

# 合成孔径激光成像雷达散斑天线接收特性分析

许 倩<sup>1,2</sup> 周 煜<sup>1</sup> 孙建锋<sup>1</sup> 孙志伟<sup>1,2</sup> 马小平<sup>1,2</sup> 刘立人<sup>1</sup>

(<sup>1</sup> 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通信及检测技术重点实验室, 上海 201800)  
<sup>2</sup> 中国科学院大学, 北京 100049)

**摘要** 合成孔径激光成像雷达(SAIL)时空散斑效应严重影响了成像质量。在时空散斑效应基础上,分析了合成孔径激光成像雷达中的散斑天线接收特性,建立了光学接收天线散斑孔径积分场的物理模型,模拟了目标分辨单元光学接收天线散斑孔径积分场距离向时间变化、方位向空间变化的二维分布。分析了不同接收天线散斑尺度比、不同天线积分起始位置对接收天线散斑孔径积分场的影响,并根据其统计性质得到散斑效应影响较小的接收天线尺寸和接收天线积分范围,为合理设计散斑效应较小的接收天线尺寸提供了参考,对进一步分析时空散斑效应如何影响 SAIL 目标成像有直接意义。

**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;散斑抑制

**中图分类号** TN958 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201434.0328002

## Analysis of Integrated Speckle Receiving Characteristics Based on Synthetic Aperture Imaging Ladar

Xu Qian<sup>1,2</sup> Zhou Yu<sup>1</sup> Sun Jianfeng<sup>1</sup> Sun Zhiwei<sup>1,2</sup> Ma Xiaoping<sup>1,2</sup> Liu Liren<sup>1</sup>

(<sup>1</sup> Key Laboratory of Space Laser Communication and Testing Technology, Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China)  
<sup>2</sup> University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

**Abstract** In synthetic aperture imaging ladar (SAIL), laser space-time speckle effect severely reduces the image quality. Based on the previous research about space-time speckle effect, integrated speckle characteristics are first investigated, and the physical model of integrated speckle over antenna aperture is established. According to simulation results, two-dimensional distribution of antenna-integrated speckle field is first presented, and its dependences on the scale and the initial position of receiving antenna are analyzed by specific examples. We also find the rational scale of receiving antenna and the preferable integration area to the space-time varying speckle field. Consequently references on the design of the rational receiving antenna, which could partly suppress the speckle effect, are provided, and it is meaningful to study how the space-time speckle effect degrades the visual quality of the SAIL image.

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

**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唯一光学成像手段。SAIL以激光器为辐射源,其光频波段的工作波长比SAR的射频波段短3~6个数量级。

**收稿日期**: 2013-09-30; **收到修改稿日期**: 2013-10-21

**基金项目**: 国家自然科学基金(61275110)

**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

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<sup>[1-2]</sup>, 已报道的 SAIL 成像实验结果<sup>[3-6]</sup>也说明散斑效应的存在严重影响了 SAIL 成像质量。

2002 年美国海军实验室(NRL)开始对合成孔径激光成像雷达中的散斑效应进行研究。他们通过统计学方法研究了空间变化的激光散斑效应对 SAIL 光学外差探测信噪比产生的影响<sup>[1]</sup>, 但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, 并研究了时空散斑效应对光学外差探测信噪比的影响。文献[7]从部分相干理论出发, 研究了时空散斑效应的统计特性和光学接收天线散斑孔径积分场复相干函数, 利用相干特性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, 模拟了 SAIL 系统中的散斑花样, 通过具体实例计算模拟并实验验证了 SAIL 中散斑的统计特性。

光学天线对接收面上的散斑积分接收得到的场, 称为接收天线散斑积分场。SAIL 天线接收目标点散射回波, 通过光电探测器外差接收成像所需的拍频电流信号。时空变化的散斑被 SAIL 光学接收天线积分接收, 引入的随机相位和振幅附加在外

差拍频信号中对成像产生影响。因此, 研究接收天线散斑孔径积分场对明确时空散斑究竟如何影响 SAIL 成像有直接意义。本文建立了光学接收天线散斑积分场的物理模型, 模拟了实际 SAIL 系统中目标分辨率单元光学接收天线散斑积分场在距离向和方位向的变化, 给出了不同接收天线散斑尺度比下, 时空散斑效应在光学回波外差拍频信号中引入的二维随机振幅和相位分布及其统计特性。通过对模拟结果的分析, 得到影响光学接收天线散斑孔径积分场分布的因素, 并计算了接收天线不同大小和不同起始积分位置下散斑引入的随机振幅、相位的统计参量, 得到了散斑对成像影响较小的接收天线尺寸。

## 2 理论模型

### 2.1 接收天线散斑孔径积分场

图 1 为条带模式下的机载合成孔径激光成像雷达散斑接收示意图。搭载 SAIL 的飞机以速度  $v$  匀速飞行, 发射天线口径为  $d$ , 天线口径到目标分辨率单元的斜距为  $z$ , 工作波长  $\lambda$ , 在目标面上光学足迹的尺度大小即合成孔径长度  $D=2\lambda z/d$ 。目标平面与水平面的夹角为  $\theta$ 。

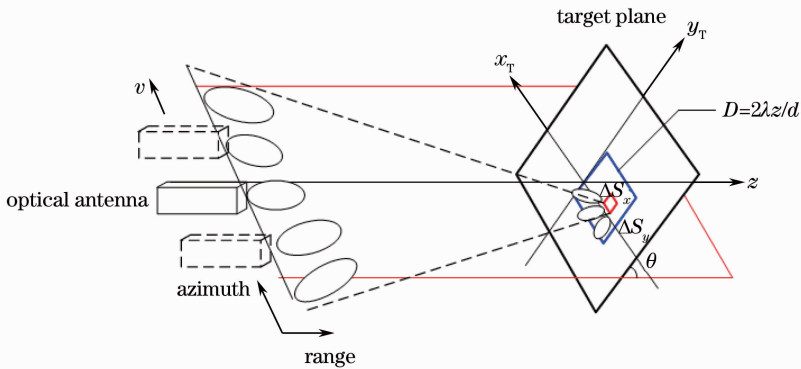


图 1 条带模式机载合成孔径激光成像雷达散斑接收

Fig. 1 Geometry for strip-mode SAIL speckle reception

SAIL 通常采用线性调频啁啾激光信号, 波长可以写作  $\lambda(t_f) = \lambda_{\text{initial}} + \dot{\lambda}t_f$ , 其中  $\lambda_{\text{initial}}$  为初始波长,  $t_f$  为快时间,  $\dot{\lambda}$  为波长啁啾率。如图 2 所示, 在一个波长啁啾过程中, 啁啾率为  $\dot{\lambda}$ 。从光源触发信号  $t_0$  开始到脉冲啁啾结束  $t_{\text{end}}$ , 脉冲宽度为  $T_p = t_{\text{end}} - t_0$ 。回波信号相对于本振信号延迟时间为  $\tau$ , 一般要求  $T_p \gg \tau$ 。回波采样起始同步触发信号开始时刻为  $t_{\text{start}}$ , 此时开始对外差信号进行采集, 到  $t_{\text{stop}}$  结束, 采样时间宽度  $T_s = t_{\text{stop}} - t_{\text{start}}$ 。需要满足时间关系  $T_p \geq T_s$ 。在

距离向采样时间  $T_s$  内, SAIL 散斑场随波长变化而沿距离向平移<sup>[8]</sup>, 即存在距离向随时间变化的散斑效应。

机载 SAIL 回波信号相对本振信号的延迟时间为  $\tau = 2z/c$ , 其中  $c$  为光速, 脉冲发射间隔为  $T$ , 系统设计中要求  $T \gg T_p \gg \tau$ 。光学接收天线方位向移动的距离间隔为  $\Delta X = vT$ , 由信号延迟导致的光学接收天线随 SAIL 沿方位向上移动的距离  $\Delta x = v\tau$  可以忽略不计。因此经过  $m$  个发射脉冲, 接收天线在

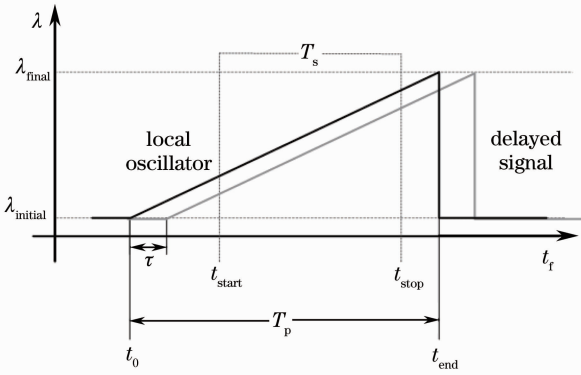


图 2 激光啁啾回波本振外差信号采样过程  
Fig. 2 Laser wavelength chirping and sampling of heterodyned signal

方位向移动距离为  $x = m\Delta X$ ，天线接收的散斑场方位向变化范围也相应为  $m\Delta X$ 。光学接收天线散斑孔径积分场在方位向上存在空间变化效应。

合成孔径激光成像雷达孔径天线为矩形时成像分辨率最好<sup>[9]</sup>，光学接收天线采用尺寸  $L_x \times L_y$  的矩形孔径。接收天线在方位向的平移记作

$$A(x, y; t_s) = \text{rect}\left(\frac{x - \varpi_s}{L_x}\right) \text{rect}\left(\frac{y}{L_y}\right), \quad (1)$$

因此接收天线散斑孔径积分场可以表示为接收天线和散斑场  $E(x, y; t_s, t_f)$  的卷积：

$$S(x, y; t_s, t_f) = E(x, y; t_s, t_f) * A(x, y; t_s). \quad (2)$$

(2)式说明接收天线散斑孔径积分场与接收面上散斑场分布及接收天线相对位置和尺寸大小均有密切关系。时空变化的散斑效应在接收天线积分过程中引入了随时间、空间变化的随机振幅和相位；天线和散斑的相对位置及尺度比则影响了接收天线散斑积分场中随机振幅和相位的变化。

### 2.2 影响接收天线散斑孔径积分场的因素

接收天线散斑孔径积分场呈二维分布，附加在成像所需的外差拍频信号上直接影响 SAIL 分辨率

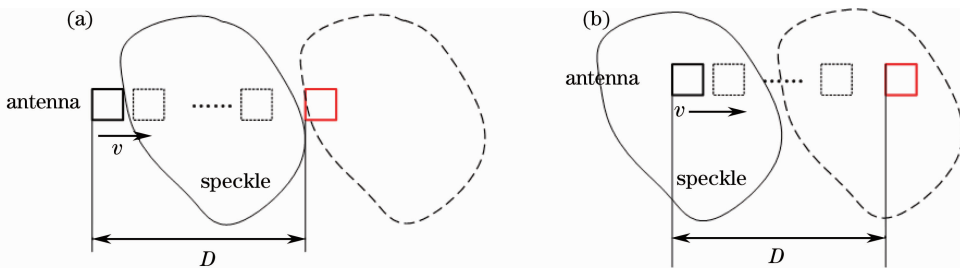


图 3  $K \ll 1$  时天线初始积分位置。(a)在散斑边界；(b)在散斑中心

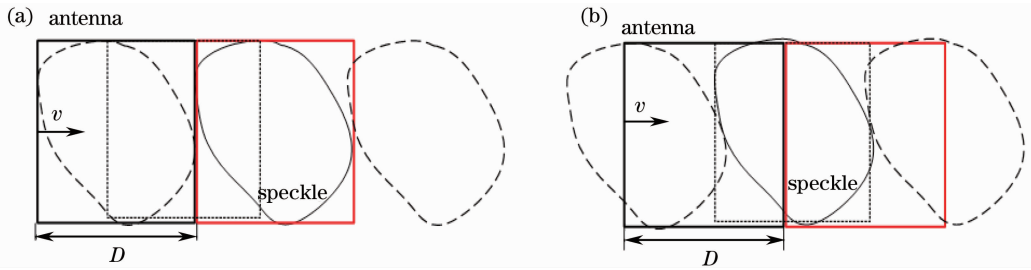
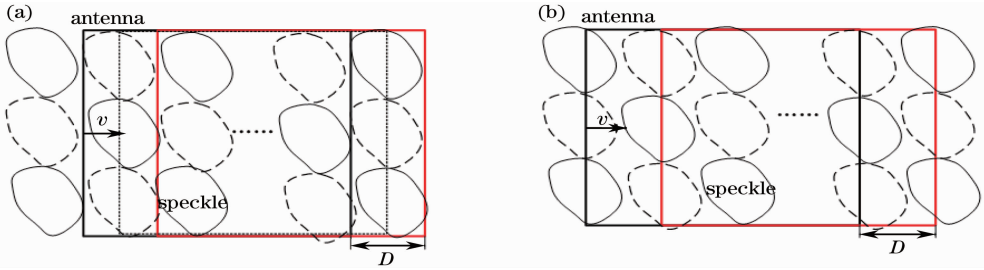
Fig. 3 Antenna initial position is (a) on the edge and (b) at the center of the speckle pattern when  $K \ll 1$

单元成像。研究接收天线散斑积分场主要是研究天线对散斑积分引入的振幅和相位分布及其统计特性。由(2)式及上述分析可知，光学天线对散斑积分引入的散斑振幅和相位分布与以下两方面因素有关：

1) 接收面散斑场与接收天线的相对空间位置。接收面上的散斑场分布理论上可以看做由相邻的“亮”散斑和“暗”散斑组成，二者统计特性相同。成对的亮暗散斑可看做一个周期，相邻散斑之间存在强度倒置。在方位向上，接收天线移动一个合成孔径长度  $D$ ，与散斑在方位向上的尺度相当。接收天线的中心起点位置在散斑边缘时，积分过程中没有经过亮暗散斑的交界处，振幅和相位分布较为平缓。当接收天线的中心起点位置在散斑中心时，积分过程经过亮暗散斑的交界处，振幅和相位起伏较大。

2) 散斑尺度和接收天线尺寸的相对大小。文献[10]定义了接收天线对于目标分辨单元散斑的平均尺寸比  $K = L_y / S_y$ ，其中  $S_y$  为距离向上的散斑平均尺度， $L_y$  为距离向上的接收天线尺度。理论分析接收天线尺度的大小对散斑效应的影响：① 当接收天线小于散斑尺寸，即  $K \ll 1$  时，接收天线散斑孔径积分场复相干函数由散斑复相关因子决定，散斑效应较弱；② 当接收天线散斑平均尺寸比  $K \approx 1$ ，即散斑尺寸和天线孔径尺寸相当时，接收天线散斑孔径积分场复相干函数由散斑复相关因子和天线复相关因子共同决定，散斑效应强烈；③ 当接收天线散斑平均尺寸比  $K \gg 1$  时，即接收天线尺度远大于散斑尺度时，接收天线散斑孔径积分场复相干函数由天线孔径相关函数确定，散斑效应不明显。

图 3 ~ 5 分别表示了  $K \ll 1, K \approx 1, K \gg 1$  时接收天线和散斑场的位置关系，图中表示的是理论上亮暗成对分布的散斑场，实线部分表示亮散斑，虚线部分表示暗散斑。

图 4  $K \approx 1$  时天线初始积分位置。(a)在散斑边界；(b)在散斑中心Fig. 4 Antenna initial position is (a) on the edge and (b) at the center of the speckle pattern when  $K \approx 1$ 图 5  $K \gg 1$  时天线初始积分位置。(a)在散斑边界；(b)在散斑中心Fig. 5 Antenna initial position is (a) on the edge and (b) at the center of the speckle pattern when  $K \gg 1$ 

在接收天线尺度远小于散斑尺度时,图 3(a)天线积分区域没有经过亮暗散斑交界处,天线移动的轨迹正好在一个散斑宽度内,此时天线积分场没有经过散斑强度和相位的突变。图 3(b)接收天线移动的轨迹经过了亮暗散斑交界处,天线积分场经历了散斑强度和相位的突变。

在天线尺度和散斑尺度近似相等的情况下,图 4(a)表示天线移动起始端和结束端都包含一个完整的散斑,在移动过程中经过亮暗散斑相位和振幅的突变区。图 4(b)则是起始端和结束端都处在亮暗散斑的交界处。这两种情况引入的天线散斑孔径积分场有一定区别。

在天线尺度远大于散斑尺度时,如图 5 所示,光学接收天线内含有许多个亮暗散斑周期。由于天线内散斑个数很多,积分的结果不依赖于散斑场,天线相对散斑的位置关系对接收天线散斑积分场产生的影响可以忽略不计。

### 3 计算机模拟

#### 3.1 参数设定

搭载合成孔径激光成像雷达光学接收天线的飞机飞行速度  $v=50$  m/s,观察角  $\theta=45^\circ$ 。SAIL 工作波长为  $\lambda=1550$  nm,发射接收天线口径为  $d=0.05$  m,到目标分辨率单元的斜距  $z=15$  km,在目标面上光

学足迹的尺度大小  $D=0.93$  m。散斑在方位向上的尺度  $S_x=0.93$  m,距离向上的尺度为  $S_y=1.315$  m。

发射脉冲时间间隔  $T=0.5$  ms,目标距离延迟时间  $\tau=2z/c=0.1$  ms,发射脉冲时间  $T_p=T/5=0.1$  ms。距离向采样时间取  $T_s=0.07$  ms,波长扫描范围  $\Delta\lambda_s=0.048$  nm。初始波长  $\lambda_{\text{initial}}=1550.5149$  nm,截止波长  $\lambda_{\text{final}}=1550.5629$  nm。

#### 3.2 接收天线散斑孔径积分场距离向的时间变化特性

散斑分布经过多次计算,统计规律相同,下面通过数值模拟给出一次随机相位下得到的典型结果,在此不考虑回波中成像需要的二次相位历程,仅研究时空散斑效应引入的随机相位和振幅。图 6(a)表示距离向采样初始端  $t_{\text{start}}$  时刻光学天线接收的散斑场振幅分布,图 6(b)、(c)代表啁啾过程中天线接收的散斑场沿距离向平移,图 6(d)表示脉冲结束端  $t_{\text{stop}}$  时刻光学接收天线内的散斑场。图 7 与图 6 对应,表示光学天线接收的散斑场相位变化。实线围成的方形代表 SAIL 光学接收接收天线范围。

在脉冲啁啾采样时间  $T_s$  内对每个采样时刻的散斑场进行积分,得到不同波长下对应的天线散斑积分场分布。图 8 模拟了波长  $\lambda$  啁啾范围  $1550.5149 \sim 1550.5629$  nm、接收天线尺度为  $1 \text{ m} \times 1 \text{ m}$ 、中心坐标为  $(0, -1.5 \text{ m})$  时接收天线散斑积分场。图 8(a)、(b)

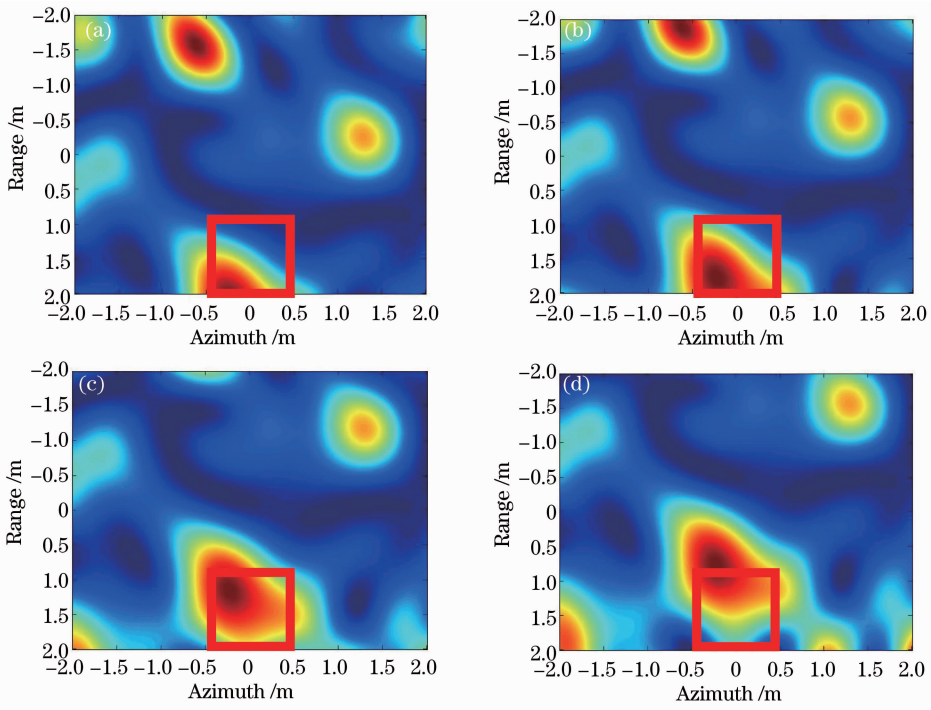


图 6 距离向脉冲周期内接收天线接收的散斑图样变化

Fig. 6 Variation of speckle pattern in a chirped pulse period

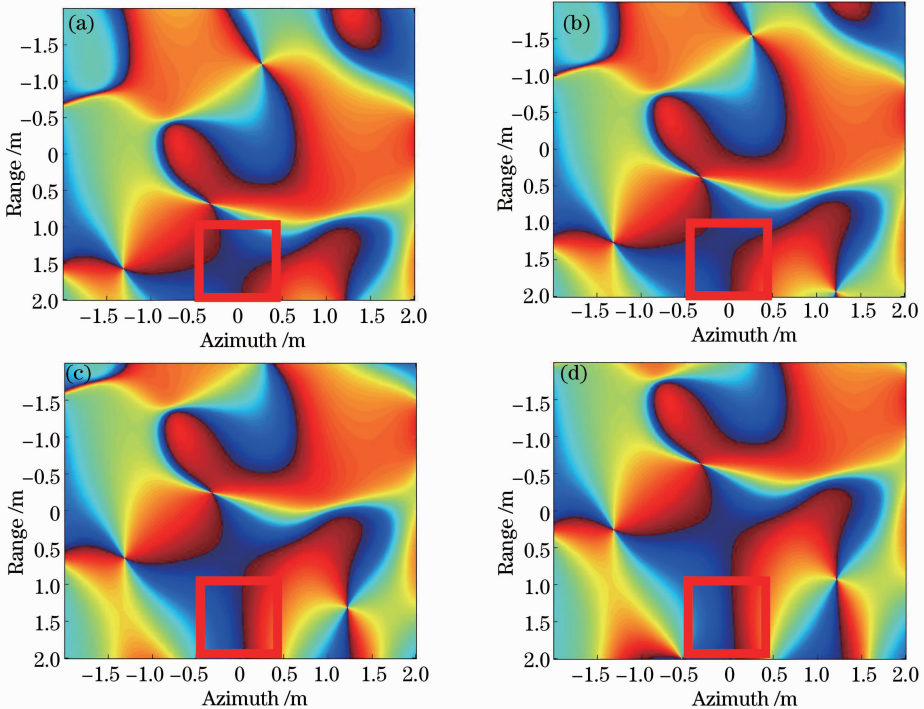


图 7 距离向脉冲周期内接收天线接收的散斑相位变化

Fig. 7 Variation of speckle phase in a chirped pulse period

分别为振幅、相位,横坐标是啁啾波长。

从图 8 可以看出,脉冲起始波长  $\lambda_{\text{initial}} = 1550.5149 \text{ nm}$ ,接收天线散斑孔径积分场振幅  $E = 9.342 \times 10^6 \text{ V}$ 、相位  $\varphi = 0.55 \text{ rad}$ 。 $\lambda = 1550.5459 \text{ nm}$  时散斑振幅花样移动到接收天线中心,振幅最大为

$E = 1.132 \times 10^7 \text{ V}$ 、相位  $\varphi = 0.74 \text{ rad}$ 。脉冲截止波长  $\lambda_{\text{final}} = 1550.5629 \text{ nm}$ ,接收天线散斑孔径积分场振幅  $E = 1.006 \times 10^7 \text{ V}$ 、相位  $\varphi = 0.75 \text{ rad}$ 。对比图 6、7,接收天线内的散斑移动导致天线积分引入

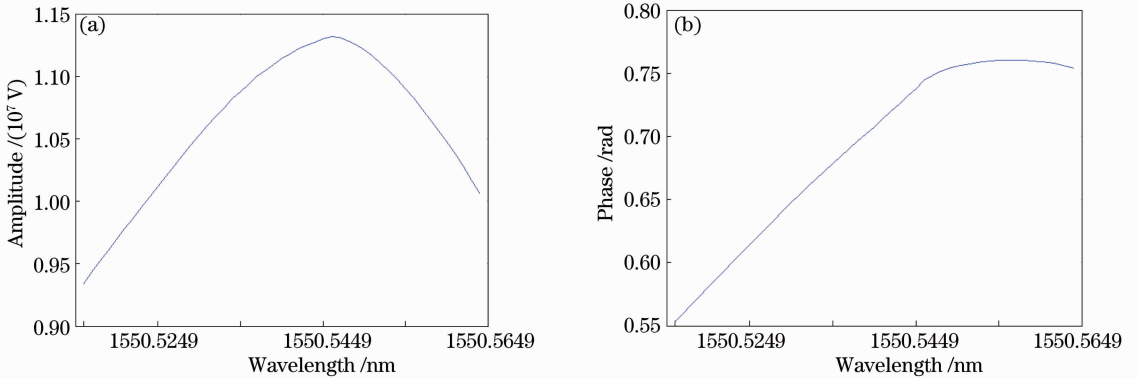


图 8 单个距离行接收天线散斑孔径积分场(a)振幅和(b)相位分布

Fig. 8 (a) Amplitude and (b) phase distribution in range direction

的随机振幅和相位随啁啾波长连续变化,变化趋势与被积分的散斑场有一定对应关系。

### 3.3 接收天线散斑孔径积分场方位向的空间变化

图 9 模拟了波长  $\lambda_{\text{initial}} = 1550.5149 \text{ nm}$  下的散斑

场,当尺度为  $1 \text{ m} \times 1 \text{ m}$ 、起始中心位置为  $(0, -1.5 \text{ m})$  的光学接收天线沿方位向上移动合成孔径长度  $D = 0.93 \text{ m}$  的距离时,天线散斑积分范围的空间变化。

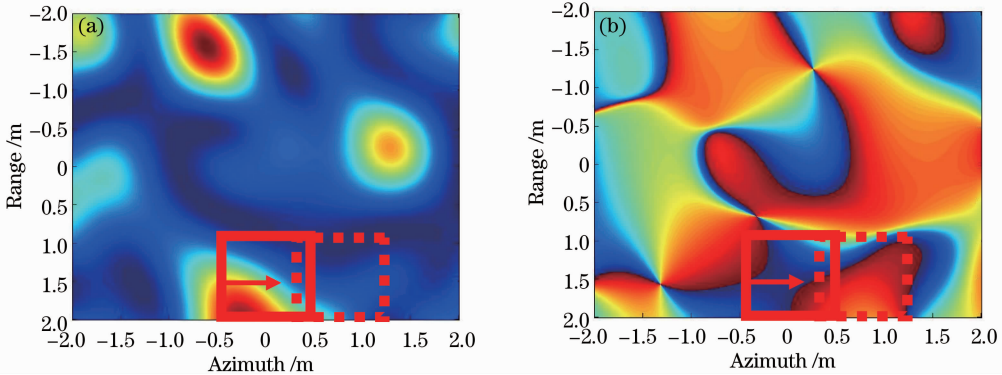


图 9 方位向接收天线接收的散斑。(a)图样; (b)相位变化

Fig. 9 Variation of speckle (a) pattern and (b) phase in azimuth direction

图 10(a)、(b)横坐标为方位向接收天线中心坐标,纵坐标为接收天线散斑积分场振幅和相位。结合图 9 中情况可知,图 9 中实线区域对应图 10 中所示的散斑积分场振幅为  $E = 1.129 \times 10^7 \text{ V}$ 、相位  $\varphi = 0.75 \text{ rad}$ 。接收天线从散斑场振幅较大区域向振幅

较小区域移动,接收天线散斑孔径积分场振幅和相位也相应呈现下降趋势。当天线移动一个合成孔径长度之后,对应天线积分后的振幅为  $E = 8.963 \times 10^6 \text{ V}$ 、相位为  $\varphi = 0.15 \text{ rad}$ 。说明在方位向上,接收天线散斑积分场的振幅和相位随空间连续变化且与

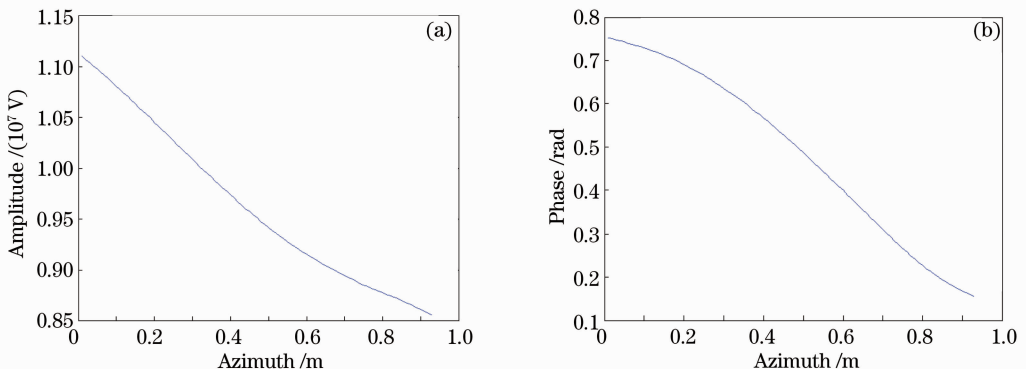


图 10 方位向接收天线散斑孔径积分场的(a)振幅和(b)相位分布

Fig. 10 (a) Amplitude and (b) phase distribution in azimuth direction

被积分的散斑场分布对应。

### 3.4 接收天线散斑孔径积分场的二维分布

接收天线远小于散斑尺度时,图 11、图 12 分别模拟了天线积分起点在散斑边缘和散斑中心处,接收天线散斑孔径积分场的振幅和相位分布。由于天

线尺度远小于散斑尺度,散斑效应较弱,相位变化和振幅变化都比较平缓。当光学天线积分场移动轨迹经过亮暗散斑交界处时,天线散斑孔径积分场振幅和相位变化的程度要大于天线在一个散斑内部移动的情况。

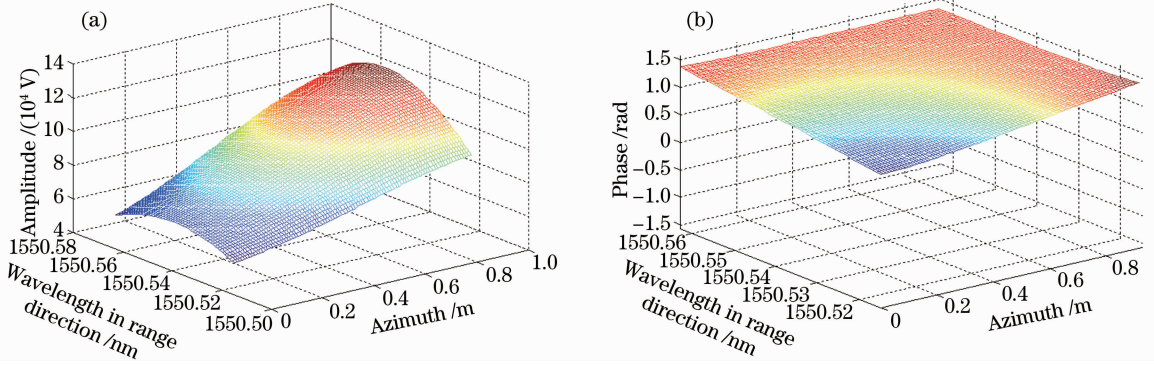


图 11  $l_y = 0.1 \text{ m}$ ,  $K \ll 1$ , 天线移动起点在散斑边界时散斑引入的(a)随机振幅分布和(b)随机相位分布  
Fig. 11 (a) Amplitude distribution and (b) phase distribution when antenna initial position is on the edge of the speckle pattern and  $K \ll 1$ ,  $l_y = 0.1 \text{ m}$

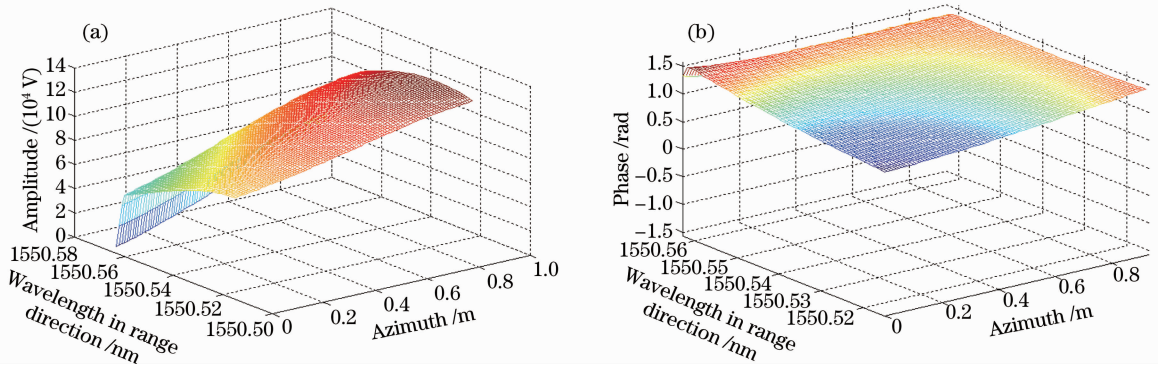


图 12  $l_y = 0.1 \text{ m}$ ,  $K \ll 1$ , 天线移动起点在散斑中心时散斑引入的(a)随机振幅分布和(b)随机相位分布  
Fig. 12 (a) Amplitude distribution and (b) phase distribution when antenna initial position is at the center of the speckle pattern and  $K \ll 1$ ,  $l_y = 0.1 \text{ m}$

图 13、图 14 表明接收天线和散斑尺度近似相等时,天线积分起点位置不同,接收天线散斑积分场

相位和振幅分布明显不同。积分起点在散斑边缘时振幅和相位分布相对起点在散斑中心时更平缓。

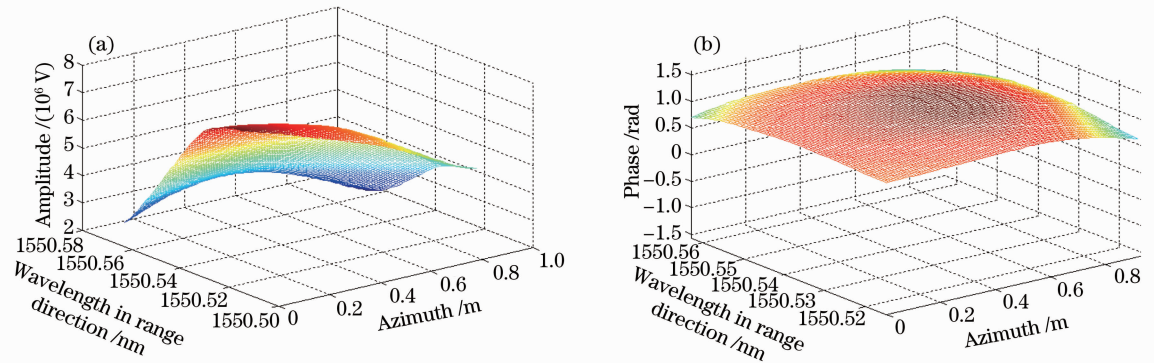


图 13  $l_y = 1.3 \text{ m}$ ,  $K \approx 1$ , 天线移动起点在散斑边界时散斑引入的(a)随机振幅分布和(b)随机相位分布  
Fig. 13 (a) Amplitude distribution and (b) phase distribution when antenna initial position is on the edge of the speckle pattern and  $K \approx 1$ ,  $l_y = 1.3 \text{ m}$

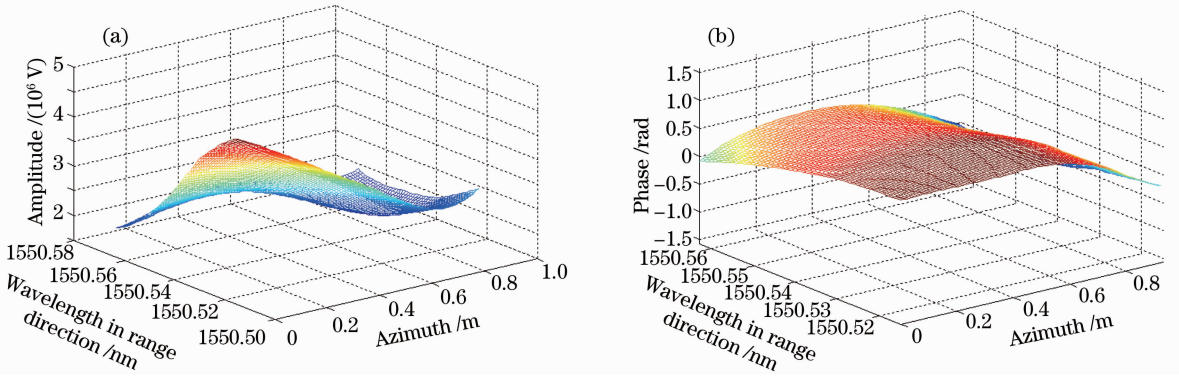


图 14  $l_y=1.3\text{ m}$ ,  $K\approx 1$ , 天线移动起点在散斑中心时散斑引入的(a)随机振幅分布和(b)随机相位分布

Fig. 14 (a) Amplitude distribution and (b) phase distribution when antenna initial position is at the center of the speckle pattern and  $K\approx 1$ ,  $l_y=1.3\text{ m}$

天线尺寸远远大于散斑时, 模拟结果如图 15、图 16 所示, 接收天线散斑孔径积分场的相位和振幅

分布基本一致, 说明此时接收天线散斑孔径积分场对天线积分起点的依赖很小。

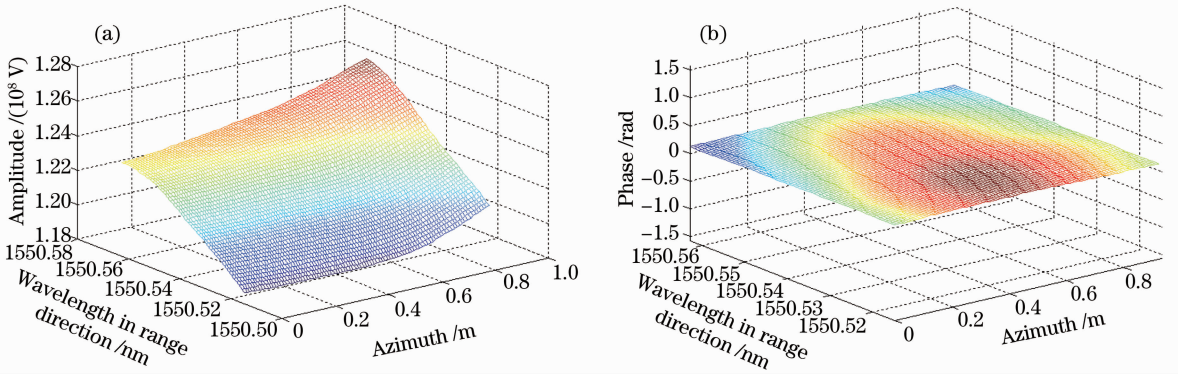


图 15  $l_y=10\text{ m}$ ,  $K\gg 1$ , 天线移动起点在散斑边界时散斑引入的(a)随机振幅分布和(b)随机相位分布

Fig. 15 (a) Amplitude distribution and (b) phase distribution when antenna initial position is on the edge of the speckle pattern and  $K\gg 1$ ,  $l_y=10\text{ m}$

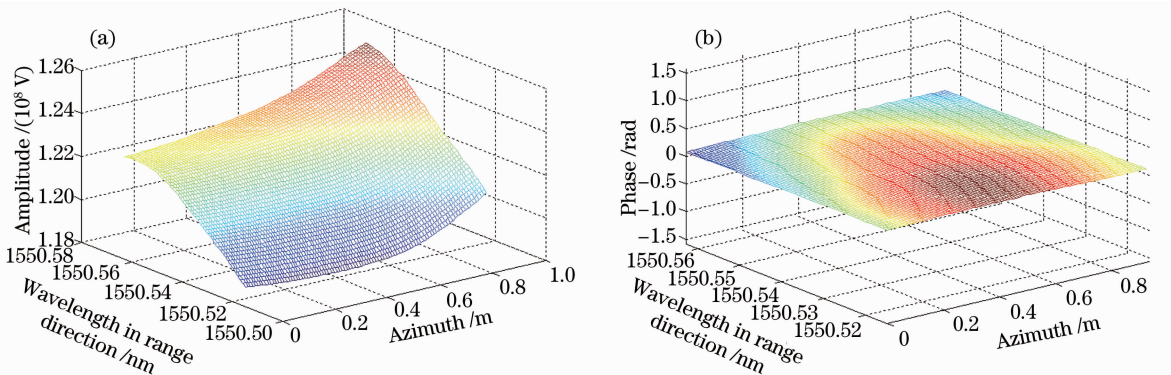


图 16  $l_y=10\text{ m}$ ,  $K\gg 1$ , 天线移动起点在散斑中心时散斑引入的(a)随机振幅分布(b)随机相位分布

Fig. 16 (a) Amplitude distribution and (b) phase distribution when antenna initial position is at the center of the speckle pattern and  $K\gg 1$ ,  $l_y=10\text{ m}$

#### 4 分析与讨论

根据上述模拟结果, 表 1 比较了不同接收天线大小、不同天线积分起点位置情况下接收天线散斑

孔径积分场振幅与相位的统计平均值  $\mu$ 、标准差  $\sigma$  和标准差离率 (Coefficient of variance)  $P_{CV}$ 。已知散斑尺度  $S_y=1.31\text{ m}$ , 天线积分起始位置在散斑边



缘处时,设定其中心坐标为(0,0);天线积分起始位置在散斑中心时,其方位向坐标为散斑在方位向尺度的一半,记为(0.465,0)。

表 1 接收天线散斑孔径积分场统计参量

Table 1 Statistics results of integral antenna aperture speckle field

Antenna width $L_y/m$	$K$	Antenna initial position	Amplitude value /V			Phase value /rad		
			$\mu_a$	$\sigma_a$	$P_{CV}^a$	$\mu_p$	$\sigma_p$	$P_{CV}^p$
0.11	$\ll 1$	(0,0)	$9.2269 \times 10^4$	$1.6904 \times 10^4$	0.1832	1.2129	0.0983	0.0810
		(0.465,0)	$9.5087 \times 10^4$	$2.0381 \times 10^4$	0.2143	1.2843	0.1151	0.0896
1.11	$\approx 1$	(0,0)	$4.8319 \times 10^6$	$9.7261 \times 10^5$	0.2010	1.1198	0.0847	0.0757
		(0.465,0)	$2.4839 \times 10^6$	$6.3164 \times 10^5$	0.2543	0.6530	0.1554	0.2380
1.31	$\approx 1$	(0,0)	$5.2354 \times 10^6$	$1.3598 \times 10^6$	0.2597	0.9510	0.0892	0.0938
		(0.465,0)	$2.7759 \times 10^6$	$7.1497 \times 10^5$	0.2576	0.3402	0.3090	0.9083
1.51	$\approx 1$	(0,0)	$5.5771 \times 10^6$	$1.5690 \times 10^6$	0.2813	0.7415	0.1984	0.2676
		(0.465,0)	$3.4970 \times 10^6$	$8.3705 \times 10^5$	0.2394	0.2276	0.4027	1.7696
10.01	$\gg 1$	(0,0)	$1.2183 \times 10^8$	$1.5732 \times 10^5$	0.0129	0.1590	0.0149	0.0935
		(0.465,0)	$1.2208 \times 10^8$	$1.6347 \times 10^6$	0.0134	0.1605	0.0152	0.0948

由于振幅和相位的平均值不相同,离散程度可以通过标准离差率  $P_{CV} = \sigma/\mu$  反映出来。可以看出:

1) 接收天线  $L_y = 0.11$  m 即  $K \ll 1$  时,天线积分起点位置在散斑中心处振幅的标准离差率  $P_{CV}^a \approx 0.21$  和相位标准离差率  $P_{CV}^p \approx 0.09$ , 分别大于起点位置在散斑边缘情况下振幅的标准离差率  $P_{CV}^a \approx 0.18$ 、相位标准离差率  $P_{CV}^p \approx 0.08$ 。说明此时散斑效应较弱,天线积分起点位置在散斑边缘时天线孔径散斑积分场分布较平缓。

2) 接收天线  $L_y = 1.11, 1.31, 1.51$  m 即  $K \approx 1$  时,振幅分布的标准离差率  $P_{CV}^a \approx P_{CV}^a$ , 离散程度近似相同。相位分布  $P_{CV}^p \ll P_{CV}^p$ , 说明天线积分起点在散斑中心时,接收天线散斑孔径积分场相位分布更加离散,散斑效应剧烈。

3) 接收天线  $L_y = 10.01$  m 即  $K \gg 1$  时,振幅标准离差率  $P_{CV}^a \approx P_{CV}^a \approx 0.01$ , 相位标准离差率  $P_{CV}^p \approx P_{CV}^p \approx 0.09$ , 离散程度几乎没有差别。此时天线散斑的位置关系和散斑效应的强弱基本无关,散斑效应很小。

综上,  $K \ll 1$  时,散斑效应较弱,接收天线积分起点的位置对散斑效应的影响较小;  $K \gg 1$  时,散斑效应最小,接收天线积分起点的位置和散斑效应的大小基本无关;  $K \approx 1$  时,接收天线积分起点的位置对散斑效应的强弱影响很大,天线积分起点位置在散斑图样中心时散斑效应强烈。因此通过合理选择接收天线的大小和积分范围,可以减小散斑效应的影响。

## 5 结 论

分析了合成孔径激光成像雷达中的散斑天线接

收特性,建立了光学天线接收口径散斑孔径积分场的物理模型,分析了影响拍频信号中散斑引入随机振幅和相位大小的因素:1) 天线接收口径与散斑平均宽度之比;2) 接收天线相对位置。模拟了实际 SAIL 系统中接收天线散斑积分场的二维分布。结果表明:当  $K \approx 1$  时,接收天线积分的位置对天线散斑积分场影响最大,当  $K \ll 1, K \gg 1$  时接收天线积分的位置对天线散斑积分场的影响较小。接收天线积分移动过程中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。通过对天线积分散斑场统计特性的进一步分析得到:  $K \approx 1$  时,接收天线散斑孔径积分场振幅和相位的标准离差率最大,散斑效应最强烈;  $K \ll 1$  时,接收天线散斑孔径积分场振幅和相位的标准离差率较小,散斑效应较弱;  $K \gg 1$  时,接收天线散斑孔径积分场振幅和相位的标准离差率最小,散斑效应最小。模拟结果与理论分析相符。因此通过合理选择接收天线积分范围、设计合理天线尺寸可以减小散斑效应的影响。对进一步分析时空散斑效应如何影响 SAIL 目标成像有直接意义。

## 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 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 [M]. Washington: Naval Research Laboratory, 2002.
- 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 ladar [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 ladar [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 ladar for speckle reduction [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 ladar [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 Liu Liren. Synthetic aperture 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.
- 10 Liren Liu. Coherent and incoherent synthetic aperture imaging ladars and laboratory-space experimental demonstrations [J]. *Appl Opt*, 2013, 52(4): 579–599.

栏目编辑: 殷建芳