

基于 ISAIL 稀疏性的相位校正算法

臧 博, 郭 睿, 张 磊, 唐 禹, 邢孟道

(西安电子科技大学雷达信号处理重点实验室, 陕西西安 710071)

摘 要: 逆合成孔径成像激光雷达(Inverse Synthetic Aperture Imaging Lidar, ISAIL)的回波信号在距离-多普勒(Range-Doppler, R-D)域具有稀疏性,由此本文提出一种以稀疏性为全局约束条件的相位校正算法,并引入正则化方法解决此问题.在算法的实现过程中引入了 Hadamard 乘法和快速傅立叶变换,提高了算法的运算速率.与传统的 ISAIL 成像算法相比,此算法可以在低信噪比或回波存在缺失的情况下得到聚焦良好的目标像.仿真及实测数据验证了算法的可行性和有效性.

关键词: 逆合成孔径成像激光雷达; 相位校正; 稀疏; 正则化

中图分类号: TN958.98 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2011) 06-1272-06

A Phase Adjustment Algorithm for ISAIL Based on Sparsity

ZANG Bo, GUO Rui, ZHANG Lei, TANG Yu, XING Meng-dao

(National Key Laboratory for Radar Signal Processing, Xidian University, Xi'an, Shaanxi 710071, China)

Abstract: Due to the sparsity of inverse synthetic aperture imaging lidar (ISAIL) echoes in range-Doppler (R-D) plane, a phase adjustment algorithm for ISAIL is proposed. The sparsity is used as a global constraint condition for phase adjustment, then the regularization method is brought in to solve this optimization problem. Hadamard multiplication and fast Fourier transform are applied to improve the computation efficiency. Compared with the traditional ISAIL imaging algorithm, image of target is well focused by our method under the condition of low SNR or lack of echoes. The ISAIL imaging experiments with numerical and measured data validate the feasibility and effectiveness of the proposed algorithm.

Key words: inverse synthetic aperture imaging lidar; phase adjustment; sparsity; regularization

1 引言

逆合成孔径成像激光雷达(Inverse Synthetic Aperture Imaging Lidar, ISAIL)结合相干激光技术与逆合成孔径技术,是一种新型主动遥感探测成像技术^[1,2].与传统的激光成像雷达相比,突破了系统孔径的限制,二维分辨率在距离上具有较好的一致性,不会由于作用距离的增加而导致分辨率恶化;与常规的微波成像雷达(SAR、ISAR等)相比,可以得到分辨率高得多的目标图像,提供更为丰富、准确的目标信息.

类似于 ISAR 成像, ISAIL 成像通过发射大的时宽带宽积信号实现距离高分辨,通过目标与雷达之间的相对运动,形成虚拟合成阵列实现方位高分辨.方位分辨率取决于相干积累时间内目标相对 ISAIL 视线转过的角度.在相干积累时间内,目标运动的平动分量导致目标的各散射点的回波增加了相同的多普勒信息,对成像过程没有帮助,反而造成了不同发射脉冲的回波包络和相

位的变化^[3],对后续方位向的处理带来不便;其转动分量是实现方位高分辨的根本,但是当目标相对 ISAIL 视线存在较大转角时,同样会造成 MTRC.因此,在 ISAIL 成像过程中,要通过包络对齐和相位校正两步操作实现高质量目标像.包络对齐的精度是相对于距离分辨单元而言的,易于实现^[4,5];相位校正通常使用文献[6]中提出的多特显点综合算法,此算法在回波信号信噪比较高,特显点可提取的情况下,可以得到较好的处理结果,然而在信噪比较低或者方位向回波缺失较为严重时,性能下降.为解决上述问题,本文提出了一种基于 ISAIL 回波信号稀疏性的相位校正算法.

ISAIL 目标像可解释为目标上散射点的位置以及各散射点对激光信号后向散射的强度,反映了目标的尺寸和形状.强散射点通常只占距离-多普勒(Range-Doppler, R-D)平面的一部分,而来自弱散射点的信号对成像几乎没有贡献,因此,回波信号通常视为众多强散射点子回波的和.上述分析表明 ISAIL 信号在 R-D 域可视为稀

疏的.因此,本文以 ISAIL 回波信号在 R-D 平面的稀疏性为全局约束条件,并结合正则化处理方法,提出了一种基于全局最优的相位校正算法.通过仿真及室内 ISAIL 验证系统的实测数据的验证,本文所提相位校正算法在低信噪比或方位向回波存在缺失的情况下依然可以对相位误差进行精确地补偿,得到聚焦良好的目标像.在算法实现过程中通过引入 Hadamard 乘法和快速傅立叶变换,有效的提高了算法的运行效率.

2 ISAIL 成像原理

ISAIL 是逆合成孔径技术与相干激光技术相结合的产物,在成像几何模型和成像原理上与 ISAR 相似.ISAIL 成像几何模型如图 1 所示.

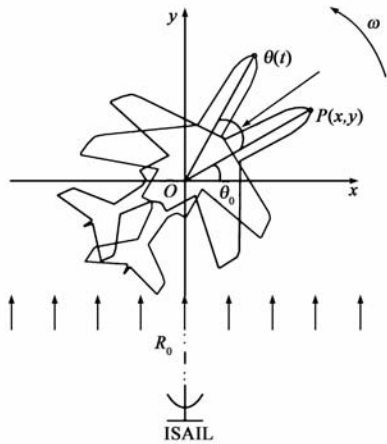


图1 ISAIL成像模型示意图

假设 ISAIL 发射信号为:

$$s_t(\tau, t_m) = a_r(\tau) \exp\left(j2\pi\left(f_c t + \frac{1}{2} \gamma \tau^2\right)\right) \quad (1)$$

其中, $a_r(\tau) = \begin{cases} 1, & |\tau| \leq \frac{T_p}{2} \\ 0, & |\tau| > \frac{T_p}{2} \end{cases}$, T_p 为脉宽, f_c 为中心频率, γ 为信号调频率, τ 为快时间,即以发射时刻为起点的时间, t_m 为慢时间,即激光脉冲信号发射时刻, τ 、 t_m 与全时间 t 的关系为 $\tau = t - t_m$.

目标采用点散射模型.以目标上任一点 $P(x, y)$ 为例, (x, y) 为 $P(x, y)$ 点在零时刻在目标直角坐标系中的位置坐标,则 t_m 时刻 $P(x, y)$ 点的回波信号可表示为:

$$s_r(\tau, t_m) = A_{xy} a_a(t_m) a_r(\tau - 2R_{xy}(t_m)/c) \cdot \exp[j\pi\gamma(\tau - 2R_{xy}(t_m)/c)^2] \cdot \exp[j2\pi f_c(t - 2R_{xy}(t_m)/c)] \quad (2)$$

其中, A_{xy} 为散射点 $P(x, y)$ 后向反射系数, $a_a(t_m)$ 为方位窗函数, c 为光速, $R_{xy}(t_m)$ 表示散射点 $P(x, y)$ 在 t_m 时刻距离 ISAIL 接收孔径相位中心的瞬时距离,可表示为:

$$R_{xy}(t_m) \approx vt_m + \frac{1}{2} at_m^2 + R_0 + x \sin\theta(t_m) + y \cos\theta(t_m) \quad (3)$$

其中, R_0 为零时刻目标转动中心距离 ISAIL 接收孔径相位中心的距离,其中 v 为目标相对激光雷达相位中心的零时刻平动速度, a 为目标相对激光雷达相位中心的加速度, $\theta(t_m)$ 为 t_m 时刻目标相对 ISAIL 视线转过的角度,由于 ISAIL 发射信号波长通常在微米量级, $10^{-2} \text{rad} \sim 10^{-3} \text{rad}$ 量级相干积累角即可达到方位高分辨的要求.因此在相干积累时间内目标转动分量可视为角速度为 ω 的匀速转动,故 $\theta(t_m) = \omega t_m$, 故式(3)可近似为:

$$R_{xy}(t_m) \approx vt_m + \frac{1}{2} at_m^2 + R_0 + y + x\omega t_m \quad (4)$$

对于 ISAIL, 由于信号频率处于光波波段,故采用 Dechirp 接收方式,以便实现回波信号采样.参考信号的形式为:

$$s_{\text{ref}}(\tau, t_m) = a_r(\tau - 2R_{\text{ref}}/c) \cdot \exp[j2\pi(f_c(t - 2R_{\text{ref}}/c) + \frac{1}{2} \gamma(\tau - 2R_{\text{ref}}/c)^2)] \quad (5)$$

其中, R_{ref} 为参考距离,

$$a_r(\tau - 2R_{\text{ref}}/c) = \begin{cases} 1, & -\frac{T_p}{2} + \frac{2R_{\text{ref}}}{2} \leq \tau \leq \frac{T_p}{2} + \frac{2R_{\text{ref}}}{2} \\ 0, & \text{else} \end{cases}$$

为参考信号距离向窗函数.

假设参考距离 $R_{\text{ref}} = R_0$, 对散射点 $P(x, y)$ 的回波 Dechirp 处理后得到的信号形式为:

$$s_r(\tau, t_m) = s_r(\tau, t_m) \cdot s_{\text{ref}}^*(\tau, t_m) = A_{xy} a_a(t_m) a_r(\tau - 2R_{xy}(t_m)/c) \cdot \exp\left[-j\frac{4\pi}{c}\gamma\left(\tau - \frac{2R_0}{c}\right)R_{\Delta}\right] \cdot \exp\left[-j\frac{4\pi}{c}f_c R_{\Delta}\right] \cdot \exp\left(j\frac{4\pi}{c^2}\gamma R_{\Delta}^2\right) \quad (6)$$

其中:

$$R_{\Delta} = R_{xy}(t_m) - R_0 = vt_m + \frac{1}{2} at_m^2 + y + x\omega t_m \quad (7)$$

式(6)中,第一项为距离项;第二项为多普勒项;第三项为剩余视频相位(RVP)项^[2].

对式(6)在距离向进行校直处理及 RVP 补偿后,由傅立叶变换实现距离压缩,得:

$$s_r(f_r, t_m) = A_{xy} T_p a_a(t_m) \cdot \text{sinc}\left[T_p\left(f_r + 2\frac{\gamma}{c}R_{\Delta}\right)\right] \exp\left(-j\frac{4\pi}{c}f_c R_{\Delta}\right) \quad (8)$$

在式(8)的基础上进行包络对齐,即补偿掉由于目标平动和转动引起的一维距离像包络位置的变化,得:

$$s_r(f_r, t_m) = A_{xy} T_p a_a(t_m) \cdot \text{sinc}\left[T_p\left(f_r + 2\frac{\gamma}{c}y\right)\right] \exp\left(-j\frac{4\pi}{\lambda}x\omega t_m\right) \exp(\phi(t_m)) \quad (9)$$

其中, $\lambda = \frac{c}{f_c}$ 为发射信号波长, $\phi(t_m)$ 为 t_m 时刻的回波

相位误差,主要来自三方面:(1)由于 MTRC 引入的相位误差;(2)由于激光信号调制技术的限制引入的初相误差;(3)大气扰动对回波相位的影响.如果 $\phi(t_m)$ 可以完全补偿掉,式(9)通过沿方位向傅立叶变换得到:

$$s_r(f_r, f_d) = A_{xy} T_p T_{\text{coh}} \cdot \text{sinc} \left[T_p \left(f_r + 2 \frac{\gamma}{c} y \right) \right] \text{sinc} \left[T_{\text{coh}} \left(f_d - 2 \frac{x\omega}{\lambda} \right) \right] \quad (10)$$

其中 T_{coh} 为相干积累时间, f_d 为多普勒频率.

通过上述推导可知,在理想的情况下,可以通过对 Dechirp 接收的回波进行二维傅里叶变换即可得到目标像.但是由于 MTRC 的存在以及激光调制技术的限制和大气扰动的存在,破坏了回波相位信息,造成了 ISAIL 回波处理中方位向相干积累的失败,严重时造成目标像完全散焦,不能成像.对于包络对齐,精度为距离分辨单元量级的,易于实现.而对于相位误差 $\phi(t_m)$ 的校正,在信噪比低或回波存在缺失的情况下,传统 ISAR 中方法难以实现聚焦良好的目标像.

为在第 3 节引入本文所提算法,此处对式(9)进行分析, $\text{sinc}[\cdot]$ 项表示了距离脉压项;而第二项的指数项代表了即将进行了方位脉压;第三项是回波信号产生及传播过程中引入的相位误差项.如式(10)所示,在没有相位误差项的情况下,对式(9)直接进行方位傅立叶变换即可得到二维目标像,即,对 Dechirp 接收的信号直接进行二维傅立叶变换即得到目标像.因此在进行成像处理前,应对相位误差项进行精确的补偿.

经上述分析,将式(9)表述为如下形式:

$$\mathbf{S} = \mathbf{E} \cdot \mathbf{F} \cdot \mathbf{a} \quad (11)$$

其中, $\mathbf{S} = [s(f_r, 1), s(f_r, 2), s(f_r, 3), \dots, s(f_r, N)]^T$ 为距离脉压后的回波数据矩阵, N 为方位向回波次数, $\mathbf{E} = \text{diag}(e(1), \dots, e(n), \dots, e(N))$ 为相位误差对角矩阵, $e(n)$ ($1 \leq n \leq N$) 为第 n 次回波的相位误差, $\mathbf{F} = [f(1), \dots, f(n), \dots, f(N)]^T$ 为与 \mathbf{S} 具有相同形式的傅立叶变换矩阵, $f(n)$ 为第 n 次回波的相位历程, \mathbf{a} 为成像区域散射点的后向散射系数复向量.

在下一节中,本文将式(11)为基础引入基于 ISAIL 稀疏性的相位校正算法.

3 稀疏相位校正 ISAIL 成像算法

3.1 稀疏相位校正 ISAIL 成像算法

针对 ISAIL 信号在 R-D 域具有稀疏性的特点,根据式(11),有以下稀疏约束优化方程:

$$\min(\|\mathbf{s} - \mathbf{E} \cdot \mathbf{F} \cdot \mathbf{a}\|_2 + \lambda^2 \|\mathbf{a}\|_1) \quad (12)$$

在上式中, $\|\cdot\|_p$ 表示 l_p 模.式(12)正是基于 1 范数稀疏约束的正则化模型,而此模型为基追踪方法(Basis Pursuit)去噪求解的优化问题^[7],此优化问题致力于最

小优化误差,同时使的信号表示最为稀疏,由于本文所提算法基于此模型,因此具有较好的在抗噪性能.

在式(12)中, l_1 模反映了向量 \mathbf{a} 的稀疏性,即只有少数的大值,其余的值为零或很小,表示了 ISAIL 成像的稀疏性. l_2 保证了数据在分辨率上的精度.正则化参数 λ 值与回波噪声水平和目标的稀疏特征有关.稀疏约束优化方程同时考虑到了相位误差校正和特征增强.通常信噪比较低时,选择较大的 λ 以压制噪声,保持 ISAIL 的稀疏性,反之则选择相对较小的 λ .在文献[8]提出了一种 λ 的自适应选择算法,具有较好的效果.对于式(12),若可以忽略相位噪声 \mathbf{E} 的影响,通常可以通过文献[9,10]中压缩感知的方法实现求解,但是由于相位噪声 \mathbf{E} 不可忽略,使得压缩感知的方法不适用.此处借鉴文献[11]中类牛顿的方法解决上述正则化优化问题.式(12)的具体解算过程如下所示.

为避免 l_1 模在原点附近的不可微分问题,此处对 l_1 模平滑近似^[12]:

$$\|z\|_1 \approx \sum_{i=1}^Q (|z_i|^2 + \epsilon)^{1/2} \quad (13)$$

其中, Q 为向量 z 的长度, z_i 为向量 z 的第 i 个元素, ϵ 为非负极小常数.

由式(13)推及到式(12),可得式(12)的近似式为:

$$\min(\|\mathbf{s} - \mathbf{E} \cdot \mathbf{F} \cdot \mathbf{a}\|_2 + \lambda^2 \sum_{i=1}^K (|a(i)|^2 + \delta)^{1/2}) \quad (14)$$

其中, $a(i)$ 成像区域散射点的后向散射系数复向量第 i 个元素.

为简化表示,令 $\mathbf{F}_e = \mathbf{E} \cdot \mathbf{F}$.借鉴文献[13]中的处理方法,首先对式(14)中 $\min(\cdot)$ 括号中的部分求梯度,得:

$$\nabla(a) = \hat{\mathbf{H}}(a) \cdot a - 2\mathbf{F}_e^H \cdot \mathbf{s} \quad (15)$$

$$\hat{\mathbf{H}}(a) = 2\mathbf{F}_e^H \cdot \mathbf{F}_e + \lambda^2 \mathbf{W}(a) \cdot 2\mathbf{F}^H \cdot \mathbf{F} + \lambda^2 \mathbf{W}(a) \quad (16)$$

其中 $[\cdot]^H$ 表示共轭转置, $\mathbf{W}(a) = \text{diag} \left[\frac{1}{(|a(i)| + \delta)^{1/2}} \right]$, $i = 1, 2, \dots, K$, K 为成像区域散射点个数.

通过迭代完成最终的相位校正.对于第 g 次迭代,有:

$$\hat{a}_{g+1} = 2 \cdot [\hat{\mathbf{H}}(\hat{a}_g)]^{-1} \cdot [\mathbf{F}^H \cdot \mathbf{E}_g^H \mathbf{s}] \quad (17)$$

将式(16)带入式(17)得:

$$\hat{a}_{g+1} = \mathbf{h}_g \cdot [\mathbf{F}^H \cdot \mathbf{E}_g^H \cdot \mathbf{s}] \quad (18)$$

其中 $\mathbf{h}_g = \text{diag} \left[\frac{\lambda^2 + 2(|\hat{a}_g(i)|^2 + \delta)^{1/2}}{2(|\hat{a}_g(i)|^2 + \delta)^{1/2}} \right]$, $i = 1, 2, \dots, N$.

在式(18)通过 Hadamard 乘法来替代式(17)中的矩阵乘法运算,提高运算效率.

将相位误差 $\phi(i)$ 的初始值设置为 $\phi_0(i) = 0$, $i = 1, 2, \dots, N$,则对相位误差 $\phi(i)$ 的第 g 次估计可表示为:

$$\hat{e}_{g+1}(i) = \hat{e}_g(i) \exp(j\Delta\phi_g(i)) \quad (19)$$

其中,

$$\exp[j \cdot \Delta \hat{\phi}_{g+1}(i)] = \frac{\hat{\mathbf{a}}_{g+1}^H f(i) \hat{\mathbf{e}}_g^H(i) \mathbf{s}(f_r, i)}{|\hat{\mathbf{a}}_{g+1}^H f(i) \hat{\mathbf{e}}_g^H(i) \mathbf{s}(f_r, i)|} \quad (20)$$

用 IFFT 表示逆傅立叶变换,将快速傅立叶变换引入式(21)可得:

$$\exp[j \cdot \Delta \hat{\phi}_{g+1}(i)] = \frac{\hat{\mathbf{a}}_{g+1}^H \cdot \text{IFFT}[\hat{\mathbf{e}}_g^H(i) \mathbf{s}(f_r, i)]}{|\hat{\mathbf{a}}_{g+1}^H \cdot \text{IFFT}[\hat{\mathbf{e}}_g^H(i) \mathbf{s}(f_r, i)]|} \quad (21)$$

从而提高迭代过程中的运算效率.

在迭代的过程中,当满足 $|\hat{\mathbf{a}}_{g+1} - \hat{\mathbf{a}}_g|_2 / |\hat{\mathbf{a}}_g|_2 \leq \rho$ 时,即可得精确的相位校正结果,从而得到良好聚焦的目标像. 阈值 ρ 为根据实际数据预先设定的一个正值.

3.2 相位校正算法分析

在本文所提算法的实现过程中,正则化参数 λ 值与回波噪声水平和目标的稀疏特征有关,当信噪比较低,目标稀疏性较强时,选择相对较大的 λ 值,可以提高相位校正的准确度,从而获取较好的图像结果;当信噪比较高,或目标稀疏性较弱时,可以适当降低 λ 值,尽可能多的保留目标细节. λ 值的选取直接影响到算法的收敛性,因此,如果要求算法在迭代过程中最终收敛于正确的极值点(或极值区域),应该先对回波予以分析(如通过常规算法利用回波预先成像,并分析信噪比),并根据回波特性选取合适的正则化参数 λ 值,以便在迭代过程中实现收敛.

在实际处理过程中,正则化参数 λ 值的选取并不需要很精确,只要在一个范围内选取,就可以保证 $A = |\hat{\mathbf{a}}_{g+1} - \hat{\mathbf{a}}_g|_2 / |\hat{\mathbf{a}}_g|_2$ 是一个随着迭代次数的增加而逐次下降,并最终达到预先设置的阈值. 在本文第 4 部分的仿真试验中,图 3(j)反映了这个事实.

在进行仿真实验前,先通过简单点目标成像对本文所提算法进行分析. 假设目标是由三个散射点三组成,坐标分别为 $(-0.0025, 0)$ 、 $(0, 0)$ 、 $(0.0025, 0)$,具体仿真参数如表 1 所示.

表 1 仿真实验参数

参数/变量	参数值	参数/变量	参数值
中心波长	$1.55 \times 10^{-6} \text{m}$	点间距	0.025m
发射信号带宽	$500 \times 10^9 \text{Hz}$	转动速度	$6(^{\circ})/\text{s}$
脉冲重复频率	$4 \times 10^4 \text{Hz}$	距离采样点数	610

图 2 为使用不同的相位校正算法的成像结果方位向剖面图. 在图 2(a)中,使用文献[6]中的多特显点综合法相位校正后,沿方位向进行傅里叶变换,得到图 2(a)的结果;图 2(b)为本文所提的成像算法(将相位校正与方位成像同步完成). 通过比较可知本文的成像算法在压制副瓣和抗噪声方面更为出色,在分辨率上,本文所提算法要好与由传统的相位校正算法的得到成像结果.

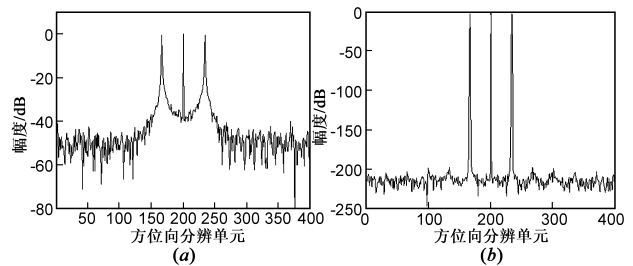


图 2 简单点目标成像结果比较

4 仿真及实测数据结果

4.1 仿真实验

仿真参数如表 2 所示. 在数据产生过程中,通过加入了均匀随机分布于 $[-2\pi, 2\pi]$ 的相位误差模拟由于激光调制技术的限制导致的发射脉冲初始相位的随机变化;通过加入随机相位屏模拟大气扰动对回波信号相位的影响.

表 2 仿真实验参数

参数/变量	参数值	参数/变量	参数值
中心波长	$1.55 \times 10^{-6} \text{m}$	目标尺寸	$0.07 \text{m} \times 0.06 \text{m}$
发射信号带宽	$500 \times 10^9 \text{Hz}$	速度	100m/s
脉冲重复频率	$4 \times 10^4 \text{Hz}$	加速度	$10 \text{m}/\text{s}^2$
相干积累时间	10^{-2}s	偏航角速度	$3(^{\circ})/\text{s}$
大气湍流外尺寸	10m	俯仰角速度	$2(^{\circ})/\text{s}$
大气相干长度	0.1m	横滚角速度	$2(^{\circ})/\text{s}$
相位屏尺寸	1024×1024	距离采样点数	610
回波信噪比	-2dB	方位采样点数	400

图 3(a)为等比例缩小的 Yak42 飞机模型(在不影响仿真性能的前提下,降低仿真试验中的数据量);图 3(b)为在发射信号中加入的随机相位误差;图 3(c)为随机相位屏,用于模拟大气扰动.

图 3(d)~(f)通过仿真对比了低信噪比情况下多特显点综合算法与本文所提算法的成像效果. 其中图 3(d)和图 3(e)为信噪比 $\text{SNR} = -2 \text{dB}$ 时两种成像算法的成像结果,在图 3(d)中,相位校正采用了多特显点综合算法,由于强噪声的干扰,目标像存在较为严重的散焦;图 3(e)为采用本文算法的成像结果,与图 3(d)的结果相比较,目标像有很大的改善. 图 3(f)比较了不同信噪比下两种成像方法所得成像结果熵值的变化,其中黑色曲线对应多特显点综合算法,而红色曲线对应本文所提算法,通过对比可知,利用本文所提相位校正算法可得到熵值更小的目标像,实现更好的成像效果.

图 3(g)~(i)仿真了回波缺失情况下的 ISAIL 成像. 仿真中仅使用了原始仿真数据中随机抽取的 1/3 回波(未加入噪声). 图 3(g)为距离脉压、包络对齐后的结果;图 3(h)与图 3(i)均为文献[14]中基于压缩感知的稀疏孔径成像方法得到的结果,所不同的是在图 3(h)中,相位校正方法使用的是文献[15]中提出的一种适用

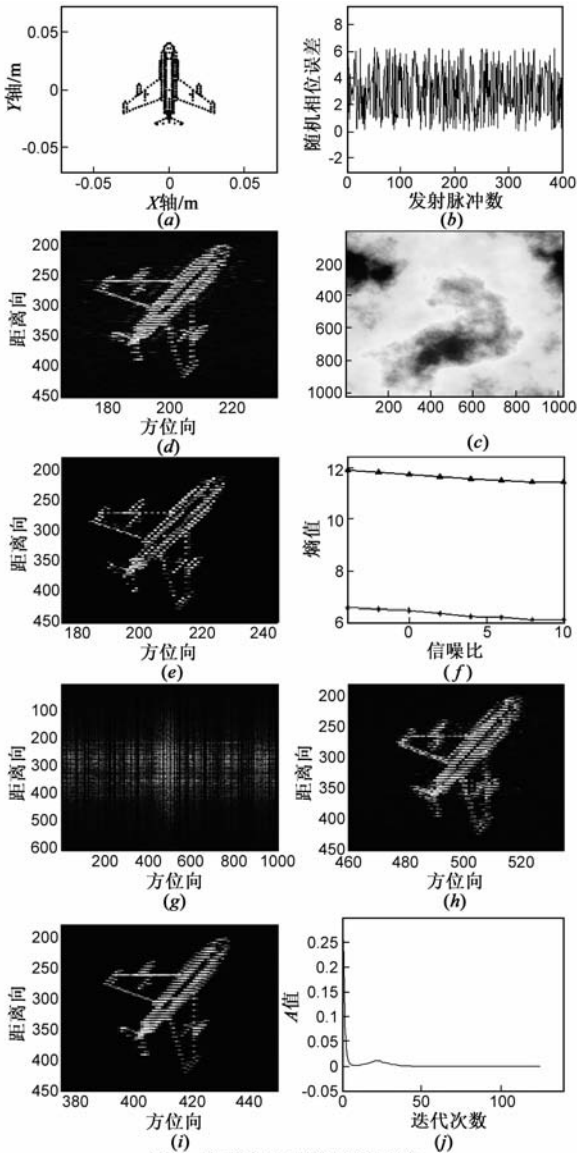


图3 仿真实验成像结果比较

于回波缺失情况的基于多特显点综合的相位校正方法,而图 3(i)使用了本文提出的相位校正方法.通过对比可知,在方位回波存在缺失的情况下,利用本文提出的相位校正方法,可以得到聚焦更好的结果.

图 3(j)反映了 $A = |\hat{\mathbf{a}}_{g+1} - \hat{\mathbf{a}}_g|_2 / |\hat{\mathbf{a}}_g|_2$ 与迭代次数之间的关系,虽然 A 在迭代的过程中有所起伏,但最终还是趋于平稳,达到预定的阈值,符合预先设想.

4.2 室内 ISAIL 验证系统实测数据实验

目前 ISAIL 尚处于室内实验状态,实测数据是通过的式室内 ISAIL 验证系统获得,系统的详细介绍可参考文献[6],实验主要参数如表 3 所示.本文结合实验的实测数据从低信噪比和方位向回波存在缺失两种情况验证了所提算法的有效性.两个子实验分别对应图 4 中的图 4(d)~(f)、(g)~(i).具体分析如下:

表 3 室内 ISAIL 验证系统参数

参数变量	参数值
中心波长	1.47 μm
波长范围	1.42 μm ~ 1.52 μm
波长调谐速度	20nm/s
采样频率	250kHz
转台步进角度	0.00125 $^\circ$
方位向累计角度	$M \times 0.00125^\circ$ (M 为方位向脉冲数)

图 4(a)为 128 次回波距离脉压、包络对齐后的结果,此段数据没有加入噪声;图 4(b)为使用文献[6]中的多特显点综合法得到的目标像;图 4(c)为本文所提算法得到的结果,通过比较可知,在信噪比高、回波不存在缺失的情况下,本文所提算法和文献[5]中所提算法得到的结果没有很大区别,均能得到聚焦良好的结果.

第一个子实验验证本文所提算法的抗噪性能.其中所用数据为在原始 128 次回波数据基础上人为加入高斯白噪声得到的数据,信噪比为 $\text{SNR} = 0\text{dB}$.图 4(d)为距离脉压、包络对齐后的结果.图 4(e)为使用多特显点综合算法得到的成像结果,由于低信噪比的影响,此算法不能估计出正确的相位误差并加以补偿,成像失败;图 5(f)利用了本文所提的相位校正算法,与图 4(e)的成像结果相比,效果明显,而与图 4(c)中未加噪声的数据得到的结果相比,成像效果变化不大.由此可知,本文所提算法具有较好的抗噪性能.

第二个子实验用于验证本文所提算法在方位向回波存在缺失的情况下的相位校正性能,与图 4(a)相比,缺失了 25% 的回波数据.图 4(g)距离脉压、包络对齐后的结果,没有经过相位校正处理;图 4(h)使用了基于文献[15]中提出的适用于方位向回波存在缺失的基于多特显点综合的相位校正方法,并结合了文献[14]中提出的基于压缩感知的稀疏孔径成像算法;图 4(i)使用了本文提出相位校正方法,结合了同样的基于压缩感知的稀疏孔径成像算法;通过两者对比,在方位向回波存在缺失的情况下,本文所提方法相位校正效果更好,可得到聚焦更好的目标像.

5 结论

本文提出一种稀疏相位校正 ISAIL 成像算法并通过仿真和实测数据验证此算法在低信噪比和回波存在缺失两种情况下的相位校正性能.

此算法以 ISAIL 回波信号在 R-D 平面的稀疏性为全局约束条件,通过正则化方法,对回波数据进行相位校正处理.在算法的实现过程中引入了 Hadamard 乘法和快速傅立叶变换,提高运算效率,从而使算法有可能用于实时成像处理.

致谢 感谢李军、刘亚波、徐刚、张双喜博士给本文提出的参考意见.

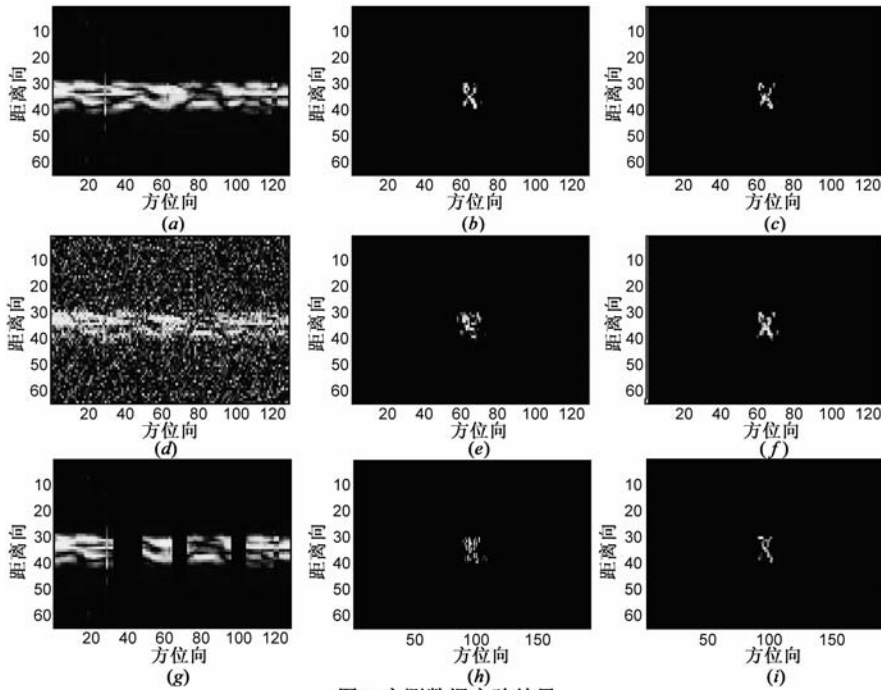


图4 实测数据实验结果

参考文献

- [1] J R Buck, B W Krause, A I R Malm, et al. Synthetic aperture imaging at optical wavelengths[A]. Conference on Lasers and Electro-Optics (CLEO)[C]. Baltimore; IEEE, 2009. 1 - 2.
- [2] 许楠, 刘立人, 鲁伟. 合成孔径激光成像雷达距离向等延时的信号处理结构和算法[J]. 电子学报, 2010, 38(6): 1405 - 1409.
XU Nan, LIU Li-ren, LU Wei. Signal processing construction and algorithm of range equal delay in SAIL[J]. Acta Electronica Sinica, 2010, 38(6): 1405 - 1409. (in Chinese)
- [3] 李亚超. ISAR 目标运动参数估计及成像技术研究[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2008.
- [4] 张焕颖, 张守宏, 李强. 高速运动目标的 ISAR 成像方法[J]. 电子与信息学报, 2007, 29(8): 1789 - 1793.
ZHANG Huan-ying, ZHANG Shou-hong, LI Qiang. ISAR imaging of high speed moving targets[J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2007, 29(8): 1789 - 1793. (in Chinese)
- [5] 汤广富, 朱珍珍, 郑璞, 等. 包络对齐快速实用算法[J]. 数据采集与处理, 2010, 25(1): 93 - 97.
TANG Guang-fu, ZHU Zhen-zhen, ZHENG Pu, et al. Valid and fast algorithm for range alignment[J]. Journal of Data Acquisition & Processing, 2010, 25(1): 93 - 97. (in Chinese)
- [6] 郭亮. 合成孔径成像激光雷达实验与算法研究[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2009.
- [7] Z M Cai, J H Lai. IBP-SVD: a practical method for learning adaptive dictionaries for image de-noising[A]. Proceedings of the 2007 International Conference on Wavelet Analysis and Pattern Recognition[C]. Beijing: IEEE, 2007. 641 - 646.

- [8] Agarwal N, Karl W C. Line detection in images through regularized Hough transform[J]. IEEE Trans Image Processing, 2006, 15(3): 582 - 591.
- [9] Patel V M, Easley G R, Healy D M, et al. Compressed synthetic aperture radar[J]. Selected Topics in Signal Processing, IEEE Journal of 2010, 4(2): 244 - 254.
- [10] 石光明, 刘丹华, 高大化, 等. 压缩感知理论及其研究进展[J]. 电子学报, 37(5): 1070 - 1081.
SHI Guang-ming, LIU Dan-hua, GAO Da-hua, et al. Advances in theory and application of compressed sensing[J]. Acta Electronica Sinica, 37(5): 1070 - 1081. (in Chinese)
- [11] M Cetin, W C Karl. Feature-enhanced synthetic aperture radar image formation based on non-quadratic regularization[J]. IEEE Trans Image Processing, 2001, 10(4): 623 - 631.
- [12] D Geman, G Reynolds. Constrained restoration and the recovery of discontinuities[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 1992, 14(3): 367 - 383.
- [13] M Cetin, Feature-enhanced synthetic aperture radar imaging [D]. USA: Boston University; 2001.
- [14] 李军, 邢孟道, 张磊, 吴顺君. 一种高分辨的稀疏孔径 ISAR 成像方法[J]. 西安电子科技大学学报, 2010, 37(3): 441 - 446, 453.
LI Jun, XING Meng-dao, ZHANG Lei, WU Sun-jun. High resolution imaging method for the sparse aperture of ISAR[J]. Journal of Xidian University, 2010, 37(3): 441 - 446, 453. (in Chinese)
- [15] 王琦. 空间目标 ISAR 成像的研究[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2007.

作者简介



臧博 男, 1983 年生, 博士生, 河北衡水人, 研究方向为合成孔径激光成像雷达系统设计成像算法及合成孔径雷达实时信号处理机设计.
E-mail: zangbotiger@163.com

郭睿 女, 1985 年生, 博士生, 陕西渭南人, 目前主要从事极化 SAR/ISAR 方面的研究工作. E-mail: gr2003@126.com