

·光电探测·

# 猫眼离焦量与探测光束参数对猫眼回波的影响

张创新<sup>1,2</sup>, 孙晓泉<sup>1,2</sup>

(1.脉冲功率激光技术国家重点实验室,安徽 合肥 230037;2.合肥电子工程学院,安徽 合肥 230037)

**摘要:**研究光学系统离焦量和探测激光束参数对猫眼光学系统回波强度的影响。通过数值仿真和实验的方法,分析猫眼回波强度与离焦量和探测光束参数关系。据此提出了通过改变探测光束参数增强猫眼回波强度的初步方案。

**关键词:**猫眼效应;离焦量;激光探测

中图分类号:TN249;TN911.7

文献标识码:A

文章编号:1673-1255(2011)01-0031-05

## Influences of Focal Shift and Detection Beam Parameters on Cat-eye Echo

ZHANG Chuang-xin, SUN Xiao-quan

(1.State Key Laboratory of Pulsed Power Laser Technology, Hefei 230037, China;

2. Hefei Electronic Engineering Institute, Hefei 230037, China)

**Abstract:** The influences of the optical system focal shift and the detection laser beam parameters on the echo of cat-eye optical system are studied. By numerical simulation and experiment, the relationships of cat-eye echo, focal shift and detection beam parameters are analyzed. A preliminary scheme of echo enhancement is proposed, by changing the detection laser beam parameters.

**Key words:** cat-eye effect; focal shift; laser detection

“猫眼”目标回波功率的主要影响因素有猫眼系统自身特性、入射光束特性及大气。运用矩阵光学理论,分析光束经准直系统出射,到达猫眼目标后被反射回到接收平面的整个过程<sup>[1-4]</sup>。建立数学模型,得出猫眼回波光斑半径与功率密度的解析公式。通过数值仿真与实验,对猫眼系统离焦量与准

直系统对回波光斑的影响进行了深入研究。

### 1 理论分析

图1为激光主动探测示意图,激光束经准直系统后出射,猫眼系统简化为透镜和反射面的组合。图1中初始激光束腰斑半径为 $\omega_0$ 、发散角为 $\theta_0$ ,准直

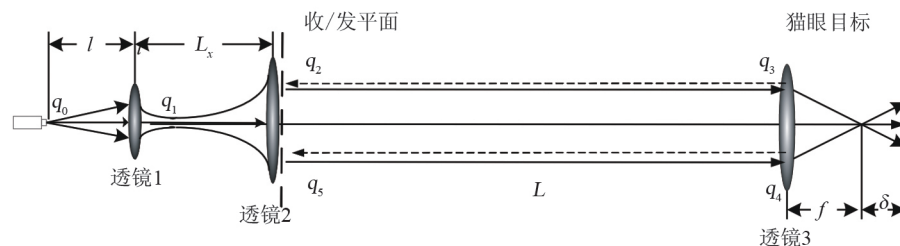


图1 激光主动探测示意图

收稿日期:2010-12-06

作者简介:张创新(1984-),男,硕士,主要从事光电技术方面的研究。

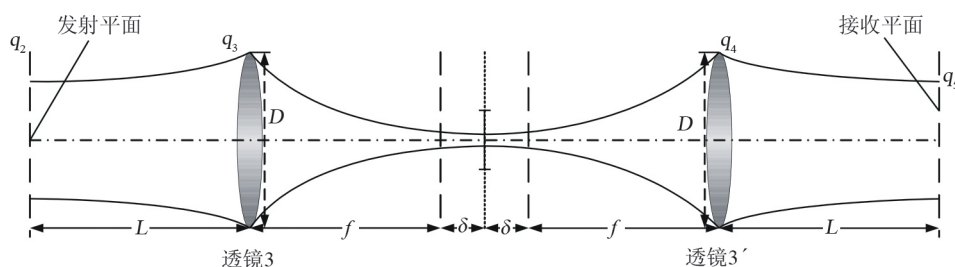


图2 高斯光束的猫眼效应示意图

透镜焦距分别为  $F_1$ 、 $F_2$ ， $l$  为入射光束腰斑平面到准直系统入射透镜的距离， $L_x$  为准直系统两透镜间距， $L$  为探测距离；猫眼系统的口径为  $D$ ，焦距为  $f$ ，离焦量为  $\delta$ 。  $q_0$  至  $q_5$  分别为各个平面的高斯光束复参数。此处令猫眼系统反射平面反射率为 1。

以准直系统出射透镜后镜面为收/发平面，将收/发平面后的光路，以探测器所在的平面为中心对称展开，可以得到一个  $4f$  系统，如图 2 所示。

利用  $ABCD$  矩阵描述高斯光束的传输与变换<sup>[5]</sup>，计算接收平面回波光斑的参数。假设探测激光为基模高斯光束，它的复振幅分布为

$$U_0(r, z) = \frac{1}{\omega(z)} e^{-\frac{r^2}{\omega(z)^2}} \quad (1)$$

式中， $r$  表示发射平面上任意一点到高斯光束轴线的距离。

以激光器出射激光束腰斑平面为起点，将整个光路进行矩阵分解，分为如下 4 个区间：起点处到准直系统出射透镜后镜面；透镜 2 后镜面到透镜 3 前镜面；透镜 3 前镜面到透镜 3' 后镜面；透镜 3' 后镜面到接收平面。各个区间的传输矩阵为

$$\begin{pmatrix} a_1 & b_1 \\ c_1 & d_1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{1}{F_2} & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & L_x \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{1}{F_1} & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & l \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (2)$$

$$\begin{pmatrix} a_2 & b_2 \\ c_2 & d_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & L \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (3)$$

$$\begin{pmatrix} a_3 & b_3 \\ c_3 & d_3 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{1}{f} & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & 2(f+\delta) \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{1}{f} & 1 \end{pmatrix} \quad (4)$$

$$\begin{pmatrix} a_4 & b_4 \\ c_4 & d_4 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & L \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (5)$$

计算猫眼透镜前镜面激光束的强度分布，激光束传输至猫眼透镜，其传输矩阵为

$$\begin{pmatrix} A_3 & B_3 \\ C_3 & D_3 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} a_2 & b_2 \\ c_2 & d_2 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} a_1 & b_1 \\ c_1 & d_1 \end{pmatrix} \quad (6)$$

根据高斯光束传输规律计算光束在透镜 3 前镜面复参数  $q_3$  有

$$q_3 = \frac{A_3 q_0 + B_3}{C_3 q_0 + D_3} \quad (7)$$

则此平面光斑半径  $\omega_3$  为

$$\omega_3^2 = \frac{-\lambda}{\pi \operatorname{Im}\left(\frac{1}{q_3}\right)} \quad (8)$$

由此可得在透镜 3 前镜面的光束强度分布为

$$I(r) = \frac{1}{\omega_3^2} \exp\left(-\frac{2r^2}{\omega_3^2}\right) \quad (9)$$

猫眼目标由于存在离焦量，其有效口径与猫眼透镜口径并不相同。可计算出对反射截面有贡献的猫眼有效孔径  $D'$  为

$$D' = \begin{cases} \frac{fD}{f+2\delta} & \delta \geq 0 \\ D & \delta < 0 \end{cases} \quad (10)$$

则能够进入猫眼系统并能够反射回来的激光功率为

$$Q = \int_0^{D'/2} \frac{1}{\omega_3^2} \exp\left(-\frac{2r^2}{\omega_3^2}\right) r dr \quad (11)$$

计算接收平面上光束复参数；从起点平面到接收平面，整个光路的传输矩阵为

$$\begin{pmatrix} A_5 & B_5 \\ C_5 & D_5 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} a_5 & b_5 \\ c_5 & d_5 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} a_4 & b_4 \\ c_4 & d_4 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} a_3 & b_3 \\ c_3 & d_3 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} a_2 & b_2 \\ c_2 & d_2 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} a_1 & b_1 \\ c_1 & d_1 \end{pmatrix} \quad (12)$$

计算接收平面上光束复参数  $q_5$  为

$$q_5 = \frac{A_5 q_0 + B_5}{C_5 q_0 + D_5} \quad (13)$$

则在接收平面内光斑半径  $\omega_5$  为

$$\omega_5^2 = \frac{-\lambda}{\pi \operatorname{Im}\left(\frac{1}{q_5}\right)} \quad (14)$$

则在接收平面内光斑平均功率密度为

$$P = \frac{Q}{\pi \omega_5^2} \quad (15)$$

## 2 数值仿真

### 2.1 离焦量对回波光斑的影响

取典型参数值进行数值仿真，分析光学系统离

焦量对猫眼回波的影响。图3、图4分别展示了收发平面回波光斑半径、功率密度与猫眼系统离焦量的关系。其中曲线参数取值如下:初始激光束发散角 $\theta_0=1\text{ mrad}$ , $l=1\text{ m}$ 、 $F_1=1\text{ cm}$ 、 $F_2=50\text{ cm}$ ,准直系统处于准直状态 $L_x=51\text{ cm}$ ,猫眼透镜焦距 $f=10\text{ cm}$ 、口径 $D=20\text{ cm}$ ,探测距离 $L$ 如图3、图4所示。根据数值仿真结果可知:猫眼离焦量一旦离开回波功率密度的峰值位置,回波功率密度将迅速下降;回波光斑半径的最小值和回波功率密度的最大值出现在零点的右侧;伴随着探测距离的增大,离焦量对回波光斑的影响也随之增大;探测距离 $L$ 越小,回波光斑伴随离焦量的变化速率越平缓;回波光斑功率密度峰值所对应的离焦量越大。

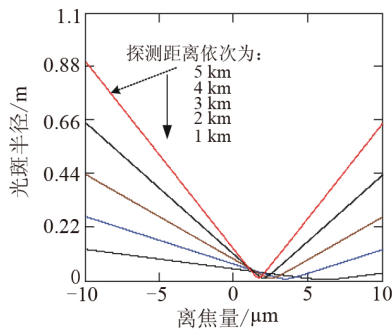


图3 不同探测距离时回波光斑半径与离焦量的关系

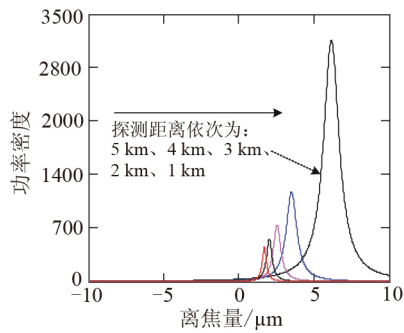


图4 不同探测距离时回波功率密度与离焦量的关系

## 2.2 猫眼回波与准直系统透镜间距的关系

### (1) 同一猫眼目标不同探测距离

图5中5条曲线分别表示焦距为10 cm、离焦量为0.1 mm的猫眼目标位于1、2、3、4、5 km的探测距离上时回波的归一化功率密度与准直透镜间距的关系。

由仿真结果可知,对于同一猫眼系统,位于不同的探测距离时,回波光斑功率密度的峰值对应不

同的准直系统透镜间距。也就是说,当同一猫眼目标位于不同的探测距离上时,需要用不同参数的激

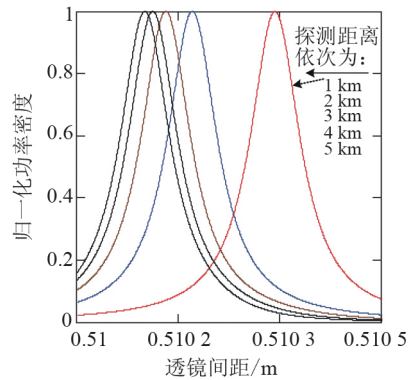


图5 猫眼回波功率密度与透镜间距的关系

光束进行探测,以获得最大的回波功率密度。经计算得出5条曲线峰值所对应横坐标如表1。

表1 不同探测距离时回波功率密度峰值所对应的透镜间距

探测距离/km	1	2	3	4	5
透镜间距/mm	510.325	510.189	510.146	510.124	510.111

表1显示探测距离为1 km时,回波功率密度峰值所对应的透镜间距为510.325 mm;探测距离为5 km时,对应的透镜间距为510.111 mm,两者相差214  $\mu\text{m}$ 。为了更清楚地说明准直状态对猫眼回波的影响,将透镜间距510.325 mm所对应的各个探测距离时回波归一化功率密度值列举在表2中。

表2 透镜间距510.325  $\mu\text{m}$ 对应的不同探测距离上猫眼回波归一化功率密度值

探测距离/km	1	2	3	4	5
归一化功率密度值	1	0.12	0.07	0.05	0.03

### (2) 不同猫眼目标同一探测距离

图6中5条曲线分别表示离焦量为-10、-20、-30、-40、-50  $\mu\text{m}$ 的猫眼目标位于1 km的探测距离上时回波的归一化功率密度与准直透镜间距的关系,发现5条曲线的峰值位置并不同,计算5条曲线峰值所对应横坐标如表3。

表3 不同离焦量对应的峰值位置

离焦量/ $\mu\text{m}$	10	20	30	40	50
透镜间距/mm	510.249	510.270	510.280	510.286	510.290

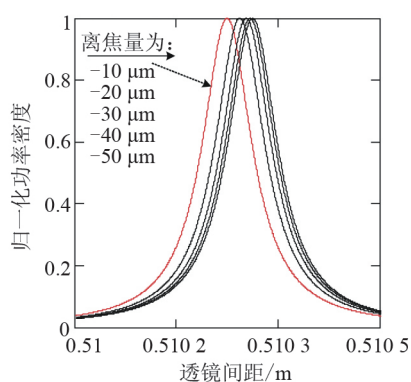


图6 回波平均功率与准直透镜间距的关系

为了更好地说明光束的准直状态对猫眼回波的影响,表4展示了透镜间距为510.249 mm所对应各猫眼目标猫眼回波的归一化功率密度值。

表4 透镜间距为510.249 mm时各猫眼目标回波归一化功率密度值

离焦量/ $\mu\text{m}$	-10	-20	-30	-40	-50
归一化功率密度	1	0.85	0.71	0.64	0.58

### 3 实验研究

#### 3.1 离焦量对回波功率密度的影响

实验采用He-Ne激光束照射猫眼目标,考察猫眼离焦量对回波功率的影响程度。实验中所使用猫眼目标,为激光测距机望远镜系统与由单透镜与反射镜组成的自制猫眼目标。

(1)利用激光束照射激光测距机望远镜系统,望远镜系统中物镜与其内部的分划板构成了猫眼系统。由于分划板的厚度造成一定程度的离焦,激光束经分划板前后表面反射后,形成大小不同的2个回波光斑。利用接收屏在测距机近处接收回波观察实验现象,实验示意图如图7。

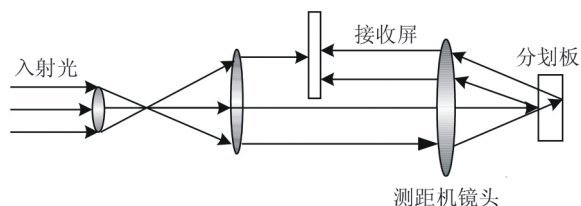


图7 实验示意图

接收屏上回波光斑如图8,可以清楚地看出,接

收屏上有2个大小不同的回波光斑。由于离焦量对回波严重影响,其中一个光斑经一段距离传输后,光斑发散过大,将无法接收。

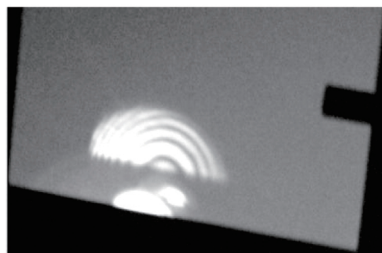


图8 接收屏上回波光斑

(2)利用离焦量可调的自制猫眼研究离焦量对猫眼回波的影响,实验原理如图9。激光器发出的

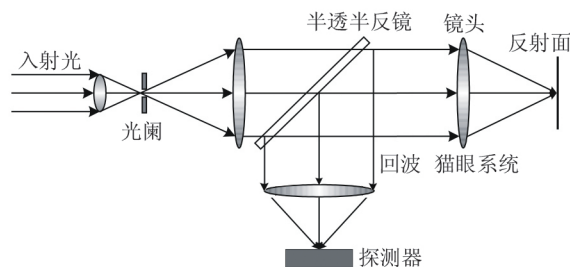


图9 实验示意图

激光经过准直扩束后,透过半透半反镜正入射到远处的猫眼目标中,反射回波经半透半反镜反射后,经一个透镜汇聚到功率计的探头上。猫眼目标反射镜在电控平移台的驱动下,可前后移动改变猫眼系统离焦量。实验装置如图10、图11所示。实验中

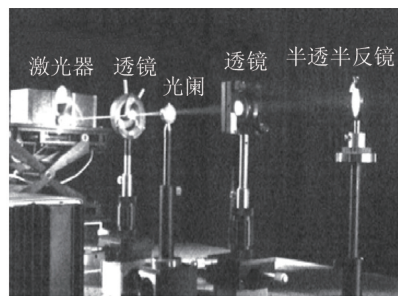


图10 激光束准直系统

首先调整反射镜位置,使接收到的回波功率最大,确定离焦量为零的位置;控制反射镜向猫眼透镜方向移动1 cm,然后,驱动反射镜沿远离猫眼镜头的方向均匀慢速移动2 cm,记录离焦量在(-1 cm, 1 cm)内变化时回波功率的变化,结果如图12。图12

中纵坐标为探测器接收功率,横坐标为猫眼离焦量。发现猫眼反射镜一旦离开回波功率的峰值位置,回波功率将迅速下降。

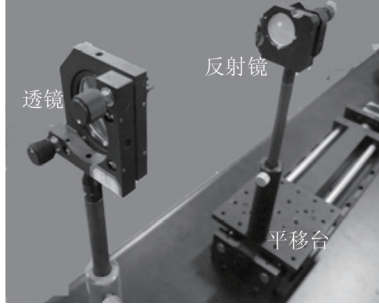


图11 猫眼系统装置

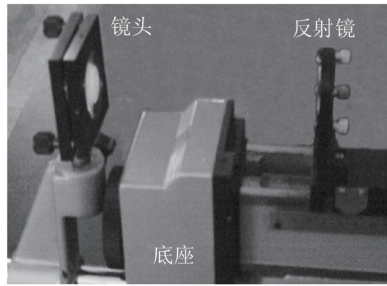


图14 猫眼系统装置

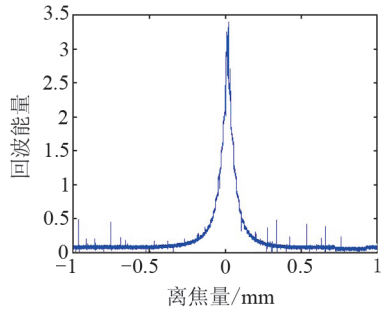


图12 回波功率与离焦量的关系

### 3.2 准直系统对回波功率密度的影响

实验原理图与3.1节实验相同,所不同的是准直系统出射透镜固定于电控平移台上,可前后移动,两透镜间距可调;所使用猫眼目标为自制猫眼,猫眼透镜与反射镜固定在底座上,反射镜位置可改变,实验装置如图13、图14。实验中调整反射镜位置,改变猫眼系统离焦量,形成不同的猫眼系统;针对不同的猫眼系统调整准直系统中两透镜间距,寻找猫眼回波最强时所对应的准直状态。

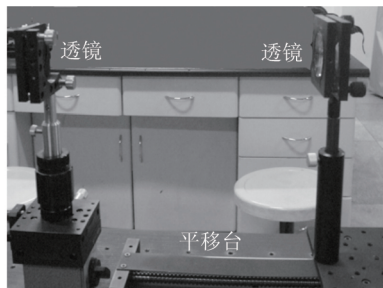


图13 激光束准直系统

#### (1)实验过程

首先调整反射镜位置使其位于猫眼透镜焦平面位置,即离焦量为零。然后调整准直系统出射透镜位置,改变准直状态,使其回波最大,并记录出射透镜位置与回波功率。调整猫眼系统反射镜位置,每次使反射镜移动4 mm,形成不同的猫眼目标。本次实验共移动反射镜2次,形成3种离焦量不同的猫眼目标。记录激光功率计功率变化,所得实验数据如表5 实验结果所示。表5中以电控平移台的刻度表示出射透镜位置;电控平移台共分80 000步,每步间隔为2.5 μm;本次实验中平移台零点位置位于入射透镜端,也就是说,出射透镜位置所对应平移台位置越大,两透镜间距就越大。

表5 实验结果

离焦量/mm	出射透镜的相对距离变化/mm	不同状态下的回波功率/mW		
		出射透镜位置		
		69 500	70 600	71 900
0	0	0.362	0.340	0.199
-4	2.75	0.180	0.277	0.199
-8	6	0.008	0.015	0.090

#### (2)实验结果

结果表明:当猫眼离焦量发生变化时,通过调节准直状态,可使回波功率增强;3种离焦量对应的最佳准直状态相差很少,最大差距为6 mm,但对回波功率有显著影响。说明不同的猫眼目标,需要不同的探测激光束进行匹配。

## 4 结 论

根据数值仿真与实验研究结果,可得出结论,回波光斑半径的最小值和回波功率密度的最大值出现在零点的右侧,在固定探测距离上,接收平面上

(下转第46页)

候,这种方法的计算结果与实验值更加接近。

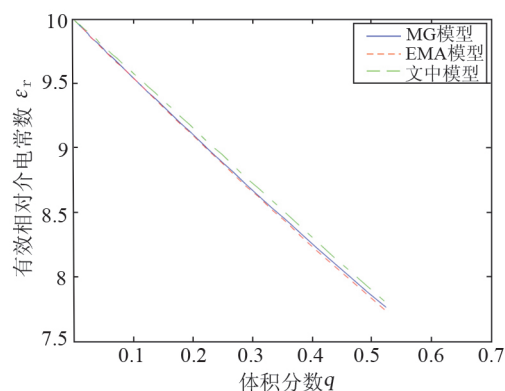


图3 等效电容法与典型方法的对比

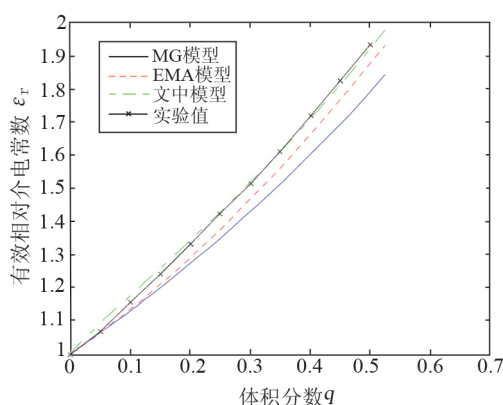


图4 三种方法与实验数据的比较

### 3 结论与展望

提出了一种计算复合材料等效电容,进而导出有效介电常数的模型。这种模型基于电容的串并联原理以及积分原理,物理概念清晰,是一种较为

精确的计算方法。应用这种模型,通过等效电感和等效电阻的方法,还可以进一步求解复合材料的有效磁导率以及电导率。

实际的颗粒弥散型复合材料,其颗粒大小不可能完全一样,颗粒的形状也不会是标准的球形,并且颗粒中心不一定和立方体单元的中心重合。为了得到更符合实际的计算结果,可以借助蒙特卡罗方法,同样先计算一个单元的电容,再利用电容串并联原理及电容等效,通过大量模拟,求解整块复合材料的有效介电常数。另外,对于那些颗粒表面包裹薄膜的复合材料,这种积分的方法可以很方便地完成计算。而一些有限元等数值方法,如果要计算薄膜,则需要进一步细分单元,这样运算量会大得惊人,难以实现。

文中是在恒定电场下求解颗粒弥散型复合材料的有效介电常数,对于有效介电常数在不同频率下的响应情况,需要进一步研究。

### 参考文献

- [1] Maxwell-Garnett J C. Colours in metal glasses and in metal films[J]. Trans Roy Soc Lond, 1904,203:385-420.
- [2] 孙大明,孙兆奇.金属陶瓷薄膜及其在光电子技术中的应用[M].北京:科学出版社,2004:121-133.
- [3] 梁成升.平行板类电容器电容的计算[J].物理与工程,2009,19(1):58-60.
- [4] 谢处方,饶克谨.电磁场与电磁波[M].4版.北京:高等教育出版社,2006:95-100.
- [5] Riuri M E, Sihvola A H, et al. The complex dielectric constant of snow at microwave frequencies[J]. IEEE J Ocean Eng, 1984,9(5):377-382.

(上接第35页)

的回波随着正离焦量的增大先汇聚,功率密度达到峰值以后才开始发散。同一猫眼系统,位于不同的探测距离上,或者不同的猫眼目标位于同一探测距离上时,回波光斑功率密度的峰值对应的准直系统透镜间距不同;通过改变准直系统透镜间距控制探测光束参数可增强猫眼回波强度。

### 参考文献

- [1] 孙晓泉,吕跃广.激光对抗原理与技术[M].北京:解

放军出版社,2000:116-117.

- [2] 赵延伸,孙华燕,宋丰华,等.离焦量对“猫眼效应”反射特性的影响[J].激光技术,2008,32(1):71-74.
- [3] 卞学丽.“猫眼”系统中离焦量的变化对回波功率的影响[J].中国测试技术,2007,33(2):84-86.
- [4] 张博,牛燕雄,张雏,等.“猫眼”目标回波功率的影响因素分析[J].红外与激光工程,2009,38(3):420-423.
- [5] 周炳琨,高以智,陈倜嵘,等.激光原理[M].5版.北京:国防工业出版社,2007.