

基于稀疏约束最优化的 ISAR 相位自聚焦成像算法

徐 刚,张 磊,陈倩倩,邢孟道

(西安电子科技大学雷达信号处理国防科技重点实验室,陕西西安 710071)

摘 要: 本文提出了一种基于稀疏约束的 ISAR 方位自聚焦算法,能够应用于稀疏孔径 ISAR 成像中.该算法利用 ISAR 图像的稀疏特征建立最小 1 范数成像模型,并将相位误差作为模型误差.然后通过数值迭代的方式进行自适应相位误差估计,最终获得聚焦良好的 ISAR 图像.同时,成像代价函数的建立基于矩阵模型,有利于采用方位 FFT 和矩阵的 Hardmard 乘积操作进行快速求解.由于利用稀疏约束,该方法在低信噪比的条件下仍然能够取得良好的聚焦结果.基于仿真数据和实测数据的结果验证了本文算法的有效性.

关键词: 逆合成孔径雷达;稀疏孔径;自聚焦;稀疏约束

中图分类号: TN958 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2013) 09-1772-06

电子学报 URL: <http://www.ejournal.org.cn> **DOI:** 10.3969/j.issn.0372-2112.2013.09.016

Novel Autofocusing Algorithm for ISAR Imaging Based on Sparse Constraint

XU Gang, ZHANG Lei, CHEN Qian-qian, XING Meng-dao

(National Laboratory of Radar Signal Processing, Xidian University, Xi'an, Shaanxi 710071, China)

Abstract: In this paper, a novel autofocusing algorithm of inversed synthetic aperture radar (ISAR) imaging based on sparse constraint is proposed, which can be applied in sparse aperture ISAR imaging. In the scheme, taking the phase errors as model errors, the proposed approach exploits the sparsity prior of ISAR image to construct the minimum 1-norm image formation. Then numerical method is adopted to realize adaptive phase error estimation while well-focused ISAR image can finally be obtained. Meanwhile, the objective function of ISAR imaging is established based on matrix model, which can be conveniently solved using fast Fourier transform (FFT) and matrix Hardmard multiplication. Due to the utilization of sparsity restriction, the proposed approach can still be capable of performing well even in the case of low signal-to-noise ratio (SNR). The experimental results using both simulated data and measured data confirm the validation of the proposal.

Key words: inversed synthetic aperture radar (ISAR); sparse aperture; autofocusing; sparse constraint

1 引言

逆合成孔径雷达 (ISAR) 由于能够实现目标的二维成像, 获得更多的散射点信息, 有利于目标的分类和识别, 因此越来越被广泛应用^[1]. 由于 ISAR 目标的非合作特性, 为了获得方位高分辨成像, 需要进行运动补偿处理. 在 ISAR 成像中, 当目标转动对应的距离徙动影响可以忽略时, 运动补偿表现为平动补偿处理. 平动补偿包含两个方面: 包络对齐和相位自聚焦. 包络对齐一般可以通过最大相关法^[2]和自适应方法实现^[3,4], 而相位自聚焦算法一般可以分为基于特显点^[5,6]和基于图像整体信息^[7~9]两类方法. 基于特显点的方法在场景存在特显点的情况下能够取得良好的聚焦效果, 而当场景不存在明显的特显点时其性能下降. 相比于基于特显点的

方法, 一般基于图像整体信息的算法具有更高的“鲁棒性”和更广泛的适用范围. 在某些情况下, ISAR 成像会出现稀疏孔径的情况, 例如多功能或者多波段 ISAR 成像. 在数据缺损的情况下, 现有的包络对齐算法可以直接应用, 而现有的自聚焦算法存在一定的局限性, 主要在于方位数据缺损导致信号的不连续和信号的不相干问题. 本文针对稀疏孔径下的 ISAR 自聚焦算法和方位高分辨成像进行研究. 相应的, 本文提出了一种利用 ISAR 散射域稀疏性建立最优化问题以实现求解自适应误差相位和重构 ISAR 图像的方法. 该方法基于 ISAR 图像的稀疏特性, 能够利用 ISAR 图像的整体信息, 具有较高的相位误差估计精度.

最近几年, 随着压缩感知理论的发展, 压缩感知理论在雷达成像处理中得到了越来越多的关注. 由压缩感

知理论可知,未知的稀疏信号可以通过求解 l_1 -范数最优化问题以极大概率得到完美恢复^[10,11].同时,信号的稀疏表征在提高成像质量方面也得到一定应用,文献[12]提出利用 SAR 图像的稀疏特性可以有效提高成像分辨率、降低副瓣以及抑制 SAR 图像相干斑,达到图像特征增强的目的.ISAR 图像可以认为由若干个散射点组成,并且散射点的数量有限,所以 ISAR 图像具有稀疏性.文献[13]基于压缩感知理论,提出了一种利用有限数目脉冲的 ISAR 超分辨成像方法.本文考虑利用 ISAR 图像的稀疏特征进行 ISAR 自聚焦和方位高分辨成像处理,并且可以应用于方位孔径稀疏的条件下.同时考虑到处理的是 ISAR 二维复图像,本文的成像模型基于矩阵形式,相比于传统的向量表示形式,更加方便在成像过程中对于距离维和方位维进行分维处理.本文的成像算法将相位误差作为 ISAR 成像的模型误差,通过建立最小 l_1 范数最优化问题以实现 ISAR 图像的稀疏表征.然后 ISAR 成像利用数值迭代的算法进行求解,在成像过程中同时进行自适应的相位误差估计.由于成像代价函数采用矩阵形式表示,在求解过程中可以采用方位 FFT 和矩阵的 Hardward 乘积操作,以提高本文算法的效率.由于利用信号的稀疏表征,本文的算法在低信噪比的情况下仍然可以取得较为理想的结果.最后将本文的自聚焦算法应用于稀疏孔径 ISAR 成像中,为了提高其成像效率,首先在各个子孔径内利用传统算法进行自聚焦处理,然后利用本文的算法对于整个稀疏孔径进行自聚焦和成像处理,最终获得方位高分辨的 ISAR 图像.

2 基于稀疏约束的 ISAR 成像模型

假设距离脉冲压缩和包络对齐已经得到有效的处理,并且由目标转动引起的越距离单元徙动可以忽略,或者已经得到校正,那么此时的 ISAR 回波信号可以离散化用矩阵形式表示为

$$\mathbf{S} = \mathbf{AFE} + \mathbf{n} \quad (1)$$

式(1)中, \mathbf{S} 表示经过距离脉冲压缩和包络对齐处理后的回波信号,每一列对应一个方位接收脉冲,其大小为 $M \times N$, M 为距离维离散点数, N 为方位维离散点数; \mathbf{A} 表示散射目标复数矩阵,即需要重构的 ISAR 二维图像,它可以用来表征目标的散射点位置信息,其大小为 $M \times N$; $\mathbf{F} =$

$$\begin{bmatrix} 1 & 1 & \cdots & 1 \\ 1 & \omega & \cdots & \omega^{N-1} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 1 & \omega^{N-1} & \cdots & \omega^{(N-1)(N-1)} \end{bmatrix}, \quad \text{其中 } \omega =$$

$\exp\left[-j \frac{2\pi}{N}\right]$, \mathbf{F} 表示 $N \times N$ 大小傅里叶变换矩阵,二维

矩阵右乘 \mathbf{F} 相当于矩阵按行做 FFT 变换,即二维图像

域在方位维进行 FFT 操作; $\mathbf{E} = \text{diag}[e_0, e_1, \dots, e_{N-1}]$ 和 $e_n = \exp[j \cdot \varphi(n)]$ 表示误差相位矩阵,沿距离维方向表现为非空变性,主要包含目标平动引起的误差相位、雷达系统不稳定和电磁波传播效应引起的误差相位^[6]; \mathbf{n} 为加性噪声矩阵.在 ISAR 成像中,需要进行包络对齐和相位自聚焦处理才可以得到“聚焦”良好的图像.包络对齐的精度要求误差小于二分之一距离单元,而相位自聚焦精度要求较高,误差相位的数量级要与 $\lambda/4$ 相比拟.越距离单元徙动校正可以通过传统的包络对齐方法实现^[2,4].相对于回波包络,回波相位对于噪声比较敏感.特别是在低信噪比的条件下,由于相位误差不能正确校正而得不到“聚焦”良好的高分辨 ISAR 图像.

信号的稀疏表征由于能够实现噪声抑制、特征增强和超分辨等优势,得到广泛的应用.最近几年,压缩感知理论被提出,并得到了越来越多的关注.由压缩感知理论可知,未知稀疏信号利用其稀疏特性通过 l_1 -范数最优化问题能够以极大概率得到完美重构^[10,11].此外,信号的稀疏表征在雷达成像处理中得到了越来越多的研究.文献[12]提出一种 SAR 图像特征增强方法,可以有效提高成像分辨率、降低副瓣以及抑制 SAR 图像的相干斑.可见,图像特征在雷达成像中起着越来越重要的作用.同时,ISAR 图像可以认为由有限的散射点组成,其他的地方为噪声信号,所以 ISAR 图像具有稀疏特性.本文中我们利用 ISAR 图像的稀疏性,通过建立最优化问题求解自适应误差相位并得到聚焦良好的 ISAR 图像.由式(1)所示的观测方程可得 ISAR 成像代价函数如下

$$\min_{\mathbf{A} \in \mathbf{C}_{M \times N}} (\|\text{vec}(\mathbf{A})\|_1), \text{ 约束条件 } \|\mathbf{S} - \mathbf{AFE}\|_2 < \epsilon \quad (2)$$

式(2)中, $\text{vec}[\cdot]$ 表示矩阵按列拼接转换成向量操作, $\|\cdot\|_1$ 表示向量 l_1 -范数操作, $\|\cdot\|_2$ 表示矩阵 l_2 -范数操作; $\|\text{vec}(\mathbf{A})\|_1$ 表示 \mathbf{A} 只有少数较大分量,其他大多数是较小分量,用于表征 ISAR 图像的稀疏性; $\|\mathbf{S} - \mathbf{AFE}\|_2$ 表示误差方程,用于表征原始信号的估计误差精度,其中 $\epsilon = \|\mathbf{n}\|_2$, ϵ 为噪声门限. ϵ 与图像的恢复精度密切相关,通过设置不同的 ϵ 可以得到不同稀疏度的 ISAR 图像,即通过设置合理的 ϵ 可以得到不同个数的散射点图像.当 ϵ 值较小时,图像的稀疏度相对减弱,在低信噪比的条件下,噪声分量被误认为有效信号分量,从而影响图像的恢复精度;当 ϵ 值较大时,图像的稀疏度得到增强,弱散射点被认为噪声分量,恢复的 ISAR 图像散射数目相对较少,噪声得到有效抑制.所以,利用 ISAR 图像的稀疏特性,在低信噪比的条件下,通过设置较大的 ϵ 值,可以有效抑制噪声而得到聚焦良好的 ISAR 图像.由 Kuhn-Tucker 理论^[14],式(2)最优化问题可以转换为

$$\min_{\mathbf{A}} f(\mathbf{A}) = \min_{\mathbf{A}} (\|\mathbf{S} - \mathbf{AFE}\|_2^2 + \mu \|\text{vec}(\mathbf{A})\|_1) \quad (3)$$

式(3)中,目标函数包含两项:数据保真项和正则化项.第一项用于控制观测噪声的能量;第二项对应于 l_1 范数.通过最小 l_1 范数约束,可以实现对 ISAR 图像的稀疏约束,从而在噪声抑制方面具有优势.其中,常数 $\mu > 0$,用于平衡图像稀疏度和估计误差精度之间的关系,其作用与 ϵ 相同,当 μ 较大时,用于增强 ISAR 图像的稀疏度,有效抑制噪声影响.所以,当图像信噪比较低时,需要合理选择较大 μ 以保证图像稀疏度,降低噪声的影响而得到“聚焦”良好的 ISAR 图像. μ 的选择可以通过利用 Bayesian 的方法进行估计^[15].

3 基于稀疏约束的 ISAR 自聚焦算法和稀疏孔径 ISAR 成像

3.1 稀疏约束自聚焦

下面求解式(3)所示的代价函数,为了克服 l_1 范数在零点处不可导问题,对 $\|\text{vec}(\mathbf{A})\|_1$ 作以下近似

$$\|\text{vec}(\mathbf{A})\|_1 = \sum_{n=0}^{N-1} \sum_{m=0}^{M-1} (|a_{m,n}|^2 + \delta)^{1/2} \quad (4)$$

式(4)中, $\delta > 0$,是非常小的量.式(4)代入式(3)可得

$$\min_{\mathbf{A}} f(\mathbf{A}) = \min \left(\|\mathbf{S} - \mathbf{AFE}\|_2^2 + \mu \sum_{n=0}^{N-1} \sum_{m=0}^{M-1} (|a_{m,n}|^2 + \delta)^{1/2} \right) \quad (5)$$

利用 $\|\mathbf{S} - \mathbf{AFE}\|_2 = \sqrt{\text{tr}[(\mathbf{S} - \mathbf{AFE})^H(\mathbf{S} - \mathbf{AFE})]}$ ^[16], 则式(5)所示目标函数 $f(\mathbf{A})$ 可改写如下

$$\begin{aligned} f(\mathbf{A}) &= (\|\mathbf{S} - \mathbf{AFE}\|_2)^2 + \mu \sum_{n=0}^{N-1} \sum_{m=0}^{M-1} (|a_{m,n}|^2 + \delta)^{1/2} \\ &= \text{tr}[(\mathbf{S} - \mathbf{AFE})^H(\mathbf{S} - \mathbf{AFE})] \\ &\quad + \mu \sum_{n=0}^{N-1} \sum_{m=0}^{M-1} (|a_{m,n}|^2 + \delta)^{1/2} \\ &= \text{tr}[\mathbf{S}^H\mathbf{S} - \mathbf{E}^H\mathbf{F}^H\mathbf{A}^H\mathbf{S} - \mathbf{S}^H\mathbf{AFE} + \mathbf{E}^H\mathbf{F}^H\mathbf{A}^H\mathbf{AFE}] \\ &\quad + \mu \sum_{n=0}^{N-1} \sum_{m=0}^{M-1} (|a_{m,n}|^2 + \delta)^{1/2} \\ &= \text{tr}[\mathbf{S}^H\mathbf{S} - \mathbf{SE}^H\mathbf{F}^H\mathbf{A}^H - \mathbf{S}^H\mathbf{AFE} + \mathbf{AFEE}^H\mathbf{F}^H\mathbf{A}^H] \\ &\quad + \mu \sum_{n=0}^{N-1} \sum_{m=0}^{M-1} (|a_{m,n}|^2 + \delta)^{1/2} \end{aligned} \quad (6)$$

式(6)中, $[\cdot]^H$ 表示矩阵共轭转置操作, $\text{tr}[\cdot]$ 表示矩阵求迹操作,并且利用矩阵迹函数性质: $\text{tr}[\mathbf{AB}] = \text{tr}[\mathbf{BA}]$.一般代价函数的共轭梯度可以表示目标函数的收敛方向,利用式(6)可以求得目标函数的共轭梯度函数

$$\nabla_{\mathbf{A}}^* f(\mathbf{A}) = -\mathbf{SE}^H\mathbf{F}^H + \mathbf{AFEE}^H\mathbf{F}^H + \mu\mathbf{W}(\mathbf{A}) \cdot \mathbf{A} \quad (7)$$

式(7)中,

$$\mathbf{W}(\mathbf{A}) = \begin{bmatrix} \frac{1}{2(|a_{0,0}|^2 + \delta)^{1/2}} & \cdots & \frac{1}{2(|a_{0,N-1}|^2 + \delta)^{1/2}} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{1}{2(|a_{M-1,0}|^2 + \delta)^{1/2}} & \cdots & \frac{1}{2(|a_{M-1,N-1}|^2 + \delta)^{1/2}} \end{bmatrix}$$

$\mathbf{FEE}^H\mathbf{F}^H = \mathbf{I}$.式(8)可改写为

$$\begin{aligned} \nabla_{\mathbf{A}}^* f(\mathbf{A}) &= (\mathbf{N} + \mu\mathbf{W}(\mathbf{A})) \cdot \mathbf{A} - \mathbf{SE}^H\mathbf{F}^H \\ &= \mathbf{H}(\mathbf{A}) \cdot \mathbf{A} - \mathbf{SE}^H\mathbf{F}^H \end{aligned} \quad (8)$$

如果令式(8)等于零矩阵,可以求得 \mathbf{A} 的递推表达式

$$\hat{\mathbf{A}}_{p+1} = \frac{\mathbf{SE}^H\mathbf{F}^H}{\mathbf{H}(\hat{\mathbf{A}}_p)} \quad (9)$$

式(9)中, $\hat{\mathbf{E}}$ 表示估计的误差相位矩阵, $\hat{\mathbf{A}}$ 表示估计的散射点二维图像矩阵.式(9)表示的含义为:首先对式(1)所示的回波信号在方位向利用估计的相位误差进行相位误差补偿,然后在方位向进行 IFFT 操作,最后进行振幅归一化处理得到自聚焦 ISAR 图像;如此进行迭代,最终可以得到聚焦良好的 ISAR 图像.需要说明的是,式(7)的 $\mathbf{FEE}^H\mathbf{F}^H = \mathbf{I}$ 仅在方位全孔径条件下成立,而在稀疏孔径的情况下,并不成立,此时 $\mathbf{FEE}^H\mathbf{F}^H = \mathbf{FF}^H$,令式(7)等于零矩阵,并采用共轭梯度算法可以得到 \mathbf{A} 的递推表达式.考虑到在没有误差相位先验信息的条件下,可以假设 $\varphi_0(n) = 0 (n = 0, 1, 2, \dots, N-1)$,并且误差相位递推表达式可以表示为

$$\hat{\varphi}_{p+1}(n) = \hat{\varphi}_p(n) + \Delta\hat{\varphi}_{p+1}(n) \quad (10)$$

式(10)中, $\Delta\hat{\varphi}_{p+1}$ 可表示为

$$\exp[j\Delta\hat{\varphi}_{p+1}(n)] = \frac{\sum_{m=0}^{M-1} [(\text{conj}[\hat{\mathbf{A}}_{p+1}\mathbf{F}\hat{\mathbf{E}}_p] \cdot \mathbf{S})]_{m,n}}{\left| \sum_{m=0}^{M-1} [(\text{conj}[\hat{\mathbf{A}}_{p+1}\mathbf{F}\hat{\mathbf{E}}_p] \cdot \mathbf{S})]_{m,n} \right|} \quad (11)$$

式(11)中, $[\cdot]$ 表示取矩阵的第 m 行、第 n 列元素操作; $\text{conj}[\cdot]$ 表示矩阵共轭操作;利用式(9)、(10)和(11),可以到 $\hat{\mathbf{A}}_{p+1}$ 的更新表示,其中式(9)的迭代终止条件可以设置为

$$\|\hat{\mathbf{A}}_{p+1} - \hat{\mathbf{A}}_p\|_2 / \|\hat{\mathbf{A}}_p\|_2 < \rho \quad (12)$$

式(12)中, ρ 是设置的大于零的常数门限值.当 \mathbf{A} 相邻两次估计值满足式(12)或者满足一定的迭代次数时,便可以停止迭代得到估计值 $\hat{\mathbf{A}}$,同时得到误差相位矩阵的估计值 $\hat{\mathbf{E}}$.

3.2 稀疏孔径 ISAR 成像

通常情况下,雷达系统需要同时具有多种工作方式,在 ISAR 多目标成像或者分布式 ISAR 成像中都会出现方位稀疏孔径的情况.在这种情况下,缺损的数据会引起相邻子孔径之间的不相干问题,利用常规成像算法其成像结果往往出现很强的栅瓣,从而对后续目标的分类和识别增加困难.由压缩感知理论可知,未知稀疏信号利用稀疏约束可以从降维的样本中以极大的概率得到完美重构.下面我们将本文提出的基于稀疏约束的自聚焦算法扩展到稀疏孔径的情况下,在方位孔径稀疏的情况下同时实现方位自聚焦和稀疏孔径下的

高分辨成像因此,需要针对缺损的数据需要进行谱恢复处理,以克服稀疏孔径引起的栅瓣影响,同时需要进行方位自聚焦处理,消除运动误差引起的散焦问题,其具体步骤如下:

(1)在稀疏孔径下,为了提高本文自聚焦算法的收敛速度和稳健性,可以利用常规自聚焦算法的估计相位误差结果作为本文自聚焦算法的初始迭代值.因此,首先在各个子孔径内利用常规的自聚焦算法进行处理,例如可以采用文献[6]的相位误差最小加权二乘估计算法,这样可以实现 ISAR 子孔径的聚焦,得到子孔径的相位误差估计.

(2)子孔径相位误差估计后,子孔径之间存在相位误差 discontinuous 和去相干的问题.将子孔径相位误差估计结果作为初始迭代值,利用本文的基于稀疏约束的自聚焦算法进行处理得到更为精确的相位误差估计和稀疏孔径数据下的 ISAR 成像重构,最终实现方位高分辨成像.

需要强调的是,本文的基于 ISAR 图像稀疏性的相位自适应聚焦方法在低信噪比的条件下可以取得良好的“聚焦”效果,与传统自聚焦算法相比,在抑制噪声方面更有优势.另一个方面是这种方法的高效性,本文的推导基于矩阵模型,有效降低转换成向量模型引起的二维耦合性,最优化求解步骤仅包含方位维 FFT 运算以及矩阵 Hadamard 乘积等简单易行的操作.在稀疏孔径的情况下,利用常规成像算法求解初步误差相位作为误差相位的初始值,可以有效提高相位自适应聚焦的收敛速度,从而有效减小算法的数据量和运算量,提高该算法的高效性和实时性.

4 实验数据验证

本部分分别通过对仿真数据和实测数据处理,以验证本文算法的有效性.为了验证本文算法的有效性,性能指标应该包含两个因素:误差相位形式和回波信噪比.不同的误差相位形式会影响最优化问题的收敛性,从而影响图像的聚焦效果.同样的,在低信噪比的条件下,由于噪声的存在,最优化问题的收敛性也会受到影响,甚至有可能导致最优化求解最终不收敛,而得不到良好的聚焦效果.所以验证本文算法在不同误差相位形式和不同信噪比条件下的自聚焦结果是必要的.

在仿真数据处理中,以 B727 飞机作为仿真模型,信号带宽 150MHz,脉冲重复频率 20KHz,并且对回波数据添加误差相位和高斯噪声,对应三种不同形式的误差相位,其信噪比设置为 10dB、5dB 和 0dB,如图 1 所示.第一种误差相位为二次相位形式(抛物线形式),主要用于分析目标的高速平动引起的误差相位影响;第二

种误差相位为正余弦相位形式,相比于第一种误差相位更复杂,主要用于分析目标的复杂运动产生的误差相位影响;第三种误差相位为随机误差相位形式,主要用于分析雷达系统不相干情况下产生误差相位影响.在仿真中,距离脉冲压缩和距离徙动已经得到校正^[2],经过预处理后,回波信号大小为 128×128 .图 1 为利用本文算法的处理结果,其中迭代终止条件设置为 $\rho = 10^{-4}$,为了便于分析,我们截取图像大小为 84×84 的部分进行显示.通过分析图 1 可知,在不同的信噪比和不同的相位误差形式下,本文的自聚焦算法都能取得较好的聚焦效果,并且在低信噪比条件下仍然适用.

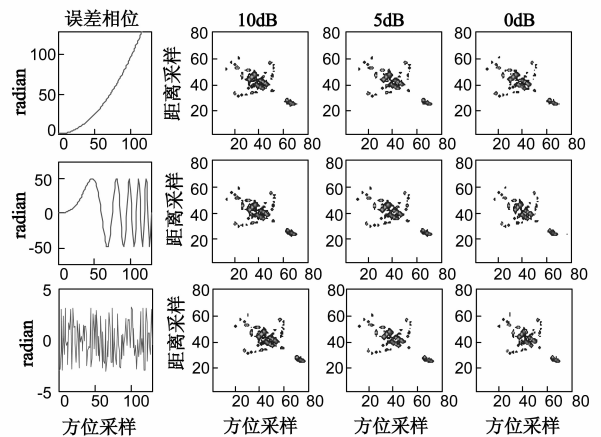


图1 本文算法在不同形式相位误差和信噪比条件下的结果

为了验证本文算法的有效性和优势,对本文介绍的自聚焦方法与两种常规自聚焦方法进行比较,两种常规方法分别为相位误差加权最小二乘和最小熵自聚焦.仍然利用前面实验的仿真数据进行处理,通过对回波数据添加随机误差相位和高斯噪声,信噪比设置为 10dB、5dB 和 0dB,三种方法的处理结果如图 2 所示.由仿真结果可以发现,在高信噪比条件下,三种方法结果都比较理想,本文的算法在视觉效果上更好.然而在低信噪比条件下,相位误差加权最小二乘方法结果比较差,其主要原因是在强噪声干扰条件下,误差相位获取

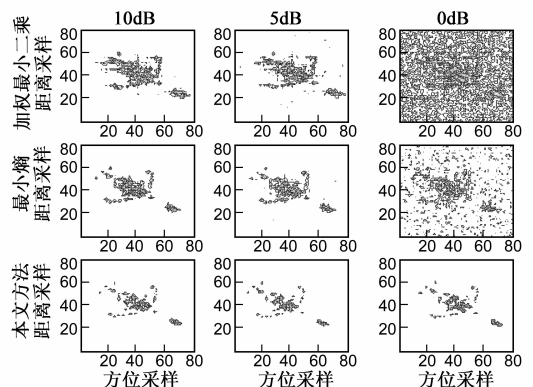


图2 本文算法与常规自聚焦算法比较的结果

不准确,从而影响聚焦效果,导致图像信噪比低;最小熵方法自聚焦结果还可以,因为最小熵方法利用图像的整体信息,能够比较有效抑制噪声影响,提高图像信噪比;相对于两种常规的自聚焦方法,本文介绍的基于 ISAR 图像稀疏性的自适应相位聚焦方法在低信噪的条件下可以取得较好的结果,是因为本文算法同样可以利用图像的整体信息,同时,本文算法可以有效抑制噪声,提高图像的信噪比。

下面分析本文介绍的 ISAR 自适应相位聚焦方法在稀疏孔径下的成像性能,下面对一组实测数据进行处理.该实测数据为 ISAR 系统录取的 Yak-42 飞机的回波数据,系统参数为:中心频率 5520MHz,发射信号带宽 400MHz,脉冲重复频率 100Hz.原始回波数据的信噪比近似为 22dB,我们选取全孔径、1/2 孔径和 1/4 孔径进行处理.在自聚焦处理前,距离脉冲压缩和距离徙动已经得到校正.包络对齐处理后,回波信号大小为 128×128 .对回波信号添加高斯分布的噪声,信噪比分别设置为 15dB、10dB 和 5dB 三种情况,本文方法处理结果如图 3 所示.由图 3 可知,本文的基于稀疏约束的自聚焦算法对于稀疏孔径可以实现信号缺损的重构和方位自聚焦处理,得到较为理想的方位成像结果.然而,需要指出的是,随着子孔径数量的减少和信噪比的降低,本文算法的性能有所下降,这是由于噪声的干扰和观测样本数量较少所致。

5 结论

本文基于 ISAR 图像的稀疏性提出一种自适应相位聚焦方法,该方法利用最优化方法求解误差相位和重构 ISAR 图像,可以适用于稀疏孔径 ISAR 成像中.本文方法基于矩阵模型,有利在距离维和方位维进行分维处理.在求解过程中,利用方位 FFT 和矩阵 Hardmard 乘积操作以提高算法的效率.由于利用稀疏约束,本文算法在低信噪比情况下仍然可以获得良好的聚焦效果。

参考文献

- [1] 李亚超,全英汇,邢孟道.一种基于时频分布尺度变换的 ISAR 成像新方法[J].电子学报,2009,37(9):2085-2091.
Li Yachao, Quan Yinghui, Xing Mengdao. A new method of ISAR imaging based on the scale transform in time-frequency distribution plane[J]. Acta Electronica Sinica, 2009, 37(9): 2085-2091. (in Chinese)
- [2] Chen C C, Andrews H C. Target-motion-induced radar imaging [J]. IEEE Transactions on Aerospace Electronic Systems, 1980, 16(1): 2-14.
- [3] Zhu D, Wang L, Yu Y, Tao Q, Zhu Z. Robust ISAR range alignment via minimizing the entropy of the average range pro-

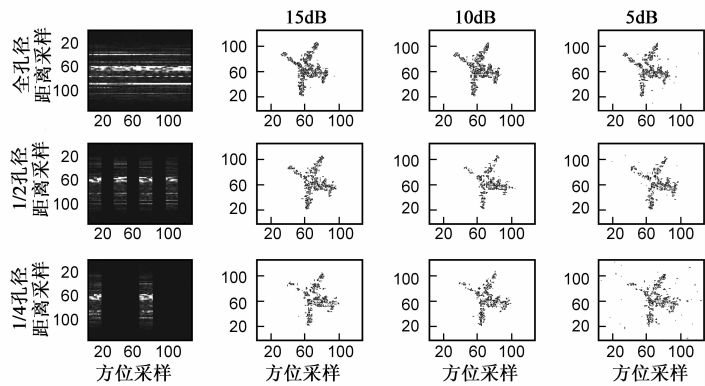


图3 本文算法在稀疏孔径下的结果

file[J]. IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, 2009, 6(2): 204-208.

- [4] 刘志凌,廖桂生,杨志伟.低信噪比条件下一种迭代加权拟合的 ISAR 包络对齐方法[J].电子学报,2012,40(4): 799-804.
Liu Zhiling, Liao Guisheng, Yang Zhiwei. A range alignment method with iterative weighted least squares fitting for ISAR under low SNR[J]. Acta Electronica Sinica, 2012, 40(4): 799-804. (in Chinese)
- [5] B D Steinberg. Radar imaging from a distorted array: The radio camera algorithm and experiment [J]. IEEE Transactions on Antennas Propagation, 1981, 29(5): 740-748.
- [6] Ye W, Yeo T S, Bao Z. Weighted least-squares estimation of phase errors for SAR/ISAR autofocus [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 1999, 37(5): 2487-2494.
- [7] Berizzi F, Cosini G. Autofocusing of inverse synthetic aperture radar images using contrast optimization [J]. IEEE Transactions on Aerospace Electronic Systems, 1996, 32(3): 1185-1191.
- [8] Munoz-Ferreras J M, Perez-Martinez F, Datcu M. Generalisation of inverse synthetic aperture radar autofocus methods based on the minimisation of the Renyi entropy [J]. IET Radar Sonar & Navigation, 2010, 4(4): 586-594.
- [9] Wang J, Liu X, Zhou Z. Minimum-entropy phase adjustment for ISAR [J]. IEEE Proc-Radar Sonar Navigation, 2005, 152(2): 58-67.
- [10] Zhao B, Zhang C S. Compressed spectral clustering [A]. IEEE International Conference on Data Mining Workshops, 2009 [C]. Miami FL: IEEE, 2009. 344-349.
- [11] E Candes, J Romberg, T Tao. Robust uncertainty principle: Extract signal reconstruction from highly incomplete frequency information [J]. IEEE Transactions on Information Theory, 2006, 52(2): 489-509.
- [12] M Cetin, W C Kard. Feature-enhanced synthetic aperture radar image formation based on nonquadratic regularization [J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2001, 10(4): 623-631.
- [13] Zhang L, Xing M D, Qiu C W, Li J, Bao Z. Achieving higher

resolution ISAR imaging with limited pulses via compressed sampling[J]. IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, 2009, 6(3):567 – 571.

[14] D Luenberger. Linear and Nonlinear Programming[M]. 2nd Ed. Boston/Dordrecht/London: Kluwer, 2003.

[15] 成萍, 司锡才, 姜义成, 许荣庆. 基于稀疏贝叶斯学习的稀疏信号表示 ISAR 成像方法[J]. 电子学报, 2008, 36(3):547 – 550.

Cheng Ping, Si Xicai, Jiang Yicheng, Xu Rongqing. Sparse signal representation ISAR imaging method based on sparse bayesian learning[J]. Acta Electronica Sinica, 2008, 36(3): 547 – 550. (in Chinese)

[16] 张贤达. 矩阵分析与应用[M]. 北京: 清华大学出版社, 2008. 44 – 56.

作者简介



徐 刚 男, 1987 年出生于山东枣庄. 2005 年就读于西安电子科技大学, 2009 年获学士学位, 现为西安电子科技大学雷达信号处理国家重点实验室在读博士研究生, 主要研究方向: SAR 和 ISAR 高分辨成像.

E-mail: xugang0102@126.com