

压缩感知机动目标 ISAR 成像新方法

陈春利, 谢红梅, 彭进业, 王志成, 王保平

(西北工业大学 电子信息学院, 陕西 西安 710129)

摘要: 基于 Fourier 基的压缩感知(Compressed Sensing, CS)算法已被成功应用于平稳运动目标的逆合成孔径雷达(Inversed Synthetic Aperture Radar, ISAR)成像。但由于建模时对 ISAR 回波方位相位高次项的忽略, Fourier 基矩阵对机动目标回波数据方位信息的稀疏表示失效, 导致对机动目标的成像在方位向模糊。鉴于时频分析技术良好的时频局部化特性, 将其引入到雷达回波方位向分析中, 以改进用于表示雷达回波数据的稀疏基, 实现对选定时间切片内回波数据多普勒频率的稀疏表示。改进后的基矩阵在通过 CS 技术解析回波在时间切片内方位信息的同时, 又保证了利用有限数据成像的分辨率。与基于 Fourier 基 CS 成像等现有方法相比较, 新方法在方位向的成像质量上有较大改进。仿真实验验证了算法的有效性。

关键词: 逆合成孔径雷达成像; 压缩感知; 时频分析; 机动目标

中图分类号: TN95 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-2276(2013)08-2269-06

New compressed sensing algorithm for ISAR imaging of maneuvering target

Chen Chunli, Xie Hongmei, Peng Jinye, Wang Zhicheng, Wang Baoping

(School of Electronics and Information, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710129, China)

Abstract: The Fourier basis compressed sensing(CS) algorithm was applied in inversed synthetic aperture radar (ISAR) imaging of smoothly moving target successfully. But it ignored the higher order terms of ISAR echo in azimuth when constructing the ISAR echo model, the sparse representation based on Fourier basis for azimuth information of ISAR echo whose target is maneuvering was invalid, which led to the lack of information of Doppler frequency in the local range of time domain. As a result, the imaging results of maneuvering target were blurred in azimuth. The time-frequency analysis technology, because of its good time-frequency characteristics in local, was introduced into the analysis of ISAR echo in azimuth: A Gauss window was used to improve the sparse basis which represented the Doppler frequency of ISAR echo data in a selected short time slice while the size of sparse basis matrix remained constant. Then CS technology which includes time-frequency analysis based sparse basis to represent the echo data, Gauss random observation matrix to reduce the sampling rate and Orthogonal Matching Pursuit (OMP) algorithm to solve the coefficients of the sparse representation was used to analyze the azimuth information in that time slice. As a result of CS's advantage in improving resolution,

收稿日期: 2012-12-20; 修订日期: 2013-01-22

基金项目: 国家自然科学基金(61073106); 航天科技创新基金(CASC201102); 西北工业大学研究生创业种子基金(Z2012077)

作者简介: 陈春利(1988-), 男, 硕士生, 主要从事雷达成像方面的研究。Email: chenrychan@sina.com

导师简介: 谢红梅(1972-), 女, 硕士生导师, 主要从事包括数字图像处理、雷达信号处理等方面的研究。Email: xiehm@nwpu.edu.cn

the resolution of image supported by limited data was high at the same time. The target models of uniformly accelerated motion and varying accelerated motion were both designed to simulate the ISAR echo data of maneuvering target. Compared with the existing imaging methods such as Fourier basis CS algorithm, Range Doppler (RD) algorithm and the Range instantaneous Doppler (RID) algorithm based on Gabor transform, the new one achieves significant improvement in terms of imaging results in azimuth. The corresponding imaging results show the effectiveness of the algorithm from both subjective observation results and objective evaluation indicators including Peak Side Lobe Ratio (PSLR) and azimuth resolution.

Key words: ISAR imaging; compressed sensing; time-frequency analysis; maneuvering target

0 引言

压缩感知^[1-3]理论 (Compressed Sensing, CS) 因其对采样率要求低、可提高成像分辨率等特性, 在雷达成像领域日益受到关注; Baraniuk 等^[4]首次将压缩感知应用到雷达成像领域, 通过理论分析和数值仿真证明了压缩感知雷达成像的可行性; Ender^[5]分析了相参雷达信号的稀疏表示, 并重点研究了压缩感知在脉冲压缩、ISAR 成像和 DOA 估计中的应用; Herman 等^[6]提出了一个压缩感知雷达的框架, 证明压缩感知技术可以使成像结果有更好的时频分辨能力; 李军、全英汇等^[7-8]则针对 ISAR 成像中常常出现回波数据缺损的实际问题构造与缺损数据形式一致的 Fourier 稀疏基, 分别实现对稀疏孔径和短孔径 ISAR 回波数据的高分辨成像。

在现有的压缩感知雷达成像方法中常采用 Fourier 基作为雷达回波信号的稀疏基, 此时雷达目标应满足平稳运动的点散射模型。但实际上, ISAR 观测目标因其非合作性往往很难满足这样的条件, 目标复杂运动带来的径向加速度和转动角加速度会使回波信号的包络产生弯曲, 同时产生方位相位的二次项, 严重影响 ISAR 成像质量。

由于时频分析技术良好的时频局部化特性, 时频分析技术常常被用来估计复杂信号的频率变化率, 从而对回波数据进行校正, 以获得更高的聚焦效果。近几年来, 该技术被越来越多的学者直接引用到 ISAR 成像的方位向分辨过程中, 以获取特定时间切片内的方位向成像, 从而提高复杂运动目标的成像质量。但基于 STFT 变换或 Gabor 变换的 (RID)^[9]方法因为窗口大小的限制, 导致成像数据量不足, 造成方位向分辨率下降; 基于 Wigner-Ville 分布的 WVD^[9]

方法虽然保证了成像结果的分辨率, 但将带来交叉项, 影响成像质量; Radon-Wigner^[9]方法可以在时频域对散射点信号进行时频表示, 但运算量巨大且当方位二次相位项较大时, 算法参数将难以控制, 不利于算法的实现; 参考文献[10]中提出的基于时频分布尺度变换的方法在将方位相位二次项进行校正的同时保证了算法的效率, 但当雷达散射截面较小时, 仍将引起较大的交叉项掩盖; 参考文献[11]文中提出了利用时频分析实现逆合成孔径激光雷达成像的方法, 但需要结合“CLEAN”技术来改善成像的质量。

文中采用 Gabor 变换的思路对 Fourier 稀疏基矩阵进行改进, 构造结构简单、参数易调的 Gabor 稀疏基矩阵用于机动目标的压缩感知雷达成像, 在保证成像质量的同时又利于算法实现。具体的讲, 文中构造 Gabor 稀疏基取代 Fourier 稀疏基进行压缩感知 ISAR 方位向成像。

1 机动目标的 ISAR 回波信号模型

经平动补偿后, 二维平面内的运动目标如图 1 所示。目标以 O 为旋转中心, Y 轴和 X 轴固定在目标

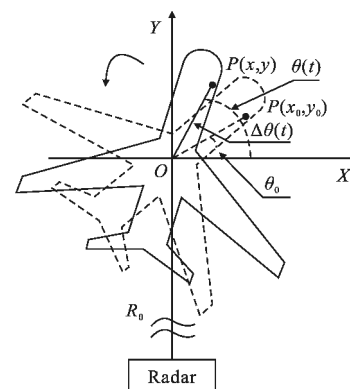


图 1 ISAR 回波模型

Fig.1 Model of ISAR echo

上, X 轴为方位轴, Y 轴为雷达视线方向, X 轴和 Y 轴所在的平面为成像平面。在相干处理时间内, 瞬时雷达视角为 $\theta(t)$, $0 \leq t \leq T_a$, 其中 T_a 为观测时间。

在远场条件下, 从点 $P(x, y)$ 到雷达的瞬时距离为:

$$R(t) \approx R_0 + y \approx R_0 + y_0 + x_0 \sin(\Delta\theta(t)) \quad (1)$$

旋转角用泰勒级数展开为:

$$\Delta\theta(t) = \theta(t) - \theta_0 \approx \omega t + at^2/2 + \sigma(t^2) \quad (2)$$

式中: ω 和 a 分别代表旋转角初速度和旋转角加速度。假设雷达发射线性调频信号为:

$$s(\tau) = A \text{rect}(\tau/T_p) \exp[j2\pi(f_c \tau + (\gamma/2)\tau^2)] \quad (3)$$

式中: A 为散射点幅度; τ 为快时间; f_c 为载波频率; γ 为调频率; T_p 为脉冲宽度; $\text{rect}(\tau/T_p)$ 为单位矩形窗函数。则点 $P(x, y)$ 的回波信号复包络经过距离脉压后为:

$$s(\tau, t) = A \text{sinc}\left[T_p \gamma \left(\tau - \frac{2(R_0 + y)}{c}\right)\right] \text{rect}\left(\frac{t}{T_a}\right) \cdot \exp\left[-j4\pi \frac{R_0 + y}{\lambda}\right] \exp\left[-j2\pi \left(f_d t - \frac{1}{2} \beta t^2\right)\right] \quad (4)$$

式中: λ 为波长; c 为光速; $f_d = 2x\omega/\lambda$, $\beta = 2xa/\lambda$ 分别代表多普勒频率和多普勒调频率。假设距离单元内包含 K 个具有不同横向距离的散射点, 忽略常数相位项, 可得到对应于时延 $\tau = 2(R_0 + y)/c$ 的距离单元信号为:

$$s(t) = \sum_{k=1}^K A_k \text{rect}\left(\frac{t}{T_a}\right) \exp\left[-j2\pi \left(f_k t - \frac{1}{2} \beta_k t^2\right)\right] \quad (5)$$

当目标做平稳运动时其角加速度 $a=0$, $\beta=2xa/\lambda=0$, 此时公式(5)可简化为:

$$s(t) = \sum_{k=1}^K A_k \text{rect}(t/T_a) \exp(-j2\pi f_k t) \quad (6)$$

从公式(6)中可以看出, 平稳运动目标各散射点的多普勒频率与所在方位距离 x 成正比, 并且不随时间变化而变化, 方位向的成像过程即可通过在频域分离这些多普勒频率 f_k 而实现。最简单有效的分辨方法是傅里叶变换, 这也正是经典压缩感知算法采用 Fourier 基矩阵的理论依据。

但当目标做非平稳运动时, 角加速度 $a \neq 0$, 距离单元信号的表示为公式(5)形式, 此时方位相位产生二次项, 各散射点的多普勒频率可等价于:

$$f_k' = f_k + \frac{1}{2} \beta_k t = \frac{x}{\lambda} (2\omega + at) \quad (7)$$

此时傅里叶变换失效, 需要设计新的基矩阵来实现方位向压缩感知成像。文中针对这种情况, 将时频分析的思想引入信号稀疏基矩阵的设计, 构造 Gabor 基矩阵来实现对特定时间切片内雷达信号的

方位向成像。

2 基于压缩感知的机动目标 ISAR 成像

2.1 基于压缩感知的 ISAR 成像

定义一个有限信号 $s \in \mathbb{C}^N$, 一个基矩阵 $\Psi \in \mathbb{C}^{N \times N}$, 使得 $s = \Psi\theta$, 其中 $\theta \in \mathbb{C}^{N \times 1}$ 为对应的系数向量, 且 θ 中只有少量 (K 个) 元素为非零值。构建观测矩阵 $\Phi \in \mathbb{C}^{M \times N} (M \ll N)$ 对 s 进行降维观测 $y = \Phi s$, $\Phi\Psi$ 应满足有限等距性质 (RIP)^[2]。参考文献[3]证明随机矩阵如高斯 (Gaussian) 随机矩阵或伯努利 (Bernoulli) 随机矩阵是理想的观测矩阵。此时, 只要满足 $M \geq O(K \log N)$, 通过求解范数凸优化问题:

$$\min \|\theta\|_1 \quad \text{s.t.} \quad y = \Phi\Psi\theta \quad (8)$$

即可以从 y 中大概率恢复出系数向量 θ , 进而高精度重构原信号 s 。一般来说, Φ 采用高斯随机矩阵 (或伯努利随机矩阵), Ψ 根据信号 s 的特性设计, 公式(8)通常采用贪婪算法 (如 MP、OMP 等)、凸优化算法 (如 LASSO、GPSR 等) 和统计优化算法 (Sparse Bayesian 等) 来求解。

在 ISAR 成像过程中, 每一个距离单元内的信号来自方位不同的散射点, 而这些方位不同的散射点对应于不同的多普勒频率, 将这些多普勒频率在频域上分辨出来即实现 ISAR 方位向成像。压缩感知 ISAR 成像通过设计合适的基矩阵 $\Psi = \{\Psi_1, \Psi_2, \dots, \Psi_N\}$, 将不同的多普勒频率 f_k 分离到对应的 Ψ_k , 再求解公式(8)得到稀疏系数向量 θ 。从将多普勒频率分离的意义上讲, 此时的系数向量 θ 就是该距离单元信号在方位向的成像结果。因此, 设计满足 ISAR 回波特性的基矩阵 Ψ , 成为压缩感知理论应用到 ISAR 成像中的关键。经典的 Fourier 基矩阵因不再满足机动目标 ISAR 回波方位相位产生二次项的特性而失效, 设计新的基矩阵 Ψ 成为压缩感知应用于机动目标 ISAR 成像的必需。

2.2 机动目标的 ISAR 回波成像

时频分析技术因其优异的时频局域化特性, 常被用来估计复杂信号的频率变化率, 以获取更高的聚焦效果。将时频分析技术引入到雷达成像领域中, 开发新的成像算法, 实现雷达瞬时成像功能, 可以使复杂运动目标的成像质量得到改善。而这也为压缩感知技术应用于雷达成像带来了新的思路, 机动目标的压缩感知 ISAR 成像成为了可能。

利用时频分析进行 ISAR 成像的一般思路为:当目标回波经过距离压缩和徙动校正后,将信号按距离单元排列,每个距离单元的信号设为 $s_i(t)$,对不同距离单元信号 $s_i(t)$ 分别计算其时频分布,然后将同一时间切片下不同距离单元信号的时频分布系数按距离组合成矩阵,即形成该时间切片下目标的 ISAR 像。

Gabor 变换通过对信号的时间平移和频率调制建立非平稳信号的联合时频函数,然后对时频平面进行采样划分,将时频平面 (t, f) 转换成另外两个离散采样网格参数 m 和 n 的平面,在二维平面 (m, n) 上表征非平稳信号。信号 $s(t)$ 的 Gabor 展开定义为:

$$s(t) = \sum_{m=-\infty}^{\infty} \sum_{n=-\infty}^{\infty} C_{m,n} g_{m,n}(t) = \sum_{m=-\infty}^{\infty} \sum_{n=-\infty}^{\infty} C_{m,n} h(t-na) \exp(j2\pi m b t) \quad (9)$$

式中: $C_{m,n}$ 为展开系数; $h(t)$ 为高斯母函数; a, b 分别为时间平移常数和频率调制常数。但由于 Gabor 变换是通过高斯母函数截取信号某个时间切片的信息并将其视为平稳信号进行频域解析,这在提高时间分辨率的同时损失了频率分辨率,将 Gabor 变换直接引用到 ISAR 成像中会降低回波在方位向的成像分辨率。

压缩感知已用于利用有限数据来还原信号。在雷达成像领域,压缩感知已实现稀疏孔径^[7]、短孔径^[8] ISAR 成像,通过对稀疏基矩阵的补零来拓宽有限数据的稀疏基,再求解范数凸优化问题获取突破原有限数据量的分辨效果。注意到公式(9)中指数项与 Fourier 变换的指数项形式一致,只需将窗函数引入 Fourier 基矩阵即可实现对时间切片的稀疏表示,同时由于远离窗口中心位置的基元素被削减至近于零,满足稀疏基矩阵补零拓宽稀疏基的要求。因此,将 Gabor 变换引入压缩感知的关键在于利用 Gabor 变换的思想设计信号的稀疏基矩阵。此时,结合时频分析技术和压缩感知理论在 ISAR 成像中的应用,利用高斯母函数对 Fourier 基矩阵进行限制,实现在选定时间切片内信号的稀疏表示。设 Fourier 基矩阵为:

$$\Psi = \{\Psi_1, \Psi_2, \dots, \Psi_N\} \quad (10)$$

则经 Gabor 变换思想改进后的基矩阵为:

$$\Psi' = g(t-t_i) \{\Psi_1, \Psi_2, \dots, \Psi_N\} = \{g(t-t_i) \Psi_1, g(t-t_i) \Psi_2, \dots, g(t-t_i) \Psi_N\} \quad (11)$$

将公式(11)基矩阵替代 Fourier 基矩阵,对各距离单元分别求解公式(8)得到稀疏系数向量 θ 即为相应距离单元信号 $s_i(t)$ 在时间切片 t_i 下对公式(11)

的展开。此时,目标信号的多普勒频率在时频域得到分离,将同一时间切片下不同距离单元信号的时频分布系数 θ 组合起来,即形成该时间切片下目标的 ISAR 成像。

3 机动目标 ISAR 回波数据处理结果

为了验证文中算法在机动目标 ISAR 成像中的可行性和有效性,笔者进行了两组仿真实验。建立实验模型为九点目标模型,如图 2 所示。其中,信号带宽 1 GHz,载频为 8 GHz,脉冲重复频率取 1 kHz,方位积累角 8° ,两组数据的不同之处在于目标的非平稳运动方式不同:第一组实验中,目标按恒定的角加速度 $a=0.0001$ ($^\circ/s^2$) 做匀加速运动;第二组实验中,目标做角加速度随机变化的变加速运动。这些非平稳运动在实验中通过转台步进角度的变化来模拟实现。分别利用距离多普勒(RD)算法、基于 Fourier 基的 CS 算法、基于 Gabor 变换的 RID 算法和文中提出的基于 Gabor 基的 CS 算法对两组数据进行成像对比,考察算法性能。

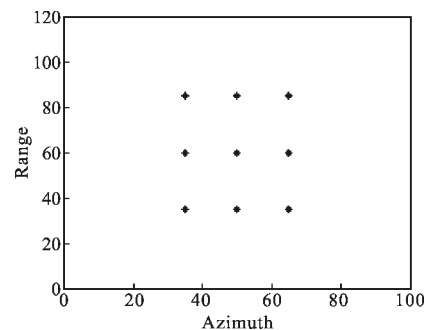


图 2 ISAR 点目标模型

Fig.2 Point target model of ISAR

分析匀加速运动的 ISAR 点目标模型:若利用 RD 算法成像,则由于其方位角速度随时间越来越大,造成其多普勒随时间越来越难以收敛,对成像质量的影响表现为越远离方位中心的图像信息在方位向越模糊;基于 Fourier 基的 CS 算法在方位向成像的思想与 RD 算法一致,因此其成像结果应与 RD 算法成像类似,但由于压缩感知算法能提高有限数据量的分辨率,故其成像在方位分辨率上会优于 RD 算法;基于 Gabor 变换的 RID 算法可以在选定时间切片对各散射点多普勒频率进行分离,因此能确定

各点所处方位坐标,但由于测不准原理的限制,时频分析结果在频域会损失一定精度,反映到图像结果上则会使得方位向分辨率下降;基于 Gabor 基的 CS 算法由于时频分析的思想也可以准确分各离散射点,同时由于压缩感知算法的高分辨率性能,其成像结果将在准确定位散射点方位的同时保证成像的方位分辨率。

分析变加速运动的 ISAR 点目标模型:变加速运动加剧了多普勒频率在频域的收敛难度,这将严重影响 RD 算法和基于 Fourier 基的 CS 算法在方位向的成像效果,甚至引起图像在方位向的不聚焦;基于 Gabor 变换的 RID 算法和基于 Gabor 基的 CS 算法仍然可以定位各散射点方位,但前者在方位向的分辨率将进一步下降。

对实验 1 和实验 2 的数据分别进行成像对比,实验结果如图 3 和图 4 所示。实验结果与算法分析较吻合。

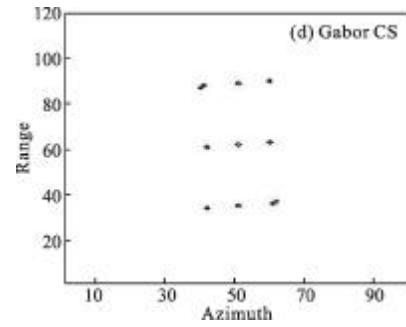


图 3 匀加速运动的成像结果

Fig.3 Imaging results of uniformly accelerated motion

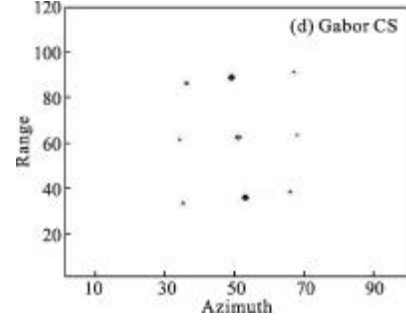
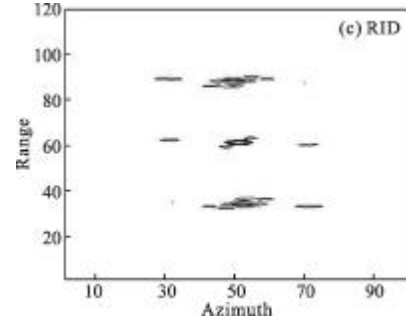
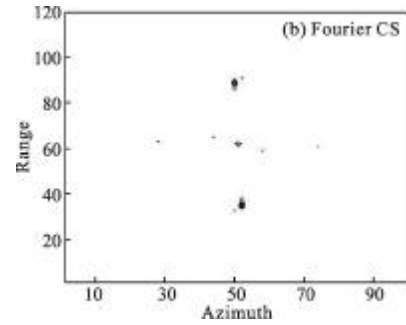
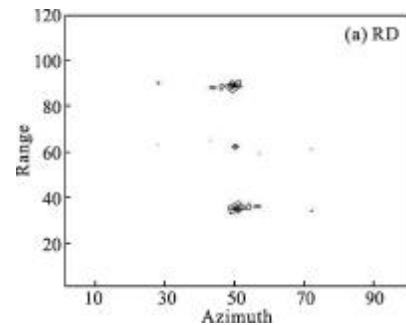
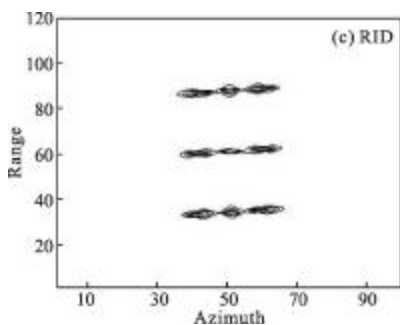
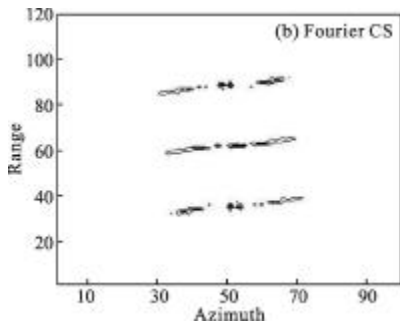
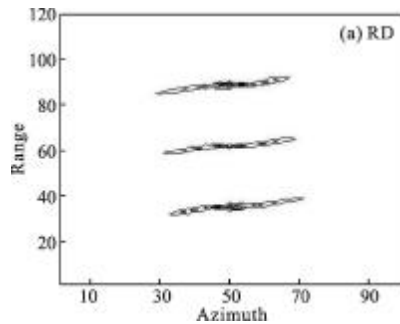


图 4 变加速运动的成像结果

Fig.4 Imaging results of varying accelerated motion



分别对以上结果计算其空间分辨率和峰值旁瓣比(PSLR),在点目标 ISAR 成像中,空间分辨率定义为点目标冲激响应半功率点处的宽度,应越小越好;峰值旁瓣比衡量强散射点对虚假目标的抑制,应越大越好。由于实验中各算法在距离压缩过程的处理方法一致,导致成像结果在距离向无显著差异,故空间分辨率只给出各组成像结果的方位向分辨率,结果如表 1 所示。

表 1 机动点目标 ISAR 成像质量评价

Tab.1 Quality evaluation for ISAR imaging of maneuvering target

	Uniformly accelerated motion model		Varying accelerated motion model	
	PSLR/dB	Resolution/m	PSLR/dB	Resolution/m
RD	2.1627	0.391	1.5262	0.351
Fourier CS	4.2915	0.176	12.1455	0.167
RID	0.8647	0.497	0.5578	0.626
Gabor CS	14.3617	0.156	14.3617	0.156

可以看出,由于目标非平稳运动影响了 RD 算法在方位向成像的质量,Fourier 基的 CS 算法同样失效,而基于 Gabor 变换的 RID 算法对预期目标有一定的成像效果但牺牲了方位分辨率。Gabor 基 CS 算法因为针对此类问题从时频分析的角度对时间切片进行压缩感知成像,削弱了非平稳运动带来的方位相位二次项问题的同时,又保证了成像的分辨率,从而得到了较理想的结果。

4 结论

针对机动目标 ISAR 成像的实际问题,经典压缩感知理论从 Fourier 变换的思路出发将回波方位向数据进行全局时频变换分解,以期分离出与方位信息相关的多普勒频率,但由于目标在运动过程中方位相位的非线性变化,Fourier 基将无法在频域准确分离出各散射点的多普勒频率,最终影响成像质量。文中提出的 Gabor 基压缩感知算法将时频分析的思想引入到对信号的稀疏分解中,对每个时间切片的信号在频域进行多普勒分离,从而将方位相位的二次项影响大大降低,获得了更好的成像质量。通过实验验证了算

法的有效性。但同常规基于 Fourier 变换的算法相比,该算法的效率较低,这需要进一步研究;同时,冗余稀疏基对算法的影响也是进一步研究的方向。

参考文献:

- [1] Candes E, Romberg J, Tao T. Robust uncertainty principles: exact signal reconstruction from highly incomplete frequency information [J]. IEEE Trans on Information Theory, 2006, 52(2): 489-509.
- [2] Candes E, Romberg J, Tao T. Near-optimal signal recovery from random projections: universal encoding strategies? [J]. IEEE Trans on Information Theory, 2006, 52(2): 5406-5425.
- [3] Donoho D. Compressed sensing [J]. IEEE Trans on Information Theory, 2006, 52(4): 5406-5425.
- [4] Richard Baraniuk, Philippe Steeghs. Compressive radar imaging [J]. IEEE Radar Conference, 2007(4): 128-133.
- [5] Joachim H G Ender. On compressive sensing applied to radar [J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2010, 90(5): 1402-1414.
- [6] Matthew Herman, Thomas Strohmer. High resolution radar via compressed sensing [J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2009, 57(6): 2275-2284.
- [7] Li Jun, Xing Mengdao, Zhang Lei, et al. High resolution imaging method for the sparse aperture of ISAR[J]. Journal of Xidian University(Natural Science), 2010, 37(3): 441-446. (in Chinese)
- [8] Quan Yinghui, Zhang Lei, Liu Yabo, et al. Method for achieving high resolution ISAR imaging with short aperture data via compressed sensing[J]. Journal of Xidian University (Natural Science), 2010, 37(6): 1022-1026. (in Chinese)
- [9] Bao Zheng, Xing Mengdao, Wang Tong. Radar Imaging Technology [M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2005:124-139. (in Chinese)
- [10] Li Yachao, Quan Yinghui, Xing Mengdao. A new method of ISAR imaging based on the scale transform in time-frequency distribution plane[J]. Chinese Journal of Electronics, 2009, 37(9): 2087-2091. (in Chinese)
- [11] Guo Liang, Xing Mengdao, Zeng Xiaodong, et al. Inverse synthetic aperture lidar imaging of indoor real data [J]. Infrared and Laser Engineering, 2011, 40(4): 637-642. (in Chinese)