

# 非对称光斑照明合成孔径激光雷达宽测绘带成像研究

吴 谨<sup>1</sup> 赵志龙<sup>1,2</sup> 段洪成<sup>1,2</sup> 吴曙东<sup>1,2</sup> 黄文武<sup>1</sup>

<sup>1</sup>中国科学院电子学研究所, 北京 100190

<sup>2</sup>中国科学院大学, 北京 100049

**摘要** 合成孔径激光雷达(SAL)能实现远距离目标的高分辨成像,但是,其测绘带宽一般很小,不利于其在对地观测中的应用。针对这一问题,给出了宽测绘带SAL实际成像范围的建议,具体研究了采用方位向短、距离向长的非对称光斑照明实现宽测绘带SAL的成像处理问题。采用波动光学衍射理论,给出了这种宽测绘带SAL的详细成像理论描述和数学仿真成像演示。结果表明,由于光学的短波长特性,非对称光斑照明的宽测绘带SAL也近似遵循基本SAL图像形成方法:傅里叶变换实现距离压缩,匹配滤波实现方位图像聚焦。

**关键词** 遥感;激光雷达;合成孔径;成像理论;宽测绘带

中图分类号 TN958

文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201535.0328003

## Investigation on Image Formation of Wide Swath Synthetic Aperture Ladar Using Non-Symmetric Beam-Pattern Illumination

Wu Jin<sup>1</sup> Zhao Zhilong<sup>1,2</sup> Duan Hongcheng<sup>1,2</sup> Wu Shudong<sup>1,2</sup> Huang Wenwu<sup>1</sup>

<sup>1</sup>*Institute of Electronics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China*

<sup>2</sup>*University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China*

**Abstract** Synthetic aperture ladar (SAL) can achieve long distance objects high resolutions imaging. However, the mapping bandwidth is generally small, which probably limits its applications in land surveillance. In order to solve the problem, practical imaging range of a wide swath SAL is suggested and a wide swath SAL using non-symmetric beam-pattern illumination with short azimuth size and long range size is investigated in detail. By wave optics diffraction theory, detailed theoretical descriptions of the image formation theory on the wide swath SAL as well as the mathematical simulations are given. The results show that due to the characteristic of short optical wavelength, the conventional image formation theory used in SAL data processing is approximately applied in wide swath SAL using non-symmetric beam-pattern illumination, that is, range compression by Fourier transformation and azimuth image focusing by matched filtering.

**Key words** remote sensing; laser radar; synthetic aperture; image formation theory; wide swath

**OCIS codes** 280.6730; 280.4750; 050.1960; 110.2990

## 1 引 言

合成孔径激光雷达(SAL)是合成孔径技术与激光技术相结合的高分辨率成像激光雷达,是微波合成孔径雷达(SAR)技术在激光波段的应用。与SAR相比,SAL具有成像时间短、分辨率高的优点。另外,作为一种光学成像手段,SAL与其他成像激光雷达、普通被动光学成像等相比,可实现与目标距离无关的成像分辨率。因此,SAL可以在远距离高分辨率成像领域得到应用。

近十几年来,SAL高分辨率成像技术研究取得了很大进展<sup>[1-17]</sup>。2006年,美国Raytheon公司和Northrop

收稿日期: 2014-09-24; 收到修改稿日期: 2014-11-12

基金项目: 国家自然科学基金(61178071)

作者简介: 吴 谨(1965—),男,博士,研究员,主要从事脉冲气体激光器及激光雷达等方面的研究。

E-mail: jwu909@263.net

Grumman公司分别采用不同的激光波长成功演示了机载SAL高分辨率技术<sup>[4]</sup>;2011年,美国Lockheed Martin公司也开展了机载SAL实验,并公开发表了机载SAL图像<sup>[5]</sup>;2012年,美国蒙大拿州立大学成功演示了实验室聚束SAL成像和干涉SAL三维成像<sup>[6]</sup>。国内,中国科学院上海光学精密机械研究所刘立人<sup>[8]</sup>独创了直视SAL技术,并且已实现了室内室外成像演示<sup>[9-10]</sup>,其中室外成像距离超过1.2 km<sup>[10]</sup>;中国科学院电子学研究所也在实验室成功演示了高分辨率二维SAL成像和干涉SAL三维成像<sup>[15-17]</sup>。这些研究工作进展预示着,SAL技术可能在不久的将来,形成现实的设备,在国防和民用领域得到应用。

然而,激光波长在微米量级,一般来说,SAL探测激光照射范围很小,属于窄视场(FOV)成像。例如,美国Lockheed Martin公司的机载SAL演示实验,成像FOV约为0.4 mrad,即在1.6 km距离的目标上,测绘带宽度约为1 m<sup>[5]</sup>。机载条件下,如此小的测绘带宽度,将影响SAL在实际工作中的广泛应用。因此,扩大成像测绘带宽度,是机载SAL研究需要解决的重要问题<sup>[18]</sup>。

关于拓展测绘带宽度,形成宽测绘带SAL,已经有一些理论思考<sup>[19-21]</sup>。基于高分辨率SAL成像实验研究的经验和SAL技术的潜在应用,本文提出了宽测绘带SAL成像范围的参考建议,探讨了利用非对称光斑照明实现宽测绘带SAL的问题,并给出了其成像处理方法和仿真成像演示。

## 2 宽测绘带SAL范围建议

SAL一般工作于运动平台,平台运动方向常称为方位向(顺轨向),与运动方向垂直的光束传播方向称为距离向(交轨向)。一段时间内SAL成像面积是平台运动距离与距离向成像尺寸的乘积。因此,SAL有点类似航空摄像机,其测绘带宽度,即距离向的成像尺寸,如图1所示。图1中, $X_0 Y_0$ 为目标所在平面, $W_s$ 即测绘带宽度,成像 $\theta_{FOV} \approx \arctan\left(\frac{W_s \sin \phi}{L_0}\right)$ ,其中, $\phi$ 为光束传播光轴Z与目标平面 $Y_0$ 轴的夹角。

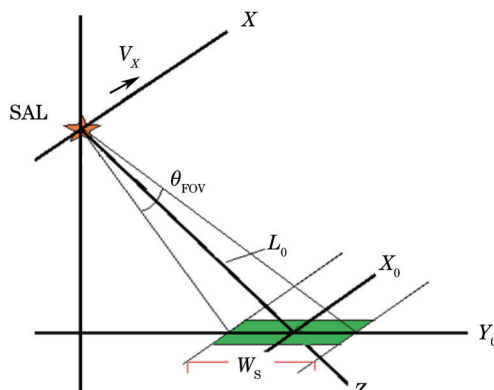


图1 SAL成像测绘带示意图

Fig.1 Schematic of SAL imaging swath

SAL技术尚在发展中,多宽成像范围可以算是宽测绘带SAL,文献中还没有人给出明确的建议。SAL本质上是光学成像设备,主要应用于远距离目标成像探测。常规的远距离光学成像观测设备是望远镜。根据用途不同,望远镜的成像视场大约在 $1^\circ \sim 10^\circ$ 范围。天文望远镜的视场小;普通观景望远镜的视场略大。因此,SAL的测绘带宽应该与现有的远距离光学成像观测设备相比拟,才容易得到应用。

基于上述思考,这里提出一个参考建议,成像FOV与望远镜相比拟的SAL,即达到常规望远镜成像FOV $1^\circ \sim 10^\circ$ 级别的SAL,可算作宽测绘带SAL。

## 3 非对称光斑照明宽测绘带SAL

SAL是主动探测激光雷达,所以照明光束在目标平面上的脚印大小即SAL的成像范围(假设所有目标点回波都能被接收)。因此,为获得SAL的宽测绘带,需设法增大距离向的光束脚印尺寸。

SAL采用激光作为探测光,其波长在微米量级。这使SAL可以用较短的合成孔径长度得到较高的方位

分辨率。由于方位向光斑尺寸不影响 SAL 的测绘带宽,可以将通常对称的光斑设计为非对称的光斑:方位向短(满足合成孔径长度要求即可),距离向长(获得大的距离向照明范围)。以这种方式,拓展 SAL 的测绘带宽度,形成宽测绘带 SAL,称为非对称光斑照明宽测绘带 SAL。

### 3.1 非对称光斑照明宽测绘带 SAL 成像理论

文献[22-23]采用光学衍射理论,建立了条带模式 SAL 成像数学模型。本节将继续沿用相似的理论推导,建立非对称光斑照明宽测绘带 SAL 成像理论。

为了简化分析,该成像理论做出如下假设:

1) SAL 工作于条带模式,系统发射/接收口径合置,且为方形口径。

收发口径尺寸为  $D_x \times D_y$ , 其中,  $D_x$  为方位向尺寸,  $D_y$  为垂直于方位向尺寸。非对称照明光斑通过要求  $D_x \gg D_y$  实现。

2) SAL 工作于一步一停模式,几何关系如图 2 所示<sup>[22-23]</sup>。

图 2 中,设置有三套直角坐标系,  $XYZ$  称为主坐标系,坐标原点为  $O$ ;  $X_0Y_0Z_0$  为目标坐标系,坐标原点为  $O_0$ ,其中,  $X_0$  轴与  $X$  轴平行,  $Y_0$  轴与主坐标系  $Z$  轴有夹角  $\phi$ , 原点  $O_0$  与主坐标系原点  $O$  距离为  $L_0$ ,  $X_0Y_0$  也为成像平面;  $X''Y''$  为雷达坐标系,坐标原点为  $O_m$ ,在主坐标系的位置为  $(x_m, 0, 0)$ ,其中,  $X''$  轴与主坐标系  $X$  轴重合,  $Y''$  轴与主坐标系  $Y$  轴平行,在主坐标系中,雷达坐标系以  $v_x$  速度沿  $X$  轴匀速运动。

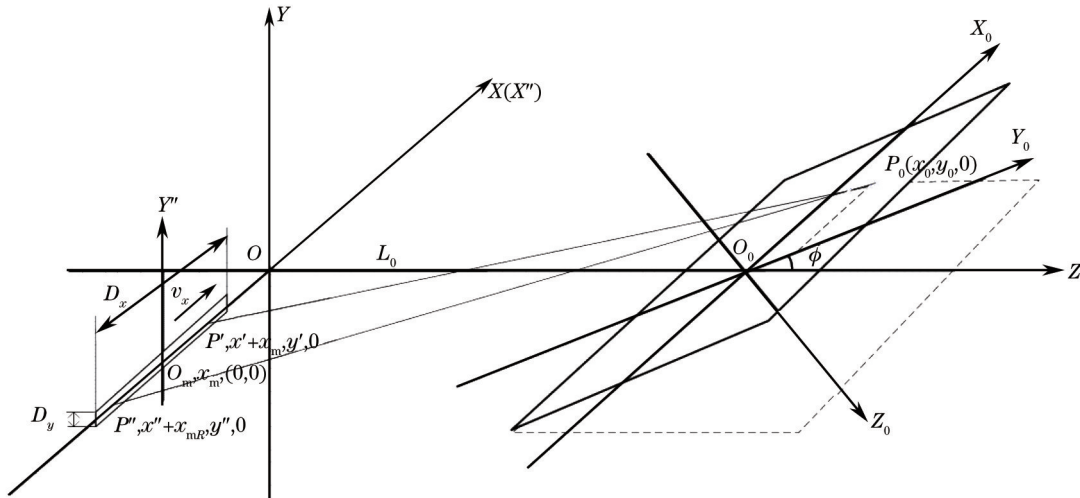


图 2 宽测绘带 SAL 几何坐标关系

Fig.2 Coordinate geometry relationship of wide swath SAL

3) 只考虑面目标 ( $z_0 = 0$ ), 目标点的振幅散射系数可近似离散化表示为

$$T(P_0) = T(x_0, y_0) \approx C_{pq} \cdot \delta(x_p - x_0) \delta(y_q - y_0). \quad (1)$$

4) SAL 采用准单色线性调频激光作为探测照明光。

照明激光的光场表达式为

$$U_s(x, y, z, t) = A \exp[-j(2\pi f_0 t + \pi k t^2 + \Phi_0)], \quad t \in [0, \tau_{\text{pul}}], \quad (2)$$

式中  $\tau_{\text{pul}}, A, f_0, k, \Phi_0$  分别为调频宽度、振幅、起始频率、调频率和初位相。

5) 光学外差探测直接在接收口径上进行。

用于外差探测的本振激光来源于照明激光,相对于照明激光,有一个参考延迟,表示为

$$U_L(x, y, z, t) = A_L \exp[-j(2\pi f_0(t - t_0) + \pi k(t - t_0)^2 + \Phi_0)], \quad t - t_0 \in [0, \tau_{\text{pul}}], \quad (3)$$

式中  $t_0, A_L$  分别为参考延迟和本振光振幅。

6) 考虑理想的情况,光束传输路径上没有大气干扰。

7) SAL与目标平面的距离  $L_0$  足够远,使收发距离关系满足如下近似要求。

对任意发射点  $P'(x',y')$ ,有

$$L(P_0;P') = \sqrt{(x' + x_m - x_0)^2 + (y' - y_0 \sin \phi)^2 + (L_0 + y_0 \cos \phi)^2} \approx L_0(y_0,0) + \frac{(x_m - x_0)^2}{2L_0(y_0,0)} + \frac{y'(-y_0 \sin \phi + z_0 \cos \phi)}{L_0(y_0,0)} + \frac{x'(x_m - x_0)}{L_0(y_0,0)}, \quad (4)$$

同理,对任意接收口径点  $P''(x'',y'')$ ,有

$$L(P'';P_0) = \sqrt{(x'' + x_m - x_0)^2 + (y'' - y_0 \sin \phi)^2 + (L_0 + y_0 \cos \phi)^2} \approx L_0(y_0,0) + \frac{(x_m - x_0)^2}{2L_0(y_0,0)} + \frac{y''(-y_0 \sin \phi + z_0 \cos \phi)}{L_0(y_0,0)} + \frac{x''(x_m - x_0)}{L_0(y_0,0)}, \quad (5)$$

在(4)、(5)两式中,  $P_0$  为目标点,  $x_m$  为 SAL 的方位位置(主坐标系),且距离表达式为

$$L_0(y_0,0) = \sqrt{L_0^2 + 2L_0 y_0 \cos \phi + y_0^2}. \quad (6)$$

根据准单色光衍射方程<sup>[22]</sup>,当 SAL 在主坐标系  $(x_m,0,0)$  方位位置时,接收口径上点  $P''(x'',y'')$  的全部目标散射回波近似为

$$U_R^{(P'')} (x_m, t) \approx \left( \frac{1}{j\lambda_0 L_0} \right)^2 \iint dx' dy' \cdot \iint dx_0 dy_0 \cdot U_s \left[ x', y', t - \frac{L(P_0;P')}{c} - \frac{L(P'';P_0)}{c} \right] \cdot T(P_0), t \in [t_{\min}, t_{\max}], \quad (7)$$

式中  $c$  为光速,  $\lambda_0 = c/f_0$  为波长,  $t_{\min}$ ,  $t_{\max}$  分别为目标场景最近点和最远点的回波时间。

根据假设 5),在主坐标系方位位置  $(x_m,0,0)$  时,SAL 全部外差信号为

$$U_{\text{het}}(x_m, t) = \int dP'' \cdot U_R^{(P'')} (x_m, t) \cdot [U_L(P'', t)]^*, t \in [t_{\min}, t_0 + \tau_{\text{pul}}], \quad (8)$$

式中假定了  $t_{\min} \geq t_0$ 。

按照参考文献[22-23]给出的推导方法,根据上面的七点假设,进一步整理(8)式,可得到当 SAL 在主坐标系  $(x_m,0,0)$  方位位置时,外差信号近似为

$$U_{\text{het}}(x_m, t) \approx A_0 \sum_{p,q} C_{pq} \exp \left\{ -j \left[ 2\pi f_0 \left\{ t_0 - \frac{1}{c} \left[ 2L_0(y_q,0) + \frac{(x_m - x_p)^2}{L_0(y_q,0)} \right] \right\} + \pi k \left[ t_0 - \frac{2L_0(y_q,0)}{c} \right] \left[ 2t - t_0 - \frac{2L_0(y_q,0)}{c} \right] \right] \right\} \times \text{sinc}^2 \left[ \frac{D_x}{\lambda_0 L_0(y_q,0)} (x_m - x_p) \right] \text{sinc}^2 \left[ \frac{D_y}{\lambda_0 L_0(y_q,0)} y_q \sin \phi \right], t \in [0, \tau_{\text{het}}], \quad (9)$$

式中  $A_0$  包含所有与位置坐标无关的常数,  $c$  为光速,  $\tau_{\text{het}}$  为有效外差信号长度,一般  $\tau_{\text{het}} \leq \tau_{\text{pul}}$ 。

(9)式为这种非对称光斑照明的 SAL 数据方程。从中可以看出,方位坐标  $x_m$  与时间  $t$  之间没有耦合,可分离变量处理。这个结果也是用非对称光斑照明实现宽测绘带 SAL 的出发点之一。因此,(9)式表达的宽测绘带 SAL 的图像形成方法与常规 SAL 完全相同,即对时间变量进行傅里叶变换得到距离压缩像,对方位坐标进行匹配滤波得到方位聚焦像。

对(9)式时间变量做傅里叶变换,进行距离聚焦,得到

$$\mathfrak{F}\{U_{\text{het}}(x_m, t)\} \approx \tau_{\text{het}} A_0 \sum_{p,q} C_{pq} \exp \left\{ -j \left[ 2\pi f_0 \left\{ t_0 - \frac{1}{c} \left[ 2L_0(y_q,0) + \frac{(x_m - x_p)^2}{L_0(y_q,0)} \right] \right\} + \pi k \left[ t_0 - \frac{2L_0(y_q,0)}{c} \right] \left[ -t_0 - \frac{2L_0(y_q,0)}{c} \right] \right] \right\} \times \exp \left\{ -j\pi \left[ f_r + k \left[ t_0 - \frac{2L_0(y_q,0)}{c} \right] \right] \right\} \tau_{\text{het}} \text{sinc} \left\{ \left[ f_r + k \left[ t_0 - \frac{2L_0(y_q,0)}{c} \right] \right] \tau_{\text{het}} \right\}, \quad (10)$$

式中认为目标在光斑脚印范围内,所以忽略了两个  $\text{sinc}^2$  函数。 $f_r$  为时间变量  $t$  对应的傅里叶变换频率。

对方位聚焦,采用如下匹配滤波器

$$h(x_m) = \exp\left\{-j2\pi f_0 \left[\frac{x_m^2}{c \cdot L_0(y_q, 0)}\right]\right\}. \quad (11)$$

对(10)式进行匹配滤波,得到

$$\begin{aligned} \Im\{U_{\text{het}}(x_m, t)\} \otimes h(x_m) &\approx \tau_{\text{het}} D_{\text{sa}} A_0 \sum_{p,q} C_{pq} \exp\left\{-j\left[2\pi f_0 \left\{t_0 - \frac{1}{c} \left[2L_0(y_q, 0) + \frac{(x_p^2 - x^2)}{L_0(y_q, 0)}\right]\right\} + \right.\right. \\ &\quad \left.\left. \pi k \left[t_0 - \frac{2L_0(y_q, 0)}{c}\right] \left[-t_0 - \frac{2L_0(y_q, 0)}{c}\right]\right]\right\} \exp\left\{-j\pi \left\{f_r + k \left[t_0 - \frac{2L_0(y_q, 0)}{c}\right]\right\} \tau_{\text{het}}\right\} \\ &\quad \text{sinc}\left\{\left\{f_r + k \left[t_0 - \frac{2L_0(y_q, 0)}{c}\right]\right\} \tau_{\text{het}}\right\} \text{sinc}\left\{\frac{f_0(x - x_p)}{cL_0(y_q, 0)} 2D_{\text{sa}}\right\}, \end{aligned} \quad (12)$$

式中  $D_{\text{sa}}$  为合成孔径长度。(12)式右边实际上是目标图像,这个图像在  $[x_p, L_0(y_q, 0)]$  坐标系中。

从(12)式可得到图像分辨率为

方位向:

$$\rho_x = \frac{c}{2f_0 D_{\text{sa}}} L_0(y_q, 0), \quad (13)$$

距离向:

$$\rho_r = \frac{c}{2k\tau_{\text{het}}}. \quad (14)$$

## 3.2 几点讨论

### 3.2.1 对称光斑是非对称光斑的特例

从上节给出的非对称光斑照明宽测绘带 SAL 的成像理论可以看出,其图像形成过程与常规 SAL 成像处理<sup>[22-23]</sup>相似。实际上,常规对称光斑是非对称光斑的特例。对于常规对称光斑,距离向的尺寸和方位向尺寸相同,并且都很小,所以下面的近似成立:

$$\frac{1}{L_0(y_q, 0)} \approx \frac{1}{L_0}. \quad (15)$$

这时,对 SAL 成像的描述即文献[22-23]中的一般描述。

### 3.2.2 非对称光斑照明宽测绘带 SAL 成像的近似处理

由(13)式可知,理论上,非对称光斑照明 SAL 采用相同合成孔径长度,由于每个距离单元的匹配滤波器略有不同,方位成像分辨率会随目标距离位置的变化而变化。

根据(6)式,得到

$$L_0(y_0, 0) - L_0 \approx y_0 \cos \phi + \frac{y_0^2}{2L_0}. \quad (16)$$

(16)式表明,在目标远离场景中心时,距离向图像会有些变形,但是,由于  $L_0 \gg |y_0|$ ,这种变形可以忽略。图3给出了(16)式中  $L_0(y_0, 0)$  与  $y_0$  之间一一对应的几何关系。

图4是(16)式的具体举例。由图4可知,当  $L_0 = 10 \text{ km}$ ,  $\phi = \frac{\pi}{4}$  时,目标范围 1000 m 内(测绘带  $\theta_{\text{fov}} = 70.7 \text{ mrad}$ ),  $L_0(y_0, 0)$  与  $y_0$  仍有良好的线性关系(相关系数为 0.9999)。换言之,(12)式代表的图像与目标在  $(x_p, y_q)$  平面上的实际图像一一对应,距离向变形可忽略。

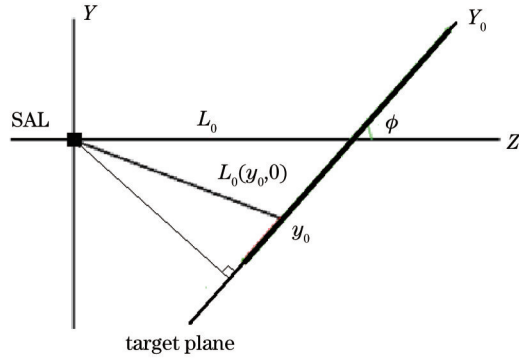


图 3  $L_0(y_0, 0)$  与  $y_0$  的几何关系

Fig.3 Geometrical relationship between  $L_0(y_0, 0)$  and  $y_0$

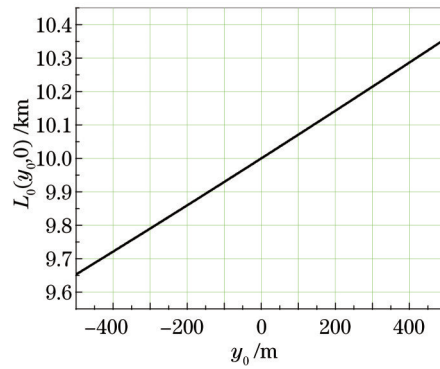


图 4 当  $L_0 = 10 \text{ km}$ ,  $\phi = \frac{\pi}{4}$  时,  $L_0(y_0, 0)$  与  $y_0$  的关系

Fig.4 Relationship between  $L_0(y_0, 0)$  and  $y_0$ , when  $L_0 = 10 \text{ km}$ ,  $\phi = \frac{\pi}{4}$

图 4 中, 在目标场景 1000 m 范围内,  $L_0(y_0, 0)$  与  $L_0$  差距不到 5%, 这就是说, 理论上, 方位匹配滤波器需要采用(11)式。但是, 实际操作时, 对匹配滤波器, 可认为近似关系(15)式仍然成立。

### 3.2.3 关于有效外差信号长度

在(9)式中, 引入了有效外差信号时间变量  $\tau_{\text{het}}$ 。所谓有效的外差信号长度, 是指实际用于成像的外差信号长度, 一般  $\tau_{\text{het}} \leq \tau_{\text{pul}}$ 。

SAL工作于光学波长, 频率很高, 回波相位不能直接探测取得, 一般通过光学外差探测方式获得。光学

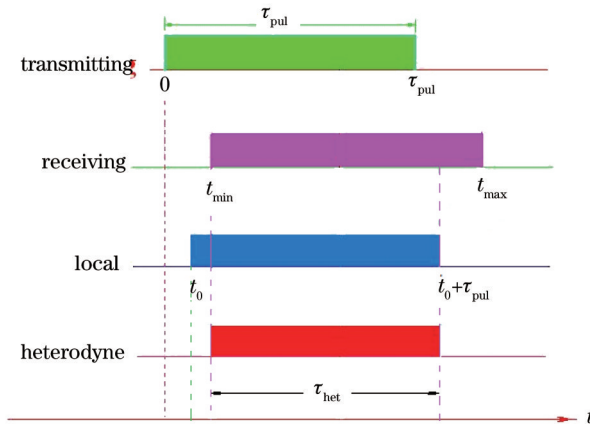


图 5 时序关系 ( $\tau_{\text{pul}}, t_0, t_{\text{min}}, t_{\text{max}}, \tau_{\text{het}}$ )

Fig.5 Time sequences relationship ( $\tau_{\text{pul}}, t_0, t_{\text{min}}, t_{\text{max}}, \tau_{\text{het}}$ )

外差探测中的本振光与探测光一般来源于同一光源。图5给出了发射激光脉冲、目标回波脉冲、本振光脉冲和外差信号脉冲之间的时序关系。由图5可知,考虑到SAL主要用于远距离目标成像,本振光的延迟光纤长度有限,所以,对于实际的SAL系统,有  $t_0 \leq t_{\min}$  及  $\tau_{\text{het}} \leq \tau_{\text{pul}} + t_0 - t_{\min} \leq \tau_{\text{pul}}$ , 即实际能用于SAL成像的外差信号长度,一般不超过发射信号的脉冲长度。

## 4 仿真成像演示

### 4.1 仿真参数

表1为仿真计算参数。需要说明的是,表1中的参数(如收发口径尺寸)仅作为仿真计算用,并不表示在实际作用距离为10 km的SAL可按此参数设计。

根据表1的参数,收发口径纵横比  $\frac{D_y}{D_x} = 8 \times 10^{-4}$ , 严重不对称。相应目标平面光斑尺寸为  $0.30 \text{ m} \times 530 \text{ m}$ , 对应测绘带  $\theta_{\text{FOV}} = 37.5 \text{ mrad}$  (约为  $2^\circ$ )。

表1中,  $z_0 = 0$ , 表示仿真计算时,只考虑在目标平面上的二维目标,没有考虑高程分布。

表1 仿真参数

Table 1 Simulation parameters

Item	Parameter	Value
1	Wavelength $\lambda_0$	1.5 $\mu\text{m}$
2	Chirp rate $k$	85 THz/s
3	Heterodyne pulse length $\tau_{\text{het}}$	100 $\mu\text{s}$
4	Transmitting/Receiving aperture size $D_x \times D_y$	5 cm $\times$ 40 $\mu\text{m}$
5	Grazing angle $\phi$	$45^\circ$
6	Target center distance $L_0$	10 km
7	Synthetic aperture length $D_{\text{sa}}$	30 cm
8	$z_0$	0

由表1参数计算得到的目标平面SAL图像分辨率为

$$\begin{cases} \rho_x = \frac{c}{2f_0 D_{\text{sa}}} L_0(y_q, z_0) \approx \frac{\lambda_0}{2D_{\text{sa}}} L_0 = \frac{D_x}{2} = 2.5 \text{ cm} \\ \rho_y = \frac{c}{2k\tau_{\text{het}} \cos \phi} = 2.5 \text{ cm} \end{cases} \quad (17)$$

因此,仿真计算中的SAL,在10 km距离上,测绘带宽超过500 m,图像分辨率为  $2.5 \text{ cm} \times 2.5 \text{ cm}$ 。

### 4.2 仿真成像结果

图6为一个距离向长500 m、方位向宽25 mm的均匀散射细线目标的仿真成像结果。图6(a)为目标示意图,是目标场景中心的一根长500 m的细线;图6(b)为采用Matlab软件仿真计算得到的SAL成像。由图6(b)可知,对一个距离向为500 m的线状目标,按照给出的成像理论处理,得到距离向线状分布的图像。根据成像计算数据,可得到距离向长度也是500 m。这表明,采用方位向短,距离向长的非对称光斑照明方式,能够拓宽SAL的测绘带。另外,根据(9)式,探测激光在目标平面存在sinc函数分布。这一方面限制了成像范围,另一方面降低了远离光斑中心处目标的回波强度。成像处理时,对处在脚印边缘的目标可以补偿这种光照的不均匀。图6(b)已经做了这种补偿。

图7为三个距离向长10 m、方位向宽300 mm的均匀散射矩形目标的SAL成像仿真结果。图7(a)为目标设置示意图。在目标平面  $X_0 Y_0$  上,三个矩形的中心位置分别为(0,245)、(0,0)和(0,-245)。图7(b)为SAL成像图(已补偿了光照的不均匀)。由图7(b)可知,对于距离向500 m范围内分布的三个矩形目标,仿真成像也是三个矩形。图7(b)中SAL仿真成像质量好,距离向没有明显形变。考虑到现实的目标都是连续分布的,对这种非对称光斑照明的宽测绘带SAL,成像方位匹配滤波时,采用(15)式,SAL图像与实际目标比,变形可以忽略,不影响目标识别,同时,还有利于减少计算量。

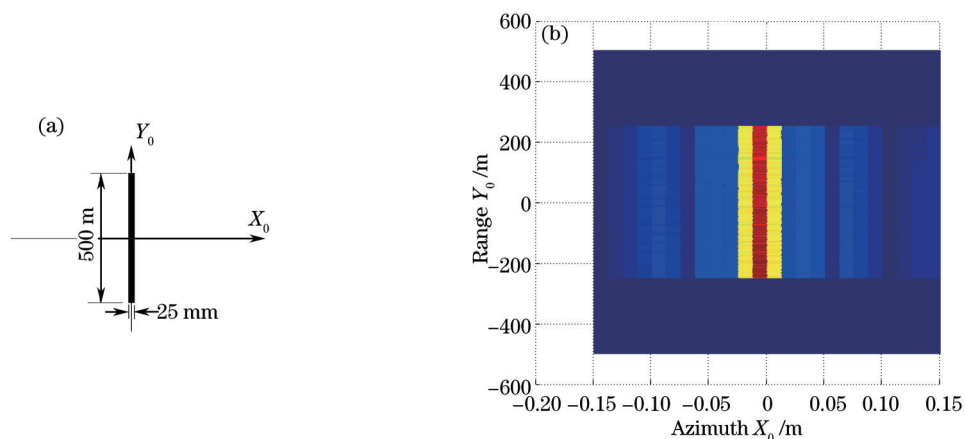


图 6 一个 500 m 长细线的 SAL 仿真成像。(a) 目标示意图; (b) SAL 成像  
Fig.6 Simulated SAL image of a 500 m long line. (a) Diagram of target; (b) SAL image

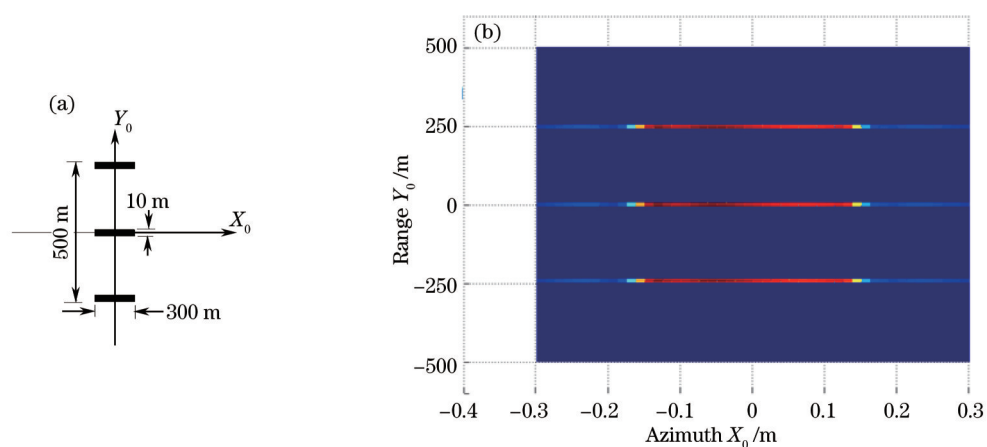


图 7 三个矩形目标的 SAL 仿真成像。(a) 目标示意图; (b) SAL 成像  
Fig.7 Simulated SAL images of three rectangular planes. (a) Diagram of target; (b) SAL image

## 5 结 论

针对 SAL 的窄测绘带宽问题,考虑到 SAL 短波长特性,探讨了采用方位向短、距离向长的非对称光斑照明,实现宽测绘带 SAL 的方案。基于光学衍射理论,给出了这种方案的成像理论描述和仿真成像演示。理论分析表明,这种体制的宽测绘带 SAL,其成像理论有非常简洁的描述,其成像处理可近似采用对称光斑照明体制 SAL 的成像处理方式;仿真成像演示,在 10 km 的目标距离,500 m 的测绘带宽下,也有良好的 SAL 成像。因此,采用非对称光斑照明,能够实现本文建议的宽测绘带 SAL。

在理论分析中,采用了矩形光斑假设,这主要是考虑可得到解析解。实际设计中,可采用椭圆型光斑照明。关于椭圆光斑 SAL 的处理,可参考文献[24]。虽然 SAL 研究已经成功实现实验室高分辨率成像,并有了机载演示结果,但是,SAL 技术尚在发展中,还有许多关键技术问题需要解决。拓宽测绘带问题,至少在机载 SAL 应用中,是必须面临的挑战。采用方位向短、距离向长的非对称光斑照明实现宽测绘带 SAL 的方案,系统设计和成像处理都不复杂,在具体的实现中有参考意义。

## 参 考 文 献

- 1 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.
- 2 S M Beck, J R Buck, W F Buell, *et al.*. Synthetic-aperture imaging radar: Laboratory demonstration and signal processing [J]. Appl Opt, 2005, 44(35):7621-7629.
- 3 J R Buck, B W Krause, A I R Malm, *et al.*. Synthetic aperture imaging at optical wavelengths [C]. Conference on Lasers and Electro-Optics, Optical Society of America, 2009: PThb3.



- 4 J Ricklin, M Dierking, S Fuhrer, *et al.*. Synthetic aperture lidar for tactical imaging [J]. DARPA Strategic Technology Office, 2007.
- 5 B W Krause, J Buck, C Ryan, *et al.*. Synthetic aperture lidar flight demonstration [C]. Applications and Technology. Optical Society of America, 2011.
- 6 S Crouch, Z W Barber. Laboratory demonstrations of interferometric and spotlight synthetic aperture lidar techniques [J]. Opt Express, 2012, 20(22): 24237–24246.
- 7 S Turbide, L Marchese, M Terroux, *et al.*. An all-optronic synthetic aperture lidar [C]. SPIE, 2012, 8542: 854213.
- 8 Liu Liren. Principle of down looking synthetic aperture imaging lidar [J]. Acta Optica Sinica, 2012, 32(9): 0928002.  
刘立人. 直视合成孔径激光成像雷达原理[J]. 光学学报, 2012, 32(9): 0928002.
- 9 L Liu. Coherent and incoherent synthetic-aperture imaging ladars and laboratory-space experimental demonstrations [J]. Appl Opt, 2013, 52(4): 579–599.
- 10 Zhu Luan, Jianfeng Sun, Yu Zhou, *et al.*. Down-looking synthetic aperture imaging lidar demonstrator and its experiments over 1.2 km outdoor [J]. Chin Opt Lett, 2014, 12(11): 111101.
- 11 Liu Liren, Zhou Yu, Zhi Yanan, *et al.*. A large aperture synthetic aperture imaging lidar 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验证[J]. 光学学报, 2011, 31(9): 0900112.
- 12 Dai Enwen, Sun Jianfeng, Yan Aiming, *et al.*. Demonstration of a laboratory Fresnel telescope synthetic aperture imaging lidar [J]. Acta Optica Sinica, 2012, 32(5): 0528003.  
戴恩文, 孙建峰, 闫爱明, 等. 菲涅耳望远镜合成孔径激光雷达实验室验证[J]. 光学学报, 2012, 32(5): 0528003.
- 13 Guo Liang, Xing Mengdao, Zhang Long, *et al.*. Research on indoor experimentation of range SAL imaging system [J]. Science in China Series E-Technological Sciences, 2009, 39(10): 1678–1684.  
郭亮, 邢孟道, 张龙, 等. 室内距离向合成孔径激光成像的实验研究[J]. 中国科学(E辑): 技术科学, 2009, 39(10): 1678–1684.
- 14 Hong Guanglie, Wang Jianyu, Meng Zhaohua, *et al.*. Chirped amplitude modulation and range dimension processing of near infrared synthetic aperture lidar [J]. Journal of Infrared and Millimeter Waves, 2009, 28(3): 229–234.  
洪光烈, 王建宇, 孟昭华, 等. Chirp强度调制与近红外激光合成孔径雷达距离向处理[J]. 红外与毫米波学报, 2009, 28(3): 229–234.
- 15 Wu Jin, Yang Zhaosheng, Zhao Zhilong, *et al.*. Laboratory demonstration on synthetic aperture lidar imaging with one-way far-field diffraction [J]. Journal of Infrared and Millimeter Waves, 2013, 32(6): 514–518.  
吴谨, 杨兆省, 赵志龙, 等. 单程远场衍射合成孔径激光雷达成像实验室演示[J]. 红外与毫米波学报, 2013, 32(6): 514–518.
- 16 Z Yang, J Wu, Z Zhao, *et al.*. Investigation on layover imaging in synthetic aperture lidar [J]. Frontiers of Optoelectronics, 2013, 6(3): 251–260.
- 17 Zhilong Zhao, Jin Wu, Yuanyuan Su, *et al.*. Three-dimensional imaging interferometric synthetic aperture lidar [J]. Chin Opt Lett, 2014, 12(9): 091101.
- 18 Wu Jin. On the development of synthetic aperture lidar imaging [J]. Journal of Radars, 2012, 1(4): 353–360.  
吴谨. 关于合成孔径激光雷达成像研究[J]. 雷达学报, 2012, 1(4): 353–360.
- 19 Lu dong, Sun Jianfeng, Zhou Yu, *et al.*. Analysis on detection capability of wide field receiving synthetic aperture imaging lidar [J]. Acta Optica Sinica, 2013, 33(7): 0728003.  
卢栋, 孙建峰, 周煜, 等. 大视场接收合成孔径激光成像雷达探测能力分析[J]. 光学学报, 2013, 33(7): 0728003.
- 20 Li Xiaozhen, Wu Yufeng, Guo Liang, *et al.*. Frequency scaling algorithm for synthetic aperture lidar imaging with wide-scene [J]. Acta Optica Sinica, 2013, 33(12): 1228004.  
李小珍, 吴玉峰, 郭亮, 等. 一种适用于合成孔径激光雷达宽场景成像的频域变标算法 [J]. 光学学报, 2013, 33(12): 1228004.
- 21 S Turbide, L Marchese, M Terroux, *et al.*. Investigation of synthetic aperture lidar for land surveillance applications [C]. SPIE, 2013, 8897: 889709.
- 22 Wu Jin. Matched filter in synthetic aperture lidar imaging [J]. Acta Optica Sinica, 2010, 30(7): 2123–2129.  
吴谨. 合成孔径激光雷达成像之匹配滤波器[J]. 光学学报, 2010, 30(7): 2123–2129.
- 23 Zhao Zhilong, Wu Jin, Li Feifei, *et al.*. Calculation and simulation on vibrating targets imaging in stripmap mode synthetic aperture lidar [J]. Acta Optica Sinica, 2012, 32(8): 0828006.  
赵志龙, 吴谨, 李斐斐, 等. 条带模式合成孔径激光雷达振动目标成像的计算与仿真[J]. 光学学报, 2012, 32(8): 0828006.
- 24 Liu Liren. 2D Fourier-transform imaging algorithm for synthetic aperture imaging lidar [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.