

天基合成孔径激光雷达成像理论初步

李丹阳^{1,2}, 吴谨^{1,2*}, 万磊^{1,2}, 王德宾^{1,2}, 吴童^{1,2}

¹中国科学院电子学研究所, 北京 100190;

²中国科学院大学电子电气与通信工程学院, 北京 100049

摘要 合成孔径激光雷达(SAL)具有成像距离远、分辨率高、速度快等特点,在天基空间目标成像领域有重要的应用前景。针对天基 SAL 成像中回波信号弱、噪声大、成像质量差等问题,提出在交会点附近连续长时间观测的思路。基于简单假设,建立采用光学外差探测的天基 SAL 成像理论数学模型,获得回波数据方程,给出成像处理流程、成像分辨率和图像信噪比,数学仿真了不同信噪比下的天基 SAL 空间目标成像。理论分析和仿真成像结果表明:当回波数据信噪比高时,任何子段数据均可形成空间目标的高分辨率图像;当回波信号微弱、数据信噪比低时,采用连续长时间观测数据形成目标子图像,将所有子图像进行叠加,提升了目标图像信噪比,改善了成像质量。

关键词 遥感; 雷达图像; 天基合成孔径激光雷达; 信噪比; 图像叠加

中图分类号 TN958

文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201939.0728002

Elementary Imaging Theory on Space-Borne Synthetic Aperture Ladar

Li Danyang^{1,2}, Wu Jin^{1,2*}, Wan Lei^{1,2}, Wang Debin^{1,2}, Wu Tong^{1,2}

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

²*School of Electronic, Electrical and Communication Engineering, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China*

Abstract Synthetic aperture ladar (SAL) has the characteristics of long imaging distance, high resolution and fast speed, and plays an important role in the field of space-borne imaging. Aiming at the problems of weak return signal, high noise level and poor imaging quality in space-borne SAL imaging, an idea of continuous long-term observation near the intersection point is presented. A mathematical model of space-borne SAL imaging theory is established by using optical heterodyne detection, and the return signal equation and imaging signal-to-noise ratio (SNR) are obtained. The processing flow, image resolution and mathematical simulation of space-borne imaging with different SNR are given. Theoretical analysis and simulation show that when the SNR is high, any sub-data can form a high-resolution image. When the SNR is low, the target sub-image is formed by continuous long-term observation, and the method of combining all sub-images enhances the SNR of the target image and improves the image quality.

Key words remote sensing; radar images; space-borne synthetic aperture ladar; signal-to-noise ratio; combining images

OCIS codes 280.4750; 280.6730; 110.2990

1 引 言

最近十几年,合成孔径激光雷达(SAL)成像技术取得了巨大的进展,国内外均实现了室内^[1-6]、室外(甚至机载)^[7-11]成像实验演示。在太空环境中,由于不存在大气干扰,激光传输过程中波面不会受到破坏,是 SAL 技术应用的理想环境。将 SAL 安装于卫星平台,形成天基 SAL,能以自带光源主动

照明的方式,对其他空间目标进行高分辨率成像。2018年4月,美国空军研究实验室发射了 EAGLE 实验卫星,在地球同步轨道(GEO)上进行天基 SAL 对其他 GEO 目标成像的技术验证^[12],国内也有对相关技术的初步研究^[13]。

在天基环境中, SAL 与被观测空间目标在不同空间轨道上运行,交会点是两者距离最近的位置,天基 SAL 成像观测一般在交会点附近进行。由于目

收稿日期: 2019-01-22; 修回日期: 2019-03-06; 录用日期: 2019-03-21

基金项目: 国家自然科学基金(61178071)

* E-mail: jwu@mail.ie.ac.cn

标距离远、散射截面积小、探测激光功率有限,天基 SAL 一般只能获得微弱的目标回波,图像噪声大,质量差^[14-15]。如何利用天基 SAL 获取高质量目标图像是需要关注的重要问题。

针对天基 SAL 空间目标成像观测问题,本文简要分析了天基 SAL 成像方式,建立了交会点附近连续观测的直线运动模型;探讨了回波数据的天基 SAL 成像处理方法,给出了成像分辨率和信噪比;以 GEO 空间目标为例对天基 SAL 成像进行了仿真成像。

2 天基 SAL 数据获取

在天基 SAL 系统中,天基 SAL(SPBSAL)与被观测空间目标分别沿各自的轨道绕地球运动,该系统一般具有轨道相对固定、速度稳定、外界扰动小等特点,如图 1 所示。由于轨道不同,天基 SAL 与被观测空间目标之间存在稳定的相对运动,满足天基 SAL 成像所需的相对运动条件。

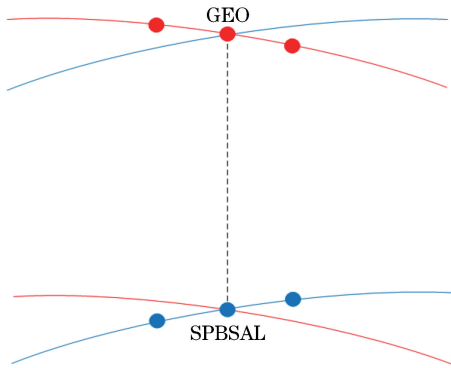


图 1 天基 SAL 与被观测空间目标运行轨道

Fig. 1 Orbit of space-borne SAL and observed space target

天基 SAL 与空间目标之间的相对距离随时间而变,距离最近的位置称为交会点,成像观测一般在交会点附近进行。因此,天基 SAL 数据获取的合理方式如下:利用天基平台的跟踪装置获得被观测空间目标的位置数据,在快接近交会点时,天基 SAL 持续发射激光脉冲照明目标,同时接收来自目标的散射回波。从发射激光到接收回波的过程一直持续到越过交会点一定距离后才停止。通过对所有的目标散射回波进行数学处理,反演生成高分辨率目标图像。

由于天基 SAL 与被观测空间目标两者的运动轨道半径很大,远远大于两者交会点的相对距离,因此,在交会点附近一段观测时间内,天基 SAL 与被观测空间目标之间的相对运动关系可以近似为匀速

直线运动,如图 2 所示。图中, L_{sa} 为合成孔径长度。这里只考虑相对运动,假设目标静止,雷达在交会点附近的范围(D)内作匀速直线运动(V),持续照明目标,获取回波数据。这是典型的天基 SAL 聚束模式成像^[16],可以通过天基 SAL 成像的处理方式处理数据。

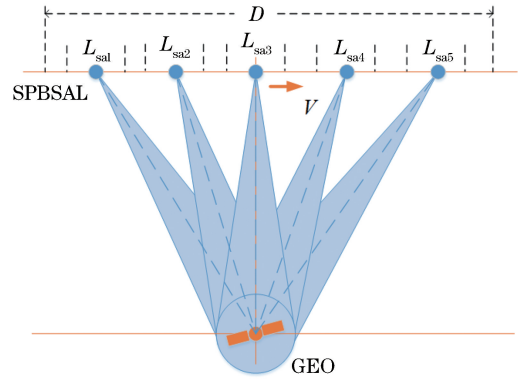


图 2 天基 SAL 数据获取示意图

Fig. 2 Schematic of space-borne SAL data acquisition

3 天基 SAL 成像

3.1 回波数据方程

一般来说,天基 SAL 目标回波数据的收集时间远长于形成单幅目标图像所需要的合成孔径时间,因此,全部回波数据可以按合成孔径时间 $T_{sa} = L_{sa}/V$ 分割为许多子段数据(图 2),每个子段数据都可以独立形成一幅目标图像。对于每个子段回波数据,不失一般性,应该按斜视成像处理,如图 3 所示。

在图 3 的坐标系中,主坐标系为 XOZ ,目标坐标系为 $X_0O_0Z_0$ 。其中, Z 轴与 Z_0 轴重合,是天基 SAL 与被观测目标交会点连线;两个坐标系原点的距离为 $L_0 = \overline{OO_0}$,表示天基 SAL 与被观测目标交会点距离;天基 SAL 以速度 V 沿 X 轴运动。

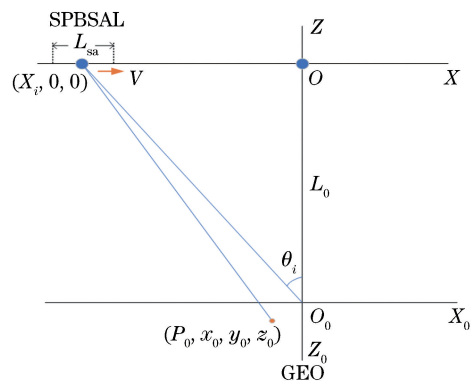


图 3 天基 SAL 系统坐标系

Fig. 3 Coordinate system of space-borne SAL

当天基 SAL 位于第 i 个方位采样位置 $(X_i, 0, 0)$ 时, 瞬时斜视角 θ_i 与瞬时斜距 R_i 的关系可表示为

$$\begin{cases} \tan \theta_i = \frac{X_i}{L_0} \\ R_i = \sqrt{L_0^2 + X_i^2} \end{cases} \quad (1)$$

若在全部数据收集过程中, 天基 SAL 从 $(-\frac{D}{2}, 0, 0)$ 位置开始, 经过交会点, 运动到 $(\frac{D}{2}, 0, 0)$ 位置, 则对应的瞬时斜视角范围为 $-\arctan \frac{D}{2L_0} \leq \theta_i \leq \arctan \frac{D}{2L_0}$ 。空间目标上任意一点 $P_0(x_0, y_0, z_0)$ (假设目标为平面目标, $Y_0 = 0$) 与天基 SAL 之间的距离关系可表示为

$$L(X_i; P_0) = \sqrt{(X_i - x_0)^2 + (L_0 + z_0)^2} \quad (2)$$

假设探测激光为简单的线性调频波 E_s , 表示为

$$E_s(t) = E_s \exp \left\{ -j \left[2\pi \left(f_0 t + \frac{1}{2} k \cdot t^2 \right) + \varphi_0 \right] \right\}, \quad t \in [0, \tau_{\text{pul}}], \quad (3)$$

式中, E_s 为振幅, f_0 为载波频率, k 为调频率, φ_0 为初相位, τ_{pul} 为脉冲宽度。外差探测用的本征光来源

于探测光, 表示为

$$E_L(t) = E_L \exp \left\{ -j \left\{ 2\pi \left[f_0 \cdot (t - t_0) + \frac{1}{2} k \cdot (t - t_0)^2 \right] + \varphi_0 \right\} \right\}, \quad t - t_0 \in [0, \tau_{\text{pul}}], \quad (4)$$

式中, E_L 为本征信号振幅, t_0 为参考延迟。则天基 SAL 在方位采样位置 $(X_i, 0, 0)$ 所得到的全部目标回波可表示为

$$U(X_i, t) = A_0 \cdot \sum_{P_0} T(X_0, Z_0) \cdot \exp \left\{ -j 2\pi \left\{ f_0 \left[t - \frac{2L(X_i; P_0)}{c} \right] + \frac{1}{2} k \left[t - \frac{2L(X_i; P_0)}{c} \right]^2 \right\} \right\}, \quad t \in [0, \tau_R], \quad (5)$$

式中, c 为光速, $T(x_0, z_0)$ 为目标点 $P_0(x_0, 0, z_0)$ 的散射系数, τ_R 为目标散射回波信号长度, A_0 为与激光散射角等有关的常数^[17]。天基 SAL 成像依赖回波信号的相位, 一般需要采用双通道外差探测, 这样, 在方位采样位置 $(X_i, 0, 0)$ 所得到的同相通道外差信号 (i_1) 与正交通道外差信号 (i_Q), 可表示为

$$\begin{cases} i_1(X_i, t_k) = \frac{\eta_d q_e}{h\nu} \int_{\text{area}} \frac{1}{2} \left| \frac{1}{\sqrt{2}} (E_s + E_L) \right|^2 d\sigma \approx \frac{\eta_d q_e}{4h\nu} \cdot |U(X_i, t_k) + E_L(t_k)|^2 \cdot \sigma_{\text{det}} \\ i_Q(X_i, t_k) = \frac{\eta_d q_e}{h\nu} \int_{\text{area}} \frac{1}{2} \left| \frac{1}{\sqrt{2}} (E_s + j \cdot E_L) \right|^2 d\sigma \approx \frac{\eta_d q_e}{4h\nu} \cdot |U(X_i, t_k) + j \cdot E_L(t_k)|^2 \cdot \sigma_{\text{det}} \end{cases}, \quad t_k \in [0, \tau_h], \quad (6)$$

式中: η_d 为外差探测器的量子效率; q_e 为电子电荷; h 为普朗克常数; ν 为探测光频率; σ_{det} 为光敏面积; t_k 为时间变量 (表示快时间变量), 其范围为 $[0, \tau_h]$, $\tau_h \leq \tau_{\text{pul}}$ 为有效外差信号长度。由信号幅度均值 \bar{E} 与平均光子数 N 的关系^[18] 可得本征信号光子数 N_L 与回波信号光子数 N_S , 表示为

$$\begin{cases} N_L = \frac{1}{2h\nu} \sigma_{\text{det}} \tau_h \cdot E_L^2 \\ N_S = \frac{1}{2h\nu} \sigma_{\text{det}} \tau_h \cdot A_0^2 \end{cases} \quad (7)$$

考虑到微弱回波近似, 即 $N_S \ll N_L$, 引入一个外差混频效率因子 η_{mix} , 则利用正交解调外差信号构建相位提取复信号为

$$i(X_i, t_k) = i_1(X_i, t_k) + j \cdot i_Q(X_i, t_k) = \frac{\eta_d q_e}{2\tau_h} \cdot \left\{ N_L (1 + j) + 2 \cdot \sqrt{\eta_{\text{mix}} N_L N_S} \cdot \sum_{P_0} T(x_0, z_0) \exp \left\{ j 2\pi \left\{ f_0 \left[t_0 - \frac{2L(X_i; P_0)}{c} \right] + \frac{1}{2} k \left[t_0 - \frac{2L(X_i; P_0)}{c} \right]^2 \right\} \right\} \right\}, \quad t_k \in [0, \tau_h]. \quad (8)$$

(8) 式中包含一个直流项和一个交流项, 其中交流项是成像所需要的数据。通过对该数据进行处

理, 可得到目标的高分辨率图像。

3.2 天基 SAL 成像数据处理

对于第 p 子段数据, 设其方位位置中心坐标为 $(X_p, 0, 0)$, 则该子段内任何一个方位位置可表示为

$$X_i = X_p + v \cdot t_i = R_p \sin \theta_p + v(t_m + t_k),$$

$$t_m \in \left[-\frac{T_{sa}}{2}, \frac{T_{sa}}{2}\right], t_k \in [0, \tau_h], \quad (9)$$

式中, t_i 为全时间, t_m 为慢时间, t_k 为快时间, R_p 为子段数据的中心斜距, θ_p 为斜视角。目标点 P_0 与雷达之间的距离为

$$L(t_m, t_k; P_0) = \sqrt{(R_p \sin \theta_p + Vt - x_0)^2 + (R_p \cos \theta_p + z_0)^2} \approx R_p + (Vt - x_0) \cdot \sin \theta_p + \cos \theta_p \cdot z_0 +$$

$$\frac{[(Vt - x_0) \cdot \cos \theta_p - z_0 \cdot \sin \theta_p]^2}{2R_p}. \quad (10)$$

将(10)式代入(8)式, 即可得到该子段成像数据方程的具体表达式。

对于斜视天基 SAL 成像处理, 前人提出了很多有效算法, 例如, 逆 Chirp-Z 变换算法、级数反演法等。与正侧视相比, 斜视条件下的天基 SAL 成像算法要复杂得多, 需要进行距离走动校正、距离弯曲校正以及二次距离压缩。针对得到的数据方程, 采用参考文献[19-20]给出的成像算法, 其处理流程如图 4 所示。

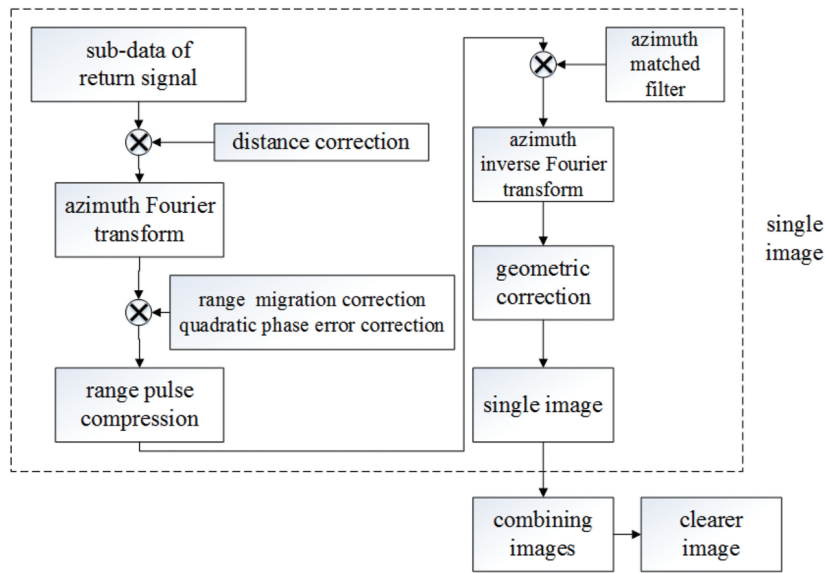


图 4 天基 SAL 成像处理算法流程图

Fig. 4 Flow chart of space-borne SAL imaging algorithm

图 4 中, 虚线框内是子段数据天基 SAL 成像处理流程图。由于斜视(即 $\theta_p \neq 0$)所形成的子图像存在几何形变, 需要一个几何形变校正的步骤。在斜视角为 θ_p 时, 未经几何形变校正的天基 SAL 图像成像位置为

$$\begin{cases} X = -x_0 - z_0 \tan \theta_p = -x_0 - \Delta X \\ Y = z_0 \cos \theta_p + x_0 \sin \theta_p = z_0 \cos \theta_p + \Delta Y \end{cases} \quad (11)$$

可见图像在不同方向上都发生了形变, 由(11)式可知需要校正的形变为 $(\Delta X, \Delta Y)$ 。聚焦后图像方位向分辨率 ρ_{x_0} 和距离向分辨率 ρ_{z_0} 可表示为

$$\begin{cases} \rho_{x_0} = \frac{\lambda}{2L_{sa} \cos^2 \theta_p} R_p = \frac{\lambda L_0}{2L_{sa} \cos^3 \theta_p} \\ \rho_{z_0} = \frac{c}{2k \cdot \tau_h} = \frac{c}{2B} \end{cases}, \quad (12)$$

式中, B 为信号带宽。当 $\theta_p = 0$ 时, 正视条件下方位

向分辨率 $\rho_{x_0} = \frac{\lambda_0 L_0}{2L_{sa}}$, 方位向分辨率会随斜视角增大而变大。图 5 给出了方位向分辨率随斜视角变化的曲线图, 其中横坐标为斜视角, 纵坐标为方位向

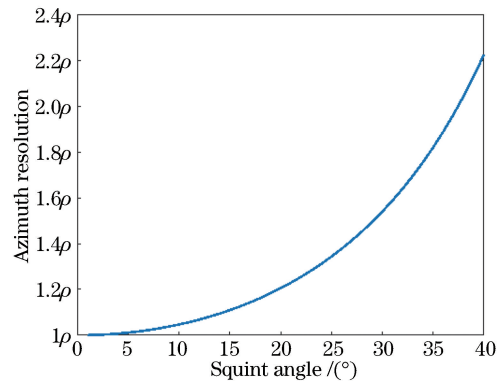


图 5 方位向分辨率变化曲线

Fig. 5 Azimuth resolution graph

分辨率。在一次成像过程中,要求在不同斜视角度条件下得到的图像有近似相同的方位向分辨率。若要求方位向分辨率的变化不超过 1.1ρ ,则选取的斜视角 θ_p 最大值应小于 14° 。

经过校正后各个子段数据均能形成高分辨率目标图像。但是,在天基 SAL 成像中,由于天基 SAL 与目标之间距离较远等,目标外差回波数据噪声很大,单个子段数据形成的天基 SAL 图像往往质量很差。进一步可以将所有子图像叠加,增强信噪比,形成清晰的目标图像。

3.3 天基 SAL 成像信噪比

在天基 SAL 成像中,信噪比通过计算子图像的信噪比获得。对每一幅子图像的形成,方位向存在的相位误差可以通过相位梯度自聚焦算法(PGA)完全消除,因此方位向聚焦处理不会对子图像的信噪比产生影响,子图像的信噪比仅由单脉冲的信噪比决定。

子图像的信噪比可通过光电流方程(8)式求得^[18,21]。详细的信噪比推导方法和过程可参考文献[21],这里仅给出结果:

$$R_{SN-single} = \frac{N_s T^2(x_0, z_0)}{\left[\frac{\eta_d N_L + (\eta_d N_L)^2 + 2\eta_d^3 \eta_{mix} N_s N_L^2 T^2(x_0, z_0) + 4\eta_d^2 \eta_{mix} N_s N_L T^2(x_0, z_0) + \eta_d^4 \eta_{mix}^2 N_s^2 N_L^2 T^4(x_0, z_0)}{\eta_d^4 \eta_{mix}^2 N_L^2} \right]^{\frac{1}{2}}} \quad (13)$$

(13)式为在微弱回波条件下,一个子段数据形成的天基 SAL 图像信噪比。这个表达式相当复杂,表明子图像信噪比与诸多因素有关。考虑到 $N_L \gg 1$, (13)式可以进一步近似为

$$R_{SN-single} \approx \frac{\eta_d \eta_{mix} N_s T^2(x_0, z_0)}{1 + \eta_d \eta_{mix} N_s T^2(x_0, z_0)} \quad (14)$$

式中,分子项 $\eta_d \eta_{mix} N_s T^2(x_0, z_0)$ 表示全部回波信号中实际参与外差混频的有效信号光子数。特别地,当 $T(x_0, z_0) = 1$ 时, (14)式可以写为

$$R_{SN-single} = \frac{N_s}{N_s + \frac{1}{\eta_d \eta_{mix}}} \quad (15)$$

即文献[18]中给出的表达式。图 6 给出了(15)式所描述的子图像信噪比随回波信号平均光子数 N_s 的变化曲线(假设 $\eta_d = \eta_{mix} = 1$)。

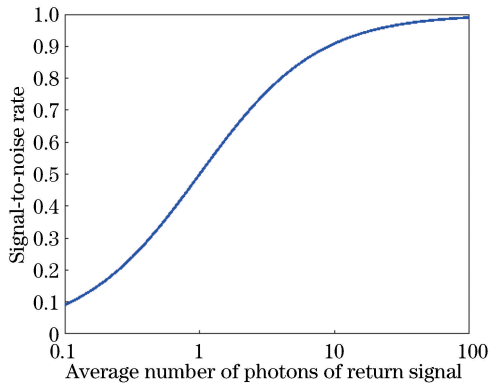


图 6 由(15)式得到的信噪比曲线

Fig. 6 SNR curves computed from Eq. 15

可知,当 $N_s \gg \frac{1}{\eta_d \eta_{mix}}$, $R_{SN-single} \approx 1$ 时,继续增大

N_s ,也不会使 $R_{SN-single}$ 大于 1,这是由于该信噪比模型仅为光子受限的情形,且散斑噪声为回波信号中的主要噪声来源^[18]。当 $N_s = \frac{1}{\eta_d \eta_{mix}}$ 时, $R_{SN-single} = 0.5$,此时进一步提升 N_s ,对于信噪比的改善效果会逐渐降低。

如果考虑将 P 幅独立的子图像进行叠加平均,叠加后的图像信噪比可以写为

$$R_{SN-sup} = \sqrt{P} \cdot R_{SN-single} \quad (16)$$

(16)式表明,将 P 幅图像叠加可以将图像的信噪比提高约 \sqrt{P} 倍。在单幅图像信噪比较低的情况下,这种做法对图像信噪比的提升比较有限,例如,当单幅图像信噪比 $R_{SN-single} = 0.3$ 时,将 100 幅图像叠加,只将信噪比提高到 3,这说明通过图像叠加提升弱回波信号条件下图像的信噪比,往往需要大量的图像。

在天基 SAL 的成像过程中,一次交会的数据获取,可以得到数千幅目标子图像。若能控制系统设计,使子图像信噪比接近 1,通过这些子图像叠加,可以更有效地提升信噪比,获得清晰度更高的目标图像。

4 仿真计算

对 GEO 目标和天基 SAL 成像进行仿真。假设天基 SAL 与 GEO 目标运动方向相同,轨道平面重合,外差混频效率、探测器量子效率、目标反射系数均为 1,其他数据见表 1。

表 1 仿真基本参数

Table 1 Basic parameters of simulation

Parameter	Value
Orbit radius of space-borne SAL R_1 /km	41978
Orbit radius of GEO target R_2 /km	42178
Wavelength λ /nm	1550
Bandwidth B /GHz	3
Pulse width $\tau_{\text{pul}}/\mu\text{s}$	10
Range of squint angle $\theta_p/(\circ)$	-5 to 5

根据表 1 的数据,天基 SAL 与 GEO 目标的相对运动速度为

$$V = \sqrt{g \cdot M_e} \left(\frac{1}{\sqrt{R_1}} - \frac{1}{\sqrt{R_2}} \right) = 7.31 (\text{m} \cdot \text{s}^{-1}), \quad (17)$$

式中,万有引力常数 $g = 6.63 \times 10^{-11} \text{ m}^3 \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{s}^{-2}$, 地球质量 $M_e = 5.965 \times 10^{24} \text{ kg}$ 。

天基 SAL 运动相对 GEO 目标运动直线距离为 $D = 2L_0 \cdot \tan 5^\circ = 2 \times 200 \times 10^3 \times \tan 5^\circ \approx 35(\text{km})$ 。

根据 5 cm 成像分辨率要求 ($\rho_{x_0} = \rho_{z_0} = 5 \text{ cm}$),

方位向合成孔径长度为

$$L_{\text{sa}} = \frac{\lambda_0}{2\rho_{x_0}} \cdot L_0 = \frac{1.55 \times 10^{-6}}{2 \times 5 \times 10^{-2}} \times 200 \times 10^3 = 3.1(\text{m}), \quad (19)$$

则全部数据可以形成目标的子图像数为

$$P = \frac{D}{L_{\text{sa}}} = \frac{35 \times 10^3}{3.1} \approx 11290. \quad (20)$$

理论上全部子图像的叠加形成的图像信噪比是单幅子图像的 106 倍,因此图像信噪比可以得到极大的改善。

图 7 为高信噪比天基 SAL 子图像仿真结果。其中,图 7(a)为设置的卫星目标;图 7(b)为交会点位置(斜视角为 0°)天基 SAL 子图像;图 7(c)和 7(d)分别为斜视角 5° 和 -5° 时未进行几何校正的天基 SAL 子图像;图 7(e)和 7(f)分别为经过几何校正后的天基 SAL 子图像。可以看出,未经几何校正前,图 7(c)和 7(d)子图像均有不同程度的几何形变,经过几何校正后,图 7(e)和 7(f)的天基 SAL 子图像与交会点天基 SAL 子图像图 7(b)完全相同。因此,采用天基 SAL 成像处理,在一定的斜视范围内,可以形成同样的目标子图像。

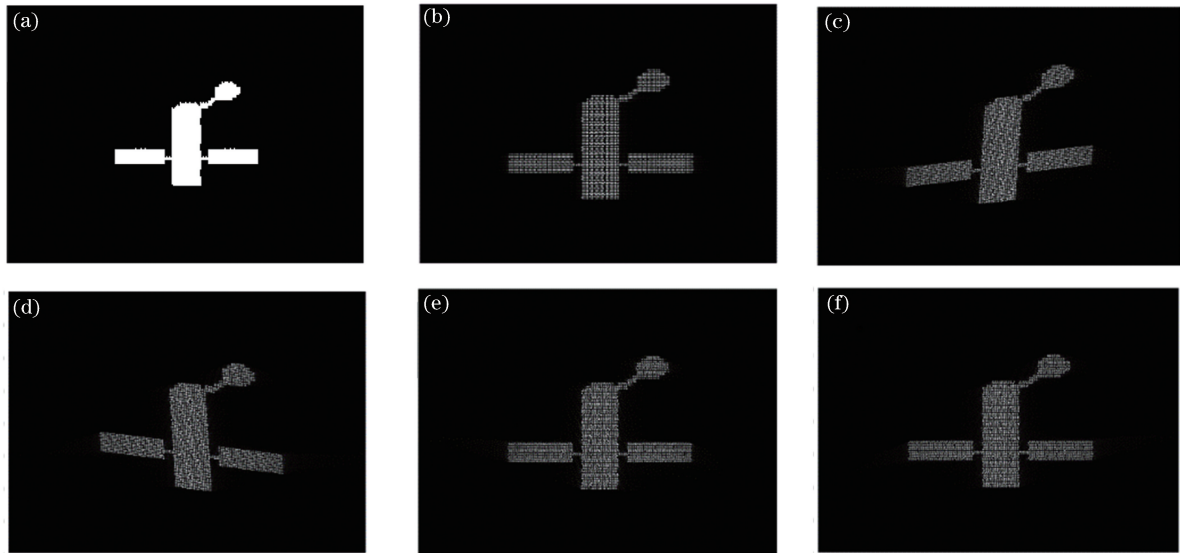


图 7 斜视下天基 SAL 成像结果。(a)目标图像;(b)斜视角为 0° ;(c)斜视角为 5° ;
(d)斜视角为 -5° ;(e)(c)校正后的图像;(f)(d)校正后的图像

Fig. 7 Space-borne SAL imaging with squint angle. (a) Target; (b) squint angle is 0° ; (c) squint angle is 5° ;
(d) squint angle is -5° ; (e) corrected image of (c); (f) corrected image of (d)

图 8 为光子受限条件下的天基 SAL 成像仿真结果。假设 $N_s = 0.5$,对应的单幅子图像 $R_{\text{SN-single}} \approx 0.3$ 。图 8(a)为交会点天基 SAL 子图像;图 8(b)为 $-5^\circ \sim 5^\circ$ 范围内的全部天基 SAL 子图像分别经过几何校正后进行叠加后的图像。可以看出,单幅天

基 SAL 子图像中,目标图像完全淹没在噪声中,无法分辨;经过叠加后的天基 SAL 图像,信噪比提升了约 106 倍,达到 $R_{\text{SN-sup}} \approx 32$,图像质量得到了极大的改善,目标轮廓清晰可辨。可以看出,对于 GEO 目标的天基 SAL 观测,若在交会点附近长时

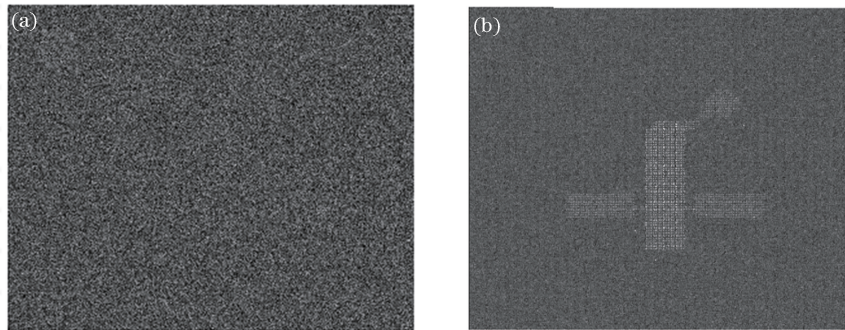


图 8 弱回波条件下的天基 SAL 成像。(a)信噪比为 0.3;(b)叠加处理后的图像

Fig. 8 Space-borne SAL imaging of weak return signal. (a) SNR is 0.3; (b) image after superposition

间收集目标回波数据,不论回波数据信噪比高还是低,理论上,均能形成高分辨率、高信噪比目标图像。

5 结 论

针对天基 SAL 成像问题,探讨了交会点附近连续长时间收集目标数据的成像观测方式。以匀速直线运动为近似观测模型,建立了基于光学外差探测的回波数据收集方程,给出合成孔径处理流程、图像分辨率和信噪比。成像仿真结果表明,当回波数据信噪比较高时,任何一个合成孔径长度的子段回波数据均能得到目标的高清晰图像;当回波信号弱、信噪比较低时,可以通过分段处理数据、多幅子图像叠加的方法提高图像信噪比,改善成像质量。

当然,在实际观测中,天基平台与被观测空间目标往往分别沿各自的椭圆轨道运动,交会点附近的相对运动不能简单地等效为匀速直线运动,更精确的成像计算必须考虑具体的轨道运动。这是下一步需要深入研究的问题。

参 考 文 献

- [1] 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.
- [2] 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.
- [3] Crouch S, Barber Z W. Laboratory demonstrations of interferometric and spotlight synthetic aperture lidar techniques [J]. *Optics Express*, 2012, 20(22): 24237-24246.
- [4] Turbide S, Marchese L, Bergeron A, *et al.* Synthetic aperture lidar based on a MOPAW laser [J]. *Proceedings of SPIE*, 2016, 10005: 1000502.
- [5] Zhao Z L, Wu J, Su Y Y, *et al.* Three-dimensional imaging interferometric synthetic aperture lidar [J]. *Chinese Optics Letters*, 2014, 12(9): 091101.
- [6] Wu J, Zhao Z L, Wu S D, *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 高分辨率合成孔径激光雷达成像 [J]. *光学学报*, 2015, 35(12): 1228002.
- [7] Wang N, Wang R, Li G Z, *et al.* Experiment of inverse synthetic aperture lidar at 1.1 km [J]. *Proceedings of SPIE*, 2016, 10155: 101551G.
- [8] Li G Z, Mo D, Wang N, *et al.* A novel coherent lidar system with high repetition frequency and wide bandwidth [J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2018, 40(3): 525-531. 李光祚, 默迪, 王宁, 等. 一种新的高重频宽带相干激光雷达系统研究 [J]. *电子与信息学报*, 2018, 40(3): 525-531.
- [9] Krause B W, Buck J, Ryan C, *et al.* Synthetic aperture lidar flight demonstration [C]// *Applications and Technology 2011*, May 1-6, 2011, Baltimore, MD, USA. Washington, D. C.: OSA, 2011: PDPB7.
- [10] Li G Z, Wang N, Wang R, *et al.* Imaging method for airborne SAL data [J]. *Electronics Letters*, 2017, 53(5): 351-353.
- [11] Lu Z Y, Zhou Y, Sun J F, *et al.* Airborne down-looking synthetic aperture imaging lidar field experiment and its flight testing [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2017, 44(1): 0110001. 卢智勇, 周煜, 孙建峰, 等. 机载直视合成孔径激光成像雷达外场及飞行实验 [J]. *中国激光*, 2017, 44(1): 0110001.
- [12] Space Flight. EAGLE-ESPA augmented geostationary laboratory experiment [OL]. [2019-01-10]. <http://spaceflight101.com/afspc-11/eagle/>.
- [13] Hu X, Li D J. Space-based synthetic aperture LiDAR

- system with 10 m diffractive aperture [J]. Chinese Journal of Lasers, 2018, 45(12): 1210002.
- 胡焯, 李道京. 10 m 衍射口径天基合成孔径激光雷达系统 [J]. 中国激光, 2018, 45(12): 1210002.
- [14] Barber Z W, Dahl J R. Synthetic aperture ladar imaging demonstrations and information at very low return levels [J]. Applied Optics, 2014, 53 (24): 5531-5537.
- [15] Trahan R, Nemati B, Zhou H, *et al.* Low-CNR inverse synthetic aperture LADAR imaging demonstration with atmospheric turbulence [J]. Proceedings of SPIE, 2016, 9846: 98460E.
- [16] Wu S D, Huang J Y, Zhao Z L, *et al.* Experimental demonstration of spotlight mode synthetic aperture ladar [J]. Acta Optica Sinica, 2016, 36 (6): 0628001.
- 吴曙东, 黄建余, 赵志龙, 等. 聚束模式合成孔径激光雷达实验演示 [J]. 光学学报, 2016, 36 (6): 0628001.
- [17] Jelalian A V. Laser radar systems [M]. London: Artech House, 1992: 9.
- [18] Lucke R L, Rickard L J. Photon-limited synthetic-aperture imaging for planet surface studies [J]. Applied Optics, 2002, 41(24): 5084-5095.
- [19] Liang Y, Wang H X, Xing M D, *et al.* Imaging study of high squint SAR based on FMCW [J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2009, 31(4): 776-780.
- 梁毅, 王虹现, 邢孟道, 等. 基于 FMCW 的大斜视 SAR 成像研究 [J]. 电子与信息学报, 2009, 31(4): 776-780.
- [20] Liang Y, Zhang Q, Yang Q, *et al.* High squint imaging method for missile-borne FMCW SAR [J]. Chinese Journal of Radio Science, 2014, 29 (6): 1115-1121.
- 梁颖, 张群, 杨秋, 等. 弹载调频连续波合成孔径雷达大斜视成像方法研究 [J]. 电波科学学报, 2014, 29(6): 1115-1121.
- [21] Pellizzari C, Matson C, Gudimetla R. Inverse synthetic aperture LADAR for geosynchronous space objects-signal-to-noise analysis [C]//The Advanced Maui Optical and Space Surveillance Technologies Conference, September 13-16, 2011, Maui, Hawaii. [S.l.: s.n.], 2011.