

直视合成孔径激光成像雷达滑动聚束模式下 图像信噪比研究

张 宁^{1,2} 卢智勇¹ 孙建锋^{1*} 周 煜¹ 栾 竹¹ 李光远^{1,2} 刘立人¹

¹中国科学院上海光学精密机械研究所空间激光信息传输与探测技术重点实验室, 上海 201800

²中国科学院大学, 北京 100049

摘要 用 15 m 的平行光管模拟远场条件对直视合成孔径激光成像雷达(SAIL)的滑动聚束模式进行了研究。基于单点目标回波收集方程,分析了滑动聚束的信噪比特性,理论和实验证实滑动聚束模式可以通过延长有效采集时间长度的方式提高信噪比。

关键词 成像系统;合成孔径激光成像雷达;滑动聚束模式;信噪比

中图分类号 TN958 **文献标识码** A

doi: 10.3788/AOS201636.0828001

Research on the Signal-to-Noise Ratio in Sliding Spotlight Mode Down-Looking Synthetic Aperture Imaging Ladar

Zhang Ning^{1,2} Lu Zhiyong¹ Sun Jianfeng¹ Zhou Yu¹

Luan Zhu¹ Li Guangyuan^{1,2} Liu Liren¹

¹Key Laboratory of Space Laser Communication and Detection Technology, Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China

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

Abstract Under far field simulated conditions by using collimator with 15 m focal length, we present a sliding spotlight mode of the down-looking synthetic aperture imaging ladar (SAIL). Based a single point target echo collection equation, the signal-to-noise ratio in sliding spotlight mode is analysed. Theory and experiment confirm that the sliding spotlight mode can improve signal-to-noise ratio when we can extend the effective acquisition time length.

Key words imaging systems; synthetic aperture imaging ladar; sliding spotlight mode; signal-to-noise ratio

OCIS codes 280.6730; 100.2000; 110.2970; 030.6140; 030.428

1 引 言

合成孔径激光成像雷达(SAIL)的原理来自射频领域的合成孔径雷达原理^[1],是目前理论上能够在远距离得到厘米量级分辨率的唯一光学成像观察手段。合成孔径激光成像雷达主要有侧视和直视两种体制。侧视 SAIL 通过频率线性调制产生啁啾信号,从而能够在距离向(或交规向)进行分辨。国外报道了采用外腔式可调单纵模半导体激光器^[2],实现了宽带啁啾调制,这种调制方式结构复杂、成本高,无法有效克服大气湍流与振动对波前相位的影响^[3],对侧视系统的相位补偿非常复杂。在侧视 SAIL 中发射孔径决定了光学足

收稿日期: 2016-02-25; **收到修改稿日期:** 2016-04-06

基金项目: 国家自然科学基金(61505233)

作者简介: 张 宁(1988—),男,博士研究生,主要从事合成孔径激光成像雷达聚束模式方面的研究。

E-mail: henryneargray@yeah.net

导师简介: 刘立人(1942—),男,研究员,博士生导师,主要从事激光技术和光学信息等方面的研究。

E-mail: lirenliu@mail.shcnc.ac.cn

* **通信联系人.** E-mail: sunjianfeng@163.com

趾大小和成像分辨率^[1]。为了增大光学足趾尺寸需要缩小发射光学天线口径,这会增大发射视场角;而为了提高雷达接收能量则需要增大接收光学天线口径,这会减小接收视场角。只有发射视场角与接收视场角重合的部分,才是外差接收视场,所以匹配发射视场角和接收视场角是相互矛盾的。直视 SAIL 采用波前变换原理^[4],对目标透射两个同轴同心且偏振正交的对向扫描光束,通过自差接收,直视系统在内光场实现交轨向的线性相位调制。顺轨向与侧视 SAIL 一样,通过运动实现二次相位历史累积,照明光斑尺寸及其相关联的成像分辨率可通过设计具体系统参数进行优化。直视 SAIL 具有如下优点:由于采用了同轴光束自差接收,大气湍流与系统振动带来的波前相位影响自动被消除,拍频初始相位不需要同步,并且可以采用低成本的光学系统来获得高分辨率的目标图像。

虽然侧视 SAIL 的接收面积受方向性限制,由于采用外差探测的方式,其系统接收灵敏度高,直视系统在原理上无方向性的限制,但是实际使用中接收光学天线口径的减小会导致灵敏度降低。为此,刘立人课题组^[5-8]发展了直视 SAIL 的静态模式系统^[9]和聚束模式系统^[10]。在机载环境下,雷达与目标之间存在相对运动。静态模式需要雷达与目标相对静止,且扫描内光场会导致分辨率下降,不适合机载使用;聚束模式需要雷达转动与目标运动速度完全匹配,这在机载情况下很难保证,因此这两种模式在机载时都有一定的局限性。聚束模式在方位向上具有高分辨率但场景宽度受到系统视场角的限制,滑动聚束模式不需要雷达与目标速度的严格匹配,在方位向牺牲了部分分辨率,使场景宽度随着光学足趾的运动而增加,因此滑动聚束模式在方位向可以获得较好的分辨率与较大的成像宽度。故本文基于滑动聚束模式对直视 SAIL 图像的信噪比特性进行研究。

2 基本原理

静态直视 SAIL 与聚束直视 SAIL 在理论上均可通过滑动聚束直视 SAIL 的二维数据收集方程控制变量推导获得,3 种模式相互联系。合成孔径激光成像雷达做直线运动^[11],在运动中光学足趾以较慢的扫描速度扫描被测目标平面内所关注的区域,这种工作模式叫做滑动聚束模式。

滑动聚束 SAIL 的实际信号的成像处理包括两个过程:1) 对交轨向进行傅里叶变换;2) 对顺轨向进行匹配滤波。图 1 为目标回波傅里叶变换和匹配滤波的信号处理系统,最终得到包含噪声的聚焦信号。

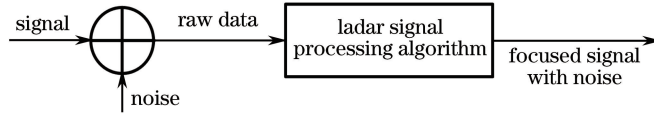


图 1 滑动聚束模式 SAIL 系统噪声模型

Fig. 1 Noise model of sliding spotlight mode SAIL system

探测器 PIN 光电二极管接收到的回波信号为有限的时间流信号,设采集到的回波信号为

$$x_i(t_{f,n}, t_{s,m}) = s_i(t_{f,n}, t_{s,m}) + n_i(t_{f,n}, t_{s,m}), \quad (1)$$

式中 $t_{f,n}$ 为快时间, $t_{s,m}$ 为慢时间。假设 PIN 管及其电路系统的热噪声可以看作是一种白噪声, $n_i(t_{f,n}, t_{s,m})$ 即表示接收到的零均值白噪声, $s_i(t_{f,n}, t_{s,m})$ 为目标反射回接收探测器的光电流信号,即

$$s_i(t_{f,n}, t_{s,m}) = C \cdot \text{rect}\left(\frac{t_{f,n}}{T_f}\right) \text{rect}\left(\frac{t_{s,m}}{T_s}\right) \text{rect}\left(\frac{x_p}{MW_x}\right) \text{rect}\left[\frac{y_p - M(v_{y1} - \omega_{y2}Z)t_{s,m}}{MW_y}\right] \times \cos\left\{\frac{2\pi}{M^2\lambda f_x} [2(x_p + MS_b) Mv_x t_{f,n}] - \frac{\pi}{M^2\lambda f_x} [y_p + M(v_{y1} - \omega_{y2}Z)t_{s,m}]\right\}, \quad (2)$$

式中 T_f 为快时间窗口, T_s 为慢时间窗口, M 为直视 SAIL 系统作用距离产生的放大倍数^[1], W_x 、 W_y 分别为内光场交规向和顺规向的光阑大小, λ 为雷达系统的工作波长, v_x 为交规向的扫描速度, v_{y1} 为目标平移台的移动速度(即相对于实际机载中的激光雷达移动速度), ω_{y2} 为转台的转动角速度, Z 为雷达系统的作用距离, S_b 为雷达系统的同向偏置^[8], x_p 为目标点的交轨向坐标, y_p 为目标点顺轨向坐标, f_x 为内光场柱面镜曲率半径。

直视 SAIL 系统采用点目标模型,并假设为线性移不变系统。假设顺轨向的采样时间间隔为 $\Delta t_{s,m}$, 则每个采样间隔内,雷达的移动距离为 $\Delta L_1 = v_{y1} \Delta t_{s,m}$, 同理,光学足趾的移动速度为 $\Delta L_2 = \omega_{y2} Z \Delta t_{s,m}$ 。设一个目标点的光学足趾最大时间扫描数为 $K = D/\Delta L_2$, D 为顺轨向光学足趾长度。当 $\Delta L_1 > \Delta L_2$ 时,即为滑动聚束模式。

对该信号处理采用交规向傅里叶变换聚焦和顺规向共轭相位二次项匹配滤波聚焦成像算法。当成像处理后,输出信号包含目标图像信号和噪声两部分^[12] :

$$x_0(\xi, t_s) = s_0(\xi, t_s) + n_0(\xi, t_s), \quad (3)$$

式中 ξ 为交轨向压缩后交轨向的频域坐标, t_s 为顺轨向时间坐标。经过成像算法处理后,输出的只包含回波信号的瞬时功率为 $|s_0(\xi, t_s)|^2$, 而对于噪声信号, 采用了傅里叶变换和匹配滤波的过程, 最终经过成像算法处理后的输出噪声平均功率为

$$\overline{n_0^2(t)} = \frac{N_0}{2} \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} |H(\xi, \eta)|^2 d\xi d\eta, \quad (4)$$

式中 N_0 为高斯白噪声单边功率谱密度, $H(\xi, \eta)$ 为系统的频率特性函数, 其中 η 为顺轨向频域坐标。对于合成孔径激光成像雷达的匹配滤波器是一个交规向的矩形窗和顺规向有限时间长度的二次相位过程, 即

$$h(\xi, t_{s,m}) = \text{rect}\left(\frac{\xi}{\xi_{\max}}\right) \text{rect}\left(\frac{t_{s,m}}{T_s}\right) \exp\left\{-j \frac{\pi}{M^2 \lambda f_y} [M(v_{y1} - \omega_{y2} Z) t_{s,m}]^2\right\}. \quad (5)$$

因此, 最终图像的信噪比为

$$R_{SN} = \frac{|s_0(t_{f,n}, t_{s,m})|^2}{n_0^2(t_{f,n}, t_{s,m})} \leq \frac{\int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} |H(\xi, \eta)|^2 d\xi d\eta \int_{-\infty}^{+\infty} |S_i(\xi, \eta)|^2 d\xi d\eta}{\frac{N_0}{2} \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} |H(\xi, \eta)|^2 d\xi d\eta} = \frac{2E}{N_0}, \quad (6)$$

式中 E 为探测器接收的信号光能量, 表达式为

$$E = \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} |S_i(\xi, \eta)|^2 d\xi d\eta = \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} |s_i(t_{f,n}, t_{s,m})|^2 dt_{f,n} dt_{s,m} = \frac{(CT_f T_s)^2}{2}, \quad (7)$$

由(6)式与(7)式可知, 最终图像的信噪比可以表示为

$$R_{SN} \leq \frac{(CT_f T_s)^2}{N_0}. \quad (8)$$

因此, 为了提高滑动聚束模式下的图像信噪比, 可以通过增加傅里叶变换的快时间窗口或顺轨向慢时间窗口的方式来实现。

3 实验验证

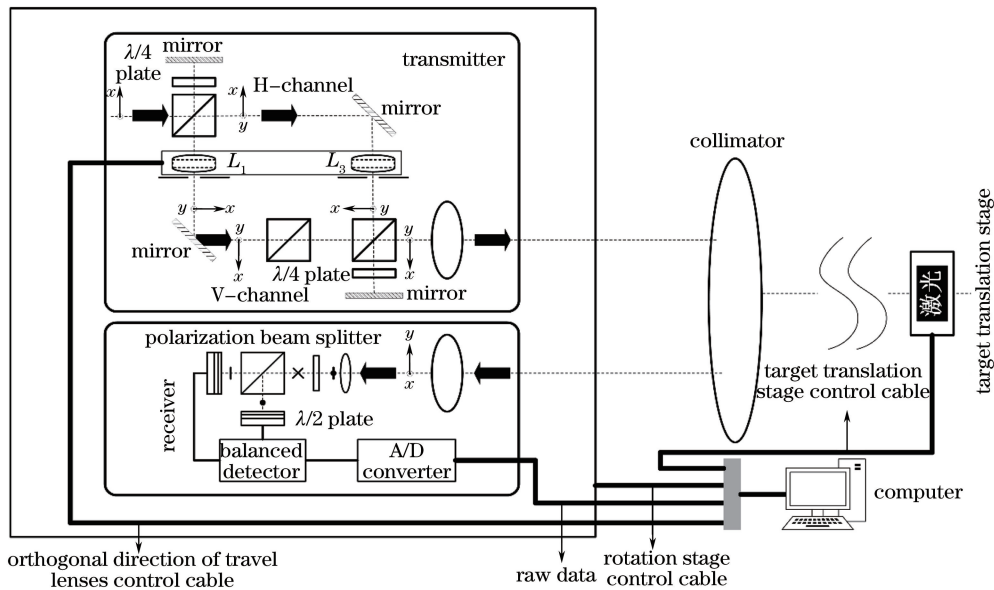


图 2 直视合成孔径激光成像雷达滑动聚束模式系统原理图
Fig. 2 Structure of down-looking SAIL under sliding spotlight mode

实验装置原理如图 2 所示,基于直视 SAIL 的原理,发射采用两个正交偏振对向扫描的空间抛物波差的光束,接收采用自差探测,并采用 15 m 平行光模拟远场条件。

发射采用波长为 1550 nm、功率为 27.5 dBm 的连续激光器。偏振正交的两束光为 H 光路和 V 光路,偏振正交的两束光,通过波前变换装置进行相位调制。发射主镜直径 $\Phi=200$ mm,焦距为 1.2 m。采用旁轴接收望远镜主镜($\Phi=200$ mm,焦距为 15 m)的平行光管模拟远场条件,接收信号经过 1×2 桥接器自差相干后,由平衡接收机进行信号采集。实验中雷达系统相对于目标的运动采用雷达系统转动和目标平动实现。

内光场光斑为 $7\text{ mm}\times 7\text{ mm}$,目标光斑尺寸为 87.5 mm ,目标如图 3 所示漫反射面目标,尺寸为 $70\text{ mm}\times 35\text{ mm}$ 的矩形点。采集到的二维数据经过交规向傅里叶变换聚焦和顺规向匹配滤波聚焦后获得二维重构图像^[13]。

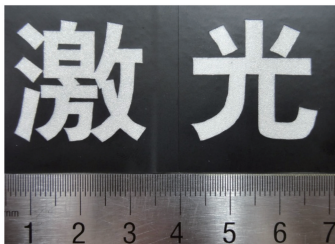


图 3 成像目标

Fig. 3 Imaging target

实验过程中,通过改变目标的平移速度、转台的转动角速度、交规向扫描速度改变顺规向时间窗口与交规向时间窗口长度,获得图 4、图 5、图 6 的 3 组实验结果,系统结构参数如表 1 所示,3 组实验的参数设置详见表 2。

表 1 系统参数

Table 1 System parameters

Parameter	Value
Focus of transmitter/receiver main lens /m	1.2
Focus of orthogonal direction cylindrical lens /mm	150
Size of inner optical field /mm ²	7×7
Scan range of orthogonal direction cylindrical lens /mm	2.46~7.66
Orthogonal direction sampling rate /(kSa/s)	10
Travel direction sampling rate /(kSa/s)	2
Detection range /m	15

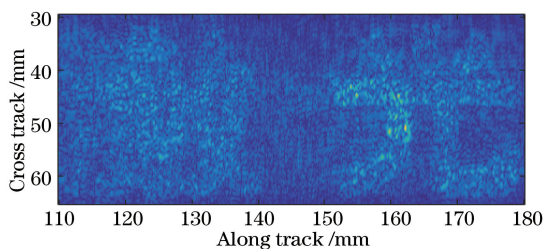


图 4 第 1 组成像结果

Fig. 4 The first set of result

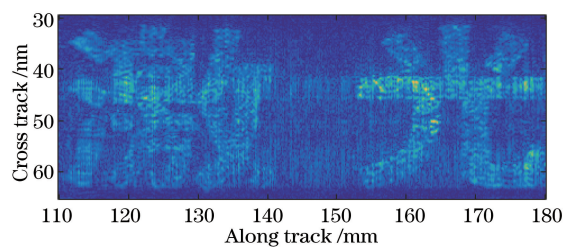


图 5 第 2 组成像结果

Fig. 5 The second set of result

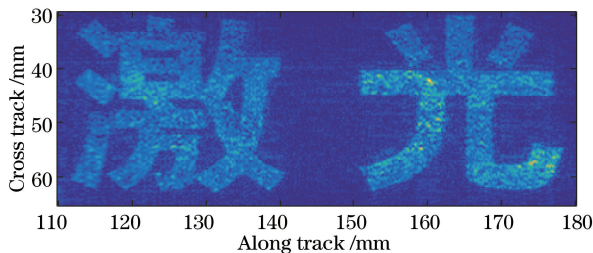


图 6 第 3 组成像结果

Fig. 6 The third set of result

表 2 实验参数

Table 2 Experiment parameters

Number	¹ Translatory velocity	² Rotation speed	³ Scanning speed	⁴ Sampling time	⁵ Total illumination
	/(mm/s)	/[(°)/s]	/(mm/s)	/ms	time /s
1	0.25	3.82×10^{-4}	39	133.3	266.6
2	0.2	0.0014	27	192.6	385.2
3	0.06	3.82×10^{-5}	14	371.4	742.8

Note: 1. Target's translatory velocity; 2. rotation speed of SAIL system platform; 3. scanning speed of orthogonal direction cylindrical lens in inner optical field; 4. sampling time of orthogonal direction cylindrical lens in each period; 5. total illumination time of target within data collection window.

雷达发射部分出射的 1550 nm 激光, 投射到目标反射, 雷达接收部分接收后向散射的回波信号, 光信号通过 1×2 桥接器, 由平衡接收机进行光电转换, 转换得到的电信号通过 NI PXI-5105 高速采集卡, 由 LabVIEW 程序控制进行数据采集, 最终得到二维回波信号, 通过 Matlab 编写数据处理算法, 将回波信号进行二维聚焦处理^[13-15], 最终得到图 4、图 5、图 6 等 3 组实验结果, 可以看到随着顺规向时间窗口与交规向时间窗口(表 2 中的总时间)的增加, 噪声得到很好的抑制, 最终图像信噪比得到显著提高。

4 结 论

实现了一种滑动聚束模式的直视合成孔径雷达装置, 使用 15 m 的平行光管模拟远场条件, 通过实验验证了滑动聚束模式可以通过延长有效采集时间长度的方式提高信噪比, 对下一步的机载实验有实际参考意义。

参 考 文 献

- Liu Liren. Principle of down-looking synthetic aperture imaging lidar[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.
- Beck S M, Buck J R, Buell W F, *et al.* Synthetic-aperture imaging lidar: laboratory demonstration and signal processing [J]. Applied Optics, 2005, 44(35): 7621-7629.
- Chen Shanqiu, Liu Wenjin, Dong Lizhi, *et al.* Constraint study on deformable mirror in close-loop adaptive optics system [J]. Acta Optica Sinica, 2015, 35(12): 1201002.
陈善球, 刘文劲, 董理治, 等. 闭环控制自适应光学系统变形镜约束技术的研究[J]. 光学学报, 2015, 35(12): 1201002.
- Liu Liren. Principle of auto-scanning synthetic aperture imaging lidar using hyperbolic wavefront difference[J]. Acta Optica Sinica, 2015, 35(1): 0128001.
刘立人. 双曲波前差自扫描直视合成孔径激光成像雷达原理[J]. 光学学报, 2015, 35(1): 0128001.
- Lu Zhiyong, Sun Jianfeng, Zhi Yanan, *et al.* Electrically controlled parabolic wavefront scanner in down-looking synthetic aperture imaging lidar[J]. Acta Optica Sinica, 2014, 34(8): 0828002.
卢智勇, 孙建锋, 职亚楠, 等. 直视式合成孔径激光成像雷达电控抛物面扫描器[J]. 光学学报, 2014, 34(8): 0828002.
- Luan Zhu, Sun Jianfeng, Zhi Yanan, *et al.* Two-dimensional imaging experiment of down-looking synthetic aperture lidar under simulated far-field conditions[J]. Acta Optica Sinica, 2014, 34(7): 0710003.
栾 竹, 孙建锋, 职亚楠, 等. 直视合成孔径激光成像雷达模拟远场条件下的二维成像实验[J]. 光学学报, 2014, 34(7): 0710003.
- Luan Z, Sun J F, Zhou Y, *et al.* Down-looking synthetic aperture imaging lidar demonstrator and its experiments over 1.2 km outdoor[J]. Chinese Optics Letters, 2014, 12(11): 111101.
- Liu Liren. Principle of self-interferometric synthetic aperture lidar for 3D imaging[J]. Acta Optica Sinica, 2014, 34(5): 0528001.
刘立人. 自干涉合成孔径激光三维成像雷达原理[J]. 光学学报, 2014, 34(5): 0528001.
- Lu Z Y, Zhang N, Sun J F, *et al.* Laboratory demonstration of static-mode down-looking synthetic aperture imaging lidar [J]. Chinese Optics Letters, 2015, 13(4): 042801.

- 10 Zhang N, Lu Z Y, Sun J F, *et al.* Laboratory demonstration of spotlight-mode down-looking synthetic aperture imaging ladar[J]. Chinese Optics Letters, 2015, 13(9): 091001.
- 11 Liu Liren. Synthetic aperture laser imaging ladar (IV): unified operation mode and two-dimensional data collection equation[J]. Acta Optica Sinica, 2009, 29(1): 1-6.
刘立人. 合成孔径激光成像雷达(IV): 统一工作模式和二维数据收集方程[J]. 光学学报, 2009, 29(1): 1-6.
- 12 Lu Z Y, Sun J F, Zhang N, *et al.* Improvement of the signal-to-noise ratio in static-mode down-looking synthetic aperture imaging ladar[C]. SPIE, 2015, 9617: 96170K.
- 13 Liu Liren. 2D Fourier-transform imaging algorithm for synthetic aperture imaging ladars[J]. Acta Optica Sinica, 2014, 34(1): 0128001.
刘立人. 合成孔径激光成像雷达的二维傅里叶变换成像算法[J]. 光学学报, 2014, 34(1): 0128001.
- 14 Xu Qian, Zhou Yu, Sun Jianfeng, *et al.* Research on the speckle influenced resolution imaging of synthetic aperture imaging ladar[J]. Acta Optica Sinica, 2014, 34(9): 0928001.
许 倩, 周 煜, 孙建锋, 等. 合成孔径激光成像雷达散斑效应分辨单元成像研究[J]. 光学学报, 2014, 34(9): 0928001.
- 15 Xu Qian, Zhou Yu, Sun Jianfeng, *et al.* Analysis of integrated speckle receiving characteristics based on synthetic aperture imaging ladar[J]. Acta Optica Sinica, 2014, 34(3): 0328002.
许 倩, 周 煜, 孙建锋, 等. 合成孔径激光成像雷达散斑天线接收特性分析[J]. 光学学报, 2014, 34(3): 0328002.