

基于稀疏采样的调频率估计与多目标 ISAR 成像

江 东, 童宁宁, 龙戈农

(空军工程大学防空反导学院,西安,710051)

摘要 针对目前多目标成像中关于信号调频斜率估计的算法存在着采样频率过大,以及短时条件下精度不高的问题,结合压缩感知理论,提出了一种基于稀疏采样的回波信号调频率估计与多目标 ISAR 成像方法。首先,根据目标回波信号的特点构造超完备稀疏基,将信号投影到该稀疏基上,利用高斯随机矩阵对分解后的信号进行欠采样,采用 FOCUSS 稀疏重构算法,精确提取出信号的调频斜率;然后,利用估计出的调频斜率对多目标回波信号中各个目标的回波分量进行分离和补偿;最后,基于稀疏采样对各个单目标分别进行成像。仿真实验验证了该方法的可行性和有效性。

关键词 压缩感知;稀疏采样;调频率估计;ISAR 成像

DOI 10.3969/j.issn.1009-3516.2015.05.018

中图分类号 TN95 **文献标志码** A **文章编号** 1009-3516(2015)05-0074-04

A Novel Algorithm of Chirp Rate Estimating and ISAR Imaging of Multiple Targets Based on Sparse Sampling

JIANG Dong, TONG Ningning, LONG Genong

(Air and Missile Defense College, Air Force Engineering University, Xi'an 710051, China)

Abstract: In view of the disadvantages of sampling at a high rate and long time duration in the current methods of multiple targets imaging, a novel algorithm of chirp rate estimating and Inverse Synthetic Aperture Radar (ISAR) imaging of Multiple Targets is proposed, combined with Compressive Sensing theory based on sparse sampling. Firstly, a redundancy sparse dictionary is established according to the characteristic of echo signals, the echo signals are decomposed into the sparse dictionary by utilizing Gauss random measurement matrices and focal undetermined system solver (FOCUSS) method to recover the imaging, and estimate the chirp rate accurately. Secondly, the echo separation and the motion compensation are done with the chirp rate estimated. Finally, obtaining the image of each target based on sparse sampling. And the results show that the method is feasible and valid.

Key words: compressive sensing; sparse sampling; chirp rate estimating; inverse synthetic aperture radar imaging

收稿日期: 2014-12-09

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(61372166);陕西省自然科学基金基础研究计划资助项目(2014JM8308)

作者简介: 江 东(1991-),男,湖南常德人,硕士生,主要从事雷达信号处理研究.E-mail: www.jd_283945288@163.com

引用格式: 江东,童宁宁,龙戈农.基于稀疏采样的调频率估计与多目标 ISAR 成像[J].空军工程大学学报:自然科学版,2015,16(5):74-77.
JIANG Dong, TONG Ningning, LONG Genong. A Novel Algorithm of Chirp Rate Estimating and ISAR Imaging of Multiple Targets Based on Sparse Sampling[J]. Journal of Air Force Engineering University: Natural Science Edition, 2015, 16(5): 74-77.

对于多目标 ISAR 成像,目前主要有 2 类方法:一类是基于时频分析^[1-2]的方法;另一类是基于参数估计^[3-4]的方法。但是这些多目标 ISAR 成像方法通常需要采用大信号带宽,因此对雷达系统的 A/D 转换速率及数据处理等有较高要求。近年来,Donoho 等人提出的压缩感知^[5-6](Compressive Sensing, CS)理论同时实现了信号的采样与压缩,该方法可以保证在不损失信息的情况下,用远低于 Nyquist 采样定理要求的速率采样信号,同时又可以用精确重建原始信号。

本文将压缩感知理论应用于多目标 ISAR 成像中,提出了一种基于稀疏采样的回波信号调频斜率估计方法。并利用估计出的调频斜率对多目标回波信号中各个目标的回波分量进行分离和补偿。最后,基于压缩感知对各个单目标分别进行成像。仿真实验验证了该方法的有效性。

1 信号模型

在多目标条件下,雷达回波可表示为目标上各散射点回波的线性叠加,则其在某一时刻即某一距离门内的回波信号可近似为:

$$\mathbf{S} = \sum_i \sum_j \exp\{j2\pi[(f_{d_{oi}} + f_{ROTij})nT + \kappa_i(nT)^2/2]\} \quad (1)$$

式中: $n = 1, 2, \dots, N$, N 为发射脉冲数; T 为脉冲重复周期; $f_{d_{oi}}$ 为第 i 个目标的起始频率; κ_i 为第 i 个目标的调频斜率;且 $f_{d_{oi}} = -2v_0/\lambda$, $\kappa_i = -2a/\lambda$, 其中, v_0 为径向初速度; a 为径向加速度, λ 为信号波长; f_{ROTij} 为第 i 个目标的第 j 个散射点由转动所引起的多普勒频移。

2 多目标 ISAR 成像

2.1 基于回波信号特点的超完备稀疏基构造

根据第 1 节分析的回波信号特点,构造 $L \times N$ 的超完备稀疏基为:

$$\mathbf{H} = \exp[j2\pi(fn + l\Delta kn^2)] \quad (2)$$

式中: $n = 1, 2, \dots, N$; $l = 1, 2, \dots, L$; Δk 为调频斜率的搜索步长。由式(2)可知稀疏基中的原子匹配了回波信号的固有特征。回波信号在稀疏基上的投影可以表示为:

$$\boldsymbol{\alpha} = \mathbf{H}\mathbf{S} \quad (3)$$

利用超完备稀疏基 \mathbf{H} 对回波信号 \mathbf{S} 进行稀疏分解,得到稀疏系数 $\boldsymbol{\alpha}$ 。该稀疏系数上某些元素的值会相对较大。即在某些元素上利用超完备稀疏解 \mathbf{H} 与回波信号完全匹配,完全匹配处所对应的调频

斜率搜索值即为其估计值。

2.2 基于 CS 的调频斜率估计

压缩感知理论中,利用现测矩实现信号处理过程中的采样和压缩,实现高维信号转换到低维空间中,从而使采样频率远低于奈奎斯特采样定律。其具体过程可定义为:

$$\mathbf{y} = \boldsymbol{\Phi}\mathbf{S} = \boldsymbol{\Phi}\mathbf{H}^T\boldsymbol{\alpha} \quad (4)$$

式中: $\boldsymbol{\Phi}$ 为 $M \times N$ 的测量矩阵, $M < N$, 通过验证, $\boldsymbol{\Phi}$ 和 \mathbf{H} 满足约束等距性维测。此时,为或解稀疏系数 $\boldsymbol{\alpha}$ 可等价为一个基于 l_1 范数最小化问题,即:

$$\hat{\boldsymbol{\alpha}} = \operatorname{argmin} \|\boldsymbol{\alpha}\|_1 \text{ s.t. } \|\mathbf{y} - \boldsymbol{\Phi}\mathbf{H}\boldsymbol{\alpha}\|_2 \leq \epsilon \quad (5)$$

式中: ϵ 取决于回波数据中的噪声系数。

但由于上述求解 l_0 范数最小化的问题是一个 NP 难问题,因此,只能转而求优化问题。目前常用的求解算法有很多^[7-10],每种算法都有其固定的优缺点。考虑到 ISAR 成像中信号特点,本文采用不需要先验信息的条件下也能保证一定成像质量的 FOCUSS 算法对信号进行重构。

利用 FOCUSS 算法对式(4)进行求解,并找到稀疏系数 $\boldsymbol{\alpha}$ 中最大值元素所在位置坐标,乘以设定调频斜率的搜索精度,即为某一目标回波的调频斜率 κ_i 。

2.3 信号分离过程

本文提出的多目标分离的主要步骤如下:

1) 取第 1 个距离单元内的回波信号 \mathbf{S} , 利用基于 CS 的调频斜率估计方法估算出第 1 个目标对应信号分量的调频斜率 κ_1 。

2) 将该距离单元内的信号乘以 $\exp[-j\pi\kappa_1(nT)^2]$, 并进行 FFT 处理,得到其频谱 $\mathbf{S}(\kappa_1)$, 对应的频率分量出的频谱出现尖峰。滤出尖峰区域部分 $\mathbf{S}'(\kappa_1)$, 对 $\mathbf{S}'(\kappa_1)$ 做 IFFT, 再乘以 $\exp[j\pi\kappa_1(nT)^2]$ 即为第 1 个目标在该距离单元内的信号。

3) 将原信号减去滤出的信号得到剩余的信号,对剩余信号重复进行步骤 1)、2), 直到信号能量小于原信号能量的 5%。

4) 对所有距离单元进行步骤 1)、2)、3), 得到各目标的回波信号。

2.4 基于 CS 的 ISAR 成像方法

本文利用压缩感知实现对各个目标的 ISAR 成像。设目标的回波信号为 s_{if} , $\boldsymbol{\alpha}$ 离散傅里叶矩阵 $\boldsymbol{\Psi}$ 定义为:

$$\boldsymbol{\Psi} = \frac{1}{\sqrt{N}}[\psi_0, \psi_1, \dots, \psi_{N-1}] \quad (6)$$

式中: $\boldsymbol{\psi}_n = [\varphi_0^{(n)}, \varphi_1^{(n)}, \dots, \varphi_{N-1}^{(n)}]^T$; $\varphi_m^{(n)} = \exp\{-j2\pi \frac{mn}{N}\}$, $1 \leq m, n \leq N$ 。则回波信号可表示为:

$$s_{if} = \Psi\alpha \tag{7}$$

构造一个 $M \times N$ 的随机高斯测量矩阵 Φ , N 维回波信号经过观测矩阵 Φ 降维处理之后得到的 M 维观测信号的过程可表示为:

$$y_{M \times 1} = \Phi_{M \times N} s_{ifN \times 1} = \Phi_{M \times N} \Psi_{N \times N} \alpha_{N \times 1} = \Gamma_{M \times N} \alpha_{N \times 1} \tag{8}$$

式中: Φ 为 $M \times N$ 维的随机高斯矩阵。求解式(8)为一个 NP 难问题,因此,可将其转化为一个 l_1 范数最小化问题,即:

$$\hat{\alpha} = \operatorname{argmin} \|\alpha\|_1 \quad \text{s.t.} \quad \|y - \Gamma\alpha\|_2 \leq \epsilon \tag{9}$$

式中: ϵ 取决于由回波数据中的噪声系数。

在 ISAR 成像过程中,由于很难获得回波信号的稀疏度,因此不能采用依靠稀疏度来决定迭代次数的 OMP 等重构算法。而 FOCUSS 算法可以在不需要先验信息的条件下高质量地完成对信号的重构。通过 FOCUSS 算法对信号进行重构,从而求解出式(9)中的稀疏系数 α , α 即为回波信号的一维距离序列。同理,在方位压缩中利用 CS 进行处理,便可以得到目标的二维 ISAR 成像结果。

3 CS 与 FRFT 在估计调频斜率精度上的比较分析

FRFT 作为一种时频分析方法,在估计线性调频信号参数时具有无交叉项干扰、运算量小以及实现过程简单等优点。但其最小频率分辨能力受信号积累时长、采样频率和角度搜索步长的限制,即:

$$\Delta f_{\min} \approx f_s \Delta l / T \tag{10}$$

因此,在采样频率一定的条件下,要提高频率分辨力,就需要延长信号观测时间 T ,减小小搜索步长 Δl 。而基于 CS 估计调频斜率时,可以通过增加稀疏基 H 的冗余度或减少调频斜率的搜索步长 Δk 来提高频率分辨力。

FRFT 等一系列时频分析方法均采用传统采样方法,即必须要满足奈奎斯特采样率,随着信息量的不断增加,传统的采样方法会给存储和处理设备带来巨大的压力。而 CS 作为一种新的采样体制,不受传统采样定理的要求限制,只要保证信号的稀疏性和测量矩阵的非相干性,就可以通过特定的重构算法求解出稀疏解,从而准实现对调频斜率值的准确估计。

4 仿真实验和分析

仿真实验中,雷达工作频率为 6 GHz,发射 LFM 信号带宽为 300 MHz,脉冲宽度为 4 μ s,脉冲

内采样频率 10 MHz,脉冲重复频率 50 Hz,观测时间为 5 s,积累脉冲数为 250。仿真中采用积累互相关法对回波数据进行包络对齐,采用多普勒中心法进行初相校正,对平动补偿后的数据采用距离-多普勒法成像。

假设雷达波束内有 2 个目标,它们与雷达的位置关系见图 1。雷达坐标为(0 km, -10 km),目标 1 和目标 2 沿同一方向运动,速度均为 300 m/s,加速度分别为 10 m/s² 和 15 m/s²,中心坐标分别为(-20 m, 0 m)和(40 m, 0 m)。图 2 为对回波直接进行成像的结果,从图中可以看出,目标 1 和目标 2 的回波叠加在一起,目标数目及形状无法分辨。

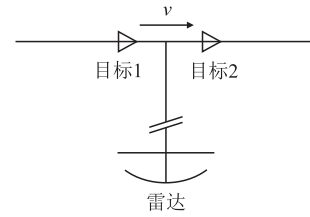


图 1 目标运动示意图

Fig.1 Schematic diagram of target motion

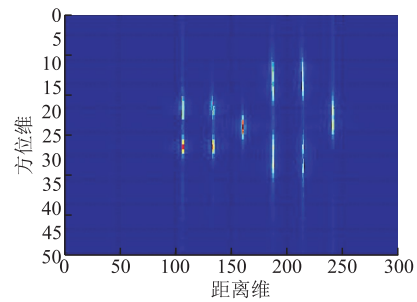


图 2 回波直接成像结果

Fig.2 Echo direct imaging results

选取回波信号第 150 个距离单元,其在稀疏基上的投影所得的能量图见图 3;其利用 FOCUSS 算法求得稀疏解的能力图见图 4。由图可知,基于 CS 的调频斜率估计,不仅能大大降低采样频率,而且其估计效果也有所改善。

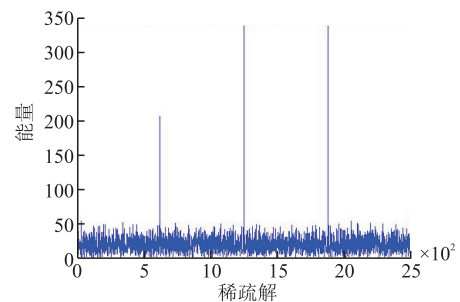


图 3 基于超完备稀疏基的原子能量图

Fig.3 Atomic energy diagram based on Overcomplete basis

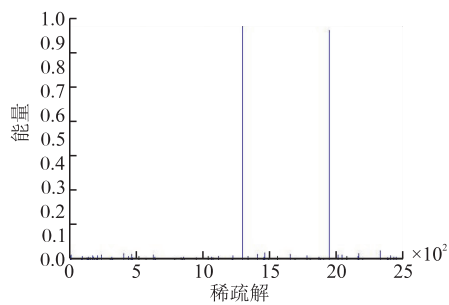
图 4 稀疏解 $\hat{\alpha}$ 的能量图

Fig.4 The energy diagram of sparse solution

对分离后的信号分别进行平动补偿,采用 CS 算法进行 ISAR 成像,得到各目标的成像结果,见图 5~6。

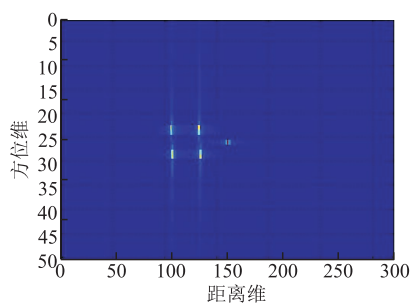


图 5 目标 1 成像结果

Fig.5 Imaging results of target 1

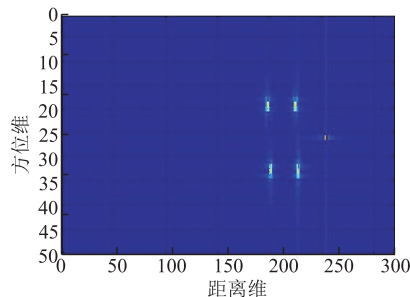


图 6 目标 2 成像结果

Fig.6 Imaging results of target 2

由图 5、图 6 显示的结果可知,利用基于 CS 的调频率估计方法对多目标信号进行分离的效果较好。对比图 2 中回波直接成像的结果,对多目标回波进行分离后的成像结果明显清晰,聚集效果较好,充分证明了文中所提方法的可行性和有效性。

5 结语

本文利用了信号的稀疏分解特性,提出了基于 CS 的调频率估计方法。与各类基于时频分析的方法不同的是,该方法在不损失参数估计精度的条件下,利用随机测量矩阵用远小于传统采样定理规定的采样频率对信号进行采样。最后仿真结果证明了该算法有效性。

参考文献(References):

- [1] 李亚楠,付耀文,黎湘. 多目标 ISAR 成像研究综述[J]. 信号处理,2009,25(7):1092-1096.
LI Ya'nan, FU Yaowen, LI Xiang. The Summarization of Multiple Targets ISAR Imaging [J]. Signal Processing, 2009, 25(7): 1092-1096. (in Chinese)
- [2] Park, S. H. ISAR Imaging of Multiple Targets Using Edge Detection and Hough Transform [J]. Journal of Electromagnetic Waves and Applications, 2008, 22(2): 365-373.
- [3] Fu X, Gao M, ISAR Imaging for Multiple Targets Based on Randomized Hough Transform [C] // Congress on Image and Signal Processing, San Ya, 2008, 238-241.
- [4] 孔令坤,张伟,张顺生,等. 一种多目标 ISAR 成像方法[J]. 现代雷达,2011,33(1):37-40,46.
KONG Lingkun, ZHANG Wei, ZHANG Shunsheng, et al. A Method of Multi-target ISAR Imaging [J]. Modern Radar, 2011, 33(1): 37-40, 46. (in Chinese)
- [5] Matthew Herman, Thomas Strohmer. High Resolution Radar via Compressed Sensing [J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2009, 57(6): 2275-2284.
- [6] Joachim H G Ender. On Compressive Sensing Applied to Radar [J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2010, 90(5): 1402-1414.
- [7] LIU Zhen, WEI Xizhang, LI Xiang. Low Sidelobe Robust Imaging in Random Frequency - Hopping Wideband Radar Based on Compressed Sensing [J]. Journal of Central South University, 2013, 45(3): 702-714.
- [8] ZHENG Haibo, ZHU Xiuchang. Sampling Adaptive Block Compressed Sensing Reconstruction Algorithm for Images Based on Edge Detection [J]. The Journal of China Universities of Posts and Telecommunications, 2013, 21(3): 97-103.
- [9] Zhang Shunsheng, Xiao Bo, Zong Zhulin. Improved Compressed Sensing for High-resolution ISAR Image Reconstruction [J]. Chinese Science Bulletin, 2014, 23(2): 2918-2926.
- [10] SUN Xiaoyu, QI Xiangyang. Novel Method of Moving Target Detection for Dual-channel Was Radar Based on Compressed Sensing [J]. Journal of Electronics (China), 2014, 31(2): 115-120.

(编辑:徐楠楠)