

基于改进Kalman滤波模型的扫描合成孔径雷达图像扇贝效应校正方法

蔡永华^{*①②} 王宇^{①②} 范怀涛^①

^①(中国科学院空天信息创新研究院 北京 100190)

^②(中国科学院大学电子电气与通信工程学院 北京 100049)

摘要: 星载扫描合成孔径雷达(ScanSAR)采取Burst工作模式,该模式在获得宽幅测绘能力的同时,也导致图像中产生了固有的扇贝效应,严重影响图像的视觉效果和定量应用。该文结合对ScanSAR图像方位向统计特性的分析,针对现有滤波模型稳定性差和时间复杂度高等缺点,提出了一种改进的Kalman滤波模型,对图像方位向标准差和均值进行滤波以校正扇贝条纹。在高分三号(GF-3)卫星获取的真实ScanSAR图像上的校正结果验证了改进算法的有效性和高效性,此外在建筑群和海陆交界等复杂场景图像上的实验结果表明,改进算法具有较强的鲁棒性。

关键词: 扫描合成孔径雷达; 扇贝效应; 辐射校正; Kalman滤波; 高分三号卫星

中图分类号: TN959.74

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2021)05-1212-07

DOI: 10.11999/JEIT200060

A Scalping Correction Method for ScanSAR Image Based on Improved Kalman Filter Model

CAI Yonghua^{①②} WANG Yu^{①②} FAN Huaitao^①

^①(Aerospace Information Research Institute, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

^②(School of Electrical and Communication Engineering, University of

Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: The spaceborne Scanning Synthetic Aperture Radar (ScanSAR) adopts the Burst working mode. While obtaining wide-range mapping capabilities, this mode also causes an inherent scalping in the image, which seriously affects the visual effects and quantitative applications of the image. Based on the analysis of the azimuth statistical characteristics of ScanSAR images and aimed at the shortcomings of the existing filtering model such as poor stability and high time complexity, an improved Kalman filtering model is proposed, which filters the standard deviation and mean of image in azimuth position to correct scallop stripes. The correction results on the real ScanSAR images acquired by the GF-3 satellite verify the effectiveness and efficiency of the improved algorithm. Furthermore, the experimental results on complex scene images such as buildings and the junction of sea and land indicate that the strong robustness of the improved algorithm.

Key words: Scanning Synthetic Aperture Radar (ScanSAR); Scalping; Radiometric correction; Kalman filtering; GF-3

1 引言

扫描合成孔径雷达(Scanning Synthetic Aperture Radar, ScanSAR)是星载合成孔径雷达(Synthetic Aperture Radar, SAR)技术发展的重要方向,其宽幅的测绘能力,有利于缩短全球观测周期和对变化较快的大规模地表现象进行监测。ScanSAR在一个

合成孔径时间内,沿距离向多次扫描并接收多个子带数据,从而可以获得数倍于传统条带SAR的测绘带宽。我国首颗C频段多极化高分辨率SAR卫星高分三号(GF-3)也搭载了扫描工作模式,其宽幅扫描模式能获得500 km的成像幅宽,全球观测成像模式进一步提升到了650 km,极大地扩展了对地观测能力和应用能力^[1]。

虽然ScanSAR具备宽幅的测绘带宽,但也正是其特殊的不连续工作模式,导致图像中产生了沿方位向周期性变化的细密条纹,这种辐射不均匀现象称为扇贝效应。扇贝效应不但会严重影响图像的视觉效果,还将干扰图像判读,妨碍特征提取和图像

收稿日期: 2020-01-15; 改回日期: 2020-12-04; 网络出版: 2020-12-15

*通信作者: 蔡永华 caiyonghuanwpu@126.com

基金项目: 国家自然科学基金(61901442)

Foundation Item: The National Natural Science Foundation of China (61901442)

拼接等后期处理的进行,难以实现图像的定量应用。早期扇贝效应校正研究多着眼于对方位方向天线方向图的补偿。Bamler^[2]通过构建加权函数与回波相乘,消除天线方向图函数对图像不同方位位置回波信号强度的影响。Vigneron^[3]对Bamler的方法进行了改进,对天线方向图进行了更加准确的估计。Shimada^[4,5]利用亚马逊森林均匀的后向散射特性,准确计算出ScanSAR卫星天线方向图函数和辐射变化规律,用于消除扇贝效应。张晓等人^[6]在ScanSAR系统噪声抑制后进行方向图补偿,以适应在低信噪比区域的扇贝效应校正。但是上述方法都在成像过程中进行校正,不适用于对已经成像后的图像处理,因此近年来一些图像后处理的校正方法被提出。Romeiser等人^[7,8]提出了一种频域上的扇贝抑制算法,通过随机选取扇贝效应相关峰邻近的幅值来替代峰值,但该算法需要进行多次迭代,增加了计算开销。Schiavulli等人^[9]在小波域上对图像滤波,同样获得了较好的校正图像,但是难免会抑制部分图像的边缘和梯度等信息。Iqbal等人^[10,11]将目光转向时域滤波,提出了一种基于Kalman滤波的校正技术,但其模型采用2阶Kalman滤波器,参数设置较为敏感,且2阶矩阵运算时间复杂度高。谷昕炜等人^[12]将Iqbal的乘法模型更改为更简单的加法模型,结合图像分层在海陆交界场景进行了扇贝效应抑制。

尽管对Iqbal的模型进行了简化,但是其抑制效果依然不够理想,且其滤波过程仍然需要遍历图像中的所有像素点,难以满足ScanSAR图像扇贝效应实时校正的需求。因此,本文在扇贝效应统计特征分析的基础上,对Iqbal的模型做了进一步改进,采取两次1阶Kalman滤波代替2阶滤波,减少了计算量并提升了算法的稳健性。在GF-3卫星真实ScanSAR图像上的实验结果验证了改进算法的有效性和高效性,此外,改进算法在建筑群、港口和海岸3种复杂场景下表现出了很好的适应能力,具有较强的鲁棒性。

2 扇贝效应

2.1 扇贝效应形成原因

与传统的条带SAR不同,ScanSAR通过波束切换以扫描距离向的多个子带。如图1所示,在每个子带上,天线都会持续一个驻留时间发射脉冲序列并接收回波数据,这组连续脉冲序列称为一个Burst,ScanSAR模式因此也称为Burst模式^[13]。可以看到,在同一子带内的两次Burst之间,存在一段时间间隙,其间的的数据是缺失的,等效于从传统

条带SAR数据中进行截断。因此,ScanSAR模式下点目标方位向信号可以表示为

$$s(\eta) = A_0 \omega_a(\eta) \sum_n \text{rect} \left(\frac{\eta - nT_p}{T_b} \right) \exp \{ jK_a \eta^2 \} \quad (1)$$

其中, η 表示方位向时间, A_0 为任意复数, $\omega_a(\cdot)$ 表示方位向天线方向图(sinc平方型函数), T_b 与 T_p 分别表示Burst驻留时间和Burst周期, n 表示Burst数目, K_a 为方位向调频率。从式(1)中可知,在传统条带模式下目标均受到完整方位方向图照射,而在ScanSAR模式下,方位向天线方向图 $\omega_a(\cdot)$ 受到了 $\sum \text{rect}(\cdot)$ 的加权,目标仅接收到部分方向图照射。因此,对于某个子带不同方位位置上的目标而言,接收到的信号强度是不同的,所以即便目标的后向散射系数相同,成像出来的图像亮度也是不同的,因而图像上会出现明暗相间的细密条纹。如图2所示的GF-3卫星获取的ScanSAR图像,就是该模式下所固有的扇贝效应,可见其中的条纹变化并不能反映地物真实的后向散射特性,应当予以校正。

2.2 扇贝效应特征分析及量化

由于Burst的周期性发射,因此扇贝条纹在方位向上具有周期性。同时单子带内处于同一方位位置的目标经历了相同的Burst照射,因此扇贝条

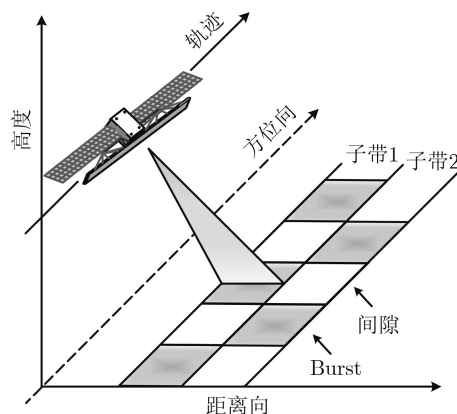


图1 ScanSAR工作模式示意图(两子带)

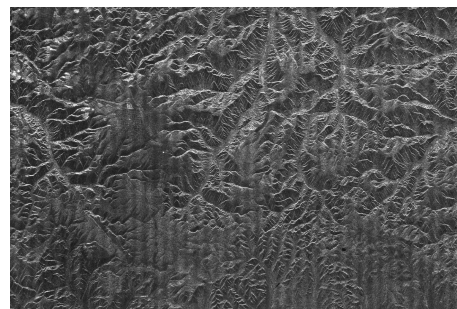


图2 GF-3获取的ScanSAR图像

纹基本垂直于方位向。值得注意的是,扇贝效应不但在亮度上表现出了渐变性,在对比度上也存在类似的渐变。图3揭示了这一点,从统计意义上分析,图像灰度值的均值可以表征图像的亮度,而标准差可以表征图像的对比度^[14]。图3中显示了沿方位向位置的图像灰度均值和标准差的分布情况,两条曲线呈现出锯齿状波动,正是均值和标准差的这种周期性变化使图像显现出了扇贝条纹。

扇贝效应强度可以采用文献^[15]中的方法进行量化描述,设带有扇贝效应的图像为 $S_c \in \mathbf{R}^{m \times n}$, m 和 n 分别表示图像距离向行数和方位向列数,沿距离向求取平方和以估计每个方位向位置的功率

$$P(j) = \sum_{i=1}^m S_c^2(i, j) \quad (2)$$

其中, i 和 j 分别表示距离向和方位向位置。扇贝效应强度可以表示为局部最大功率 $\max[P(j)]$ 与局部最小功率 $\min[P(j)]$ 之比

$$\Delta P = 10 \lg \left\{ \frac{\max[P(j)]}{\min[P(j)]} \right\} \quad (3)$$

图4给出了图2所示ScanSAR图像的扇贝效应分布情况,呈现与图3类似的锯齿状波动,扇贝效应强度等于局部最大值与最小值之差,计算得到该ScanSAR图像的最大扇贝效应为2.66 dB,最小值为1.71 dB,平均值为2.01 dB,标准差为0.19 dB。

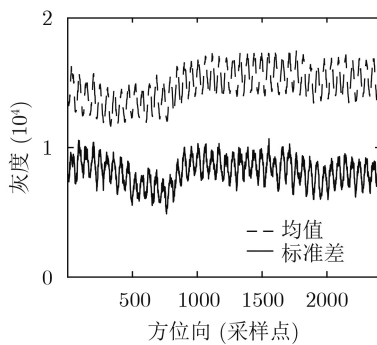


图3 方位向均值和标准差分布

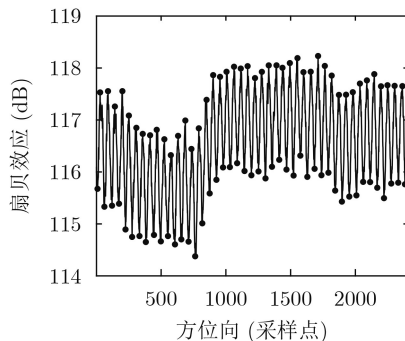


图4 扇贝效应分布

3 Kalman滤波模型

3.1 Iqbal扇贝效应校正模型

Iqbal采用沿方位向周期性变化的增益和偏差对带有扇贝效应的ScanSAR图像进行了建模^[10]

$$S_c(i, j) = g(j)S_0(i, j) + o(j) \quad (4)$$

其中, i 和 j 分别表示距离向和方位向位置, $S_0 \in \mathbf{R}^{m \times n}$ 表示无扇贝的理想图像, $g \in \mathbf{R}^n$ 和 $o \in \mathbf{R}^n$ 分别为沿方位向周期性变化的增益和偏差,它们仅是方位向位置的函数。为了校正扇贝效应,即从 S_c 中恢复出 S_0 ,Iqbal运用2阶Kalman滤波器,将 S_c 的每一列元素都作为观测值,同时估计出该方位向位置上的增益 $g(j)$ 和偏差 $o(j)$,然后利用式(5)得到扇贝校正后的图像^[10]

$$S_0(i, j) = \frac{S_c(i, j) - o(j)}{g(j)} \quad (5)$$

上述模型在仿真图像和真实ScanSAR图像中都得到了比较好的扇贝效应消除效果^[10,11]。但是此模型采用2阶Kalman滤波器,对参数设置比较敏感,使得算法稳定性降低。而且在Kalman滤波过程中需要遍历图像中的所有像素点进行迭代,进行2阶矩阵运算,时间复杂度高。

3.2 改进的扇贝效应校正模型

针对于Iqbal的方法稳定性降低和时间复杂度高缺点,本文在其模型上进行了修改

$$S_c(i, j) = g(j)S_1(i, j) \quad (6)$$

$$S_1(i, j) = S_0(i, j) + o(j) \quad (7)$$

其中, $g \in \mathbf{R}^n$ 是在原始带扇贝效应的图像 S_c 中估计出的增益, $S_1 \in \mathbf{R}^{m \times n}$ 为经过增益 g 校正后的图像, $o \in \mathbf{R}^n$ 是在 S_1 中估计出的偏差,然后根据偏差即可校正残余的扇贝效应,得到无扇贝效应的图像 S_0 。

注意到扇贝效应具有前面所述的统计特征,因此与Iqbal不同,改进算法并不直接对增益和偏差进行估计,而是通过对表征图像对比度和亮度的标准差与均值进行滤波,间接得到增益 g 和偏差 o 。

设 S_c 沿方位向位置的标准差向量为 D

$$D(j) = \sqrt{\frac{1}{m} \sum_{i=1}^m \left(S_c(i, j) - \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m S_c(i, j) \right)^2} \quad (8)$$

S_1 沿方位向位置的均值为 M

$$M(j) = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m S_1(i, j) \quad (9)$$

将标准差和均值作为观测值,先后运用两次1阶Kalman滤波器分别得到其最小均方误差估计 \hat{D} 和 \hat{M} 。标准差的观测值与估计值作商得到增益 g

$$g = \frac{D}{\hat{D}} \quad (10)$$

均值的观测值与估计值作差得到偏差 \mathbf{o}

$$\mathbf{o} = \mathbf{M} - \hat{\mathbf{M}} \quad (11)$$

式(6)–式(11)建立了ScanSAR图像扇贝效应校正模型，为了对图像沿方位向的标准差 D 和均值 M 进行估计，仅需要构建1阶Kalman滤波器，其公式如式(12)–式(16)所示。

预测方程

$$\hat{\mathbf{X}}(k|k-1) = \hat{\mathbf{X}}(k-1|k-1) \quad (12)$$

$$\mathbf{P}(k|k-1) = \mathbf{P}(k-1|k-1) + \mathbf{Q} \quad (13)$$

式(12)、式(13)中， $\hat{\mathbf{X}}(k|k-1)$ 表示从 $k-1$ 步到 k 步的状态一步预测值， $\hat{\mathbf{X}}(k-1|k-1)$ 表示上一步最小均方误差估计值， $\mathbf{P}(k|k-1)$ 与 $\mathbf{P}(k-1|k-1)$ 分别是其对应的协方差， \mathbf{Q} 表示过程噪声方差。

更新方程

$$\mathbf{K}\mathbf{g}(k) = \frac{\mathbf{P}(k|k-1)}{\mathbf{P}(k|k-1) + R} \quad (14)$$

$$\hat{\mathbf{X}}(k|k) = \hat{\mathbf{X}}(k|k-1) + \mathbf{K}\mathbf{g}(k) [\mathbf{Z}(k) - \hat{\mathbf{X}}(k|k-1)] \quad (15)$$

$$\mathbf{P}(k|k) = [1 - \mathbf{K}\mathbf{g}(k)] \mathbf{P}(k|k-1) \quad (16)$$

式(14)–式(16)中， $\mathbf{K}\mathbf{g}$ 表示Kalman增益， R 表示观测噪声方差， \mathbf{Z} 表示观测值， $\hat{\mathbf{X}}(k|k)$ 为第 k 步估计值，即为滤波输出， $\mathbf{P}(k|k)$ 为其对应的协方差。

改进的扇贝效应校正算法流程如图5所示，运用上述构建的1阶Kalman滤波器对标准差向量 D 进行滤波，并保留每一步估计结果，得到估计值 \hat{D} ，由此可以对原始图像进行第1次校正

$$S_1(i, j) = \frac{S_c(i, j)}{g(j)} = S_c(i, j) \frac{\hat{D}(j)}{D(j)} \quad (17)$$

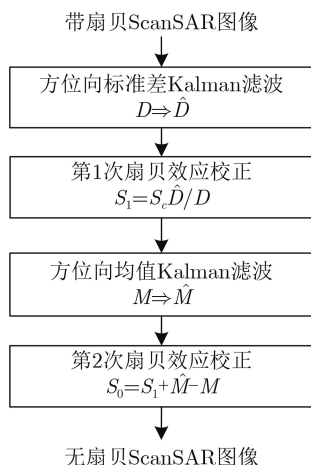


图5 扇贝效应校正流程图

同理对均值向量 M 滤波得到 \hat{M} ，对残余的扇贝效应进行第2次校正，得到扇贝校正后的图像

$$S_0(i, j) = S_1(i, j) - \mathbf{o}(j) = S_1(i, j) + [\hat{M}(j) - M(j)] \quad (18)$$

4 实验结果分析

4.1 算法有效性实验及分析

将本文改进的扇贝效应校正算法与Iqbal^[10,11]和谷昕炜^[12]所采用的Kalman滤波模型对图2所示GF-3卫星获取的ScanSAR图像进行对比实验，实验环境为：Intel酷睿i5处理器、3.20 GHz主频、8 GB内存、编程语言为MATLAB 2018b。其中本文算法给定Kalman滤波器的初值为： $\hat{\mathbf{X}}(1|1) = \mathbf{Z}(1)$ ， $\mathbf{P}(1|1) = 0.01$ ，过程噪声方差和观测噪声方差分别设置为： $\mathbf{Q} = 1 \times 10^{-6}$ ， $R = 1 \times 10^{-2}$ 。扇贝效应校正后的结果如图6所示，从图6(a)中可以看出，ScanSAR图像中的周期性扇贝条纹均得到明显消除，图像质量大为改善，其中Iqbal算法的校正效果与本文算法相近，但是谷昕炜算法校正的图像中仍然存在残余的扇贝条纹。这在图6(b)中均值和标准差的分布也有体现，与图3相比，本文算法有效抑制了锯齿状波动，方位向均值和标准差的周期性变化消失；Iqbal算法对均值的波动抑制较好，但标准差仍然存在较小的起伏；而谷昕炜简化的加法模型未考虑乘性增益，因而标准差的起伏较大。从图6(c)中校正后的扇贝效应分布可以看到，本文算法的扇贝效应校正质量明显优于前两种算法。表1给出了扇贝效应强度的量化比较，本文算法将图像的扇贝效应强度平均值从2.01 dB降低到了0.22 dB，各项指标均较前两种算法有所提高，校正后的扇贝效应强度最大值与Iqbal算法的平均值相当，且小于谷昕炜算法的最小值。定量分析结果与前述定性分析结果一致，验证了本文改进算法的有效性。

4.2 算法鲁棒性实验及分析

图7给出了建筑群、港口和海岸3种场景下本文算法的扇贝效应校正效果。可以看到在建筑密布和海陆交界等后向散射系数差距较大的区域，场景更加复杂，可以结合边缘检测^[16]和图像分割技术^[17-20]分离海陆区域后分别进行校正。如图7所示，扇贝条纹依然能够得到良好的消除，图像细节得到很好的保留，尤其是在港口和海岸的浅滩区域，恢复出了被扇贝条纹掩盖下的部分细节，表明改进算法能够很好地适应复杂场景下的扇贝效应校正，具有较强的鲁棒性。

4.3 算法时间复杂度分析

对于一幅 $m \times n$ 的ScanSAR图像，表2给出了

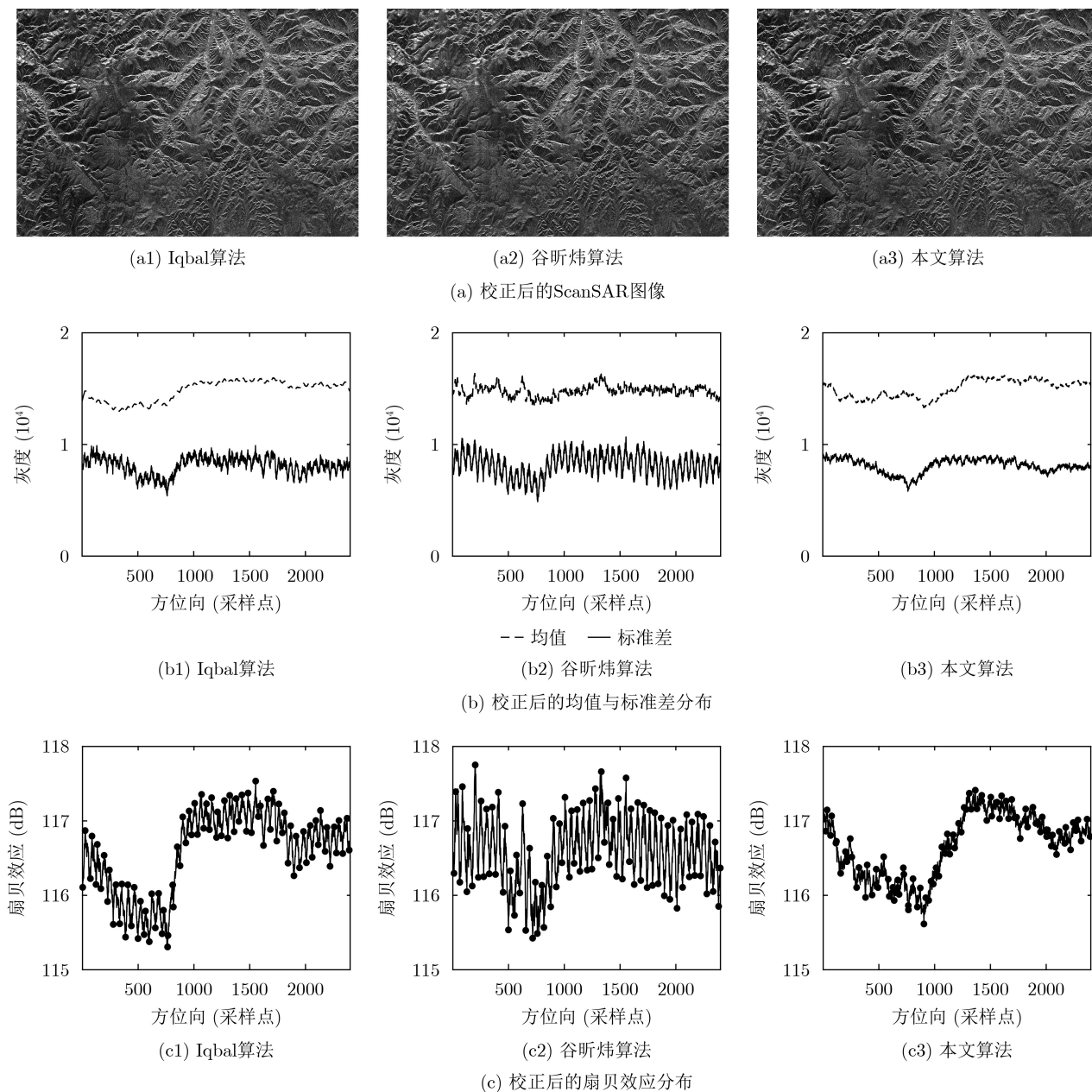


图6 各算法校正结果比较

表1 扇贝效应强度量化比较(dB)

扇贝效应	最大值	最小值	平均值	标准差
校正前	2.66	1.71	2.01	0.19
Iqbal算法	0.76	0.15	0.46	0.13
谷昕炜算法	1.63	0.52	0.94	0.21
本文算法	0.48	0.03	0.22	0.11

3种算法对Kalman滤波器的应用情况。Iqbal算法需要遍历整个图像，将每一列像素都输入，进行 n 次2阶Kalman滤波，每次滤波的迭代次数为 $m-1$ 次；谷昕炜简化的加法模型虽然将滤波器阶数降为了1阶，但是仍然需要输入每一列图像像素进行 n 次滤波；本文改进算法只需要在滤波前求取

图像方位向标准差和均值向量，从而仅进行了两次1阶Kalman滤波，每次迭代次数为 $n-1$ 次，因此极大地减少了运算量。

图8给出了3种算法的运算时间随图像方位向采样点数的变化曲线。从图8中可以看到，与Iqbal采用的2阶Kalman滤波器相比，本文改进算法仅使用了两次1阶Kalman滤波，且不需要遍历整个图像进行迭代，因此大大减少了运算时间，同时也优于谷昕炜所改进的加法模型。

5 结论

本文在Iqbal的模型基础上，提出了一种基于改进Kalman滤波模型的ScanSAR图像扇贝效应校

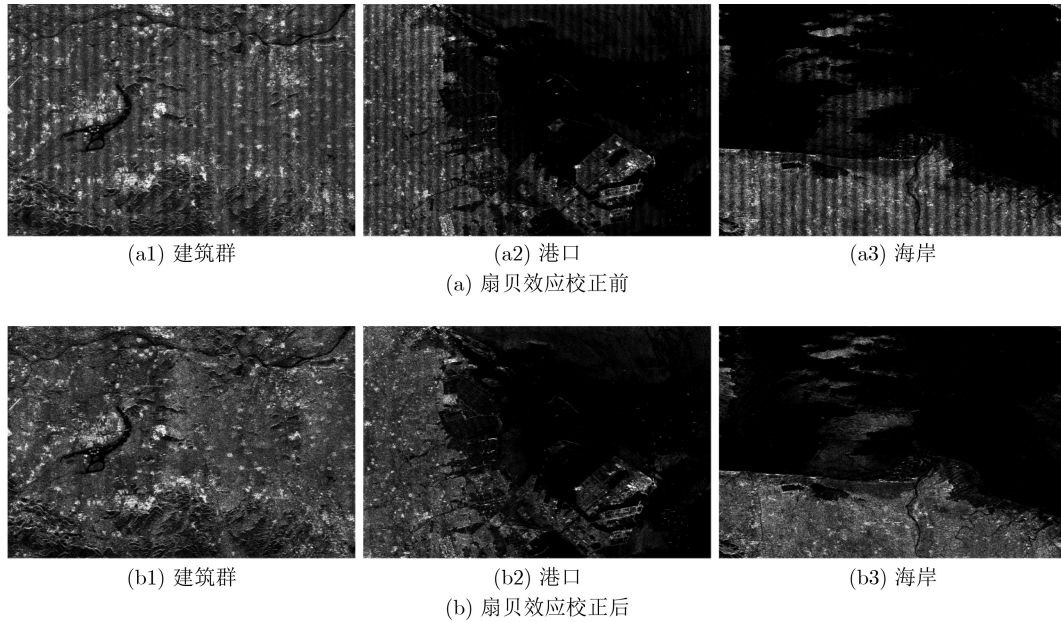


图 7 多场景下扇贝效应校正效果

表 2 Kalman滤波器比较

校正算法	阶数(阶)	滤波次数(次)	迭代次数(次)
Iqbal算法	2	n	$m - 1$
谷昕炜算法	1	n	$m - 1$
本文算法	1	2	$n - 1$

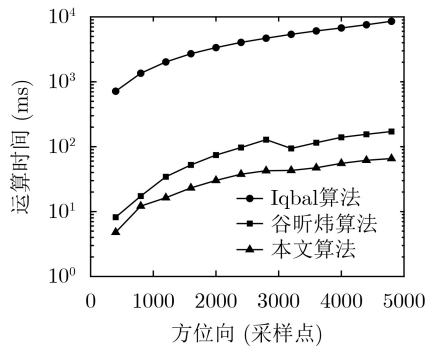


图 8 算法运算时间比较

正方法，并在GF-3号ScanSAR图像上进行了验证。实验结果表明，在建筑群和海陆交界等不同的复杂场景下，本算法均可以有效消除扇贝效应，ScanSAR图像质量得到大幅提升，同时算法的时间复杂度低，适用于对星载ScanSAR图像扇贝效应的实时校正。

参 考 文 献

[1] 张庆君. 高分三号卫星总体设计与关键技术[J]. 测绘学报, 2017, 46(3): 269–277. doi: 10.11947/j.AGCS.2017.20170049.
 ZHANG Qingjun. System design and key technologies of the GF-3 satellite[J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2017, 46(3): 269–277. doi: 10.11947/j.AGCS.2017.20170049.

[2] BAMLER R. Optimum look weighting for burst-mode and ScanSAR processing[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 1995, 33(3): 722–725. doi: 10.1109/36.387587.
 [3] VIGNERON C M. Radiometric image quality improvement of ScanSAR data[D]. [Master dissertation], University of British Columbia, 1996. doi: 10.14288/1.0065108.
 [4] SHIMADA M. Long-term stability of L-band normalized radar cross section of Amazon rainforest using the JERS-1 SAR[J]. *Canadian Journal of Remote Sensing*, 2005, 31(1): 132–137. doi: 10.5589/m04-058.
 [5] SHIMADA M. A new method for correcting ScanSAR scalloping using forests and inter-SCAN banding employing dynamic filtering[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2009, 47(12): 3933–3942. doi: 10.1109/TGRS.2009.2027596.
 [6] 张晓, 仇晓兰, 仲利华, 等. 基于系统噪声抑制的ScanSAR辐射校正方法[J]. 国外电子测量技术, 2015, 34(6): 47–51. doi: 10.19652/j.cnki.femt.2015.06.011.
 ZHANG Xiao, QIU Xiaolan, ZHONG Lihua, et al. Radiometric correction algorithm for ScanSAR scalloping based on reduction of system noise[J]. *Foreign Electronic Measurement Technology*, 2015, 34(6): 47–51. doi: 10.19652/j.cnki.femt.2015.06.011.
 [7] ROMEISER R, HORSTMANN J, and GRABER H. A new algorithm for descalloping ScanSAR images by post processing[C]. ESA Living Planet Symposium, Bergen, Norway, 2010: 354–358.
 [8] ROMEISER R, HORSTMANN J, CARUSO M J, et al. A descalloping postprocessor for ScanSAR images of ocean scenes[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*

- Sensing*, 2013, 51(6): 3259–3272. doi: [10.1109/TGRS.2012.2222648](https://doi.org/10.1109/TGRS.2012.2222648).
- [9] SCHIAVULLI D, SORRENTINO A, and MIGLIACCIO M. An innovative technique for postprocessing descalloping[J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2012, 10(3): 424–427. doi: [10.1109/LGRS.2012.2207879](https://doi.org/10.1109/LGRS.2012.2207879).
- [10] IQBAL M, CHEN Jie, YANG Wei, *et al.* Kalman filter for removal of scalloping and inter-scan banding in scanSAR images[J]. *Progress in Electromagnetics Research*, 2012, 132: 443–461. doi: [10.2528/PIER12082107](https://doi.org/10.2528/PIER12082107).
- [11] IQBAL M and CHEN Jie. Removal of scalloping in ScanSAR images using Kalman filter[C]. 2012 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium, Munich, Germany, 2012: 260–263. doi: [10.1109/IGARSS.2012.6351588](https://doi.org/10.1109/IGARSS.2012.6351588).
- [12] 谷昕炜, 杨威, 陈杰. 海陆交界非平稳场景星载ScanSAR扇贝效应抑制方法[J]. 海军航空工程学院学报, 2018, 33(1): 125–129, 134. doi: [10.7682/j.issn.1673-1522.2018.01.005](https://doi.org/10.7682/j.issn.1673-1522.2018.01.005).
- GU Xinwei, YANG Wei, and CHEN Jie. Suppression of scalloping effects in spaceborne ScanSAR images for non-stationary scene of coastal area monitoring[J]. *Journal of Naval Aeronautical and Astronautical University*, 2018, 33(1): 125–129, 134. doi: [10.7682/j.issn.1673-1522.2018.01.005](https://doi.org/10.7682/j.issn.1673-1522.2018.01.005).
- [13] CUMMING I G, WONG F H, 洪文, 胡东辉译. 合成孔径雷达成像: 算法与实现[M]. 北京: 电子工业出版社, 2012: 285–286.
- CUMMING I G, WONG F H, HONG Wen, HU Donghui. translation. *Digital Processing of Synthetic Aperture Radar Data: Algorithms and Implementation*[M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2012: 285–286.
- [14] PELI E. Contrast in complex images[J]. *Journal of the Optical Society of America A*, 1990, 7(10): 2032–2040. doi: [10.1364/JOSAA.7.002032](https://doi.org/10.1364/JOSAA.7.002032).
- [15] HAWKINS R K and VACHON P W. Modelling SAR scalloping in burst mode products from RadarSAT-1 and ENVISAT[C]. The CEOS Working Group on Calibration/Validation SAR Workshop, London, United Kingdom, 2002: 24–26.
- [16] 胡炎, 单子力, 高峰. 基于增强指数加权均值比的SAR图像边缘检测算法[J]. 电子与信息学报, 2018, 40(5): 1166–1172. doi: [10.11999/JEIT170806](https://doi.org/10.11999/JEIT170806).
- HU Yan, SHAN Zili, and GAO Feng. Edge detection algorithm for SAR image based on enhanced ROEWA[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2018, 40(5): 1166–1172. doi: [10.11999/JEIT170806](https://doi.org/10.11999/JEIT170806).
- [17] 陈祥, 孙俊, 尹奎英, 等. 基于Otsu与海域统计特性的SAR图像海陆分割算法[J]. 数据采集与处理, 2014, 29(4): 603–608. doi: [10.3969/j.issn.1004-9037.2014.04.017](https://doi.org/10.3969/j.issn.1004-9037.2014.04.017).
- CHEN Xiang, SUN Jun, YIN Kuiying, *et al.* Sea-land segmentation algorithm of SAR image based on Otsu method and statistical characteristic of sea area[J]. *Journal of Data Acquisition and Processing*, 2014, 29(4): 603–608. doi: [10.3969/j.issn.1004-9037.2014.04.017](https://doi.org/10.3969/j.issn.1004-9037.2014.04.017).
- [18] CHENG Dongcai, MENG Gaofeng, XIANG Shiming, *et al.* Efficient sea-land segmentation using seeds learning and edge directed graph cut[J]. *Neurocomputing*, 2016, 207: 36–47. doi: [10.1016/j.neucom.2016.04.020](https://doi.org/10.1016/j.neucom.2016.04.020).
- [19] LEI Sen, ZOU Zhengxia, LIU Dunge, *et al.* Sea-land segmentation for infrared remote sensing images based on superpixels and multi-scale features[J]. *Infrared Physics & Technology*, 2018, 91: 12–17. doi: [10.1016/j.infrared.2018.03.012](https://doi.org/10.1016/j.infrared.2018.03.012).
- [20] 肖乐意, 欧阳红林, 范朝冬. 基于记忆分子动理论优化算法的多目标截面投影Otsu图像分割[J]. 电子与信息学报, 2018, 40(1): 189–199. doi: [10.11999/JEIT170301](https://doi.org/10.11999/JEIT170301).
- XIAO Leyi, OUYANG Honglin, and FAN Chaodong. Multi-objective cross section projection Otsu's method based on memory kinetic-molecular theory optimization algorithm[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2018, 40(1): 189–199. doi: [10.11999/JEIT170301](https://doi.org/10.11999/JEIT170301).
- 蔡永华: 男, 1996年生, 博士生, 研究方向为星载SAR图像与信号处理.
- 王 宇: 男, 1980年生, 研究员, 博士生导师, 研究方向为SAR系统设计与信号处理技术, 新体制星载SAR技术等.
- 范怀涛: 男, 1990年生, 副研究员, 研究方向为高分辨率宽幅星载SAR成像.

责任编辑: 余 蓉