

# 面向遥感图像无损压缩的 CCD 噪声抑制方法研究

吴强<sup>①</sup>, 王智勇<sup>②</sup>, 郭兴杰<sup>②</sup>

(<sup>①</sup>航天长征国际贸易有限公司; <sup>②</sup>北京宇视蓝图信息技术有限公司)

**摘要:** CCD 在成像过程中所产生的噪声会限制星地间遥感图像数据的传输效率。因此, 为有效抑制 CCD 噪声并提高遥感图像无损压缩比, 本文提出了一种基于图像噪声标准差估计的各向异性扩散方法。首先, 结合图像同质性测度和边缘提取结果提出一种遥感图像噪声标准差的自动化估计方法。而后, 通过噪声模拟的方式拟合出图像噪声标准差与经典式各向异性扩散方程传导系数中梯度阈值的线性关系。基于图像噪声标准差估计和同质性测度结果, 最终提出一种可自适应性调整传导系数值和迭代次数的噪声驱动式各向异性扩散方法。本文中分别采用北京一号小卫星多光谱遥感图像和标准测试图像对所提出的噪声估计方法和噪声抑制方法进行评价。试验结果表明, 对比其他各向异性扩散方法, 本文所提出的方法不仅可实现更好的图像复原效果, 还可有效地提高多光谱遥感图像无损压缩比, 并为今后星上数据处理系统的研究提供一种较新的思路。

**关键词:** 噪声; 标准差; 同质性; 各向异性扩散; 无损压缩

**doi:** 10.3969/j.issn.1000-3177.2011.01.012

**中图分类号:** TP751    **文献标识码:** A    **文章编号:** 1000-3177(2011)113-0059-06

## Study on Suppression Method of CCD Noise for Lossless Compression of Remote Sensing Images

WU Qiang<sup>①</sup>, WANG Zhi yong<sup>②</sup>, GUO Xing jie<sup>②</sup>

(<sup>①</sup> Aerospace Long-March International Trade Co., Ltd., Beijing 100089;

<sup>②</sup> Beijing Landview Mapping Information Technology Co. Ltd, Beijing 100096)

**Abstract:** The noise generated by Charge Coupled Device (CCD) will limit transmission efficiency of the remote sensing image data transmitted from the satellite to the earth. Therefore, in order to efficiently suppress CCD noise and increase lossless compression ratio of the remote sensing images, an anisotropic diffusion method based on estimation of noise standard deviation is proposed. Firstly, based on the results of image homogeneity measurement and edge extraction, an automatic estimation method of noise standard deviation is proposed. Then, empirically linear regression model between noise standard deviation and gradient threshold of the conduction coefficient in conventional anisotropic diffusion is extracted using simulated noisy images. Based on results of noise estimation and homogeneity measurement, a noise driven anisotropic diffusion method, which could adaptively modify conduction coefficient value and iteration number, is finally proposed. Also, Beijing 1 multispectral images and standard test images are used to assess noise estimation and noise suppression methods. The experimental results show that compared with other existing anisotropic diffusion methods, the proposed method not only achieves a better quality of image restoration but also efficiently increases lossless compression ratio of multispectral images. Furthermore, the proposed method will provide a novel thought for future development of onboard data processing system.

**Key words:** noise; standard deviation; homogeneity; anisotropic diffusion; lossless compression

收稿日期: 2010-01-11    修订日期: 2010-03-05

作者简介: 吴强(1981~), 博士, 工程师, 研究方向: 数据压缩与传输, 目标识别与提取。

## 1 引言

为提高星地间遥感图像数据的传输效率,目前在轨运行的诸多卫星上已嵌入了星上压缩算法<sup>[1]</sup>。然而,CCD 传感器在成像过程中所形成的噪声,会对图像压缩和数据传输产生影响<sup>[2]</sup>,其不仅难以压缩<sup>[3]</sup>,更会限制数据的压缩比<sup>[4]</sup>。目前,国内外较少开展面向遥感图像压缩的 CCD 噪声抑制方法的研究。尽管 Yu 等<sup>[1]</sup>针对遥感图像的无损压缩提出了一种 CCD 遥感图像条带噪声自动去除的方法,但尚未考虑 CCD 传感器自身噪声对无损压缩的影响及其抑制方法。

光学传感器 CCD 在图像获取过程中所产生的噪声可以指发生源产生并叠加在图像上,且与图像信号不相关的噪声。此类噪声通常被认为是高斯分布且功率谱密度均匀的加性白噪声<sup>[5-6]</sup>。为量化描述图像加性噪声,目前应用较为广泛的是局部标准差法<sup>[5-9]</sup>,但此类方法总依赖于同质区的人工选取。虽然文献[5]和[8]提出了一种基于梯度算子的图像边缘剔除的方法,但并未考虑同质区的选取问题。尽管文献[9]中考虑了图像同质性测度问题,却忽略了由于图像噪声而造成的非连通性(discontinuity)问题<sup>[10]</sup>。因此,本文将结合图像同质性测度和边缘提取结果,提出一种图像噪声标准差的自动化估计方法。

此外,各向异性扩散方法由于其在图像平滑过程中可较好保持边缘,因而引起了广泛关注<sup>[11-19]</sup>。然而,对于图像噪声抑制而言,目前的各向异性扩散方法大多关注于扩散方程中传导系数的选择,却较少考虑图像自身的噪声水平,使得大部分各向异性扩散方法强调图像边缘增强效果,并非实际的图像噪声抑制效果。

因此,本文将探讨图像噪声标准差与各向异性扩散方法中经典式传导系数的关系,并以提高遥感图像无损压缩比为目标,提出一种噪声驱动式各向异性扩散方法。

## 2 遥感图像噪声评估

### 2.1 图像同质性测度

首先,基于  $3 \times 3$  邻域窗口(图 1),采用高通算子分别计算窗口中每个方向(共 8 个方向)的梯度。

以图 1 中邻域 1 为例,中心像元横向梯度绝对值

$$|\nabla I_h(x, y)| = \left| \frac{2 \cdot I(x, y) - (I(x-1, y) + I(x+1, y))}{2} \right| \quad (1)$$

其他邻域的梯度绝对值以此类推。

之后,将各方向的梯度绝对值累加,得出像元非连通性测度的绝对值  $D_{(x,y)}$ <sup>[9]</sup>。

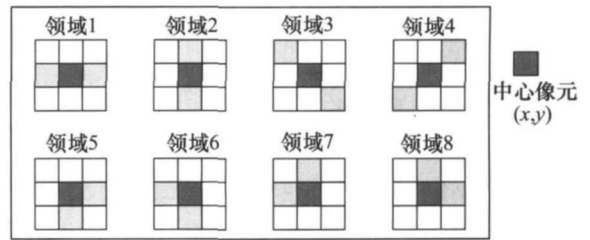


图 1 中心像元  $(x, y)$  的  $3 \times 3$  邻域窗口<sup>[9]</sup>

为自动化判定图像中每个像元  $(x, y)$  的均匀同质性,将每个像元点的非连通性测度值进行均一化处理,并得出每个像元的同质性测度值  $H_{(x,y)}$ 。

$$H_{(x,y)} = 1 - \frac{D_{(x,y)} - D_{\min}}{D_{\max} - D_{\min}} \quad (2)$$

式中,  $D_{\max}$  表示整个图像中最大非连通性测度值,  $D_{\min}$  表示整个图像中最小非连通性测度值。

此外,为体现邻域窗口内图像的同质性,计算窗口内所有像元点同质性测度值的标准差。标准差越小,则表明窗口内图像的同质性越好。针对图像中最佳同质区的选取,本文采用  $3 \times 3$  大小的邻域窗口。

### 2.2 图像噪声标准差估计

图像中的边缘不能用于图像噪声标准差的估计,且 Canny 算子<sup>[20]</sup>对图像边缘探测的效果最佳<sup>[5]</sup>;因此,本文仍采用文献[5]的方法对图像边缘进行初步探测。然而,区别于文献[5]中的方法,本文将图像局部同质性测度结果与边缘提取结果相结合,可实现图像噪声标准差的自动化估计。

图像噪声标准差自动化估计的主要步骤为:在搜索最佳同质区(即局部同质性标准差最小的  $3 \times 3$  邻域窗口)的过程中,同时考虑图像的边缘提取结果,将不含边缘且局部同质性标准差最小的区域定义为最佳备选区(Optimum Candidate Region)。计算所有最佳备选区中图像的标准差,将所有标准差的中值(median value)作为最终的图像噪声标准差估计结果。

### 2.3 图像噪声标准差估计结果验证

为评价本文所提出的图像噪声标准差估计方法,采用一幅 2008 年 7 月 6 日获取的  $1024 \times 1024$  像元大小的北京一号小卫星多光谱影像(图 2)。

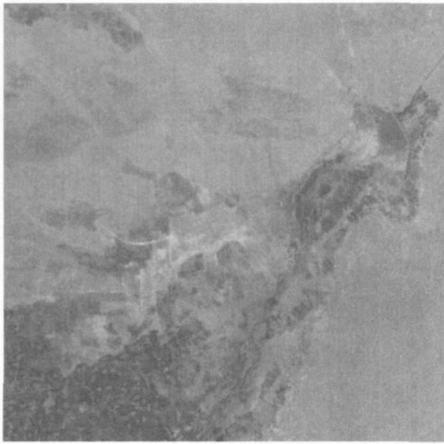


图2 北京一号小卫星多光谱测试影像

基于边缘提取和同质性测度结果的噪声标准差估计方法, 所得出北京一号小卫星多光谱图像三个波段(近红、红、绿)的噪声标准差分别为 1.581、1.581、1.581, 而基于人工选取同质区的噪声标准差估计方法所得出的北京一号多光谱影像三个波段的标准差分别为 1.53、1.46、1.57<sup>[6]</sup>。可以看出, 基于本文方法的噪声标准差自动化估计结果与基于人工选取同质区的估计方法所得出的结果基本相似。

### 3 噪声驱动式各向异性扩散方法

#### 3.1 各向异性扩散方法原理

基于热传导方程和非线性扩散思想, Perona 与 Malik 于 1990 年提出了各向异性扩散模型(又称 P-M 模型)<sup>[11]</sup>。

$$I_s^{t+1} = I_s^t + \frac{\lambda}{|\Omega_s|} \sum_{p \in \Omega_s} g(\nabla I_{s,p}) \nabla I_{s,p} \quad (3)$$

式中,  $I_s^{t+1}$  表示第  $t+1$  次迭代后的像元值,  $I_s^t$  表示第  $t$  次迭代后的像元值,  $\Omega_s$  表示邻域像元,  $|\Omega_s|$  表示邻域像元的个数(根据极值定理,  $|\Omega_s|$  通常为 4),  $t$  表示迭代次数,  $\lambda$  表示传导率(又称为稳定性因子),  $g(\nabla I_{s,p})$  表示传导系数,  $\nabla I_{s,p}$  表示像元与其邻域像元间的亮度差值。

$$\nabla I_{s,p} = (I_p - I_s^t)/d, p \in \Omega_s \quad (4)$$

式中,  $d$  表示像元及其邻域  $I_p$  间的距离。

为控制扩散行为, P-M 模型中提出了以 Gaussian 分布函数和 Cauchy 分布函数为核函数的两种传导系数形式:

$$g(\nabla I_{s,p}) = e^{-(\|\nabla I_{s,p}\|/K)^2} \quad (5)$$

$$g(\nabla I_{s,p}) = \frac{1}{1 + (\frac{\|\nabla I_{s,p}\|}{K})^2} \quad (6)$$

式中,  $K$  表示梯度阈值, 可根据边缘直方图法求得  $K$  值。

而后, 还衍生出了传导系数的其他表达形式, 包括: Tukey Biweight 估计函数式<sup>[13, 19]</sup>、前后向扩散式<sup>[14, 16]</sup>等; 同时, 相应地衍生出传导系数中梯度阈值的估计方法, 如中值绝对差法<sup>[13]</sup>、绝对均值梯度法<sup>[14]</sup>、形态学法<sup>[15]</sup>等。然而, 这些方法的目的大多为图像的边缘提取, 并未真正从图像本身的噪声分析入手, 进行图像噪声的抑制处理。

#### 3.2 噪声标准差与最佳梯度阈值的经验式线性关系

在 0.5 和 5.0 之间, 以 0.5 为间隔, 作为模拟噪声的标准差 ( $\sigma_n$ ), 将十种不同标准差的模拟噪声分别添加到标准测试图像(图 3)中。基于 Cauchy 函数式(式(6)), 采用手工搜索的方式寻找单次迭代情况下, 去噪图像与原始图像可达到最大结构相似度指数(Structure Similarity Index, SSIM)<sup>[21-22]</sup>时的最佳  $K$  值。

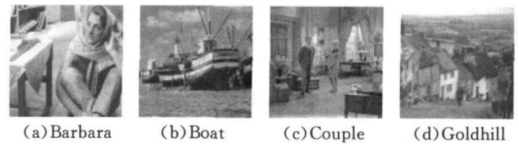


图3 标准测试图像

假设 Cauchy 函数中最佳梯度阈值  $K$  与噪声标准差  $\sigma_n$  之间的线性关系为:

$$K = f(\sigma_n) = a \times \sigma_n + b \quad (7)$$

则根据最小二乘法:

$$\begin{cases} a = \frac{ns \times \sum_{i=1}^{ns} (q \bar{K}_i) - \left( \sum_{i=1}^{ns} q \right) \times \left( \sum_{i=1}^{ns} \bar{K}_i \right)}{ns \times \sum_{i=1}^{ns} (q)^2 - \left( \sum_{i=1}^{ns} q \right)^2} \\ b = \frac{\left( \sum_{i=1}^{ns} \bar{K}_i \right) \times \left( \sum_{i=1}^{ns} (q)^2 \right) - \left( \sum_{i=1}^{ns} q \right) \times \left( \sum_{i=1}^{ns} q \bar{K}_i \right)}{ns \times \sum_{i=1}^{ns} (q_i)^2 - \left( \sum_{i=1}^{ns} q \right)^2} \end{cases} \quad (8)$$

式中,  $ns$  表示模拟噪声的个数(本文中为 10),

$\bar{K}_i$  表示每个噪声水平级别上, 基于各幅测试图像搜索到的最佳  $K$  值的均值,  $q$  表示每个噪声水平级别的标准差。

根据模拟噪声图像处理 and 人工搜索的结果, 得出 Cauchy 函数中的最佳梯度阈值  $K$  与噪声标准差  $\sigma_n$  的线性关系式为:

$$K = 4.53 \times \sigma_n - 3.48 (R^2 = 0.983) \quad (9)$$

式中:  $R^2$  为回归方程的确定性因子。

### 3.3 基于噪声估计的各向异性扩散

章节 2.2 中验证了基于同质性测度的图像噪声标准差自动化估计方法的可靠性, 章节 3.2 中提出了一种噪声标准差与最佳梯度阈值的经验式线性关系模型。此外, 文献[19]中还指出, 图像同质性越高, 则传导率越高。因此, 本文最终提出一种噪声驱动式各向异性扩散方法。

$$I_s^{t+1} = I_s^t + \frac{H}{4} \sum_{p \in \Omega_s^t} g(\nabla I_{s,p}) \nabla I_{s,p} \quad (10)$$

式中,  $H$  表示像元的同质性测度值,

$$\nabla I_{s,p} = (I_p - I_s^t), p \in \Omega_s, |\Omega_s| = 4,$$

$$g(\nabla I_{s,p}) = \frac{1}{1 + \left[ \frac{\|\nabla I_{s,p}\|}{4.53 \times \sigma_e - 3.48} \right]^2} \quad (11)$$

式中,  $\sigma_e$  为估计的噪声标准差。

将标准差为 2.5 和 5.0 的高斯噪声添加到北京一号小卫星多光谱测试数据(图 2)的绿波段图像中。采用噪声驱动式各向异性扩散方法对原始图像和噪声污染图像进行去噪处理, 并统计迭代前后的噪声标准差估计值的绝对差值( $|\Delta\sigma_e|$ )。

$$|\Delta\sigma_e| = |\sigma_e^t - \sigma_e^{t+1}| \quad (12)$$

式中,  $\sigma_e^t$  表示第  $t$  次迭代后的图像噪声标准差估计值,  $\sigma_e^{t+1}$  表示第  $t+1$  次迭代后的图像噪声标准差估计值。

试验结果(图 4)表明, 当迭代一定次数之后,  $|\Delta\sigma_e|$  逐渐收敛并最终趋近零。因此,  $|\Delta\sigma_e|$  可作为迭代中止的条件, 即:  $|\Delta\sigma_e| = 0$  时, 迭代中止。

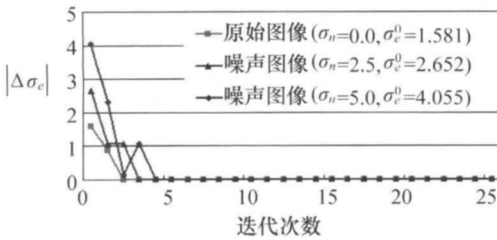


图 4 噪声驱动式各向异性扩散迭代试验结果

综上, 噪声驱动式各向异性扩散方法的步骤如下图(图 5)所示。

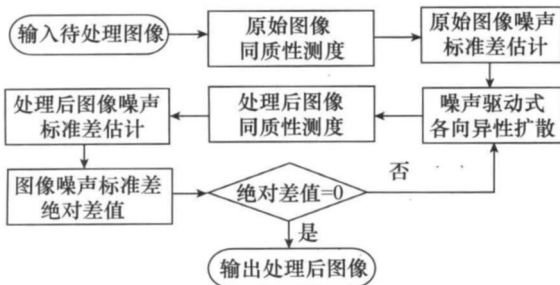


图 5 噪声驱动式各向异性扩散方法流程

## 4 试验结果与分析

### 4.1 噪声抑制效果比较评价

在测试图像 Boat(图 3(a))上分别添加标准差为 1.0、3.0 和 5.0 的高斯噪声, 采用直方图法<sup>[11]</sup>、鲁棒统计法<sup>[13]</sup>、前后向扩散法<sup>[14]</sup>、形态学法<sup>[15]</sup>以及本文方法对模拟噪声图像进行单次迭代去噪处理, 并通过峰值信噪比(Peak Signal to Noise Ratio, PSNR)(表 1)和结构相似度指数(SSIM)(表 2)对去噪图像进行评价。

表 1 测试图像 Boat 去噪后的 PSNR 对比

噪声标准差 / 处理方法	1.0	3.0	5.0	均值
噪声图像	50.79	41.54	37.15	43.16
直方图法 <sup>[11]</sup>	34.70	34.53	34.22	34.48
鲁棒统计法 <sup>[13]</sup>	47.39	42.32	38.22	42.64
前后向扩散法 <sup>[14]</sup>	40.86	40.00	38.66	39.84
形态学法 <sup>[15]</sup>	40.00	39.19	38.01	39.07
本文方法	50.51	42.14	38.86	43.84

表 2 测试图像 Boat 去噪后的 SSIM 对比

噪声标准差 / 处理方法	1.0	3.0	5.0	均值
噪声图像	0.992	0.954	0.909	0.952
直方图法 <sup>[11]</sup>	0.944	0.926	0.902	0.924
鲁棒统计法 <sup>[13]</sup>	0.990	0.959	0.917	0.955
前后向扩散法 <sup>[14]</sup>	0.977	0.955	0.924	0.952
形态学法 <sup>[15]</sup>	0.976	0.954	0.924	0.951
本文方法	0.992	0.960	0.924	0.959

通过表 1 和表 2 可以看出, 在  $\sigma_n = 3.0$  时, 基于本文方法处理后的图像 PSNR 值低于鲁棒统计法处理的图像, 且基于这两种方法处理后图像的 SSIM 值基本相同。然而, 通过不同标准差的模拟噪声图像处理的整体效果来看, 针对低噪声水平( $\sigma_n \leq 5.0$ )污染的图像, 在单次迭代情况下, 本文所提出的噪声驱动式各向异性扩散方法可实现比其他各向异性扩散方法更好的图像复原效果。同时, 可以注意到, 当添加的模拟噪声标准差  $\sigma_n \leq 1.0$  时, 各类扩散方法的图像复原效果均不明显。

针对各向异性扩散的迭代特性, 文献[17]和[18]中将图像迭代前后的绝对平方误差(Mean Absolute Error, MAE)作为迭代中止的指标, 即: 当  $MAE \leq 0.01$  时, 迭代中止。为比较本文所提出的迭代中止方法与基于 MAE 方法的效果, 在北京一号小卫星多光谱测试影像(图 2)的三个波段图像上

分别添加标准差为 5.0 的高斯噪声,分别采用文献 [18] 和本文方法进行处理,并首先通过目视方式(图 6)对两种方法进行评估。

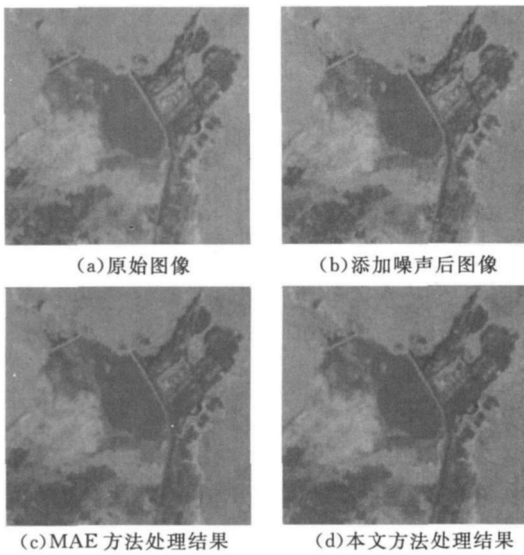


图 6 测试影像局部放大图

通过图 6 可以发现,目视方式并不能明显看出两种方法的差异,因此采用 PSNR 和 SSIM 对两种方法进行客观评价(表 3)。通过表 3 可以看出,两种方法均可以有效抑制噪声,且本文所提出的方法可实现更好的图像复原效果。

表 3 各向异性扩散迭代中止方法比较

波段	噪声图像		MAE 法 <sup>[18]</sup>		本文方法	
	PSNR	SSIM	PSNR	SSIM	PSNR	SSIM
近红	37.15	0.890	39.89	0.899	41.88	0.906
红	37.16	0.916	40.22	0.925	42.38	0.931
绿	37.15	0.901	40.06	0.912	42.65	0.920

#### 4.2 噪声抑制方法在遥感图像无损压缩中的应用

为体现噪声驱动式各向异性扩散方法在遥感图像无损压缩中的应用效果,对北京一号小卫星多光谱测试影像(图 2)进行去噪处理;再分别采用 JPEG-LS<sup>[23]</sup> 和 JPEG2000-LS<sup>[24-26]</sup> 两种无损压缩算法对去噪前和去噪后的各波段图像进行无损压缩,并得到图像数据的无损压缩比(表 4)。

表 4 去噪处理前后的北京一号多光谱测试影像无损压缩比

波段	JPEG2000-LS		JPEG-LS	
	去噪前	去噪后	去噪前	去噪后
近红	2.46	2.46	2.49	2.70
红	2.53	2.53	2.54	2.63
绿	2.61	2.61	2.62	2.78
均值	2.53	2.53	2.55	2.70

通过表 4 可以看出,基于本文方法去噪处理后的影像,在采用 JPEG2000-LS 算法进行无损压缩处理后,无损压缩比并没有变化;而采用 JPEG-LS 算法进行压缩处理后,无损压缩比有所提高。此外,由于 JPEG-LS 的计算复杂性比 JPEG2000-LS 低<sup>[1,23]</sup>,因此其可以更好地适用于星上遥感图像去噪数据的无损压缩处理。

另一方面,当卫星成像载荷 CCD 运行工作一定时间后,性能会自然衰减,并影响成像质量;通常采用增加 CCD 积分时间(Integration Time)的方式解决此问题。然而,由于积分时间与高斯分布的热噪声成正比<sup>[27]</sup>,因此所获取图像的噪声水平会随之增加。在假设此种情况发生的条件下,分别将标准差为 2.5 和 5.0 的高斯模拟噪声添加到北京一号小卫星多光谱测试影像各波段图像中,采用本文方法进行去噪,并采用 JPEG-LS 压缩(表 5)。

表 5 模拟噪声影像去噪前后无损压缩比比较

波段	$\sigma_n = 2.5$		$\sigma_n = 5.0$	
	去噪前	去噪后	去噪前	去噪后
近红	2.00	2.69	1.67	2.45
红	1.99	2.63	1.67	2.28
绿	1.96	2.56	1.66	2.36
均值	1.98	2.63	1.67	2.36

结合表 4 与表 5,可以看出,当遥感影像受 CCD 中呈现高斯分布的热噪声影响下,无损压缩比会随着噪声水平的增高而显著下降。由表 5 可知,在采用本文所提出的噪声抑制方法后,模拟噪声标准差为 2.5 的多光谱影像的无损压缩比可提高 33%,模拟噪声标准差为 5.0 的多光谱影像的无损压缩比可提高 41%。这体现了 CCD 噪声抑制在遥感影像无损压缩中的重要作用。

## 5 结束语

为增大星载遥感影像的无损压缩比,从而提高星地间的数据传输效率,在遥感影像数据进行无损压缩处理前,有必要对 CCD 噪声进行有效抑制。因此,本文首先提出了一种基于图像同质性测度的噪声标准差自动化估计方法,同时拟合出图像噪声标准差与各向异性扩散传导系数的经验式线性关系。根据此线性关系,本文最终提出了一种可自适应调节传导系数值和迭代次数的图像噪声驱动式各向异性扩散方法。通过相关试验证明,本文方法不仅可以对 CCD 噪声进行有效抑制,还可以提高遥感影像的无损压缩比。

本文对今后星上数据处理系统的开发提出了一种较新的研究思路。为本文方法的工程化实际应用奠定良好基础,在后续工作中将在以下三方面开展进一步研究:(1)采用更多的试验数据进行模拟分

析,提高噪声标准差与传导系数的线性拟合度;(2)评价噪声抑制对遥感影像定标和地表参数反演的影响;(3)在保证处理精度的同时优化噪声抑制算法的运行效率。

### 参考文献

- [1] Yu G, Vladimirova T, Sweeting M N. Image compression systems on board satellites [J]. *Acta Astronautica*, 2009(64): 988– 1005.
- [2] Kutz R L, Sciulli J A. The performance of an adaptive image data compression system in the presence of noise [J]. *IEEE Transactions on Information Theory*, 1968, 14(2): 273– 279.
- [3] Natarajan B K. Filtering random noise from deterministic signals via data compression [J]. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 1995, 43(11): 2595– 2605.
- [4] Lo S C B, Krasner B, Mun S K. Noise impact on error free image compression [J]. *IEEE Transactions on Medical Imaging*, 1990, 9(2): 202– 206.
- [5] 高连如, 张兵, 张霞, 申茜. 基于局部标准差的遥感图像噪声评估方法研究[J]. *遥感学报*, 2007, 11(2): 201– 210.
- [6] 冉琼, 迟耀斌, 王智勇, 陈正超. 北京1号小卫星图像噪声评估[J]. *遥感学报*, 2009, 13(3): 554– 558.
- [7] Gao B C. An operational method for estimating signal to noise ratios from data acquired with imaging spectrometers [J]. *Remote Sensing of Environment*, 1993, 43(1): 23– 33.
- [8] Corner B R, Narayanan R M, Reichenbach S E. Noise estimation in remote sensing imagery using data masking [J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2003, 24(4): 689– 702.
- [9] Amer A, Dubois E. Fast and reliable structure oriented video noise estimation [J]. *IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology*, 2005, 15(1): 113– 118.
- [10] Pratt W K. *Digital Image Processing* [M]. 3rd Edition. New York: Wiley, 2001.
- [11] Perona P, Malik J. Scale space and edge detection using anisotropic diffusion [J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 1990, 12(7): 629– 639.
- [12] You Y-L, Xu W, Tammenbaum A, Kaveh M. Behavioral analysis of anisotropic diffusion in image processing [J]. *IEEE Transactions on Image Processing*, 1996, 5(11): 1539– 1553.
- [13] Black M J, Sapiro G, Marimont D H, Heeger D. Robust anisotropic diffusion [J]. *IEEE Transactions on Image Processing*, 1998, 7(3): 421– 432.
- [14] Gilboa G, Sochen N, Zeevi Y Y. Forward and backward diffusion processes for adaptive image enhancement and denoising [J]. *IEEE Transactions on Image Processing*, 2002, 11(7): 689– 703.
- [15] Voci F, Eiho S, Sugimoto N, Sekiguchi H. Estimating the gradient threshold in the Perona Malik equation [J]. *IEEE Signal Processing Magazine*, 2004, 21(3): 39– 65.
- [16] Wang Y, Zhang L, Li P. Local variance controlled forward and backward diffusion for image enhancement and noise reduction [J]. *IEEE Transactions on Image Processing*, 2007, 16(7): 1854– 1864.
- [17] Zhang F, Yoo Y M, Koh L M, Kim Y. Nonlinear diffusion in Laplacian pyramid domain for ultrasonic speckle reduction [J]. *IEEE Transactions on Medical Imaging*, 2007, 26(2): 200– 211.
- [18] Yu J, Wang Y, Shen Y. Noise reduction and edge detection via kernel anisotropic diffusion [J]. *Pattern Recognition Letters*, 2008(29): 1496– 1503.
- [19] Zhong J, Sun H. Wavelet based multiscale anisotropic diffusion with adaptive statistical analysis for image restoration [J]. *IEEE Transactions on Circuits and Systems I: Regular Papers*, 2008, 55(9): 2716– 2725.
- [20] Canny J. A computational approach to edge detection [J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 1986, 8(6): 679– 698.
- [21] Wang Z, Bovik A C, Sheikh H R, Simoncelli E P. Image quality assessment: From error visibility to structural similarity [J]. *IEEE Transactions on Image Processing*, 2004, 13(3): 600– 612.
- [22] Wang Z, Bovik A C. Mean Squared Error: Love It or Leave It? A new look at signal fidelity measures [J]. *IEEE Signal Processing Magazine*, 2009, 26(1): 98– 117.
- [23] Weinberger M J, Seroussi G, Sapiro G. The LOCO-I lossless image compression algorithm: principles and standardization into JPEG-LS [J]. *IEEE Transactions on Image Processing*, 2000, 9(8): 1309– 1324.
- [24] ISO/IEC 15444-1: Information Technology—JPEG 2000 Image Coding System—Part 1: Core Coding System [Z]. 2000.
- [25] ISO/IEC 15442-2: Information Technology—JPEG 2000 Image Coding System—Part 2: Extensions [Z]. 2004.
- [26] Taubman D, Marcellin M W. *JPEG2000: Image Compression Fundamentals, Standards, and Practice* [M]. 3rd Edition. Kluwer Academic Publishers, 2004.
- [27] Boncellet C. Image noise models [A]// *Handbook of Image and Video Processing* [M]. 2nd Edition. A. C. Bovik Ed., Singapore: Elsevier Pte Ltd., 2006: 397– 410.