

文章编号:1004-9037(2012)01-0001-12

# 压缩感知在雷达目标探测与识别中的研究进展

张 弓 杨 萌 张劲东 陶 宇

(南京航空航天大学电子工程学院,南京,210016)

**摘要:**压缩感知理论是针对采样率和计算复杂度的一种新的信号处理模式,它以远低于奈奎斯特频率对信号进行采样,并能准确重构出原始信号。随着宽带高分辨雷达技术发展,目标相对于背景的高度稀疏,与复杂的雷达系统、海量数据呈现极度的不平衡,压缩感知是有效地减弱这种不平衡的可能技术之一。以雷达稀疏信号的压缩测量及重构为主线,本文综述了压缩感知理论在雷达目标探测与识别中的研究进展,分析了压缩感知理论在PD雷达、穿墙雷达、MIMO雷达、雷达目标参数估计、雷达成像以及目标识别等领域的潜在应用,描述了国内外的相关研究进展。文中对研究中现存的难点问题进行了探讨,并展望了未来的研究方向。

**关键词:**压缩感知;目标探测与识别;稀疏表示;雷达

中图分类号:TN95

文献标识码:A

## Advances in Theory and Application of Compressed Sensing in Radar Target Detection and Recognition

Zhang Gong, Yang Meng, Zhang Jindong, Tao Yu

(College of Electronics & Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing, 210016, China)

**Abstract:** Compressed sensing (CS) is a new paradigm in signal processing that trades sampling frequency for computing power. It allows accurate reconstruction of signals sampled at rates many times less than the conventional Nyquist frequency. Today, modern radar systems operate with high bandwidths and high resolution. Compared with complex radar system and mass data, often only a small amount of target parameters is the final output. CS is one of good means to effectively reduce data size. This paper reviews the latest developments of CS in radar target detection and recognition and introduces the key technical problems about the design of measurement matrix and the reconstruction algorithm for sparse signal. Several possible applications are considered, including PD radar, through wall radar, MIMO radar, radar target parameter estimation, radar imaging and radar target detection and recognition system. Then the existing difficult problems in the study and the future research directions on CS applied to radar are discussed.

**Key words:** compressed sensing; target detection and recognition; sparse representation; radar

## 引 言

雷达在现代战争下担负着目标的精确、实时、全天候侦察监视,对弹道导弹、巡航导弹等大规模破坏性武器的探测与跟踪,各种隐身目标的探测与识别,战斗杀伤效果判别和目标识别等任务。雷达

还担任导弹制导和武器火控等任务。相控阵雷达(PAR)、超视距雷达(OHTR)、合成孔径雷达(SAR)和干涉仪合成孔径雷达(InSAR)、毫米波雷达(MMW)、双/多基地雷达、高速实时信号/数据处理技术、雷达组网技术等是实现上述任务的关键技术。随着雷达技术发展,大带宽高分辨力、多通道信号处理方式的采用,使得实时信号处理对数据的

**基金项目:**国家自然科学基金(61071163)资助项目;航空基金(2011ZC52034)资助项目;江苏高校优势学科建设工程资助项目;教育部留学回国人员科研启动基金资助项目。

**收稿日期:**2011-09-22;**修订日期:**2011-11-26

处理速度大大提高。同时在雷达信号处理中运算量大,数据吞吐量急剧上升,对数据处理的要求不断提高。在雷达目标探测中,目标相对于背景的高度稀疏,与复杂的雷达系统、海量数据呈现极度的不平衡,目前有三种方法可有效地减弱这种不平衡:(1)稀疏阵<sup>[1]</sup>,在空间采样突破 Nyquist 采样定理;(2)MIMO 雷达<sup>[2]</sup>,通过多个独立的收发天线增加有效通道数和系统自由度,以降低系统造价和复杂度,还可以进一步提高角度估计的性能;(3)压缩感知(Compressed sensing, CS)<sup>[3-7]</sup>,利用信号的稀疏先验信息,可以以少量的观测量高概率重建原信号。

CS 理论与传统奈奎斯特采样定理不同,它指出,只要信号是可压缩的或在某个变换域是稀疏的,就可以用一个与变换基不相关的观测矩阵将变换所得高维信号投影到一个低维空间上,然后通过求解一个优化问题就可以从这些少量的投影中以高概率重构出原信号,可以证明这样的投影包含了重构信号的足够信息。在该理论框架下,采样速率不决定于信号的带宽,而决定于信息在信号中的结构和内容。雷达目标相对于背景的高度稀疏为 CS 技术在雷达目标探测与识别的应用提供了必要的条件。作为信号处理的基础理论,CS 将给雷达信号处理带来根本性的变革,CS 雷达系统具有其潜在的优势:(1)在接收端除去了匹配滤波的处理过程;(2)降低了 A/D 转换的采样率;(3)信号重构算法突破传统的测不准原理,为提高雷达分辨率提供了一种新的手段。

CS 理论的某些抽象结论源于 Kashin 创立的范函分析和逼近论<sup>[8]</sup>,最近由 Candès<sup>[3-4,6,9]</sup>, Romberg<sup>[4]</sup>, Tao<sup>[9]</sup> 和 Donoho<sup>[5]</sup> 等人构造了具体的算法并且通过研究表明了这一理论的巨大应用前景。由于从理论上讲任何信号都具有稀疏性或可压缩性,只要能找到其相应的稀疏表示空间,就可以有效地进行压缩采样,这一理论必将给信号采样方法带来一次新的革命。CS 理论的引人之处还在于它对应用科学和工程的许多领域具有重要的影响和实践意义,如统计学、信息论、编码等<sup>[3]</sup>。

## 1 压缩感知概述

传统意义上的测量算子并非总是可以或者稳定地实现信号的超分辨率稀疏表示。E Candès<sup>[3-4,6,9]</sup> 和 D L Donoho<sup>[5]</sup> 等学者研究表明,

随机测量算子可以稳定地实现信号的超分辨率稀疏表示,由此开启了研究 CS 这一新理论的大门。该理论指出,当信号具有稀疏性或可压缩性时,通过采集少量的信号投影值就可实现信号的准确或近似重构。

对于以时间  $t$  为自变量的模拟信号  $\bar{x}(t)$ ,  $\bar{\phi}_s$  是稳定的高分辨率 A/D 转换器,  $\Phi$  是测量算子。以上各量关系可以表述为

$$Y = \Phi \bar{\phi}_s \bar{x}(t) + n \quad (1)$$

式中:  $Y$  是  $m$  维测量向量;  $n$  是系统噪声。对于式(1),也可写为

$$Y = \Phi X + n \quad (2)$$

式中:  $X = \bar{\phi}_s \bar{x} \in \mathbf{R}^n$  是 A/D 转换后的高分辨率离散数字信号;  $\Phi X$  表示测量算子  $\Phi$  对离散数据  $X$  的作用。如此,模拟信号  $\bar{x}(t)$  经由 A/D 转换器  $\bar{\phi}_s$  和测量算子  $\Phi$  实现了在维测量域中的表示  $Y$ 。

假设信号  $X \in \mathbf{R}^n$  在变换字典  $\Psi = \{\Psi^j\}_{j \in \Gamma}$  下具有稀疏逼近特性。令  $\Psi X = \{\Psi^j X\}_{j \in \Gamma}$ , 这里  $\Psi X$  表示变换字典  $\Psi$  在  $X$  上的作用,  $\Psi^j X$  表示字典原子  $\Psi^j$  在  $X$  上的作用,  $\Psi^j$  是  $\Psi \in \mathbf{C}^{m \times |\Gamma|}$  的原子, 这里  $|\Gamma|$  表示指标集  $\Gamma \subset N$  的势。则信号  $X$  的估计  $\tilde{X}$  可以表示为

$$\tilde{X} = \sum_{j \in \Gamma} \tilde{\alpha}[j] \Psi^j \quad (3)$$

式中  $\tilde{\alpha} = \{\tilde{\alpha}[j]\}_{j \in \Gamma}$  是信号  $X$  在字典  $\Psi = \{\Psi^j\}_{j \in \Gamma}$  下的稀疏表示,即信号  $X$  在变换域的系数集合。于是,由式(2,3)得到

$$\tilde{Y} = \sum_{j \in \Gamma} \tilde{\alpha}[j] \Phi \Psi^j$$

式中  $\Phi \Psi^j$  表示算子  $\Phi$  与原子  $\Psi^j$  的复合运算。

于是,稀疏表示  $\tilde{\alpha}$  可以通过优化如下  $L_1$  范数得到  $\min_{\tilde{\alpha} \in \mathbf{C}^{|\Gamma|}} \|\tilde{\alpha}\|_{L_1}$ , 使得

$$Y = \sum_{j \in \Gamma} \tilde{\alpha}[j] \Phi \Psi^j \quad (4)$$

理论上讲,自然界中的信号都是稀疏的,只要正确定义雷达信号的稀疏性,就具备了应用压缩感知的前提条件,这一技术快速发展势将改变雷达领域处理信号和大规模数据集的方式。

## 2 CS 理论在雷达目标探测与识别中的应用

文献[10]提出了 CS 在雷达领域最有潜力的应用,指出了 CS 雷达系统的公开问题,讨论了 CS 在雷达空间采样和时间采样方面的应用。文献[11]探

讨论了压缩雷达成像的基本问题,研究宽带信号稀疏表示和波形设计。文献[12]讨论了在压缩感知理论框架下接收信号的频域稀疏性和多脉冲的采样模式。文献[13]建立了目标信息感知模型,运用压缩感知以低于Nyquist采样率对目标回波采样,从少量的采样数据中提取噪声背景下的目标场景信息,采用模拟退火算法对波形进行优化。文献[14]把在时域和频域高度密集的多分量线性调频信号,转化到分数傅里叶域,以形成稀疏表示,在分数傅里叶域中运用压缩感知,减少采样数据。文献[15]从逆散射成像的角度探讨了CS-MIMO雷达成像模型。文献[16]从传统的雷达模糊函数出发,研究了高分辨CS雷达的目标场景重构问题,分析了高分辨CS雷达的分辨率。但是对于类似于噪声的SAR数据/图像,目前还没有合适的基变换能够对它进行稀疏处理<sup>[17]</sup>。文献[18]提及到了两个概念,强目标和noise-like的背景,针对这两个概念作者提到了两种修正版的CS方法去处理SAR原始数据压缩,并对处理结果进行了分析。文献[19]运用CS的低采样率结合粒子滤波实现目标的实时跟踪。

## 2.1 雷达目标探测与成像

### 2.1.1 CS与传统的高分辨雷达

雷达的两大主要任务是探测和识别目标,通常雷达系统接收到模拟信号以后,以较高的采样频率转换成数字信号,再对目标的方位、角度、速度等参数进行估计,并跟踪目标。而只对目标场景的信息感兴趣。而压缩感知技术,可以直接通过采样少量数据,并且由这些少量数据来精确恢复出目标场景信息。该技术以增加计算的复杂度为代价来降低采样频率。文献[20]证明在距离-多普勒域中目标场景满足稀疏性的条件下,CS是一项非常高效的信号处理技术。

在CS雷达中,有以下3个关键的点:(1)发射信号必须是充分不相关的,虽然已有的一些成果是依赖于一个确定信号的,但是发射机的白噪声信号可以产生一个充分不相干的信号;(2)在CS方法中,不需要使用匹配滤波器;(3)目标场景可以恢复是在假设目标满足稀疏性约束的条件下。由前述可知,压缩感知技术很重要的思想是设计一个观测矩阵 $\Phi$ ,用来表示稀疏信号的字典集 $\Psi$ ,并且 $\Phi$ 与 $\Psi$ 是不相关的。比如冲击函数与sin函数的傅里叶变换基,傅里叶变换基与小波变换,可以用来表示两组不相关的基,独立同分布的高斯矩阵与伯努利矩阵

表示一组高概率不相关矩阵,以及利用场景和字典集优化的观测矩阵。文献[21]利用这个思想设计出CS雷达接收机如图1所示。

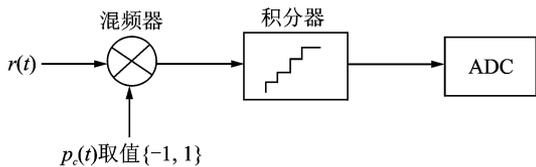


图1 CS雷达接收机

如图1所示CS雷达接收机, $r(t)$ 为基带信号,即普通雷达接收的接收信号通过标准的滤波器,下变频器以及放大器以后的输出信号。 $p_c(t)$ 为伪随机信号,取值范围为1或者-1。将 $r(t)$ 和 $p_c(t)$ 作为混频器的输入信号,混频器的输出信号经过一个积分器。积分器的输出信号为ADC的输入信号,ADC的采样间隔 $T_{CS} = NT_{sample}$ ,其中 $T_{sample}$ 为奈奎斯特采样间隔, $N$ 为欠采样因子。信号通过混频器再求积分的信号即为接收机信号在观测矩阵 $\Phi$ 投影,在连续时间信号里,定义为 $p_c(t)$ 。在实际算法中,采取随机数字生成器来生成 $p_c(t)$ ,并且产生的 $p_c(t)$ 对于在重构 $r(t)$ 过程中必须是已知的。

对于脉冲多普勒雷达,距离向的快时间采样可以通过传统的CS算法重构出距离向的信息,但是由于脉冲多普勒雷达的脉冲重复频率较低,将会因此丢失可以检测到的多普勒频率信息。目前的解决方法是在信号输入混频器之前,将基带信号 $r(t)$ 进行分割,每段分割信号为一组数据,和一组伪随机信号 $p_c(t)$ 混频,即多段分组信号和多组伪随机信号 $p_c(t)$ 混频。这个方法允许利用单脉冲也能重构信号,并且保留了雷达的多普勒能力,但会有3 dB的信噪比损失。少数几次脉冲分割产生的信噪比损失不能够接收时,可以通过研究增加脉冲数目来提高重构性能。因此,可以将压缩感知技术应用到传统的雷达信号处理中。

文献[20]假设空间有若干个稀疏目标,将目标所在的距离向与方位向分割成网格形式。如图2所示,其中 $\tau$ 是距离向参数, $\omega$ 是方位向参数。压缩感知雷达可以检测的目标数量 $K < \overline{N}^2$ , $\overline{N}$ 为稀疏单元数目。如果 $K \ll \overline{N}^2$ ,则可以精确分辨出空间的多个目标。文献[22]利用雷达目标在多普勒域的稀疏性,基于压缩感知的目标多普勒估计方法,通过二维稀疏信号优化的低复杂度正交匹配追踪算法进行快速多普勒估计。文献[23]针对运动目标成像,

对采用传统动目标成像进行杂波抑制后的信号,在距离向采用脉冲压缩处理方式,在方位向根据稀疏阵列构型和脉冲压缩后信号形式,构造基矩阵,利用压缩感知理论对目标进行重建,避免了稀疏阵列旁瓣和积分旁瓣比较高的问题。

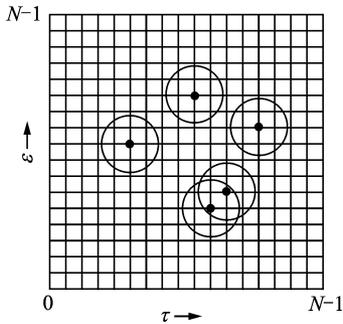


图2 时-频平面重构的稀疏目标

穿墙探测雷达(Through-the-wall detecting radar)通过发射电磁波来穿透墙壁、隔板等障碍物,并分析接收到的目标回波信号,对隐藏在障碍物后的目标进行检测与定位。因为其在反恐、灾后救援等方面的迫切需要而成为近年来的一个研究重点。按照技术体制,穿墙雷达可分为经典的多普勒雷达和超宽带(UWB)两大类。穿墙雷达面临两大任务,一是对目标进行检测与定位,二是对障碍物后的场景进行成像。从这个角度上讲,本文前面提到的CS在PD雷达中以及CS在雷达成像中的应用优势,都可以同样应用到穿墙雷达中来。文献[24]利用频率步进雷达,通过变化检测方式消除杂波和静止目标的影响获得动目标的稀疏性特性,并运用CS进行成像显示。文献[25]研究了一种基于CS的探地雷达的成像算法,文中方法利用了目标空间稀疏性的先验知识,解决了优化问题,通过选取的一些少量随机压缩测量来重构目标空间图像。国内相关学者关于CS在穿墙雷达和探地雷达中的应用也做了相关工作<sup>[26-27]</sup>,并得到了一些研究结果。

相比于一般雷达,穿墙雷达所探测的目标与环境有明显的区别:(1)穿墙雷达一般是针对人体呼吸、心跳等弱信号探测;(2)接收信号噪声复杂,信噪比极低;(3)信号的衰减与目标分辨率相互制约;(4)目标处于雷达的近场范围,容易形成天线的近场效应。这些特点决定了CS在穿墙雷达中的应用将会遇到许多新的问题,但是从CS在采样频率方面的优势以及穿墙雷达在现实中的应用性来看,研

究CS在穿墙雷达中应用有着重要的理论和现实意义。

### 2.1.2 CS与MIMO雷达

2004年Fishler等人提出了多输入多输出(Multiple input multiple output, MIMO)雷达的概念<sup>[2]</sup>,MIMO雷达利用空间分集技术对抗目标的RCS起伏<sup>[28]</sup>,利用灵活的发射分集设计<sup>[29]</sup>,具有高分辨率的空间谱估计性能<sup>[30-31]</sup>,能够获得目标探测、参数估计、杂波与干扰抑制、抗摧毁、抗低空突防、反隐身等能力的大幅提升。MIMO雷达概念及其相关的信号处理技术受到了各国学者越来越多的关注。目前国内外对MIMO雷达系统的研究主要集中在两种不同形式的MIMO雷达系统:相参MIMO雷达系统和非相参MIMO雷达系统。(1)非相参MIMO雷达具有空间广泛分布的发射/接收单元,它通过发射正交波形从不同的视角激发目标电磁散射的空间分集特性,克服目标RCS随机起伏。与传统雷达相比,其在信号检测能力、参数估计精度、目标分辨率等方面具有明显优点。(2)相参MIMO雷达系统并不要求发射/接收单元满足空间广泛分布,它通过多个接收单元信号的相参信号处理来获取性能提升,要求同频带、时间/相位同步、波束同步和相参发射以及相干的目标回波。它通过发射正交波形及波形优化设计获得额外的自由度,利用较少的天线规模通过多发多收实现大的、密布的虚拟阵列,因此具有更高的多目标探测与参数估计性能、更强的杂波与干扰抑制能力。

MIMO雷达由于采用多发多收体制,增加了有效通道,使得MIMO雷达与传统雷达相比具有更高系统分辨率,但也同时面临更大的数据量挑战。此外,由于MIMO雷达发射波形的正交性引起非相关组合,发射天线的增益降低,使得MIMO雷达相对于相控阵雷达遭受严重的信噪比损失<sup>[32]</sup>。文献[33]从发射波形设计出发,分析对比了MIMO雷达与常规SIMO雷达的杂波抑制和信噪比损失关系。为改善MIMO雷达信噪比损失提出了一种IFIR radar,该雷达选用与相干MIMO雷达相同的收发天线阵列配置,如图3所示,其中 $d_i = Nd_i$ 。但各发射阵列发射信号包络相同,基于滤波器设计波束形成原理实现空间波束栅瓣,达到了良好的杂波抑制和信噪比损失性能。这种突破MIMO雷达发射波形正交性的限制,为降低MIMO雷达信噪比损失的研究提供了有益的借鉴。

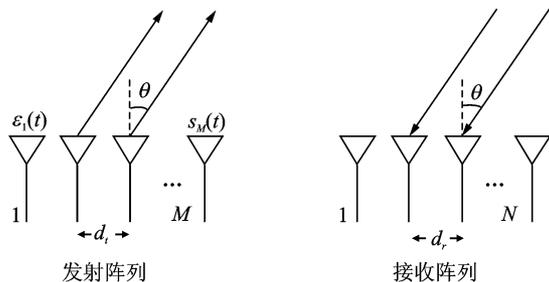


图3 MIMO 雷达收发阵列配置图

文献[34]基于小规模无线网络将CS理论应用于非相参MIMO雷达系统,通过对各接收机节点融合处理,构建1-范数意义下的优化问题,求得目标的角度和多普勒解。文献[35]研究指出优化判别设计的最佳测量矩阵取决于感知矩阵和/或信号干扰比的相关性,并对此提出了两种解决方案。文献[36]研究了基于随机卷积的压缩感知雷达成像方法,分析和讨论了随机测量体系中降采样的不同实现方式。文献[37]基于相参MIMO雷达系统的信号模型,结合MIMO雷达目标在距离-多普勒-角度域的稀疏特点,研究了CS在相参MIMO雷达系统中的信号重构和波形优化问题。文献[38]利用DOA在角度空间的稀疏性,运用CS以低采样率对MIMO雷达进行超分辨率参数估计。

对于均匀线阵的MIMO雷达信号模型,利用压缩感知方法估计信号的DOA,可以高概率精确估计目标的DOA。并且它的概率随发射阵列个数的增加而增加,且可估计的目标个数也随发射阵列个数的增加而增加。图4为基于均匀线阵的MIMO雷达信号模型,利用压缩感知方法实现的信号的DOA估计仿真结果<sup>[38]</sup>。

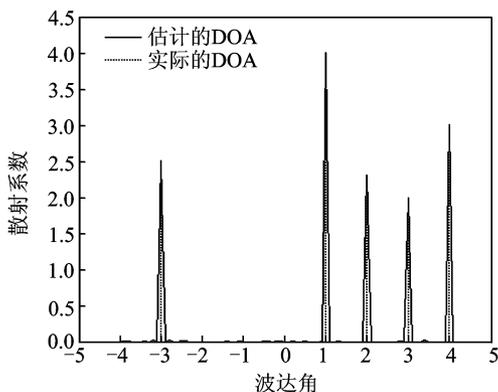


图4 均匀线阵的MIMO雷达DOA估计结果

图4中发射阵列个数 $M=10$ ,接收阵列个数 $N=6$ ,发射接收阵列阵元间距都为半个波长,快拍

数目 $L=256$ ,稀疏度为 $K=18$ ,目标个数 $Q=5$ ,信噪比 $SNR=10$  dB。假设空间存在5个目标,目标的位置分别为 $-3^\circ, 1^\circ, 2^\circ, 3^\circ, 4^\circ$ ,散射系数分别为 $2.5, 4, 2.3, 2, 3$ 。其估计的3个目标的散射系数为: $2.5078, 4.034, 2.2717, 2.0198, 2.9130$ 。

单个信号的CS理论及其应用,已经有了较为深入和广泛的研究,而对于多信号的分布式压缩感知(DCS)理论及其应用方面的研究则相对进步较慢。DCS的基本思想<sup>[39-40]</sup>充分利用单个信号内部及多个信号之间的相关性信息,使得较少的测量包含充分的信息,足以重构原信号。在DCS的相关文献中<sup>[40-42]</sup>,建立了一系列同时考虑信号自相关以及互相关的联合稀疏表示模型,在这些模型中,所有的信号在同一个变换基原子集合中被重构,只是他们具有不同的投影系数。一些联合稀疏表示模型被用于诸如无线传感网络<sup>[43-44]</sup>和语音信号阵列<sup>[45]</sup>,把信号分解为公共的互相关部分和相互独立的自相关部分,减少了压缩测量的数据量,优化了重构算法。

相参MIMO雷达系统通过多发多收形成大量数量的虚拟阵列,在发射机、目标以及接收机之间构成对目标的分布式探测系统,这与分布式压缩感知(DCS)的思想不谋而合。如果多个信号都在某个变换基下是稀疏的,并且这些信号彼此相关,那么每个信号都能够通过测量矩阵进行联合压缩测量,利用优化方法对待测量进行联合重构。

将DCS理论应用于相参MIMO雷达系统(发射稀疏阵MIMO雷达模式(如图3 $d_t=Nd_r$ )),研究基于DCS的雷达目标探测系统是作者目前正在开展的工作。该系统利用多个接收阵元接收信号的自相关性与互相关性信息,构建信号群的联合稀疏模型,进一步减少处理信号的数据量;以保证测量矩阵与变换基(函数)之间以及变换基(函数)与变换基(函数)之间低相关性为波形设计准则,突破MIMO雷达发射波形正交性的限制;通过联合重构算法,提高目标检测性能与参数估计精度。(1)基于MIMO雷达体系的DCS变换基构造。将DCS-MIMO雷达系统视为多个相关的时变(非)线性系统,对每个系统,输入信号为所有雷达发射阵元发射信号,输出信号为单个雷达接收阵元接收信号。用逼近论的思想把多个相关的时变(非)线性系统用有限个数的同一个已知基(函数)集 $\{H_k\}$ 线性表示,该基(函数)集 $\{H_k\}$ 的选取要使得在该基下的展开

式系数 $\tilde{\alpha}$ 具有时-频特性,据此得到基于MIMO雷达体系的DCS变换基 $\Psi$ 。为利用联合重构算法获得好的重构结果,需要保证观测矩阵与变换基(函数)之间以及变换基(函数)与变换基(函数)之间相关性足够的低,以此为准侧,将从优化的角度研究雷达波形的设计问题。主要研究基函数的选择与时变(非)线性系统的逼近表示问题;研究基于相关性分析的波形优化设计问题。(2)联合稀疏表示。构造测量算子 $\Phi$ 对接收信号的变换域系数进行联合稀疏表示。联合稀疏表示即是充分利用接收信号自身以及接收信号之间的相关性信息,对变换域系数进行联合编码。主要研究信号的相关性信息在变换域的表示;研究测量算子 $\Phi$ 的构造问题。(3)DCS-MIMO联合重构算法。最优化重构理论与智能算法。采用优化算法求解欠定方程,实现DCS-MIMO雷达信号重构。在测度选择问题上,由于 $l_0$ -范数最优化问题理论上为NP问题,主要研究基于 $l_p$ -范数( $0 < p < 2$ )的联合重构优化算法;研究稀疏表示域的模式识别理论算法。

### 2.1.3 CS与雷达成像

目标相对于背景的高度稀疏是CS技术应用提供了必要的条件。针对CS雷达成像,文献[46]针对CS在高分辨雷达成像领域的研究现状进行了归纳和分析。文献[11]作为第一篇公开发表关于CS雷达成像的文献,研究了低于Nyquist采样率的A/D转换器,采用数值仿真探讨了压缩感知雷达成像的基本问题,如需要解决雷达场景稀疏变换基设计,稀疏度判定及最优化算法等问题。文献[47]利用Chirplet变换分析了Chirp信号回波的稀疏性,提出基于压缩感知的Chirp信号回波压缩和重构方法。文献[48]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向压缩算法。文献[49]对方位向进行随机稀疏采样得到降采样的原始数据,在距离向采用传统匹配滤波方法实现脉冲压缩处理,方位向利用小波基作为场景散射系数的稀疏变换基,并通过求解优化问题重构方位向散射系数,提出基于场景方位向小波稀疏表示的压缩感知成像方法。文献[50]提出了一种改进CS的高分辨率ISAR成像方法,运用能量门限分离含目标的距离单元和噪声单元,在方位向上用相干投影来提高观测数据的信噪比,利用迭代加权的1-范数优化以增强真实散射点能量并抑制噪声。文献[51]针对表面反射去除问题研究了压缩感

知步进频率探地雷达成像技术。文献[52]提出了一种基于压缩感知和快速贝叶斯匹配追踪恢复算法的雷达遥感成像方法。文献[53]研究了基于CS的稀疏信号的重构算法在提高距离向分辨率的作用。文献[54]在成像方法,研究了基于稀疏体制的ISAR,同时给出了基于实测数据的ISAR包络对齐和对空间目标(卫星)的成像结果。文献[55]利用基于稀疏约束来实现反卷积,消除点扩展函数的影响,达到抑制SAR旁瓣的作用。文献[56]从稀疏线性回归模型的角度讨论了SAR场景重建问题。

文献[57]提出了一种具有层次结构超完备字典的稀疏表示方法,讨论了广角SAR成像问题。文献[58]运用CS分析多站SAR场景,研究了不同测量体系对测量算子的影响以及测量算子与稀疏重建的关系。文献[59]基于探地雷达成像目标空间的稀疏特性,在单道数据获取中应用压缩感知减少采集数据量,在 $x$ - $y$ 测量平面上随机抽取部分孔径位置进行测量,以少量的测量孔径和测量数据获得重建目标空间的足够信息,实现了探地雷达成像中的随机孔径压缩感知三维成像。文献[60]讨论了在CS合成孔径雷达成像中,由于雷达平台运动引起的相位误差,以及自动聚焦处理的运动补偿问题。文献[61]探讨了电磁波在介质中传播速度近似已知的情况下基于CS的地下成像问题。文献[62]根据雷达原始回波信号与参考信号做差频处理后所得信号的稀疏特性,构造合理的傅里叶基矩阵实现雷达数据的稀疏表征,利用正交匹配追踪算法重构目标谱图,得到目标旁瓣被有效抑制的目标ISAR像。文献[63]使用二维离散小波变换来稀疏图像,提出了基于CS的高分辨率穿墙雷达成像方法。文献[64]讨论了基于CS的单像素激光雷达三维成像问题。文献[65]讨论了基于压缩采样理论的3-D合成孔径雷达数据成像问题。文献[66]基于点散射模型构造字典,将超分辨率成像过程转化成稀疏参数估计问题。文献[67-68]研究了压缩感知在SAR层析技术和SAR测形变技术中的应用问题,SAR层析技术和SAR测形变技术是合成孔径雷达干涉测量的最新拓展,比起传统的参数或非参数方法,基于高度向稀疏性的压缩感知重建方法具有更好的应用前景。

对于基于CS的SAR成像需要解决的主要问题有:目标场景的成像模型,稀疏变换基设计,非相关测量以及最优化重构算法等。对于理想假设前提

下的SAR成像模型,通常是把目标场景当作若干个目标来处理的,然而在实际情况下,回波中不仅包括强反射点目标的响应,还包括大量弱小目标的响应、目标的极化、色散和相互耦合作用,信号的构成模式比点目标模型要复杂得多,这还有待进一步的研究。对于大场景雷达成像,由于噪声的缘故,信息量比较大;在实际雷达系统中非相关测量的设计是一个有待解决的问题;另外,压缩感知需要求解一个非线性最优化问题,即需要较高的信噪比,然而大场景雷达成像的数据量特别大,且信噪比很差。因此,如何利用压缩感知实施大场景雷达成像是一件非常具有挑战性的研究课题。

## 2.2 CS在雷达目标识别中的应用

雷达目标识别按不同的识别程度可以分为检测,分类识别以及对特定目标的辨识。宽带高分辨雷达图像(一维HRRP、二维ISAR)中目标相对于背景高度稀疏,为CS技术应用提供了必要的条件。将CS理论应用于非相参MIMO雷达系统,基于高维几何和压缩采样的MIMO雷达HRRP多姿态下目标识别问题,可以通过研究MIMO雷达信号群的压缩测量与回归模型的几何分析理论和方法,降低处理数据量;分析目标判别决策与流形模型的关系,研究高维信号数据中低维流形模型的构建算法,降低HRRP目标识别的相对方位敏感性和平移敏感性限制,实现多方位探测联合识别,提高MIMO雷达系统的HRRP目标协同识别能力。一般来讲,CS在雷达目标识别中的应用,可涉及到两大类:(1)基于复回波信号的特征矢量的目标识别方法;(2)基于各种成像算法所得到的复图像的目标识别方法。对多个复信号的处理可以充分利用回波信号的幅度和相位的融合信息。

### 2.2.1 字典设计与稀疏性分析

运用CS思想方法,设计字典实现原信号的稀疏表示是一个关键性问题。理论上,自然信号或图像在适当的变换字典下具有稀疏性,表示每个源信号只需要有较少的时刻采样是非零值(或者较大值),而绝大多数时刻取值为零(或者接近零)<sup>[69]</sup>。据此,假设 $\Omega = \{\Psi_p\}_{p \in \Gamma}$ 是信号空间 $C^N$ 中的一个字典,令 $\{\Psi_p\}_{p \in \Lambda} \subset \Omega$ ,信号 $X \in C^N$ 在子空间 $\mathcal{S}_\Lambda \subset C^N$ 上的投影可以表示为

$$X_\Lambda = \sum_{p \in \Gamma} \tilde{\alpha}[p] \Psi_p \quad (5)$$

式中:当 $p \in \tilde{\Lambda}$ 时, $\tilde{\alpha}[p] \neq 0$ ;当 $p \in \Gamma/\tilde{\Lambda}$ 时, $\tilde{\alpha}[p] =$

0。若 $\Omega$ 为正交基,可用设置阈值的方法得到式(5);若 $\Omega$ 为冗余字典,可以用优化理论来实现字典的设计,目前已有的优化算法可以分为三类:(1)贪婪算法<sup>[70]</sup>,该类算法是针对组合优化提出;(2)凸优化算法<sup>[71]</sup>,该类算法速度慢,然而需要的测量数据少,且精度高;(3)以Sparse Bayesian为代表的统计优化算法<sup>[72]</sup>,该类方法优化性能介于前两者之间。另外,值得强调的是目前的CS理论均假设信号的稀疏度是已知的或者在一定假设条件下是可以估计的,然而在许多情况下,稀疏度并不已知,且难以估计,那么建立动态的测量算子和相应的重建算法也是今后关键的问题。对于雷达目标,根据衍射原理,激发波长小于目标尺寸,可以把电磁后向散射看作若干个独立的散射中心,据此可以将雷达目标的电磁散射模型构建成为在适当基变换下的稀疏模型,从而实现雷达目标的稀疏表示和优化重构。

对于冗余字典的设计方法,可供选择的已有基变换,如光滑信号的Fourier系数、小波系数、有界变差函数的全变差范数、振荡信号的Gabor系数及具有不连续边缘的图像信号的Curvelet系数等都具有足够的稀疏性。另外,也可以运用优化理论自适应的生成冗余字典,如K-SVD方法<sup>[73-74]</sup>、ILSDLA方法<sup>[75]</sup>、RL-DLA方法<sup>[76]</sup>,以及在最优条件下的构造基。

### 2.2.2 雷达目标分类与识别

目标分类与识别是现代雷达技术发展的一个重要组成部分。由于问题本身的复杂性和复杂的电磁干扰环境,雷达目标分类与识别问题至今还没有满意的答案。现有的雷达目标识别系统思路单一,都是先提取目标特征,而后依据一定的查找搜索方法在训练样本集中找出与测试样本最优匹配,然后判断目标属性。实际的系统中处理数据的数目庞大是可想而知的,这必然增加了识别过程中的计算复杂度,虽然很多学者先后提出各种优化的快速算法,但仍然没能从根本上解决问题。CS理论提供了一个崭新的思路,CS凭借自身的优越性受到相关研究者的青睐。文献[77]指出,在多个静态雷达场景中,从空间随机分布的接收器中提取延迟信息,各接收机不是相位同步的,因此各接收器的测量值只能不相干地组合起来,可以通过一个共享稀疏模式把其当作联合稀疏重建问题来研究。文献[78]通过原始图像上的小波平滑<sup>[79-80]</sup>和特征提取构建多

尺度极化干涉特征空间,运用CS提取每一个尺度上图像子块的观测域特征并在数据域重建稀疏特征,组合多尺度的稀疏特征生成用于分类的多尺度金字塔表达,提出了基于多尺度压缩感知金字塔的极化干涉SAR图像分类的方法。文献[81]提出了一种贝叶斯改良追踪算法,将一个信号表示为一个主要信号和一些残留信号的总和,并且主要信号和残余信号将广义高斯分布作为先验分布,通过反复分解残留信号,解决一系列子问题来达到近似CS信号的重建,然后得到主信号和残余信号的最大后验估值,通过搜索全局最优解来达到更好的恢复性能,实验表明,该算法既可以很好地保存SAR图像的重要特征(例如,点、线目标),同时拥有较好的恢复性能。文献[82]探讨了用于二维图像数据模式分类的压缩采样模式问题。SAR图像目标识别存在处理高维数据的问题,有效地利用SAR图像的统计特性,通过优化投影构建SAR图像训练样本的过完备字典,求解测试样本在过完备字典下的稀疏表示系数,根据系数矢量的能量特征完成分类识别,可以有效地提高识别的准确率和速度。

分布式压缩采样将单信号的压缩采样扩展到信号群的压缩采样,利用信号内相关性和互相关性对多个信号进行联合测量,以减少观测数据。根据信号的统计模型在参数流形上建立微分结构,并定义相应的几何要素,使得不同目标回波信号具有更好的可分性。作者课题组将压缩采样和微分几何应用于MIMO雷达系统,构建信号群的联合测量算子,研究了MIMO雷达信号的回归模型、压缩域统计模型的几何结构以及流形空间中的贝叶斯判决决策等问题。通过研究基于压缩采样和微分几何的MIMO雷达HRRP目标识别的新概念、新理论和新方法,提高MIMO雷达系统的协同识别能力,为MIMO雷达系统目标识别提供理论和技术支持。

### 3 结束语

CS理论是近年来新出现的一种信号获取理论框架,该理论充分利用信号稀疏性或可压缩性来实现信号处理,为信号的采样率的降低提供了一种可能,对于宽带雷达信号来说显得尤为重要。目前,国内在这个方面的研究刚刚展开,而在国外也只是最近两三年来成为非常热的研究领域,取得了一些进展。本文对CS在雷达目标探测与识别中的研究展开了讨论,阐述了CS理论所涉及的关键技术,综

述了国内外在CS雷达的研究成果、存在的公开问题及最新的相关理论。

基于CS的理论和方法,探索和研究宽带雷达的数据采集、信息还原和成像的新方法和新技术,从而提出能在较低采样速率、较小数据率的条件下实现宽带雷达的高分辨成像处理的理论、方法,为新型宽带雷达系统的研制和改进提供关键技术支撑。目前在基于CS技术的雷达目标探测与识别应用方面,应重点开展以下几方面研究:宽带信号稀疏特征的定义与建模技术、稀疏性度量的分析;宽带信号稀疏特征域及测量算子构造与相干性分析技术;雷达目标的稀疏表示及特征提取;CS雷达成像处理理论和方法;原信号最优化重建理论与智能算法;压缩采样的软硬件体系结构等。

CS理论作为信号处理领域一个新的基础理论,虽然还有许多问题待研究,由于从理论上讲任何信号都具有可压缩性,只要能找到其相应的稀疏表示空间,就可以有效地进行压缩采样,其研究成果将对信号处理等领域产生重大影响,给雷达技术的发展带来一次新的机遇。

#### 参考文献:

- [1] Schwartz J, Steinberg B. Ultrasparse, ultrawide-band arrays[J]. IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics and Frequency Control, 1998, 45(2): 376-393.
- [2] Fishler E, Haimovich A, Blum R, et al. MIMO radar: an idea whose time has come[C]//Proceedings of the IEEE Radar Conference. Newark, NJ, USA: IEEE, 2004:71-78.
- [3] Candès E. Compressive sampling[C]//Proceedings of the International Congress of Mathematicians. Madrid, Spain:[s. n.], 2006:1433-1452.
- [4] Candès E, Romberg J, Tao T. Robust uncertainty principles: exact signal reconstruction from highly incomplete frequency information[J]. IEEE Transactions on Information Theory, 2006, 52(2): 489-509.
- [5] Donoho D L. Compressed sensing[J]. IEEE Transactions on Information Theory, 2006, 52(4): 1289-1306.
- [6] Candès E J, Romberg J. Practical signal recovery from random projections[C]//Proceedings of SPIE. San Jose, CA, USA: SPIE, 2005:56-74.
- [7] Donoho D L, Tsaig Y. Extensions of compressed sensing[J]. Signal Processing, 2006, 86(3): 533-

- 548.
- [8] Kashin B. The widths of certain finite dimensional sets and classes of smooth functions[J]. *Izv, Akad, Nauk SSSR*, 1977,41(2):334-351.
- [9] Candès E J, Tao T. Near optimal signal recovery from random projections: universal encoding strategies[J]. *IEEE Transactions on Information Theory*, 2006,52(12):5406-5425.
- [10] Ender J H G. On compressive sensing applied to radar [J]. *Signal Processing*, 2010, 90 (5): 1402-1414.
- [11] Baraniuk R, Steeghs P. Compressive radar imaging [C]//*IEEE Radar Conference*. Waltham, Massachusetts:[s. n. ], 2007:128-133.
- [12] Talaei F, Modarres-Hashemi M, Sadri S. Spectrum analysis of multiple PRF Radars based on the compressive sensing method[C]//*19th Iranian Conference on Electrical Engineering*. Isfahan, Iran: IEEE,2011:1-6.
- [13] 贺亚鹏,王克让,张劲东,等.基于压缩感知的伪随机多相码连续波雷达[J].*电子与信息学报*,2011,33(2):418-423.
- He Yapeng, Wang Kerang, Zhang Jindong, et al. Compressive sensing based pseudo-random multiphase CW radar[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2011,33(2):418-423.
- [14] Aldirmaz S, Durak-Ata L. Compressive sensing of linear frequency modulated signals in fractional Fourier domains[C]//*IEEE 19th Conference on Signal Processing and Communications Applications*. Istanbul, Turkey: IEEE,2011:742-745.
- [15] Xu Hao, He Xuezhi, Yin Zhiping, et al. Compressive sensing MIMO radar imaging based on inverse scattering model[C]//*IEEE 10th International Conference on Signal Processing*. Beijing: [s. n. ], 2010:1999-2002.
- [16] Herman M A, Strohmer T. High-resolution radar via compressed sensing[J]. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 2009,57(6):2275-2284.
- [17] Bhattacharya S, Blumensath T, Mulgrew B, et al. Fast encoding of synthetic aperture radar raw data using compressed sensing[C]//*IEEE Workshop on Statistical Signal Processing*. Madison, USA: [s. n. ], 2007:448-452.
- [18] Rilling G, Davies M, Mulgrew B. Compressive sensing based compression of SAR raw data [C]//*SPARS' 09-Signal Processing with Adaptive Sparse Structured Representations*. Saint Malo, France: SPARS, 2009:1-6.
- [19] Kyriakides I. Adaptive compressive sensing and processing for radar tracking [C]//*IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing*. Prague, Czech Republic: IEEE, 2011: 3888-3891.
- [20] Herman M, Strohmer T. Compressed sensing radar [C]//*IEEE Radar Conference*. Rome, Italy: IEEE, 2008:1-6.
- [21] Smith G E, Diethel T. Compressed sampling for pulse Doppler radar [C]//*IEEE Radar Conference*. Washington DC, USA: IEEE,2010: 887-892.
- [22] 刘寅,吴顺君,张怀根,等.一种快速的基于压缩感知的多普勒高分辨方法[J].*西安电子科技大学学报:自然科学版*,2011,38(2):82-87.
- Liu Yin, Wu Shunjun, Zhang Huaigen, et al. Low complexity compressed sensing based Doppler high resolution algorithm[J]. *Journal of Xidian University*, 2011,38(2):82-87.
- [23] 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*, 2009,19(10):1110-1116.
- Hou Yingni, Li Daojing, Hong Wen. Radar imaging of moving targets in ship-borne radar based on sparse array and compressive sensing[J]. *Progress in Natural Science*, 2009,19(10):1110-1116.
- [24] Amin M, Ahmad F, Zhang W. A compressive sensing approach to moving target indication for urban sensing[C]//*IEEE Radar Conference*. Kansas City, MO, USA: IEEE,2011:509-512.
- [25] Gurbuz A C, McClellan J H, Scott W R. Compressive sensing for GPR imaging [C]//*Conference Record of the Forty-First Asilomar Conference on Signals, Systems and Computers*. California, USA: IEEE,2007:2223-2227.
- [26] 屈乐乐,黄琼,方广有.基于压缩感知的频率步进探地雷达成像算法[J].*系统工程与电子技术*,2010,32(2):295-297.
- Qu Lele, Huang Qiong, Fang Guangyou. Stepped-frequency ground penetrating radar imaging algorithm based on compressed sensing[J]. *Systems Engineering and Electronics*, 2010,32(2):295-297.
- [27] 屈乐乐,方广有,杨天虹.压缩感知理论在频率步进探地雷达偏移成像中的应用[J].*电子与信息学报*, 2011,33(1):21-26.
- Qu Lele, Fang Guangyou, Yang Tianhong. The ap-

- plication of compressed sensing to stepped-frequency ground penetrating radar migration imaging [J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2011, 33(1): 21-26.
- [28] Fishler E, Haimovich A, Blum R, et al. Spatial diversity in radars-modles and detection performance [J]. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 2006, 54(3): 823-838.
- [29] Luzhou X, Jian L, Stoica P. Adaptive techniques for MIMO radar [C]//*IEEE Workshop Sensor Array Multi-Chanel Processing*. Waltham, MA, USA: [s. n. ], 2006: 258-262.
- [30] Lehmann N H, Fishler E, Haimovich A. Evaluation of transmit diversity in MIMO radar direction finding [J]. *IEEE Transactions on Signal Processing*. 2007, 55(5): 2215-2225.
- [31] Luzhou X, Jian L, Stoica P. Target detection and parameter estimation for MIMO radar systems [J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 2008, 44(3): 927-939.
- [32] Daum F, Huang J. MIMO radar: Snake oil or good idea? [C]//*International Waveform Diversity and Design Conference*. Kissimmee, FL, USA: IEEE, 2009: 113-117.
- [33] Vaidyanathan P P, Pal P. MIMO radar, SIMO radar, and IFIR radar: a comparison [C]//*Conference Record of the Forty-Third Asilomar Conference on Signals, Systems and Computers*. Pacific Grove, CA: [s. n. ], 2009: 160-167.
- [34] Yao Y, Athina P, Petropulu H, et al. MIMO radar using compressive sampling [J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Signal Processing*, 2010, 4(1): 146-163.
- [35] Yao Y, Petropulu A, Poor H. Measurement matrix design for compressive sensing based MIMO Radar [J]. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 2011, 59(11): 1-15.
- [36] 刘记红, 徐少坤, 高勋章, 等. 基于随机卷积的压缩感知雷达成像 [J]. *系统工程与电子技术*, 2011, 33(7): 1485-1490.  
Liu Jihong, Xu Shaokun, Gao Xunzhang, et al. Compressed sensing radar imaging based on random convolution [J]. *Systems Engineering and Electronics*, 2011, 33(7): 1485-1490.
- [37] Chun-Yang C, Vaidyanathan P P. Compressed sensing in MIMO radar [C]//*42nd Asilomar Conference on Signals, Systems and Computers*. California, USA: IEEE, 2008: 41-44.
- [38] Yao Y, Petropulu A P, Poor H V. Compressed sensing for MIMO radar [C]//*IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing*. Georgia, USA: IEEE, 2009: 3017-3020.
- [39] Baron D, Wakin M B, Duarte M, et al. Distributed compressed sensing [DB/OL]. [http://www.dsp.rice.edu/~rorb/pdf/DCS\\_112005](http://www.dsp.rice.edu/~rorb/pdf/DCS_112005). Pdf, 2006-07-12/2011-08-15.
- [40] Duarte M F, Sarvotham S, Baron D, et al. Distributed compressed sensing of jointly sparse signals [C]//*Record of the Thirty-Ninth Asilomar Conference on Signals, Systems and Computers*. California, USA: IEEE, 2005: 1537-1541.
- [41] Hormati A, Vetterli M. Distributed compressed sensing: sparsity models and reconstruction algorithms using annihilating filter [C]//*IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing*. Georgia, USA: IEEE, 2008: 5141-5144.
- [42] Wang W, Garofalakis M, Ramchandran K. Distributed sparse random projections for refinable approximation [C]//*Proceedings of the Sixth International Symposium on Information Processing in Sensor Networks*. New York: [s. n. ], 2007: 331-339.
- [43] Bajwa W, Haupt J, Sayeed A, et al. Compressive wireless sensing [C]//*International Conference on Information Processing in Sensor Networks*. Nashville, Tennessee: [s. n. ], 2006: 134-142.
- [44] Masiero R, Quer G, Rossi M, et al. A Bayesian analysis of compressive sensing data recovery in wireless sensor networks [C]//*The International Workshop on Scalable Ad Hoc and Sensor Networks*. Saint Petersburg, Russia: [s. n. ], 2009: 1-6.
- [45] Xiao Y. Underwater acoustic sensor networks [DB/OL], <http://dsp.rice.edu/sites/dsp.rice.edu/files/cs/Bookchapter.pdf>, 2006-07-12/2011-08-15.
- [46] 刘记红, 徐少坤, 高勋章, 等. 压缩感知雷达成像技术综述 [J]. *信号处理*, 2011, 27(2): 251-160.  
Liu Jihong, Xu Shaokun, Gao Xunzhang, et al. A review of radar imaging technique based on compressed sensing [J]. *Signal Processing*, 2011, 27(2): 251-160.
- [47] 高磊, 陈曾平, 黄小红. 基于压缩感知的宽带成像雷达 Chirp 信号回波的压缩和重构 [J]. *信号处理*, 2010, 26(11): 1670-1676.  
Gao Lei, Chen Zengping, Huang Xiaohong. Compression and reconstruction of chirp echo of broad

- band imaging radar based on compressed sensing[J]. *Signal Processing*, 2010,26(11):1670-1676.
- [48] 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.
- [49] 王伟伟,廖桂生,吴孙勇,等. 基于小波稀疏表示的压缩感知 SAR 成像算法研究[J]. *电子与信息学报*, 2011,33(6):1440-1446.  
Wang Weiwei, Liao Guisheng, Wu Sunyong, et al. A compressive sensing imaging approach based on wavelet sparse representation[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2011, 33(6): 1440-1446.
- [50] 张龙,张磊,邢孟道. 一种基于改进压缩感知的低信噪比 ISAR 高分辨成像方法[J]. *电子与信息学报*, 2010, 32(9):2263-2267.  
Zhang Long, Zhang Lei, Xing Mengdao. A new method of high resolution ISAR imaging under low SNR based on improved compressive sensing [J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2010,32(9):2263-2267.
- [51] Tuncer M A C, Gurbuz A C. Ground reflection removal in compressive sensing ground penetrating Radars [J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2011(99):1-5.
- [52] Wang M, Yang S Y, Wan Y Y, et al. High resolution radar Imaging based on compressed sensing and fast Bayesian matching pursuit [C]//International Workshop on Multi-Platform/Multi-Sensor Remote Sensing and Mapping. Xiamen, China: IEEE,2011: 1-5.
- [53] Krichene H A, Pekala M J, Sharp M D, et al. Compressive sensing and stretch processing [C]//IEEE Radar Conference. Georgia, USA: IEEE,2011:362-367.
- [54] 全英汇,张磊,刘亚波,等. 利用压缩感知的短孔径高分辨 ISAR 成像方法[J]. *西安电子科技大学学报:自然科学版*, 2010,37(6):1022-1026.  
Quan Yinghui, Zhang Lei, Liu Yabo, et al. Method for achieving high resolution ISAR imaging with short aperture data via compressed sensing[J]. *Journal of Xidian University*, 2010,37(6):1022-1026.
- [55] 寇波,江海,刘磊,等. 基于压缩感知的 SAR 抑制旁瓣技术研究[J]. *电子与信息学报*, 2010, 32(12):3022-3026.  
Kou Bo, Jiang Hai, Liu Lei, et al. Study of SAR side-lobe suppression based on compressed sensing [J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2010,32(12):3022-3026.
- [56] Potter L, Schniter P, J Ziniel. Sparse reconstruction for RADAR [J]. *Proceedings of SPIE*, 2008:1-15.
- [57] Varshney K R, Çetin M, 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.
- [58] Stojanovic I, Karl W C, Cetin M. Compressed sensing of monostatic and multistatic SAR [C]//Proceedings of SPIE. Florida, USA: SPIE,2009:1-12.
- [59] 余慧敏,方广有. 压缩感知理论在探地雷达三维成像中的应用[J]. *电子与信息学报*, 2010,32(1):12-16.  
Yu Huimin, Fang Guangyou. Research on compressive sensing based 3D imaging method applied to ground penetrating radar [J]. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 2010,32(1):12-16.
- [60] Tian J H, Sun J P, Han X, et al. Motion compensation for compressive sensing SAR imaging with autofocus [C]//6th IEEE Conference on Industrial Electronics and Applications. Beijing, China: IEEE, 2011:1564 -1567.
- [61] Mehmet T A C, Gurbuz A C. Analysis of unknown velocity and target off the grid problems in compressive sensing based subsurface imaging [C]//IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing. Georgia, USA: IEEE,2011:880-2883.
- [62] 雷强,李宏伟,张群,等. 基于压缩感知的 ISAR 像目标旁瓣抑制新方法[J]. *弹箭与制导学报*, 2011, 31(1):143-147.  
Lei Qiang, Li Hongwei, Zhang Qun, et al. A new way of suppressing ISAR imaging sidelobe based on compressed sensing [J]. *Journal of Projectiles, Rockets, Missiles and Guidance*, 2011, 31(1): 143-147.
- [63] Michael L, Christian D, Abdelhak Z M. Compressive sensing in through-the-wall imaging [C]//IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing. Kyoto, Japan: IEEE,2011:4008-4011.
- [64] Michael L, Christian D, Abdelhak Z M. Compressive sensing LIDAR for 3D imaging [C]//Conference

- on Lasers and Electro-Optics. California, USA: IEEE, 2011;1-2.
- [65] Budillon A, Evangelista A, Schirizzi G. Three-dimensional SAR focusing from multipass signals using compressive sampling [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2011, 49(2): 488-499.
- [66] Wang Z M, Wang W W. Fast and adaptive method for SAR superresolution imaging based on point scattering model and optimal basis selection [J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2009, 18(7):1477-1486.
- [67] Zhu X X, Bamler R. Tomographic SAR inversion by L1-norm regularization—the compressive sensing approach[J]. IEEE transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2010, 48(10):3839-3846.
- [68] Zhu X X, Bamler R. Super-resolution power and robustness of compressive sensing for spectral estimation with application to spaceborne tomographic SAR [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2011, (99):1-12.
- [69] Pearlmutter B A, Potluru V K. Sparse separation: principles and tricks [C]//Proceedings of International Society for Optical Engineering. Orlando, FL, USA:[s. n. ], 2003:1-4.
- [70] Mallat S, Zhang Z. Matching pursuit in a time-frequency dictionary[J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 1993, 41(12):3397-3415.
- [71] Efron B, Hastie T, Johnstone I, et al. Least angle regression [J]. Annals of statistics, 2004, 32(2): 407-499.
- [72] Baron D, Sarvotham S, Baraniuk R G. Bayesian compressive sensing via belief propagation[J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2010, 58(1):269-280.
- [73] Aharon M, Elad M, Bruckstein A. The K-SVD: an algorithm for designing of overcomplete dictionaries for sparse representation[J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2006, 54(11):4311-4322.
- [74] 杨萌, 张弓. 遥感图像变化区域的无监督压缩感知 [J]. 中国图象图形学报, 2011, 16(11):2081-2087.
- Yang Meng, Zhang Gong. Unsupervised compressive sensing of change area in remote sensing images [J]. Journal of Image and Graphics, 2011, 16(11): 2081-2087.
- [75] Engan K, Skretting K, Husøy J H. A family of iterative LS-based dictionary learning algorithms, ILS-DLA, for sparse signal representation [J]. Digital Signal Processing, 2007, 17(1):32-49.
- [76] Engan K, Engan K. Recursive least squares dictionary learning algorithm [J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2010, 58(4):2121-2130.
- [77] Berger C R, Moura J M F. Noncoherent compressive sensing with application to distributed radar [C]//45th Annual Conference on Information Sciences and Systems. Baltimore, MD, USA: IEEE, 2011:1-6.
- [78] 何楚, 刘明, 冯倩, 等. 基于多尺度压缩感知金字塔的极化干涉 SAR 图像分类 [J]. 自动化学报, 2011, 37(7):820-827.
- He Chu, Liu Ming, Feng Qian. PolInSAR image classification based on compressed sensing and multi-scale pyramid [J]. Acta Automatica Sinica, 2011, 37(7):820-827.
- [79] Vetterli M, Kovacevic J. Wavelets and subband coding [M]. NJ: Prentice-Hall, 1995.
- [80] Cvetkovic Z, Vetterli M. Oversampled filter banks [J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 1998, 46(5):1245-1255.
- [81] Wu J, Liu F, Jiao L C, et al. Compressive sensing SAR image reconstruction based on Bayesian framework and evolutionary computation [J]. Transactions on Image Processing, 2011, 20(7): 1904-1911.
- [82] Eftekhari A, Babaie-Zadeh M, Moghaddam H A. Two-dimensional random projection [J]. Signal Processing, 2011, 91:1589-1603.

**作者简介:**张弓(1964-),男,博士,教授,研究方向:雷达信号处理、目标探测与识别、图像分析与处理,E-mail:gzhang@nuaa.edu.cn;杨萌(1980-),男,博士研究生,研究方向:信号的稀疏性分析;张劲东(1981-),男,博士,讲师,研究方向:MIMO 雷达信号处理;陶宇(1988-),男,博士研究生,研究方向:MIMO 雷达信号处理。