

文章编号:1004-4213(2010)02-0275-4

稀疏孔径光学系统成像的图像恢复算法研究

李波^{1,2}, 李艳¹, 李昕^{1,2}

(1 中国科学院西安光学精密机械研究所, 西安 710119)

(2 中国科学院研究生院, 北京 100049)

摘 要:提出两种稀疏孔径光学系统成像的图像恢复模型. 分析维纳滤波、最小二乘方滤波和极大似然法盲去卷积三种图像恢复算法的适用条件. 针对存在噪声干扰的稀疏孔径光学系统, 通过实验对比, 指出维纳滤波和最小二乘方滤波把相机光学传函当作系统传函, 其理论推导能够达到最优. 盲去卷积把大气传输函数和相机光学传函作为系统传函进行恢复, 其恢复结果优于维纳滤波带入常数 K 和最小二乘方滤波调整参量结果.

关键词: 图像处理; 维纳滤波; 盲去卷积; 稀疏孔径

中图分类号: TN911.73

文献标识码: A

doi: 10.3788/gzxb20103902.0275

0 引言

空间光学遥感分辨率标志着空间技术发展水平. 增大光学系统口径能够提高空间分辨率, 但受到制造成本和飞行器有效载荷限制. 有学者提出稀疏孔径的思想, 用特定排列小光学口径来代替大口径, 从而在减轻系统重量的同时, 获得相同的分辨率^[1-4]. 各子孔径空间分布结构不同, 其 MTF 截止频率特性也不同, 从而成像特性也不同, 比如 Golay3 和等边六孔径^[5]. 但不管采用哪种稀疏孔径结构, 由于通光面积减小, 系统信噪比降低, 需要对所获得图像采取一定图像滤波处理方法来提高图像质量. 理想条件下, 稀疏孔径非相干衍射受限光学系统成像过程的传函已知, 目前普遍采用维纳滤波来恢复目标图像^[6-8]. 也有学者提出维纳滤波结合小波去噪的改进方法, 取得了很好的恢复效果^[9].

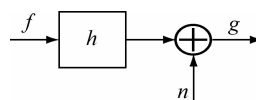
本文使用 Matlab 仿真 Golay3 结构稀疏孔径系统, 该光学系统为 Golay3 结构, 光瞳大小 $D = 30$ mm, 其系统点扩散函数 PSF_3 , 填充因子 $F = 0.34$. 为模拟实际成像中存在的 CCD 读入噪声和光子散射噪声等, 在图像中加入均值为 0、方差为 0.01 的高斯噪声.

1 稀疏孔径光学系统成像

衍射受限光学系统在非相干单色光照明下对遥远目标成像公式可以表示为

$$I_g(x_i, y_i) = I_f(x_i, y_i) * PSF(x_i, y_i) \quad (1)$$

即像平面光强分布 I_g 等于物光强分布 I_f 与系统点扩散函数 PSF 的卷积, 其为模型 1 为:



Golay3 的点扩散函数 PSF_3 为

$$PSF_3 = \left(\frac{\pi D^2}{4\lambda f}\right)^2 \left(\frac{2J_1(\pi r D/\lambda f)}{(\pi r D/\lambda f)}\right)^2 \left|\sum_{i=1}^3 e^{-\frac{2\pi i}{\lambda f}(xx_i + yy_i)}\right|^2 \quad (2)$$

式中 (x_i, y_i) 是第 i 个孔径圆心坐标, $J_1(*)$ 是一阶贝塞尔函数, $r = \sqrt{x^2 + y^2}$ 是系统焦平面上一点到坐标原点的距离.

本文采用航拍图 1(a) 作为目标图像, 经过 Golay3 光学系统后的带噪声图 1(b) 作为待恢复图像, 如图 1.



图 1 目标图像和待恢复图像
Fig.1 Target and to-be-restored image

2 维纳滤波方法

维纳滤波是一种经典的线性图像复原方法. 由于相机光学传递函数 OTF 可以在地面测得, 相机本身诸如 CCD 等固有噪声也能测定, 故可用先验知识获得目标图像和噪声的特征参量, 计算其功率谱

和自相关函数,则在模型 1 中,维纳滤波是有效反卷积并去噪方法。

对于目标图像 f (未退化图像),维纳滤波器寻找这样一个估计 \hat{f} ,它使得误差函数 $e^2 = E\{(f - \hat{f})^2\}$ 为最小。 E 是求期望, f 是未退化图像。在频域中表示为

$$\hat{F}(u, v) = G(u, v) \left[\frac{H^*(u, v)}{|H(u, v)|^2 + S_n(u, v)/S_f(u, v)} \right] \quad (3)$$

式中, $H(u, v)$ 为光学传递函数 OTF, $H^*(u, v)$ 为 $H(u, v)$ 的复共轭, $S_n(u, v)$ 为噪声功率谱, $S_f(u, v)$ 为未退化图像功率谱, $K = S_n(u, v)/S_f(u, v)$ 为噪信功率比。

在噪声和未退化图像功率谱已知的情况下,用其带入 K ,能够得到最佳的反卷积结果。在实际图像的噪声信号功率比未知的情况下,根据传感器的已知参量来估计,然后用变常数 K 带入,并观察恢复结果,从而找到最佳恢复图像^[9]。其结果如图 2 所示,其中图(a)为在维纳滤波公式中,代入实际计算出的噪信功率比 $K = 0.008$ 所得结果,噪声未得到有效抑制,图(b)为使用自相关函数所得的最优恢复图像。

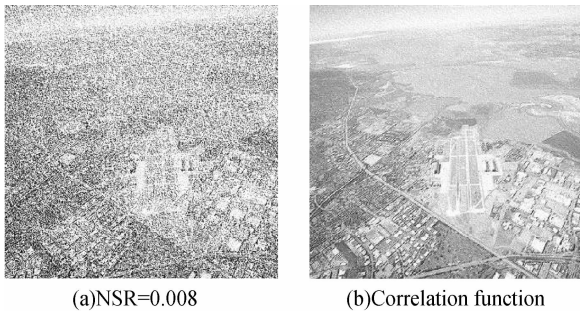


图 2 代入噪信功率比和自相关

Fig. 2 Use NSR and correlation function

3 最小二乘方滤波

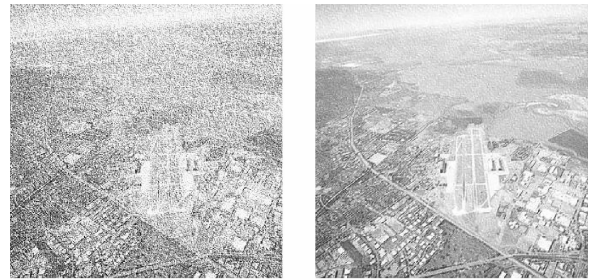
最小二乘方滤波亦称为正则滤波,也是一种线性恢复方法。与维纳滤波相比,它不需要知道噪信功率比,而只需从退化图像估计出噪声的均值和方差,然后以 $\|\eta\|^2 = MN[\sigma_\eta^2 + m_\eta^2]$ 作为初始估计,通过迭代,得到恢复图像。

与维纳滤波相同,考虑在频域进行恢复计算为 $\hat{F}(u, v) = \left[\frac{H^*(u, v)}{|H(u, v)|^2 + \gamma |P(u, v)|^2} \right] G(u, v)$ (4) 式中 $P(u, v)$ 是拉普拉斯算子的傅里叶变换。通过对 γ 进行调整,以使满足约束条件

$$\|g - \hat{H}f\|^2 = \|\eta\|^2 \quad (5)$$

式中 $\|\omega\|^2 = \omega^T \omega$ 是欧几里德向量范数

处理结果如图 3 所示,图(a)采用默认参量进行迭代,噪声依然很大,轮廓不是很清晰,结果不理想。(b)为调整参量后,所得的最佳结果。



(a) Target image

(b) To-be-restored image

图 3 正则滤波的两次结果

Fig. 3 Result of the least squares filtering

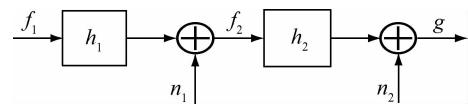
在对目标图像和噪声有足够先验知识的情况下,维纳滤波的结果更佳。若是不知道噪声功率谱的话,在实际使用中,最小二乘方滤波更为简单,估计出噪声均值和方差即可。其结果与维纳滤波相比,也是较好的。

4 盲信号处理

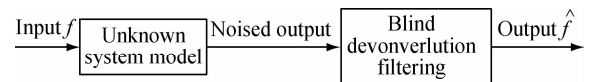
盲信号处理指的是在不知道目标图像(源信号)和系统传递函数(传输通道)参量的情况下,根据输入信号的统计特性,仅由观测信号恢复出源信号各个独立成分的过程。通常的盲信号处理可分为盲辨识、盲反卷积和盲信号分离。

传统的反卷积,建立在有足够的目标图像和噪声先验知识的基础上,从而实现最优估计,如维纳滤波器设计。可是,在不知道目标图像和系统传函参量情况下,模型 1 是具有局限性的,它把相机的光学传函 OTF 作为整个系统的传函。这里采用模型 2,把目标图像经过大气传输作为 h_1 ,大气扰动等噪声为 n_1 ;相机 OTF 作为 h_2 ,相机固有噪声作为 n_2 。

建立模型 2 为:



盲反卷积仅由系统的带噪输出对系统的输入进行重构,其工作模型为:



本文采用 Richardson-Lucy 算法^[10]。该算法是一种非线性迭代方法,原理是把图像看作是一个满足泊松分布的数学模型,通过极大化图像模型的似然函数来得到一个收敛的迭代公式^[11]

$$\hat{f}_{k+1}(x, y) = \hat{f}_k(x, y) \left[\frac{g(x, y)}{h(x, y) * \hat{f}_k(x, y)} \right] \quad (6)$$

在迭代中,本文给出约束条件和迭代次数,并使用“1”作为对 PSF 的初始估计,最终返回具有最大可能性的解.图 4 是迭代为 10 次左右的一个最佳结果,其信噪比达到了 46.



图 4 盲去卷积
Fig. 4 Blind deconvolution

实验显示,迭代 50 次以后,信噪比越来越差,不仅出现了毛边,局部甚至出现了错误的恢复.分析结合迭代过程极大似然法盲去卷积的实质是数值迭代过程,其点扩散函数 PSF 受其推测初值影响,其最终恢复图像受其迭代次数的影响.增加迭代次数,有时可以得到更好的结果.但由于噪声降质的作用,在迭代过程中某些像素处,所得到的恢复解可能与噪声更加匹配.也就是说,随着迭代次数增加,噪声也会被放大,从而迭代次数过多时,由于噪声放大影响,具有最大可能性的解的图像反而失真较大.

5 图像恢复评价

采用信噪比 SNR 来客观评价图像恢复的质量:

恢复方式	图 2(a)维纳滤波常数 K	图 2(b)维纳滤波代自相关
信噪比	11	110

恢复方式	图 3(a)正则参量 1	图 3(b)参量 2	图 4 盲去卷积
信噪比	23	37	46

比较维纳滤波、最小二乘方滤波和盲去卷积不同条件可知:1)维纳滤波需要知道噪声和图像先验知识,知道其系统传递函数.用自相关计算能够得到最优恢复,用功率谱比值计算需要手工操作.2)最小二乘方滤波不需要知道图像的先验知识,只需估计噪声参量,其结果往往可以和维纳滤波相比.3)极大似然法盲去卷积在不知道目标图像、噪声参量和系统传递函数的情况下,仅由带噪图像恢复出目标图像.

维纳滤波中所有参量已知,代入自相关所得结果,其信噪比达到 110,在去噪和恢复图像细节方面,无疑是最优恢复,在理论研究方面(采用模型 1)具有重要意义.但实际中不能得到其自相关,故多使用常数 K 带入的方法.

维纳滤波代入常数 $K=0.008$ 的结果是信噪比为 11,正则滤波调整参量的结果分别是 23 和 37.相比之下,极大似然法盲去卷积采用模型 2,恢复图像的信噪比达到 46,明显更优.

6 结论

稀疏孔径光学系统在减轻系统重量、取得高分辨率同时,也需要对其成像进行有效恢复.本文提出两种图像恢复模型.

以往稀疏孔径光学系统成像恢复都是使用维纳滤波方法.本文认为,非相干衍射受限稀疏孔径光学系统的理想成像过程的光学传函已知,在模型 1 的条件下能够取得最大程度的恢复.可由于大气传输扰动的影响,实际成像如模型 2,使用盲信号处理是更为恰当的手段,并且其恢复效果比维纳滤波代入噪信比恢复结果更优,也比正则滤波调整参量要优.实验结果表明,可采用盲信号处理.

参考文献

- [1] MEINEL A B, MEINEL P M. Large sparse-aperture space optical systems[J]. *Opt Eng*, 2002, **41**(8): 1983-1994.
- [2] ROBERT D F, THEODORE A T. Image quality of sparse-aperture designs for remote sensing[J]. *Opt Eng*, 2002, **41**(8): 1957-1968.
- [3] QIAN Lin, WU Quan-ying, WU Feng, et al. Study on imaging of dual three sub-apertures design [J]. *Acta Optica Sinica*, 2005, **25**(8): 1030-1035.
钱霖, 吴泉英, 吴峰, 等. 复合三子镜的成像研究[J]. *光学学报*, 2005, **25**(8): 1030-1035.
- [4] WU Quan-ying, QIAN Lin, SHEN Wei-min. Imaging research on sparse-aperture systems of symmetrical configuration [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2006, **35**(8): 1259-1262.
吴泉英, 钱霖, 沈为民. 两种对称型稀疏孔径系统的成像研究[J]. *光子学报*, 2006, **35**(8): 1259-1262.
- [5] YI Hong-wei, LI Ying-cai, FAN Chao. Research on puple configuration of equilateral six sub-apertures [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2007, **36**(11): 2062-2065.
易红伟, 李英才, 樊超. 稀疏孔径等边六孔径结构研究[J]. *光子学报*, 2007, **36**(11): 2062-2065.
- [6] WU Quan-ying, QIAN Lin, SHEN Wei-min. Image recovering for sparse-aperture systems [J]. *Laser Journal*, 2005, **26**(6): 40-42.
吴泉英, 钱霖, 沈为民. 稀疏孔径系统的成像和图像复原[J]. *激光杂志*, 2005, **26**(6): 40-42.
- [7] WANG Da-yong, FU Xi-yang, GUO Hong-feng, et al. Imaging and image reconstruction of optical sparse-aperture systems [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2005, **34**(10): 1557-1560.
王大勇, 伏西洋, 郭红锋, 等. 光学稀疏孔径系统的成像及其图像复原[J]. *光子学报*, 2005, **34**(10): 1557-1560.
- [8] WANG Da-yong, HAN Ji, LIU Han-cheng, et al. Imaging of optical sparse aperture systems and evaluate method[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2008, **37**(6): 1208-1212.

- 王大勇,韩骥,刘汉承,等. 光学稀疏孔径系统的成像及其评价方法[J]. 光子学报,2008,**37**(6):1208-1212.
- [9] ZHU Xi-Fang, WU Feng, TAO Chun-kan. Research on image restoration for sparse aperture systems [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2007,**36**(12):2319-2324.
- 朱锡芳,吴峰,陶纯堪. 稀疏孔径光学系统成像恢复算法研究[J]. 光子学报,2007,**36**(12):2319-2324.
- [10] LUCY L. B. An iterative technique for the rectification of observed distributions[J]. *The Astronomical Journal*, 1974,**79**(6):745-754.
- [11] HOLMES T J. Light microscopy images reconstructed by maximum likelihood deconvolution, in handbook of biological and confocal microscopy[M]. 2nd ed, PAWLEY J B, ed. New York: Plenum Press, 1995, 389-402.

Research on the Image Restoration for Sparse Aperture Optical Systems

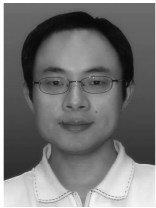
LI Bo^{1,2}, LI Yan¹, LI Xin^{1,2}

(1 *Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanical of Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710119, China*)

(2 *Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China*)

Abstract: Two models of the image restoration for sparse aperture optical systems are proposed. The adapted condition is analysed about Wiener filtering, least squares filtering and MLE blind deconvolution. According to the experiment, the issue points out Wiener filtering and least squares filtering use camera lens' OTF as the whole system MTF. In theory the Wiener filtering can make the best image restoration. Considering sparse aperture optical systems with noises, the blind deconvolution uses the atmosphere transfer function and the lens' OTF as the system MTF to have a image restoration. The result is better than Wiener filtering using constant K and least squares filtering.

Key words: Image processing; Wiener filtering; Blind deconvolution; Sparse aperture



LI Bo was born in 1978. Now he is studying for his M. S. degree at Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics of CAS, and his research interests focus on image processing.