

基于压缩感知的合成孔径雷达二维成像算法

李炳杰, 李旭威, 闫龙

(空军工程大学理学院, 西安, 710051)

摘要 通过对合成孔径雷达回波信号的分析,利用压缩感知理论基于信号稀疏性或可压缩性的基本原理,提出了方位稀疏表示的一种新方法,在此基础上给出了基于压缩感知的SAR回波信号处理方法和二维成像算法,实现了压缩感知对信号的全新采集和编解码,以较少的数据量实现成像,有效地抑制旁瓣,在一定程度上提高了成像中目标的分辨率,为有效降低高分辨合成孔径雷达的数据率提供了一种有效途径。通过对仿真数据和实测数据的处理验证了所提方法的可行性和有效性。

关键词 合成孔径雷达;二维成像;压缩感知;方位压缩

DOI 10.3969/j.issn.1009-3516.2015.04.009

中图分类号 TN957.52;TN919.81 **文献标志码** A **文章编号** 1009-3516(2015)04-0037-05

Research on Synthetic Aperture Radar 2D Imaging Based on Compressed Sensing

LI Bingjie, LI Xuwei, YAN Long

(Science College, Air Force Engineering University, Xi'an 710051, China)

Abstract: By the use of the principle of compressed sensing (CS) theory which is based on the sparsity or compressibility of signals, a new sparse representation for azimuth is proposed through the analysis of synthetic aperture radar echo signal. On this basis, a SAR echo signal processing method is obtained and a 2D SAR imaging algorithm which achieve a fire-new data collection and coding of signal is established. The use of this algorithm not only suppresses the side lobe effectively but also enhances the resolution of imaging target to a certain extent, and simultaneously needs less amounts of data for imaging, which provides an efficient path of decreasing the data rate of high resolution synthetic aperture radar. The feasibility and validity of the method proposed in this paper are tested through processing both simulated data and real radar data.

Key words: synthetic aperture radar; 2D imaging; compressed sensing; azimuth compression

压缩感知理论是一种基于信号稀疏性或可压缩性,通过非相关测量和非线性优化算法实现对信号的采集、编解码的理论^[1-2]。这种新的信号处理理论

突破了奈奎斯特(Nyquist)采样定理的限制,为解决高分辨合成孔径雷达(SAR)面临的高采样率、大数据量和实时处理困难等问题提供了一种有效途径。

收稿日期:2014-10-27

基金项目:陕西省自然科学基金资助项目(2011JM8031)

作者简介:李炳杰(1963—),男,甘肃会宁人,教授,博士,主要从事最优控制数值算法以及最优化理论研究。E-mail: libingjie45@yahoo.com.cn

引用格式: 李炳杰,李旭威,闫龙. 基于压缩感知的合成孔径雷达二维成像算法[J]. 空军工程大学学报:自然科学版,2015,16(4):37-41. LI Bingjie, LI Xuwei, YAN Long. Research on Synthetic Aperture Radar 2D Imaging Based on Compressed Sensing[J]. Journal of Air Force Engineering University: Natural Science Edition, 2015, 16(4): 37-41.

待处理信号在某个基或字典上可稀疏表示是CS理论应用的前提。因此,压缩感知理论应用于雷达成像的关键基础问题是,对雷达回波数据的稀疏性进行分析,建立雷达回波信号稀疏化的数学模型。目前利用压缩感知理论进行合成孔径雷达成像算法的研究主要可以分为2类:一是通过对成像所需要的所有回波数据直接进行二维随机采样以实现降维测量^[3-5],降维测量前需要获取全部用于成像的回波数据,这样没有从根本上缓解系统数据速率上的压力;二是通过距离-方位二维解耦,在压缩感知雷达成像过程中只对距离向数据^[6]或者方位向数据^[7]运用压缩感知理论进行处理。

本文在具有保相性的压缩感知距离压缩算法^[6,8]的基础上,提出了方位向回波信号在时域稀疏表示模型,与距离向压缩感知算法以及距离-多普勒算法(Range-Doppler Algorithm, RDA)算法结合起来,构建了基于压缩感知的SAR二维成像算法模型。

1 问题描述

假设雷达发射的线性调频脉冲信号为:

$$S_T(t) = \text{rect}\left(\frac{t}{T_p}\right) \exp(j2\pi f_c t + j\pi k_r t^2) \quad (1)$$

式中: T_p 为发射信号的脉冲宽度; f_c 为载波的中心频率; k_r 为调频斜率; $\text{rect}(\cdot)$ 为单位矩形窗函数。则理想点目标基带回波信号为^[6]:

$$S_R(t, \eta) = A_0 \text{rect}\left(\frac{t - 2r(\eta)/c}{T_p}\right) \exp(j\pi k_r (t - 2r(\eta)/c)^2) \text{rect}\left(\frac{\eta}{T_a}\right) \exp(-j\frac{4\pi}{\lambda} r(\eta)) \quad (2)$$

式中: c 为光速; r 为雷达和目标的瞬时距离; T_a 为合成孔径时间; A_0 为常数。式(2)中含有2个指数项,第1项包含目标距离信息,第2项包含目标相位信息。经过距离向压缩后,SAR回波数据为^[2]:

$$S_M(t, \eta) = T_p A_0 \text{sinc}[\pi B_0 (t - 2R_c/c)] \text{rect}\left(\frac{\eta}{T_a}\right) \exp\left(-j\frac{4\pi}{\lambda} R_c\right) \exp\left(-j\frac{4\pi}{\lambda} (v\eta - y_0)^2\right) \quad (3)$$

2 基于压缩感知理论的SAR二维成像算法

2.1 基于压缩感知理论的方位回波压缩方法

雷达回波数据经距离向压缩处理后,假设在某一距离单元内不同方位位置强散射点的个数为 N ,

由式(3)可知,此距离单元的信号可以表示为^[2-3,6]:

$$S_M(t, \eta) = \sum_{n=1}^N A_n T_p \exp\left(-j\frac{4\pi}{\lambda} R_c\right) \exp\left(-j\frac{4\pi}{\lambda} (v_a \eta - y_n)^2\right) \quad (4)$$

若计参考信号为:

$$\varphi(\eta) = \exp(-j\frac{4\pi v_a^2}{\lambda} \eta^2) \quad (5)$$

则式(4)可以表示为:

$$S_M(t, \eta) = \sum_{n=-\infty}^{+\infty} \beta_n \varphi\left(\eta - \frac{y_n}{v_a}\right) \quad (6)$$

式中 $\beta_n = A_n T_p \exp(-j4\pi R_c/\lambda)$ 。

假设雷达系统在方位向的成像区域为 $[Y_{\min}, Y_{\max}]$,方位向分辨率为 ρ_a ,则此距离单元内方位区域可以分为 $K = 1 + (Y_{\max} - Y_{\min})/\rho_a$ 个方位区间,各区间内的目标散射中心可以用一维向量 $\boldsymbol{\beta}$ 表示:

$$\boldsymbol{\beta} = [\beta_1, \beta_2, \dots, \beta_k, \dots, \beta_K]_{1 \times K} \quad (7)$$

式中: $\beta_k = A_k T_p \exp(-j4\pi R_c/\lambda)$; A_k 为位于第 r_k 方位区间内的散射中心后向散射系数; $r_k = Y_{\min} + \Delta r k, k = 1, 2, \dots, k$ 。当某个方位区间内没有目标时,记 $\beta_k = 0$ 。我们可以利用 $\varphi(\eta)$ 的时延函数构建如下稀疏集:

$$\boldsymbol{\Psi} = [\varphi\left(\eta - \frac{Y_{\min}}{v_a}\right), \varphi\left(\eta - \frac{Y_{\min} + \rho_a}{v_a}\right), \dots, \varphi\left(\eta - \frac{Y_{\min} + \rho_a k}{v_a}\right), \dots, \varphi\left(\eta - \frac{Y_{\max}}{v_a}\right)]_{1 \times K} \quad (8)$$

则式(4)可以改写为:

$$S_M(t, \eta) = \boldsymbol{\Psi} \boldsymbol{\beta} \quad (9)$$

向量 $\boldsymbol{\beta}$ 中不为零的 N 个元素的强度和位置代表了方位区间内 N 个散射点的信息,考虑到噪声的影响,可通过求解下式得到 $\boldsymbol{\beta}$ 的稀疏逼近 $\hat{\boldsymbol{\beta}}$:

$$\min \|\boldsymbol{\beta}\|_{l_p} \quad \text{s.t.} \quad \|\boldsymbol{\Phi} S_M - \boldsymbol{\Phi} \boldsymbol{\Psi} \boldsymbol{\beta}\|_2 \leq \epsilon \quad (10)$$

式中: $\boldsymbol{\Phi}$ 为测量矩阵; ϵ 为噪声水平。

利用稀疏重建算法求解式(10)可以得到方位向上的稀疏系数 $\boldsymbol{\beta}$,即实现了相同距离单元内的散射点在方位向上的分离,从而实现SAR成像。

雷达回波数据可利用压缩感知理论先经过距离向压缩,再经方位压缩算法实现二维成像。实现压缩感知距离压缩算法时,输入信号为雷达回波原始信号,输出的SAR图像为一维距离向图像;实现压缩感知方位压缩算法时,输入信号为距离压缩后的信号,参考信号为式(5),稀疏基为式(8),输出的SAR图像为二维SAR图像。

2.2 SAR二维压缩感知成像流程

将基于压缩感知理论的信号压缩算法和匹配滤波法相结合,图1给出了基于压缩感知理论的二维SAR成像流程。

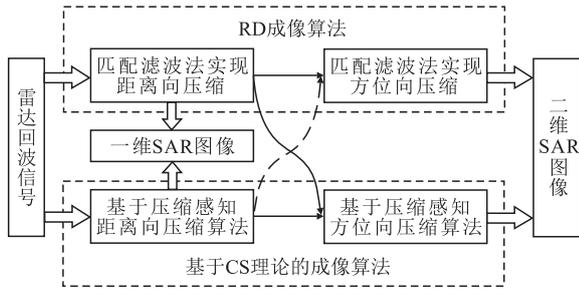


图 1 基于压缩感知理论的 SAR 成像流程

Fig.1 SAR imaging process based on compressed sensing theory

从图 1 中可以看出,基于压缩感知理论的 SAR 成像算法既可以在距离向或方位向上单独使用,也可以同时使用。为表述方便,在本文中定义距离向用压缩感知技术进行压缩、方位向匹配滤波的成像算法为 RCS 成像算法,距离向匹配滤波、方位向用压缩感知技术进行压缩的成像算法称为 ACS 成像算法,距离向和方位向上均使用压缩感知技术进行压缩的成像算法称为 RACS 成像算法。

3 SAR 压缩感知成像处理结果

本节利用仿真数据和实测数据对所提出的基于压缩感知的 SAR 成像算法的有效性进行验证。在利用 SAR 回波数据进行成像处理过程中,我们采用托普利兹矩阵作为测量矩阵对 SAR 回波信号进行降维测量,利用 SL₀ 算法^[9]对目标信息进行恢复。仿真计算时充分考虑了距离徙动校正(Range Migration Correction,RMC)^[10]对 SAR 成像的影响。

3.1 理想点目标仿真

首先在观测场景中设置了 30 个理想点目标,按照表 1 的雷达仿真参数对回波信号进行处理。

表 1 雷达仿真参数

Tab.1 Radar simulation parameters

参数	模拟值	参数	模拟值
雷达信号载频	3 GHz	观测场景长度	200 m
雷达脉冲带宽	150 MHz	飞行平台的速度	150 m/s
雷达脉冲时宽	1.5 μs	平台飞行高度	3 000 m
采样频率	300 MHz	天线孔径长度	2 m
雷达距目标	4 200 m	快时间过采样率	1.2
区域中心点		慢时间过采样率	1.25
测绘带宽度	300 m		

图 2 给出了观测场景模拟图以及用 RD 算法、RCS 算法和 RACS 算法成像的结果。图 2(a)为观测均景模拟图,图 2(b)为完整的回波数据利用 RD 算法的成像效果,图 2(c)为对回波数据在距离向上降采样 50%利用 RCS 算法的成像效果,图 2(d)为对回波

数据在距离向和方位向上均降采样 50%利用 RACS 算法的成像效果。3 种算法有效地实现了成像,这说明本文提出的基于压缩感知理论的 SAR 成像算法可以以较少的数据量较好地实现成像。

同时可以看出,RD 算法距离向和方位向上均存在旁瓣,当目标距离过近时,不利于目标的区分;RCS 算法成像结果则有效抑制了距离向上的旁瓣,方位向上还有一定模糊;利用 RACS 算法的成像,距离向和方位向上的旁瓣均得到抑制,在一定程度上提高了目标的分辨率。

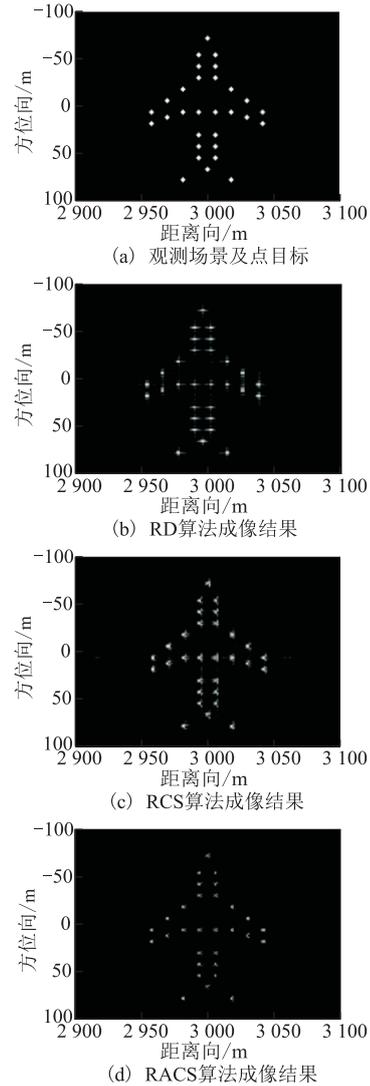


图 2 仿真实验结果

Fig.2 The simulation results

图 3 显示了基于 RACS 算法在 4 种不同降采样率下所得到的 SAR 图像,从中也可以看到降采样率的降低,图像的视觉效果越来越差,也就是说重建目标信号的信噪比越来越小。图 3(d)显示了降采样率 $CR = 0.05$ 时的 SAR 图像,目标几乎不能辨认,这是因为测绘带宽度为 300 m 的区域内分布 30 个点目标,而雷达距离向的分辨率是 1 m,这相当于目标的稀疏度仅为 10%,不满足测量值 $m =$

$o(k \log(n/k))$ 的条件,所以信号不能很好地恢复,实际的 SAR 系统测绘带宽达几十 km,当场景目标稀疏时,降采样率很低时目标也能很好恢复,这就是基于压缩感知的 SAR 成像算法的优势所在。

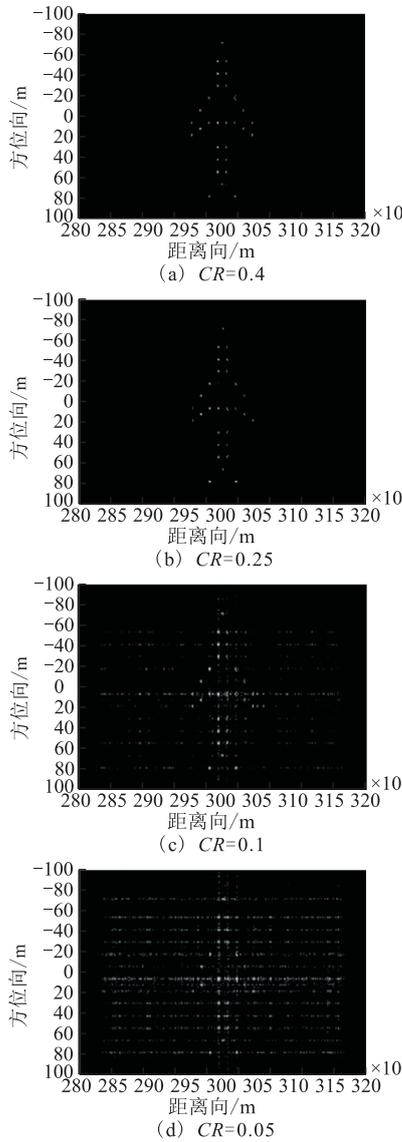


图3 不同降采样率下 RACS 算法成像结果
Fig.3 Imaging results of RACS algorithm under different lower sampling rate

综上所述,基于压缩感知的合成孔径雷达成像算法不仅能够以较少的数据量实现成像,而且可以有效抑制旁瓣,在一定程度上提高了成像中目标的分辨率。

3.2 实测数据处理

本文采用的实测数据采自加拿大温哥华的 RADARSAT-1 精细模式 2(加拿大航天局版权所有),距离带宽为 30.3 MHz,相应的斜距和地面分辨率分别约为 6 m 和 10 m,其他参数见表 2^[10]。

表 2 温哥华场景的 RADARSAT-1 参数

Tab.2 RADARSAT-1 parameters for the vancouver scene

参数	值	参数	值
采样率	32.317 MHz	有效雷达速率	7 062 m/s
脉冲宽度	30.111 MHz	距离调频率	0.721 35 MHz/ μ s
雷达频率	5.3 GHz	脉宽	41.74 μ s
雷达波长	0.056 57 m	数据窗开始时间	6.595 6 μ s
脉冲重复频率	1 256.98 Hz	卫星轨道半径	7 189 029 m

图 4(a)给出了加拿大温哥华地区英吉利海湾附近区域的实测图像。从图中可分辨出停泊在英吉利海湾的 6 艘货轮,相对于海平面来说,货轮是强散射目标,且货轮在英吉利海湾中是稀疏的,所以我们包含 6 艘货轮的部分数据作为研究对象进行处理,来验证本文提出的算法的有效性。

图 4(b)给出了降采样率为 0.5 时利用 RACS 算法对实测数据的成像处理结果。基于 RACS 算法的成像有效地重建了货船目标信息,且成像效果明显好于基于 RD 算法的成像效果,降采样率为 0.4 时货船目标仍清晰可辨。从实测数据的处理结果来看,数据量大大减少后,本文提出的基于压缩感知理论的 SAR 成像算法仍能够较好地重建各个目标信息,进一步验证了本文算法的有效性。

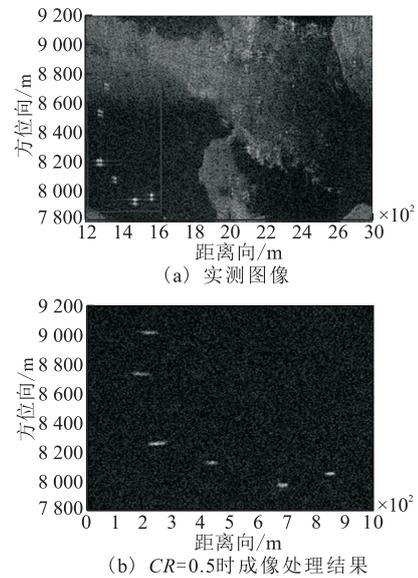


图 4 基于 RD 算法的实测数据成像
Fig.4 RD imaging algorithm based on measured data

4 结语

本文通过对 SAR 回波信号的分析,构建了基于慢时间域的稀疏表示模型,提出了压缩感知方位压缩算法,在此基础上,与 RD 算法相结合,构建了基于压缩感知的 SAR 二维成像算法。通过对仿真数据和实测数据的处理,实现了基于压缩感知的合成

孔径雷达成像,验证了本文提出算法的有效性。但是本文只对算法的有效性做了直观的探讨,今后还需要对算法精度和效率的定量比较分析方面做进一步研究。

参考文献(References):

- [1] Donoho D L. Compressed sensing [J]. IEEE Transactions on Information Theory, 2006, 52(4): 1289-1306.
- [2] Yun Lin, Wen Hong, Weixian Tan. Compressed Sensing Technique for Circular SAR Imaging[C]//IET International Radar Conference. Guilin, 2009:1123-1134.
- [3] 侯颖妮, 李道京, 洪文. 基于稀疏阵列和压缩感知理论的舰载雷达运动目标成像研究[J]. 自然科学进展, 2009(10):1110-1116.
HOU Yingni, LI Daojing, HONG Wen. Study of Moving Target Imaging of Shipload Radar Based on The Theory of Compressed Sensing and Sparse Array [J]. Progress in Natural Science, 2009(10):1110-1116.(in Chinese)
- [4] 李炳杰, 马青海, 闫龙, 等. 基于位置参数二分法控制的信号稀疏分解[J]. 空军工程大学学报:自然科学版, 2013, 14(5):89-91.
LI Bingjie, MA Qinghai, YAN Long, et al. Dichotomy Control of Positional parameter Based Signal Sparse Decomposition[J]. Journal of Air Force Engineering University; Natural Science Edition, 2013, 14(5): 89-91.(in Chinese)
- [5] Si Xiaoyun, Jiao Licheng, Yu Hang, et al. SAR Images Reconstruction Based on Compressive Sensing [C]//2nd Asian-Pacific Conference on Synthetic Aperture Radar. Xian, 2009:1056-1059.
- [6] 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): 1234-1238.(in Chinese)
- [7] ZHANG Lei, XING Mengdao, QIU Chengwei, 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.(in Chinese)
- [8] 李炳杰, 吕园, 叶萌, 等. 基于非相干准则的压缩感知观测矩阵设计的极大极小方法[J]. 空军工程大学学报:自然科学版, 2011, 12(5):81-84.
LI Bingjie, LÜ Yuan, YE Meng, et al. The Minimax Method of Design of Measurement Matrices for Compressed Sensing Based on Incoherence Criterion[J]. Journal of Air Force Engineering University; Natural Science Edition, 2011, 12(5):81-84.(in Chinese)
- [9] 赵瑞珍, 林婉娟, 李浩, 等. 基于光滑 l_0 范数和修正牛顿法的压缩感知重建算法[J]. 计算机辅助设计与图形学学报, 2012, 24(4):478-484.
ZHAO Ruizhen, LIN Wanjuan, LI Hao, et al. Reconstruction Algorithm for Compressive Sensing Based on Smoothed l_0 Norm and Revised Newton Method [J]. Journal of Computer-Aided Design & Computer Graphics, 2012, 24(4):478-484.(in Chinese)
- [10] 洪文, 胡东辉. 合成孔径雷达成像——算法与实现 [M]. 北京:电子工业出版社, 2012.
HONG Wen, HU Donghui. Digital Processing of Synthetic Aperture Radar Data: Algorithms and Implementation [M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2012.(in Chinese)

(编辑:徐楠楠)