

· 雷达系统与技术 ·

DOI:10.16592/j.cnki.1004-7859.2021.09.009

基于压缩感知的雷达目标距离超分辨成像算法

王高飞^{*1}, 郭国强²

(1. 空装驻南京地区第一军事代表室, 南京 210039; 2. 南京电子技术研究所, 南京 210039)

摘要:针对传统雷达匹配滤波处理的距离分辨严格受限于信号带宽的问题,提出了基于压缩感知的雷达目标距离超分辨算法并对其进行了性能分析。通过数学推导给出了距离超分辨算法的理论模型和求解算法,通过仿真实例分析了不同信噪比条件下算法的性能边界。基于某雷达实录的目标回波数据验证了算法的性能,仿真和实录数据表明,基于压缩感知的超分辨算法在信噪比 ≥ 20 dB条件下,可精确获取6倍以上的距离高分辨率估计,估计误差小于-10 dB。

关键词:压缩感知;距离高分辨;稀疏恢复

中图分类号:TN95;TP301.6 文献标志码:A 文章编号:1004-7859(2021)09-0054-05

引用格式:王高飞, 郭国强. 基于压缩感知的雷达目标距离超分辨成像算法[J]. 现代雷达, 2021, 43(9): 54-58.

WANG Gaofei, GUO Guoqiang. Range super-resolution imaging for radar targets based on compressive sensing[J]. Modern Radar, 2021, 43(9): 54-58.

Range Super-resolution Imaging for Radar Targets Based on Compressive Sensing

WANG Gaofei^{*1}, GUO Guoqiang²

(1. The First Military Representative Office of the Air Force Equipment Department, Nanjing 210039, China)

(2. Nanjing Research Institute of Electronics Technology, Nanjing 210039, China)

Abstract: The radar range resolution of conventional matched filter is limited strictly by the signal bandwidth. In order to obtain super-resolution within limited signal bandwidth, a range super-resolution imaging for radar targets using compressive sensing is proposed. The theoretical model and algorithm for range super-resolution are presented. The performance analysis on different conditions of SNR (Signal-to-Noise Ratio) is researched by simulations. Moreover, experimental results are presented. The simulation and experimental results indicate that the range super-resolution can be improved more than six-times than traditional pulse compress processing with estimation error less than -10 dB, when target's SNR is larger than 20 dB.

Key words: compressive sensing; range super-resolution; sparse recovery

0 引言

现代雷达系统常采用高的距离分辨率来改善雷达的群目标分辨能力,并通过高分辨率距离一维像来提升目标识别性能,以及实现高分辨率雷达成像^[1-5]。根据模糊函数理论,距离分辨率取决于脉冲压缩处理后波形的时域主瓣宽度(通常为信号频谱宽度的倒数)。常规处理方式下,高距离分辨率主要通过增大发射信号的带宽来实现,但是信号带宽的增加无疑给硬件处理能力和处理设备量提出了更高的要求。

为此,人们一直在探讨在信号带宽受限的条件下如何利用信号处理的手段来提高距离分辨率,即突破常规匹配滤波时域宽度的限制。目前,常见的方法有反卷积、线性预测法、特征法、条件匹配滤波器、最小方

差无失真等^[6-8]。这些方法本质上都是利用了包含信号带宽以外的全部频谱信息,实现信号带宽外推,从而使得距离分辨率得到提高。处理过程中受采样频率、噪声模型以及信噪比等因素影响较大。

压缩感知理论表明在一定稀疏约束条件下高分辨可以从远少于通常认为的必要信息的数据中恢复获得^[9-12]。近年来,该技术被广泛应用于雷达超分辨成像。文献[13-15]给出了基于压缩感知的超分辨成像相关理论框架和求解方法,并验证了相关技术的有效性。

由于压缩感知获取距离超分辨算法的基本思想是基于目标的散射点在距离维的稀疏分布特性,从稀疏样本中高概率恢复出原始目标的散射特性,因此其性能与实际目标散射点分布的稀疏特性、信噪比(SNR)等因素相关。

针对上述问题,本文开展了基于压缩感知的雷达

目标距离超分辨算法性能分析。分析了不同信噪比和散射点分布情况下的超分辨性能,给出了距离超分辨性能评估模型和性能边界,并通过某雷达实录数据完成了算法性能验证。

1 距离超分辨算法

1.1 问题建模

假定雷达发射信号为 $s(t)$, 目标在距离向有 K 个散射点组成, 则雷达接收的目标反射信号为

$$x(t) = \sum_{k=1}^K \sigma_k s(t - \tau_k) + n(t) \quad (1)$$

式中: σ_k 和 τ_k 分别为目标第 k 个散射点对应的散射复系数和传播时延; $n(t)$ 为噪声信号。经过雷达脉冲压缩处理后, 回波信号可以写为

$$\begin{aligned} y(t) &= x(t) * h(t) = \\ &\sum_{k=1}^K \sigma_k s'(t - \tau_k) + n'(t) \end{aligned} \quad (2)$$

式中: $h(t) = s^*(t_0 - t)$ 。

对于线性调频信号(LFM), 式(1)中的 $s(t)$ 可以写为

$$s(t) = \begin{cases} e^{j\pi \frac{B}{T} t^2} & -\frac{T}{2} \leq t < \frac{T}{2} \\ 0 & \text{其他} \end{cases} \quad (3)$$

脉压后的信号为

$$s'(t) = \sqrt{BT} \frac{\sin(\pi B(t - t_0))}{\pi B(t - t_0)} \quad (4)$$

该信号的时域主瓣宽度为 $1/B$ 。因此当目标多个距离对应的散射点时延 $\tau_k < 1/B$ 时, 常规方法将难以分辨。

离散采样情况下, 式(2)中的目标回波信号可以写为

$$\begin{aligned} y(m) &= x(m) * h(m) = \\ &\sum_{k=1}^K \sigma_k s'(m - \tau_k) + n'(m) \end{aligned} \quad (5)$$

进一步, 式(5)中的回波信号可以写为

$$\begin{bmatrix} y(1) \\ y(2) \\ y(3) \\ \vdots \\ y(M) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} s'(1 - \tau_1) & s'(1 - \tau_2) & \cdots & s'(1 - \tau_K) \\ s'(2 - \tau_1) & s'(2 - \tau_2) & \cdots & s'(2 - \tau_K) \\ s'(3 - \tau_1) & s'(3 - \tau_2) & \cdots & s'(3 - \tau_K) \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ s'(M - \tau_1) & s'(M - \tau_2) & \cdots & s'(M - \tau_K) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \delta(1) \\ \delta(2) \\ \delta(3) \\ \vdots \\ \delta(K) \end{bmatrix} \quad (6)$$

其矩阵形式为

$$\mathbf{y} = \mathbf{S}\boldsymbol{\sigma} \quad (7)$$

当雷达信号带宽一定且采样频率和信号带宽相当时, 脉压后目标回波信号有效采样点数 M 较少 ($M \ll K$), 距离超分辨的目标是通过有限的回波采样数据 $y(m)$, $m = 1, 2, \dots, M$ 求解出更多距离上的散射系数 $\sigma(k)$, $k = 1, 2, \dots, K$, 实现目标的距离超分辨。

显然, 上述问题是一个欠定方程求解问题, 理论上可获得无穷多个解。然而, 通常情况下, 目标仅有若干个强散射点, 散射点数目远小于设定的距离采样点数, 即 $\sigma(k)$, $k = 1, 2, \dots, K$ 中的较大元素个数远小于 K 。由此, 可将问题纳入压缩感知理论框架之下进行建模求解。

假定目标散射点距离上稀疏分布, 可以构建如下稀疏方程

$$\min_{\boldsymbol{\sigma}} \|\boldsymbol{\sigma}\|_0, \quad \text{s. t. } \|\mathbf{y} - \mathbf{S}\boldsymbol{\sigma}\|_2 \leq \varepsilon \quad (8)$$

距离超分辨主要通过求解上述方程获得。下一节将具体介绍该方程的求解方法。

1.2 问题求解

式(8)给出的稀疏恢复方程为欠定问题, 可采取松弛算法进行求解^[11]。将 l_0 范数约束转化为更容易处理的模型, 如 l_q ($0 < q \leq 1$) 范数约束。可以证明, l_q ($0 < q \leq 1$) 范数也能够保证解的稀疏性。这里采用了 l_1 范数约束, 则式(8)可以写为

$$\min_{\boldsymbol{\sigma}} \|\boldsymbol{\sigma}\|_1, \quad \text{s. t. } \|\mathbf{y} - \mathbf{S}\boldsymbol{\sigma}\|_2 \leq \varepsilon \quad (9)$$

根据凸优化理论, 问题(9)的拉格朗日方程为

$$\frac{1}{2} \|\mathbf{y} - \mathbf{S}\boldsymbol{\sigma}\|_2^2 + \lambda \|\boldsymbol{\sigma}\|_1$$

定义

$$\begin{aligned} F(\boldsymbol{\sigma}) &= \frac{1}{2} \| \mathbf{y} - \mathbf{S}\boldsymbol{\sigma} \|_2^2 + \lambda \| \boldsymbol{\sigma} \|_1 = \\ &f(\boldsymbol{\sigma}) + \lambda g(\boldsymbol{\sigma}) \end{aligned} \quad (10)$$

则式(9)可以写为

$$\begin{aligned} \boldsymbol{\sigma} &= \arg \min \frac{1}{2} \| \mathbf{y} - \mathbf{S}\boldsymbol{\sigma} \|_2^2 + \lambda \| \boldsymbol{\sigma} \|_1 = \\ &\arg \min f(\boldsymbol{\sigma}) + \lambda g(\boldsymbol{\sigma}) \end{aligned} \quad (11)$$

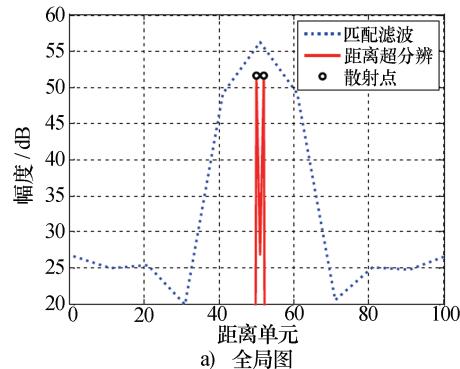
上述优化问题可以采用很多种方法来求解^[11, 16-17], 例如匹配追踪算法, 凸优化算法, 迭代阈值算法, 贝叶斯算法。上述方法中, 匹配追踪算法在变换矩阵相干性不好时效果会变得很差; 凸优化算法和贝叶斯算法的复杂度很高, 不适合工程应用。而迭代阈值算法在每次迭代中仅仅存在两次矩阵运算, 算法复杂度可以大大降低; 然而, 传统的迭代阈值算法收敛性能较差。综上所述, 这里采用了一种快速迭代阈值收缩算法(FISTA)算法^[18]来优化求解上述代价函数, 该算法较传统迭代阈值算法可成倍地提高算法收敛速度。

2 性能分析和验证

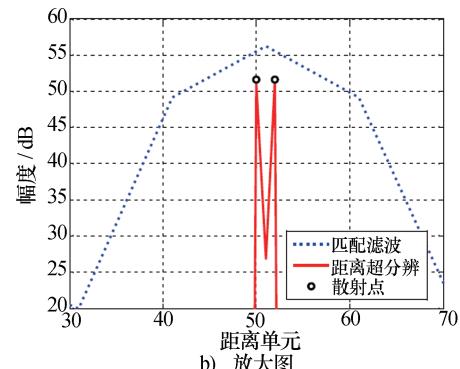
这一节主要通过数值仿真和试验数据分析验证算法性能。

仿真参数: 工作频段为 S 波段, 雷达发射信号带宽为 30 MHz, 信号脉冲宽度为 10 μs, 信号形式为 LFM, 接收信号采样频率为 30 MHz。

假定两个散射点距离间隔为 0.2 倍采样间隔(距离间隔 1 m), 散射点强度设置为(1, 1), 相位随机, 信噪比为 20 dB。根据式(6)构建字典矩阵 \mathbf{S} , 距离间隔 0.2 m。根据式(8)构建超分辨求解模型。根据 2.2 节给出的方法可完成散射点提取。图 1 给出了该条件下距离超分辨结果。为了进一步评估距离超分辨算法性能, 图 2 给出了不同散射点间隔条件下距离超分辨性能随回波 SNR 的变化关系。其中, 距离超分辨性能通过超分辨估计误差计算获得, 具体为 $20\lg(\|\hat{\boldsymbol{\sigma}}-\boldsymbol{\sigma}\|/\|\boldsymbol{\sigma}\|)$ 。可以看出, 随着信噪比的增加和散射点距离间隔增大, 超分辨的估计性能有明显改善。信噪比 20 dB 条件下, 本文提出的方法可实现 5 倍以上的距离高分辨估计, 在信噪比 25 dB 条件下, 可实现 10 倍以上的距离高分辨估计(估计误差小于 -10 dB)。



a) 全局图



b) 放大图

图 1 距离超分辨结果

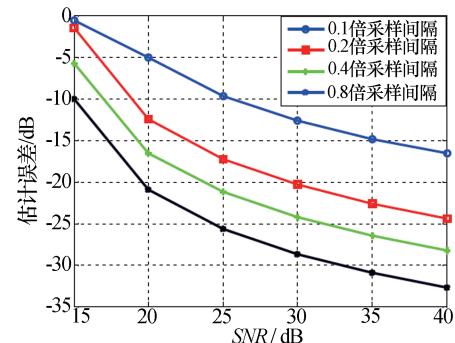


图 2 距离超分辨性能与信噪比关系

在数值仿真的基础上, 进一步利用某雷达实录数据进行算法性能验证。雷达工作频段为 S 波段, 信号带宽为 150 MHz, 采样频率为 150 MHz, 信号形式为 LFM。为了验证距离超分辨算法性能, 首先利用 150 MHz 宽带回波获取目标一维距离像, 如图 3 所示, 并将其作为真值来评估距离超分辨的性能。

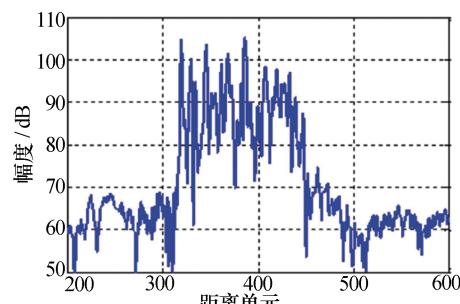


图 3 目标宽带一维像(150 MHz)

为了获得窄带信号波形, 可通过窄带滤波的方式将 150 MHz 信号滤成 20 MHz, 滤波后的信号采样频率相应地降成 20 MHz。针对滤出的窄带信号, 通过本文给出的距离超分辨方法对其进行处理, 可以获得相应带宽条件下距离超分辨结果, 如图 4 所示。

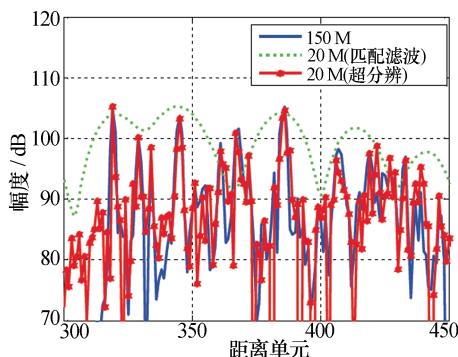


图 4 基于窄带信号的距离超分辨结果

可以看出, 基于 20 MHz 信号获得距离超分辨结果与 150 MHz 的结果基本一致, 特别是估计的强散射位置和强度。消去由于信号带宽不一致引起的信号平均功率差异, 基于 20 MHz 窄带信号超分辨估计的一维距离像和宽带一维像(150 MHz)误差 ≤ -10.9 dB。

3 结束语

本文开展了基于压缩感知的目标距离超分辨算法性能分析, 该方法突破了传统脉压压缩处理方法获得的距离分辨率受雷达信号带宽的严格限制, 可基于常规雷达的窄带信号精确获得目标的高分辨的一维距离像。通过仿真实例验证了算法的性能和边界条件, 并针对某雷达实录目标回波数据, 完成了算法的实测数据验证, 为算法的工程应用奠定基础。仿真和实录数据表明, 基于压缩感知的超分辨算法在 $SNR \geq 20$ dB 条件下, 可精确获取 6 倍以上的距离高分辨估计, 估计误差小于 -10 dB。

参 考 文 献

- [1] LI H J, WANG Y D, WANG L H. Matching score properties between range profiles of high-resolution radar targets [J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2001, 44(4): 444–452.
- [2] MITCHELL R A, WESTERKAMP J J. Statistical feature based HRR radar classification [C]// Proceedings of the IEEE Aerospace and Electronics Conference. Colombia, USA: IEEE Press, 1998: 111–118.
- [3] LIAO X, RUNKLE P, CARIN L. Identification of ground targets from sequential high-range-resolution radar signatures [J]. IEEE Transactions on Aerospace & Electronic Systems, 2002, 38(4): 1230–1240.
- [4] 邓 泳, 王彩云. 高分辨率雷达信号参数对目标识别的影响[J]. 现代雷达, 2008, 30(8): 40–45.
- DENG Yong, WANG Caiyun. Impact of high resolution radar waveform parameters on target classification [J]. Modern Radar, 2008, 30(8): 40–45.
- [5] 李宝柱, 袁 起, 何佩琨, 等. 一种利用宽带信号辨识目标分离的新方法[J]. 现代雷达, 2011, 33(2): 27–30.
- LI Baozhu, YUAN Qi, HE Peikun, et al, A new method of discriminating target separation using wide band signals [J]. Modern Radar, 2011, 33(2): 27–30.
- [6] GRABRIEL W F. Improved range super-resolution via bandwidth extrapolation [C]// Proceedings of the Conference. Lynnfield MA: IEEE Press, 1993: 123–127.
- [7] 倪晋麟, 储晓彬, 林幼权. 基于去卷积距离超分辨方法的机理及限制条件[J]. 系统工程与电子技术, 2000, 22(3): 62–64.
NI Jinlin, CHU Xiaobin, LIN Youquan. The principle and limitation of the range super-resolution algorithms based on deconvolution [J]. Systems Engineering and Electronics, 2000, 22(3): 62–64.
- [8] 姚红梅, 王军锋, 刘兴钊. 最小熵谱外推技术及其在雷达超分辨中的应用[J]. 现代雷达, 2005, 27(3): 19–20.
YAO Hongmei, WANG Junfeng, LIU Xingzhao. A minimum entropy spectrum extrapolation technique and its application to radar super-resolution [J]. Modern Radar, 2005, 27(3): 19–20.
- [9] 晋本周, 吴 刚. 基于压缩感知的超分辨目标散射中心估计[J]. 现代雷达, 2015, 37(12): 29–33.
JIN Benzhou, WU Gang. Super-resolution scattering centers estimation based on compressed sensing [J]. Modern Radar, 2015, 37(12): 29–33.
- [10] AUD A R M, BELL M R. Sparse recovery and resolution of pulse-Doppler radar [C]// 2014 IEEE Radar Conference. Cincinnati, OH: IEEE Press, 2014: 824–828.
- [11] DONOHO D L. Compressed sensing [J]. IEEE Transactions on Information Theory, 2006, 52(4): 1289–1306.

- [12] BARANIUK R G. Compressive sensing[J]. IEEE Signal Processing Magazine, 2007, 24 (4): 118–121.
- [13] CANDES E J, WAKIN M B. An introduction to compressive sampling [J]. IEEE Signal Processing Magazine, 2008, 25(2): 21–30.
- [14] 曲长文,徐 舟,陈天乐. 稀疏条件下基于散射点估计的 SAR 切片超分辨重建[J]. 电子与信息学报, 2015, 37(1): 71–77.
QU Changwen, XU Zhou, CHEN Tianle. Super-resolution reconstruction of SAR section based on scattering center estimation and sparse constraint[J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2015, 37(1): 71–77.
- [15] FANG Jian, XU Zongben, CHEN Bing. Fast compressed sensing SAR imaging based on approximation observations [J]. IEEE Journal for Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing, 2014, 7(1): 352–356.
- [16] 吕明久,李少东,杨 军,等. 频率步进信号距离-方位联合超分辨成像方法[J]. 电波科学学报, 2016, 31 (3): 537–545.
- LÜ Mingjiu, LI Shaodong, YANG Jun, et al. Range-azimuth joint ISAR super-resolution imaging method based on frequency-stepped signal [J]. Chinese Journal of Radio Science, 2016, 31(3): 537–545.
- [17] 邹建成,车冬娟. 信号稀疏表示方法研究进展综述 [J]. 北方工业大学学报, 2013, 25(1): 1–4.
ZOU Jiancheng, CHE Dongjuan. Research on signal sparse representation[J]. Journal of North China University of Technology, 2013, 25(1): 1–4.
- [18] DANIELE B, MARK D P. Learning dictionaries for sparse approximation using iterative projections and rotations[J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2013, 61 (8): 2055–2065.

作者简介:

王高飞 女,1976 年生,硕士,高级工程师,研究方向为雷达工程与信号处理;

郭国强 男,1983 年生,博士,研究员级高级工程师,研究方向为雷达信号处理。