

基于Relax算法的星载高分宽幅成像方法研究

王旭东 张迪 闫贺*

(南京航空航天大学电子信息工程学院 南京 210000)

摘要: 现代星载合成孔径雷达(SAR)系统要求同时具备高分辨率和宽测绘带的能力, 而传统单通道星载SAR系统在分辨率和测绘带两个重要指标之间存在固有矛盾, 因此方位向多通道的方法被提出并用于解决上述问题。该文在分析方位向多通道回波模型的基础上, 结合Relax算法的特点, 提出了一种基于Relax算法的星载SAR高分宽幅(HRWS)成像方法, 并给出了新方法的详细迭代流程。通过点目标回波仿真, 并与传统的方位向多通道HRWS重建方法进行对比, 验证了新方法的可靠性和有效性。

关键词: 星载合成孔径雷达; 高分宽幅; Relax算法

中图分类号: TN957.52

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2019)05-1077-07

DOI: 10.11999/JEIT180596

Research on Spaceborne High Resolution Wide Swath Imaging Method Based on Relax Algorithm

WANG Xudong ZHANG Di YAN He

(College of Electronic Information Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210000, China)

Abstract: The modern spaceborne SAR system requires both high resolution and wide swath, and the conventional single channel spaceborne SAR system has a contradiction between the two important indexes, the azimuth multichannel method is proposed and used to solve the above problem. Based on the analysis of the azimuth multichannel echo model and the characteristics of the Relax algorithm, a spaceborne SAR High Resolution Wide Swath (HRWS) imaging method is proposed, and the iterative process of the new method is described in detail. By the simulation of point target echo, and comparing with the traditional azimuth multichannel HRWS reconstruction methods, the reliability and effectiveness of the proposed method are verified.

Key words: Spaceborne Synthetic Aperture Radar (SAR); High Resolution Wide Swath (HRWS); Relax algorithm

1 引言

高分辨率和宽测绘带是星载合成孔径雷达(SAR)成像算法研究中的两个重要目标^[1,2]。然而, 在单通道SAR中, 高分辨率和宽测绘带这两个目标在系统的设计和配置中不能同时实现^[3]。一方面, 为了实现高分辨率, 需要采用高的脉冲重复频率(PRF); 另一方面, 为避免距离向模糊, 对广域区域进行成像需要采用低的PRF。因此, 在保证距离向不产生

模糊的情况下, 如果所采用的PRF对于方位向天线来说过低, 将在方位向上产生模糊。为解决这个问题, 可以在方位向上采用一个长的接收天线, 并将这个天线划分成多个通道, 每个通道独立接收, 即多通道SAR系统^[4-6]。目前欧空局ESA正在研究星载高分宽幅(HRWS)技术, 尝试将其应用在Sentinel-1中; 德国未来的星载SAR系统也将应用该技术。

随着硬件的发展, 多通道处理技术尝试着将不同通道的信号组合在一起后, 再对方位向模糊进行抑制。在最优的信号重构算法中, 为实现均匀采样, PRF和通道个数、天线长度以及卫星速度之间需要满足一定的关系, 但是在实际处理时, 大部分PRF都不满足均匀采样条件, 因此多通道SAR系统需要处理的是方位向上非均匀采样的数据。文献^[7]最先提出了非均匀采样方位谱的重构方法, 但是该方法只有在理想配置的情况下才能实现最优重建

收稿日期: 2018-06-19; 改回日期: 2018-12-13; 网络出版: 2018-12-20

*通信作者: 闫贺 yanhe@nuaa.edu.cn

基金项目: 国家自然科学基金(61501231), 民用航空“十三五”背景型号预研项目(D010102)

Foundation Items: The National Natural Science Foundation of China (61501231), The Civil Aerospace 13th Five-year Background Model Pre-research Project (D010102)

(即,理想的PRF和相同的天线方向图)。文献[8]提出了一种类似于空时自适应处理(STAP)的更加稳健的重建方法。文献[9]提出了一种可以在模糊抑制、噪声水平以及分辨率之间进行权衡的重建方法。文献[10]中对矩阵求逆法、投影法以及最大信号法进行了详细介绍。

本文提出了一种基于Relax算法的星载高分宽幅(HRWS)成像方法。在进行信号重建之前,可以根据信号加噪声协方差矩阵的特征值分布、空时采样关系以及相位分布来对信号的重建效果进行预测。之后对各个通道的回波分别进行距离向压缩、方位向FFT,将数据变换到距离-多普勒域后,利用不同模糊倍数所对应的导向矢量,结合Relax算法进行不断迭代,可以将信号按照模糊倍数的不同分离开来,达到抑制模糊的效果。之后再对数据进行方位向压缩,就可以实现信号重建。

本文结构安排如下:第2节对方位多通道星载SAR系统的信号模型进行分析;第3节对用Relax算法实现模糊抑制的迭代方法进行介绍;第4节是实验验证与分析,给出了仿真数据的处理结果,并与矩阵求逆法和最大信号法进行性能比较,证明了该方法有效性和可行性;最后是本文的总结。

2 信号模型

在星载SAR系统中,可以用多种方法来实现 M 个通道。第1种是采用不随时间变化的固定天线配置的多通道雷达系统,该系统由1个发射天线(TX)和 M 个接收天线(RX)组成,等效于单输出多输入的雷达系统。另一种是通过开关和切换操作来实现时分复用[11,12],进而产生 M 个通道。在这两种情况中,形成的通道个数 M 都大于物理天线的个数。还可以通过频分复用[13]和码分复用来增加系统的多样性,进而产生多个通道。本文不失一般性地采用第1种配置方式。

方位多通道星载SAR系统的空间几何关系如图1所示,工作于正侧视模式。接收通道的个数为 M ,卫星沿方位向(Y 轴)以速度 v_a 运动。假设第1个通道为参考通道。下述分析中采用的符号如表1所示。

对各个通道接收到的回波进行距离向压缩、方位向FFT,变换到距离-多普勒域(r, f_d)之后,信号可以表示为一个 $M \times 1$ 的向量

$$\begin{aligned} \mathbf{C}(r, f_d) = & \left\{ \sum_l \alpha(\mathbf{u}[f_d + lf_p, \vartheta]) \right. \\ & \cdot \mathbf{A}(\mathbf{u}[f_d + lf_p, \vartheta]) \cdot \Phi(f_d + lf_p) \\ & \cdot e^{-j2\pi[f_d + lf_p]T_0} \cdot e^{j\Omega(\vartheta)[f_d + lf_p]^2} \\ & \left. \cdot \delta_r(r - R[f_d + lf_p, \vartheta]) \right\} \cdot e^{j\Theta} \cdot \mathbf{1}_M \quad (1) \end{aligned}$$

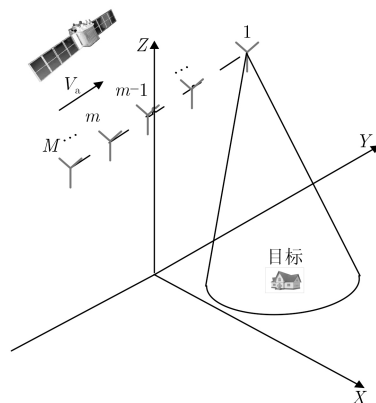


图1 方位多通道星载SAR系统空间几何关系图

表1 公式中用到的符号说明

符号	说明
M	通道个数
r	距离变量, $r = ct/2$
c	光速
t	距离向时间变量
f_d	多普勒频率
ϑ	目标参数向量, $\vartheta = [T_0, R_0, \sigma^2, \Theta]^T$
T_0	最小斜距对应的时间
R_0	最小斜距 $\min\{R(T)\} = R(T_0) = R_0$
σ^2	目标功率
Θ	目标相位
f_p	各通道的脉冲重复频率
Ω	2次相位项的变化率
$R(T)$	雷达与目标之间的距离
T	慢时间变量
$\mathbf{u}[f_d, \vartheta]$	天线与目标间的瞄准线向量
A_m	第 m 个通道的双向天线方向图
d_m	第 m 个通道的等效相位中心

其中,点目标的参数被组合成一个向量 $\vartheta = [T_0, R_0, \sigma^2, \Theta]^T$,包括最小时间 T_0 ,最小距离 R_0 ,功率 σ^2 和随机相位 Θ 。假设所采用的采样频率 f_p 足够小,因此在距离向上的模糊可以忽略不计。 $\mathbf{C}(r, f_d)$ 可以被分为无模糊信号部分 $l=0$,和模糊信号部分 $l \neq 0$,其中 l 是模糊的倍数。 $\mathbf{1}_M = [1 \ 1 \ \dots \ 1]^T$ 是由 M 个1组成的列向量, α 为点目标反射率, δ_r 为距离向上的点目标扩散函数(PSF), Ω 为2次相位项的变化率(方位调频率),目标的距离 R 由目标参数和多普勒频率共同决定。 $\mathbf{A}(\mathbf{u}[f_d, \vartheta])$ 为由天线方向图构造的矩阵, \mathbf{u} 为天线与目标之间的瞄准线(LOS)向量。

$$\mathbf{A}(\mathbf{u}[f_d, \vartheta]) = \begin{bmatrix} A_1(\mathbf{u}[f_d, \vartheta]) & 0 & 0 \\ 0 & \vdots & 0 \\ 0 & 0 & A_M(\mathbf{u}[f_d, \vartheta]) \end{bmatrix} \quad (2)$$

对角矩阵 $\Phi(f_d)$ 为各通道间的相位差异。

$$\Phi(f_d) = \begin{bmatrix} e^{-j2\pi f_d \frac{d_1}{v_a}} & 0 & 0 \\ 0 & \vdots & 0 \\ 0 & 0 & e^{-j2\pi f_d \frac{d_M}{v_a}} \end{bmatrix} \quad (3)$$

d_m 为等效相位中心, $m = 1, 2, \dots, M$ 。

最后, 考虑到实际情况中噪声的存在, 因此最终回波信号可以表示为

$$\mathbf{Z}(r, f_d) = \mathbf{C}(r, f_d) + \mathbf{N}(r, f_d) \quad (4)$$

其中, $\mathbf{N}(r, f_d)$ 表示噪声分量。

3 基于Relax算法的模糊抑制

Relax算法^[14]根据非线性最小方差准则对目标信号的参数进行估计, 可以用来区分多个目标, 具有很强的适应性, 因此可以用来分离不同模糊分量。由前面的分析可知, 方位多通道星载SAR系统的回波变换到距离-多普勒域后, 每个距离-多普勒单元的数据由模糊部分和不模糊部分组成, 如果可以成功将信号按照不同的模糊倍数分离开, 就可以实现模糊抑制。正是基于这一思路, 本节采用Relax算法进行模糊抑制。根据方位频率和方位角度的一一对应关系可知, 不同模糊倍数下的方位频率对应的导向矢量是已知的, 因此在用Relax算法进行模糊抑制时, 只需要对不同模糊倍数下的信号幅度进行估计即可。这也是Relax算法用于HRWS信号重建时和用于常规运动目标估计时不同的地方。基于Relax算法的方位向多通道星载SAR系统成像处理流程如图2所示, 采用RD算法实现成像。

基于Relax算法的模糊抑制方法针对距离-多普勒域的每个距离-多普勒单元, 采用两个嵌套的循环完成遍历。一个循环遍历所有多普勒单元, 另一个循环遍历所有距离单元, 两个循环的嵌套顺序可以任意选择。该算法可以分3步来实现, 即初始化、方位向模糊抑制和方位向压缩。在下面的算法描述中, P 表示信号总共模糊的倍数, 总模糊倍数 P 需要小于或等于通道个数 M , 这里假设 P 为奇数, p 表示其中的第 p 次模糊。具体步骤如下:

步骤1 初始化: 通过将不同模糊倍数下的导向矢量分别与原始信号进行匹配, 进而初步将模糊信号与不模糊信号区分开来, 得到不同模糊倍数下信号幅度的初步估计。根据方位频率和方位角度的一一对应关系, 构造不同模糊倍数下的导向矢量

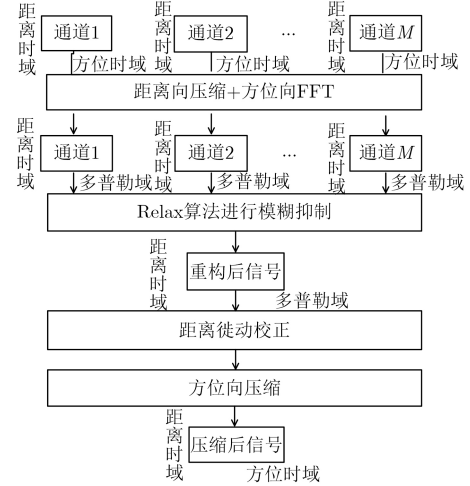


图2 方位向多通道星载SAR系统成像处理流程

$$\mathbf{a}_p(f_d) = \left[\exp \left\{ -j2\pi \left(f_d + pf_p \right) \frac{d_1}{v_a} \right\} \cdots \exp \left\{ -j2\pi \left(f_d + pf_p \right) \frac{d_M}{v_a} \right\} \right]^T \quad (5)$$

完成匹配运算

$$\mathbf{Z}_{\text{rec-1}}(r, f_d + pf_p) = \frac{\mathbf{a}_p^H(f_d) \mathbf{Z}(r, f_d)}{M} \quad (6)$$

其中, $\mathbf{Z}_{\text{rec-1}}(r, f_d + pf_p)$ 表示初步估计的第 p 个模糊分量的幅度。

步骤2 方位向模糊抑制: 根据原始信号以及步骤1中初步估计得到的不同模糊倍数下的信号幅度, 可以得到与不同模糊倍数相对应的信号向量 $\mathbf{Z}_{p-k}(r, f_d)$; 之后, 用不同模糊倍数下的导向矢量分别与相应的信号向量进行匹配, 即依次完成下述迭代步骤:

第1次(初次)迭代

$$\mathbf{Z}_{p-1}(r, f_d) = \mathbf{Z}(r, f_d) - \sum_{i=-(P-1)/2, i \neq p}^{(P-1)/2} \mathbf{a}_i(f_d) \cdot \mathbf{Z}_{\text{rec-1}}(r, f_d + pf_p) \quad (7)$$

$$\hat{\mathbf{Z}}_{\text{rec-1}}(r, f_d + pf_p) = \frac{\mathbf{a}_p^H(f_d) \mathbf{Z}_{p-1}(r, f_d)}{M} \quad (8)$$

其中, $\mathbf{Z}_{p-1}(r, f_d)$ 表示第1次迭代中得到的第 p 个模糊向量, $\hat{\mathbf{Z}}_{\text{rec-1}}(r, f_d + pf_p)$ 表示第1次迭代估计得到的第 p 个模糊分量的幅度。

第 k 次迭代($k \geq 2$)

$$\mathbf{Z}_{p-k}(r, f_d) = \mathbf{Z}(r, f_d) - \sum_{i=-(P-1)/2, i \neq p}^{(P-1)/2} \mathbf{a}_i(f_d) \cdot \hat{\mathbf{Z}}_{\text{rec-}k-1}(r, f_d + pf_p) \quad (9)$$

$$\hat{Z}_{\text{rec}_k}(r, f_d + pf_p) = \frac{\mathbf{a}_p^H(f_d) \mathbf{Z}_{p-k}(r, f_d)}{M} \quad (10)$$

其中, $\mathbf{Z}_{p-k}(r, f_d)$ 表示第 k 次迭代中得到的第 p 个模糊向量, $\hat{Z}_{\text{rec}_{k-1}}(r, f_d + pf_p)$ 表示第 $k-1$ 次迭代估计得到的第 p 个模糊分量的幅度, $\hat{Z}_{\text{rec}_k}(r, f_d + pf_p)$ 表示第 k 次迭代估计得到的第 p 个模糊分量的幅度。

反复迭代, 直至收敛或达到迭代次数。其中检验是否收敛的公式如下

$$F = \begin{bmatrix} \mathbf{Z}(r, f_d) - \mathbf{a}_p(f_d) \hat{Z}_{\text{rec}}(r, f_d + pf_p) \\ \mathbf{Z}(r, f_d) - \mathbf{a}_p(f_d) \hat{Z}_{\text{rec}}(r, f_d + pf_p) \end{bmatrix}^H \quad (11)$$

步骤 3 方位向压缩: 即将模糊抑制后的信号按照模糊倍数的顺序进行排列之后, 进行常规 SAR 成像方位匹配压缩处理, 完成 SAR 成像处理, 得到模糊抑制后的成像结果。

基于 Relax 算法的模糊抑制过程可以借助 MATLAB 语言进行描述, 如表 2 所示。

4 仿真验证

仿真参数如下: 载频 9.45 GHz, 发射信号带宽 80 MHz, 脉冲宽度 5 μ s, 信噪比 SNR 为 12 dB, 平台飞行速度 7480 m/s, 通道个数为 3, 多普勒带宽 3740 Hz, 脉冲重复频率设为 1400 Hz, 此时模糊倍数为 3。为了便于观察最终成像的效果, 目标设置为 1 个静止点目标, 同时在回波中加入了高斯噪声。

4.1 重建效果预测

在模糊抑制之前, 可以根据信号的空时采样关系、相位分布以及信号加噪声协方差矩阵的特征值分布来对模糊抑制的效果进行预测。图 3(a)–图 3(c) 是非均匀采样的结果。图 3(a) 中空间采样和时间采样看起来是相互交错的, 但是在图 3(b) 中可以看到, 信号的相位差在 2π 上的分布是不均匀的, 因此, 由于 PRF 的值过小所造成的时间采样的缺失不能完全被空间采样补偿。另外, 如图 3(c) 所示, 在

无卷绕的频率域上, 特征值的分布不是均匀的, 这是因为不同模糊倍数下的信号导向矢量 $\mathbf{a}_p(f_d)$ 之间不完全正交。导向矢量之间线性相关越严重, 对信号重建造成的影响就越大; 反之, 特征值的分布越均匀, 重建之后得到的信号就越接近于高 PRF 下单通道系统得到的信号。

4.2 仿真结果

图 4 为仿真的距离-多普勒域回波信号, 其中图 4(a) 为将数据变换到距离-多普勒域之后的结果, 可以发现未进行 Relax 算法处理前的数据方位向严重模糊。图 4(b) 为用 Relax 算法进行方位向模糊抑制

表 2 基于 Relax 算法的模糊抑制

For $m = 1 : N_a$
For $n = 1 : N_r$
%遍历所有距离-多普勒单元(其中, N_a 表示多普勒单元的个数, N_r 表示距离单元的个数)
$Z_{\text{rec}_1}(r, f_d + pf_p) = \frac{\mathbf{a}_p^H(f_d) \mathbf{Z}(r, f_d)}{M}$ %初始化操作
%第1次迭代
$\mathbf{Z}_{p-1}(r, f_d) = \mathbf{Z}(r, f_d)$
$- \sum_{i=-(M-1)/2, i \neq p}^{(M-1)/2} \mathbf{a}_i(f_d) \cdot Z_{\text{rec}_1}(r, f_d + pf_p)$
$\hat{Z}_{\text{rec}_1}(r, f_d + pf_p) = \frac{\mathbf{a}_p^H(f_d) \mathbf{Z}_{p-1}(r, f_d)}{M}$
如果未满足收敛条件或者未达到迭代次数
%第 k 次迭代 ($k \geq 2$)
$\mathbf{Z}_{p-k}(r, f_d) = \mathbf{Z}(r, f_d)$
$- \sum_{i=-(M-1)/2, i \neq p}^{(M-1)/2} \mathbf{a}_i(f_d) \cdot \hat{Z}_{\text{rec}_{k-1}}(r, f_d + pf_p)$
$\hat{Z}_{\text{rec}_k}(r, f_d + pf_p) = \frac{\mathbf{a}_p^H(f_d) \mathbf{Z}_{p-k}(r, f_d)}{M}$
End
End
End

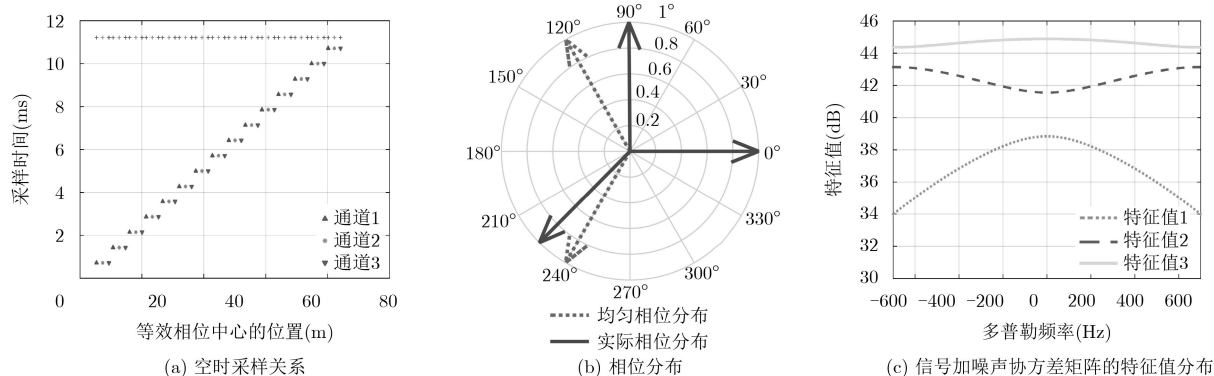


图 3 空时采样关系、相位分布以及信号加噪声协方差矩阵的特征值分布结果

后的距离-多普勒域结果，对比图4(a)可以看出方位向模糊抑制效果明显。

为进一步验证Relax算法处理效果，下面进行成像处理。对加Relax算法模糊抑制前后的回波数据进行方位向压缩，结果如图5所示。其中，图5(a)为模糊抑制前的成像结果，可以看出在方位向上有多个模糊的点目标；图5(b)为模糊抑制后的成像结果，只有一个真实的点目标得以突现，模糊点被有效抑制；图5(c)和图5(d)为模糊抑制前后成像结果的方位向切片图，用Relax算法进行模糊抑制，归一化后，虚假模糊目标的幅度在-28 dB以下；图5(e)为模糊抑制后的点目标切面图，是标准的点目标成像结果。

4.3 性能分析与对比

图6为用矩阵求逆法和最大信号法对回波信号进行重建处理的结果。需要说明的是，上述重建方法在进行信号重建时采用的是相同的方位压缩匹配函数，且没有进行方位向加窗处理。其中图6(a)和图6(b)为不同方法模糊抑制后的成像结果，可以看出两种方法均能实现模糊抑制；图6(c)和图6(d)为不同方法模糊抑制后的方位向切片图，进行模糊抑制并归一化后，矩阵求逆法中虚假模糊目标的幅度在-49 dB以下，最大信号法中虚假模糊目标的幅度在-23 dB以下。

表3所示为矩阵求逆法、最大信号法以及Relax法在PSLR、分辨率、SNR和SANR 4个方面的性

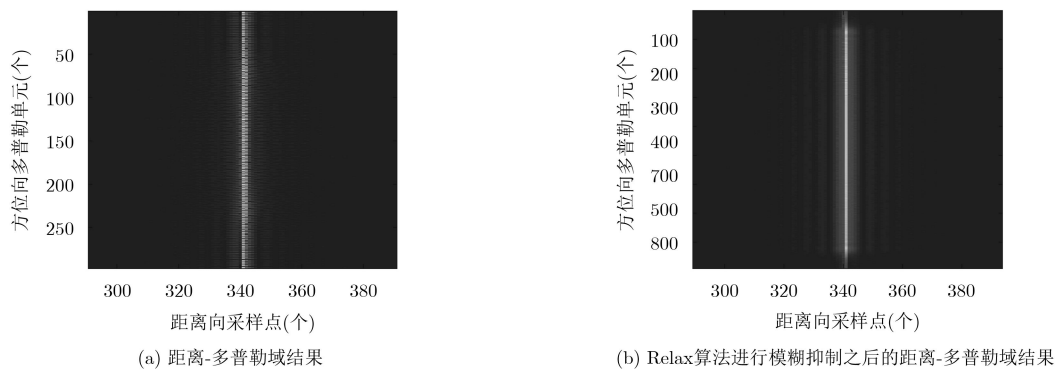


图4 仿真的距离-多普勒域回波信号

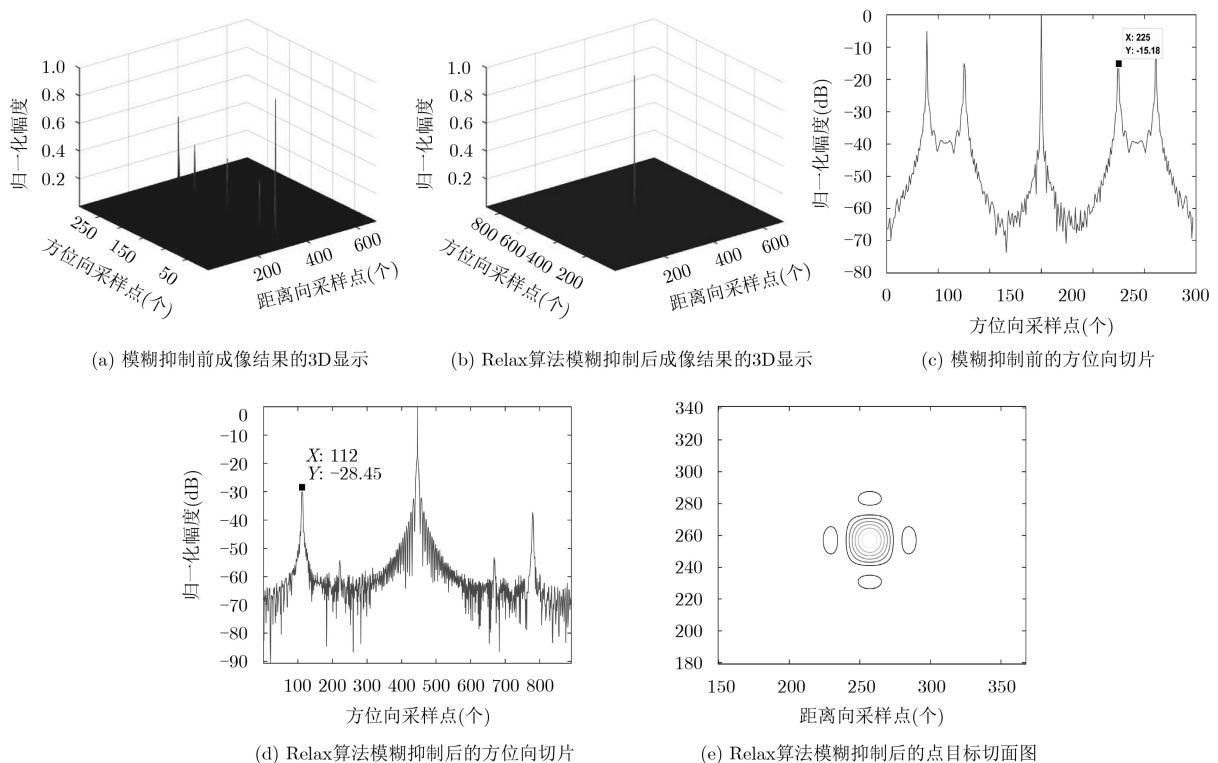


图5 方位压缩后的成像结果

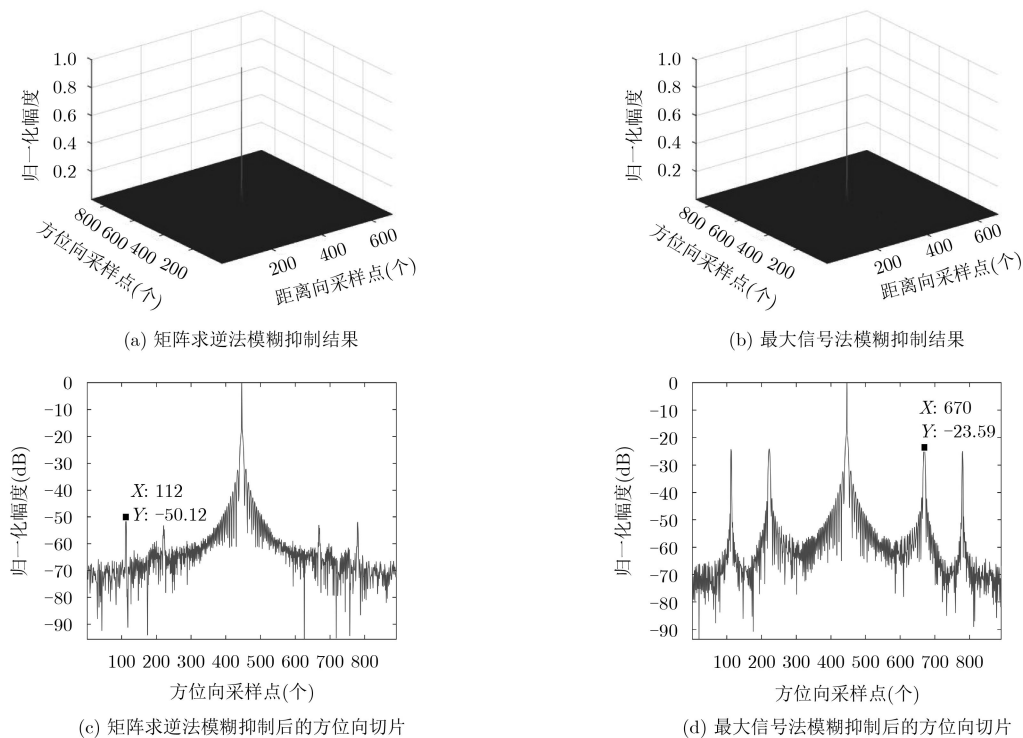


图6 矩阵求逆法和最大信号法的信号重建结果

表3 不同重建方法的性能对比

算法类别	PSLR(dB)	方位向分辨率(m)	SNR(dB)	SANR(dB)
矩阵求逆法	13.99	1.66	39.46	27.08
最大信号法	13.99	1.66	40.33	12.97
Relax法	13.82	1.66	50.56	21.22

能对比结果,其中,PSLR表示峰值旁瓣比,SNR表示信噪比,SANR表示信号与模糊信号加噪声的比值。

从表3中可以看出,3种方法的PSLR性能和分辨率性能基本相同;Relax法的SNR性能最好,矩阵求逆法和最大信号法的SNR性能相差不大;在SANR性能的对比如果中,矩阵求逆法的性能最好,最大信号法的性能最差,Relax法的性能处于两者之间。

5 结束语

本文提出一种基于Relax算法的方位向多通道星载SAR高分宽幅信号重建方法。该方法首先进行距离压缩和方位向FFT处理,将回波数据变换到距离-多普勒域。然后根据方位向多通道星载SAR系统在距离-多普勒域的回波模型,设计基于Relax算法的迭代流程,在迭代的过程中重建星载SAR回波的方位谱。最后对重建后的数据进行方位向脉冲压缩处理即可实现SAR成像。与传统的模糊抑制方法相比,通过构建确定的导向矢量并进行迭代的方法对模糊分量进行抑制,简单易行且具有更优的模糊

抑制效果。通过点目标仿真实验和成像后的性能对比证明了论文所提方法的有效性和优越性。

参考文献

- [1] 房超,刘艳阳,李真芳,等.方位多通道HRWS SAR多普勒中心稳健估计算法[J].西安电子科技大学学报,2018,45(1):30-35. doi: 10.3969/j.issn.1001-2400.2018.01.006.
FANG Chao, LIU Yanyang, LI Zhenfang, et al. Robust doppler centroid estimation method for multichannel HRWS SAR[J]. *Journal of Xidian University*, 2018, 45(1): 30-35. doi: 10.3969/j.issn.1001-2400.2018.01.006.
- [2] 赵耀,邓云凯,王宇,等.原始数据压缩对方位向多通道SAR系统影响研究[J].雷达学报,2017,6(4):397-407. doi: 10.12000/JR17030.
ZHAO Yao, DENG Yunkai, WANG Yu, et al. Study of effect of raw data compression on azimuth multi-channel SAR system[J]. *Journal of Radars*, 2017, 6(4): 397-407. doi: 10.12000/JR17030.
- [3] 王志斌,刘艳阳,李真芳,等.基于多普勒谱优化的HRWS SAR系统通道相位偏差估计算法[J].电子与信息学报,2016,38(12):3026-3033. doi: 10.11999/JEIT161038.
WANG Zhibin, LIU Yanyang, LI Zhenfang, et al. Phase bias estimation algorithm for HRWS SAR system in azimuth based on doppler spectrum optimization[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2016, 38(12): 3026-3033. doi: 10.11999/JEIT161038.
- [4] 赵庆超,张毅,王宇,等.基于多帧超分辨率的方位向多通道星载SAR非均匀采样信号重建方法[J].雷达学报,2017,6(4):408-419. doi: 10.12000/JR17035.

- ZHAO Qingchao, ZHANG Yi, WANG Yu, *et al.* Signal reconstruction approach for multichannel SAR in azimuth based on multiframe super resolution[J]. *Journal of Radars*, 2017, 6(4): 408–419. doi: [10.12000/JR17035](https://doi.org/10.12000/JR17035).
- [5] 田立俊. 高分宽幅SAR动目标成像方法研究[D]. [硕士学位论文], 电子科技大学, 2017: 6–16.
- TIAN Lijun. Study of Moving Target Imaging Method on High Resolution Wide Swath SAR[D]. [Master dissertation]. School of Electronic Engineering, 2017: 6–16.
- [6] 林玉川, 张剑云, 武拥军, 等. 双基星载HRWS-SAR系统方位向信号重构的最小二乘算法[J]. *现代雷达*, 2017, 39(10): 36–48. doi: [10.16592/j.cnki.1004-7859.2017.10.008](https://doi.org/10.16592/j.cnki.1004-7859.2017.10.008).
- LIN Yutian, ZHANG Jianyun, WU Yongjun, *et al.* Least square algorithm for azimuth reconstruction in bistatic spaceborne high resolution wide swath SAR[J]. *Modern Radar*, 2017, 39(10): 36–48. doi: [10.16592/j.cnki.1004-7859.2017.10.008](https://doi.org/10.16592/j.cnki.1004-7859.2017.10.008).
- [7] GEBERT N, KRIEGER G, and MOREIRA A. Multichannel azimuth processing in ScanSAR and TOPS mode operation[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2010, 48(7): 2994–3008. doi: [10.1109/TGRS.2010.2041356](https://doi.org/10.1109/TGRS.2010.2041356).
- [8] LI Zhenfang, WANG Hongang, SU Tao, *et al.* Generation of wide-swath and high-resolution SAR images from multichannel small spaceborne SAR systems[J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2005, 2(1): 82–86. doi: [10.1109/LGRS.2004.840610](https://doi.org/10.1109/LGRS.2004.840610).
- [9] SIKANERA I, GIERULL C, and CERUTTI-MAORI D. Optimum signal processing for multi-channel SAR: with application to high-resolution wide-swath imaging[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2014, 52(10): 6095–6109. doi: [10.1109/TGRS.2013.2294940](https://doi.org/10.1109/TGRS.2013.2294940).
- [10] CERUTTI-MAORI D, SIKANETA I, KLARE J, *et al.* MIMO SAR processing for multichannel high-resolution wide-swath radars[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2014, 52(8): 5034–5055. doi: [10.1109/TGRS.2013.2286520](https://doi.org/10.1109/TGRS.2013.2286520).
- [11] CERUTTI-MAORI D, SIKANETA I, and GIERULL C H. Optimum SAR/GMTI processing and its application to the radar satellite RADARSAT-2 for traffic monitoring[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2012, 50(10): 3868–3881. doi: [10.1109/TGRS.2012.2186637](https://doi.org/10.1109/TGRS.2012.2186637).
- [12] CERUTTI-MAORI D and SIKANETA I. A generalization of DPCA processing for multi-channel SAR/GMTI radars[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2013, 51(1): 560–572. doi: [10.1109/TGRS.2012.2201260](https://doi.org/10.1109/TGRS.2012.2201260).
- [13] 王成浩, 廖桂生, 许京伟. FDA-SAR高分辨率宽测绘带成像距离解模糊方法[J]. *电子学报*, 2017, 45(9): 2085–2091. doi: [10.3969/j.issn.0372-2112.2017.09.005](https://doi.org/10.3969/j.issn.0372-2112.2017.09.005).
- WANG Chenhao, LIAO Guisheng, and XU Jingwei. Range ambiguity resolving method for high-resolution and wide-swath imaging with FDA-SAR[J]. *Acta Electronica Sinica*, 2017, 45(9): 2085–2091. doi: [10.3969/j.issn.0372-2112.2017.09.005](https://doi.org/10.3969/j.issn.0372-2112.2017.09.005).
- [14] ZHANG Yongqiang. Super-resolution passive ISAR imaging via the RELAX algorithm[C]. *Computational Intelligence and Design (ISCID)*, Hangzhou, China, 2016: 2473–3547. doi: [10.1109/ISCID.2016.2024](https://doi.org/10.1109/ISCID.2016.2024).
- 王旭东: 男, 1979年生, 副教授, 研究方向为雷达信号处理及硬件实现.
- 张迪: 女, 1994年生, 硕士生, 研究方向为合成孔径雷达信号处理.
- 闫贺: 男, 1985年生, 副教授, 研究方向为合成孔径雷达信号处理.