

基于改进维纳逆滤波的衍射成像光谱仪数据 误差分析与重构*

李娜¹⁾ 贾迪¹⁾ 赵慧洁^{1)†} 苏云²⁾ 李妥妥²⁾

1) (北京航空航天大学仪器科学与光电工程学院, 北京 100191)

2) (北京空间机电研究所, 北京 100094)

(2014年2月23日收到; 2014年5月18日收到修改稿)

衍射成像光谱仪探测到的高光谱数据需要进行计算与反演才可以得到成像光谱数据, 本文对衍射成像光谱仪的成像过程及数据误差产生的原理从空间维和光谱维两方面进行了分析, 并针对其光谱重构过程中系统点扩散函数标准差较大时重构结果清晰度较低、存在振铃等问题, 提出了基于改进维纳逆滤波的光谱数据重构算法, 该方法在分析衍射成像光谱仪数据特点与误差的基础上, 将每一次维纳逆滤波的重构结果视为新的模糊图像, 利用成像过程及维纳逆滤波的基本原理确定新的模糊图像对应的点扩散函数, 反复进行维纳逆滤波达到提高图像清晰度的效果, 再根据图像自身的空间和光谱特征分布, 进行自适应性的噪声去除. 利用模拟的衍射成像光谱数据进行验证, 在系统点扩散函数的标准差为2.5的情况下, 能得到无振铃的重构结果, 且与传统维纳逆滤波法的结果进行比较, 清晰度、细节能力等指标均有所提高, 满足了衍射成像光谱数据应用需求.

关键词: 衍射成像, 高光谱, 光谱重构, 点扩散函数

PACS: 78.20.Bh

DOI: 10.7498/aps.63.177801

1 引言

成像光谱技术能够同时获取目标的空间信息和光谱信息, 达到直接识别物质的目的, 在农林业、生物医学、数值预报、气候研究^[1]等众多领域有着广泛的应用, 成为目前的研究热点^[2-4]. 成像光谱仪一般由望远镜成像系统和光谱仪系统组成, 望远镜成像系统功能与普通对地遥感成像系统相同, 将地物目标成像于成像光谱仪的一次像面处; 一次像面所成的像经光谱仪系统后在成像光谱仪焦面上得到同一地物目标的不同谱段的信息, 经图像处理, 获得地物目标的高光谱图像. 但是传统的棱镜色散型、光栅色散型以及傅里叶干涉型等成像光谱

仪在使用中存在一些问题: 首先, 传统的衍射成像光谱仪实现上较为复杂, 体积较大; 第二, 由于面阵探测器同时接收同一目标多个谱段信息, 因此每个波段所接收到的能量略显不足, 信噪比较低, 因此对新原理的成像光谱技术提出了迫切需求.

衍射光学元件同时实现空间成像和色散分光功能, 不需要先通过前置望远镜系统实现空间维目标信息获取, 再进行光谱维信息采集, 实现上形式较为简单, 具有体积小、重量轻等优点. 同时由于其色散分光沿光轴方向, 适合凝视成像, 大大提高了信噪比. 但在成像过程中, 除空间维的模糊外, 某一波长的辐射成像于其光轴对应位置的焦平面上, 相邻波长的辐射由于二元光学元件的色散作用也在该焦平面的位置上呈现模糊的图像, 即衍射光

* 国家自然科学基金(批准号: 61008047)、国家高技术研究发展计划(批准号: 2012AA12A30801, 2012YQ05250)、中国地质调查局项目(批准号: 1212011120227)、公益性行业科研专项基金(批准号: 201311036)和教育部长江学者和创新团队发展计划(批准号: IRT0705)资助的课题.

† 通讯作者. E-mail: hjzhao@buaa.edu.cn

谱数据中的每一幅图像都是该波段的图像与相邻波段的离焦量的叠加^[5],因此衍射成像光谱仪的数据包含空间维和光谱维两方面的误差,不可以直接使用,必须经过光谱重构的处理.

图像重构在对由高光谱成像技术、放射成像技术等手段得到的影响数据进行处理时有着非常广泛的应用^[6,7].目前常见的光谱重构算法包括传统的逆滤波法、维纳逆滤波法^[8],Jansson-Van Citter算法等.其中传统的逆滤波算法对噪声极其敏感^[9],仅能在无噪声的理想情况下使用;维纳逆滤波法引入了抑制噪声的因子,但同时可能导致复原结果的边缘依然较为模糊^[10];Jansson-Van Citter算法对于点扩散函数标准差较大的图像,其复原结果中将出现较为严重的振铃.由此可见,目前常见的重构算法对衍射成像光谱仪的数据质量要求较高,在原始数据模糊程度较严重时,都难以得到清晰的重构结果.

针对上述问题,本文提出了一种基于改进维纳逆滤波的重构方法.该算法将维纳逆滤波法的重构结果视为新的模糊图像,根据成像过程及维纳逆滤波的基本原理计算得到新的模糊图像的点扩散函数,再次对新的图像进行维纳逆滤波.通过多次迭代,重构结果的清晰度逐渐提高,最终得到真实的清晰图像.并给出了相关实验对结果进行验证.

2 成像光谱系统特点与原理

衍射光学元件具有显著的色散特性,焦距与波长成反比,色散情况如图1所示,不同波长的光经衍射透镜后汇聚到不同的像面上.

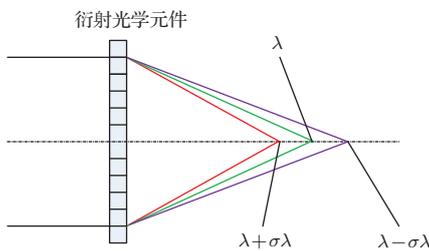


图1 衍射光学元件色散示意图

根据衍射光学元件这一特性,将窄带滤波技术与光谱层析技术相结合,采用衍射光学元件同时实现成像和色散功能,设计出衍射成像光谱仪系统,系统原理示意图如图2所示.

如图2所示的衍射成像光谱系统由衍射光学

元件、消色差系统和可移动焦面三部分组成,衍射光学元件提供色散功能,消色差系统实现不同谱段光线的汇聚和各类像差校正,可移动焦面通过沿轴方向的扫描,获取不同谱段的图像;该方案结构形式简单、体积小、重量轻,尤其适用于地物目标与成像光谱仪相对静止的工作条件,如地球静止轨道对地凝视成像.凝视成像模式的使用,可以通过延长积分时间,增大系统信噪比,同时降低对光学系统的要求,设计、加工、装调难度相对降低.

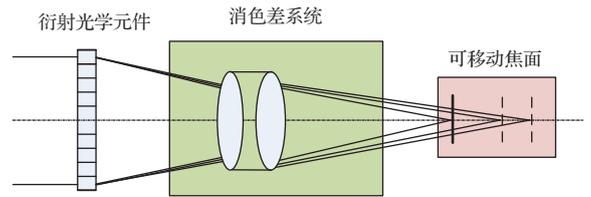


图2 衍射成像光谱仪原理示意图

衍射成像光谱仪虽然具有以上优点,但是受工作原理限制,对单谱段成像时会存在目标谱段图像与其他临近谱段图像的混叠现象,需要开展相应的图像处理算法研究,提取不同谱段图像,并进行三维数据的重构.

3 误差分析与重建建模

3.1 成像误差分析

衍射成像光谱仪使用衍射光学元件进行色散,对于波长较短的光,其焦距较长,而波长较长的光焦距则相对较短.因此,衍射成像光谱仪中各波长的光的聚焦位置按照波长由长到短在光轴上顺次排列.

在进行成像时,衍射成像光谱仪采用凝视成像,通过可移动焦面的移动来获取不同波段的图像数据.当可移动焦面在波长为 λ 的光的焦面位置时,在理想情况下,可移动焦面所探测到的数据为 $f(x, y, \lambda)$,其中, x, y 分别表示图像上各点在空间维的横、纵坐标位置, λ 表示所探测数据的波长, $f(x, y, \lambda)$ 则表示波长为 λ 的波段的真实图像数据.

然而,在成像时探测到的图像数据会受到空间维和光谱维两方面的影响.在空间维,数据会受到点扩散函数的影响产生模糊.点扩散函数即理想点光源通过系统后的成像^[11],一般采用高斯模型进行模拟.对于中心波长为 λ 的波段,其成像过程可

表示为

$$g_\lambda(x, y) = f_\lambda(x, y) * h_\lambda(x, y), \quad (1)$$

其中, $f_\lambda(x, y)$, $h_\lambda(x, y)$, $g_\lambda(x, y)$ 分别为该波段的真实图像、空间维的点扩散函数以及该波段真实图像被空间维的点扩散函数模糊所得到的结果.

而另一方面, 在光谱维, 由于衍射光学元件沿光轴方向色散, 同时其能量主要集中于+1级次上, 其他级次的衍射效率较小, 因此, 将可移动焦面置于波长为 λ 的光的衍射级次为+1的位置时, 可接收波长为 λ 的光的大部分能量; 而由于衍射光学元件沿光轴方向色散, 对于某一特定波长 λ , 其包含较小能量的其他衍射级次的位置会与其他波长的光的焦面位置重合, 从而以离焦量的形式对其他波段的成像产生影响, 造成成像误差. 也就是说, 系统每个波段所探测到的图像其实为若干图像在此平面上的成像之和, 即

$$g_{x,y}(\lambda_k) = \sum_{i=1}^N f_{x,y}(\lambda_i) * h_{x,y}(\lambda_i - \lambda_k), \quad (2)$$

其中, λ_k 表示第 k 波段的波长, N 表示高光谱数据的波段数, $f_{x,y}(\lambda)$, $g_{x,y}(\lambda)$ 分别表示空间维坐标为 (x, y) 的物点的真实光谱曲线以及叠加离焦量后的光谱曲线, $h_{x,y}$ 表示光谱维的点扩散函数. 在实际成像过程中, 与 λ_k 相邻的波段, 如 λ_{k-1} , λ_{k+1} , 对 λ_k 波段的影响较大, 而随波长与 λ_k 的差异变大, 对 λ_k 波段的影响逐渐变小, 甚至可以忽略不计. 假设对于波段 λ_k 的成像, 需考虑从 λ_{k-m} 至 λ_{k+m} 共 $(2m+1)$ 个波段的影响, m 是由光谱仪的具体参数决定的. 则有

$$g_{x,y}(\lambda_k) = \sum_{i=k-m}^{k+m} f_{x,y}(\lambda_i) * h_{x,y}(\lambda_i - \lambda_k). \quad (3)$$

在实际物理成像过程中, 空间维的模糊与光谱维离焦量的叠加同时发生, 因此, 可用三维点扩散函数对成像过程产生的误差进行表示:

$$\begin{aligned} g(x, y, \lambda_k) &= \\ &= \sum_{i=k-m}^{k+m} f(x, y, \lambda) * h(x, y, \lambda_i - \lambda_k), \end{aligned} \quad (4)$$

其中, $h(x, y, \lambda)$ 为三维点扩散函数, $g(x, y, \lambda_k)$ 为第 k 波段实际探测到的模糊图像数据.

对于第 k 波段, 探测到的图像与真实的清晰图

像存在差异可简写为

$$\begin{aligned} \Delta g_k &= g_k - f_k = \left(\sum_{i=k-m}^{k+m} f_i * h_{i,k} \right) - f_k \\ &= \sum_{i=k-m}^{k-1} f_i * h_{i,k} + \sum_{i=k+1}^{k+m} f_i * h_{i,k} \\ &\quad + (f_k * h_{k,k} - f_k), \end{aligned} \quad (5)$$

其中, f_k , g_k 分别为第 k 波段的真实图像与探测到的图像, $h_{i,k}$ 表示第 i 波段的图像在第 k 波段的点扩散函数.

由(5)式可知, 对于衍射成像光谱仪, 每一波段探测到的图像与真实清晰图像的误差, 包含本波段的空维模糊 $(f_k * h_{k,k} - f_k)$, 与叠加的周围波段相对能量较弱的离焦量 $\sum_{i=k-m}^{k-1} f_i * h_{i,k} + \sum_{i=k+1}^{k+m} f_i * h_{i,k}$ 两部分. 图像的误差不仅使数据的空维图像清晰度降低, 同时也对各点物点的光谱曲线造成很大影响. 一般来说, 离焦量会使光谱曲线趋向平滑, 导致光谱特征的减弱甚至消失.

3.2 衍射成像光谱仪数据重构

3.2.1 重构基本原理

由(4)式可知, 真实图像被点扩散函数模糊得到探测图像, 这一过程可简写为

$$g = f * h, \quad (6)$$

对(6)式进行傅里叶变换, 可得到

$$G = FH, \quad (7)$$

其中, G , F , H 分别为 g , f , h 的傅里叶变换^[12,13], 与一般傅里叶变换不同的是, 由于 g , f 为图像数据, 并非一维向量, 因此此处进行的是多维傅里叶变换^[14].

在维纳逆滤波法重构的过程中, 通过对点扩散函数进行修正达到抑制对图像噪声的目的, 有

$$F_w = \frac{GH^*}{|H|^2 + \frac{1}{\text{SNR}}}, \quad (8)$$

其中, F_w 为维纳逆滤波法复原结果的傅里叶变换.

(7)式与(8)式中均存在原始模糊数据的傅里叶变换 G , 因此可以用 G 建立真实清晰图像 f 与维纳逆滤波法重构结果 f_w 之间的等式关系. 经计算, 可得

$$f_w = f * \text{IDTF} \left(\frac{\text{SNR}|H|^2}{1 + \text{SNR}|H|^2} \right), \quad (9)$$

由(9)式可知, 维纳逆滤波法的重构结果相当于真实图像被点扩散函数 $\text{IDFT}\left(\frac{\text{SNR}|H|^2}{1+\text{SNR}|H|^2}\right)$ 模糊得到的模糊图像. 若令

$$h_1 = \text{IDFT}\left(\frac{\text{SNR}|H|^2}{1+\text{SNR}|H|^2}\right),$$

则

$$g = f_w * h_w = f_1 * h_1 * h_w, \quad (10)$$

以 f_w 为模糊图像, h_1 为点扩散函数, 则可使用维纳逆滤波法再次对 f_w 进行重构. 将此过程反复进行, 则可得到

$$g = f_n * h_1 * h_2 * \dots * h_n * h_w, \quad (11)$$

因此, 探测到的模糊图像可视为清晰图像被多个不同的点扩散函数连续模糊得到的结果. 当点扩散函数的标准差 σ 较大时, 维纳逆滤波法的重构结果 f_w 的清晰度会较低, 与真实的清晰数据 f 差异较大. 针对这一问题, 本文提出的光谱重构算法采

用逐次对各次模糊过程进行重构的方法, 首先计算出探测数据的点扩散函数, 并用其对图像进行光谱重构得到最后一次模糊前的模糊图像, 再依次计算之前各次的点扩散函数并进行重构, 最终得到真实的清晰图像. 图3为本文提出重构方法的流程.

3.2.2 基于改进维纳逆滤波的重构算法

在重构算法中, 由于光谱维与空间维均存在点扩散函数的影响, 可采用三维点扩散函数同时完成空间维和光谱维的重构^[15], 以避免空间维和光谱维共同作用对图像产生的额外影响. 三维点扩散函数一般呈沙漏型, 其计算公式为

$$h(x, y, z) = \frac{1}{2\pi\sigma_z^2(z)} \exp\left[-\frac{x^2 + y^2}{2\sigma_z^2(z)}\right]. \quad (12)$$

对于噪声不可忽略的图像, 其成像过程可表示为

$$g(x, y, z) = f(x, y, z) * h(x, y, z) + n(x, y, z), \quad (13)$$

其中, $f(x, y, z)$ 为真实的数据立方体, $h(x, y, z)$ 为三维点扩散函数, $n(x, y, z)$ 为数据立方体中存在的噪声, $g(x, y, z)$ 为实际探测到的数据立方体. 在对数据的信噪比 SNR 进行估计后^[16,17], 采用维纳逆滤波法进行重构, 并将维纳逆滤波法的结果作为模糊图像 f_{n-1} , 继续对得到的模糊图像进行维纳逆滤波, 可依次得到前一次的模糊图像 f_{n-2}, f_{n-3}, \dots . 由于初始的模糊图像与每一次的重构结果在计算过程中均已知, 因此, 在本文所提出的算法中, 每一次维纳逆滤波过程中点扩散函数以及迭代终止条件的确定就成为了研究的重点问题.

1) 点扩散函数的估计

将每一次的光谱重构结果 f_k 与初始探测图像 g 相比较, 由于它们具有相同的真实清晰图像, 因此可以在第 k 次重构结果 f_k 、探测图像 g 、整体点扩散函数 h 以及将原始图像 f 模糊为 f_k 的点扩散函数 h_k 之间建立等式关系

$$f * h_k = f_k, \quad (14)$$

对其进行傅里叶变换, 得到

$$FH_k = F_k, \quad (15)$$

$$F = F_k/H_k. \quad (16)$$

由(15)式可得

$$F_k/H_k = G/H, \quad (17)$$

$$H_k = F_k H/G. \quad (18)$$

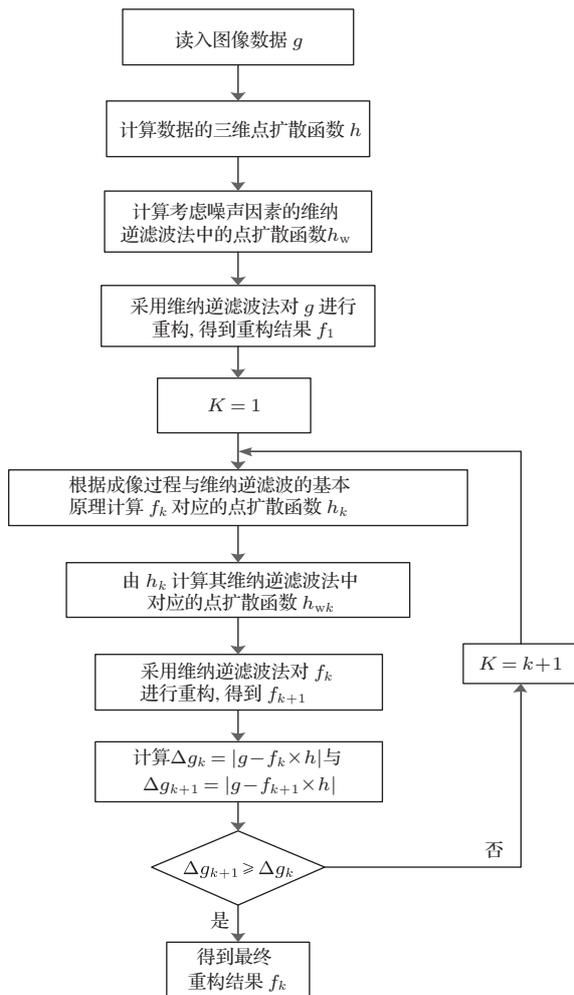


图3 基于改进维纳逆滤波的光谱重构流程

可求得 H_k , 继而可计算并确定将真实图像 f 模糊为 f_k 的点扩散函数 h_k . 重新以 f_k 为模糊数据, h_k 为点扩散函数, 可采用维纳逆滤波法进行再次重构, 得到更接近真实成像光谱数据 f 的重构结果 f_{k+1} . 通过迭代反复进行这一过程, 可最终得到清晰的重构结果.

2) 终止条件的确定

在一定迭代次数范围内, 随着迭代次数增加, 将不断得到更接近真实图像的模糊图像, 确定迭代的停止条件时, 采用初始点扩散函数 h 对每一次的复原结果进行模糊, 并将模糊结果与初始的模糊图像 g 进行比较, 可以得到此时模糊图像与初始模糊图像的差异

$$\Delta g_k = \sum |g - f_k * h|, \quad (19)$$

其中, $\sum |g|$ 表示图像 g 中所有像素取绝对值求和.

由于在进行迭代时, 每一次迭代采用维纳逆滤波法, 虽然已经对噪声的放大进行了抑制, 但仍会在一定程度上使噪声略微放大. 因此, 在进行重构过程中, 有两方面的因素会对 Δg_k 的值产生影响. 一方面, 通过迭代, 重复进行维纳逆滤波, 探测到数据的清晰度会逐渐提高, 更接近真实数据, 使 Δg_k 的值减小. 另一方面, 在对图像数据进行重构时, 虽然维纳逆滤波法已采取加入信噪比因子抑制噪声被极大的放大, 但在多次迭代的过程中, 噪声仍会在一定程度上被放大. 因此需根据图像数据是否为边缘、光谱特征点, 以及空间维和光谱维的邻域相关性, 进行噪声去除^[18,19]. 噪声去除会使图像的清晰度降低, 加大重构结果与真实数据的差异, 从而使 Δg_k 的值增大.

随着迭代次数的增加, 迭代得到的重构结果逐渐接近真实数据, 因此使图像清晰度提高的程度逐渐减小^[20], 即 Δg_k 值的减小幅度逐渐减小; 同时图像中的噪声逐渐增强, 因此进行噪声去除时使图像模糊的程度逐渐增大, 即 Δg_k 值的增大幅度逐渐增大. 因此, 综合考虑两方面因素对 Δg_k 值的影响, 随着迭代次数的增加, Δg_k 值的变化是一个先减小后增大的过程, 当 Δg_k 值取得最小值时, 得到最接近真实数据的重构结果, 可停止迭代.

若判定迭代的终止条件为

$$\Delta g_{k+1} \geq \Delta g_k, \quad (20)$$

则认为与 g_k 对应的重构结果 f_k 的模糊图像与初始模糊图像最为相似, 即 f_k 为最终的重构结果.

对数据重构后, 空间维的模糊以及光谱维离焦量的影响被消除, 得到真实可用的数据.

4 实验结果及分析

4.1 实验数据

根据衍射成像光谱仪的成像原理模拟得到的 30 波段, 512×512 像素, 光谱分辨率 15 nm, 光谱范围 450—900 nm 的高光谱图像数据.

4.2 结果分析

图 4(a), (b), (c), (d) 分别为采用 $\mu = 0, \sigma = 1.0, \mu = 0, \sigma = 1.5, \mu = 0, \sigma = 2.0, \mu = 0, \sigma = 2.5$ 的点扩散函数对模拟的清晰图像进行模糊后得到的图像数据.

图 5、图 6、图 7 分别为采用维纳逆滤波算法、Jansson-Van Citter 算法与本文提出的改进算法对图 3 进行光谱重构得到的重构结果.

由图 6 可知, 在点扩散函数的标准差较大, 如 $\sigma = 2.0$ 及 $\sigma = 2.5$ 时, Jansson-Van Citter 算法的重构结果中出现了较为严重的振铃, 严重影响了图像质量. 同时, 振铃现象也使对于图像质量的一些统计指标出现较大的偏差. 因此, 在点扩散函数的标准差较大时, Jansson-Van Citter 算法无法实现衍射成像光谱数据重构.

利用清晰度、细节能力、平均噪声等高光谱数据质量检验指标, 可进行对模糊图像与几种重构算法得到的重构结果评价.

清晰度反映了图像对微小细节差异的表达能力, 是重要的图像质量评价参数. 表 1 反映了维纳逆滤波法与本文提出的算法的重构结果的清晰度性能的比较. 其中, 边缘区域定义为图像中不同地物的交界处, 非边缘区域定义为同种地物的内部区域. 在衍射成像光谱仪的数据应用中, 相比非边缘区域, 边缘区域的数据往往具有更为重要的意义, 因此保证重构结果中边缘区域的数据质量尤为重要. 由表 1 可知, 维纳逆滤波法的重构结果在 $\sigma = 1.0$ 时边缘区域的清晰度为 311.54, 非边缘区域的清晰度为 126.85, 而在 $\sigma = 2.5$ 时维纳逆滤波法重构结果的边缘区域和非边缘区域的清晰度分别下降为 219.81 和 106.81, 其下降趋势非常明显. 而本文提出的改进算法的重构结果边缘区域与非边缘区域的清晰度在 $\sigma = 1.0$ 时为 293.24 与 103.56,

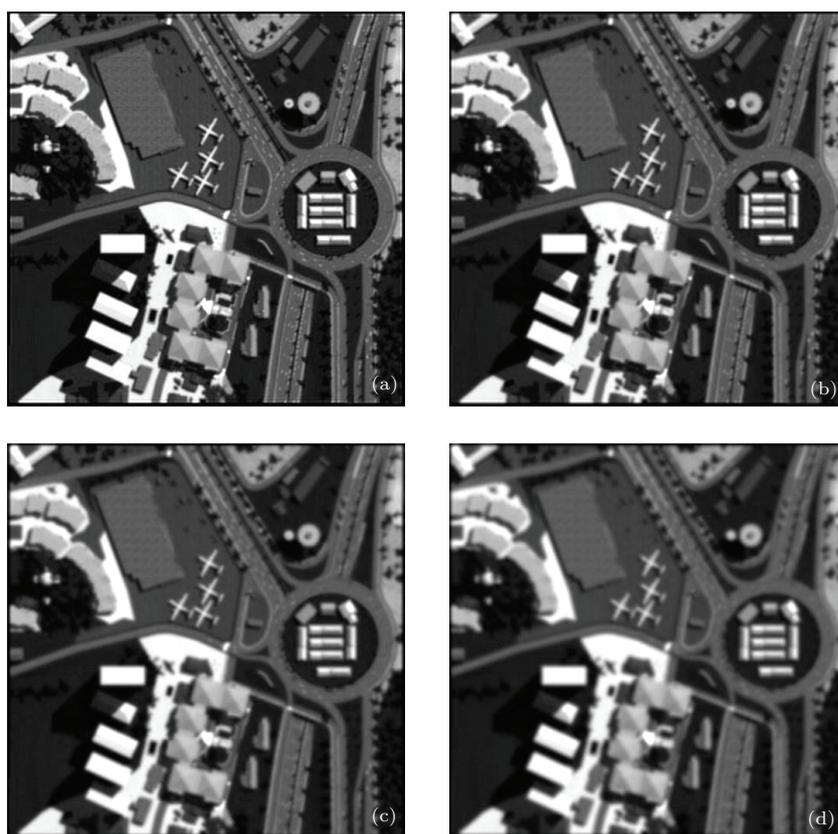


图4 不同点扩散函数的原始模糊图像 (a) $\sigma = 1.0$; (b) $\sigma = 1.5$; (c) $\sigma = 2.0$; (d) $\sigma = 2.5$

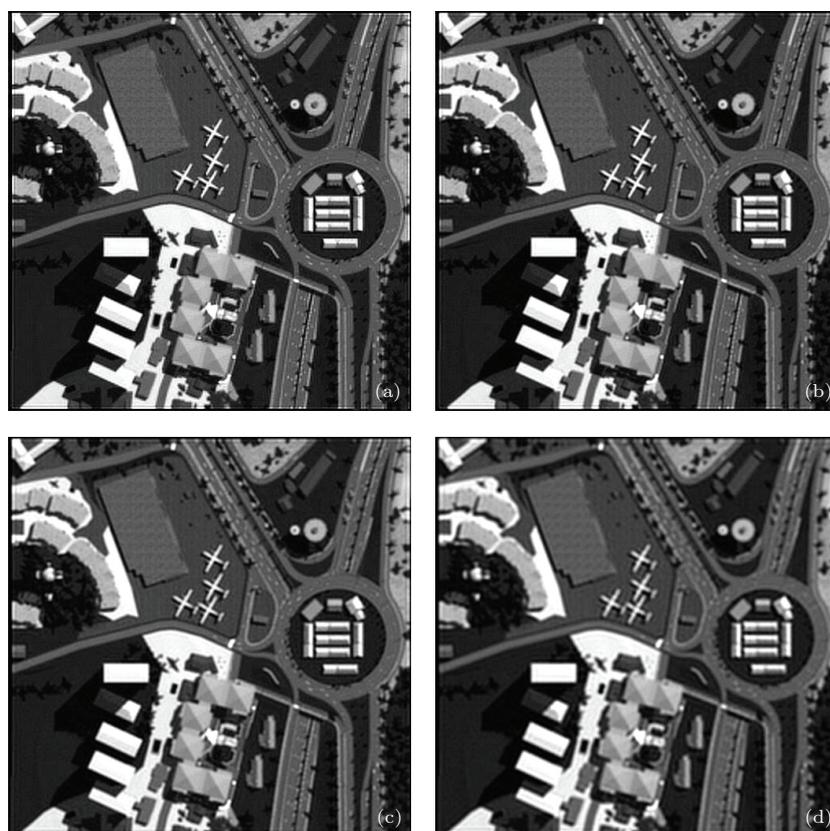


图5 维纳逆滤波法重构结果 (a) $\sigma = 1.0$; (b) $\sigma = 1.5$; (c) $\sigma = 2.0$; (d) $\sigma = 2.5$

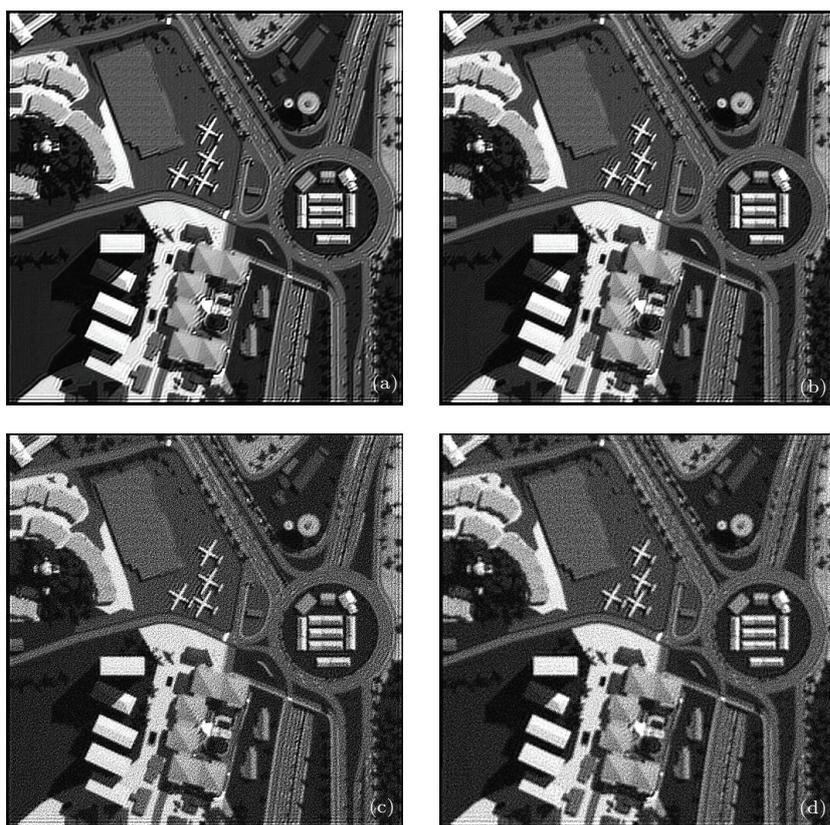


图6 Jansson-Van Citter 算法重构结果 (a) $\sigma = 1.0$; (b) $\sigma = 1.5$; (c) $\sigma = 2.0$; (d) $\sigma = 2.5$

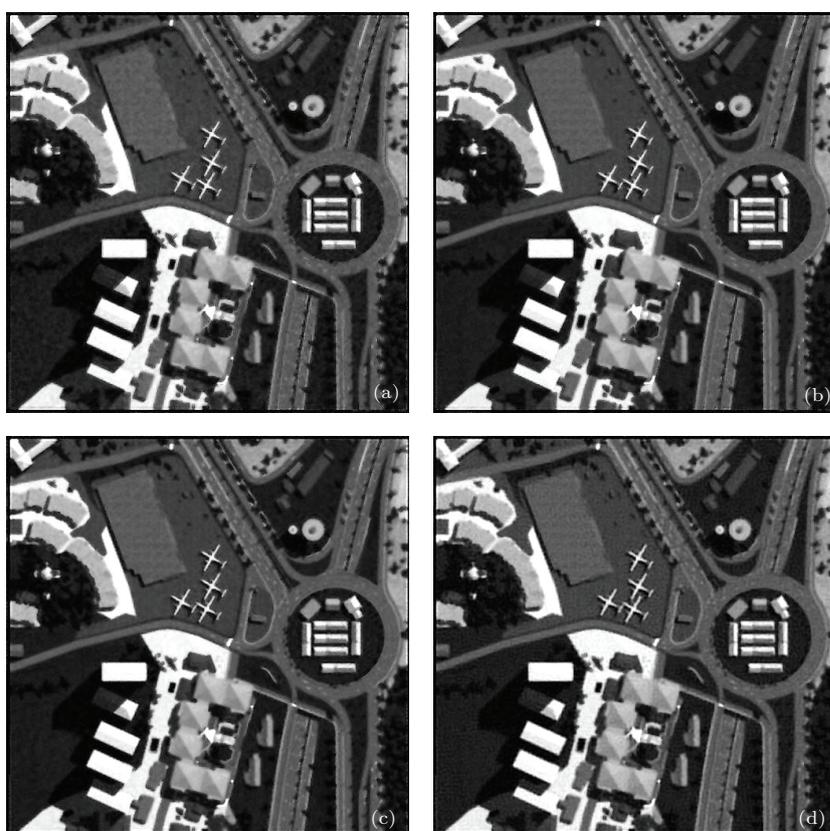


图7 本文提出的改进算法重构结果 (a) $\sigma = 1.0$; (b) $\sigma = 1.5$; (c) $\sigma = 2.0$; (d) $\sigma = 2.5$

在 $\sigma = 2.5$ 时为 275.42 与 104.21. 随着模糊图像点扩散函数标准差的增大, 维纳逆滤波法重构结果的清晰度下降较快, 而本文提出的改进算法对于模糊图像点扩散函数标准差的变化则不敏感, 具有比较稳定的重构结果. 在点扩散函数的标准差较大时, 本文提出的改进算法具有更高的清晰度.

表 1 模糊图像与常见算法重构结果清晰度比较

清晰度 (平均梯度)	边缘区域	非边缘区域	
模糊图像	$\sigma = 1.0$	281.98	104.78
	$\sigma = 1.5$	220.57	97.11
	$\sigma = 2.0$	178.87	91.08
	$\sigma = 2.5$	151.90	85.22
维纳逆滤波法	$\sigma = 1.0$	311.54	126.85
	$\sigma = 1.5$	289.06	119.92
	$\sigma = 2.0$	249.73	112.34
本文提出的改进算法重构结果	$\sigma = 1.0$	293.24	103.56
	$\sigma = 1.5$	295.04	102.87
	$\sigma = 2.0$	289.05	101.80
	$\sigma = 2.5$	275.42	104.21

细节能力反映了同一地物的图像质量变化情况, 同样是评价图像质量的一个常用的重要参数. 表 2 为不同点扩散函数的模糊图像与常见算法的重构结果细节能力的比较. 对于非边缘区域, 当原始模糊图像点扩散函数的标准差从 1.0 变化到 2.5 时, 维纳逆滤波法重构结果细节能力从 199.88 下降到 44.25, 而本文提出的改进算法的重构结果的细节能力仅从 109.63 下降到 89.01; 在边缘区域, 当原始模糊图像点扩散函数的标准差从 1.0 变化到 2.5 时, 维纳逆滤波法重构结果细节能力从 165.37 下降到 83.51, 本文提出的改进算法的重构结果的细节能力从 143.07 下降到 115.63. 可以看出, 在点扩散函数的标准差较大, 即图像模糊较为严重的情况下, 本文提出的改进算法重构结果的细节能力均远高于维纳逆滤波算法, 且在点扩散函数标准差越大的情况下, 具有的优势越明显.

从维纳逆滤波法与本文提出的改进算法重构结果清晰度与细节能力的对比结果可知, 本文提出

的改进算法在模糊图像的标准差较大的情况下, 相比传统的重构算法具有更好的重构结果. 且这一优势在图像的边缘区域体现更为明显.

表 2 模糊图像与常见算法的重构结果细节能力比较

细节能力	边缘区域	非边缘区域	
模糊图像	$\sigma = 1.0$	85.13	71.50
	$\sigma = 1.5$	55.19	33.83
	$\sigma = 2.0$	33.70	17.77
	$\sigma = 2.5$	28.28	11.85
维纳逆滤波法	$\sigma = 1.0$	165.37	199.88
	$\sigma = 1.5$	139.78	139.79
	$\sigma = 2.0$	109.70	77.25
本文提出的改进算法重构结果	$\sigma = 1.0$	143.07	109.63
	$\sigma = 1.5$	136.03	105.28
	$\sigma = 2.0$	124.90	101.35
	$\sigma = 2.5$	115.63	89.01

平均噪声为反映图像噪声水平的评价指标. 由表 3 可以看出, 维纳逆滤波法与本文提出的改进算法重构结果的平均噪声几乎相同. 在得到清晰度与细节能力更高的重建结果同时, 本文提出的重构算法没有进一步放大噪声.

表 3 模糊图像与常见算法的重构结果平均噪声比较

σ	1.0	1.5	2.0	2.5
模糊图像	3.44	3.12	2.86	2.54
维纳逆滤波法重构结果	4.80	4.43	4.25	4.12
本文提出的改进算法重构结果	4.68	4.32	3.94	4.43

为了验证重构光谱的正确性, 本文在 $\mu = 0$, $\sigma = 1.3$ 时进行了重构光谱的分析. 图 8 (a) 与 (c) 分别为模糊图像中典型地物——植被与土壤的光谱曲线, 图 8 (b) 与 (d) 则为重构结果中对应地物点的光谱曲线.

图 8 (b) 中植被的反射峰、吸收谷、植被的红边以及图 8 (d) 中光谱缓慢上升的特征都较原始数据更为明显, 可以明显看到, 重构结果中的光谱曲线更为接近真实光谱.

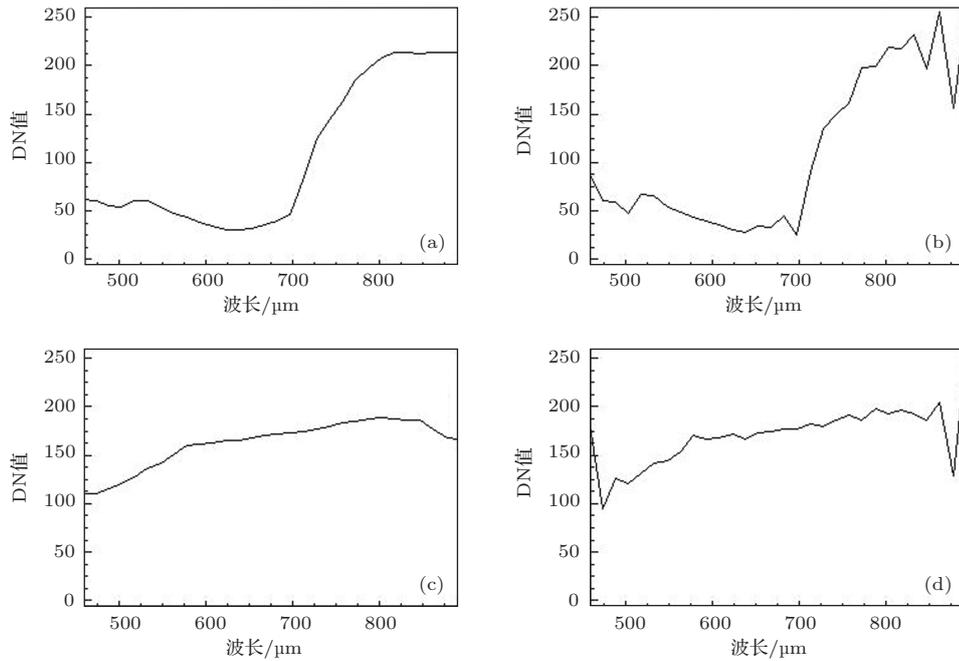


图8 光谱维重构结果对比 (a) 模糊图像植被光谱, (b) 重构结果植被光谱, (c) 模糊图像土壤光谱, (d) 重构结果土壤光谱

5 结 论

本文提出了一种基于维纳逆滤波的光谱重构算法, 可用于衍射成像光谱数据重构, 特别是对模糊较为严重、点扩散函数的标准差较大情况下数据重构取得满足应用需求的结果. 该方法将图像数据视为一个经过多次模糊得到的最终结果, 根据衍射成像光谱仪的成像过程与维纳逆滤波法的基本原理推导出中间过程中各次的模糊图像以及对应的点扩散函数, 通过多次反复进行逆滤波计算达到高质量光谱重构的目的; 并利用模拟数据进行方法性能验证, 从清晰度、细节能力和信噪比三个方面对不同点扩散函数的模糊图像采用维纳逆滤波法及本文提出的改进算法的重构结果进行了对比, 本文提出的改进算法在点扩散函数的标准差越大时, 相比传统的维纳逆滤波法拥有越好的重构结果. 在点扩散函数的标准差为2.5时, 图像模糊非常严重, 传统维纳逆滤波法重构结果边缘区域清晰度为219.81, 细节能力为83.51, 而本文提出的改进算法重构结果清晰度为275.42, 细节能力为115.63, 远高于传统维纳逆滤波法的重构结果. 实验结果表明, 本文提出的改进算法在点扩散函数标准差较大的情况下, 依然可得到清晰、无振铃的重构结果.

参考文献

- [1] Du H D, Huang S X, Shi H Q 2008 *Acta Phys. Sin.* **57** 7685 (in Chinese) [杜华栋, 黄思训, 石汉青 2008 物理学报 **57** 7685]
- [2] Chen S, Ong Y H, Liu Q 2012 *Proc. SPIE* **8553** 85531R
- [3] Valdivieso L G, Osorio C A, Guerrero J E 2011 *22nd Congress of the International Commission for Optics* 80119P
- [4] Tong Q X, Zhang B, Zheng L F 2006 *Hyperspectral Remote Sensing* (Beijing: Higher Education Press) p38-59 (in Chinese) [童庆禧, 张兵, 郑兰芬 2006 高光谱遥感 (北京: 高等教育出版社) 第38—59页]
- [5] Li R F, Shi F G, Qu L A 2001 *Optoelectronic Technology & Information* **14** 35 (in Chinese) [李睿凡, 师发刚, 瞿安连 2001 光电子技术与信息 **14** 35]
- [6] Li S P, Wang L Y, Yan B, Li L, Liu Y J 2012 *Chin. Phys. B* **21** 108703
- [7] Zhang H M, Wang L Y, Yan B, Li L, Xi X Q, Lu L Z 2013 *Chin. Phys. B* **22** 078701
- [8] Murayama Y, Ektessabi A I 2012 *SPIE-IS&T* **8296** 829614
- [9] Yu B 2003 *Ph. D. Dissertation* (Changchun: Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy OF Sciences) (in Chinese) [于斌 2003 博士学位论文 (长春: 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所)]
- [10] Tao Q C 2005 *Ph. D. Dissertation* (Chengdu: Sichuan University) (in Chinese) [陶青川 2005 博士学位论文 (成都: 四川大学)]
- [11] Kong X L, Li Y T, Yuan X H, Yu Q Z, Zheng Z Y, Liang W X, Wang Z H, Wei Z Y, Zhang J 2006 *Acta Phys. Sin.* **55** 2364 (in Chinese) [孔祥龙, 李玉同, 远晓辉, 于全芝, 郑志远, 梁文锡, 王兆华, 魏志义, 张杰 2006 物理学报 **55** 2364]

- [12] Zhao J 2006 *M. S. Dissertation* (Chengdu: Sichuan University) (in Chinese) [赵佳 2006 硕士学位论文 (成都: 四川大学)]
- [13] Liu Y 2006 *M. S. Dissertation* (Chengdu: Sichuan University) (in Chinese) [刘莹 2006 硕士学位论文 (成都: 四川大学)]
- [14] Ly N H, Du Q, James E 2012 *IEEE J. STARS* 1939–1404
- [15] Lyons D M 1997 *A Diffractive Optic Image Spectrometer* (DOIS) Rome: Rome Laboratory 59–70
- [16] Wang W Y 2010 *Comput. Eng.* **36** 227–228, 235 (in Chinese) [王文远 2010 计算机工程 **36** 227—228, 235]
- [17] Jiang Q S, Wang J Y 2003 *Acta Opt. Sin.* **23** 1335 (in Chinese) [蒋青松, 王建宇 2003 光学学报 **23** 1335]
- [18] Gao J, Zhang F Y, Xie W, Qin Q Q 2012 *Geomatics and Information Science of Wuhan University* **37** 322 (in Chinese) [高建, 张飞艳, 谢伟, 秦前清 2012 武汉大学学报·信息科学版 **37** 322]
- [19] Gonzalez R C, Woods R E (translated by Ruan Q Q, Ruan Y Z) 2009 *Digital Image Processing* (Beijing: Publishing House of Electronics Industry) pp134–136 (in Chinese) [拉斐尔 L 冈萨雷斯, 理查德 E 伍兹著 (阮秋琦, 阮宇智译) 2009 数字图像处理 (北京: 电子工业出版社) 第 134—136 页]
- [20] Wang K, Zeng Y, Ding Z H, Meng J, Shi G H, Zhang Y D 2010 *Acta Phys. Sin.* **59** 2471 (in Chinese) [王凯, 曾焱, 丁志华, 孟婕, 史国华, 张雨东 2010 物理学报 **59** 2471]

Error analysis and reconstruction for diffractive optic imaging spectrometer using the multiple iterations*

Li Na¹⁾ Jia Di¹⁾ Zhao Hui-Jie^{1)†} Su Yun²⁾ Li Tuo-Tuo²⁾

1) (School of Instrumentation Science and Opto-electronics Engineering, Beihang University, Beijing 100191, China)

2) (Beijing Institute Of Space Mechanics & Electricity, Beijing 100094, China)

(Received 23 February 2014; revised manuscript received 18 May 2014)

Abstract

Diffraction imaging spectrometer cannot acquire imaging spectral data without calculation and inversion. In this paper, the imaging process of the diffraction imaging spectrometer and the principle of the data error from both space and spectra are analyzed. To solve the problems of low definition of the reconstruction and the ringing in it occurring under the condition that the point spread function (PSF) is larger, a new algorithm is proposed based on improved inverse Wiener filtering. The improved method regards the reconstruction result of Wiener filtering as a new fuzzy image, and recalculates the PSF of the new fuzzy image based on the analysis of the diffraction characteristics and error. Inverse iterative Wiener filtering is used to improve the definition of the reconstruction, and then the noise needs to be removed according to the distribution of the spatial and spectral features. Simulated diffraction imaging spectral data are used to verify the correctness of the algorithm proposed in this paper. A reconstruction without ringing can be obtained when the standard deviation of PSF is 2.5, and both of the definition and detail ability are higher than those of the traditional reconstruction. The reconstruction using the improved algorithm proposed in this paper can satisfy the applications of the diffraction imaging spectral data.

Keywords: diffractive optic image, hyperspectral data, spectral reconstruction, point spread function

PACS: 78.20.Bh

DOI: 10.7498/aps.63.177801

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 61008047), the National High Technology Research and Development Program of China (Grant Nos. 2012AA12A30801, 2012YQ05250), the China Geological Survey Project (Grant No. 1212011120227), the Special Scientific Research Fund of Meteorological Public Welfare Profession of China (Grant No.201311036), and the Program for Changjiang Scholars and Innovative Research Team in University of Ministry of Education of China (Grant No.IRT0705).

† Corresponding author. E-mail: hjzhao@buaa.edu.cn