

基于压缩感知的二维雷达成像算法

谢晓春^{①②} 张云华^①

^①(中国科学院空间科学与应用研究中心 北京 100190)

^②(赣南师范学院物理与电子信息学院 赣州 341000)

摘要: 压缩感知理论能够有效地降低高分辨率雷达成像系统的数据率。该文通过对复基带雷达回波信号模型的稀疏性分析,提出了一种具有保相性的压缩感知距离压缩算法。在此基础上建立了距离向采用压缩感知距离压缩算法,方位向采用传统的雷达成像算法处理的雷达 2 维成像方案。通过对仿真和实测逆合成孔径雷达数据的成像处理验证了方案的有效性。

关键词: 逆合成孔径雷达; 雷达成像; 压缩感知; 距离压缩

中图分类号: TN957.52

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2010)05-1234-05

DOI: 10.3724/SP.J.1146.2009.01223

2D Radar Imaging Scheme Based on Compressive Sensing Technique

Xie Xiao-chun^{①②} Zhang Yun-hua^①

^①(Center for Space Science and Applied Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

^②(School of Physics and Electronics Information, Gannan Normal University, Ganzhou 341000, China)

Abstract: Compressive sensing technique has been shown to be able to reduce effectively the data rate of high-resolution radar imaging system. A phase-preserving range compression algorithm based on Compressive Sensing (CS) technique is proposed, after analyzing the sparse characteristics of complex base-band echo signal from a target using chirp signal as transmitted signal. Based on this range compression algorithm, a 2D imaging scheme is established, i.e. performing range compression by using CS technique and performing azimuth compression by using traditional technique. The effectiveness of the 2D imaging scheme is tested through processing both simulated data and real radar data.

Key words: ISAR; Radar imaging; Compressive Sensing(CS); Range compression

1 引言

雷达成像系统在军用和民用领域有着广泛的应用,而高分辨率雷达图像的获得通常需要采用大信号带宽才能实现。随着对雷达图像分辨率的需求不断提高,以香农采样定理为基础的信号处理框架对采样速度和数据处理速度的要求越来越高,因而对宽带雷达信号获取和处理的难度在日益加剧。近年来信号处理领域中提出的压缩感知(Compressive Sensing, CS)理论指出,当信号具有稀疏性或可压缩性时,通过求解一个最优化问题,就可以依靠远低于 Nyquist 率所采集到的信号测量值实现信号的准确或近似重构^[1,2]。由于 CS 理论能够有效地降低雷达成像系统的数据率,国内外学者和科研机构陆

续展开了 CS 理论应用于雷达成像的研究工作,目前相关的研究工作已经取得了一些进展。Baraniuk 创造性地提出了基于 CS 的 SAR 成像方法^[3], Herman 引入 Alltop 序列构造 CS 雷达^[4]。此外还有研究者提出了多种应用于不同雷达系统的 CS 成像算法^[5-11]。这些方法主要是对 2 维离散回波信号进行稀疏采样,无助于降低雷达系统前端的 AD 转换器的压力。

当雷达平台与目标在单个雷达脉冲时间内的相对运动可以忽略不计时,雷达 2 维成像过程可以分解为距离像处理和方位向处理两个步骤进行。因此可以先利用 CS 理论对雷达回波数据进行距离向处理,然后对获得的距离像进行方位向处理,以实现 2 维成像。虽然一些学者提出了 1 维距离向的 CS 成像算法^[3,8,12,13],但算法所获得的距离像只包含目标的散射系数信息,没有将雷达脉冲在传播过程中所得到的相位信息保留下来供后续的方位向处理使用。

2009-09-15 收到, 2010-02-09 改回

中国科学院“十一五”技术支撑课题, 江西省自然科学基金(2009GQS0008)和江西省教育厅青年科学基金(GJJ09581)资助课题
通信作者: 谢晓春 xiexiaochun@sina.com

为了解决这些问题，本文通过对复基带雷达回波信号模型的稀疏性分析，对1维距离向的CS成像算法进行了改进，提出了具有保相性的基于CS的距离压缩算法，并构建了基于CS的雷达2维成像框架。在框架中，复基带雷达回波信号的每个脉冲都通过基于CS的距离压缩算法完成距离压缩，然后利用传统的雷达成像算法进行方位向处理以获取2维雷达图像。文中通过对仿真数据和北京13号线城铁的实测数据进行成像处理验证了成像框架的有效性。

2 复基带回波信号的稀疏性分析

基于CS雷达2维成像框架如图1所示。2维雷达图像是通过在距离-多普勒平面中显示强散射中心的位置和幅度来反映目标的轮廓信息，通常弱散射中心的回波信号对成像的贡献很小。因此，回波信号可以近似看作强散射中心回波的叠加。假设目标包含 K 个位于不同距离单元的强散射中心，那么当雷达发射的线性调频脉冲信号为 $s_T(t) = \text{rect}(t/T_P) \exp(j2\pi f_0 t + j\pi K_r t^2)$ 时，雷达系统接收到的复基带回波信号 $x_R(\tau, t)$ 可以描述为



图1 基于压缩感知的雷达成像框架

$$x_R(\tau, t) = \sum_{k=1}^K \sigma_k \exp[-j4\pi f_0 r_k(\tau)/c] \text{rect}[(t - 2r_k(\tau)/c)/T_P] \exp\{j\pi K_r [t - 2r_k(\tau)/c]^2\} + n_x(t) \quad (1)$$

其中 σ_k 为散射点 k 的后向散射系数， f_0 为线性调频脉冲信号的载频， $r_k(\tau)$ 为散射点 k 在脉冲发射时刻 τ 与雷达平台间的距离， c 为光速， T_P 为线性调频脉冲信号的时间宽度， $n_x(t)$ 为复基带回波信号中由弱散射中心回波信号合成的等效加性噪声。

若记信号 $s_0(t) = [\text{rect}(t/T)/(T_P |K_r|)] \cdot \exp(j\pi K_r t^2)$ ，则式(1)可以表示为

$$x_R(\tau, t) = \sum_{k=1}^K \{\alpha_k(\tau) s_0[t - 2r_k(\tau)/c]\} + n_x(t) \quad (2)$$

其中 $\alpha_k(\tau) = T_P |K_r| \sigma_k \exp[-j4\pi f_0 r_k(\tau)/c]$ 。

复基带回波信号 $x_R(\tau, t)$ 通过匹配滤波器后得到经过距离压缩后的输出为

$$g_R(\tau, t) = \sum_{k=1}^K T_P |K_r| \sigma_k \exp[-j4\pi f_0 r_k(\tau)/c] \cdot \text{Sinc}\{\pi T_P K_r [t - 2r_k(\tau)/c]\}$$

若仅考虑峰值处的值，距离压缩的结果可以近似表示为

$$g_R(\tau, t) = \sum_{k=1}^K \{T_P |K_r| \sigma_k \exp[-j4\pi f_0 r_k(\tau)/c] \cdot \delta[t - 2r_k(\tau)/c]\} \quad (3)$$

在对所有的雷达回波脉冲完成距离压缩后，通过方位向处理即可获得目标的2维雷达图像。

对比式(2)，式(3)，可以看出式(2)中 $s_0[t - 2r_k(\tau)/c]$ 相对于 $s_0(t)$ 的时移与式(3)中 $\delta[t - 2r_k(\tau)/c]$ 相对于 $\delta(t)$ 的时移是一致的，而且两者的系数在幅度和相位上完全相同。因此目标的复基带回波信号 $x_R(\tau, t)$ 可以表示为以信号 $s_0(t)$ 的时延序列张成的空间中的某些点， $x_R(\tau, t)$ 在该空间中具有稀疏表示，而这个稀疏表示就是目标基带回波信号 $x_R(\tau, t)$ 的匹配滤波输出。

3 基于压缩感知的距离压缩算法及雷达成像

假设雷达系统在观测区间 $[r_0, r_1]$ 中距离向的分辨率为 Δr ，则距离单元内的目标散射中心可以用一维向量 α 表示：

$$\alpha^T = [\alpha_1 \ \alpha_2 \ \cdots \ \alpha_l \ \cdots \ \alpha_{L-1} \ \alpha_L]_{1 \times L} \quad (4)$$

其中 $\alpha_l = \sigma_l \exp[-j4\pi f_0 r_l(\tau)/c]$ ， σ_l 为位于 r_l 距离单元内的散射中心后向散射系数， $r_l = r_0 + l\Delta r$ ， $l \in [1:L]$ ， $L = 1 + (r_1 - r_0)/\Delta r$ 。当某个距离单元 k 内没有目标时， $\alpha_k = 0$ 。由于ISAR成像中，目标仅占观测区域中很小的一部分面积，所以 α 中非零元素个数 K 远小于距离单元个数 L 。

将 $s_0(t)$ 延时，构建如下的稀疏基：

$$\Psi = \begin{bmatrix} s_0\left(t - 2\frac{r_0}{c}\right) & s_0\left(t - 2\frac{r_0 + \Delta r}{c}\right) & \cdots \\ s_0\left(t - 2\frac{r_0 + l\Delta r}{c}\right) & \cdots & s_0\left(t - 2\frac{r_1 - \Delta r}{c}\right) \\ s_0\left(t - 2\frac{r_1}{c}\right) \end{bmatrix}_{L \times L}$$

那么式(3)式可以描述为

$$x(t) = \Psi \alpha + n_x(t) \quad (5)$$

应用压缩感知理论，由复基带回波信号 $x(t)$ 的观测值估计 α 的问题可以描述为

$$\min_{\alpha} \|\alpha\|_p \quad \text{s.t.} \quad \|\Phi x(t) - \Phi \Psi \alpha\|_2 \leq \varepsilon \quad (6)$$

其中 Φ 为观测矩阵， ε 由噪声 $n_x(t)$ 决定。

为了能够实现对 $x(t)$ 的实时测量，同时保证重建算法的收敛性，本文采用了Kirolos等人提出的AIC(Analog-to-Information Conversion，模拟/信息转换)测量框架^[4]，如图2所示。

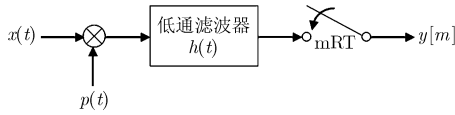


图2 基于AIC的雷达回波实时测量框架

带宽为 B 的雷达回波信号 $x(t)$ 首先与脉冲间隔 $T < 1/2B$ 的随机加权信号 $p(t)$ 相乘, 然后通过低通滤波器 $h(t)$, 最后经过采样间隔为 RT 的 A/D 转换器后就得到回波的测量数据 $y[m]$ 。结合式(5), AIC 的输出可以写为

$$y = \Phi x(t) = \Phi \Psi \alpha + n = \Theta \alpha + n \quad (7)$$

其中 Θ 即为压缩感知重建算法中所需的稀疏字典, n 为通过 AIC 后的噪声。

在获得测量值 y 后, 根据式(7), 通过稀疏贝叶斯算法^[15]即可将 $x(t)$ 在稀疏基 Ψ 中的系数 α 重建, 从而实现基于压缩感知的距离压缩, 得到如式(3)所示的1维距离像。

由式(4)对 α 的定义可知, 在完成 CS 匹配滤波后, 同时重建了雷达信号在目标与雷达间传播所积累的相位信息与目标的后向散射系数信息。所以对获得的回波测量数据逐行完成距离压缩后, 能够利用重建的相位信息, 根据传统的成像算法在方位向对获得的距离压缩数据进行处理就可以完成雷达2维成像。

4 仿真及实测数据处理

本节将通过点对目标仿真 ISAR 数据和北京 13 号线城铁实测 ISAR 数据的处理, 来对比传统的匹配滤波方法和压缩感知方法的距离压缩效果。通过两种方法获得的距离压缩数据将通过相同的 ISAR 成像算法来检验距离压缩数据的有效性。

第1组实验是对点目标仿真数据进行处理, 仿真数据的参数如表1所示。目标由5个散射点组成, 它们的分布如图3所示。成像期间, 目标以 $v_x = -63.66 \text{ m/s}$, $v_y = 3 \text{ m/s}$ 的速度在雷达波束中匀速运动。距离向上复基带回波信号的采样点数为1293点, 经过 AIC 后的测量值为130点, 下采样率为10。通过压缩感知距离压缩算法, 利用130点测量值获得的雷达回波信号距离压缩如图4(a)所示。完成距离压缩后, 在方位向按传统的 ISAR 成像算法进行平动补偿后, 获得的 ISAR 图像如图4(c)所示。图4(b)和4(d)显示了通过传统方法, 利用1293点采样值实现雷达回波信号距离压缩和 ISAR 成像的效果对比。通过图4(a), 4(b)及图4(c), 4(d)两组图的对比可以看出, 基于压缩感知的距离压缩算法能够有效地实现对雷达回波信号的距离压缩, 并且能够将散射点的方位

表1 仿真数据参数

载频	13.58 GHz
带宽	200 MHz
脉宽	2.5 μs
脉冲重复频率	500 Hz
采样频率	250 MHz
成像时间	2 s

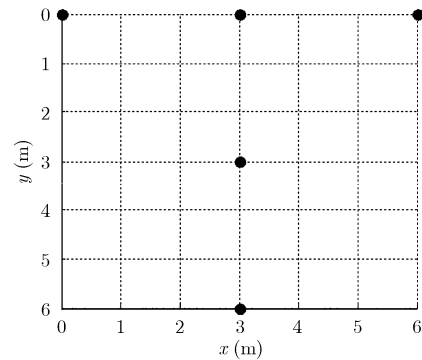


图3 目标散射点分布

向多普勒信息保留下来供 ISAR 成像算法使用。同时也可以看出, 基于压缩感知的距离压缩算法的成像结果, 在距离向上是没有旁瓣的干扰, 这是由于在算法建模时忽略了旁瓣影响的缘故。

第2组实验是对北京13号线城铁实测数据进行处理, 数据的参数如表2所示, 城铁在成像过程中以正侧视方式穿过雷达波束^[16]。距离向上复基带回波信号的采样点数为1600点, 经过 AIC 后的测量值为160点, 下采样率为10。图5(a), 5(b)两图分别显示了通过压缩感知方法, 利用160点测量值实现雷达回波信号距离压缩与通过匹配滤波方法, 利用1600点采样值实现雷达回波信号距离压缩的效果对比。图5(c), 5(d)两图是将两种距离压缩的结果采用相同的方位向匹配滤波后的成像效果对比。由图可以看出, 城铁的成像区域在距离向-18 m左右, 方位向-80 m至40 m的区间内。城铁结构的细节在图5(c), 5(d)两图中都有比较好的体现, 而基于 CS 的成像算法对

表2 城铁实测数据参数

载频	13.58 GHz
带宽	120 MHz
脉宽	8 μs
脉冲重复频率	500 Hz
采样频率	200 MHz
成像时间	8.4 s

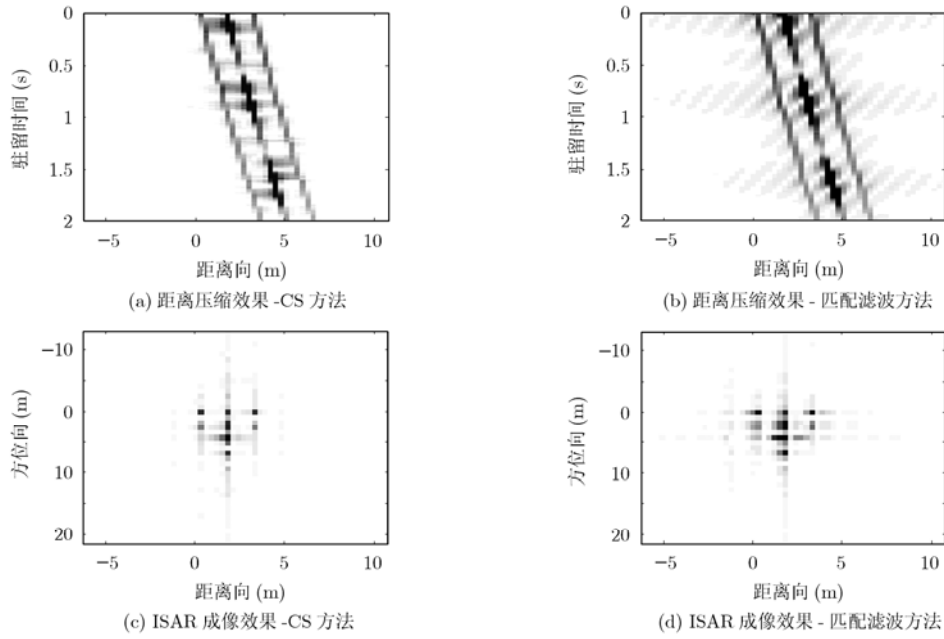


图4 仿真数据的压缩感知距离压缩与匹配滤波距离压缩成像效果对比(局部放大)

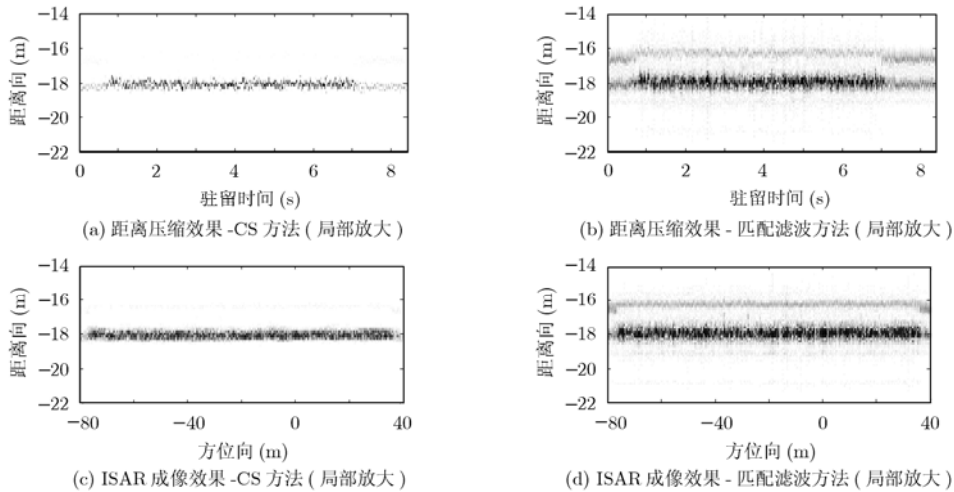


图5 实测数据的压缩感知距离压缩与匹配滤波距离压缩成像效果对比

距离向旁瓣的抑制作用使得成像效果更为清晰。

通过上面的两组数据处理可以看出，基于压缩感知的距离压缩算法能够在保证雷达成像效果不降低的前提下，极大地减少成像所需的数据量，因而能够有效地降低高分辨率雷达成像系统对数据率的要求。同时，基于 AIC 的回波数据测量框架能够保证数据测量的实时性，而不需要在获得成像所需的所有回波后再进行测量。

5 结束语

本文提出了具有保相性的基于CS的距离压缩算法，利用少量的复基带回波信号的测量值就能够有效地实现距离压缩。并且能够利用该算法得到的

相位信息，通过传统的成像算法实现雷达2维成像。成像框架的有效性得到了仿真数据和实测数据的验证。这种算法通过AIC框架能够实时获得回波数据的测量值，能够有效地降低高分辨率雷达成像系统的数据率，减少硬件系统(特别是A/D转换器)的实现难度，对于高分辨率雷达成像系统性能的提高有重要意义。但是目前算法在进行稀疏系数估计(即距离压缩)过程所需的时间比较长，还不能满足实时成像的要求，今后需要在加快算法速度方面进行研究，以提高算法的实用性。

参考文献

[1] Tsai Y and Donoho D L. Extensions of compressed

- sensing[J]. *Signal Processing*, 2006, 86(3): 549-571.
- [2] Candes E J, Romberg J, and Tao T. Robust uncertainty principles: Exact signal reconstruction from highly incomplete frequency information[J]. *IEEE Transactions on Information Theory*, 2006, 52(2): 489-509.
- [3] Baraniuk R and Steeghs P. Compressive radar imaging[C]. IEEE Radar Conference, Boston, MA, USA, Apr.17-20, 2007: 128-133.
- [4] Herman M and Strohmer T. Compressed sensing radar[C]. IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing, Las Vegas, NV, USA, Mar.30-Apr.4, 2008: 1509-1512.
- [5] Yoon Y S and Amin M G. Compressed sensing technique for high-resolution radar imaging [J]. *Proceedings of the SPIE*, 2008, Vol.6968: 69681A-69681A-10.
- [6] Varshney K R, Cetin M, and Fisher J W, *et al.* Sparse representation in structured dictionaries with application to synthetic aperture radar[J]. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 2008, 56(8): 3548-3561.
- [7] Potter L C, Schniter P, and Ziniel J. Sparse reconstruction for radar[J]. *Proceedings of the SPIE*, 2008, Vol.6970: 697003-697003-15.
- [8] Tello M, Lopez-Dekker P, and Mallorqui J J. A novel strategy for radar imaging based on compressive sensing[C]. International Geoscience and Remote Sensing Symposium, Boston, MA, USA, Jul.7-11, 2008, Vol.2: II-213-II-216.
- [9] Gurbuz A C, McClellan J H, and Scott W R Jr. GPR imaging using compressed measurements[C]. International Geoscience and Remote Sensing Symposium, International Geoscience and Remote Sensing Symposium, Boston, MA, USA, Jul.7-11, 2008, Vol.2: II-13-II-16.
- [10] Lin Yun, Hong Wen, and Tan Wei-xian, *et al.* Compressed sensing technique for circular SAR imaging[C]. IET International Radar Conference, Guilin, China, Apr.20-22, 2009: 676-679.
- [11] Lei Z, Mengdao X, and Cheng-Wei Q, *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.
- [12] Shi G M, Lin J, and Chen X Y, *et al.* UWB echo signal detection with ultra-low rate sampling based on compressed sensing[J]. *IEEE Transactions on Circuits and Systems II-Express Briefs*, 2008, 55(4): 379-383.
- [13] Jouny I. Compressed sensing for UWB radar target signature reconstruction[C]. Digital Signal Processing Workshop and 5th IEEE Signal Processing Education Workshop, Marco Island, FL, USA, Jan.4-7, 2009: 714-719.
- [14] Sami K, Jason L, and Michael W, *et al.* Analog-to-Information conversion via random demodulation[C]. IEEE Dallas Circuits and Systems Workshop, Dallas, Tex, USA, Oct.29-30, 2006: 71-74.
- [15] Ji S H, Xue Y, and Carin L. Bayesian compressive sensing[J]. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 2008, 56(6): 2346-2356.
- [16] Zhang Yun-hua, Zhang Xiang-kun, and Zhai Wen-shuai, *et al.* Moving train imaging by ground-based Ka-band radar[C]. Loughborough Antennas & Propagation Conference 2009, Loughborough, UK, Nov.16-17, 2009: 413-416.
- 谢晓春: 男, 1975年生, 博士生, 研究方向为雷达信号处理。
张云华: 男, 1967年生, 研究员, 博士生导师, 研究方向为微波遥感理论与技术、电磁场数值计算。