

·信号与信息处理·

两种稀疏孔径光学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, 陕西 西安 710119; 2. 中国科学院研究生院, 北京 100039)

摘要:根据稀疏孔径光学系统成像的图像恢复模型, 分析维纳滤波和最小二乘方滤波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, 维纳滤波的理论推导能够达到最优. 通过实验对比, 指出噪声功率谱未知情况, 最小二乘方滤波的恢复结果优于维纳滤波结果.

关键词:图像处理; 最小二乘方滤波; 维纳滤波; 稀疏孔径

中图分类号: TN911.74

文献标识码: A

文章编号: 1673-1255(2009)03-0056-03

Two Algorithms of Images 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 CAS, Xi'an 710119, China;

2. Graduate University of the Chinese Academy of Science, Beijing 100039, China)

Abstract: According to the model of images restoration for sparse aperture optical systems, the adapted conditions to the algorithms of image restoration for the Wiener filtering and the least squares filtering are analyzed. Considering sparse aperture optical systems with noises, the theoretically calculation of Wiener filtering could be optimized. By contrasting with the experiments, it is known that the restoration result of the least squares filtering is better than that of the Wiener filtering in the case of having not known the noise power spectrum.

Key words: image processing; least squares filtering; wiener filtering; sparse aperture

空间技术的发展水平通常以空间光学遥感分辨率为标志. 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的限制. 为了解决这个问题, 提出了稀疏孔径的方法, 即用特定排列小光学口径来代替大口径, 从而在减轻系统质量同时, 获得相同分辨率^[1-4]. 由于通光面积减小, 系统信噪比降低, 就需要提高成像质量. 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, 目前国内普遍采用维纳滤波来恢复目标图像^[5-7]. 也有学者提出维纳滤波结合小波去噪的改进方法^[8].

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,

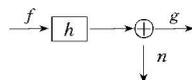
在图像中加入均值为 0、方差为 0.01 的高斯噪声.

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, 其模型如下:



Golay3 的点扩散函数 PSF_3 为

$$PSF_3 = \left(\frac{\pi D^2}{4\lambda f}\right)^2 \left(\frac{2J_1(\pi r D / \lambda f)}{(\pi r D / \lambda f)}\right)^2.$$

收稿日期: 2009-03-25

作者简介: 李波(1978-), 男, 江西上饶人, 硕士研究生, 研究方向为图像信号与信息处理.

$$\left| \sum_{i=1}^3 e^{\frac{2\pi i}{\lambda f}(xx_i + yy_i)} \right|^2 \quad (2)$$

式中, (x_i, y_i) 是第 i 个孔径圆心坐标; $J_1(g)$ 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。

采用航拍图图 1a 作为目标图像, 经过 Golay3 光学系统后的带噪图图 1b 作为待恢复图像, 如图 1 所示。

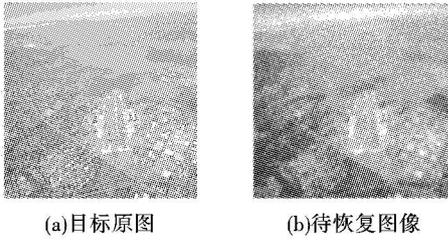


图 1 目标图像和待恢复图像

2 维纳滤波方法

采用线性图像复原的维纳滤波是一种经典的复原方法. 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数, 计算其功率谱和自相关函数, 则在所建模型中, 维纳滤波是有效反卷积并去噪方法。

对于未退化的目标图像 f , 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. 式中, E 是求期望, f 是未退化图像. 它在频域中表示为

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

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; $K = S_n(u, v)/S_f(u, v)$ 为噪声功率比。

在噪声和未退化图像功率谱已知的情况下, 用其代入 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数来估计, 然后用变常数 K 代入, 并观察恢复结果, 从而找到最佳恢复图像^[8]. 其结果如图 2 所示, 其中图 2a 为在维纳滤波公式中, 代入实际计算出的噪声功率比 $K = 0.008$ 所得结果, 噪声未得到有效抑制, 图 2b 为使用自相关函数所得的最优恢复图像。

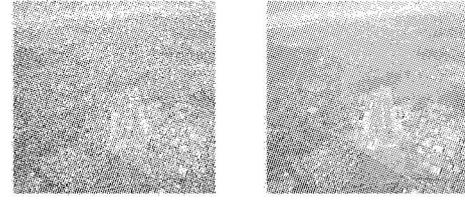


图 2 代入噪声功率比和自相关

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. 维纳滤波存在的问题是, 退化图像和噪声的功率谱必须是已知的. 约束最小二乘方滤波与维纳滤波相比, 它不需要知道噪声功率比, 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. 通常说来, 从所获得的退化图像中, 往往都能估计出噪声的均值和方差, 从而具有实际使用的价值。

约束最小二乘方是寻找这样一个估计 \hat{f} , 它使 $\|Q\hat{f}\|^2$ 得为最小, 且服从 $\|g - H\hat{f}\|^2 = \|\eta\|^2$, 故可写出寻找极值的准则函数

$$J(\hat{f}) = \|g - H\hat{f}\|^2 + \gamma \|Q\hat{f}\|^2 \quad (4)$$

其中, Q 为 \hat{f} 的图像运算因子, 采用高通滤波器, 以保留图像的边缘和细节; γ 为拉格朗日算子, 既要保持对原始解忠实, 又要使其平滑, 起到平衡因子的作用, 称为正则参数。

$$\text{令 } \frac{\partial J(\hat{f})}{\partial \hat{f}} = 2\gamma Q^T Q\hat{f} - 2H^T(g - H\hat{f}) = 0$$

$$\text{从而有 } \hat{f} = (H^T H + \gamma Q^T Q)^{-1} H^T g \quad (5)$$

其对应频域表达式为

$$\hat{F}(u, v) = \left[\frac{H^*(u, v)}{|H(u, v)|^2 + \gamma |Q(u, v)|^2} \right] \cdot G(u, v) \quad (6)$$

式中, $Q(u, v)$ 是拉普拉斯算子 $q(x, y)$ 的傅里叶变换. 通过对 γ 进行调整, 以使满足约束条件

$$\|g - H\hat{f}\|^2 = \|\eta\|^2 \quad (7)$$

式中, $\|W\|^2 = W^T W$ 是欧几里德向量范数. 拉普拉斯算子 $q(x, y)$ 为

$$q(x, y) = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 1 & -4 & 1 \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \quad (8)$$

实际上, 由于 γ 依赖于 \hat{f} , 式(6)不能直接求解,

故采用迭代方法处理

$$\hat{f}_{k+1} = \hat{f}_k + [H^T g - (H^T H + \gamma Q^T Q) \hat{f}_k] \quad (9)$$

其终止条件为

$$\Delta^k = \frac{\|\hat{f}_{k+1} - \hat{f}_k\|^2}{\|\hat{f}_k\|^2} \quad (10)$$

处理结果如图 3 所示,图 3a 采用默认计算所得的参数 586 和 $[10^{-9}, 10^9]$ 进行迭代,噪声依然很大,轮廓不是很清晰,结果不理想.图 3b 为调整参数为 200 和 $[10^{-7}, 10^7]$ 后,所得的最佳结果.

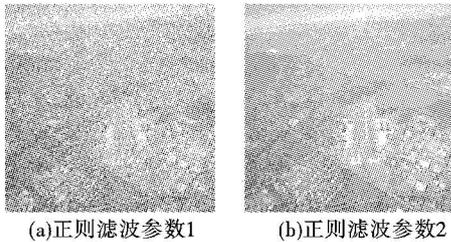


图 3 正则滤波的 2 次结果

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,也是更优.

4 图像恢复评价

图像恢复评价分为主观和客观 2 种方式.采用信噪比 SNR 来客观评价图像恢复的质量如表 1.

比较维纳滤波和最小二乘方滤波在成像恢复的不同条件可知:①维纳滤波不光需要知道其系统传递函数,还要知道噪声和图像先验知识.若是知道噪声功率谱,则可用自相关计算来得到最优恢复.若是用功率谱比值计算需要手工操作,并且其结果不是最优.②最小二乘方滤波不需要知道图像的先验知识,只需估计噪声参数,对给出的迭代初始值和终止条件进行迭代,直到符合条件,对其做傅里叶逆变换

表 1 信噪比评价图像恢复质量

	图 2a	图 2b
恢复方式	维纳滤波代常数 K	维纳滤波代自相关
信噪比	11	110
	图 3a	图 3b
恢复方式	正则滤波参数 1	正则滤波参数 2
信噪比	24	37

即为所恢复图像.在同样给出一个经验值的情况下,经过若干次实验,其结果往往比维纳滤波代入常数 K 的结果要好.

维纳滤波中所有参数已知,则可对每一点进行计算,将自相关所得结果代入,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,在理论研究方面具有重要意义.但实际中得不到每一点的噪声,即不能使用其自相关代入,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,远不如使用正则滤波所得结果,2 次调整参数的结果分别是 24 和 37.相比之下,最小二乘方滤波明显更优.

5 结 论

稀疏孔径光学系统在减轻系统质量、取得高分辨率同时,也需要对其成像进行有效恢复.

以往稀疏孔径光学系统成像恢复都是使用维纳滤波方法,它建立在最小化统计准则基础上,在平均意义上它是最优的.实验结果表明,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,但噪声功率谱未知,则根据退化图像估算出噪声均值和方差所得的最小二乘方滤波结果通常要比维纳滤波代入噪声比为常数 K 的结果要优.

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] 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] 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] 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.
- [6] 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.
- [7] 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).

(下转第 62 页)

从图 3 融合图像可以看出,各种方法均获得了大小闹钟均清晰的图像,但基于文中方法的融合图像细节表现更加清楚.另外从表 1 中数据也可以看出,此方法得到的融合图像的评价参数均为最好,所以提出的基于 DT-CWT 的多分辨率图像融合方法得到的融合图像最清晰,细节最丰富,包含的信息量最大,融合效果最好,是一种行之有效的方法.

4 结 论

针对多聚焦图像的成像特点,在详细讨论 DT-CWT 的基础上,提出了一种基于 DT-CWT 和图像对比度的图像融合算法.该方法首先利用 DT-CWT 对输入图像进行多尺度和多方向分解,并根据双树复小波域各分解子带的系数特性定义了局部方向对比度,基于此在高频域采用基于方向对比度的融合规则,而在低频域采用基于图像清晰度的融合策略.实验结果表明,该算法能够很好地将不同聚焦图像中的重要信息提取并注入到融合图像中,并且无论是视觉效果还是客观评价参数,与其他方法相比较,该方法均取得了更好的融合效果,提高了融合图像的质量,能够更加有效地融合多聚焦图像.

参考文献

[1] 王红梅,张科,李言俊.基于小波变换的图像融合方法

(上接第 49 页)

整数.为了提高测温精度,要严格按照 DS1820 的时序要求去操作.

5 结 论

在传统的温度测量系统中,往往采用模拟的温度传感器进行设计,必须经过 A/D 转换后才可以被微处理器识别和处理.这样的设计方法不仅对前端模拟信号处理电路提出了更高的要求,而且不具有数字通信和网络功能.结合 DS1820 的新特性和现代温度测量系

(上接第 58 页)

[8] 朱锡芳,吴峰.基于小波阈值法和维纳滤波的稀疏孔径光学系统成像的恢复[J].应用光学,2007,28(5):526-530.

[9] Lucy, L. B. An Iterative Technique for the Rectification of Observed Distributions[J]. The Astronomical Journal,

[J]. 红外与激光工程, 2005, 34(3): 328-332.

[2] N Kingsbury. The dual-tree complex wavelet transform: a new technique for shift invariance and directional filters [C]//Proceedings of 8th IEEE Digital Signal Processing Workshop. Bryce Canyon, Utah, USA;1998:86-89.

[3] N Kingsbury. The dual-tree complex wavelet transform: a new efficient tool for image restoration and enhancement[C]//Processing of EUSIPCO, 1998:319-322.

[4] N Kingsbury. Image processing with complex wavelets [J]. Philosophical Transactions: Mathematical Physical and Engineering Sciences, 1999, 357: 2543-2560.

[5] N Kingsbury. Shift invariant properties of the dual-tree complex wavelet transform[J]. IEEE International Conference on Acoustics Speech and Signal, 1999(3):1221-1224.

[6] 杨晓慧,金海燕,焦李成.基于 DT-CWT 的红外与可见光图像自适应融合[J].红外与毫米波学报,2007,26(6):419-421.

[7] 李玲玲.像素级图像融合方法研究与应用[D].武汉:华中科技大学,2005.

[8] 蒲恬,方庆,倪国强.基于对比度的多分辨率图像融合[J].电子学报,2000,28(12):116-118.

[9] 王亚杰,付萍,李殿起,等.基于多策略的多聚焦图像融合方法[J].光电工程,2007,34(8):93-96.

[10] Eltoukhy Helmy A, Kayusi Sam. A Computationally Efficient Algorithm for Multi-focus Image Reconstruction[J]. SPIE,2003,5017:332-341.

统提出的新要求,提出了基于智能数字温度传感器 DS1820 的高精度、多点温度测量系统设计方案.该方案具有安装方便、数字化程度高、精度高、适应性强等特点,在多种温度检测中具有广阔的应用前景.

参考文献

[1] 蒋鸿宇. DS18B20 构成的多点温度测量系统的设计 [J]. 单片机与嵌入式系统应用, 2004.

[2] 聂毅. 单片机定时器中断时间误差的分析及补偿 [J]. 在微计算机信息, 2002, 18(4): 37-38.

[3] 求是科技. 单片机典型模块设计实例导航 [M]. 北京: 电子工业出版社, 2005: 166-176.

1974, 79(6): 745-754.

[10] Holmes, T. J., et al. Light Microscopy Images Reconstructed by Maximum Likelihood Deconvolution, in Handbook of Biological and Confocal Microscopy [M]. 2nd ed. J. B. Pawley, ed.: Plenum Press, Ny, 1995: 389-402.