志龙, 苏圆圆, 吴谨, 等. 基于合成频率步进线性调频信号的合成孔径激光雷达成像[J]. *强激光与粒子束*, 2015, 27(5): 051004.
- 15 Wu Jin, Zhao Zhilong, Wu Shudong, *et al.*. High resolution synthetic aperture lidar imaging at 12.9 m distance[J]. *Acta Optica Sinica*, 2015, 35(12): 1228002.

- 吴 谨, 赵志龙, 吴曙东, 等. 12.9 m 分辨率合成孔径激光雷达成像[J]. 光学学报, 2015, 35(12): 1228002.
- 16 S Crouch, Z Barber. Laboratory demonstrations of interferometric and spotlight synthetic aperture ladar techniques[J]. Opt Express, 2012, 20(22): 24237-24246.
- 17 Liu Liren. Principle of down-looking synthetic aperture imaging ladar[J]. Acta Optica Sinica, 2012, 32(9): 0928002.
刘立人. 直视合成孔径激光成像雷达原理[J]. 光学学报, 2012, 32(9): 0928002.
- 18 Zhang Ning, Lu Zhiyong, Sun Jianfeng, *et al.*. Laboratory demonstration of spotlight-mode down-looking synthetic aperture imaging ladar[J]. Chin Opt Lett, 2015, 13(9): 091001.
- 19 Wu Jin. Matched filter in synthetic aperture ladar imaging[J]. Acta Optica Sinica, 2010, 30(7): 2123-2129.
吴 谨. 合成孔径激光雷达成像之匹配滤波器[J]. 光学学报, 2010, 30(7): 2123-2129.
- 20 D E Wahl, P H Eichel, D C Ghiglia, *et al.*. Phase gradient autofocus-a robust tool for high resolution SAR phase correction[J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 1994, 30(3): 827-835.