

压缩感知雷达超分辨率成像

邓振淼, 叶淋美, 傅茂忠, 张贻雄
厦门大学信息科学与技术学院, 福建 厦门 361005

摘要: 研究压缩感知理论在逆合成孔径雷达 (inverse synthetic aperture radar, ISAR) 成像中的应用. 雷达发射方位稀疏的探测脉冲, 对满足 Nyquist 采样定理的雷达去斜回波数据进行稀疏采样, 再利用压缩感知重构算法分别重构距离向和方位向的完整的目标特性回波信号. 为了得到高分辨的雷达 ISAR 像, 对重构的数据在距离向和方位向分别进行超分辨率处理. 实际雷达数据和仿真数据表明 ISAR 像的分辨率有较大提高, 所给出的综合方法可以降低数据量, 节省雷达的时间资源, 具有良好的应用价值.

关键词: 压缩感知; 雷达成像; 重构; 超分辨率

中图分类号: TN911

文章编号: 0255-8297(2014)02-0133-08

Radar Super-Resolution Imaging Based on Compressive Sensing

DENG Zhen-miao, YE Lin-mei, FU Mao-zhong, ZHANG Yi-xiong

School of Information Science and Engineering, Xiamen University, Xiamen 361005, Fujian Province, China

Abstract: Application of compressed sensing (CS) in inverse synthetic aperture radar is investigated in this paper. The radar transmits sparse probing pulses and dechirped radar echo samples that satisfy the Nyquist sampling theorem are resampled sparsely. Reconstruction is performed to these sparse samples both in range and cross-range directions to recover the whole radar echo signals containing the target characteristics. To obtain high resolution ISAR images, super-resolution processing on both range and cross-range directions is conducted on the reconstructed data. Results of processing on real radar data and simulated data show that the resolution of ISAR image can be enhanced significantly. The proposed algorithm can reduce data size and time consumption, and is valuable for super-resolution radar image applications.

Keywords: compressed sensing (CS), radar image, reconstruction, super-resolution

高分辨率雷达成像系统广泛应用于军用和民用领域, 但受 Nyquist 采样定理的约束, 在提高分辨率以及满足实时性要求的同时, 面临采样率高、数据量大、快速处理困难等问题的挑战. Candes 和 Donoho 等人于 2004 年提出了压缩感知 (compressed sensing, CS) 理论, 指出当信号满足稀疏性条件时可以在低于 Nyquist 速率的情况下采样信号而不丢失信号的主要信息. 对于高分辨率成像雷达, 雷达目标的脉冲响应可由少数重要散射中心来刻画, 而这些散射中心数通常远小于数据样本数. 因此, 雷达目标响应的稀疏性使压缩感知在雷达目标探测与成像识别中的应用成为

可能.

近年来, 压缩感知在雷达成像中的应用成为研究热点^[1-25]. 把 CS 应用于雷达成像需要克服以下问题^[1]: 1) 探测到的目标反射系数必须在某个变换域上是稀疏的或可压缩的; 2) 在包含噪声的环境下信号重构算法可以处理真实数据, 且算法具有良好的效率和鲁棒性; 3) 采样速率和 CS 系统动态范围之间的权衡. 文献 [2] 给出了宽带雷达 Chirp 回波在一个正交字典上的稀疏表示, 验证了压缩感知应用于宽带雷达的可行性. 文献 [3] 将 CS 理论应用到高分辨率雷达成像中, 在正交基变换上满足稀疏度 K 的信号可

收稿日期: 2013-03-11; 修订日期: 2013-04-25

基金项目: 国家自然科学基金(No.61102135); 中央高校基本科研业务费专项基金(No.2010121063)资助

作者简介: 邓振淼, 副教授, 研究方向: 信号与信息处理, E-mail: dzm_ddb@xmu.edu.cn

用线性规划或贪婪算法重构. 压缩感知理论可以应用于雷达的高分辨率成像, 稀疏采样信号数以减少数据量^[4-9]. 文献 [10-11] 研究了压缩感知应用于合成孔径雷达 (synthetic aperture radar, SAR) 成像时的运动参数估计和运动补偿算法. 文献 [12-15] 以发射频率稀疏的探测信号代替传统的宽带信号, 再根据重构算法恢复目标宽带回波信号, 即把压缩感知应用于方位向压缩, 用有限的雷达探测脉冲获得高分辨率的 ISAR 像. 文献 [16] 在方位向随机稀疏采样雷达回波数据, 实现了在欠采样情况下的运动目标检测. 文献 [17] 针对条带式体制下的 SAR 成像, 提出了基于场景方位向小波稀疏表示的压缩感知成像方法. 文献 [18] 研究了基于随机卷积的压缩感知雷达成像方法. 文献 [19] 提出了一种具有保相性的压缩感知距离压缩算法, 即距离向采用压缩感知, 方位向采用传统的雷达成像算法. 文献 [20] 将压缩感知与随机噪声雷达相结合, 提出了基于压缩感知的随机噪声成像雷达方案. 此外, 文献 [21-24] 研究了 CS 理论在探地雷达成像中的应用, 文献 [25] 提出了自适应雷达压缩感知并将其应用于成像雷达中动态稀疏目标的雷达认知检测.

雷达成像是利用目标散射中心散射强度与目标散射函数空间谱的傅里叶变换之间的关系, 通过傅里叶变换反演出目标散射中心的空间分布, 获得目标图像. ISAR 成像的距离分辨率与带宽 B 的关系为 $c/2B$, 其中 c 为光速. 由于带宽制约, 故雷达图像的分辨率有限. 为此, 人们基于目标散射模型使用各种参数化方法估计散射中心参数, 接着将模型参数进行外推, 从而获得超分辨的雷达图像. 超分辨算法研究最有代表性的是美国林肯实验室提出的带宽外推技术, 通过预测观测频带之外的目标频率响应以达到增加雷达信号有效带宽并提高雷达成像分辨率的目的, 能使距离分辨率提高 2~3 倍^[26-27]. 文献 [28] 把雷达回波建模为自回归 (autoregressive, AR) 模型, 文献 [29] 把回波建模为自回归滑动平均 (autoregressive moving average, ARMA) 模型, 根据状态空间法得到 ARMA 模型的参数估计值, 再对原信号进行预测. 文献 [30-31] 也对此问题进行了研究, 其中文献 [30] 采用 AR 模型谱估计技术进行模型参数的估计及外推, 文献 [31] 则把林肯实验室的超分辨算法推广到稀疏孔径的超分辨成像.

现有的宽带成像雷达系统带宽有限, 在对某些目标进行成像时, 往往受带宽制约而得不到足够分辨率的图像. 为此, 本文将压缩感知和超分辨算法相结合, 并应用于宽带成像雷达的成像处理. 近年来, 有关 CS 在宽带成像雷达中应用的主要研究方法是: 如何构造测量矩阵对宽带雷达回波进行稀疏采样. 这种方法虽然可以避免匹配滤波运算, 但测量矩阵较大且必

须对雷达硬件进行改造. 目前装备的宽带成像雷达通常采用去斜处理 (dechirp 或 stretch)^[32] 的方式降低回波信号的带宽后进行采样, 于是本文对压缩感知在去斜处理方式下的应用进行研究, 首先分析了雷达去斜回波的稀疏特性, 应用压缩感知稀疏采样信号以降低采样数据量; 采用恢复算法重构雷达回波信号后, 运用 Burg 法外推成像数据, 相当于增加了雷达的带宽, 从而得到了超分辨率的雷达 ISAR 像. 为了节省雷达时间资源, 根据方位向雷达回波同样存在稀疏性的性质, 雷达有可能只需要发射少量的稀疏探测脉冲就可以利用重构算法得到完整的方位向回波. 然而, ISAR 成像时必须在方位向进行相位聚焦, 而目前的相位聚焦算法^[33-38] 主要研究固定重复频率的雷达应用场景, 因此在方位稀疏情况下的相位聚焦算法是下一步需要研究的问题.

1 雷达去斜回波模型及其稀疏性

雷达发射的线性调频信号可以表示为

$$s(\hat{t}, t_m) = \Pi(\hat{t}/T_p) e^{j2\pi(f_c \hat{t} + \frac{1}{2}\gamma \hat{t}^2)} \quad (1)$$

式中, $\Pi(u) = \begin{cases} 1, & |u| \leq 0.5 \\ 0, & |u| > 0.5 \end{cases}$, f_c 为中心频率, T_p 为脉宽, γ 为调频率, \hat{t} 为快时间, t 为全时间, $t = \hat{t} + t_m$, t_m 是慢时间.

设某点目标到达雷达的距离是 R_t , 雷达接收到的该点回波信号 $s_r(\hat{t}, t_m)$ 为

$$s_r(\hat{t}, t_m) = A \Pi((\hat{t} - 2R_t/c)/T_p) \cdot e^{j\pi\gamma(\hat{t} - 2R_t/c)^2} e^{-j4\pi f_c R_t/c} \quad (2)$$

式中, A 为散射点回波的幅度, c 为光速.

回波信号经过匹配滤波并变换到距离频域之后, 其信号表现形式 $r(f_r, t_m)$ 为

$$r(f_r, t_m) = A' \Pi(f_r/B) e^{-j4\pi(f_r + f_c)R_t/c} \quad (3)$$

式中, B 为信号带宽.

忽略目标的加速度、加加速度、转动角速度, 可以将 R_t 表示为

$$R_t \approx R_0 + vt_m \quad (4)$$

式中, R_0 为起始时刻目标与雷达的距离, v 为径向速度. 将式 (4) 代入式 (3) 可以得到慢时间域雷达回波

$$r(f_d, t_m) = A'' e^{-j2\pi f_d t_m} \quad (5)$$

式中, $f_d = 2(f_r + f_c)v/c$, $A'' = A' e^{2(f_r + f_c)R_0/c}$, f_d 为多普勒频率.

ISAR 成像通过距离-多普勒平面上散射中心的位置和幅度反映目标信息. 宽带雷达回波信号可近似为

目标各散射中心回波的叠加. 假设目标包含 L 个位于不同距离单元的散射中心, 雷达系统接收到的复基带回波信号可以近似表示为

$$s(f_d, t_m) = \sum_{k=1}^L A_k'' e^{-j2\pi f_{dk} t_m} \quad (6)$$

这 L 个正弦波信号在频域上可表示为

$$S(f_{dk}, f) = \sum_{k=1}^L A_k'' \delta(f - f_{dk}) \quad (7)$$

式中, $\delta(\cdot)$ 为冲击函数. 式 (7) 表示一组稀疏信号. 因此, 二维雷达成像回波信号在距离向和方位向均为正弦波信号的叠加, 而正弦波信号在频域上是稀疏的^[39], 雷达回波的这种频域稀疏特性为 CS 理论应用于雷达环境提供了必要条件.

2 基于CS的距离向和方位向压缩与重构

2.1 距离向回波压缩和重构

将距离向 (即快时间域) 的回波信号 \mathbf{x} 投影到一个大小为 $M \times N$ 的测量矩阵 Φ , 使 \mathbf{x} 从 N 维降到 $M (K < M \ll N)$ 维, 其中 K 为信号 \mathbf{x} 的稀疏度, 于是得到线性测量值 \mathbf{y}

$$\mathbf{y} = \Phi \mathbf{x} \quad (8)$$

式中, Φ 是从 $\Phi_{N \times N}$ ($\Phi_{N \times N}$ 是与正交变换基不相关的 $N \times N$ 的矩阵) 随机抽取 M 行组成的矩阵, \mathbf{y} 是一个 $M \times 1$ 的向量.

$$\mathbf{y} = \Phi \mathbf{x} = \Phi \Psi \mathbf{s} = \Theta \mathbf{s} \quad (9)$$

式中, $\Theta = \Phi \Psi$ 是 $M \times N$ 的矩阵, 被称为感知矩阵. 只需要矩阵 Θ 服从有限等距性质 (restricted isometry property, RIP)^[40], 则 K 个稀疏系数值能够从 M 个测量值中重构. 为了得到精确的重构信号, M 的值通常取 $M \geq O(K \ln N)$ ^[40-41].

典型的恢复算法有基追踪 (basis pursuit, BP) 算法和匹配追踪算法. 基追踪算法具有全局最优的优点, 但计算复杂度高; 贪婪匹配追踪算法, 如正交匹配追踪和正则化正交匹配追踪算法等, 是一种局部最优化的方法, 算法处理速度较 BP 算法有了明显的提升.

2.2 方位向回波稀疏与重构

由于方位向回波在频域上是稀疏的, CS 理论也同样适用, 因此雷达可能只要发射少量的稀疏探测脉冲就可以利用重构算法得到完整的方位向回波. 本文从单位矩阵 $\mathbf{I}_{N \times N}$ 中随机抽取 M 行构成测量矩阵 Φ , 随机抽取的行的位置对应稀疏脉冲信号发射时刻 t_m .

未抽取的行对应的时刻雷达不必发射信号, 从而节省了时间资源.

针对方位向回波的处理, 稀疏矩阵 Ψ 可取为傅里叶变换基, 其中

$$\psi_{i,k} = 1/\sqrt{2\pi N} e^{-j2\pi i k/N}, 0 \leq i, k \leq N. \quad (10)$$

由 $\Theta = \Phi \Psi$ 构成 $M \times N$ 的感知矩阵 Θ 服从 RIP 性质, 采用 CS 重构算法就能精确重构慢时间域的完整信号.

3 雷达超分辨率成像

雷达成像是利用雷达观测系统接收到的目标回波信号获得电磁散射特性的空间分布. 把 CS 应用于雷达成像, 可减少提取目标脉冲响应和目标散射机制所需的测量数, 减缓样本采集和存储的压力. 常用的基于傅里叶变换的成像方法是一种非参数化的方法, 其成像分辨率受 Rayleigh 分辨率准则的限制. 当雷达系统的距离分辨率大于目标散射点在雷达视线上投影的距离时, 会导致信号频谱的几个正弦波频谱成分无法分开, 此时可以通过超分辨, 即增加雷达信号的带宽, 来提高频谱分辨率. 因此, 可以运用线性预测滤波方法外推观测数据来提高样本数, 然后对外推后的数据进行离散傅里叶变换, 从而获得较高的频谱分辨率. 如图 1 所示, 假设原始数据有 100 个样本点, 其频谱只有 1 个谱峰. 用线性预测的方法将原信号沿前后向各外推 100 个样本点, 如图 1(c) 中蓝线表示, 得到 300 个样本值. 从外推之后的信号频谱图上可以观察到 2 个谱峰, 从而提高了该信号的频谱分辨率.

数据外推预测算法流程如下: 首先对数据进行全极点参数估计, 这里采用 Burg 算法^[30]估计信号的 AR 模型参数, 得到全极点模型系数 α . 然后由 α 线性预测观测数据之外的前向和后向样本值. 对上述 CS 信号重构之后得到雷达信号数据 $x_n (n = 0, 1, \dots, N-1)$, 用一个 P 阶线性预测滤波器进行外推, 滤波器系数为 $\alpha_p (p = 1, \dots, P)$, P 为 AR 模型的阶数. 最佳 AR 模型阶数可以由相似信息准则 (Akaike information criteria, AIC)^[42] 或最小描述长度 (minimum description length, MDL)^[43] 准则求得, 结果差别不大, 都可以采用.

这个滤波器按式 (11) 产生前向外推样本值 $x_n^{(f)}$

$$x_n^{(f)} = \sum_{p=1}^P x_{n-p} \alpha_p, \quad N < n \leq 2N \quad (11)$$

后向外推过程将滤波器反转, 且滤波器的系数取为前向滤波器的共轭复数 α_p^* , 即按式 (12) 后向外推 $x_n^{(b)}$

$$x_n^{(b)} = \sum_{p=1}^P x_{n+p} \alpha_p^*, \quad -N < n < 1 \quad (12)$$

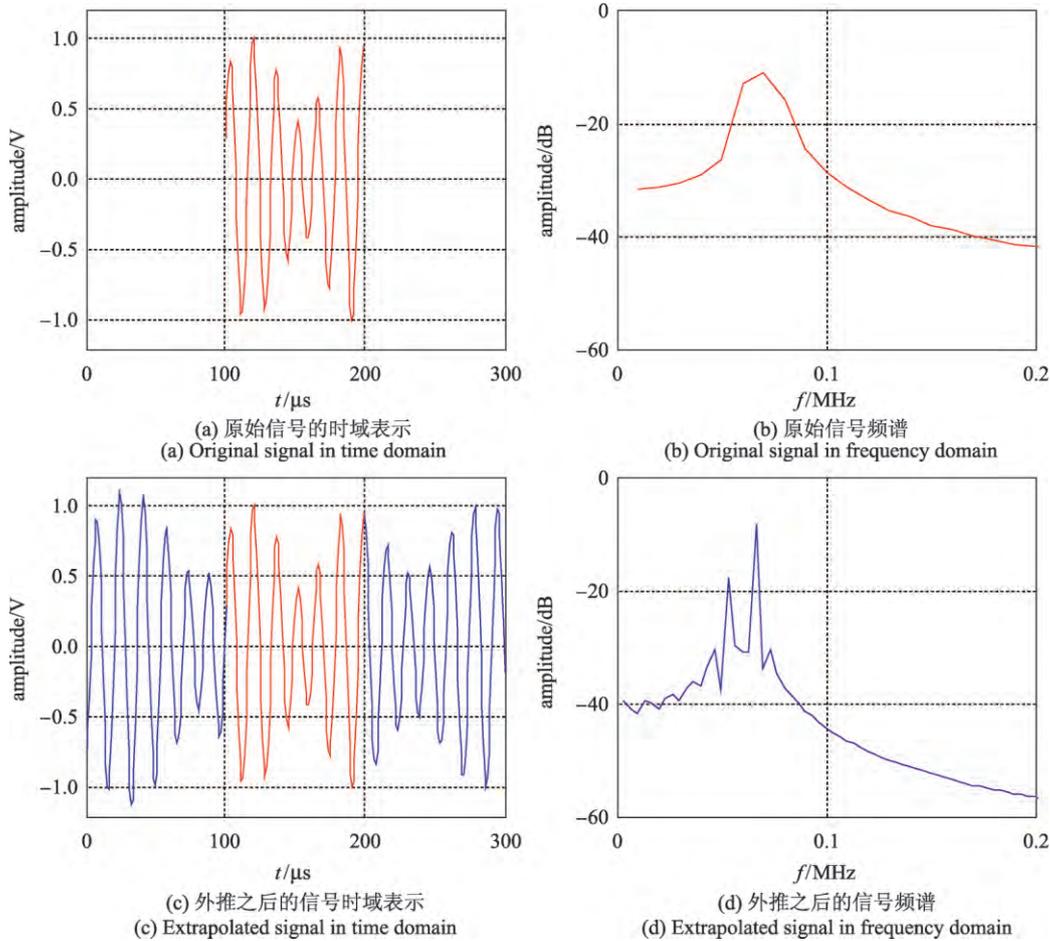


图 1 线性外推前后信号的时域和频域表示

Figure 1 Signal in time and frequency domain before and after extrapolation

式中, $1 \leq n \leq N$ 的数据样本是真实的, $N < n \leq 2N$ 和 $-N < n < 1$ 的数据是外推得到的. 经过线性预测共得到 $3N$ 个数据, 对应的频率分辨率提高了 3 倍.

4 算法验证

本节对本文算法进行仿真, 设雷达信号带宽 $B = 300$ MHz, 分辨率为 0.5 m, 脉冲宽度为 100 μ s, 重复频率为 1 000 Hz, 去斜之后的信号采样频率为 10 MHz. 每个脉冲的样本数为 $N = 616$, 通过 CS 稀疏采样, 样本数降为 $M = 75$. 传统 ISAR 成像用于成像的脉冲数为 256. 若采用方位向稀疏重构方法, 则从 256 个脉冲中随机抽取 64 个, 即雷达随机地发射 64 个脉冲. 传统方法用于成像的一帧雷达回波数据为 256×616 , 而采用 CS 数据量降为 64×75 , 采样数量大大减少. 图 2 所示是原始的完整雷达目标回波成像, 经过距离向和方位向压缩感知并重构后的结果如图 3 所示. 图 2 与图 3 的实验结果基本相似, 说明了本文算法的可行性. 经过超分辨后, 雷达成像系统用于超分辨成像的样本数量为 768×1848 , 距离向

和方位向的分辨率分别提高了 3 倍, 如图 4 所示. 本文采用的 CS 重构算法是正交匹配追踪 (orthogonal matching pursuit, OMP).

图 3 和 4 分别是超分辨处理前后的 ISAR 像, 可以看到经过外推后成像分辨率明显提高. 带宽外推前

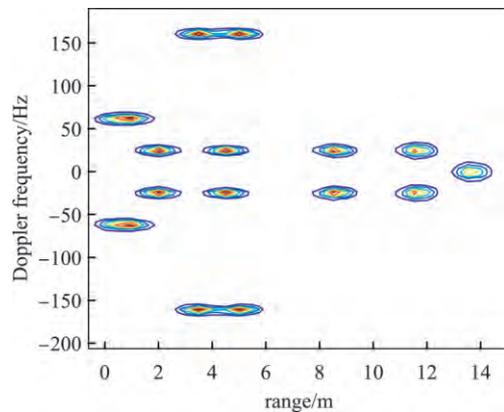


图 2 原始图像

Figure 2 Original image

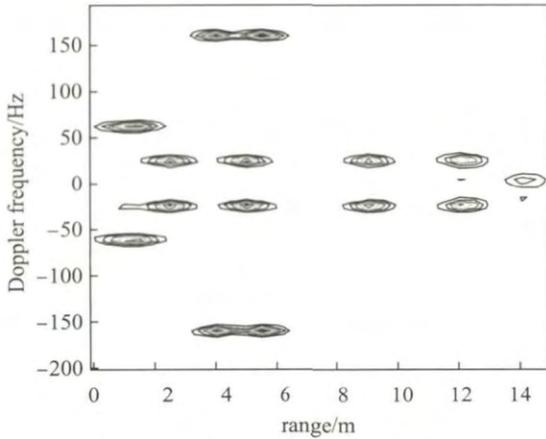


图 3 压缩感知重构后的图像

Figure 3 Image with CS reconstructed signals

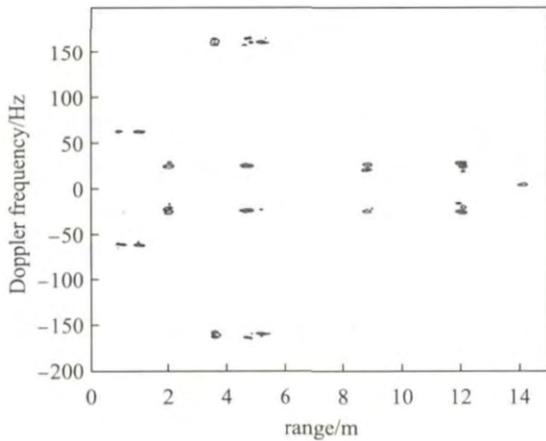


图 4 压缩感知重构后再进行超分辨的图像

Figure 4 Super-resolution image with CS reconstructed signals

如图 3 所示, 目标的分辨率为 0.5 m, 距离小于 0.5 m 的两个点目标无法分开. 带宽外推之后的结果如图 4 所示, 此时距离分辨率约为 0.167 m, 图 4 左边位于 (1 m, -60 Hz) 和 (1.5 m, -60 Hz) 的两个点目标可以分离, 而在超分辨前是无法分离的.

最后, 运用某雷达观测某空间飞行器时采集的信号对本算法进行验证. 该雷达信号的带宽 $B = 300$ MHz, 分辨率为 0.5 m, 原始回波信号的成像结果如图 5 所示. 原始数据每个脉冲的样本数为 $N = 1520$, 通过 CS 稀疏采样, 样本数降为 $M = 100$. 用于成像的脉冲数为 512 个, 这样一帧信号 512×1520 可被压缩采样为 512×100 . 雷达成像之前, 重构距离向的 CS 压缩采样的信号, 使恢复后的信号与原信号逼近, 再进行超分辨成像处理. 经过超分辨后, 雷达成像系统用于超分辨成像的样本数量为 1536×4560 , 距离向和方位向的分辨率分别提高 3 倍, 成像结果如图 7 所示. 必须指出的是, 现有的 ISAR 成像相位聚焦算法需要完整的方位向回波, 因此在实际雷达数据时方位向没有进行稀疏. 在方位稀疏情况下的相位聚焦算

法是下一步需要研究解决的问题.

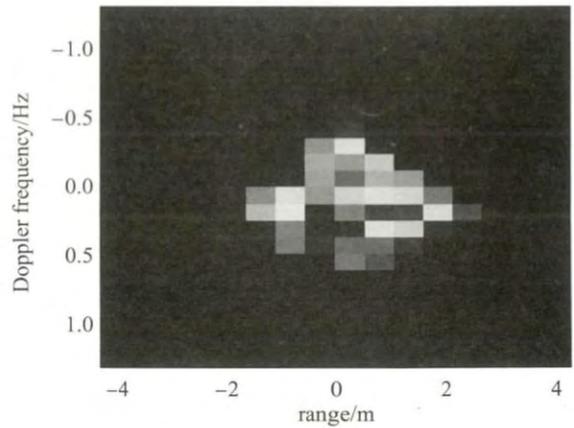


图 5 真实雷达数据原始成像

Figure 5 Original real radar image

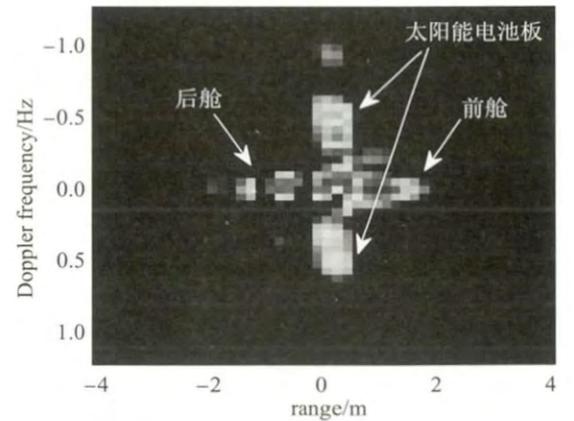


图 6 原始数据的超分辨成像

Figure 6 Super-resolution image with original data

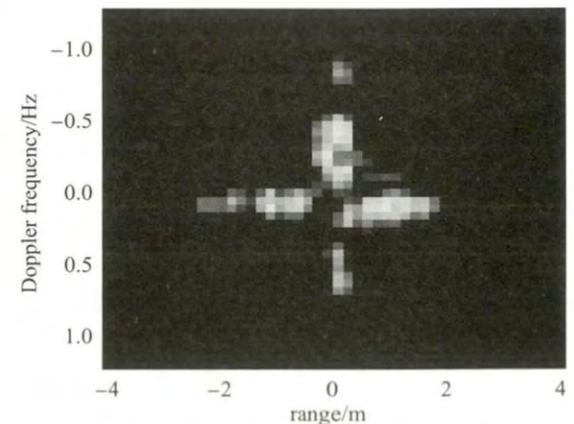


图 7 压缩感知重构后的超分辨成像

Figure 7 Super-resolution image with CS reconstructed signals

从图 5 中可以看出, 由于雷达带宽较小, 原始数据的分辨率低, 只能判断目标的存在, 而无法分辨细节. 经过超分辨之后的成像结果如图 6 所示, 分辨率明显提高, 于是可以分辨出上下两个太阳能电池板和左右两个舱体. 压缩感知稀疏采样并重构后的信号再经超分辨的成像结果如图 7 所示, 这一结果与图 6 逼

近. 实际雷达数据验证表明, 基于 CS 的雷达超分辨算法在保持回波信号信息的同时降低了采样数据量, 得到了比原始数据更高的分辨率.

5 算法量化分析

压缩感知虽然可以减小数据量, 但在稀疏采样的过程中, 利用测量矩阵对信号进行处理的过程有一定的计算量, 而且测量值样本数还必须满足一定的处理才能保证精确重构. 此外, 稀疏采样之后的重构和超分辨处理也有一定的运算复杂度, 因此本节对稀疏采样、重构和超分辨 4 个环节的数据量和运算量进行量化分析.

1) 稀疏采样量化分析

测量矩阵 Φ 是一个大小为 $M \times N (M \ll N)$ 的矩阵, 回波信号 \mathbf{x} 的大小为 $N \times 1$, 因此稀疏测量值 $\mathbf{y} = \Phi\mathbf{x}$ 的计算量大小为 MN 次乘法和 $M(N-1)$ 次加法. 而测量值大小需满足 $M \geq O(K \ln N)$ 才能精确重构, 所以稀疏采样的复杂度近似于 $O(KN \ln N)$.

2) 算法数据量分析

接收端需要对稀疏采样的信号进行重构来恢复原来的完整信号, 本文采用的压缩感知重构算法为 OMP 算法, 该重构算法的计算复杂度为 $O(K^2 N)^{[41]}$. 对重构后的信号再运用 BURG 算法进行超分辨处理, 根据式 (11) 和 (12) 分别将重构后的 N 个信号前向后向各外推一倍, 该过程计算量大小总和为 $2NP$ 次乘法和 $2(N-1)P$ 次加法.

综上所述, 本文算法的计算量约为 $O(K^2 N)$, 即本文算法计算量主要集中于稀疏信号的重构过程. 随着通用高速并行计算单元图形处理器 (graphics processing unit, GPU) 的快速发展, 使用 GPU 实现压缩感知的重构算法^[44] 以及压缩感知成像算法^[45-46], 其处理速度已经可以满足工程应用的要求.

6 结 语

本文针对宽带成像雷达去斜回波的稀疏性, 把压缩感知应用于雷达 ISAR 成像. 对距离向回波, 通过构造压缩感知矩阵得到稀疏的线性测量值. 在方位向上, 雷达发射随机稀疏的探测脉冲, 得到稀疏的方位向回波信号. 稀疏的成像数据经重构之后恢复出完整雷达回波. 为提高分辨率, 再把带宽外推方法应用于重构之后的雷达回波, 得到超分辨的 ISAR 像. 仿真数据和实际雷达数据验证表明, 本文方法具有较强的可行性和实用性, 适用于宽带成像雷达系统.

参考文献:

- [1] BARANIUK R, STEEGHS P. Compressive radar imaging [C]// Radar Conference IEEE, 2007, 20(7): 128-133.
- [2] 高磊, 宿绍莹, 陈曾平. 宽带雷达 Chirp 回波的正交稀疏表示及其在压缩感知中的应用 [J]. 电子与信息学报, 2011, 33(11): 2720-2726.
GAO Lei, SU Shaoying, CHEN Zengping. Orthogonal sparse representation for chirp echoes in broadband radar and its application to compressed sensing [J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2011, 33(11): 2720-2726. (in Chinese)
- [3] HERMAN M A, STROHMER T. High-resolution radar via compressed sensing [J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2009, 57(6): 2275-2284.
- [4] PATEL V M, EASLEY G R, HEALY D M Jr, CHELLAPPA R. Compressed synthetic aperture radar [J]. IEEE Journal of Selected Topics in Signal Processing, 2010, 4(2): 244-254.
- [5] ZHAO Guanghui, WANG Zhengyang, WANG Qi, SHI Guangming, SHEN Fangfang. Robust ISAR imaging based on compressive sensing from noisy measurements [J]. Signal Processing, 2012, 92: 120-129.
- [6] ONHON N O, CETIN M. A sparsity-driven approach for joint SAR imaging and phase error correction [J]. Imaging Processing, 2012, 21(4): 2075-2088.
- [7] SOLIMENE R, AHMAD F, SOLDVIERI F. A novel CS-TSVD strategy to perform data reduction in linear inverse scattering problems [J]. IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, 2012, 9(5): 881-885.
- [8] 刘记红, 黎湘, 徐少坤, 庄钊文. 基于改进正交匹配追踪算法的压缩感知雷达成像方法 [J]. 电子与信息学报, 2012, 34(6): 1344-1350.
LIU Jihong, LI Xiang, XU Shaokun, ZHUANG Zhaowen. Compressed sensing radar imaging methods based on modified orthogonal matching pursuit algorithms [J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2012, 34(6): 1344-1350. (in Chinese)
- [9] 徐建平, 皮亦鸣, 曹宗杰. 基于贝叶斯压缩感知的合成孔径雷达高分辨成像 [J]. 电子与信息学报, 2011, 33(12): 2863-2868.
XU Jianping, PI Yiming, CAO Zongjie. SAR imaging based on Bayesian compressive sensing [J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2011, 33(12): 2863-2868. (in Chinese)
- [10] KHWAJA A S, MA J W. Applications of compressed sensing for SAR moving-target velocity estimation and image compression [J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2011, 6(8): 2848-2860.
- [11] 徐建平, 皮亦鸣. 压缩感知 SAR 成像中的运动补偿 [J]. 电子与信息学报, 2012, 34(2): 294-299.
XU Jianping, PI Yiming. Motion compensation for compressive sensing SAR imaging [J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2012, 34(2): 294-299. (in Chinese)
- [12] WANG Hongxian, QUAN Yinghui, XING Mengdao, ZHANG Shouhong. ISAR imaging via sparse probing frequencies [J]. IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, 2011, 8(3): 451-455.
- [13] 刘天鹏, 刘振, 魏玺章. 基于压缩感知的脉间捷变频 SAR 成像研 [J]. 电子学报, 2012, 40(6): 1073-1078.
LIU Tianpeng, LIU Zhen, WEI Xizhang. Research on interpulse frequency agility SAR imaging via compressed sensing [J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2012, 40(6): 1073-1078. (in Chinese)

- [14] MIR H S, CARLSON B D. On the definition of radar range resolution for targets of greatly differing RCS [J]. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 2012, 61(3): 655-663.
- [15] ZHANG Lei, XING Mengdao. Achieving higher resolution ISAR imaging with limited pulses via compressed sampling [J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2009, 6(3): 567-571.
- [16] 王伟伟, 廖桂生, 朱圣棋. 基于压缩感知的双通道 SAR 地面运动目标检测方法研究 [J]. *电子与信息学报*, 2012, 34(3): 587-593.
WANG Weiwei, LIAO Guisheng, ZHU Shengqi. A compressive sensing based SAR GMTI method for dual-channel SAR system [J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2012, 34(3): 578-593. (in Chinese)
- [17] 王伟伟, 廖桂生, 吴孙勇, 朱圣棋. 基于小波稀疏表示的压缩感知 SAR 成像算法研究 [J]. *电子与信息学报*, 2011, 33(6): 1440-1446.
WANG Weiwei, LIAO Guisheng, ZHU Shengqi, ZHU Shengqi. A compressive sensing imaging approach based on wavelet sparse representation [J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2011, 33(6): 1440-1446. (in Chinese)
- [18] 刘记红, 徐少坤, 高勋章, 黎湘. 基于随机卷积的压缩感知雷达成像 [J]. *系统工程与电子技术*, 2011, 33(7): 1485-1490.
LIU Jihong, XU Shaokun, GAO Xunzhang, LI Xiang. Compressed sensing radar imaging based on random convolution [J]. *Systems Engineering and Electronics*, 2011, 33(7): 1485-1490. (in Chinese)
- [19] 谢晓春, 张云华. 基于压缩感知的二维雷达成像算法 [J]. *电子与信息学报*, 2010, 32(5): 1234-1238.
XIE Xiaochun, ZHANG Yunhua. 2D radar imaging scheme based on compressive sensing technique [J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2010, 32(5): 1485-1490. (in Chinese)
- [20] 江海, 林月冠, 张冰尘, 洪文. 基于压缩感知的随机噪声成像雷达 [J]. *电子与信息学报*, 2011, 33(3): 672-676.
JIANG Hai, LIN Yueguan, ZHANG Bingchen, HONG Wen. Random noise imaging radar based on compressed sensing [J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2011, 33(3): 672-676. (in Chinese)
- [21] 余慧敏, 方广有. 压缩感知理论在探地雷达三维成像中的应用 [J]. *电子与信息学报*, 2010, 32(1): 12-16.
YU Huimin, FANG Guangyou. Research on compressive sensing based 3D imaging method applied to ground penetrating radar [J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2010, 32(1): 12-16. (in Chinese)
- [22] 屈乐乐, 方广有, 杨天虹. 压缩感知理论在频率步进探地雷达偏移成像中的应用 [J]. *电子与信息学报*, 2011, 33(1): 21-26.
QU Lele, FANG Guangyou, YANG Tianhong. The application of compressed sensing to stepped-frequency ground penetrating radar migration imaging [J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2011, 33(1): 21-26. (in Chinese)
- [23] 卢策吾, 刘小军, 方广有. 基于感知压缩的探地雷达数据压缩采集 [J]. *电子学报*, 2011, 39(9): 2204-2206.
LU Cewu, LIU Xiaojun, FANG Guangyou. Compressive sensing for GPR data acquisition [J]. *Acta Electronica Sinica*, 2011, 39(9): 2204-2206. (in Chinese)
- [24] QU Lele, YANG Tianhong. Investigation of air/ground reflection and antenna beam width for compressive sensing SFCW GPR migration imaging [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2012, 50(8): 3143-3149.
- [25] ZHANG Jindong, ZHU Daiyin, ZHANG Gong. Adaptive compressed sensing radar oriented toward cognitive detection in dynamic sparse target scene [J]. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 2012, 60(4): 1718-1729.
- [26] BORISON S L, BOWLING S B, CUOMO K M. Super-resolution methods for wideband radar [J]. *The Lincoln Laboratory Journal*, 1992, 5(3): 441-461.
- [27] CUOMO K M. A bandwidth extrapolation technique for improved range resolution of coherent radar data [R]. Project report CJP-60 Rev. 1, Lincoln Laboratory, 4 Dec. 1992, CTIC #ADA-258462.
- [28] CUOMO K M, PIOUS J E, MAYHAN J T. Ultra-wideband coherent processing [J]. *The Lincoln Laboratory Journal*, 1997, 10(2): 203-222.
- [29] PIOUS J E, CUOMO K M, MAYHAN J T. A state-space technique for ultrawide-bandwidth coherent processing [R]. Massachusetts Institute of Technology Lincoln Laboratory, July 1999.
- [30] 朱兆达, 叶纂如, 邬小青. 一种超分辨距离多普勒成像方法 [J]. *电子学报*, 1992, 20(7): 1-6.
ZHU Zhaoda, YE Zhenru, WU Xiaoqing. An approach to super resolution range-Doppler imaging [J]. *Acta Electronica Sinica*, 1992, 20(7): 1-6. (in Chinese)
- [31] 王琦, 周峰, 邢孟道, 黄金杰. 雷达成像中稀疏孔径外推新算法 [J]. *电子与信息学报*, 2007, 29(11): 2698-2701.
WANG Qi, ZHOU Feng, XING Mengdao, HUANG Jinjie. A new algorithm for sparse aperture extrapolation in radar imaging [J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2007, 29(11): 2698-2701. (in Chinese)
- [32] WEHNER D R. High-resolution radar [M]. Artech House, 1995.
- [33] EICHEL P H, JAKOWATZ C V Jr. Phase-gradient algorithm as an optimal estimator of the phase derivative [J]. *Optics Letters*, 1989, 14(20): 1101-1103.
- [34] 朱兆达, 邱晓晖, 余志舜. 用改进的多普勒中心跟踪法进行动 ISAR 补偿 [J]. *电子学报*, 1997, 25(3): 65-69.
ZHU Zhaoda, QIU Xiaohui, YU Zhishun. ISAR motion compensation using modified Doppler centroid tracking method [J]. *Acta Electronica Sinica*, 1997, 25(3): 65-69. (in Chinese)
- [35] WANG Ling, ZHU Daiyin, ZHU Zhaoda. Improvements of ROPE in ISAR motion compensation [C]// 1st Asian and Pacific Conference on Synthetic Aperture Radar, 2007. APSAR 2007. 735-738.
- [36] MUÑOZ-FERRERAS J M, PÉREZ-MARTÍNEZ F. On the Doppler spreading effect for the range-instantaneous-Doppler technique in inverse synthetic aperture radar imagery [J]. *Geoscience and Remote Sensing Letters*, IEEE, 2010, 7(1): 180-184.
- [37] THAYAPARAN T, BRINKMAN W, LAMPROPOULOS G. Inverse synthetic aperture radar image focusing using fast adaptive joint time-frequency and three-dimensional motion detection on experimental radar data [J]. *IET Signal Processing*, 2010, 4(4): 382-394.

- [38] ZHANG Lei, SHENG Jialian, DUAN Jia, XING Mengdao, QIAO Zhijun, BAO Zheng. Translational motion compensation for ISAR imaging under low SNR by minimum entropy [J]. *Journal on Advances in Signal Processing*, 2013, 2013: 33.
- [39] DUARTE M F, BARANIUK R G. Spectral compressive sensing [J]. *Applied Computational Harmonic Analysis* (2012), <http://dx.doi.org/10.1016/j.acha.2012.08.003>.
- [40] 王军华, 黄知涛, 周一宇, 王丰华. 压缩感知理论中的广义不相关性准则 [J]. *信号处理*, 2012, 28(5): 675-679.
WANG Junhua, HUANG Zhitao, ZHOU Yiyu, WANG Fenghua. Generalized incoherence principle in compressed sensing [J]. *Signal Processing*, 2012, 28(5): 675-679. (in Chinese)
- [41] NEEDELL D. Topics in compressed sensing [D]. California: University of California, 2009.
- [42] AKAIKE H. Information theory and an extension of the maximum likelihood principle [C]// *Proceedings of 2nd International Symposium on Information Theory*, 1973: 267-281.
- [43] SCHWARTZ G. Estimating the dimension of a model [J]. *The Annals of Statistics*, 1978, 6(2): 461-464.
- [44] CHEN Liang, WU Jiaji, HUANG Bomin. GPU implementation of orthogonal matching pursuit for compressive sensing [C]// *2011 IEEE 17th International Conference on Parallel and Distributed Systems*, 7-9 2011: 1044 -1047.
- [45] WU Xifei, XIANG Hui, LU Peng. A GPU accelerated algorithm for compressive sensing based Image super-resolution [C]// *2011 Workshop on Digital Media and Digital Content Management*, 15-16 May. 2011: 198- 202.
- [46] SMITH D S, GORE J C, YANKEELOV T E, WELCH E B. Real-time compressive sensing MRI reconstruction using GPU computing and split bregman methods [J]. *International Journal of Biomedical Imaging*, 2012: 1-6.

(编辑: 秦 巍)