

相位差图像复原技术研究

李斐[†]

(中国北方电子设备研究所, 北京 100083)

(2012年4月20日收到; 2012年6月29日收到修改稿)

大气湍流、系统像差等因素会使入射光的波前发生畸变, 从而降低成像系统的成像质量. 相位差图像复原技术是针对波前畸变发展起来的图像复原方法, 它具有无需参考目标和退化函数、收敛性好等优点, 可以提高图像的分辨率和清晰度, 增加图像的信息量, 改善图像的视觉效果, 在图像复原领域有着广阔的应用前景. 本文对相位差图像复原技术进行了研究, 借用光学系统中光学传递函数、调制传递函数和点扩散函数的概念对相位差图像复原技术的性能进行了分析, 并进行了数值仿真和实验验证. 结果表明, 相位差图像复原技术不仅可以克服像差对成像质量的影响, 而且可以对截止频率以内的低频信息进行增强, 提高图像的对比度, 从而使获得的图像优于衍射受限系统所成的像.

关键词: 图像复原, 相位差法, 光学传递函数

PACS: 02.30.Zz, 42.30.Wb, 42.40.Lx, 42.15.Fr

1 引言

无论观测目标是星际物体还是地面场景, 大气扰动和成像系统的像差等因素都会降低成像系统的分辨能力, 引起成像质量的下降. 对于大多数成像系统, 单纯从硬件方面提高成像质量将带来巨大的成本和技术压力^[1], 因此, 研究图像复原技术来提高图像的分辨率有着极大的现实意义和应用价值. 图像复原就是利用降质现象的某种先验知识来重建被降质的原始图像^[2], 以改善图像的分辨率和清晰度, 增加图像的信息量, 改善图像的视觉效果.

由于图像复原本身是一个病态的反问题, 因此需要加入先验约束将病态问题转化为良态. 常用的图像复原技术主要有斑点成像^[3]、解卷积^[4]、盲解卷积^[5]等. 斑点成像技术已经比较成熟, 但它需要采集大量图像、计算量大、对计算机硬件要求高, 并且需要点目标作为参考, 这就大大限制了其应用范围. 解卷积技术需要预先知道图像的退化函数, 通常需要使用波前探测器, 对硬件的要求比较高, 因此常作为自适应光学系统的一部分被使

用. 盲解卷积技术由于具有无需参考目标和退化函数等优点而被广泛应用, 但算法的收敛性能还需要改进, 特别是在低光子水平或噪声较大的情况下. 为了增加了约束条件, 增强解的唯一性, Gonsalves等^[6]提出了相位差 (phase diversity, PD) 图像复原技术, 该技术被认为是盲解卷积的一种, 其基本原理是在成像系统的焦面和离焦面处同时采集一对图像, 然后利用这一对图像解算波前信息并复原目标图像. 1992年, Paxman等^[7]将PD方法应用于大气湍流退化图像的恢复研究中, 他们将斑点成像技术和PD的思想相结合, 提出了在焦面上和离焦位置上采集多对短曝光像进行图像复原的方法, 改善了求解过程的收敛性. 目前, PD图像复原技术已成功应用于太阳观测^[8]、卫星观测^[9]以及水平方向的景物观测领域^[10], 并取得了较好的效果.

与斑点成像技术相比, PD图像复原技术采集图像少、不需要参考目标, 与一般盲解卷积相比, PD增加了约束条件, 具有更好的收敛性和更快的收敛速度. 本文借用光学系统中光学传递函数 (OTF)、调制传递函数 (MTF) 和点扩散函数 (PSF) 的概念对PD图像复原技术的性能进行

[†] E-mail: sdlifei2008@163.com

了详细分析. 结果表明, PD 图像复原技术不仅可以克服像差对成像质量的影响, 而且可以对截止频率以内的低频信息进行增强, 从而使获得的图像优于衍射受限系统 (diffraction limited system, DLS) 所成的像.

2 PD 图像复原技术的基本原理

PD 技术的基本思想是利用同一目标 $o(x, y)$ 经过不同的光学通道 $\{h_k(x, y)\}$ 所成的 $K(K \geq 2)$ 幅图像 $\{i_k(x, y)\}$ 来估计波前相位, 同时复原目标像, 其成像过程如图 1 所示.

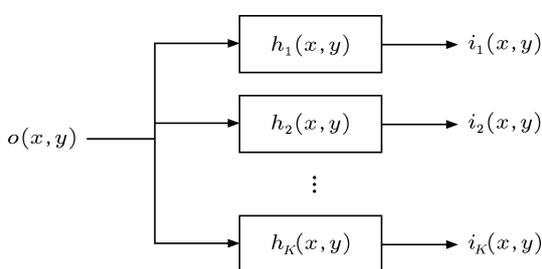


图 1 PD 成像过程框图

假设光学成像是空间不变线性系统, 根据成像理论, 当目标位于等晕区内时, 成像过程可以表示为目标与成像系统 PSF 的卷积. 在高光子水平或以光电探测器的读出噪声为主的情况下, 噪声满足加性高斯模型. 此时, 第 k 个光电探测器上的光强分布为

$$i_k(x, y) = o(x, y) * h_k(x, y) + n_k(x, y), \quad (1)$$

式中, $o(x, y)$ 表示目标光强分布, $h_k(x, y)$ 表示第 k 个光学通道的 PSF, $*$ 表示卷积运算. 根据极大似然估计或最小二乘估计理论确定一个目标函数 E ^[7]:

$$E = \sum_k \sum_{x, y} \left| i_k(x, y) - \hat{o}(x, y) * \hat{h}_k(x, y) \right|^2, \quad (2)$$

式中, $\hat{o}(x, y)$ 表示目标光强分布的估计量; $\hat{h}_k(x, y)$ 表示第 k 个光学通道 PSF 的估计量

$$\hat{h}_k(x, y) = \left| \mathcal{F}^{-1} \left\{ A(u, v) \exp[i\hat{\phi}_k(u, v)] \right\} \right|^2, \quad (3)$$

式中, $\hat{\phi}_k(x, y)$ 为第 k 个光学通道上的波前分布的估计量, $A(x, y)$ 为孔径函数, $\mathcal{F}^{-1}\{\}$ 表示傅里叶逆变换. 根据 Parseval 定理和卷积定理, (2) 式可表示为

$$E = \sum_k \sum_{f_x, f_y} \left| I_k(f_x, f_y) - \hat{O}(f_x, f_y) \hat{H}_k(f_x, f_y) \right|^2, \quad (4)$$

式中 $I_k(f_x, f_y)$, $\hat{O}(f_x, f_y)$ 和 $\hat{H}_k(f_x, f_y)$ 分别是 $i_k(x, y)$, $\hat{o}(x, y)$ 和 $\hat{h}_k(x, y)$ 的离散傅里叶变换. 令 $\partial E / \partial \hat{O} = 0$, 得

$$\hat{O} = \frac{\sum_{k=1}^K I_k \hat{H}_k^*}{\sum_{l=1}^K |\hat{H}_l|^2}, \quad (5)$$

代入 (4) 式得

$$E = \sum_{f_x, f_y} \sum_{k=1}^K |I_k|^2 - \sum_{f_x, f_y} \left(\left| \sum_{j=1}^K I_j \hat{H}_j^* \right|^2 / \sum_{l=1}^K |\hat{H}_l|^2 \right). \quad (6)$$

由于图像复原是一个病态问题, 为了确保解的存在、唯一和连续性, 需要利用关于解的先验知识, 构造附加约束, 即正则化方法. 本文采用图像复原技术中常见的 Tikhonov 正则化方法来构造附加约束, 根据 Tikhonov 正则化原理, 目标函数可改写为^[11]

$$E = \sum_{f_x, f_y} \sum_{k=1}^K |I_k|^2 - \sum_{f_x, f_y} \frac{\left| \sum_{j=1}^K I_j \hat{H}_j^* \right|^2}{\gamma + \sum_{l=1}^K |\hat{H}_l|^2} + \alpha \langle \Phi^{-1} \mathcal{F}\{\phi\}, \mathcal{F}\{\phi\} \rangle, \quad (7)$$

式中, $\gamma, \alpha > 0$, 称为正则化系数, Φ 是波前的先验信息, 一般为波前像差的功率谱, \langle, \rangle 表示内积. 采用最优化算法寻找使目标函数 E 最小化的解, 即可求得波前相位 $\phi(x, y)$, 可表示为

$$\phi(u, v) = \min_{\hat{\phi}}^{-1} \left[E(\hat{\phi}(u, v) | \{i_k(x, y)\}) \right], \quad (8)$$

式中 $\min_{\hat{\phi}}^{-1} \left[E(\hat{\phi}(u, v) | \{i_k(x, y)\}) \right]$ 表示在已知参数 $\{i_k(x, y)\}$ 的条件下求使得 E 达到最小值的 $\hat{\phi}$. 同时, 可以利用 (5) 式重建目标像.

有限内存 Broyden-Fletcher-Goldfarb-Shanno (L-BFGS) 方法, 存储量少、计算效率高, 非常适合求解大规模无约束优化问题, 是求解 PD 问题的有效方法之一^[12], 因此本文利用 L-BFGS 方法寻找使目标函数最小化的解, 具体过程参看文献^[13].

3 PD 图像复原技术的 MTF

在估计出波前相位之后, 各通道的 OTF 就可以相应地求出, 此时便可以利用 (5) 式重建目标像. 根

据 Tikhonov 正则化方法, (5) 式可改写为

$$O_{pd} = \frac{\sum_{k=1}^K I_k \tilde{H}_k^*}{\left(\gamma + \sum_{l=1}^K |\tilde{H}_l|^2\right)}, \quad (9)$$

式中, \tilde{H}_k 表示利用 PD 方法估计出的波前相位计算得到的各通道的 OTF. 在不考虑噪声的情况下, 对 (1) 式做傅里叶变换得

$$I_k = OH_k. \quad (10)$$

假如 PD 方法能准确地计算出波前相位, 则

$$\tilde{H}_k \approx H_k. \quad (11)$$

将 (10) 式和 (11) 式代入 (9) 式得

$$\begin{aligned} O_{pd} &= \frac{\sum_{k=1}^K I_k H_k^*}{\gamma + \sum_{l=1}^K |H_l|^2} = \frac{\sum_{k=1}^K OH_k H_k^*}{\gamma + \sum_{l=1}^K |H_l|^2} \\ &= \frac{O \sum_{k=1}^K H_k H_k^*}{\gamma + \sum_{l=1}^K |H_l|^2} = \frac{O \sum_{k=1}^K |H_k|^2}{\gamma + \sum_{l=1}^K |H_l|^2}. \end{aligned} \quad (12)$$

当正则化参数 γ 很小时, 上式可以表示为

$$O_{pd} \approx \begin{cases} O, & (f_x, f_y) \in F_1, \\ 0, & \text{其他;} \end{cases} \quad (13)$$

$$\begin{aligned} F_1 &= \left\{ (f_x, f_y) \mid \sum_{k=1}^K |H_k(f_x, f_y)|^2 \neq 0, \right. \\ &\quad \left. k = 1, 2, \dots, K \right\}. \end{aligned} \quad (14)$$

借用成像系统中的 OTF 和 MTF 的概念来研究 PD 图像复原技术的性能. H_{pd} 是利用 PD 算法进行图像复原后的退化函数的频域表示, 即

$$O_{pd} = O \cdot H_{pd}. \quad (15)$$

本文将 H_{pd} 称为 PD 图像复原技术的 OTF, 在理想情况下它可以表示为

$$H_{pd} = \frac{O_{pd}}{O} = \begin{cases} 1, & (f_x, f_y) \in F, \\ 0, & \text{其他,} \end{cases} \quad (16)$$

相应地, 其 MTF 为

$$M_{pd} = |H_{pd}| = \begin{cases} 1, & (f_x, f_y) \in F, \\ 0, & \text{其他.} \end{cases} \quad (17)$$

图 4(a)—(d) 分别显示了原始目标、不存在像差的成像系统 (即 DLS) 获得的目标像、存在像差

4 数值仿真

为了验证 (17) 式, 对 PD 图像复原技术进行仿真和实验研究. 一个理想的点目标成像时, 由于成像系统孔径光阑的限制, 目标产生的衍射分量只有一部分被有限的光瞳所截取, 因此目标发出的光线不可能会聚成一个绝对点. 如果一个成像系统不存在几何像差, 只存在衍射效应, 就称它为 DLS. 当成像系统受到像差和孔径光阑的双重影响时, 其获得的目标图像的分辨率必然会进一步下降.

在本文的研究中用两幅图像来复原目标图像, 其中一幅图像是由像差导致退化的焦面图像, 另外一幅是在焦面图像上引入一个已知离焦像差得到的图像. 假设成像系统的孔径光阑如图 2 所示, 成像系统的像差 (包括内部和外部像差) 如图 3 所示, 峰谷 (PV) 值为 0.5 个波长. 在利用 PD 方法进行图像复原的过程中, 取正则化参数 $\gamma = 10^{-7}$.

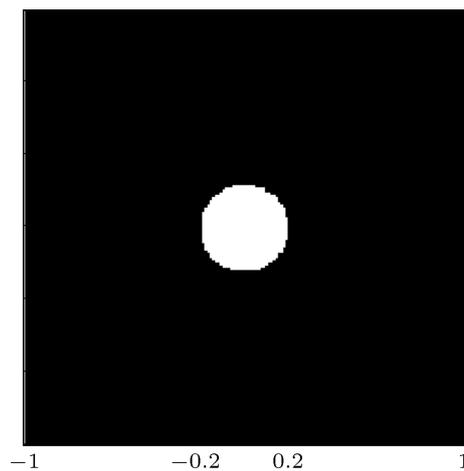


图 2 归一化半径为 0.2 的孔径光阑

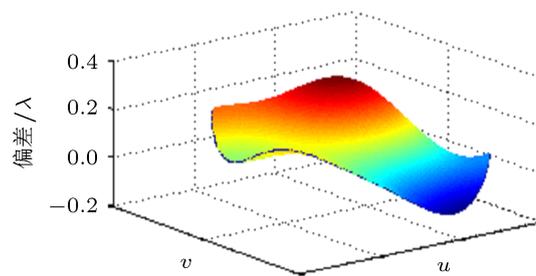


图 3 成像系统的像差

的成像系统获得的目标像和利用 PD 图像复原技术获得的目标像.

图 5(a)—(c) 给出了这三种情况下 MTF 的立体图, PD 方法的 MTF 由 $|O_{pd}/O|$ 求得. 为了方便比较, 我们给出了它们的截面图, 如图 5(d) 所示. 图中, f_c 为系统的截止频率, 实线为 DLS 的 MTF, 点划线为存在像差时成像系统的 MTF, 虚线为 PD 图像处理技术的 MTF. 图 6 给出了在图像复原过程中 PD 方法的 MTF 随迭代次数的变化, 由图可以看出随着迭代次数的增加, 各频率的 MTF 渐渐趋近于 1, 这就验证了 (17) 式的正确性.

由图 4 和图 5 可以看出, 在截止频率内, PD 图像复原技术可以提高图像的对比度, 利用 PD 图像复原技术可以增强光学系统截止频率以内的信息, 从而获得优于 DLS 的目标图像. 为了更加直观地

说明这一结论, 我们选取一幅单一频率的图像作为目标, 且该图像的空间频率在成像系统的截止频率以内. 原始目标、DLS 获得的目标像、存在像差的成像系统获得的目标像和利用 PD 图像复原技术获得的目标像分别如图 7(a)—(d) 所示, 在每幅图像中截取一部分, 图 8(a)—(d) 分别给出了它们的横截面图, 其中, 横坐标为像素点, 纵坐标为灰度级. 可以看出, 由于孔径光阑的限制, 与原始目标相比 DLS 所获得图像的对对比度已经大大降低, 而利用 PD 图像处理技术获得的图像的对对比度非常接近原始图像. 这就说明, 在截止频率以内, 利用 PD 图像处理技术所获得的图像对对比度高于 DLS 所得图像, 从而实现了超衍射成像.

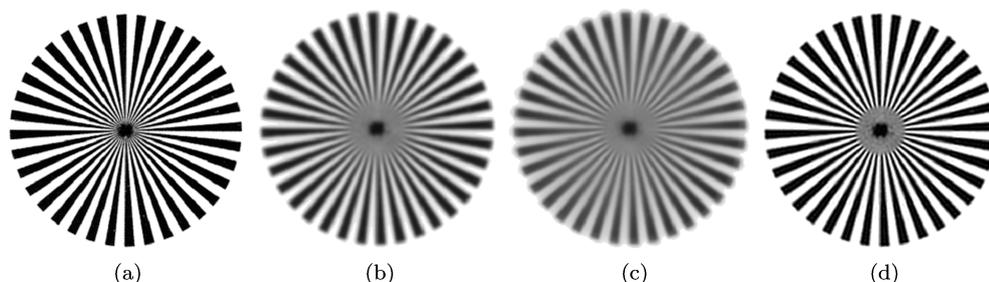


图 4 多频率目标的成像结果 (a) 原始目标; (b) DLS 获得的图像; (c) 存在像差的成像系统获得的图像; (d) PD 图像复原技术获得的图像

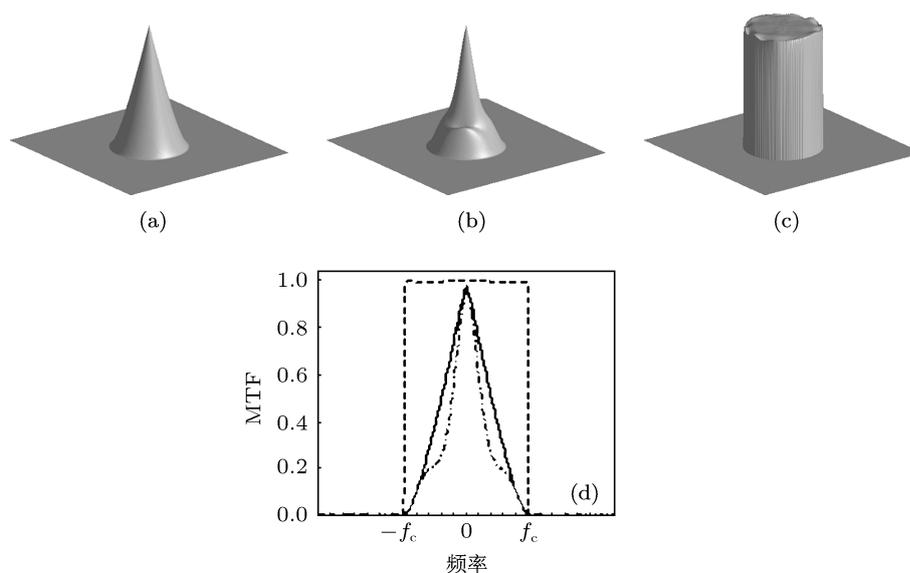


图 5 MTF 的仿真结果 (a) DLS; (b) 存在像差的成像系统; (c) PD 图像复原技术; (d) 以上三种情况的截面图

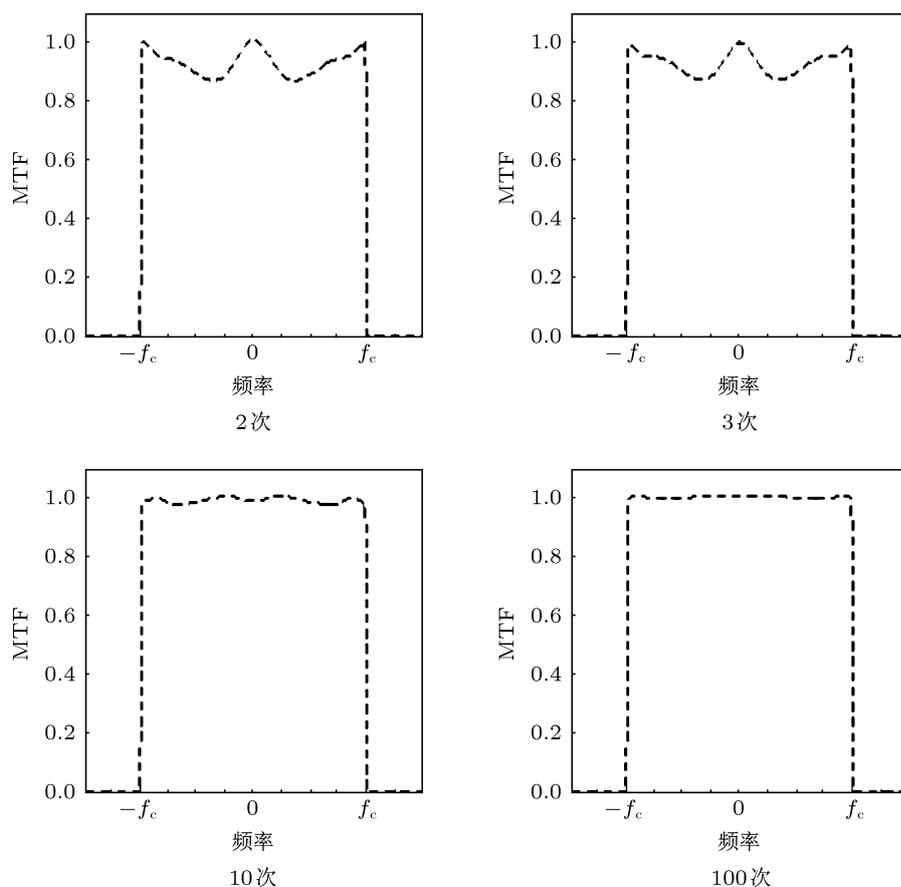


图6 图像复原过程中PD图像复原技术的MTF随迭代次数的变化

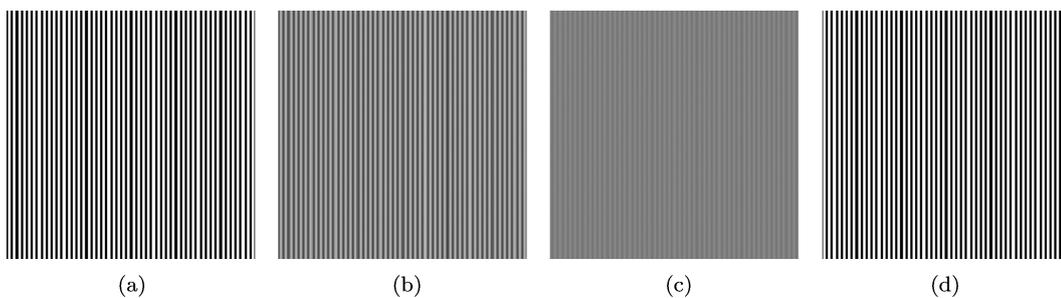


图7 单频率目标的成像结果 (a) 原始目标; (b) DLS 获得的图像; (c) 存在像差的成像系统获得的图像; (d) PD 图像复原技术获得的图像

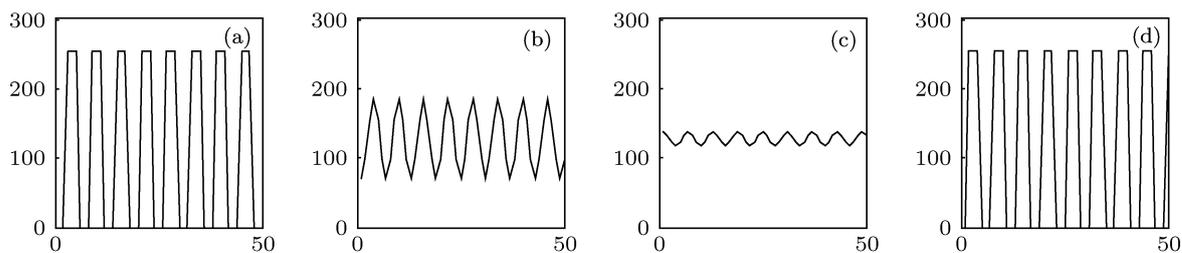


图8 单频率目标成像结果的截面图 (a) 原始目标; (b) DLS 获得的图像; (c) 存在像差的成像系统获得的图像; (d) PD 图像复原技术获得的图像

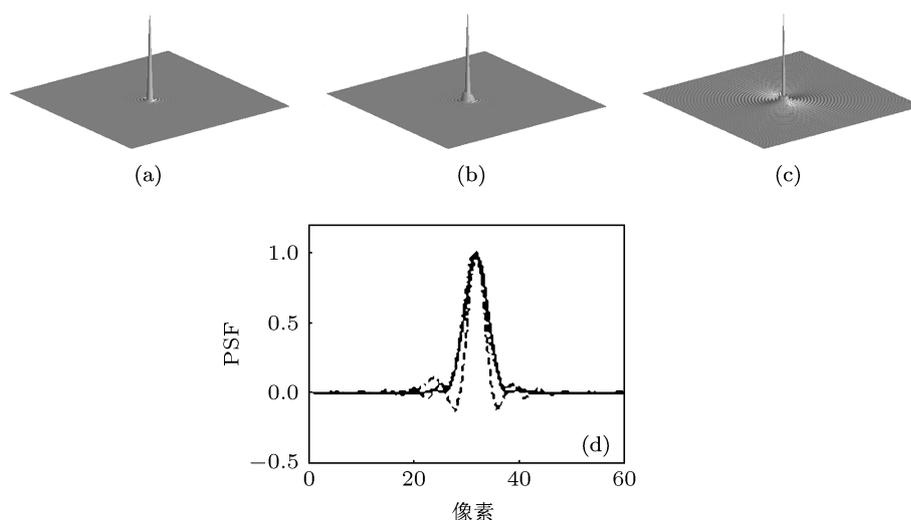


图9 PSF的仿真结果 (a) DLS; (b) 存在像差的成像系统; (c) PD图像复原技术; (d) 以上三种情况的截面图

对计算所得的 OTF 求傅里叶逆变换可以得到成像系统的 PSF. 图 9 给出了计算所得的 DLS、存在像差的成像系统和 PD 图像复原技术的归一化 PSF (图 5(a), (b), (c) 中的傅里叶逆变换), 其中图 5(a), (b), (c) 为立体图, (d) 为它们的截面图, 实线为 DLS 的 PSF, 点划线为存在像差时成像系统的 PSF, 虚线为 PD 图像处理技术的 PSF.

可以看出, PD 图像复原技术所得的 PSF 的半高宽明显小于 DLS 的 PSF 的半高宽, 但会在求得的 PSF 中出现负值. 为了验证该结论的正确性, 我们搭建了实验平台, 对 PD 图像复原技术的 PSF 进行实验研究.

5 实验验证

实验光路和实物照片分别如图 10 和图 11 所示. 实验系统由点目标、液晶空间光调制器 (LC-SLM) 和成像系统三个部分组成. 点目标由 He-Ne 激光器、偏振片 P、显微物镜 L1、针孔 SF 和透镜 L2 组成. 显微物镜的参数为 40/65, 针孔的直径为 $15\ \mu\text{m}$, 透镜 L2 的焦距为 200 mm. He-Ne 激光器输出的光束经过偏振片, 以便保证光束的偏振方向与 LC-SLM 的非寻常光轴方向平行. 针孔放置于透镜 L2 的焦面上, 用来模拟无穷远处的点目标. LC-SLM 用来加载波前像差和附加离焦像差. 成像部分由双胶合凸透镜 L3 和 CCD 相机组成, 透镜 L3 的焦距为 200 mm, CCD 相机采用的是 Cascade: 650,

像素尺寸为 $7.4\ \mu\text{m} \times 7.4\ \mu\text{m}$.

在 LC-SLM 上加载如图 12 所示的像差, CCD 相机上的光强分布如图 13(a) 所示. 像差由前 35 项 Zernike 多项式随机生成, 其 PV 值为 1 个波长, 均方根 (RMS) 值为 0.1608 个波长. 在 LC-SLM 上同时加载如图 12 所示的像差和 PV 值为 1 个波长的离焦像差, CCD 相机上的光强分布如图 13(b) 所示.

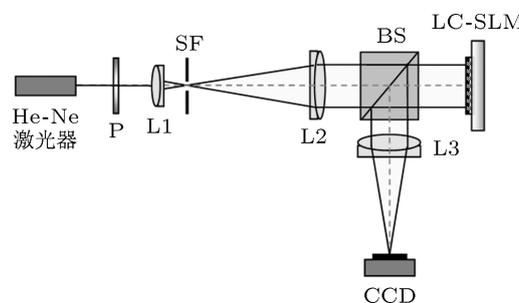


图 10 实验光路图

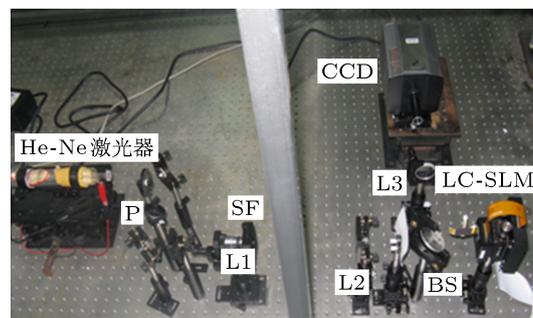


图 11 实物照片

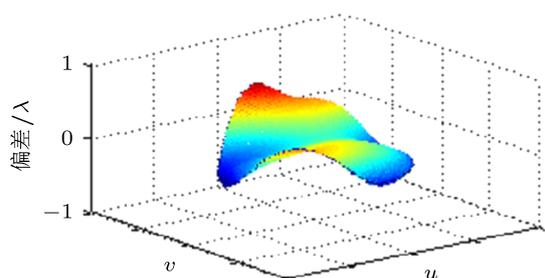


图 12 实验中所加载的成像系统的像差

由 PSF 的定义可知, 一个光学系统的 PSF 就是当输入物是一点目标时其输出像的光强分布. 本文将利用 PD 图像复原技术得到的点目标图像的光强

分布认为是 PD 图像复原技术的 PSF, 根据这一定义, 图 14(a)—(c) 分别给出了 DLS、存在像差的成像系统和 PD 图像复原技术的 PSF, 图 14(d) 给出了它们的截面图, 线形表示与图 9 相同.

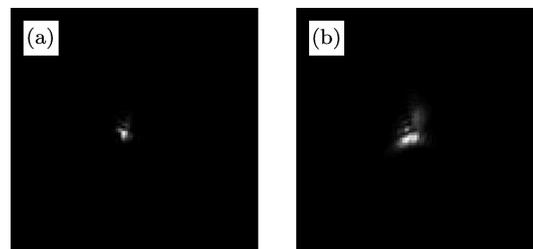


图 13 CCD 采集到的图像 (a) 焦面图像; (b) 引入附加离焦像差的图像

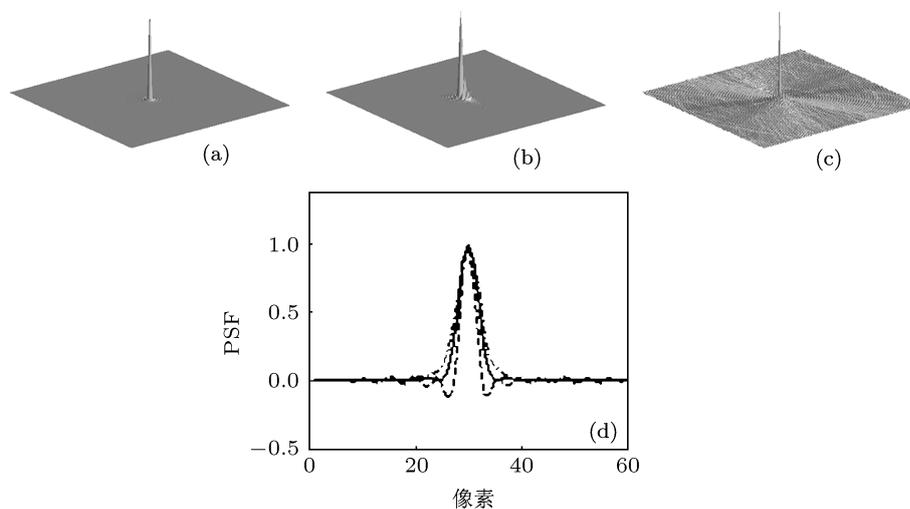


图 14 PSF 的实验结果 (a) DLS; (b) 存在像差的成像系统; (c) PD 图像复原技术; (d) 以上三种情况的截面图

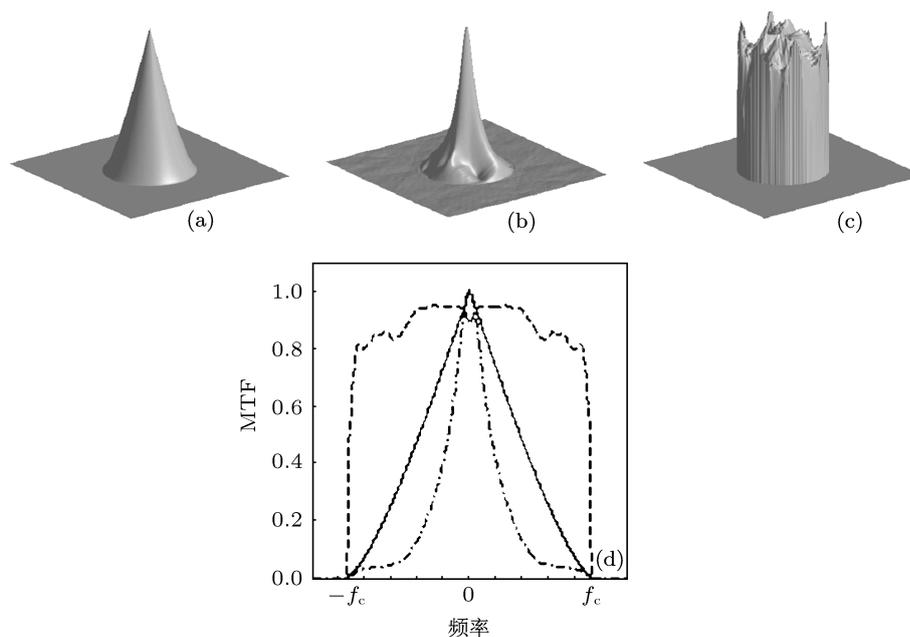


图 15 MTF 的实验结果 (a) DLS; (b) 存在像差的成像系统; (c) PD 图像复原技术; (d) 以上三种情况的截面图

根据实验所得的 PSF 可以求得 DLS、存在像差的成像系统和 PD 图像复原技术的 MTF, 如图 15(a)—(c) 所示, 图 15(d) 给出了它们的截面图, 线形表示与图 5 相同.

图 12 和图 13 所示的实验结果证明了数值仿真的正确性. 由仿真和实验结果可以看出, PD 图像复原技术不仅可以克服像差对成像质量的影响, 而且可以在截止频率以内增强图像的对比度, 从而使获得的图像优于 DLS 所成的像, 在图像复原领域有着广阔的应用前景.

然而, PD 图像复原技术会对采集到图像的高频部分进行增强, 这就导致了噪声的放大, 在下一步的研究中还需要采用各种去噪技术来提高 PD 的性能. 由于 PD 方法的 OTF 相当于一个圆柱形滤波器, 当成像系统的孔径较小时, 利用 PD 图像复原技术得到的图像中会出现比较严重的振铃效应. 因此在今后的工作中, 还要对正则化方法进行研究, 以消除这种现象.

6 结论

借助光学系统中 OTF、MTF 和 PSF 的概念研究了 PD 图像复原技术的性能, 推导了 PD 图像复原技术 OTF 和 MTF 的表达式, 并进行了数值仿真

和实验验证. 结果表明, PD 图像复原技术不仅可以克服像差对成像质量的影响, 而且在截止频率内可以提高图像的对比度, 利用 PD 图像复原技术可以增强光学系统截止频率以内的信息, 从而获得优于 DLS 的目标像. 但是, PD 图像复原技术会对噪声比较敏感, 当成像系统的孔径较小时, 利用 PD 图像复原技术得到的图像中还会出现比较严重的振铃效应. 因此在今后的工作中, 还需要选择有效的去噪方法, 并对正则化方法进行研究, 以消除振铃现象.

由数学理论可知, 当目标在空域上有界的时候, 其频谱函数是一个解析函数, 因此可以根据解析延拓理论利用目标函数支持域上的频谱重建其整个频谱, 从而实现超分辨成像, 超分辨率成像技术是目前的一个研究热点^[14-16]. 利用 PD 进行图像复原是一个不适定的反问题, 本文采用 L-2 范数和 Tikhonov 正则化方法以及最优化方法来寻找该反问题的最小二乘解. 这与正则化超分辨成像问题在实质上是相同的, 且 PD 方法利用了附加的约束条件, 增强了解的唯一性. 因此, 我们推断, PD 方法必将在超分辨成像领域占有一席之地, 因此为了提高 PD 图像复原技术的性能, 拓展其应用领域, 在下一步的工作中我们将对 PD 超分辨成像技术进行深入研究.

-
- [1] Shang J G, Jiao B L 2011 *Application Research of Computers* **28** 785 (in Chinese) [商俊国, 焦斌亮 2011 计算机应用研究 **28** 785]
- [2] Wu X J 2006 *Ph. D. Dissertation* (Changsha: National University of Defense Technology) (in Chinese) [吴显金 2006 博士学位论文 (长沙: 国防科学技术大学)]
- [3] Liu Z, Qiu Y H 1998 *Acta Astronomica Sinica* **39** 217 (in Chinese) [刘忠, 邱耀辉 1998 天文学报 **39** 217]
- [4] Rao C H, Zhang X J 2002 *Acta Opt. Sin.* **22** 789 (in Chinese) [饶长辉, 张学军 2002 光学学报 **22** 789]
- [5] Luo L, Wang L, Cheng W D, Shen M Z 2006 *Acta Phys. Sin.* **55** 6708 (in Chinese) [罗林, 王黎, 程卫东, 沈忙作 2006 物理学报 **55** 6708]
- [6] Gonsalves R 1982 *Opt. Engng.* **21** 829
- [7] Paxman R G, Schulz T J, Fienup J R 1992 *J. Opt. Soc. Am. A* **9** 1072
- [8] Paxman R G, Seldin J H, Löfdahl M G 1996 *Astrophysical Journal* **466** 1087
- [9] Seldin J H, Reiley M F, Paxman R G 1997 *Proc. SPIE* **3170** 277
- [10] Smith M W 2003 *Novel Optical Systems Design and Optimization VI* **5174** 60
- [11] Gilles L, Vogel C R, Bardsley J 2002 *Inverse Problems* **18** 237
- [12] Nocedal J 1980 *Mathematics of Computation* **35** 773
- [13] Li F, Rao C H 2010 *Chinese J. Lasers* **37** 2813 (in Chinese) [李斐, 饶长辉 2010 中国激光 **37** 2813]
- [14] Zhao W Q, Chen S S, Feng Z D 2006 *Acta Phys. Sin.* **55** 3363 (in Chinese) [赵维谦, 陈珊珊, 冯政德 2006 物理学报 **55** 3363]
- [15] Lu J, Li H, He Y, Shi G H, Zhang Y D 2011 *Acta Phys. Sin.* **60** 034207 (in Chinese) [卢婧, 李昊, 何毅, 史国华, 张雨东 2011 物理学报 **60** 034207]
- [16] Liu X M, Liu L R, Bai L H 2006 *Chin. Phys.* **15** 708

Phase diversity image restoration

Li Fei[†]

(*The Northern Institute of Electronic Equipment, Beijing 100083, China*)

(Received 20 April 2012; revised manuscript received 29 June 2012)

Abstract

The image quality of the imaging system is often reduced by the wave-front aberrations which arises from a variety of sources including atmospheric turbulence, system aberration, and so on. Phase diversity image restoration is an image restoration technique that mainly aims to solve the problem of wave-front aberrations. This technique needs neither reference object nor the degraded function and has a good convergence. It can enhance the resolution and sharpness, increase the information content and improve the visual effect of the image, and has broad application prospect in the field of image restoration. In this paper, the phase diversity image restoration technique is studied, and its performance is analyzed in virtue of the concept of the optical transfer function, modulation transfer function and point spread function. Simulation and experimental results both show that phase diversity image restoration technique can not only reduce the influence of wavefront aberrations but also increase the information of low frequency within the cutoff frequency, and improve the contrast. So, the image acquired by phase diversity image restoration can be better than the image acquired by the diffraction limited system.

Keywords: image restoration, phase diversity, optical transfer function

PACS: 02.30.Zz, 42.30.Wb, 42.40.Lx, 42.15.Fr

[†] E-mail: sdlifei2008@163.com