

# 应用于激光回光探测的高效窄带光栅光谱滤波技术

许放<sup>1,2\*\*</sup>, 万敏<sup>1\*</sup>, 颜宏<sup>1</sup>, 张永红<sup>1</sup>, 谢庚承<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>中国工程物理研究院应用电子学研究所, 四川 绵阳 621900;

<sup>2</sup>中国工程物理研究院研究生院, 北京 100088

**摘要** 在强背景下的窄线宽激光回光探测研究中,采用光谱滤波的方式可以滤除背景光,提高探测系统的信噪比;对于光栅滤波系统而言,考虑到信号光经过大气信道传输后会引起波前相位畸变,而这会对系统的滤波性能产生一定影响,故有必要对其进行深入研究。针对光栅光谱滤波在激光大气传输探测方向的应用,从激光大气传输理论和光栅衍射原理出发,建立了光栅在入射光场为大气扰动光场时的光谱光强分布仿真模型,分析了大气相干长度以及系统结构参数对系统性能的影响,给出了光栅光谱滤波技术系统及大气适用条件,当大气相干长度  $r_0 > 0.05$  m 时,得到了亚纳米级的光谱滤波线宽(半峰全宽 FWHM 为 0.3 nm),有效光谱的透射率也超过了 0.90,并通过大量仿真实验进行了验证。

**关键词** 光栅; 光谱滤波; 窄线宽; 高效率; 双光栅; 大气湍流

中图分类号 O436

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201845.1005002

## High Efficient Narrow-Band Grating Spectral Filtering Technology Applied to Laser Echo Detection

Xu Fang<sup>1,2\*\*</sup>, Wan Min<sup>1\*</sup>, Yan Hong<sup>1</sup>, Zhang Yonghong<sup>1</sup>, Xie Gengcheng<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Institute of Applied Electronics, China Academy of Engineering Physics, Mianyang, Sichuan 621900, China;

<sup>2</sup>Graduate School of China Academy of Engineering Physics, Beijing 100088, China

**Abstract** In the study of narrow linewidth laser light echo detection under strong background, we utilize spectral filtering method to filter out background light and improve the signal-to-noise ratio. For the grating filter system, the transmission of signal light through the atmospheric channel will cause the wavefront phase distortion, and this will have a certain effect on the filtering performance of the system, so it is necessary to study it further. Aiming at the application of grating spectral filtering in the laser atmospheric transmission detection direction, based on the laser atmospheric transmission theory and the grating diffraction principle, we establish the simulation model of the spectral intensity distribution of the grating when the incident light field is atmospheric disturbance light field. The influences of atmospheric coherent length and system structural parameters on system performance are analyzed. The system of the grating spectral filtering technology and the atmospheric applicable conditions are given. When the atmospheric coherent length  $r_0$  is greater than 0.05 m, sub-nanometer level spectral filter linewidth (full width at half maximum is 0.3 nm) is obtained, and the transmission of the effective spectrum exceeds 0.90. The results are verified by a large number of simulation experiments.

**Key words** gratings; spectral filtering; narrow linewidth; high efficiency; double grating; atmospheric turbulence

**OCIS codes** 050.1950; 140.2020; 140.3300; 140.3298; 140.3320

## 1 引言

激光探测技术<sup>[1-4]</sup>在国防和天文等众多领域具有广泛应用,如:激光主动照明成像、激光导星技术、激光雷达等。激光束在大气远距离传输过程中,其

强度会因光源自身的发散角和大气湍流引起的光束发散作用而逐渐削弱<sup>[5]</sup>。此外,激光导星存在钠共振发射效率和瑞利散射效率低的问题<sup>[6]</sup>,激光照明也存在目标回光散射效率低的问题。同时,天空背景辐射光也会不可避免地混入信号激光中<sup>[7]</sup>,从而

收稿日期: 2018-03-19; 修回日期: 2018-04-09; 录用日期: 2018-04-15

基金项目: 中国工程物理研究院高能激光科学与技术重点实验室基金(CAEP2017090623210)

\* E-mail: wanmin@caep.cn; \*\* E-mail: 772547351@qq.com

使得激光照明和激光导星技术的回光探测系统最终接收到的回光的信噪比较低<sup>[8]</sup>,这给探测带来了一定困难。因此,提高强背景噪声下的弱光探测能力是这两种技术能够得以应用的关键之一。

光谱滤波技术是目前改善激光回光探测信噪比的有效方法<sup>[9-10]</sup>。光谱滤光器能够按照需要改变入射光的光谱强度分布。原本信噪比很低的返回光,在经滤光器处理后,背景光谱被减弱,而信号光谱得以通过,从而使探测信噪比得以提高<sup>[11]</sup>。目前,激光回光探测系统中主要采用的干涉滤光片技术带宽只能达到数纳米级,在此基础上,探测系统接收到的光经过滤光片后,信噪比已经有了一定的提高。但是随着对回光探测精度要求的不断提高,客观上需要发展透射带宽更窄、峰值透射率更高的滤光技术,所以有必要对光谱滤波技术进行更深入的研究。

目前的主流滤波技术,如原子滤光技术<sup>[12]</sup>、法拉第反常色散滤波技术、双折射滤波技术、干涉滤光技术等<sup>[13-14]</sup>,大多存在透射率与线宽性能不能同时满足应用要求的问题,而光栅滤波技术在理论上具有这一潜力。在前期的工作中,本课题组设计了一套基于双多层介质膜衍射光栅的超窄线宽光谱滤波系统<sup>[15]</sup>。为了进一步缩减系统的体积,本文提出了一种单光栅折叠复用结构。另外,前文分析光栅滤波性能时,都是假设入射光近似为平面波或球面波等,但是实际上经过大气后返回的探测光,其相位面因大气湍流的影响而处于一种随机起伏的相位分布状态。从原理上来讲,这种随机相位畸变无疑会对光栅的滤光性能带来很大影响,所以本文的主要目的是为了验证这种光栅滤波技术在存在大气湍流条件下的滤波可行性和稳定性,同时给出大气各类条件参数、系统结构参数等对滤光性能的影响,最终得到该系统的大气适用性条件。

## 2 光栅滤波原理

相位随机分布的激光束照射在多层介质膜光栅上,其出射光场分布同样是光栅单缝衍射与多缝干涉共同作用的结果。对于单缝衍射因子,其与入射在光栅狭缝上的光相位无关,即对于闪耀光栅而言,其单缝衍射相位差 $\Phi$ 为<sup>[16]</sup>

$$\Phi = k(a/2)[\sin(i - \gamma) - \sin(\gamma - \theta)], \quad (1)$$

式中: $i$ 为入射角; $\theta$ 为衍射角; $\gamma$ 为闪耀角; $a$ 为缝宽; $k$ 为波数。对于多缝干涉因子,由于其是光栅所有狭缝子光场的叠加,故其复振幅分布与光栅不同狭缝空间位置差异导致的空间光程差以及由入射光本身引入的相位差这两方面的因素有关;对于相位

面随机分布的入射光,传统的多缝干涉因子并不满足。假设光栅总缝数为 $N$ ,将入射光在每个光栅狭缝上的相位值组成一个 $N \times 1$ 维的矩阵,假设其矩阵元素分别为 $p_1, p_2, p_3, \dots, p_{N-1}, p_N$ ,同时可求得光栅本身引起的多缝干涉相位因子为

$$\delta = kd(\sin i + \sin \theta), \quad (2)$$

式中: $d$ 为光栅常数。则完整的多缝复振幅之和为

$$E_d = \{\exp(-jp_1) + \exp[-j(\delta + p_2)] + \exp[-j(2\delta + p_3)] + \dots + \exp[-j(N-1)\delta + p_N]\}. \quad (3)$$

综合单缝衍射因子可知,当入射光场为随机相位分布时,其出射光在透镜后焦面上的复振幅分布为

$$E_d = \frac{\sin(k\varphi_0)}{k\varphi_0} \{\exp(-jp_1) + \exp[-j(\delta + p_2)] + \exp[-j(2\delta + p_3)] + \dots + \exp[-j(N-1)\delta + p_N]\}. \quad (4)$$

由于随机量 $p_1, p_2, p_3, \dots, p_{N-1}, p_N$ 的引入,出射光场分布不仅与衍射角、波长 $\lambda$ 有关,还与随机量的大小、分布有关,这导致出射光场是一种随机分布。在透镜的后焦面上放置狭缝,通过分析狭缝上不同波长的随机光场分布,并统计不同波长的光通过狭缝的总能量,就可以得到通过狭缝的光谱曲线。

## 3 数值实验结果与讨论

### 3.1 大气整体特性对滤波性能的影响

#### 3.1.1 入射光场模型的建立

大气湍流介质中光传播的特殊性在于介质折射率的随机起伏特性,这种特性可以使用一个相位随机分布的相位屏来代替,数值模拟的一个重要核心问题是构造合适的相位屏。对于中心波长为1064 nm,口径为50 mm的发射光束,设置大气相位屏尺寸 $D=2$  m,湍流外尺度为100 m,湍流内尺度为0.01 m,相位屏采样点数为300,改变大气相干长度 $r_0$ 的数值,使用MATLAB软件进行相位屏仿真模拟,得到图1~4所示的相位屏。

由图1~4可以发现,在 $r_0$ 从0.01 m逐渐增大至0.2 m的过程中,相位屏的相位起伏幅度整体上逐渐减小。这说明,大气相干长度 $r_0$ 越小,大气湍流在空间尺度上的变化就越剧烈,从而对光栅滤波性能的影响就可能越大。

另外,使用同一大气条件(相同的湍流内尺度0.01 m,相同的湍流外尺度100 m,相同的大气相干长度 $r_0$ 取0.1 m)进行多次仿真,得到同一大气条件下的多组相位屏,结果如图5所示。

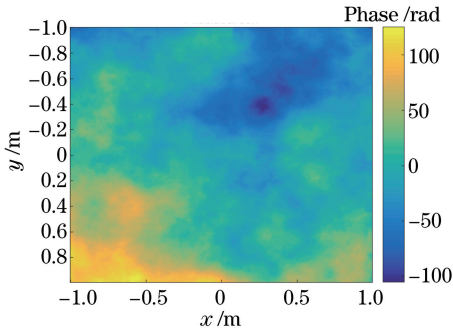


图 1  $r_0=0.01$  m 时的相位屏

Fig. 1 Phase screen when  $r_0$  is 0.01 m

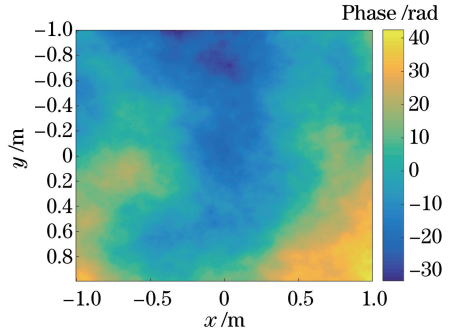


图 2  $r_0=0.05$  m 时的相位屏

Fig. 2 Phase screen when  $r_0$  is 0.05 m

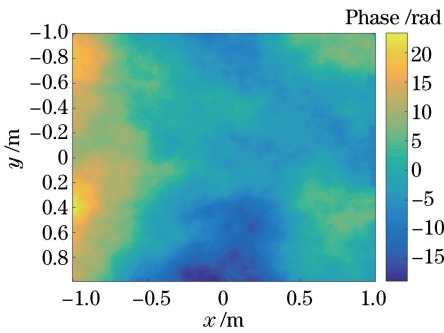


图 3  $r_0=0.1$  m 时的相位屏

Fig. 3 Phase screen when  $r_0$  is 0.1 m

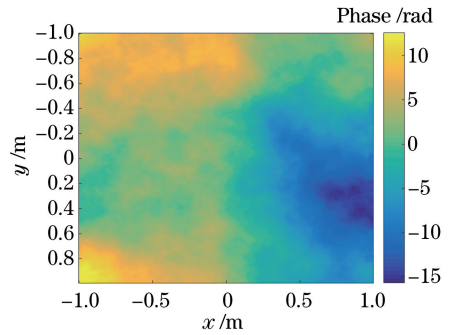


图 4  $r_0=0.2$  m 时的相位屏

Fig. 4 Phase screen when  $r_0$  is 0.2 m

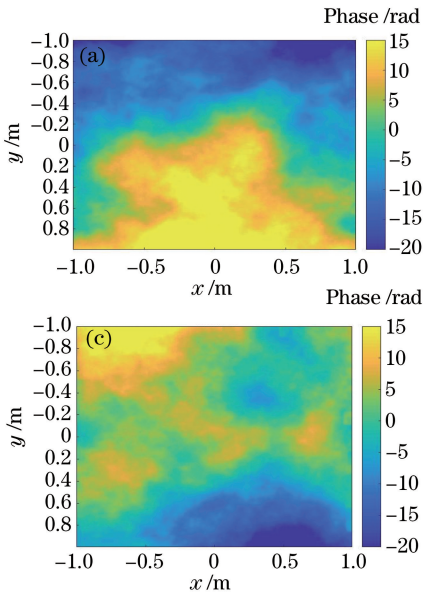


图 5 同一大气条件下的相位屏。(a)第 1 次仿真；(b)第 2 次仿真；(c)第 3 次仿真；(d)第 4 次仿真

Fig. 5 Phase screens under the same atmospheric condition. (a) The first simulation; (b) the second simulation; (c) the third simulation; (d) the fourth simulation

从图 5 所示的相位屏可以看出,对于在同一大气条件下多次重复仿真得到的相位屏,虽然其相位起伏程度近似相同,但相位分布并不相同。对于光栅滤波,入射光场相位对衍射光场的分布有很大

影响,所以不仅要分析不同大气参数条件下系统的滤波性能,还要分析同一大气条件下系统的性能,用以验证所设计的系统在一定大气条件下工作的稳定性。下面将一束平面波经过  $r_0=0.1$  m 时的相位屏



后得到的光束作为模拟光源,来分析双光栅系统对相位随机分布光场的滤波性能。

### 3.1.2 光栅系统对随机光场滤波的可行性分析

初始仿真参数依据实际设计如下:发射光束中心波长取 1064 nm,光束口径为 50 mm,接收端处于滤光系统的前端,并增加干涉滤光片,这使得入射波长的范围为 1061.5~1066.5 nm。根据实验室 1064 nm 固体激光器输出的光谱线宽,设定有效信号光波长范围为 1063.95~1064.05 nm,中心波长为 1064 nm;假设接收的回光中各波长所占比例相同,根据望远镜接收系统参数设定接收视场角(FOV)为 900  $\mu$ rad。为减小系统体积,同时保证狭缝的加工装调,初步选取透镜焦距为 75 mm,狭缝宽度为 60  $\mu$ m。另外,使用实验室已有的光栅参数,光栅尺寸为 100 mm $\times$ 100 mm $\times$ 20 mm,光栅的刻槽密度为 1500 lp/mm,光栅的闪耀角为 66.5 $^\circ$ 。对上述同一组参数进行多次仿真,计算得到中心波长在透镜后焦面上的光场分布,结果如图 6 所示,对应的光谱透射曲线如图 7 所示(图中的多条曲线对应多次仿真的结果)。

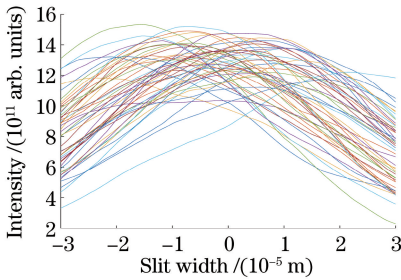


图 6 有效光在狭缝上的能量分布

Fig. 6 Energy distribution of effective light in slit

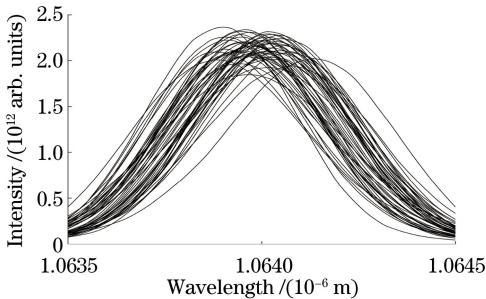


图 7 狭缝的透射光谱曲线

Fig. 7 Transmission spectrum curves of slit

从图 6 可以看出,虽然每条曲线的位置和形状变化很大,但整体上都呈现出有效光能量集中在狭缝内,狭缝外光能量逐渐减小的趋势。另外从图 7 中可以更直观地看到,狭缝的透射光谱呈现出中间

高、两边低的分布形态,尽管透射率最高点在中心波长 1064 nm 附近摆动,但是 1063.95~1064.05 nm 这个范围内的有效光的透射率在多次实验中一直保持着较高的数值,这就达到了较为理想的光谱滤波的目的。结果说明,双光栅系统可用于相位随机分布光场的光谱滤波。

### 3.1.3 大气相干长度 $r_0$ 对滤波性能的影响

首先采用统计的方法分析相同大气参数条件下随机相位分布对系统性能的影响。使用 3.1.2 节中的系统参数,首先取  $r_0=0.1$  m,生成 50 组相位屏,再利用这 50 组相位屏生成的光源来计算线宽(用半峰全宽 FWHM 表示)和有效光谱的透射率(用  $T$  表示,即有效光谱透过的能量与总有效光谱能量的比值),结果如图 8~9 所示。

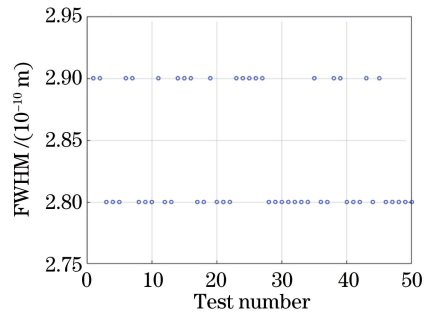


图 8  $r_0=0.1$  m 时的 50 次线宽实验结果

Fig. 8 Linewidth for 50 tests when  $r_0$  is 0.1 m

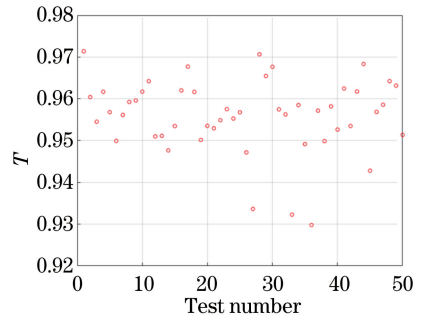


图 9  $r_0=0.1$  m 时的 50 次透射率实验结果

Fig. 9 Transmittance for 50 tests when  $r_0$  is 0.1 m

50 次的统计结果显示:FWHM 稳定在 0.28~0.29 nm, $T$  稳定在 0.95 附近。另外,在该条件下统计了每次实验的中心波长以及实际需要的 1064 nm 中心波长的透射率,结果如图 10~11 所示。

从图 10 和图 11 可以看到,每次实验的透射中心波长保持在 1063.97~1064.05 nm 之间,相对于实际需要的 1064 nm 波长偏离较小,且相对稳定,而 1064 nm 波长的  $T$  稳定在 0.95 以上,这说明透射谱的峰值稳定在 1064 nm 附近。图 8~11 的结



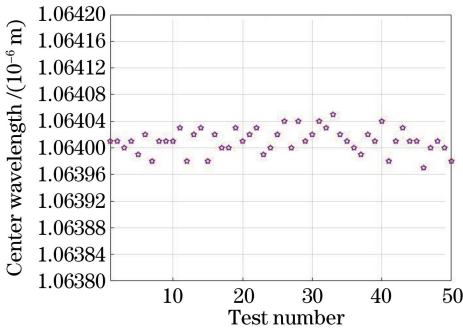


图 10  $r_0=0.1$  m 时的 50 次中心波长实验结果

Fig. 10 Center wavelength for 50 tests when  $r_0$  is 0.1 m

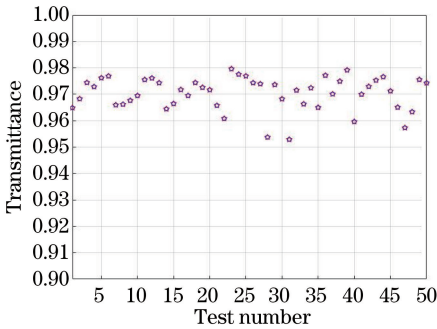


图 11  $r_0=0.1$  m 时的 50 次透射率实验结果

Fig. 11 Transmittance for 50 tests when  $r_0$  is 0.1 m

果表明,虽然同一大气相干长度  $r_0$  在不同时刻有不同的随机相位分布,但是从 FWHM、 $T$  以及透射中心波长等方面考虑,可以得出系统滤波性能相对稳定的结论。

通过改变  $r_0$  的大小可以得到图 12~13 所示的结果。从图 12 和图 13 中可以得出结论:大气相干长度  $r_0$  对滤波性能有很大影响;随着  $r_0$  逐渐增大,FWHM 逐渐变窄, $T$  明显增大;当  $r_0$  小于 0.05 m 时,曲线斜率逐渐变大,系统性能迅速下降,所以该滤波系统在恶劣大气条件下的使用是存在一定限制的,应尽量保证系统在  $r_0$  大于 0.05 m 的大气环境中使用。

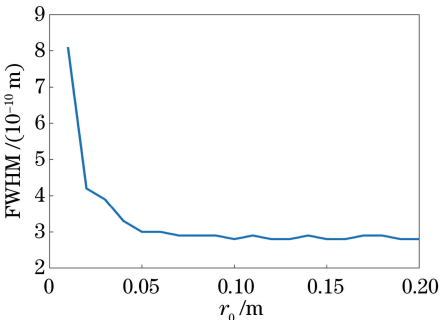


图 12 FWHM 与  $r_0$  的关系

Fig. 12 Relationship between FWHM and  $r_0$

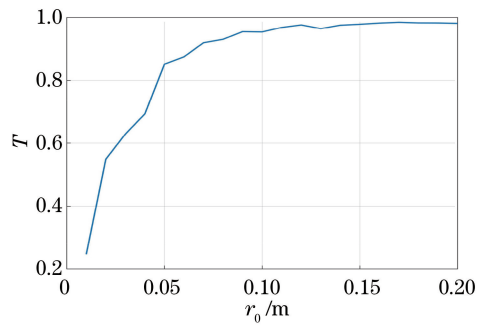


图 13  $T$  与  $r_0$  的关系

Fig. 13 Relationship between  $T$  and  $r_0$

### 3.2 系统结构参数对滤波性能的影响

#### 3.2.1 狭缝宽度对系统性能的影响

狭缝作为系统中的光谱选通器件,其尺寸和位置都会影响最终的出射光谱,所以选择合适的狭缝尺寸和位置也是研究的重点。在  $r_0=0.05$  m 的条件下,使用 3.1.2 节中的系统参数,求得 1064 nm 波长在无大气时衍射主极大的位置,并将狭缝中心位置放置在此处,以狭缝宽度为变量,采用 FWHM 和  $T$  这两个参数来评价该滤光系统的性能,得到如图 14 和图 15 所示的结果。

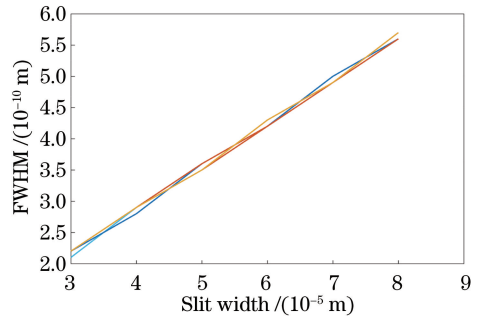


图 14 FWHM 与狭缝宽度的关系

Fig. 14 Relationship between FWHM and slit width

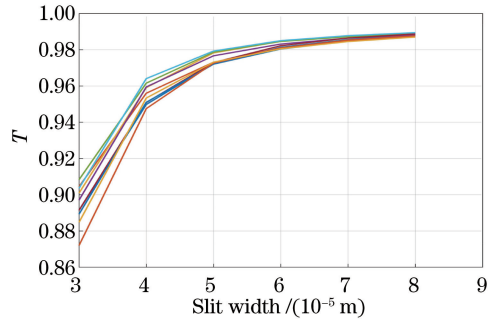


图 15  $T$  与狭缝宽度的关系

Fig. 15 Relationship between  $T$  and slit width

图 14~15 中的多条曲线同样是代表多次实验得到的结果。从图 14 中可以看出:随着狭缝宽度增

大,FWHM 逐渐变宽, $T$  也逐渐增大;当狭缝宽度为  $40\ \mu\text{m}$  时,FWHM 稳定在  $0.29\ \text{nm}$  左右, $T$  稳定在  $0.95$  左右。

### 3.2.2 透镜焦距对系统性能的影响

透镜焦距  $f$  一方面影响系统的总长,另一方面影响不同波长、角度入射光在狭缝平面处的分离程度,从而影响狭缝内的光谱分布。同样使用 3.1.2 节中的系统参数,设置狭缝宽度为  $40\ \mu\text{m}$ ,以透镜焦距为变量,得到如图 16~17 所示的结果。图中的多条曲线是同一大气条件下的多次仿真结果。

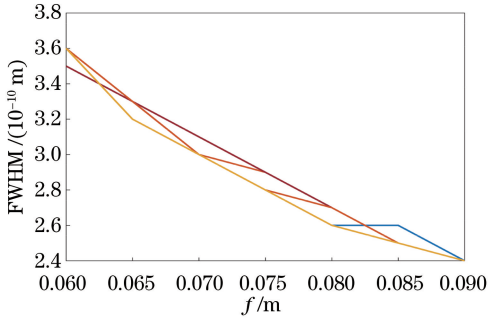


图 16 线宽与焦距的关系

Fig. 16 Relationship between FWHM and local length

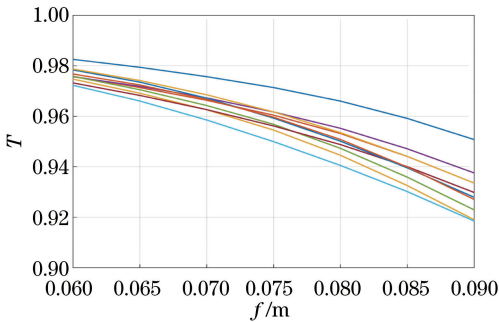


图 17  $T$  与焦距的关系

Fig. 17 Relationship between  $T$  and local length

从图 16 和图 17 中可以看出:随着透镜焦距增大,滤波 FWHM 逐渐变窄, $T$  逐渐减小;当  $f = 60\ \text{mm}$  时,滤波 FWHM 约为  $0.36\ \text{nm}$ , $T$  约为  $0.7$ ;当  $f = 90\ \text{mm}$  时,FWHM 为  $0.24\ \text{nm}$ , $T$  约为  $0.92$ 。考虑到系统体积与系统性能两方面的因素,取透镜焦距为  $75\ \text{mm}$ ,此时滤波光谱的 FWHM 约为  $0.29\ \text{nm}$ , $T$  约为  $0.95$ 。

### 3.2.3 光栅参数对系统性能的影响

#### 1) 光栅常数 $d$

利用第 2 节中求得的光场分布表达式,即(4)式,使用 3.1.2 节中设定的初始系统参数,设置狭缝宽度为  $40\ \mu\text{m}$ ,透镜焦距  $f = 75\ \text{mm}$ ,以光栅常数  $d$  为变量,做出系统滤波 FWHM、 $T$  与光栅常数  $d$  之

间的关系曲线,结果如图 18~19 所示。

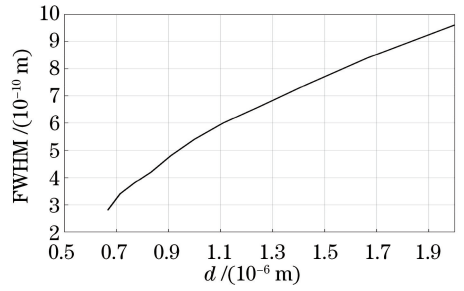


图 18 FWHM 与光栅常数  $d$  之间的关系

Fig. 18 Relationship between FWHM and grating constant  $d$

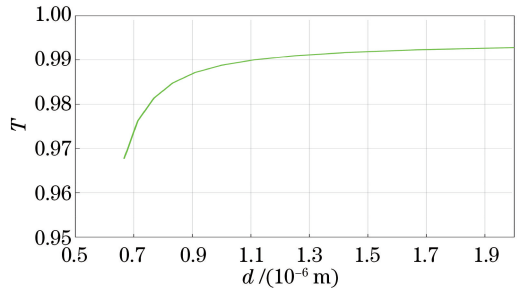


图 19  $T$  与光栅常数  $d$  之间的关系

Fig. 19 Relationship between  $T$  and grating constant  $d$

从图 18 和图 19 中可以看出,随着光栅常数  $d$  增大,滤波 FWHM 逐渐变宽, $T$  也逐渐变大,但这两者的变化趋势不同:FWHM 随着  $d$  增大大致呈现线性上升的趋势;而  $T$  则呈现出上升并逐渐趋于平缓的状态,以光栅常数  $d = 0.8\ \mu\text{m}$  为分界点,前半段上升快,后半段上升慢;因此在  $d < 0.8\ \mu\text{m}$  时,以更小的 FWHM 性能指标的损失可以换取更大的  $T$  指标的提升。在保证一定线宽的要求下,应尽可能将光栅常数  $d$  的值设计在  $0.8\ \mu\text{m}$  以下,且越接近  $0.8\ \mu\text{m}$  越好。

#### 2) 光栅总缝数

同样利用第 2 节求得的光场分布表达式,即(4)式,使用 3.1.2 节中设定的系统初始参数,设置狭缝宽度为  $40\ \mu\text{m}$ ,透镜焦距为  $75\ \text{mm}$ ,以光栅总缝数  $N$  为变量,作系统滤波 FWHM、 $T$  与光栅总缝数的关系曲线,结果如图 20~21 所示。图中的多条曲线是同一大气条件下多次仿真的结果。

从图 20 和图 21 中可以看出:在同一大气条件下,尽管每次仿真得到的曲线并不完全相同,但只是在相对较小的范围内有所变化,结果同样验证了滤波系统在大气条件下工作的稳定性。另外可以看出,随着光栅总缝数增大,FWHM 呈现出先快速减小后缓慢减小的趋势,而  $T$  则呈现出先快速增大后

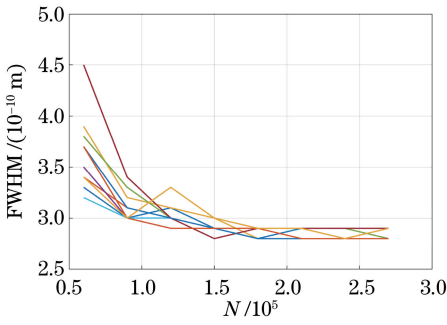


图 20 FWHM 与光栅总缝数之间的关系  
Fig. 20 Relationship between FWHM and total grating slit number

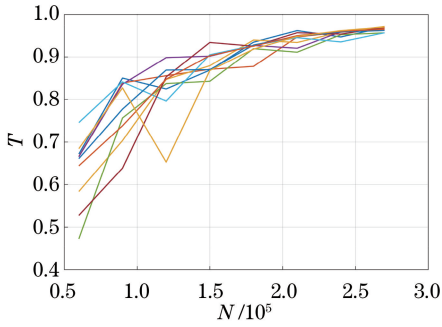


图 21  $T$  与光栅总缝数的关系  
Fig. 21 Relationship between  $T$  and total grating slit number  $N$

缓慢增大的趋势,两者的转折点均约在光栅总缝数为  $1.2 \times 10^5$  处,因此当光栅总缝数小于  $1.2 \times 10^5$  时,可以以较小的  $N$  指标的损失换取 FWHM 与  $T$  的较大增加。光栅的总缝数与光栅体积有关,光栅总缝数越大,光栅体积越大,加工难度也就更大。所以,将  $N$  选取得更大以获得更佳的性能时应尽量保证不超过  $1.2 \times 10^5$ 。

### 3.2.4 大气湍流条件下入射光特性对滤波性能的影响

#### 1) 不同光谱中心波长对系统性能的影响

前文在分析系统结构参数对系统的影响时,使用的入射光谱中心波长均为 1064 nm。为了探究系统对各种不同光谱区间滤波的可行性,有必要改变入射光谱的中心波长,以分析不同入射光谱区间对系统滤波性能的影响。在 500 ~ 1000 nm 范围内每间隔 50 nm 取点作为中心波长,光谱宽度同样是中心波长  $\pm 2.5$  nm,有效光谱宽度为中心波长  $\pm 0.05$  nm,其他系统结构参数使用前文设定的初始参数。FWHM、 $T$  与入射光谱中心波长之间关系的曲线如图 22、23 所示。

从图 22、23 中可以看出:入射光谱的中心波长

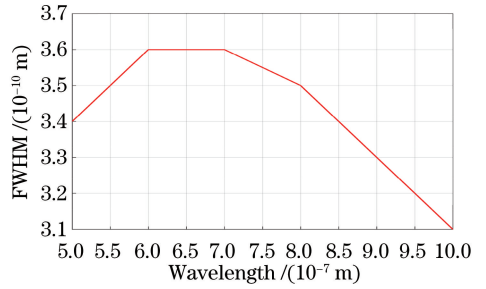


图 22 FWHM 与入射光谱中心波长的关系  
Fig. 22 Relationship between FWHM and incident spectrum center wavelength

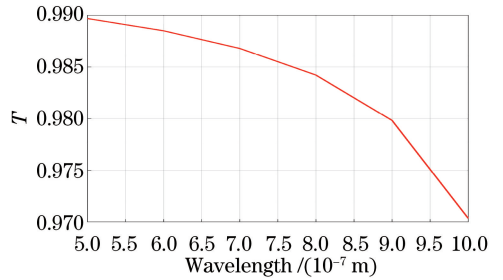


图 23  $T$  与入射光谱中心波长的关系  
Fig. 23 Relationship between  $T$  and incident spectrum center wavelength

越小,  $T$  越高;而 FWHM 则随着中心波长的增大而先增大后减小,转折点在 580 ~ 700 nm 之间。可见,当中心波长小于 580 nm 时,越小的中心波长越容易获得更优的性能。

#### 2) 视场角对系统性能的影响

实际的光接收系统往往会有一定的接收视场,这会导致入射光存在一定的角度范围,同一波长但是不同角度的入射光在狭缝上的光场分布是不同的,这会对输出光谱产生一定影响。使用前文设定的系统初始结构参数,假设视场角为 600 ~ 6000  $\mu\text{rad}$ ,做出 FWHM、 $T$  与视场角的关系曲线,结果如图 24、25 所示。图中的多条曲线是同一大气条件下的多次仿真结果。

从图 24、25 中可以得出:随着视场角增大,FWHM 逐渐增大,  $T$  逐渐减小;当视场角小于 1000  $\mu\text{rad}$  时,FWHM、 $T$  的变化趋势较为平缓;当视场角大于 1000  $\mu\text{rad}$  时,FWHM、 $T$  的变化较为剧烈。

## 4 基于双光栅的窄带高效滤光系统的设计

依据光栅滤波的原理设计了基于双多层介质膜光栅的窄带滤光系统,系统结构如图 26 所示。探测



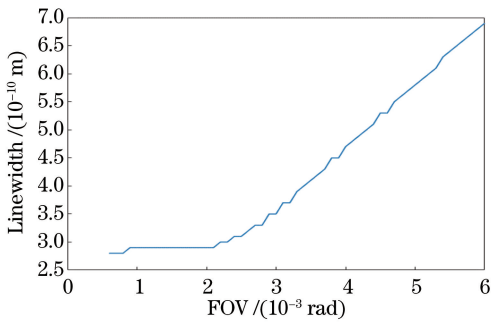


图 24 FWHM 与视场角的关系

Fig. 24 Relationship between FWHM and field of view

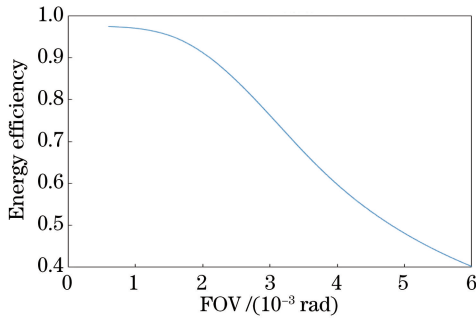


图 25  $T$  与视场角的关系

Fig. 25 Relationship between  $T$  and field of view

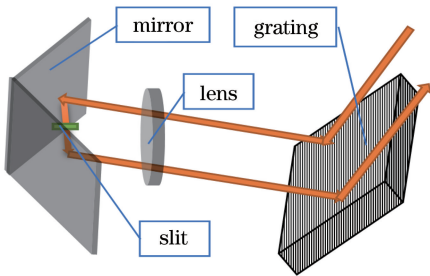


图 26 双 MLD 光栅的窄带滤光系统

Fig. 26 Narrow band spectral filtering system based on double MLD gratings

回光经第一块光栅衍射后,不同波长光的衍射方向不同,在两组成像透镜构成的  $4f$  系统焦平面处从空间上分开。在焦平面处设置一个狭缝,用以在色散方向上限制通过的光谱宽度,调节狭缝位置可允许需要的光谱透过,而其他谱段的干扰光则被阻挡而无法进入后续光路。对于用于有一定成像视场要求的探测系统,需要考虑因光栅色散原理带来的不同波长光角度偏折不同而引起的光束质量退化问题,因此考虑使用第二块光栅对色散进行补偿,以改善出射光的光束质量。另外,为了使系统体积最小,将其设计为单光栅折叠复用结构,利用一块直角高反镜将光路对折,使光束的分光与色散补偿可以由

同一块光栅完成。根据第 3 节中的仿真分析可知,在保证滤波 FWHM 在  $0.3 \text{ nm}$  以下, $T$  为  $0.90$  以上的条件下,可以实现透镜焦距为  $75 \text{ mm}$ ,狭缝宽度为  $40 \mu\text{m}$ 。对于光栅的设计而言,应尽可能将光栅常数  $d$  设计在  $0.8 \mu\text{m}$  以下,且越接近  $0.8 \mu\text{m}$  越好。考虑到光栅的加工难度,将  $N$  选取得更大以获得更优性能时应尽量保证  $N$  不超过  $1.2 \times 10^5$ 。

## 5 结 论

获得更窄的光谱滤波线宽是提高激光回光探测系统信噪比和抗干扰能力的关键技术。本研究主要针对大气激光回光这一特殊光源对双光栅滤波系统性能的影响进行了理论分析和数值实验。通过数值实验的统计方法验证了系统对大气随机光场滤波的可行性和稳定性,在一定的大气条件下( $r_0 > 0.05 \text{ m}$ ),系统具有亚纳米级(FWHM 为  $0.3 \text{ nm}$ )的光谱滤波线宽,有效光谱的透射率  $T$  超过了  $0.90$ 。同时,分析了大气特性、狭缝宽度、光栅特性,以及透镜焦距等参量对 FWHM 和  $T$  的影响,这为解决实际滤波问题时,根据实际需求选择最优系统结构参数提供了较为完整的理论基础。此外,本研究还提出了一种单光栅折叠复用结构,实现了单光栅复用功能,在满足光谱滤波和色散补偿性能的同时减小了系统的体积。

## 参 考 文 献

- [1] Huang T, Hu H L, H Y H, *et al.* Laser detection in the identification of space target [J]. *Laser & Infrared*, 2010, 40(7): 685-689.  
黄涛, 胡惠灵, 胡以华, 等. 空间目标识别中的激光探测技术[J]. *激光与红外*, 2010, 40(7): 685-689.
- [2] Zhou Y P, Shu R, Tao K Y, *et al.* Study of photoelectric detecting and identifying of space target [J]. *Optical Technique*, 2007, 33(1): 68-73, 76.  
周彦平, 舒锐, 陶坤宇, 等. 空间目标光电探测与识别技术的研究[J]. *光学技术*, 2007, 33(1): 68-73, 76.
- [3] Rork E W, Lin S S, Yakutis A J. Ground-based electro-optical detection of artificial satellites in daylight from reflected sunlight [C]. *NASA STI/Recon Technical Report N*, 1982: 83.
- [4] He C, Zhu Q X. A study of technology for detection of nonluminous artificial satellites in daylight [Z/OL]. [2018-03-15]. [http://www.researchgate.net/publication/235157587 A Study of Technology for Detection of Nonluminous Artificial Satellites in Daylight](http://www.researchgate.net/publication/235157587_A_Study_of_Technology_for_Detection_of_Nonluminous_Artificial_Satellites_in_Daylight). (Baitian Feizifaguang Tianti Mubiao Tance

- Jishu De Yanjiu).
- [5] Wu L, Ying J J, Geng B. Effect on laser propagation in the atmospheric turbulence[J]. *Laser & Infrared*, 2008, 38(10): 974-977.  
武琳, 应家驹, 耿彪. 大气湍流对激光传输的影响[J]. *激光与红外*, 2008, 38(10): 974-977.
- [6] Xu Z Y, Bo Y, Peng Q J, *et al.* Progress on sodium laser guide star[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2016, 45(1): 13-25.  
许祖彦, 薄勇, 彭钦军, 等. 激光钠导引星技术研究进展[J]. *红外与激光工程*, 2016, 45(1): 13-25.
- [7] Sun F Y. Study on the characteristic of the whole sky background radiation [D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2016.  
孙凤莹. 全天空背景光谱辐射特性研究[D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2016.
- [8] Sun C. Study on Si-APD noise characteristics in laser radar under background light [D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2014.  
孙超. 背景光作用下激光雷达中 Si-APD 噪声特性研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2014.
- [9] Wan M, Su Y, Yang R, *et al.* Improvement of signal to noise ratio in astronomical objects detection in daytime [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2003, 15(12): 1151-1154.  
万敏, 苏毅, 杨锐, 等. 提高白天观测星体信噪比的方法研究[J]. *强激光与粒子束*, 2003, 15(12): 1151-1154.
- [10] Tan B T, Jing C Y, Wang B G, *et al.* Precision of magnitude measurement caused by spectral filtering technology [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2009, 21(2): 221-224.  
谭碧涛, 景春元, 王宝国, 等. 光谱滤波技术对星等测量精度的影响[J]. *强激光与粒子束*, 2009, 21(2): 221-224.
- [11] Wang F. Study on ultra-narrow-band birefringence filter technology [D]. Beijing: China Academy of Engineering Physics, 2007.  
王锋. 超窄带双折射滤光器技术研究[D]. 北京: 中国工程物理研究院, 2007.
- [12] Gelbwachs J A. Atomic resonance filters[J]. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 1988, 24(7): 1266-1277.
- [13] Wang F, Hu X Y, Ye Y D. Development of ultra-narrow band filter technique [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2007, 44(6): 62-67.  
王锋, 胡晓阳, 叶一东. 超窄带滤光技术研究进展[J]. *激光与光电子学进展*, 2007, 44(6): 62-67.
- [14] Zhang Y D, Yuan P, Bi Y, *et al.* Ultranarrow-band optical filter[J]. *Laser Technology*, 1999, 23(5): 257-261.  
掌蕴东, 袁萍, 毕勇, 等. 超窄带光学滤波器[J]. *激光技术*, 1999, 23(5): 257-261.
- [15] Xu F, Yan H, Zhang Y H, *et al.* Ultra-narrow linewidth spectral filtering technology based on double gratings[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2017, 44(8): 0811003.  
许放, 颜宏, 张永红, 等. 基于双光栅的超窄线宽光谱滤波技术[J]. *中国激光*, 2017, 44(8): 0811003.
- [16] Zhu Z M. Physical opticals[M]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology Press, 2009: 147-155.  
竺子民. 物理光学[M]. 武汉: 华中科技大学出版社, 2009: 147-155.