

抑制孔径间距误差影响的相干场成像质量提升方法研究

程志远 马彩文 罗秀娟 张羽 朱香平 夏爱利

Improving coherent field imaging quality by suppressing the influence of transmitting aperture spacing error

Cheng Zhi-Yuan Ma Cai-Wen Luo Xiu-Juan Zhang Yu
Zhu Xiang-Ping Xia Ai-Li

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 64, 124203 (2015) DOI: 10.7498/aps.64.124203

在线阅读 View online: <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.124203>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn/CN/Y2015/V64/I12>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

部分相干径向偏振光束传输中相干性研究

[Research on the coherence of partially coherent radially polarized beam during propagation](#)

物理学报.2015, 64(13): 134201 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.134201>

第三代同步辐射光源 X 射线相干性测量研究

[Coherence of X-ray in the third synchrotron radiation source](#)

物理学报.2014, 63(10): 104202 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.63.104202>

相干场成像原理局限性分析

[Analyses on limitations of coherent field imaging principle](#)

物理学报.2014, 63(10): 104203 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.63.104203>

光束相干合成中填充因子对远场光强分布的影响

[Influence of filling factor on far-field intensity distribution in coherent beam combination](#)

物理学报.2014, 63(9): 094202 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.63.094202>

相干场成像技术接收镜精度对传递函数的影响

[Optical transfer function of coherent field imaging based on deviation of receptors](#)

物理学报.2013, 62(22): 224201 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.62.224201>

抑制孔径间距误差影响的相干场成像 质量提升方法研究*

程志远¹⁾²⁾ 马彩文¹⁾ 罗秀娟^{1)†} 张羽¹⁾²⁾ 朱香平¹⁾²⁾ 夏爱利¹⁾

1)(中国科学院西安光学精密机械研究所, 西安 710119)

2)(中国科学院大学, 北京 100049)

(2014年10月9日收到; 2014年12月22日收到修改稿)

相干场成像基于激光发射孔径间距相等、频谱相等的基本假设, 迭代计算频谱重建高分辨图像, 实际应用中不可避免的激光发射孔径间距误差是影响成像质量的重要因素. 针对发射孔径间距误差造成的成像质量下降问题, 提出一种抑制孔径间距误差影响的成像质量提升方法. 首先分析了孔径间距误差对激光回波频谱和成像质量的影响机理; 推导得到了频谱误差迭代模型; 理论上构建了孔径间距误差对信号频谱和成像质量的零影响条件方程; 提出一种线性规划方法求解成像质量零影响条件方程, 得到孔径间距误差最优化分布矩阵; 实际应用中基于该最优化误差矩阵合理分配各孔径间距误差, 就可抑制孔径误差对成像质量的影响. 实验验证了该方法的正确性和有效性. 结果表明: 该方法可提升成像质量评价指标斯特列尔比近1倍; 所提方法可便捷有效地抑制孔径误差对成像质量的影响. 该研究为实际相干场系统成像质量的提升和发射阵列孔径间距精度设计提供了理论指导.

关键词: 发射孔径间距误差, 频谱误差, 成像质量, 相干场成像

PACS: 42.25.Kb, 42.30.Kq, 87.63.lt, 42.30.-d

DOI: 10.7498/aps.64.124203

1 引言

激光相干场成像是一种新型高分辨成像技术, 通过激光发射孔径阵列主动发射多束相干激光照射目标, 目标反射的激光回波信号经解调和相位闭合抑制湍流扰动后, 重构目标高分辨图像. 同现有常规光学成像相比, 该技术无需自适应光学校正就可最大限度地克服大气湍流对成像质量的影响, 并通过拉长发射孔径基线提高系统分辨率, 具有分辨率高、作用距离远、主动性强等特点, 可推广应用于遥感高分成像等领域, 对其开展研究有着重要意义和广阔的应用前景.

1996年, Holes等^[1]为激光相干场成像技术的发展奠定了坚实的理论基础. 随后, 美国于1999年启动了激光相干场成像傅里叶望远镜计划(GEO

Light Imaging National Testbed), 针对地球同步轨道目标成像; 接着又开展了对低轨运动目标成像计划(Satellite Active Imaging National Testbed)^[2]. 国外近期的研究主要有大气湍流抑制研究^[3]、成像实验验证研究^[4]. 相干场成像物理本质上是一种基于傅里叶变换原理的无透镜计算成像技术, 并有望突破衍射极限成像. 关于无透镜成像原理, 目前已开展了针对X射线波段的无透镜成像实验方案研究^[5]; 针对生物细胞、纳米晶体成像的相位恢复算法研究等^[6]. 国内针对远程暗弱目标的激光相干场成像望远镜研究整体处于理论研究和原理验证阶段, 近期的主要研究有基于非均匀采样理论的低频采样技术研究^[7], 观测目标曲面梯度信息对相干场成像影响研究^[8], 激光大气传输中能量估算方法研究^[9], 模拟大气光强和相位抖动的湍流数值仿真研

* 国家自然科学基金(批准号: 11173053)资助的课题.

† 通信作者. E-mail: xj_luo@opt.ac.cn

究^[10], 接收系统光程差与传函数的影响关系研究^[11], 激光发射阵列孔径个数与成像质量的影响关系研究^[12], 不同形状发射孔径阵列分辨率研究^[13].

激光发射孔径阵列是相干场成像系统的重要组成部分. 相干场成像基于发射孔径间距相等、频谱相等的基本假设, 由低阶频谱迭代计算高阶频谱重构高分辨图像, 而技术实现过程中要保证大型激光发射阵列成百上千个孔径间距完全相等, 其实现难度和成本非常高. 而发射孔径间距误差会带来频谱误差, 在后续迭代计算高阶频谱分量时, 产生迭代累计误差, 进而影响重构图像质量. 孔径间距精度要求太高, 系统实现难度非常大, 成本很高, 而精度太低又会影响到成像质量. 如何在一定的成本范围内和工程实施可行性条件下, 合理有效地设计发射系统发射孔径间距精度, 最大限度地提高系统成像质量是本文研究的重点.

本研究从抑制发射孔径间距误差影响的角度, 研究抵消孔径间距误差对成像质量降质影响方法. 本文推导了由孔径间距误差引起的频谱误差传递模型, 建立了孔径间距误差对频谱和成像质量零影响等式条件方程, 提出一种线性优化方法求解孔径间距布局最优优化矩阵, 通过合理分配发射阵列孔径精度, 抵消孔径误差对成像质量的影响, 并对方法的正确性和有效性进行了验证. 该方法有效降低了孔径误差对成像质量的影响, 提升了成像质量, 为相干场成像发射系统孔径间距设计提供了理论依据.

2 相干场成像原理

相干场成像原理如图 1 所示. 系统主要由大型激光发射孔径阵列和面积拼接式接收会聚镜组成, 常规的拼接式望远镜结构对拼接面型要求高^[14], 而激光相干场成像会聚系统只需接收激光回波能量信号, 对拼接面型要求低, 只要求接收系统共焦不共相, 因此可大幅度节约拼接镜光学制造成本. 激光发射阵列发射经频率调制后的多束激光主动扫描目标, 在目标域形成可移动的干涉条纹, 经目标反射的激光回波信号用大面积接收系统会聚, 回波信号中包含了目标丰富的傅里叶频谱分量信息, 最后利用相位闭合技术抑制大气湍流对成像的影响, 并通过逆傅里叶变换重建目标图像^[1,2]. 该技术可通过拉长发射孔径基线获取目标高频细节信息, 从而获取目标高分辨率图像.

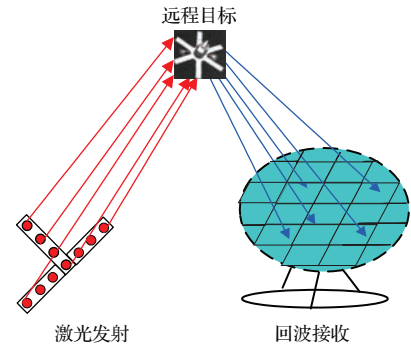


图 1 相干场成像原理示意图

Fig. 1. Schematic diagram of laser coherent imaging.

3 激光回波信号频谱误差模型

本节先分析发射孔径间距误差引起的回波信号误差, 再建立由回波信号误差引起的频谱误差模型, 最后推导得到频谱误差迭代传递模型.

3.1 激光回波信号误差

不失一般性, 本文以相干场成像最通用的三光束 T 型发射阵列平台开展研究, 分析发射孔径间距误差引起的激光回波信号频谱误差.

T 型阵列激光发射如图 2 所示, 三束空间位置不同, 光波频率不同, 光强相同的激光束扫描距离 R 处的目标. 由多光束叠加定理可知, 三束激光会在目标处产生随时间变化的干涉条纹.

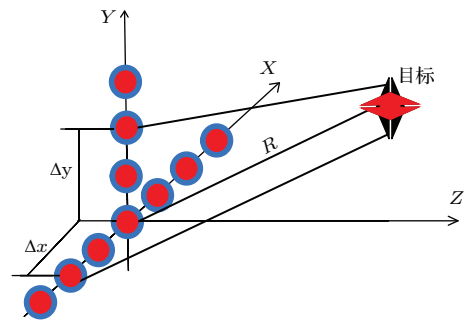


图 2 阵列光束发射示意图

Fig. 2. Schematic diagram of transmitting laser beam.

三束激光经目标反射的回波信号 $S(t)$ 可看作光强函数 $I(x, y, t)$ 与目标强度反射率函数 $O(x, y)$ 之间的卷积, 其表达式为^[15]

$$\begin{aligned}
 S(t) &= \iint I(x, y, t)O(x, y) dx dy \\
 &= 3B^2O_0 + B^2 \sum \left[e^{-i(\Delta\omega_{ij}t - \Delta\varphi_{ij})} O(f_{xij}, f_{yij}) \right] \\
 &\quad + B^2 \sum \left[e^{i(\Delta\omega_{ij}t - \Delta\varphi_{ij})} O^*(f_{xij}, f_{yij}) \right], \quad (1)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 O(f_{xij}, f_{yij}) &= \iint O(x, y) e^{-i2\pi(xf_x + yf_y)} dx dy, \\
 O^*(f_{xij}, f_{yij}) &= \iint O(x, y) e^{i2\pi(xf_x + yf_y)} dx dy, \\
 O_0 &= \iint O(x, y) dx dy, \quad (2)
 \end{aligned}$$

式中, $ij = 12, 13, 23$; B 为光强振幅; $f_x = \Delta x/\lambda R$; $f_y = \Delta y/\lambda R$; $\Delta\omega_{ij}$ 为两两光束之间的频差; $\Delta\varphi_{ij}$ 为两两光束之间的随机相位差; λ 为激光光波波长; R 为探测成像距离. 由上式可见, 采集的目标回波信号频谱值与发射孔径间距相对位置 Δx 和 Δy 直

接相关.

工程实践中存在的发射孔径间距误差会带来回波信号误差, 由发射孔径间距误差引起的回波信号可表示为

$$S'(t) = S(t) + \Delta S(t), \quad (3)$$

式中, $S'(t)$ 表示存在发射孔径间距误差下的回波信号; $S(t)$ 表示不存在发射孔径间距误差状态下的回波信号; $\Delta S(t)$ 表示由发射孔径间距误差引起的回波信号误差, 可表示为

$$\begin{aligned}
 \Delta S(t) &= B^2 e^{-p_{12}t} \iint e^{-j2\pi(xf_x + yf_y)} \left[e^{-j2\pi\left(\frac{x\Delta E_{x12}}{\lambda R} + \frac{y\Delta E_{y12}}{\lambda R}\right)} - 1 \right] dx dy \\
 &+ B^2 e^{p_{12}t} \iint e^{-j2\pi(xf_x + yf_y)} \left[e^{j2\pi\left(\frac{x\Delta E_{x12}}{\lambda R} + \frac{y\Delta E_{y12}}{\lambda R}\right)} - 1 \right] dx dy \\
 &+ B^2 e^{-p_{13}t} \iint e^{-j2\pi(xf_x + yf_y)} \left[e^{-j2\pi\left(\frac{x\Delta E_{x13}}{\lambda R} + \frac{y\Delta E_{y13}}{\lambda R}\right)} - 1 \right] dx dy \\
 &+ B^2 e^{p_{13}t} \iint e^{-j2\pi(xf_x + yf_y)} \left[e^{j2\pi\left(\frac{x\Delta E_{x13}}{\lambda R} + \frac{y\Delta E_{y13}}{\lambda R}\right)} - 1 \right] dx dy \\
 &+ B^2 e^{-p_{23}t} \iint e^{-j2\pi(xf_x + yf_y)} \left[e^{-j2\pi\left(\frac{x\Delta E_{x23}}{\lambda R} + \frac{y\Delta E_{y23}}{\lambda R}\right)} - 1 \right] dx dy \\
 &+ B^2 e^{p_{23}t} \iint e^{-j2\pi(xf_x + yf_y)} \left[e^{j2\pi\left(\frac{x\Delta E_{x23}}{\lambda R} + \frac{y\Delta E_{y23}}{\lambda R}\right)} - 1 \right] dx dy, \quad (4)
 \end{aligned}$$

其中, ΔE_{xij} 为 T 型阵列 X 轴孔径间距误差; ΔE_{yij} 为 T 型阵列 Y 轴孔径间距误差; $p_{ij} = i(\Delta\omega_{ij}t + \Delta\varphi_{ij})$; $ij = 12, 13, 23$. 由 (4) 式可知, t 时刻接收的回波信号同时受到三光束中任意两束光之间的孔径间距误差影响.

3.2 激光回波频谱误差传递模型

激光回波信号 $S'(t)$ 经解调和相位闭合处理后得到激光相干场回波信号频谱, 分析由发射孔径间距误差引起的频谱误差, 可得到激光回波频谱误差模型:

$$\begin{aligned}
 \Delta O &= \iint O(x, y) e^{-i2\pi(xf_x + yf_y)} \\
 &\times \left[e^{-i\frac{2\pi}{\lambda R}(x\Delta E_x + y\Delta E_y)} - 1 \right] dx dy, \quad (5)
 \end{aligned}$$

式中, ΔE_x , ΔE_y 分别为 X 轴和 Y 轴孔径间距误差. 不失一般性, 基于相干场成像通用的 T 型发射阵列, 建立频谱误差传递模型, 迭代重建各阶频谱如图 3 所示. 相干场成像依据发射阵列孔径间距相等、频谱相等的基本假设, 迭代求解各阶频谱分量, 由上述假设, 对于编号 1 到 n 的发射孔径, 存在下列频谱关系等式: $O_{(j-n)j} = O_{j(j+n)}$, 而实际工程中,

由于孔径间距误差的影响, 频谱 $O_{(j-n)j}$ 与 $O_{j(j+n)}$ 不完全相等, 由低阶频谱 O_{12} 迭代计算高阶频谱 O_{1n} 时, 会产生迭代累积误差. 由频谱迭代原理, 可建立第 n 阶频谱误差传递模型:

$$\begin{cases}
 O_{1n} = \frac{O_{12}^{n-1}}{n} + \Delta O_{1n}, \\
 \prod_{k=3}^{n-1} R_{12k} \\
 \Delta O_{1n} = \sum_{j=2}^{n-2} \frac{O_{12}^{n-j} \Delta O_{2(j+1)}}{\prod_{K=3}^n R_{12k}} + \frac{O_{12} \Delta O_{2(j+1)}}{R_{12n}},
 \end{cases} \quad (6)$$

式中, O_{1n} 为第 n 阶频谱值, ΔO_{1n} 为第 n 阶迭代频谱误差项, R_{12k} 为各阶相位闭合系数, $\Delta O_{2(j+1)}$ 为各阶频谱误差.

由上述理论分析和频谱误差传递模型可得如下结论.

1) 第 n 阶频谱 O_{1n} 受前 $n - 1$ 阶频谱误差 ΔO_{23} , ΔO_{24} , \dots , $\Delta O_{2(n-1)}$ 共同影响, 频谱误差项 ΔO_{1n} 呈迭代累加放大趋势.

2) 频谱同时受各阶相位闭合系数 R_{123} ,

R_{124}, \dots, R_{12n} 影响, $1/\prod_{k=3}^n R_{12k}$ 作为各阶频谱误差项的权重系数, 当各阶相位闭合系数 R_{12k} 乘积大于1时, 误差影响权重系数呈递减趋势, 故前 $n-1$ 阶频谱误差对第 n 阶频谱影响越来越小; 反之当相位闭合系数之积小于1时, 误差权重系数呈递增趋势, 前 $n-1$ 阶频谱误差对第 n 阶频谱影响越来越大.

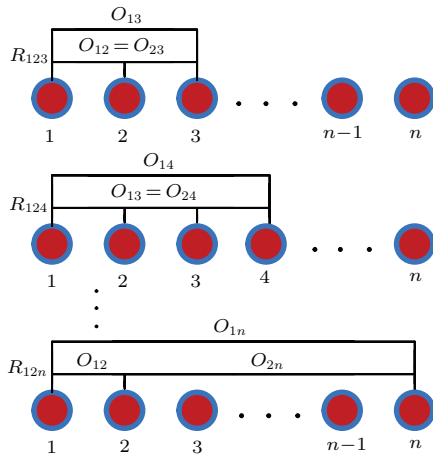


图3 频谱迭代示意图

Fig. 3. Schematic diagram of spectrum iteration.

4 抑制孔径误差影响的像质提升方法

本节由频谱误差模型出发, 构建了发射孔径间距误差对频谱和成像质量的零影响条件方程, 并基于此像质影响条件方程, 提出一种通过求解孔径最优误差分布矩阵的线性优化方法, 抵消孔径间距误差对成像质量的影响.

4.1 成像质量零影响条件方程的构建

由上述频谱误差模型(5)进一步分析, 可得孔径间距误差对频谱和成像质量的零影响等式条件方程

$$(x\Delta Ex + y\Delta Ey)/\lambda R = N \quad (N \text{ 为整数}), \quad (7)$$

式中, x, y 分别为发射孔径坐标; ΔEx 为该位置处 X 轴上的孔径间距误差; ΔEy 为该位置处 Y 轴上的孔径间距误差.

当发射孔径间距差 $\Delta Ex, \Delta Ey$ 满足上述等式条件方程(7)时, X 轴和 Y 轴发射孔径间距误差引起的频谱误差相互抵消, 频谱误差为零, 因此不会影响重构成像质量.

理论分析得出如下结论: 孔径间距误差满足条件(7), 就可抑制孔径间距误差对重建图像质量的影响, 从而间接提升成像质量.

4.2 成像质量零影响方程线性规划求解模型

为使像质零影响条件方程(7)求解简单化, 方程右端可简化为 $N = 0$, 得到简化后的像质零影响条件方程

$$x\Delta Ex + y\Delta Ey = 0. \quad (8)$$

基于约束优化的思想, 将上述等式条件转化为线性规划问题求解, 可用线性规划模型表述为

$$\begin{aligned} \min \quad & x\Delta Ex + y\Delta Ey, \\ \text{s.t.} \quad & x_1 \leq \Delta Ex \leq x_2, \\ & y_1 \leq \Delta Ey \leq y_2. \end{aligned} \quad (9)$$

式中, x_1 和 x_2 分别为 T 型发射阵列 X 轴孔径间距最小和最大误差, y_1 和 y_2 分别为 T 型阵列 Y 轴孔径间距最小和最大误差. 模型(9)中的孔径位置 x 和 y 变化范围如下: $-L_x \leq x \leq L_x$; $0 \leq y \leq L_y$; L_x 为 T 型阵列 X 轴正(负)半轴长度; L_y 为 T 型阵列 Y 轴长度.

对应于每一个空间孔径位置 (x, y) , 先求解孔径间距误差分布最优值 $\Delta Ex, \Delta Ey$; 遍历 T 型阵列所有采样频谱点, 可求得一组孔径间距最优分布解.

4.3 抑制孔径误差影响的像质提升方法

1) 由成像目标大小和预期图像分辨率, 计算 T 型发射阵列孔径间距及 X 轴和 Y 轴臂长 L_x 和 L_y .

2) 在一定的工程实现可行性条件和成本范围内, 确定 X 轴的孔径间距最小和最大误差精度 x_1 和 x_2 ; 确定 Y 轴的孔径间距最小和最大误差精度 y_1 和 y_2 .

3) 上述参数代入线性规划模型(9), 求解得到孔径间距误差矩阵对频谱和成像质量影响最小的一组最优解 M .

4) 以上述最优孔径间距误差矩阵 M 为设计指标, 调节补偿各发射孔径位置精度逼近上述最优误差分布矩阵 M , 从而最大限度地抑制孔径间距误差对重构图像的降质影响, 达到间接提升相干场成像质量的目的.

5 成像质量评价

本文采用斯特列尔比 (Strehl ratio, SR) 来评价重建图像与原始目标图像的强度误差分布^[16]. SR 是两幅图像强度分布互相关谱的归一化结果, 原始图像强度分布表示为 $O(f)$, 重建图像强度分布表示为 $N(f)$, 其共轭分别为 $O^*(f)$ 和 $N^*(f)$, 其定义如 (10) 式所示. 两幅强度分布相同的图像, SR 为 1, SR 一般小于 1, 比值越大说明两幅图像越接近.

$$SR = \frac{\left| \iint O(f)N(f)df_xdf_y \right|^2}{\iint O(f)O^*(f)df_xdf_y \iint N(f)N^*(f)df_xdf_y} \quad (10)$$

6 仿真实验和分析

本节基于最常用的 T 型发射阵列建立相干场成像仿真系统, 在同样误差范围内, 分别采用本文所提方法和不采用本文所提方法直接重构图像, 并比较两种情况下的成像 SR, 定量化评估本文所提方法的效果.

仿真思路 对 X 轴和 Y 轴设置不同的孔径误差范围, 进行仿真重建图像, 计算重建图像的 SR, 分析讨论 T 型发射阵列孔径间距误差对成像质量

的影响和像质提升方法的效果.

仿真实验条件 观测距离 1000 km; 目标尺寸 2 m; T 型发射阵列孔径间距 0.58 m; T 型发射阵列 X 轴孔径个数 11 个, Y 轴孔径个数 5 个; T 型阵列 X 轴臂长 5.8 m, Y 轴臂长 2.3 m; 相干场成像望远镜等效孔径 6.2 m; 激光波长 1064 nm.

6.1 孔径间距误差对像质的影响

模拟不同误差范围下的孔径间距误差, 构造多组发射孔径间距误差数据源, 并分别依据这些数据重建图像和计算重建图像的 SR, 分析不同孔径间距误差对重建图像质量的降质影响程度. 图 4 为原始目标图像, 图 5 为 T 型发射阵列孔径间距误差在 0%—20% 变化范围内恢复得到的图像, 表 1 为不同孔径误差下的重建图像 SR, 图 6 为孔径间距误差与重建图像 SR 之间的关系.

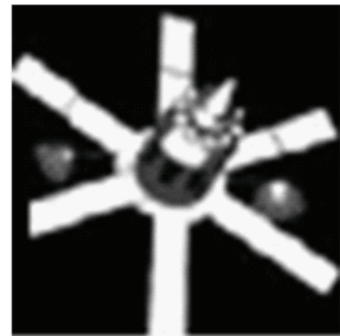


图 4 原始目标图像

Fig. 4. Original target image.

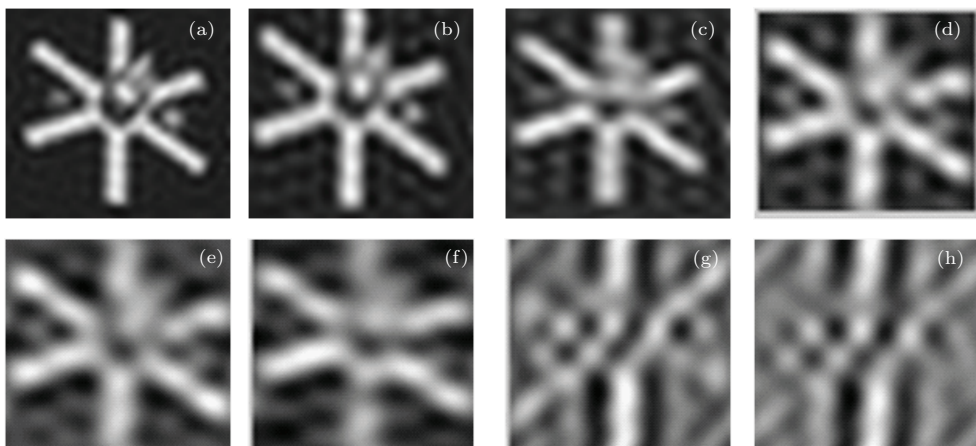


图 5 不同孔径间距误差下的重建图像 (a) 误差 0% 重构图像; (b) 误差 3% 重构图像; (c) 误差 5% 重构图像; (d) 误差 7% 重构图像; (e) 误差 8% 重构图像; (f) 误差 10% 重构图像; (g) 误差 15% 重构图像; (h) 误差 20% 重构图像

Fig. 5. Reconstructed image of different aperture spacing errors: (a) reconstructed image of 0% error; (b) reconstructed image of 3% error; (c) reconstructed image of 5% error; (d) reconstructed image of 7% error; (e) reconstructed image of 8% error; (f) reconstructed image of 10% error; (g) reconstructed image of 15% error; (h) reconstructed image of 20% error.

表1 不同孔径间距误差下的SR
Table 1. SR with different aperture spacing errors.

孔径间距误差/%	0	3	5	7	8	10	15	20
SR/%	35.3	34.8	32.2	28.8	22.5	25.8	19.1	13.4

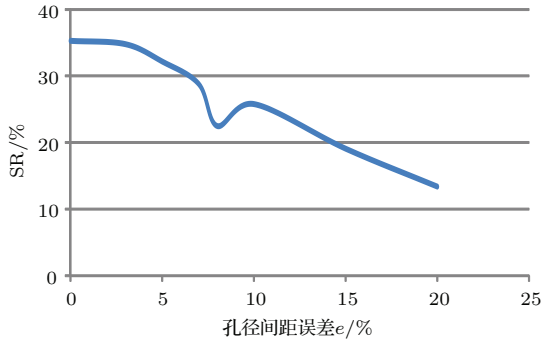


图6 重构图像SR与孔径间距误差的关系

Fig. 6. Relation between imaging SR and aperture spacing error.

综合上述图5、图6和表1, 可得如下结果: 比较图5不同孔径间距误差下的重构图像可知, 发射孔径间距误差越大, 对图像影响越大, 成像质量越差; 当孔径间距误差超过5%以后, 图像开始模糊不清, SR明显下降(图6); 当间距误差超过10%时, 已无法分辨原始目标, SR下降50%以上; 当间距误差达20%时, 几乎无法重构成像, SR降至13.4%.

6.2 抑制孔径间距误差降质影响

为验证本文所提方法的正确性和有效性, 取与6.1节仿真实验中同样的误差范围0%—20%, 采用本文所提方法抑制孔径误差对成像质量影响后, 得到不同误差范围内重构图像和成像质量量化评价指标SR.

表2为本文方法重建图像SR, 图7为T型发射阵列孔径间距误差在0%—20%范围内本文像质提升方法恢复的图像, 图8为该方法抑制孔径误差影响后重建图像SR与孔径间距误差之间的关系, 图9为本文所提方法重建图像SR提升效果百分比与孔径间距误差的关系对照图.

表2 基于本文像质提升方法, 不同孔径间距误差下的SR
Table 2. SR with different aperture spacing errors based on the suppressing spacing error method.

孔径间距误差/%	0	3	5	7	8	10	15	20
SR/%	35.3	35.1	34.5	33.6	32.99	31.58	26.8	23.98

综合上述图7、图8、图9和表2可得如下结果: 如图7所示, 新方法可明显改变重建图像的视觉效

果; 从图8和图9可知, 在同样误差范围下, 新方法可有效提升成像SR.

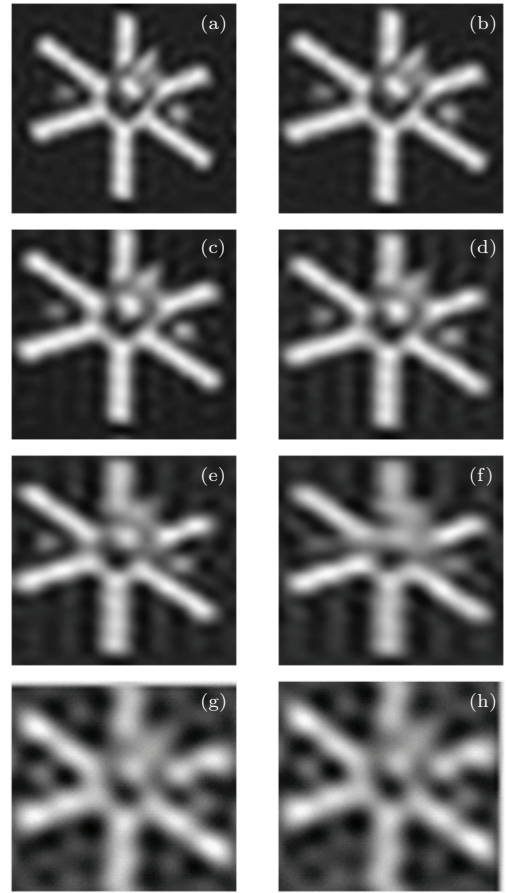


图7 抑制孔径间距误差方法重建图像 (a) 误差0%重构图像; (b) 误差3%重构图像; (c) 误差5%重构图像; (d) 误差7%重构图像; (e) 误差8%重构图像; (f) 误差10%重构图像; (g) 误差15%重构图像; (h) 误差20%重构图像

Fig. 7. Reconstructed image obtained by the suppressing spacing error method: (a) reconstructed image of 0% error; (b) reconstructed image of 3% error; (c) reconstructed image of 5% error; (d) reconstructed image of 7% error; (e) reconstructed image of 8% error; (f) reconstructed image of 10% error; (g) reconstructed image of 15% error; (h) reconstructed image of 20% error.

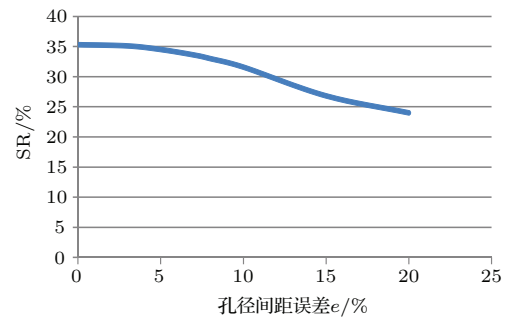


图8 基于本文像质提升方法, 重构图像SR与孔径间距误差的关系

Fig. 8. Relation between SR and aperture spacing error based on the suppressing spacing error method.

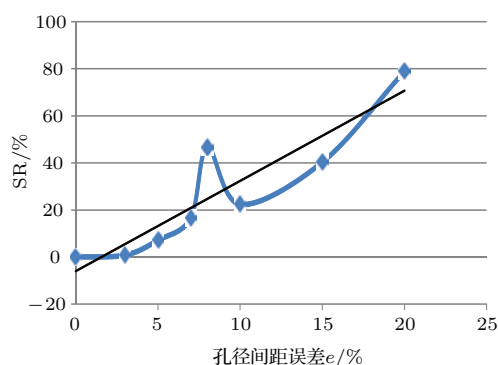


图9 SR提升百分比与孔径间距误差的关系

Fig. 9. Relation between improving SR and aperture spacing error.

6.3 实验结果比较分析

1) 抑制间距误差影响方法的实验结果

理论分析和实验仿真表明,采用本文所提方法可有效抵消孔径间距误差对成像质量的影响,且呈现孔径间距误差越大,提升效果越明显趋势。

基于本文像质提升方法,孔径间距误差同样为20%,SR由未采用本文方法的13.4%提升到23.98%,成像SR相对百分比提升近1倍.图9呈现出孔径间距误差越大,SR提升越大的趋势,可见孔径间距误差越大,该方法对像质提升效果越明显.从直观视觉角度来看,孔径间距误差达20%时,不采用该方法系统已无法成像,如图5(h)所示;而采用该方法抑制孔径误差影响后,依旧可成像,如图7(h)所示。

2) 孔径间距误差对成像质量影响的实验结果

实验结果表明,发射孔径间距误差越大,对重建图像质量的影响越大.孔径间距误差在5%以内,孔径间距误差对图像降质影响不明显,SR下降在4%以内;发射孔径间距误差超过15%时,对成像质量影响很大,SR下降50%以上,几乎无法成像。

7 讨论

实际应用中不可避免的孔径间距误差使得相干场成像不满足孔径间距相等、频谱相等的基本成像假设.为解决孔径间距误差带来的成像质量下降问题,本文研究了实际应用中不满足该基本成像假设的情形下孔径间距误差对频谱和成像质量的影响机理,建立了孔径误差对成像质量零影响方程,提出一种抑制孔径误差对成像质量降质影响的方法,理论分析和实验验证了误差影响理论模型和抑

制方法的正确性,为相干场成像技术的工程化实现提供了技术支撑。

目前相干场成像技术在原理上已得到验证,本文只是从孔径间距误差对成像质量的影响角度进行研究.实际应用中还有诸如激光光束质量、激光功率稳定性、干涉条纹质量等实际工程误差因素会影响成像质量,对于这些像质影响因素还需要后续不断研究和完善,加快推进激光相干场成像由原理验证向工程技术转化。

8 结论

本文针对激光相干场成像不满足或弱满足孔径间距相等、频谱相等基本假设的情形,建立了相干场成像发射阵列孔径间距误差影响模型,分析了孔径间距误差对频谱和成像质量的影响机理,理论上构建了孔径间距误差对频谱和成像质量零影响的条件方程,基于最优化思想把方程转化为线性规划优化模型求解,提出了一种抑制孔径间距误差的成像质量提升方法.研究表明,该方法可在不增加造价成本和实现难度的前提下,有效抑制孔径误差对成像质量的影响,达到间接提升相干场成像质量的目的.该方法对发射系统孔径间距误差精度设计和相干场成像质量的提升具有指导意义。

参考文献

- [1] Holmes R B, Ma S, Bhowmik A, Greninger C 1996 *J. Opt. Soc. Am. A* **13** 351
- [2] Holmes R B, Brinkley T 1999 *Proc. SPIE* **3815** 11
- [3] Rhodes W T 2012 *Appl. Opt.* **51** A11
- [4] Cuellar E L, Cooper J, Mathis J, Fairchild P 2008 *Proc. SPIE* **7094** 70940G
- [5] Liu R F, Yuan X X, Fang Y Z, Zhang P, Zhou Y, Gao H, Li F L 2014 *Chin. Phys. B* **23** 054202
- [6] Fu J, Li P 2013 *Chin. Phys. B* **22** 014204
- [7] Yu S H, Wang J L, Dong L, Liu X Y, Wang G C 2013 *Acta Opt. Sin.* **33** 0811001 (in Chinese) [于树海, 王建立, 董磊, 刘欣悦, 王国聪 2013 光学学报 **33** 0811001]
- [8] Si Q D, Luo X J, Zeng Z H 2014 *Acta Phys Sin.* **63** 104203 (in Chinese) [司庆丹, 罗秀娟, 曾志红 2014 物理学报 **63** 104203]
- [9] Luo X J, Zhang Y, Sun X, Cao B, Zeng Z H, Xia A L, Li L B, Zhu S L 2013 *Acta Opt. Sin.* **33** 0801004 (in Chinese) [罗秀娟, 张羽, 孙鑫, 曹蓓, 曾志红, 夏爱利, 李立波, 朱少岚 2013 光学学报 **33** 0801004]
- [10] Zeng Z H, Luo X J, Wang B F, Xia A L, Cheng Z Y, Si Q D 2014 *Acta Photon. Sin.* **43** 0601002 (in Chinese) [曾志红, 罗秀娟, 王保峰, 夏爱利, 程志远, 司庆丹 2014 光子学报 **43** 0601002]

- [11] Xiang L B, Zhang W X, Wu Z, Lü X Y, Li Y, Zhou Z S, Kong X X 2013 *Acta Phys. Sin.* **62** 224201 (in Chinese) [相里斌, 张文喜, 伍洲, 吕笑宇, 李杨, 周志盛, 孔新新 2013 物理学报 **62** 224201]
- [12] Ye S, Liu Y, Wu J 2011 *High Power Laser Particle Beams* **23** 611 (in Chinese) [叶溯, 刘艺, 吴健 2011 强激光与粒子束 **23** 611]
- [13] 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, 周志胜 2013 物理学报 **62** 164203]
- [14] Jiang Z Y, Li L, Huang Y F 2009 *Chin. Phys. B* **18** 2774
- [15] Li Y 2013 *Ph. D. Dissertation* (Xi'an: Chinese Academy Sciences University) (in Chinese) [李杨 2013 博士学位论文 (西安: 中国科学院大学)]
- [16] Kong X X, Huang M, Zhang W X 2012 *Acta Opt. Sin.* **32** 1211001 (in Chinese) [孔新新, 黄旻, 张文喜 2012 光学学报 **32** 1211001]

Improving coherent field imaging quality by suppressing the influence of transmitting aperture spacing error*

Cheng Zhi-Yuan¹⁾²⁾ Ma Cai-Wen¹⁾ Luo Xiu-Juan^{1)†} Zhang Yu¹⁾²⁾
Zhu Xiang-Ping¹⁾²⁾ Xia Ai-Li¹⁾

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

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

(Received 9 October 2014; revised manuscript received 22 December 2014)

Abstract

Coherent field imaging is based on the assumption of equal transmitting apertures spacing and equal spectrum of laser, and high-resolution image is reconstructed by iteratively computing the frequency spectrum. However, the inevitable transmitting aperture spacing error of laser is a key factor to affect the coherent field imaging quality in the application. Aiming at the problem of degrading imaging quality caused by the transmitting aperture spacing error, we discuss the mechanism of influence of aperture spacing error on imaging quality and propose a novel method of improving imaging quality from the perspective of suppressing the influence of transmitting aperture spacing error. Firstly, the mechanism of the influence of aperture spacing error on imaging quality and laser echo spectrum is analyzed in detail. Then we derive a frequency spectrum error propagation model. Based on the model, the iterative effect of frequency spectrum error is investigated and the trend of variation in imaging quality with frequency spectrum error is given. We propose a theoretical equation, in which the transmitting aperture spacing error has no influence on frequency spectrum nor imaging quality. To solve the above equation, an optimized method of linear programming is proposed and the optimized matrix of aperture spacing error is obtained. In practice, the influence of aperture spacing error on imaging quality can be largely counteracted by reasonably allocating aperture spacing error according to the optimized spacing error matrix. The correctness and validity of the theoretical model are verified by a simulation experiment. The results show that the Strehl ratio of imaging quality index can be improved by about 100% through using the proposed method, the greater the aperture spacing error, the higher the Strehl ratio of imaging quality index obtained by the method will be. In addition, the method is easy to use practically and less costly as well. Finally, it is concluded that the proposed method can easily and effectively counteract the degrading effect of aperture spacing error on imaging quality. The research can provide a theoretical basis for improving imaging quality and reasonably assigning transmitter aperture spacing accuracy of coherent field imaging telescope.

Keywords: transmitting aperture spacing error, frequency spectrum error, imaging quality, coherent field imaging

PACS: 42.25.Kb, 42.30.Kq, 87.63.lt, 42.30.-d

DOI: 10.7498/aps.64.124203

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 11173053).

† Corresponding author. E-mail: xj_luo@opt.ac.cn