

一种卫星平台振动光谱成像数据分块校正方法^{*}

南一冰 唐义[†] 张丽君 常月娥 陈廷爱

(北京理工大学光电学院, 光电成像技术与系统教育部重点实验室, 北京 100081)

(2013年6月24日收到; 2013年9月11日收到修改稿)

卫星平台的振动会降低光谱成像数据的质量. 以星载色散型成像光谱仪为例, 介绍了其运动成像的退化机理. 针对传统二维反卷积算法存在的问题以及推扫机理的特殊性, 提出了一种光谱成像数据分块校正方法. 该方法将分块处理、升维运算以及灰度渐变拼接相结合, 将基于自然景物统计规律的图像去模糊算法运用于降质成像光谱数据的校正中. 分别进行了不同目标的光谱成像退化校正仿真实验, 实验结果表明, 光谱成像数据质量在空间维和光谱维都有了明显提高, 校正效果优于传统二维反卷积算法.

关键词: 振动, 光谱成像, 退化, 校正

PACS: 07.60.Rd, 42.30.Lr, 42.30.Va, 07.10.Fq **DOI:** 10.7498/aps.63.010701

1 引言

成像光谱仪能够同时获取地物目标的空间和光谱信息, 因此被广泛应用于航天遥感领域. 在飞行过程中, 包括振动在内的卫星平台复杂运动误差普遍存在, 来自不同地物目标的信息将混叠在探测器上, 这将严重影响光谱成像数据的质量^[1,2]. 为了满足精度要求, 有必要对卫星平台运动误差造成的光谱成像退化数据进行校正和重构.

校正卫星平台运动误差造成的退化光谱成像数据是近年来新兴的研究方向. 相里斌等人^[3]研究了遥感干涉成像光谱仪的像移补偿问题, 李湘滨等人^[4]设计了针对LASIS卫星光谱图像的校正算法, Mahgoub等人^[5]对傅里叶变换成像光谱仪受卫星振动影响进行了校正研究. 他们的研究往往针对某一特定类型的振动模式或仪器, 或者只分析了振动对光谱成像质量的影响, 并没有给出具有广泛适用性的有效校正方法. 本文以色散型成像光谱仪为例, 将三维反卷积这一校正过程简化为逐波段二维反卷积运算. 对于每个波段图像的二维反卷积, 采用基于自然景物统计规律的图像去模糊算法, 并结合分块、升维和灰度渐变拼接等运算. 该方

法能够有效的校正不同振动模式下的退化光谱成像数据.

2 卫星平台振动和光谱成像退化原理

卫星平台振动在空域上表现为卫星本体六个自由度方向上的振动, 即沿3个轴的平动和绕3个轴的转动, 而对像质影响较大的主要是转动, 即俯仰、侧滚和偏航三个姿态角的振动. 在频域上, 根据推扫过程中每行曝光时间 T 和振动周期 t_0 比值的大小把卫星振动分为高频振动和低频振动: 当 $T/t_0 \leq 2.5$ 时称为低频, 振幅较大; 当 $T/t_0 > 2.5$ 时称为高频, 振幅较小. 但在实际中, 其振动形式可能并不单一, 而是高阶、多模的复杂形式, 它在曝光时间内有多种频率同时存在, 方向也不一定固定. 在研究平台振动过程中, 一般忽略高频低振幅因素, 空域中主要研究俯仰、侧滚以及偏航的对光谱成像质量影响.

振动导致光谱仪像元的偏移量不会超过一个像素^[2], 因此混合光谱是由原始光谱和周围的8个像元光谱混叠而成^[6]. 其退化掺杂过程如图1所示.

^{*} 国家重点基础研究发展计划(973计划)(批准号: 2013CB329202, 2009CB724005) 资助的课题.

[†] 通讯作者. E-mail: tangyi4510@bit.edu.cn

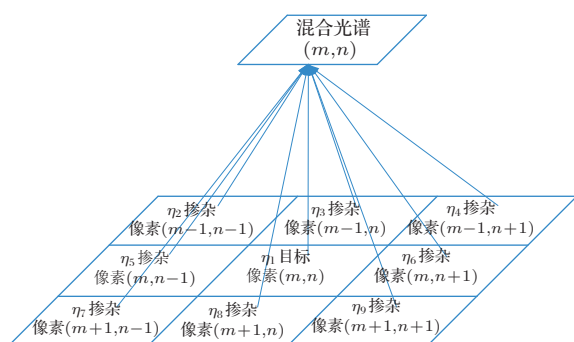


图1 像元掺杂示意图

设掺杂像素2—9所占的权重系数分别对应于 η_2 — η_9 , 原始光谱在混合光谱中所占权重为 η_1 . 根据混合像元理论中光谱混合的线性模型^[7]可知, 各个像元的权重系数由曝光时间内各个时刻所覆盖的像元总的曝光面积决定. 计算过程中, 根据获取的曝光过程中的振动模式, 对目标像元的8邻域曝光面积进行积分, 即可得到 η_2 — η_9 , 而 $\eta_1 = 1 - \eta_2 - \eta_3 - \eta_4 - \eta_5 - \eta_6 - \eta_7 - \eta_8 - \eta_9$.

3 光谱数据立方体校正

在本文中, 我们采用分块处理的方法来解决推扫型成像光谱仪空变校正的问题; 然后对每一分块进行升维, 在高维空间进行校正运算, 提高算法精度的同时, 降低了图像质量对复杂运算的敏感度; 校正完成后, 将结果降维至原始分辨率; 由于分块边缘存在振铃效应, 因此最后对相邻分块重叠部分进行灰度渐变拼接, 减弱边缘的振铃效应和灰度不连续性.

对于整个光谱数据立方体的校正, 按照波段顺序依次进行. 每个波段图像的校正过程如图2所示.

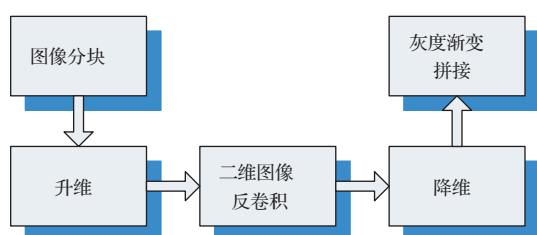


图2 单个波段图像校正流程图

3.1 图像分块

成像光谱仪的推扫机制决定了退化的空变性. 因为对于真实的推扫成像过程, 每行扫描时, 振动情况并不一定相同, 这样行与行的退化函数也不尽

相同, 由于偏航影响相对很小, 可以忽略, 所以可以认为每一行内部的退化函数是一致的, 故采用分块处理的方法来解决这种空变校正的问题.

图像分块的基本原理是, 将空间移变降质光谱图像分成若干子块, 近似认为每一子块图像的降质是空间移不变的, 这种区域称为等晕区, 则在等晕区内可采用空间移不变的算法校正每个子图像块, 再将校正后的子块组合, 即可得到整个校正图像.

子块的大小和子块之间重叠区域大小的选取是两个关键问题. 一般子块大小的选取应综合考虑计算量和校正效果, 较小的子块能够更好地近似空间移变的退化函数, 但加大了计算量, 而子块又不能小于退化函数的支持域. 选取重叠区域的大小, 应根据退化函数支持域的大小而变化. 在成像光谱数据校正问题中, 针对推扫机制的特点, 我们选用矩形分块, 即选取每个扫描行及其上下相同行数 a 的图像, 每个分块的宽度为 $2a + 1$, a 的大小根据实际情况选取, 对于图像边缘, 采用最近邻插值的方式处理.

3.2 二维图像反卷积

校正退化光谱数据立方体的核心是二维图像反卷积. 传统二维反卷积方法包括维纳滤波、Richardson-Lucy(R-L)算法等, 这些方法往往会在图像结构边缘产生明显的振铃效应和噪声; 而且传统方法对一个像素内的小幅度反卷积运算很敏感, 这样, 不仅不能校正图像, 反而会获得比退化图像更差的结果. 而结合自然景物统计规律等先验知识, 采用更准确的噪声模型和局部平滑约束等方法可以获得理想的反卷积运算结果^[7,8].

尽管真实世界的图像场景千差万别, 但研究表明^[9]它们的梯度都服从重尾分布: 图像梯度值主要分布在较小范围, 但在较大值范围明显表现出比高斯分布更大的概率. 基于此, 在校正过程中加入如下控制条件:

$$\log(P(\nabla L)) = \begin{cases} -k|\nabla L|, & x \leq c, \\ -(a(\nabla L)^2 + b), & x > c, \end{cases} \quad (1)$$

其中 x 表示图像梯度水平, c 表示重尾尖峰底部两端的阈值.

有了上述先验知识, 我们还需要建立图像退化的基本模型, 传统算法采用的模型如下:

$$I = L \otimes f + n, \quad (2)$$

其中 I , L 和 n 分别代表退化图像、校正原图像和附加噪声, $\otimes$ 代表卷积运算符, 而 f 表示点扩散函数

(PSF). 由于图像和PSF估计误差 ΔL , Δf 的存在, 这一模型是不精确的, 我们使用更加精确的模型, 模型如下:

$$\begin{aligned} I &= (L' + \Delta L) \otimes (f' + \Delta f) + n \\ &= L' \otimes f' + \Delta L \otimes f' + L' \otimes \Delta f \\ &\quad + \Delta L \otimes \Delta f + n. \end{aligned} \quad (3)$$

本文采用的二维反卷积方法的优点主要体现在以下几个方面:

1) 空间随机分布的图像噪声模型

$$\begin{aligned} P_1(n) &= \prod_i N(n_i | 0, \zeta_0) \prod_i N(\nabla n_i | 0, \zeta_1) \\ &\quad \times \prod_i N(\nabla(\nabla n_i) | 0, \zeta_2). \end{aligned} \quad (4)$$

每个像素的噪声随机变量服从高斯分布. 该模型使我们能够区分图像噪声估计和模糊核估计过程中产生的误差, 这些误差是传统校正算法所产生的振铃效应的主要来源.

2) 对图像的低对比度区域使用的一种新的平滑约束

$$p_2(L) = \prod_{i \in \text{white}} N(\nabla L - \nabla I | 0, \sigma_1), \quad (5)$$

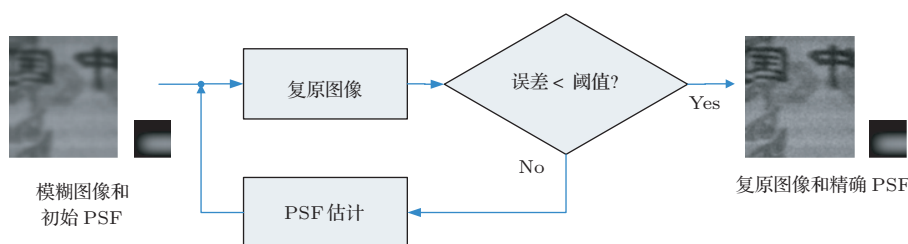


图3 图像校正算法流程图

算法具体可概括为两个步骤: 迭代优化退化图像 L , 迭代优化点扩散函数 f . 下面分别予以介绍.

1) 迭代优化退化图像 L

对 L 进行优化时, 保持 f 不变. 由 (7) 式可知, 对 L 的优化可用下式表示:

$$E(L) = \log[p(\nabla L)p_1(n)p_2(L)]. \quad (8)$$

将 (8) 式展开得到

$$\begin{aligned} E(L) &= \left(\sum_{\nabla^*} w_{\nabla^*} \|\nabla^* L \otimes f - \nabla^* I\|_2^2 \right) \\ &\quad + \lambda_1 \|\log p(\nabla L)\|_1 \\ &\quad + \lambda_2 \left(\sum_{i \in \text{white}} \|\nabla L_i - \nabla I_i\|_2^2 \right). \end{aligned} \quad (9)$$

这样不仅可以在平滑区域很好的抑制振铃效应, 而且在附近纹理丰富的区域也可以达到很好的振铃抑制效果. 这一约束同样可以促使接下来的模糊核估计达到更好的效果.

3) 基于高级最优化策略的高效优化算法, 例如变量替换和浦式定理, 通过这些方法, 可以在频域进行优化步骤, 大大缩减了计算量.

另外, 在迭代过程中加入对模糊核的指数分布限定条件

$$p(f) = \prod_i e^{-\tau f_j}, \quad f_j \geq 0. \quad (6)$$

在完成图像分块后, 对每一个分块首先进行升维处理, 然后进行二维反卷积, 其核心就是求解下式:

$$\begin{aligned} \min E(L, f) \\ = \min \log[p(\nabla L)p_1(n)p_2(L)p(f)], \end{aligned} \quad (7)$$

包括优化 L 和 f 两个主要步骤.

其流程可概括为以下几步: 1) 输入升维后的退化图像 I 和每行的初始PSF, 2) 计算平滑区域, 3) 循环优化 L 和 f 直到满足退出条件, 4) 输出 L 和 f . 算法流程图如图3所示.

其三个加法项分别表示 $\log p_1(n)$, $\log p(\nabla L)$ 和 $\log p_2(L)$, $w_{\nabla^*} = 1/\zeta^2(\nabla^*)^\tau$, λ_1 , λ_2 分别表示全局和局部的先验条件, 由用户根据具体情况在开始运算前设定. 由于 $\nabla^* L \otimes f$ 这一运算往往要耗费较多时间, 因此用 $\Psi = (\Psi_x, \Psi_y)$ 代替 $\nabla^* L$, 并增加新的约束条件 $\Psi \approx \nabla^* L$, 对 (9) 式进行因式分解, 则 (9) 式变为如下形式:

$$\begin{aligned} E'(L) &= \left(\sum_{\nabla^*} w_{\nabla^*} \|\nabla^* L \otimes f - \nabla^* I\|_2^2 \right) \\ &\quad + \lambda_1 \|\log p(\Psi)\|_1 + \lambda_2 \left(\sum_{i \in \text{white}} \|\Psi_i - \nabla I_i\|_2^2 \right) \\ &\quad + \gamma (\|\Psi - \nabla L\|_2^2) \end{aligned}$$

$$= \left(\sum_{\nabla^*} w_{\nabla^*} \|\nabla^* L \otimes f - \nabla^* I\|_2^2 \right) + \gamma (\|\Psi - \nabla L\|_2^2), \quad (10)$$

其中, γ 的值随迭代而增长, 直到最后变得足够大. 得到 (10) 式后, 我们就可以在优化 Ψ 和 L 中进行迭代运算 (当对其中一项进行优化时, 另一项保持不变). 根据浦式定理可知, 函数的平方和等于它的傅里叶变换的平方和, 因此可用 $E'(F(L))$ 代替 $E'(L)$ 的最小化运算.

对于 Ψ 的优化

$$E'(\Psi) = \left(\sum_{\nabla^*} w_{\nabla^*} \|\nabla^* L \otimes f - \nabla^* I\|_2^2 \right) + \lambda_1 \|\log p_1(\Psi)\|_1 + \lambda_2 \left(\sum_{i \in \text{white}} \|\Psi_i - \nabla I_i\|_2^2 \right) + \gamma (\|\Psi - \nabla L\|_2^2). \quad (11)$$

由于此时 L 保持不变, 则

$$E'(\Psi) = \lambda_1 \|\log p_1(\Psi)\|_1 + \lambda_2 \left(\sum_{i \in \text{white}} \|\Psi_i - \nabla I_i\|_2^2 \right) + \gamma (\|\Psi - \nabla L\|_2^2) = \sum_i E'_{\Psi_i}. \quad (12)$$

按照 (10) 式和 (12) 式, 逐次迭代即可完成对 L 的优化运算.

2) 迭代优化点扩散函数 f

点扩散函数 f 的优化运算表示为

$$E(f) = \left(\sum_{\nabla^*} w_{\nabla^*} \|\nabla^* L \otimes f - \nabla^* I\|_2^2 \right) + \|f\|_1, \quad (13)$$

其实质是 $L1$ 范式的正则化问题, 我们使用内点法解决, 这里不再赘述.

3.3 灰度渐变拼接^[10]

为了消除校正过程中图像边界产生的振铃波纹, 需要对其边缘进行渐变拼接. 将其边界进行外

延, 使相邻块有一定的重叠. 分块校正之后的振铃波纹将分布在重叠区中. 然而要准确的寻找振铃区域是非常困难的, 所以要适当地加大该区. 当然该区域也不能太大, 否则影响运算速度.

每个块在经过校正之后, 去除明显被振铃破坏的边缘部分, 相邻块保留的重叠区以它到等晕区边界的距离构成加权系数叠加计算, 从而实现渐变拼接. 这样虽然重叠区仍有少许的剩余振铃, 但能被该过程削弱或消除, 边界的灰度不连续性也能同时得到改善.

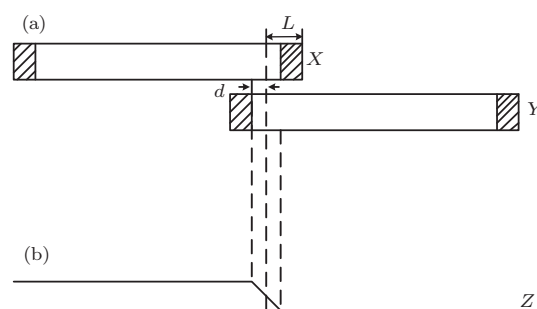


图4 图像分块边缘重叠区一维示意图

以一维的重叠为例来说明该加权系数, 设相邻两块分别表示为 X, Y , 两者拼接后表示为 Z , 如图4所示, 图4(a)中的阴影部分为振铃区域, 图4(b)表示图像分块校正后去除振铃余下重叠区边缘灰度渐变. X, Y 大小分别为 M, N , 图像边界的等晕区往外延伸 S , 即等晕区边界位于 X 的第 $M - S$ 列, Y 的第 S 列. X, Y 在经过校正之后, 去除包含振铃的 l 列, 则剩下的两块的重叠区宽度 $2d = 2(S - l)$, 即此时等晕区边界位于 X 的第 $M - d$ 列, Y 的第 d 列. 重叠区第一个过渡元素的权重系数为

$$Z_{M-d+1} = X_{M-d+1} \times \left(1 - \frac{1}{2d}\right) + Y_1 \times \frac{1}{2d},$$

其余按 $1/(2d)$ 递推.

4 退化校正仿真实验及分析

实验中使用的光谱成像数据格式见表1, 分别

表1 光谱成像数据格式

数据来源		分辨率/pixel	波段数	像元大小/ μm	曝光时间/s	物镜焦距/mm
纸币	紫外-可见光成像光谱仪	360×320	100	16	1/10	100
室外场景	紫外-可见光成像光谱仪	360×360	100	16	1/10	100
沙漠	HJ1A 卫星	256×256	115	18	1/16	117

进行不同振动模式下以及不同场景的退化校正仿真实验, 并与典型二维反卷积算法进行了比较. 运算过程中, 对于不同的反卷积算法, 都进行了分块处理.

4.1 卫星平台振动信号

根据真实卫星在轨测量的振动数据, 卫星平台的振动主要来源于太阳能电池阵列驱动所产生的频率为 1 Hz、振幅为 100 μrad 的振动以及卫星反作用轮基波的二次谐波所产生的频率为 100 Hz、振幅为 4 μrad 和频率为 200 Hz、振幅为 0.6 μrad 的振动. 卫星振动可以认为是这三个谐波振动的合成^[11]. 实验中, 将该合成谐波作为基本振动信号, 为其加上高斯噪声, 生成模拟振动信号如图 5 所示.

4.2 仿真实验

以 4.1 节中描述的振动信号模拟真实卫星的振动曲线. 由于偏航对光谱成像数据质量的影响非常小, 所以忽略偏航的作用, 分别进行俯仰、侧滚和俯

仰加侧滚的退化校正实验. 原始数据单波段图像如图 6 所示.

校正后, 分别使用均方误差 (MSE)^[12]、信噪比 (SNR) 对空间维实验结果进行评价, 使用光谱信息散度 (SID)、光谱相关系数 (SCC)^[13] 对光谱维实验结果进行评价.

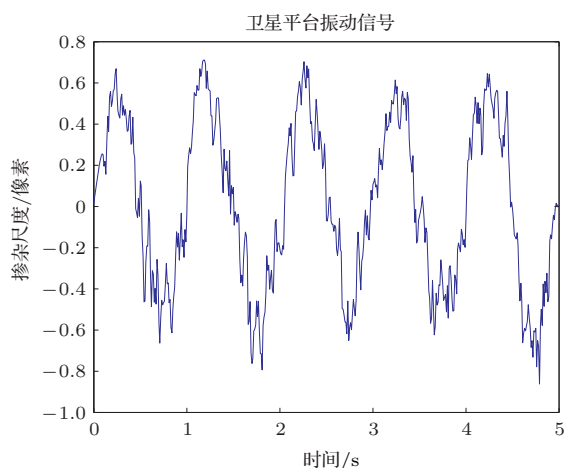


图5 卫星平台振动信号

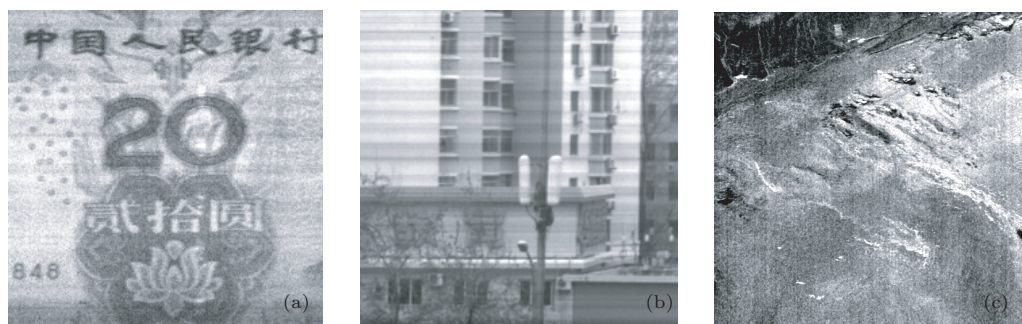


图6 原始数据 (a) 纸币; (b) 室外场景; (c) HJ1A 卫星获得的沙漠成像光谱数据

空间维退化校正效果质量评价如表 2 所示 (表中数值为所有波段或像素点的平均数值, 下同).

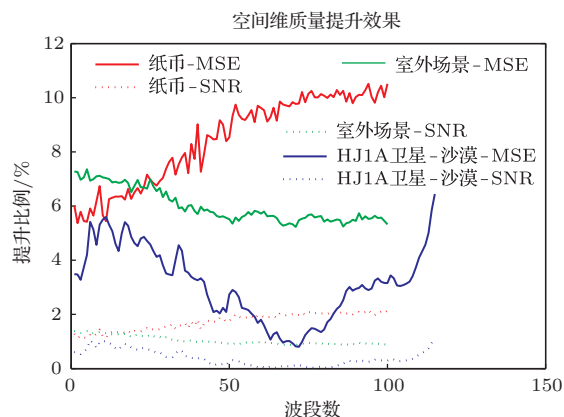


图7 校正后三种目标空间维图像质量提升效果

可以看出, 经过维纳滤波、L-R 算法的校正, 图像质量没有提高反而有所下降, 而使用本文方法校正后, 三个姿态的振动退化图像质量都有所提升. 以俯仰姿态的纸币数据为例, MSE 平均提高 8.45%, 最大提高 10.51%; SNR 平均提高 1.74%, 最大提高 2.16%. 校正后, 三种目标空间维各波段图像质量提升效果如图 7 所示, 各振动模式提升效果如表 3 所示.

从图 7 可以看出, 不同波段图像校正效果具有一定的差异, 但总体来看, 通过校正图像质量都有所提高.

光谱维退化校正效果质量评价如表 4 所示. 同样, 经过维纳滤波、L-R 算法也不能提升光谱质量, 经过本文方法的校正, 光谱质量都得到了提升. 校正后, 俯仰振动模式下三种目标上各点 (局部) 光谱

维质量提升比例如图8所示. 各振动模式提升效果如表3所示. 俯仰和侧滚混合振动模式下, 三种目标SID提升最大的三个点光谱曲线如图9所示.

光谱维校正效果在图8中表现出一定的周期

性. 提升比例随振动信号的大小而波动. 另外, 在纹理丰富的区域, 校正效果相对较差, 纹理简单的区域的校正效果明显好于纹理丰富的区域.

表2 空间维质量评价

运动姿态	数据	纸币		室外场景		HJ1A 沙漠数据	
		MSE	SNR	MSE	SNR	MSE	SNR
俯仰	退化数据	0.0023	19.0781	0.0013	21.9120	0.0010	19.6868
	维纳滤波	0.0034	17.0119	0.0019	19.9396	0.0017	17.1329
	L-R	0.0026	18.5180	0.0017	20.7926	0.0013	18.6652
	本文方法	0.0021	19.4125	0.0012	22.1385	9.9635×10^{-4}	19.7553
侧滚	退化数据	0.0020	19.7492	0.001147	22.4348	8.2873×10^{-4}	20.6702
	维纳滤波	0.0029	17.7260	0.0019	19.9282	0.0014	18.0443
	L-R	0.0023	19.0365	0.0015	21.2648	0.0010	19.6811
	本文方法	0.0017	20.2289	0.001131	22.4442	8.1253×10^{-4}	20.6427
俯仰 + 侧滚	退化数据	0.0021	19.4865	0.0013	21.9825	9.4575×10^{-4}	20.0194
	维纳滤波	0.0033	17.1284	0.0024	18.7856	0.0016	17.2116
	L-R	0.0025	18.6379	0.0019	20.2924	0.0012	19.0222
	本文方法	0.0019	19.7852	0.0012	22.1028	9.1295×10^{-4}	20.1006

表3 校正后光谱成像数据质量提升效果

运动姿态		纸币提升比例/%				室外场景提升比例/%				HJ1A 沙漠提升比例/%			
		MSE	SNR	SID	SCC	MSE	SNR	SID	SCC	MSE	SNR	SID	SCC
俯仰	平均	8.45	1.74	1.06	3.85	6.00	1.04	0.21	1.68	3.14	0.36	0.33	1.03
	最大	10.51	2.16	51.22	80.93	7.36	1.39	79.05	125.98	6.44	1.12	87.03	130.77
侧滚	平均	11.4	2.43	1.96	7.91	1.07	0.52	0.47	2.05	0.87	0.93	0.85	0.79
	最大	12.9	2.65	73.1	105.14	5.88	1.06	83.08	111.46	6.16	1.35	90.08	80.63
俯仰 + 侧滚	平均	7.62	1.53	1.23	3.98	3.58	0.55	0.46	5.82	3.21	0.42	2.96	0.6
	最大	8.87	1.78	69.45	85.26	5.58	1.02	78.51	103.87	4.74	0.99	78.65	100.28

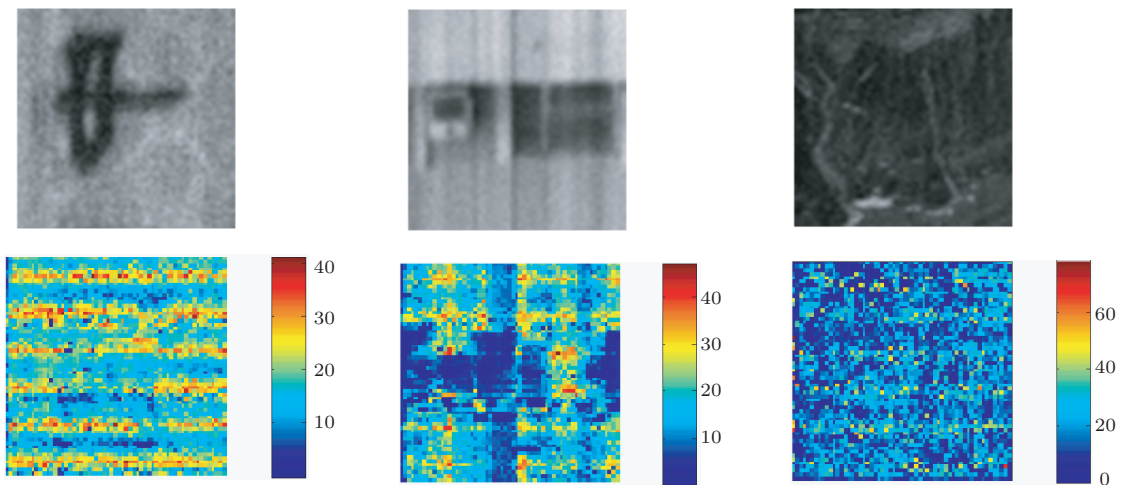


图8 校正后三种目标光谱维质量提升比例 (单位: %)

表 4 光谱维质量评价

运动姿态	数据	纸币		室外场景		HJ1A 沙漠数据	
		SID	SCC	SID	SCC	SID	SCC
俯仰	退化数据	0.0279	0.7811	0.0134	0.7818	0.0093	0.8776
	维纳滤波	0.0365	0.7063	0.0166	0.7261	0.0130	0.8253
	L-R	0.0309	0.7578	0.0153	0.7584	0.0109	0.8561
	本文方法	0.0254	0.7908	0.0122	0.7912	0.0086	0.8825
侧滚	退化数据	0.0237	0.8161	0.0123	0.8071	0.0075	0.8988
	维纳滤波	0.0320	0.7501	0.0173	0.7395	0.0114	0.8511
	L-R	0.0274	0.7923	0.0153	0.7742	0.0088	0.8792
	本文方法	0.0209	0.8336	0.0120	0.8177	0.0070	0.9024
俯仰 + 侧滚	退化数据	0.0245	0.7987	1.0127	0.7919	0.0080	0.8903
	维纳滤波	0.0355	0.7105	1.0193	0.7052	0.0125	0.8342
	L-R	0.0285	0.7703	1.0162	0.7530	0.0094	0.8702
	本文方法	0.0225	0.8088	1.0125	0.7979	0.0076	0.8940

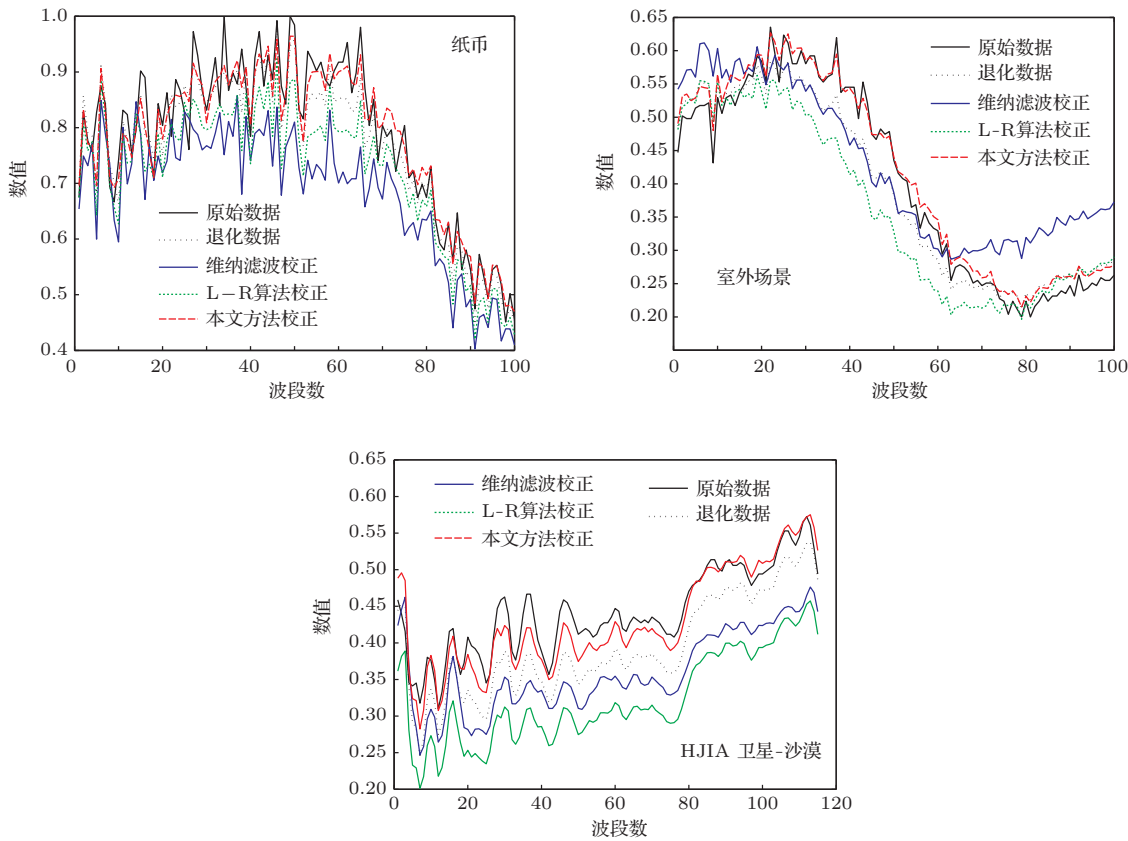


图 9 三种目标 SID 提升最大点的光谱曲线对比

5 结 论

卫星平台的振动会影响光谱成像数据的质量. 将三维反卷积简化为二维反卷积即可校正降质的

光谱成像数据. 鉴于传统二维反卷积算法对小幅度校正运算的敏感性和推扫机理带来的点扩散函数空间移变特性, 本文基于光谱 8 邻域掺杂模型, 采用分块处理和升维运算的方式使上述问题得到了改善, 校正过程中结合了基于自然景物梯度规律的

图像去模糊算法和灰度渐变拼接. 实验表明, 本文方法能同时提升空间维和光谱维的光谱成像数据质量, 对不同姿态、目标卫星平台振动造成的光谱成像退化数据校正具有广泛的适用性. 但由于振动信号和图像纹理的变化, 光谱维校正效果呈现一定的波动性, 未来还需要寻找能够自动适应这些变化的校正方法.

参考文献

- [1] Hadar O, Fisher M, Kopeikan S 1992 *Opt. Eng.* **31** 581
- [2] Tang Q Y, Tang Y, Cao W L, Wang J, Nan Y B, Ni G Q 2012 *Acta Phys. Sin.* **61** 0700202 (in Chinese) [唐秋艳, 唐义, 曹玮亮, 王静, 南一冰, 倪国强 2012 物理学报 **61** 0700202]
- [3] Xiang L B, Liu G X, Gao Z, Xue M Q 1997 *Acta Photonica Sinica* **26** 644 (in Chinese)[相里斌, 刘改侠, 高瞻, 薛鸣球 1997 光子学报 **26** 644]
- [4] Li X B, Chen D R, Yu C W, Lu J H, Yang J F 2004 *Opto-Electronic Engineering* **31** 8 (in Chinese) [李湘滨, 谌德荣, 余成伟, 陆建华, 杨建峰 2004 光电工程 **31** 8]
- [5] Mahgoub A, Nguyen T, Desbiens R, Zaccarin A 2009 *IEEE ICIP* **573**
- [6] Yang W, Chen J, Song-Xia Wen-Jing, Gong P, Chen C X 2008 *Journal of Remote Sensing* **12** 454 (in Chinese)[杨伟, 陈晋, 松下文经, 宫鹏, 陈春晓 2008 遥感学报 **12** 454]
- [7] Shan Q, Jia J Y, ASEEM A 2008 *ACM Transactions on Graphics* **27**
- [8] Fergus R, Singh B, Hertzmann A, Roweis S T, Freeman W T 2006 *ACM Transactions on Graphics* **25** 787
- [9] Roth S, Black M J 2005 *IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition San Diego, CA, USA, June 0-5, 005* **2** p860
- [10] Tao X P, Feng H J, Lei H, Li Q, Xu Z H 2009 *Acta Opt. Sin.* **29** 648 (in Chinese)[陶小平, 冯华君, 雷华, 李奇, 徐之海 2009 光学学报 **29** 648]
- [11] Wittig M, Holtz L V, Tunbridge D E L, Vermeulen H C 1990 *Proc. SPIE* **1218** 205
- [12] Cao M Y, Sun N L, Yu D Y 2003 *Opto-Electronic Engineering* **30** 69 (in Chinese)[曹茂永, 孙农亮, 郁道银 2003 光电工程 **30** 69]
- [13] Zhang X B, Yuan Y, Jing J J, Sun C M, Wang Q 2011 *Spectroscopy and Spectral Analysis* **31** 853 (in Chinese)[张修宝, 袁艳, 景娟娟, 孙成明, 王潜 2011 光谱学与光谱分析 **31** 853]

A sectioned method to correct spectral imaging data degraded by satellite vibrations^{*}

Nan Yi-Bing Tang Yi[†] Zhang Li-Jun Chang Yue-E Chen Ting-Ai

(Key Laboratory of Photoelectronic Imaging Technology and System School of Photoelectricity, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China)

(Received 24 June 2013; revised manuscript received 11 September 2013)

Abstract

The quality of spectral imaging data will be degraded by the vibrations of satellite platform. We study the methods to correct degraded spectral imaging data in this paper. First, the vibration patterns of satellites and the degradation mechanism of the motion imaging of dispersion imaging spectrometer are introduced. Considering the problems of traditional two-dimensional deconvolution algorithms, and the speciality of push-sweeping mechanism, a sectioned correction method is presented, in which are combined image dividing, dimension rising, and gradual splicing. And the motion deblurring algorithm based on natural image statistics is applied in the correction of degraded spectral imaging data. We implement degradation and correction experiments for various data. Results show that the qualities of spectral imaging data are significantly improved for both the spatials and spectrals. Our method is better than the traditional deconvolution algorithms.

Keywords: vibration, spectral imaging, degradation, correction

PACS: 07.60.Rd, 42.30.Lr, 42.30.Va, 07.10.Fq

DOI: 10.7498/aps.63.010701

^{*} Project supported by the National Basic Research Program of China (Grant Nos. 2013CB329202, 2009CB724005).

[†] Corresponding author. E-mail: tangyi4510@bit.edu.cn