

基于期望值最大化的高光谱图像迭代复原算法

赵慧洁 曲磊* 程宣

(北京航空航天大学仪器科学与光电工程学院, 精密机电一体化技术教育部重点实验室, 北京 100191)

摘要 声光可调谐滤光器(AOTF)的谱线半峰全宽(FWHM)以及换能器结构的不理想导致图像退化,空间分辨率降低。为了提高光谱数据的空间分辨率,将计算机断层图像复原中的期望值最大化(EM)算法应用到降质图像预处理中,可在对图像模糊降质程度估计不准确时进行运算,利用迭代求解逐次逼近最终收缩于原始目标。实验结果表明,该算法不依赖于数字图像周期拼接的假设,因而有效避免了传统的去卷积复原算法中产生的边界振铃现象,提高了图像的空间分辨率,图像质量得到改善。该算法对改善 AOTF 高光谱成像质量有较大意义。

关键词 图像处理; 图像复原; 期望值最大化; 声光可调谐滤光器

中图分类号 TP751.1 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS20092908.2164

Iterative Restoration Algorithm Based on Expectation Maximization (EM) for Hyperspectral Image

Zhao Huijie Qu Lei Cheng Xuan

(Key Laboratory of Precision Opto-Mechatronics Technology, Ministry of Education, School of Instrument Science and Opto-Electronics Engineering, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100083, China)

Abstract The full width at half maximum (FWHM) of spectra of acousto-optic tunable filter (AOTF) and non-ideal transducer structure result directly in image degradation. In order to increase the spatial resolution of hyperspectral images, the expectation-maximization algorithm is utilized and optimized in pre-processing, and it could also be used even when degradation is not accurately estimated. The original target is ultimately approached by iterative method. Experimental results show that the algorithm does not depend on the assumption of the image spliced periodically, and thus efficiently avoids the defects of the traditional deconvolution method. This method increases the spatial resolution of the image, and improves image quality. It plays a significant role in improving image quality of AOTF hyperspectral image.

Key words image processing; image restoration; expectation maximization; acousto-optic tunable filter (AOTF)

1 引言

声光可调谐滤光器(AOTF)应用于光谱分析领域,具有在很宽的调谐范围内以很窄的带宽获得光谱信息的能力,这是传统的光栅、棱镜等分光器件所不具备的^[1]。然而在应用中,入射的光波和超声波都不是理想平面波,大大降低了图像的空间分辨率,甚至影响数据精度。如何解决这一问题一直是 AOTF 应用技术的一大关键^[2]。由于点扩展函数

(Point spread function, PSF)造成的图像降质复原一直是相关领域内的研究重点,相关算法有基于自相关^[3]与去卷积算法等,其中去卷积算法被广泛应用。

成像系统的点扩展函数是通过卷积效应对原始图像产生影响的,去卷积算法即利用反函数对获得的图像进行处理以得到原始图像。J. Yuan 等^[4]提出了基于曲线峰值的去卷积算法,J. Markham 等^[5]对显微图像提出了参量化去卷积方法,T. R. Lewis 等^[6]在 1991 年成功的对空间降质图像应用了去卷

收稿日期: 2008-10-29; 收到修改稿日期: 2008-12-16

基金项目: 国家自然科学基金(60678030)资助项目。

作者简介: 赵慧洁(1966—),女,教授,博士生导师,主要从事光电探测、高光光谱遥感等方面的研究。

E-mail: hjzhao@buaa.edu.cn

* 通信联系人。E-mail: q. qulei@gmail.com

积算法, A. Neri 等^[7]提出了基于贝叶斯算子的去卷积算法, 黄建明等^[8]提出了基于噪声特性的去卷积方法, 使得复原结果更加精确, E. Thiébaud^[9]详细讨论了对去卷积算法进行优化需要考虑的问题。

然而上述基于去卷积的操作引入了其他的图像质量问题, 包括边界相关振铃现象以及图像细节模糊, 且当图像降质程度未知时, 无法对去卷积操作过程进行控制。期望值最大化(EM)算法是计算机断层图像复原中的一种经典算法^[10]。J. J. Holmes 分析了将 EM 算法应用于成像光学系统处理的可能性^[11]。本文提出了一种基于期望值最大化的图像复原算法, 通过参数类比将 EM 算法应用到图像复原中, 将点光源通过系统后扩散的能量向期望值位置逐次迭代逐次集中, 而且当无法估计降质程度时, 还可以控制迭代次数实现理想的复原效果。

2 图像降质原理以及点扩展模型

实际应用于成像光谱仪器的 AOTF 均是基于非共线型声光可调谐滤光器的。根据声光互作用理论, 声光互作用过程可以表示为入射光波、衍射光波、超声波的动量互作用。对于声光可调谐滤光器, 声光互作用只发生在一个方向上, 所以点扩展函数也将只是这个方向上空间坐标的单变量函数^[12], 只需要确定衍射光的光强随衍射角的变化而改变的量即可确定点扩展函数。在小信号近似条件下, 衍射光波的光强可以用下式表达:

$$I_{out}(\lambda, \theta_d) = C^2 I_{inc}(\lambda) I_{acousto}(\alpha_{acousto}) \times \delta[\mathbf{k}_d(\lambda, \theta_d) - \mathbf{k}_i(\lambda, \theta_i) - \mathbf{k}_a(f, \alpha_{acousto})], \quad (1)$$

式中 I_{out} 为衍射光的光强分布, I_{inc} 为入射光的光强分布, $I_{acousto}$ 是超声波强度的分布, $\delta[\cdot]$ 是冲击函数, 反映了动量匹配条件的作用, C 是常数, θ_i 和 θ_d 分别为光波入射、衍射角, $\alpha_{acousto}$ 为超声波发散角, f 为超声波频率, λ 为光波波长, \mathbf{k}_i , \mathbf{k}_d 和 \mathbf{k}_a 分别为入射光、衍射光和超声波波矢。

根据线性系统传递函数理论以及傅里叶分析理论, 超声波强度对于超声发散角的分布正比于超声换能器外型结构傅里叶变换的平方。为了建立 PSF 函数的具体表达形式, 还需要引入如下两个约束条件: 1) 根据傅里叶变换的性质, 对超声换能器外形结构进行傅里叶变换, 自变量为二维空间角度变量, 衍射角对超声发散角近似为线性关系, 从而固定了点扩展函数 PSF 在横轴上的伸缩。2) 从能量守恒的角度, 不考虑成像过程中的能量损耗与元器件衰减, 原始图像与模糊图像应当具有能量总量的一致

性, 即: PSF 在衍射角分布范围内的积分应等于 1。这样, 点扩展函数在因变量轴上的伸缩也被固定了。图 1 给出了一种典型的六片独立的压电换能器结构与双片和四片换能器结构的 PSF 曲线。

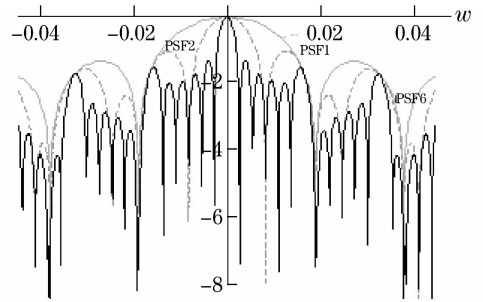


图 1 三种换能器结构的点扩展函数

Fig. 1 Point spread functions (PSF) of three kinds of transducer structure

3 基于 EM 算法的图像复原

3.1 期望值最大化算法原理

极大似然-期望值最大化方法 (Maximum likelihood-expectation maximization, 简称 ML-EM 或 EM) 是计算机断层扫描成像图像重建中的一种方法^[9,10]。在断层成像中, 探测器探测到的粒子的测量位置是利用一定规律的概率密度函数表示的, 期望值最大化就是利用这个概率密度函数以及探测器探测到的粒子的测量位置的信息反复对测量结果进行迭代, 最终得到粒子发射的正确位置, 从而恢复原始图像。具体的算法如下:

$$\hat{\lambda}^{(k+1)}(x) = \iint_{R^2} \frac{p_\epsilon(x-u)\hat{\lambda}^{(k)}(x)}{\iint_{R^2} p_\epsilon(z-u)\hat{\lambda}^{(k)}(z)dz} N du, \quad (2)$$

式中 $\hat{\lambda}^{(k+1)}$ 是第 $k+1$ 次迭代结果, p_ϵ 为光子接收器的位置误差概率密度函数, $N(du)$ 是位置在 $[(u_1, u_1 + du_1) \times (u_2, u_2 + du_2)]$ 的接收光子数量。这些特性与非相关光学成像系统的一些原理是类似的, 相应的文献^[9]也指出一些计算与处理方法是可类推的。对于图像点扩展模型, 进行如下假设: 原始目标平面是一个具有一定空间分布的点光子发射源所构成的平面, 而点源的空间分布即表示了原始图像的灰度级分布。这个源发出的光子经过成像系统后在像平面被探测器 (CCD) 探测收集, 最终成像。理想情况下, 点发射源发射的光子都按照统一的唯一确定的路线通过成像系统在像平面到达同一个确定的点, 这就对应于系统的光学传递函数 (OTF) 是冲击响应的情况。这样的假设对于 AOTF 成像光谱系统也是适用的, 只要假设光子发射源只发射超

声波频率对应的衍射光波长的光子即可。

对于 PSF 的影响可以这样理解,由位于目标平面中一点光源所发射的一个光子,它到达像平面某一点的概率是由 PSF 决定的。这样,考虑目标平面上分布的所有点光子源,只需要将 PSF 通过一定的变换表示成如下形式

$$P_{\text{PSF}}[(x_{\text{object}}, y_{\text{object}}), (x_{\text{image}}, y_{\text{image}})], \quad (3)$$

至此,就建立了 EM 算法应用于点扩展造成的降质图像复原的桥梁。下面给出图像复原处理用到的迭代公式^[10]以及公式中各个参量的含义。

$$f^{(k+1)}(i, j) = \frac{f^{(k)}(i, j)}{\sum_{m, n} P_{\text{PSF}}(i, j, m, n)} \cdot \sum_{m, n} \frac{P_{\text{PSF}}(i, j, m, n) f_0(m, n)}{\sum_{i', j'} P_{\text{PSF}}(i', j', m, n) f^{(k)}(i', j')}, \quad (4)$$

式中 $f^{(k+1)}(i, j)$ 表示对处理图像的第 $(k+1)$ 次迭代后的估计值, $f_{\text{PS}}(i, j, m, n)$ 表示由点扩展函数得到的概率密度函数, $f_0(m, n)$ 表示成像系统得到的原始灰度分布图像,即待处理图像。由于 $\sum_{m, n} f_{\text{PS}}(i, j, m, n) = 1$, 显然有

$$f^{(k+1)}(i, j) = f^{(k)}(i, j) \cdot \sum_{m, n} \frac{f_{\text{PS}}(i, j, m, n) f_0(m, n)}{\sum_{m, n} f_{\text{PS}}(i', j', m, n) f^{(k)}(i', j')}. \quad (5)$$

3.2 算法优化

对于图像中的每一个像点,该算法都要应用图像中所有像元的灰度值信息结合点扩展函数来进行重建,运算时间与图像水平和垂直两个方向的像素数目乘积的平方成正比。直接利用(5)式进行常规尺寸图像复原操作的效率是很低的,必须进行算法优化。

首先,(5)式对每一个像素都要进行四维求和,直接导致运行时间与图像尺寸的 4 次方成正比。然而求和是不依赖于具体的 m, n 值的,故将对的求 i', j' 和运算单独进行,计算一个四维数组,在进行 m, n 求和时只要从数组中读取相应的值即可。这样优化后的程序虽然占用内存较大,但是运算时间缩短为图像尺寸乘积的 2 倍。

其次,考虑分块运算。虽然第一步优化使得处理时间减小,但是对大尺寸图像仍然不合适,需要考虑分块处理,然后对每一个小块进行迭代运算,将迭代后的结果图进行拼接。但是由于分块后的边缘在算法中被当作是真正图像的边缘处理,导致每一个小块的边缘出现暗条纹,失真很严重。为了解决这

一问题,采用了交叉分块—交叉重组的方法,即对原始图像采用两种相互交错的分块策略进行分块,分别对这两组图像进行处理,在重建时只选取每一组分块的中间数据,避免了边缘的黑色暗条纹。

4 实验结果与分析

4.1 EM 算法迭代复原验证实验

为了验证 EM 算法对于图像复原的正确性,首先对图 2(a)所示的 $20 \text{ pixel} \times 20 \text{ pixel}$ 的图片进行迭代操作。背景表示为黑色,目标用不同灰度级的色块表示。图 2(c)给出了模拟的 PSF 曲线,图 2(b)是原始图像经过 PSF 函数的系统后的降质图像。图 3(a)给出了 78 次迭代过程的结果图。最后一次迭代的结果如图 3(b)所示。

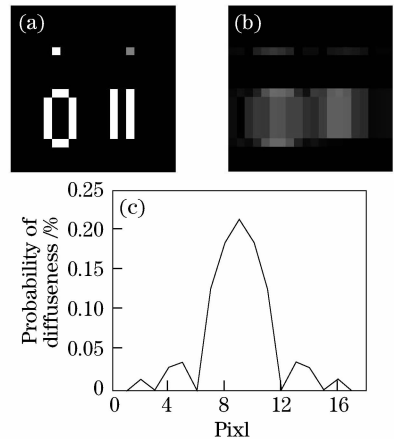


图 2 $20 \text{ pixel} \times 20 \text{ pixel}$ 图像。(a)原始图像;(b)模糊图像;(c) PSF 曲线

Fig. 2 $20 \text{ pixel} \times 20 \text{ pixel}$ image. (a) original image; (b) blurred image; (c) PSF curve

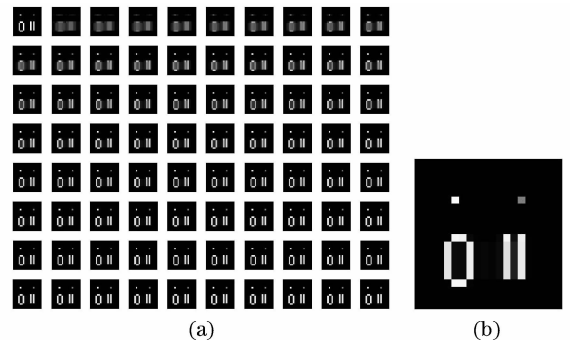


图 3 应用 EM 算法复原图像的迭代结果。(a)每一次迭代结果图;(b)第 78 次迭代结果图

Fig. 3 Iterative results of EM algorithm. (a) results for each iteration; (b) results for the 78th iteration

EM 算法从模糊的图像中复原得到了原始图像,而且迭代次数越高,复原效果越好。这在无法对

图像的降质程度进行先验估计的情况下是十分有用的。因为理论上传统的去卷积操作只能进行一次,多次进行去卷积会对图像质量造成很大的影响,利用 EM 迭代算法,当无法确定降质程度,可以设定阈值,以两次相邻迭代结果的均方差做为过程变量,进行控制。

4.2 对比实验

图 4 给出了一幅由六片换能器结构的 AOTF 成像标准分辨率图像。在声光互作用方向,由于 PSF 的较宽的主瓣以及旁瓣效应引起了严重的模糊,质量很差。为了对比 EM 算法的优点,首先给出了基于传统的反卷积方法的复原结果,如图 5 所示。

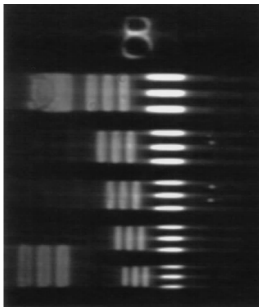


图 4 待处理的降质图像

Fig. 4 Degraded image to be treated

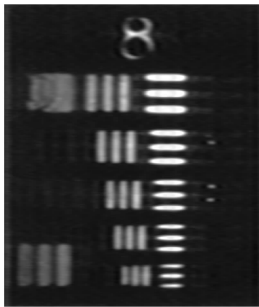


图 5 去卷积操作效果图

Fig. 5 Result obtained by using deconvolution

由 PSF 引起的模糊在一定程度上得到了去除,但是效果并不明显。而且,由于数字去卷积操作基于离散傅里叶变换,在计算时会高频(主要是图像中的突变以及边缘)进行截止,同时去卷积操作具有周期性,使得最后处理的图像出现所谓的边界相关振铃现象(Boundary related ringing),引入了新的图像降质问题。

图 6 给出了利用 EM 迭代得到的复原图像,清晰显示了期望值最大化算法的优势。通过迭代次数的逐渐提高,图像逐渐接近于原始目标,是去卷积算法所不具备的。并且这时不会出现去卷积操作中的

周期振铃现象。对比图 6(a),(c)中最下面一组分辨率条纹,EM 算法的处理结果的清晰程度有很大提高,去除了由于点扩展造成的图像降质,有效提高了空间分辨率,对图像进行了复原。

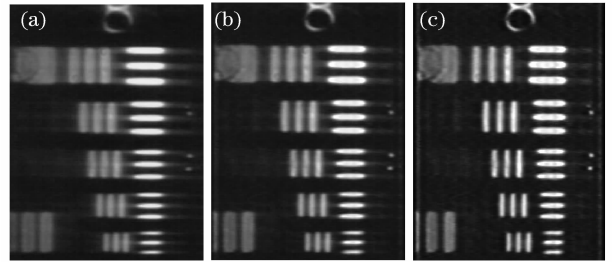


图 6 EM 算法复原图像。(a)未处理图像;(b) 5 次迭代结果;(c) 10 次迭代结果

Fig. 6 EM algorithm restoration image. (a) original image; (b) result of 5 iterations; (c) result of 10 iterations

5 结 论

将断层图像复原中的 EM 算法应用到高光谱图像预处理中。算法实质是将由点扩展造成的目标中某一个点的模糊斑向 PSF 函数的期望值位置收缩,而该算法每迭代一次,就将上一次收缩的结果再进行收缩,最终使得扩散的光斑收缩到目标位置。当图像灰度收缩以后,再进行迭代运算,处理后的结果基本没有什么变化,图像质量保持不变。可见,该算法可以在对于图像模糊降质程度估计不准确时进行运算,结果会逐渐逼近原始成像的目标,直至收缩于目标。这一优点是传统的去卷积操作所不具备的。

参 考 文 献

- 1 Xu Jieping. *Theory, Design and Application of Acoustooptic Devices*[M]. Beijing: Science Press, 1982. 32~41
徐介平. 声光器件的原理、设计和应用[M]. 北京: 科学出版社, 1982. 32~41
- 2 D. R. Suhre, N. Gupta. Acousto-optic tunable filter sidelobe analysis and reduction with telecentric confocal optics[J]. *Appl. Opt.*, 2005, **44**(27): 5797~5801
- 3 Zhao Lin, Jin Weiqi, Chen Yinan *et al.*. Blind restoration for defocus blurred image based on autocorrelation of derivative image[J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(9): 1703~1709
赵琳, 金伟其, 陈翼男等. 基于微分图像自相关的离焦模糊图像盲复原[J]. *光学学报*, 2008, **28**(9): 1703~1709
- 4 Jinghe Yuan, Ziqiang Hu. Image blind deconvolution based on kurtosis extrema[C]. *SPIE*, 2006, **60471**: 60171F
- 5 J. Markham, J. Conchello. Parametric blind deconvolution of microscopic images: Further results[C]. *SPIE*, 1998, **3261**: 38~49
- 6 T. R. Lewis, S. Mitra. Application of a blind-deconvolution restoration technique to space imagery[C]. *SPIE*, 1991, **1565**: 221~226
- 7 A. Neri, G. Scarano, G. Jacovitti. Bayesian iterative method for

- blind deconvolution[C]. *SPIE*, 1991, **1565**:196~209
- 8 Huang Jianming, Shen Mangzuo. Multiframe blind deconvolution restoration of atmospheric turbulence-degraded images based on noise characteristic[J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(9): 1860~1864
- 黄建明,沈忙作. 基于噪声特性的大气湍流退化图像多帧盲反卷积复原[J]. *光学学报*, 2008, **28**(9): 1860~1864
- 9 E. Thiébaud. Optimization issues in blind deconvolution algorithms[C]. *SPIE*, 2002, **4847**:174~184
- 10 J. M. Ollinger. Maximum-likelihood reconstruction of transmission images in emission computed tomography via the EM algorithm[J]. *IEEE T. Med. Imaging*, 1994, **13**(1):89~101
- 11 T. J. Holmes. Maximum-likelihood image restoration adapted for noncoherent optical imaging[J]. *J. Opt. Soc. Am. A*, 1988, **5**(5):666~673
- 12 Zhao Wenqian, Rao Changhui, Geng Zexun. Myopic image deconvolution of point source based on joint estimation of object and point spread function[J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, **27**(1): 34~40
- 赵文倩, 饶长辉, 耿则勋. 基于目标和点扩展函数联合估计的点源目标图像近视解卷积[J]. *光学学报*, 2007, **27**(1):34~40
- 13 E. S. Wachman, W. Niu, D. L. Farkas. Imaging acousto-optic tunable filter with 0.35-micrometer spatial resolution[J]. *Appl. Opt.*, 1996, **35**(25):5220~5226
- 14 D. R. Suhre, L. J. Denes, and N. Gupta. Telecentric confocal optics for aberration correction of acousto-optic tunable filters [J]. *Appl. Opt.*, 2004, **43**(6):1255~1260
- 15 D. R. Suhre and J. G. Theodore. White-light imaging by use of a multiple passband acousto-optic tunable filter[J]. *Appl. Opt.*, 1996, **35**(22):4494~4501
- 16 Wu Zhaoxia, Liu Li, Chai Xinyu. The simulated study of variable constraint ordered subsets expectation maximizaion (VCOSEM) [J]. *Chin. J. Biomed. Eng.*, 2004, **23**(1):1~4
- 吴朝霞,刘力,柴新禹. 可变约束 OS-EM 图像重建算法仿真研究[J]. *中国生物医学工程学报*, 2004, **23**(1):1~4