

基于设计结构化 Gram 矩阵的 ISAR 运动补偿方法

俞 翔,朱岱寅,张劲东,蒋 锐

(南京航空航天大学电子信息工程学院,江苏南京 210016)

摘 要: 运动补偿是 ISAR(Inverse Synthetic Aperture Radar)成像算法中的重要步骤.本文将运动补偿归结为多参数估计问题,基于设计结构化 Gram 矩阵的最优化理论提出了一种运动补偿方法.该方法可分为距离对准和相位补偿两部分,其中距离对准算法通过让所有距离像之间的相关性同时逼近最大值的准则实现偏移量的估计,而相位补偿算法则通过分析信号模型推导出最优矩阵从而利用最优化方法提取相位误差.实测数据处理结果表明,这两种算法都具有较强的鲁棒性和较高的估计精度,是一种有效的运动补偿方法.

关键词: ISAR; 结构化 Gram 矩阵; 距离对准; 相位补偿; 压缩感知

中图分类号: TN957.52 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2014)03-0452-10

电子学报 URL: <http://www.ejournal.org.cn>

DOI: 10.3969/j.issn.0372-2112.2014.03.006

A Motion Compensation Algorithm Based on the Designing Structured Gram Matrices

YU Xiang, ZHU Dai-yin, ZHANG Jing-dong, JIANG Rui

(College of Electronic and Information Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing, Jiangsu 210016, China)

Abstract: Motion compensation is a key procedure in ISAR (Inverse Synthetic Aperture Radar) imaging. The motion compensation can be viewed as a multi-parameter estimation problem. Based on the designing structured Gram matrices optimization, a motion compensation method is put forward. This method consists of two parts: the range alignment algorithm and the phase compensation algorithm. The former estimates the offset of each range profile based on a criterion, which makes correlations among all range profiles approaching to maximum values simultaneously. And the latter can extract phase errors by means of the optimization method, in which the optimal matrix is derived from analysis on the signal model. The measured data processing result shows that the motion compensation method has strong robustness and high estimation accuracy.

Key words: ISAR (Inverse Synthetic Aperture Radar); structured Gram matrices; range alignment; phase compensation; compressed sensing

1 引言

逆合成孔径雷达 (ISAR) 成像是一种可以在全天时全天候条件下对非合作目标远距离高分辨成像的技术. ISAR 的应用平台十分灵活, 可以是海基、陆基、空天基. 得益于其平台的多样性, ISAR 在军事和民用领域具有较为广泛的应用前景, 目前公开发表的文献中就有很多关于 ISAR 对人造航空航天器、水面舰船甚至是行星

成像^[1,2]的研究成果.

与合成孔径雷达 (SAR) 成像目标相比, ISAR 成像目标的尺寸通常较小, 因此要求 ISAR 图像具有更高的距离向和方位向分辨率. ISAR 的距离向分辨率主要依赖于发射信号的带宽, 而方位向分辨率则与孔径时间内目标的等效转动角度有关, 本文仅讨论小转角情况下的距离多普勒成像方法. 距离多普勒成像方法可以分为两部分, 即成像算法和运动补偿.

收稿日期: 2012-11-16; 修回日期: 2013-07-23; 责任编辑: 覃怀银

基金项目: 国家自然科学基金 (No. 61071165, No. 61201367); 江苏省自然科学基金 (No. BK2012382); 国防基础科研计划资助 (No. B2520110008); 教育部新世纪优秀人才支持计划 (No. NCET-09-0069) 资助课题; 航空科学基金 (No. 20102052024); 中央高校基本科研业务费专项资助 (No. NS2012097); 南京航空航天大学基本科研业务费专项资助 (No. NS2013023)

ISAR 的距离多普勒成像算法主要是指回波的距离向和方位向压缩算法.其中距离向压缩一般在运动补偿之前完成,通常采用简单的“脉压”方法处理.而方位向压缩最常用的是傅里叶变换,也可以采用时频分析,近年来有学者提出了基于压缩感知的成像方法^[3~12],该方法利用了稀疏场景回波的冗余性,用较少的回波样本数即可高概率地重构场景图像.这些方位向压缩算法的实现都要基于有效的运动补偿,本文将主要讨论运动补偿这一 ISAR 关键技术.

一般来说,非合作目标相对雷达的运动是不可预知的.通常雷达与目标之间的相对运动可分解为平动和转动分量,其中只有转动分量对目标像的重建起作用,而平动分量对成像是中不利的,需要在成像之前补偿.非合作目标的运动姿态和航迹等运动参数无法准确获知,实际上运动补偿问题就是多参数估计问题.运动补偿可分为距离对准和相位补偿两个步骤.

距离对准作为相位补偿和成像的基础,目的是通过校正各距离像的偏移量将各距离像对准.现有的距离对准算法主要可以分为距离像互相关对准和全局对准两类.前者典型的算法有:相邻包络互相关法^[13]、时域和频域积累互相关法^[14]、包络最大修正峰度法^[15]等.这类算法较依赖于距离像之间的相关性.而全局对准类算法一般是以某种全局准则作为对准依据,通过迭代的方法使某个性能指标达到最优,例如全局对准算法^[16]、全局最小熵算法^[17]等.这类算法对距离像之间的相关性要求不高,并且可以较好地抑制突跳和漂移误差,尤其当遇到回波有间断或回波突变的情况,该类方法较前者具有更好的鲁棒性.

距离对准解决了距离单元级别的距离像偏移问题,为了进一步消除平动对成像的影响,必须进行相位补偿以消除平动引起的相位误差.目前已有多种相位补偿方法,如多普勒中心跟踪法、相位梯度自聚焦法(PGA)^[18]和特征向量相位补偿算法(MLE)^[19]等.其中前两种算法通过估计两个相邻距离像的相位梯度获得相位误差,而 MLE 算法则是通过求解距离像协方差矩阵的特征向量直接估计出相位误差.相对而言,MLE 算法的估计精度要高于前两种算法,但是由于该算法要对协方差矩阵特征分解,所以该算法受到矩阵维数的限制难以在工程实践中应用.

$$\mathbf{G} = \mathbf{P}^T \cdot \mathbf{P} = \begin{bmatrix} \langle \mathbf{p}_1(r + \Delta r_1), \mathbf{p}_1(r + \Delta r_1) \rangle & \langle \mathbf{p}_1(r + \Delta r_1), \mathbf{p}_2(r + \Delta r_2) \rangle & \cdots & \langle \mathbf{p}_1(r + \Delta r_1), \mathbf{p}_M(r + \Delta r_M) \rangle \\ \langle \mathbf{p}_2(r + \Delta r_2), \mathbf{p}_1(r + \Delta r_1) \rangle & \ddots & \ddots & \vdots \\ \vdots & \ddots & \ddots & \vdots \\ \langle \mathbf{p}_M(r + \Delta r_M), \mathbf{p}_1(r + \Delta r_1) \rangle & \cdots & \cdots & \langle \mathbf{p}_M(r + \Delta r_M), \mathbf{p}_M(r + \Delta r_M) \rangle \end{bmatrix} \quad (2)$$

\mathbf{G} 矩阵是 Gram 矩阵^[20],矩阵中的元素为任意两个距离像之间的内积.众所周知,傅氏变换是一种正交变

换,本文将要介绍一种全新的运动补偿方法,该方法分为距离对准算法和相位补偿算法.本文将这两个问题都归结为多参数估计问题,并且通过设计结构化 Gram 矩阵(DSGM, Designing Structured Gram Matrices)的最优化理论^[20]解决.本文提出的距离对准和相位补偿算法都是全局类算法,其中距离对准算法(RA-DSGM)主要通过让任意距离像之间的相关性同时逼近最大值的准则实现偏移量的估计,而相位补偿算法(PC-DSGM)主要通过分析信号模型推导出了最优矩阵从而利用最优化方法求解相位误差.这两种算法通过构造距离像互相关矩阵充分利用了所有距离像的相关性实现多参数估计,并且这两种算法都可直接适用于随机 PRI 的回波数据,可实现对 ISAR 压缩感知成像的运动补偿.本文的章节内容安排如下:第 2、3 两节分别介绍了基于 DSGM 理论的距离对准算法和相位补偿算法;第 4 节分为两个小节,通过仿真和实测数据详细分析了本文提出两种算法的性能;最后一节是对本文研究内容的总结.下面我们首先来介绍距离对准算法.

2 基于 DSGM 的距离对准算法

由于非合作目标的不规则运动和雷达对目标扫描时出现的跟踪误差,导致了回波在距离向上的随机错位.因此首先需要将各距离像对准才能做更加精确的相位补偿操作.由于雷达的 PRF 较高并且目标在相干积累时间内航迹和姿态变化相对缓慢,所以各距离像之间的相关性较强.很多学者都基于距离像相关性提出了一些经典的距离对准算法,比如相邻脉冲互相关算法^[13]、积累互相关算法^[14]、全局最小熵算法^[17]等.通过分析文献可知,这些算法的共同特点即在迭代过程中每次仅利用 2 个距离像(和包络或者平均距离像)的相关性做距离对准.笔者认为只有当所有距离像的互相关性同时达到最大时距离对准完成.根据此准则本文提出了一种全新的距离对准算法,下面做详细介绍.

假设有 M 个距离像,每个距离像有 N 个距离单元,各距离像可以表示为:

$$\mathbf{P} = [\mathbf{p}_1(r + \Delta r_1) | \mathbf{p}_2(r + \Delta r_2) | \cdots | \mathbf{p}_M(r + \Delta r_M)] \quad (1)$$

其中 $\mathbf{p}_i(r + \Delta r_i)$ 表示距离像列向量, Δr_i 为偏移量.距离像之间的相关性可以利用互相关矩阵 \mathbf{G} 表示为:

换,根据矩阵论知识,正交变换不会改变内积运算的结果.因此将各距离像通过 DFT 变换到频域后 \mathbf{G} 矩阵也

可以表示为:

$$\mathbf{G} = \mathbf{P}^T \cdot \mathbf{P} = (\tilde{\mathbf{P}} \odot \mathbf{Q}) \mathbf{H} \cdot (\tilde{\mathbf{P}} \odot \mathbf{Q})$$

$$= \begin{bmatrix} \langle (\tilde{\mathbf{p}}_1 \odot \mathbf{q}_1)^*, (\tilde{\mathbf{p}}_1 \odot \mathbf{q}_1) \rangle & \langle (\tilde{\mathbf{p}}_1 \odot \mathbf{q}_1)^*, (\tilde{\mathbf{p}}_2 \odot \mathbf{q}_2) \rangle & \cdots & \langle (\tilde{\mathbf{p}}_1 \odot \mathbf{q}_1)^*, (\tilde{\mathbf{p}}_M \odot \mathbf{q}_M) \rangle \\ \langle (\tilde{\mathbf{p}}_2 \odot \mathbf{q}_2)^*, (\tilde{\mathbf{p}}_1 \odot \mathbf{q}_1) \rangle & \ddots & \ddots & \vdots \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \langle (\tilde{\mathbf{p}}_M \odot \mathbf{q}_M)^*, (\tilde{\mathbf{p}}_1 \odot \mathbf{q}_1) \rangle & \cdots & \cdots & \langle (\tilde{\mathbf{p}}_M \odot \mathbf{q}_M)^*, (\tilde{\mathbf{p}}_M \odot \mathbf{q}_M) \rangle \end{bmatrix} \quad (3)$$

式中 \odot 表示矩阵 Hadamard 乘积, $\tilde{\mathbf{P}}$ 和 \mathbf{Q} 分别为 N 行 M 列的矩阵:

$$\tilde{\mathbf{P}} = [\tilde{\mathbf{p}}_1 | \tilde{\mathbf{p}}_2 | \cdots | \tilde{\mathbf{p}}_M] \quad (4)$$

$$\mathbf{Q} = [\mathbf{q}_1 | \mathbf{q}_2 | \cdots | \mathbf{q}_M] \quad (5)$$

其中 $\tilde{\mathbf{p}}_i$ 和 \mathbf{q}_i 都是列向量:

$$\mathbf{p}_i(r) \xrightarrow{\text{DFT}} \tilde{\mathbf{p}}_i(f_r) \quad (6)$$

$$\mathbf{q}_i(f_r, \Delta r_i) = \exp(j2\pi f_r \Delta r_i) \quad (7)$$

当估计出 $\Delta r_i (i=1, 2, \dots, M)$ 使得互相关矩阵 \mathbf{G} 的所有元素同时取得最大值时,可以认为各距离像完成距离对准,所以距离对准问题可以用下式表示:

$$\arg \max_{\Delta r_i, \Delta r_j} [\mathbf{G}_{ij}(\Delta r_i, \Delta r_j)], i, j = 1, 2, \dots, M \quad (8)$$

上式实际上是一个多参数估计的最优化问题,如果直接通过遍历搜索的方法求解式(8)将会十分困难.本文尝试运用设计结构化 Gram 矩阵^[20]的思路来解决该问题,式(8)的问题可以转化为下式:

$$\arg \min_{\Delta r_i} \|\mathbf{G} - \tilde{\mathbf{G}}\|_F^2, i = 1, 2, \dots, M \quad (9)$$

上式中 $\|\cdot\|_F$ 表示 F 范数, $\tilde{\mathbf{G}}$ 是理想的最优矩阵,即我们期望估计出一组合适的偏移量 Δr 使得 \mathbf{G} 矩阵在 F 范数下逼近 $\tilde{\mathbf{G}}$ 矩阵.求解式(9)首先要确定 $\tilde{\mathbf{G}}$,为此我们需要考虑距离对准完成时的情况.虽然我们无法直接获得此时的 \mathbf{P} 矩阵,但是可以得到 \mathbf{P} 矩阵的互相关矩阵 \mathbf{G} .

首先对 $\tilde{\mathbf{p}}_i(f_r)$ 用下式归一化:

$$\hat{\mathbf{p}}_i(f_r) = \frac{\tilde{\mathbf{p}}_i(f_r)}{\sqrt{\langle \tilde{\mathbf{p}}_i(f_r)^*, \tilde{\mathbf{p}}_i(f_r) \rangle}} \quad (10)$$

将上式重新带入式(3)得到新的互相关矩阵 \mathbf{G} ,则式(8)可以更新为:

$$\left\{ \begin{array}{l} \mathbf{G}_{ij}(\Delta r_i, \Delta r_j) \equiv 1, i = j \text{ 且 } i, j = 1, 2, \dots, M \\ \arg \max_{\Delta r_i, \Delta r_j} [\mathbf{G}_{ij}(\Delta r_i, \Delta r_j) \approx 1], i \neq j \text{ 且 } i, j = 1, 2, \dots, M \end{array} \right\} \quad (11)$$

上式得到了距离对准完成时的互相关矩阵 \mathbf{G} .由于距离像之间的相关性较强,所以式(11)中两种情况的结果较为接近,为了方便后续处理,可以将上式合并近似得到理想的最优矩阵 $\tilde{\mathbf{G}}$ 为:

$$\tilde{\mathbf{G}} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & \cdots & 1 \\ 1 & \ddots & \ddots & \vdots \\ \vdots & \ddots & \ddots & \vdots \\ 1 & \cdots & \cdots & 1 \end{bmatrix}_{M \times M} \quad (12)$$

$\tilde{\mathbf{G}}$ 矩阵就是所有元素都为1的 M 行 M 列方阵.

根据式(9)和(10),距离对准问题可以进一步描述为:

$$\arg \min_{\Delta r_i} \|\hat{\mathbf{P}} \odot \mathbf{Q} \mathbf{H} \cdot (\hat{\mathbf{P}} \odot \mathbf{Q}) - \tilde{\mathbf{G}}\|_F^2, i = 1, 2, \dots, M \quad (13)$$

根据文献[21]我们可以将式(13)简化为:

$$\arg \min_{\Delta r_i, U} \|\hat{\mathbf{P}} \odot \mathbf{Q} - U \cdot \tilde{\mathbf{G}}^{1/2}\|_F^2, i = 1, 2, \dots, M \quad (14)$$

其中 $\tilde{\mathbf{G}}^{1/2}$ 为方阵 $\tilde{\mathbf{G}}$ 的开方运算,根据式(12)可以得到

$$\tilde{\mathbf{G}}^{1/2} = \frac{1}{\sqrt{M}} \tilde{\mathbf{G}} \quad (15)$$

式(14)中有两个变量,分别为 U 和 \mathbf{Q} , U 是一个半酉矩阵,满足:

$$U^* U = \mathbf{I} \quad (16)$$

可以通过交替迭代^[20]的方法来求解式(14)的最小化问题,即固定一个变量,再通过迭代求解另一个变量.

首先我们固定 \mathbf{Q} 变量,求解 U 使得式(14)达到极小值.根据文献[21]可知,当 U 为 $\tilde{\mathbf{G}}^{1/2} \hat{\mathbf{P}}^H$ 的极因子时,式(14)可以达到极小值,即

$$U = U_2 U_1^H \quad (17)$$

其中 U_1 和 U_2 可以通过对 $\tilde{\mathbf{G}}^{1/2} \hat{\mathbf{P}}^H$ 的SVD分解获得:

$$U_1 \xi U_2^H = \text{SVD}(\tilde{\mathbf{G}}^{1/2} \hat{\mathbf{P}}^H) \quad (18)$$

实际上求解极因子 $U_2 U_1^H$ 可以避免SVD分解,而通过下式求解则更加简便,令

$$\mathbf{Z} = \tilde{\mathbf{G}}^{1/2} \hat{\mathbf{P}}^H \quad (19)$$

则:

$$U_2 U_1^H = (\mathbf{Z} \mathbf{Z}^H)^{-\frac{1}{2}} \mathbf{Z} \quad (20)$$

也有文献[22, 23]提出了更高效的方法求解极因子.

在求得变量 U 后,我们固定变量 U 再求解变量 \mathbf{Q} .令

$$\mathbf{X} = U \cdot \tilde{\mathbf{G}}^{1/2} \quad (21)$$

上式中 \mathbf{X} 是一个 N 行 M 列的矩阵, $\mathbf{X} = [\mathbf{x}_1 | \mathbf{x}_2 | \cdots | \mathbf{x}_M]$,其中 \mathbf{x}_i 为列向量.根据最小二乘法^[24],式(14)可以变换成下式:

$$\hat{\mathbf{P}} \odot \mathbf{Q} = \mathbf{X} \quad (22)$$

由式(7)和(5)可知, \mathbf{Q} 是关于距离像偏移量的线性相位矩阵,这里可以假设偏移量 Δr 为距离单元时延的整数倍.由于对 \mathbf{Q} 设定了以上约束条件,所以式(22)要修正为:

$$\arg \min_{\tilde{\mathbf{Q}}} (\hat{\mathbf{P}} \odot \tilde{\mathbf{Q}} - \mathbf{X}) \quad (23)$$

其中 $\tilde{\mathbf{Q}}$ 表示约束条件下的 \mathbf{Q} 为。为了让上式逼近极小值,本文采用了最小二乘估计的方法搜索最优解:

$$\arg \min_{\Delta r_j} [\mathbf{e}_i(\Delta r_j)^H \mathbf{e}_i(\Delta r_j)], i = 1, 2, \dots, M; j = 1, 2, \dots, N \quad (24)$$

其中

$$\mathbf{e}_i(\Delta r_j) = \hat{\mathbf{p}}_i \odot \tilde{\mathbf{q}}(\Delta r_j) - \mathbf{x}_i \quad (25)$$

式(25)中 $\tilde{\mathbf{q}}(\Delta r_j)$ 是 $\tilde{\mathbf{Q}}$ 的列向量, $\mathbf{e}_i(\Delta r_j)$ 是估计误差。当每个距离像偏移量的线性相位 $\tilde{\mathbf{q}}(\Delta r_j)$ 都确定后,最终得到了距离像偏移量的估计矩阵 $\tilde{\mathbf{Q}}$ 。至此变量 \mathbf{U} 和 \mathbf{Q} 都已解出,实际应用中可以通过迭代对这两个变量交替求解并逐步逼近最优解。大量 ISAR 实测数据实验结果表明,一般情况下本算法迭代 4,5 次即可收敛。最后我们给出算法流程如下:

- (1) 根据距离单元大小生成偏移量 $\tilde{\mathbf{Q}}$ 和 $\tilde{\mathbf{Q}}^{1/2}$ 矩阵;
- (2) 对 \mathbf{P} 矩阵沿距离向做 FFT 得到 $\hat{\mathbf{P}}$ 矩阵并归一化得到 $\hat{\mathbf{P}}$ 矩阵;
- (3) 求解极因子 \mathbf{U} 和 \mathbf{X} 矩阵;
- (4) 求解出各距离像的偏移量线性相位 $\tilde{\mathbf{q}}(\Delta r_j)$ 从而得到矩阵 $\tilde{\mathbf{Q}}$;
- (5) 用估计出的偏移量分别更新 $\hat{\mathbf{P}}$ 和 $\tilde{\mathbf{P}}$ 矩阵;
- (6) 重复步骤(3)~(5),判断迭代终止条件。若迭代结束,对 $\tilde{\mathbf{P}}$ 矩阵沿距离向做 IFFT 得到距离对准完毕的一维距离像。

3 基于 DSGM 的相位补偿算法

非合作目标相对雷达的平移运动造成距离像的错位可以通过距离对准校准,但是该运动还引入了不利于成像的复指数相位,该相位可以表示为:

$$\varphi_e = \exp(-j4\pi\Delta r_T/\lambda) \quad (26)$$

其中 Δr_T 为平动引起的相对距离变化, λ 为波长。而距离对准精度无法达到波长的量级,我们需要通过相位补偿消除该相对成像的影响。

下面我们首先通过信号模型来分析各相位之间的关系。各距离像经过距离对准后,目标区域任意距离单元的信号模型假设如下:

$$s_n(m) \approx a_n \exp\{j2\pi f_n m + \varphi_e(m) + \varphi_{0,n} + \varphi_n(m)\}, m = 1, 2, \dots, M; n = 1, 2, \dots, N \quad (27)$$

其中第一项是目标散射点的相位历程,第二项就是需要消除的相位误差,第三项是散射点反射初相,最后一项是杂噪分量。本节将介绍的相位补偿算法同样基于文献[20]介绍的最优化理论。

考虑式(27)的第一项,该项是目标散射点的转动分量,实际同一距离单元内会有多个散射点,这些点的回波之间会发生干涉作用从而干扰相位误差的估计。为

了消除该干扰,我们以每个距离单元中的最强散射点作为多普勒中心,让距离单元的平均多普勒频率为零,即将多普勒中心移至 0Hz 处。“中心移位”后得到下式:

$$s'_n(m) \approx a_n \exp\{\varphi_e(m) + \varphi_{0,n} + \varphi_n(m)\}, m = 1, 2, \dots, M; n = 1, 2, \dots, N \quad (28)$$

假设相位误差项已被完全消除,可以得到下式:

$$\tilde{s}_n(m) \approx a_n \exp\{\varphi_{0,n} + \varphi_n(m)\}, m = 1, 2, \dots, M; n = 1, 2, \dots, N \quad (29)$$

运用设计结构化 Gram 矩阵^[20]的思路来解决相位补偿问题,可将该问题转化为下式:

$$\arg \min_{\Phi} \|\mathbf{G} - \tilde{\mathbf{G}}\|_{\text{F}}^2 \quad (30)$$

式中

$$\mathbf{G} = (\hat{\mathbf{S}} \odot \Phi)^H \cdot (\hat{\mathbf{S}} \odot \Phi) \quad (31)$$

即我们期望找到一组合适的相位误差 Φ 使得 \mathbf{G} 矩阵在 F 范数下逼近 $\tilde{\mathbf{G}}$ 矩阵。式(31)中 $\Phi = [\varphi_e(1)^* | \varphi_e(2)^* | \dots | \varphi_e(M)^*]$, 而 $\hat{\mathbf{S}} = [\hat{s}_n(1) | \hat{s}_n(2) | \dots | \hat{s}_n(M)]$ 的列向量如下式:

$$\hat{s}_n(m) = \frac{s'_n(m)}{\sqrt{\langle s'_n(m)^*, s'_n(m) \rangle}} \quad (32)$$

是 $s'_n(m)$ 的归一化向量。根据上节对该最优化方法的介绍,结合式(29)的结论可以获得理想的最优矩阵 $\tilde{\mathbf{G}}$ 如下:

$$\tilde{\mathbf{G}} = \tilde{\mathbf{S}}^H \tilde{\mathbf{S}} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & \dots & 1 \\ 1 & \ddots & \ddots & \vdots \\ \vdots & \ddots & \ddots & \vdots \\ 1 & \dots & \dots & 1 \end{bmatrix}_{M \times M} \quad (33)$$

其中 $\tilde{\mathbf{S}} = [\tilde{s}_n(1) | \tilde{s}_n(2) | \dots | \tilde{s}_n(M)]$ 。

根据文献[21]提到的方法,我们可以将式(30)简化为:

$$\arg \min_{\mathbf{U}} \|(\hat{\mathbf{S}} \odot \Phi) - \mathbf{U} \cdot \tilde{\mathbf{G}}^{1/2}\|_{\text{F}}^2 \quad (34)$$

上式中 \mathbf{U} 和 $\tilde{\mathbf{G}}^{1/2}$ 矩阵分别满足式(15)和式(16)。式(34)中的两个变量 \mathbf{U} 和 Φ , 同样可以通过交替迭代^[20]的方法求解最小化问题。

首先我们固定 Φ 变量求解 \mathbf{U} 变量。根据上节介绍的方法可知,当 \mathbf{U} 为 $\tilde{\mathbf{G}}^{1/2} \hat{\mathbf{S}}^H$ 的极因子时,可让式(34)逼近极小值。即:

$$\mathbf{U} = \mathbf{U}_2 \mathbf{U}_1^H \quad (35)$$

$\tilde{\mathbf{G}}^{1/2} \hat{\mathbf{S}}^H$ 的极因子可以通过下式获得:

$$\mathbf{U} = (\mathbf{Z}\mathbf{Z}^H)^{-\frac{1}{2}} \mathbf{Z} \quad (36)$$

$$\mathbf{Z} = \tilde{\mathbf{G}}^{1/2} \hat{\mathbf{S}}^H \quad (37)$$

在求得变量 \mathbf{U} 后,我们固定变量 \mathbf{U} 再求解变量 \mathbf{Q} 。令

$$\mathbf{X} = \mathbf{U} \cdot \tilde{\mathbf{G}}^{1/2} \quad (38)$$

\mathbf{X} 是一个 N 行 M 列的矩阵, $\mathbf{X} = [\mathbf{x}_1 | \mathbf{x}_2 | \dots | \mathbf{x}_M]$, 其中 \mathbf{x}_i 为列向量。根据最小二乘法^[24], 式(34)可以变换成

下式:

$$\hat{S} \odot \Phi = X \quad (39)$$

相位误差具有空不变性,即同一距离像中不同距离单元的相位误差相同,因此最终的相位误差可以通过对各距离单元的相位误差加权平均获得.根据式(39)对 Φ 矩阵的列向量逐个求解可得:

$$\varphi_e(m)^* = \left(\sum_{n=1}^N x_m(n) / \hat{s}_m(n) \right) / \text{abs} \left(\sum_{n=1}^N x_m(n) / \hat{s}_m(n) \right) \quad (40)$$

用上式估计出的相位误差对距离像逐个校正即可实现相位补偿,该算法通常需要迭代3、4次即可得到满意的图像.最后给出相位补偿算法的流程:

(1)生成 $\tilde{G}^{1/2}$ 矩阵;

(2)对 S 矩阵沿方位向做FFT,以每个距离单元中的最强散射点作为多普勒中心,循环移位将该点移至多普勒0Hz,对循环移位后的矩阵沿方位向做IFFT并归一化各列向量得到 \hat{S} 矩阵;

(3)求解极因子 U 和 X 矩阵;

(4)求解相位误差矩阵 Φ ;

(5)用估计出的相位误差分别更新 S 和 \hat{S} 矩阵;

(6)重复步骤(3)~(5),直到满足迭代终止条件;

(7)重复步骤(2)~(6),直到满足迭代终止条件,相位补偿结束.

4 实验结果与分析

以上两节介绍了一种全新的运动补偿方法,该运

动补偿方法分为距离对准和相位补偿算法,本节将利用ISAR实测数据分别对这两种算法做出验证和分析.实测数据是由地基X波段宽带脉冲雷达对空中目标探测得到的回波,雷达带宽为400MHz,观测目标为yake-42中型喷气式飞机和citanan小型喷气式飞机.为了研究随机PRI情况下的运动补偿方法,我们对回波数据方位向随机采样,并将采用MP(Matched Pursuit)算法^[25]重构目标的图像.

4.1 距离对准实验

在距离对准实验中,我们对yake-42和citanan小型飞机的回波数据分别随机抽取256和128个脉冲作为观测样本,方位向稀疏度分别设为20和8.为了得到目标清晰的二维图像,首先我们对脉压后的一维距离像距离对准.相邻互相关和积累互相关是距离对准算法中的经典算法,下面的实验将用这两种算法与本文提出的RA-DSGM距离对准算法做比较.

图1是一组目标为yake-42的回波距离对准结果,其中图1(a)是距离对准前的情况,图1(b)~(d)分别为相邻互相关、积累互相关和本文算法的距离对准结果.图2是一组目标为citanan小型飞机的回波距离对准结果.从以上两组实验结果可以看出相邻互相关算法的对准误差较大,距离像出现了较大的随机跳动;积累互相关算法的对准结果整体上没有出现大的误差,但局部误差仍然较大;本文算法的整体和局部对准结果都较为理想.

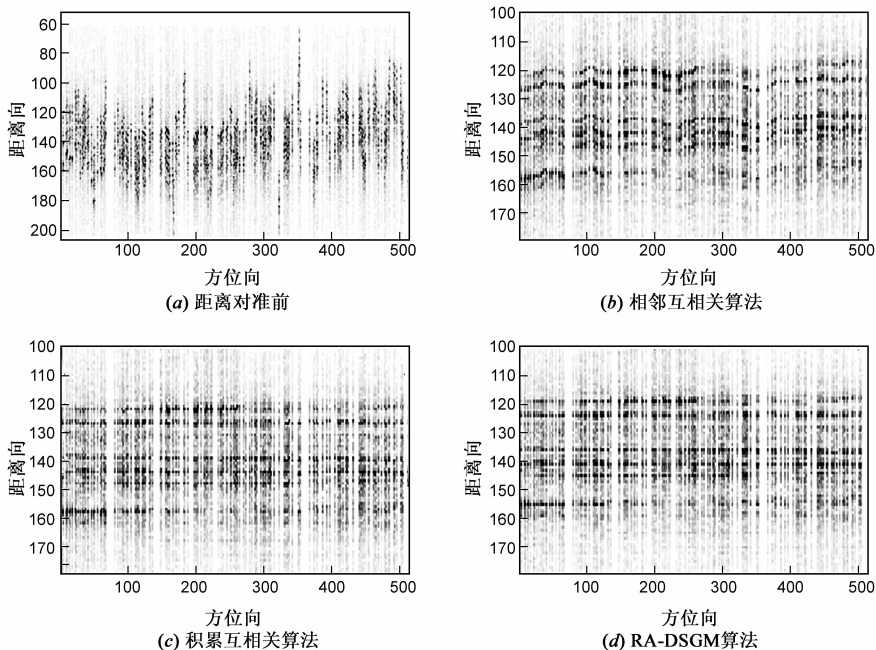


图1 yake-42实测数据(256个脉冲)距离对准结果

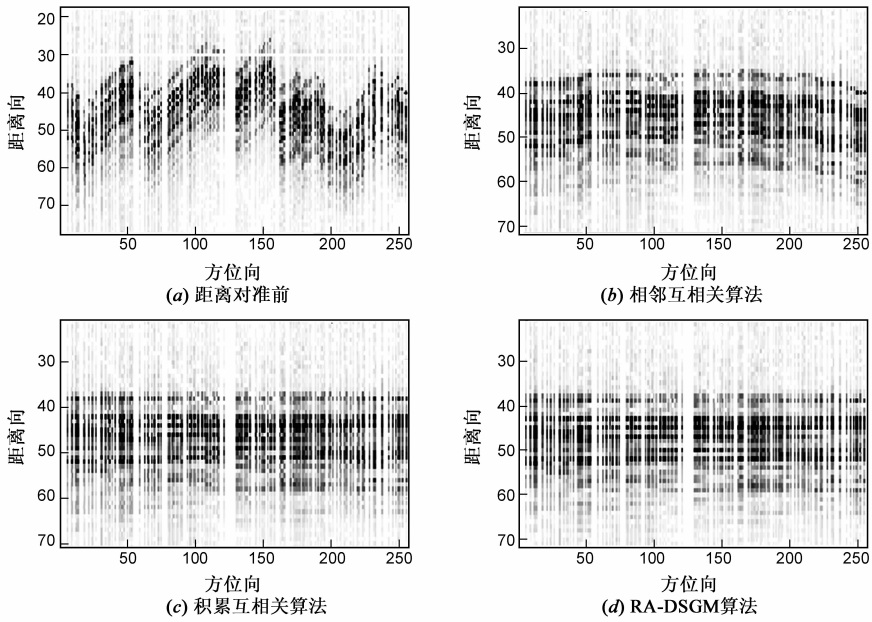


图2 citatan实测数据(128个脉冲)距离对准结果

为进一步分析距离对准算法的性能,需要对以上各算法的距离对准结果进行相位补偿并重构出目标的二维图像.为保证最终成像的质量,这里我们采用了本文提出的 PC-DSGM 相位补偿算法和 MP 重构算法.图 3 和图 4 的成像结果分别与图 1 和图 2 的距离对准结果一一对应,其中图 3(a)和图 4(a)无法分辨出目标轮廓.图 3(b)和 3(c)可以大致分辨出目标轮廓,但目标

的局部细节部分仍然较难分辨.图 4(b)和 4(c)目标的图像不能很好地聚焦,很难分辨出目标轮廓.而从 RA-DSGM 算法对应的图 3(d)和图 4(d)可以看出目标轮廓和细节部分都较为清晰.分别比较图 3 和图 4 各子图对应的图像对比度 C ,结果表明图 3(d)和图 4(d)的对比度最高.

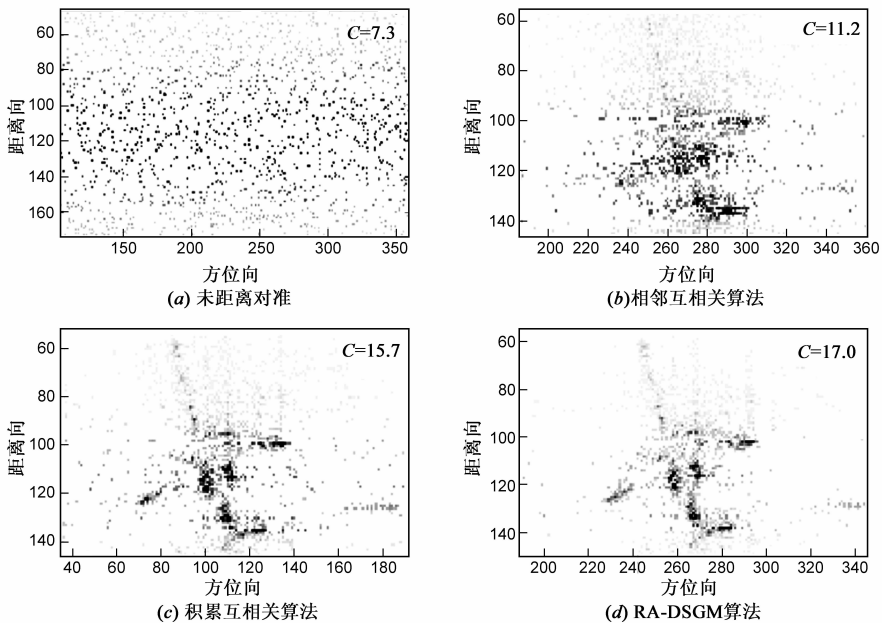


图3 yake-42实测数据(256个脉冲)成像结果

在某些情况下,由于目标相对雷达的运动使其散射特性发生突变,导致了相邻回波的相关性降低.为了

验证算法在该情况下的鲁棒性,我们随机扰动图 1(a)的回波次序和距离向偏移量,仍然用上述三种算法实

现距离对准,如图 5 所示.结果表明该种情况下相邻互相关和积累互相关算法都会出现较大的估计偏差,而

RA-DSGM 距离对准算法较为稳健.

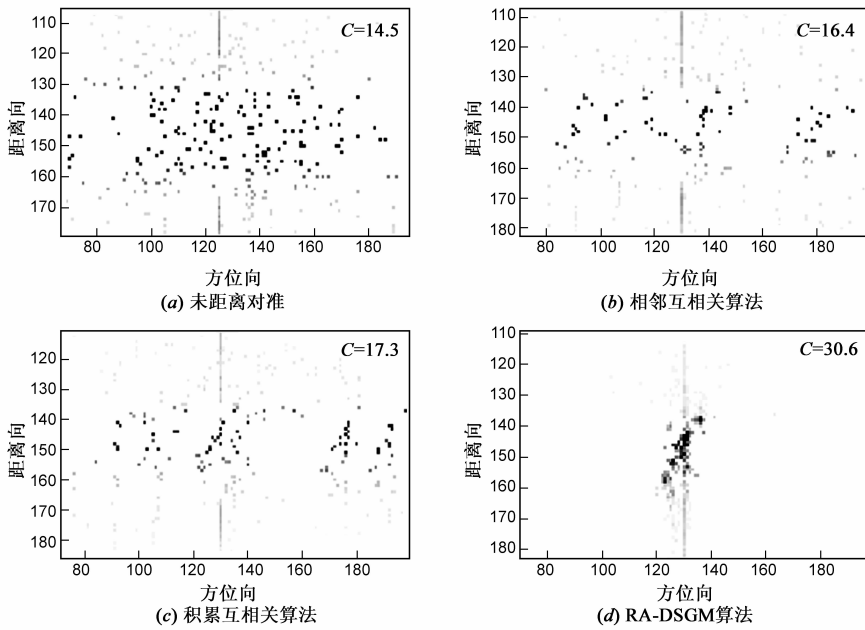


图4 citatan实测数据(128个脉冲)成像结果

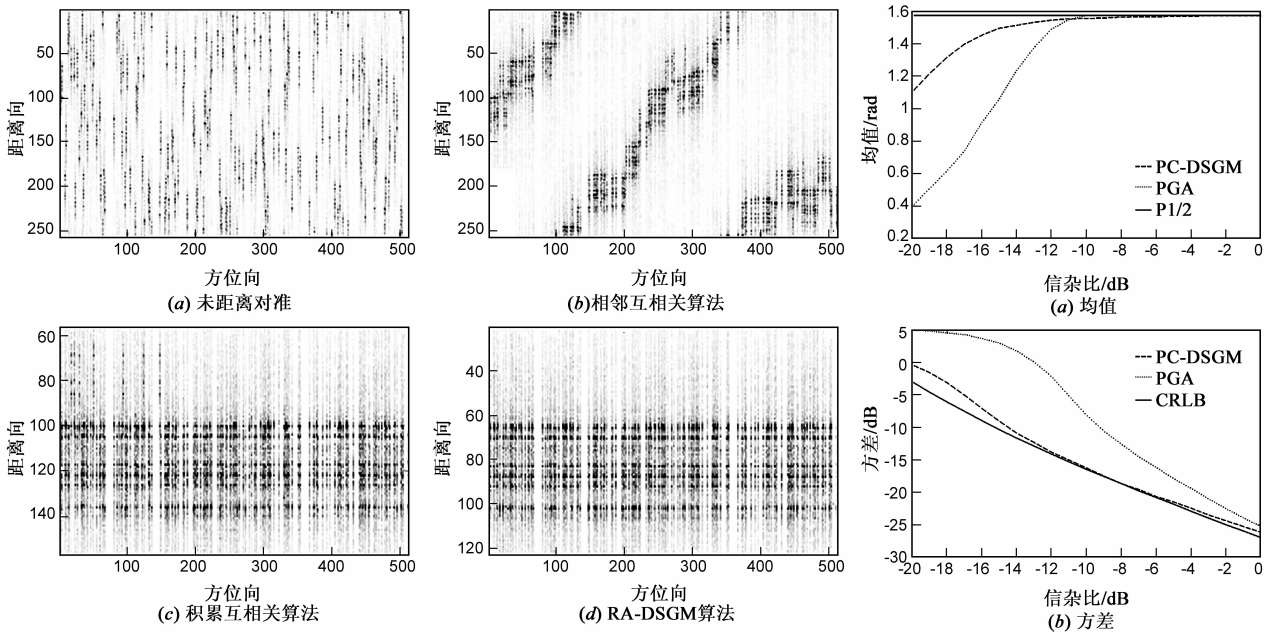


图5 对yake-42实测数据(256个脉冲)随机扰动后的距离对准结果

图6 蒙特卡洛仿真实验

4.2 相位补偿实验

在相位补偿实验中,我们对两组 yake-42 的回波数据分别随机抽取了 128 个脉冲作为观测样本,方位向稀疏度设为 20,需要说明这里采用的所有数据都已经过距离对准处理.

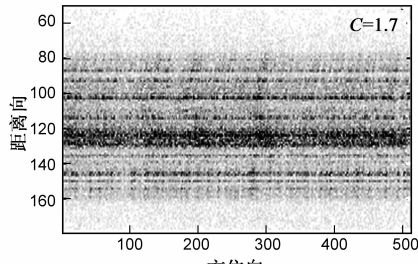
在 ISAR 相位补偿算法中,PGA 算法是较为经典和常用的相位补偿算法.下面将本文提出的 PC-DSGM 相

位补偿算法与 PGA 算法作比较,分析在两者的性能.图 6 是两种算法蒙特卡洛仿真实验的性能曲线,其中图 6 (a)和图 6 (b)分别是相位误差估计的平均值和方差.这里需要说明 SAR \ ISAR 回波数据在相位补偿之前的信杂比通常都在 0dB 以下,因此我们只考虑 0dB 以下的情况,从图(6)可以看出 PC-DSGM 算法的估计均值和方差在低信杂比情况下较 PGA 算法更接近于真实值和克拉

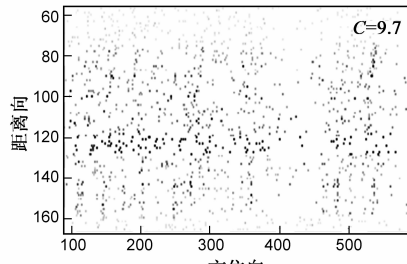
美劳界线,这说明 PC-DSGM 算法的估计精度和稳健性更好.下面的实验将采用实测数据进一步比较两种算法的性能.

首先,我们来验证在方位向均匀采样条件下的相位补偿效果,如图 7(b)、(c)所示,两者的相位补偿效果相当并且都比较理想,图像的对比度和图 7(d)的方位向剖面图进一步印证了该结论.接下来继续比较在方

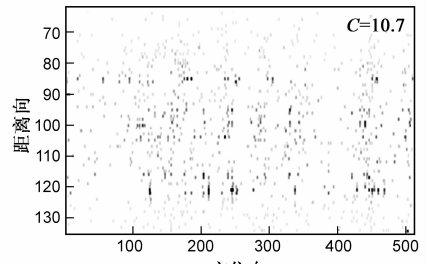
位向随机 PRI 回波条件下两种算法的性能,如图 8(b)、(c)和图 9(b)、(c)所示,PGA 算法在该条件下估计误差较大,不能很好地聚焦图像,而 PC-DSGM 算法可以正常聚焦,目标图像轮廓较为清晰.图像的对比度和图 8(d)、图 9(d)的方位向剖面图的结果表明,本文提出的相位补偿算法更为有效.



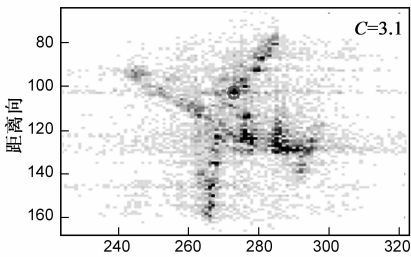
(a) 未相位补偿



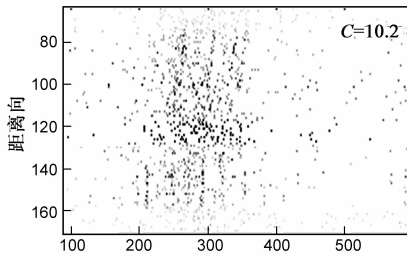
(a) 未相位补偿



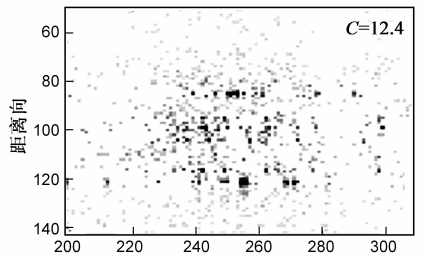
(a) 未相位补偿



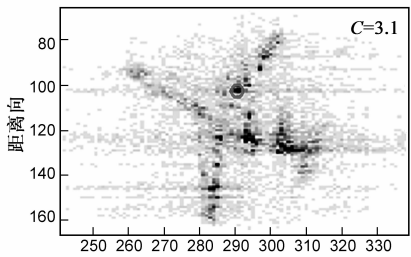
(b) PGA算法



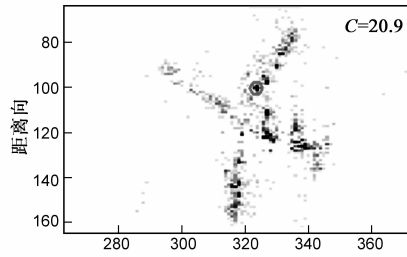
(b) PGA算法



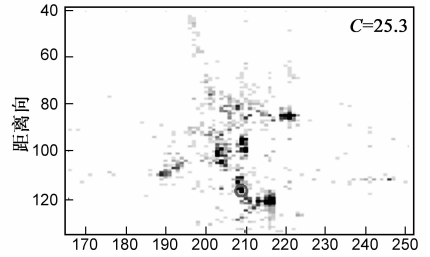
(b) PGA算法



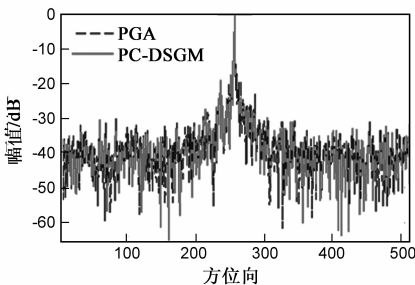
(c) PC-DSGM算法



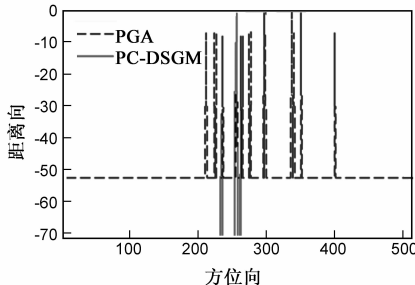
(c) PC-DSGM



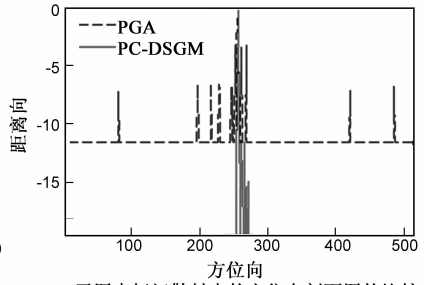
(c) PC-DSGM算法



(d) 子图中标记散射点的方位向剖面图的比较
图7 yake-42实测数据(512个脉冲)相位补偿结果



(d) 子图中标记散射点的方位向剖面图的比较
图8 yake-42实测数据方位向随机采样(128个脉冲)相位补偿结果



(d) 子图中标记散射点的方位向剖面图的比较
图9 yake-42实测数据方位向随机采样(128个脉冲)相位补偿结果

5 结论

本文基于设计结构化 Gram 矩阵的最优化理论提出了一种全新的运动补偿算法. 实验结果表明, RA-DS-GM 算法具有较高的准确性和较强的鲁棒性, 并且可以直接用于解决方位向随机采样回波的距离对准问题. PC-DSGM 算法适用于方位向均匀采样和随机采样回波数据的相位补偿, 并且由蒙特卡洛仿真实验可知, 该算法在低信杂比情况下仍然具有较高的估计精度. 因此该运动补偿方法的提出将使得压缩感知技术在 ISAR 成像领域具有更实际的应用前景.

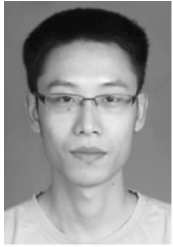
参考文献

- [1] RAYMOND F. JURGENS. Earth – based radar studies of planetary surfaces and atmospheres[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 1982, 20(3): 293 – 305.
- [2] DALE A. AUSHERMAN, ADAM KOZMA, JACK L. WALKER. Developments in radar imaging[J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 1984, 20(4): 363 – 399.
- [3] ZHANG L, XING M D. Resolution Enhancement for inversed synthetic aperture radar imaging under low SNR via improved compressive sensing[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2010, 48(10): 3824 – 3838.
- [4] WANG H X, QUAN Y H, XING M D, ZHANG S H. ISAR imaging via sparse probing frequencies [J]. IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, 2011, 8(3): 451 – 455.
- [5] 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 Xiao-chun, Zhang Yun-hua. 2D radar imaging scheme based on compressive sensing technique[J]. Journal of Electronics and Information Technology, 2010, 32(5): 1234 – 1238. (in Chinese)
- [6] XIE X C, ZHANG Y H. High-resolution imaging of moving train by ground-based radar with compressive sensing[J]. IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, 2010, 46(7): 529 – 531.
- [7] F Ye, D Liang. ISAR enhancement technology based on compressed sensing[J]. IEEE Electronic Letters, 2011, 47(10): 620 – 621.
- [8] ZHANG L, QIAO Z J, XING M D, LI Y C, BAO Z. High-resolution ISAR imaging with sparse stepped-frequency waveforms [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2011, 49(11): 4630 – 4651.
- [9] ZHANG L, QIAO Z J, XING M D. High-resolution ISAR imaging by exploiting sparse apertures[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2012, 60(2): 997 – 1008.
- [10] 焦李成, 杨淑媛, 刘芳, 侯彪. 压缩感知回顾与展望[J]. 电子学报, 2011, 39(7): 1651 – 1662.
- [11] JIAO Li-cheng, YANG Shu-yuan, LIU Fang, HOU Biao. Development and prospect of compressive sensing[J]. Acta Electronica Sinica, 2011, 39(7): 1651 – 1662. (in Chinese)
- [12] 张宗念, 黄仁泰, 闫敬文. 压缩感知信号盲稀疏度重构算法[J]. 电子学报, 2011, 39(1): 18 – 22.
ZHANG Zong-nian, HUANG Ren-tai, YAN Jing-wen. A blind sparsity reconstruction algorithm for compressed sensing signal [J]. Acta Electronica Sinica, 2011, 39(1): 18 – 22. (in Chinese)
- [13] J H G, Ender. On compressive sensing applied to radar[J]. Signal Processing, 2010, 90(3): 1402 – 1414.
- [14] Chen C C, Andrews H C. Target motion induced radar imaging[J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 1980, 16(1): 2 – 14.
- [15] 王根原, 保铮. 逆合成孔径雷达运动补偿中包络对齐的新方法[J]. 电子学报, 1998, 26(6): 5 – 8.
WANG Gen-yuan, BAO Zheng. A new algorithm of range alignment in ISAR motion compensation[J]. Acta Electronica Sinica, 1998, 26(6): 5 – 8. (in Chinese)
- [16] 汪玲, 朱兆达. 一种基于最大修正峰度的 ISAR 距离对准算法[J]. 南京航空航天大学学报, 2006, 38(6): 722 – 726.
WANG Ling, ZHU Zhao-da. New range alignment algorithm for ISAR based on maximum modified kurtosis[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2006, 38(6): 722 – 726. (in Chinese)
- [17] WANG J F, LIU X Z. Improved global range alignment for ISAR[J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 2007, 43(3): 1070 – 1075.
- [18] ZHU D Y, WANG L. Robust ISAR range alignment via minimizing the entropy of the average range profile[J]. IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, 2009, 6(2): 204 – 208.
- [19] 朱兆达, 邱晓晖, 余志舜. 用改进的多普勒中心跟踪法进行 ISAR 运动补偿[J]. 电子学报, 1997, 22(3): 65 – 69.
ZHU Zhao-da, QIU Xiao-hui, et al. ISAR motion compensation using modified Doppler centroid tracking method[J]. Acta Electronica Sinica, 1997, 22(3): 65 – 69. (in Chinese)
- [20] C V Jakowatz, D E Wahl. Eigenvector method for maximum-likelihood estimation of phase errors in synthetic aperture radar imagery[J]. Journal of the Optical Society of America, 1993, 10(12): 2539 – 2546.
- [21] Joel A Tropp, Inderjit S Dhillon, Robert W Heath, Thomas Strohme. Designing structured tight frames via an alternating projection method[J]. IEEE Transactions on Information Theory, 2005, 51(1): 188 – 209.
- [22] Petre Stoica, Jian Li, X. M. Zhu. Waveform synthesis for diversity-based transmit beam pattern design[J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2008, 56(6): 2593 – 2598.
- [23] N J Higham. Computing the polar decomposition—With applications[J]. SIAM Journal on Scientific Computing, 1986, 7

(4):1160 – 1174.

- [23] N J Higham, P Papadimitriou. A parallel algorithm for computing the polar decomposition[J]. Parallel Comput, 1994, 20(8):1161 – 1173.
- [24] Jindong Zhang, Daiyin Zhu, Gong Zhang. Adaptive compressed sensing radar oriented toward cognitive detection in dynamic sparse target scene[J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2012, 60(4):1718 – 1729.
- [25] Joel A Tropp, Anna C Gilbert. Signal recovery from random measurements via orthogonal matching pursuit [J]. IEEE Transactions on Information Theory, 2007, 53(12):4655 – 4666.

作者简介



俞 翔 男,1982 年 10 月出生于江苏省南京市.现就读于南京航空航天大学通信与信息系系统专业,博士研究生.主要研究方向:逆合成孔径雷达成像技术.

E-mail: cwal20@163.com



朱岱寅 男,1974 年 7 月出生于江苏省无锡市.1996 年本科毕业于东南大学无线电工程系,分别于 1998 年和 2002 年在南京航空航天大学电子工程系获硕士和博士学位.现为南航电子工程系教授、博士生导师,IEEE 会员,主要从事雷达成像和信号处理方面的研究.

E-mail: zhudy@nuaa.edu.cn

张劲东 男,1981 年生,江苏南通人.南京航空航天大学信息科学与技术学院讲师,2006 年和 2010 年分别获南京理工大学信号与信息处理、信息与通信工程专业硕士和博士学位.研究方向为机载雷达信号处理.

E-mail: zjdjs@126.com

蒋 锐 男,1985 年 1 月出生于江苏南京.于 2013 年在南京航空航天大学电子工程系获博士学位,现任南京邮电大学讲师,主要研究方向为雷达信号处理.

E-mail: j_ray@njupt.edu.cn