

# 条带式合成孔径激光雷达光轴影响距离成像研究

朱炳祺<sup>1,2</sup> 吴 谨<sup>1</sup> 赵美静<sup>1,2</sup> 王东蕾<sup>1</sup>

(<sup>1</sup>中国科学院电子学研究所, 北京 100190)

(<sup>2</sup>中国科学院研究生院, 北京 100049)

**摘要** 条带式合成孔径激光雷达(SAL)系统中光轴角包括俯仰角和水平偏离角两方面,其中光轴的水平偏离角会导致发射孔径运动轴与其孔径方位向坐标轴不平行,从而导致距离向图像失真。从理论出发推导出了两轴夹角与其失真关系的公式,并通过实验观察验证了由此引起的距离向图像失真。在实际的条带式 SAL 系统设计中,这种严重的图像失真是必须要解决的问题。通过点目标对系统进行校正的方法,消去了因两轴夹角而产生的距离向和方位向之间的耦合,是保证 SAL 系统能进行复杂面目标成像的必要条件。

**关键词** 合成孔径激光雷达;距离成像;条带模式;校正

中图分类号 TN958

OCIS 110.2990 280.3640 280.6730

文献标识码 A

## Influence of Optical Axis on Range Imaging in Stripmap Synthetic Aperture Ladar

Zhu Bingqi<sup>1,2</sup> Wu Jin<sup>1</sup> Zhao Meijing<sup>1,2</sup> Wang Donglei<sup>1</sup>

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

(<sup>2</sup>Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

**Abstract** The angles of optical axis in the stripmap synthetic aperture ladar(SAL) system include two aspects: the pitch angle and the horizontal angle. The horizontal angle leads to the fact that the antenna aperture moving axis is not parallel to the azimuth moving direction which causes the image distortion. Formulas are deduced theoretically on the relationship between two-axis angle and distortion, and experiments are carried out to prove this situation. The results show that the image distortion is severe in the actual stripmap SAL system. The way on image correction eliminates this coupling on range and azimuth direction, and is necessary for the complex two-dimensional imaging.

**Key words** synthetic aperture ladar; range image; stripmap; correction

## 1 引言

合成孔径激光雷达(SAL)的原理来自于微波合成孔径雷达(SAR),是利用激光短波长的优势获得超过光学衍射极限分辨率的成像雷达。2002年美国海军科研(NRL)实验室<sup>[1]</sup>、2005年美国空军实验室<sup>[2]</sup>分别报道了基于光纤技术的 SAL 实验室成像。2006年,美国宣称成功进行了机载 SAL 的实验。受此影响,国内很多研究机构也都开展了一系列对于 SAL 成像的研究工作<sup>[3~10]</sup>。

理论上,SAL 系统相对于 SAR 有成像速度快、合成孔径时间短等优点,但将合成孔径技术应用于激光波段是一个极具挑战的任务。如果直接进行机载 SAL 实验,由于很多的因素不可控制,很有可能得不到理想的结果。因此对 SAL 系统的研究应首先搭建一个实验室原理演示系统,使诸多不确定因素都在可控制的

收稿日期: 2010-05-19; 收到修改稿日期: 2010-07-23

基金项目: 国家 863 计划(2007AA12Z107)资助课题。

作者简介: 朱炳祺(1984—),男,硕士研究生,主要从事合成孔径激光雷达成像等方面的研究。

E-mail: zhu\_bingqi@hotmail.com

导师简介: 吴 谨(1965—),男,博士,研究员,博士生导师,主要从事合成孔径激光雷达成像和新型激光产生技术与系统等方面的研究。E-mail: jwu909@263.net

范围内,以探索 SAL 成像所涉及的关键技术问题。

SAL 成像的高分辨率对 SAL 系统本身的发射激光光轴精确程度有较高的要求。发射光轴的影响包括两个方面:光轴的俯仰角和水平偏离角。俯仰角度的存在导致了目标侧视角度的变化;而水平偏离角则会使雷达孔径平面水平轴与雷达运动轴存在夹角。实际情况中,雷达孔径平面水平轴与雷达运动轴也并不能保证完全平行,导致方位分辨率与距离分辨率之间存在耦合,引起 SAL 图像的失真,实际的 SAL 系统必须消除这种现象。

本文基于光学衍射理论,详细分析了条带式 SAL 成像系统雷达运动轴与孔径方位向坐标轴之间的相互关系对距离向分辨率的影响,并进行了相关实验。

## 2 理论模型分析

### 2.1 理想 SAL 工作模型

准单色光的衍射光场方程近似为

$$U'(P_0, t) = \frac{1}{j\lambda_0 L_0} \iint_S U\left(P, t - \frac{L}{c}\right) dx dy, \quad (1)$$

式中  $U'(P_0, t)$  为  $P_0$  点的衍射光场,  $L_0$  为发射孔径与目标平面的中心距,  $L$  为目标平面点  $P_0$  与发射孔径面上一点  $P$  的距离, 载波波长  $\lambda_0 = c/f_0$ , 积分是对发射孔径  $S$  进行的。

设 SAL 发射的激光为线性调频波, 即

$$U_0(x, y, t) = A \exp[-j(2\pi f_0 t + \pi k t^2 + \phi_{s0})], \quad |t| \leq \tau_{\text{pul}}/2, \quad (2)$$

式中  $A$  为振幅,  $f_0$  为载频,  $k$  为调频率,  $\phi_{s0}$  为光场初相位,  $\tau_{\text{pul}}$  为脉冲持续时间。本振信号通过分离发射信号获得, 其延迟为  $t_0$ , 即

$$U_L(u, v, t) = A_L \exp[-j(2\pi f_0(t - t_0) + \pi k(t - t_0)^2 + \phi'_{s0})], \quad |t - t_0| \leq \tau_{\text{pul}}/2, \quad (3)$$

则外差信号为

$$r(t) = \iint dudv U(u, v, t) U_L^*(u, v, t), \quad (4)$$

式中  $u, v$  为目标平面某点坐标。

图 1 是侧视合成孔径激光雷达的几何图。其中  $XYZ$  坐标系为主坐标系,  $(X_0 O_0 Y_0)$  为目标平面坐标系,  $(X' O' Y')$  为雷达孔径坐标系, 目标平面的  $X_0$  轴与主坐标系  $X$  轴平行,  $Y_0$  轴在主坐标系  $YOZ$  平面内, 且与  $Z$  轴成  $\phi$  角(正侧视时  $\phi = 45^\circ$ )。在主坐标系中, 雷达采用收发合置的方式, 沿  $X(X')$  轴运动, 孔径中心坐标为  $O'(x_m, 0)$ 。

由图 1 可得, 在目标平面坐标系中, 目标点  $P_0(x_0, y_0)$  与孔径上某点  $P(x, y, 0)$  的距离为

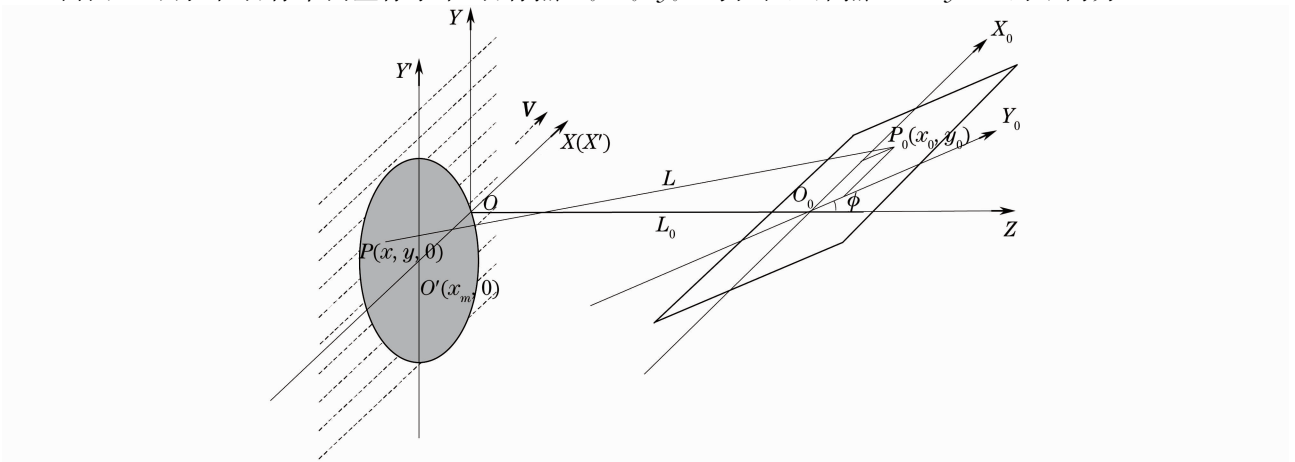


图 1 理想 SAL 空间几何图示

Fig. 1 Space geometry in ideal stripmap SAL

$$L(x, y, z; x_0, y_0) = \sqrt{(x - x_0)^2 + (y - y_0 \sin \phi)^2 + (L_0 + y_0 \cos \phi)^2}. \quad (5)$$

在雷达孔径坐标系 ( $X'O'Y'$ ) 中, 孔径上  $P$  点坐标为  $(x', y')$ , 则有

$$x = x' + x_m; \quad y = y'; \quad z = 0, \quad (6)$$

$$L(x', y'; x_0, y_0) = L(x, y, z; x_0, y_0) = \sqrt{(x' + x_m - x_0)^2 + (y' - y_0 \sin \phi)^2 + (L_0 + y_0 \cos \phi)^2} \approx L_0 \left[ 1 + \frac{(x' + x_m - x_0)^2 + y'^2 - 2y'y_0 \sin \phi + y_0^2 + 2L_0 y_0 \cos \phi}{2L_0^2} \right]. \quad (7)$$

将(2)、(3)、(7)式带入(4)式, 并经过各项近似整理<sup>[4]</sup>, 可得

$$r(x_m, t) = A' \iint dx'_0 dy'_0 \exp \left\{ -j \left[ 2\pi f_0 \left[ t_0 - \frac{2L_0}{c} - \frac{(x_m - x'_0)^2 + y_0'^2 + 2L_0 y'_0 \cos \phi}{2cL_0} \right] + \pi k \left[ 2t - t_0 - \frac{2L_0}{c} - \frac{(x_m - x'_0)^2 + y_0'^2 + 2L_0 y'_0 \cos \phi}{2cL_0} \right] \times \left[ t_0 - \frac{2L_0}{c} - \frac{(x_m - x'_0)^2 + y_0'^2 + 2L_0 y'_0 \cos \phi}{2cL_0} \right] + \phi_{s0} - \phi'_{s0} \right\} \tilde{T}(x'_0, y'_0), \quad (8)$$

式中  $\tilde{T}(x'_0, y'_0)$  为目标平面目标反射系数,  $A'$  为积分所得系数。(8) 式为雷达在  $x = x_m$  位置时, 获得的 SAL 成像用的外差信号数据。SAL 系统的距离向成像是通过对(8)式做傅里叶变换来获得。

假设目标为位于成像平面上的平面目标, 且可以简单离散为

$$\tilde{T}(x'_0, y'_0) = \sum_p \sum_q C_{pq} \delta(x'_0 - x_p) \delta(y'_0 - y_q). \quad (9)$$

将(9)式代入(8)式, 并做时间傅里叶变换, 得到

$$R(x_m, f) = F\{r(x_m, t)\} = A' \sum_p \sum_q C_{pq} \delta(x'_0 - x_p) \delta(y'_0 - y_q) \times \exp \left\{ -j 2\pi f_0 \left[ t_0 - \frac{2L_0}{c} - \frac{(x_m - x_p)^2 + y_q^2 + 2L_0 y_q \cos \phi}{cL_0} \right] \right\} \times \exp \left\{ -j \pi k \left\{ \left[ -t_0 - \frac{2L_0}{c} - \frac{(x_m - x_p)^2 + y_q^2 + 2L_0 y_q \cos \phi}{cL_0} \right] \times \left[ t_0 - \frac{2L_0}{c} - \frac{(x_m - x_p)^2 + y_q^2 + 2L_0 y_q \cos \phi}{cL_0} \right] + \phi_{s0} - \phi'_{s0} \right\} \right\} \times \text{sinc} \left\{ \tau_{\text{pul}} \left\{ f - k \left[ t_0 - \frac{2L_0}{c} - \frac{(x_m - x_p)^2 + y_q^2 + 2L_0 y_q \cos \phi}{cL_0} \right] \right\} \right\}. \quad (10)$$

(10) 式为距离压缩后的数据, 其中 sinc 函数峰值位置为

$$f = k \left[ t_0 - \frac{2L_0}{c} - \frac{(x_m - x_p)^2 + y_q^2 + 2L_0 y_q \cos \phi}{cL_0} \right]. \quad (11)$$

在 SAL 系统中, 成像满足远场衍射条件, 其成像距离、目标大小、雷达运动范围等满足

$$\frac{(x_m - x_p)^2 + y_q^2}{cL_0} \ll \frac{2L_0 y_q \cos \phi}{cL_0}. \quad (12)$$

这样, (11) 式中频率与目标纵坐标  $y_q$  有近似一一对应的线性关系, 即

$$f = k \left( t_0 - \frac{2L_0}{c} - \frac{2L_0 y_q \cos \phi}{cL_0} \right), \quad (13)$$

这就是 SAL 成像系统中利用线性调频脉冲获得距离向成像的原理。

据(13)式得到距离向分辨率为

$$\delta y'_0 \approx \delta f \left( \frac{c}{2k \cos \phi} \right) = \frac{c}{2B \cos \phi}, \quad (14)$$

式中  $B$  为线性调频信号的带宽。

## 2.2 实验室 SAL 孔径角度问题分析

实际 SAL 系统中, 收发孔径平面、雷达运动轴与主坐标系 ( $XYZ$ ) 的关系可能并不符合图 1 的理想情况, 这种偏离会引起距离向分辨率的下降。对于条带式 SAL, 可以分为两种情况: 方位向运动轴  $X''$  与主坐标

系中  $X$  有夹角和雷达发射光束光轴  $z$  与主坐标系中  $Z$  轴有夹角。

### 2.1.1 方位运动轴角度分析

在雷达孔径方位向运动过程中,方位向运动轴  $X''$  与主坐标系( $XYZ$ )中的  $X(X')$  轴并不能保证完全重合,会有小夹角,如图 2 所示。

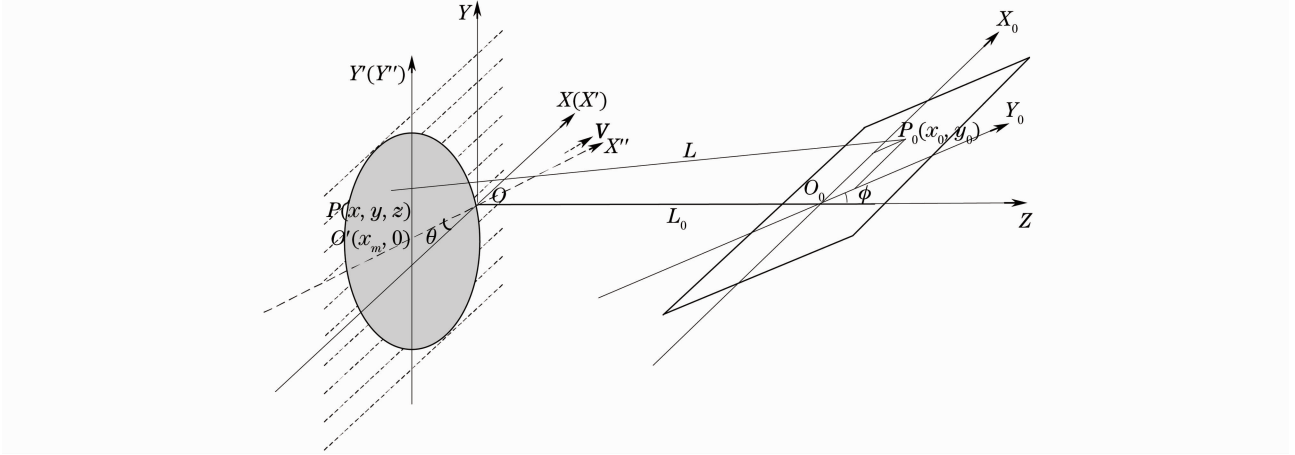


图 2 SAL 方位运动轴角度空间几何图示

Fig. 2 Space geometry on moving axis in stripmap SAL

在图 2 中,  $X''$  轴与  $X'$  轴成  $\theta$  夹角,对于发射孔径上一点  $P(x, y, z)$ , 则有

$$x = x' + x_m \cos \theta; \quad y = y'; \quad z = x_m \sin \theta. \quad (15)$$

基于上面类似分析,可以得到此时距离压缩后 sinc 函数峰值点位置变为

$$f = k \left[ t_0 - \frac{2L_0}{c} - \frac{x_m^2 - 2x_m x_p \cos \theta + x_p^2 + y_q^2 - 2L_0 (x_m \sin \theta - y_q \cos \phi) + 2x_m y_q \sin \theta \cos \phi}{cL_0} \right]. \quad (16)$$

忽略各小量,得到

$$f \approx k \left[ t_0 - \frac{2L_0}{c} - \frac{2L_0 (x_m \sin \theta - y_q \cos \phi)}{cL_0} \right]. \quad (17)$$

由(16)式可以看出,此时 sinc 函数峰值频率  $f$  与目标平面纵坐标不再是一一对应的关系。即使只有一个点目标,经过距离压缩后,sinc 函数的峰值频率还是随着雷达位置移动而线性变化。显然,只有满足

$$|x_m \sin \theta|_{\max} \ll |y_q \cos \phi|, \quad (18)$$

(16)式才可以简化为(13)式的形式。

对于条带式 SAL,设合成孔径长度为  $L_{SA}$ , (18)式的要求从分辨率角度可写为

$$\theta \ll \frac{c}{BL_{SA}}. \quad (19)$$

例如,文献[2]中的系统,  $B \approx 2.5 \times 10^{12}$  Hz,  $L_{SA} = 1$  cm,这时要求  $\theta \ll 12$  mrad。

一般  $\theta$  很小, (17)式也表明,利用点目标形成的距离压缩图像,可以求出  $\theta$  角,从而实现对系统的调整,即

$$\theta \approx \frac{\Delta f c}{\Delta x_m \cdot 2k}. \quad (20)$$

### 2.2.2 雷达发射光轴俯仰角度分析

图 3 是雷达发射光束光轴  $z$  与主坐标系中  $Z$  轴有夹角的情况,其俯仰角为  $\phi$ 。为了简单起见,转动主坐标系  $XYZ$  为  $Xyz$ ,使  $y$  轴与  $Y'$  轴平行,如图 3 所示,则其  $z$  轴与  $Z$  轴、 $y$  轴与  $Y$  轴间的夹角都为  $\phi$ 。在新的主坐标系  $Xyz$  下,目标平面  $Y_0$  与  $z$  轴的夹角变为  $\phi - \phi_0$ 。由(11)式可知,其频率峰值点相应变为

$$f = k \left[ t_0 - \frac{2L_0}{c} - \frac{(x_m - x_p)^2 + y_q^2 + 2L_0 y_q \cos(\phi - \phi_0)}{cL_0} \right], \quad (21)$$

则距离向分辨率变化为

$$\delta y'_0 \approx \delta f \left[ \frac{c}{2k \cos(\phi - \varphi)} \right] = \frac{c}{2B \cos(\phi - \varphi)}, \quad (22)$$

即雷达孔径俯仰角可以转化为目标平面倾斜角  $\phi$  的改变。对于正侧视 SAL 系统, 角度  $\phi = \pi/4$ , 系统设计可以很容易实现  $\varphi \ll \phi$  的要求。

可得

$$\delta y'_0 = \frac{c}{2B \cos(\phi - \varphi)} \approx \frac{c}{2B \cos \phi}. \quad (23)$$

因此, 在条带式 SAL 系统中, 小的雷达发射孔径光轴俯仰角带来的分辨率下降可以忽略, 而方位运动轴角度  $\theta$  的存在会带来图像的失真。

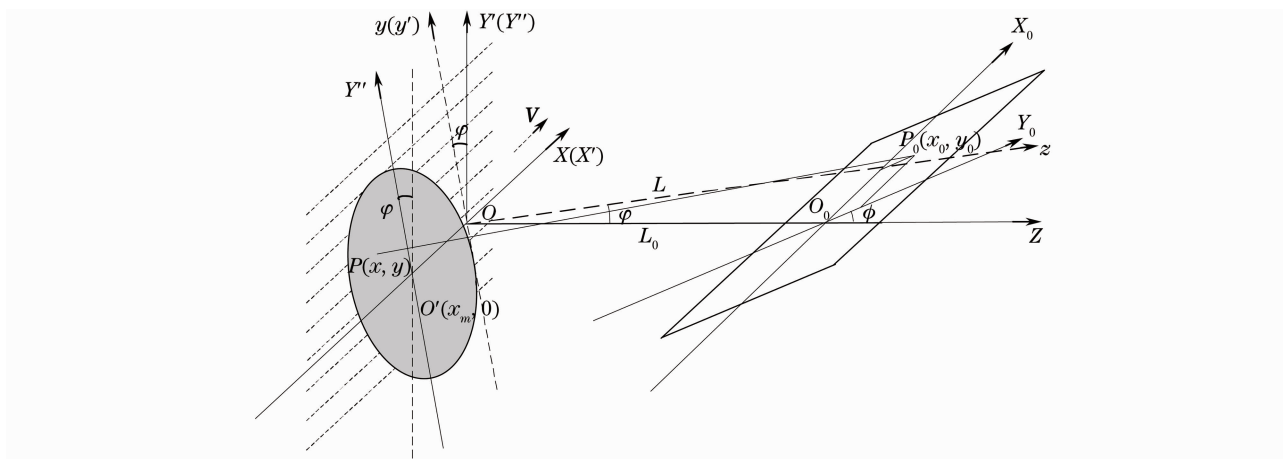


图3 条带式 SAL 孔径俯仰角度空间几何图示

Fig. 3 Space geometry on pitch angle in stripmap SAL

### 3 理论仿真与实验验证

#### 3.1 理论仿真计算

仿真参数: 波长扫描范围 1530~1560 nm, 调频率  $k = 1.249 \times 10^{13}$  Hz/s, 合成孔径长度  $L_{SA} = 0.01$  m,  $\phi = \frac{\pi}{4}$  rad(正侧视), 成像距离  $L_0 = 1$  m。

图4是方位运动轴夹角  $\theta$  为不同数值时所得条带式 SAL 点目标成像距离压缩图, 其中左侧为俯视图, 能看出距离向压缩峰值与方位向之间的耦合; 右侧为点目标的距离向分辨率。

可以看到, 由于存在运动轴夹角  $\theta$ , 峰值频率  $f$  与目标平面纵坐标不再是一一对应的关系。距离压缩后 sinc 函数的峰值频率随着雷达位置移动而线性变化(图4左侧), 其距离压缩后点目标有着明显的失真, 并且随着距离向分辨率的降低, 聚焦后的能量也会随之分散, 对最终成像造成影响(图4右侧)。根据所得距离压缩后的图像, 利用(20)式, 可以算得其运动轴夹角  $\theta$  分别为 0, 0.0109 和 0.0317 rad, 与仿真所设角度一致。这说明理论推导公式的正确, 验证了其有效性。

#### 3.2 实际雷达数据验证

图5是一个条带式 SAL 实验室演示系统所获得的点目标距离压缩图像。其中, 图5(a)为距离压缩后的二维图像, 图5(b)、(c)分别为方位向、距离向的幅度图。SAL 成像演示实验装置基本参数为: 线性扫描波长范围为 1530~1560 nm, 扫描速度 100 nm/s, 合成孔径长度  $L_{SA} = 0.01$  m, 目标距离  $L_0 = 2$  m, 方位采样步长为 50  $\mu\text{m}$ 。

对于条带式 SAL 成像, 距离压缩后, 方位向的幅度图包络反映了发射光束光斑分布, 距离向幅度反映了距离向的目标图像。对于一个点目标, 距离压缩后, 距离向图像理论上应只占一个分辨率单元, 图5(c)的幅度图表明该点目标距离压缩图像占有多个分辨率单元, 图像严重失真。从图5(a)的二维图像可以看到, 随着雷达位置的移动, 图像沿一条直线移动。根据理论分析可以判断, 这种图像的形成可能是由于雷达方位运

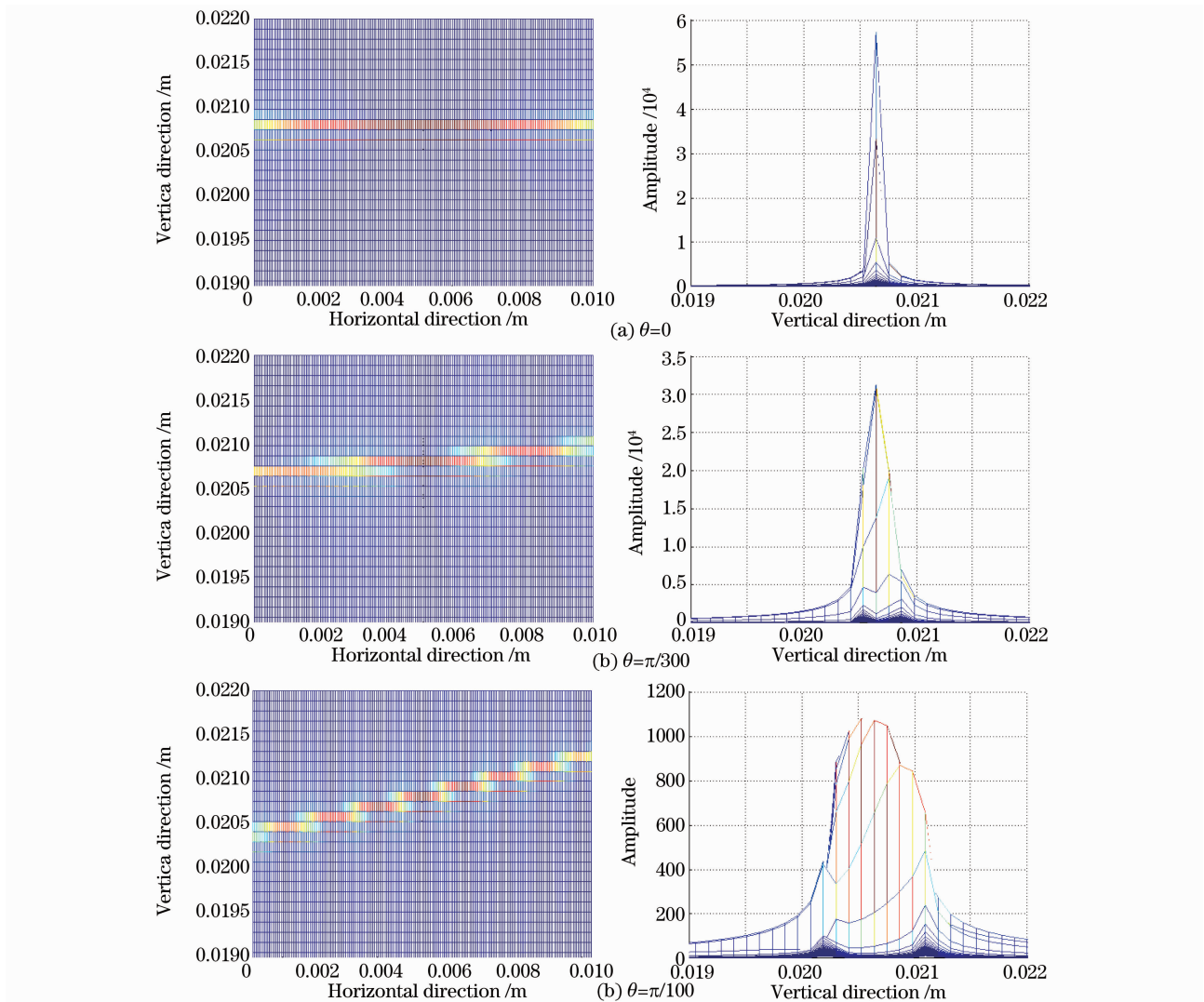


图4 不同角度条带式SAL点目标成像距离压缩图

Fig. 4 Range compressed point-image with different angles in stripmap SAL

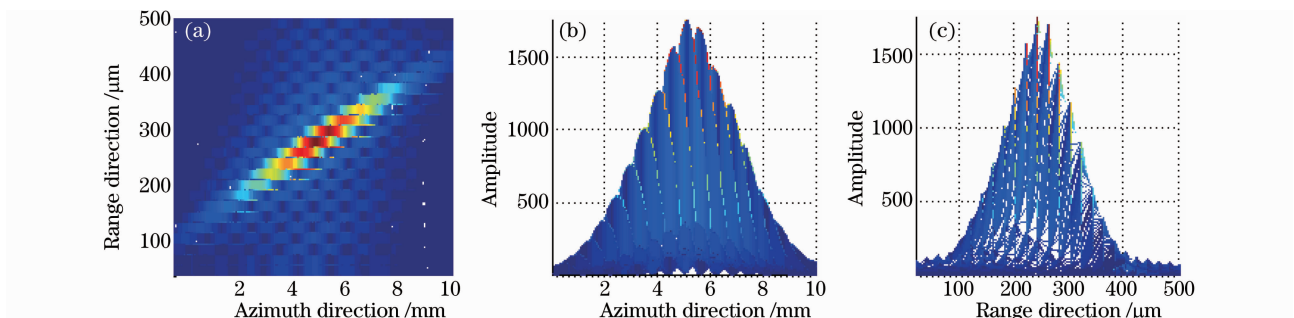


图5 角度校正前点目标距离压缩图像

Fig. 5 Range compressed point-image before angle correction

动方向与孔径方位向坐标轴不平行,造成距离图像与方位运动方向之间存在耦合。

根据图5(a),利用(20)式可以计算出运动轴夹角 $\theta \approx 0.0375$  rad,而 $c/(B \cdot L_{SA}) = 0.08$  rad,两角度为一个量级,不满足(19)式中的条件,因此需要对系统进行角度校正。

根据所得 $\theta$ 对实际SAL系统进行调整,图6为调整后获得的点目标距离压缩图像,其中图6(a)为距离压缩二维图像,图6(b)、(c)分别为方位向幅度图和距离向幅度图。对比图5可以看到,经过校正后所得的距离压缩图像不再和方位向有耦合,距离图像域得到了很好的聚焦。

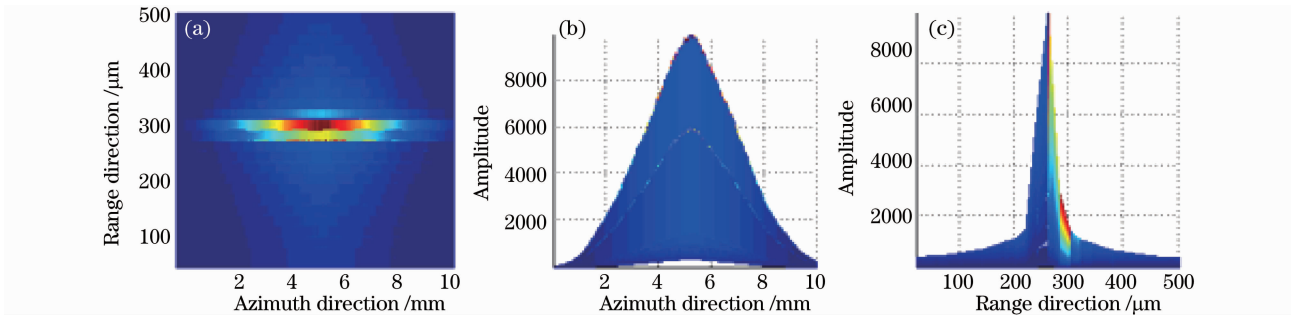


图 6 角度校正后点目标距离压缩图像

Fig. 6 Range compressed point-image after angle correction

## 4 结 论

对正侧视条带模式 SAL 系统光轴角度偏移对距离向分辨率的影响进行了详细的理论与实验研究。从理论和实验两部分,分别分析和观察到了由两轴不平行而导致的距离向图像失真。由推导可以得知,距离像恶化是非常严重的,对于实际的 SAL 系统,对这种恶化进行去除十分必要,否则对于复杂目标的成像将非常困难。通过点目标对系统进行校正的方法,消去了因两轴夹角而产生的距离向和方位向之间的耦合。这是保证其能进行复杂面目标成像的必要条件,也将是今后 SAL 系统出厂检测的重要步骤之一。

## 参 考 文 献

- 1 M. Bashkansky, R. L. Lucke, E. Funk. Two-dimensional synthetic aperture imaging in the optical domain[J]. *Opt. Lett.*, 2002, **27**(22): 1983~1985
- 2 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
- 3 Zhang Yun, Wu Jin, Tang Yongxin. Synthetic aperture lidar[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2005, **42**(7): 48~50  
张云,吴谨,唐永新.合成孔径激光雷达[J].激光与光电子学进展,2005,**42**(7):48~50
- 4 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
- 5 Liu Guoguo, Wu Jin, Zhu Bingqi. Nonlinear degradation and compensation on range resolution in synthetic aperture lidar experiment[J]. *Laser & Infrared*, 2009, **39**(9): 934~938  
刘国国,吴谨,朱炳祺.合成孔径激光雷达距离像分辨率非线性恶化与补偿[J].激光与红外,2009,**39**(9):934~938
- 6 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
- 7 Liu Liren. Synthetic aperture lidar (II): Spatial phase biased telescope for transmitting antenna[J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(6): 1197~1200  
刘立人.合成孔径激光成像雷达(II):空间相位偏置发射望远镜[J].光学学报,2008,**28**(6):1197~1200
- 8 Liu Liren. Synthetic aperture lidar (III): Circulated duplex telescope[J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(7): 1405~1410  
刘立人.合成孔径激光成像雷达(III):双向环路发射接收望远镜[J].光学学报,2008,**28**(7):1405~1410
- 9 Zhou Yu, Sun Jianfeng, Luan Zhu *et al.*. Aperture-synthesizing experiment of a down-scaled synthetic aperture imaging lidar[J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(12): 2446~2448  
周煜,孙建峰,栾竹等.尺度缩小合成孔径激光成像雷达的孔径合成实验[J].光学学报,2008,**28**(12):2446~2448
- 10 Zhou Yu, Xu Nan, Luan Zhu. 2D imaging experiment of a 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.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