

合成孔径激光成像雷达散斑效应分辨单元成像研究

许倩^{1,2} 周煜¹ 孙建锋¹ 孙志伟^{1,2} 卢智勇^{1,2} 张宁^{1,2} 刘立人¹

(¹ 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)

² 中国科学院大学, 北京 100049

摘要 分析了合成孔径激光成像雷达(SAIL)受散斑效应影响的分辨单元成像过程并推导了含有散斑效应的二维数据收集方程。在此基础上通过数值模拟分析比较了不同接收天线尺寸、不同天线积分起点位置情况下散斑效应对成像所需的光电流交流项、距离向压缩和最终分辨单元成像结果的影响。结果表明散斑效应对分辨单元成像的影响主要体现在降低了分辨单元的图像强度,同时不同天线尺寸和天线积分位置对分辨单元的成像影响差异较大。分析结果可为今后 SAIL 散斑效应的抑制提供一定的参考。

关键词 遥感; 合成孔径激光成像雷达; 激光散斑; 散斑效应; 光学接收天线

中图分类号 TN958 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201434.0928001

Research on the Speckle Influenced Resolution Imaging of Synthetic Aperture Imaging Ladar

Xu Qian^{1,2} Zhou Yu¹ Sun Jianfeng¹ Sun Zhiwei^{1,2}

Lu Zhiyong^{1,2} Zhang Ning^{1,2} Liu Liren¹

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

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

Abstract Imaging process and the two-dimensional data collection influenced by space-time speckle effect for a resolution of the synthetic aperture imaging ladar (SAIL) are analyzed. Based on the previous research, the influences of the speckle effect introduced by different scopes and locations of the receiving antenna are compared. Correspondingly, the photocurrent, the compression in range direction and the final images of the resolution are simulated. Simulation results show that the image intensity of the resolution is significantly decreased, and the space-time varying speckle effects, introduced by different scopes and locations of the receiving antenna, exhibit remarkable different influences on the resolution imaging. Our research provides a certain reference for the reduction of the speckle effect in SAILs.

Key words remote sensing; synthetic aperture imaging ladar; laser speckle; speckle effect; optical receiving antenna

OCIS codes 280.6730; 030.6140; 110.1650

1 引 言

合成孔径激光成像雷达(SAIL)是微波合成孔径雷达(SAR)在光学波段的应用,是目前能够在几千公里作用距离上实现厘米量级分辨率的最可行的光学成像手段。SAIL以近红外激光器为辐射源,

其工作波长比 SAR 的射频波段短 3~6 个数量级。在比 SAR 获得更高成像分辨率的同时,SAIL 也因为激光的高相干性不可避免地受到散斑效应的影响^[1-2],国内外许多研究机构的 SAIL 成像实验结果^[3-6]也说明散斑效应的存在对 SAIL 成像质量有

收稿日期: 2014-04-28; 收到修改稿日期: 2014-05-19

基金项目: 国家自然科学基金(61377004,61108069)

作者简介: 许倩(1987—),女,博士研究生,主要从事合成孔径激光成像雷达散斑效应方面的研究。

E-mail: xuqian@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方面的研究。

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

所影响。

美国海军实验室(NRL)于2002年研究了SAIL中散斑效应对SAIL光学外差探测信噪比产生的影响^[1],没有涉及时间变化的散斑统计特性。文献[2]首次提出SAIL中随时间空间变化的散斑效应,文献[7]利用部分相关理论描述了时空散斑效应,提出了抑制散斑效应的SAIL结构和工作模式。文献[8]建立了时空散斑效应的物理模型,通过具体实例计算并实验验证了SAIL中散斑的统计特性。文献[9]分析了散斑的天线接收特性及影响接收天线散斑积分场的因素。本文在之前工作的基础上,分析了SAIL受散斑效应影响的分辨单元成像过程,推导了含有散斑效应的二维数据收集方程,并通过数值模拟分析比较了不同接收天线尺寸、不同天线积分起点位置情况下散斑效应对分辨单元成像的影响。分析结果可为抑制SAIL中的散斑效应提供重要参考。

2 理论分析

条带模式下的机载SAIL散斑接收如图1所示。 x 轴为方位向坐标,目标平面倾斜角 θ 。目标面坐标表示为 (x_k, y_k) ,天线接收面坐标为 (x_r, y_r) ,分辨率单元尺寸为 $d_x \times d_y$ 。光学发射天线尺寸为 $L_x \times L_y$,接收天线尺寸为 $D_x \times D_y$ 。SAIL到目标面的中心斜距为 z_0 ,与主平面 (x, y) 的坐标变换可表示为 $x = x_k, y = y_k \sin \theta, z = z_0 + y_k \cos \theta$ 。SAIL平台运动速度为 v ,工

作中心波长为 λ 。距离向上的快时间定义为 $t_f(0 \leq t_f \leq T_f)$,方位向上的慢时间表示为 $t_s = nT_s, T_s$ 是发射脉冲的时间间隔。SAIL的发射信号为线性调频啁啾激光信号,起始频率为 f_0 ,频率啁啾率为 \dot{f} ,啁啾频率表示为 $f(t_f) = f_0 + \dot{f}t_f$ 。由于实际激光器往往对波长线性调制,与频率对应的起始波长为 λ_0 ,波长啁啾率为 $\dot{\lambda} = -\frac{\lambda^2}{c}\dot{f}$,啁啾波长可以表示为 $\lambda(t_f) = \lambda_0 + \dot{\lambda}t_f$ 。波长啁啾范围可表示为 $\Delta\lambda = \dot{\lambda}T_f = -\lambda^2/2d_y$ 。文献[10]已经给出了理想情况下的SAIL的二维成像数据方程,下面分析受到散斑效应影响的SAIL成像过程。

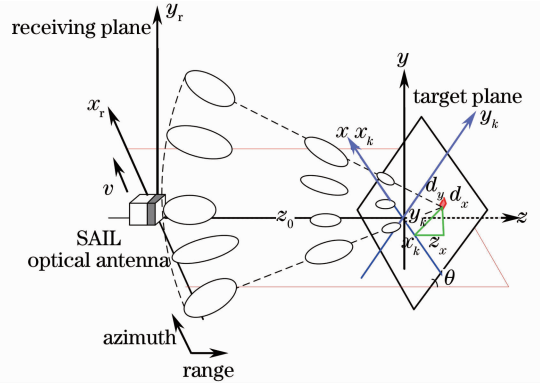


图1 条带模式机载合成孔径激光成像雷达散斑接收示意图

Fig. 1 Geometry for strip-mode SAIL speckle reception

在前面所述的条带模式SAIL中,含有时域信号的发射光场可表示为

$$E_1(x_r, y_r, t_{n,t}) = A_1 \text{rect}\left(\frac{x_r}{L_x}\right) \text{rect}\left(\frac{y_r}{L_y}\right) \exp\left\{j2\pi\left[f_0 t_f + \dot{f} \frac{t_f^2}{2}\right]\right\}. \quad (1)$$

目标面与SAIL的距离满足远场衍射条件,照射到目标面上为发射光的衍射场,分辨率单元 (x_k, y_k) 处的复振幅可以表示

$$E_2(x_k - nvT_s, y_k) = A_1 \frac{L_x L_y}{j\lambda z} \text{sinc}\left[\frac{(x_k - nvT_s)L_x}{\lambda z}\right] \text{sinc}\left(\frac{y_k L_y}{\lambda z}\right) \exp\left(j \frac{2\pi z}{\lambda}\right) \times \exp\left[j\pi \frac{(x_k - nvT_s)^2 + (y_k \sin \theta)^2}{\lambda z}\right]. \quad (2)$$

粗糙目标面上的分辨单元 $d_x \times d_y$ 经后向散射,在接收面上得到回波信号:

$$E'_3(x_r, y_r, x_k, y_k; t_f, nT_s) = E_2(x_k - nvT_s, y_k) \rho(x_k - nvT_s, y_k) e_{\text{speckle}}(x_r, y_r; t_f, nT_s) \times \exp\left\{j\pi\left[f_0(t_f - \tau) + \dot{f} \frac{(t_f - \tau)^2}{2}\right]\right\}, \quad (3)$$

式中 $\rho(x_k - nvT_s, y_k)$ 代表朗伯体的反射率, $\tau = 2z/c$ 为回波信号的双程延迟时间。 $e_{\text{speckle}}(x_r, y_r; t_f, nT_s)$ 为目标分辨单元后向散射得到的散斑场。由文献[8],将目标面分辨单元按奈奎斯特定律等间隔分为 $M \times M$ 个采样单元。第 (i, j) 个采样单元坐标为 $[x_k(i, j), y_k(i, j)]$ 。接收面 (x_r, y_r) 的散斑场可以由所有采样单元的回波叠加进行表示:

$$e_{\text{speckle}}(x_r, y_r; t_f, nT_s) = \frac{1}{M^2} \sum_{i \leq M, j \leq M} E[x_r, y_r; x_k(i, j), y_k(i, j)], \quad (4)$$

式中 $1/M^2$ 为归一化平均因子, $E[x_r, y_r; x_k(i, j), y_k(i, j)]$ 为第 (i, j) 个采样单元衍射得到的回波散斑场:

$$E[x_r, y_r; x_k(i, j), y_k(i, j)] = \exp\left\{j \frac{2\pi}{\lambda(t_f)} [z_0 + y_k(i, j) \cos \theta]\right\} \exp[j\varphi'(i, j)] \times \exp\left\{-j \frac{2\pi}{\lambda(t_f)} [z_0 + y_k(i, j) \cos \theta] \{x_r[x_k(i, j) - nvT_s] + y_r y_k(i, j) \sin \theta\}\right\}. \quad (5)$$

$\varphi'(i, j)$ 为由粗糙目标面引入的第 (i, j) 个采样单元的随机相位。在这里仅研究时空散斑效应引入的随机相位和振幅, 因此忽略了回波二次相位历程并补偿了目标衍射产生的波前二次项^[11]。SAIL 中散斑效应在距离向上存在随快时间变化的波长特性。在一次啁啾信号采样时间内, 接收天线范围内的散斑场沿距离向平移的长度等于散斑的统计平均尺寸 $S_y = \frac{\lambda z}{\cos \theta L_y / 2}$ 。回波信号和本振信号经外差平衡接收并复数化后, 得到成像所需的光电流信号:

$$I_{1D}(x_T, y_T; t_{n,f}, nT_s) = K(x_k, y_k) \operatorname{sinc}\left[\frac{(x_k - nvT_s)L_x}{\lambda z}\right] \operatorname{sinc}\left(\frac{y_k L_y}{\lambda z}\right) \times S(x_r, y_r; t_f, nT_s) \operatorname{rect}\left(\frac{t_f - T_f/2}{T_f}\right) \exp(j2\pi f t_f \Delta\tau) \exp\left[j2\pi \frac{(x_k - nvT_s)^2}{\lambda z}\right], \quad (6)$$

式中 $K(x_k, y_k) = \eta A_i^2 \frac{L_x L_y}{j\lambda z} \rho(x_k - nvT_s, y_k) \exp\left(j2\pi \frac{y_k^2}{\lambda z}\right)$ 可看作与系统参数有关的常数因子, $\operatorname{rect}\left(\frac{t_f - T_f/2}{T_f}\right)$ 为时间采样窗口函数^[10], $\Delta\tau$ 为回波信号相对本振信号的时间延迟。 $S(x_r, y_r; t_f, nT_s)$ 表示接收天线和散斑场的卷积在天线范围内积分, 写作^[9]:

$$S(x_r, y_r; t_f, nT_s) = \iint e_{\text{speckle}}(x_r, y_r; t_f, nT_s) * A(x_r, y_r; nT_s) dx_r dy_r, \quad (7)$$

式中 $A(x_r, y_r; nT_s) = \operatorname{rect}\left(\frac{x_r - nvT_s}{D_x}\right) \operatorname{rect}\left(\frac{y_r}{D_y}\right)$ 表示沿方位向匀速运动的 SAIL 接收天线, $*$ 为卷积号。综上所述, 受散斑效应影响的 SAIL 分辨单元二维成像方程可写作:

$$I_{2D}(x_k, y_k; t_f, t_s) = \sum_n I_{1D}(x_k, y_k; t_f, nT_s), \quad (8)$$

可以看出, 由于 SAIL 中存在的时空散斑效应^[8], 回波散斑场被接收天线积分接收后, 接收天线散斑积分场 $S(x_r, y_r; t_f, nT_s)$ 的振幅和相位在距离向和方位向上分别随快时间 t_f 和慢时间 t_s 连续变化, 从而使得距离向成像所需的拍频信号被附加上随快时间变化的随机相位; 方位向成像所需的相位二次历程也受到随慢时间变化的散斑相位影响, 经过距离向傅里叶变换、方位向匹配滤波后, 影响最终成像结果为

$$I(x_k, \Delta z) = K(x_k, y_k) [S_{\text{range}}(\xi) * \delta(\xi - f\Delta\tau)] [S_{\text{azimuth}}(nvT_s) * \delta(nvT_s - x_k)]. \quad (9)$$

成像结果为受散斑效应影响的距离向和方位向的脉冲响应 $S_{\text{range}}(\xi)$ 和 $S_{\text{azimuth}}(nvT_s)$ 与目标位置的卷积。

3 数值模拟

可以看出, 散斑天线积分场对二维成像光电流信号及最终成像有直接影响。得到的散斑天线积分场不同, 在距离向和方位向引入的随机相位和振幅起伏相应发生改变, 因此最终对成像的影响程度也不相同。文献[9]模拟了不同情况下天线散斑积分场随机相位和振幅二维分布, 分别计算并比较其统计参量, 得到影响接收天线散斑积分场的因素: 1) 散斑与接收天线的相对空间位置; 2) 两者尺寸的相对

大小。

定义天线散斑尺寸比为 $K = D_y/S_y$, 当 $K \gg 1$, 天线尺寸远大于散斑尺寸时, 接收天线散斑孔径积分场振幅和相位起伏程度最小; $K \ll 1$, 天线尺寸远小于散斑尺寸时, 接收天线散斑孔径积分场振幅和相位起伏程度较小; $K \approx 1$, 天线尺寸近似等于散斑尺寸时, 接收天线散斑孔径积分场振幅和相位起伏程度最大。并且接收天线积分移动过程经过亮暗散斑交界处时, 接收天线散斑积分场起伏较大; 在一个散斑内部积分移动时, 接收天线散斑积分场起伏较小。在此基础上, 进一步模拟并分析散斑接收天线积分效应对分辨率成像的影响。

表 1 系统参数设置

Table 1 Parameter settings of system

Parameter	Value
Velocity of platform v / (m/s)	50
Speed of light c / (m/s)	3.0×10^8
Observation angle θ / ($^\circ$)	45
Slant range z_0 / km	15
Transmitting aperture $L_x \times L_y$ / m	0.05×0.05
Designed resolution $d_x \times d_y$ / cm	2.5×2.5
Pulse initial wavelength λ_0 / nm	1550.5149
Transmitted pulse interval T_s / ms	0.5
Pulse duration time t_f / ms	0.1
Chirp bandwidth B / Hz	8.49×10^9
Frequency chirp rate \dot{f} / (Hz/s)	8.49×10^{13}
Wavelength scan rate $\dot{\lambda}$ / (nm/s)	680
Wavelength scan range $\Delta\lambda$ / nm	0.068
Speckle scale in range direction S_y / m	1.31

系统基本参数设置由表 1 列出。在没有散斑的理想情况下,分辨单元成像结果如图 2 所示。为了方便对比,对成像结果进行了归一化处理,即忽略不同大小的天线积分导致的幅值不同。如图 2(a)所示,理想情况下成像所需的光电流信号交流项最大

幅值为 1;图 2(b)、图 2(c)中,距离向压缩和方位向匹配滤波后的图像强度最大值为 1。分辨单元像点的坐标为 (1.3116m, 0.456m),分辨单元尺寸为 $2.50 \text{ cm} \times 2.50 \text{ cm}$ 。

SAIL 时空散斑的天线特性在文献[9]中已有详细讨论,表 2 总结了不同天线尺寸下天线散斑积分场的变化。天线积分起始位置在散斑边缘处时,设其中心坐标为(0,0);天线积分起始位置在散斑中心时,其方位向坐标为(0.465,0)。散斑尺寸 $S_y = 1.31 \text{ m}$ 。由于接收天线的积分和平滑作用,散斑场在成像光电流中引入的振幅平均值 μ_a 随接收天线宽度 D_y 增大而增大;引入的相位平均值 μ_p 随 D_y 增大呈现下降趋势。当 $K \ll 1$ 时,接收天线积分起始位置对积分散斑场引入的振幅和相位影响较小,接收天线积分起始位置在散斑边缘时引入的振幅和相位平均值略小于天线积分起始位置在散斑中心时引入的振幅和相位平均值。当 $K \approx 1$ 时,接收天线积分起始位置对积分散斑场引入的振幅和相位影响较大,接收天线积分起始位置在散斑边缘时引入的振幅和相位平均值比天线积分起始位置在散斑中心时引入的振幅和相位平均值大得多。当 $K \gg 1$ 时,接收天线积分起始位置对积分散斑场引入的振幅和相位几乎没有影响。

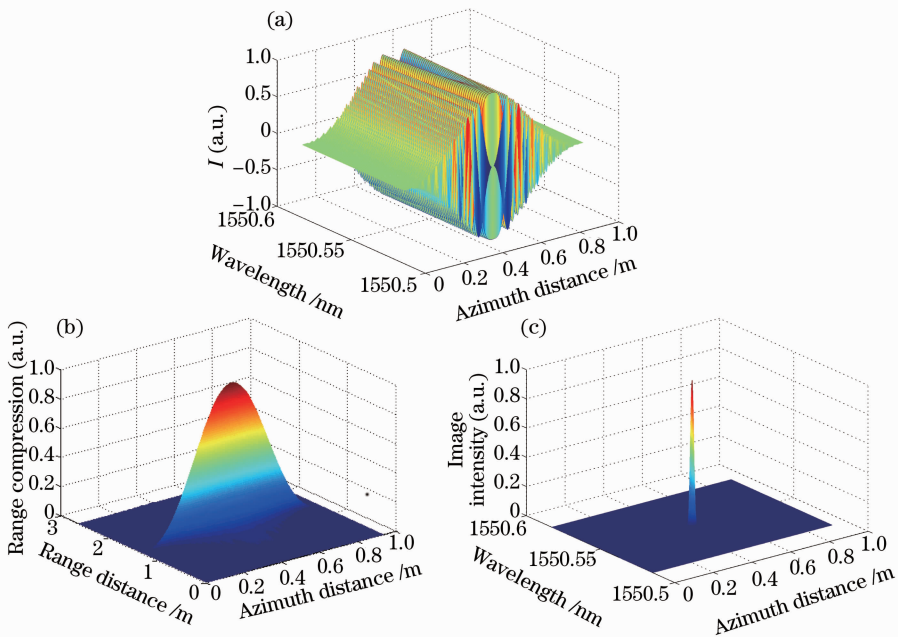


图 2 理想(a)光电流交流分量;(b)距离向压缩;(c)成像结果

Fig. 2 Ideal (a) alternating current component of photocurrent; (b) range compression; (c) resolution imaging

表 2 不同尺寸天线散斑积分场平均值

Table 2 Mean value of integral antenna aperture speckle field for different sizes

Item	Parameter value			
Antenna width /m	0.11	1.31	10.01	
Factor	$\ll 1$	≈ 1	$\gg 1$	
Antenna initial position	(0,0)	μ_a	9.2269×10^4	5.2354×10^6
		μ_p	1.2129	0.9510
	(0,465,0)	μ_a	9.5087×10^4	2.7759×10^6
		μ_p	1.2843	0.3402

接下来分析不同视场范围的天线散斑积分场对分辨单元成像的影响。图 3、图 4 模拟了当接收天线尺寸为 $D_y=0.1\text{ m}$ ，即 $K=0.076$ 、满足 $K \ll 1$ 时接收天线不同起始位置下散斑对分辨率成像的影响情况。如图 3(a) 所示，当天线积分起点位置在散斑中心时，

天线散斑积分场的相位平均值 $\mu_p=1.2843$ ，附加在光电流交流项中使得其中心最大幅值下降为 0.3842，距离向聚焦峰值强度下降为 0.3013，方位向匹配滤波后最终成像结果峰值强度为 0.0862。然而分辨单元像点的坐标保持不变，尺寸变为 $2.69\text{ cm} \times 2.67\text{ cm}$ 。

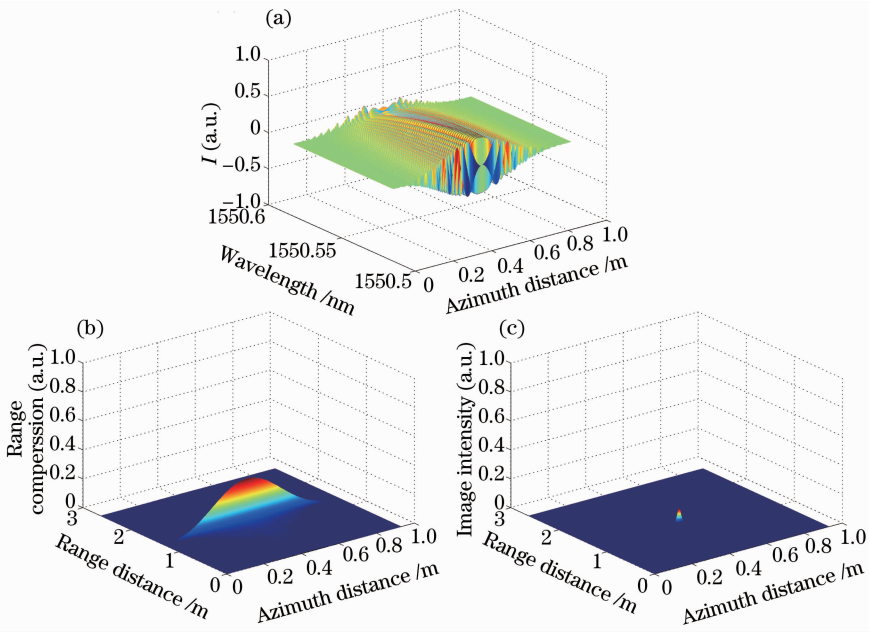


图 3 $K \ll 1$ 、积分起始位置为散斑中心时归一化的 SAIL 分辨单元。(a) 光电流交流分量；(b) 距离向压缩；(c) 成像结果
Fig. 3 (a) Alternating current component of photocurrent, (b) range compression; (c) resolution imaging of SAIL when antenna initial position is in the center of the speckle pattern and $K \ll 1$

如图 4 所示，天线积分起始位置在散斑边缘时，天线散斑积分场的相位平均值 $\mu_p=1.2129$ ，附加在光电流交流项中使得其中心最大幅值下降为 0.4732，距离向聚焦峰值强度下降为 0.3682，方位向匹配滤波后最终成像结果峰值强度为 0.1299。分辨单元像点的坐标保持不变，尺寸变为 $2.59\text{ cm} \times 2.67\text{ cm}$ 。

使得其中心最大幅值下降为 0.9083，分辨单元像点的坐标保持不变，尺寸变为 $2.40\text{ cm} \times 2.41\text{ cm}$ 。距离向聚焦峰值强度下降为 0.8504，方位向匹配滤波后成像峰值强度为 0.7644。

图 5、图 6 模拟了当接收天线尺寸为 $D_y=1.3\text{ m}$ ，即 $K=0.992$ 、满足 $K \approx 1$ 时接收天线不同起始位置下散斑对分辨率成像的影响情况。如图 5 所示，当天线积分起点位置在散斑中心时，天线散斑积分场的相位平均值 $\mu_p=0.3402$ ，附加在光电流交流项中

如图 6 所示，天线积分起始位置在散斑边缘时，天线散斑积分场的相位平均值 $\mu_p=0.9510$ ，附加在光电流交流项中使得其中心最大幅值下降为 0.6167，距离向聚焦峰值强度下降为 0.5322，方位向匹配滤波后强度为 0.2984。分辨单元像点的坐标保持不变，尺寸为变为 $2.38\text{ cm} \times 2.41\text{ cm}$ 。

图 7、图 8 模拟了当接收天线尺寸为 $D_y=10\text{ m}$ ，即 $K=7.634$ 、满足 $K \gg 1$ 时接收天线不同起始位置

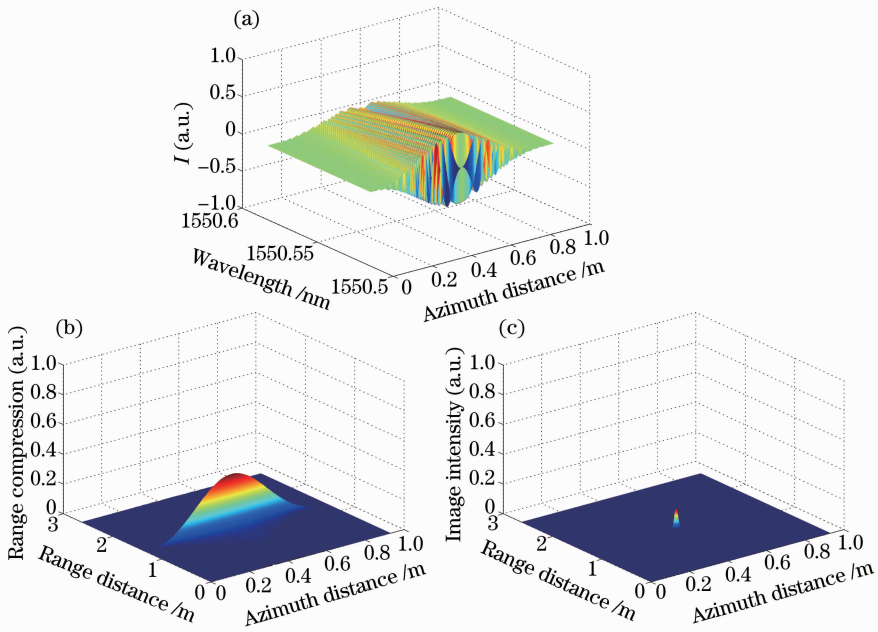


图 4 $K \ll 1$ 、积分起始位置为散斑边缘时归一化的 SAIL 分辨单元。(a) 光电流交流分量；(b) 距离向压缩；(c) 成像结果
Fig. 4 (a) Alternating current component of photocurrent; (b) range compression; (c) resolution imaging of SAIL when antenna initial position is on the edge of the speckle pattern and $K \ll 1$

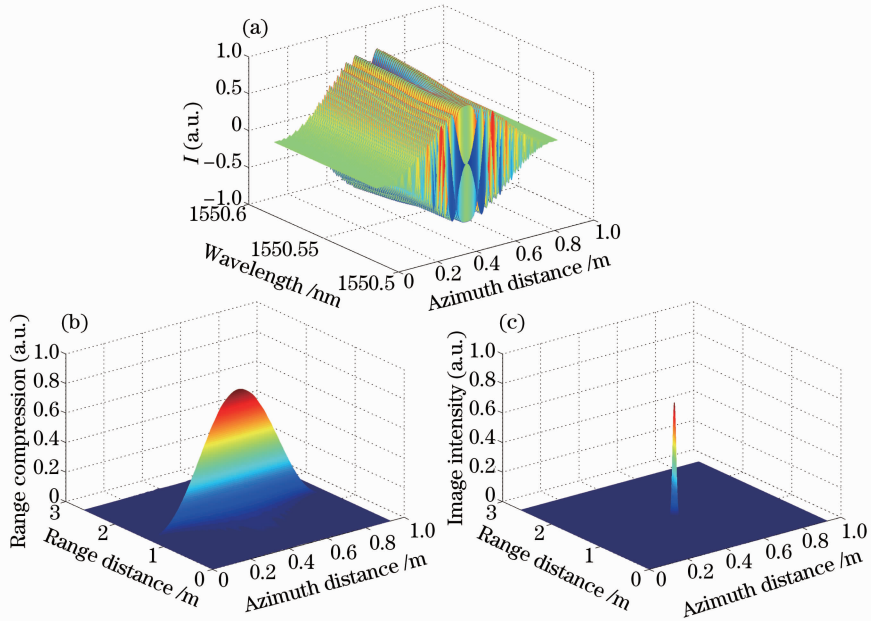


图 5 $K \approx 1$ 、积分起始位置为散斑中心时归一化的 SAIL 分辨单元。(a) 光电流交流分量；(b) 距离向压缩；(c) 成像结果
Fig. 5 (a) Alternating current component of photocurrent; (b) range compression; (c) resolution imaging of SAIL when antenna initial position is in the center of the speckle pattern and $K \approx 1$

下散斑对分辨率成像的影响情况。如图 7 所示,当天线积分起点位置在散斑中心时,天线散斑积分场的相位平均值 $\mu_p = 0.0152$,附加在光电流交流项中,其中心最大幅值为 0.9941,距离向聚焦峰值强度为 0.9964,方位向匹配滤波后强度为 0.9928。分辨单元像点的坐标保持不变,尺寸为 $2.50 \text{ cm} \times 2.50 \text{ cm}$ 。与理想成像结果对比,此时散斑效应对成

像的影响很小。

如图 8 所示,天线积分起始位置在散斑边缘时,天线散斑积分场的相位平均值 $\mu_p = 0.0149$,附加在光电流交流项,此时其中心最大幅值为 0.9903,距离向聚焦峰值强度为 0.9925,方位向匹配滤波后强度为 0.9917。分辨单元像点的坐标保持不变,尺寸为 $2.50 \text{ cm} \times 2.50 \text{ cm}$,可以看出模拟结果与天线积

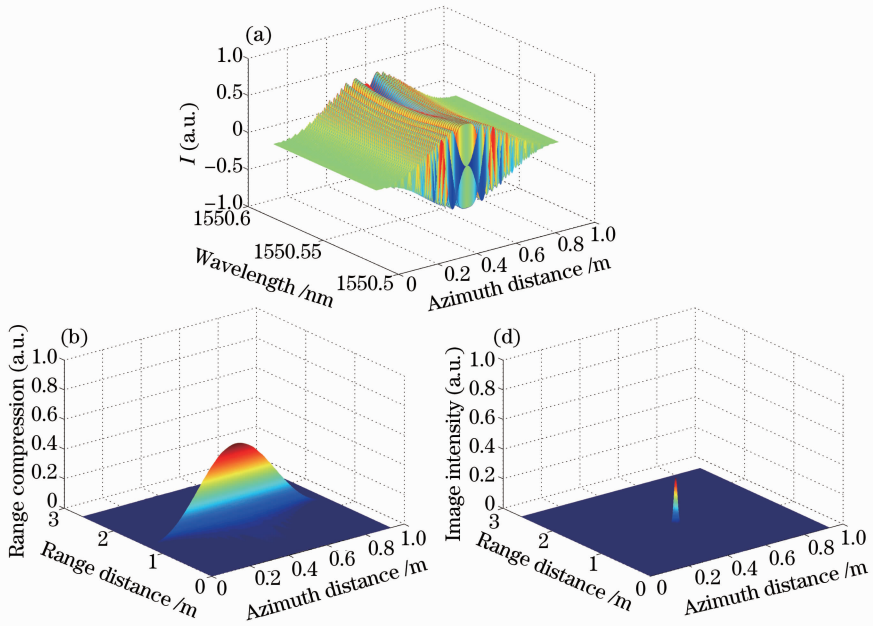


图 6 $K \approx 1$ 、积分起始位置为散斑边缘时归一化的 SAIL 分辨单元。(a) 光电流交流分量；(b) 距离向压缩；(c) 成像结果
 Fig. 6 (a) Alternating current component of photocurrent; (b) range compression; (c) resolution imaging of SAIL when antenna initial position is on the edge of the speckle pattern and $K \approx 1$

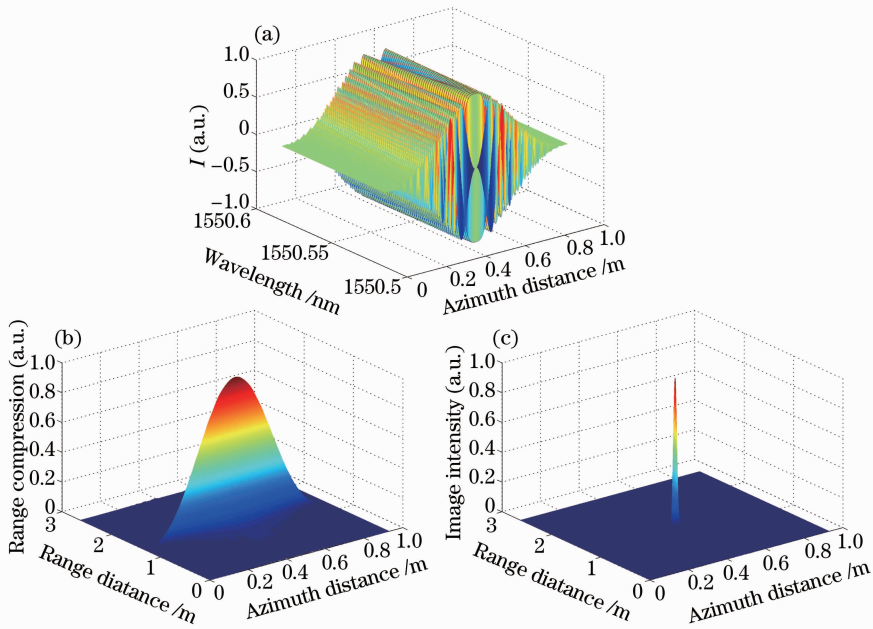


图 7 $K \gg 1$ 、积分起始位置为散斑中心时归一化的 SAIL 分辨单元。(a) 光电流交流分量；(b) 距离向压缩；(c) 成像结果
 Fig. 7 (a) Alternating current component of photocurrent; (b) range compression; (c) resolution imaging of SAIL when antenna initial position is in the center of the speckle pattern and $K \approx 1$

分起始位置在散斑中心时差别很小。

4 分析与讨论

上述模拟结果比较了不同接收天线范围、不同天线积分起点位置情况下散斑效应对成像所需的光电流交流项、距离向压缩和最终分辨单元成像结果

的影响。可以看出：散斑效应对分辨单元成像的影响主要是降低分辨单元的图像强度及改变分辨单元成像尺寸，对分辨单元的中心坐标没有影响。当 $K \ll 1$ 时，虽然天线散斑积分场引入的随机振幅相位分布较平缓，但由于天线积分接收的振幅平均值较小，相位平均值较大，附加到光电流中使得图像的成

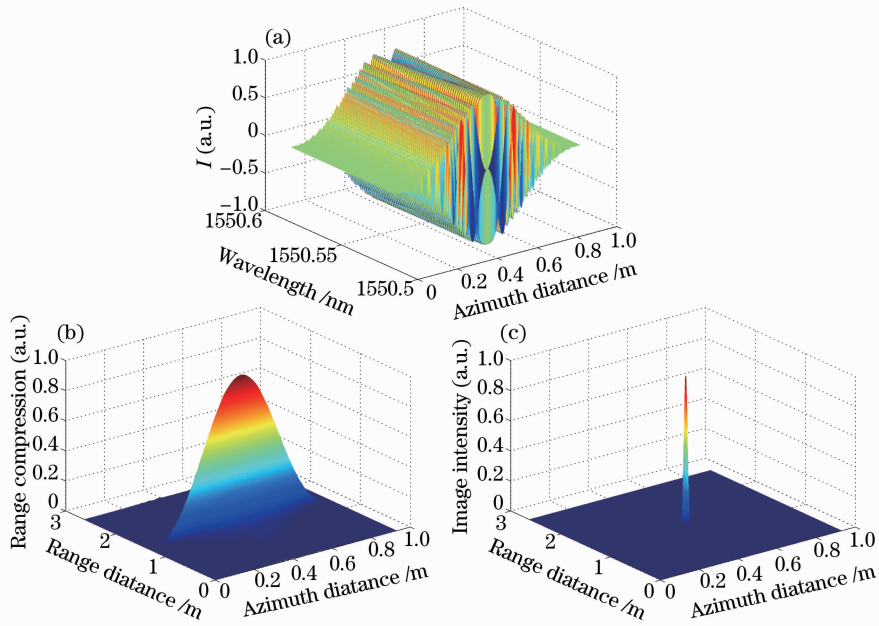


图 8 $K \gg 1$ 、积分起始位置为散斑边缘时归一化的 SAIL 分辨单元。(a) 光电流交流分量；(b) 距离向压缩；(c) 成像结果
Fig. 8 (a) Alternating current component of photocurrent; (b) range compression; (c) resolution imaging of SAIL when antenna initial position is on the edge of the speckle pattern and $K \gg 1$

像强度明显减小；接收天线积分起始位置的不同对分辨单元的成像结果也有一定影响。当 $K \approx 1$ 时，接收天线积分起始位置对积分散斑场引入的振幅和相位影响较大，最后成像结果差别也较大。由于接收天线积分起始位置在散斑边缘时引入的相位平均值比天线积分起始位置在散斑中心时大得多，附加到光电流中导致最后的成像峰值强度降低的也更多。当 $K \gg 1$ 时，分辨单元峰值强度没有明显下降，接收天线积分起始位置也对分辨单元成像几乎没有影响。

5 结 论

分析了受散斑效应影响的 SAIL 成像过程并推导了含有散斑效应的二维数据收集方程。在此基础上，通过数值模拟分析并比较了不同接收天线尺寸、不同天线积分起点位置情况下散斑效应对成像所需的光电流交流项、距离向压缩和最终分辨单元成像结果的影响，得到如下结论：散斑效应通过天线积分引入随快时间和慢时间变化的天线积分散斑场，从而附加在快时间拍频信号和慢时间二次相位历程中进而影响成像。SAIL 中的时空散斑效应对分辨单元成像的影响主要为降低了分辨单元的图像强度及改变了对分辨单元的成像尺寸，对分辨单元的中心坐标没有影响。 $K \ll 1$ 时，分辨单元图像强度下降最明显，同时接收天线积分起始位置的不同对分辨

单元的成像结果有一定影响但差别不大。 $K \approx 1$ 时，接收天线积分起始位置对成像影响较大，接收天线积分起始位置在散斑边缘时的成像峰值强度比天线积分起始位置在散斑中心时降低更多。 $K \gg 1$ 时，分辨单元峰值强度几乎没有下降，接收天线积分起始位置也对分辨单元成像几乎没有影响。因此天线散斑尺寸比 K 是合成孔径激光成像雷达设计中必须考虑的重要指标，对抑制合成孔径激光成像雷达散斑效应研究提供了重要的区分判据，在合成孔径激光成像雷达总体设计中具有重要意义。分析结果可为抑制 SAIL 中的散斑效应提供了参考。

参 考 文 献

- 1 Robert L Lucke, J Rickard. Photon-limited synthetic-aperture imaging for planet surface studies [J]. Appl Opt, 2002, 41(24): 5084–5095.
- 2 Liu Liren. Synthetic aperture laser imaging lidar (VI): space-time speckle effect and heterodyne signal-to-noise ratio [J]. Acta Optica Sinica, 2009, 29(8): 2326–2332.
刘立人. 合成孔径激光成像雷达(VI): 时空散斑效应和外差探测信噪比[J]. 光学学报, 2009, 29(8): 2326–2332.
- 3 R L Lucke, L J Rickard, M Bashkansky, *et al.*. Synthetic Aperture Ladar (SAL): Fundamental Theory, Design Equations for a Satellite System, and Laboratory Demonstration[R]. Naval Research Laboratory, 2003, NRL/FR/7218-02-10051.
- 4 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.
- 5 W F Buell, N J Marechal, J R Buck, *et al.*. Synthetic-aperture imaging lidar [J]. The Aerospace Corporation Magazine of Advances Technology, 2004, 5(2): 45–49.
- 6 Zhou Yu, Xu Nan, Luan Zhu, *et al.*. 2D imaging experiment of

- 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雷达的二维成像实验[J]. *光学学报*, 2009, 29(7): 2030–2032.
- 7 Liu Liren. Structure and operating mode of synthetic aperture laser imaging lidar for speckle reduction; space-time speckle effect and heterodyne signal-to-noise ratio [J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, 31(10): 1028001.
- 刘立人. 基于散斑抑制的合成孔径激光成像雷达的结构和工作模式[J]. *光学学报*, 2011, 31(10): 1028001.
- 8 Xu Qian, Zhou Yu, Sun Jianfeng, *et al.*. Analysis and simulation of space-time speckle effect based on synthetic aperture imaging lidar [J]. *Acta Optica Sinica*, 2013, 33(10): 1028002.
- 许倩, 周煜, 孙建锋, 等. 合成孔径激光成像雷达时空散斑效应模拟与分析[J]. *光学学报*, 2013, 33(10): 1028002.
- 9 Xu Qian, Zhou Yu, Sun Jianfeng, *et al.*. Analysis of integrated speckle receiving characteristics based on synthetic aperture imaging lidar [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.
- 10 Liren Liu. Coherent and incoherent synthetic aperture imaging ladars and laboratory-space experimental demonstrations [J]. *Appl Opt*, 2013, 52(4): 579–599.
- 11 Liu Liren. Synthetic aperture laser imaging radar (I): defocused and phase-biased telescope for reception antenna [J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, 28(5): 997–1000.
- 刘立人. 合成孔径激光成像雷达(I): 离焦和相位偏置望远镜接收天线[J]. *光学学报*, 2008, 28(5): 997–1000.

栏目编辑: 韩 峰