

条带模式合成孔径激光雷达振动目标成像的计算与仿真

赵志龙^{1,2} 吴 谨¹ 李斐斐^{1,2} 杨兆省^{1,2}

(¹ 中国科学院电子学研究所, 北京 100190; ² 中国科学院研究生院, 北京 100049)

摘要 在光学波长的尺度上, 几乎没有目标可被认为是静止的, 因此, 目标振动对合成孔径激光雷达(SAL)成像可能有较大影响。对此问题, 基于衍射光学, 建立了在目标作简谐振动情况下, 采用准单色光线性调频光源照明的条带模式 SAL 的成像数学方程, 分析和讨论了目标振动参数对 SAL 成像的影响, 并给出了若干数学仿真演示。结果表明, SAL 成像对目标振动非常敏感, 在距离方向上目标微小的振动可使 SAL 系统在方位向上产生一系列虚像, 严重影响 SAL 高分辨率成像的实现。

关键词 物理光学; 合成孔径激光雷达; 条带模式; 振动目标; 成对回波

中图分类号 TN958.98 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201232.0828006

Calculations and Simulations on Vibrating Targets Imaging in Strip-Map Mode Synthetic Aperture Ladar

Zhao Zhilong^{1,2} Wu Jin¹ Li Feifei^{1,2} Yang Zhaosheng^{1,2}

(¹ *Institute of Electronics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China*)
(² *Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China*)

Abstract In optical wavelength scale, any targets can be hardly regarded as stationary. Therefore, target vibration may affect synthetic aperture ladar (SAL) imaging severely. To address this problem, the imaging mathematical equation of strip-map mode SAL, in which quasi-monochromatic chirp laser is used as the illumination source in the situation of target vibrating, is set up. Using this equation, the effect of the vibration parameters is analyzed and discussed, and some simulations for this are performed. The result shows that SAL imaging is extremely sensitive to the target vibration. Tiny target vibration in range may bring a series of false images in azimuth to the final SAL image and seriously affect the realization of a high resolution SAL imaging.

Key words physical optics; synthetic aperture ladar; strip-map mode; vibrating targets; paired echo

OCIS codes 280.6730; 280.4750; 050.1960; 120.7280

1 引 言

合成孔径激光雷达(SAL)能够以较小的接收光学口径实现远距离目标高分辨率成像, 并且其成像时间远远短于用微波作为照明源的合成孔径雷达(SAR)。这些优点都十分有利于从飞机、卫星等运动平台上对目标进行远距离监测。迄今为止, 人们已经为发展出一套实用的 SAL 系统付出了巨大的

努力, 而取得的结果也十分令人振奋和鼓舞^[1~7]。

实现 SAL 成像所面临的最大困难, 就是在一个合成孔径时间内获得稳定的相位历程数据(PHD)。SAL 采用相干成像, 稳定的 PHD 是获得高分辨率成像的保证。影响 PHD 的因素很多, 如光源(包括本征光)、光学系统、机械振动、大气湍流和目标散射特性等。本文主要关注机械振动的影响。

收稿日期: 2012-02-22; **收到修改稿日期**: 2012-04-11

基金项目: 国家 863 计划(2007AA12Z107)和国家自然科学基金(61178071)资助课题。

作者简介: 赵志龙(1986—), 男, 硕士研究生, 主要从事激光雷达方面的研究。E-mail: zhaozhilong09@mails.gucas.ac.cn

导师简介: 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

由于激光波长很短,在 SAR 中可以被忽略的微小振动,会在 SAL 中引起严重的相位误差。机械振动包括雷达平台的振动和目标的振动。对此问题,尤其是平台振动影响 SAL 成像问题,人们已做了一些理论或实验探索^[8~10]。

然而,消除平台振动对 SAL 成像的影响固然十分重要,但是在光波波长的尺度上,几乎没有任何现实的物体可被视为静止。因此,目标的振动也可能会对 SAL 成像产生不可忽略的影响。本文试图从光学的角度探讨这一问题,建立数学模型并给出了一些仿真图像。

2 数学模型

2.1 条带模式 SAL 成像数据方程

借鉴文献[11],建立如图 1 所示的坐标关系。在图 1 中,假定 SAL 系统发射/接收孔径合置(单站),且发/收孔径为矩形。XYZ 为主坐标系, X'O'Y' 和 X₀Y₀Z₀ 分别为孔径坐标系和目标坐标系。假定孔径在主坐标系中以速度 v_x 沿 X 轴运动。对于一个侧视 SAL 而言,侧视角 Φ 为目标坐标系的 Y₀ 轴和主坐标系的 Z 轴之间的夹角。

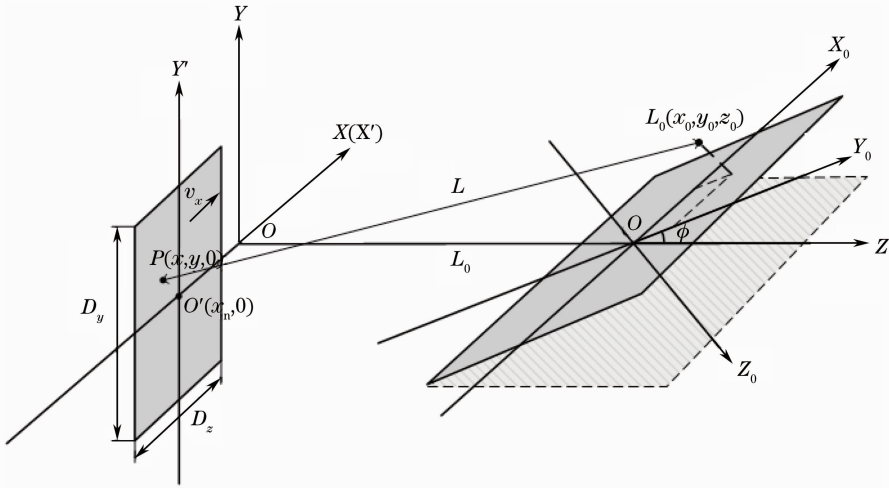


图 1 条带模式侧视 SAL 系统坐标关系

Fig. 1 Coordinate relations of side-looking strip-map mode SAL

假定 SAL 系统所发射的 chirp 信号满足准单色光近似条件,将其表示为

$$U(x, y, z, t) = A \exp[-j(2\pi f_0 t + \pi f_1 t^2 + \Phi_0)], \quad t \in [0, \tau_{\text{pul}}] \quad (1)$$

式中 f₀ 和 f₁ 分别表示载频频率和调频率; A、τ_{pul} 和 Φ₀ 分别表示光场的幅度、脉冲宽度和初始相位。

外差探测所用的本征光信号表示为

$$U_L(x, y, z, t) = A_L \exp\{-j[2\pi f_0(t - t_0) + \pi f_1(t - t_0)^2 + \Phi_0]\}, \quad t - t_0 \in [0, \tau_{\text{pul}}] \quad (2)$$

式中 A_L 和 t₀ 分别表示本征光的幅度和相对延时。

当探测距离满足夫琅禾费条件时,参照文献[11]的推导,当 SAL 系统的发/收孔径位于主坐标系的 (x_m, 0, 0) 点时,外差探测的 SAL 数据方程为

$$r(x_m, t) = \iint dx'' dy'' U(x'', y'', t) U_L^*(x'', y'', t) = AA_L \left(\frac{1}{j\lambda_0 L_0} \right)^2 \iint dx'' dy'' \iint dx_0 dy_0 \iint dx' dy' \exp\left\{-j\left[2\pi f_0 \left[t_0 - \frac{L(P'', P_0)}{c} - \frac{L(P_0, P')}{c}\right] + \pi f_1 \left[t_0 - \frac{L(P'', P_0)}{c} - \frac{L(P_0, P')}{c}\right]^2\right]\right\} T(x_0, y_0). \quad (3)$$

在(3)式中,假定外差混频在接收孔径处操作,没有使用接收透镜。其中 P' 为发射孔径上任意一点,其在孔径坐标系中的坐标为 (x', y'); P'' 为接收孔径上任意一点,其在孔径坐标系中的坐标为 (x'', y''); P₀ 为目标表面上任意一点,其在目标坐标系中的坐标为 (x₀, y₀, z₀); L(P₀, P') 为发射孔径上任意一点 P' 到目标表面上任意一点 P₀ 之间的距离; L(P'', P₀) 为目标表面上任意一点 P₀ 到接收孔径上任意一点 P'' 之间的距离; T(x₀, y₀) 为目标表面上任意一点 P₀ 处的反射系数; λ₀ 为发射 chirp 信号的中心波长, λ₀ = c/f₀。

当探测距离满足夫琅禾费条件时,两点距离可以近似为

$$L(P_0, P') = \sqrt{(x' + x_m - x_0)^2 + (y' - y_0 \sin \Phi + z_0 \cos \Phi)^2 + (L_0 + y_0 \cos \Phi + z_0 \sin \Phi)^2} \approx L_0 \left[1 + \frac{(x' + x_m - x_0)^2 + y_0^2 + z_0^2 + y'^2 - 2y'(y_0 \sin \Phi - z_0 \cos \Phi) + 2L_0(y_0 \cos \Phi + z_0 \sin \Phi)}{2L_0^2} \right], \quad (4)$$

$$L(P''_0, P) = \sqrt{(x'' + x_m - x_0)^2 + (y'' - y_0 \sin \Phi + z_0 \cos \Phi)^2 + (L_0 + y_0 \cos \Phi + z_0 \sin \Phi)^2} \approx L_0 \left[1 + \frac{(x'' + x_m - x_0)^2 + y_0^2 + z_0^2 + y''^2 - 2y''(y_0 \sin \Phi - z_0 \cos \Phi) + 2L_0(y_0 \cos \Phi + z_0 \sin \Phi)}{2L_0^2} \right]. \quad (5)$$

将(4)式和(5)式代入(3)式中,通过进一步的化简,(3)式将变为

$$r(x_m, t) = (D_x D_y)^2 AA_L \left(\frac{1}{j\lambda_0 L_0} \right)^2 \iint dx_0 dy_0 \cdot \exp \left\{ -j \left\{ 2\pi f_0 \left[t_0 - 2L_0/c - \frac{(x_m - x_0)^2 + y_0^2 + z_0^2 + 2L_0(y_0 \cos \Phi + z_0 \sin \Phi)}{cL_0} \right] + \pi f_1 \left(2t - t_0 - 2L_0/c - \frac{2y_0 \cos \Phi + 2z_0 \sin \Phi}{c} \right) \left(t_0 - 2L_0/c - \frac{2y_0 \cos \Phi + 2z_0 \sin \Phi}{c} \right) \right\} \right\} \cdot T(x_0, y_0) \operatorname{sinc}^2 \left[\frac{D_x}{\lambda_0 L_0} (x_m - x_0) \right] \operatorname{sinc}^2 \left[\frac{D_y}{\lambda_0 L_0} (y_0 \sin \Phi - z_0 \cos \Phi) \right], \quad (6)$$

(6)式即为条带模式 SAL 系统的数据方程。从(6)式可以看出,目标坐标的 y_0 和 z_0 是对称的,因此目标表面的粗糙起伏会给 SAL 系统的成像带来距离走动,即 SAR 中的叠掩现象。

2.2 目标振动

为使讨论更为简明,以简谐振动为例来讨论振动对 SAL 成像的影响。将在距离向没有距离走动的前提下展开以下讨论,即振动的幅度小于距离分辨单

元。当目标在振动时,目标上任意一点 P_0 的时变坐标将表示为 $P_0[x_0(t), y_0(t), z_0(t)]$ 。这里,时间 t 表示 SAL 系统中的全时间。在 SAR 的术语里,全时间通常写为慢时间 t_s 和快时间 t_f 之和:

$$t = t_s + t_f. \quad (7)$$

而根据 SAL 系统采集信号的特点,(6)式中的 t 应写为 t_f 。

假设目标点 $P_0(x_0, y_0, z_0)$ 作简谐振动,将其表示为

$$\mathbf{A}_{\text{vib}} \sin(\omega t + \phi_0) = A_{\text{vibr}} \sin(\omega t + \phi_0) \mathbf{i} + A_{\text{viby}} \sin(\omega t + \phi_0) \mathbf{j} + A_{\text{vibz}} \sin(\omega t + \phi_0) \mathbf{k}. \quad (8)$$

利用(7)式,则点 P_0 的实时坐标将表示为

$$P_0 \{ x_0 + A_{\text{vibr}} \sin[\omega(t_s + t_f) + \phi_0], y_0 + A_{\text{viby}} \sin[\omega(t_s + t_f) + \phi_0], z_0 + A_{\text{vibz}} \sin[\omega(t_s + t_f) + \phi_0] \}.$$

那么,SAL 数据(6)式将改写为

$$r(x_m, t) = (D_x D_y)^2 AA_L \left(\frac{1}{j\lambda_0 L_0} \right)^2 \iint dx_0 dy_0 T(x_0, y_0) \exp \left\{ -j \left\{ 2\pi f_0 \left\{ t_0 - 2 \frac{L_0}{c} - \frac{\{x_m - \{x_0 + A_{\text{vibr}} \sin[\omega(t_m + t_f) + \phi_0]\}\}^2 + \{y_0 + A_{\text{viby}} \sin[\omega(t_m + t_f) + \phi_0]\}^2}{cL_0} - \frac{\{z_0 + A_{\text{vibz}} \sin[\omega(t_m + t_f) + \phi_0]\}^2 + 2L_0 \{y_0 + A_{\text{viby}} \sin[\omega(t_m + t_f) + \phi_0]\} \cos \Phi}{cL_0} - \frac{2L_0 \{z_0 + A_{\text{vibz}} \sin[\omega(t_m + t_f) + \phi_0]\} \sin \Phi}{cL_0} \right\} + \pi f_1 \left\{ 2t_f - t_0 - 2L_0/c - \frac{2\{y_0 + A_{\text{viby}} \sin[\omega(t_m + t_f) + \phi_0]\} \cos \Phi + 2\{z_0 + A_{\text{vibz}} \sin[\omega(t_m + t_f) + \phi_0]\} \sin \Phi}{c} \right\} \left(t_0 - \frac{2L_0}{c} - \frac{2\{y_0 + A_{\text{viby}} \sin[\omega(t_m + t_f) + \phi_0]\} \cos \Phi + 2\{z_0 + A_{\text{vibz}} \sin[\omega(t_m + t_f) + \phi_0]\} \sin \Phi}{c} \right) \right\} \right\} \cdot \operatorname{sinc}^2 \left\{ \frac{D_x}{\lambda_0 L_0} \{x_m - \{x_0 + A_{\text{vibr}} \sin[\omega(t_m + t_f) + \phi_0]\}\} \right\} \cdot \operatorname{sinc}^2 \left\{ \frac{D_y}{\lambda_0 L_0} \{ \{y_0 + A_{\text{viby}} \sin[\omega(t_m + t_f) + \phi_0]\} \sin \Phi - \{z_0 + A_{\text{vibz}} \sin[\omega(t_m + t_f) + \phi_0]\} \cos \Phi \} \right\}, \quad (9)$$

式中目标表面的反射系数 $T(x_0, y_0)$ 在一个合成孔径时间内将被视为常数, t_m 为方位位置 x_m 处的慢时间。

通常来说,很难从(9)式中获得目标的信息 $T(x_0, y_0)$,但是当满足如下条件

$$\omega t_f \ll 1, \quad (10)$$

(9)式可以近似为

$$\begin{aligned} r(x_m, t) \approx & (D_x D_y)^2 A A_L \left(\frac{1}{j\lambda_0 L_0} \right)^2 \iint dx_0 dy_0 T(x_0, y_0) \exp \left\{ -j \left\{ 2\pi f_0 \left\{ t_0 - 2L_0/c - \right. \right. \right. \\ & \left. \left. \frac{\{x_m - [x_0 + A_{vibr} \sin(\omega t_m + \phi_0)]\}^2 + [y_0 + A_{viby} \sin(\omega t_m + \phi_0)]^2 + [z_0 + A_{vibz} \sin(\omega t_m + \phi_0)]^2}{cL_0} - \right. \right. \\ & \left. \left. \frac{2L_0 [y_0 + A_{viby} \sin(\omega t_m + \phi_0)] \cos \Phi + 2L_0 [z_0 + A_{vibz} \sin(\omega t_m + \phi_0)] \sin \Phi}{cL_0} \right\} + \right. \\ & \left. \pi f_1 \left\{ 2t_f - t_0 - 2L_0/c - \frac{2[y_0 + A_{viby} \sin(\omega t_m + \phi_0)] \cos \Phi + 2[z_0 + A_{vibz} \sin(\omega t_m + \phi_0)] \sin \Phi}{c} \right\} \right. \\ & \left. \left\{ t_0 - 2L_0/c - \frac{2[y_0 + A_{viby} \sin(\omega t_m + \phi_0)] \cos \Phi + 2[z_0 + A_{vibz} \sin(\omega t_m + \phi_0)] \sin \Phi}{c} \right\} \right\} \cdot \\ & \text{sinc}^2 \left\{ \frac{D_x}{\lambda_0 L_0} \{x_m - [x_0 + A_{vibr} \sin(\omega t_m + \phi_0)]\} \right\} \cdot \\ & \text{sinc}^2 \left\{ \frac{D_y}{\lambda_0 L_0} \{ [y_0 + A_{viby} \sin(\omega t_m + \phi_0)] \sin \Phi - [z_0 + A_{vibz} \sin(\omega t_m + \phi_0)] \cos \Phi \} \right\}. \end{aligned} \quad (11)$$

从(11)式可以看出,目标的振动会影响到载频、调频和光束分布。因此,目标上的干涉图样在数学表达上是时变的。

然而,在(11)式中,快时间只在调频部分出现,这就意味着在(10)式限定的条件下,目标的振动在每个 chirp 脉冲里可以被视为静止。

对(11)式作距离压缩并忽略常数项系数,可以得到

$$\begin{aligned} r(x_m, f_r) \approx & \iint dx_0 dy_0 T(x_0, y_0) \exp \left\{ -j \left\{ 2\pi f_0 \left\{ t_0 - 2L_0/c - \right. \right. \right. \\ & \left. \left. \frac{\{x_m - [x_0 + A_{vibr} \sin(\omega t_m + \phi_0)]\}^2 + [y_0 + A_{viby} \sin(\omega t_m + \phi_0)]^2 + [z_0 + A_{vibz} \sin(\omega t_m + \phi_0)]^2}{cL_0} - \right. \right. \\ & \left. \left. \frac{2L_0 [y_0 + A_{viby} \sin(\omega t_m + \phi_0)] \cos \Phi + 2L_0 [z_0 + A_{vibz} \sin(\omega t_m + \phi_0)] \sin \Phi}{cL_0} \right\} \right\} \tau_{pul} \cdot \\ & \text{sinc} \left\{ \tau_{pul} \left\{ f_r + f_1 \left\{ t_0 - 2L_0/c - \frac{2[y_0 + A_{viby} \sin(\omega t_m + \phi_0)] \cos \Phi + 2[z_0 + A_{vibz} \sin(\omega t_m + \phi_0)] \sin \Phi}{c} \right\} \right\} \right\}. \end{aligned} \quad (12)$$

对(12)式采取合理的近似,忽略方位向相位中与方位聚焦无关的 y_0 和 z_0 ,并暂时省略距离向的 sinc 函数,可以得到如下的包含方位向信息的合成孔径数据

$$\begin{aligned} r(x_m) \approx & \iint dx_0 dy_0 \exp \left\{ -j \left\{ 2\pi f_0 \left\{ - \frac{\{x_m - [x_0 + A_{vibr} \sin(\omega t_m + \phi_0)]\}^2}{cL_0} - \right. \right. \right. \\ & \left. \left. \frac{2[A_{viby} \sin(\omega t_m + \phi_0) \cos \Phi + A_{vibz} \sin(\omega t_m + \phi_0) \sin \Phi]}{c} \right\} \right\} \Big\} T(x_0, y_0). \end{aligned} \quad (13)$$

在实际 SAL 系统中,目标振动幅度是有限的, X 方向的振动幅度一般远小于分辨率,对 SAL 成像影响很小^[12]。忽略 X 方向振动,(13)式近似为

$$\begin{aligned} r(x_m) \approx & \iint dx_0 dy_0 \exp \left\{ -j \left\{ 2\pi f_0 \left\{ - \frac{(x_m - x_0)^2}{cL_0} - \frac{2[A_{viby} \sin(\omega t_m + \phi_0) \cos \Phi + A_{vibz} \sin(\omega t_m + \phi_0) \sin \Phi]}{c} \right\} \right\} \right\} \cdot \\ & T(x_0, y_0). \end{aligned} \quad (14)$$

方位向的匹配滤波器的表达式为

$$h(x_m) = \exp \left(-j 2\pi f_0 \frac{x_m^2}{cL_0} \right). \quad (15)$$

方位向的聚焦可以通过(14)式和(15)式的卷积来获得

$$r(x_m) \otimes h(x_m) \approx \left\{ \iint dx_0 dy_0 T(x_0, y_0) \exp \left\{ -j \left\{ 2\pi f_0 \left[-\frac{(x_m - x_0)^2}{cL_0} - \frac{2[A_{\text{viby}} \sin(\omega t_m + \phi_0) \cos \Phi + A_{\text{vibz}} \sin(\omega t_m + \phi_0) \sin \Phi]}{c} \right] \right\} \right\} \right\} \otimes \exp \left(-j2\pi f_0 \frac{x_m^2}{cL_0} \right). \quad (16)$$

现在考虑(10)式限定的条件,它将目标的振动频率限制为

$$f_{\text{vib}} = \frac{\omega}{2\pi} \ll \frac{1}{2\pi t_t}. \quad (17)$$

不妨假设一个 chirp 信号的脉宽为 $10 \mu\text{s}$, 则(17)式限定振动频率为 $f_{\text{vib}} \ll 15.89 \text{ kHz}$, 而根据文献[13], 实际情况通常都满足这样的条件。表 1 列出了文献[13]中的测试条件。

表 1 装甲车辆测试条件

Table 1 Test requirements for armored vehicles

| Frequency range /Hz | Peak-peak value /mm | Acceleration / (m/s ²) |
|---------------------|---------------------|------------------------------------|
| 5~5.5 | 25.40 | |
| 5.5~30 | | 15 |
| 30~50 | 0.84 | |
| 50~500 | | 42 |

3 讨 论

在(16)式中, Y 方向和 Z 方向的振动分量会对成像产生不可忽略的影响。它们带来影响是对称的, 特别是, 当两个分量互为相反数的时候, 它们产生的影响会相互抵消为零。

在(16)式中, 有

$$t_m = x_m/v_x, \quad (18)$$

式中 v_x 表示平台沿方位向运动的速度。

于是, (16)式可以写为

$$\begin{aligned} r(x_m) \otimes h(x_m) &\approx \iint dx_0 dy_0 T(x_0, y_0) \cdot \int \exp \left\{ -j \left\{ 2\pi f_0 \left[-\frac{(x_m - x_0)^2}{cL_0} - \frac{2(A_{\text{viby}} \cos \Phi + A_{\text{vibz}} \sin \Phi) \sin(\omega x_m/v_x + \phi_0)}{c} \right] \right\} \right\} \exp \left[-j2\pi f_0 \frac{(x' - x_m)^2}{cL_0} \right] dx_m = \\ &\iint dx_0 dy_0 T(x_0, y_0) \exp \left[-j2\pi f_0 \frac{(x' - x_0)(x_0 + x')}{cL_0} \right] \cdot \\ &\int \exp \left\{ -j \left\{ 2\pi f_0 \left[\frac{-2(x' - x_0)x_m}{cL_0} - \frac{2(A_{\text{viby}} \cos \Phi + A_{\text{vibz}} \sin \Phi) \sin \left(\omega \frac{x_m}{v_x} + \phi_0 \right)}{c} \right] \right\} \right\} dx_m. \end{aligned} \quad (19)$$

对(19)式中的振动项进行 Bessel 展开^[14], 可以得到

$$\begin{aligned} &\exp \left\{ -j \left\{ 2\pi f_0 \left[\frac{-2(A_{\text{viby}} \cos \Phi + A_{\text{vibz}} \sin \Phi) \sin(\omega x_m/v_x + \phi_0)}{c} \right] \right\} \right\} = \\ &\exp \left[\frac{j4\pi(A_{\text{viby}} \cos \Phi + A_{\text{vibz}} \sin \Phi)}{\lambda_0} \sin \left(\omega \frac{x_m}{v_x} + \phi_0 \right) \right] = \\ &\sum_{n=-\infty}^{\infty} J_n \left[\frac{4\pi(A_{\text{viby}} \cos \Phi + A_{\text{vibz}} \sin \Phi)}{\lambda_0} \right] \exp \left(j \frac{\omega}{v_x} n x_m \right) \exp(jn\phi_0), \end{aligned} \quad (20)$$

将(20)式代入(19)式中, 并考虑前面暂时略去的距离向 sinc 函数, 则最终成像结果被近似为

$$\begin{aligned} r(x', f_r) &\approx \sum_{n=-\infty}^{\infty} J_n \left[\frac{4\pi(A_{\text{viby}} \cos \Phi + A_{\text{vibz}} \sin \Phi)}{\lambda_0} \right] \cdot \\ &\exp(jn\phi_0) \iint dx_0 dy_0 T(x_0, y_0) \frac{\lambda_0 L_0}{D_x} \text{sinc} \left\{ \frac{\lambda_0 L_0}{D_x} \left[\frac{2(x_0 - x' - \lambda_0 L_0 \frac{n\omega}{4\pi v_x})}{\lambda_0 L_0} \right] \right\} \cdot \\ &\tau_{\text{pul}} \text{sinc} \left\{ \tau_{\text{pul}} \left\{ f_r + f_l \left\{ t_0 - 2L_0/c - \frac{2[y_0 + A_{\text{viby}} \sin(\omega t + \phi_0)] \cos \Phi + 2[z_0 + A_{\text{vibz}} \sin(\omega t + \phi_0)] \sin \Phi}{c} \right\} \right\} \right\}. \end{aligned} \quad (21)$$

从(21)式的计算结果可以看出,目标的振动会导致成像结果中沿方位向产生一系列等间距的虚假像,这些虚假像对应于 Bessel 级数中的高阶项,而真正的目标像对应于 Bessel 级数中的零阶项。这些虚假像的间距正比于 $\frac{\omega}{2\pi v_x}$, 各阶虚假像的强度的权重为 $J_n\left[\frac{4\pi(A_{\text{vib},y}\cos\Phi + A_{\text{vib},z}\sin\Phi)}{\lambda_0}\right]$, 目标像和各阶次的虚假像由于振动带来的相位表示为 $\exp(jn\phi_0)$ 。

这一现象在 SAR 成像中被称为成对回波 (paired-echo) 现象^[15]。但与 SAR 系统相比,目标给 SAL 成像带来的影响更为严重,因为 SAL 中的激光源的波长要比 SAR 中的微波源小 4~5 个数量级。

考虑到目标像和各阶次的虚假像具有的相位为 $\exp(jn\phi_0)$, 当振动频率 f_{vib} 较低的时候,目标像和各阶次的虚假像之间的距离较近,相互之间可能会出

现相干叠加,使目标像和各阶次的虚假像之间出现相消或相长,而随着振动频率的提高,此相干叠加也会逐渐消失,振动初相位的影响也随之消失。

考察各阶虚假像的强度权重为 $J_n\left[\frac{4\pi(A_{\text{vib},y}\cos\Phi + A_{\text{vib},z}\sin\Phi)}{\lambda_0}\right]$, 如图 2 所示,以 Z 方向振动为例,取 $\lambda_0 = 1.55 \mu\text{m}$, $\Phi = \pi/4$, 图中分别给出了振幅 A_{vib} 分别为 0.1、1、10 μm 时各阶 $J_n\left[\frac{4\pi A_{\text{vib}}\sin\Phi}{\lambda_0}\right]$ 的值。可以看出,当 A_{vib} 较小的时候,零阶 Bessel 函数十分突出,目标可以准确聚焦;但随着 A_{vib} 的增大,高阶函数开始出现,并且零阶函数可能消失,这样真正的目标像也就消失,如图 2 (b) 所示;随着 A_{vib} 的进一步增大,高阶次函数越来越多,虚假像也就越来越多。

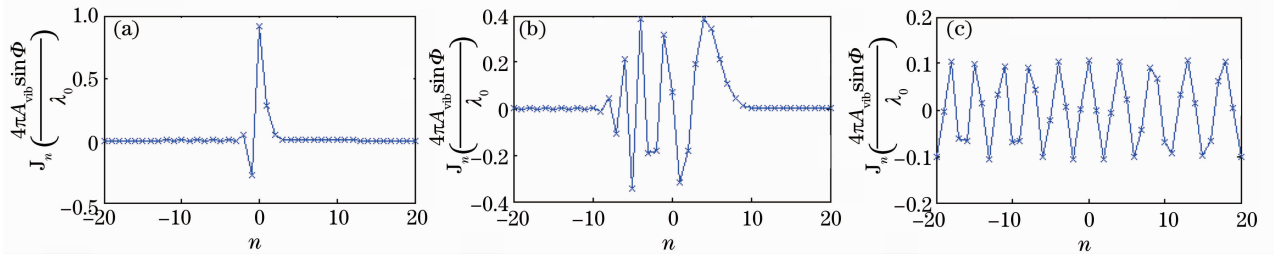


图 2 Bessel 函数 $J_n\left[\frac{4\pi A_{\text{vib}}\sin\Phi}{\lambda_0}\right]$ 。 $\lambda_0 = 1.55 \mu\text{m}$, $\Phi = \pi/4$ 。(a) $A_{\text{vib}} = 0.1 \mu\text{m}$; (b) $A_{\text{vib}} = 1 \mu\text{m}$; (c) $A_{\text{vib}} = 10 \mu\text{m}$

Fig. 2 Bessel function $J_n\left[\frac{4\pi A_{\text{vib}}\sin\Phi}{\lambda_0}\right]$. $\lambda_0 = 1.55 \mu\text{m}$, $\Phi = \pi/4$ 。(a) $A_{\text{vib}} = 0.1 \mu\text{m}$; (b) $A_{\text{vib}} = 1 \mu\text{m}$; (c) $A_{\text{vib}} = 10 \mu\text{m}$

可见,目标振动的振幅、频率和初相位对 SAL 成像影响如下:

- 1) 振幅会影响 Bessel 级数中各阶次的相对大小,即总能量在各阶次虚假像的分布,振幅越大,虚假像就越多;
- 2) 频率会影响相邻虚假像之间的间距,间距与频率成正比例关系;
- 3) 低频振动的时候,初相位会引起目标像和各阶次的虚假像之间出现相消或相长,而在高频振动的时候,初相位对成像没有影响。

4 数学仿真

4.1 仿真参数

对微小振动,由于 X 方向的振动对成像影响很小,而 Y 和 Z 方向的振动对成像的影响是对称的,因此,本文将仅仅仿真沿 Z 方向的微小简谐振动。

表 2 仿真参数

Table 2 Simulation parameters

| Parameter | Value |
|--|--------|
| Carrier wavelength $\lambda_0/\mu\text{m}$ | 1.55 |
| Chirp rate $f_1/(10^{16} \text{ Hz/s})$ | 1.0606 |
| Working range L_0/km | 10 |
| T/R lens diameter D_x/cm | 2 |
| Azimuth step length $\Delta x_m/\text{mm}$ | 4 |
| Azimuth velocity $v_x/(\text{m/s})$ | 80 |
| Pulse duration $\tau_{\text{pul}}/\mu\text{s}$ | 2 |
| Side-looking angle $\Phi/(\text{°})$ | 45 |

根据以上的仿真参数,距离向和方位向的分辨率均为 1 cm。

4.2 仿真结果

4.2.1 点目标

不同振动幅度的点目标的仿真结果如图 3 所示。点目标的振动频率均为 500 Hz,但振动幅度分别为 0.1、1、10 μm 。

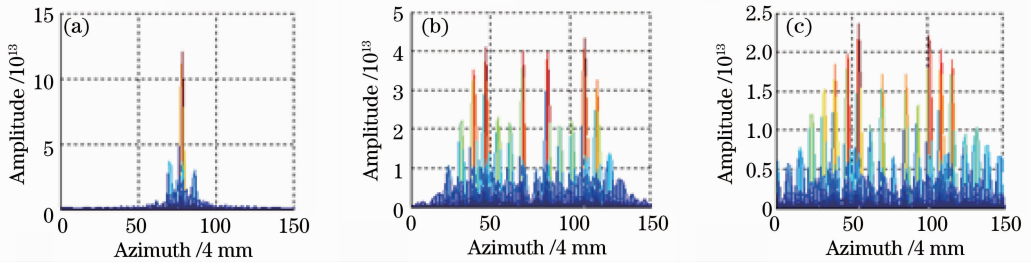


图3 不同振动幅度的点目标的仿真。 $f_{vib}=500$ Hz。(a) $A_{vib}=0.1 \mu\text{m}$ ；(b) $A_{vib}=1 \mu\text{m}$ ；(c) $A_{vib}=10 \mu\text{m}$
Fig.3 Simulation of a point target with different vibration amplitudes. $f_{vib}=500$ Hz. (a) $A_{vib}=0.1 \mu\text{m}$ ；
(b) $A_{vib}=1 \mu\text{m}$ ；(c) $A_{vib}=10 \mu\text{m}$

从图3可以看出，各阶次虚假像的能量分布与振动幅度 A_{vib} 直接相关。振幅 A_{vib} 越大，虚假像越多，但每个虚假像的能量越低；且随着振幅逐渐增大，真正的目标像(零阶 Bessel 函数)可能会消失或

变的很微弱，如图3(b)、(c)所示。

4.2.2 不同振动频率的点目标

如图4所示，点目标的振动幅度均为 $1 \mu\text{m}$ ，但振动频率分别为 500、1000、2000 Hz。

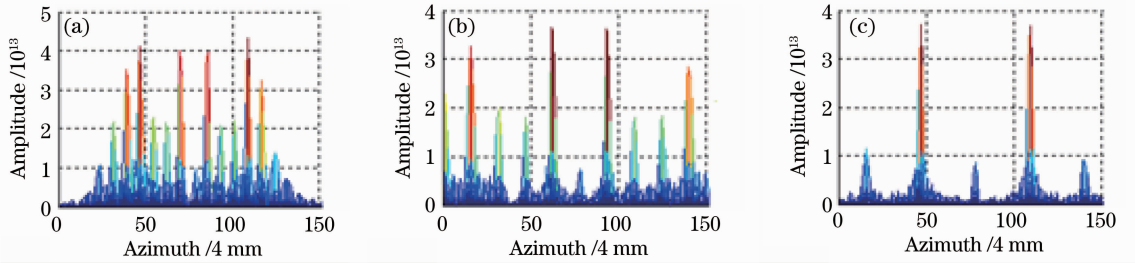


图4 对不同振动频率的点目标的仿真。 $A_{vib}=1 \mu\text{m}$ 。(a) $f_{vib}=500$ Hz；(b) $f_{vib}=1$ kHz；(c) $f_{vib}=2$ kHz
Fig.4 Simulation of a point target with different vibration frequencies. $A_{vib}=1 \mu\text{m}$. (a) $f_{vib}=500$ Hz；
(b) $f_{vib}=1$ kHz；(c) $f_{vib}=2$ kHz

从图4可以看出，各阶次虚假像之间的间距与振动频率 f_{vib} 成正比例关系。频率 f_{vib} 越高，各阶次虚假像之间的间距就越大。

4.3 简单面目标

4.3.1 不同振动幅度的简单面目标

如图5所示，每幅图中有两个三角形目标。其中下面的三角形为静止不动的参考目标；上面的三角形为振动目标，其振动频率均为 500 Hz，但振动幅度分别为 0.1 、 1 、 $10 \mu\text{m}$ 。

动点目标的情况相同，振动的简单面目标也会产生一系列的虚假像。振幅 A_{vib} 越大，虚假像越多，但每个虚假像的能量越低；且随着振幅逐渐增大，真正的目标像可能会消失或变的很微弱，如图5(b)和5(c)所示。

4.3.2 不同振动频率的简单面目标

如图6所示，每幅图中有两个三角形目标。其中下面的三角形为静止不动的参考目标；上面的三角形为振动目标，其振动幅度均为 $1 \mu\text{m}$ ，但振动频率分别为 500、1000、2000 Hz。

从图5可以看出，与图3所示的不同振幅的振

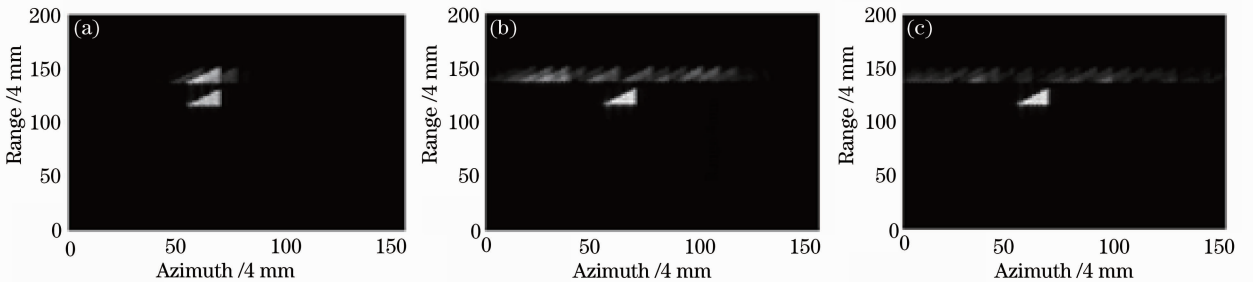


图5 对不同振动幅度的简单扩展目标的仿真 $f_{vib}=500$ Hz，(a) $A_{vib}=0.1 \mu\text{m}$ ；(b) $A_{vib}=1 \mu\text{m}$ ；(c) $A_{vib}=10 \mu\text{m}$
Fig.5 Simulation of simple extended targets with different vibration amplitudes. $f_{vib}=500$ Hz，(a) $A_{vib}=0.1 \mu\text{m}$ ；
(b) $A_{vib}=1 \mu\text{m}$ ；(c) $A_{vib}=10 \mu\text{m}$

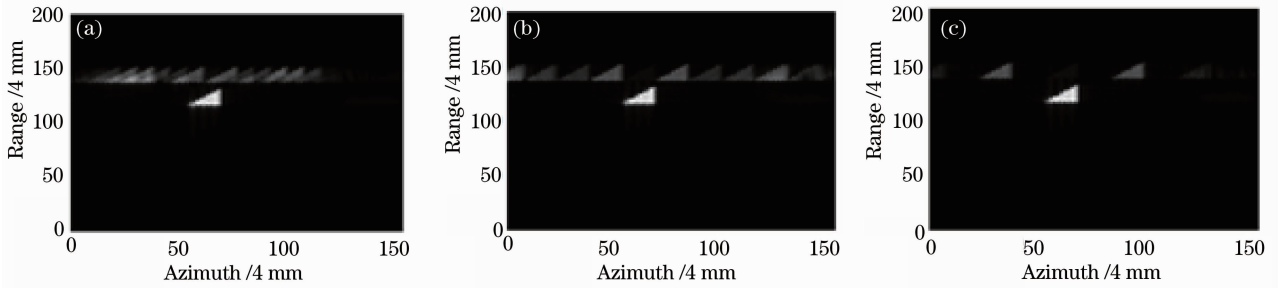


图 6 对不同振动频率的简单扩展目标的仿真。 $A_{\text{vib}}=1 \mu\text{m}$ 。(a) $f_{\text{vib}}=500 \text{ Hz}$; (b) $f_{\text{vib}}=1 \text{ kHz}$; (c) $f_{\text{vib}}=2 \text{ kHz}$
 Fig. 6 Simulations of simple extended targets with different vibration frequencies. $A_{\text{vib}}=1 \mu\text{m}$. (a) $f_{\text{vib}}=500 \text{ Hz}$;
 (b) $f_{\text{vib}}=1 \text{ kHz}$; (c) $f_{\text{vib}}=2 \text{ kHz}$

从图 6 可以看出,与图 4 所示的不同频率的振动点目标的情况相同,简单面目标的振动频率 f_{vib} 越高,各阶次虚假像之间的间距就越大。

4.4 局部振动的面目标

如图 7(a)所示,目标为 $20 \text{ cm} \times 20 \text{ cm}$ 整个方块区域,其中方块的中心部分(IE)静止不动,方块的其余部分有振幅为 10^{-3} m ,频率为 $2 \times 10^2 \text{ Hz}$ 的局部振动。图 7(b)为 SAL 对该目标所成的像。

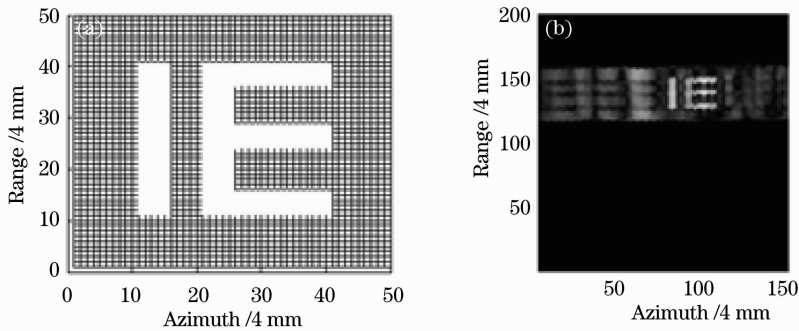


图 7 对目标的局部振动的仿真。(a)目标; (b)SAL 成像

Fig. 7 Simulation of target with partial vibration. (a) Target; (b) SAL image

5 结 论

理论分析和数学仿真表明,对于以激光为探测光源的条带模式 SAL 来说,SAL 成像对目标的振动是非常敏感的。目标在距离向的微小振动会严重影响 SAL 成像结果,它会导致方位向上散焦,产生一系列的假目标像。假目标像的强度与振动幅度直接相关,振幅越大,假目标越多;假目标之间的间距与振动频率成正比,频率越高,间距越大;低频振动的时候,初相位会引起目标像和各阶次的虚假像之间出现相消或相长,而在高频振动的时候,初相位对成像没有影响。

现实生活中,没有任何物体可以在激光波长的尺度上可被视为静止。目标附近的任何动静,如蛙

从图 7 可以看出,如果目标区域有局部振动,而振幅又较大时,反而不会对静止部分的分辨产生太大影响。这是因为振动部分相对于静止部分,其像的强度较低。这个结果也反映了一个有趣的现象,例如,一辆停在树叶下的装甲车,树叶在随风作剧烈摇摆,那么树叶反而不会干扰到对被其部分遮盖的装甲车的分辨。

鸣虫跳、风声鹤唳等,都有可能引起目标表面反射层的微小振动。对于基于目标表面反射光成像的 SAL 而言,高质量的成像,可能是复杂甚至困难的。

当然,大气湍流、目标特性等引起探测激光的相干性退化也是影响 SAL 成像的严重问题^[16],但是,仅就 SAL 成像对目标振动高度敏感的问题而言,就需要在 SAL 系统设计中引起重视,并做慎重处理。

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 S. M. Beck, J. R. Buck, W. F. Buell *et al.*. Synthetic-aperture imaging lidar: 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 Laser and Electro-Optics/International Quantum Electronics, OSA, 2009. PHhB3
- 4 B. W. Krause, J. Buck, C. Ryan *et al.*. Synthetic aperture lidar flight demonstration [C]. CLEO-Laser Application to Photonic Applications, OSA, 2011. PDPB7
- 5 Zhou Yu, Xu Nan, Luan Zhu *et al.*. Two-dimensional imaging experiment of a point target in a laboratory-scale synthetic aperture imaging lidar [J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(2): 566~568
周煜, 许楠, 栾竹等. 实验室合成孔径激光雷达点目标二维成像实验[J]. *光学学报*, 2009, **29**(2): 566~568
- 6 Liu Liren, Zhou Yu, Zhi Ya'nan *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雷达成像雷达演示样机及其实验室验证[J]. *光学学报*, 2011, **31**(9): 0900112
- 7 Xing Mengdao, Guo Liang, Tang Yu *et al.*. Design on the experiment optical system of synthetic aperture imaging lidar [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2009, **38**(2): 290~294
邢孟道, 郭亮, 唐禹等. 合成孔径激光雷达实验系统设计[J]. *红外与激光工程*, 2009, **38**(2): 290~294
- 8 W. Buell, N. Marechal, J. Buck *et al.*. Demonstrations of synthetic aperture imaging lidar [C]. *SPIE*, 2005, **5791**: 152~166
- 9 Hong Guanglie, Guo Liang. Effects of angle vibration on imaging quality of synthetic aperture lidar [J]. *J. Infrared Millim. Waves*, 2011, **30**(6): 571~576
洪光烈, 郭亮. 角振动对合成孔径激光雷达成像的影响[J]. *红外与毫米波学报*, 2011, **30**(6): 571~576
- 10 Li Zengju, Wu Jin, Liu Guoguo *et al.*. Preliminary investigation on airborne SAL imaging with platform vibration [J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(4): 994~1001
李增局, 吴谨, 刘国国等. 振动影响机载合成孔径激光雷达成像初步研究[J]. *光学学报*, 2010, **30**(4): 994~1001
- 11 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
- 12 Zhao Meijing, Wu Jin, Zhu Bingqi. Mathematical simulation on stripmap mode synthetic aperture lidar imaging with random phase errors [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2011, **40**(12): 2418~2423
赵美静, 吴谨, 朱炳祺. 随机相位误差影响条带模式合成孔径激光雷达成像的数学模拟[J]. *红外与激光工程*, 2011, **40**(12): 2418~2423
- 13 The General Reserve Department of CPLA. GJB 150. 16-86. National Military Standard for Environment I [S]. Military Standard Press for Chinese Defense Advanced Research Projects Agency, 1992. 132~133
中国人民解放军总装备部 GJB 150. 16-86, 国家军用标准 环境 I [S]. 国防科工委军标出版发行部, 1992. 132~133
- 14 Xi dingping. Bessel Functions [M]. Beijing: High Education Press, 1998
奚定平. 贝塞尔函数 [M]. 北京: 高等教育出版社, 1998
- 15 W. G. Carrara, R. S. Goodman, R. M. Majewski. Spotlight Synthetic Aperture Radar: Signal Processing Algorithms [M]. Norwood, MA: Artech House, 1995. 386~399
- 16 T. J. Karr. Synthetic aperture lidar resolution through turbulence [J]. *J. Opt. Soc. Am. A*, 2003, **20**(6): 1067~1083

栏目编辑: 何卓铭