

文章编号: 0253-2239(2010)04-0994-08

振动影响机载合成孔径激光雷达成像初步研究

李增局^{1,2} 吴 谨¹ 刘国国^{1,2} 朱炳祺^{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 Park 模型基础上,建立了二维机载正侧视条带模式合成孔径激光雷达(SAL)平台振动对成像的影响简化数学模型;在振动频率不超过 500 Hz 的情况下,仿真计算了振幅、频率、初相位和峰值加速度等振动参数对 SAL 图像分辨率的影响,给出了振动影响下理想点目标和扩展面目标的 SAL 图像。仿真结果表明,振动的峰值加速度是直接和图像模糊程度最相关的量,峰值加速度越大,图像模糊程度越高,存在峰值加速度阈值,小于这个阈值时,图像基本不受影响,而大于另一个阈值时,图像开始出现重影;另外,仿真计算结果也表明,振动初相位对图像质量恶化也有重要影响。

关键词 合成孔径激光雷达;条带式;分辨率;峰值加速度

中图分类号 TN958 文献标识码 A doi: 10.3788/AOS20103004.0994

Preliminary Investigation on Airborne SAL Imaging with Platform Vibration

Li Zengju^{1,2} Wu Jin¹ Liu Guoguo^{1,2} Zhu Bingqi^{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 A simple mathematical model is set up to investigate the effect of platform vibration on the image quality in an airborne strip-mode synthetic aperture radar (SAL) based on the work of Park. Numerical simulation is carried out to show the influence of the vibration parameters such as amplitude, frequency, initial phase, or peak acceleration, on the SAL image resolution within the frequency range of 0~500 Hz. SAL image of ideal point target or extended surface target with or without vibration is given. The simulation results show that the quality of SAL image is most correlated to the peak acceleration of the platform vibration. With higher acceleration, the SAL image deteriorates severely. As illustrated in the simulation, the SAL image is acceptable as the peak acceleration is no more than threshold and will be totally distorted in the azimuth with many ghosts as the acceleration is greater than another threshold. In addition, the simulation results also indicate that initial phase of the vibration plays an important role in deterioration of the SAL image induced by the vibration.

Key words synthetic aperture radar; strip-mode; resolution; peak acceleration

1 引 言

运动补偿是研究合成孔径雷达(SAR)的重要问题之一^[1]。在合成孔径激光雷达(SAL)中,由于使用的激光波长一般比 SAR 采用的微波要短 3~4 个数量级,雷达平台运动过程中的机械振动会引起剧

烈的相位变化,从而造成 SAL 图像分辨率的下降,并且可能难以补偿^[2]。

无论是雷达平台的振动还是目标的振动,根据运动的相对性原理采取两者任何一个为固定坐标系观察,运动规律不变,从处理角度来讲,两者在数学

收稿日期: 2009-03-30; 收到修改稿日期: 2009-06-12

基金项目: 国家 863 计划(2007AA12Z107)资助课题。

作者简介: 李增局(1984—),男,硕士研究生,主要从事合成孔径激光雷达方面的研究。E-mail: leecas84@gmail.com

导师简介: 吴 谨(1965—),男,研究员,主要从事脉冲气体激光器、合成孔径激光雷达等方面的研究。

E-mail: jwu909@263.net(通信联系人)

表达上是等效的,因此研究时只假设平台振动,而目标静止。

振动问题只是运动补偿的一种类型。20 世纪 80 年代末 Dongwook Park^[3] 建立一个简单模型定性讨论了振动对连续波 SAL 成像效果的影响。此后,更进一步关于振动对 SAL 成像影响的研究工作则少有报道,然而,随着 SAL 系统研究的进展^[4~8],这是 SAL 系统实现不能回避的重要问题。本文采用数学仿真的办法针对振动影响条带式 SAL 成像的情况进行了具体的分析和讨论,得到了一些初步结果。

2 SAL 振动理论模型

2.1 SAL 外差公式

假设雷达是收发同置,即发射和探测接受器是同一个孔径。设激光传播方向为 z ,光探测表面为 $z=0$ 平面,目标表面为 $z=L$ 平面。同时采用单色波近似,发射光为

$$S_T(P, t) = f_T(t)U_T(P, t)\exp[-j\phi(t)],$$

其中 $f_T(t)$ 是信号光源的调制信号, $U_T(P, t)$ 是激光光束空间振幅分布, P 为空间坐标,为了计算方便使 $\int |U_T(P, t)|^2 dP = 1$,积分空间是垂直传播路径的平面, $\phi(t)$ 是由于振动引入的相位误差。

对于外差接收,假设目标回波信号为 $S_R(P, t)$,本征信号为

$$S_{LO}(P, t) = \sqrt{P_{LO}}f_{LO}(t)U_{LO}(P, t),$$

其中 P_{LO} 是本征信号的功率, $f_{LO}(t)$ 为本征光的调制信号脉冲,而 $U_{LO}(P, t)$ 是本征信号的空间振幅。

外差接收后进行正交解调频,信号表达式为

$$S_{Total}(t) = \int_{detector} S_R(P, t)f_{LO}^*(t)U_{LO}^*(P, t)dP, \quad (1)$$

通常本征信号是通过分束镜分束发射信号得到,因此

$$U_{LO}^*(P) = U_T^*(P), \quad f_{LO}(t) = f_T(t), \quad (2)$$

其中 $U_T^*(P)$ 是发射初始时振幅分布。

信号光满足准单色光近似时,即载频 f_0 远远大于频宽 B ,同时发射孔径满足远场近似条件,即发射孔径直径 D 和光束传播距离 L ,光学波长 λ 满足

$L\lambda \gg D^2$ 时,由光学惠更斯-菲涅耳传播^[9]和外差探测原理,并把(2)式代入(1)式,整理得到

$$S_{Total}(t) = \int_{z=L} T(P)h^2(P)u_T^*(P/\lambda L, t-L/c) \cdot f_T(t-2L/c)f_T^*(t)\exp[-j\phi(t-2L/c)]dP, \quad (3)$$

其中积分空间是目标平面, $h(P)$ 是传播因子,且

$$h(P) = (1/j\lambda L)\exp[jkL + jk|P|^2/2L], \quad (4)$$

而 $u_T(P/\lambda L, t-L/c)$ 是 $U_T^*(P)$ 的傅氏变换项, $T(P)$ 是目标的反射系数^[10], (3)式是研究条带模式雷达的基本公式。

2.2 二维正侧视条带模式 SAL

如图 1 所示,机载雷达以速度 v 沿 x 轴运动,角度 ψ 是在 yz 平面内光束与 y 轴的夹角, L 是探测器中心到目标表面光斑中心的距离。

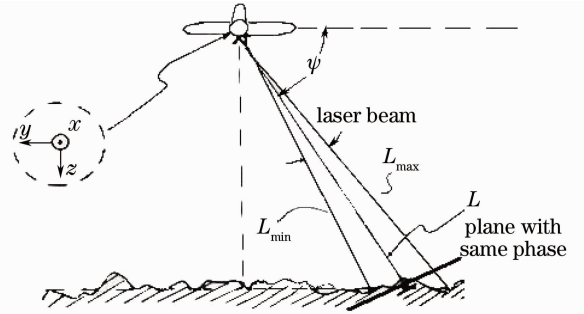


图 1 二维正侧视 SAL 几何表示

Fig. 1 Geometry of two-dimensional scanning SAL

由正侧视条带模式雷达的原理和外差探测分析,直接引用(3)式,由于只关注分辨率,而没有研究其信噪比,因此代表信号强度项的系数一律用常数代替。假设发射信号采用高斯光束,即

$$S_T(P, t) = C \sum_{m=-\infty}^{\infty} f_T(t - mT_s + 2L/c) \cdot \exp[-(x - vt)^2/a_x^2 - (y/a_y)^2]\exp[-j\phi(t)], \quad (5)$$

式中 C 为信号振幅, T_s 为脉冲发射周期, $\exp[-(x - vt)^2/a_x^2 - (y/a_y)^2]$ 为空间振幅分布, a_x, a_y 为高斯光束的两个半轴长, $f_T(t) = \exp[-j\pi W_0 t^2]\text{rect}(t/T_0 + 1/2)$, W_0 为调频速率, T_0 为单个脉冲持续时间,同时在外差探测时将本征调制信号延迟 $2L/c$, 代入到(3)式得

$$S_{Total}(t) = \sum_{m=-\infty}^{\infty} S_m(t), \quad (6)$$

其中

$$S_m(t) = C \int T(P)\exp[j2ky\cos\psi + jk(y\sin\psi)^2/L - (ka_y\sin\psi/L)^2/2] \cdot f_T(t - mT_s - 2y\cos\psi/c)f_T^*(t - mT_s)\exp[(jk/L - (ka_x/L)^2/2)(x - vt)^2] \cdot \exp[-j\phi(t - 2L/c - 2y\cos\psi/c)]dP, \quad (7)$$

同时不考虑在一次脉冲收发时间内飞机运动引起的距离变化。完成一次收发再发射下一次脉冲,要求

$$T_s \geq 2L/c + T_0.$$

这样数据可以进行二维存储,代入 $f_T(t)$ 得到

$$S_{\text{Total}}(m, \tau) = S_{\text{Total}}(mT_s + \tau) = C \int T(P) \exp[j2ky \cos \phi + jk(y \sin \phi)^2/L - (ka_y \sin \phi/L)^2/2] \cdot \exp[j4\pi W_0 y (\cos \phi) \tau/c - j4\pi W_0 (y \cos \phi)^2/c^2] \exp\{[jk/L - (ka_x/L)^2/2][x - v(mT_s + \tau)]^2\} \cdot \exp[-j\phi(mT_s + \tau - 2L/c - 2y \cos \phi/c)] \text{rect}(\tau/T_0 + 1/2) dP, \quad (8)$$

其中 $T_0 < T_s$ 。

外差数据通过正交解调后,进行下一步信号处理。如(8)式所示,在一个脉冲周期内,信号与不同目标距离成正比的不同频率信号叠加。对每个发射脉冲,时延为 $(2L_{\min}/c, 2L_{\max}/c)$,对(8)式做傅里叶变换,进行距离向压缩,在压缩前,考察一下与脉冲时间有关的两项, $j4\pi W_0 y (\cos \phi) \tau/c$ 和 $[jk/L - (ka_x/L)^2/2][x - v(mT_s + \tau)]^2$,在一个脉冲时间 T_0 里,前者的变化为 $4\pi W_0 y (\cos \phi) T_0/c \approx 4\pi y \cos \phi / y_{\text{res}}$ 将变化很多个周期,而后者为 $2k/L[x - v(mT_s + \tau)]v \leq (2k/L)(L\lambda/a_x)vT_0 = 2\pi vT_0/a_x$,其变化基本上在一个周期内,对实数部分,假设了一个脉冲发射周期内信号振幅的空间分布不变,同时信号不受任何干扰,即 $\phi(t - 2L/c - 2y \cos \phi/c) = 0$ 。因此(8)式的傅里叶变换结果近似为

$$S_{\text{Total}}(m, f) = C \int T(P) \exp[j2ky \cos \phi + jk(y \sin \phi)^2/L - (ka_y \sin \phi/L)^2/2] \cdot \exp[-j4\pi W_0 (y \cos \phi)^2/c^2] \exp\{[jk/L - (ka_x/L)^2/2][x - v(mT_s)]^2\} \text{sinc}[(2W_0 y \cos \phi/c - f)T_0] dP. \quad (9)$$

取 sinc 函数峰值点来对(9)式做相位补偿。首先考察与距离向有关的相位是

$$j2ky \cos \phi + jk(y \sin \phi)^2/L - j4\pi W_0 (y \cos \phi)^2/c^2, \quad (10)$$

将峰值点处 $y = fc/2W_0 \cos \phi$ 代入(10)式有

$$\Delta\phi = j2kfc/W_0 + jk(f/2W_0)^2 \tan^2 \phi/L - jf^2, \quad (11)$$

因此补偿函数为

$$\hat{S}(f) = \exp(-\Delta\phi). \quad (12)$$

(9)式补偿后的表达式近似为

$$S_{\text{Total}}(m, f) = C \int T(P) \exp[-(ka_y \sin \phi/L)^2/2] \exp\{[jk/L - (ka_x/L)^2/2][x - v(mT_s)]^2\} \cdot \text{sinc}[(2W_0 y \cos \phi/c - f)T_0] dP. \quad (13)$$

然后对方位向处理,方位向用离散匹配滤波器,即

$$h(m) = \exp[-(jk/L)(vmT_s)^2 - (ka_x/L)^2(vmT_s)^2/2]. \quad (14)$$

信号通过离散滤波器后,输出结果为

$$S_{\text{Total}}(m, f) = C \int T(P) \exp[-(ka_y \sin \phi/L)^2/2] \left\{ \sum_{m'=-\infty}^{\infty} \exp\{[jk/L - (ka_x/L)^2/2][x - v(m'T_s)]^2\} \right\} \times \exp[-jk/L - (ka_x/L)^2/2] v^2 T_s^2 (m - m')^2 \text{sinc}[(2W_0 y \cos \phi/c - f)T_0] dP. \quad (15)$$

在满足奈奎斯特抽样定律时,即 $vT_s \leq a_x$,上式可以近似为

$$S_{\text{Total}}(m, f) = C \int T(P) \exp[-(ka_y \sin \phi/L)^2/2] \exp[-(ka_x/2L)^2(x - mvT_s)^2 - (x - mvT_s)^2/a_x^2] \cdot \text{sinc}[(2W_0 y \cos \phi/c - f)T_0] dP, \quad (16)$$

这是理想情况下处理完的 SAL 图像。

假设目标为单个理想点目标,即

$$T(p) = \delta(x - x_0)\delta(y - y_0). \quad (17)$$

将(17)式代入(16)式,有

$$S_{\text{Total}}(m, f) = C \exp[-(ka_y \sin \phi/L)^2/2] \exp[-(ka_x/2L)^2(x_0 - mvT_s)^2 - (x_0 - mvT_s)^2/a_x^2] \cdot \text{sinc}[(2W_0 y_0 \cos \phi/c - f)T_0]. \quad (18)$$

由(18)式可见,点目标的 SAL 成像分辨单元为 $a_x(c/2W_0 T_0 \cos \phi)$ 。

2.3 振动的引入

前面推导的是飞机平台在理想运动情况下的 SAL 成像, 如果运动是非理想状况, 则需要考虑 $\phi(t-2L/c-2y\cos\phi/c)$ 对应的相位项。

假设振动在 y 和 z 方向上, 振幅分别为 A_y 和 A_z , 两者具有同样频率 ω , 同时振动位移只有平动, 不考虑侧视角的变化。另外实际情形中, 目标面每一点回波信号都具有一个随机初相位, 这里为了简单起见, 假设目标的附加初相位为零。

如图 2 所示, 目标足迹中心点为 T , 理想雷达位置为 P 点, 而由于振动, 真实位置是 R 点, 几何近似下有

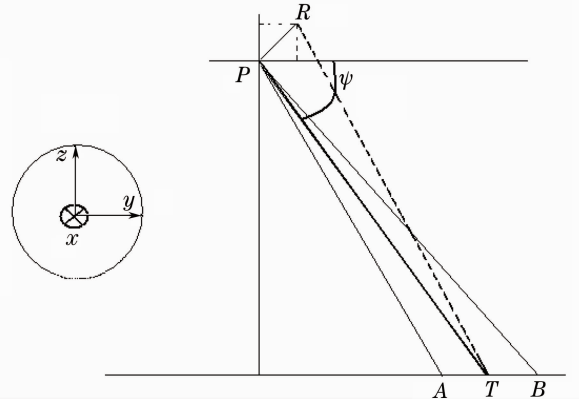


图 2 机载平台振动的几何图像

Fig. 2 Geometry of vibration of the air-borne platform

$$|PT| = L, |RT| - |PT| = \sqrt{[L\sin\phi + A_z\sin(\omega t + \theta_1)]^2 + [L\cos\phi + A_y\sin(\omega t + \theta_2)]^2} - L \approx A_z\sin(\omega t + \theta_1)\sin\phi + A_y\sin(\omega t + \theta_2)\cos\phi - \frac{[A_y^2\sin^2(\omega t + \theta_2) - A_z^2\sin^2(\omega t + \theta_1)]\cos(2\phi)}{2L} - \frac{A_yA_z\sin(2\phi)\sin(\omega t + \theta_1)\sin(\omega t + \theta_2)}{L}. \quad (19)$$

因为激光波长相当短, 所以在近似时必须考察泰勒展开阶次是否足够多。振动满足军标 GJB150-86 的规定时, 可以认为最后一项的长度不及波长的数量级, 可以忽略, 因此, (19) 式可进一步近似为

$$A_z\sin(\omega t + \theta_1)\sin\phi + A_y\sin(\omega t + \theta_2)\cos\phi - \frac{[A_y^2\sin^2(\omega t + \theta_2) - A_z^2\sin^2(\omega t + \theta_1)]\cos(2\phi)}{2L} - \frac{A_yA_z\sin(2\phi)\sin(\omega t + \theta_1)\sin(\omega t + \theta_2)}{L} \approx A\sin(\omega t + \beta). \quad (20)$$

把(20)式代入(8)式, 有

$$S_{\text{Total}}(m, \tau) = S_{\text{Total}}(mT_s + \tau) = C \int T(P) \exp[j2ky\cos\phi + jk(y\sin\phi)^2/L - (ka_y y \sin\phi/L)^2/2] \cdot \exp[j4W_0 y (\cos\phi)\tau/c - j4W_0 (y\cos\phi)^2/c^2] \exp\{[jk/L - (ka_x/L)^2/2][x - v(mT_s + \tau)]^2\} \cdot \exp\{j4\pi A \sin[\omega(mT_s + \tau) + \beta]/\lambda\} \text{rect}(\tau/T_0 + 1/2) dP. \quad (21)$$

在距离向压缩时, 在一个脉冲周期内, 振动项可认为基本不变, 故距离向上压缩不存在干扰, 距离向分辨率不变。在方位向压缩时, 必须考虑振动项。

(13) 式考虑振动项以后, 变为

$$S_{\text{Total}}(m, f) = C \int T(P) \exp[-(ka_y y \sin\phi/L)^2/2] \exp\{[jk/L - (ka_x/L)^2/2][x - v(mT_s)]^2\} \cdot \exp[j4\pi A \sin(\omega mT_s + \beta)/\lambda] \text{sinc}[(2W_0 y \cos\phi/c - \pi f)T_0] dP, \quad (22)$$

(22) 式就是受到振动影响后距离向压缩后的结果。然后再通过方位向匹配滤波, 即可得到振动后的图像。引入振动后, 与(22)式完全匹配的滤波器难以选定, 成像仿真计算时, 对于方位向, 仍然采用(14)式作为方位向的匹配滤波器。这样更便于比较振动对 SAL 成像的影响。

(22) 式为分析振动对 SAL 成像影响的基本公

式。(22) 式中, 振动的初相位为 β 、角频率为 ω 、振幅为 A , 相应的峰值加速度为 $\omega^2 A$ 。

在进行仿真以前, 对部分参数需要设定。同时考虑到(1)~(3)式必须满足远场近似, 发射孔径 $2a_x, 2a_y$ 的距离 L 必须满足 $L\lambda \gg a_x^2, L\lambda \gg a_y^2$ 。在对(8)式进行傅里叶变换近似时, 要求 $vT_0 < a_x$, 而(15)~(19)式近似时, 要求 $T_s < a_x/v$ 。

3 数值仿真

3.1 机载 SAL 参数设定

仿真基本参数:机载 SAL 距目标 10 km,飞机飞行速度为 100 m/s;理想分辨率单元为 $1\text{ cm}\times 1\text{ cm}$;测绘带宽度在 x 和 y 方向都为 $[-0.5\text{ m}, 0.5\text{ m}]$;激光发射孔径(半径)为 $a_x = a_y = 1\text{ cm}$;激光器基准波长为 $1.55\text{ }\mu\text{m}$,脉冲宽度 $T_0 = 6\text{ }\mu\text{s}$,脉冲频率带宽为 60 GHz(对应调频速率 $W_0 = 1.0\times 10^{16}\text{ Hz/s}$),发射激光脉冲周期 $T_s = 80\text{ }\mu\text{s}$;雷达侧视角度 $\psi = 45^\circ$ 。忽略大气对光束传播的影响。

仿真是对距离飞机平台 10 km 处的一块 1 m^2 面积上的理想点目标或扩展目标(E 形图像),设“E”的大小为 10 cm (方位向) $\times 15.5\text{ cm}$ (距离向)。

3.2 振动量级的选择

根据国家军用标准关于环境适应性的试验规定(GJB150.16-86),喷气式飞机机载设备环境适应性试验正弦振动试验要求如图 3 所示^[11]。图 3 中 b 曲线为机上减震后振动曲线标准,其最大峰值加速度为 2 g (g 为重力加速度);另外,根据 GJB150-86 的规定,当设备安装有减震装置时,最高试验振动频率只到 500 Hz。对于机载 SAL 系统,采取减震措施是完全可能的,因此,在仿真计算中,振动的最大峰值加速度设为 20 m/s^2 ,即 2 g 。

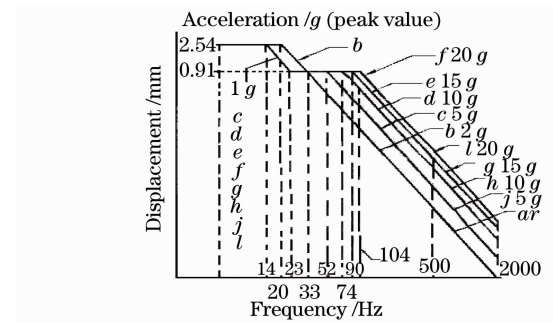
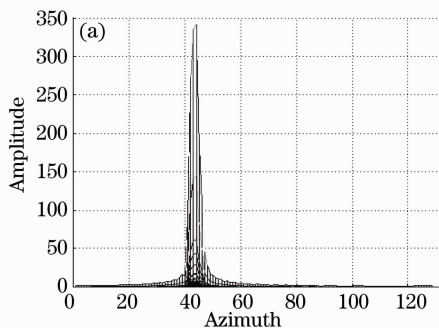


图 3 国家军用标准的飞机振动曲线

Fig. 3 Vibration plot of plane in GJB

决定一个振动的有三个参数:振幅、频率和初相位。仿真计算时,从不同的角度,在振幅、频率、初相位和峰值加速度之间选择参数。

3.3 振动对 SAL 成像影响仿真

3.3.1 点目标

选取振动参数作为仿真结果的统一命名格式,振幅、角频率和初相位数值作为名字,比如 0.2 mm 振幅,50 Hz 频率, 60° 初相位,将命名为 0.2_50_60 ;如果某个参量被选为变量,直接用变量代替命名。

图 4(a)为无振动时单个点目标的 SAL 方位向成像,图 4(b)为振动为 0.025_50_120 时单个点目标的 SAL 成像。对比图 4 两图可以看出,振幅 0.025 mm 、频率 50 Hz、初相位 120° 的振动对 SAL 图像分辨率影响很明显,图像分辨率严重下降。

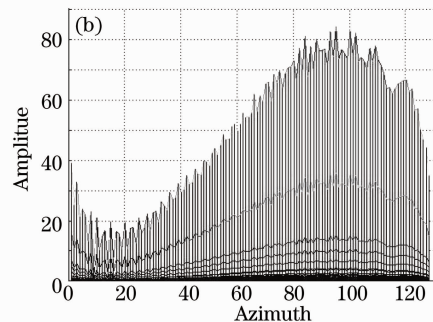


图 4 点目标方位向 SAL 成像。(a)无振动;(b)振动参数为 0.025_50_120

Fig. 4 Azimuth SAL imaging of point target. (a) without vibration; (b) vibration parameter is 0.025_50_120

在针对同频率和同振幅情形下的不同初相位的点目标成像仿真时,发现振动初相位对图像有明显影响。对此,计算了振幅和频率相同情况下不同初相位振动产生的图像分辨率,如图 5 所示。图中纵轴表示实际方位向图像分辨率与理想图像分辨率之比。

从图 5(a)~图 5(c)可以看到,振动的初相位对

SAL 图像的分辨率有较严重的影响,在同一振动频率下,初相位对图像分辨率的影响呈现约 180° 周期性变化,并且不同的振动频率,初相位对图像分辨率的影响严重程度不相同。由于峰值加速度的限制,振动频率越高,允许的振幅越小,初相位对成像分辨率的影响就越不明显。

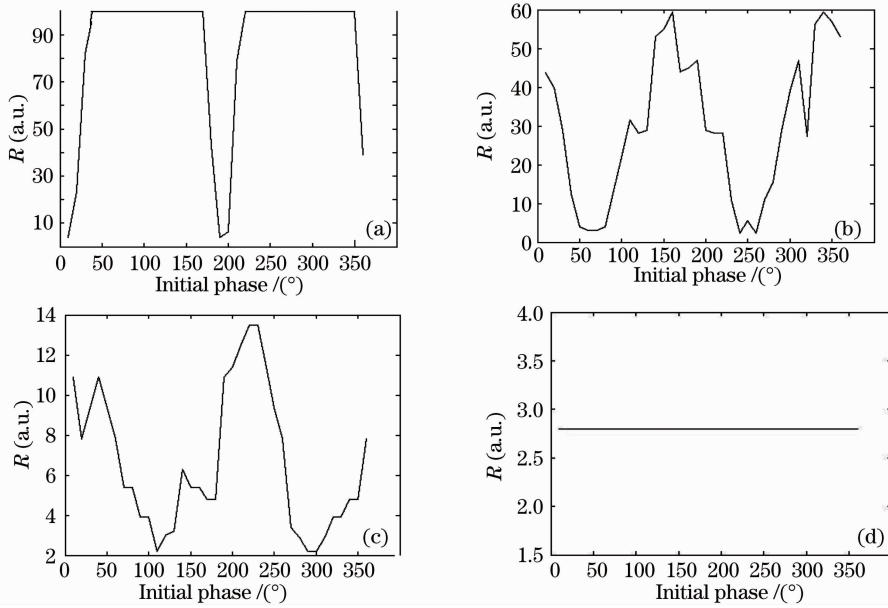


图 5 在相同振幅和频率情况下 SAL 图像分辨率与初相位关系, 振动参数分别为 (a) 0.25_10_initial_phase; (b) 0.025_50_initial_phase; (c) 0.00125_100_initial_phase; (d) 0.000025_500_initial_phase

Fig. 5 SAL image resolution versus different initial phases under the same amplitude and frequency, vibration parameter are (a) 0.25_10_initial_phase; (b) 0.025_50_initial_phase; (c) 0.00125_100_initial_phase; (d) 0.000025_500_initial_phase

图 6 展示了对相同初相位的振动在不同峰值加速度、频率情况下 SAL 图像分辨率变化曲线, 图中纵轴是振动后方位向分辨率和理想分辨率比值。从图 6(a) 可以看出, 不同的振动频率, 峰值加速度越大 (对应的振幅也越大), 图像分辨率下降越严重; 当峰值加速度小于 0.05 m/s^2 时, 图像分辨率与振动

频率关系不大。图 6(b) 表明相同峰值加速度、不同频率下分辨率模糊程度相差很大, 这是因为不同初相位对不同频率影响不同。取图固定频率值对不同峰值加速度可见峰值加速度值越大分辨率下降越厉害。从图 6 可以得到的结论是, 振动峰值加速度与 SAL 图像模糊程度相关程度很强。

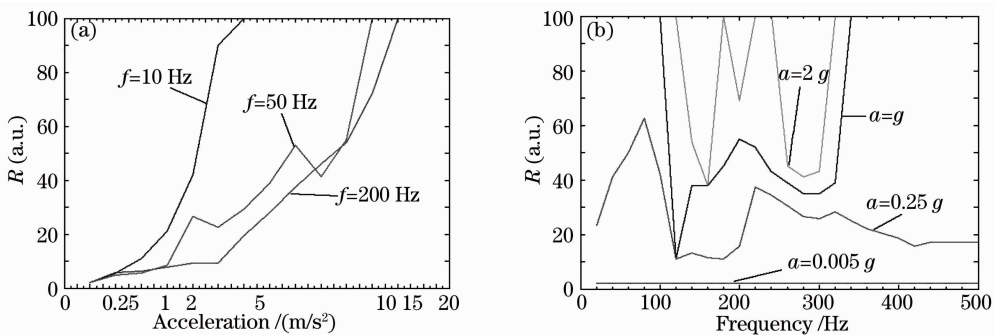


图 6 SAL 图像分辨率和振动峰值加速度、频率的关系。(a) 相同频率和初相位 (270°) 不同峰值加速度; (b) 相同峰值加速度和初相位 (0°) 不同频率

Fig. 6 SAL image resolutions versus acceleration. (a) resolution of different peak accelerations with the same frequency and initial phase (270°); (b) resolution of different frequencies with the same peak accelerations and initial phase (0°)

图 6(a) 的结果还表明, 在振动峰值加速度控制在 0.05 m/s^2 的情况下, 图像分辨率下降不到一个数量级, 图像基本不受影响, 而图像在峰值加速度超

过 5 m/s^2 会造成极大模糊。

3.3.2 扩展面目标

图 7 为无振动情况下扩展目标的 SAL 图像。

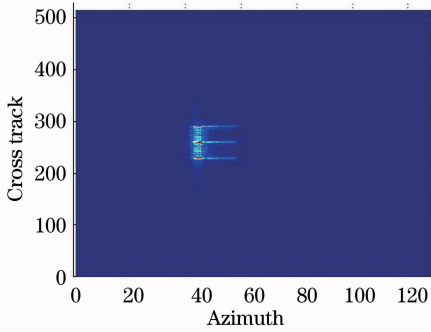


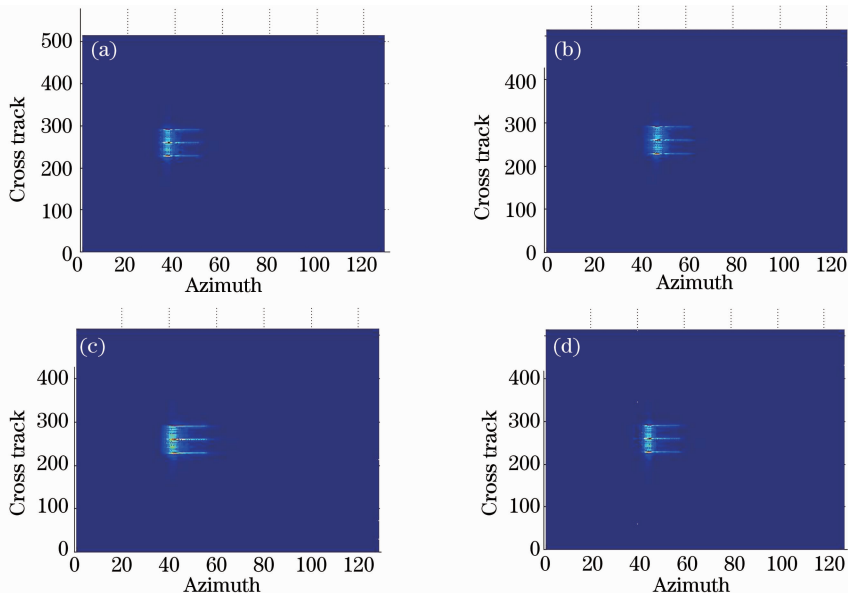
图 7 无振动情况下的 SAL 成像

Fig. 7 SAL image without vibration

图 8 给出了峰值加速度为 0.05 m/s^2 时,不同振幅、频率和初相位的振动下的 SAL 图像,图像基本没有模糊,这与前面得出的结论相符。

图 9 是峰值加速度分别为 $0.25, 2.5, 5$ 和 10 m/s^2 时某些振动频率下的 SAL 图像,可以看出振动对 SAL 成像的明显影响。其中图 9(a)和图 9(b)对应的峰值加速度约为 0.25 m/s^2 和 2.5 m/s^2 ,图 9(c)和图 9(d)对应的峰值加速度约为 5 m/s^2 和 10 m/s^2 。可以看出,加速度越大,图像模糊程度越严重,分辨率下降越厉害。这也吻合对点目标仿真做出的结论。

从图 8 和图 9 的仿真结果也可以看出,振动对 SAL 图像的影响主要表现在方位向的模糊。

图 8 峰值加速度为 0.1 m/s^2 时不同振动频率下的 SAL 成像,振动参数分别为(a)0.002_25_10;

(b)0.0005_50_200;(c)0.000125_100_90;(d)0.000005_500_270

Fig. 8 SAL image with different frequencies and peak acceleration 0.1 m/s^2 , vibration parameter are (a)0.002_25_10;

(b)0.0005_50_200;(c)0.000125_100_90;(d)0.000005_500_270 respectively

4 结 论

针对 SAL 存在的特殊问题,因为探测器或者目标的小幅度高频振动而引起成像模糊问题做了理论分析和仿真。结果表明,振动确实对条带模式机载 SAL 成像质量有严重影响,振动峰值加速度越大,成像点扩展越明显,图像方位向像点相互干扰越大,图像分辨率越差。针对文中设置的仿真对象,振动峰值加速度小于 0.05 m/s^2 时,图像基本不受影响;当振动峰值加速度不超过 0.5 m/s^2 时,分辨率下降不超过一个数量级,成像图像基本能分辨;当振动峰

值加速度超过 5 m/s^2 时,图像出现重影问题。另外,仿真计算结果还表明,在振幅和频率,即峰值加速度确定情况下,低频振动时,不同振动初相位对 SAL 成像分辨率影响明显;但在高频振动时,初相位对 SAL 图像分辨率的影响可以忽略。仿真结果也表明,平台振动对于机载 SAL 成像的影响是非常严重且不规律。这表明在实际 SAL 系统中,必须想方设法进行减震,使可能存在的振动峰值加速度减小至某个阈值以下。

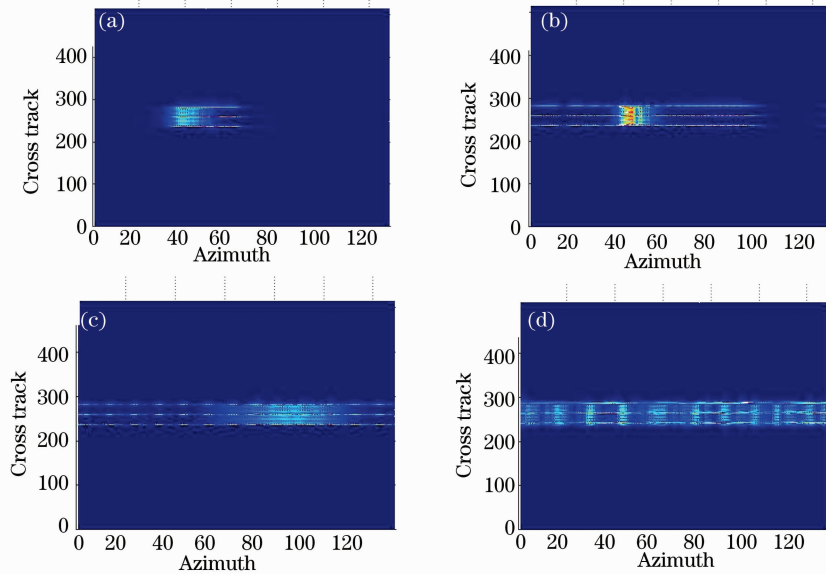


图9 不同振动频率和峰值加速度情况下 SAL 图像,振动参数分别为(a)0.000625_100_180;
(b)0.001_250_250;(c)1.25_10_270(d)0.01_500_90

Fig. 9 SAL images under different frequencies and different peak accelerations, vibration parameter are
(a)0.000625_100_180;(b)0.001_250_250;(c)1.25_10_270(d)0.01_500_90 respectively

参 考 文 献

- Guo Zhi, Ding Chibiao, Wu Yirong. A motion compensation system for high resolution airborne synthetic aperture radar[J]. *J. Electronics & Information Technology*, 2004, **26**(2): 174~180
- 郭智, 丁赤彪, 吴一戎. 一种高分辨合成孔径雷达运动补偿机制[J]. *电子信息学报*, 2004, **26**(2): 174~180
- Peng Renjun, Wu Jian, Yang Chunping *et al.*. Synthesizing aperture in optics with interferometric imaging [J]. *Acta Optica Sinica*, 2002, **22**(3): 355~359
- 彭仁军, 吴健, 杨春平等. 用干涉法实现光学合成孔径技术[J]. *光学学报*, 2002, **22**(3): 355~359
- P. Dongwook. High resolution laser radar performance analysis [D]. Massachusetts: MIT Library, 1988
- S. M. Beck, J. R. Buck. Synthetic-aperture imaging laser radar: laboratory demonstration and signal processing[J]. *Appl. Opt.*, 2005, **44**(35): 7621~7629
- 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
- 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
- Guo Liang, Xing Mengdao, Liang Yi *et al.*. 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
- Zhang Yun, Wu Jin, Tang Yongxin. Synthetic aperture laser radar [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
- J. W. Goodman. Introduction to Fourier Optics [M]. Qin Kecheng *et al.*. Transl.. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2006. 48~49
- 顾德曼. 傅里叶光学导论[M]. 秦克诚等译. 北京: 电子工业出版社, 2006. 48~49
- J. H. Shapiro. B. A. Capron, R. C. Harney. Imaging and target detection with a heterodyne-reception optical radar [J]. *Appl. Opt.*, 1981, **20**(19): 3292~3313
- 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