

相干场成像四光束相位闭合算法研究

曹蓓 罗秀娟 司庆丹 曾志红

Four-phase closure algorithm for coherent field imaging

Cao Bei Luo Xiu-Juan Si Qing-Dan Zeng Zhi-Hong

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 64, 054204 (2015) DOI: 10.7498/aps.64.054204

在线阅读 View online: <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.054204>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn/CN/Y2015/V64/I5>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

基于旋转相位编码与照明光束匹配的叠层衍射成像算法研究

Ptychographical imaging algorithm based on illuminating beam matched with rotational phase encoding

物理学报.2014, 63(16): 164204 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.63.164204>

多种图像采集策略下 X 射线折射信息的提取研究

Simulation of X-ray refraction information extraction using multiple image-collecting strategies

物理学报.2014, 63(10): 104206 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.63.104206>

基于光栅分光法的相干衍射成像

Coherent diffractive imaging based on the multiple beam illumination with cross grating

物理学报.2013, 62(18): 184204 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.62.184204>

利用相干光照明的纹影成像装置研究飞秒激光脉冲烧蚀铝靶喷射物相位的超快时间演化

Investigation of the ultrafast phase evolution of the ejected material generated during femtosecond laser ablation of aluminum by the coherent light illuminated schlieren apparatus

物理学报.2013, 62(13): 134203 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.62.134203>

一种基于角谱理论的改进型相位恢复迭代算法

An ameliorated fast phase retrieval iterative algorithm based on the angular spectrum theory

物理学报.2013, 62(11): 114203 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.62.114203>

相干场成像四光束相位闭合算法研究*

曹蓓† 罗秀娟 司庆丹 曾志红

(中国科学院西安光学精密机械研究所, 西安 710119)

(2014年7月1日收到; 2014年9月5日收到修改稿)

依据相干场成像相位闭合实现原理, 在T型多光束发射阵列下推导出一种新的四光束相位闭合算法. 定义了基于四重积的闭合比率求解公式, 推导出在消除大气随机相位误差的同时能抑制光强闪烁对成像质量的影响. 数值模拟结果证明其有效性, 为多光束相干场成像系统消除大气扰动误差提供了新的途径.

关键词: 相干场成像, 相位闭合, 图像重构, 闪烁效应

PACS: 42.30.Rx, 42.30.Wb, 07.05.Tp

DOI: 10.7498/aps.64.054204

1 引言

相干场成像技术^[1](又称傅里叶望远镜)是一种新型的计算成像技术, 结合了激光主动照明成像与光学合成孔径技术的优势, 能够突破望远镜口径对成像分辨率的限制, 透过大气湍流对远距离微弱目标高分辨率成像, 理论上角分辨率能达到纳弧度量级. 因此, 近年来得到研究学者的广泛关注, 成为最有发展前景的高分辨率主动成像技术之一^[2-4].

与传统被动成像方式不同, 相干场成像技术的一个突出优势是利用相位闭合技术^[5]消除大气湍流带来的随机相位误差, 无需应用自适应光学技术, 从而大大降低了系统的设计难度和研制成本. Holmes将经典相位闭合算法与发射阵列的孔径布局相结合, 推导并论证了三光束相位闭合在相干场成像中的实现. 国内也有文献开展了此方面的研究^[6], 但是针对T型多光束发射阵列的相位闭合算法目前尚无文献述及.

本文依据相位闭合技术的实现原理, 在相干场成像T型多光束发射阵列下提出一种新的四光束相位闭合算法(four-phase closure, FPC). 推导并证明了在同时发射五束激光照明目标的情况下, 通过合理配置四束光进行相位闭合, 能够在消除大气

随机相位误差的同时抑制不同光束光强闪烁^[7,8]对成像质量的影响. 数值模拟结果表明: 在大气湍流模拟环境^[9,10]下, FPC算法能有效消除大气随机相位误差, 且与三光束相位闭合相比抑制了光强闪烁对成像质量的影响, 在信噪比降低的条件下具有更好的抑噪能力, 图像重构质量更好、重构strehl值明显高于传统算法.

2 相干场成像技术原理

2.1 相干场成像原理

相干场成像技术采用激光干涉主动成像, 基本成像原理可如图1所示.

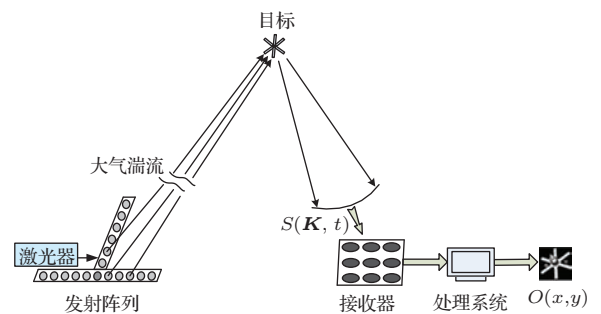


图1 相干场成像基本原理

* 中国科学院“西部之光”人才培养计划“西部博士资助项目”(批准号: Y429621213) 资助的课题.

† 通信作者. E-mail: candy@opt.ac.cn

通过发射多束激光主动照明目标, 在接收端接收由目标返回的回波能量信号, 解调处理后利用相位闭合技术消除大气扰动引起的主要随机相位误差, 然后经由傅里叶逆变换重构目标灰度图像.

可知: 通过发射不同频率的激光束, 将形成对应空间频率的干涉条纹扫描目标, 在目标表面形成的电场强度与目标相互作用后随时间累积, 形成时域的回波能量信号 $S(\mathbf{K}, t)$, 可描述为下式的形式:

$$S(\mathbf{K}, t) = c \int_t^{t+T} dt' \iint \left| \sum_{n=0}^{N-1} E_n(\mathbf{x}) \times \exp[i(\omega_n t + (\mathbf{x} - \mathbf{x}_n)\mathbf{k}_n + \varphi_n)] \right|^2 \times O(x + v_x t', y + v_y t') dx dy, \quad (1)$$

式中 N 为同时发射的激光束数目,

$$E_n(\mathbf{x}) \exp[i(\omega_n t + (\mathbf{x} - \mathbf{x}_n)\mathbf{k}_n + \varphi_n)]$$

表示第 n 束激光在目标上形成的瞬时电场强度, T 为采样持续时间, 对积分进行求解后可得到

$$S(\mathbf{K}, t) = cNIT O(\mathbf{K} = 0)|_{f_x, f_y=0} + cIT \sum_{n=0}^{N-1} \sum_{m=n+1}^{N-1} O(\mathbf{K}_{nm}) \times \exp[i(\Delta\omega_{mn}(t + T/2) + \varphi_{m,n})] + c.c., \quad (2)$$

公式的详细推导可参见文献 [1].

(1) 式中的 $O(x, y)$ 即为目标的强度反射率函数, 求解后的 (2) 式表明目标的回波能量信号中包含目标的空间傅里叶频谱 $O(\mathbf{K}_{nm})$, \mathbf{K}_{nm} 对应目标的空间频率坐标 (f_x, f_y) . 因此可通过傅里叶逆变换重构目标空间图像 $O(x, y)$ 为

$$O(x, y) = \iint O(f_x, f_y) \times \exp[i2\pi(f_x x + f_y y)] df_x df_y. \quad (3)$$

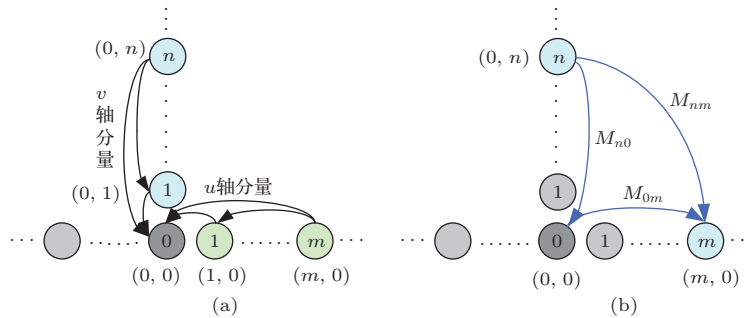


图2 三光束相位闭合实现原理 (a) 轴上频谱分量; (b) 象限频谱分量

故可知, 相干场成像是一种计算成像技术且具有空时编码特性, 即目标的空间傅里叶频谱信息被巧妙地调制到由目标返回的时域能量信号 $S(\mathbf{K}, t)$ 中. 在对回波能量信号解调处理后, 如何消除大气湍流扰动对成像带来的相位畸变、恢复目标的真实频谱 $O(f_x, f_y)$ 是正确重建目标图像的先决条件. 因此, 相位闭合技术的研究对相干场成像具有关键的作用, 将直接影响最终的成像质量.

2.2 三光束相位闭合技术

相位闭合是光学综合孔径成像中消除大气扰动的关键技术. 在相干场成像中, 为应用相位闭合技术每一时刻至少应同时发射三束激光照射目标. 图 2 给出 T 型发射阵列下三光束相位闭合 (three-phase closure, TPC) 的实现原理图, 图 2 (a), (b) 分别对应轴上频谱分量与象限频谱分量的相位闭合方式.

考虑编号为 $0, n, m$ 的三束光 (空间坐标如图 2 (b) 中所示) 同时发射扫描目标, 可知由目标返回的回波能量信号 $S(\mathbf{K}, t)$ 是三个不同拍频 (beat frequency) 余弦信号的叠加, 将提取出目标对应空间频率的象限频谱分量. 合理配置激光调制频率对回波信号解调处理, 可得

$$M_{nm} = M(\mathbf{K}_{-m,n}) = N_s c' O(\mathbf{K}_{-m,n}) \times \exp[i(\omega_n - \omega_m)t + i(\varphi_{0,n} - \varphi_{m,0})],$$

$$M_{0m} = M(\mathbf{K}_{-m,0}) = N_s c' O(\mathbf{K}_{-m,0}) \times \exp[i(\omega_0 - \omega_m)t + i(\varphi_{0,0} - \varphi_{m,0})],$$

$$M_{n0} = M(\mathbf{K}_{0,n}) = N_s c' O(\mathbf{K}_{0,n}) \times \exp[i(\omega_n - \omega_0)t + i(\varphi_{0,n} - \varphi_{0,0})], \quad (4)$$

其中 $c' = cIT$ 为比例因子, N_s 为采样点数, (4) 式表明每项解调值中除了目标真实频谱分量外, 还包括其他误差因子, 需要采用相位闭合技术消除.

相位闭合通过构造如下测量比率 (measurement ratio) 达到消除指数因子项、提取目标真实频谱分量的目的. 在三光束相位闭合中称为作一个 triplet, 如 (5) 式所示, 对 0, n , m 三束光按图 2 (b) 中蓝色弧线的箭头方向进行相位闭合, 得到闭合值 R_{nm} 如下:

$$R_{nm} = \frac{M_{nm}}{M_{n0}M_{0m}} = \frac{M(\mathbf{K}_{-m,n})}{M(\mathbf{K}_{0,n})M(\mathbf{K}_{-m,0})} = \frac{O(\mathbf{K}_{-m,n})}{N_s c' O(\mathbf{K}_{0,n})O(\mathbf{K}_{-m,0})}. \quad (5)$$

可知经过大气传输后由于湍流扰动、两两光束间光程差等因素所导致的大气随机相位误差项 (如 $(\varphi_{0,n} - \varphi_{m,0})$ 等) 将被消除掉, 且通过合理配置三束激光的调制频差将同时消除 $(\omega_n - \omega_m)t$ 等指数因子项. 由于目标频谱仅由其自身形状所决定, 因此可略去比例因子 $N_s c'$, 依下式求出光束 m 和 n 所确定的象限频谱分量 $O(\mathbf{K}_{-m,n})$:

$$O(\mathbf{K}_{-m,n}) = R_{nm}O(\mathbf{K}_{0,n})O(\mathbf{K}_{-m,0}), \quad (6)$$

其中 $O(\mathbf{K}_{-m,0})$, $O(\mathbf{K}_{0,n})$ 分别为 u 轴与 v 轴的频谱分量, 可按照图 2 (a) 中所示的相位闭合顺序构造 triplet 后同理求出.

由此, 依据 T 型发射阵列孔径的空间布局进行三束光相位闭合的迭代运算, 先求解出轴上频谱分量, 之后代入 (6) 式依次求出各个空间频率下的象

限频谱分量, 从而最终恢复出目标的真实傅里叶频谱.

3 四光束相位闭合算法

随着相干场成像技术的发展, 采用多光束发射方式能够在一次测量中获取更多的目标频谱分量, 从而减少采样时间、提高成像速度, 因此研究新的多光束相位闭合算法具有重要的意义. 首先给出了多光束相位闭合应满足的条件, 在此基础上定义了基于四重积的闭合比率求解公式, 证明在消除大气随机相位误差的同时, 四光束闭合方式还能抑制光强闪烁对成像质量的影响, 从而获得更好的目标图像重构质量.

3.1 四光束闭合方式推导

首先设计五光束同时发射的 T 型阵列如图 3 所示. 其中 ①—⑤ 代表可移动的五束发射激光, ①, ③ 位于水平轴的负向和正向, ④, ⑤ 位于垂直轴上, ② 号光位于中心参考点, 其空间坐标如图中标注. 给 ①—⑤ 号光加入互不重复的激光调制频率, 可知五束光两两干涉会形成 10 个不同的激光拍频信号, 当同时发射扫描目标时一次解调处理即能获取 10 个频谱测量值.

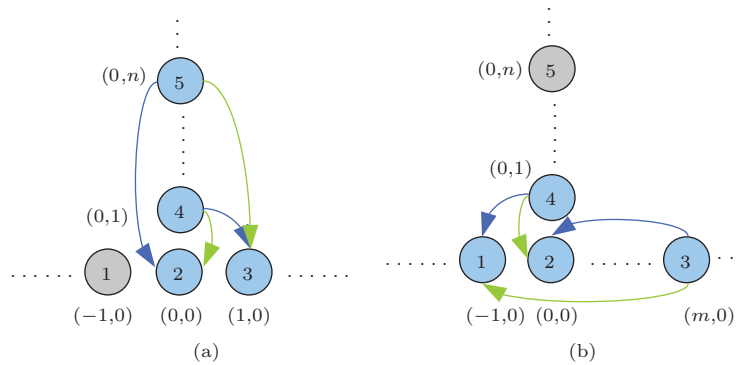


图 3 (网刊彩色) 四光束相位闭合方式 (a) v 轴频谱分量; (b) u 轴频谱分量

由三光束相位闭合的原理可知: 为完全消除解调后频谱测量值中包含的误差因子项, 相位闭合应满足以下两个条件:

- 1) 闭合光束的选择应满足作比率后消除大气随机相位误差 $\exp(i\Delta\varphi_{mn})$ 的目的;
- 2) 为消除 $\exp(i\Delta\omega_{mnt})$ 项, 上下两组解调值所对应的调制频差之和应相等.

基于此约束条件推导出一种新的四光束相位

闭合 (four-phase closure, FPC) 算法. 设计 v 轴和 u 轴频谱分量的闭合方式如图 3 (a), (b) 所示. 在 v 轴频谱分量的求解中选择 ②, ③, ④, ⑤ 四束光进行相位闭合, 闭合顺序如图中箭头方向所示, 即构造 v 轴闭合比率 (ratio) 如下:

$$R_v = \frac{M(\mathbf{K}_{52})M(\mathbf{K}_{43})}{M(\mathbf{K}_{53})M(\mathbf{K}_{42})}, \quad (7)$$

其中分子分母分别对应图 3 (a) 中蓝色和绿色的两

组频谱测量值, 代入后能完全约掉比例因子, 得到

$$R_v = \frac{O(\mathbf{K}_{0,n}) \exp[i(\omega_5 - \omega_2)t + i(\varphi_{0,n} - \varphi_{0,0})]}{O(\mathbf{K}_{-1,n}) \exp[i(\omega_5 - \omega_3)t + i(\varphi_{0,n} - \varphi_{1,0})]} \times \frac{O(\mathbf{K}_{-1,1}) \exp[i(\omega_4 - \omega_3)t + i(\varphi_{0,1} - \varphi_{1,0})]}{O(\mathbf{K}_{0,1}) \exp[i(\omega_4 - \omega_2)t + i(\varphi_{0,1} - \varphi_{0,0})]} = \frac{O(\mathbf{K}_{0,n})O(\mathbf{K}_{-1,1})}{O(\mathbf{K}_{-1,n})O(\mathbf{K}_{0,1})}. \quad (8)$$

可知大气随机相位误差项及频差因子被完全约掉, 所得闭合值 R_v 中只包含目标的真实傅里叶频谱分量, 由此随着光束位置的移动进行四光束相位闭合的迭代运算, 即能求解出 v 轴的真实频谱分量 $O(\mathbf{K}_{0,n})$.

同理, 在 u 轴频谱分量求取中选择①, ②, ③, ④四束光, 闭合顺序如图2(b) 中蓝、绿色两组所示, 构造 u 轴闭合比率为

$$R_u = \frac{M(\mathbf{K}_{32})M(\mathbf{K}_{41})}{M(\mathbf{K}_{31})M(\mathbf{K}_{42})} = \frac{O(\mathbf{K}_{m,0})O(\mathbf{K}_{1,1})}{O(\mathbf{K}_{m+1,0})O(\mathbf{K}_{0,1})}. \quad (9)$$

同样可完全消除大气随机相位误差及频差因子项, 进而迭代求解出 u 轴的真实频谱分量 $O(\mathbf{K}_{m,0})$.

由此证明了所提出四光束相位闭合的有效性. 下节将对其抑制光束闪烁的性能进行分析, 指出与传统三光束闭合方式相比, 四光束相位闭合还能消除光束闪烁效应对成像带来的影响.

3.2 抑制光束闪烁性能分析

由于相干场成像受到上行链路大气扰动的影响, 发射出的激光束在湍流大气中传播时由于折射率的起伏使其散射强度发生起伏, 即出现光束的闪烁效应 (scintillation)^[11], 闪烁会影响干涉条纹的对比度, 增加回波信号的方差, 进而影响相位闭合与图像重构的精度.

在图3(a) 中, 大气扰动在⑤号光束与目标之间引起的闪烁效应可以用 $\exp(\chi_5)$ 因子来表示, 其中 χ_5 代表由大气扰动引起的对数幅值误差, 由此光束⑤, ②干涉形成的解调值 $M(\mathbf{K}_{52})$ 受闪烁的影响可用 $\exp(\chi_5 + \chi_2)$ 因子来表示.

当选择②, ④, ⑤三束光作三光束相位闭合求解 v 轴频谱分量时, 即

$$R_e|_{\text{TPC}}(\mathbf{k}_{52}) = \frac{M(\mathbf{K}_{52})}{M(\mathbf{K}_{54})M(\mathbf{K}_{42})} = R_T(\mathbf{k}_{52}) \exp(-2\chi_4). \quad (10)$$

可知在光束闪烁的情况下得到的实际闭合值 $R_e|_{\text{TPC}}(\mathbf{k}_{52})$ 将偏离真值 $R_T(\mathbf{k}_{52})$, 即经过三光束相位闭合后闪烁效应对于②号和⑤号光的影响可以消除, 但对④号光的影响不能消除, 实际闭合值中将包含闪烁带来的误差因子项 $\exp(-2\chi_4)$, 从而增加回波信号的方差, 如下式所示:

$$\langle |R_e|_{\text{TPC}}(\mathbf{k}_{52})|^2 \rangle - |\langle R_e|_{\text{TPC}}(\mathbf{k}_{52}) \rangle|^2 = [\exp(4\langle (\chi_4)^2 \rangle) - 1] |R_T(\mathbf{k}_{52})|^2. \quad (11)$$

但是, 采用文中提出的四光束相位闭合算法, 由②, ③, ④, ⑤四束光进行相位闭合, 可得实际闭合值为

$$R_e|_{\text{FPC}}(\mathbf{k}_{52}) = \frac{M(\mathbf{K}_{52})M(\mathbf{K}_{43})}{M(\mathbf{K}_{53})M(\mathbf{K}_{42})} = R_T(\mathbf{k}_{52}), \quad (12)$$

与真值 $R_T(\mathbf{k}_{52})$ 一致, 即能够消除大气扰动对各个光束带来的闪烁效应. 同理在 u 轴频谱分量的求解中, 四光束相位闭合也能够消除中间②号光束的闪烁效应. 从而表明在消除大气随机相位误差的同时, 四光束相位闭合比三光束相位闭合能够更好地抑制光束闪烁对成像质量的影响.

4 数值模拟分析

为验证所提出的四光束相位闭合算法 (FPC), 采用五光束 T 型发射阵列在 Matlab 软件中进行数值模拟. 计算流程如下: 通过模拟位于不同发射位置的五束激光扫描照射目标, 对目标表面形成的瞬时电场强度按采样持续时间进行积分, 得到由目标返回的时域回波能量信号作为重构过程的原始数据, 之后进行相位闭合及图像重构计算. 相位闭合算法的处理步骤为: 首先初始化发射光束的位置, 在对回波信号解调后, 依据算法原理对频谱测量值作测量比率得到相位闭合值, 然后移动各光束到下一发射位置求解对应的闭合值, 通过孔径坐标位置进行迭代运算恢复出目标的真实频谱, 从而实现目标图像的重构.

1) 消除大气随机相位误差性能

相干场成像的参数^[12] 设置为: 激光波长为 $1.08 \mu\text{m}$, 探测距离 1000 km , 目标尺寸 2.5 m , 发射孔径单位间距 40 cm , 水平轴单向孔径个数为 8, 垂直轴两组孔径、每组个数为 12, 即模拟 17×25 的 T 型发射阵列; 给五束激光加入调制频差

$\Delta f = [0, 1, 4, 9, 11] \times 10$ kHz, 初始信噪比设为 200 dB.

采用功率谱反演法产生符合 Kolmogorov 谱的随机相位屏, 对上行链路的大气湍流进行模拟, 大气湍流强度为 $C_n^2 = 0.6 \times 10^{-13} \text{ m}^{-2/3}$ (中等湍流强度). 对图 4(a), (d) 两种复杂度不同的目标模型, 不采用相位闭合及采用文中 FPC 算法得到的图像重构结果分别如图 4 中所示.

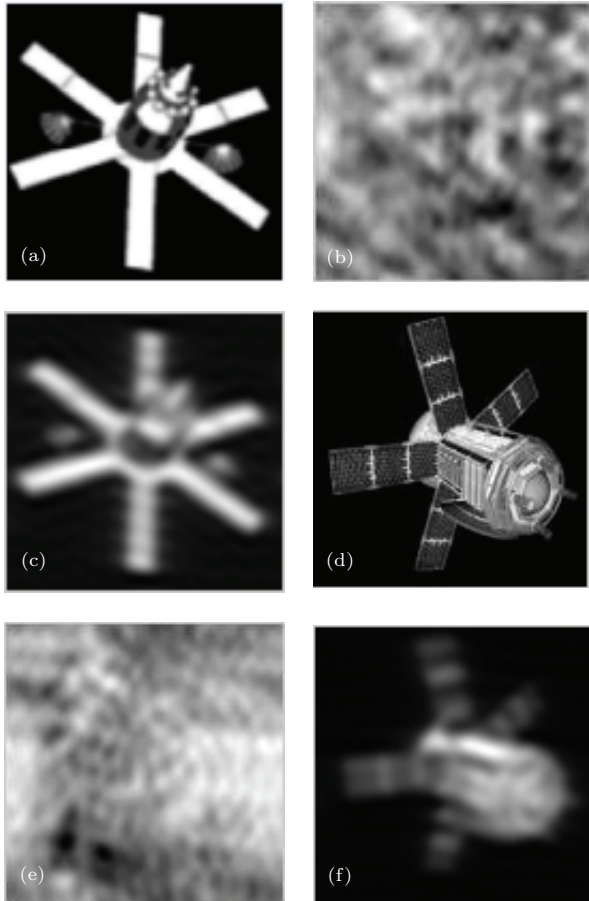


图 4 不同算法目标图像重构结果 (a) 目标 1; (b) 无相位闭合; (c) FPC; (d) 目标 2; (e) 无相位闭合; (f) FPC

图 4 结果说明不采用相位闭合时, 大气湍流扰动带来的相位误差将导致重构图像严重失真、无法辨识, 而采用四光束相位闭合后能够有效消除大气随机相位误差、不失真地还原目标, 克服上行链路大气扰动对相干场成像的影响, 证明了所提出 FPC 算法的有效性.

2) 抑制光强闪烁效应的性能

为验证 FPC 算法抑制大气扰动带来的光强闪烁效应的性能, 在数值模拟中首先给 ②, ④, ⑤ 三束光加入光强闪烁, 令光强起伏方差与光强均值平方的比值为 10%, 即闪烁指数取为 $\delta_I^2 = 0.01$, 如下

式定义:

$$\delta_I^2 = \frac{\langle I^2 \rangle}{\langle I \rangle^2} - 1, \quad (13)$$

其中 I 为光束的随机光强, 可知在弱起伏区, 光强的闪烁指数与 Rytov 方差 σ_I^2 ($\sigma_I^2 = 1.23C_n^2 k^{7/6} L^{11/6}$) 成正比, 考虑 1.5 km 的大气水平传输距离, 可求出对应的大气折射率结构常数 $C_n^2 \approx 1.57 \times 10^{-16} \text{ m}^{-2/3}$ (相当于弱湍流模拟环境). 其余实验参数不变, 分别应用 TPC 和 FPC 算法对目标 1 相位闭合后得到图像重构结果如图 5(a), (b) 所示; 再给五束激光均加入 10% 的光强闪烁, 两种算法的重构结果分别为图 5(c) 和 (d).

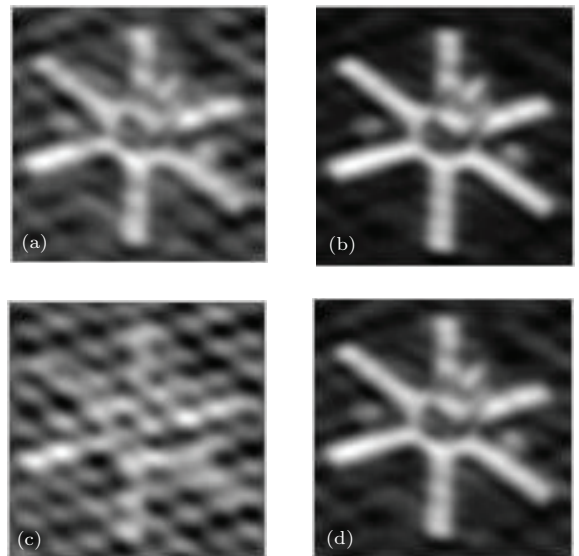


图 5 闪烁效应下目标 1 的重构结果 (a) TPC(三束光有闪烁); (b) FPC(三束光有闪烁); (c) TPC(五束光均闪烁); (d) FPC(五束光均闪烁)

重构结果证明了当给 ②, ④, ⑤ 三束光加入光强闪烁时, FPC 算法比 TPC 能够更好地抑制光强闪烁的影响, 图 5(b) 的重构质量明显优于 (a); 之后在五束光均加入光强闪烁的情况下, 由于 FPC 算法同样消除了 u 轴 ② 号光的闪烁因子误差, 在 TPC 的重构结果 (c) 已经完全失真的情况下, FPC 的重构图像 (d) 仍然清晰可辨.

图 6(a)—(d) 为在回波信号中加入高斯白噪声, $\text{SNR} = 100$ 时 TPC 和 FPC 算法对目标 2 的图像重构结果. 可知在同时存在光强闪烁与随机噪声的情况下, 会进一步带来图像重构质量的恶化, TPC 算法在五束光均闪烁时重构结果 (c) 已经难以识别目标; 但由于消除了各光束闪烁因子的影响, FPC 算法依然具有较好的图像重构质量 (b) 和 (d).

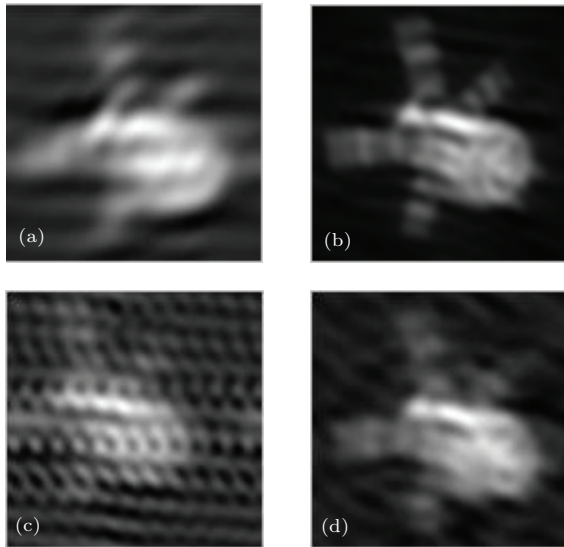


图6 存在闪烁及随机噪声 (SNR = 100) 时目标 2 的重构结果 (a) TPC(三束光有闪烁); (b) FPC(三束光有闪烁); (c) TPC(五束光均闪烁); (d) FPC(五束光均闪烁)

采用 strehl 比衡量重构图像的质量, 计算两种算法在不同信噪比下重构图像的 strehl 值, 如表 1 中所示. strehl 值的计算公式如下:

$$\begin{aligned} \text{strehl} &= \max |H(x, y)|^2 \\ &\times \left\{ \iint O_T^*(x, y) O_T(x, y) dx dy \right. \\ &\times \left. \iint O_R^*(x, y) O_R(x, y) dx dy \right\}^{-1}, \quad (14) \\ H(x, y) &= O_T \otimes O_R \\ &= \iint I_T^*(k_x, k_y) I_R(k_x, k_y) \\ &\times \exp(-i2\pi(k_x f_x + k_y f_y)) dx dy, \quad (15) \end{aligned}$$

其中 $O_T(x, y)$ 和 $O_R(x, y)$ 分别代表目标真实图像与重构图像的空间强度分布, $I_T(x, y)$ 和 $I_R(x, y)$ 分别对应真实图像与重构图像傅里叶变换后的频谱值, strehl 值越大表明重构图像与目标真实图像越相似.

表 1 不同信噪比条件下两种算法的 strehl 值

信噪比	SNR	200	150	100	50
目标 2	TPC	0.6829	0.6251	0.3583	—
	FPC	0.8376	0.7529	0.6702	0.5238

表 1 中 SNR = 100 时的目标重构结果对应图 6 (c) 和 (d), TPC 和 FPC 的重构 strehl 值分别为 0.3583 和 0.6702, 可知在相同信噪比条件下, FPC 算法的 strehl 值明显高于 TPC, 说明 FPC 算法在抑制光束闪烁的同时也具有较好的抑噪能力, 图像

重构质量更加稳定.

5 结 论

相位闭合能够消除相干场成像中上行链路大气湍流扰动对成像的影响, 是图像重构前非常重要的数据处理技术. 本文针对相干场成像 T 型多光束发射阵列, 提出一种新的四光束相位闭合算法. 给出了多光束发射阵列下构造相位闭合比率应满足的条件, 在此基础上推导出新的四光束相位闭合公式, 证明能够在消除大气随机相位误差的同时抑制光束闪烁效应对成像质量的影响. 数值模拟结果表明: 所提 FPC 算法能有效消除大气扰动带来的随机相位误差, 且与三光束方式相比能够抑制光强闪烁带来的重构质量下降; 在信噪比降低的情况下, 重构 strehl 值明显高于 TPC、具有更好的目标重构质量. 下一步将针对实际成像环境中的噪声进一步分析提升 FPC 算法的抑噪能力.

参考文献

- [1] Holmes R B, Ma S, Bhowmik A, Greninger C 1996 *J. Opt. Soc. Am. A* **13** 351
- [2] Stapp J, Spivey B, Chen L, Leon L, Hughes K, Sandler D, Cuellar E L 2006 *Proc. SPIE* **6307** 630701
- [3] Cuellar E L, Cooper J, Mathis J, Fairchild P 2008 *Proc. SPIE* **7094** 70940G
- [4] Zhang W X, Xiang L B, Kong X X, Li Y, Wu Z, Zhou Z S 2013 *Acta Phys. Sin.* **62** 164203 (in Chinese) [张文喜, 相里斌, 孔新新, 李杨, 伍洲, 周志盛 2013 物理学报 **62** 164203]
- [5] Spivey B, Stapp J, Sandler D 2006 *Proc. SPIE* **6307** 630702
- [6] Wang X W, Li Q, Wang Y G, Chen W, Hu X J 2009 *J. National Uni. of Defense Technology* **31** 38 (in Chinese) [王小伟, 黎全, 王雁桂, 陈卫, 胡小景 2009 国防科技大学学报 **31** 38]
- [7] Li Y Q, Wu Z S, Zhang Y Y, Wang M J 2014 *Chin. Phys. B* **23** 074202
- [8] Wang L G, Wu Z S, Wang M J 2013 *Acta Phys. Sin.* **62** 164210 (in Chinese) [王利国, 吴振森, 王明军 2013 物理学报 **62** 164210]
- [9] Wang L G, Wu Z S, Wang M J, Cao Y H, Zhang G 2014 *Chin. Phys. B* **23** 094202
- [10] Cai D M, Wang K, Jia P, Wang D, Liu J X 2014 *Acta Phys. Sin.* **63** 104217 (in Chinese) [蔡冬梅, 王昆, 贾鹏, 王东, 刘建霞 2014 物理学报 **63** 104217]
- [11] Wu W M, Ning Y, Ma Y X, Xi F J, Xu X J 2014 *Chin. Phys. B* **23** 099502
- [12] Cuellar E L, Stapp J, Cooper J 2005 *Proc. SPIE* **5896** 58960D

Four-phase closure algorithm for coherent field imaging*

Cao Bei[†] Luo Xiu-Juan Si Qing-Dan Zeng Zhi-Hong

(Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics of CAS, Xi'an 710119, China)

(Received 1 July 2014; revised manuscript received 5 September 2014)

Abstract

According to the realization principle of phase closure in coherent field imaging, a new four-phase closure (FPC) algorithm is proposed for T-array multi-beam transmitter system. A type of four-item measurement ratio of closure phase is first defined, and then the validity of FPC is confirmed in cancelling out the random atmospheric phase aberrations as well as eliminating atmospheric scintillation effect on degradation of the reconstructed image. Simulations prove the effectiveness of FPC, providing a new approach in removing atmospheric aberrations for multi-beam coherence field imaging.

Keywords: coherent field imaging, phase closure, image reconstruction, scintillation effect

PACS: 42.30.Rx, 42.30.Wb, 07.05.Tp

DOI: [10.7498/aps.64.054204](https://doi.org/10.7498/aps.64.054204)

* Project supported by the Chinese Academy of Sciences, the Light of "Western" Talent Cultivation Plan Dr. Western Fund Project (Grant No. Y429621213).

[†] Corresponding author. E-mail: candy@opt.ac.cn