

线振动对合成孔径激光雷达成像的影响分析

洪光烈¹ 郭亮^{2*}

(¹ 中国科学院上海技术物理研究所, 上海 200083
² 西安电子科技大学技术物理学院, 陕西 西安 710071)

摘要 合成孔径激光雷达采用激光作为信号载波,通过孔径合成技术实现高分辨率成像。但是平台的振动会对激光雷达图像质量产生影响。针对平台线振动对合成孔径激光雷达影响进行了分析,通过对带有振动的合成孔径激光雷达瞬时斜距展开,可以将线振动的影响分为沿航线振动影响和垂直航线振动影响,其中沿航线振动对图像质量的影响可以忽略,而垂直航线的振动对图像质量影响敏感,会导致方位向散焦而无法成像。最后通过仿真验证了分析结果。

关键词 遥感;合成孔径激光雷达;线振动;瞬时斜距;误差分析

中图分类号 TN958 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201232.0428001

Analysis of Effects of Line Vibration on Imaging Quality of Synthetic Aperture Ladar

Hong Guanglie¹ Guo Liang²

(¹ Shanghai Institute of Technical Physics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200083, China)
² School of Technical Physics, Xidian University, Xi'an, Shaanxi 710071, China)

Abstract Synthetic aperture ladar (SAL), whose carrier is laser, makes use of synthetic aperture processing to improve the resolution of images. Vibration from the platform of SAL will affect on the imaging quality of SAL. The effects of line vibration on the imaging quality are analyzed. Firstly, instantaneous range of synthetic aperture ladar with vibration is unwrapped and the effect of vibration is divided into two classes, the along-track and the cross-track one. After analysis, the effect of the along-track vibration can be ignored while the cross-track one cannot. And the vibration only affects the azimuth direction result in defocusing of the azimuth and the imaging quality. Finally, the simulations prove the validity of the analysis.

Key words remote sensing; synthetic aperture ladar; line vibration; instantaneous slant range; error analysis

OCIS codes 280.3640; 280.6730; 280.4788

1 引 言

合成孔径激光雷(SAL)达作为一种全新的观测手段,受到了国内外学者的广泛关注^[1~7]。2002年,美国海军实验室第一个成功地实现了合成孔径激光雷达的室内二维成像实验^[2],解决了方位频率同步的问题。2005年,美国宇航实验室也成功获得了多幅合成孔径激光雷达的室内二维图像^[3]。2009

年,国内中国科学院上海光学精密机械研究所^[4]和西安电子科技大学^[5]分别独立地实现了合成孔径激光雷达的室内二维成像实验,并在2011年中国科学院上海光学精密机械研究所给出了一种 $\Phi 300$ mm孔径合成孔径激光雷达演示样机^[6]。具有里程碑意义的第一幅室外机载的合成孔径激光雷达图像^[8],由Lockheed Martin公司于2011年实验成功,将更加激

收稿日期: 2011-05-07; 收到修改稿日期: 2011-07-06

基金项目: 国家 973 计划(2009CB724004)、国家自然科学基金青年基金(61107006)和中央高校基本科研业务费(K50510050008)资助课题。

作者简介: 洪光烈(1966—),男,副研究员,主要从事激光雷达与激光遥感等方面的研究。

E-mail: glhong@mail. sitp. ac. cn

* 通信联系人。E-mail: lguo@mail. xidian. edu. cn

发了研究学者对合成孔径激光雷达的研究热情。

合成孔径激光雷达综合了微波雷达成像和光学成像的优势,其基本原理与微波雷达成像相同,利用的是激光雷达平台和目标之间的相对运动,采取信号处理技术,获得高分辨率图像。“运动是合成孔径技术的依据,也是产生问题的根源”^[9],由于合成孔径激光雷达采用激光作为信号的载波,波长比微波成像短3~4个量级,所以平台的微小振动可能会对合成孔径激光雷达图像产生剧烈的影响。虽然合成孔径激光雷达的研究正在如火如荼地开展,但是研究振动对合成孔径激光雷达的影响较少^[10,11]。

在研究平台振动对合成孔径激光雷达影响前,应先了解平台的振动模型和特点。传统的光学成像^[12]把运动平台的振动分为两类:角振动和线振动。角振动的影响主要是针对于激光波束角度,直观看来主要影响合成孔径激光雷达的幅度,引起幅度的调制。而线振动的影响在文献^[10,11]中作了分析。但是文献^[10]和^[11]分析方法较为相似,而其中分析直接将线振动的影响作为一个误差相位项,没有能够深入地分析误差是如何引入的,没有给出其数学模型和解析的表达式,这种误差对合成孔径激光雷达参数的具体影响没有充分分析,并且其只分析了垂直航线的线振动影响,而没有考虑沿航线的线振动的影响。本文从合成孔径激光雷达成像原理入手,建立合理的数学模型,对线振动误差如何引入,误差对具体参数产生的影响进行深入分析,最后通过仿真验证所提结论。

2 合成孔径激光雷达成像原理

2.1 合成孔径激光雷达基本原理

合成孔径激光雷达平台运动方向为方位向,与方位垂直的方向(也就是距离向)通过发射大时宽带宽的信号,经过脉冲压缩实现高分辨率。对于合成孔径信号处理技术而言,最重要的参数就是瞬时斜距,即目标和激光雷达相位中心之间的瞬时距离。距离随着方位时间(也称作慢时间)变化,就是所谓的距离方程。随着激光雷达平台的运动,靠近目标距离随之减小,远离目标距离增大。这种距离的变化,引起脉冲间相位的变化,而记录这种相位的变化是得到方位高分辨的基础,最终实现高分辨二维成像。几何模型如图1所示,雷达平台以速度 v 沿理想 X 方向飞行,目标与雷达相位中心最近距离为 R_0 ,平台下视角为 β 。

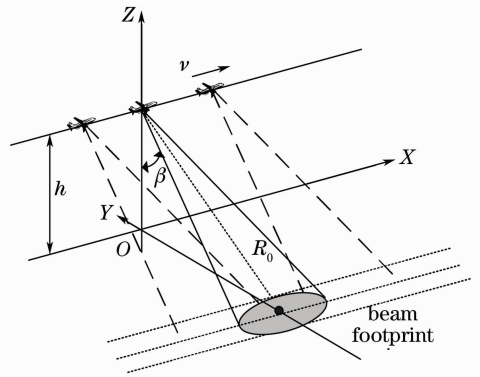


图1 合成孔径激光雷达几何模型

Fig.1 Geometry of SAL system

2.2 相位中心距离与方位匹配函数

合成孔径激光雷达方位向呈现一个近似的线性调频信号,方位向高分辨的获得就是通过对方位向线性调频信号的匹配滤波实现的。方位向线性调频信号的推导源于刚才所提到的距离方程,这里假设距离向信号的调制周期远小于脉冲重复频率,也就是说,传统的“一步一停”^[9]的假设成立。那么由图1可得距离方程

$$R = \sqrt{R_0^2 + X_m^2} = \sqrt{R_0^2 + (vt_m + X_0)^2}, \quad (1)$$

式中 R_0 为目标到平台的最近距离, X_m 为平台的方位位置, v 为平台速度, t_m 为方位慢时间,以目标与平台之间的最近时刻为慢时间零点, X_0 为平台波束中心照射目标时平台的方位位置,当平台以正侧视工作时该值为零,当平台以某一斜视角工作时,其斜视角为 $\tan \alpha = X_0/R_0$,此时方位时间假设为 t_{dc} 。

然后对距离(1)式进行泰勒展开可以得到(当高阶项小于 $\lambda/4$ 时,该项对成像的影响是可以忽略的^[12]):

$$R \approx R_0 + \frac{(vt_m + X_0)^2}{2R_0} = R_0 + \frac{v^2 t_m^2 + 2vt_m X_0 + X_0^2}{2R_0}. \quad (2)$$

可以构造出方位向匹配函数(常数相位对成像没有影响):

$$H = \exp^* \left(j \frac{4\pi}{\lambda} \frac{v^2 t_m^2 + 2vt_m X_0 + X_0^2}{2R_0} \right) = \exp^* \left(j \frac{4\pi}{\lambda} \frac{v^2 t_m^2 + 2vt_m X_0}{2R_0} \right), \quad (3)$$

式中 $*$ 表示共轭, λ 为激光波长, t_m 的一次相位影响成像目标点的位置,而 t_m 的二次相位影响图像的聚焦效果。而方位脉压就是通过几何模型的斜距历程得到方位向信号相位信息,构造相位的匹配函数进行匹配实现方位脉压最终成像的。

3 线振动影响分析

3.1 线振动的数学模型

振动分为^[12]角振动和线振动。其划分是通过振动和相位中心的变化进行区分的。如图2所示,线振动表示引起的平台发射和接收的相位中心位置产生变化的振动,角振动表示引起平台发射和接收的波束角的变化而使得照在目标上的激光幅度产生变化的振动。线振动引起激光雷达相位中心的变化引入相位误差,影响合成孔径激光雷达的多普勒频谱的频率特性,进而对成像产生影响。角振动必然引起激光波束轴向不能对目标有效照射,这种误差将影响合成孔径激光雷达的多普勒频谱的幅度特性和接收系统的信号的相位特性^[13]。本文主要针对线振动进行讨论,所以忽略角振动的影响,并且也忽略由于发射波束的形式不同而产生的方位信号幅度的变化。

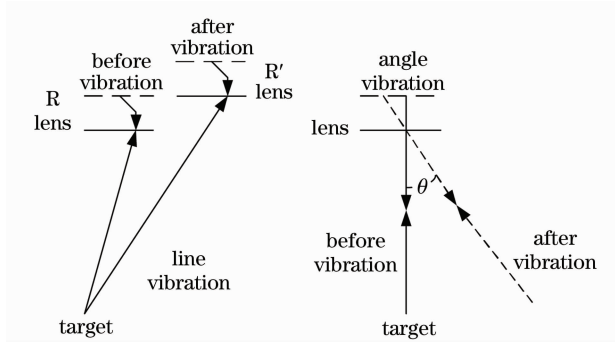


图2 线振动和角振动

Fig. 2 Line vibration and angle vibration

平台线振动是由于平台受到来自平台内部或外部力的作用而使得激光发射和(或)接收透镜位置发生微小的变化。这里假设内部或外部的影响因素是一个平稳随机过程,则经过振动控制系统滤波后,最终输出的平台角振动的是相互独立的各次谐波,其数学表达式为^[14]

$$\Delta A(t) = \sum_i A_{mi} \sin(2\pi f_i t_m + \varphi_i), \quad (4)$$

式中 A_{mi} 、 f_i 和 φ_i 分别表示为第 i 个振动分量的幅度、频率和初始相位。

3.2 线振动的影响分析

假设目标以正侧视工作,沿着“理想航迹”运动,按照图1的几何模型,理想航迹为沿 X 轴的匀速直线运动,可以表示为 $[vt_m, R_0 \sin \beta, R_0 \cos \beta]$ 。而实际由于平台的振动引起 X 、 Y 和 Z 方向与理想轨迹偏离 $X(t_m)$ 、 $Y(t_m)$ 和 $Z(t_m)$,那么实际平台的运动轨迹可以表示为 $[vt_m - X(t_m), Y(t_m), Z(t_m)]$ 。其中

$$X(t_m) = A_x \sin(2\pi f_x t_m + \varphi_x), \quad (5)$$

$$Y(t_m) = A_y \sin(2\pi f_y t_m + \varphi_y), \quad (6)$$

$$Z(t_m) = A_z \sin(2\pi f_z t_m + \varphi_z). \quad (7)$$

为了分析方便,把线振动的影响分为两类进行分析:沿航线的线振动 $X(t_m)$ 与垂直航线的线振动^[11] $Y(t_m)$ 和 $Z(t_m)$ 。

刚才提到线振动是引起相位中心变化的振动,所以相位中心的变化必然带来合成孔径激光雷达成像最重要的参数——瞬时斜距的变化,将(5)~(7)式代入(1)式中,可得

$$R = \sqrt{[vt_m - X(t_m)]^2 + [R_0 \sin \beta - Y(t_m)]^2 + [R_0 \cos \beta - Z(t_m)]^2} \approx R(0) + R'(0)t_m + \frac{1}{2!}R''(0)t_m^2 + \frac{1}{3!}R'''(0)t_m^3 + \dots, \quad (8)$$

$$R(0) = \sqrt{X(0)^2 + [R_0 \sin \beta - Y(0)]^2 + [R_0 \cos \beta - Z(0)]^2}, \quad (9)$$

其中 $X(0) = A_x \sin \varphi_x$, $Y(0) = A_y \sin \varphi_y$, $Z(0) = A_z \sin \varphi_z$ 。

$$R'(0) = \frac{-X(0)[v - X'(0)] - Y'(0)[R_0 \sin \beta - Y(0)] - Z'(0)[R_0 \cos \beta - Z(0)]}{R(0)}, \quad (10)$$

其中, $X'(0) = A_x 2\pi f_x \cos \varphi_x$, $Y'(0) = A_y 2\pi f_y \cos \varphi_y$, $Z'(0) = A_z 2\pi f_z \cos \varphi_z$ 。

$$R''(0) = \frac{1}{R(0)} \{ [v - X'(0)]^2 + X(0)X''(0) - Y''(0)[R_0 \sin \beta - Y(0)] + [Y'(0)]^2 - Z''(0)[R_0 \cos \beta - Z(0)] + [Z'(0)]^2 - [R'(0)]^2 \}, \quad (11)$$

其中, $X''(0) = -A_x 4\pi^2 f_x^2 \sin \varphi_x$, $Y''(0) = -A_y 4\pi^2 f_y^2 \sin \varphi_y$, $Z''(0) = -A_z 4\pi^2 f_z^2 \sin \varphi_z$ 。

$$R'''(0) = \frac{1}{R(0)} \{ -2X''(0)[v - X'(0)] + X(0)X'''(0) + X(0)X''(0) - Y'''(0)[R_0 \sin \beta - Y(0)] + 3Y(0)Y''(0) - Z'''(0)[R_0 \cos \beta - Z(0)] + 3Z(0)Z''(0) - 3R'(0)R''(0) \}, \quad (12)$$

其中, $X'''(0) = -A_x 8\pi^3 f_x^3 \cos \varphi_x, Y'''(0) = -A_y 8\pi^3 f_y^3 \cos \varphi_y, Z'''(0) = -A_z 8\pi^3 f_z^3 \cos \varphi_z$ 。

在(8)式中,对 R 的展开的近似必须要保证省略的部分产生的距离误差小于 $\lambda/4$ 。考虑沿航线的线振动的影响,即(8)式中的忽略 Y 和 Z 方向的振动带来的位置误差,结合图 3(a)进行讨论。

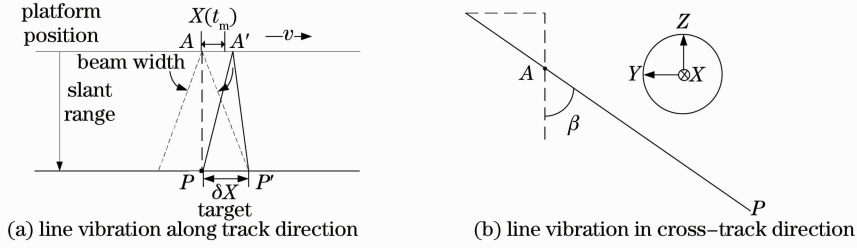


图 3 线振动影响示意图

Fig. 3 Sketch map of line vibration

根据(5)式某一时刻的平台相位中心由于振动的影响理想位置和实际位置分别为 A 和 A' ,那么,正侧方场景中点目标 P 的距离差为

$$\Delta r_X = R_{A'P} - R_{AP} \approx \frac{X(0)^2}{2R_0} + \frac{-X(0)[v - X'(0)]}{R_0} t_m + \frac{[v - X'(0)]^2 + X(0)X''(0)}{2R_0} t_m^2 + \frac{1}{R(0)} \{-2X''(0)[v - X'(0)] + X(0)X'''(0) + X(0)X''(0)\} t_m^3 + \dots, \quad (13)$$

(13)式中省略的 t_m 高次项部分通过推导可以发现都有 $1/R(0)$ 项这一系数,那么平台距离 R_0 机载平台为几十千米,星载为几百千米,而一般振动幅度为毫米量级,而且合成孔径激光雷达成像合成孔径时间很短,机载一般为 10^{-4} m 量级,那么距离差 Δr_X 远小于 $\lambda/4$,那么其对相位的影响可以忽略。因此,沿航线的线振动对相位中心的影响可以忽略,对成像的影响不明显,即(8)式中的 $X(t_m)$ 引起的影响是可以忽略的。

接下来考虑线振动在垂直航线的影响,即(8)式中忽略沿航线振动带来的位置误差,那么由垂直航线振动带来的位置误差可以表示为

$$\begin{aligned} \Delta r \approx & \frac{(vt_m)^2}{2R_0} + \left[-Y(0)\sin\beta - Z(0)\cos\beta + \frac{Y(0)^2}{2R_0} + \frac{Z(0)^2}{2R_0} \right] + \\ & \left[-Y'(0)\sin\beta - Z'(0)\cos\beta + \frac{Y(0)Y'(0)}{R_0} + \frac{Z(0)Z'(0)}{R_0} \right] t_m + \\ & \left[\frac{-Y''(0)\sin\beta - Z''(0)\cos\beta}{2} + \frac{Y(0)Y''(0) + Y'(0)^2}{R_0} + \frac{Z(0)Z''(0) + Z'(0)^2}{R_0} \right] t_m^2 + \\ & \frac{1}{2R_0} \left[-Y'(0)\sin\beta - Z'(0)\cos\beta + \frac{Y(0)Y'(0)}{R_0} + \frac{Z(0)Z'(0)}{R_0} \right]^2 t_m^2 + \\ & \frac{1}{3!R_0} \left[-Y'''(0)[R_0\sin\beta - Y(0)] - Z'''(0)[R_0\cos\beta - Z(0)] \right] t_m^3 + \\ & \frac{1}{3!R_0} [3Y(0)Y''(0) + 3Z(0)Z''(0)] t_m^3 + \dots \end{aligned} \quad (14)$$

结合图 3(b)进行讨论,文献[11]把垂直航线平面中 Y 和 Z 方向的统一处理,这里采用不同的方法,把 Y 和 Z 方向的振动投影到波束中心方向,即 AP 方向(即径向) Δr_R 和与之垂直的方向 Δr_N 。初步分析由 Δr_N 产生的影响为

$$\sqrt{\Delta r_N^2 + R_0^2} - R_0 \approx \frac{1}{2} \left(\frac{\Delta r_N}{R_0} \right) \Delta r_N. \quad (15)$$

Δr_N 大小通常为毫米量级,所以可以认为其影响是可以忽略的。类比(13)式分析(14)式可以得到,主要表现为 Y 和 Z 方向振动在径向的投影即 Δr_R ,其远大于 $\lambda/4$ 所以其影响不能忽略。那么,由于线振动引起的目标相位中心的位置误差可以表示为

$$\begin{aligned}
 \Delta r_R \approx & [-Y(0)\sin\beta - Z(0)\cos\beta] + [-Y'(0)\sin\beta - Z'(0)\cos\beta]t_m + \\
 & \left[\frac{-Y''(0)\sin\beta - Z''(0)\cos\beta}{2} - \frac{[Y'(0)\sin\beta + Z'(0)\cos\beta]^2}{2R_0} \right] t_m^2 + \\
 & \frac{1}{2R_0} \{-Y'''(0)[R_0\sin\beta - Y(0)] - Z'''(0)[R_0\cos\beta - Z(0)]\} t_m^3 \approx \\
 & [-Y'(0)\sin\beta - Z'(0)\cos\beta]t_m + \frac{1}{2!}[-Y''(0)\sin\beta - Z''(0)\cos\beta]t_m^2 + \\
 & \frac{1}{3!}[-Y'''(0)\sin\beta - Z'''(0)R_0\cos\beta]t_m^3 + \dots, \quad (16)
 \end{aligned}$$

简化(16)式可以改写为

$$\Delta r_R \approx \sum_{n=1}^N \frac{1}{n!} [-Y^{(n)}(0)(\sin\beta)^{\text{mod } 2} (\cos\beta)^{\text{mod } 2-1} - Z^{(n)}(0)(\sin\beta)^{\text{mod } 2-1} (\cos\beta)^{\text{mod } 2}] t_m^n, \quad (17)$$

式中 $Y^{(n)}$ 表示对函数 $Y(t_m)$ 求 n 阶导数, mod 表示求余。常数项对成像没有影响,但是对成像后处理等需要相位信息的处理是需要考虑的,这里可以忽略。一次项将会影响成像目标的多普勒中心进而影响目标的成像位置,其中下视角 β 为常数,产生影响的是 $Y'(0)$ 和 $Z'(0)$,所以多普勒中心的影响主要受到振动的幅度和频率的影响,其大小与振动的幅度和频率的乘积相关;二次项将会影响成像目标的多普勒调频率进而影响目标的聚焦程度,进而影响成像质量,同样下视角 β 为常数,产生影响的是 $Y''(0)$ 和 $Z''(0)$,所以多普勒调频率的影响主要受到振动的幅度和频率的影响,其大小与振动的幅度和频率平方的乘积相关,即与振动的峰值加速度有关。振动对图像散焦的影响通过解析的表达式可以看出与文献[11]中仿真的出的结论相似。而高阶项影响的是脉压辛格(sinc)函数的旁瓣^[15],前面提到当误差相位小于 $\lambda/4$ 时,影响可以忽略,这里高阶项的大小主要取决于振动信号的频率和振幅,以本文给出的参数为例,在激光基准波长 $2 \mu\text{m}$,发射和接收孔径(直径) 0.05 m ,目标到平台距离 10 km ,平台速度 75 m/s ,其

合成孔径时间约为 5.3 ms ,在三个方向振动都为 0.2 mm 振幅, 50 Hz 频率,初相 45° 的情况下,展开式二阶项最大为 $289 \mu\text{m}$,三阶项最大为 $157 \mu\text{m}$,四阶项最大为 $66 \mu\text{m}$,五阶项最大为 $22 \mu\text{m}$,所以振动的补偿问题将是一个非常困难的研究课题。

4 仿真实验

这里以机载平台为例:激光基准波长 $\lambda = 2 \mu\text{m}$,发射和接收孔径(直径) $D_a = 0.05 \text{ m}$,目标到平台距离 $R_0 = 10 \text{ km}$,平台速度 $v = 75 \text{ m/s}$,脉冲重复频率 $f_{\text{pr}} = 6 \text{ kHz}$,脉冲调制周期 $40 \mu\text{s}$,信号带宽 6 GHz 。场景中放置 3 个点目标坐标分别为 $(0, 0, 0)$, $(0.3, 0.3, 0)$, $(-0.2, -0.2, 0)$ 。如图 4(a) 为在没有任何振动情况下利用文献[16]成像算法的点目标成像效果图。首先考虑沿航线的振动影响,参考文献[11, 17]中参数的命名格式,设沿航线的振动参数为 2_50_60 ,表示振幅为 2 mm ,频率为 50 Hz ,初相为 60° 。从图 4(b)、(c) 中可以看出,沿航线振动的影响可以忽略,这也验证了(12)式分析的结论。

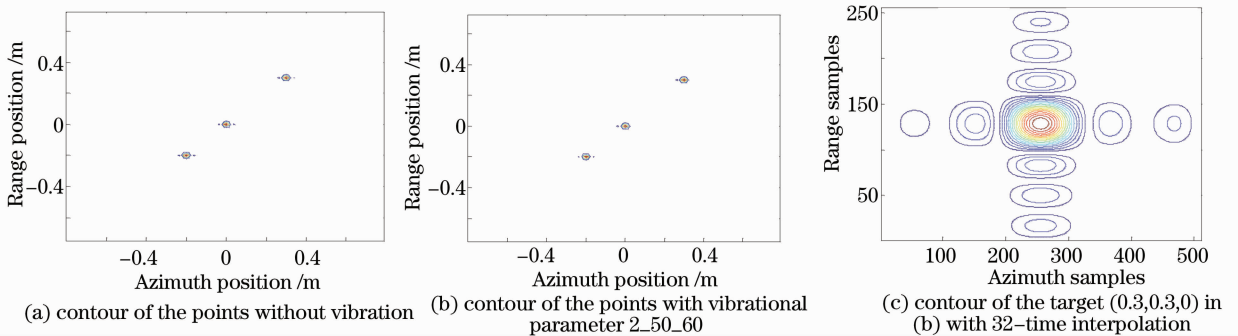


图 4 有和无振动时点目标等高线图

Fig. 4 Contour of the points with and without vibration

然后考虑垂直航线的振动影响, Y 和 Z 方向都为参数 0.2_50_60 , 其峰值加速度为 0.5 m/s^2 。从图 5(a)中可以看出, 当振动引起的位置误差为亚毫米量级大于 $\lambda/4$, 此时引起的相位误差较大, 导致方位向出现了严重的散焦, 分辨率恶化无法成像, 而距离向影响可以忽略。当振幅减小 3 个数量级达到亚微米量级的振动时, 也就是其峰值加速度为 0.0005 m/s^2 , 由于振动幅度较小, 并且振动频率较低, 产生的相位误差较小, 这时垂直航线的振动影响可以忽略如图 5(b)所示, 并且对 $(0, 0, 0)$ 点进行 32 倍插值, 如图 5(c)所示, 可以看出聚焦良好, 只是对方位向聚焦的旁瓣稍有影响, 将图 5(c)中方位向数据与没有振动

情况下的点目标插值后的采样点数据比较如图 5(d)所示, 可以看出这种量级振动影响是可以忽略的, 同时看到成像点目标在有振动情况下位置略有偏移, 偏移了 16 个单元, 这是由于振动带来的一次项相位误差引起的, 不过由于该图为 32 倍插值的结果, 所以实际中偏移量仅为半个距离单元, 这种量级的影响是可以忽略的。提高 Y 和 Z 方向振动频率都为参数 0.0002_500_60 , 其峰值加速度为 0.05 m/s^2 成像效果图如图 5(e)所示可见即使较小的振动幅度但是由于振动频率较高, 即振动的峰值加速度较大, 同样影响成像结果, 这也验证了对(15)式的分析, 即方位向的聚焦与振动的峰值加速度有关。

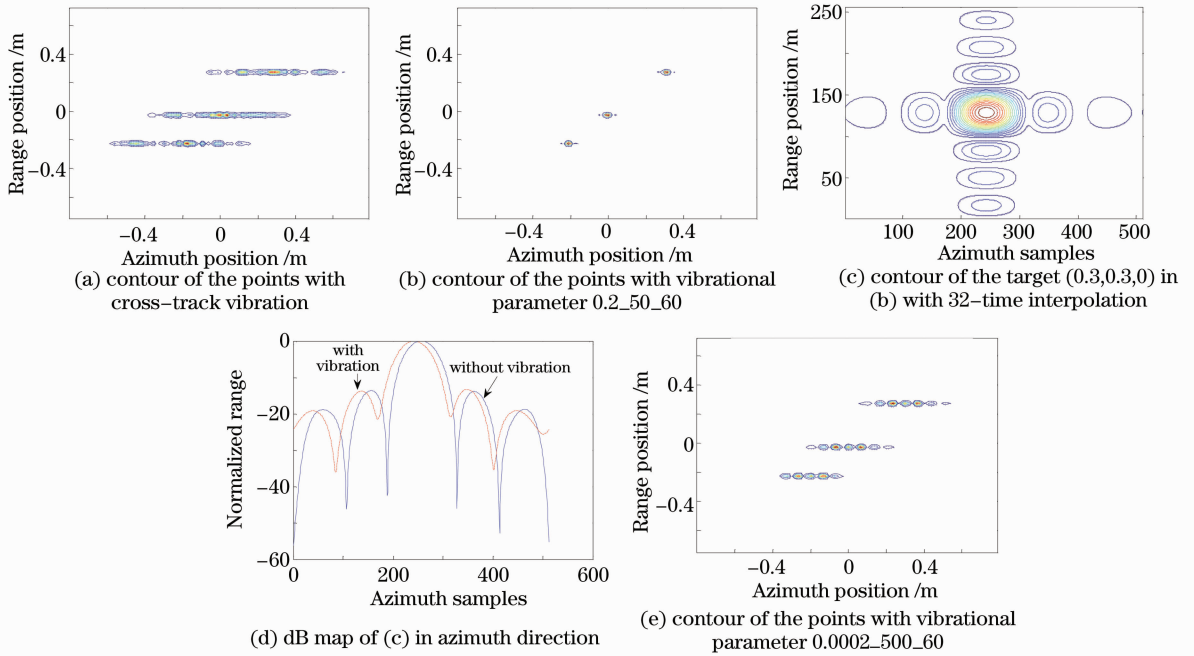


图 5 带有垂直航线线振动时点目标等高线图

Fig. 5 Contour of the points with cross-track vibration

由(15)式, 可以发现如果参数设计恰当, 其实 Y 、 Z 方向的振动如果大小相等方向相反, 振动是可以抵消的。假设 Y 和 Z 方向参数分别为 0.2_50_60

和 -0.2_50_60 , 下视角(俯仰角的余角)为 45° , 发现振动影响完全抵消如图 6(a)所示。此时, 改变参数 Y 和 Z 方向参数分别为 0.2_50_60 和 -0.2_50_30

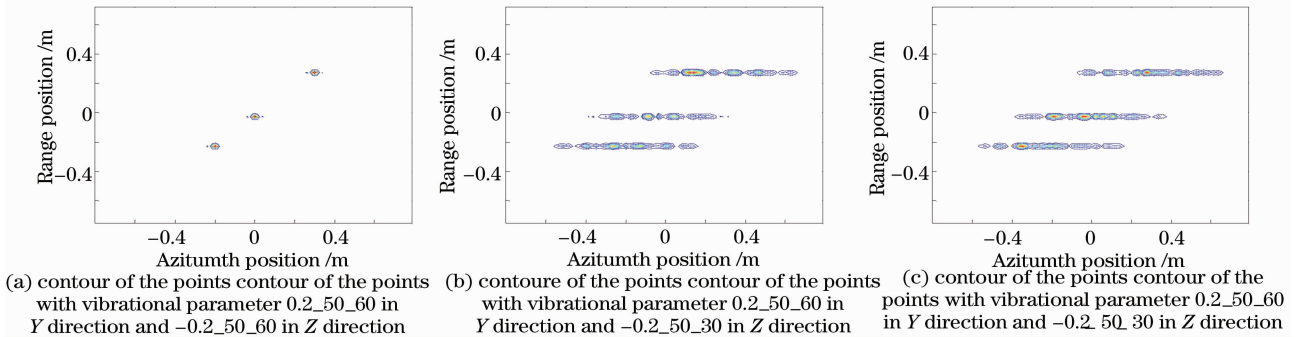


图 6 下视角为 45° 的点目标成像等高线图

Fig. 6 Contour of the points imaged with downwards angle 45°

30,这时由于两种振动不再同步,振动无法抵消方向无法聚焦,最终导致无法成像如图6(b)所示,改变Z方向振动的频率可以得到同样的结果如图6(c)所示。

此时,可以发现,线振动对合成孔径激光雷达成像的影响主要表现为Y方向振动和Z方向振动博弈后合振动的影响,包括振动的振幅、频率和初相的影响,而振动的主要影响因素为振动的幅度和频率,这点可以从(15)式明显看出。

5 结 论

合成孔径激光雷达作为遥感领域的一个重要技术手越来越受到关注。但是平台振动的影响作为合成孔径激光雷达总体设计的重要技术指标,却较少被分析。本文对平台线振动引起的相位中心位置误差进行分析,以单频简谐振动为特例对振动影响进行理论推到和仿真分析,得到其影响机理:线振动对合成孔径激光雷达成像的影响主要表现为垂直航线合振动的影响,对沿航线的影响可以忽略。虽然根据振动国家军用环境标准振动条件将更为复杂,但是其影响的根本原理是不变的。仿真结果同时还表明,振动的影响主要是对方位向的影响,对距离的影响可以忽略。

参 考 文 献

- 1 S. Marcus, B. D. Colella. Solid-state laser synthetic aperture radar [J]. *Appl. Opt.*, 1994, **33**(6): 960~964
- 2 M. Bashkansky, E. L. Lucke, E. Funk. Two-dimensional synthetic aperture imaging in the optical domain [J]. *Opt. Lett.*, 2002, **27**(22): 1983~1985
- 3 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
- 4 Zhou Yu, Xu Nan, Luan Zhu *et al.*. 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
- 5 Xing Mengdao, Guo Liang, Tang Yu *et al.*. Design on the indoor optical system of synthetic aperture imaging lidar[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2009, **385**(2): 290~294
邢孟道,郭亮,唐禹等. 合成孔径激光成像雷达实验系统设计[J]. *红外与激光工程*, 2009, **385**(2): 290~294
- 6 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室验证[J]. *光学学报*, 2011, **31**(9): 0900112
- 7 Hong Guanglie, Wang Jianyu, Meng Zhaoxia *et al.*. Chirped amplitude modulation and range dimension processing of near infrared synthetic aperture lidar [J]. *J. Infrared & Millim. 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
- 8 B. Krause, J. Buck, C. Ryan *et al.*. Synthetic aperture lidar flight demonstration [C]. 2011-Laser Applications to Photonic Applications, OSA Technical Digest (CD) (Optical Society of America, 2011), 2011. PDPB7
- 9 Bao Zheng, Xing Mengdao, Wang Tong. Technologies of Radar Imaging [M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2005
保铮,邢孟道,王彤. 雷达成像技术 [M]. 北京: 电子工业出版社, 2005
- 10 P. Dongwook. High Resolution Laser Radar Performance Analysis [D]. Massachusetts: Massachusetts Institute of Technology, 1998
- 11 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
- 12 Zhang Bao. Study of Active Vibration Control of Moving Vehicles Imaging [D]. Changchun: Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, 2003
张葆. 动载体成像振动主动控制技术的研究[D]. 长春: 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 2003
- 13 Zhang Chengbo. Synthetic Aperture Radar-Principle, Analysis of System and Application[M]. Beijing: Science Press, 1989
张澄波. 综合孔径雷达——原理、系统分析与应用[M]. 北京: 科学出版社, 1989
- 14 Liu Liren. Synthetic aperture laser imaging rader (I): unified operation mode and two-dimensional data collection equation[J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(1): 1~6
刘立人. 合成孔径激光成像雷达(IV): 统一工作模式和二维数据收集方程 [J]. *光学学报*, 2009, **29**(1): 1~6
- 15 Jiang Yu. Research on the Simulation of Super-Gaussian Random Vibration Environment with Controllable Frequency Spectrum and its Applications [D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2005
蒋瑜. 频谱可控的超高斯随机振动环境模拟技术及其应用研究[D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2005
- 16 Guo Liang, Xing Mengdao, Liang Yi *et al.*. An algorithm for airborne spotlight synthetic aperture imaging lidar data processing [J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(6): 1183~1190
郭亮,邢孟道,梁毅等. 一种机载合成孔径成像激光雷达聚束模式成像算法[J]. *光学学报*, 2008, **28**(6): 1183~1190
- 17 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