

# 角振动对合成孔径激光雷达成像的影响

洪光烈<sup>1</sup>, 郭亮<sup>2</sup>

(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,通过合成孔径技术实现高分辨率成像.由于激光波长较短,平台的振动将对激光雷达图像质量产生影响.基于成对回波理论,针对平台角振动对合成孔径激光雷达影响进行分析,详细推导角振动影响引起的成对回波的解析表达式,其影响表现为成对的虚假目标并且加窗压低旁瓣的处理方法对成对回波是无效的.最后通过仿真验证了分析结果,该结论为合成孔径激光雷达系统总体分析与设计提供了理论依据.

**关键词:**合成孔径激光雷达;角振动;成对回波

**中图分类号:**TN958.98 **文献标识码:**

## Effects of angle vibration on imaging quality of synthetic aperture radar

HONG Guang-Lie<sup>1</sup>, GUO Liang<sup>2</sup>

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

**Abstract:** Synthetic aperture radar (SAR), whose carrier is laser, makes use of synthetic aperture processing to improve the resolution of images. Vibrations from the platform of SAR would have effects on the imaging quality of SAR because of the short wavelength of laser. Firstly, based on the paired-echo theory, the effects of angle vibration on the imaging quality are analyzed. Then, the amplitude and the position of the paired-echoes are deduced in detail. It was found that the vibrations would result in paired false target which cannot be eliminated by the traditional windowing method used in suppressing the side-lobes. Finally, the simulations prove the validity of the analysis. It provides theoretical foundation for analysis and design of SAR system.

**Key words:** synthetic aperture radar; angle vibration; paired-echoes

**PACS:** 84.40Xb

### 引言

合成孔径激光雷达(Synthetic Aperture Radar, SAR)作为一种全新的观测手段,受到国内外学者的广泛关注<sup>[1-2]</sup>.多项SAR实验的成功<sup>[1-2]</sup>使SAR成为研究热点.

SAR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<sup>[3]</sup>,由于SAR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都会对SAR图像产生剧烈的影响.SAR的研究正在展开,但是研究振动对SAR影响的却很少<sup>[4-5]</sup>.

在研究平台振动对SAR影响前,首先要了解平台的振动模型及特点.传统光学成像<sup>[6]</sup>把运动平台的振动分为角振动和线振动.文献[5]主要针对机载平台线振动对SAR进行了分析.而角度的稳定性直接影响星载或机载SAR平台激光束控制系统及卫星、飞机机械构型的方案设计,所以必须针对平台角振动对SAR影响进行深入分析.

### 1 合成孔径激光雷达成像原理与振动

SAL 工作原理如图 1 所示. 随着平台的移动, 被激光信号照射到的目标由于位置不同, 导致信号的强度会随之变化. 假设为高斯光束, 当以正侧视模式工作时, 如图 2 所示, 随着平台位置的变化, 目标的强度也呈现高斯分布, 而平台到目标的瞬时距离也随之变化, 主要反应在相位历程(即其多普勒历程)的变化, 在方位向呈现出一个近似的线性调频信号. 合成孔径就是利用平台相位中心与目标之间在不同时刻的位置变化形成的相位差实现方位高分辨. 而线振动和角振动的划分也是通过振动和相位中心的变化进行区分的. 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, 如图 3 所示. 线振动引起激光雷达相位中心的变化, 引入相位误差, 影响 SAL 的多普勒频谱的频率特性, 对成像产生影响, 文献[5]已经进行了分析; 角振动引起激光波束轴向不能对目标有效照射, 影响 SAL 的多普勒频谱的幅度特性, 对成像产生影响.

### 2 角振动对合成孔径激光雷达成像影响分析

#### 2.1 角振动的数学模型

平台角振动是由于受到来自平台内部或外部的作用使激光波束控制系统角度发生微小的变化. 这里假设内部或外部的影响因素是一个平稳随机过程, 则经过波束控制系统滤波后, 最终输出的平台角振动是相互独立的各次谐波, 其数学表达式为

$$\Delta\theta(t) = \sum_i \theta_{mi} \sin(2\pi f_i t_m + \varphi_i) \quad (1)$$

其中,  $\theta_{mi}$ ,  $f_i$  和  $\varphi_i$  分别表示为第  $i$  个振动分量的幅度、频率和初始相位.

##### 2.1.1 方位向角振动影响分析

平台角振动影响的是 SAL 多普勒频谱的幅度

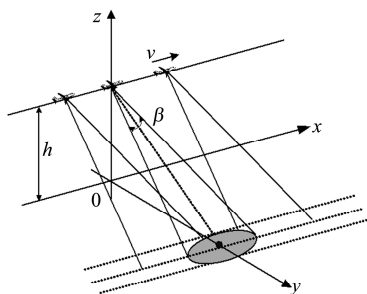


图 1 合成孔径激光雷达几何模型  
Fig. 1 SAL system geometry

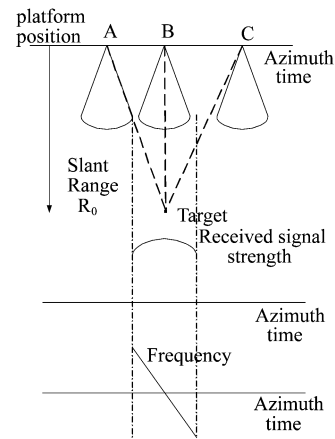


图 2 波束对信号强度和 Doppler 的影响  
Fig. 2 Effect of azimuth beam pattern upon signal strength and Doppler frequency

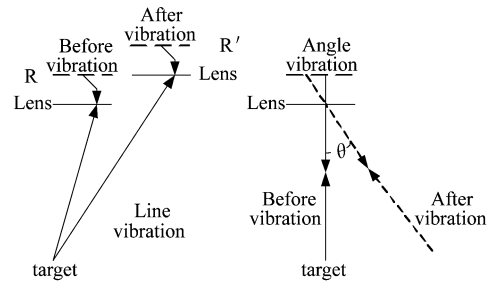


图 3 线振动和角振动  
Fig. 3 Line vibration and angle vibration

特性, 合成孔径激光雷达点目标回波幅度受到发射激光信号的振幅分布的调制. 为简化分析, 假设激光光束为高斯光束, 且没有幅度和相位误差. 平台以正侧视条带模式工作, 那么目标回波经过相干接收和距离脉冲压缩后表达式为

$$S = \exp\left(-j \frac{4\pi R_B \cdot \beta(f_a)}{\lambda}\right) \text{sinc}\left(\frac{\pi T_p}{\beta(f_a)}\left(f_r + \frac{2\gamma}{c}(R_B - R_{ref})\right)\right) \quad (2)$$

其中  $\beta(f_a) = \sqrt{1 - \frac{f_a^2 \lambda^2}{4v^2}}$ ,  $v$  为平台的移动速度,  $f_a$  为方位频率(即多普勒频率),  $R_B$  为目标到雷达平台的最近距离,  $\lambda$  为激光信号波长,  $T_p$  为发射信号脉冲宽度,  $f_r$  为距离频率,  $c$  为光速,  $\gamma$  为发射信号调频率,  $R_{ref}$  为用于解线频调时的参考距离.

为方便分析, 对式(2)进行方位傅里叶反变换, 将其变换到方位时域, 即

$$s = \text{sinc}\left(\frac{\pi T_p}{\beta(f_a)}\left(f_r + \frac{2\gamma}{c}(R_B - R_{ref})\right)\right) \int \exp\left(-j\frac{4\pi R_B \cdot \beta(f_a)}{\lambda}\right) \exp(j2\pi f_a t_m) df_a, \quad (3)$$

其中,  $t_m$  为方位慢时间. 利用驻相点原理

$$\frac{d}{df_a}\left(-\frac{4\pi R_B \cdot \beta(f_a)}{\lambda} + 2\pi f_a t_m\right)\Big|_{f_a=f_a^*} = 0, \quad (4)$$

可以得到

$$f_a^* = -\frac{2v^2 t_m}{\lambda \sqrt{R_B^2 + (vt_m)^2}}. \quad (5)$$

将式(5)代入式(3)中, 可得

$$s = \text{sinc}\left(\frac{\pi T_p}{\beta(f_a)}\left(f_r + \frac{2\gamma}{c}(R_B - R_{ref})\right)\right) \exp\left(-j\frac{4\pi}{\lambda} \sqrt{R_B^2 + (vt_m)^2}\right) \approx \text{sinc}\left(\frac{\pi T_p}{\beta(f_a)}\left(f_r + \frac{2\gamma}{c}(R_B - R_{ref})\right)\right) \exp\left(-j\frac{4\pi}{\lambda} \left(R_B + \frac{v^2 t_m^2}{2R_B}\right)\right). \quad (6)$$

令  $k_a = -\frac{2v^2}{\lambda R_B} t_m^2$ ,  $\exp\left(-j\frac{4\pi R_B}{\lambda}\right)$  为常数项对成

像没有影响, 那么, 式(6)可简化为

$$s(t_m) = w(t_m) \exp(j\pi k_a t_m^2), \quad (7)$$

其中,  $w(t_m)$  表示由于发射激光光束为高斯光束,  $w(t) = w_a(t) w_r(\theta_r)$  为高斯光束的双程幅度特性, 而  $w_a(t)$  和  $w_r(t)$  分别为方位向和距离向光束双程的幅度分布. 主要针对角振动对 SAL 的影响进行分析, 而角振动的影响如图(3)所示, 不会带来相位中

$$s_a(t_m) = A\pi(-f - k_a t_m) \exp\left(-j\pi k_a \left[\left(\frac{f}{k_a}\right)^2 + 2\frac{f}{k_a} t_m\right] - j\varphi\right) s_o\left(t + \frac{f}{k_a}\right) - A\pi(f - k_a t_m) \exp\left(-j\pi k_a \left[\left(\frac{f}{k_a}\right)^2 + 2\frac{f}{k_a} t_m\right] + j\varphi\right) s_o\left(t - \frac{f}{k_a}\right) + C, \quad (13)$$

为由于振动引入的成对回波<sup>[8-9]</sup>, 其中  $C$  为常数.

$$C = \exp(j\pi k_a t_m^2) \int_{-\infty}^{+\infty} [-A \sin(2\pi f + \varphi) w_a(t) \exp(-j2\pi k_a t_m \tau)]' d\tau. \quad (14)$$

由此可见, 平台角振动引入的成对回波位于主回

波两侧  $t = \pm \frac{f}{k_a}$  处, 幅度分别为  $A\pi(-f - k_a t_m)$

$s_o\left(t + \frac{f}{k_a}\right)$  和  $A\pi(f - k_a t_m) s_o\left(t - \frac{f}{k_a}\right)$ . 由此可见其峰

值出现在  $t_0 = \pm \frac{f}{k_a} \pm \frac{D_a v}{2\lambda R k_a}$ , 成对回波与回波主峰的

幅度比为  $B = \frac{\pi D_a}{4\lambda} \cdot \theta_m$ .

### 2.1.2 距离向角振动影响分析

同样, 将式(8)代入式(7), 可得

心与目标之间的距离变化, 即不会对回波相位产生影响, 所以本文以  $w(t_m)$  表示发射为高斯光束的信号幅度, 不再像文献[7]中认为的距离和方位向没有调制, 而是矩形窗函数.

为简化推导, 假设角振动的振动函数只有一个谐波分量, 即

$$\Delta\theta(t) = \theta_m \sin(2\pi f t_m + \varphi), \quad (8)$$

那么, 将式(8)代入式(7)中可得

$$s(t_m) = w_a(t_m - A \sin(2\pi f t_m + \varphi)) w_r(\theta_r) \exp(j\pi k_a t_m^2), \quad (9)$$

其中,  $A = \theta_m \frac{R}{v}$ ,  $w_a(t) \approx \exp^2\left(-\left(\frac{\pi D_a v}{\lambda R} t\right)^2\right)$ , 利用

同一个透镜进行发射和接收, 所以幅度特性用高斯函数的平方,  $D_r$  和  $D_a$  分别表示距离向和方位向的透镜直径,  $R$  为相位中心到目标的距离.

那么经过方位脉压, 即与参考函数

$$h(t_m) = \text{rect}(t_m) \exp(-j\pi k_a t_m^2), \quad (10)$$

进行匹配滤波, 其中  $\text{rect}(\cdot)$  表示与方位向积累时间相匹配的方波.

则成像输出后, 点目标的响应为

$$s_{out}(t_m) = s_o(t_m) - s_a(t_m), \quad (11)$$

$$\text{其中, } s_o(t_m) = \exp(j\pi k_a t_m^2) \int_{-\infty}^{+\infty} w_a(\tau) w_r(\theta_r) \exp(-j2\pi k_a t_m \tau) d\tau$$

为没有振动时的点目标响应;

$$s(t_m) = w_a(t_m) w_r(\theta_r - \theta_m \sin(2\pi f t_m + \varphi)) \exp(j\pi k_a t_m^2), \quad (15)$$

同理, 成像输出后, 点目标的响应为

$$s_{out}(t_m) = s_o(t_m) - s_r(t_m), \quad (16)$$

其中,

$$s_r(t_m) = A_r \exp\left(-j\pi k_a \left[\left(\frac{f}{k_a}\right)^2 + 2\frac{f}{k_a} t_m\right] - j\varphi\right) s_o\left(t + \frac{f}{k_a}\right) - A_r \exp\left(-j\pi k_a \left[\left(\frac{f}{k_a}\right)^2 - 2\frac{f}{k_a} t_m\right] + j\varphi\right) s_o\left(t - \frac{f}{k_a}\right), \quad (17)$$

为距离向角振动引入的成对回波, 分别位于  $t = \pm \frac{f}{k_a}$

处,  $A_r = \frac{w'_r(\theta_r)}{2\omega_r(\theta_r)} \theta_m$ .

对比式(17)和式(13), 可以看出距离向振动和

方位向振动引起的成对回波表达式较为相似,这是由于距离向数据是通过测量雷达平台到目标之间的距离时延获取的,其对应的是光速,距离向的抖动即距离向的角振动,相对于时延数据录取的是慢变的.而方位向数据是通过目标和平台之间的相对运动获取的,其对应的是平台的速度,而这时距离向的抖动周期和合成孔径时间是相当的.所以,距离向的抖动也就表现为是对方位向信号的幅度调制.

### 3 仿真分析

#### 3.1 带有方位向角振动成像仿真

参数设置机载平台:激光发射脉冲为高斯脉冲,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  $R = 10 \text{ km}$ ,平台速度  $v = 75 \text{ m/s}$ ,脉冲重复频率  $\text{PRF} = 6 \text{ kHz}$ .角振动幅度  $\theta_m = 20 \mu\text{rad}$ ,振动频率  $f = 500 \text{ Hz}$ .振动频率按照文献[5]中最高振动试验频率设置.仿真结果如图4所示.图4(a)是在方位脉压没有加窗的情况下最终的成像效果图,可以看出由于平台角振动引入的成对回波明显抬高了点目标点扩散函数的旁瓣,这样在最终的成像效果中会引入虚假目标,为成像以后的目标检测或识别等带来麻烦;图4(b)利用了传统压

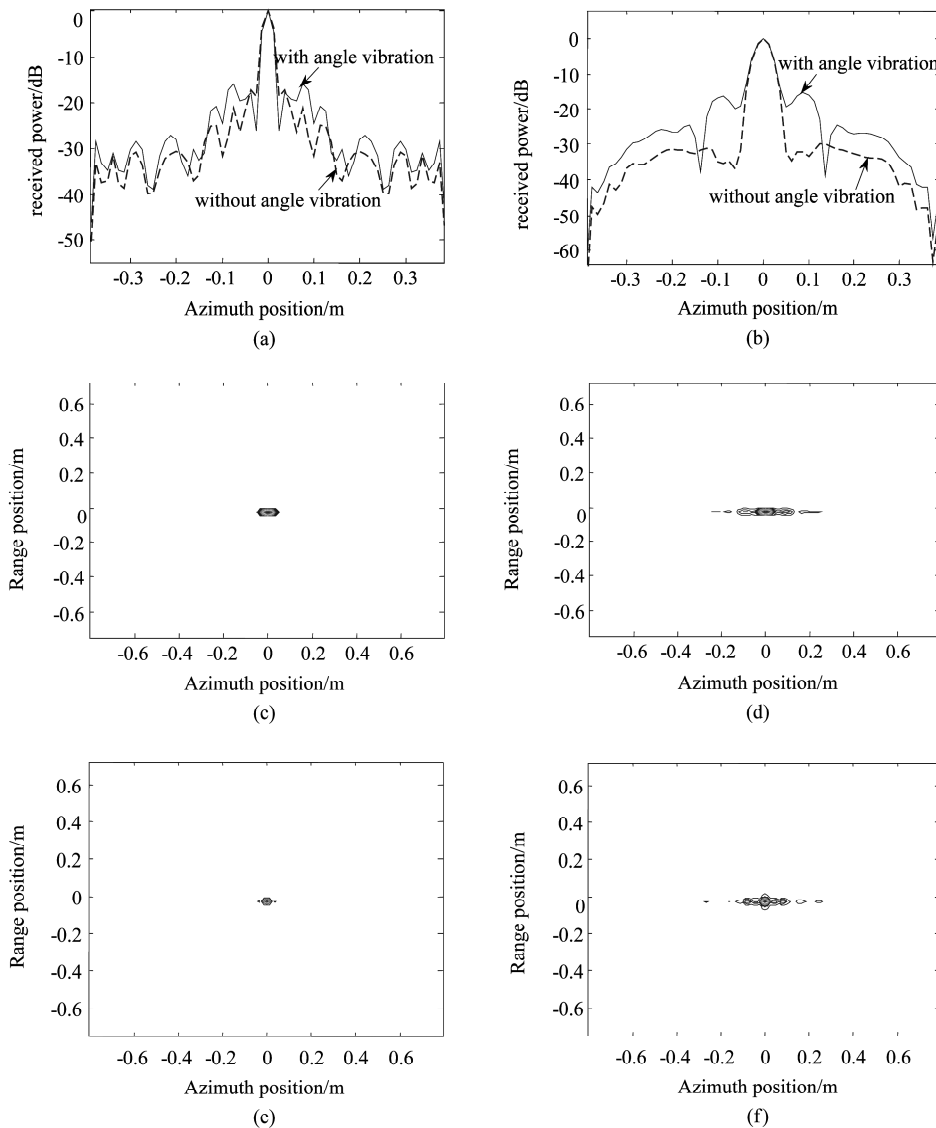


图4 机载平台方位向角振动仿真 (a)未加窗方位脉压效果图 (b)加窗后方位脉压效果图 (c)无角振动加窗后二维成像等高线图 (d)有角振动加窗后二维成像等高线图 (e)无角振动方位没有加窗二维成像效果图 (f)有角振动方位没有加窗二维成像效果图  
Fig.4 Angle vibration in azimuth on airborne platform (a)azimuth compressed without hamming windows (b)azimuth compressed with hamming windows (c)contour map without vibration windows and with hamming windows (d)contour map with vibration windows and with hamming windows (e)contour map without vibration windows and without hamming windows (f)contour map with vibration windows and without hamming windows

低旁瓣的方法,即在方位脉压时匹配滤波函数加窗(本文加的是汉明窗),以达到压低成对回波的目的,但从仿真结果来看加窗带来的压低旁瓣、主瓣展宽的效果明显,但是不能起到消除成对回波的目的,这点从式(12)也能看出,成对回波的出现,是在脉压时出现的新的回波,而不是主回波的旁瓣;图4(c)和图4(d)是有无角振动方位加窗后二维成像效果图,从图中同样可以看出图4(d)沿方位向两侧出现了虚假目标,这便是角振动对成像带来的影响.图4(e)和图4(f)是有无角振动方位没有加窗二维成像效果图,从图中同样可以看出图4(f)沿方位向两侧出现了虚假目标,这便是角振动对成像带来的影响.并且对比图4(c)和图4(e)可以看出加窗后主瓣明显展宽,这便是加窗起到的压低旁瓣,主瓣展宽的效果.

参数设置星载平台:激光发射脉冲为高斯脉冲,基准波长  $\lambda = 2 \mu\text{m}$ ,发射和接收孔径(直径)  $D_a = 0.5 \text{ m}$ ,目标到平台距离  $R = 600 \text{ km}$ ,平台速度  $v = 7000 \text{ m/s}$ ,脉冲重复频率  $\text{PRF} = 42 \text{ kHz}$ .角振动幅度  $\theta_m = 1.8 \mu\text{rad}$ ,振动频率  $f = 200 \text{ Hz}$ .根据 ESA 对 OLYMPUS 卫星数据分析,其角振动振动频率在  $200 \text{ Hz}$  以内<sup>[10-11]</sup>.仿真结果如图5所示.图5(a)和图5(b)分别是在方位脉压没有加窗和加窗的情况下最终的成像效果图,可以看出角振动影响并不明显,这点可以从式(12)中看出,虽然有平台角振动的影响,但是由于平台角振动引入的成对回波位置,在星载参数中处于回波主峰内部,并没有超过一个分辨单元,所以这时成对回波就不会像机载平台成对回波明显而出现虚假目标.

为了更明显地展示成对回波的真实存在,假设一个不太合理的星载平台参数:激光发射脉冲为高斯脉冲,基准波长  $\lambda = 10 \mu\text{m}$  ( $\text{CO}_2$  激光器),发射和接收孔径(直径)  $D_a = 0.02 \text{ m}$ ,目标到平台距离  $R = 600 \text{ km}$ ,平台速度  $v = 7000 \text{ m/s}$ ,脉冲重复频率  $\text{PRF} = 700 \text{ kHz}$ .角振动幅度  $\theta_m = 200 \mu\text{rad}$ ,振动频率  $f = 500 \text{ Hz}$ .仿真结果如图6所示,可以看出成对回波的影响与机载影响效果一样.

### 3.2 带有距离向角振动成像仿真

参数设置机载平台:激光发射脉冲为高斯脉冲,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  $R = 10 \text{ km}$ ,平台速度  $v = 75 \text{ m/s}$ ,脉冲重复频率  $\text{PRF} = 6 \text{ kHz}$ .角振动幅度  $\theta_m = 18 \mu\text{rad}$ ,振动频率  $f = 500 \text{ Hz}$ .振动频率按照文献[5]中最高振动试验频率设置.仿真结果如图7所

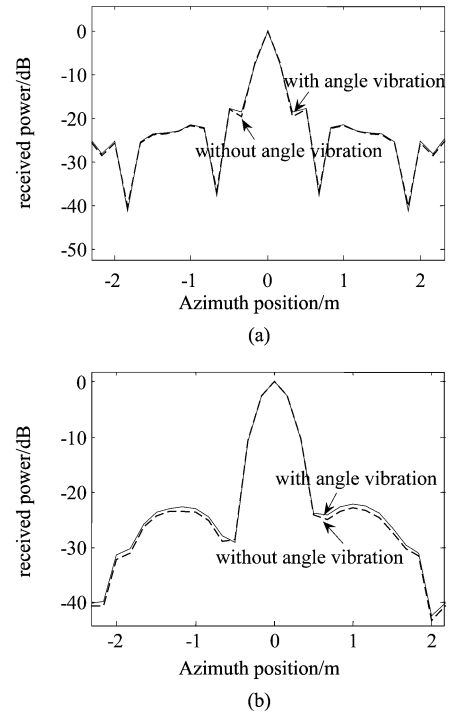


图5 星载平台方位向角振动仿真 (a)未加窗方位脉压效果图 (b)加窗后方位脉压效果图

Fig. 5 Angle vibration in azimuth on spaceborne platform (a) azimuth compressed without hamming windows (b) azimuth compressed with hamming windows

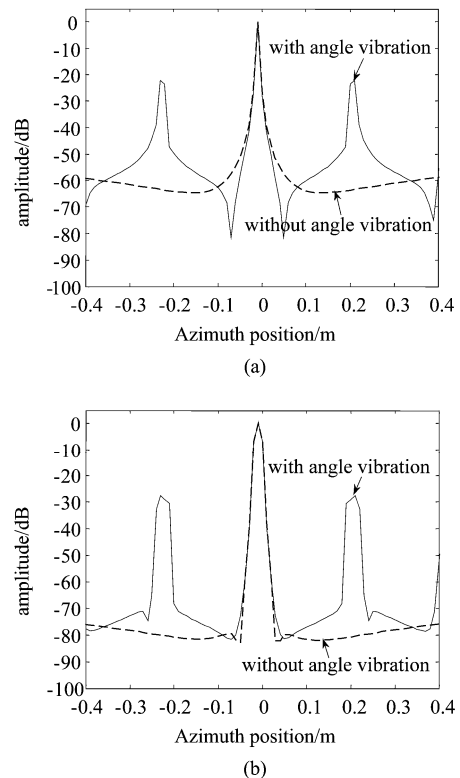


图6 非合理参数星载平台角振动仿真 (a)未加窗方位脉压效果图 (b)加窗后方位脉压效果图

Fig. 6 Angle vibration in azimuth on irrational spaceborne platform (a) azimuth compressed without hamming windows (b) azimuth compressed with hamming windows

示.从图7(a)中虽看不出成对回波的影响,但从图7(b)中可以看出加窗后成对回波的影响是客观存在的,但幅度较小,在-20 dB左右.

#### 4 结论

对角振动引起的成对回波进行了分析和仿真,机载平台成对回波影响较为明显,并且传统的加窗压低旁瓣的方法对成对回波的消除没有效果,而星载平台在合理参数设计中成对回波的影响可以忽略.由于成对回波的峰值较小,相对于主回波一般在15 dB以下,在一般的成像要求中,其影响是可以忽略的.针对平台角振动的影响进行了理论分析,之后

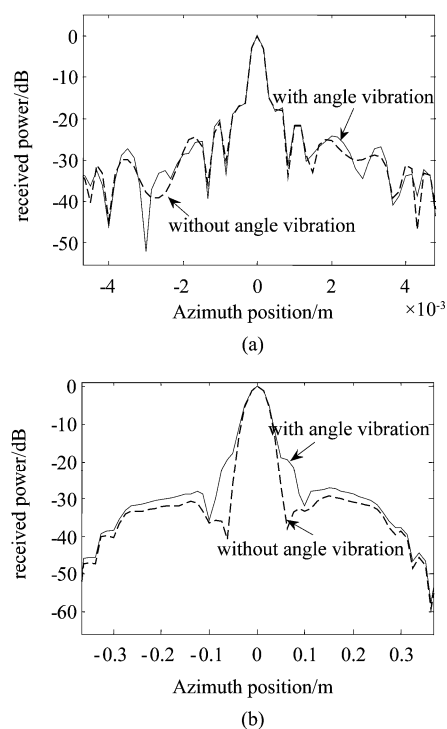


图7 机载动平台带有距离向角振动加窗后方位脉压仿真 (a)未加窗方位脉压效果图 (b)加窗后方位脉压效果图  
Fig.7 Azimuth compressed with hamming windows with the range angle vibration on spaceborne platform (a) azimuth compressed without hamming windows (b) azimuth compressed with hamming windows

将会对平台线振动的影响进行研究.

#### REFERENCES

- [1] Bashkansky M, Lucke R L, Funk E. Two-dimensional synthetic aperture imaging in the optical domain[J]. *Optics letters*, 2002, **27**:1983 - 1985.
- [2] Beck S M, Buck J R, Buell W F, et al. Synthetic-aperture imaging laser radar: laboratory demonstration and signal processing[J]. *Appl. Opt.*, 2005, **44**(35):7621 - 7629.
- [3] BAO Zheng, XING Meng-Dao, WANG Tong. *Technologies of radar imaging* [M]. Beijing: Publishing house of electronics industry (保铮, 邢孟道, 王彤. 雷达成像技术. 北京: 电子工业出版社), 2005.
- [4] Dongwook P. High resolution laser radar performance analysis[D]. Massachusetts: MIT Library, 1998.
- [5] LI Zeng-Ju WU Jin, LIU Guo-Guo, et al. Preliminary investigation on airborne SAL imaging with platform vibration [J]. *ACTA OPTICA SINICA* (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. *光学学报*), 2010, **30**(4):994 - 1001.
- [6] ZHANG Bao. Study of active vibration control of moving vehicles imaging [D]. Changchun institute of optics and Mechnics (张葆. 动载体成像振动主动控制技术的研究. 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所), 2003.
- [7] GUO Liang, XING Meng-Dao, LIANG Yi, et al. Synthetic aperture imaging lidar imaging algorithm[J]. *Acta Photonica Sinica* (郭亮, 邢孟道, 梁毅, 等. 合成孔径成像激光雷达成像算法研究. *光子学报*), 2009, **38**(2):448 - 452.
- [8] ZHANG Cheng-Bo. *Synthetic aperture radar-principle, analysis of system and application* [M] Beijing: Science press (张澄波. 综合孔径雷达——原理、系统分析与应用. 北京: 科学出版社), 1989.
- [9] ZHU Li, QIU Guang-Feng, PAN Jie. Analysis of Antenna bore sight pointing instability effect on SAR imaging quality [J]. *Modern Radar* (朱力, 仇光锋, 潘洁. 天线指向抖动对成像质量的影响分析. *现代雷达*), 2006, **28**(1):61 - 64.
- [10] YU Si-Yuan, TAN Li-Ying, MA Jing, et al. Study of vibration compensation technology in intersatellite laser links [J]. *Journal of Optoelectronics laser* (于思源, 谭立英, 马晶, 等. 激光星间链路中振动补偿技术研究. *光电子激光*), 2004, **15**(4):472 - 476.
- [11] CHEN Chun-Yi, YANG Hua-Min, TONG Shou-Feng, et al. Real-time simulation of satellite-platform vibration of space optical communication[J]. *Journal of system simulation* (陈纯毅, 杨华民, 佟首峰, 等. 空间光通信卫星平台振动实时模拟. *系统仿真学报*), 2007, **19**(16):3834 - 3837.