



## 激光主动照明均匀性影响因素及其规律

罗文 张飞舟 张建柱

### Influence factors and laws of laser active illumination uniformity

Luo Wen Zhang Fei-Zhou Zhang Jian-Zhu

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 71, 154203 (2022) DOI: 10.7498/aps.71.20220420

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.7498/aps.71.20220420>

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

---

## 您可能感兴趣的其他文章

### Articles you may be interested in

基于阶梯相位调制的窄谱激光主动照明均匀性

Active illumination uniformity with narrow spectrum laser based on ladderlike phase modulation

物理学报. 2021, 70(15): 154207 <https://doi.org/10.7498/aps.70.20210228>

单脉冲时间精确可控的单纵模Nd:YAG激光器

Single-axial-mode Nd:YAG laser with precisely controllable laser pulse output time

物理学报. 2019, 68(13): 134202 <https://doi.org/10.7498/aps.68.20190393>

相位调制激光多普勒频移测量方法的改进

Improvement of phase modulation laser Doppler shift measurement method

物理学报. 2018, 67(6): 064204 <https://doi.org/10.7498/aps.67.20172049>

激光照明条件对超振荡平面透镜聚焦性能的影响

Effect of laser illumination conditions on focusing performance of super-oscillatory lens

物理学报. 2020, 69(18): 184215 <https://doi.org/10.7498/aps.69.20200577>

基于随机场照射的最优微波成像

Optimal microwave imaging with random field illuminations

物理学报. 2019, 68(5): 055201 <https://doi.org/10.7498/aps.68.20182122>

结构光照明技术在二维激光诱导荧光成像去杂散光中的应用

Structured illumination for two-dimensional laser induced fluorescence imaging to eliminate stray light interference

物理学报. 2019, 68(21): 218701 <https://doi.org/10.7498/aps.68.20190977>

# 激光主动照明均匀性影响因素及其规律

罗文<sup>1)2)3)</sup> 张飞舟<sup>1)</sup> 张建柱<sup>1)†</sup>

1) (北京应用物理与计算数学研究所, 北京 100094)

2) (中国工程物理研究院流体物理研究所, 绵阳 621900)

3) (中国工程物理研究院研究生院, 北京 100088)

(2022年3月8日收到; 2022年4月9日收到修改稿)

针对阶梯相位调制窄谱激光主动照明方法, 基于物理模型及工程应用需求, 对窄谱激光谱线线型、阶梯相位调制器光学镜数量、光学镜厚度梯度误差三种影响因素, 进行了主动照明远场光斑均匀性数值模拟, 揭示了照明远场光斑闪烁指数随影响因素的变化规律. 结果表明: 激光谱线线型对照明光斑均匀性的影响很小, 均匀型、高斯型、洛伦兹型激光谱线照明光斑空间闪烁指数均值分别为 0.27, 0.28, 0.28; 照明光斑闪烁指数随阶梯相位调制器光学镜数量增多而降低, 且逐渐趋于平缓; 光学镜厚度梯度毫米量级的误差对闪烁指数的影响很小, 误差为  $-0.6$  mm 时, 空间闪烁指数由 0.266 增大到 0.271, 恶化率仅为 1.9%.

**关键词:** 主动激光照明, 相位调制, 闪烁指数, 窄谱激光

**PACS:** 42.68.Ay, 42.68.Wt, 42.79.Ag

**DOI:** 10.7498/aps.71.20220420

## 1 引言

主动激光照明是主动跟踪、主动成像、目标识别、激光瞄准等领域关键的技术<sup>[1,2]</sup>. 受大气湍流的影响, 照明光斑呈散斑分布且随时间快速变化<sup>[3,4]</sup>, 光斑均匀性和稳定性严重下降. 如何抑制大气湍流引起的随机散斑效应, 提高远场光斑均匀性和稳定性成为主动激光照明技术迫切需要解决的问题. 目前, 提高主动激光照明远场光斑均匀性和稳定性的方法, 主要有增加照明激光数量、降低照明激光相干性、加入相位扰动来匀化远场光斑分布. 1998—1999年, 林肯实验室 Higgs 和 Barclay<sup>[5,6]</sup> 提出多光束照明技术, 并开展了一系列多光束照明实验, 验证了多光束照明技术改善照明均匀性的效果. 2002—2003年, 万敏等<sup>[7,8]</sup> 提出利用空间相干性较差的激光器作为照明光源的方法, 开展了激光空间相干性对照明光斑均匀性的影响实验研究.

2014年, Poyet 等<sup>[9]</sup> 通过模拟与实验研究了光管照明技术, 照明光斑空间闪烁指数改善了 2.5 倍. 2019年, 康凯<sup>[10]</sup> 研究了基于相位调制的高斯光束空域匀化技术, 通过对光束相位进行调制, 将高斯光束匀化为平顶光束.

2021年, 罗文等<sup>[11]</sup> 提出一种基于阶梯相位调制的窄谱激光主动照明方法, 利用阶梯型相位调制器对窄谱激光进行相位调制, 可提高照明激光到达目标处的光斑均匀性和稳定性. 但在实际工程设计应用中, 影响远距离光斑均匀性的因素有很多, 包括激光谱线分布、阶梯相位调制器光学镜数量、光学镜厚度加工误差等. 本文基于物理模型及工程应用需求, 对激光谱线分布、光学镜数量、光学镜厚度梯度误差三种影响因素, 开展了主动照明远场光斑均匀性数值模拟, 揭示了照明远场光斑闪烁指数随影响因素的变化规律. 激光谱线线型对照明光斑均匀性的影响很小, 工程应用中不作重点关注; 光学镜厚度毫米量级的误差对闪烁指数的影响较小, 需注

† 通信作者. E-mail: zhang\_jianzhu@iapcm.ac.cn

重控制光学镜厚度梯度负向误差; 而阶梯相位调制器光学镜数量对照明光斑均匀性的影响较大, 应结合系统复杂度进行优化, 是工程应用中关注的重点.

## 2 理论模型及问题

### 2.1 理论模型

窄谱激光在发射平面 ( $z = 0$ ) 的光场为

$$E(\mathbf{r}, 0, t) = \int_{k_0 - \Delta k/2}^{k_0 + \Delta k/2} dk U_k(\mathbf{r}, 0) \exp(-i\omega_k t), \quad (1)$$

式中, 窄谱激光中心波数  $k_0 = 2\pi/\lambda_0$ ,  $\lambda_0$  是中心波长; 波数宽度  $\Delta k = 2\pi \cdot \Delta\lambda/\lambda_0^2$ ,  $\Delta\lambda$  是激光线宽;  $U_k(\mathbf{r}, 0)$  是波数为  $k$  的光束的场分布,  $\mathbf{r}$  是发射平面的半径向量;  $t$  是时间; 角频率  $\omega_k = kc$ ,  $c$  是光速.

阶梯型相位调制器由  $N$  个光学镜组成, 第  $j$  部分波数为  $k$  的光束被调制的相位  $\phi_{kj} = (n-1)kh_j$ , 其中  $n$  是光学镜折射率,  $h_j$  是第  $j$  个光学镜厚度. 被阶梯相位调制器调制后的窄谱激光光场为

$$E'(\mathbf{r}, 0, t) = \int_{k_0 - \Delta k/2}^{k_0 + \Delta k/2} dk \sum_{j=1}^N U_{kj}(\mathbf{r}_j, 0) \times \exp(-i\omega_k t) \exp(-i\phi_{kj}), \quad (2)$$

式中,  $U_{kj}(\mathbf{r}_j, 0)$  是第  $j$  部分波数为  $k$  的光束的场分布; 第  $j$  部分激光相对于中心的位置为  $\mathbf{r}_j = \mathbf{r} - \mathbf{d}_j$ ,  $\mathbf{d}_j$  是第  $j$  部分激光的中心位置.

激光大气传输满足线性波束方程, 窄谱激光经大气传输到达目标处 ( $z = L$ ) 的光场分布为

$$E(\mathbf{r}, L, t) = \int_{k_0 - \Delta k/2}^{k_0 + \Delta k/2} dk \sum_{j=1}^N U_{kj}(\mathbf{r}_j, L) \times \exp(-i\omega_k t) \exp(-i\phi_{kj}), \quad (3)$$

式中  $U_{kj}(\mathbf{r}_j, L)$  是第  $j$  部分波数为  $k$  的激光经过大气传输后的场分布. 设激光谱线为均匀分布, 即激光谱线线型为均匀型. 不同波数激光的远场光强相等, 满足  $I_{kj} = I_{k_0j}$  和  $U_{kj}(\mathbf{r}_j, L)U_{k_p}^*(\mathbf{r}_p, L) = U_{k_0j}(\mathbf{r}_j, L) \times U_{k_0p}^*(\mathbf{r}_p, L)$ . 根据不同波数激光远场光斑非相干叠加原理, 窄谱激光在远场的总光强分布为

$$I(\mathbf{r}, L) = \sum_{j=1}^N \Delta k I_{k_0j}(\mathbf{r}_j, L) + \sum_{j=1}^N \sum_{p \neq j}^N \left| U_{k_0j}(\mathbf{r}_j, L) U_{k_0p}^*(\mathbf{r}_p, L) \times \int_{k_0 - \Delta k/2}^{k_0 + \Delta k/2} dk \exp(-i\Delta\phi_{kjp}) \right|, \quad (4)$$

$$\int_{k_0 - \Delta k/2}^{k_0 + \Delta k/2} dk \exp(-i\Delta\phi_{kjp}) = -\frac{i}{(n-1)\Delta h_{jp}} 2 [\sin(\Delta\phi_{k_0jp}) + i \cos(\Delta\phi_{k_0jp})] \sin[(n-1)\Delta k \Delta h_{jp}/2], \quad (5)$$

式中, 第  $j$  部分和第  $p$  部分光学镜对波束为  $k$  的激光的调制相位差  $\Delta\phi_{kjp} = (n-1)k\Delta h_{jp}$ , 光学镜厚度差  $\Delta h_{jp} = h_j - h_p$ .

当阶梯相位调制器第  $j$  部分和第  $p$  部分光学镜厚度差满足

$$\Delta h_{jp} = q \times \frac{(j-p) \times 2\pi}{(n-1)\Delta k} \quad (6)$$

时, (5) 式中  $\sin[(n-1)\Delta k \Delta h_{jp}/2] = 0$ , 因此 (4) 式可简化为

$$I(\mathbf{r}, L) = \sum_{j=1}^N \Delta k I_{k_0j}(\mathbf{r}_j, L) = \sum_{j=1}^N I_j(\mathbf{r}_j, L), \quad (7)$$

式中,  $I_j(\mathbf{r}_j, L) = \Delta k I_{k_0j}(\mathbf{r}_j, L)$  为各部分光束在目标处的光强分布. (7) 式表明, 基于阶梯相位调制的窄谱激光照明远场光斑等价于阶梯相位调制器各部分光束的非相干叠加, 照明结果等效于多光束照明, 采用阶梯型相位调制器可实现多光束照明效果.

### 2.2 影响因素

基于阶梯相位调制的窄谱激光主动照明的理论模型中有 3 个假设:

- 1) 激光谱线分布为均匀型分布, 不同波数激光光强满足  $I_{kj} = I_{k_0j}$ ;
- 2) 阶梯相位调制器中光学镜个数为  $N$ ;
- 3) 阶梯相位调制器中相邻光学镜厚度差 (光学镜厚度梯度) 为  $\Delta h = 2\pi / [(n-1)\Delta k]$ .

在实际工程应用中, 窄谱激光谱线并非理想均匀分布, 阶梯相位调制器光学镜数量有限, 阶梯相位调制器光学镜厚度存在加工误差, 这些都不能严格满足上述 3 个假设条件. 为了使该方法更好地应用于实际工程, 本文通过数值模拟方法, 分析窄谱激光谱线线型、阶梯相位调制器光学镜数量  $N$ 、阶梯相位调制器光学镜厚度梯度误差对照明光斑均匀性的影响规律.

## 3 影响因素

### 3.1 数值模拟方法

利用激光系统仿真软件 EasyLaser<sup>[12,13]</sup> 开展

阶梯相位调制窄谱激光主动照明数值模拟, 研究影响因素对远场光斑均匀性的影响. 窄谱激光: 采用激光谱线均匀离散方法, 将窄谱激光均匀离散化为多个准单频激光. 阶梯相位调制器: 采用光场叠加相位方法, 在  $N$  个部分光束的多个离散准单频激光上分别加载相应的调制相位. 激光大气传输: 采用多层相位屏方法, 大气湍流服从 Kolmogorov 谱.

采用瞬时远场光斑的空间闪烁指数和中心点时间闪烁指数作为照明光斑均匀性和稳定性的评价指标. 空间闪烁指数表达式为

$$\begin{aligned} \sigma_{\text{is}}^2 &= \langle I^2(\mathbf{r}, L) \rangle / \langle I(\mathbf{r}, L) \rangle^2 - 1 \\ &= \left( \sum_{j=1}^N \langle I_j(\mathbf{r}_j, L) \rangle \right)^{-2} \\ &\times \left[ \sum_{j=1}^N \langle I_j^2(\mathbf{r}_j, L) \rangle + 2 \sum_{j=1}^N \sum_{p>j}^N \langle I_j(\mathbf{r}_j, L) I_p(\mathbf{r}_p, L) \rangle \right] - 1, \end{aligned} \quad (8)$$

式中,  $\langle \cdot \rangle$  是对 1 帧瞬态光斑光强分布中面积为  $s$  的圆形区域计算平均, 面积为  $s$  的圆形区域取以网格中心为圆心的固定圆形区域. 中心点时间闪烁指数表达式为

$$\sigma_{\text{it}}^2 = \frac{\langle I_t^2(0, L) \rangle}{\langle I_t(0, L) \rangle^2} - 1, \quad (9)$$

式中,  $I_t(0, L)$  是单帧中心点光强,  $\langle \cdot \rangle$  是中心点光强随时间的平均. 窄谱激光中心波长  $\lambda_0 = 1064 \text{ nm}$ , 谱线宽度  $\Delta\lambda = 0.2 \text{ nm}$ , 均匀离散化为幅值相同的 20 个单频激光, 光束形状为圆形, 光束发射口径  $D = 800 \text{ mm}$ . 阶梯相位调制器由 6 个环形排布的光学镜组成, 每个光学镜口径  $d_{\text{sub}} = 240 \text{ mm}$ , 光学镜材料折射率  $n = 1.5$ , 系数  $q = 1$ . 根据 (6) 式计算得到光学镜厚度梯度  $\Delta h = 11.3 \text{ mm}$ . 激光以  $60^\circ$  斜向上传输, 传输距离为  $600 \text{ km}$ , 大气模式采用实际测量的大气高度廓线, 地面大气相干长度  $C_n^2$  约为  $1.4 \times 10^{-14} \text{ m}^{-2/3}$ , 整层大气相干长度  $r_0$  约为  $11 \text{ cm}@1064 \text{ nm}$ .

图 1 是有阶梯相位调制器和无阶梯相位调制器时的典型帧远场光斑分布. 无阶梯相位调制器时, 受大气湍流效应的影响, 远场光斑呈现散斑特征; 加入阶梯相位调制器对窄谱激光进行调制后, 大气湍流引起的散斑特征被匀化, 光斑均匀性提升. 图 2 是 100 帧光斑的半径及空间闪烁指数曲线. 有阶梯相位调制器时, 远场光斑半径无明显变

化, 由  $2.94 \text{ m}$  增大到  $3.31 \text{ m}$ ; 远场光斑闪烁指数明显降低, 空间闪烁指数均值由  $1.22$  改善到  $0.27$ , 中心点时间闪烁指数由  $0.82$  改善到  $0.26$ .

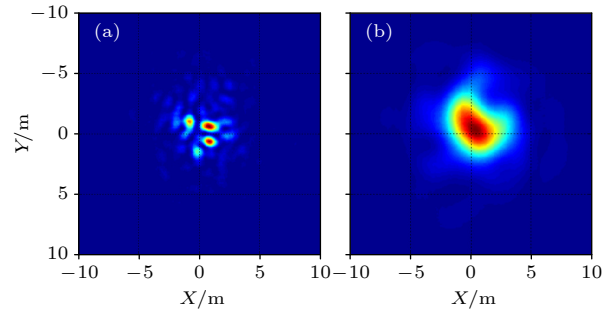


图 1 典型帧远场光斑分布 (a) 无阶梯相位调制器; (b) 有阶梯相位调制器

Fig. 1. Typical focal patterns: (a) No ladderlike phase modulator (No LPM); (b) ladderlike phase modulator (LPM).

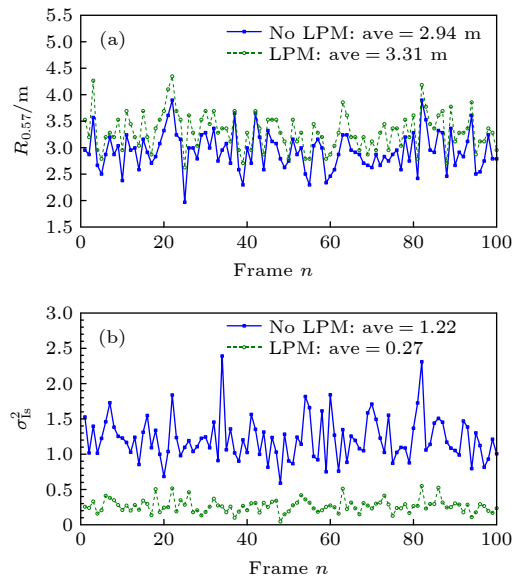


图 2 远场光斑半径及空间闪烁指数 (a) 光斑半径; (b) 空间闪烁指数

Fig. 2. Radius and spatial scintillation index of focal patterns: (a) Radius; (b) spatial scintillation index.

### 3.2 谱线分布

对于窄谱激光, 介质自发辐射光谱中每一条谱线都不是理想的单频光, 而是在其对应的原子能级间跃迁的玻尔频率附近呈现出某种频率分布, 即激光谱线加宽特征, 采用谱线线型和线宽描述. 气体介质的激光谱线加宽机制主要包括属于均匀加宽的自然加宽、寿命加宽、碰撞加宽, 以及属于非均匀加宽的多普勒加宽; 固体和液体介质的激光谱线加宽机制主要包括高温下低浓度离子掺杂的晶体

激光介质的热声子加宽, 和低温下高浓度离子掺杂的晶体介质中晶体随机无规则局部缺陷决定的非均匀加宽, 这些加宽机制产生的激光谱线线型通常为高斯型激光谱线和洛伦兹型激光谱线<sup>[14]</sup>. 将激光谱线归一化处理, 得到归一化后的均匀型、高斯型、洛伦兹型激光谱线表达式分别为

$$I_{\text{BU}(k)} = \begin{cases} 1, & |k - k_0| \leq \Delta k/2, \\ 0, & |k - k_0| > \Delta k/2, \end{cases} \quad (10a)$$

$$I_{\text{BG}(k)} = e^{-0.8325^2 \times (k - k_0)^2 / \Delta k^2}, \quad (10b)$$

$$I_{\text{BL}(k)} = \frac{\Delta k^2}{(k - k_0)^2 + \Delta k^2}. \quad (10c)$$

图 3 给出了窄谱激光中心波长  $\lambda_0 = 1064 \text{ nm}$ , 谱线线宽  $\Delta\lambda = 0.2 \text{ nm}$  时, 三种激光谱线线型分布. 对三种谱线线型的窄谱激光进行阶梯相位调制器调制及大气传输数值模拟, 得到远场光斑分布、空间闪烁指数及中心点时间闪烁指数, 如图 4 和图 5 所示. 结果表明, 均匀型、高斯型、洛伦兹型谱线窄谱激光经阶梯相位调制及大气传输后的远场光斑无明显差异, 与无阶梯相位调制器的照明远场光斑相比, 光斑均匀性得到明显改善. 均匀型、高斯型、洛伦兹型窄谱激光远场光斑空间闪烁指数均值分别为 0.27, 0.28, 0.28, 中心点时间闪烁指数分别为 0.26, 0.29, 0.29.

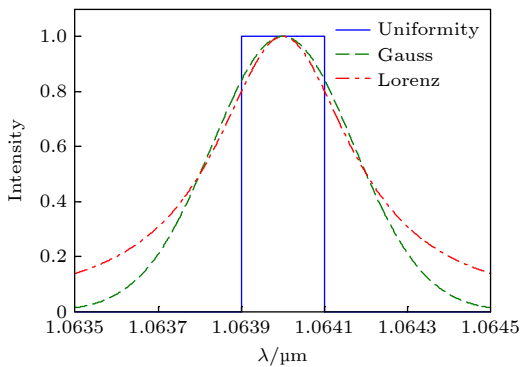


图 3 均匀型、高斯型、洛伦兹型激光谱线  
Fig. 3. Laser spectrum style of uniformity, Gauss and Lorenz.

### 3.3 光学镜数量

(6) 式给出了阶梯相位调制器光学镜厚度与光学镜数量和谱线宽度的关系, 第  $j$  个光学镜的厚度为

$$h_j = (j - 1) \times \frac{\lambda_0^2}{(n - 1) \Delta\lambda}, \quad (11)$$

(11) 式表明阶梯相位调制器光学镜厚度与光学镜数量呈正比关系, 光学镜数量越多, 光学镜厚度越

厚, 最大厚度为  $h_{\text{max}} = (N - 1) \times \lambda_0^2 / [(n - 1) \Delta\lambda]$ , 其中  $N$  是阶梯相位调制器光学镜个数.

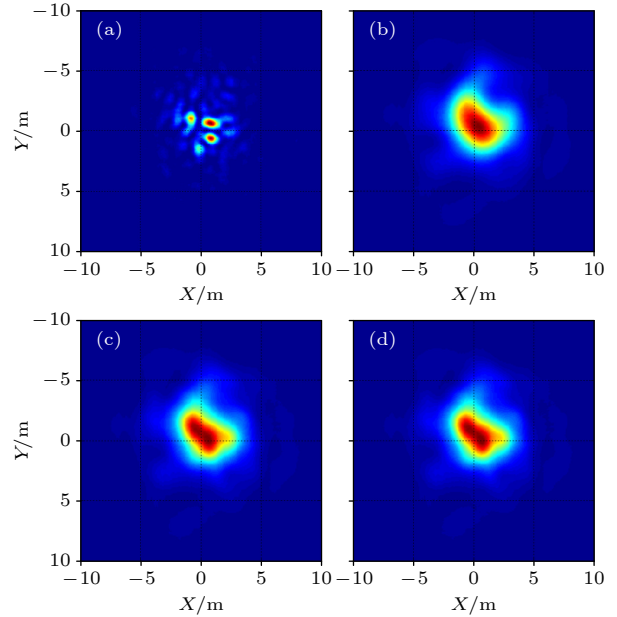


图 4 不同谱线线型窄谱激光照明远场光斑分布 (a) 无阶梯相位调制器; (b)–(d) 有阶梯相位调制器, 其中激光谱线线型分别为 (b) 均匀型、(c) 高斯型、(d) 洛伦兹型

Fig. 4. Typical focal patterns with different laser spectrum styles: (a) No LPM; (b)–(d) LPM, where the laser spectrum styles in panel (b)–(d) are (b) uniformity style, (c) Gauss style, (d) Lorenz style, respectively.

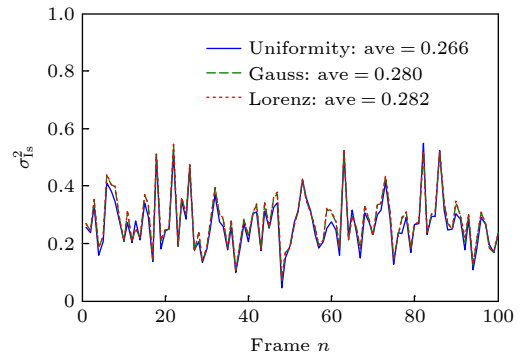


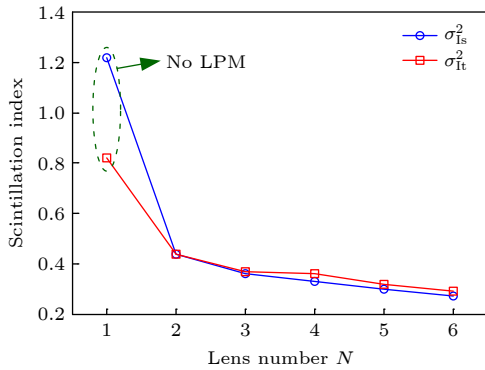
图 5 不同谱线线型窄谱激光照明远场光斑空间闪烁指数  
Fig. 5. Spatial scintillation index of the focal patterns with different laser spectrum styles.

当  $\lambda_0 = 1.064 \text{ nm}$ ,  $\Delta\lambda = 10, 50, 100 \text{ GHz}$ ,  $N = 1-6$  时, 阶梯相位调制器光学镜的厚度见表 1. 结果表明,  $\Delta\lambda = 10 \text{ GHz}$ ,  $N = 6$  时,  $h_{\text{max}} = 283 \text{ mm}$ , 工程系统十分笨重;  $\Delta\lambda = 100 \text{ GHz}$  时, 第 2 块光学镜厚度仅为 5.96 mm, 光学镜厚度较薄;  $\Delta\lambda = 50 \text{ GHz}$  时, 第 2 块光学镜厚度为 11.92 mm, 第 6 块光学镜厚度为 59.58 mm, 工程应用较为合适.

表 1 阶梯相位调制器光学镜厚度  
Table 1. Lens thickness of LPM.

光学镜 数量	激光线宽/ mm		
	0.04 (~10 GHz)	0.19 (~50 GHz)	0.38 (~100 GHz)
1	0	0	0
2	56.60	11.92	5.96
厚度 /mm	3	113.21	23.83
	4	169.81	35.75
	5	226.42	47.66
	6	283.02	59.58

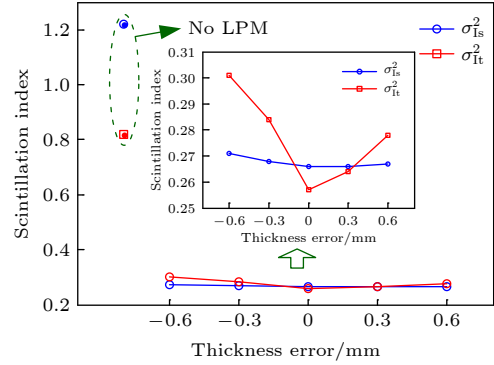
取  $\lambda_0 = 1.064$  nm,  $\Delta\lambda = 0.19$  nm(约 50 GHz), 模拟分析阶梯相位调制器光学镜数量为 2—6 时, 远场光斑空间闪烁指数及中心点时间闪烁指数, 优化光学镜数量. 图 6 给出了空间闪烁指数和中心点时间闪烁指数随光学镜数量的变化关系. 加入阶梯相位调制器后空间闪烁指数和中心点时间闪烁指数均得到明显改善, 随着光学镜数量增加, 闪烁指数改善趋于平缓,  $N = 5$  时, 空间闪烁指数和中心点时间闪烁指数均约为 0.3. 实际工程中光学镜数量越大、系统越复杂、实现难度越大, 同时考虑工程复杂度和照明光斑均匀性, 在该条件下优先选择阶梯相位调制器光学数量为 5 或 6.


 图 6 光学镜数量对闪烁指数的影响  
Fig. 6. Scintillation index vs. the lens number.

### 3.4 光学镜厚度梯度误差

远场光斑表达式(即 (4) 式)完全简化为 (7) 式的形式, 要求阶梯相位调制器光学镜厚度梯度严格满足  $\Delta h = 2\pi / [(n-1)\Delta k]$ . 但是实际工程中光学镜加工存在误差, 通过数值模拟, 分析阶梯相位调制器光学镜厚度梯度误差对远场光斑闪烁指数的影响.

图 7 是阶梯相位调制器光学镜厚度梯度误差为  $-0.6, -0.3, 0, 0.3, 0.6$  mm 时, 窄谱激光照明远场光斑空间闪烁指数和中心点时间闪烁指数. 结果表明: 光学镜厚度梯度误差在毫米级范围内时, 误差越大空间闪烁指数和中心点时间闪烁指数越大; 但毫米量级误差对闪烁指数的影响都很小, 光学镜厚度梯度误差为  $-0.6$  mm 时, 空间闪烁指数由 0.266 增大到 0.271, 中心点时间闪烁指数由 0.258 增大到 0.301.


 图 7 光学镜厚度梯度误差对闪烁指数的影响  
Fig. 7. Scintillation index vs. the thickness error of lens.

另外, 光学镜厚度梯度负向误差对闪烁指数的影响大于正向误差对闪烁指数的影响, 这是由于远场光强分布中相干部分幅值随光学镜厚度梯度误差变化而振荡, 且负向误差振荡幅值大于正向误差振荡幅值引起的. (5) 式的绝对值为

$$\begin{aligned}
 & \left| \int_{k_0 - \Delta k/2}^{k_0 + \Delta k/2} dk \exp(-i \Delta \phi_{kjp}) \right| \\
 &= \left| -\frac{i}{(n-1)\Delta h_{jp}} 2 [\sin(\Delta \phi_{k_0jp}) \right. \\
 & \quad \left. + i \cos(\Delta \phi_{k_0jp}) \sin[(n-1)\Delta k \Delta h_{jp}/2] \right| \\
 &= \left| \frac{2 \sin[(n-1)\Delta k(j-p)\Delta h/2]}{(n-1)(j-p)\Delta h} \right|. \quad (12)
 \end{aligned}$$

当光学镜厚度梯度存在误差  $\Delta h_{\text{err}}$  时, (12) 式可改写为

$$\begin{aligned}
 & \left| \int_{k_0 - \Delta k/2}^{k_0 + \Delta k/2} dk \exp(-i \Delta \phi_{kjp}) \right| \\
 &= \left| \frac{2 \sin[(n-1)\Delta k(j-p)(\Delta h + \Delta h_{\text{err}})/2]}{(n-1)(j-p)(\Delta h + \Delta h_{\text{err}})} \right|. \quad (13)
 \end{aligned}$$

图 8 给出了归一化幅值与  $\Delta h_{\text{err}}$  的关系. 随着  $\Delta h_{\text{err}}$  增大, 归一化幅值呈现振荡现象, 且振荡的幅

值越来越小;  $\Delta h_{\text{err}}$  为负的振荡幅值大于  $\Delta h_{\text{err}}$  为正的振荡幅值. 因此, 光学镜厚度梯度负向误差对闪烁指数的影响大于正向误差的影响.

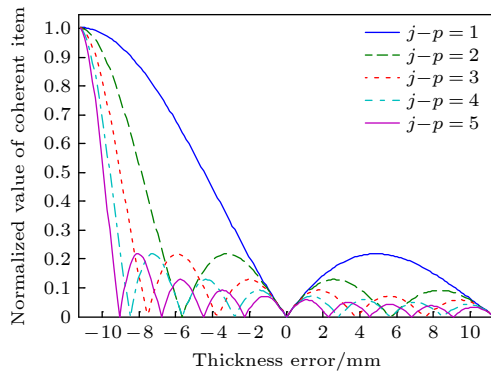


图 8 照明光斑相干项归一化幅值与光学镜厚度梯度误差的关系

Fig. 8. Normalized value of coherent item vs. the thickness error of lens.

## 4 结 论

基于阶梯相位调制的窄谱激光主动照明方法, 采用窄谱激光作为照明光源, 通过特制的阶梯相位调制器对窄谱激光进行相位调制, 能够有效抑制大气湍流效应, 提高主动激光照明光斑均匀性和稳定性. 在实际工程应用中, 激光谱线为非理想均匀分布, 阶梯相位调制器光学镜数量有限, 阶梯相位调制器光学镜厚度存在加工误差, 这些都不能严格满足理论模型中的假设条件. 基于物理模型及工程应用需求, 针对不同谱线分布、不同光学镜数量、不同光学镜厚度梯度误差三种影响因素, 开展了主动照明远场光斑均匀性数值模拟, 揭示了照明远场光斑闪烁指数随影响因素的变化规律. 结果表明: 均匀型、高斯型、洛伦兹型谱线窄谱激光照明远场光斑及闪烁指数无明显差异, 空间闪烁指数均值分别为 0.27, 0.28, 0.28, 中心点时间闪烁指数分别为 0.26, 0.29, 0.29; 阶梯相位调制器对照明远场光斑闪烁指数改善明显, 但随着光学镜数量增加, 闪烁指数改善趋于平缓, 光学镜数量为 5 时闪烁指数约为 0.3, 在工程应用中同时考虑工程复杂度和照明光斑均匀性, 光学镜数量取 5 或 6; 光学镜厚度梯

度毫米量级的误差对闪烁指数的影响很小, 光学镜厚度梯度误差为  $-0.6$  mm 时, 空间闪烁指数由 0.266 增大到 0.271, 闪烁指数随光学镜厚度梯度误差增大逐渐增大, 负向误差对闪烁指数的影响大于正向误差对闪烁指数的影响. 本文针对阶梯相位调制窄谱激光主动照明方法, 研究了三种因素对照明远场光斑均匀性的影响规律, 建议在工程应用中谱线线型不作为关注重点, 光学镜数量需根据工程复杂度及光斑匀化效果进行优化, 注重控制光学镜厚度梯度负向误差.

## 参考文献

- [1] Su Y, Wan M 2004 *High Energy Laser System* (Beijing: National Defense Industrial Press) p181 (in Chinese) [苏毅, 万敏 2004 高能激光系统 (北京: 国防工业出版社) 第181页]
- [2] Tan Y, Geng C, Li X Y, Luo W, Luo Q 2015 *Acta Phys. Sin.* **64** 024216 (in Chinese) [谭毅, 耿超, 李新阳, 罗文, 罗奇 2015 物理学报 **64** 024216]
- [3] Zhang F Z, Li Y K 2007 *Acta Opt. Sin.* **22** 567 (in Chinese) [张飞舟, 李有宽 2007 光学学报 **22** 567]
- [4] Peleg A, Moloney J V 2006 *J. Opt. Soc. Am. A* **23** 3114
- [5] Higgs C, Barclay H T 1998 *Part of the SPIE Conference on Airborne Laser Advanced Technology* Orlando, Florida, USA, April, 1998 p160
- [6] Higgs C, Barclay H T 1999 *Part of the SPIE Conference on Airborne Laser Advanced Technology II* Orlando, Florida, USA, April, 1999 p206
- [7] Wan M, Zhang W, Xiang R J, Yang R 2002 *High Power Laser and Particle Beam* **14** 0041 (in Chinese) [万敏, 张卫, 向汝建, 杨锐 2002 强激光与粒子束 **14** 0041]
- [8] Li B Z, Lü B D, Wan M, Li G H, Zheng J, Zhang W 2003 *Laser Tech.* **27** 334 (in Chinese) [李宾中, 吕百达, 万敏, 李国会, 郑捷, 张卫 2003 激光技术 **27** 334]
- [9] Poyet J M, Meyer O, Christnacher F 2014 *Opt. Lett.* **39** 2592
- [10] Kang K 2019 *M. S. Thesis* (Harbin: Harbin Institute of Technology) (in Chinese) [康凯 2019 硕士学位论文 (哈尔滨: 哈尔滨工业大学)]
- [11] Luo W, Chen T J, Zhang F Z, Zhou K, An J Z, Zhang J Z 2021 *Acta Phys. Sin.* **70** 154207 (in Chinese) [罗文, 陈天江, 张飞舟, 邹凯, 安建祝, 张建柱 2021 物理学报 **70** 154207]
- [12] Xie X G, Zhang J Z, Yue Y F, An J Z, Zhang F Z 2013 *High Power Laser and Particle Beam* **25** 2536 (in Chinese) [谢晓钢, 张建柱, 岳玉芳, 安建祝, 张飞舟 2013 强激光与粒子束 **25** 2536]
- [13] Zhang J Z, Zhang F Z, Wu Y 2012 *High Power Laser and Particle Beam* **24** 2318 (in Chinese) [张建柱, 张飞舟, 吴毅 2012 强激光与粒子束 **24** 2318]
- [14] Chen Y Q, Wang J H 2008 *Laser Principle* (Hangzhou: Zhejiang University Press) pp240–265 (in Chinese) [陈钰清, 王静环 2008 激光原理 (杭州: 浙江大学出版社) 第240–265页]

# Influence factors and laws of laser active illumination uniformity

Luo Wen<sup>1)2)3)</sup> Zhang Fei-Zhou<sup>1)</sup> Zhang Jian-Zhu<sup>1)†</sup>

1) (*Institute of Applied Physics and Computational Mathematics, Beijing 100094, China*)

2) (*Institute of Fluid Physics, China Academy of Engineering Physics, Mianyang 621900, China*)

3) (*Graduate School of China Academy of Engineering Physics, Beijing 100088, China*)

( Received 8 March 2022; revised manuscript received 9 April 2022 )

## Abstract

Active illumination with narrow spectrum laser based on ladderlike phase modulator (LPM), is an effective method to improve the illumination uniformity. Laser spectrum style, lens number of LPM, and lens thickness error of LPM are three significant factors influencing the illumination uniformity in engineering. The laws of the three factors with scintillation indexes are analyzed through numerical simulation. The results indicate that the laser spectrum style is not an important factor, and the spatial scintillation index of uniformity, Gauss, Lorenz style narrow spectrum laser are 0.27, 0.28, and 0.28 respectively. The scintillation indexes decrease gradually with the lens number of LPM increasing. The spatial scintillation index increases from 0.266 to 0.271, when the lens thickness error of LPM is  $-0.6$  mm. Therefore, several ideas are proposed: when this method is used in the engineering project, some attention should be paid to laser spectrum style, the lens number of LPM should be optimized by considering the laser spectrum width and scintillation index synchronously, and the negative error of optical lens thickness gradient of LPM should be controlled attentively.

**Keywords:** laser active illumination, phase modulation, scintillation index, arrow spectrum laser

**PACS:** 42.68.Ay, 42.68.Wt, 42.79.Ag

**DOI:** [10.7498/aps.71.20220420](https://doi.org/10.7498/aps.71.20220420)

---

† Corresponding author. E-mail: [zhang\\_jianzhu@iapcm.ac.cn](mailto:zhang_jianzhu@iapcm.ac.cn)