

机载合成孔径激光雷达相位误差补偿研究

鲁天安 李洪平

中国海洋大学信息科学与工程学院, 山东 青岛 266100

摘要 为了研究大气湍流对合成孔径激光雷达(SAL)成像的影响,基于 Monte-Carlo 随机因子,对满足 Kolmogorov 统计规律的大气湍流相位屏进行数值模拟,计算了不同湍流、不同波长情况下的机载 SAL 成像结果,数值分析了不同斜距、不同波长条件下合成孔径长度与大气相干长度比值随大气湍流强度的变化关系。结果表明大气湍流效应严重影响了 SAL 的方位向成像,随着湍流强度的增大,SAL 图像散焦越来越严重,直至目标无法分辨。同一湍流强度下,光束波长越长,SAL 成像效果越好。对于湍流效应造成的 SAL 图像失真,采用改进的秩一相位误差估计(IROPE)法对 SAL 图像进行补偿,当大气相干长度大于实孔径长度时,IROPE 算法能够有效改善图像的聚焦效果,提升 SAL 成像分辨率。

关键词 大气光学;合成孔径激光雷达;相位屏;秩一相位误差估计法

中图分类号 TN249 **文献标识码** A

doi: 10.3788/AOS201535.0801002

Phase Error Compensation in Airborne Synthetic Aperture Lidar Data Processing

Lu Tianan Li Hongping

College of Information Science and Engineering, Ocean University of China, Qingdao, Shandong 266100, China

Abstract In order to study the influence of atmospheric turbulence on the image of synthetic aperture lidar (SAL), based on Monte-Carlo random factor, numerical simulation of phase screens following the Kolmogorov spectrum is introduced. The SAL images with different turbulence and different wavelengths are calculated. Additionally, with different wavelengths and slant ranges, the relations of turbulence intensity and the ratio of synthetic aperture length to atmospheric coherent length are analyzed. The results show that the atmospheric turbulence can severely affect the azimuth resolution of the SAL image. With the increase of turbulence intensity, SAL imaging defocus is becoming more and more serious, and eventually the target can not be distinguished. With the same turbulence intensity, when the beam wavelength is longer, the SAL image quality is better. For the distortion of SAL image caused by turbulence effect, improved rank one phase error estimation (IROPE) method is used to compensate the phase errors. When the atmospheric coherent length is greater than the real aperture length, IROPE method can effectively improve the focusing effect of images and increase the imaging resolution.

Key words atmospheric optics; synthetic aperture lidar; phase screen; rank one phase error estimation

OCIS codes 010.1290; 100.3020; 280.4788

1 引言

合成孔径激光雷达(SAL)是一种以激光器为辐射源的光学成像雷达,由于激光信号波长更短且传播频率更高,对于相对运动速度相同的目标可以产生更大的多普勒频移,所以在成像分辨率及成像时间上,相比合成孔径雷达(SAR)具有显著优势,并且其克服了普通激光成像雷达扫描波束窄、探测区域小等缺点,能够实现特定区域的精确成像,成为了近年来的研究热点^[1-5]。影响 SAL 成像的环境因素主要有大气吸收、大气湍流

收稿日期:2015-01-14;收到修改稿日期:2015-03-25

基金项目:国家自然科学基金(41275013)

作者简介:鲁天安(1985—),男,博士研究生,主要从事合成孔径激光雷达方面的研究。E-mail:lutianan@hotmail.com

导师简介:李洪平(1966—),男,教授,博士生导师,主要从事合成孔径激光雷达成像算法和高性能并行计算等方面的研究。E-mail:lhq@ouc.edu.cn (通信联系人)

等,其中大气湍流引起的折射率起伏及大气密度变化可导致激光光束波前产生畸变,进而破坏光束的相干性,使得激光雷达无法精确成像。

对于大气湍流对 SAL 成像的影响, Karr^[6]理论推导了聚束模式下,大气湍流对 SAL 成像分辨率的影响; Lucke^[7]基于相位屏方法模拟了大气湍流对一维 SAL 成像质量的影响; Hua 等^[8]数值模拟了大气湍流背景下,相位补偿方法在改善 SAL 成像质量上的作用;戴品娟等^[9]利用相位屏法对大气湍流造成的 SAL 图像失真进行了数值模拟,随后采用相位梯度自聚焦(PGA)算法对 SAL 图像进行方位向补偿,改善了图像的聚焦效果;韦宏艳等^[10]基于 Kolmogorov 湍流谱模型,推导了大气湍流中激光光束斜程传输时接收机处波束的对数振幅方差,并进一步仿真了激光反射回波闪烁效应对未经滤波 SAL 成像的影响。以上的研究表明,采用合适的方法能够在一定程度上降低大气湍流对 SAL 成像的影响,考虑到大气湍流对 SAL 成像系统的影响是无法避免的,所以有关工作还值得进一步探讨。

本文根据大气湍流的连续及随机特性,基于 Kolmogorov 湍流谱,利用 Monte-Carlo 随机因子经数据元随机扩张生成了多层大气湍流随机相位屏,计算了不同强度湍流和不同光束波长情况下的 SAL 系统的成像质量,并探讨了采用改进的秩一相位误差估计自聚焦算法补偿大气湍流造成的回波相位误差,从而改善 SAL 系统的成像效果。

2 大气湍流随机相位屏

相位屏方法模拟大气湍流的核心思想是,将光束传输路径中湍流对光波的影响近似模拟成一组薄屏进行的相位调制,从而模拟湍流对 SAL 信号的扰动作用^[11]。大气湍流中的光波波前可由相位结构函数表示:

$$D(r_1, r_2) = \left\langle [\varphi(r_1) - \varphi(r_2)]^2 \right\rangle, \quad (1)$$

式中 $\varphi(r_1)$ 和 $\varphi(r_2)$ 分别表示 r_1 和 r_2 的相位, $\langle \cdot \rangle$ 表示定义域内取均值。根据 Kolmogorov 湍流理论,大气湍流可视为局部均匀各向同性,所以在光波传输路径中,湍流强度可认为是均匀不变的。此时,平面波相位结构函数可以表示为

$$D(r) = 8\pi^2 k^2 Z \int_0^\infty \Phi_n(K) [1 - J_0(Kr)] K dK, \quad (2)$$

式中 k 为光波波数, $k = 2\pi/\lambda$, λ 为光波波长, Z 为光波传播距离, $J_0(\cdot)$ 为零阶贝塞尔函数, K 为空间波数, $\Phi_n(K)$ 为大气湍流的功率谱密度,惯性区内的 Kolmogorov 湍流功率谱可以表达为

$$\Phi_n(K) = 0.033 C_n^2 K^{-11/3}, K \in (2\pi/L_0, 2\pi/l_0), \quad (3)$$

式中 C_n^2 为大气湍流折射率结构常数, l_0 和 L_0 分别为湍流内、外尺度,对于机载平台,通常认为大气湍流的内尺度 $l_0 < 1 \text{ cm}$, 外尺度 $L_0 > 1 \text{ m}$, 即 $l_0/L_0 < 0.01$ 。

因为大气湍流可由不同尺度的涡旋组成,且涡旋之间尺度差距很大,为了模拟大气湍流相位畸变的随机性,需要考虑其高频结构随机性及低频尺度随机性^[12]。这里提出一种基于随机因子的多层相位屏模拟方法,该随机因子的特性实现随机屏各个模拟点的 2×2 生长扩张,但在扩张过程中,各模拟点作为扩张元点的选择是随机的,且该点一旦未被选中,在以后的扩张中将不具备扩张资格。由于各模拟点扩张具备双重随机性,最终相位屏的生成也满足大气湍流相位调制随机特性。由此,假设 (x_0, y_0) 为随机相位屏上一点,若该点为初始相位点,其初始相位值为 $\varphi_0(x_0, y_0)$, 单层相位屏生成表达式为

$$\varphi_1(x, y) = \varphi_0(x_0, y_0) + R_n \sqrt{D(r) + R\sigma_D^2}, \quad (4)$$

式中 R_n 为 0,1 随机选择数, $D(r)$ 为间距为 r 的两点之间均方相位差, R 为满足 (0,1) 均匀分布 Monte-Carlo 随机因子, $\sigma_D^2 = 1.0299(D/r_0)^{5/3}$ 为接收孔径 D 内的相位起伏方差, r_0 为大气相干长度,大气相干长度可表示为

$$r_0 = \left(0.423 k^2 \int_0^Z C_n^2(z) dz \right)^{-3/5}, \quad (5)$$

式中 Z 为激光束的传播距离。

根据设计的随机相位屏生成方法,初次扩张中,可将初始相位 $\varphi_0(x_0, y_0)$ 设置为接收孔径 D 内的相位起伏均方差 $\sigma_D = 1.0299(D/r_0)^{5/6}$, 相位屏的外尺度 L_0 即为相位屏的尺寸大小。由于初始元点必须被选中,则在第一次扩张过程中, R_n 必须设置为 1, 从第二次扩张开始, R_n 在 0 或 1 间随意选择。经过 n 次扩张,当数据元间隔达到预先设定的采样点间隔时,生成第一层相位屏。

为了建立大气湍流数值模型,需要采用多层相位屏叠加的方法模拟光束传播路径的空间统计特性,而且相位屏之间并不是完全独立,其相关性体现在各相位屏生成时的初始相位值。在进行相位屏初始相位值设定时,后续相位屏可根据上一层相位屏对应位置的相位数值进行设定。多层相位屏生成表达式为

$$\varphi_N(x,y) = \varphi_{N-1}(x,y) + R_n \sqrt{D(r) + R\sigma_D^2}, N \geq 1, \quad (6)$$

式中 N 为第 N 层相位屏。多层相位屏的个数可由光强起伏确定,如果湍流强度比较小,使得整个光波传播路径光强起伏 $\delta_I^2(z) < 0.1$ 时,相位屏个数可设定为 10;如果湍流强度比较大,使得整个光波传播路径光强起伏 $\delta_I^2(z) > 0.1$ 时,可以增加相位屏的数目使相位屏间隔距离 Δz 内 $\delta_I^2(\Delta z) < 0.1$ 。理论上,相位屏数目越多效果越好,但计算量也会相应增大^[13]。对于 Kolmogorov 谱,光强起伏的表达式为

$$\delta_I^2(z) = 1.23 C_n^2 k^{7/6} z^{11/6}. \quad (7)$$

3 改进的秩一相位误差估计补偿算法

在 SAL 的成像过程中,目标理想的方位向回波应是线性调频信号形式,但是由于 SAL 系统平台运动及大气湍流效应等多种因素作用,SAL 方位向回波信息中增加了许多冗余相位,这里把理想调频信号以外的冗余相位称作相位误差。秩一相位误差估计法可根据多个距离单元强散射点的相位差估计回波多普勒信息,并利用多普勒信息与相位信息的函数关系互相推导,从而对相位误差估计并进行补偿。因为 SAL 回波信号比较复杂,造成传统秩一相位误差估计算法对相位误差直接估计存在困难,在此对传统 ROPE 算法进行改进,结合大气湍流数值模拟模型对相位误差进行估计补偿。设离散化 SAL 距离压缩回波信号为

$$S_r(m,n) = A_{m,n} \exp\{j[\varphi_{0,n} + 2\pi f_{m,n}m + \varphi_c(m,n)]\}, \quad (8)$$

式中 $A_{m,n}$ 为回波振幅, $\varphi_{0,n}$ 为初始相位, $f_{m,n}$ 为点 (m,n) 的多普勒频率, $\varphi_c(m,n)$ 为点 (m,n) 的相位误差。 $m = 0, 1, \dots, M-1$ 为离散方位向采样点, $n = 0, 1, \dots, N-1$ 为距离向采样点。由于 SAL 回波信号距离单元内特显点往往不是很明确,所以需要根据回波信号复振幅选出距离单元中的孤立峰值点,移位后使其位于方位中心并用相应的窗函数对移位后的图像进行统一加窗,抑制窗外信号。窗函数可以表达为

$$G(m,n) = \sum_{n=1}^N |s'_r(m,n)|^2, \quad (9)$$

式中 $s'_r(m,n)$ 为移位后的距离向信号,若初始窗宽设为合成孔径长度,对 $s'_r(m,n)$ 进行差分处理并消除初始相位可得

$$D(m,n) = s'_r(m+1,n)s'_r(m,n) = |A|^2 \exp\{j[2\pi f_{m,n} + \Delta\varphi_c(m,n)]\}, \quad (10)$$

式中 $\Delta\varphi_c(m,n) = \varphi_c(m+1,n) - \varphi_c(m,n)$, $\varphi_c(m,n)$ 为 $\Delta\varphi_c(m,n)$ 之和。待估计参数为 $f_{m,n}$ 和 $\Delta\varphi_c(m,n)$, 即

$$f_{m,n}^{(p)} = \frac{1}{2\pi} \arg \sum_{n=1}^N D(m,n) \exp[-j\Delta\varphi_c^{(p)}(m,n)], \quad (11)$$

$$\Delta\varphi_c^{(p)}(m,n) = \arg \sum_{n=1}^N D(m,n) \exp(-j2\pi f_{m,n}^{(p)}), \quad (12)$$

式中上标 p 为第 p 次迭代,迭代运算开始时,由相位屏生成算法产生与回波信号采样点网格数相同的湍流相位估计值 $\Delta\varphi_c^{(0)}(m,n)$, 代入(11)式可以求得初始条件 $f_{m,n}^{(0)}$ 。对相位误差估计值 $\varphi_c(m,n)$ 取复共轭,同距离压缩数据 $S_r(m,n)$ 复乘便可以实现对相位误差的补偿,补偿后的距离压缩数据 $s_{rc}(m,n)$ 表达式为

$$s_{rc}(m,n) = s_r(m,n) \cdot \exp\{j[-\varphi_c(m,n)]\}. \quad (13)$$

4 模拟及结果分析

对于相位屏的空间统计特性进行计算,假设激光辐射源波长为 $1 \mu\text{m}$, 距离向及方位向分辨率均为 0.01 m , 相位屏间距为 1000 m , 网格大小为 512×512 , 大气湍流折射率结构常数为 $C_n^2 = 1.0 \times 10^{-16} \text{ m}^{-2/3}$, 不同方法生成的相位屏相位结构函数计算结果如图 1(a)所示。从图中可以看出, Monte-Carlo 随机因子法克服了谱反演法低频表现不足的缺点,更为接近理论值。不同网格数相位屏相位结构函数的计算结果如图 1(b)所示,随着相位屏网格数的增加,结构函数曲线高频部分同理论值几乎重合,表明经过数据元随机扩张,相位屏的小尺度特性得到了表达。

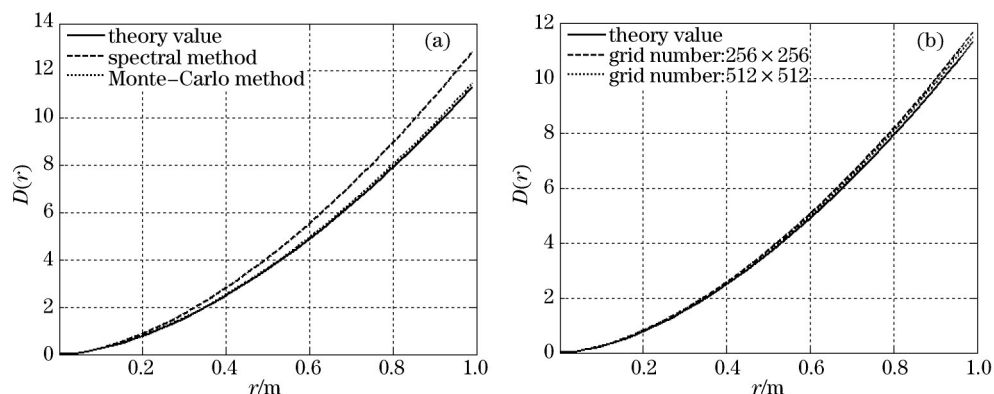


图 1 相位结构函数的对比。(a) 不同方法; (b) 不同网格数

Fig.1 Comparison of phase structure function. (a) Different methods; (b) different grid numbers

利用网格数为 512×512 的 Monte-Carlo 随机因子相位屏对大气湍流背景下的 SAL 成像进行分析, 假设载机和雷达平台处于理想工作状态, 雷达平台与场景目标的斜距为 20000 m, 飞行速度为 100 m/s, 不同湍流强度下, 聚束工作模式的机载 SAL 成像结果如图 2 所示。

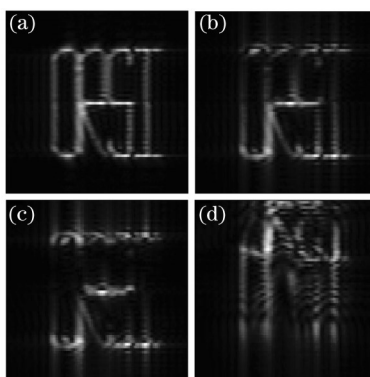


图 2 不同湍流强度下的 SAL 成像。(a) $C_n^2 = 0$; (b) $C_n^2 = 1.0 \times 10^{-19} \text{ m}^{-2/3}$; (c) $C_n^2 = 1.0 \times 10^{-16} \text{ m}^{-2/3}$; (d) $C_n^2 = 1.0 \times 10^{-14} \text{ m}^{-2/3}$

Fig.2 SAL imaging with different turbulence. (a) No turbulence; (b) weak turbulence; (c) medium turbulence; (d) strong turbulence

图 2(a) 为无湍流的 SAL 成像结果, 此时场景中目标能够在方位向和距离向很好聚焦。图 2(b) 为 $C_n^2 = 1.0 \times 10^{-19} \text{ m}^{-2/3}$ 时的成像结果, 从图中可以看出, 图像在方位向出现了散焦, 但依然能够分辨出目标的大致轮廓, 图 2(c) 和图 2(d) 分别为 $C_n^2 = 1.0 \times 10^{-16} \text{ m}^{-2/3}$ 和 $C_n^2 = 1.0 \times 10^{-14} \text{ m}^{-2/3}$ 的成像结果, 由于湍流逐渐加强, 散焦效应变得严重, 成像目标最终无法分辨。图 3(a)~(d) 为 $C_n^2 = 1.0 \times 10^{-16} \text{ m}^{-2/3}$ 条件下, 不同辐射源波长的成像结果, 通过对比可以发现, 波长越长, 散焦效应越小, SAL 成像质量越高。

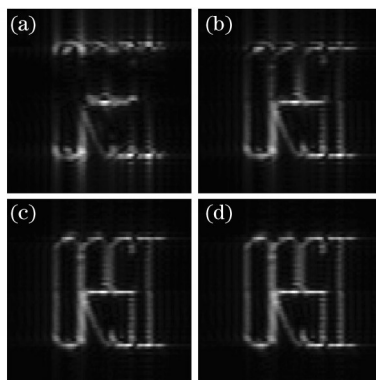


图 3 不同激光波长的 SAL 成像。(a) $\lambda = 1 \mu\text{m}$; (b) $\lambda = 2 \mu\text{m}$; (c) $\lambda = 5 \mu\text{m}$; (d) $\lambda = 10 \mu\text{m}$

Fig.3 SAL imaging with different wavelengths. (a) $\lambda = 1 \mu\text{m}$; (b) $\lambda = 2 \mu\text{m}$; (c) $\lambda = 5 \mu\text{m}$; (d) $\lambda = 10 \mu\text{m}$

图 4(a)~(d) 分别为合成孔径长度 L_{SA} 与大气相干长度 r_0 之比为 1/5、1/1、5/1、50/1 的场景目标成像结果, 可

可以看出,当 $L_{SA} < r_0$ 时,距离向和方位向目标能够很好地成像。随着 r_0 的减小,目标成像受到干扰,直到图像方位向无法精确成像。

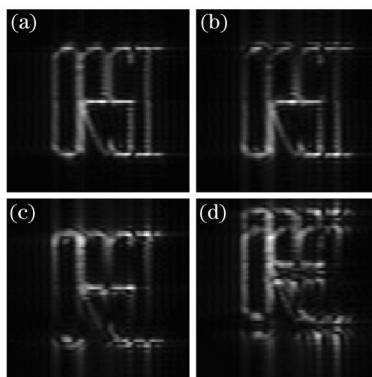


图 4 不同 L_{SA}/r_0 情况下的 SAL 成像。(a)1/5; (b) 1/1; (c) 5/1; (d) 50/1

Fig.4 SAL imaging with different L_{SA}/r_0 .(a)1/5; (b) 1/1; (c) 5/1; (d) 50/1

图 5(a)~(d)为图 4(a)~(d)经过 IROPE 算法补偿后的结果。其中,图 5(a)和图 5(b)分别为 $L_{SA}/r_0 = 1/5$ 及 $1/1$ 时,经过 IROPE 算法 10 次迭代补偿的结果,补偿后聚焦效果良好,分辨率明显提升。图 5(c)为 $L_{SA}/r_0 = 5/1$ 时,SAL 图像的 IROPE 算法补偿效果,经过 10 次迭代运算,图像的成像质量有了很大改善,但是仍然存在散焦现象,这说明大气湍流造成的回波信号相位误差不是完全可逆的,只有一部分能够得到补偿。图 5(d)为 $L_{SA}/r_0 = 50/1$ 时,经过 IROPE 算法 15 次迭代补偿,补偿效果不明显,表明 SAL 成像受到了大气湍流的严重影响,使得 r_0 小于实孔径长度 D ,破坏了回波信号的相干成像,进而无法对相位误差进行准确估计,成像数据无法恢复。

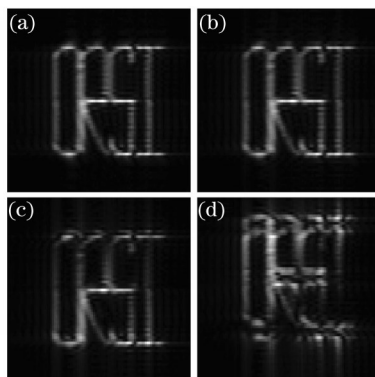


图 5 不同 L_{SA}/r_0 情况下的 SAL 成像补偿结果。(a) 1/5; (b) 1/1; (c) 5/1; (d) 50/1

Fig.5 Compensation results of SAL imaging with different L_{SA}/r_0 .(a) 1/5; (b) 1/1; (c) 5/1; (d) 50/1

图 6 为不同波长、不同斜距条件下合成孔径长度与大气相干长度比值随大气湍流强度的变化关系。图 6(a)给出了雷达平台与场景目标之间斜距为 $Z=1000\text{m}$,不同波长情况下, L_{SA}/r_0 随湍流强度 C_n^2 的变化关系。图 6(b)

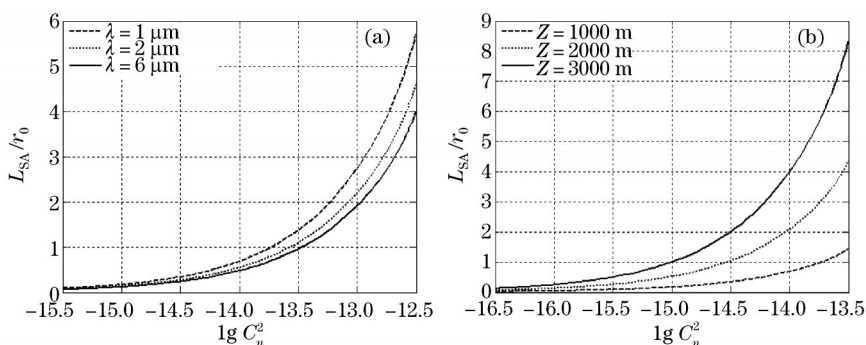


图 6 L_{SA}/r_0 随湍流强度 C_n^2 的变化关系。(a) 不同波长; (b) 不同斜距

Fig.6 Relation of L_{SA}/r_0 and turbulence intensity C_n^2 . (a) Different wavelengths; (b) different slant ranges

给出了波长 $\lambda = 1 \mu\text{m}$ 时,不同斜距情况下, L_{SA}/r_0 随湍流强度 C_n^2 的变化关系。从图中可以看出,随着 C_n^2 的增大,合成孔径长度与大气相干长度比值也在不断增大。在相同的大气湍流下,当斜距一定时,波长越短,比值越大;当波长一定时,斜距越大,比值越大。

5 结 论

本文根据 Kolmogorov 湍流谱,基于 Monte-Carlo 随机因子生成大气湍流随机相位屏,计算结果表明, Monte-Carlo 随机因子法空间统计特性较谱反演法更为接近理论值,并且随网格数的增加,高频部分与理论值几乎重合,验证了方法的有效性。从大气湍流下 SAL 成像效果来看,随着湍流强度的增大,图像的散焦效应越明显,辐射源波长较长的 SAL 成像质量更高,利用改进的秩一相位误差估计法对 SAL 图像进行补偿,当合成孔径长度小于大气相干长度时,图像聚焦效果良好;当大气相干长度小于实孔径长度时,补偿效果不理想。

在 SAL 实际应用中,大气湍流对 SAL 的影响是不可忽视的因素,对于一些成像分辨率要求较高的场合,可以考虑适度降低机载平台的斜距并选择波长更长的辐射源来提升 SAL 的成像质量。

参 考 文 献

- 1 Steven M Beck, Joseph R Buck, Walter F Buell, *et al.*. Synthetic-aperture imaging laser radar:laboratory demonstration and signal processing[J]. Appl Opt, 2005, 44 (35): 7621-7629.
- 2 T J Karr. Synthetic aperture lidar resolution through turbulence[C]. SPIE, 2003, 4976:22-33.
- 3 Peng Renjun, Wu Jian, Yang Chunping, *et al.*. Synthesizing aperture in optics with interferometric imaging[J]. Acta Optica Sinica, 2002, 22(3): 355-359.
彭仁军, 吴 健, 杨春平, 等. 用干涉法实现光学合成孔径技术[J]. 光学学报, 2002, 22(3): 355-359.
- 4 Liu Liren. Synthetic aperture laser imaging lidar (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.
- 5 Guo Liang, Xing Mengdao, Liang Yi, *et al.*. Algorithm for airborne spotlight synthetic aperture imaging lidar data processing[J]. Acta Optica Sinica, 2008, 28(6): 1183-1190.
郭 亮, 邢孟道, 梁 毅, 等. 一种机载合成孔径成像激光雷达聚束模式成像算法[J]. 光学学报, 2008, 28(6):1183-1190.
- 6 T J Karr. Resolution of synthetic-aperture imaging through turbulence[J]. J Opt Soc Am A, 2003, 20(6): 1067-1083.
- 7 R L Lucke. Synthetic aperture lidar simulations with phase screens and Fourier propagation[C]. IEEE Aerospace Conference, 2004, 3: 1788-1798.
- 8 Z Hua, H Li, Y Gu. Atmospheric turbulence phase compensation in synthetic aperture lidar data processing[C]. SPIE, 2007, 6787: 678724.
- 9 Dai Pinjuan, Liu Guoguo, Wu Jin. Numerical simulation on synthetic aperture lidar imaging through atmospheric turbulence with phase gradient algorithm compensation[J]. Acta Optica Sinica, 2010, 30(3): 739-746.
戴品娟, 刘国国, 吴 谨. 大气湍流下合成孔径激光雷达成像数值模拟及 PGA 补偿[J]. 光学学报, 2010, 30(3): 739-746.
- 10 Wei Hongyan, Zhang Hongjian, Cai Dongmei, *et al.*. Effect of atmospheric turbulence scintillation on synthetic aperture laser radar imaging[J]. Acta Optica Sinica, 2013, 33(s2): s228002.
韦宏艳, 张洪建, 蔡冬梅, 等. 大气湍流闪烁效应对合成孔径激光雷达成像的影响[J]. 光学学报, 2013, 33(s2): s228002.
- 11 Xiang Jinsong, Zhang Xiaolei, Zhang Miaomiao, *et al.*. Generation of infinitely long turbulence phase screen[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2012, 24(5): 1071-1075.
向劲松, 张孝雷, 张苗苗, 等. 无限长湍流相位屏产生方法[J]. 强激光与粒子束, 2012, 24(5): 1071-1075.
- 12 Hua Zhili, Li Hongping. Atmospheric turbulence phase screen simulation based on random unit expansion[J]. Acta Optica Sinica, 2012, 32(5): 0501001.
华志励, 李洪平. 基于随机数据元扩张的大气湍流相位屏数值模拟[J]. 光学学报, 2012, 32(5): 0501001.
- 13 Zhang Jianzhu. The Influence of Atmospheric Turbulence on Partially Coherent Flat-Topped Gaussian Beam[D]. Mianyang: China Academy of Engineering Physics, 2004: 12-17.
张建柱. 大气湍流对部分相干平顶高斯光束影响的研究[D]. 绵阳: 中国工程物理研究院, 2004: 12-17.

栏目编辑: 何卓铭