

·光电系统·

## 非扫描激光主动成像系统性能分析

张晟翀, 朱海波, 唐树威, 王立新

(光电信息控制和安全技术重点实验室, 河北 三河 065201)

**摘要:**介绍了面阵非扫描型激光主动成像系统的原理、特点及影响其性能和成像距离的因素。对激光主动成像模型、ICCD探测器性能、灵敏度指标换算和目标识别性能进行了分析计算。依据入射辐照度和探测器辐照度灵敏度,建立了探测距离公式和入射辐照度需大于探测器辐照度灵敏度2倍的距离估算方法。采用808 nm波段激光进行的主动成像实验证明了理论分析的有效性。

**关键词:**非扫描;激光主动成像;成像距离;辐照度灵敏度;ICCD

中图分类号:TN249

文献标识码:A

文章编号:1673-1255(2011)05-0001-04

## Performance Analysis on Non-scanned Active Laser Imaging System

ZHANG Sheng-chong, ZHU Hai-bo, TANG Shu-wei, WANG Li-xin

(Science and Technology on Electro-optical Information Security Control Laboratory, Sanhe 065201, China)

**Abstract:** The principle and characteristics of plane array non-scanned laser active imaging system and factors affecting the detection range are introduced. The laser active imaging model, ICCD detector performance and sensitivity index conversion are analyzed. The formula of detection range and the distance estimation method for incident irradiance which is twice the sensitivity of the detector are established. Laser active imaging experiment using 808 nm wavelength can prove the validity of the theoretical analysis.

**Key words:** non-scan; laser active imaging; detection range; irradiance sensitivity; ICCD

激光主动成像系统在技术领域上应属于激光雷达范畴。由于人类所获得的目标信息75%来自图像,以及信息化社会的来临,要求激光雷达的性能向成像化、多功能化、智能化、实时化方向发展<sup>[1]</sup>。而非扫描激光成像采用了焦平面阵列器件,成像的速率很高,实现了目标的实时探测成像。相对于扫描型激光成像,具有分辨率高、探测距离远、结构简单,能同时进行被动强度成像(即不用激光照射时的成像)和主动强度成像(即主动照射时的成像),还可进行强度成像和速度成像<sup>[2]</sup>。得益于ICCD、EBCCD、EMCCD等成像探测器材以及激光技术的发展,非扫描激光主动成像系统的性能得到了显著的增强。如美国Intevac公司的激光照明二维成像系统LIVAR,可以识别5 km之外的目标;加拿大光子学研究开发中心INO

研制的全天候、零照度激光成像系统,作用距离可达10 km<sup>[3]</sup>,如果采用事后多帧图像处理技术甚至可以达到20 km的探测距离<sup>[4]</sup>;英国的BAE系统公司1.57  $\mu\text{m}$ 的HgCdTe焦平面阵列距离选通相机,可进行穿透成像<sup>[5]</sup>。

影响激光主动成像系统性能的因素有很多,如:探测器和激光器的性能,大气的衰减、散射,目标的反射率以及光学系统的性能等。但起决定性作用的主要是探测器的灵敏度、信噪比和激光器的功率及发散角等光束质量指标。目前采用比较多的探测器是像增强ICCD,因为它具有最灵活快速的快门控制,更适合距离选通和脉宽门控操作,激光器则采用脉冲半导体激光器,因为它的波段大多在750~900 nm

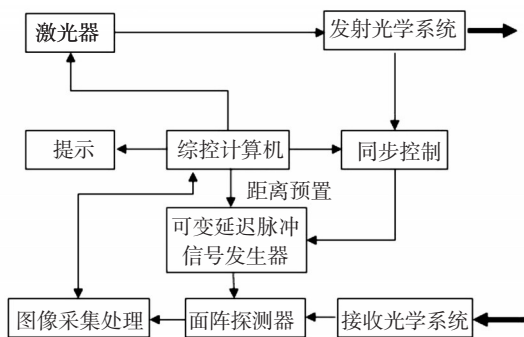


图1 非扫描激光主动成像系统组成框图

之间,正好和ICCD相匹配。如:加拿大的两代激光主动成像系统ALBEDOS和ELVISS。文中的分析和实验也是基于此种模式的系统。

## 1 激光主动成像模型

根据所要求的性能细节不同,可以从不同角度模拟激光主动成像系统的性能。比如采用激光测距方程模型<sup>[6]</sup>、激光雷达方程模型<sup>[7]</sup>。激光主动成像具有面阵ICCD成像,激光发散角小,可以距离选通去除后向散射,可以控制快门过滤背景噪声,可以多帧累加和积分等特性,系统性能的核心就是在焦平面上成像的最低辐照度和成像的距离。根据以上特点建立的激光主动成像模型<sup>[8-9]</sup>如图2所示,并假定照射光束具有均匀的强度分布,目标为漫反射目标。

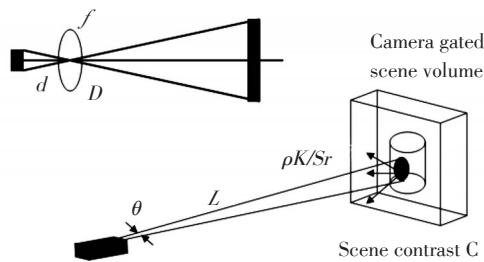


图2 激光主动成像照明模型

模型中激光光源输出功率 $P$ ,激光发散角 $\theta$ ,距离 $L$ ,可得入射到探测器上的目标辐照度为

$$I_i = \frac{\pi P \rho K C T_a^2 T_o}{4 f \#^2 \theta^2 L^2} \quad [\text{W/m}^2] \quad (1)$$

式中, $\rho$ 为目标平均反射率; $C$ 为目标对比度(在能见度较低的情况下一般取1); $K$ 为入射光与反射光比率系数(对朗伯表面为 $1/\pi \text{sr}^{-1}$ ;对半球反射表面强度分布为 $1/2\pi$ ); $T_a$ 为大气透过率; $T_o$ 为镜头透过率; $f\#$ 为镜头 $F$ 数( $f/D$ ); $\theta$ 为激光发散角。

通过式(1)可计算出不同距离目标反射的辐照度数值范围,然后与探测器的响应灵敏度进行比较,只有大于探测器的响应辐照度才可能成像。

## 2 ICCD探测器性能分析

像增强ICCD的性能可以由它的亮度增益、调制传递函数、分辨率等来描述<sup>[10]</sup>,但比较实用的是用噪声等效照度(NEI)和响应灵敏度来表示。用噪声等效照度可计算系统的信噪比SNR

$$SNR = MTF_s \times I_i / NEI \quad (2)$$

NEI是当 $SNR = 1$ 时与入射光强 $I_i$ 对应的噪声等效照度。 $MTF_s$ 是整个系统的调制传递函数。而ICCD的响应灵敏度一般用 $\text{mA/W}$ 或量子效率(QE)的百分比来表示(见图3),需要换算成激光主动成像模型中的辐照度( $\text{W/m}^2$ )单位。

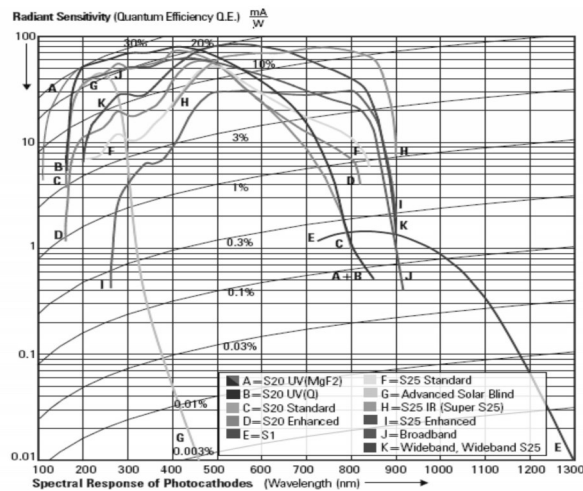


图3 像增强器不同光阴极光谱响应曲线

设量子效率为 $\eta_\lambda$ ,以 $\text{mA/W}$ 为单位的辐射响应灵敏度为 $S_\lambda$ ,前者表征了产生的光电子数和接收到的光子数的比例,而后者表示探测器输出信号电流(由产生的光电子形成)和接收到的辐射功率之比。它们其实是统一的,可由下式表示

$$\eta_\lambda = \frac{hc}{e\lambda} S_\lambda = 1.24 \times 10^{-3} \frac{S_\lambda}{\lambda} \quad (3)$$

式中, $h$ 为普朗克常数 $6.626 \times 10^{-34} \text{J}\cdot\text{s}$ ;  $c$ 为光速 $3 \times 10^8 \text{m/s}$ ;  $e$ 为电子电荷常数 $1.6 \times 10^{-19} \text{C}$ ;  $\lambda$ 为波长,以 $\mu\text{m}$ 为单位。

实际上 $hc/\lambda$ 就是光子能量的表达式。根据以上分析可以推导出探测器的量子效率和辐照度响应灵敏度 $I_\lambda (\text{W/m}^2)$ 的关系

$$I_\lambda = \frac{hc}{\eta_\lambda \lambda t a} = \frac{e}{S_\lambda t a} \quad (4)$$

式中,  $t$  为探测器有效积分时间;  $a$  为像元面积;

### 3 成像距离计算

由式(1)、式(2)可以导出距离估算公式<sup>[11-12]</sup>

$$L = \sqrt{\frac{\pi \times MTF_s \times \rho \times C \times K \times T_a^2 \times T_o \times P}{4 \times SNR \times f\#^2 \times NEI \times \theta^2}} \quad (5)$$

理论上只要信噪比  $SNR > 1$ , 通过图像滤波增强等处理手段, 就可以获得目标图像。但实际上  $SNR$  达到 2 以上更加稳妥。图 4 为 Matlab 计算的成像距离和激光功率关系曲线, 参数取值为:  $MTF_s = 0.036$ ,  $C = 1$  (夜间实验),  $T_a = 0.7$ ,  $SNR = 2.5$ ,  $f\# = 2$ ,  $NEI = 7 \times 10^{-9} \text{ W/m}^2$ ,  $\theta = 3 \text{ mrad}$ , 大气透过率  $T_o = \exp(-\sigma L)$ ,  $\sigma$  为大气消光系数, 它与距离、波长和天气等因素有关。

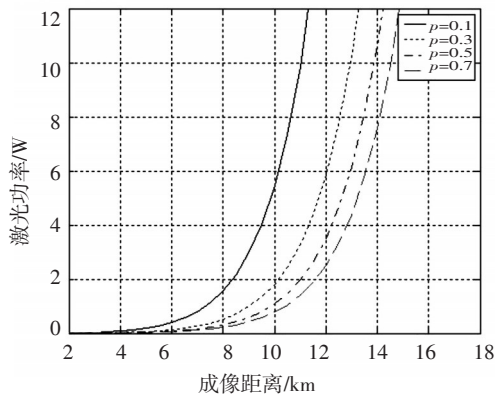


图4 成像距离与激光功率关系曲线

实际上探测器的响应灵敏度能更直观、更简便、更准确地反映系统的性能。因此可根据式(1)的计算结果和探测器灵敏度的辐照度指标  $I_a$ , 来计算探测距离。理论上当入射到探测器像面上的辐照度  $I_i > I_a$  时, 就可以探测到目标, 但  $I_i$  应大于  $2I_a$  更符合实际情况。表 1 列出了计算数据 ( $\rho = 0.1 \sim 0.7$ , 大气透过率  $T_o$  可按表 2 取值)。

表1 发散角 3 mrad 时不同距离目标反射辐照度计算数据 ( $\mu\text{W/m}^2$ )

激光功率 /W	目标距离/km				
	2	4	6	8	10
0.02	0.9~6.3	0.09~0.61	-	-	-
0.1	4.52~31.6	0.44~3.07	0.08~0.53	-	-
1	45.2~316	4.38~30.7	0.76~5.3	0.16~1.16	-
10	452~3 165	43.8~307	7.58~53.1	1.66~11.6	0.42~2.9

表2 中纬度夏季, 近地面 808 nm 波长的大气透过率 (%)

角度/(°)	距离/km				
	2	4	6	8	10
0°	61.210 4	38.040 2	23.725 5	14.810 4	9.263 2
5°	61.295 4	38.226 3	23.954 4	15.062 7	9.491 9
10°	61.371 2	38.404 1	24.236 0	17.646 5	14.846 0

### 4 目标识别性能分析

对于成像系统而言, 要得到满足要求的目标像, 除了要求被摄目标具有足够的照度, 还需要满足分辨率要求的光学系统和高分辨率 ICCD。根据约翰逊准则, 发现、识别和认清目标所需的空域频率  $n$  分别为 1、4、8 对线/目标临界尺寸, 则相应分辨角为

$$\alpha = H/nL \quad (6)$$

式中,  $H$  为目标的临界尺寸。系统所能达到的最小分辨角  $\alpha$  由物镜的焦距  $f$  和 ICCD 的分辨力  $m$  决定

$$\alpha = 1/fm \quad (7)$$

由式(6)和式(7)得

$$f = \frac{n \cdot L}{mH} \quad (8)$$

系统的视场角为

$$W = \arctan(Y/f) \quad (9)$$

式中,  $Y$  为有效靶面尺寸。表 3 列出了不同距离和尺寸下识别目标的焦距和视场要求, 认清目标时的焦距和视场则相应的分别扩大和减小一倍。可见, 系统的目标识别性能可以达到 10 km 处识别 2 m 的物体和认清 4 m 的物体。如果配合高质量的光学系统, 进一步增加焦距到 1 200 mm, 则可达到认清 10 km 处 2 m 目标的性能。

表3 识别目标时的焦距和视场

距离/km	目标尺寸/m	焦距/f/mm	视场角 W
6	2	342.9	2.3°×1.8°
	4	171.4	4.7°×3.5°
8	2	457.1	1.8°×1.3°
	4	228.6	3.5°×2.6°
10	2	571.4	1.4°×1°
	4	285.7	2.8°×2.1°

### 5 激光成像实验结果

图 5 列出了采用 808 nm 波段进行非扫描激光主动成像的实验图像。其中, 图 5a、图 5b 的探测器辐照度灵敏度为:  $I_a = 1.76 \mu\text{W/m}^2$ , 10 W 功率可以得到 4.7 km 高塔

的图像,根据式(1)估算的入射辐照度 $I_i=2.6 \mu\text{W}/\text{m}^2$ ,满足 $I_i>I_s$ 的条件;图5c的ICCD在波长808 nm的灵敏度可根据图3和式(4)换算成相应的辐照度响应灵敏度为 $I_s=0.1 \mu\text{W}/\text{m}^2$ 。3 ns快门对应的有效激光功率为21 mW,则估算 $I_i=0.2 \mu\text{W}/\text{m}^2$ 满足探测灵敏度要求。图5d是通过长焦镜头实验得到的8.32 km目标图像,这一结果也在先前的估算范围之内。

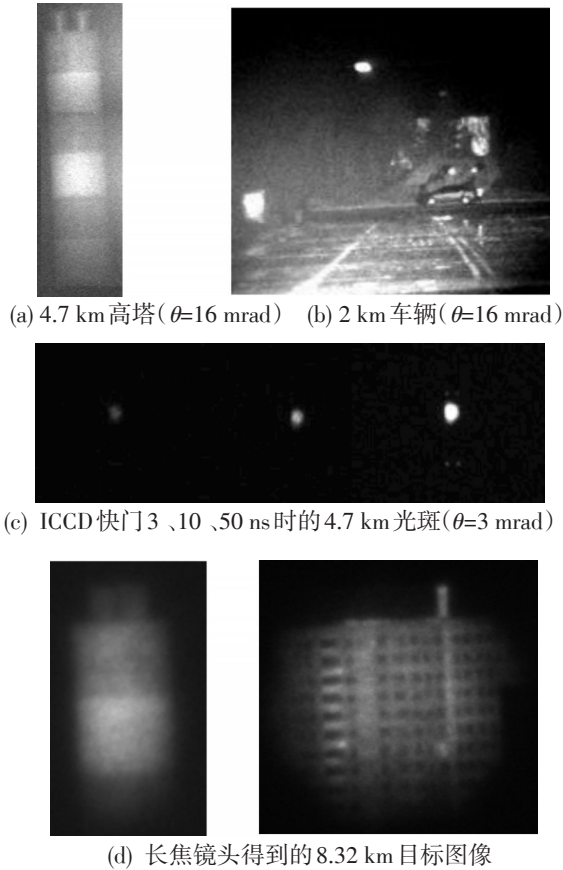


图5 非扫描激光主动成像实验图像

## 6 结论

通过理论分析、计算并且和实验数据进行对比,可以得出以下结论:

(1)非扫描激光主动成像系统的成像距离主要依赖ICCD探测器的灵敏度和激光光束质量。激光的发散角要小,而平均功率不一定很大。

(2)ICCD采用距离选通和多快门累加,延长积分时间,可以达到很高的灵敏度,探测很低的辐照度。发散角3 mrad,最低激光功率21 mW就可探测到4.7 km

的目标光斑。

(3)激光器应具备高频、低脉宽特性,可以降低其总的功率。功率太大对提升探测距离的作用有限,而且会增加后向散射能量,但提高脉冲峰值功率是有益的。

(4)理论分析和实验数据是基本符合的,证明激光主动成像模型和距离计算方法的有效性。合理地选择参数对计算成像距离和分析系统的性能具有一定的应用和指导意义。

(5)由于ICCD探测性能的提高,有效激光功率10 W以上可以达到10 km的成像距离。随着大气衰减、散射的增强,要进一步增加系统成像距离,单纯增大激光功率是不行的,需要大口径光学系统、更小的发散角和多种降噪手段的综合运用,才能实现更远距离的探测。

## 参考文献

- [1] 戴永江.激光雷达技术(上册)[M].北京:电子工业出版社,2010:7.
- [2] 詹玉书,安毓英.非扫描成像半导体激光雷达[J].激光与红外,1995(5):15-17.
- [3] 徐效文,郭劲,于前洋.距离选通激光成像系统发展现状[J].仪器仪表学报,2003,24(4):616-618.
- [4] David Dayton, Steve Browne. Long Range Laser Illuminated Imaging[J]. Proc.SPIE,2000,4124:232-243.
- [5] 王寿增,孙峰,张鑫.激光照明距离选通成像技术研究[J].红外与激光工程增刊,2008,37(9):95-99.
- [6] 王海平,王寿增,张保.激光主动照明成像系统及其关键技术分析[J].舰船光学,2008,44(1):1-5.
- [7] 庞春颖,张涛.激光主动成像系统信噪比模型的研究[J].光学精密工程,2008,16(2):319-323.
- [8] Vincent Larochelle, Pierre Mathieu, Jean-Robert Simard. Two Generations of Canadian Active Imaging Systems:AL-BEDOS and ELVISS[J]. SPIE,1999,3698:229-243.
- [9] Kevin J Snell, Andre Parent. An Active Range-gated Near-IR TV system for All-weather Surveillance[J]. SPIE,1997,2935:171-181.
- [10] 孙大维,蒲元远.像增强器参数综合测试研究[J].光电技术应用,2009,24(3):17-19.
- [11] 张晟翀,唐树威,朱海波.激光主动成像技术研究[J].光电技术应用,2009,24(3):9-11,28.
- [12] 朱海波,张晟翀,杨海波.激光主动成像系统设计[J].红外与激光工程增刊,2008,37(9):93-94.