

合成孔径激光成像雷达的二维匹配滤波成像算法

孙志伟 侯培培 职亚楠 孙建锋* 许倩 周煜 刘立人

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

摘要 提出了一种合成孔径激光成像雷达(SAIL)的二维匹配滤波成像算法,对利用单频本振激光与线性调频信号光外差接收得到的 SAIL 目标回波信号同时在距离向、方位向进行相位二次项匹配滤波以实现目标成像。给出了单频本振信号外差接收情况下的单分辨单元的二维数据收集方程,并对 SAIL 二维匹配滤波成像算法进行了数学描述,具体分析了矩形和圆形天线孔径下的成像分辨率,给出了此算法对模拟 SAIL 回波信号的成像处理结果。

关键词 遥感;合成孔径激光成像雷达;成像算法;匹配滤波;矩形孔径;圆形孔径

中图分类号 TN958 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201434.1228003

Two-Dimensional Matched Filtering Imaging Algorithm for Synthetic Aperture Imaging Ladar

Sun Zhiwei Hou Peipei Zhi Yanan Sun Jianfeng Xu Qian Zhou Yu Liu Liren

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

Abstract A two-dimensional (2D) matched filtering imaging algorithm for synthetic aperture imaging ladar (SAIL) is proposed. This algorithm simultaneously performs quadratic phase matched filtering in range and azimuth direction for the data obtained through heterodyne detection with single frequency local oscillator and linear frequency modulation signal light to achieve target image. The SAIL 2D data-collection equation of point target through heterodyne detection with single frequency local oscillator is presented. Imaging process of the algorithm is mathematically analyzed. Imaging resolutions of the algorithm for the SAIL with rectangular and circular apertures are described specifically. Imaging result of simulated SAIL echo data is presented.

Key words remote sensing; synthetic aperture imaging ladar; imaging algorithm; matched filtering; circular aperture; rectangular aperture

OCIS codes 280.6730; 280.3640; 100.3005; 110.2990

1 引言

合成孔径激光成像雷达(SAIL)的原理取之于微波波段合成孔径雷达(SAR),是国外报道的能够在数千公里距离实现厘米量级分辨率的唯一的激光成像观测手段^[1]。自从 2002 年美国海军实验室取得突破性进展^[2]以来,SAIL 先后得到了实验室验证^[3-5]并进行了近距离机载实验^[6-7]。

典型的 SAIL 采用侧视模式对目标发射线性调

频的啁啾脉冲激光,接收到的回波信号与引入的同样为线性调频的啁啾脉冲激光本振激光进行外差探测,在距离向产生与雷达目标等效距离成正比的线性项相位调制,在方位向产生以目标点方位向位置为中心的二次项相位历程^[1]。对于上述回波信号,传统的 SAIL 回波信号成像处理方法为:1)在距离向对快时间进行快速傅里叶变换(FFT)实现距离向聚焦;2)在方位向对慢时间利用共轭相位二次项与

收稿日期:2014-04-23;收到修改稿日期:2014-08-05

基金项目:国家自然科学基金(61377004,61275110)

作者简介:孙志伟(1988—),男,博士研究生,主要从事合成孔径激光成像雷达成像算法、光学成像处理等方面的研究。

E-mail: sunzhiwei@siom.ac.cn

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领域等方面的研究。

E-mail: lirenliu@mail.shnc.ac.cn(中国光学学会会员号:Z019248)

二次项相位历程进行匹配滤波实现方位向聚焦,得到距离向频域,方位向空间域成像输出^[1]。前述文献提出了一种 SAIL 二维傅里叶变换成像算法^[8],即在方位向利用共轭相位二次项对二次项相位历程进行补偿,然后进行二维快速傅里叶变换(FFT2),得到了二维频率域成像输出。当利用频率稳定的本振激光与 SAIL 发射的线性调频的啁啾激光的反射光波进行外差探测时,得到的回波信号的距离向相位为关于快时间的二次项相位,不再是线性相位,因此前述成像算法不再适用。

本文提出了一种 SAIL 二维匹配滤波成像算法,用于对利用频率稳定本振激光外差接收得到的 SAIL 目标回波信号进行成像处理,基本思想为利用与距离向快时间、方位向慢时间的相位二次项的共轭相位二次项与回波信号进行二维匹配滤波,同时实现距离向、方位向聚焦成像。给出了单频本振信号外差接收情况下的单一分辨单元的二维数据收集方程,并对 SAIL 二维匹配滤波成像算法进行了数学描述,具体分析了矩形和圆形天线孔径下的成像分辨率,给出了此算法对模拟 SAIL 回波信号的成像处理结果。

2 二维匹配滤波成像算法

2.1 目标二维数据收集方程

线性调频啁啾激光的目标反射光波与频率稳定的本振激光单个发射脉冲下进行外差探测的信号采样过程如图 1 所示。 t_f 为距离向快时间, $t_f=0$ 为单个发射脉冲的时间起点,信号光与本振光同步发射, τ_{loc}, τ_s 分别为本振光与信号光的延迟时间, $W(t)$ 为单个脉冲内快时间数据采样窗口, t_{start}, t_{stop} 分别为采样起止时间。

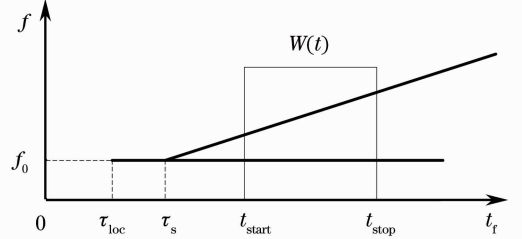


图 1 回波本振外差信号采样过程

Fig. 1 Sampling process of the echo local oscillator heterodyned signal

设定信号光起始频率与本振光频率同为 f_0 ,且初始相位均为 0,经过目标平面上坐标为 (x_k, y_k, z_k) 的单一分辨单元反射后到达雷达平衡接收机光电转换探测面的信号光为^[9]

$$e_{sk}(x_k, y_k; t_f) = E_{sk} \Phi_t(x_k, y_k) \exp \left\{ j2\pi \left[f_0 + \frac{f}{2}(t_f - \tau_k) \right] (t_f - \tau_k) + j\varphi(x_k, y_k) \right\}, \quad (1)$$

式中 E_{sk} 为与目标反射率、雷达结构等有关常数。 $\Phi_t(x_k, y_k)$ 为与雷达发射孔径有关的发射方向性函数, f 为雷达发射激光的频率啁啾率, τ_k 为信号光的双程延迟时间, $\varphi(x_k, y_k)$ 为信号光的双程衍射附加相位^[9]。

$$\varphi(x_k, y_k; x_r, y_r) = \frac{\pi}{\lambda Z/2}(x_k^2 + y_k^2) - \frac{2\pi}{\lambda Z}(x_k x_r + y_k y_r), \quad (2)$$

式中 (x_r, y_r) 为探测器平面坐标, λ 为信号光中心波长, Z 为雷达目标中心距离。探测面上的本振光场为

$$e_{loc}(t_f) = E_{loc} \exp[j2\pi f_0(t_f - \tau_{loc})], \quad (3)$$

式中 E_{loc} 为本振光的振幅。

设定探测器平面孔径函数为 $A_d(x_r, y_r)$,则信号光与本振光的外差信号为

$$I_k(x_k, y_k; t_f) = \iint A_d(x_r, y_r) |e_{sk}(x_k, y_k; t_f) + e_{loc}(t_f)|^2 dx_r dy_r = E_{sk}^2 \Phi_t^2(x_k, y_k) + E_{loc}^2 + 2E_{sk} E_{loc} \Phi_t(x_k, y_k) \Phi_r(x_k, y_k) \cos \left[\pi f t_f^2 - 2\pi f t_f \tau_k + \frac{\pi}{\lambda Z/2}(x_k^2 + y_k^2) \right], \quad (4)$$

其中积分式中略去了无关的常数相位因子。 $\Phi_r(x_k, y_k)$ 为接收孔径方向性函数。

$$\Phi_r(x_k, y_k) = \iint A_d(x_r, y_r) \exp \left[-j \frac{2\pi}{\lambda Z}(x_k x_r + y_k y_r) \right] dx_r dy_r. \quad (5)$$

则条带模式下外差平衡接收与复数化后得到的单点目标二维数据收集方程为

$$i_k(x_k, y_k; t_f, t_s) = A(x_k, y_k) S(x_k, y_k - ut_s) \text{rect} \left(\frac{t_f - T_f/2}{T_f} \right) \exp \left[j\pi f t_f^2 - j2\pi \frac{2(Z + z_k)}{c} f t_f \right] \times \exp \left[j \frac{\pi}{\lambda Z/2} (y_k - ut_s)^2 \right], \quad (6)$$

式中 $A(x_k, y_k)$ 考虑了常数与常数相位项。 v 为雷达方位向运动速度, $T_f = t_{\text{stop}} - t_{\text{start}}$ 为距离向时间采样宽度。 $\tau_k = 2(Z + z_k)/c$, c 为光速。光学足趾函数 $S(x_k, y_k - vt_s) = \Phi_t(x_k, y_k - vt_s)\Phi_r(x_k, y_k - vt_s)$ 。这里值得注意的是当采用单频激光进行外差接收时, 距离向为快时间的二次项相位。

2.2 成像过程

对上述目标回波信号进行二维相位二次项匹配

$$e_k(x_k, y_k; \xi, \eta) = \int_{-\infty-\infty}^{+\infty+\infty} i_k(x_k, y_k; t_t, t_s) i_c(\xi - t_t, \eta - vt_s) dt_t dt_s = B(x_k, y_k; \xi, \eta) \text{sinc}(T_f f \xi) * \delta\left[\xi - \frac{2(Z + z_k)}{c}\right] \mathcal{F}_{vt_s \rightarrow \eta/\lambda F} \{S(x_k, y_k - vt_s)\} * \delta(\eta - y_k), \quad (8)$$

式中 $B(x_k, y_k; \xi, \eta)$ 考虑了常数相位因子与常数。符号 $*$ 代表卷积, \mathcal{F} 代表傅里叶变换。

2.3 成像位置及分辨率

2.3.1 成像位置

由(7)式的第一个脉冲函数 $\delta[\xi - 2(Z + z_k)/c]$ 可得目标点距离向成像位置为

$$\xi_k = \frac{2(Z + z_k)}{c}. \quad (9)$$

由(8)式看出, 经过相位二次项匹配滤波后, 距离向成像坐标为时间域, 距离向成像坐标时域-空域转换关系为

$$\xi = \frac{2(Z + z)}{c}. \quad (10)$$

滤波, 匹配滤波项为距离向、方位向的共轭相位二次项:

$$i_c(t_t, vt_s) = \exp(-j\pi f t_t^2) \exp\left[-j \frac{\pi}{\lambda F} (v_y t_s)^2\right]. \quad (7)$$

设定成像输出面距离向、方位向坐标分别为 ξ , η 。二维成像输出为

将(9)式代入(10)式得到距离向成像空域坐标为 $z = z_k$ 。

由(8)式的第二个脉冲函数 $\delta(\eta - y_k)$ 得目标点方位向成像位置为

$$\eta_k = y_k. \quad (11)$$

2.3.2 矩形孔径成像分辨率

矩形发射孔径为 $D_x \times D_y$, D_x 、 D_y 分别对应距离向与方位向, 为了方便分析, 设定接收孔径与发射孔径相同, 因此考虑了发射光斑和外差接收方向性函数的光学足趾函数^[9]为

$$S_{\text{rec}}(x_k, y_k - vt_s) = \text{sinc}^2\left(\frac{D_x x_k}{\lambda Z}\right) \text{sinc}^2\left[\frac{D_y (y_k - vt_s)}{\lambda Z}\right], \quad (12)$$

光学足趾函数的一维傅里叶变换为

$$\mathcal{F}_{vt_s \rightarrow \eta/\lambda F} \{S_{\text{rec}}(x_k, y_k - vt_s)\} = \frac{\lambda Z}{D_y} \text{sinc}^2\left(\frac{D_x x_k}{\lambda Z}\right) \exp(j2\pi \frac{\eta}{\lambda F} y_k) \text{tri}\left(\frac{2\eta}{D_y}\right). \quad (13)$$

光学足趾函数的一维傅里叶变换决定了方位向成像分辨率, 其中 $\text{tri}(2\eta/D_y)$ 相当于点扩展函数, 因此方位向成像分辨率(零值全宽)为

$$R_a^{\text{rec}} = D_y. \quad (14)$$

距离向成像分辨率取决于(8)式中的点扩展函数 $\text{sinc}(T_f f \xi)$ 的零值全宽, 为

$$R_{\text{rt}}^{\text{rec}} = \frac{2}{T_f f}, \quad (15)$$

上式为时域分辨率, 根据(10)式的时域-空域转换关系, 得距离向空域成像分辨率为

$$R_r^{\text{rec}} = \frac{c}{T_f f}, \quad (16)$$

2.3.3 圆形孔径成像分辨率

圆形发射孔径与矩形发射孔径距离向成像分辨率相同。设定圆形发射孔径直径为 D_{cir} , 圆孔径光学足趾函数^[9]为

$$S_{\text{cir}}(x_k, y_k - vt_s) = \text{somb}^2\left[\frac{D_{\text{cir}} \sqrt{x_k^2 + (y_k - vt_s)^2}}{\lambda Z}\right] = \left\{ \frac{J_1\left[\pi D_{\text{cir}} \sqrt{x_k^2 + (y_k - vt_s)^2}/\lambda Z\right]}{\pi D_{\text{cir}} \sqrt{x_k^2 + (y_k - vt_s)^2}/\lambda Z} \right\}^2. \quad (17)$$

为得到解析式分析, 对上述光学足趾函数进行如下

近似^[8]

$$S_{\text{cir}}(x_k, y_k - \nu t_s) \approx \text{sinc}^2\left(\frac{x_k D_{\text{cir}}}{\lambda Z}\right) \text{sinc}^2\left[\frac{y_k - \nu t_s}{\sqrt{(\lambda Z/D_{\text{cir}})^2 - x_k^2}}\right], \quad (18)$$

上述近似保持了光学足趾函数在 x 轴和 y 轴的准确分布,同时第一级零点具有与宽边帽(somb)函数分布相同的半径 $\lambda Z/D_{\text{cir}}$ 。近似后的光学足趾函数的一维傅里叶变换为

$$\mathcal{F}_{\nu t_s \rightarrow \eta/\lambda F} \{S_{\text{cir}}(x_k, y_k - \nu t_s)\} = \sqrt{(\lambda Z/D_{\text{cir}})^2 - x_k^2} \text{sinc}^2\left(\frac{x_k D_{\text{cir}}}{\lambda Z}\right) \exp\left(j2\pi \frac{\eta}{\lambda F} y_k\right) \times \text{tri}\left[\frac{\eta \sqrt{(\lambda Z/D_{\text{cir}})^2 - x_k^2}}{\lambda F}\right], \quad (19)$$

则方位向成像分辨率(零值全宽)为

$$R_a^{\text{cir}} = \frac{2\lambda F}{\sqrt{(\lambda Z/D_{\text{cir}})^2 - x_k^2}}, \quad (20)$$

由 R_a^{cir} 表达式可以看出,在光学足趾距离向中心线位置即 $x_k = 0$ 处,方位向分辨率达到最高 $R_{\text{amin}}^{\text{cir}} = D_{\text{cir}}$,随着 x_k 绝对值的增加方位向成像分辨率逐渐降低,在光学足趾距离向边缘即 $x_k = \pm \lambda Z/D_{\text{cir}}$ 处, $R_a^{\text{cir}} \rightarrow \infty$,原因为孔径合成积分长度随着 x_k 绝对值的增加而减小。

2.4 距离向采样率

(6)式中的距离向快时间相位为

$$\varphi_k(t_f) = \pi \dot{f}_t^2 - 2\pi \frac{2(Z + z_k)}{c} \dot{f}_t, \quad (21)$$

(21)式对 t_f 求导并除 2π ,得到距离向等效频率:

$$f_k(t_f) = \dot{f}_t - \frac{2(Z + z_k)}{c} \dot{f}, \quad (22)$$

利用探测器进行光电转换过程中,为了保证奈奎斯特采样定律,采样率最小值为 $2|f_k(t_f)|_{\text{max}}$ 。

2.5 成像算法对比分析

合成孔径激光成像雷达(SAIL)的二维匹配滤波成像算法与参考文献[1,8]中的SAIL成像处理算法应用于不同的外差接收体制下得到的回波信号。上述已有的SAIL成像处理算法所适用的为发射激光与本振光同为线性调频的啁啾脉冲信号的情况下外差接收得到的回波信号,此回波信号距离向相位为线性项,通过解线频调的方法实现距离向压缩;而SAIL二维匹配滤波成像算法所适用的回波信号为发射激光为线性调频的啁啾脉冲光,本振激光为单频激光条件下外差接收所得,此回波信号中的距离向相位为二次项,通过相位二次项匹配滤波实现距离向压缩。上述两种外差接收体制在方位向的回波信号相同,方位向相位均为二次项,通过相位

二次项匹配滤波实现压缩。当上述两种外差接收体制下的SAIL的设计参数相同时,应用本文提出的成像算法与上述已有的成像算法的成像结果应当完全相同。当利用光学手段对SAIL回波信号进行成像处理时,由于本文提出的成像算法所适用的SAIL回波信号的距离向、方位向均为二次项相位,因此该算法更适合作为光学成像处理的理论基础对SAIL回波信号通过二维并行光学匹配滤波(如二维菲涅耳衍射等方式)进行成像处理。

3 模拟数据成像处理结果

3.1 数值模拟一

3.1.1 系统参数

设定SAIL搭载平台方位向行进速度为10 m/s,雷达目标中心距离为15 km,雷达发射激光中心波长为1550 nm,频率啁啾率为 6×10^{13} Hz/s,接收、发射矩形孔径均为 $5 \text{ cm} \times 5 \text{ cm}$,光学足趾方位向宽度为930 mm,雷达方位向慢时间采样间隔为0.3 ms,因此,方位向步进间隔为3 ms,方位向单足趾采样点为330,距离向快时间采样宽度为0.1 ms,在满足奈奎斯特采样定律条件下设定采样率为12 GHz,得距离向采样点为 1.2×10^6 。由上述参数得距离向、方位向分辨率(零值全宽)均为5 cm。

3.1.2 成像结果

模拟所用目标四个单一分辨单元,呈正方形四个顶点分布,分辨单元距离向、方位向间距均为10 cm,成像结果如图2(a)所示。图2(b)和(c)分别为成像结果方位向与距离向成像分辨率,由图2(b)、(c)得方位向、距离向分辨率均为5 cm,与理论计算结果相吻合。

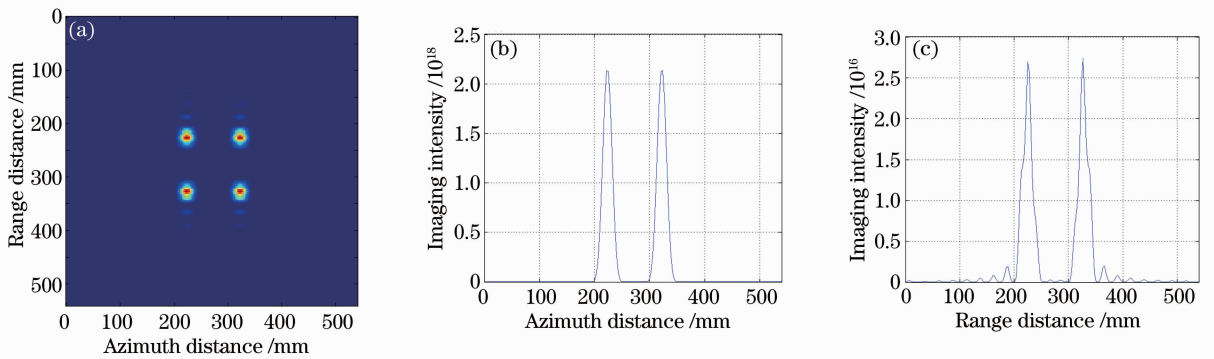


图 2 (a) 目标成像结果; (b) 方位向成像分辨率; (c) 距离向成像分辨率

Fig. 2 (a) Target imaging results; (b) azimuth imaging resolution; (c) range imaging resolution

3.2 数值模拟二

3.2.1 系统参数

设定 SAIL 搭载平台方位向行进速度为 20 m/s, 雷达目标中心距离为 30 km, 雷达发射激光中心波长为 1550 nm, 频率啁啾率为 6×10^{13} Hz/s, 接收、发射矩形孔径均为 $5 \text{ cm} \times 5 \text{ cm}$, 光学足趾方位向宽度为 1860 mm, 雷达方位向慢时间采样间隔为 0.3 ms, 因此, 方位向步进间隔为 6 ms, 方位向单足趾采样点为 330, 距离向快时间采样宽度为 0.1 ms, 在满足

奈奎斯特采样定律条件下设定采样率为 16 GHz, 得距离向采样点为 1.6×10^6 。由上述参数得距离向、方位向分辨率(零值全宽)均为 5 cm。

3.2.2 成像结果

模拟目标单一目标分辨单元。成像结果如图 3 (a) 所示。图 3(b) 和 (c) 分别为成像结果方位向与距离向成像分辨率, 由图 3(b)、(c) 得方位向、距离向分辨率均为 5 cm, 与理论计算结果相吻合。

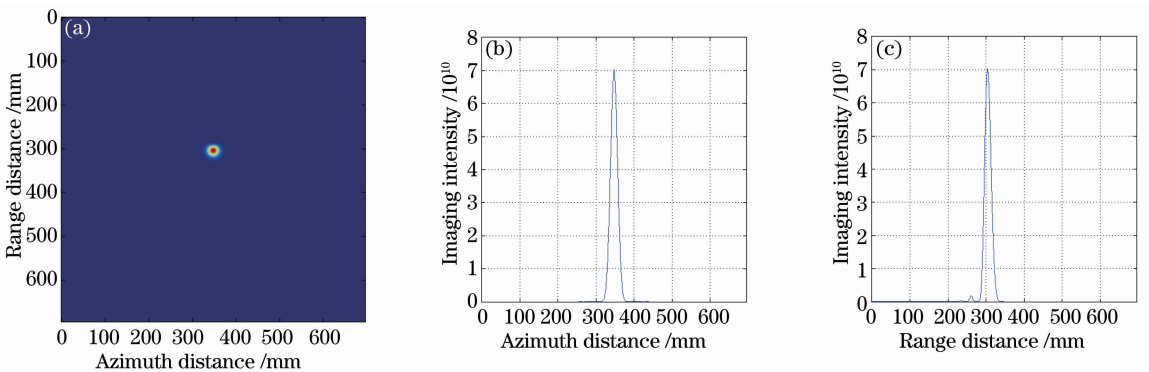


图 3 (a) 目标成像结果; (b) 方位向成像分辨率; (c) 距离向成像分辨率

Fig. 3 (a) Target imaging results; (b) azimuth imaging resolution; (c) range imaging resolution

4 结 论

提出了一种合成孔径激光成像雷达二维匹配滤波成像算法, 用于对采用单频本振光与线性调频信号光进行外差接收所得的回波信号进行成像处理。给出了侧视条带模式下的单点目标二维数据收集方程, 对上述成像算法进行了数学描述, 具体分析了矩形与圆形孔径的成像分辨率。利用此算法对发射、接收口径为 5 cm, 信号光频率啁啾率为 6×10^{13} Hz/s, 观测距离分别为 15 km、30 km 条件下的模拟 SAIL 目标回波信号进行了成像处理, 均得到了与理论分析相符合的结果, 证明了此算法的有效性。

参 考 文 献

- 1 L R Liu. Coherent and incoherent synthetic aperture imaging radars and laboratory-space experimental demonstrations [J]. Appl Opt, 2013, 52(4): 579-599.
- 2 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.
- 3 S M Beck, J R Buck, W F Buell, *et al.*. Synthetic-aperture imaging laser radar: laboratory demonstration and signal processing [J]. Appl Opt, 2005, 44(35): 7621-7629.
- 4 Zhou Yu, Xu Nan, Luan Zhu, *et al.*. 2D imaging experiment of a 2D target in a laboratory-scale synthetic aperture imaging lidar [J]. Acta Optica Sinica, 2009, 29(7): 2030-2032.
周煜, 许楠, 栾竹, 等. 尺度缩小合成孔径激光成像雷达的二维成像实验[J]. 光学学报, 2009, 29(7): 2030-2032.

- 5 Liu Liren, Zhou Yu, Zhi Yanan, *et al.*. A large-aperture synthetic aperture imaging ladar 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.
- 6 J Ricklin, M Dierking, S Fuhrer, *et al.*. Synthetic Aperture Ladar for Tactical Imaging [R]. DAPRA Strategic Technology Office, 2007.
- 7 B Kraus, J Buck, C Ryan, *et al.*. Synthetic aperture ladar flight demonstration [C]. *CLEO: Applications and technology Optical*

- Society of America, 2011. PDPB7.
- 8 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.
- 9 Liu Liren. Synthetic aperture laser imaging ladar (V): Imaging resolution and antenna aperture shape [J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, 29(5): 1408–1415.
刘立人. 合成孔径激光成像雷达(V): 成像分辨率和天线孔径函数[J]. *光学学报*, 2009, 29(5): 1408–1415.

栏目编辑: 张浩佳