

一种稀疏孔径下大尺寸目标的 ISAR 成像方法

仲利华^{*①②③} 胡东辉^{①②} 丁赤飏^{①②} 张问一^{①②③}

^①(中国科学院空间信息处理与应用系统技术重点实验室 北京 100190)

^②(中国科学院电子学研究所 北京 100190)

^③(中国科学院研究生院 北京 100039)

摘要: 针对稀疏孔径下的大尺寸目标 ISAR 成像, 该文提出了一种新的成像方法, 该方法在距离频域进行方位向压缩, 避免了散射点越距离单元徙动的影响; 引入压缩感知替代 FFT 对稀疏孔径数据进行方位压缩, 通过构造随距离频率变化的基空间, 消除了距离频率和方位时间之间的耦合, 同时降低了方位向的峰值旁瓣比, 获得了清晰的目标图像。计算机仿真结果验证了该算法的有效性。

关键词: 越距离单元徙动; 峰值旁瓣比; 压缩感知; 稀疏孔径; 逆合成孔径雷达

中图分类号: TN957.52

文献标识码: A

文章编号: 2095-283X(2012)03-0292-09

DOI: 10.3724/SP.J.1300.2012.20033

ISAR Sparse Aperture Imaging Algorithm for Large Size Target

Zhong Li-hua^{①②③} Hu Dong-hui^{①②} Ding Chi-biao^{①②} Zhang Wen-yi^{①②③}

^①(Key Laboratory of Spatial Information Processing and Application System Technology,

Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

^②(Institute of Electronics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

^③(Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China)

Abstract: A novel algorithm for larger size target imaging in sparse aperture is presented in this paper for Inverse Synthetic Aperture Radar (ISAR). In the proposed method, azimuth compressing is done in the range frequency domain to avoid Migration Through Range Cell (MTRC), and Compress Sensing (CS) is introduced to take place of FFT to reduce the Peak Side Lobe Ratio (PSLR), meanwhile a basis matrix changing with the range frequency is constructed to eliminate the coupling between range frequency and azimuth time. Simulation results validate the feasibility of the approach.

Key words: Migration Through Range Cell (MTRC); Peak Side Lobe Ratio (PSLR); Compress Sensing (CS); Sparse aperture; Inverse Synthetic Aperture Radar (ISAR)

1 引言

逆合成孔径雷达(Inverse Synthetic Aperture Radar, ISAR)是对运动目标成像的有效手段。通过 ISAR 成像可以实现目标后向散射截面积(Radar Cross Section, RCS)及几何形状的测量, 为目标识别提供依据。因此 ISAR 在空中交通管理、太空探测以及国防等领域有着重要的应用^[1,2]。然而, 由于 ISAR 通常是对非合作目标进行成像, 无法确保对目标的连续观测, 当目标跟踪丢失时, 造成方位向稀疏观测, 给成像处理带来不便。另外, 随着分辨

率的提高以及所观测目标尺寸的增大, 散射点的越距离单元徙动(Migration Through Range Cell, MTRC)现象将更加严重并导致图像质量下降。因此, 研究稀疏孔径下大尺寸目标成像方法, 在方位向不连续观测的情况下实现 MTRC 校正, 对获得目标清晰的 ISAR 图像具有重要的意义。

目前, 已有很多学者对方位向稀疏孔径下的 ISAR 成像展开了研究。国外学者 Li H J 和 Farhat N H 等人提出了基于谱估计的插值方法恢复缺失的孔径数据后进行成像^[3]; 国内, 西电张磊等人引入了压缩感知理论代替方位向 FFT 获得高分辨率 ISAR 图像^[4]。然而, 上述研究均针对小尺寸目标开展, 并未考虑当目标尺寸增大后, 目标边缘散射点出现 MTRC 后对成像的影响。另一方面, 对 ISAR

2012-05-10 收到, 2012-08-13 改回; 2012-08-23 网络优先出版

国家自然科学基金(60972149)资助课题

*通信作者: 仲利华 zlhbuuaa@163.com

成像中 MTRC 校正的研究虽然也有大量的成果，如 Keystone 变换和极坐标格式法^[5]，但均是在方位向连续观测情况下获得的，由于需要沿方位向进行插值，当方位向采样不连续时，受插值精度的限制无法准确校正。综上所述，根据已公开的研究成果，方位向稀疏孔径成像和大尺寸目标的 MTRC 校正之间形成了一对矛盾。为了校正 MTRC，需要方位向连续观测，然而，在稀疏孔径下，为了通过数据恢复方法获得全孔径数据，又需要散射点不发生 MTRC。目前，在稀疏孔径下有效实现大尺寸目标 MTRC 校正的方法还未见报道。

在传统的 ISAR 处理流程中，方位压缩位于距离压缩之后。然而由于同一散射点在不同方位时刻并不处于相同距离门内，将导致方位向有效积累时间变短，分辨率下降，同时对周围散射点造成影响。如果在距离压缩之前或距离压缩后的变换域进行方位压缩，将可以有效避免 MTRC 的影响。本文在距离频域进行方位压缩，此时，散射点在各个方位时刻的脉冲中不再是聚集起来的尖峰，而是均匀弥散在整个距离频域，在各个距离频率完成方位压缩后经逆傅里叶变换至距离时域，即实现了目标的 2 维压缩。为了实现对方位向稀疏孔径的处理，本文引入压缩感知理论。针对在距离频域进行方位压缩时，目标压缩后方位位置受距离频率调制的现象，构建了一组随距离频率变化的基空间和线性预测矩阵，解决了距离-方位耦合的影响。仿真结果表明，本文方法可以较好的实现稀疏孔径下的 MTRC 校正，获得大尺寸目标清晰的 ISAR 图像。

本文以下各节安排如下：第 2 节从 ISAR 信号模型出发，研究了大尺寸目标 MTRC 产生原因，并讨论了传统 MTRC 校正方法在方位向稀疏孔径下的局限性；第 3 节提出了在距离频域中引入压缩感知理论进行方位压缩的成像算法；第 4 节对所提方法进行了数值仿真试验，并与传统方法进行了对比，通过视觉对比与点目标指标评价，验证了本文方法的正确性；最后第 5 节对全文进行了总结。

2 稀疏孔径下越距离单元徙动分析

2.1 越距离单元徙动分析

本节从 ISAR 运动模型出发，分析 MTRC 产生的原因。由于 ISAR 的观测对象多为非合作目标，因此无法准确获得目标的运动信息以进行运动补偿。ISAR 成像算法通常利用相邻回波之间相关性较强这一条件进行运动补偿。经运动补偿后的 ISAR 成像模型可等效为转台模型，如图 1 所示。

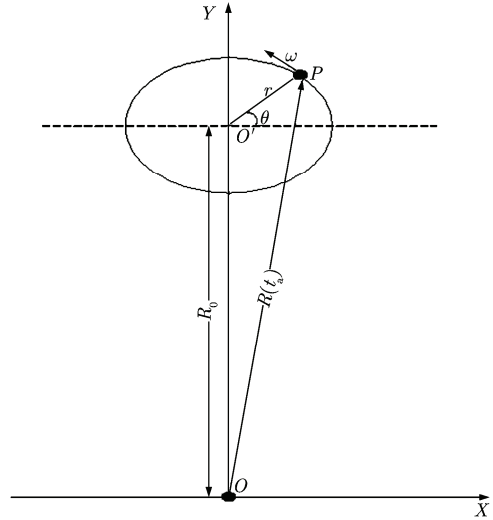


图 1 ISAR 成像几何

雷达放置于坐标原点 O ，转台中心 O' 与雷达距离为 R_0 ， P 为转台上距 O' 为 r 的一点，初始相角为 θ 。转台以角速度 ω 围绕 O' 点逆时针旋转。由于 $R_0 \gg r$ ，可得在任意方位时刻 t_a 时 P 点距雷达的瞬时距离 $R(t_a)$ 如下：

$$R(t_a) = \sqrt{R_0^2 + r^2 + 2R_0r \sin(\theta + \omega t_a)} \approx R_0 + r \sin(\theta + \omega t_a) \quad (1)$$

则在任意时刻， P 点和 O' 点到原点的距离差为

$$\Delta r = R(t_a) - R_0 = r \sin(\theta + \omega t_a) \quad (2)$$

ISAR 成像中进行整体运动补偿含有如下假设：组成目标的不同散射点之间距离历程空变性可以忽略，即需满足

$$\Delta r = r \sin(\theta + \omega t_a) < \rho_r \quad (3)$$

即 Δr 小于距离向分辨单元 ρ_r 。由式(3)知，这一假设在目标尺寸较小、分辨率较低的情况下可以得到满足，然而随着目标尺寸的增大以及分辨率的提升，在完成了散射点间距离包络的整体对齐之后，目标边缘的散射点仍然可能存在大于一个距离分辨单元的徙动，当 Δr 大于 ρ_r 时， P 点将会出现 MTRC。

文献[5]对式(3)进行分析得出不产生 MTRC 的最大尺寸为

$$r \leq 2\rho_a^2 / \lambda \quad (4)$$

其中 ρ_a 为方位向分辨率，通常取 $\rho_a = \rho_r$ 。 λ 为发射信号载频。设距离向和方位向分辨率均为 0.5 m，波长 0.03 m，则不发生 MTRC 的最大尺寸为 16.7 m，而大型运输机，客机的机身长度和翼展可以达到接近百米的量级，空间站更是达到几百米的量级，所以对此类大型目标进行高分辨率成像时不可避免的会产生 MTRC。

2.2 稀疏孔径下传统 MTRC 校正方法存在的问题分析

导致方位向稀疏孔径的原因有多种,为了获得方位向高分辨率,ISAR 需要在一定的相干积累时间内对目标进行观测。然而在观测时间内,为了减少采样数据以降低存储,或者由于跟踪失败而导致的方位向不连续观测都会使得观测数据稀疏化。图 2 给出了方位向稀疏观测示意图,在整个积累时间内,只在某些时刻随机的对目标进行观测,相邻两次观测在方位时间上可能间隔很长。

传统的 MTRC 校正方法主要有两种,极坐标格式法和 Keystone 变换法。两种方法均需要沿方位向进行插值,然而,根据采样定理,只有当在方位向采用较高的脉冲重复频率时,才可以准确的进行插值。然而,当方位向稀疏观测时,由于插值结果的准确性对插值点附近的若干点依赖性较强,所以当方位向稀疏度较高时,插值精度将会下降,无法准确校正 MTRC。此外,对于大尺寸目标,由于 MTRC 的存在,散射点在不同方位时刻并不位于同一距离门内,也将降低沿方位向插值的精度。

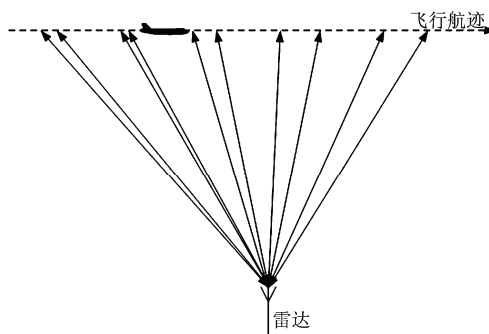


图 2 方位向稀疏孔径示意图

图 3 给出了图 2 所示的稀疏孔径形式下分别采用 Keystone 变换法和极坐标格式法进行校正的仿真结果。仿真数据波长为 0.03 m,距离方位分辨率均为 0.5 m,则理论上不发生 MTRC 的最大尺寸为 16.7 m。仿真中设 4 个点目标距参考点方位位置都为 50 m,将会出现较严重的 MTRC 现象。从 600 个连续脉冲中随机抽取 64 个脉冲构成方位向稀疏孔径数据,分别采用 Keystone 变换和极坐标格式法进行校正。

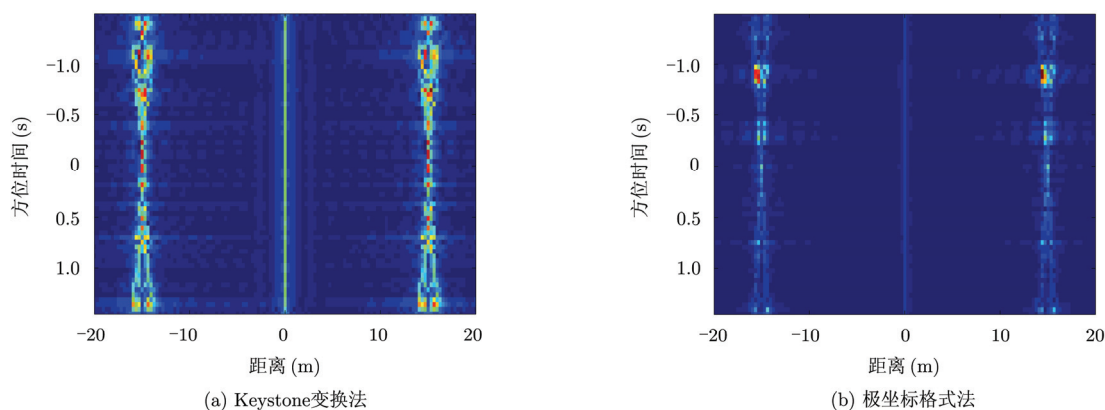


图 3 传统 MTRC 校正方法对比

通过仿真试验可以证实,受插值精度的限制,方位向稀疏孔径数据直接采用传统的 MTRC 校正方法不再有效。

此外,图 4 给出了图 3 中参考点方位压缩结果。由图 4 可见,在稀疏孔径下,直接采用传统的傅里叶变换法进行方位压缩将会导致图像峰值旁瓣比变差,影响成像质量。因此,亟需研究针对稀疏孔径下大尺寸目标的成像算法。

3 基于压缩感知的大尺寸目标成像方法

根据第 2 节的分析,传统 MTRC 校正方法不再适用于稀疏孔径下的大尺寸目标成像,主要原因是传统的 MTRC 校正方法和稀疏孔径信号处理方

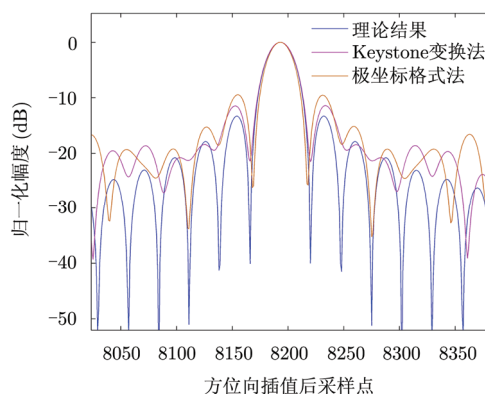


图 4 稀疏孔径下点目标方位压缩示意图

法之间形成矛盾。为此，本节引入压缩感知理论^[6] (Compress Sensing, CS)在距离频域进行方位压缩以避免 MTRC 的影响，为了解决在距离频域进行方位压缩时方位位置受距离频率调制的问题，构建了一组随距离频率变化的基空间和线性预测矩阵，解决了距离-方位耦合的影响。3.1 节对压缩感知理论进行简要介绍，3.2 节给出本文方法的理论推导和处理流程。

3.1 压缩感知理论基础

压缩感知理论是新近诞生的一种信号处理理论，文献[4]将其引入到雷达成像，文献[7]对其在雷达成像中的应用进行了系统分析，在这里，就与本文相关的基本理论进行简要说明。

针对稀疏信号，当信号满足一定的限制条件时^[8]，它突破了奈奎斯特采样定理的限制，在低于奈奎斯特采样率的条件下也可近乎完全的重构信号。能够采用压缩感知处理的前提是信号具有稀疏性。对于某一信号 $\mathbf{S} \in \mathbb{C}^N$ ，在某组基函数 $\Phi = [\phi_1 \ \phi_2 \ \cdots \ \phi_N]$ 下有如下表示：

$$\mathbf{S} = [\phi_1 \ \phi_2 \ \cdots \ \phi_N] \begin{bmatrix} x_1 \\ \vdots \\ x_N \end{bmatrix} \quad (5)$$

$\mathbf{X} = [x_1 \ \cdots \ x_N]$ 是 \mathbf{S} 在基函数 Φ 下的加权系数向量，当 \mathbf{X} 中非零系数的个数 $K \ll N$ 时，则称信号 \mathbf{S} 为 K 稀疏。

构造维数为 M 的测量矩阵 $\mathbf{A} \in \mathbb{C}^{M \times N}$ 对信号 \mathbf{S} 进行观测得

$$\mathbf{Y} = \mathbf{A}\mathbf{S} = \mathbf{A}\Phi\mathbf{X} = \Psi\mathbf{X} \quad (6)$$

$\Psi = \mathbf{A}\Phi$ 称为观测矩阵。对于一般的信号重构问题，即已知某一观测矩阵 $\Psi_{M \times N}$ ($M \ll N$) 和某未知信号 \mathbf{X} 在该组测量矩阵下的线性测量值 $\mathbf{Y} = \Psi_{M \times N}\mathbf{X}_{N \times 1}$ ，当由 \mathbf{Y} 重构 \mathbf{X} 时，由于 \mathbf{Y} 的维数远小于 \mathbf{X} 的维数，所以会存在无穷多解，无法准确重构 \mathbf{X} 。但是如果 Ψ 满足 RIP 准则^[9] (Restricted Isometric Property)，则可以通过求解如下优化问题找到其最稀疏解：

$$\hat{\mathbf{X}} = \arg \min \|\mathbf{X}\|_0, \quad \text{s.t. } \Psi\mathbf{X} = \mathbf{Y} \quad (7)$$

由于 l_0 优化不是凸优化问题，上述问题可以转化为 l_1 优化问题对 \mathbf{X} 进行精确重构。

$$\hat{\mathbf{X}} = \arg \min \|\mathbf{X}\|_1, \quad \text{s.t. } \|\Psi\mathbf{X} - \mathbf{Y}\|_2 \leq \varepsilon \quad (8)$$

3.2 算法推导与处理流程

采用压缩感知求解问题的关键是获得待求解变量在某组基空间下的稀疏表示。为此，从 ISAR 信号模型出发，构建基空间。

进一步对式(1)进行分析，运动补偿后目标的距离历程可写成式(9)所示形式：

$$\begin{aligned} R(t_a) &\approx R_0 + r \sin(\theta + \omega t_a) \\ &\approx R_0 + r \sin(\theta) \cos(\omega t_a) + r \cos(\theta) \sin(\omega t_a) \\ &\approx R_0 + \Delta y + \Delta x \omega t_a \\ &\approx R'_0 + \Delta x \omega t_a \end{aligned} \quad (9)$$

其中 R'_0 为散射点的初始斜距， Δx 为散射点在目标坐标系中的初始方位位置，则目标的回波形式为

$$\begin{aligned} s(t_a, t_r) &= \sigma \exp \left\{ -j\pi K_r \left[t_r + \frac{2R(t_a)}{C} \right]^2 \right\} \\ &\quad \cdot \exp \left\{ -j \frac{4\pi}{\lambda} R(t_a) \right\} \\ &= \sigma \exp \left\{ -j\pi K_r \left[t_r - \frac{2(R'_0 + \Delta x \omega t_a)}{C} \right]^2 \right\} \\ &\quad \cdot \exp \left\{ -j \frac{4\pi}{\lambda} (R'_0 + \Delta x \omega t_a) \right\} \end{aligned} \quad (10)$$

式(10)中 σ 为散射点 P 的散射系数， $R(t_a)$ 为方位向 t_a 时刻 P 点距雷达的距离， K_r 为距离向发射信号调频率， t_r 为距离向快时间， λ 为载波波长。

经距离向匹配滤波、运动补偿后，忽略高次项影响，式(10)可写为

$$\begin{aligned} s(t_a, t_r) &= \sigma \text{sinc} \left[t_r - \frac{2(R'_0 + \Delta x \omega t_a)}{C} \right] \\ &\quad \cdot \exp \left\{ -j \frac{4\pi}{\lambda} (R'_0 + \Delta x \omega t_a) \right\} \end{aligned} \quad (11)$$

式(11)中 $\text{sinc}()$ 为距离压缩后脉冲包络， Δx 为目标方位位置，所以在传统的 RD 算法中，通过对第 2 个指数项沿方位时间 t_a 进行傅里叶变换即可实现方位成像。

由式(11)可以发现，在距离时域，方位时间 t_a 在距离压缩后快时间域包络 $\text{sinc} \left[t_r - 2(R'_0 + \Delta x \omega t_a)/C \right]$ 中的出现导致了 MTRC 的产生。为此，本文提出在距离频域进行方位压缩，此时，散射点在各个方位时刻不再被压缩成主瓣位置随 t_a 变化的 sinc 函数，而是均匀分布在距离频域，避免了 MTRC 的影响。将式(11)变换至距离频域可得：

$$S(t_a, f_r) = \sigma P(f_r) \exp \left\{ -j \frac{4\pi}{C} (f_0 + f_r) (R'_0 + \Delta x \omega t_a) \right\} \quad (12)$$

设目标在所讨论距离频率处沿方位向分布有 N 个散射点，其散射强度分别为 $[\sigma_1, \sigma_2, \dots, \sigma_N]$ ，方位位置分别为 $[\Delta x_1, \Delta x_2, \dots, \Delta x_N]$ ，则有

$$\begin{aligned}
s(t_a, f_r) &= \sum_{i=1}^N \sigma_i p(f_r) \exp \left\{ -j \frac{4\pi}{c} (f_0 + f_r) (R'_0 + \Delta x_i \omega t_a) \right\} \\
&= p(f_r) \exp \left\{ -j \frac{4\pi}{c} (f_0 + f_r) R'_0 \right\} \\
&\quad \cdot \sum_{i=1}^N \sigma_i \exp \left\{ -j \frac{4\pi}{c} (f_0 + f_r) \Delta x_i \omega t_a \right\} \quad (13)
\end{aligned}$$

式(13)中前两项不影响本文的讨论, 可将第 3 项直接记为

$$\begin{bmatrix} S(t_1, f_r) \\ S(t_2, f_r) \\ \vdots \\ S(t_M, f_r) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \exp \left\{ -j \frac{4\pi}{C} (f_0 + f_r) \Delta x_1 \omega t_1 \right\} & \exp \left\{ -j \frac{4\pi}{C} (f_0 + f_r) \Delta x_2 \omega t_1 \right\} & \dots & \exp \left\{ -j \frac{4\pi}{C} (f_0 + f_r) \Delta x_N \omega t_1 \right\} \\ \exp \left\{ -j \frac{4\pi}{C} (f_0 + f_r) \Delta x_1 \omega t_2 \right\} & \exp \left\{ -j \frac{4\pi}{C} (f_0 + f_r) \Delta x_2 \omega t_2 \right\} & \dots & \exp \left\{ -j \frac{4\pi}{C} (f_0 + f_r) \Delta x_N \omega t_2 \right\} \\ \vdots & \vdots & \dots & \vdots \\ \exp \left\{ -j \frac{4\pi}{C} (f_0 + f_r) \Delta x_1 \omega t_M \right\} & \exp \left\{ -j \frac{4\pi}{C} (f_0 + f_r) \Delta x_2 \omega t_M \right\} & \dots & \exp \left\{ -j \frac{4\pi}{C} (f_0 + f_r) \Delta x_N \omega t_M \right\} \end{bmatrix}_{M \times N} \cdot \begin{bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \vdots \\ \sigma_N \end{bmatrix}_N \quad (15)$$

其中, $S(t_a, f_r)$ 是在距离频率为 $f_0 + f_r$ 处各个方位位置 t_a 时的观测数据, $\Phi = \left[\exp \left\{ \left(-j \frac{4\pi}{C} \right) (f_0 + f_r) \cdot \Delta x_j \omega t_i \right\} \right]$, $i = 1, 2, \dots, M$, $j = 1, 2, \dots, N$, 构成距离频率为 $f_0 + f_r$ 时的基空间, σ 为目标散射强度, 也就是 ISAR 成像中待求解的变量。针对飞机等运动目标, 可以认为其电磁散射是某些局部位置上的电磁散射的合成, 目标可以由等效多散射中心进行描述。所以 σ 在空间分布上具有稀疏性, 这一条件吻合了压缩感知理论的基本要求, 所以该问题可以引入压缩感知理论进行求解。

式(15)可以写成如下形式:

$$S = \Phi \sigma \quad (16)$$

这时, 由于散射点的能量分布在整个距离频域, 针对某个距离频率处, 信噪比较脉冲压缩后的时域信号大大下降, 这将增加求解式(14)的不确定性, 为此, 采用文献[10]提出的相干积累方法, 构造 $M \times M$ 维相干积累操作矩阵 A ,

$$S_c = AS = A\Phi\sigma \quad (17)$$

为了满足 RIP 准则, 构造高斯白噪声矩阵^[8]作为测量矩阵对信号进行测量,

$$S_{cs} = \Psi S_c = \Psi A\Phi\sigma \quad (18)$$

最后, 对式(18)采用 OMP^[11]等算法求解最小 l_1 范数可得对 σ 的估计值 $\hat{\sigma}$

$$\hat{\sigma} = \arg \min \|\sigma\|_1, \quad \text{s.t. } S_{cs} = \Psi A\Phi\sigma \quad (19)$$

通过上述分析确定本文算法的处理流程如下:

由于前期处理与传统处理流程相同, 所以仅对相位补偿后本文相关操作进行详细说明。

$$s(t_a, f_r) = \sum_{i=1}^N \sigma_i \exp \left\{ -j \frac{4\pi}{c} (f_0 + f_r) \Delta x_i \omega t_a \right\} \quad (14)$$

式(12)-式(14)中 f_r 为距离频率, $P(f_r)$ 为距离包络的傅里叶变换。此时, 若沿方位向进行压缩, 则压缩后目标方位位置受距离频率 f_r 的调制, 导致在不同距离频率处目标方位位置不一致。因此, 针对每个固定距离频率 f_r 处的数据沿方位向采用矩阵形式进行表示如式(15)所示:

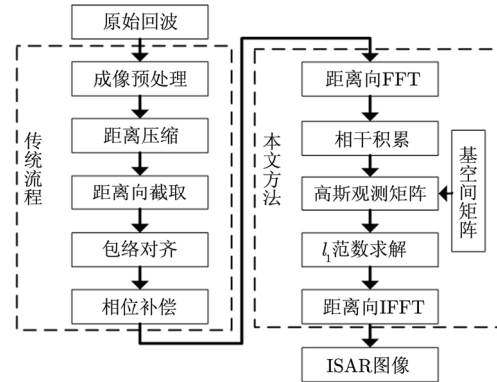


图 5 基于压缩感知的稀疏孔径大尺寸目标成像处理流程

步骤 1 本文算法在距离频域进行方位压缩, 首先通过距离向 FFT 将数据变换至距离频域。此时, 数据具有式(14)所示形式;

步骤 2 由于目标信号在距离频域中信噪比较低, 因此, 参考文献[10]构建沿方位向的相干积累矩阵以提高信噪比;

步骤 3 根据式(15)-式(18)构建随距离频率变化的基空间 Φ , 同时构建高斯白噪声矩阵 Ψ ;

步骤 4 采用传统的 l_1 范数求解方法, 如 OMP^[10] 等对式(19)进行求解, 获得对散射点散射强度 σ 的估计值。结合式(15), σ 与方位位置 Δx 相对应。因此, 根据 Δx 与 σ 即可还原目标方位向信息, 实现方位压缩;

步骤 5 在实现方位压缩后, 经距离向 IFFT 变换至距离时域, 实现距离向压缩, 获得目标 2 维图像。

4 仿真试验与分析

针对第3节提出的算法流程进行仿真试验。试验中用到的点目标飞机模型如图6(a)所示。仿真中所用的雷达参数分别为：发射信号带宽 400 MHz，脉冲时宽 10 μ s，波长 0.03 m，脉冲重复频率 200 Hz，回波信噪比为 0 dB。目标以 200 m/s 的切向速度在距离雷达 20 km 的地方飞行。理论上为了得到 0.5 m 的方位分辨率需要对目标连续观测 3 s，获得 600 个脉冲采样。本实验从 600 个脉冲采样中随机的选取 64 个脉冲形成稀疏孔径观测数据，孔径稀疏度达到 89%，稀疏观测示意图如图 6(b)所示。

为了验证本文算法的有效性，同时分析对比传

统方法中存在的缺陷，采用稀疏孔径补零法，全极点插值法^[3]和本文方法对图 6 (b)所述稀疏孔径数据进行处理，同时，采用全孔径数据 RD 成像结果作为参考。在 3 种传统成像算法中，均在距离压缩后采用 Keystone 变换进行 MTRC 校正。

图 7 给出了上述 4 种方法的成像结果，从图中可以看出，稀疏孔径直接补零方法成像质量较差，方位向旁瓣较高。对稀疏孔径数据插值后成像质量相对于直接补零法得到了较大的提高，方位向旁瓣大大降低，边缘处散射点仍然有明显的散焦现象，而本文提出的基于压缩感知的方法获得了清晰的图像。

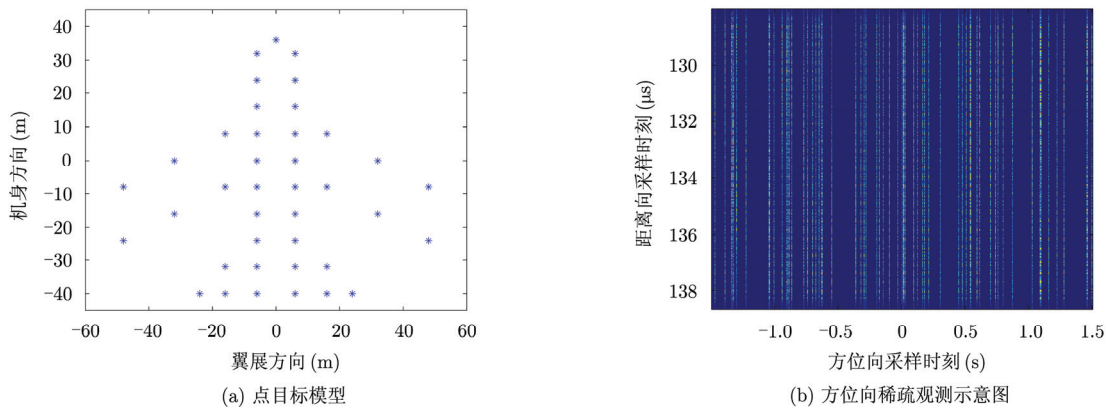


图 6 仿真试验示意图

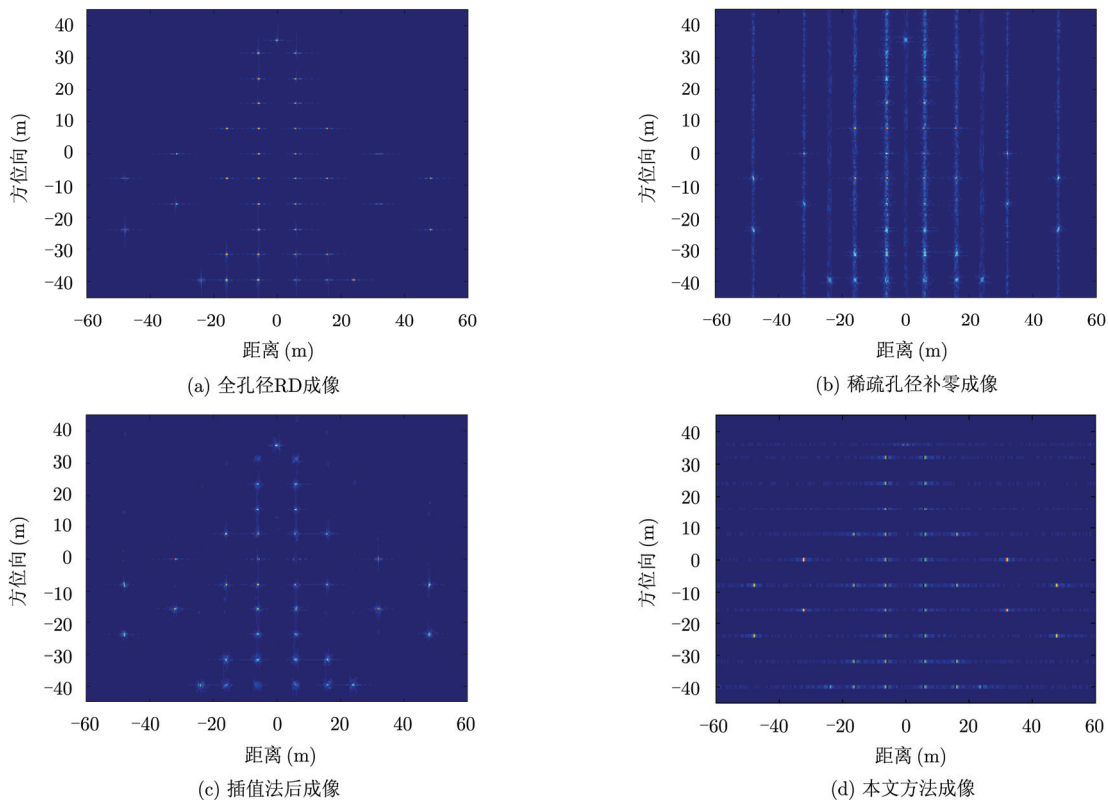


图 7 稀疏孔径 ISAR 成像仿真

由于本文旨在解决稀疏孔径下目标距离向 MTRC 校正和方位向压缩质量问题, 所以分别对距离压缩结果和方位压缩结果进行分析对比。

图 8 给出了 4 种成像方法在图像方位向边缘处某个散射点的距离剖面, 从中看出, 补零成像和插值后成像方法无法校正 MTRC, 距离向出现展宽, 而本文方法则有效地消除了 MTRC。

表 1 给出了上述各种方法点目标成像指标的评价, 可以看出, 本文方法成像质量与全孔径成像基本一致, 优于补零成像和插值后成像。

图 9 给出了图 8 中对应散射点的方位剖面。由于采用 CS 成像的脉冲响应函数为 δ 函数, 不再适

合进行深采样操作, 所以无法对成像指标进行量化评价。然而从图 9 中可以看出, CS 成像结果的旁瓣明显低于其它 3 种成像方法。

表 1 不同方法点目标距离向成像指标对比

成像方法	评价指标	
	分辨率(m)	PLSR(dB)
全孔径成像	0.38	-13.26
补零成像	0.99	-22.50
插值后成像	0.40	-6.50
本文方法	0.38	-13.20

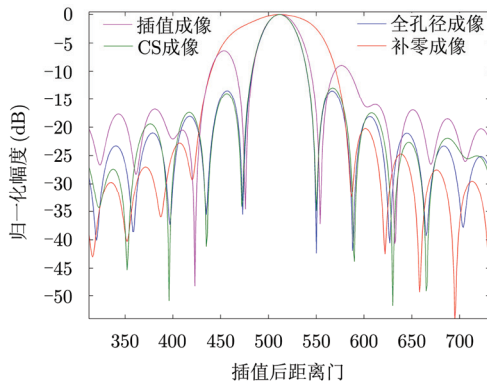


图 8 图像边缘散射点距离剖面

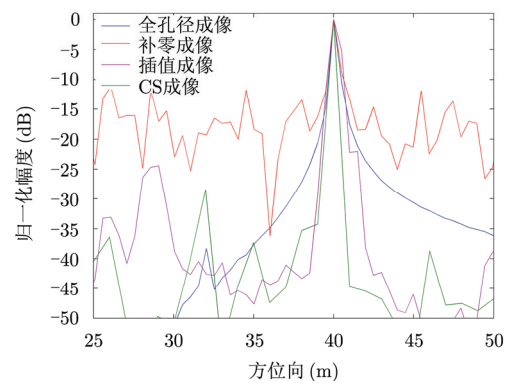


图 9 图像边缘散射点方位剖面

在 3.2 节中提到, 本文算法由于在距离频域进行方位压缩, 信噪比相对于距离时域有所下降, 为了进一步分析本文算法对信噪比的依赖性及其适用条件, 在保持其它仿真参数不变的条件下对不同信噪比下成像结果进行分析对比。图 10 给出了信噪比分别为 10 dB, 0 dB, -10 dB, -20 dB 时本文算法成像结果。可以看出, 当信噪比降至 -10 dB 时, 虽然散射点的越距离单元徙动仍然能够被校正, 但成像质量已明显下降, 当信噪比降至 -20 dB 时, 已无法获得目标清晰的轮廓。

为了能够量化描述成像质量, 引入熵^[5]的概念对图像质量进行评价。图像熵的定义如下:

$$E(I) = -\sum_{i=1}^{N_a} \sum_{j=1}^{N_r} P'(i, j) \ln P'(i, j) \quad (20)$$

其中 $P'(i, j) = P(i, j)^2 / \sum_{i=1}^{N_a} \sum_{j=1}^{N_r} P(i, j)^2$ 为图像中每个点的归一化功率强度。根据图像熵的定义, 当图像中散射点聚焦效果越好时, 熵值越小。

图 11 给出了不同成像方法在不同信噪比下图像熵, 从图中可以看出, 除 CS 成像方法外, 其它方法成像质量受信噪比影响较小。这是由于对于全

孔径成像而言, 2 维压缩后积累增益较高, 噪声对目标影响较小, 而对于补零成像和插值成像, 孔径缺失和插值误差的影响远大于噪声的影响, 故 3 种方法成像结果受信噪比的影响比较小。而本文方法则严重受到信噪比的制约, 当信噪比低于 0 dB 时, 成像质量开始明显下降, 当信噪比为 -5 dB 时, 图像质量与插值成像方法接近, 本文方法将不再具有优势。

通过对距离向及方位向成像质量的分析证明, 在回波信噪比高于 -5 dB 的情况下, 本文方法可以有效校正 MTRC, 同时避免了传统方法在稀疏孔径下较高的峰值旁瓣比, 成像质量优于传统方法。

5 结论

针对稀疏孔径下大尺寸目标的成像问题, 传统的 Keystone 变换法和极坐标格式法在插值时将会引入插值误差, 导致散射点越距离单元徙动无法校正, 成像质量下降。本文提出在距离频域结合 CS 理论进行方位压缩, 避免了进行 MTRC 校正时插值操作引入的误差。通过构建一组随距离频率变化的基函数, 使得在不同距离频率处方位压缩后同一散射点出现在相同的多普勒频率位置, 消除了距离

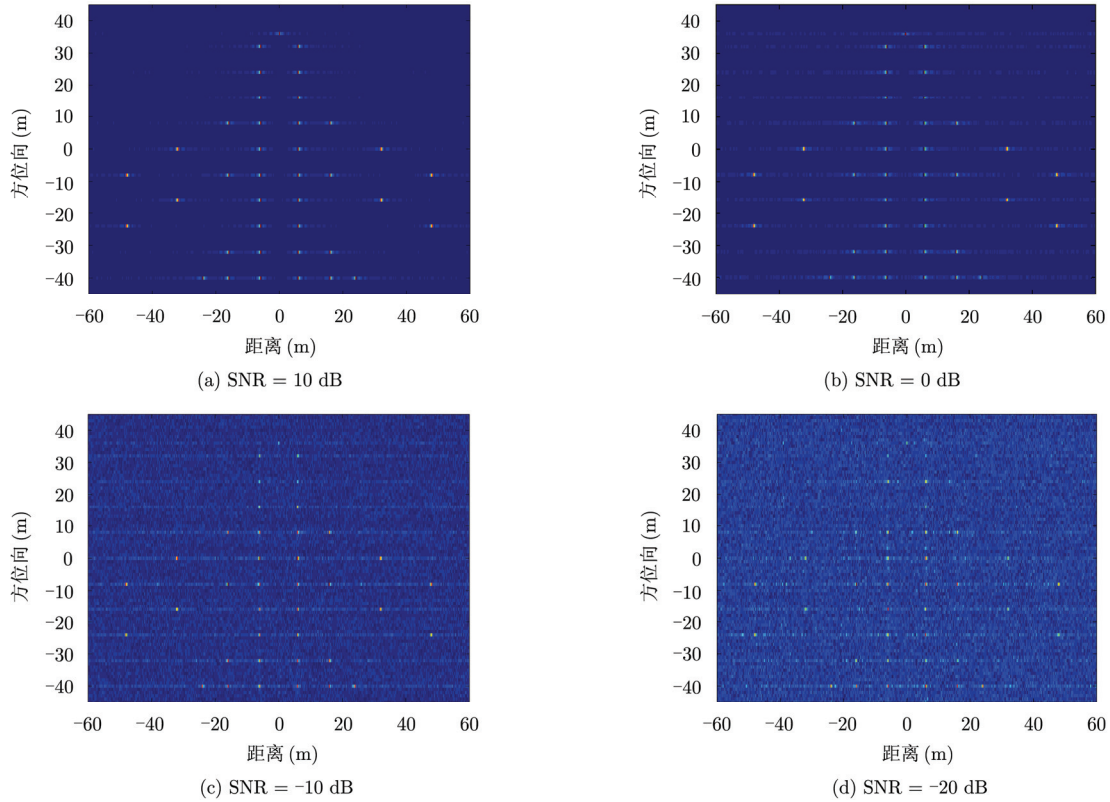


图 10 不同信噪比下 CS 成像结果

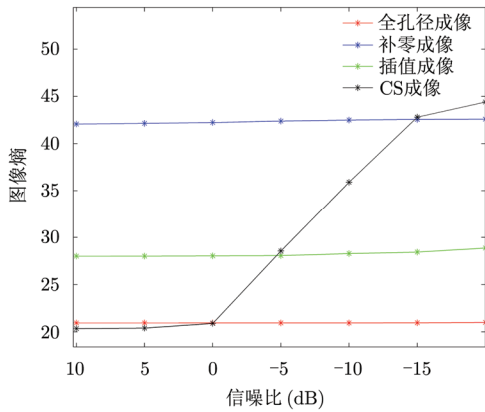


图 11 各种算法不同信噪比下图像熵

向和方位向之间的耦合，同时降低了方位向峰值旁瓣比。仿真结果验证了本文方法的有效性。

然而，本文方法仅考虑了方位向稀疏采样的情况，而在距离向，需要在每个距离频点处求解 l_1 范数以实现方位压缩，运算量较传统方法有所增加。为此，在接下来的研究中，计划进一步对距离向稀疏采样的情况进行研究，一方面降低数据量，另一方面减少计算量，最终实现 2 维稀疏采样下大尺寸目标的高分辨率成像。

参考文献

- [1] Bennani Y, Comblet F, and Khenchaf A. RCS of complex targets: original representation validated by measurements—application to ISAR imagery[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*. <http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=6168829>(pre-print).
- [2] Paladini R, Martorella M, and Berizzi F. Classification of man-made targets via invariant coherency-matrix eigenvector decomposition of polarimetric SAR/ ISAR images[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2011, 49(8): 3022-3034.
- [3] Li H J, Farhat N H, and Shen Y S. A new iterative algorithm for extrapolation of data available in multiple restricted regions with applications to radar imaging[J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 1987, 35(5): 581-588.
- [4] Zhang L, Xing M D, Qiu C W, et al. Achieving higher resolution ISAR imaging with limited pulses via compressed sampling[J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2009, 6(3): 567-571.
- [5] 保铮, 邢孟道, 王彤. 雷达成像技术[M]. 北京: 电子工业出版社, 2005: 241-254.

- Bao Zhen, Xing Meng-dao, and Wang Tong. Radar Imaging Technology[M]. Beijing, Publishing House of Electronics Industry. 2005: 241-254.
- [6] Candes E J and Wakin M. An introduction to compressive sampling[J]. *IEEE Signal Processing Magazine*, 2008, 25(2): 21-30.
- [7] Ender J H G. On compressive sensing applied to radar[J]. *Signal Processing*, 2010, 90(5): 1402-1414.
- [8] Candes E J, Romberg J, and Tao T. Stable signal recovery from incomplete and inaccurate measurements[J]. *Communications on Pure and Applied Mathematics*, 2006, 59(8): 1207-1223.
- [9] Candes E J. The restricted isometry property and its implications for compressed sensing[J]. *Comptes Rendus Mathematique*, 2008, 346(9): 589-592.
- [10] 张龙, 张磊, 邢孟道. 一种基于改进压缩感知的低信噪比 ISAR 高分辨成像方法[J]. *电子与信息学报*, 2010, 32(9): 2263-2267.
- Zhang Long, Zhang Lei, and Xing Meng-dao. A new method of high resolution ISAR imaging under low SNR based on improved compressive sensing[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2010, 32(9): 2263-2267.
- [11] Yaakov Tsaig. SolveOMP. <http://sparselab.stanford.edu/~Sparselab200/Solvers/SolveOMP>, 2007.3.

作 者 简 介



仲利华(1984-), 男, 博士生, 主要研究方向为 ISAR 成像。

E-mail: zlhbuaa@163.com

胡东辉(1970-), 男, 副研究员, 研究方向为 SAR/ISAR 成像。

E-mail: dhhu@mails.ie.ac.cn

丁赤飏(1969-), 男, 研究员, 博士生导师, 现任中国科学院电子学研究所副所长。主要从事合成孔径雷达、遥感信息处理和应用系统等领域的研究工作。

E-mail: cbding@mails.ie.ac.cn

张问一(1984-), 男, 博士生, 主要研究方向为海洋合成孔径雷达成像。

E-mail: zhangwenyi06@mails.gucas.ac.cn