

逆合成孔径激光雷达机动目标运动补偿成像算法

李建^{1,2,3}, 王鲲鹏⁴, 晋凯^{1,2}, 徐晨^{1,2,3}, 付瀚初^{1,2}, 魏凯^{1,2*}

¹中国科学院自适应光学重点实验室, 四川 成都 610209;

²中国科学院光电技术研究所, 四川 成都 610209;

³中国科学院大学, 北京 100049;

⁴北京跟踪与通信技术研究所, 北京 100094

摘要 逆合成孔径激光雷达(ISAL)成像运动补偿中,包络对齐的精度直接影响了相位误差估计精度。当目标速度和加速度较大时,距离包络严重倾斜且相位误差较大,图像无法进行良好聚焦。针对上述问题,在高精度成像模型的基础上提出了一种基于 Nelder-Mead 单纯形法和粒子群优化的全局联合运动误差补偿算法。首先,利用单纯形法估计目标速度,完成包络对齐。然后,将包络对齐过程获得的目标速度作为相位误差估计中参数初始化的约束条件。最后,用粒子群优化算法对各运动参数进行全局搜索并得到最优解,实现高精度运动参数估计及高阶相位误差补偿,得到聚焦良好的二维图像。实验结果表明,本算法的参数估计误差主要分布在 $\pm 0.2\%$ 以内,参数估计精度和抗噪声性能均优于传统 ISAL 成像算法。

关键词 遥感; 逆合成孔径激光雷达; 运动补偿; Nelder-Mead 单纯形法; 粒子群优化算法; 参数估计

中图分类号 TN958.98

文献标志码 A

doi: 10.3788/AOS202141.1928001

Inverse Synthetic Aperture Lidar Motion Compensation Imaging Algorithm for Maneuvering Targets

Li Jian^{1,2,3}, Wang Kunpeng⁴, Jin Kai^{1,2}, Xu Chen^{1,2,3}, Fu Hanchu^{1,2}, Wei Kai^{1,2*}

¹Key Laboratory on Adaptive Optics, Chinese Academy of Sciences, Chengdu, Sichuan 610209, China;

²Institute of Optics and Electronics, Chinese Academy of Sciences, Chengdu, Sichuan 610209, China;

³University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;

⁴Beijing Institute of Tracking and Telecommunications Technology, Beijing 100094, China

Abstract The accuracy of envelope alignment of imaging motion compensation in inverse synthetic aperture lidar (ISAL) directly affects the accuracy of phase error estimation. When the velocity and acceleration of the target are large, the range envelope is severely skewed and the phase error is tremendous, making it impossible to focus the image well. To address the above problem, a global motion error compensation joint estimation algorithm based on Nelder-Mead simplex method and particle swarm optimization is proposed in this paper, which is on the basis of high precision imaging model. The algorithm first estimates the target velocity using the simplex method to realize the envelope alignment. Then, the target velocity obtained in the envelope alignment process is used as the constraints for the initialization of the phase error estimation. The particle swarm optimization algorithm is used to search the global optimal solution for each motion parameters. Finally, the estimation of high-precision motion parameters and compensation of high-order phase error are achieved. Meanwhile, the well-focused two-dimensional images are obtained. The experimental results show that the parameter estimation error of the algorithm is mainly distributed within $\pm 0.2\%$, and the parameter estimation accuracy and noise immunity are superior to the traditional ISAL imaging algorithm.

Key words remote sensing; inverse synthetic aperture lidar; motion compensation; Nelder-Mead simplex method;

收稿日期: 2021-01-13; 修回日期: 2021-03-28; 录用日期: 2021-04-19

通信作者: *wei_kai@126.com

particle swarm optimization algorithm; parameter estimation
 OCIS codes 280.6730; 280.4750; 060.2840

1 引言

逆合成孔径激光雷达 (ISAL) 是一种获取远距离运动目标图像的技术手段,其成像原理和逆合成孔径雷达 (ISAR) 基本相同。ISAL 具有高载频、大带宽、高分辨率和强抗干扰能力等特点,在远距离目标识别、高精度地形测绘等领域具有极大的应用潜力。理论上 ISAL 系统的分辨率不受限于成像距离,因此受到了人们的广泛关注^[1-4]。

目标运动是合成孔径雷达成像的基本条件,也是误差的主要来源。目标运动会引入包络误差和相位误差,导致二维图像严重模糊^[5]。ISAR 成像运动补偿可大致归为基于回波数据和基于成像模型两种类型。基于回波数据的算法有相位梯度自聚焦 (PGA) 算法^[6]和时频分析算法^[7]。由于非合作目标的运动方式比较复杂,目标运动加速度较大,且 ISAL 系统成像的数据量较大,传统基于回波数据的运动补偿算法适用性较差。Chen 等^[8]对非合作目标 ISAR 成像系统进行了建模,将 ISAR 成像目标的运动分解为平移运动和旋转运动,建立了基于成像模型的 ISAR 成像运动补偿方式,但该方式通常将平动误差和转动误差进行分离补偿^[9],对平动与转动耦合误差的补偿能力较弱。Xu 等^[10]用拟牛顿法同时对平动和转动误差进行补偿,消除了耦合误差对 ISAR 成像的影响。针对拟牛顿法易陷入局部最优的特点,刘盛捷等^[11]结合单纯形法和拟牛顿法进行全局估计,并联合补偿平动和转动相位误差,进一步提高了误差补偿精度。何劲等^[12]对 ISAL 信号模型的分析结果表明,相比 ISAR 成像,ISAL 成像需要更高的运动补偿精度,且高速运动目标必须考虑脉内多普勒误差。ISAL 成像的包络对齐质量对相位误差估计精度的影响比较明显,加速度和脉内多普勒效应对成像效果的负面影响也十分突出^[13],且机动目标运动模型复杂,优化目标函数通常不可约束,导致传统成像算法不再适用^[14]。

本文提出了一种基于 Nelder-Mead 单纯形法和粒子群优化 (NM-PSO) 的机动目标全局联合运动补偿成像算法。首先,在高精度成像模型下,利用 Nelder-Mead 单纯形法估计目标运动速度,完成包络对齐;然后,构建待补偿相位项,利用改进的粒子群优化 (PSO) 算法全局搜索最优运动参数,联合补

偿平动和转动相位误差。PSO 算法能保证进行全局优化搜索时不易陷入局部最优,可以很好地适应复杂的 ISAL 成像模型。实验结果表明,相比 PGA 算法和 Nelder-Mead 单纯形法,基于 NM-PSO 的 ISAL 成像算法运动参数估计精度更高、抗噪声能力更强。

2 ISAL 信号模型与 NM-PSO 成像算法

2.1 ISAL 信号模型

图 1 为 ISAL 成像几何模型。以目标的相位中心为原点建立笛卡儿坐标系,其中, y 轴为距离向, x 轴为方位向。假设成像为小斜视角,采用单发单收模式,可将目标的运动分解为沿 y 轴的平动和绕 z 轴的转动。

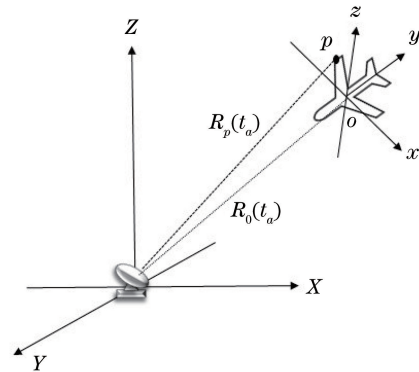


图 1 ISAL 几何模型

Fig. 1 Geometric model of the ISAL

目标上任意一个散射点 p 到雷达的瞬时距离 $R_p(t_a)$ 可表示为^[15]

$$R_p(t_a) = R_0 + vt_a + \frac{1}{2}at_a^2 + y_p - \frac{1}{2}y_p\omega^2t_a^2 - x_p\omega t_a, \quad (1)$$

式中, v 为目标速度, a 为目标加速度, ω 为目标转速, t_a 为慢时间, R_0 为初始时刻目标相位中心 o 点到雷达的距离, y_p 和 x_p 分别为目标 p 的距离向和方位向坐标。线性调频 (LFM) 信号便于产生和处理,常用于雷达探测,发射信号可表示为

$$s(t_r, t_a) = \text{rect}\left(\frac{t_r}{T_p}\right) \exp\left[j2\pi\left(f_c t + \frac{1}{2}K_r t_r^2\right)\right], \quad (2)$$

式中, $\text{rect}(\cdot)$ 为标准矩形函数, $t = t_r + t_a$ 为全时

间, t_r 为快时间, 下标 r 为不同的距离单元, f_c 为信号载频, T_p 为脉冲时间宽度, K_r 为脉冲调制斜率。则回波信号可表示为

$$s(t_r, t_a) = \sum_p \text{rect}\left(\frac{t_r - \tau_p}{T_p}\right) \text{rect}\left(\frac{t_a}{T_a}\right) \times \exp\left\{j2\pi\left[f_c(t - \tau_p) + \frac{1}{2}K_r(t_r - \tau_p)^2\right]\right\}, \quad (3)$$

式中, T_a 为系统成像相干处理时间的宽度, τ_p 为回波延时。考虑到目标高速运动会引入脉内多普勒效应, 且在单个脉冲内不考虑加速效应, 回波时延可表

示为^[12]

$$\tau_p = \frac{2[R_p(t_a) + vt_r]}{c + v} \approx \frac{2[R_p(t_a) + vt_r]}{c}, \quad (4)$$

式中, c 为真空中的光速。回波时误差在包络和相位中均有体现, 由于 $v \ll c$, 则回波时误差对包络的影响可以忽略。当目标在单个脉冲时间内的径向移动量达到波长量级时, 回波时误差会引入不可忽略的脉内多普勒误差。采用 dechirp 方式探测回波信号, 回波信号和本振参考信号在外差探测器的表面相干叠加, 经探测器处理后输出的中频信号可表示为

$$S_{\text{IF}}(t_r, t_a) = \sum_p \text{rect}\left(\frac{t_r - \tau_p}{T_p}\right) \text{rect}\left(\frac{t_a}{T_a}\right) \exp\{-j\pi[2f_c\tau_{\Delta p} - K_r\tau_{\Delta p}^2 + 2K_r\tau_{\Delta p}(t_r - \tau_{\text{ref}})]\} \cdot \exp\left[\frac{j4\pi vt_s}{c}(K_r\tau_{\Delta p} - f_c)\right] \exp\left[\frac{j4\pi K_r vt_s^2}{c}\left(\frac{v}{c} - 1\right)\right], \quad (5)$$

式中, $\tau_{\Delta p} = \tau_p - \tau_{\text{ref}}$, $t_s = t_r - \tau_{\text{ref}}$, τ_{ref} 为参考信号延时。(5)式中的第一个指数项为不考虑目标高速运动的相位, 第二个指数项和第三个指数项为考虑目标高速运动引入的脉内多普勒误差, 可在包络对齐中进行补偿。对中频信号第一个指数项关于快时间 t_r 进行逆傅里叶变换, 得到的目标距离像可表示为

$$S_{f_r t_a}(f_r, t_a) = \sum_p T_p \text{rect}\left(\frac{t_a}{T_a}\right) \exp(-j2\pi f_c \tau_{\Delta p}) \times \exp(-j\Phi_1) \exp(j\Phi_2) \text{sinc}[T_p(f_r - K_r\tau_{\Delta p})], \quad (6)$$

$$\Phi_1 = \pi K_r \tau_{\Delta p}^2 - 2\pi f_r \tau_{\Delta p} - 2\pi f_r \tau_{\text{ref}}, \quad (7)$$

$$\Phi_2 = \frac{4\pi vt_s}{c}(K_r\tau_{\Delta p} - f_c) + \frac{4\pi K_r vt_s^2}{c}\left(\frac{v}{c} - 1\right). \quad (8)$$

(6)式中, 第一个指数项包含方位向坐标信息,

第二个指数项包含残余视频相位(RVP)、包络倾斜项, 可直接进行补偿^[16], 第三个指数项为脉内多普勒误差, 准确估计目标速度后可进行补偿。通过测距可以确定目标到雷达的初始距离 R_0 , 并将参考距离 R_{ref} 合理设置为 R_0 , 使中频信号始终落在系统探测带宽内。将(1)式代入(4)式, 得到

$$\tau_{\Delta p} = \frac{2}{c}\left(vt_a + \frac{1}{2}at_a^2 + y_p - \frac{1}{2}y_p\omega^2 t_a^2 - x_p\omega t_a\right). \quad (9)$$

平移分量 $vt_a + \frac{1}{2}at_a^2$ 和转动分量 $-\frac{1}{2}y_p\omega^2 t_a^2 - x_p\omega t_a$ 可使包络偏移和越距离单元徙动, 利用 Nelder-Mead 单纯形法估计目标速度, 消除距离像包络 $\tau_{\Delta p}$ 内的时变项和脉内多普勒相位误差 Φ_2 , 并忽略较小的误差项, 完成包络对齐, 得到一维距离像

$$S'_{f_r t_a}(f_r, t_a) = \sum_p T_p \text{rect}\left(\frac{t_a}{T_a}\right) \exp(-j2\pi f_c \tau_{\Delta p}) \text{sinc}\left[T_p\left(f_r - \frac{2K_r}{c}y_p\right)\right]. \quad (10)$$

由(6)式和(9)式可知, 方位向相位可表示为

$$\varphi_a = -\frac{j4\pi f_c}{c}\left(vt_a + \frac{1}{2}at_a^2 + y_p - \frac{1}{2}y_p\omega^2 t_a^2 - x_p\omega t_a\right). \quad (11)$$

相位误差包括平动误差 $vt_a + \frac{1}{2}at_a^2 + y_p$ 和转动误差 $-\frac{1}{2}y_p\omega^2 t_a^2$, 因此需要构建相位误差待补偿项, 并利用 PSO 算法估计运动参数并补偿相位误差, 最后沿方位向进行逆快速傅里叶变换(IFFT)操作, 得到目标的二维图像, 可表示为

$$S_{f_r f_a}(f_r, f_a) = \sum_p T_p T_a \text{sinc}\left[T_p\left(f_r - \frac{2K_r}{c}y_p\right)\right] \text{sinc}\left[T_a\left(f_a - \frac{2\omega}{\lambda_c}x_p\right)\right], \quad (12)$$

式中, λ_c 为中心波长。

2.2 NM-PSO 成像算法

产生包络偏移的主要原因是存在径向平动速度,其在慢时间轴上为一次项分布并与快时间耦合,导致每个回波数据沿快时间压缩后,当前包络与前一时刻包络错位,进而导致距离像倾斜且方位向数据无法正常压缩。通过估计目标运动速度完成包络对齐,再将速度估计值作为相位误差补偿中速度估计的初始化条件之一,从而提高相位误差补偿中速度估计的精度。当评价函数在迭代计算过程中单峰可微时,传统优化算法通常是有效的,但当待优化变量增多时,评价函数存在多个极值且不可微或求导复杂时,传统优化算法很难实现最优化操作。启发式优化算法具有较强的全局搜索能力,如遗传算法、PSO 算法。PSO 算法具有模型简单、结构简单、效率高等优点,因此,实验利用 PSO 算法全局搜索 ISAL 成像目标的运动参数。

1) 包络对齐

在包络对齐中,以图像包络对比度(IEC)为评价指标^[17]进行参数估计。原因是 IEC 可以很好地描述图像不同距离单元能量分布的反差,在 ISAL 距离像中,反差越大,表明包络对齐的效果越好。IEC 可表示为

$$I_{EC}(v_0) = \sum_{m=1}^M \left| \sum_{n=1}^N |S'_{f_r t_a}(f_r, t_a; v_0)| \right|^2, \quad (13)$$

式中, v_0 为待估计参数速度, M 、 N 分别为距离向和方位向的单元数量, $S'_{f_r t_a}(f_r, t_a; v_0)$ 为补偿后的图像包络。联立(6)式和(7)式,得到

$$\mathcal{F}^{-1} \left\{ \mathcal{F} [S_{f_r t_a}(f_r, t_a) \cdot \exp(j\Phi_1)]_{f_r} \cdot H \right\}_{t_r}, \quad (14)$$

式中, \mathcal{F}^{-1} 和 \mathcal{F} 分别为对应下标变量的逆傅里叶变换(IFT)和傅里叶变换(FT)操作, H 为包络对齐待补偿误差项,可表示为

$$H = \exp \left[-j \left(\frac{4\pi K_r}{c} v_0 t_a t_r + \Phi_2 \right) \right]. \quad (15)$$

忽略 $\tau_{\Delta p}$ 慢时间二次项的影响时,可将包络对齐参数估计问题表示为

$$\hat{v}_0 = \operatorname{argmin} [-I_{EC}(v_0)]. \quad (16)$$

最后,通过 Nelder-Mead 单纯形法搜索得到粗略估计值 \hat{v}_0 ,完成包络对齐。

2) 相位误差估计

相比包络对齐,相位误差估计需要更高的精度,以保证方位向的聚焦良好。图像熵(IE)是 ISAL 成像相位误差估计常用的评价函数^[18-19],IE 越小,表

明图像的能量分布越集中,散射点的聚焦效果越好,图像越清晰。IE 有多种不同形式,结合实际问题选择 Frieden 定义的 IE^[20],可表示为

$$I_E(v, a, \omega) = - \sum_{n=1}^N \sum_{m=1}^M D(\hat{v}_0 | v, a, \omega) \cdot \ln D(\hat{v}_0 | v, a, \omega), \quad (17)$$

式中, $D(\hat{v}_0 | v, a, \omega)$ 为图像的能量密度,可表示为

$$D(\hat{v}_0 | v, a, \omega) = \frac{|I(\hat{v}_0 | v, a, \omega)|^2}{\sum_{n=1}^N \sum_{m=1}^M |I(\hat{v}_0 | v, a, \omega)|^2}, \quad (18)$$

式中, $I(\hat{v}_0 | v, a, \omega)$ 为补偿后的目标图像,可表示为

$$I(\hat{v}_0 | v, a, \omega) = \mathcal{F}^{-1} [S'_{f_r t_a}(f_r, t_a) \cdot h(v, a, \omega)]_{t_a}, \quad (19)$$

式中, $h(v, a, \omega)$ 为补偿相位误差项。以平动方程的二阶形式为例, $h(v, a, \omega)$ 可表示为

$$h(v, a, \omega) = \exp \left[j \frac{4\pi}{\lambda_c} \left(vt_a + \frac{1}{2} at_a^2 - \frac{1}{2} y_p \omega^2 t_a^2 \right) \right]. \quad (20)$$

根据上述分析,可将 ISAL 成像相位误差估计优化问题表示为

$$\hat{\boldsymbol{\beta}} = \operatorname{argmin} I_E(\boldsymbol{\beta}), \quad (21)$$

式中, $\boldsymbol{\beta} = [v, a, \omega]$ 为待估计参数矢量,从而将 ISAL 成像相位误差估计当作非线性最小优化问题。

PSO 算法是一种基于群体的全局优化算法,在 ISAR 成像参数估计中得到了广泛应用^[21-22]。将待估计参数矢量 $\boldsymbol{\beta}$ 定义为粒子位置矢量 \mathbf{x}_i^t ,则粒子速度和位置更新公式为

$$\mathbf{v}_i^{t+1} = \eta \mathbf{v}_i^t + c_1 r_1 (\mathbf{x}_i^{t, \text{pbest}} - \mathbf{x}_i^t) + c_2 r_2 (\mathbf{x}_i^{t, \text{gbest}} - \mathbf{x}_i^t), \quad (22)$$

$$\mathbf{x}_i^{t+1} = \mathbf{x}_i^t + \mathbf{v}_i^{t+1}, \quad (23)$$

式中, \mathbf{v} 为种群内每个粒子的速度, i 和 t 分别为粒子编号和迭代次数, η 为惯性权重系数, c_1 和 c_2 为加速常数, r_1 和 r_2 为分布在 0 和 1 之间的随机值, $\mathbf{x}_i^{t, \text{pbest}}$ 和 $\mathbf{x}_i^{t, \text{gbest}}$ 分别为迭代次数 t 时当前和全局最优的粒子位置, $c_1 r_1 (\mathbf{x}_i^{t, \text{pbest}} - \mathbf{x}_i^t)$ 和 $c_2 r_2 (\mathbf{x}_i^{t, \text{gbest}} - \mathbf{x}_i^t)$ 为优化迭代时种群内粒子相互学习和信息共享的过程,以此加快向全局最优靠拢的速度。

为提高 PSO 算法对 ISAL 成像运动参数估计的效率,对待估计参数初始化方法进行改进。在不同速度下进行多次粗略估计实验,得到多个对应的

目标速度估计值 $\hat{v}_0 = [\hat{v}_{0,1}, \dots, \hat{v}_{0,k}]$, 其中, k 为实验序数。每次实验的真值为 $\hat{v}_{0,k}^{\text{real}}$, k 次粗略估计误差 $\Delta\hat{v}_{0,k}^{\text{real}} = \hat{v}_{0,k}^{\text{real}} - \hat{v}_{0,k}$, 找出估计误差绝对值最大项 $\Delta\hat{v}_{0,k,\text{max}}^{\text{real}} = |\hat{v}_{0,k}^{\text{real}} - \hat{v}_{0,k}|_{\text{max}}$, 则速度初始化可表示为 $v_{\text{ini},k} = \text{rand}(\hat{v}_{0,k} - \Delta\hat{v}_{0,k,\text{max}}^{\text{real}} - \delta, \hat{v}_{0,k} + \Delta\hat{v}_{0,k,\text{max}}^{\text{real}} + \delta)$, (24)

式中, $\text{rand}(\cdot)$ 为生成指定范围内的随机数, δ 为 0

到 1 之间的随机数, 可扩展参数初始化范围, 增加速度初始化的可靠性, 而加速度 a 和转速 ω 在特定范围内随机产生。完成参数初始化后进行迭代优化, 获得各运动参数并完成相位误差补偿, 实现运动目标的高分辨成像。图 2 为基于 NM-PSO 算法的 ISAL 成像流程图, 其中, range 表示对信号在距离向进行变换。

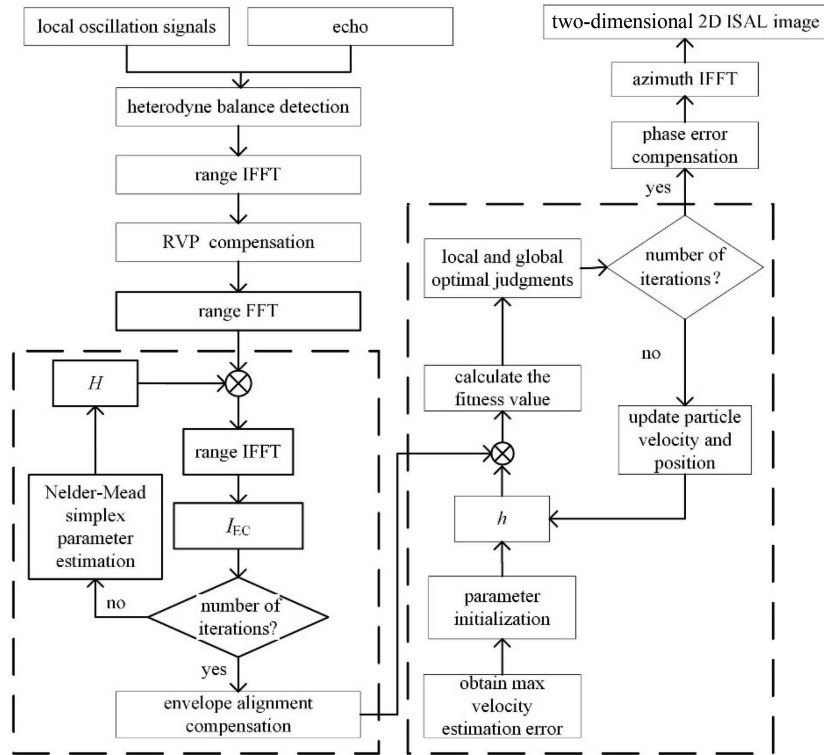


图 2 NM-PSO 成像算法的流程图

Fig. 2 Flow chart of the NM-PSO imaging algorithm

3 仿真实验

仿真实验用 LFM 信号作为发射信号, 表 1 为系统参数。其中, 信号带宽、波长、脉冲重复频率、脉冲宽度、采样率等参数与室内实验系统的工作参数相同, 由目标尺寸和距离向分辨率得到距离单元数

表 1 系统参数

Table 1 System parameters

Parameter	Value
Signal bandwidth B /GHz	4
Carrier wavelength λ_c /nm	1550
Pulse repetition rate f_{PRF} /kHz	50
Pulse width T_p / μs	10
Sampling rate f_s /MHz	80
Initial distance R_0 /km	3
Range cell M	800
Pulse number N	128

为 800, 仿真实验中累积 128 个脉冲就能完成二维成像, 即方位向单元数为 128。

将仿真实验的目标设置为飞机散射点模型, 模型的长宽均为 30 m, 旋转角速度为 0.002 rad/s, 图 3 为目标散射点模型图。为方便表达, 下文将成像方法表示为 AA-BB 的形式, 其中, AA 表示包络

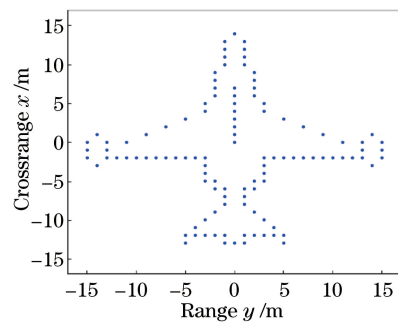


图 3 仿真实验的目标模型

Fig. 3 Target model of the simulation experiment

对齐方法, BB 表示相位误差估计方法, 将 Nelder-Mead 单纯形法表示为 NM 单纯形法。

3.1 包络对齐

设置目标速度为 100 m/s, 加速度为 20 m/s², 通过不同包络对齐方法得到一维距离像, 在此基础上采用 PSO 算法估计运动参数补偿相位误差, 获取二维 ISAL 图像。图 4(a) 为未补偿的距离像, 对应的图像包络对比度 $I_{EC} = 0.69 \times 10^6$, 可以明显看到包络倾斜; 图 4(b) 为距离向未补偿, 方位向采用 PSO 算法补偿的二维图像, 可以发现, 图像完全模糊, 无法分辨目标轮廓; 图 4(c) 为互相关法包络对

齐后的距离像, 对应的图像包络对比度 $I_{EC} = 1.36 \times 10^6$; 图 4(d) 为互相关包络对齐后方位向采用 PSO 算法补偿的二维图像, 可以发现, 图像的散射点比较模糊, 聚焦效果较差; 图 4(e) 为利用 Nelder-Mead 单纯形法包络对齐后的距离像, 对应的图像包络对比度 $I_{EC} = 1.50 \times 10^6$; 图 4(f) 为 NM-PSO 算法补偿后的二维图像, 可以发现, 目标散射点聚焦良好。从图像包络对比度和二维图像的聚焦效果可以发现, 包络对齐质量会直接影响相位误差估计精度, 且基于 Nelder-Mead 单纯形法的包络对齐算法补偿能力更好。

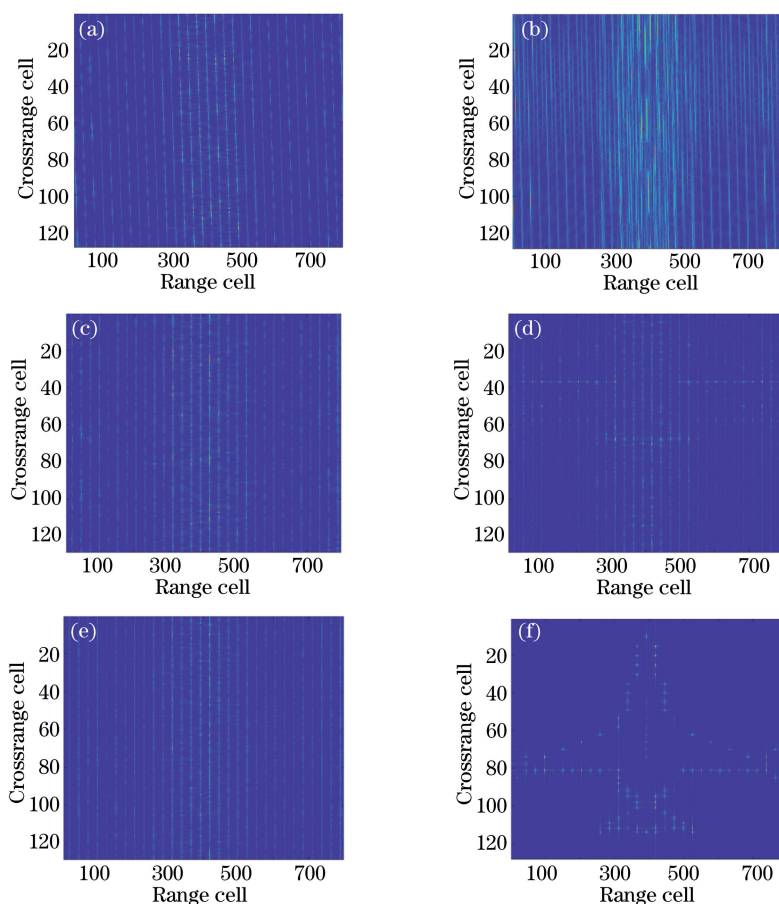


图 4 不同算法得到的距离像和二维成像结果。(a) 未补偿; (b) 未补偿-PSO; (c) 互相关法; (d) 互相关法-PSO; (e) NM 单纯形法; (f) NM-PSO

Fig. 4 Distance image and two-dimensional imaging results obtained by different algorithms. (a) Uncompensation; (b) uncompensation-PSO; (c) cross-correlation method; (d) cross-correlation method and PSO; (e) NM simplex; (f) NM-PSO

为进一步验证基于 Nelder-Mead 单纯形法的包络对齐算法的稳定性, 在速度分布为 50~400 m/s 且目标初始方向角不同的情况下, 估计目标速度。以图 3 中的目标方向为参考基准, 方向角为 0, 以 $\pi/2$ 为步长顺时针旋转获取 3 个不同初始方向角, 得到不同初始方向角的速度估计相对误差分布如图 5 所示。可以发现, 在 50~400 m/s 速度范围内, 速度

估计相对误差主要分布在 0.2%~0.6% 范围内, 估计误差导致的频率偏移量远小于 1/8 分辨单元, 这表明本算法适用于目标不同姿态下的运动速度估计且精度较高。

3.2 相位误差估计

由(20)式可知, 目标运动导致的相位误差量级需和中心波长 λ_c 进行对比, ISAL 成像系统的中心

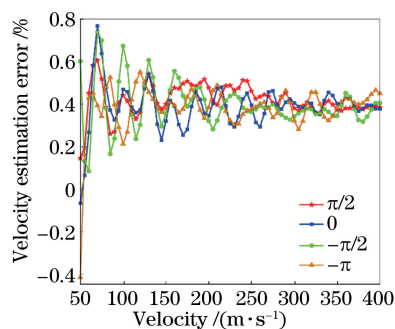


图 5 速度估计误差

Fig. 5 Velocity estimation error

波长 λ 。通常为微米量级。影响 ISAL 图像方位向聚焦的运动参数主要是加速度,其构成与慢时间相关且远大于波长量级的二次相位项,导致方位向聚焦后图像模糊。用改进的 PSO 算法估计运动参数构建待补偿相位误差项和评价函数,可消除运动误差对方位向数据压缩的负面影响,获取高分辨二维

ISAL 图像。

实验中设置目标运动速度为 100 m/s,加速度为 20 m/s²。为检验该算法的相对误差估计性能,将目标加速度初始化为 1~50 m/s² 内的均匀分布并进行多次实验,根据 (24) 式完成速度初始化,并在合理范围内随机生成转动角速度。图 6(a) 为本算法的运动参数估计误差,可以发现,对成像效果影响最大的加速度估计误差主要分布在 $\pm 0.1\%$ 内;速度估计误差主要分布在 $\pm 0.2\%$ 内,相比包络对齐操作中的速度估计精度有所提高,验证了改进速度初始化方法的有效性;角速度估计误差主要分布在 $\pm 0.4\%$ 内。图 6(b) 为加速度优化前后的粒子分布图,初始化加速度在 5~45 m/s² 范围内随机产生 100 个粒子,经过全局搜索后,大部分粒子集中分布在最小熵值附近。这表明本算法对于速度、加速度和角速度的估计精度均较高,接近运动参数真实值。

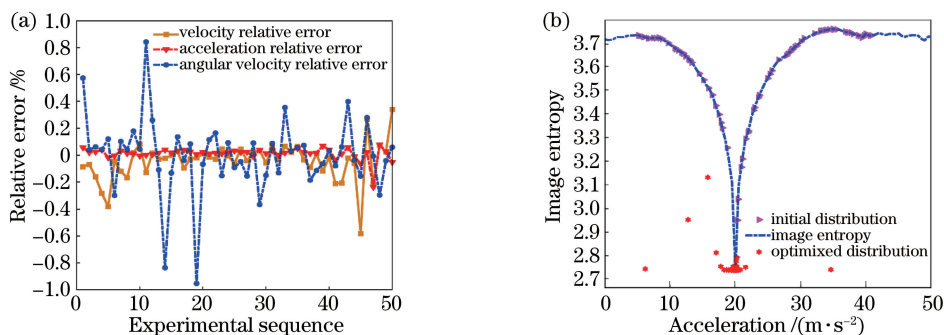


图 6 参数估计结果。(a) 参数估计误差; (b) 加速度粒子分布

Fig. 6 Parameter estimation results. (a) Parameter estimation error; (b) distribution of acceleration particles

根据上述估计结果和补偿模型完成相位误差补偿,图 7 为 PGA 算法、Nelder-Mead 单纯形法和 PSO 算法优化得到的二维成像结果。图 7(a) 为 PGA 算法得到的二维结果,由于加速度过大,图像无法聚焦;图 7(b) 和图 7(c) 分别为 Nelder-Mead 单纯形法和 PSO 算法补偿得到的二维图像,均可分辨

目标轮廓,但在细节上 PSO 算法成像结果的部分散射点聚焦更清晰。从图中分别选取 5 个大小相同的点图像,如矩形方框区域,利用不同优化算法计算被选取点图像的图像熵,结果如表 1 所示。可以发现,位于不同方位的几个点图像用 PSO 算法优化补偿的图像熵值始终最小。

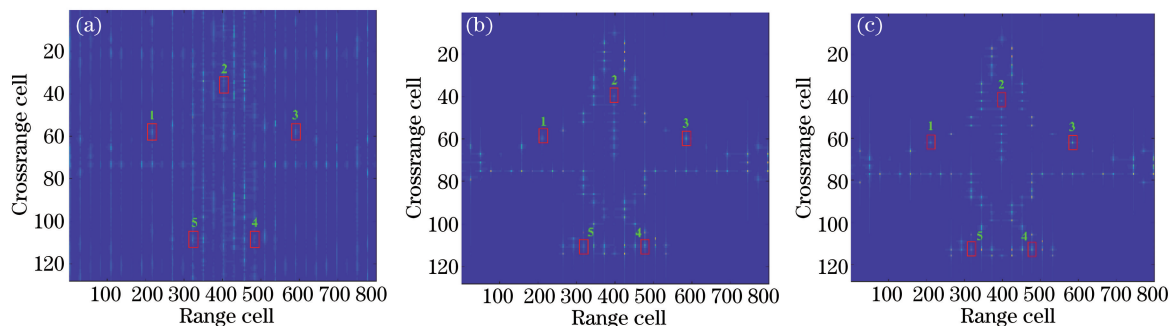


图 7 二维成像结果和熵分布。(a) PGA 算法; (b) NM 单纯形法; (c) PSO 算法

Fig. 7 Two-dimensional imaging results and entropy distribution. (a) PGA algorithm; (b) NM simplex method; (c) PSO algorithm

表 2 部分点的 IE
Table 2 IE of partial points

Optimization algorithm	Point 1	Point 2	Point 3	Point 4	Point 5
PGA	1.2397	1.2260	1.0205	0.7891	1.0870
NM simplex	0.8358	0.5706	1.0516	1.0840	0.7979
NM-PSO	0.4897	0.2039	0.6999	0.9903	0.5421

3.3 抗噪声性能检验

ISAL 的目标通常距离较远,回波数据信噪比 (SNR)较低,且包含大量激光散斑噪声、散粒噪声、脉间随机相位噪声以及其他电路噪声等引入的误差。实验主要考虑散粒噪声和脉间随机相位噪声对成像效果的影响。其中,散粒噪声用信噪比评价。图 8 为不同算法在不同信噪比时的二维成像结果和图像熵。从图 8(a)可以发现,信噪比约为 -35 dB 时,三种算法的图像熵趋于一致,且图像熵随信噪比的升高逐渐降低。这表明目标散射点图像的聚焦效

果不断提高,且在相同信噪比下,NM-PSO 算法优化补偿后二维图像的图像熵始终最小。图 8(b)和图 8(c)为幅度信噪比为 -35 dB 时 Nelder-Mead 单纯形法和本算法的成像结果,可以发现,Nelder-Mead 单纯形法只能分辨部分散射点,目标轮廓无法完全分辨,而 PSO 算法得到的图像噪声背景较强,可以分辨目标散射点,目标轮廓也比较清晰。这表明在相同信噪比且图像熵趋于一致时,NM-PSO 算法的二维成像结果明显比 Nelder-Mead 单纯形法更清晰。

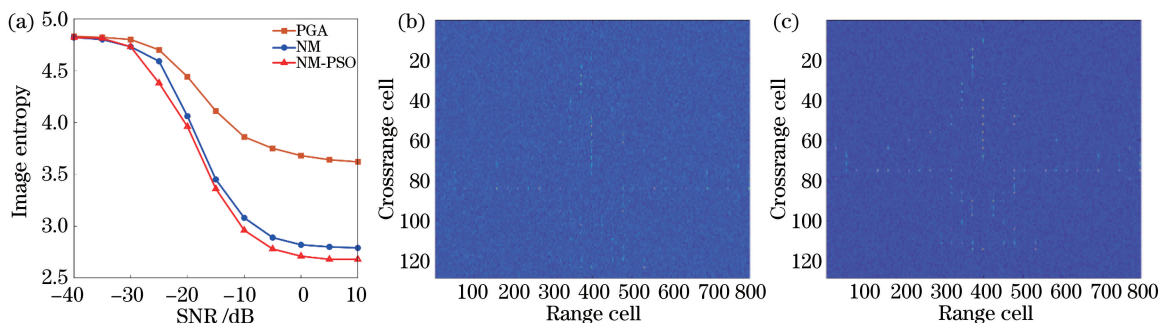


图 8 散粒噪声的实验结果。(a) IE;(b) NM 单纯形法;(c) PSO 算法

Fig. 8 Experimental results of shot noise. (a) IE; (b) NM simplex method; (c) PSO algorithm

从误差模型上可以发现,相比散粒噪声,脉间随机相位噪声 (R_{PN}) 对 ISAL 成像效果的影响更大。图 9 为不同算法在随机相位误差情况下的二维成像结果和图像熵。从图 9(a)可以发现, R_{PN} 约为 40 rad 时不同优化算法处理的图像熵值趋于一致。其中,PGA 算法在 R_{PN} 较小时的补偿能力较弱,而 NM-PSO 算法的误差估计性能较好。图 9(b)和

图 9(c)分别为随机相位噪声 $R_{PN}=2$ rad 时 Nelder-Mead 单纯形法和 PSO 算法的成像结果,可以发现, $R_{PN}=2$ rad 时,Nelder-Mead 单纯形法的相位误差估计精度较低,无法有效补偿附加的随机相位噪声,而 NM-PSO 算法补偿后仍能清晰分辨出目标轮廓和大部分散射点。

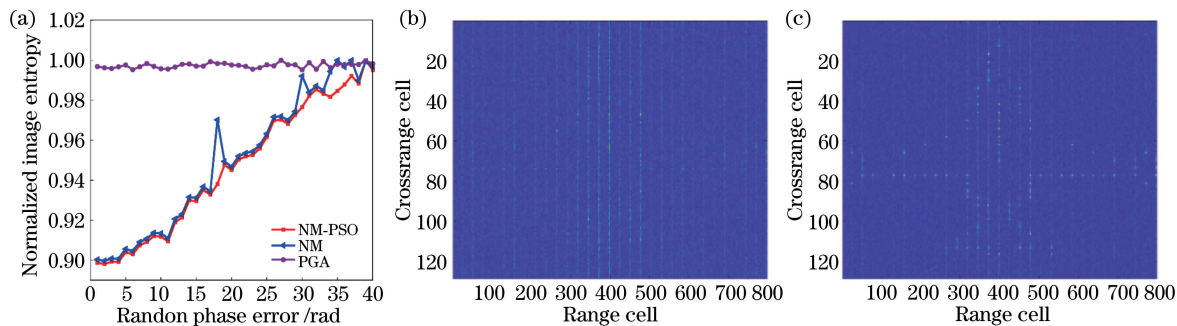


图 9 相位噪声的实验结果。(a) IE;(b) NM 单纯形法;(c) PSO 算法

Fig. 9 Experimental results of phase noise. (a) IE; (b) NM simplex method; (c) PSO algorithm

4 结 论

运动补偿是 ISAL 成像的重要研究内容,针对传统基于回波数据的 ISAL 成像算法对高阶运动误差补偿精度较低的问题,结合 Nelder-Mead 单纯形法和 PSO 算法提出了一种基于成像模型的 NM-PSO 全局联合运动补偿算法。通过 Nelder-Mead 单纯形法估计目标运动速度完成包络对齐,在速度为 50~400 m/s 和不同初始方位角状态下,速度估计误差主要分布在 0.2%~0.6% 之间;通过改进 PSO 算法估计运动参数并有效补偿相位误差,可使各参数估计误差主要分布在 $\pm 0.2\%$ 以内。实验结果表明,NM-PSO 成像算法的相位误差估计性能和抗噪声性能均优于 PGA 算法和 Nelder-Mead 单纯形法。后续将搭建成像实验平台,通过实测数据验证本算法的有效性。

参 考 文 献

- [1] Song Z, Mo D, Li B, et al. Phase gradient matrix autofocus for ISAL space-time-varied phase error correction[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2020, 32(6): 353-356.
- [2] Zhang Y, Yang Q, Deng B, et al. Experimental research on interferometric inverse synthetic aperture radar imaging with multi-channel terahertz radar system[J]. *Sensors (Basel, Switzerland)*, 2019, 19(10): E2330.
- [3] Li X Z, Guo L, Shen M Y. Inverse synthetic aperture lidar imaging of indoor real data[J]. *Optik*, 2019, 181: 28-35.
- [4] Wu J, Zhao Z L, Wu S D, et al. High resolution synthetic aperture lidar imaging at 12.9 m distance [J]. *Acta Optica Sinica*, 2015, 35(12): 1228002.
吴谨, 赵志龙, 吴曙东, 等. 12.9 m 高分辨率合成孔径激光雷达成像 [J]. *光学学报*, 2015, 35(12): 1228002.
- [5] Lu T A, Li H P. Phase error compensation in airborne synthetic aperture lidar data processing[J]. *Acta Optica Sinica*, 2015, 35(8): 0801002.
鲁天安, 李洪平. 机载合成孔径激光雷达相位误差补偿研究[J]. *光学学报*, 2015, 35(8): 0801002.
- [6] Eichel P H, Jakowatz C V. Phase-gradient algorithm as an optimal estimator of the phase derivative[J]. *Optics Letters*, 1989, 14(20): 1101-1103.
- [7] Chen V C. Adaptive time-frequency ISAR processing [J]. *Proceedings of SPIE*, 1996, 2845: 133-140.
- [8] Chen C C, Andrews H C. Target-motion-induced radar imaging [J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 1980, AES-16(1): 2-14.
- [9] Ye W, Yeo T S, Bao Z. Weighted least-squares estimation of phase errors for SAR/ISAR autofocus [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 1999, 37(5): 2487-2494.
- [10] Xu G, Xing M D, Yang L, et al. Joint approach of translational and rotational phase error corrections for high-resolution inverse synthetic aperture radar imaging using minimum-entropy [J]. *IET Radar, Sonar & Navigation*, 2016, 10(3): 586-594.
- [11] Liu S J, Fu H C, Wei K, et al. Jointly compensated imaging algorithm of inverse synthetic aperture lidar based on Nelder-Mead simplex method [J]. *Acta Optica Sinica*, 2018, 38(7): 0711002.
刘盛捷, 付翰初, 魏凯, 等. 基于 Nelder-Mead 单纯形法的逆合成孔径激光雷达联合补偿成像算法 [J]. *光学学报*, 2018, 38(7): 0711002.
- [12] He J, Zhang Q, Yang X Y, et al. Imaging algorithm for inverse synthetic aperture imaging LADAR [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2012, 41(4): 1094-1100.
何劲, 张群, 杨小优, 等. 逆合成孔径成像激光雷达成像算法 [J]. *红外与激光工程*, 2012, 41(4): 1094-1100.
- [13] Ruan H, Wu Y H, Ye W. Echo signal characteristics of inverse synthetic aperture lidar [J]. *Laser & Infrared*, 2013, 43(4): 385-390.
阮航, 吴彦鸿, 叶伟. 逆合成孔径激光雷达回波信号特征分析 [J]. *激光与红外*, 2013, 43(4): 385-390.
- [14] Walker J L. Range-Doppler imaging of rotating objects [J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 1980, AES-16(1): 23-52.
- [15] Zang B, Guo R, Tang Y, et al. Real envelope imaging algorithm for inverse synthetic aperture imaging lidar [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2010, 39(12): 2152-2157.
臧博, 郭睿, 唐禹, 等. 逆合成孔径成像激光雷达实包络成像算法 [J]. *光子学报*, 2010, 39(12): 2152-2157.
- [16] Bao Z, Xing M D, Wang T. Radar imaging technology [M]. Beijing: Publishing House of Electronics industry, 2005: 25-28.
保铮, 邢孟道, 王彤. 雷达成像技术 [M]. 北京: 电子工业出版社, 2005: 25-28.
- [17] Martorella M, Berizzi F, Bruscoli S. Use of genetic algorithms for contrast and entropy optimization in ISAR autofocusing [J]. *EURASIP Journal on Advances in Signal Processing*, 2006, 2006: 087298.
- [18] Xi L, Liu G S, Ni J L. Autofocusing of ISAR images based on entropy minimization [J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*,

- 1999, 35(4): 1240-1252.
- [19] Zhang S H, Liu Y X, Li X. Fast entropy minimization based autofocusing technique for ISAR imaging [J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2015, 63(13): 3425-3434.
- [20] Frieden B R. Statistical models for the image restoration problem [J]. Computer Graphics and Image Processing, 1980, 12(1): 40-59.
- [21] Liu L, Qi M S, Zhou F. A novel non-uniform rotational motion estimation and compensation method for maneuvering targets ISAR imaging utilizing particle swarm optimization [J]. IEEE Sensors Journal, 2018, 18(1): 299-309.
- [22] Brinkman W, Thayaparan T. Focusing inverse synthetic aperture radar images with higher-order motion error using the adaptive joint-time-frequency algorithm optimised with the genetic algorithm and the particle swarm optimisation algorithm-comparison and results[J]. IET Signal Processing, 2010, 4(4): 329-342.