

## 基于压缩感知的 ISAR 高分辨成像算法

李少东, 杨军, 马晓岩

(空军预警学院 空天预警装备系, 湖北 武汉 430019)

**摘要:**针对 ISAR 在短孔径条件下存在的方位向分辨率低、易受噪声干扰等问题, 基于压缩感知理论, 提出了一种适用于短孔径时间模式下的基于压缩感知的 ISAR 方位向高分辨成像算法——PH-SL0 算法。该算法首先构建部分随机化哈达玛矩阵作为量测矩阵, PH 矩阵具有重构精度高、重构需要量测个数少的优点; 然后将运算速度快、重构精度高且稳健性好的平滑 0-范数法 (SL0, smoothed L0-norm) 推广应用到雷达复数域进行信号重构, 实现 ISAR 的横向高分辨成像; 最后对在短 CPI 条件下提出的 PH-SL0 算法的横向分辨率问题进行了理论分析。仿真和实测数据结果表明, 所提算法具有更高的聚焦性能、分辨率以及较好的抗噪性能。

**关键词:** 压缩感知; 部分随机化哈达玛; 短孔径时间; 平滑 0-范数法

中图分类号: TN957

文献标识码: B

文章编号: 1000-436X(2013)09-150-08

## High resolution ISAR imaging algorithm based on compressive sensing

LI Shao-dong, YANG Jun, MA Xiao-yan

(Department of Air Space-based Early Warning Equipment, Air Force Early Warning Academy, Wuhan 430019, China)

**Abstract:** According to the problem that conventional imaging algorithms have some unavoidable shortcomings such as low resolution of image and being fragile to the noise with short coherent processing interval (CPI), an improved ISAR imaging algorithm via CS method, namely, PH-SL0 algorithm, was proposed. In the proposed algorithm, as a kind of measure matrix, partial randomizer Hadamard matrix (PH) has many advantages such as high reconstruction precision and low dimension of measure matrix. Meanwhile, as a reconstruction algorithm, SL0 has many advantages such as demanding fewer measurements than existing methods, having higher reconstructed accuracy and better robust. Therefore, making use of the advantages of PH and SL0, and extending them to the field of radar, the azimuth imaging with short imaging data could be implemented. Finally, simulation results and experimental results of real data show that the algorithm has higher imaging resolution and better robust to noise.

**Key words:** compressed sensing; partial randomizer Hadamard matrix; short CPI; smooth L0-norm

### 1 引言

逆合成孔径雷达 (ISAR, inverse synthetic aperture radar) 作为一种高分辨率的微波成像系统, 通常发射大带宽信号获得高分辨距离像, 利用目标相对雷达视线的旋转运动获得方位向的高分辨能力, 进而可实现对舰船、空中以及空间目标等非合作运动目标的成像, 并获得其二维结构特征。常规 ISAR 成像算法的横向分辨率与雷达载频以及

目标转动角有关, 高的目标横向分辨率需要较大的目标转动角或长相干处理时间间隔 (CPI, coherent processing interval)。针对在实际应用中短 CPI 条件下超分辨 ISAR 成像存在的问题, 国内外学者提出了许多超分辨算法, 概括起来, 大致分为 2 类: 谱估计<sup>[1]</sup>和谱外推类算法<sup>[2]</sup>, 这 2 类方法主要存在的问题是需对基于回波构建的谱模型的阶数进行准确估计, 而模型的阶数与噪声强度和分布相关, 导致难以准确估计模型阶数。近年来 Donoho、Candes

和 Tao 等人提出的压缩感知(CS, compressive sensing)理论是建立在矩阵分析、统计概率论、拓扑几何、优化与运筹学、泛函分析等基础上的一种全新的信号描述与处理的理论框架<sup>[3]</sup>,它充分利用目标信号结构的稀疏特性,通过非自适应线性投影得到信号的量测值,然后利用重构算法实现对信号的精确重构。许多学者将 CS 理论应用于短孔径条件下的 ISAR 成像,以获得高分辨。文献[4]通过求解一个 1-范数问题实现了短孔径有限数据条件下的高分辨 ISAR 成像。但是基于 1-范数的 ISAR 成像算法的效率较低,难以用于实际;文献[5]针对短孔径条件下 ISAR 成像中可能会引起虚假点或漏检的问题,提出了一种基于统计 CS 的短孔径成像方法,但是该文中使用 OMP 算法作为重构算法,虽然计算速度快,但是存在算法易受噪声干扰且重构精度不高的问题。由于 CS 重构算法对噪声十分敏感,强噪声条件下几乎无法得到准确的信号重构值,文献[6,7]提出了低信噪比条件下的基于 CS 的 ISAR 成像方法,但是其都是基于凸优化算法得到的 ISAR 成像结果,由于 1-范数不能充分反映稀疏向量的稀疏特征,使得低信噪比条件下重构稀疏向量时需要较多的量测数。

本文针对在短孔径时间内传统成像算法存在成像分辨率低、易受噪声干扰影响的问题,为实现短相干处理时间内 ISAR 方位高分辨成像,分析了 CS 用于 ISAR 成像时的稀疏基构造,构建局部随机化哈达玛矩阵作为量测矩阵,并将平滑 0-范数推广至雷达信号复数域处理,提出了一种新的重构算法—部分随机化哈达玛—平滑 0-范数重构(PH-SL0, partial randomizer Hadamard-smooth L0 norm)算法。该算法综合利用 PH 矩阵的强互不相干性和随机独立性以及 SL0 算法作为重构算法时的高效和抗噪性能,将算法应用到方位向成像后,不仅实现了短孔径条件下的方位高分辨,还降低了噪声对成像的影响。仿真和实验结果验证了本文所提算法的有效性和抗噪性。

## 2 CS-ISAR 算法分析

### 2.1 CS 理论简介

对于长度为  $M$  的稀疏复信号  $s \in C^M$ ,若信号本身不稀疏,那么一定存在一组变换基  $\Phi \in C^{M \times M}$ ,使得  $s$  在该变换基上的投影是稀疏的,记为  $s = \Phi q$ 。其中,  $q \in C^M$  为稀疏信号,于是量测过程可写为<sup>[8]</sup>

$$y = F\Phi q = Tq \tag{1}$$

$F \in C^{N \times M}$  称为量测矩阵,  $T = F\Phi$  是大小为  $N \times M$  ( $N \ll M$ ) 的矩阵,称为感知矩阵。基于压缩感知的稀疏重构就是从  $y$  中恢复出原始信号  $s$ 。文献[9]中证明了如下结论:当感知矩阵  $\Phi$  满足约束等距性 (RIP, restricted isometry property) 条件时,信号可以通过求解一个欠定方程从量测值中精确地重构,即

$$\min \|q\|_0 \quad \text{s.t.} \quad y = Tq \tag{2}$$

其中,  $\|\cdot\|_p$  表示  $p$ -范数,  $q$  表示待重构稀疏信号。

从上可知,压缩感知理论主要包括稀疏基  $\Phi$  的构建、量测矩阵  $F$  的构建、重构算法择优 3 方面的内容。

本文针对压缩感知理论这 3 个最重要的问题,结合 ISAR 成像理论,首先对基于 CS 的 ISAR 算法进行分析;其次提出了新的重构算法—PH-SL0 算法;最后分析在短孔径条件下方位仍能高分辨的原因。

### 2.2 CS-ISAR 成像分析

本文的研究重点是 ISAR 方位向成像,因此假设已经对回波数据完成了脉冲压缩、运动补偿以及相位校正处理。令  $T_a$  表示观测时间,假定目标在  $T_a$  时间内以恒定角速度  $\omega$  在二维平面内转动,转台模型如图 1 所示。

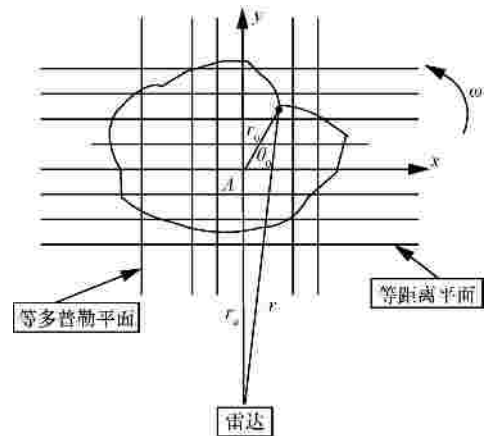


图 1 雷达转台成像模型

ISAR 通过发射大时宽带宽信号来获得距离向上的高分辨。假设雷达发射的线性调频信号为<sup>[10]</sup>

$$s_T(t_f) = \text{rect}\left(\frac{t_f}{t_p}\right) \exp\left(j2\pi\left(f_c t_f + \frac{1}{2}g t_f^2\right)\right) \tag{3}$$

其中,  $t_f$  为快时间,  $t_p$  为脉冲宽度,  $f_c$  为载频,  $g$

为调频斜率,  $rect(\cdot)$  为矩形函数。在某个距离单元内, 假设有  $K$  个具有不同方位角坐标的散射点, 用  $s$  表示散射系数, 则此距离单元的回波信号可以表示为

$$s_B(t_r, t_a) = \sum_K rect\left(\left(t_r - \frac{2R_k(t_a)}{C}\right)/t_p\right) s_k \cdot \exp\left[j2p\left(f_c\left(t_r - \frac{2R_k(t_a)}{C}\right) + \frac{1}{2}g\left(t_r - \frac{2R_k(t_a)}{C}\right)^2\right)\right] \quad (4)$$

其中,  $C$  为光速,  $R_k(t_a)$  表示第  $k$  个散射点在  $t_a$  时刻距离雷达的距离。式(4)经脉压之后可以表示为

$$s_M(t_r, t_a) = \sum_K s_k \exp\left[-j4pf_c \frac{R_k(t_a)}{C}\right] \cdot \text{sinc}\left(t_p \left(t_r - \frac{2R_k(t_a)}{C}\right)\right) \quad (5)$$

对脉压后的回波进行运动补偿、相位校正之后, 位于某个距离单元处的信号可以表示为<sup>[7,11]</sup>

$$s_a(t_a) = \sum_K s_k \text{rect}\left(\frac{t_a}{T_a}\right) \exp(-j2pf_k t_a) \quad (6)$$

其中,  $f_k$  表示第  $k$  个散射点相对于参考点的多普勒频率。假设多普勒域的范围是  $[-f_d/2, f_d/2]$ , 多普勒分辨率为  $\Delta f_d$ , 则回波散射点的强度可以用一维向量  $q$  表示

$$q^T = [q_1, q_2, \dots, q_q, \dots, q_Q]_{1 \times Q} \quad (7)$$

其中,  $q_q$  表示位于多普勒单元  $f_{d_q}$  内散射点的散射系数,  $f_{d_q} = q\Delta f_d - F_r/2$ ,  $F_r$  为脉冲重复频率。显然, 只有当多普勒单元内有散射点时,  $q_q$  不为 0。这表明在同一距离单元的方位角, 散射点所占的多普勒频点与整个多普勒域相比是稀疏, 因此构造稀疏基如下。

定义慢时间分辨率为  $\Delta t_a$ 。设脉冲重复频率为  $F_r$ , 那么慢时间序列可表示为  $t_1 = [1:L]^T \Delta t_a$ ,  $\Delta t_a = 1/F_r$ ,  $L = T_a/\Delta t_a$ , 其中,  $L$  为脉冲数。多普勒序列为  $F_d = [1:Q]\Delta f_d - F_r/2$ ,  $Q = F_r/\Delta f_d$ , 其中,  $Q$  为多普勒单元总数。显然, 在选取时,  $Q > L$ 。至此, 可根据式(6)构建稀疏基如式(8)所示。

? =

$$\begin{bmatrix} \exp[-j2pf_{d_1} t_1] & \exp[-j2pf_{d_2} t_1] & \dots & \exp[-j2pf_{d_Q} t_1] \\ \exp[-j2pf_{d_1} t_2] & \exp[-j2pf_{d_2} t_2] & \dots & \exp[-j2pf_{d_Q} t_2] \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \exp[-j2pf_{d_1} t_L] & \exp[-j2pf_{d_2} t_L] & \dots & \exp[-j2pf_{d_Q} t_L] \end{bmatrix} \quad (8)$$

回波的稀疏化形式为

$$s_a(t_a) = ? q \quad (9)$$

其中,  $q$  为对应的散射系数向量, 其非零分量对应于  $K$  个最大散射点的复幅度。将压缩感知模型引入, ISAR 方位向成像问题描述为

$$\min \|q\|_0 \quad \text{s.t.} \quad s_a(t_a) = Tq \quad (10)$$

从而 ISAR 方位成像获取目标高分辨问题可等价转化为式(10)的重构精度问题。

由式(10)可知, 在完成式(9)回波在稀疏基下表征的基础上, 若再获得量测矩阵  $F$ , 即可采用 CS 重构算法实现方位向成像。作为压缩感知研究的核心问题之一, 构造合理有效的量测矩阵  $F$  对于量测值的获取和原始数据的恢复都起到了关键作用。文献[12]通过对比各种常用量测矩阵对稀疏信号重构的效果, 指出局部哈达玛矩阵具有重构所需量测个数最少、重构精度最高的优势且便于存储。但由于局部哈达玛矩阵具有信号维度的取值必须满足  $M = 2^a$ ,  $a = 1, 2, 3, \dots$  的固有特性, 极大地限制了局部哈达玛矩阵的应用。文献[13]构造结构随机矩阵作为量测矩阵, 具有计算复杂度低、通用性强、量测数目少等优点, 获得了很好的重构效果。为此本文提出了部分随机化哈达玛矩阵, 即 PH 矩阵作为量测矩阵。此外, 对 CS 而言, 重构算法性能的好坏也直接影响待估计量的重构精度, 性能好的算法可以大大提高估计量的估计精度。但目前重构算法存在重构速度和重构精度等方面的矛盾。本文基于这一矛盾, 采用一种折中的算法, 即 SLO 算法作为重构算法, 与量测矩阵共同构成 PH-SLO 重构算法。

### 3 PH-SLO 算法

#### 3.1 PH 量测矩阵构建及其分析

##### 3.1.1 PH 矩阵构建

本文借鉴结构随机矩阵<sup>[13]</sup>的构造思想, 提出将

随机符号矩阵、部分哈达玛矩阵和随机抽样矩阵相结合，旨在突破局部哈达玛矩阵应用限制的同时，保留其优势。下面首先阐述构建 PH 矩阵的步骤，其次证明 PH 量测矩阵的性能。PH 量测矩阵的构建主要包括 3 步。

**Step1 构建局部随机符号矩阵  $R$ 。**针对正交字典上稀疏信号的压缩感知问题，CANDES E J 对观测信号提出了一个限制<sup>[9]</sup>，即信号在支撑集上具有随机符号，因此在构建 PH 矩阵时，首先构建随机符号矩阵。构造一个对角矩阵  $R \in M \times M$ ，对角线元素为  $R_{ii} = \pm 1$ ，且每一个元素独立地服从概率为  $p(R_{ii} = -1) = N/M$  的分布，其他非对角线元素均为 0。 $R$  的作用是预先对可稀疏信号  $X$  进行随机化符号处理，即  $X_1 = R \cdot X$ 。

**Step2 构造部分哈达玛矩阵  $H$ 。**若  $M \neq 2^a$ ，那么首先寻找  $M'$ ，使  $M'$  大于  $M$  且为  $2^a$ ， $a=1,2,3,L$  的最小值。构造一个对称标准正交哈达玛矩阵  $H_1 \in M_1 \times M_1$ ，然后从  $M_1$  中随机选取矩阵  $M$  行和  $M$  列构成部分哈达玛矩阵  $H$ ， $H$  的作用是把可压缩信号  $X$  的所有能量进行分散，形成包含原始信号全部能量的过完备量测序列  $Y_1$ ， $Y_1$  维度为  $M \times 1$ ，即 Step2 实现  $Y_1 = H \times X_1$ 。

**Step3 构造随机抽样矩阵  $S$ 。**构造一个亚采样矩阵  $S \in N \times M$ ， $S$  是从  $M \times M$  维单位矩阵抽取  $M$  行得到的，等价于随机抽取过完备量测序列  $Y_1$  的  $N$  行，得到低维量测序列  $Y_2$ ，即  $Y_2 = S \times Y_1$ 。但是这样相当于将原信号  $X$  分散在其他  $N - M$  行中能量丢弃了，因此为了弥补这一损失，需要在  $Y_2$  前面附加系数  $\sqrt{M/N}$ ，用以使量测序列能量与原信号能量相同，得到最终的量测序列  $Y$ ： $Y = \sqrt{M/N} Y_2$ 。

对应 PH 矩阵的上述 3 个步骤，可知低维量测序列  $Y$  满足

$$Y = \sqrt{\frac{M}{N}} \times S \times H \times R \times X = PH \times X \quad (11)$$

从而部分随机化哈达玛矩阵  $PH$  可表示为

$$PH = \sqrt{\frac{M}{N}} \times S \times H \times R \quad (12)$$

至此，完成了部分随机化哈达玛矩阵的构造。量测矩阵必须满足互不相干性和随机独立性时才能完成精确重构。本文构造的 PH 矩阵能保留结构化随机矩阵重构所需量测数目少且易于存储的优势，主要原因在于构造中的第 2 步使用哈达玛矩阵

满足了互不相干性，第 3 步则保证了矩阵的随机独立性，因此构造的矩阵不但保留了哈达玛矩阵的优势，又避免了其劣势，因此性能良好。

### 3.1.2 PH 矩阵性能分析

采用 Applebaum L<sup>[14]</sup>、Baraniuk<sup>[15]</sup>等人基于 RIP 给出了一种可量化衡量量测矩阵优劣的判决准则：

定义格拉姆矩阵  $A_{\text{index}} = Q_{\text{index}}^H Q_{\text{index}}$ ， $|\text{index}| = K$ ，若  $A_{\text{index}}$  是对称矩阵和非负定矩阵，且  $A_{\text{index}}$  的特征值范围都在  $[1 - d_k, 1 + d_k]$ ， $d_k \in (0, 1)$  之间时，那么  $Q$  将满足 RIP 条件。

可采用特征值法具体实现上述判别准则，简述如下：RIP 条件中  $d_k$  越小，说明  $Q$  的列相关性越小，那么  $A_{\text{index}}$  的最大和最小特征值偏离 1 的程度可以反映量测矩阵的优劣： $A_{\text{index}}$  的最大特征值越小，最小特征值越大，说明越接近于 1，即  $d_k$  越小，那么  $Q$  的列相关性越小，重构的精度和稳定性将越高，进而表明量测矩阵的重构性能更优；反之，则重构性能将更差。

为考察 PH 矩阵的性能，采用最常用的高斯随机矩阵作为对比，目的是验证 PH 矩阵是否可以突破局部哈达玛矩阵的约束。仿真设置如下：信号维度取  $M=260$ ，量测值个数取为 64，分别计算 PH 矩阵和高斯矩阵的  $A_{\text{index}}$  的最大和最小特征值的均值。稀疏度从 1 变化到 40。对每一个稀疏度的取值，不同的“index”组合方式是随机产生的，本文取 1 000 次蒙特卡罗仿真。RIP 性能仿真如图 2 所示。

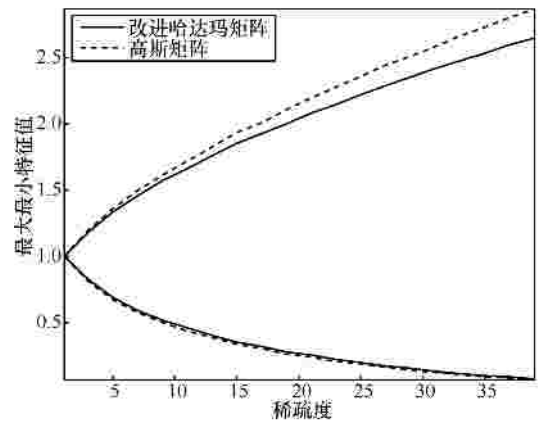


图 2 2 个不同量测矩阵特征值对比

从图 2 可知，PH 矩阵的列相关性比典型的高斯量测矩阵的列相关性弱，这意味着有更好的重构性能。随着稀疏度的变大，特征值开始背离 1 的程度也变大，意味着在稀疏度较大时需要更长的量测

序列来重构信号。综上可知，在有限的量测值个数条件下，PH 矩阵比高斯矩阵具有更好的非相关性，且相同稀疏度条件下重构需要的量测值个数更少。因此可以以更高的精度重构信号。

### 3.2 PH-SL0 重构算法

在得到回波的稀疏表示及构造出非相关性强的 PH 量测矩阵后，下面分析重构算法。

制约 0-范数最小化问题求解的根源在于矢量的 0-范数不是连续函数，无法利用常规的最优化算法。一种求解思路是通过一组连续函数对 0-范数平滑处理之后，将 0-范数最小化问题转换为连续函数最小化问题，进而可以使用最速下降法等算法求解。Mohimani 等<sup>[16]</sup>人提出用高斯函数对 0-范数进行平滑近似，以作为 0-范数最优化问题的求解。理论和分析结果均表明该方法既可以有与贪婪追踪类算法相同的重构速度，又可以有凸最优化类重构算法的精度，同时文献[16]还指出 SL0 算法是一种抗噪性较强的算法。此外通过调节算法中的参数还能进一步提高 SL0 算法抗噪声干扰的能力。综上所述，SL0 算法计算速度快，由于 0-范数能够充分反映信号的稀疏性，具有重构需要量测值数目较少的优点，所以该算法很适合作为雷达压缩感知成像算法中的重构算法，因此本文采用 SL0 算法作为重构算法。

综上所述，本文基于 PH-SL0 算法的 CS-ISAR 算法流程如图 3 所示。

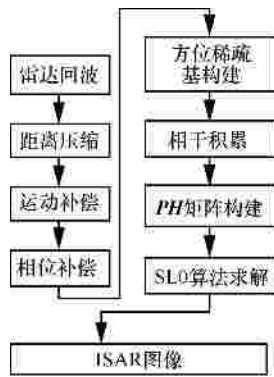


图 3 CS-ISAR 算法流程

## 4 方位分辨率分析

下面分析压缩感知实现方位高分辨的可行性。ISAR 成像中，常规目标横向分辨率上限为

$$\Delta f_d = \frac{1}{T_a} \tag{13}$$

为便于理论分析本文所研究的算法的分辨率，先将式(8)构造的过完备稀疏基字典进行一步转换，变为正交基字典。令：

$$P = \begin{bmatrix} 1 & L & 0 & 0 & L & 0 \\ M & & M & & M & \\ 0 & L & 1 & 0 & L & 0 \end{bmatrix}_{L \times Q} \tag{14}$$

式(8)的冗余基可改写为

$$Y = PY_1 \tag{15}$$

其中， $Y_1 = \exp(-j2\pi f_{d(q)} t_{1(q)})$ ， $t_{1(q)} = [1:Q]^T \Delta t_a$ 。  $Y_1$  是大小为  $Q \times Q$  的正交基。此时，式(10)对应的冗余基的形式可以写为

$$\min \|q\|_0 \quad \text{s.t.} \quad F s_a(t_a) = F P Y_1 q = Q_1 q \tag{16}$$

其中， $Q_1$  是大小为  $N \times Q$  的感知矩阵。这样可认为  $s_a(t_a)$  是和正交基  $Y_1$  对应的。由基于正交分解理论可知，为了恢复出  $K$  个强散射点，观测自由度需满足基本条件  $N \gg O(K \log Q)$ <sup>[17]</sup>。由 CS 理论可知，如果量测值序列越长，那么能够重构的稀疏信号分量信息就越丰富，在短 CPI 条件下，量测序列长度为  $N$ ， $N \ll Q$ 。那么可以重构的多普勒频点数  $K$  应满足  $K \ll N/O(\log Q)$ 。考虑一种理想情况：假设  $K$  个目标强散射点所占的横向总宽度为  $x_{\max}$ ，且  $K$  个点在方位向均匀分布。那么此时的多普勒分辨率应为

$$\Delta f_d = \frac{2w x_{\max}}{l K} \tag{17}$$

则对应 CS 的多普勒分辨率公式为

$$\Delta f_{d\_cs} = \frac{O(\log Q)}{N} \Delta f_d = b \Delta f_d \tag{18}$$

其中， $b = O(\log Q)/N$ 。对  $b$  进行分析可知，当  $Q$  取对数  $\log Q$  之后，相当于  $Q$  被非线性“压缩”了很多倍，即  $b \ll 1$ ，这说明与  $\Delta f_d$  相比，CS 处理之后的多普勒分辨率上限  $\Delta f_{d\_cs}$  将缩小  $1/b$  倍，这就是短 CPI 条件下使用 CS 算法依然能够得到方位向高分辨的原因。

## 5 仿真实验及分析

仿真 1 无噪条件下 PH-SL0 算法成像对比

仿真参数设置如下：信号载频为 10 GHz，PRF 为 400 Hz，发射信号为 LFM 信号，其时宽为 2.5 μs，带宽为 50 MHz，采样率为 100 MHz。目标做匀速飞行，速度为 100 m/s。目标飞机散射模型如图 4

所示。为验证本文所提算法的高分辨能力，将机头位置的 2 个散射点相对距离设置为 5 m。

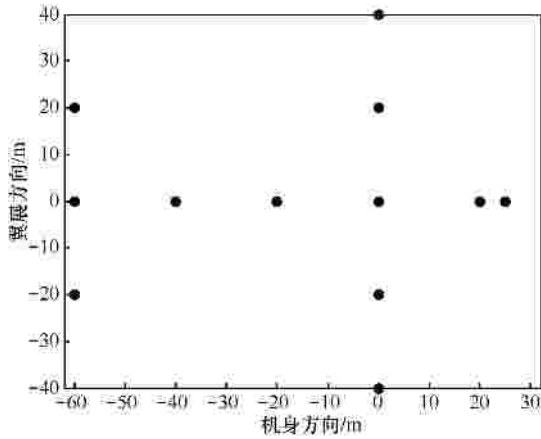


图 4 目标模型

仿真时，回波脉冲个数  $L$  取 64，量测值个数为  $N = 0.5L$ 。为验证本算法的有效性，对回波分别进行传统 RD (range doppler) 成像<sup>[18]</sup>、典型高斯矩阵加 OMP(G-OMP, Gauss orthogonal matching pursuit)算法<sup>[5,19]</sup>以及本文所提算法成像。结果如图 5 所示。

从图 5 可知，相同条件下，RD 算法的横向分辨率由于受短 CPI 条件的限制，得到的聚焦效果很差，方位向副瓣很高。而基于 CS 算法得到的成像结果都可以有效地突破短 CPI 条件对分辨率的限制，不仅可以得到方位向比较清晰的分辨，而且有效地降低了方位向副瓣。PH-SLO 与 G-OMP 的成像结果细节更加丰富，分辨率更高。

#### 仿真 2 信噪比对重构结果的影响

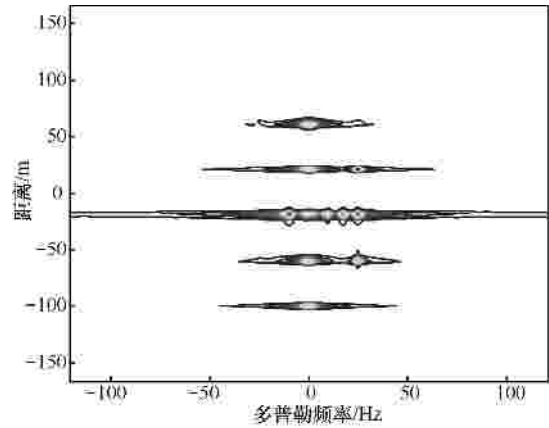
为了验证本文算法具有良好的抗噪性，定义输入信噪比为

$$SNR_{in} = E \left[ 20 \log \frac{\frac{1}{N} \sum_{m=1}^M |s_a(t_a)|^2}{s^2} \right] \quad (19)$$

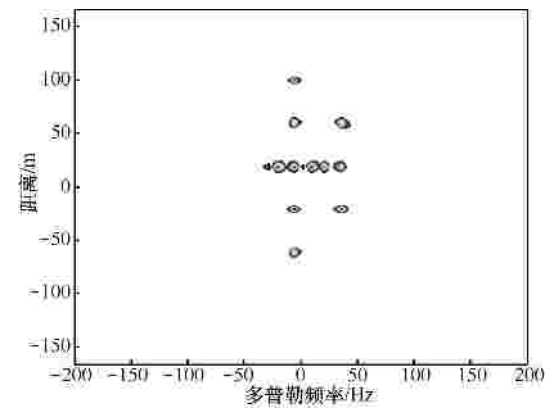
其中， $s^2$  为高斯噪声方差。输入信噪比为所有脉冲的输入信噪比均值。取输入信噪比为 10 dB，回波脉冲个数取 128，其余与仿真 1 类似，结果如图 6 所示。

从图 6 可以看出 RD 算法在噪声较强的条件下，方位向和距离向具有更多的虚假散射点，且成像聚焦性能差；G-OMP 算法虽然克服了短孔径条件对成像的约束，但是由于成像算法对噪声十分敏感，

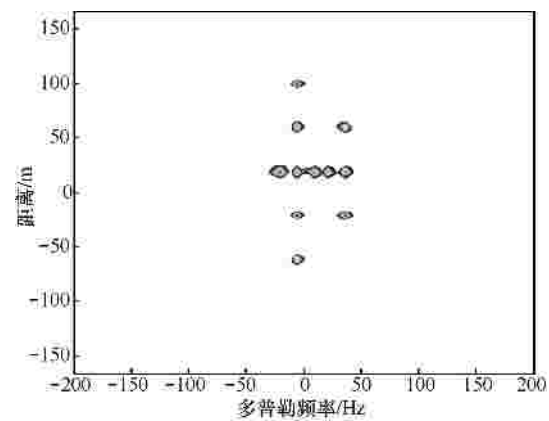
成像结果中出现许多虚假的目标散射点，说明算法易受噪声干扰且重构精度不高；而 PH-SLO 算法虚假点较少，且能分辨机头 2 个相距为“5 m”的散射点，成像聚焦效果好，同时，重构时需要的量测数仅为 128，说明本文算法重构需要的量测个数少，表明本文所提算法在信噪比较低且量测数较少的条件下确实能得到有效的成像结果。



(a) RD 成像结果

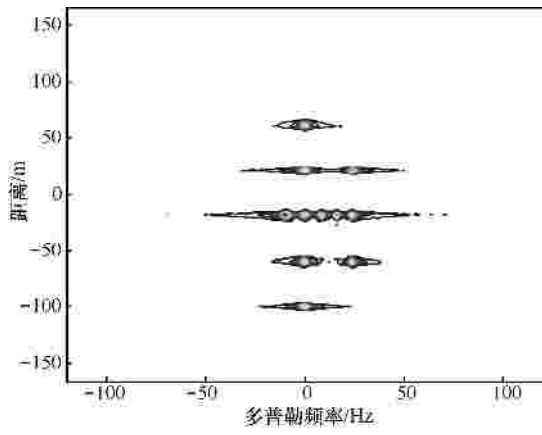


(b) G-OMP 成像结果

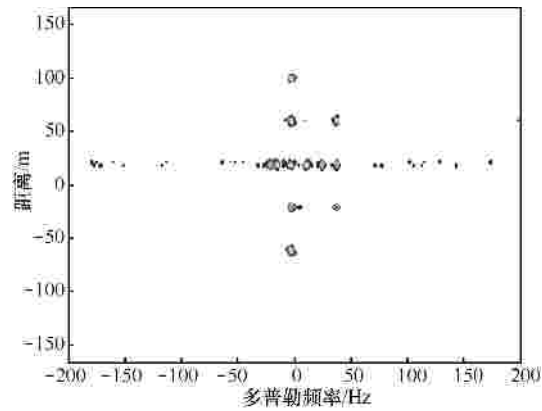


(c) 本文方法成像结果

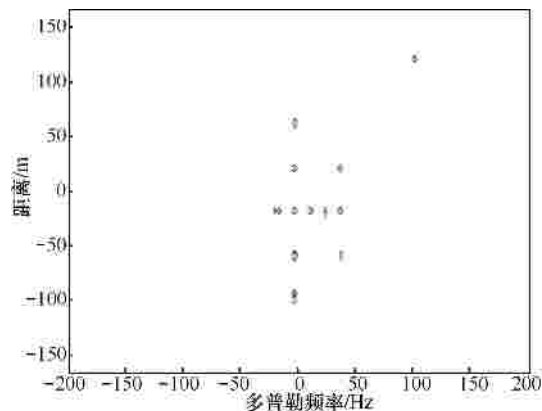
图 5 64 次回波条件下不同算法得到的 ISAR 图像



(a) RD ISAR 图像



(b) G-OMP ISAR 图像



(c) PH-SLO ISAR 图像

图 6 SNR=10 dB 时,不同算法得到的 ISAR 图像

### 实验 3 实测数据验证

采用实测数据,相关的雷达参数如下:雷达为边扫描边跟踪、窄带结合的脉冲体制雷达,发射信号为 LFM 信号,信号带宽为 100 MHz,工作频段为 S 波段。目标包络脉冲压缩以及运动补偿完后的结果如图 7 所示, RD、G-OMP 以及本文方法成像结果如图 8 所示。

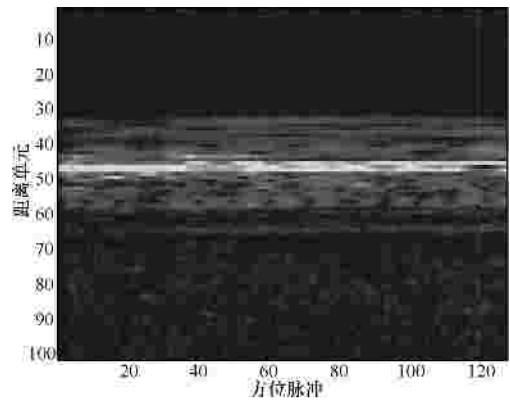
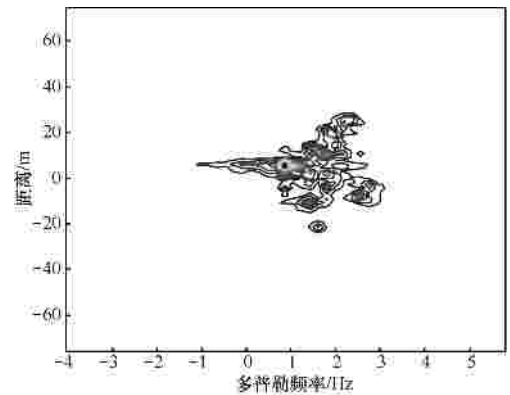
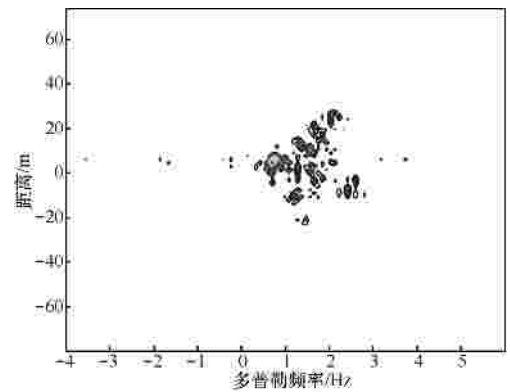


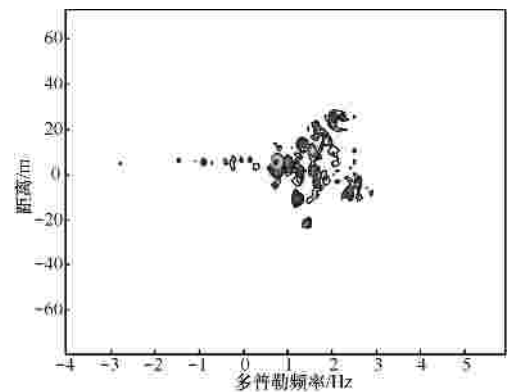
图 7 128 次回波包络



(a) 实测数据 RD 成像结果



(b) 实测数据 G-OMP 成像结果



(c) 实测数据 PH-SLO 成像结果

图 8 实测数据条件下,不同算法得到的 ISAR 成像

从图8中可以看出,在机翼、机尾、机头位置,G-OMP算法以及PH-SLO算法具有比传统RD算法更高的方位分辨率,拥有更多的散射点信息。由于目标在飞行状态,在回波中引入复杂的多普勒调制,传统的运动补偿方法很难对高次相位完整补偿,从而难以得到高分辨、聚焦效果好的ISAR成像。与G-OMP算法得到的成像结果对比,在短孔径条件下本文算法得到的成像结果拥有更多的细节信息,在机翼、机尾、机头位置散射点信息更丰富。实测数据处理结果也验证了本文所提算法的有效性。

## 6 结束语

本文针对短孔径时间下传统成像算法存在成像分辨率低、易受噪声干扰的缺陷,提出了PH-SLO算法,该算法在深入分析量测矩阵构建以及重构算法选择的基础上,应用于ISAR方位成像,在短CPI条件下得到的ISAR图像不仅聚焦性能更好,且对噪声的抑制能力大大提高,仿真实验验证了本文所提算法的有效性。对抗噪性进一步的理论分析是下一步研究的重点。

### 参考文献:

- [1] BI Z, LI J, LIU Z S. Super resolution SAR imaging via parametric spectral estimation methods[J]. IEEE Trans Aerosp Electron Syst, 1999, 35(1):267-281.
- [2] SUWA K, IWAMOTO M. A two-dimensional bandwidth extrapolation technique for polarimetric synthetic aperture radar images[J]. IEEE Trans Geosci Remote Sens, 2007, 45(1):45-54.
- [3] 焦李成, 杨淑媛, 刘芳等. 压缩感知回顾与展望[J]. 电子学报, 2011, 39(7):1651-1662.  
JIAO L C, YANG S Y, LIU F, et al. Development and prospect of compressive sensing[J]. Acta Electronica Sinica, 2011, 39(7):1651-1662.
- [4] 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, 2010, 37(6):1022-1026.  
QUAN Y H, ZHANG L, LIU Y B, 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.
- [5] 李宁, 汪玲. 基于统计压缩感知的短孔径 ISAR 成像方法研究[J]. 中国雷达, 2011, 2:24-28.  
LI N, WANG L. Study on short CPI ISAR imaging via statistics CS[J]. Chinese Radar, 2011, 2:24-28.
- [6] 赵光辉, 张天键, 沈方芳等. 低信噪比下稳健压缩感知成像[J]. 航空学报, 2011, 33(3):561-571.  
ZHAO G H, ZHANG T J, SHEN F F, et al. Robust compressive sensing sar imaging in low SNR conditions[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2011, 33(3):561-571.
- [7] 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]. 电子信息学报, 2011, 32(9):2263-2267.  
ZHANG L, ZHANG L, XING M D. A new method of high resolution ISAR imaging under low SNR based on improved compressive sensing[J]. Acta Electronica Sinica, 2011, 32(9):2263-2267.
- [8] 戴琼海, 付长军, 季向阳. 压缩感知研究[J]. 计算机学报, 2011, 34(3):425-434.  
DAI Q H, FU C J, JI X Y. Research on compressed sensing[J]. Chinese Journal of Computers, 2011, 34(3):425-434.
- [9] CANDES E, TAO. Decoding by linear programming[J]. IEEE Trans on Information Theory, 2005, 51(12):4203-4215.
- [10] ZHANG L, XING M D, QIU C W, et al. Achieving higher resolution ISAR imaging with limited pulses via compressed sampling[J]. IEEE Geosci Remote Sens Lett, 2009, 6(3):567-571.
- [11] ZHANG L, XING M D, QIU C W, et al. Resolution enhancement for inverse synthetic aperture radar imaging under low SNR via improved compressive sensing[J]. IEEE Trans Geosci Remote Sens, 2010, 48(10):3824-3838.
- [12] 李晓波. 基于压缩感知的量测矩阵研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2010.  
LI X B. Research on Measurement Matrix Based on Compressed Sensing[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2010.
- [13] DO T T, GAN L. Fast and efficient compressive sensing using structurally random matrices[J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2012, 60(1):139-154.
- [14] RONALD A, DEVORE. Deterministic constructions of compressed sensing matrices[J]. Journal of Complexity, 2007, 23(4-6):918-925.
- [15] RICHARD B, MARK D, RONALD D, et al. A simple proof of the restricted isometry property for random matrices[J]. Constructive Approximation, 2008, 28(3):253-263.
- [16] MOHIMANI HOSEIN G, BABAIE-ZADEH M. A fast approach for overcomplete sparse decomposition based on smoothed  $L_0$  norm[J]. IEEE Trans on Signal Processing, 2009, 57(1):289-301.
- [17] DONOHO. Compressed sensing[J]. IEEE Trans Inform Theory, 2006, 52(4):1289-1306.
- [18] 保铮, 邢孟道, 王彤. 雷达成像技术[M]. 北京: 电子工业出版社, 2006.  
BAO Z, XING M D, WANG T. Radar Imaging Technique[M]. Beijing: Electronic Industry Publishing House, 2006.
- [19] 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, 2:143-150.  
LEI Q, LI H W, ZHANG Q, et al. A new way of suppressing ISAR imaging sidelobe based on compressed sensing[J]. Journal of Projectiles, Rockets, Missiles and Guidance, 2011, 2:143-150.

### 作者简介:



李少东(1987-),男,河北保定人,空军预警学院博士生,主要研究方向为压缩感知在雷达成像中的应用。

杨军(1973-),男,云南大理人,博士,空军预警学院副教授、硕士生导师,主要研究方向为雷达系统、雷达信号处理与检测理、SAR/ISAR成像等。

马晓岩(1962-),男,湖北赤壁人,博士,空军预警学院教授、博士生导师,主要研究方向为雷达系统、雷达信号处理与检测理、现代信号处理及其应用。