

逆合成孔径成像激光雷达低信噪比稀疏多孔径成像方法研究

臧博 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 西安 710071)

摘要: 受目标非合作特性的影响, 逆合成孔径成像激光雷达(ISAIL)回波存在缺失; 同时受大气衰减和自然背景光等因素的影响, ISAIL 回波信号信噪比较低, 因此, 常规的稀疏多孔径成像方法不再适用。针对上述问题, 该文提出了一种结合压缩感知(CS)和权矩阵的稀疏多孔径成像方法。首先, 通过基于 CS 的稀疏多孔径成像方法对原始数据处理, 得到目标像的支撑域; 然后, 据此建立权矩阵, 优化采用 CS 重构时的代价函数, 对稀疏多孔径 ISAIL 原始数据进行成像处理, 利用不完整的回波信号获得高分辨目标像。此算法具有较好的抗噪能力。采用室内 ISAIL 系统实测数据验证了算法的有效性。

关键词: 逆合成孔径成像激光雷达(ISAIL); 稀疏孔径; 压缩感知(CS); 权矩阵; 低信噪比

中图分类号: TN958.98

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2010)12-2808-06

DOI: 10.3724/SP.J.1146.2010.00669

Study on Sparse Aperture of Inverse Synthetic Aperture Imaging Ladar with Low SNR

Zang Bo Zhang Lei Tang Yu Xing Meng-dao

(National Lab of Radar Signal Processing, Xidian University, Xi'an 710071, China)

Abstract: The traditional sparse aperture methods are not suitable for signal processing of Inverse Synthetic Aperture Imaging Ladar (ISAIL) for the following reasons. One is the lack of echoes caused by the noncooperation characteristic of the target, the other is the low Signal-to-Noise Ratio (SNR) caused by the influence of atmosphere attenuation and natural background light. For this reason, a novel sparse aperture imaging method is proposed in this paper which combines the Compressed Sensing (CS) with the weighted matrix. Through the preprocessing of CS based imaging, the supporting field of the target can be obtained, with which the weighted matrix can be constructed. Then the cost function is optimized using the weighted matrix. Finally, with this new cost function, the high resolution image can be achieved using the incomplete original echoes from the sparse aperture ISAIL. This new method is robust in front of strong noise. The feasibility and effectiveness of the method are validated by the measured data of the indoor ISAIL system.

Key words: Inverse Synthetic Aperture Imaging Ladar (ISAIL); Sparse aperture; Compressed Sensing (CS); Weighted matrix; Low SNR

1 引言

逆合成孔径成像激光雷达(Inverse Synthetic Aperture Imaging Ladar, ISAIL)结合相干激光技术和逆合成孔径技术, 是一种新型主动遥感探测成像技术^[1]。与传统的激光成像雷达相比, 突破了系统孔径的限制, 2 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。

但是, 与常规微波成像雷达相比, ISAIL 受波长的限制, 视场通常较小; 且目标为非合作目标, 因此在对目标观测的过程中聚焦点往往会偏离模场中心, 降低系统孔径对回波的耦合效率, 造成回波接收性能下降, 甚至无法接收到回波, 从而造成观测时间内的回波数据缺失, 在此借用微波成像雷达中的概念, 称此种情况下的 ISAIL 成像为稀疏多孔径成像^[2]; 另外, 某些情况下, ISAIL 回波信号的信噪比会很低: 首先, 发射信号为激光信号, 受大气衰减、自然背景光的影响较为严重; 其次, 为得到较大的观测视场, ISAIL 望远镜孔径较小, 由相干激光雷达信噪比方程^[3]可知, 望远镜孔径缩小会导致

2010-06-29 收到, 2010-09-16 改回

国家“973”计划项目(2010CB731903)和国家自然科学基金委员会与中国民用航空局联合项目(61001210)资助课题

通信作者: 臧博 zangbotiger@163.com

系统信噪比的下降; 再次, 回波信号的缺失, 导致用于方位积累的信号数量下降, 尤其在回波缺失严重的情况下, 信噪比下降将不可避免。因此在将 ISAIL 技术推向实际应用的过程中, ISAIL 在低信噪比下的稀疏多孔径成像技术值得关注。

在微波雷达中, 对方位稀疏多孔径成像问题的解决方法通常可分为两类: 第1类方法是对缺失的回波进行线性预测估计^[4], 当预测长度较小时, 此方法是有效的, 但当回波缺失过多时, 此类方法将会引入较大的误差, 严重影响成像质量; 第2类方法是结合参数估计的超分辨算法进行稀疏多孔径融合, 其典型算法就是利用全极点模型匹配的方法对稀疏频带孔径进行插值处理^[5], 但是实际的雷达方位向信号是一个具有趋势性的非平稳过程, 因此用参数化的超分辨算法外推并不能体现出原有多稀疏孔径数据的这种趋势性, 有时并不能达到好的成像效果^[6]。另外, 上述算法的一个共同的特点是仅适用于高信噪比的情况, 在低信噪比的情况下, 其稳健性将会下降, 成像效果变差。

针对上述问题, 本文提出了一种结合压缩感知和权矩阵的方位稀疏多孔径成像算法。首先将 ISAIL 方位稀疏多孔径成像问题转换为基于压缩感知的稀疏信号重构问题, 通过优化求解的方法获得低信噪比下的目标像初步结果, 由于强噪声的影响, 此图像会存在诸多虚假点, 通常仅能得到目标的大致轮廓, 成像结果较差, 此时对目标像初步结果通过中值滤波器进行平滑降噪, 获取目标像的支撑域, 并以此为先验信息建立权矩阵, 最后结合权矩阵和压缩感知技术, 对 ISAIL 原始数据进行稀疏重构处理, 获得清晰的目标像。采用室内 ISAIL 验证系统的实测数据验证了本文所提算法的有效性和稳定性。

本文结构如下: 第2节简要介绍了 ISAIL 几何模型和成像原理; 第3节介绍了基于压缩感知的 ISAIL 方位稀疏多孔径成像算法; 第4节通过室内 ISAIL 验证系统实测数据处理结果验证了本文所提算法在低信噪比情况下的有效性; 最后是结束语。

2 ISAIL 几何模型及成像原理

ISAIL 成像过程与微波雷达中的 ISAR 成像类似。相对雷达视线, 目标运动可分解为平动分量和转动分量。平动分量对成像无贡献, 应予以补偿; 而转动分量提供了方位向高分辨必需的多普勒信息。

本文的重点是研究低信噪比下的 ISAIL 稀疏多孔径成像, 因此假定通过文献[6]中的方法已完成对原始数据运动补偿、相位校正处理, 在观测时间 T_a 内

目标以恒定角速度 ω 在 2 维平面转动, ISAIL 转台模型如图 1 所示。

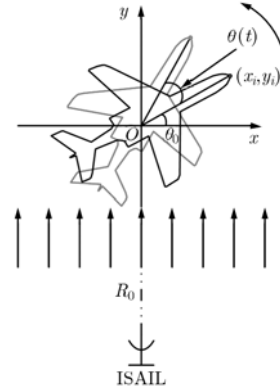


图 1 转台目标成像示意图

ISAIL 通过发射大的时宽带宽积信号实现距离高分辨, 通过合成阵列实现方位高分辨。假设系统发射线形调频信号为

$$s_t(\hat{t}, t_m) = \text{rect}\left[\frac{\hat{t}}{T_p}\right] \exp\left[j2\pi\left(f_c t + \frac{1}{2}\gamma\hat{t}^2\right)\right] \quad (1)$$

其中 $\text{rect}(u) = \begin{cases} 1, & |u| \leq 1/2 \\ 0, & |u| > 1/2 \end{cases}$, f_c 为频率中心, T_p 为脉宽, γ 为调频率, \hat{t} 为快时间, 即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, \hat{t} , t_m 与全时间 t 的关系为 $\hat{t} = t - t_m$ 。

在某距离单元内(距离向坐标为 y)存在 K 个具有不同方位向坐标的散射点, 散射点的散射系数由 $A_i (i = 1, \dots, K)$ 表示, 则此距离单元的回波信号可表示为

$$s_r(\hat{t}, t_m) = \sum_{i=1}^K A_i \cdot \text{rect}\left[\frac{\hat{t} - \frac{2R_i(t_m)}{c}}{T_p}\right] \cdot \exp\left[j2\pi\left\{f_c\left(t - \frac{2R_i(t_m)}{c}\right) + \frac{1}{2}\gamma\left(\hat{t} - \frac{2R_i(t_m)}{c}\right)^2\right\}\right] \quad (2)$$

c 为光速, $R_i(t)$ 为第 i 个散射点在 t_m 时刻到达雷达的瞬时距离, 可表示为

$$\begin{aligned} R_i(t_m) &= \sqrt{R_0^2 + (x_i^2 + y_i^2) - 2R_0\sqrt{x_i^2 + y_i^2} \cos(\theta(t_m) + \theta_0)} \\ &\approx R_0 + y_i + x\omega t_m \end{aligned} \quad (3)$$

其中 R_0 为目标转动中心 O 到雷达的距离, (x_i, y_i) 为

零时刻第 i 个散射点的坐标, θ_0 为零时刻第 i 个散射点和转动中心 O 的连线与 x 轴之间的夹角, $\theta(t_m)$ 为 t_m 时刻目标转过的角度。

ISAIL 采用 Dechirp 接收方式接收回波信号, 设定参考距离为 $R_r = R_0$, 则对 Dechirp 接收后的信号沿距离向快时间域做傅里叶变换, 且经过去斜和补偿剩余视频相位后^[7], 在差频域得到距离脉压后的结果:

$$s_r(f_r, t_m) = \sum_{i=1}^K A_i T_p \operatorname{sinc} \left[T_p \left(f_r + \frac{2\gamma(y_i + x_i \omega t_m)}{c} \right) \right] \cdot \exp \left(-j \frac{4\pi}{c} f_c y_i \right) \exp \left(-j \frac{4\pi}{c} f_c x_i \omega t_m \right) \quad (4)$$

在式(4)中, $(2\gamma x \omega t_m)/c$ 表示由于目标转动引起的包络移动, 在运动补偿、自聚焦中即可补偿掉。忽略式(4)中的常数相位, 沿方位向做傅立叶变换, 得

$$s_r(f_r, f_a) = \sum_{i=1}^K A_i T_p \operatorname{sinc} \left[T_p \left(f_r + \frac{2\gamma y_i}{c} \right) \right] \cdot \operatorname{sinc} \left[T_a \left(f_a + \frac{2}{c} f_c x_i \omega \right) \right] \quad (5)$$

由式(5)可知, ISAIL 的方位向高分辨是通过相干积累得到的。在本文第 1 部分中提到, 由于各种原因回波数据往往存在缺失, 对 ISAIL 成像的影响体现在两方面: (1)用于方位向相干积累的回波数量减少, 信噪比下降, 目标像中虚假点增加, 影响目标像对实际目标的真实反映能力; (2)回波数据的缺失造成方位多普勒信息丢失, 严重时导致方位向不能相干积累, 成像失败。

此时可以通过稀疏孔径成像算法对存在回波缺失的原始数据进行处理, 获得目标像。但是以往的稀疏孔径成像算法是以高信噪比为前提的, 信噪比的下降将大大减弱成像效果。为此, 在本文的后续部分提出了一种结合压缩感知和权矩阵的稀疏孔径成像方法。

3 基于压缩感知的ISAIL稀疏多孔径成像算法

3.1 CS 基本原理

压缩感知是由 Donoho^[8]提出的。以 1 维有限长的离散信号 $\mathbf{x} = \{x_1, x_2, \dots, x_N\} \in \mathbf{R}^N$ 为例, 根据 CS 理论, 如果 \mathbf{x} 在某个域下是 K 稀疏的, 即存在基矩阵 $\Psi = \{\psi_1, \psi_2, \dots, \psi_N\}$, 使得 $\mathbf{x} = \Psi \mathbf{s}$, \mathbf{s} 为对应的系数向量, 其中有 K ($K \ll N$) 个元素非零, 则只需要对 \mathbf{x} 进行 M ($K < M \ll N$) 次测量, 即可对 \mathbf{x} 进行精确重构, 获取 \mathbf{x} 中的完整信息^[9], 而传统理论对信号 \mathbf{x} 重构需要进行 N 次以上的测量。

利用基于正交基的 CS 理论对原始信号 \mathbf{x} 进行观测和恢复的过程如下: 在对原始信号 \mathbf{x} 观测的过程中, 建立线性测量矩阵 $\Phi (M \times N)$, 通过对 \mathbf{x} 进行 M 次观测实现对 \mathbf{x} 的降维处理, 即

$$\mathbf{y} = \Phi \mathbf{x} = \Phi \Psi \mathbf{s} = \Theta \mathbf{s} \quad (6)$$

其中 $\mathbf{y} = \{y_1, y_2, \dots, y_M\} \in \mathbf{R}^M$, 测量矩阵 Φ 的建立不依赖于信号模型, 是非自适应的, 且 Φ 的建立应该令 $\Theta = \Phi \Psi$ 满足 RIP (Restricted Isometry Property) 条件^[10], 即对于任意 T ($|T| \leq K$) 稀疏信号 \mathbf{x}_T , 应满足不等式:

$$(1 - \delta_K) \|\mathbf{x}_T\|_2 \leq \|\Theta \mathbf{x}_T\|_2 \leq (1 + \delta_K) \|\mathbf{x}_T\|_2, \quad \mathbf{x}_T \in \mathbf{R}^N, \quad |T| \leq K \quad (7)$$

其中 $\delta_k \in (0, 1)$ 。一般选择高斯白噪声矩阵或贝叶斯矩阵作为测量矩阵。

式(6)是一个病态问题, 为从测量信号 \mathbf{y} 大概率恢复原始信号 \mathbf{x} 或 \mathbf{x} 在空间 Ψ 下的等价向量 \mathbf{s} , 测量次数 M 应满足不等式^[11]:

$$M > cK \log(N/K) \leq N \quad (8)$$

Donoho 提出利用最优化方法重构原始信号, 可以得到接近最优化的系数向量 $\hat{\mathbf{s}}$, 建立求解方程如下:

$$\min \lambda \|\hat{\mathbf{s}}\|_1, \quad \text{s.t.} \|\mathbf{y} - \Theta \hat{\mathbf{s}}\|_2 < \varepsilon \quad (9)$$

其中 $\|\cdot\|_1$ 表示范数 1。求解式(8)属于基匹配问题, 通常采用凸优化的方法或效率较高的贪婪算法实现, 如正交匹配追踪算法 (Orthogonal Matching Pursuit, OMP)^[12]。

3.2 基于压缩感知的ISAIL稀疏多孔径成像算法

类似于 ISAR 成像, 由式(5)可知 ISAIL 目标像也呈现于距离-多普勒平面, 且目标像仅占成像平面的一部分, 因此 ISAIL 回波信号在距离-多普勒域为稀疏信号^[13], 可以利用 CS 对 ISAIL 稀疏多孔径数据处理得到目标像。

ISAIL 图像反映的是距离-多普勒平面中强散射点位置及其回波强度信息, 而目标上的弱散射点在回波中的贡献相对很小, 可视为噪声处理。仅考虑一个距离单元的情况, 假设已完成运动补偿、自聚焦处理, 并忽略常数相位, 式(4)可改写为

$$s_r(f_r, t_m) = \sum_{i=1}^K A_i T_p \operatorname{sinc} \left[T_p \left(f_r + \frac{2\gamma y_i}{c} \right) \right] \cdot \exp \left(-j \frac{4\pi}{c} f_c x_i \omega t_m \right) + \sigma(t_m) \quad (10)$$

此处 K 表示的距离单元中强散射点的个数, $f_d(i) = (2x_i \omega c)/f_c$ 为多普勒频率, $\sigma(t_m)$ 为由弱散射点回波及其他噪声构成的加性噪声。

在 ISAIL 成像平面内, 目标上的散射点与噪声的

不同主要在于幅度的不同, 目标的散射点通常集中在某个或某几个分辨单元内, 具有较强的幅值; 而噪声通常是均匀地分散在整个成像平面内, 且幅值较小。因此, 如果知道目标像在成像平面内的支撑域, 就可以以此为依据, 构造权矩阵, 在 ISAIL 成像的过程中, 结合权矩阵, 降低噪声对 ISAIL 目标像的影响, 提高成像算法的性能。而在 ISAIL 中, 目标信息是非先验信息, 且目标具有是非合作性, 因此目标像的支撑域是未知的, 为得到目标的支撑域, 从而建立权矩阵, 可对原始的低信噪比回波数据初步成像处理, 得到低信噪比的目标像, 并以此目标的先验信息, 确定目标像在成像平面内的位置和支撑域, 为后续的建立权矩阵, 得到清晰目标像提供基础。

通过上述分析, 当回波存在缺失, 式(10)中的部分多普勒信息丢失时, ISAIL 成像过程如下:

步骤1 确定原始数据中每次回波在时间轴上的位置, 构造与原始回波数据对应的缺失基空间。假设原始回波情况如图 2 所示, 阴影部分表示存在回波, 空白区表示回波缺失。定义方位向时间分辨率和多普勒频率分辨率为 Δt 和 Δf_d , 假设系统脉冲重复频率 (Pulse Recurrence Frequency, PRF) 为 f_{prf} , 多普勒频率为 $f_d = [1:N] \cdot \Delta f_d$, N 为回波不缺失时应该存在的回波数, 方位向时间序列为 $t = [1:a b:c d:e f:N] \cdot \Delta t$, $\Delta t = 1/f_{prf}$, 构造傅里叶基 Ψ :

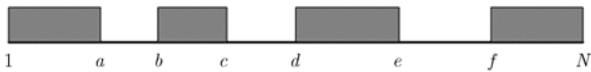


图 2 回波缺失示意图

$$\Psi = \{\psi_1, \psi_2, \dots, \psi_N\} \quad (11)$$

其中

$$\psi_q(t) = \exp[-j2\pi \cdot f_d(q) \cdot t], \quad q = 1, 2, \dots, N \quad (12)$$

步骤2 构造与原始数据相对应的测量矩阵, 本文中采用高斯白噪声矩阵作为测量矩阵, 矩阵大小为 $M \times N$, 其中 M 为由于存在回波缺失时的回波数量。

步骤3 对运动补偿后的数据在方位向做基于范数1的凸优化处理, 进行基匹配搜索, 由于存在噪声影响, 将式(9)改写为

$$\min \|s'\|_1, \quad \text{s.t.} \|\Phi s_r - \Phi \Psi s'\|_2 \leq \varepsilon \quad (13)$$

得到低信噪比目标像, 由于强噪声干扰, 其中存在大量虚假点, 不能真实反映地目标, 但却足以确定目标像在成像平面内的位置及支撑域。

步骤4 对步骤3中得到的初步目标像通过中值滤波器降噪平滑处理, 确定目标像的支撑域 S , 以此为根据, 建立权矩阵 W :

$$w_{ij} = \begin{cases} \frac{1}{s_{ij}}, & s_{ij} \neq 0 \\ +\infty, & s_{ij} = 0 \end{cases} \quad (14)$$

其中 s_{ij} , w_{ij} 分别为支撑域 S 和权矩阵 W 第 i 行、第 j 列对应的矩阵元素。

步骤5 对运动补偿后的数据进行基于压缩感知的方位重构处理, 不同于步骤3, 此步中通过权矩阵 W 改善基于压缩感知的成像算法在成像过程中对目标像的重构性能并压低噪声对目标像的影响。即, 将式(13)改写为

$$\min \|W s'\|_1, \quad \text{s.t.} \|\Phi s_r - \Phi \Psi s'\|_2 \leq \varepsilon \quad (15)$$

对式(5)通过凸优化求解或效率较高的贪婪算法求解, 即可得到清晰的目标像。

通过上述5个步骤在低信噪比的情况下得到的清晰的 ISAIL 目标像, 算法的具体流程图如图3所示。

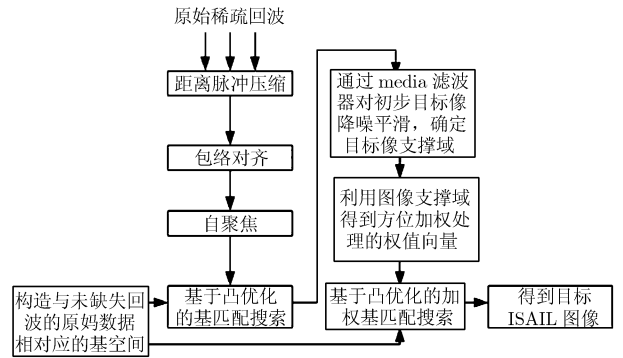


图 3 基于压缩感知的 ISAIL 稀疏多孔径成像算法流程图

4 实测数据处理结果

目前 ISAIL 尚处于室内实验状态, 本文结合实验的实测数据对基于压缩感知的 ISAIL 稀疏多孔径成像算法予以验证。

限于篇幅, 本文仅介绍实验系统部分参数, 其详细介绍可参考文献[14], 系统主要参数如表 1 所示。

为构造低信噪比、稀疏多孔径数据, 对原始数据加入高斯白噪声, 并从 128 次连续回波中随机抽取一定数量的回波作为实验数据。

为验证回波缺失和回波信噪比对成像结果的影响, 实验分 3 组进行, 具体如图4所示: 图4(a)-图4(d)为第1组实验, 从原始数据中随机抽取 64 次回波作为实验数据, 此时数据距离脉冲压缩后的信噪比 $\text{SNR} = 8 \text{ dB}$; 图4(e)-图4(h)为第2组实验, 采用与

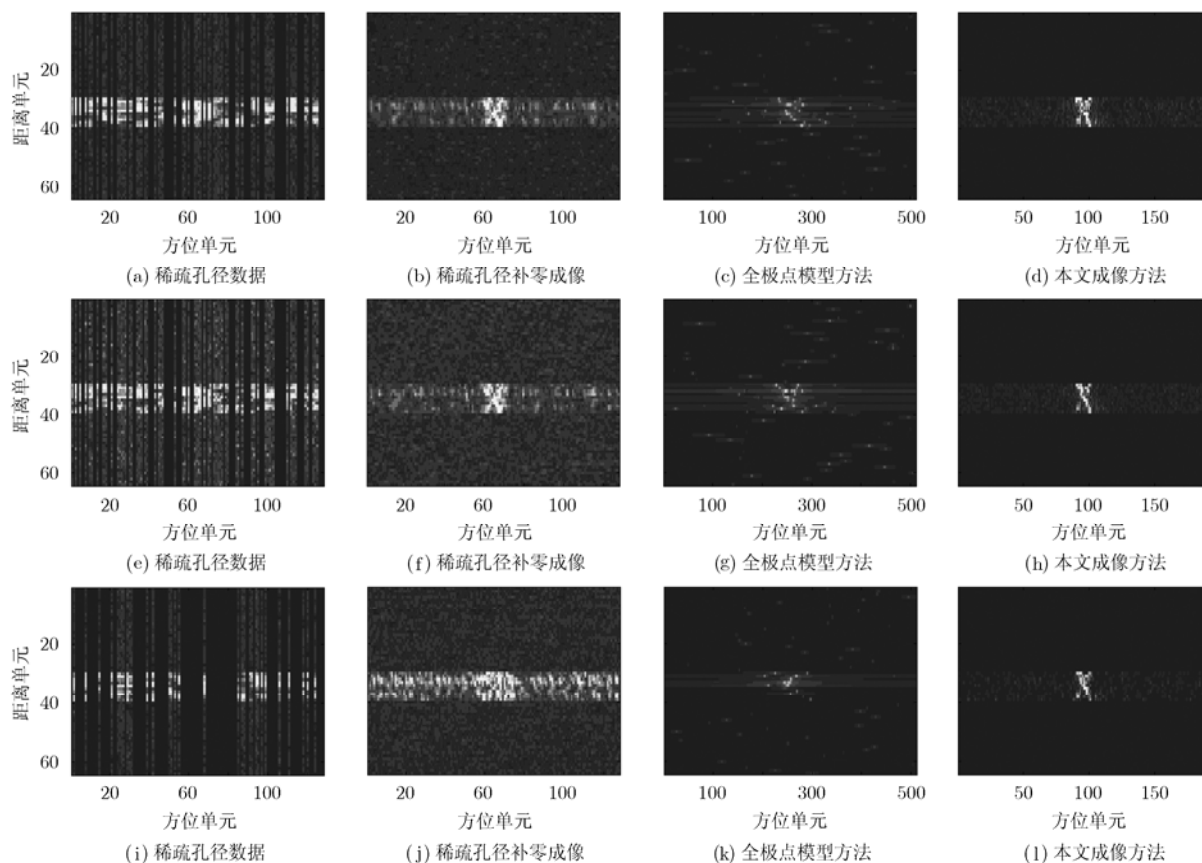


图4 室内ISAIL验证系统稀疏数据处理结果

表1 实验参数设置

参数变量	参数值
中心波长	1.47 μm
波长范围	1.42 ~ 1.52 μm
波长调谐速度	20 nm/s
采样频率	250 kHz
转台步进角度	0.00125°
方位向累计角度	$M \times 0.00125^\circ$ ($M = 128$ 为方位向脉冲数)

第1组试验相同的数据,不同的是此时数据距离脉冲压缩后的信噪比降为 $\text{SNR} = 2$ dB;图4(i)-图4(l)为第3组实验,从原始数据中随机抽取32次回波作为实验数据,数据距离脉压后的信噪比与第1组实验相同,为 $\text{SNR} = 8$ dB。

对比图4中的3组实验结果,有以下结论:首先,3组实验中全极点模型的方法成像结果是失败的,原始归结为全极点模型的方法本质上是利用参数化模型的超分辨算法进行稀疏孔径融合,由于利用信号本身估计参数,而ISAIL的实测数据在方位向是一个趋势性的非平稳过程,与模型区别很大,因此成像失败;其次,通过比较图4(b),4(d),4(f),4(h)

可知,在方位向数据缺失度相同的情况下,本文提出的方法要比稀疏孔径补零的方法具有更好的抗噪声能力,对噪声更加不敏感;最后,比较图4(b),4(d),4(j),4(l),在相同的信噪比下,当稀疏孔径数据只有原始数据的25%时,稀疏孔径补零的方法已经失效,方位向上出现严重的重影,而本文成像方法的成像结果图4(l)与图4(d)相比,处理图像的信噪比略有下降外,并无太大区别,说明,本文提出的方法在方位回波确实严重的情况下,成像效果依然良好。

为了更进一步说明信噪比、回波缺失度对本文提出的成像的影响,本文以图像的峰值信噪比PSNR作为目标像的评判准则,对上述两种方法比较(全极点模型的方法失效,因此不作比较),其准则定义为

$$P_{\text{PSNR}} = 10 \times \lg \left(\frac{255^2}{E_{\text{MSE}}} \right) \quad (16)$$

其中 E_{MSE} 为当前图像与标准图像(即回波无缺失、为加入噪声的全孔径成像结果,如图5所示)的最小均方误差。

图6(a)画出了不同回波缺失度下成像结果的PSNR, $\text{—}\circ\text{—}$ 为方位回波不同缺失程度对本文所提

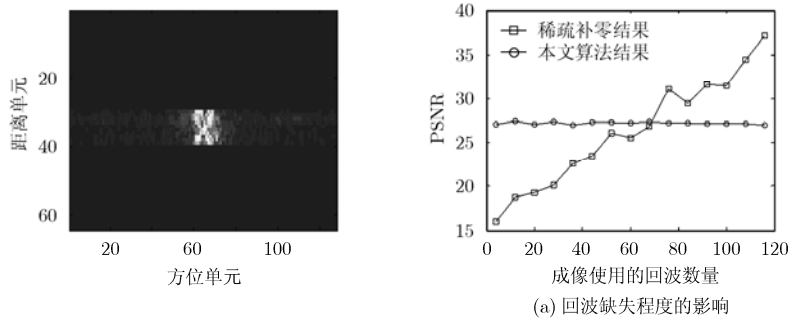


图5 原始数据全孔径成像结果

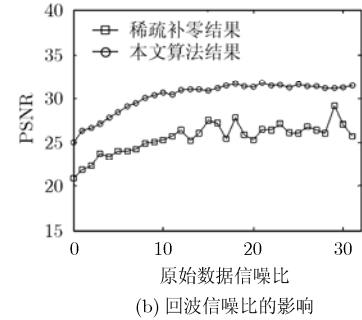


图6 信噪比、回波缺失度对成像的影响

算法成像结果影响, —□—为对传统稀疏孔径补零成像的影响; 图6(b)画出了数据缺失度相同、信噪比不同的情况下的成像结果PSNR, —○—为不同信噪比本文所提算法成像结果影响, —□—为对传统稀疏孔径补零成像的影响。

通过比较可知, 在回波缺失度变化时, 本文所提算法成像结果的PSNR变化较平稳; 而传统的稀疏补零算法成像结果的PSNR变化剧烈, 当回波缺失度低于50% (即图中用于成像的回波数少于64) 时, 其PSNR要低于本文所提算法。为比较回波缺失度相同、信噪比不同的情况下的成像结果PSNR, 本文以图6(a)为依据, 选择回波缺失度为50%、回波缺失度对两种算法影响相同的情况, 由图6(b)可知, 此情况下, 本文所提成像算法具有更好的抗噪声干扰能力。

5 结束语

由于ISAIL系统视场较小、目标具有非合作特性, 在实际中往往存在回波缺失的情况, 且由于大气衰减、自然背景光干扰等原因, 回波的信噪比较低。基于上述原因, 本文提出了一种结合压缩感知和权矩阵的稀疏成像新算法, 此算法具有良好的抗噪性能。室内ISAIL系统实测数据验证了此算法的有效性。

本文所提算法在每个距离单元处理的过程中据需要两次优化求解, 因此计算量较大, 在后续研究中, 将针对此缺陷进行算法优化, 降低运算量, 满足实时处理要求。

参考文献

- [1] Buck J R, Krause B W, and Malm A I R, *et al.* Synthetic Aperture Imaging at Optical Wavelengths [C]. CLEO/QELS 2009. Baltimore, MD. 2009: 1-2.
- [2] Gupta I J, Beals M J, and Moghaddar A. Data extrapolation for high resolution radar imaging. *IEEE Transaction on Antennas and Propagation*, 1994, 42(11): 1540-1545.
- [3] 戴永江. 激光雷达原理[M]. 北京: 国防工业出版社, 2002: 16-30.
- [4] Larsson E G and Liu G. High-resolution SAR imaging with angular diversity. *IEEE Transaction on Aerospace and Electronic Systems*, 2001, 37(4): 1359-1372.
- [5] Cuomo K M, Piou J E, and Mayhan J T. Ultrawide-band coherent processing. *IEEE Transaction on Antennas and Propagation*, 1999, 47(6): 1094-1107.
- [6] 王琦. 空间目标ISAR 成像的研究[D]. [博士学位论文], 西安电子科技大学, 2007, 10.
- [7] 保铮, 邢孟道, 王彤. 雷达成像技术[M]. 北京: 电子工业出版社, 2005: 25-29.
- [8] Donoho D L. Compressed sensing [J]. *IEEE Transaction on Information Theory*, 2006, 52(4): 1289-1306.
- [9] Haupt J D. New theory and methods in adaptive and compressive sampling for sparse discovery [D]. [Ph.D. dissertation], University of Wisconsin-Madison, 2009.
- [10] Candès E, Romberg J, and Tao T. Robust uncertainty principles: exact signal reconstruction from highly incomplete frequency information [J]. *IEEE Transaction on Information Theory*, 2006, 52(2): 489-509.
- [11] Candès E and Tao T. Near-optimal signal recovery from random projections: universal encoding strategies [J]. *IEEE Transaction on Information Theory*, 2006, 52(12): 5406-5425.
- [12] 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.
- [13] Li Jun, Xing Meng-dao, Zhang Lei, and Wu Sun-jun. High resolution imaging method for the sparse aperture of ISAR [J]. *Journal of Xidian University*, 2010, 37(3):441-446, 453.
- [14] Zhang Lei, Xing Meng-dao, and Qiu Chen-wei. Achieving higher resolution ISAR imaging with limited pulses via compressed sampling[J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2009, 6(3): 567-571.
- [14] 郭亮. 合成孔径成像激光雷达实验与算法研究. [博士学位论文], 西安电子科技大学, 2009, 12.

- 臧博: 男, 1983年生, 博士生, 研究方向为合成孔径成像激光雷达系统设计、成像算法以及成像雷达实时处理机设计。
- 张磊: 男, 1984年生, 博士生, 研究方向为合成孔径成像雷达算法及成像雷达实时处理机设计。
- 唐禹: 男, 1976年生, 副教授, 硕士生导师, 研究方向为合成孔径成像雷达、合成孔径成像激光雷达及穿墙雷达系统设计和成像算法。
- 邢孟道: 男, 1975年生, 教授, 博士生导师, 研究方向为各种成像雷达成像算法及实时系统设计。