

基于压缩感知的稀疏孔径认知 ISAR 成像方法

孙凤莲, 张群, 罗迎, 顾福飞, 王国正

(空军工程大学 信息与导航学院, 陕西 西安 710077)

摘要: 针对运用压缩感知理论对 ISAR 目标成像时不同目标所需观测维数和积累时间不同的问题, 提出了一种基于压缩感知的稀疏孔径认知 ISAR 高分辨成像方法。在对目标稀疏特性认知的基础上, 构建了基于目标横向稀疏度和观测积累时间的随机观测矩阵, 并给出了成像质量评估标准, 实现了对有限雷达资源条件下 ISAR 目标的高分辨认知成像。仿真结果表明, 利用该方法成像, 不仅可以减少雷达成像发射脉冲数, 而且可以有效减少目标成像的时间, 同时还能获得高质量的目标 ISAR 像。

关键词: 逆合成孔径雷达; 压缩感知; 认知成像

中图分类号: TN957

文献标识码: A

文章编号: 1000-436X(2012)Z2-0262-08

Imaging method based on compressed sensing for the cognitive sparse aperture of ISAR

SUN Feng-lian, ZHANG Qun, LUO Ying, GU Fu-fei, WANG Guo-zheng

(Inst. of Information and Navigation, Air Force Engineering University, Xi'an 710077, China)

Abstract: Focused on the problem that different ISAR targets required different measurement dimension and different imaging time when they were imaging with compressed sensing (CS) theory, a cognitive high-resolution imaging method based on CS was proposed. According to the cognition of the sparsity of the radar target, a stochastic measurement matrix was established based on the imaging time and the target's cross-range sparsity. An evaluate criterion of imaging quality was also present. Based on this, the cognitive high-resolution imaging was realized with the limited radar resource. Simulation results indicate that the proposed method can gain the high quality ISAR imaging with much less transmitted pulses and shorter imaging time compare to traditional imaging radar.

Key words: inverse synthetic aperture radar (ISAR); compressed sensing (CS); cognitive imaging

1 引言

作为一种对运动目标实现二维高分辨成像的微波雷达, 逆合成孔径雷达 (ISAR) 在目标探测识别、天体观测及空中交通管制等领域都具有十分重要的应用价值^[1]。在现代高动态战场环境中, 雷达特别是多功能雷达同时担负着目标搜索、跟踪、成

像、识别等多重作战任务, 每个目标或任务都不可能独占所有的系统资源。尤其在对多目标进行成像时, 不可能保证每个目标都有足够的合成孔径时间来获得方位向的高分辨能力, 且对其中某一目标进行成像时还需分出一部分固定的资源来实现对其他目标的搜索、跟踪及识别。在这种工作模式下, 雷达分配给各目标的观测时间通常是有限的、间断

收稿日期: 2012-07-30

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (61172169, 60971100); 国家重点基础研究发展计划 (“973” 计划) 基金资助项目 (2010CB731905)

Foundation Items: The National Natural Science Foundation of China (61172169, 60971100); The National Basic Research Program of China (973 Program) (2010CB731905)

的,可认为是雷达系统对该目标在时域上进行低维观测的结果。

对于部分缺失即稀疏孔径的 ISAR 数据,传统方法一般首先采用线性预测^[2]或功率谱估计的参数化模型差值^[3]来形成一个全孔径数据,然后利用距离-多普勒(RD)方法进行成像。此类方法一般在孔径缺失较小时较为有效,但在孔径缺失较多时将引入较大误差,影响成像质量。针对这一问题,文献[4]提出了一种基于压缩感知(CS, compressed sensing)的稀疏孔径成像方法,并利用 OMP 算法重构出了高质量的目标 ISAR 像,有效地减小了孔径缺失程度对目标成像质量的影响。文献[5]指出,为高概率重构原始信号,观测维数需满足 $M \geq CK \ln(N)$ 。然而实际中目标回波信号的稀疏度往往是未知的,这给雷达发射信号参数的设计带来了困难,从而无法保证雷达资源的最佳利用。同时,由于具有不同运动特征的目标具有不同的多普勒特征,获得特定方位分辨率所需成像积累时间也将有所不同。所以,研究如何在保证目标成像质量的前提下合理配置雷达观测时间,对于未来雷达的智能化发展将具有重要意义。

从上述背景条件出发,本文将“认知^[6]”思想引入雷达成像,以线性调频信号为基本信号形式,在对目标横向稀疏特性认知的基础上,建立了相应的随机观测矩阵和成像质量评估标准,并在压缩感知成像理论框架下实现了雷达发射脉冲数与目标观测时间的自适应调整。该方法可在实现雷达高分辨的同时有效节约系统资源,提高系统工作效率。

2 基于线性调频信号的高分辨成像

线性调频信号(LFM, linear frequency modulation signal)通过非线性相位调制获得了大带宽、大时宽特性,具有良好的距离分辨率和径向速度分辨率等特点,目前已经广泛应用于高分辨率雷达成像领域^[7]。

雷达发射线性调频信号,其表达式为

$$s(t) = \text{rect}\left(\frac{t}{T_p}\right) \cdot \exp\left(j2\pi\left(f_c t + \frac{1}{2}\mu t^2\right)\right) \quad (1)$$

其中, f_c 为载频, T_p 为脉冲持续宽度, μ 为调频率。

若目标为点目标模型,则在慢时间 τ_n 时刻,目标回波可以写成

$$s_r(t, \tau_n) = \sum_{k=1}^K \sigma_k \cdot \text{rect}\left(\frac{t - 2R_k(\tau_n)/c}{T_p}\right) \cdot \exp\left(j2\pi\left(f_c\left(t - \frac{2R_k(\tau_n)}{c}\right) + \frac{1}{2}\mu\left(t - \frac{2R_k(\tau_n)}{c}\right)^2\right)\right) \quad (2)$$

其中, σ_k 为第 k 个散射点的反射系数, $R_k(\tau)$ 为第 k 个散射点到雷达的距离, c 为光速。

假设已经完成了精确的运动补偿,取参考信号为

$$s_0(t, \tau_n) = \text{rect}\left(\frac{t - 2R_{\text{ref}}(\tau_n)/c}{T_{\text{ref}}}\right) \cdot \exp\left(j2\pi\left(f_c\left(t - \frac{2R_{\text{ref}}(\tau_n)}{c}\right) + \frac{1}{2}\mu\left(t - \frac{2R_{\text{ref}}(\tau_n)}{c}\right)^2\right)\right) \quad (3)$$

其中, $R_{\text{ref}}(\tau)$ 为参考点到雷达的距离, T_{ref} 为参考信号的脉冲宽度,通常略大于 T_p 。

令回波信号与参考信号共轭相乘,即 $s_c(t, \tau_n) = s_r(t, \tau_n) \cdot s_0^*(t, \tau_n)$,并以参考时延为基准作关于 $t_r = t - 2R_{\text{ref}}(\tau_n)/c$ 的快时间傅里叶变换,剔除 RVP 和包络斜置项,整理可得

$$S_c(f, \tau_n) = T_p \sum_{k=1}^K \sigma_k \sin c\left(T_p\left(f + \frac{2\mu}{c} \cdot R_{\Delta k}\right)\right) \cdot \exp\left(-j\frac{4\pi}{c} f_c R_{\Delta k}\right) \quad (4)$$

对上式取模即可得到目标的一维距离像。

在观测时间(即成像积累时间)很短的情况下,可假设目标散射点相对于参考点在雷达视线方向上作匀速运动,速度为 v ,则在慢时间 τ_n 时刻散射点相对于参考点的径向距离

$$R_{\Delta k} = R_{\Delta k0} + v\tau_n \quad (5)$$

其中, $R_{\Delta k0}$ 为成像初始时刻目标散射点与参考点之间的径向距离。将式(5)代入式(4)后,对其做关于慢时间方向上的傅里叶变换后,得到^[8]

$$s_c(f, f_{\tau n}) = T \cdot T_p \sum_{k=1}^K \sigma_k \sin c\left(T_p\left(f + \frac{2\mu}{c} \cdot R_{\Delta k0}\right)\right) \cdot \sin c\left(T\left(f_{\tau n} + \frac{2f_c}{c}v\right)\right) \exp\left(-j\frac{4\pi}{c} f_c R_{\Delta k0}\right) \quad (6)$$

可以看出, $|S_c(f, f_{\tau n})|$ 在多普勒域上的峰值出现在 $f_{\tau} = -2f_c v/c$ 处,通过简单计算即可得到目标

的方位向信息，实现目标的高分辨成像。

3 基于压缩感知的稀疏孔径认知 ISAR 成像

在上述成像方法中，目标的距离向高分辨通过大的信号带宽得到，方位向高分辨则通过长的积累时间合成大的雷达孔径来实现。对于多功能雷达而言，雷达系统资源极其宝贵，分配给每个目标的时间都是有限的、间断的，方位孔径稀疏现象较为严重，这与压缩感知^[9,10]的降维观测概念是一致的。因而，可直接利用稀疏孔径数据，通过压缩感知理论实现对该目标的高分辨 ISAR 成像。

3.1 基于压缩感知的稀疏孔径 ISAR 成像

为运用 CS 理论对信号进行处理，需首先对信号的稀疏性进行分析。设一有限长一维信号为 $X \in \mathbb{R}^N$ ，其在某规范正交基（设为 $\Psi = \{\psi_1, \psi_2, \dots, \psi_N\}$ ）下可表示为

$$X = \sum_{l=0}^{N-1} \theta_l \psi_l \text{ 或 } X = \Psi \Theta \quad (7)$$

其中， $\Theta = \{\theta_l\} = \{\langle X, \psi_l \rangle\}$ 只有 K ($K < N$) 个非零或绝对值较大的系数，则说明该信号是可稀疏的，且其稀疏度为 K 。

由式 (6) 可以看出，若散射点目标在方位向上是 K 稀疏的（通常 ISAR 目标均近似满足稀疏条件），则 $S_c(f, f_{\tau_n})$ 在多普勒域上是 K 稀疏的。令 $X = \{x_i\} = \{S_c(f, \tau_n)\}$ ， $\Theta = \{\theta_k\} = \{S_c(f, f_{\tau_n})\}$ ，则有

$$X = \Psi \Theta = D_N^{-1} \Theta \quad (8)$$

其中， D_N^{-1} 为 IDFT 变换矩阵。

假设为获得期望的 ISAR 方位向高分辨，目标方位角相干积累时间为 T ，共发射 $M_T = PRF \cdot T$ 个脉冲信号。在多目标环境中，设针对某一目标雷达只随机发射了 M ($M < N$) 个子脉冲，即对于该目标来说只有 M 个有效孔径数据，如图 1 所示。

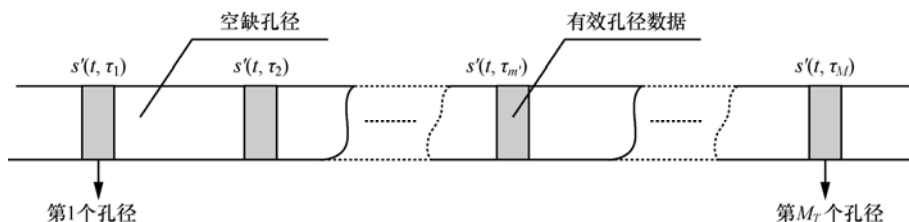


图 1 稀疏孔径数据示意

假设该数据已完成距离向脉压处理，得到的稀疏孔径信号模型为

$$S_c'(f, \tau_m) = T_p \sum_{k=1}^K \sigma_k \text{sinc} \left(T_p \left(f + \frac{2\mu}{c} \cdot R_{\Delta k} \right) \right) \exp \left(-j \frac{4\pi}{c} f_c R_{\Delta km} \right) \quad (9)$$

与传统的乃奎斯特理论的逐点采样不同，CS 并不是直接对信号本身进行测量，而是通过随机测量矩阵 $\Phi = \{\phi_1, \phi_2, \dots, \phi_M\}$ 把信号 X 投影到低维空间上，得到 M ($M < N$) 个测量值 $y_m = \langle X, \phi_m \rangle$ 。设计一个 $M \times N$ 维的随机部分单位阵作为观测矩阵 Φ ，满足

$$\Phi = \{\phi_{m,n}\} = \begin{cases} 1, & \{(m,n) | \tau_m = \tau_n\} \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \quad (10)$$

则 $Y = S_c'(f, \tau_m) = \Phi S_c(f, \tau_n)$ ，即 $Y = \Phi X = \Phi D_N^{-1} \Theta$ 。

显然，由于观测集合 Y 中的元素个数远小于信号 X 中的元素个数，从观测集合 Y 中重构信号 X 是一个求解欠定方程组的问题，无法直接求解。为高概率重构原信号，传感矩阵 $\Phi \Psi$ 必须满足约束等距性 (RIP, restricted isometry property) 条件^[11]。文献[12]从理论上证明了基于随机采样并利用部分傅里叶矩阵重构稀疏信号的可行性，因此，可通过求解如下最优化模型完成对信号方位信息重构。

$$\begin{aligned} \Theta &= \min \|\Psi^H \Phi^H S_c'(f, \tau_m)\|_1 \\ \text{s.t. } S_c'(f, \tau_m) &= \Phi X = \Phi \Psi \Theta \end{aligned} \quad (11)$$

目标函数 Θ 即为所期望的目标方位像。对 $m=1, 2, \dots, M$ 均按式(11)进行求解，并排列成一个矩阵，即可得到目标的二维 ISAR 像。

3.2 基于认知的子孔径稀疏设计

在以上分析中，假设稀疏度为已知，而实际应用中，ISAR 目标稀疏度 K 往往是未知的，需首先对其做出合理估计。从 CS 角度来看，一个离散信号的稀疏度可以表示为该信号中数值较大元素的

个数，而“势”是指一个集合中元素的个数，所以，当该集合满足一定条件时，两者在含义上是相同的，可利用“势”^[13]来表示该信号的稀疏度估计值。

$$C_{S_{T_h}} = \left\| \left\{ S(n) : S(n) \geq T_h \right\} \right\|_c, n=1, 2, L, N \quad (12)$$

其中， $S(n)$ 是一个长度为 N 的离散信号， T_h 为一设定门限， $C_{S_{T_h}}$ 即为设定门限下该离散信号的稀疏度估计值，记为 \hat{K} 。

为了便于理论分析，首先将传统成像时间 T 分为 I 段，记为 $T_i, i=1, 2, L, I$ ，时间间隔 $\Delta T_i = T_i - T_{i-1}$ ，起始时间为 $T_0 = 0$ ，并重新记 $S'_c(f, f_{\tau_m})$ 为 $S'_{c,i}(f, f_{\tau_m})$ 。具体成像过程阐述如下。

1) 在雷达扫描到目标后，首先发射少数 LFM 信号脉冲，并按第 2 节方法得到该目标的一个粗分辨 ISAR 像 $S'_{c,i}(f, f_{\tau_m})(i=1)$ 。

2) 为给出合适的门限值 $T_h (0 < T_h < 1)$ ，对得到的目标 ISAR 像按下式作归一化处理。

$$\bar{S}'_{c,i}(f_{\tau,m}) = \frac{\bar{S}'_{c,i}(f_{\tau,m}) - \min_{f_{\tau,m}} \left\{ \bar{S}'_{c,i}(f_{\tau,m}) \right\}}{\max_{f_{\tau,m}} \left\{ \bar{S}'_{c,i}(f_{\tau,m}) \right\} - \min_{f_{\tau,m}} \left\{ \bar{S}'_{c,i}(f_{\tau,m}) \right\}} \quad (13)$$

其中， $\bar{S}'_{c,i}(f_{\tau,m}) = \max_{j=1, 2, L, N} \left| \bar{S}'_{c,i}(f_j, f_{\tau,m}) \right|$ ， N 为目标距离向单元数。

3) 根据式 (12)，计算 $\bar{S}'_{c,i}(f_{\tau,m})$ 在设定门限 T_h 下的“势”，得到对目标横向稀疏度的估计值 \hat{K}_i ，实现对目标稀疏度的初步认知。

4) 利用 T_i 时间获得的横向稀疏度估计值，通过下式计算 ΔT_{i+1} 内雷达基于 CS 成像发射脉冲数 M'_{i+1} 。

$$M'_{i+1} = \left\lceil \frac{1}{I} \cdot z \hat{K}_i \ln(M_T) \right\rceil \quad (14)$$

其中， z 为较小整数， $\lceil \cdot \rceil$ 表示向正无穷取整。

5) 在时间 ΔT_{i+1} 内随机发送 M'_{i+1} 个 LFM 脉冲，并构造观测矩阵 Φ'_i ，满足

$$\begin{cases} \Phi'_{i+1} = \left\{ \Phi'_i, \Phi'_{i+1}, \text{zeros}(M - M_i - M'_{i+1}, M_T) \right\} \\ \Phi'_i = \begin{cases} 1, & \left\{ (m_i, m_i) \mid \tau'_{m_i} = \tau'_{m_i} \right\} \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \\ \Phi'_1 = \Phi''_1 \\ i = 1, 2, L, I-1 \end{cases} \quad (15)$$

其中， $m_i = M_{T_i}, M_{T_i} + 1, L, M_{T_{(i+1)}} - 1, m_i = 1, 2, L,$

$M'_i, M = z \hat{K}_i \ln(M_T)$ 为根据 T_i 时刻目标稀疏度估计值 \hat{K}_i 得到的为保证目标成像分辨率所需要的稀疏孔径数， $M_i = M'_1 + M'_2 + L + M'_i (M'_1 = M_1 = M_{T_1})$ 为 T_i 时间内雷达实际发射稀疏孔径数。

6) 按第 3.1 节的成像方法对目标 ISAR 像进行重构，转 2)。利用获得的目标横向稀疏度估计值 \hat{K}_{i+1} 来重构下一个时间点 T_{i+2} 时刻的目标 ISAR 像。

3.3 雷达观测时间自适应调整

在多目标、多任务的电磁环境下，系统资源极其宝贵，分配给各个目标的观测时间都是有限的，且对系统处理的实时性要求较高。由于在对稀疏孔径 ISAR 目标进行成像时，具有不同运动特征的目标获得特定方位向分辨率所需要的成像积累时间也不同，因而可设计一个目标成像质量评估标准，利用认知雷达从接收端到发射端的信息反馈，实现对目标成像积累时间的自适应调整，以达到节省雷达时间资源的目的。

从信息论角度讲，当相邻两时刻重构的目标方位像互信息量较大时，说明前一时刻的目标方位像并没有包含目标的全部信息，继续增大观测时间可以获得更多的目标方位向信息；反之，若相邻两时刻重构得到的目标方位像互信息量很小，则说明继续增加成像时间已不能从雷达回波中获得更多的关于目标方位向的有效信息^[14,15]，可停止对该目标的继续观测。此时，若以该两时刻重构目标方位像的相关系数为标准，则其相关系数很大。因此，可选择相邻两时刻重构得到目标方位像的相关系数作为目标成像质量评估标准，当其相关系数达到某一合适的阈值时，即认为目标成像质量已达到期望标准。

在对目标成像质量阈值 T_α 进行设置时，还应参照目标特定的成像环境。若需实现对目标的精确识别，即对目标成像质量要求较高，则取较大的 T_α 值，反之，若雷达处于多目标多任务环境中，时间资源较为宝贵，且对系统的实时处理能力要求较高，则可适当降低对 T_α 值的设定。

根据式 (13) 和式 (15) 自适应稀疏雷达孔径，并按照第 3.2 节方法重构 T_{i+1} 时刻目标 ISAR 像 $S'_{c,i+1}(f, f_{\tau_m})$ 。假设 T_{i+1} 及 T_i 时刻重构目标方位像的相关系数为 α ，其具体计算公式为

$$\alpha = \frac{\int |S'_{c,i+1}(\cdot, f_{\tau_m})| |S'_{c,i}(\cdot, f_{\tau_m})| df_{\tau_m}}{\sqrt{\int |S'_{c,i+1}(\cdot, f_{\tau_m})|^2 df_{\tau_m} \cdot \int |S'_{c,i}(\cdot, f_{\tau_m})|^2 df_{\tau_m}}} \quad (16)$$

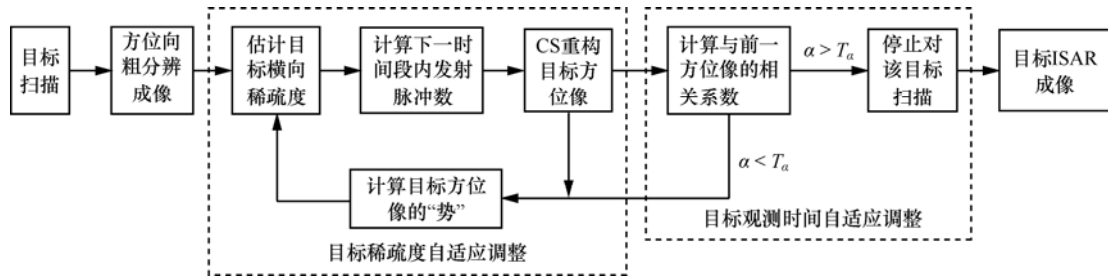


图 2 基于压缩感知的稀疏孔径认知高分辨成像方法流程

若 $\alpha < T_\alpha$ ，则说明由于观测时间太短，通过 OMP 算法得到的重构精度太低，需继续增加目标观测时间至 $T_{i+1}, i < I - 1$ ，并按 3.1 节方法进行成像；若 $\alpha \geq T_\alpha$ ，则说明通过增加观测时间已无法获得更多有必要的信息量，即认为该方位像的质量达到了对目标成像精度的要求，可以停止对该目标的继续观测，完成对该目标的高分辨成像。

综上所述，本文提出的基于 CS 理论的稀疏孔径认知高分辨成像方法可概括为图 2 所示的流程。

4 仿真实验

为验证本文所提认知雷达波形高分辨成像的有效性，笔者采用图 3 所示飞机散射点模型进行仿真分析。该目标共由 29 个散射点构成，运动速度为 300m/s，与雷达之间距离为 10km。雷达发射信号为线性调频信号，具体仿真参数如表 1 所示。

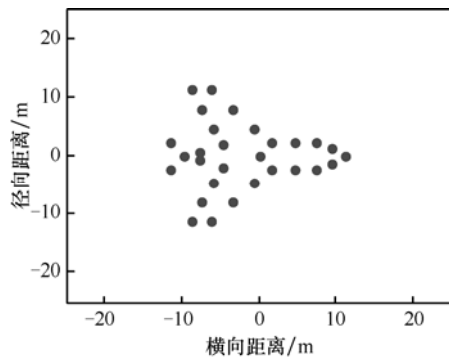


图 3 飞机目标散射点模型

表 1 系统仿真参数

仿真参数	值
信号载频(f_c)	10GHz
脉冲带宽(B)	300MHz
脉冲重复频率(PRF)	1 000MHz
距离向分辨率(Δr)	0.5m
期望的方位向分辨率(Δa)	0.5m

首先，利用基于 CS 的稀疏孔径成像方法对该目标进行二维 ISAR 成像，为达到期望横向分辨率，雷达对目标观测时间 $T = 1s$ ，发射脉冲数 $M = 103$ ，成像结果如图 4 所示。

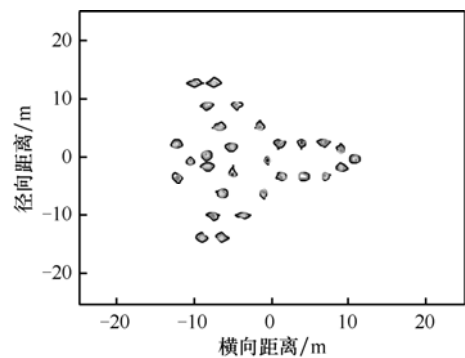


图 4 基于压缩感知的稀疏孔径 ISAR 像

下面，利用本文所提基于 CS 的稀疏孔径认知高分辨成像方法展开相关仿真研究。

为便于仿真分析，将成像时间 T 等间隔分为 10 段，即为 $T_i = iT/10, i = 1, 2, \dots, 10$ ，设定阈值 $T_\alpha = 0.9$ ，当相邻 2 次 ISAR 像方位向相关系数 $\alpha > 0.9$ 时即认为对该目标的成像质量已达到所需精度要求。

雷达扫描到目标后，首先在 T_1 时间发射少量脉冲，本实验中取为 100 个，利用传统方法重构长度为 N 的目标粗分辨 ISAR 像，如图 5 所示。对目标方位像归一化，并设定阈值 $T_h = 0.2$ ，得到目标横向稀疏度估计初始值为 53，完成对目标信息的初始“认知”。增加目标观测时间，并利用 3.1 节所述方法依次重构 T_i 时刻目标 ISAR 像，得到 $T_2 = 0.2s$ 时的重构结果如图 6 所示。可以看出，此时目标的成像质量较 $T_1 = 0.1s$ 时已有较大改进，但由于观测时间太短，目标成像质量依然很不理想。计算相邻 2 次目标 ISAR 像方位向相关系数为 $\alpha = 0.7203 < T_\alpha$ ，需继续增加目标观测时间。

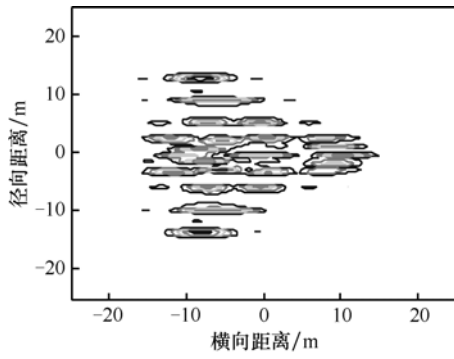


图 5 飞机目标粗分辨 ISAR 像

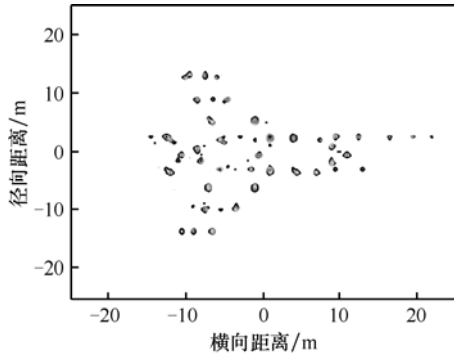


图 6 0.2s 时飞机目标 ISAR 像

依次增加成像时间，并计算相邻 2 次目标方位像的相关系数，进一步估计对目标横向稀疏度的估计值，得到如表 2 所示的系统参数自适应调整过程。可以看出，当雷达观测时间 $T' = 0.7s$ 时，前后 2 次目标方位像的相关系数为 $\alpha = 0.9273 > T_\alpha$ ，达到了预定的成像质量要求，停止对该目标的继续观测。此时，通过 OMP 算法重构得到的目标 ISAR 像如图 7 所示。

可以看出，该目标 ISAR 像分辨率较高，成像质量较好。计算图 7 与图 4 目标 ISAR 像的相关系数为 0.9458，接近于 1，但成像时间仅为 0.7s，且 T_1 时间后基于 CS 理论稀疏孔径认知成像所发射的脉冲数仅为 73 个。

为便于比较，下面对 $T = 0.7s$ 时的稀疏孔径数据单纯利用 CS 方法进行成像，成像时间内对目标的横向稀疏度始终设为 29，即为该飞机模型的真实

稀疏度，得到目标的成像结果如图 8 所示。可以看出，由于相干积累时间较短，该目标 ISAR 像的横向分辨率较低，成像质量较差。计算其与传统方法所得 ISAR 像的相关系数，得到 $\alpha = 0.8792$ ，小于本节所提的基于认知的成像结果。

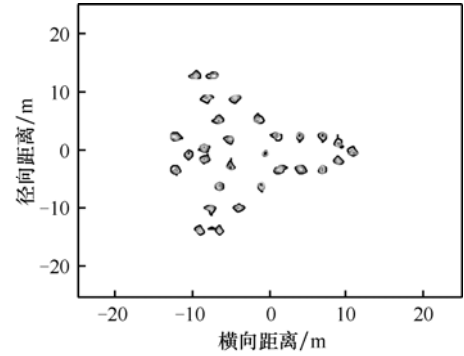


图 7 基于压缩感知的稀疏孔径认知成像

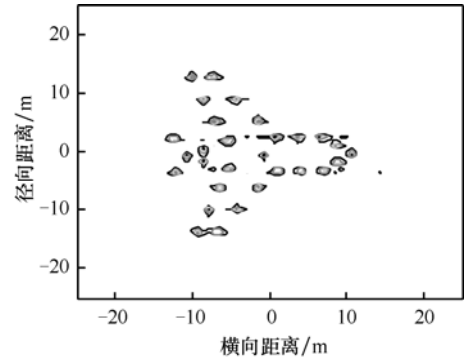


图 8 $T=0.7s$ 时单纯基于压缩感知的稀疏孔径成像

以上实验都是基于无噪声条件下展开的，它充分验证本文所提方法的有效性。在实际应用中，目标成像环境中大都存在一定的噪声，它部分破坏了信号在变换域中的稀疏性，进而影响基于 CS 的信号重构质量。在本文所述的应用中，由于基于 CS 的 ISAR 目标认知重构是在对回波信号“dechirp”处理后进行的，在此过程中，目标信号通过相干积累获得了较大的增益，而噪声信号由于非相干却无法获得同样的增益。因而在重构时，信号的信噪比相对于接收端的回波信号已有明显改善。当接收端信

表 2 系统自适应调整参数

参变量	时段 T_i/s						
	$T_1 = 0.1$	$T_2 = 0.2$	$T_3 = 0.3$	$T_4 = 0.4$	$T_5 = 0.5$	$T_6 = 0.6$	$T_7 = 0.7$
脉冲总数 M_i	100	116	127	138	150	162	173
稀疏度估计 \hat{K}_i	44	29	28	33	32	28	29
相关系数 $\alpha_{i,i-1}$	0	0.7203	0.7754	0.8468	0.8516	0.8986	0.9273

噪比为 -5dB 时, 利用本文方法在 $T = 0.7\text{s}$ 时得到的目标 ISAR 像如图 9 所示。

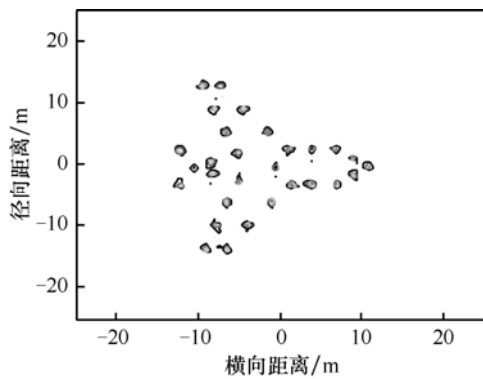


图 9 $SNR = -5\text{dB}$, $T'_a = 0.7\text{s}$ 时, 基于压缩感知的稀疏孔径认知成像

可以看出, 目标的成像质量并未受太大影响。但由于加入了随机噪声, 本实验在对参数进行设计时, 适当降低了相邻 2 次目标像相关系数阈值的设定, 取为 $T'_a = 0.7$, 这也符合对智能化系统参数自适应调整的基本要求。

综上分析, 在利用本文所提基于 CS 理论的认知方法对 ISAR 目标进行成像时, 不仅可以大幅减少雷达成像所需的发射脉冲数, 而且可以有效减少雷达成像时间, 同时可以重构出高质量的目标 ISAR 像, 与单纯基于 CS 理论的 ISAR 成像相比, 更适合于多目标、多任务、多变化的复杂电磁环境。

5 结束语

本文提出了一种基于 CS 理论的稀疏孔径认知 ISAR 成像方法。在对目标横向稀疏特性认知的基础上, 建立了相应的随机观测矩阵和成像质量评估标准, 并在压缩感知成像理论框架下实现了对目标的高分辨成像。仿真结果表明, 通过该方法对 ISAR 目标进行成像时, 既可保证目标在期望分辨率下的成像质量, 又可以有效地节省雷达系统资源, 且具有一定的顽健性。本文所展开的研究工作对于认知雷达成像技术的智能化发展具有一定的价值和意义。

参考文献:

[1] 邢孟道. 基于实测数据的雷达成像方法研究[D]. 西安: 西安电子科技大学博士论文, 2002.
XING M D. A Study of Radar Imaging Based on the Real-Measured

Date[D]. Xi'an, China: Doctoral Dissertation of Xidian University, 2002.

[2] POTTER L C, ARUN K S. Energy concentration in band-limited extrapolation[J]. IEEE Trans on Acoustics Speech and Signal Processing, 1989, 37(7):1027-1041.

[3] 王琦, 周峰, 邢孟道等. 雷达成像中稀疏孔径外推新算法[J]. 电子与信息学报, 2007, 29(11):2698-2701.
WANG Q, ZHOU F, XING M D, *et al.* A new algorithm for sparse aperture extrapolation in radar imaging[J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2007, 29(11):2698-2701.

[4] 李军, 邢孟道, 张磊等. 一种高分辨的稀疏孔径 ISAR 成像方法[J]. 西安电子科技大学学报(自然科学版), 2010, 37(3):441-446.
LI J, XING M D, ZHANG L, *et al.* High resolution imaging method for the sparse aperture of ISAR[J]. Journal of Xidian University (Natural Science), 2010, 37(3):441-446.

[5] KUNIS S, RAUHUT H. Random sampling of sparse trigonometric polynomials II: orthogonal matching pursuit versus basis pursuit[J]. Foundations of Computational Mathematics, 2007, 8(6):737-763.

[6] ZHANG J D, ZHU D Y, ZHANG G. A daptive compressed sensing radar oriented towads cognitive detection in dynamic sparse target science[J]. IEEE Copyright (c), 2011, 1-20.

[7] 潘继飞, 姜秋喜, 毕大平等. 线性调频雷达信号特征研究[J]. 电子对抗, 2003, 89(2):24-27.
PAN J F, JIANG Q X, BI D P, *et al.* Characteristic study of LFM radar signal[J]. Electronic Countermeasures, 2003, 89(2):24-27.

[8] 雷强. 压缩感知在高分辨雷达成像中的应用[D]. 西安: 空军工程大学硕士学位论文, 2010.
LEI Q. Application of Compressed Sensing in High-Resolution Radar Imging[D]. Xi'an, China: Master Dissertation of Air Force Engineering University, 2010.

[9] DONOHO D L. Compressed sensing[J]. IEEE Trans on Information Theory, 2006, 52(4):1289-1306.

[10] 金坚, 谷源涛, 梅顺良. 压缩采样技术及其应用[J]. 电子与信息学报, 2010, 32(2):470-475.
JIN J, GU Y T, MEI S L. An introduction to coperative sampling and its applications[J]. Jounal of Electronics & Information Technology, 2010, 32(2):470-475.

[11] CANDÉS E. The restricted isometry property and its implications for compressed sensing [J]. Comptes Rendus Mathematic, 2006, 246 (9): 589-592.

[12] CANDES E, ROMBERG J, TAO T. Robust uncertainty principles:

exact signal reconstruction from highly incomplete frequency information[J]. *IEEE Trans on Info Theory*, 2006, 52(2):489-509.

[13] ZHU F, ZHANG Q, LUO Y, *et al.* A novel cognitive ISAR imaging method with random stepped frequency chirp signal[J]. *Science China Information Science*, 2012, 55(8):1910-1924.

[14] ROMAN J R, DAVIS D W, GARNHAM J W, *et al.* Waveform diversity via mutual information[J]. *Digital Signal Processing*, 2009, 19(1): 45-58.

[15] 贺亚鹏, 庄珊珊, 李洪涛等. 基于感知矩阵统计相关系数最小化的压缩感知雷达波形优化设计[J]. *电子与信息学报*, 2011, 33(9):2097-2102.

HE Y P, ZHUANG S N, LI H T, *et al.* Waveform design for compressive sensing radar based on minimizing the statistical coherence of the sensing matrix[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2011, 33(9):2097-2102.

作者简介:



孙凤莲 (1988-), 女, 山东潍坊人, 空军工程大学硕士生, 主要研究方向为雷达信号处理。



张群 (1964-), 男, 陕西合阳人, 空军工程大学教授、博士生导师, 主要研究方向为雷达信号处理、雷达成像、目标识别。



罗迎 (1984-), 男, 湖南益阳人, 空军工程大学助教, 主要研究方向为雷达信号处理。



顾福飞 (1987-), 男, 江苏淮安人, 空军工程大学博士生, 主要研究方向为压缩感知理论与雷达成像。

王国正 (1960-), 男, 陕西乾县人, 空军工程大学教授、硕士生导师, 主要研究方向为运筹学与控制论、最优化理论等。