

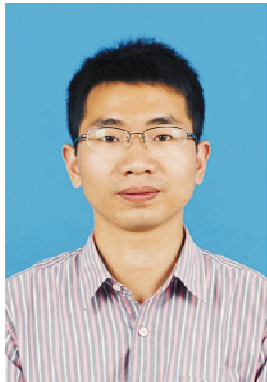
引用格式:王天云,刘冰,魏强,等. 压缩感知成像雷达研究进展[J]. 电光与控制, 2019, 26(7): 1-8. WANG T Y, LIU B, WEI Q, et al. A review on research progresses of compressed sensing imaging radar[J]. Electronics Optics & Control, 2019, 26(7): 1-8.

## 压缩感知成像雷达研究进展

### A Review on Research Progresses of Compressed Sensing Imaging Radar

王天云, 刘冰, 魏强, 康凯, 余清华, 丛波

(中国卫星海上测控部, 江苏 江阴 214431)



王天云

王天云(1986—),男,河南信阳人,2015年毕业于中国科学技术大学电磁场与微波技术专业,获博士学位,现为卫星海上测控部博士后。先后参与了国家自然科学基金、国家863、国防预研等十余项项目,目前主持省、部级在研项目3项,在国内外SCI、EI期刊及EI学术会议上发表论文40余篇,并担任国内外多个核心期刊或学术会议的审稿人。主要从事雷达探测及成像技术研究工作。

## 0 引言

压缩感知(Compressive Sensing, CS)理论是由DONOHO等从信号稀疏分解和逼近理论进一步发展得出的一种新型信号处理理论<sup>[1]</sup>。CS理论的本质内容是稀疏或可压缩信号的少量随机的线性投影即包含重构和处理的足够信息,它挑战了SHANNON的NYQUIST采样定理的理论极限,对整个信号处理领域产生了极大影响。

基金项目:国家自然科学基金(61401140);  
中国博士后基金(2017M623444)

近年来发展起来的压缩感知理论挑战了SHANNON的NYQUIST采样定理的理论极限,对信号处理领域产生了极其重要的影响。本文对压缩感知成像雷达的研究进展进行了综述,首先从压缩感知理论的基本原理出发,探讨了压缩感知应用于雷达成像领域的基本思想;重点阐述了压缩感知成像雷达的研究现状,包括合成孔径雷达、逆合成孔径雷达、多发多收雷达、探地雷达、穿墙雷达、认知雷达等多个方面;最后探讨了压缩感知成像雷达走向实用化所面临的若干挑战,并提出后续发展的相关建议。

关键词: 压缩感知理论; 雷达成像; 研究进展; 应用挑战

中图分类号: TM958.97 doi:10.3969/j.issn.1671-637X.2019.07.001

面对日益剧增的数据采集传输需求,以NYQUIST采样定理为基础的模数转换器(Analog to Digital Converter, ADC)在采样速率、处理速度、功耗、研制成本等方面面临着重大挑战,无法胜任宽带、高速率信号处理应用需求。文献[2]指出NYQUIST采样定理是信号无失真恢复的一个充分条件,但不是必要条件。压缩感知理论打破了NYQUIST采样定理的约束条件,指出采样速率应取决于信息在信号中的内容及结构分布,并非信号带宽<sup>[2]</sup>,为信号采集技术带来了革命性的突破。从理论上讲,只要找到有效的方法就能对所有的信号进行稀疏表示,均可利用压缩感知理论进行处理,因此具有广阔的应用前景。目前压缩感知理论已在多个领域获得广泛应用<sup>[3-4]</sup>,比如图像处理、无线通信、语音识别、雷达成像等。

本文较系统地探讨了压缩感知在雷达成像领域的研究进展。首先,分析了压缩感知理论应用于成像雷达领域的基本思想;接着,重点介绍

了压缩感知成像雷达的研究现状,包括合成孔径雷达(Synthetic Aperture Radar, SAR)、逆合成孔径雷达(Inverse Synthetic Aperture Radar, ISAR)、多发多收雷达(Multiple Input Multiple Output Radar, MIMO Radar)、无源雷达(Passive Radar, PR)、探地雷达(Ground Penetrating Radar, GPR)、穿墙雷达(Through the Wall Radar, TWR)、认知雷达(Cognitive Radar, CR)等多个方面;最后,深入分析了压缩感知成像雷达在实际应用时面临的若干挑战,并对其发展趋势进行了展望。

## 1 压缩感知成像雷达背景介绍

### 1.1 压缩感知理论基础

若信号能由正交基或者过完备字典的少数几个原子的线性组合准确表示,则该信号是稀疏的。在数学上,一个稀疏度为 $K$ 的信号 $\mathbf{r} \in \mathbf{R}^N$ 最多只能有 $K(K \ll N)$ 个非零值。有时,信号自身并不稀疏,而是在某个

变换域  $\Psi \in \mathbf{R}^{N \times N}$  稀疏, 此时  $r$  可以表示为  $r = \Psi x$ , 其中,  $\|x\|_0 \leq K$ 。

在 CS 理论中, 采用一个与  $\Psi$  不相关矩阵  $\Phi \in \mathbf{R}^{M \times N}$  ( $M \ll N$ ) 将信号  $r$  从高维空间映射至低维空间, 即

$$y = \Phi r = \Phi \Psi x \triangleq D x \quad (1)$$

式中:  $D = \Phi \Psi \in \mathbf{R}^{M \times N}$  为感知矩阵。

由于式(1)是欠定的, 理论存在无穷多组解。CS 理论的核心是在目标稀疏先验前提下, 证明了式(1)对应的欠定线性方程有唯一解<sup>[5]</sup>, 可以利用如下优化问题来刻画。

$Q_0$  问题

$$\begin{aligned} \min_x \|x\|_0 \\ \text{s. t. } y = D x \end{aligned} \quad (2)$$

式中:  $\|\cdot\|_0$  是  $l_0$  范数, 它表示向量  $x$  中非零元素的个数。众所周知, 式(2)对应的优化问题是一个非确定性多项式困难 (Non-deterministic Polynomial hard, NP-hard) 问题。

进一步, 考虑到观测数据通常受到噪声的影响, CS 从理论上证明了可通过求解式(3)获得原始信号的逼近解, 即

$$\begin{cases} Q_0 \text{ 问题: } \min_x \|x\|_0 \\ \text{s. t. } \|y - D x\| \leq \xi \\ Q_p \text{ 问题: } \min_x \|x\|_p \\ \text{s. t. } \|y - D x\| \leq \xi \end{cases} \quad (3)$$

式中:  $\xi$  是与噪声功率有关的参数, 表征了对噪声的容忍程度。求解式(3)对应的  $Q_p$  问题, 常见的稀疏重构算法可分为凸优化算法、贪婪算法、非凸优化算法和统计优化算法 4 大类。

## 1.2 雷达成像基础

雷达成像是指依据接收到的回波数据来正确反演目标电磁散射特性的过程。在一阶 Born 近似和远场近似的条件下, 雷达成像可以看成是线性逆问题的求解。以二维成像为例, 设接收回波为  $r(t_m)$ , 目标散射系数分布为  $\sigma(x, y)$ , 雷达辐射场为  $A(x, y, t_m)$ , 雷达成像场景为  $S$ , 则有

$$y(t_m) = \int_S A(x, y, t_m) \sigma(x, y) dx dy \quad (4)$$

可见, 雷达接收回波是成像区域内所有散射系数分布共同作用的效果。定义  $M$  为回波采样次数, 依据经典匹配滤波 (Matched Filter, MF) 成像方法, 可以得出雷达场景中任意一点  $(x_n, y_n)$  散射系数分布为

$$\sigma(x_n, y_n) = \sum_{m=1}^M y(t_m) A^*(x_n, y_n, t_m) = \int_S \sigma(x, y) W_n(x, y) dx dy \quad (5)$$

式中:  $W_n(x, y) = \sum_{m=1}^M A(x, y, t_m) A^*(x_n, y_n, t_m)$  为系统点扩散函数, 其 3 dB 宽度即为传统雷达成像分辨率。在实际应用中, 较高的旁瓣通常会妨碍邻近目标的分辨效果, 将大大减弱后续目标图像中的特征提取和识别性能<sup>[6]</sup>。因此, 研究高分辨率成像雷达一直是国内外学者关注的重点。

## 1.3 压缩感知应用于雷达成像的基本思想

依据广义孔径成像的概念, 现有的雷达成像体制, 等价于利用空间展开分布的多个雷达站或等效雷达站获得不同角度上的观测孔径。其中, 孔径的大小直接决定了成像系统的空间分辨率。考虑实际系统的限制, 如发射机和接收机数目不能太多、发射信号带宽有限、成像时间不能太长等客观条件约束, 空间谱仅能获得稀疏孔径填充效果<sup>[6]</sup>。

文献[7]指出, 基于傅里叶变换的传统雷达成像算法对稀疏孔径较为敏感, 成像结果容易出现较高的旁瓣和较宽的主瓣。压缩感知理论主要解决稀疏信号的表示和反演问题, 可以概括为在信号稀疏先验条件下求解式(4)对应的欠定方程。根据式(5)对应的雷达成像模型可知, 如果待反演的成像目标自身存在稀疏先验信息 (如对空、对海目标) 或者在某些变换域上是稀疏的 (如对地遥感成像目标), CS 理论则能够被应用至雷达成像领域。

## 2 压缩感知成像雷达成像研究现状

自 2007 年 BARANIUK 等提出压缩感知雷达<sup>[8]</sup>概念以来, 基于压缩感知理论的雷达成像技术受到了广泛关注。从应用目的角度来讲, 研究领域涵盖了缩短数据获取时间、提高成像分辨率、简化雷达硬件设计等多个方面。从应用对象角度来讲, 研究领域涵盖了合成孔径雷达 (SAR)、逆合成孔径雷达 (ISAR)、多发多收雷达 (MIMO)、无源雷达 (PR)、穿墙雷达 (TWR)、探地雷达 (GPR)、认知雷达 (CR) 等多种雷达体制。

### 2.1 压缩感知 SAR 成像

传统 SAR 体制采用经典的距离-多普勒 (Range Doppler, RD) 成像算法, 但受限于傅里叶反演方法的分辨极限, 通常成像结果具有较高的旁瓣和较宽的主瓣。文献[9]提出一种全新的 CS-SAR 处理方法, 对距离维和方位维同时应用 CS 反演方法, 大大简化 SAR 硬件系统, 但需付出较大的软件计算成本; 文献[10]提出一种基于贝叶斯压缩感知 (Bayesian Compressive Sensing, BCS) 的 SAR 高分辨成像, 通过在距离向和方位向同时随机采样, 以较少的测量数据获得重建目标空间的足够信息。由于 BCS 方法能够提供散射系数的全后验概率密度估计, 因而更适合具有杂波的成像场景; 文献[11]研究基于 1 bit 采样的 SAR 压缩感知成像方法, 构建了“ $l_2$  范数 + 非凸函数”约束的 SAR 成像方程, 并利用 ADMM 方法进行求解, 在大大降低采样速率和数据存储量的前提下, 可获得相比于传统 RD 方法更优的成像结果; 文献[12]则研究了存在相位误差下的 SAR 自聚焦成像方法, 其中, SAR 成像信号建模为

$$g = C(\phi)f + \nu \quad (6)$$

式中： $g$  为回波测量值； $C(\phi)$  为含有相位误差的系统测量矩阵； $f$  是待重构的 SAR 图像； $\nu$  是观测噪声。文中将  $\phi$  和  $f$  作为优化变量，通过交替迭代求解式(7)对应的优化问题实现 SAR 自聚焦成像，即

$$J(f, \phi) = \|g - C(\phi)f\|_2^2 + \lambda \|f\|_1 \quad (7)$$

图 1b 展示了 CS SAR 自聚焦成像结果，其中成像目标是挖掘机，可见相比图 1a 对应的传统 RD 成像结果具有更优的目标参数提取精度。

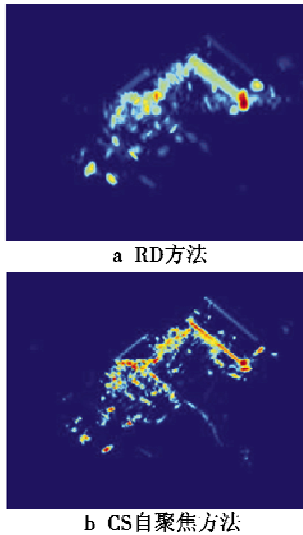


图 1 SAR 自聚焦成像结果验证

Fig.1 Verification of SAR autofocus imaging

针对大尺度成像场景，为降低 CS 成像计算量，文献[13]提出了一种分段拼接成像方法。首先重构出大场景下的距离像，然后将距离像分割成若干个子距离像，接着对每个子距离像的数据进行方位维稀疏重构操作，得到每个子成像场景，最后将这些子成像场景进行拼接处理，得到最终的 SAR 成像结果。相比于传统 CS 方法，所提算法的计算时间缩减了 85%，为大场景下 SAR 高分辨成像提供了一种可能的解决思路。

### 2.2 压缩感知 ISAR 成像

压缩感知技术在 ISAR 中的应用主要集中在利用稀疏频带及稀疏

孔径的自聚焦成像、转速估计、成像标定等方面。

文献[14]研究了基于稀疏孔径的高分辨率 ISAR 成像技术，仅利用几个离散独立的子孔径实现了对空目标较优的成像效果，如图 2 所示。

初相校正是 ISAR 运动补偿的重

要环节，需要波长量级补偿精度，但这在工程实现时存在较大困难。

文献[15]研究基于 CS 的 ISAR 自聚焦成像方法。不同方法成像结果如图 3 所示，可以看出所提 CS 自聚焦方法相比经典 PGA 和 MEM 方法能取得更好的成像质量。

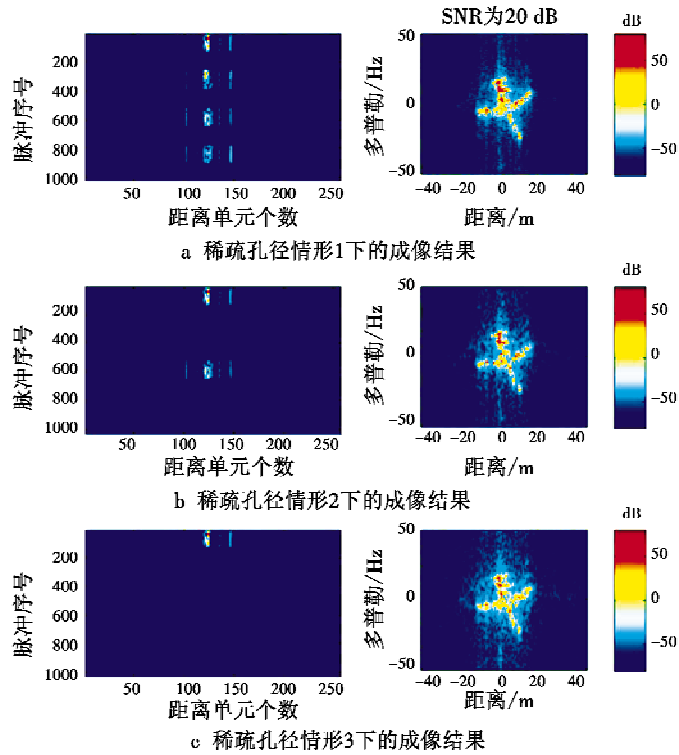


图 2 3 种稀疏孔径下的 ISAR 成像结果

Fig.2 ISAR imaging results under three kinds of sparse apertures

文献[16]针对 ISAR 成像中目标非合作运动导致系统观测矩阵存在部分参数未知的现象，提出了一种基于压缩感知技术的参数化  $l_1$  范数加权最小算法。在稀疏成像的同时估计运动目标的等效转速，通过交替迭

代求解方式实现 MIG-25 飞机成像。文献[17]则进一步研究存在目标机动情形下的双基 ISAR 成像方法，并提出了改进的 OMP 成像方法，可同时实现运动补偿、稀疏成像和成像标定功能。

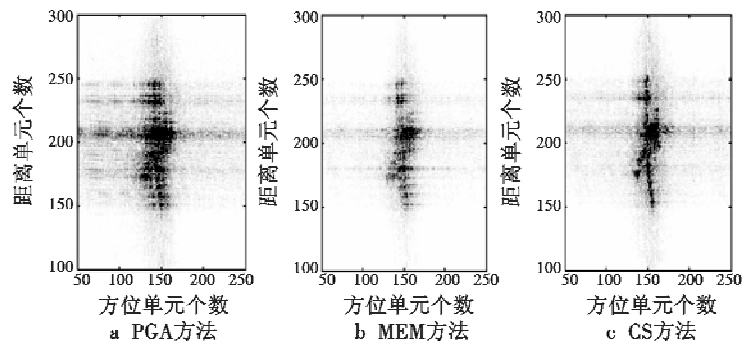


图 3 不同成像方法的 ISAR 自聚焦效果对比

Fig.3 Comparison of ISAR autofocus imaging results via different methods

### 2.3 压缩感知 MIMO 雷达成像

单站场景中应用 CS 技术的主要优势在于减少了数据采集量、存储量和发射脉冲数,而 MIMO 雷达以空间散布的多个发射机和接收机为代价,有潜力进一步减少数据获取时间,为一次快拍下的目标成像提供可能。

文献[18]将 CS 扩展至 MIMO 雷达领域,利用目标在“角度-多普勒-距离”空间的稀疏性,采用远少于传统方法的样本实现了目标“角度-多普勒-距离”信息的联合解

耦处理;文献[19]研究了基于 MIMO 阵列的前视探地雷达,并基于实测数据初步验证了 CS 理论用于 MIMO 雷达的可行性;文献[20]则讨论了地基 SAR 和 MIMO 雷达之间的内在联系,从理论分析和外场实验 2 个方面验证了两者的等效性,如图 4 所示。文献[20]指出 MIMO 雷达相比于地基 SAR,不仅可以降低硬件设计的复杂度,还能节约成像时间,尤其适用于对运动目标成像,不需要额外复杂的运动补偿。

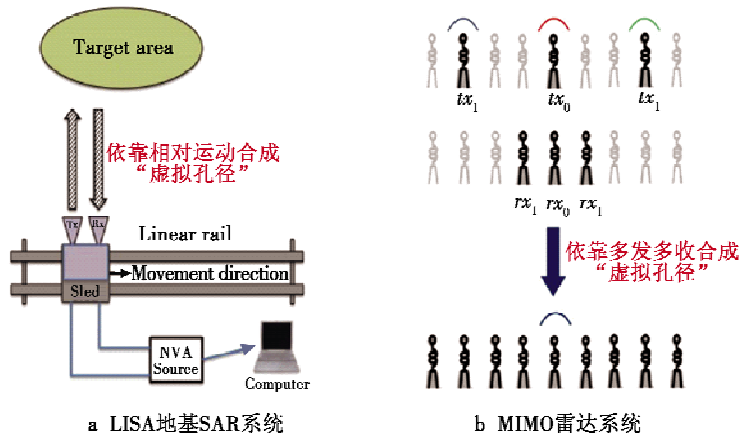


图4 地基 SAR 和 MIMO 雷达等效性分析

Fig.4 Equivalence analysis of ground-based SAR and MIMO radar

### 2.4 压缩感知无源雷达成像

近年来,基于 CS 技术的无源雷达成像得到了迅速发展。文献[21]以多电视台作为非合作空间辐射源,利用压缩感知理论通过稀少随机测量样本即可较高概率地重建目标信号的优势,提出了基于 OMP 的稀疏无源成像方法;文献[22]提出了基于“ $l_1$  范数+原子范数”约束的 OFDM 无源雷达成像,可以较好地处理偏离网格点的目标散射点;文献[23]则将“ $l_p$  范数+TV 正则化”约束引入至无源雷达成像中,等价于求解如下优化问题,即

$$\hat{f} = \arg \min_f \{ \|g - Tf\|_2^2 + \lambda_1 \|f\|_p^p + \lambda_2 \|\nabla f\|_p^p \} \quad (8)$$

式中: $\hat{f}$ 为待重构的目标图像。所提方法在 SNR 为 10 dB 时仍可以获得较好的成像质量,在图像稀疏度和边

缘特性保持上,相比于传统傅里叶成像方法具有较大的优势,如图 5 所示。

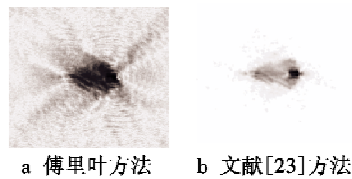


图5 联合 VHF 和 FM 调频电台的无源成像结果对比

Fig.5 Passive radar imaging results using VHF and FM stations

### 2.5 压缩感知探地雷达成像

探地雷达是一种重要遥感工具,在地雷检测、环境鉴定、考古研究等领域发挥重要作用。现有的高分辨探地成像系统通常要求高速率的时间/频率测量和精细的空间采样<sup>[24]</sup>。文献[25]根据地下目标的空间稀疏

性,将 CS 理论应用于探地雷达成像领域,通过构建离散的观测空间,综合每个“离散的目标空间位置+发射频率”模型数据来生成字典元素,分别利用仿真和实验数据验证了 CS 方法相比传统后向投影(Back-Projection, BP)方法在成像质量、稳健性和测量带宽要求上的优势,如图 6 所示。

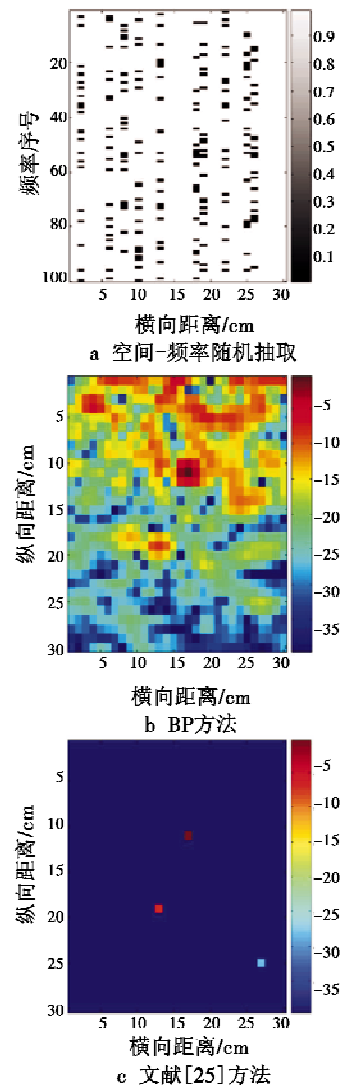


图6 探地雷达成像结果对比  
Fig.6 Imaging results of different methods for GPR

文献[26]则研制了一套前视探地成像雷达系统,基于对偶  $l_1$  稀疏先验约束,仅利用较少数据即能实现较高分辨的成像结果,且所提方法具有较高的计算速度。

### 2.6 压缩感知穿墙雷达成像

文献[27]针对超宽带(Ultra-



Wide Band, UWB) 穿墙雷达, 基于 CS 理论提出了一种新的数据采集方案和成像算法, 新的测量矩阵在每个随机选择的 天线位置 选用相同的少数频率, 更易于硬件实现, 仿真结果表明, 25% 的数据即能获得传统 Back-Projection 成像方法获得的结果, 如图 7 所示。

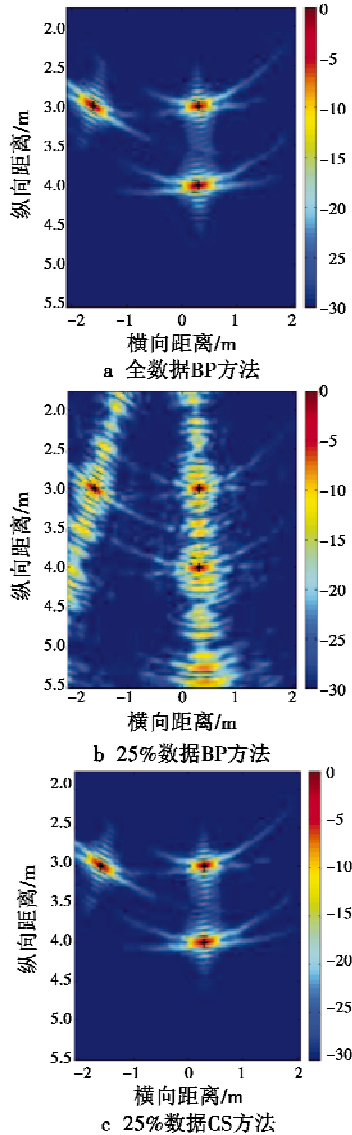


图 7 穿墙雷达成像结果对比

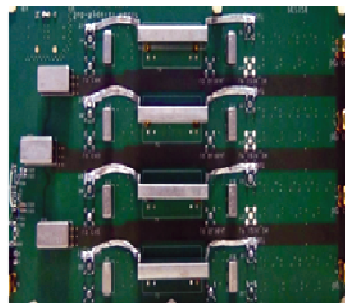
Fig. 7 Imaging results of different methods for TWR

文献[28]将变化检测(Change Detection, CD)技术用于 CS-TWR 雷达, 可以较好地剔除墙内静止目标和杂波的影响, 实现对运动人体目标的跟踪成像; 文献[29]研究了极化穿墙雷达成像问题, 利用墙体反

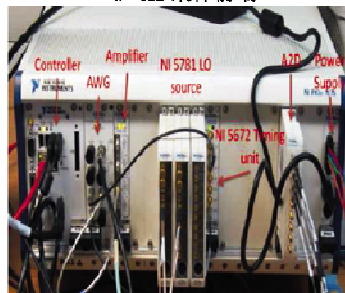
射信号的低秩特性, 以及不同极化通道图像的联合稀疏特性, 构建了  $l_{2,1}$  稀疏优化成像方程。微波暗室环境下的穿墙成像结果表明, 所提方法在 50% 采样数据情形下, 一方面可以较好地抑制墙体杂波的影响, 另一方面可以获得 4 个极化通道的高质量成像结果。

## 2.7 压缩感知认知雷达成像

不同于传统的雷达系统, 认知雷达具备对目标和场景的感知能力, 并且能够利用反馈机制来调整雷达系统的工作性能。利用基于先验知识和面向不同应用的波形优化设计技术, 以及现场实时反馈技术, 能够提升雷达系统对目标与环境的自适应能力。近年来迅速发展的压缩感知理论可以大大提升传统雷达性能。文献[30]提出一种 CS 认知雷达架构, 将 CS 理论与认知理论进行结合, 充分发挥两者优势; 更进一步, 文献[31]研制了一套认知 SAR 成像装置, 如图 8 所示, 根据成像场景自适应地更改发射波形, 仅采用 50% 的回波采样数据即能获得全数据的 RD 成像效果, 这为 CS 认知雷达走向实用化迈出了关键一步。



a AD采样前端



b 系统组成

图 8 CS 认知 SAR 系统硬件实物图

Fig. 8 Hardware of CS cognitive SAR system

综上所述, CS 应用于雷达成像一直是近年来的研究热点, 主要包括如下几个方面。

1) 利用 CS 构造全新的雷达成像体制, 简化接收处理端的硬件设计, 无需传统的匹配滤波处理, 直接通过构造观测矩阵进行目标反演。

2) 利用 CS 降低天线阵列规模 (MIMO 雷达) 或减少合成孔径的空间采样率 (SAR/ISAR), 便于工程实现。

3) 研究高效、稳健的稀疏成像算法, 从最初的贪婪算法、凸优化算法等发展到非凸优化方法 (如 FOCUSS, SLO) 以及不同类型的统计学习优化算法 (如 BCS, SBL, MSBL) 等, 并对参数的选取、算法性能进行了深入研究及分析验证。

4) 根据观测矩阵的高概率重构条件, 开展发射随机跳频、随机步进频、随机噪声信号等情形下的成像反演性能研究。

5) 压缩感知在新体制雷达中的应用, 包括凝视雷达、激光雷达、测井雷达等领域。

## 3 压缩感知成像雷达面临的若干挑战

毋庸置疑, 压缩感知在高分辨雷达领域有着巨大的应用潜力。但当前的研究大多只针对实际成像问题做了相应的近似和简化处理, 并没有考虑真实成像中成像模型、目标散射的复杂性, 在实际应用中仍存在较多亟待解决的技术难题, 包括如下 3 个方面。

### 3.1 稀疏重构方法的改进与优化

传统稀疏重构方法在实际硬件实现时通常具有较高的复杂度, 难以在 DSP, FPGA 等数字电路中直接实现, 大大制约了压缩感知雷达的实用化进程。另外, 低 SNR 情形下如何改进算法来获取稳健的目标重构性能, 也是压缩感知成像走向实用化必须要解决的重要问题。其中, 文献[32]提出了基于贝叶斯稀

疏学习技术的长时间相干积累无源雷达成像方法,在 SNR 为  $-30$  dB 情况下获得了较好的反演效果;文献 [33] 则提出了一种基于贝叶斯学习的双基 ISAR 成像,针对复杂运动目标,在低 SNR 情况下获得了比已有 CS 方法更为稳健的成像结果。

### 3.2 CS 成像模型构造及设计

鉴于大多数 CS 成像方法通常基于成像模型精确已知的前提,因此实际应用中,需要重点关注 CS 成像模型构造及设计方面。1) 首先是目标散射点没有精确位于划定的成像网格点上,即 Off-grid 问题。其本质原因是待求解的散射点空间位置是连续的,因此对成像场景离散化所构造的观测矩阵与真实回波之间必然存在失配现象<sup>[6]</sup>。GURBUZ 等利用实测数据分析了探地雷达中 Off-grid 目标对传统 CS 成像方法的影响,结果表明不合理的网格划分会造成稀疏反演性能的严重恶化<sup>[34]</sup>。文献 [35] 研究 SAR 成像中 Off-grid 问题,亦得出了类似结论。2) 其次可能是由于存在系统误差(比如在多发多收雷达系统中,通常收发布站存在相位同步误差、频率误差、位置误差等因素),或者存在部分系统参数未知(比如目标存在未合作运动)情形时,导致观测矩阵不能精确已知<sup>[6]</sup>。此时如果仍采用传统稀疏重构技术,必将取得较差的成像结果。

### 3.3 深入挖掘待重构目标和系统观测矩阵的先验信息

为了提高反演性能,可以进一步深入挖掘待重构目标和系统观测矩阵的先验信息。比如文献 [36] 开展了基于 Block-Toeplitz 观测矩阵下的三维探地雷达成像技术研究;文献 [37] 研究了具有树状结构的稀疏信号表征及相应的重构方法,取得了比传统 CS 方法更好的图像恢复效果;文献 [38] 则将图像处理中的总变差正则化(TV)技术引至雷达成像,可以较大幅度提升反演性能。

总体而言,目前仍需进一步探索高效、稳健的 CS 目标重构算法,同时,在复杂成像场景的稀疏基构造、压缩采样软硬件成本优化、CS 图像质量评价准则等方面亟待大的技术突破。

## 4 结束语

压缩感知雷达在简化雷达硬件设计、提高成像分辨率、缩短数据获取时间、减少数据存储和传输量等方面,有望实现新的技术突破,是近年来雷达成像领域发展的重要分支之一。本文较系统地对比压缩感知雷达的研究进展进行了总结与分析,包括压缩感知理论在雷达领域应用的基本思想、研究现状以及面临的若干挑战等,为后续学者深入探究其中的技术难点提供一定的参考和借鉴。

## 参考文献

- [1] DONOHO D L. Compressed sensing [J]. IEEE Transactions on Information Theory, 2006, 52(4):1289-1306.
- [2] VETTERLI M, MARZILIANO P, BLU T. Sampling signals with finite rate of innovation[J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2002, 50(6):1417-1428.
- [3] QIN Z, FAN J, LIU Y, et al. Sparse representation for wireless communications: a compressive sensing approach[J]. IEEE Signal Processing Magazine, 2018, 35(3):40-58.
- [4] BUAKHLAI S, UDOMSIRI S. Speech recognition and classification using the compressive sensing method [C]//International Conference on Frontiers of Signal Processing, 2017: 8-14.
- [5] NARAYANAN S, SAHOO S K, MAKUR A. Greedy pursuits assisted basis pursuit for reconstruction of joint-sparse signals [J]. Signal Process-

ing, 2018, 142:485-491.

- [6] 王天云. 分布式雷达稀疏成像技术研究[D]. 合肥:中国科学技术大学,2015.
- [7] MA C, YEO T S, TAN C S, et al. Sparse array 3-D ISAR imaging based on maximum likelihood estimation and clean technique [J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2010, 19(8):2127-2142.
- [8] BARANIUK R, STEEGHS P. Compressive radar imaging [C]//IEEE Radar Conference, 2007:128-133.
- [9] JIANG C L, ZHANG B C, ZHANG Z, et al. Experimental results and analysis of sparse microwave imaging from spaceborne radar raw data [J]. Science China Information Sciences, 2012, 55(8):1801-1815.
- [10] XU J, PI Y, CAO Z. Bayesian compressive sensing in synthetic aperture radar imaging [J]. IET Radar, Sonar and Navigation, 2012, 6(1):2-8.
- [11] DEMIR M, ERCELEBI E. One-bit compressive sensing with time-varying thresholds in synthetic aperture radar imaging [J]. IET Radar, Sonar and Navigation, 2018, 12(12):1517-1526.
- [12] ONHON N O, CETIN M. A sparsity-driven approach for joint SAR imaging and phase error correction[J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2012, 21(4):2075-2088.
- [13] YANG J G, THOMPSON J, HUANG X T, et al. Segmented reconstruction for compressed sensing SAR imaging [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2013, 51(7):4214-4225.
- [14] LI P, ZHANG M, ZHONG Z. Integrative wideband DOA estimation method based on sparse representa-

- tion [ J ]. *Electronics Letters*, 2011, 47(22) :1251-1252.
- [15] DU X Y, DUAN C W, HU W D. Sparse representation based autofocusing technique for ISAR images [ J ]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2013, 51(3) :1826-1835.
- [16] RAO W, LI G, WANG X, et al. Adaptive sparse recovery by parametric weighted  $l_1$  minimization for ISAR imaging of uniformly rotating targets [ J ]. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 2013, 6(2) :942-952.
- [17] KANG M, LEE S, KIM K, et al. Bistatic ISAR imaging and scaling of highly maneuvering target with complex motion via compressive sensing [ J ]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 2018, 54(6) :2809-2826.
- [18] YAO Y, PETROPULU A P, POOR H V. MIMO radar using compressive sampling [ J ]. *IEEE Journal of Selected Topics in Signal Processing*, 2010, 4(1) :146-163.
- [19] YANG J G, JIN T, HUANG X T, et al. Sparse MIMO array forward-looking GPR imaging based on compressed sensing in clutter environment [ J ]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2014, 52(7) :4480-4494.
- [20] TARCHI D, OLIVERI F, SAM MARTINO P F. MIMO radar and ground-based SAR imaging systems: equivalent approaches for remote sensing [ J ]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2013, 51(1) :425-435.
- [21] 徐浩,尹治平,刘畅畅,等. 基于压缩感知的稀疏无源雷达成像 [ J ]. *系统工程与电子技术*, 2011, 33(12) :2623-2630.
- [22] ZHENG L, WANG X D. Super-resolution delay-Doppler estimation for OFDM passive radar [ J ]. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 2017, 65(9) :2197-2210.
- [23] CETIN M, LANTERMAN A D. Region-enhanced passive radar imaging [ J ]. *IET Radar, Sonar and Navigation*, 2005, 152(3) :185-194.
- [24] 刘记红. 基于压缩感知的 ISAR 成像技术研究 [ D ]. 合肥:国防科学技术大学, 2012.
- [25] GURBUZ A C, MCCLELLAN J H, SCOTT W R. A compressive sensing data acquisition and imaging method for stepped frequency GPRs [ J ]. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 2009, 57(7) :2640-2650.
- [26] WEBB A J, HAVENS T C, SCHULZ T J. Fast image reconstruction in forward-looking GPR using dual  $l_1$  regularization [ J ]. *IEEE Transactions on Computational Imaging*, 2018, 4(3) :470-478.
- [27] YOON Y S, AMIN M G. Imaging of behind the wall targets using wideband beamforming with compressive sensing [ C ] // *IEEE/SP 15th Workshop on Statistical Signal Processing*, 2009 :93-96.
- [28] AHMAD F, AMIN M G. Through-the-wall human motion indication using sparsity-driven change detection [ J ]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2013, 51(2) :881-890.
- [29] TANG V H, BOUZERDOUM A, PHUNG S L. Multipolarization through-wall radar imaging using low-rank and jointly-sparse representations [ J ]. *IEEE Transactions on Image Processing*, 2018, 27(4) :1763-1776.
- [30] ZHANG J D, ZHU D Y, ZHANG G. Adaptive compressed sensing radar oriented toward cognitive detection in dynamic sparse target scene [ J ]. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 2012, 60(4) :1718-1729.
- [31] ABERMAN K, AVIV S, ELDAR Y C. Adaptive frequency allocation in radar imaging: towards cognitive SAR [ C ] // *IEEE Radar Conference*, 2017 :1348-1351.
- [32] FILIP A, SHUTIN D, HAGAN D W O. Sparse Bayesian learning for long coherent integration time in passive radar systems [ C ] // *International Conference on Radar Systems*, 2017 :1-5.
- [33] ZHANG S H, LIU Y X, LI X. Bayesian bistatic ISAR imaging for targets with complex motion under low SNR condition [ J ]. *IEEE Transactions on Image Processing*, 2018, 27(5) :2447-2460.
- [34] DUMAN M, GURBUZ A C. Analysis of compressive sensing based through the wall imaging [ C ] // *IEEE Radar Conference*, 2012 :641-646.
- [35] CAMLICA S, GURBUZ A C, ARIKAN O. Autofocused spotlight SAR image reconstruction of off-grid sparse scenes [ J ]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 2017, 53(4) :1880-1892.
- [36] KRUEGER K, MCCLELLAN J H, SCOTT W R. 3-D imaging for ground penetrating radar using compressive sensing with block-toeplitz structures [ C ] // *IEEE Sensor Array and Multichannel Signal Processing Workshop*, 2012 :229-232.
- [37] YAN R, JIAO L C, YANG S Y, et al. Mutual learning between sali-

ency and similarity: image cosegmentation via tree structured sparsity and tree graph matching[J]. IEEE Transactions on Image Pro-

[38]

cessing, 2018, 27(9):4690-4704.  
WANG T Y, LIU B, ZHAO W H, et al. High-resolution radar imaging for non-sparse scatterers by the combi-

nation of non-convex regularization and total variation[C]//International Conference on Optical Communications and Networks, 2017: 1-3.

**Abstract:** Compressed Sensing (CS) theory has challenged the limitation of Nyquist-Shannon sampling theorem and has a very important impact on signal processing field in recent years. In this paper, the research progresses of CS imaging radar are reviewed. Firstly, based on the basic principle of CS theory, the idea of its application in radar imaging is discussed. Then, the current research development of CS imaging radar is demonstrated, including Synthetic Aperture Radar (SAR), Inverse Synthetic Aperture Radar (ISAR), Multiple-Input Multiple-Output (MIMO) radar, Ground Penetrating Radar (GPR), Through-the-Wall Radar (TWR), Cognitive Radar (CR) and so on. Finally, some challenges faced by the CS imaging radar in its practical applications are discussed, and several suggestions are given on its future development.

**Key words:** compressed sensing theory; radar imaging; research progress; application challenge

## 下 期 要 目

基于视觉的自主空中加油锥套跟踪与定位  
一种基于局部特征索引结构的目标跟踪方法  
无人直升机着舰视觉引导系统设计及试验  
失效阵元对阵列天线性能影响分析  
四旋翼无人机高阶一致性编队控制方法  
单框架控制力矩陀螺转子的稳速控制  
基于抗差卡尔曼滤波的 SLAM 问题研究

基于动态规划的多目标卫星资源优化配置  
基于核心体系结构数据的体系结构设计方法  
基于联合误差模型的无人机编队扩展一致性控制  
基于 IMU-LiDAR 的负障碍检测方法  
着舰引导装备体系备件系统级保障建模与仿真  
舰载直升机反潜作战使用研究综述  
动态场景下基于场景流的闭环检测算法



请扫描二维码关注我刊