

文章编号:1004-9037(2012)01-0045-06

# 基于压缩感知的含旋转部件目标 ISAR 成像方法

顾福飞 朱 丰 池 龙 张 群 罗 迎 刘 韵

(空军工程大学电讯工程学院,西安,710077)

**摘要:**在 ISAR 成像中,某些雷达目标的部件存在旋转运动,会对目标主体信息产生干扰导致目标成像质量下降,严重时甚至无法实现成像。本文结合压缩感知理论提出了一种含旋转部件目标成像方法。在成像时间内,由于目标主体部件相对于成像区域的位置保持不变,而旋转部件的位置在不断变化,因此,对回波信号运用压缩感知理论可得到目标主体部件的信息,从而有效剔除了旋转部件带来的影响并且大幅减少了回波数据量。最后仿真结果验证了该方法的有效性,并对其抗噪性能进行了分析。

**关键词:**变换矩阵;压缩感知;旋转部件;ISAR 成像

中图分类号:TN957

文献标识码:A

## ISAR Imaging Algorithm for Targets with Rotating Parts Based on Compressed Sensing

*Gu Fufei, Zhu Feng, Chi Long, Zhang Qun, Luo Ying, Liu Yun*

(Institute of Telecommunication Engineering, Air Force Engineering University, Xi'an, 710077, China)

**Abstract:** When a radar target contains rotating structures, such as a rotor on a helicopter, the body image of the target is contaminated due to the micro-Doppler effect generated by additional frequency modulations on the received signals. Therefore, an imaging algorithm is proposed for targets with rotating parts based on the compressed sensing theory. Since the target body almost keeps relatively changeless in the imaging region and the rotating parts migrate in the imaging region during the imaging time, the image of main body can be reconstructed by the orthogonal matching pursuit(OMP) algorithm, and the interference generated by the rotating parts is also eliminated. Thanks to compressed sampling, the datum of the returned signal is reduced. Finally, the computer simulations are given to prove the effectiveness of the proposed method, and the performance of the algorithm with different SNR is analyzed.

**Key words:** transform matrix; compressed sensing; rotating parts; ISAR image

## 引 言

ISAR 成像中,传统的距离多普勒(RD)算法首先对目标做平动补偿,使其转化为转台目标,其次利用各子回波多普勒的变化成像<sup>[1]</sup>。但是,当目标结构中含有旋转部件时,对目标主体做平动补偿后并不能将该旋转部件转化为转台目标,成像将受到污染。这种由于旋转部件运动对雷达回波信号产生的附加频率调制,称作“微多普勒”现象<sup>[2]</sup>。微多普勒现象的存在,使得对目标 ISAR 成像时质量下

降,特别是当目标结构中包含大旋翼(如直升机的水平旋翼)或高反射系数的旋转和振动部件(如机载、舰载旋转雷达)时,微多普勒现象对目标主体像的污染尤为严重。因此,有效剔除微多普勒现象对目标主体像的干扰,对含旋转部件目标进行 ISAR 成像具有十分重要的意义。文献[3]基于旋转部件的微多普勒谱与目标主体谱在谱图域表现形式的不同,将旋转部件的微多普勒谱与目标主体谱分离后获得了具有大旋翼一类目标的清晰像;文献[4]采用自适应 Chirple 分解算法将目标刚体和旋转部件回波映射到不同的参数空间,并通过设置门限分

离刚体回波;文献[5]则采用基于有序统计的方法分离旋转部件回波。以上方法均是对旋转部件进行分析,然后剔除其产生的微多普勒干扰。但在实际应用中,目标旋转部件可能尺寸较大、转速很高,那么微多普勒就很难被准确地剔除。

压缩感知(Compressed sensing, CS)理论是数学家 D L Donoho 于 2006 年提出的一种数据压缩与重建理论<sup>[6]</sup>。近年来,压缩感知作为一种新的信号获取与压缩重构方法被应用于雷达体制及信号处理中<sup>[7]</sup>。本文主要将压缩感知理论应用于含旋转部件目标 ISAR 成像中,与其他基于微多普勒信息分离的成像方法不同,本文方法是通过构造特殊的变换矩阵,然后直接利用压缩感知重构理论得到目标的固定散射点信息,从而进行成像。首先将目标成像区域按照雷达的分辨单元进行划分,其次基于线性调频(Linear frequency modulation, LFM)回波信号稀疏表示方法构造每次回波的变换矩阵。再将得到的变换矩阵按接收回波的次序,依次排列起来形成成像所需的变换矩阵(本文定义为合成变换矩阵)。在成像时间内,由于目标的固定散射点相对于成像区域位置保持不变,而旋转散射点相对于成像区域有一定的运动,因此通过低维观测信号与恢复矩阵,运用正交匹配追踪(Orthogonal matching pursuit, OMP)算法<sup>[8]</sup>即可获得目标固定散射点的信息,从而实现目标成像。

## 1 LFM 回波信号稀疏表示方法和压缩感知

### 1.1 LFM 回波信号稀疏表示方法

为了获得 LFM 回波信号的稀疏表示,文献[9]提出了利用波前匹配方法构造 LFM 回波信号的变换矩阵。在雷达系统中,假设发射信号为  $s_i(t)$ ,在不考虑诸如多普勒频移等其他干扰的情况下,回波信号  $s_r(t)$  可以由发射信号通过时移进而线性相加来表示。即

$$s_r(t) = \sum_{i=1}^K \sigma_i s_i(t - \tilde{n}_i \tau), \sigma_i \neq 0 \quad (1)$$

其中,  $K$  代表目标散射点数目,  $\sigma_i$  是目标散射点的反射系数,  $\tau$  是信号的奈奎斯特采样时间单元,  $\tilde{n}_i$  表示目标第  $i$  个散射点的延时单元数。

若构造的变换矩阵  $\Psi = \{\Psi_n(t) \mid \Psi_n(t) = s_i(t - \tilde{n}_i \tau), n \in \{1, 2, \dots, N\}\}$ , 其中  $N$  是目标成像区域按成像分辨率得到的总单元数。那么对于任一散射点模型目标, LFM 回波信号可以重新写成

$$s_r(t) = \sum_{i=1}^N \sigma_i \Psi_i(t) = \Psi \sigma \quad (2)$$

通常情况下,目标进行 ISAR 成像时,散射点数  $K$  远远小于单元数  $N$ , 因此目标反射系数向量  $\sigma$  是稀疏的。那么 LFM 回波信号在变换矩阵  $\Psi$  下是  $K$  稀疏的。

### 1.2 压缩感知基本理论

对于一个维数为  $N_1$  的信号  $H$ , 可以表示成  $H = \Psi \Theta$ ,  $\Psi = [\psi_1, \psi_2, \dots, \psi_{N_1}]$  为变换矩阵, 如果  $\Theta$  中只有  $K$  个非零系数, 且  $K \ll N_1$ , 则说明该信号  $H$  是  $K$ -稀疏的。对于  $K$ -稀疏的信号  $H$ , 可以用观测矩阵  $\Phi \in R^{M \times N_1}$  ( $M < N_1$ ) 对其进行观测, 得到观测集合, 即

$$U = \Phi \cdot H = \Phi \cdot \Psi \Theta = A^{cs} \Theta \quad (3)$$

其中  $A^{cs} = \Phi \Psi$ 。对于式(3)的求解, 由 CS 理论知, 当恢复矩阵  $A^{cs}$  满足有限等距特性(Restricted isometry property, RIP)时, 可将其转化成  $l_1$  范数下的最优化解问题

$$\min \|\Theta\|_1 \quad \text{s. t.} \quad U = A^{cs} \Theta \quad (4)$$

通常情况下判定  $A^{cs}$  是否具有 RIP 性质是一个组合复杂度问题, 为了降低问题复杂度, 文[10]指出, 如果观测矩阵  $\Phi$  和变换矩阵  $\Psi$  不相干, 则  $\Phi \Psi$  在高概率条件下满足 RIP 性质。因此, 通过判定  $\Phi$  与  $\Psi$  之间的相干性可等效判定  $\Phi \Psi$  是否具有 RIP 性质。

## 2 基于 CS 含旋转部件目标成像方法

### 2.1 合成变换矩阵的构造

假设目标和雷达处于一个 2-D 平面上, 如图 1 所示。雷达位于坐标原点  $O$  固定不动, 目标中心的初始位置位于  $y$  轴上的  $O'(0, y_{ref})$  点, 并以速度  $v$  沿  $x$  轴负方向运动。目标中心到雷达的距离为  $R$ 。目标由初始时刻分别位于坐标  $(x_m, y_m)$  的  $m$  个固定散射点  $P_m$  和初始时刻分别位于坐标  $(x_n, y_n)$  的  $n$  个旋转散射点  $P_n$  构成, 每个旋转散射点以不同的旋转半径  $r_n$  和旋转频率  $\omega_n$  绕  $C$  点旋转,  $C$  点的初始时刻坐标为  $(x_c, y_c)$ 。雷达发射信号  $s(t)$  为 LFM 信号, 即

$$s(t) = \text{rect}\left(\frac{t}{T_p}\right) \cdot \exp(j2\pi(f_c t + \frac{1}{2}\beta t^2)) \quad (5)$$

其中, 当  $-1/2 \leq t \leq 1/2$  时,  $\text{rect}(t) = 1$ ,  $f_c$  是载频,  $T_p$  是脉冲宽度,  $\beta$  是调频率。

设成像系统的横向距离分辨率为  $\Delta x$ , 距离分辨率为  $\Delta y$ , 那么将目标成像区域按照分辨率进行划分, 如图 1 所示, 这样可得到  $a \cdot b$  个单元格。将这些单元格按列连接起来形成一个长度为  $a \cdot b$  的目标反射系数向量  $\sigma$  (其中黑色单元格表示有散射

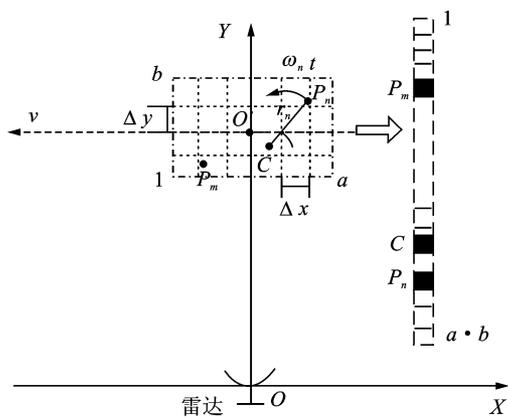


图1 成像模型图

点)。即

$$\sigma = [\sigma_1, \sigma_2, \dots, \sigma_a]^T \quad (6)$$

其中  $\sigma_i = [\sigma_{i,1}, \sigma_{i,2}, \dots, \sigma_{i,b}]$ ,  $i = 1, \dots, a$ ,  $\sigma_{i,j}$  是目标成像区域第  $i$  行  $j$  列单元格的反射系数。

在  $t_1$  时刻, 雷达接收到固定散射点的回波信号为  $S_1$ , 由 2.1 节分析可知  $S_1$  等于成像区域每个单元格反射的回波信号线性叠加。即

$$S_1 = \sum_{i=1}^{a \cdot b} \sigma_i s(t - \tilde{n}_{1,i} \tau) = \Psi_1 \sigma \quad (7)$$

其中,  $\Psi_1 = [s(t - \tilde{n}_{1,1} \cdot \tau)^H, \dots, s(t - \tilde{n}_{1,a \cdot b} \cdot \tau)^H]^T$ ,  $\tau$  表示信号的奈奎斯特采样时间单元,  $\tilde{n}_{1,i}$  表示接收第一次回波时第  $i$  个单元格的延时数。

假设在成像时间内一共接收到  $L$  次回波, 那么接收每次回波时均可得到变换矩阵, 将这些变换矩阵按回波次序依次排列即可得到合成变换矩阵  $\Psi$ , 即

$$\Psi = \begin{bmatrix} \Psi_1 \\ \Psi_2 \\ \dots \\ \Psi_L \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} s(t - \tilde{n}_{1,1} \cdot \tau)^H, \dots, s(t - \tilde{n}_{1,a \cdot b} \cdot \tau)^H \\ s(t - \tilde{n}_{2,1} \cdot \tau)^H, \dots, s(t - \tilde{n}_{2,a \cdot b} \cdot \tau)^H \\ \dots \\ s(t - \tilde{n}_{L,1} \cdot \tau)^H, \dots, s(t - \tilde{n}_{L,a \cdot b} \cdot \tau)^H \end{bmatrix} \quad (8)$$

若回波信号长度均为  $Q$ , 将接收到的回波依次连接起来形成长度为  $L \cdot Q$  的回波向量  $S_r$ ,  $S_r$  可以表示为目标固定散射点的回波向量  $S_{r1}$  与旋转散射点的回波向量  $S_{r2}$  之和。即:

$$S_r = S_{r1} + S_{r2} \quad (9)$$

目标固定散射点的回波向量  $S_{r1}$  可以表示为  $S_{r1} = \Psi \sigma$ , 而旋转散射点的回波由于具有多普勒频移的干扰, 因此不可以用 LFM 回波信号的稀疏表示方法表示。则式(9)可重新写为

$$S_r = \Psi \sigma + S_{r2} \quad (10)$$

目标 ISAR 成像时, 成像积累时间比较短, 可

假设目标未发生越距离单元徙动。这样固定散射点始终处于同一分辨单元格, 式(11)给出了在成像时间内, 目标旋转散射点不始终处于同一分辨单元, 其角速度与脉冲重复时间  $\Delta t$  应满足的关系

$$n \cdot \sqrt{x^2 + y^2} \leq \omega_n \cdot \Delta t \cdot r_n \leq n \cdot (2\pi r_n - \sqrt{x^2 + y^2}) \quad (n = 1, 2, \dots) \quad (11)$$

由于脉冲重复时间  $\Delta t$  是可控的, 因此即使有的目标旋转角速度不满足式(11), 也可以通过调整  $\Delta t$  使其满足该要求。这样旋转散射点在成像时间内不在同一单元格, 那么利用压缩感知重构理论求解式(10), 就可以得到目标固定散射点的信息, 从而有效剔除了旋转散射点的影响。

## 2.2 成像算法

对回波信号  $S_r$  进行低维随机观测, 观测矩阵设为广义单位阵, 记为  $\Phi$ 。其中  $\Phi = \{\varphi_{c,d}\}$ , 且(设矩阵中最左上角元素为  $\varphi_{1,1}$ )

$$\varphi_{c,d} = \begin{cases} 1, & d = m_c \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \quad c = 1, \dots, M; d = 1, \dots, L \cdot Q \quad (12)$$

对于  $\Phi$  中的任意行向量  $\varphi_c$ , 其中除了第  $m_c$  个元素为 1 外, 其余元素均为零,  $m_c$  随机选取。观测过程如图 2 所示。

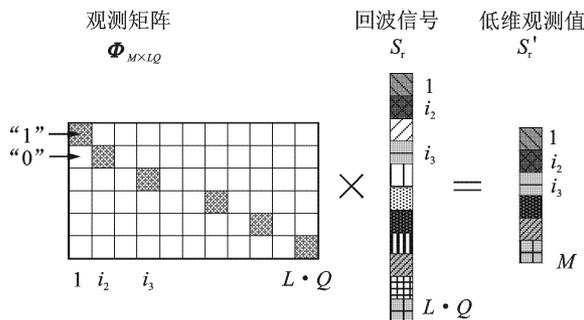


图2 观测过程图

低维观测值  $S'_r = \Phi \cdot S_r = A^{cs} \cdot \sigma + \Phi \cdot S_{r2}$ , 由于  $\Phi$  是随机观测矩阵, 因此可以证明  $\Phi$  与  $\Psi$  不相干, 即恢复矩阵  $A^{cs}$  满足 RIP 性质<sup>[11]</sup>。那么根据 CS 理论, 在获得观测值  $S'_r$  和恢复矩阵  $A^{cs}$  的基础上, 采用 OMP 算法可重构得到反射系数向量  $\hat{\sigma}$ 。

在利用 OMP 算法重构反射系数向量  $\hat{\sigma}$  时, 最重要的一步是利用恢复矩阵  $A^{cs}$  与低维观测信号  $S'_r$  进行匹配找出其中的最值点和最值点所在的位置信息, 从而进行成像。由于  $\Phi \cdot S_{r2}$  中不含有与恢复矩阵相匹配的变换基, 因此重构得到的最值点中不含有旋转散射点的信息, 只有固定散射点的信息。因此将  $\hat{\sigma}$  按行重新排成  $a \times b$  的矩阵, 这样就得到目标

的成像结果,有效剔除了旋转散射点带来的干扰。

具体重构步骤如下:

(1) 令  $A^{cs} = \{\beta_i\}$ , 初始化残余量  $r_0 = S \in \partial'_r$ , 最大投影位置记录向量  $\zeta_0 = \emptyset$ , 匹配正交基记录矩阵  $\Pi_0 = \emptyset$ , 迭代次数计数器  $g=1$ ,  $\hat{\sigma}$  为  $a \cdot b \times 1$  维全零向量;

(2) 求解  $\delta_g = \operatorname{argmax}_{i=0,1,\dots,a \cdot b-1} |\langle S'_r, \beta_i \rangle|$ ;

(3)  $\Pi_g = [\Pi_{g-1}, \beta_{\delta_g}]$ ;

(4) 根据最小二乘法,  $\hat{\sigma}_{\delta_g} = (\Pi_g^H \Pi_g)^{-1} \Pi_g^H S'_r$ ;

(5)  $r_g = S'_r - \Pi_g \hat{\sigma}_{\delta_g}$ ;

(6)  $\hat{\sigma}(k) = \{\hat{\theta}_i\}$ , 其中  $\hat{\theta}_i =$

$$\begin{cases} \hat{\sigma}_{\delta_g}, i = \delta_0, \delta_1, \dots, \delta_{k-1} \\ 0, \text{其他} \end{cases}$$

(7) 给定一个门限  $\rho$ 。如果  $|\hat{\sigma}(k) - \hat{\sigma}(k-1)|_2 / \hat{\sigma}(k) \leq \rho$ , 则结束迭代。否则  $k = k+1$  转(2);

其中,OMP 算法能否精确重构  $\sigma$  与  $\Phi$  的维度  $M$  密切相关,  $M$  越大, 重构精度越高。基于 CS 的含旋转部件目标 ISAR 成像方法的流程图如图 3 所示。

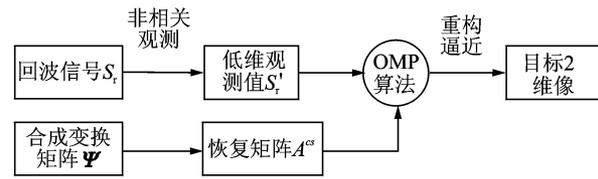


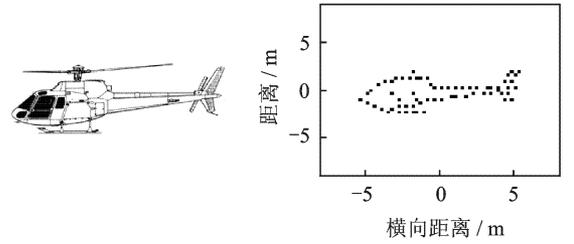
图 3 基于 CS 的含旋转部件目标 ISAR 成像方法流程图

### 3 仿真试验

采用 AS350“松鼠”直升机的 1:1 模型进行仿真实验,其原型和散射点模型分别如图 4(a)和(b)所示(图 4(b)中未画出旋翼)。由于在成像过程中尾翼通常被主体所遮挡,其引起的微多普勒效应对主体 ISAR 像的影响可以不用考虑。AS350“松鼠”直升机具有 3 片直径为 10.69 m 的水平旋翼,转速为 394 r/min,即 6.566 7 r/s。直升机每个水平旋翼有 3 个强散射点。雷达系统及目标参数如表 1 所示。

表 1 雷达系统及目标参数

目标到雷达距离/km	$R$	1
目标运动速度/( $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ )	$v$	100
发射信号载频/GHz	$f_c$	10
发射信号带宽/MHz	$B$	600
脉冲宽度/s	$T_p$	$10^{-6}$
脉冲重复频率/Hz	PRF	300
距离分辨率/m	$\Delta y$	0.25
横向距离分辨率/m	$\Delta x$	0.25
发射波束仰角/( $^\circ$ )	$\theta$	75



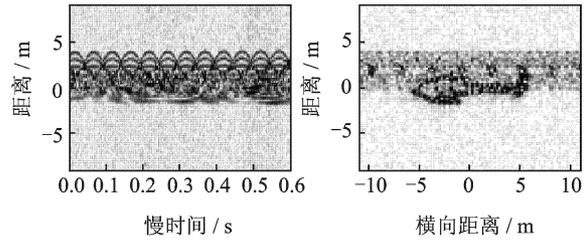
(a) 直升飞机原型

(b) 散射点原型(未画出旋翼)

图 4 直升机模型图

### 3.1 有效性验证

回波信号中叠加了信噪比 SNR 为 5dB 的噪声,对回波信号利用传统的 RD 算法,没有剔除旋转部件干扰直接成像得到的结果如图 5 所示。图 5(a)是目标的谱图,可以看出其中含有旋转部件产生的微多普勒;图 5(b)是成像结果,从成像结果可以看出由于旋转部件的干扰使得成像结果中存在较大的污染,影响了目标的识别。

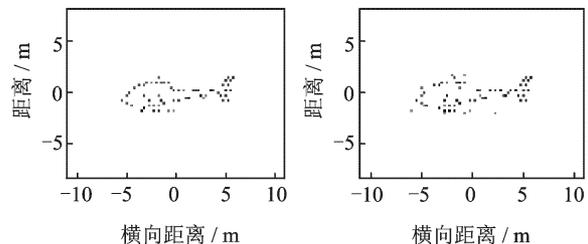


(a) 目标谱图

(b) 未剔除微多普勒的成像图

图 5 利用 RD 算法成像图

利用本文的方法,首先给定门限值  $\rho=0.05$ , 分别对回波数据压缩 60% 和 80% 进行成像得到的结果如图 6 所示。从图 6(a)中可以看出当接收信号压缩 60% 时,目标固定散射点基本被重构出来,虽然受到旋转散射点的影响出现了个别重构错误的点但不影响目标的识别;当接收信号压缩 80% 时,如图 6(b)所示,由于回波数据压缩太多,对重构准确度产生了一定的影响,出现了错误的点。这由 CS 重



(a) 压缩 60% 结果

(b) 压缩 80% 结果

图 6 基于 CS 方法成像图

构理论决定,即观测值越少重构准确性越差。总的来看,仿真结果与本文的理论分析相一致,验证了本文方法在大幅压缩回波数据基础上可以有效剔除旋转散射点对目标成像的影响,实现含旋转部件目标成像。

### 3.2 噪声条件下性能分析

假设接收信号叠加了信噪比 SNR 分别为 3 dB, 0 dB, -3 dB, -10 dB 的高斯白噪声,那么对接收信号压缩 60% 得到的结果如图 7 所示。从成像结果可以看出,随着 SNR 的降低,重构效果逐渐变得不理想。当 SNR  $\geq 0$  dB 时,基本能够分辨出目标的轮廓;但随着信噪比 SNR 的降低,噪声干扰了回波信号与恢复矩阵的相关性,导致重构出不准确的散射点,从而影响了目标识别。

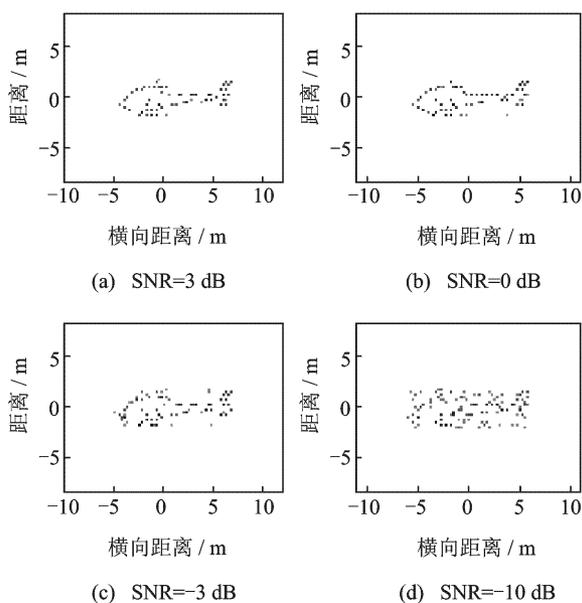


图7 噪声干扰时基于CS方法成像图

下面利用重构得到的目标像与原始目标像的相关系数  $\rho_{\sigma\sigma}$  来定量分析比较所提方法的抗噪性能。 $\rho_{\sigma\sigma}$  定义为

$$\rho_{\sigma\sigma} = \frac{\sum_{i=1}^a \sum_{j=1}^b \sigma_{i,j} \hat{\sigma}_{i,j}}{\left[ \sum_{i=1}^a \sum_{j=1}^b \sigma_{i,j}^2 \cdot \sum_{i=1}^a \sum_{j=1}^b \hat{\sigma}_{i,j}^2 \right]} \quad (13)$$

当回波数据分别压缩 60% 和 80%, 信噪比在 -15 ~ 30 dB 之间变化时,重构得到的目标像与原始目标像的相关系数曲线如图 8 所示。首先可以看出,压缩 60% 曲线均在压缩 80% 曲线的上面,因此回波数据压缩 60% 的抗噪性能明显强于压缩 80%, 说明了本文方法的抗噪性能与压缩数据量有关,数据压缩的越多抗噪性能越不理想。再从压缩 60% 曲

线可以看出, SNR  $\geq 0$  dB 时,相关系数均大于 0.9, SNR  $< 0$  dB 时,相关系数曲线下降幅度很大。说明了当回波数据压缩 60% 时, SNR  $\geq 0$  dB 的成像效果比较理想,而 SNR  $< 0$  dB 时,由于回波信号叠加的噪声能量超过了信号能量,干扰了回波信号与恢复矩阵的相关性,对准确重构目标产生了一定的影响。

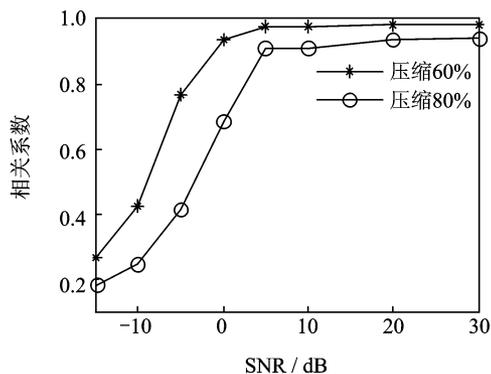


图8 相关系数  $\rho_{\sigma\sigma}$  曲线图

综上所述,本文所提的基于压缩感知的含旋转部件目标 ISAR 成像方法在大幅减少回波数据量的基础上,有效剔除了旋转部件带来的干扰,得到目标清晰的主体像。同时对于具有较高信噪比的空中目标回波信号,本文的方法完全可以胜任对其进行成像的需要。

## 4 结束语

本文提出了基于压缩感知的含旋转部件目标 ISAR 成像新方法,该方法与传统的含旋转部件目标成像方法不同,传统的含旋转部件目标成像均是对旋转部件进行分析剔除其产生的微多普勒干扰从而进行成像,而本文方法是直接对目标成像区域进行分析划分单元格,运用 LFM 回波信号的波前匹配方法构建合成变换矩阵,然后利用 OMP 重构算法得到目标固定散射点的信息,有效剔除了旋转部件带来的影响。同时该方法能够大幅减少回波的数据量,具有一定的抗噪性能。最后若运用本文的方法对地面运动目标进行成像,由于地面运动目标具有较强的杂波干扰,会严重干扰回波信号与恢复矩阵的相关性,因此需要对回波信号作一定的处理,这将是后续工作的重点。

### 参考文献:

[1] 保铮, 邢孟道, 王彤. 雷达成像技术 [M]. 北京: 电子工业出版社, 2006: 230-231.

Bao Zheng, Xing Mengdao, Wang Tong. Radar im-

- age technology [M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2006:230-231.
- [2] Chen V C, Li F, Ho S S, et al. Analysis of radar micro-Doppler signatures [J]. IEEE Proc Radar Sonar Navig, 2003, 150(4): 271-276.
- [3] Qun Zhang, Tat Soon Yeo, Hwee Siang Tan, et al. Imaging of a moving target with rotating parts based on the Hough transform [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2008, 46(1): 291-299.
- [4] Jie Lin, H Ling. Application of adaptive Chirplet representation for ISAR feature extraction from targets with rotating parts [J]. IEE Proc-Radar Sonar Navig, 2003,150(4): 284-291.
- [5] Stankovic L, Djurovic I, Thayaparan T. Separation of target rigid body and micro-Doppler effects in ISAR imaging [J]. IEEE Trans on AES, 2006, 42(4): 1496-1506.
- [6] Donoho D L. Compressed sensing [J]. IEEE Trans Information Theory, 2006, 52(4): 1289-1306.
- [7] Baraniuk R, Steeghs P. Compressive radar imaging [C]//IEEE Radar Conference. Boston, MA: [s. n. ], 2007: 128-133.
- [8] Tropp J, Gilbert A C. Signal recovery from random measurements via orthogonal matching pursuit [J]. IEEE Trans Information Theory, 2007, 53(12): 4655-4666.
- [9] Guangming Shi, Jie Lin. Uwe echo signal detection with ultra-low rate sampling based on compressed sensing [J]. IEEE Transactions on Circuits and Systems, 2008, 55(4): 379-383.
- [10] Baraniuk R. A lecture on compressive sensing [J]. IEEE Signal Processing Magazine, 2007, 24(4): 118-121.
- [11] 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 Jian, Gu Yuantao, Mei Shunliang. An introduction to compressive sampling and Its application[J]. Journal of Electronics and Information Technology, 2010;32(2):470-475.

**作者简介:**顾福飞(1987-),男,硕士研究生,研究方向:雷达成像与雷达信号处理,E-mail:gffpan@126.com;朱丰(1983-),男,博士研究生,研究方向:压缩感知与雷达成像;池龙(1958-),男,副教授,研究方向:通信对抗;张群(1964-),男,教授,研究方向:雷达信号处理与电子对抗。