

提高激光主动成像系统性能的匹配设计

赵云¹ 李迎春² 孙华燕² 郭惠超¹

(¹装备指挥技术学院研究生管理大队,北京 101416)
(²装备指挥技术学院光电装备系,北京 101416)

摘要 光学系统及探测器的极限分辨率是影响激光主动成像系统分辨能力的主要因素,系统调制传递函数(MTF)是表征系统性能的重要指标。为了提高激光主动成像系统成像分辨率和 MTF,分析了接收光学系统和探测器尺寸间的相互匹配关系,给出了光学系统参数的设计步骤,并对匹配条件和设计方法进行了实验验证。

关键词 成像系统; 激光主动成像; 调制传递函数; 成像分辨率; 匹配设计

中图分类号 TH745 文献标识码 A doi: 10.3788/LOP48.071101

Interrelation Design for Improving Performance of Laser Active Imaging System

Zhao Yun¹ Li Yingchun² Sun Huayan² Guo Huichao¹

(¹Company of Postgraduate Management, Academy of Equipment Command & Technology, Beijing 101416, China)
(²Department of Optical and Electrical Equipment, Academy of Equipment Command & Technology, Beijing 101416, China)

Abstract Optical system and detector's limit resolution are the main factors to influence the resolution of laser active imaging system. Modulation transfer function (MTF) is an important index to represent system performance. To improve imaging resolution and MTF, the interrelation of receiving optical system and detector size is analyzed, and the design steps of optical system parameters are given. The matching condition and design procedure are proved by experiments.

Key words imaging systems; laser active imaging; modulation transfer function; imaging resolution; interrelation design

OCIS codes 110.2970; 040.1880

1 引言

选通型激光主动成像系统是一个复杂的系统,主要包括激光器、成像探测器(ICCD)、光学系统、同步控制及图像处理单元等部分。在激光器发射功率一定的情况下,从接收端提高整个系统的成像性能,是提高整个系统性能的有效途径。本文主要从提高成像分辨率和调制传递函数(MTF)的角度对光学系统与成像探测器间的指标匹配进行分析,避免在探测器及光学系统指标选取上的浪费,以期取得较好的成像效果。

2 系统性能指标

2.1 调制传递函数

MTF 是评价系统成像质量的重要参数,影响系统 MTF 的主要因素^[1]包括光学系统调制传递函数 F_{optic} ,ICCD 探测器的阵列调制传递函数 F_{ICCD} 、电子电路的调制传递函数 F_{ele} 和大气调制传递函数 F_{tur} 。本文主要考虑光学系统和探测器分系统,因此 MTF 主要有 F_{optic} 和 F_{ICCD} 两部分组成:

收稿日期: 2010-08-27; 收到修改稿日期: 2010-11-23; 网络出版日期: 2011-06-03

作者简介: 赵云(1984—),男,硕士研究生,主要从事光电信息处理与激光成像等方面的研究。

E-mail: zhaoyunhappy@yeah.net

导师简介: 李迎春(1973—),女,博士,副教授,主要从事机器视觉与图像处理等方面的研究。

E-mail: liyingchun@163.com

$$F_{MT} = F_{optic} F_{ICCD}, \quad (1)$$

对圆形光孔的衍射极限光学系统,其传递函数^[2]为

$$F_{optic}(u_i) = \frac{2}{\pi} \left\{ \arccos \frac{u_i}{N_p} - \frac{u_i}{N_p} \left[1 - \left(\frac{u_i}{N_p} \right)^2 \right]^{1/2} \right\}, \quad (2)$$

式中 N_p 为光学系统截止频率, $N_p = D/(f\lambda)$, D 为光学系统入瞳, f 为焦距, λ 为工作波长,说明光学系统的分辨率由光学直径和激光波长决定。

ICCD探测器由像增强器、CCD及连接二者的光纤面板组成,三者的调制传递函数依次为 $F_{intensifier}$, F_{CCD} , F_{ofp} ,则 ICCD 的 F_{ICCD} 可表示为

$$F_{ICCD} = F_{intensifier} F_{ofp} F_{CCD}, \quad (3)$$

$F_{intensifier}$ 主要由微通道板的分辨率决定,一般厂家会提供实测的器件 MTF 参数。高斯型 MTF 可以表示为

$$F_{intensifier} = \exp[-2(\pi\sigma u_i)^2], \quad (4)$$

式中 u_i 为空间频率,参数 σ 是由像增强 MTF 为 50% 时的分辨率定义的,可表示为

$$\sigma = 2 \sqrt{\log(0.5)/(-2)} / (\pi \text{res } F_{MT}), \quad (5)$$

对于性能优良的像增强器,当空间频率为 20 lp/mm 时 MTF 值为 50%。

像增强器通过光纤面板与 CCD 耦合在一起, F_{ofp} 与中心距有关:

$$F_{ofp} = [2J_1(a\pi u_i)/(a\pi u_i)]^2, \quad (6)$$

式中 a 为光纤的中心距, J_1 为一阶贝塞尔函数。

F_{CCD} 是像素空间频率的函数^[3]

$$F_{CCD} = \sin(2\pi u_i/N_c)/(2\pi u_i/N_c), \quad (7)$$

式中 N_c 为 CCD 阵列的空间频率, $N_c = 2/d$, d 为像元大小。像元尺寸越小,则 CCD 的分辨率越高。ICCD 探测器的截止频率主要由像元尺寸决定,由采样定理知,其截止频率为 $u_{iN} = 1/2d$ 。

在截止频率条件下,对于成品 ICCD,像增强器及光纤面板的传递函数近似为常数,分系统的调制传递函数由光学系统及 CCD 决定。图 1 为 F_{MT} 与 $d/(F\lambda)$ (光学截止频率/探测器截止频率)的变化曲线。竖线为 $d/(F\lambda) = 2.44$,此时艾里斑与 ICCD 像元尺寸相当;横线为在不考虑像增强器及光纤面板的传递函数情况下,分系统的极限调制传递函数为 0.637,能量衰减由 ICCD 引起, $F_{optic} = 1$ 。 F_{MT} 随着 $d/(F\lambda)$ 的增大而逐渐增大,成像质量逐渐变好,但探测器对目标的高频成分的成像会产生模糊而使图像的可辨认程度下降,因此在系统设计过程中选择合适的 $d/(F\lambda)$ 值至关重要。

2.2 分辨率

分辨率是描述光电成像系统成像质量的重要特性参数之一,通常讨论系统的成像质量主要是讨论其分辨率。光电成像系统的分辨率受光学系统弥散斑、成像探测器的尺寸及由探测器决定的奈奎斯特极限等因素决定,系统总的分辨率由各子系统的分辨率组成。一般情况下,电子线路、显示系统对成像质量产生的不利影响不明显。因此,通常由光学系统和探测器的性能来评估系统的成像质量。

成像系统的等效分辨率可表示为

$$R_{eq} = \sqrt{R_O^2 + R_D^2}, \quad (8)$$

式中 R_O , R_D 分别为光学系统和探测器的分辨率。光学系统和探测器阵列分辨率通常以艾里斑的直径 d_a 和探测器有效单元直径 d 描述。根据文献^[4]:

$$R_O = 1.845\lambda F, \quad R_D = d, \quad (9)$$

则系统总的分辨率 R_{eq} 可表示为

$$R_{eq} = d \sqrt{(1.845\lambda F/d)^2 + 1}, \quad (10)$$

式中 F 为光学系统 F 数, λ 为激光波长。从(10)可以看出,当 $F\lambda/d$ 减小时, $d > d_a$, 系统分辨率受探测器尺

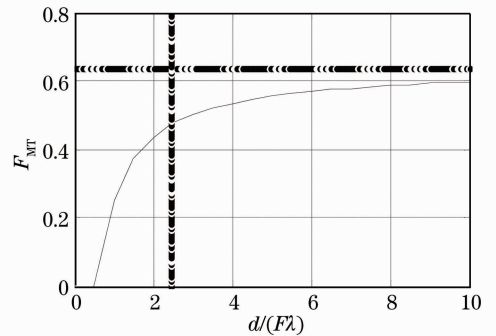


图 1 F_{MT} 与 $d/(F\lambda)$ 的变化曲线

Fig. 1 Curve of F_{MT} varying with $d/(F\lambda)$

寸限制;当 $\lambda F/d$ 的值较大时, $d < d_a$ 系统分辨率受光学极限限制。

分辨率与 $d/(F\lambda)$ (光学截止频率/探测器截止频率) 之间有如图 2 所示的关系曲线。从图 2 可以看出,像空间的成像分辨率随 $d/(F\lambda)$ 变小而增大。曲线有一段基本稳定区,这是由于整个系统分辨率受探测器尺寸限制。探测器像元尺寸越小,激光波长越长,该稳定区越短,系统的分辨率越易受光学系统限制,系统激光波长越长,光学系统的设计越复杂。

3 匹配设计

3.1 匹配条件

分辨率和 MTF 是系统成像质量好坏的重要度量,在系统设计时要充分考虑:

1) 选取像元尺寸越小,系统所能达到的分辨率就会越高,但像元尺寸过小,为保持系统分辨率,势必减小光学系统 F 数,增大了设计难度,提高了 CCD 购买成本及光学系统的设计成本;像元尺寸过大,系统的分辨率则达不到要求。当 $F\lambda/d = 1/2.44 = 0.41$ 时, $R_{eq} = 1.25d$, 即当艾里斑和探测器尺寸相当时,系统能分辨的最小尺寸约比探测器尺寸大 25%。此时在充分利用 CCD 像元尺寸的基础上,系统分辨率达到最大,光学系统的设计难度最小。

2) 在保证图像可辨认程度的基础上,尽量提高系统的 MTF,即 $d/(F\lambda)$ 取尽可能大的值,使目标的高频及低频成分都能清晰地成像。系统分辨率最大时, $d/(F\lambda) = 2.44$, MTF 接近 0.5, 达到了极限传递函数的 75% 以上,因此, $d/(F\lambda) = 2.44$, 能保证分辨率和 MTF 都达到较好效果。

3) 成像必须满足 Johnson 判则和目标传递概率函数^[5]要求的大小。

Johnson 判则提供的是在 50% 的辨识概率下最小尺寸上的周数,记为 N_{50} , 具体如表 1 所示。

表 1 工业上采用的 Johnson 判则

Table 1 Johnson rule in industry

Grade	Meaning	Pixel
Detect	Setting out aim from background	1.0
Identify	To identify the target of which a category	4.0
Confirm	Recognized and clearly identify the type	8.0

目标传递概率函数(TTPF)提供了辨别的累积概率。在不同概率条件下 TTPF 因子如表 2 所示。某一概率条件下,达到辨别等级所占周数为 N_{50} 乘以 TTPF 因子。

表 2 不同辨别概率下的 TTPF 因子

Table 2 TTPF in different probabilities of distinguishment

Probability of distinguishment	1.0	0.95	0.8	0.5	0.30	0.1	0.02	0
TTPF	3.0	2.0	1.5	1.0	0.75	0.5	0.25	0

3.2 设计步骤

假设探测距离 L , 目标大小为 $x \times y (x > y)$, 要求以 95% 的概率可以识别出目标属于哪一类。设成像探测器单元宽度为 d , 像素为 $M \times N$, 探测器面积为 $X \times Y$; 光学系统焦距为 f , 口径为 D , 即 $F = f/D$ 。为达到识别要求, 目标在像面上的极限成像大小为 h 。

1) 焦距 f : 由成像关系及成像尺寸的要求, f 最小值应为

$$f/h = L/y, \quad (11)$$

即 $f_{\min} = Lh/y$ 。设计要求以 95% 的概率可以识别出目标, 根据原则 3, 成像尺寸至少要占探测器的 8 周, 即 16 pixel, 即 $h = 16d$ 。成像尺寸的极限应使全部目标在像面上成像, 则 f 最大值应为

$$f_{\max} = LX/x. \quad (12)$$

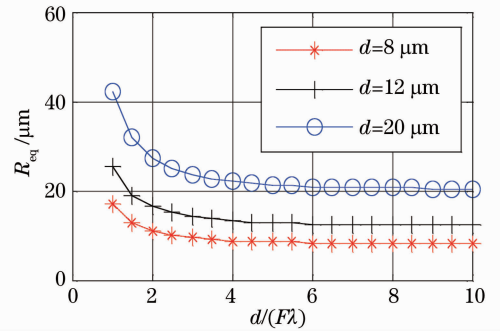


图 2 系统分辨率与 $d/(F\lambda)$ 的关系

Fig. 2 Resolution varying with $d/(F\lambda)$

2) 口径 D : 根据以上分析, $d/(F\lambda) = 2.44$, 选取适中的探测器及激光波长后, 计算光学 F 数, 可得到口径 D 。

3) 视场: 视场是接收光学系统另一个重要的指标, 由成像探测器的靶面尺寸 X, Y 及焦距 f 共同决定

$$W_h = 2\arctan(X/2f), \quad W_v = 2\arctan(Y/2f). \quad (13)$$

4 验证实验

4.1 正确性验证

为了验证匹配条件的正确性, 实验设计了针对近距离成像实验系统。系统采用 $\lambda = 850 \text{ nm}$ 半导体激光器, 成像探测器为北方夜视技术有限公司 1XC18/18WHS-G 选通型 ICCD, CCD 尺寸 $48 \text{ mm} \times 70 \text{ mm}$, 像元尺寸 $12 \mu\text{m} \times 11 \mu\text{m}$, 接收光学系统焦距 $80 \sim 200 \text{ mm}$ 。对距离约 30 m 的目标成像, 目标为“回”图样。

实验时, 目标距离不变, 焦距不变, 调节光圈即 F 数, 依次为 $4.5, 5.6, 8, 11, 16, 22$, 则 $d/(F\lambda)$ 依次为 $3.14, 2.52, 1.76, 1.28, 0.88, 0.64$ 。得到如图 3 所示的图像。从图中可以看出, 随着 $d/(F\lambda)$ 减小, 图像的信噪比明显降低, 表明系统 MTF 逐渐减小。

清晰度是衡量图像质量的另一重要度量。清晰的图像较模糊的图像包含更多的细节信息。这是采用清晰度进行图像质量判别的依据^[6]。当图像清晰时, 图像细节丰富, 在空域表现为相邻像素的特征值(如灰度等)变化较大, 具有较好的边缘效果; 在频域, 有更尖锐的边缘图像, 应有更大的梯度函数值^[7]。

用 Prewitt 算子对采集的实验图像进行边缘提取, 结果如图 4 所示。图 4(b) 具有较好的边缘效果, 可以清楚地看到目标是“回”, 而其他图的效果偏差, 并且随着 $d/(F\lambda)$ 的数值与 2.44 相差越大, 清晰程度越差, 图像越来越模糊。综合考虑图像的信噪比和清晰程度, 可以看出当 $d/(F\lambda)$ 越接近 2.44 时, 系统的成像效果越好。

灰度共生矩阵表达了图像灰度关于方向、相邻间隔、变化幅度的结构信息。利用基于灰度共生矩阵的清晰度计算方法对图 3 实验图像的清晰度进行了计算。具体步骤为:

1) 从图像 $f(x, y)$ 灰度为 i 的像素出发, 统计与其距离为 D 、灰度为 j 的像素 $(x+Dx, y+Dy)$ 同时出现的概率 $P(i, j, D, \theta)$ 。

2) 计算概率的二阶统计量, 定义为清晰度的大小,

$$F_{DE} = \sum_{n=0}^{L-1} n^2 \left[\sum_{i=1}^L \sum_{j=1}^L p(i, j) \right], \quad |i - j| = n. \quad (14)$$

根据上述计算方法, 对清晰度的计算结果如表 3 所示, 计算结果与图像的处理结果一致。

表 3 清晰度计算数据

Table 3 Calculated data of definition

	(a)	(b)	(c)	(d)	(e)	(f)
$d/(F\lambda)$	3.14	2.52	1.76	1.28	0.88	0.64
Definition	99.8	109.7	100.5	95.4	93.9	82.6

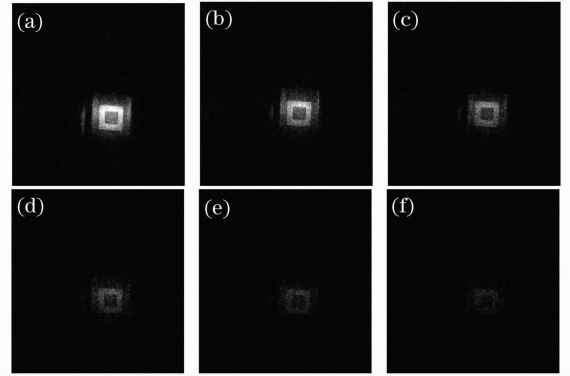


图 3 实验图像

Fig. 3 Experimental images

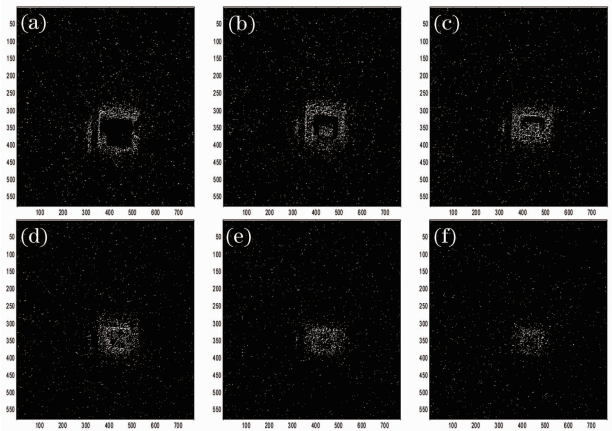


图 4 实验图像边缘提取

Fig. 4 Edge extraction on experimental images

4.2 设计实例

对 10 km 远 10 m×1 m 大小目标达到识别要求的激光主动成像系统指标进行设计。根据(11)式,在满足识别要求的情况下,接收光学系统焦距 $f > 160000d$,根据匹配原则 $d/(F\lambda) = 2.44$,取 $\lambda = 1.06 \mu\text{m}$,则口径 D 约为 400 mm,ICCD 面元尺寸与焦距的对应关系如表 4 所示。

表 4 参数间的对应关系

Table 4 Corresponding relationship between parameters

Parameter	Value		
$d / \mu\text{m}$	22	16	8
f / mm	3520	2560	1280
F	8	6.4	3.2

从表 4 可以看出,ICCD 分辨率越高,相同要求情况下,光学系统焦距越小,光圈数越小,则接收回波激光的能力越强,但会提高对 ICCD 的要求。因此,在可能的情况下或根据成像分辨率要求,尽可能地选择分辨率高的 ICCD,降低光学系统的设计难度和提高接收激光的能力。选取 ICCD 面元尺寸为 $8 \mu\text{m}$,画幅 $1/4''$,光学系统焦距设计为 1300 mm,口径设计为 400 mm,则视场为 $2.4 \text{ mrad} \times 1.8 \text{ mrad}$,10 km 处覆盖范围约为 $24 \text{ m} \times 18 \text{ m}$,满足覆盖目标的要求。

5 结 论

从衡量激光主动成像系统性能的 MTF 及分辨率指标出发,分析了系统中光学系统设计和探测器尺寸选取与匹配条件,给出了具体的设计步骤,并用实验验证了匹配条件的正确性。这对实际系统的设计具有指导作用。

参 考 文 献

- Lian Minlong, Wang Shitao. Research on the imaging performance of space low light level imaging system based on ICCD [J]. *Spacecraft Recovery and Remote Sensing*, 2007, **28**(3): 6~10
练敏隆,王世涛. 基于 ICCD 的空间微光成像系统成像性能研究[J]. *航天返回与遥感*, 2007, **28**(3): 6~10
- Da Zhengshang, Chen Liangyi. The matching design of opto-electronic image system[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2003, **32**(6): 669~671
达争尚,陈良益. 光电系统的匹配设计[J]. *光子学报*, 2003, **32**(6): 669~671
- Dai Dede. Study on Assessment of Performance on Laser Active Detecting System[D]. Beijing: The Academy of Equipment Command & Technology, 2009. 35~43
戴得德. 激光主动探测系统成像性能评价方法研究[D]. 北京: 装备指挥技术学院, 2009. 35~43
- Zuo Fang, Liu Guangrong, Gao Zhiyun. The interrelation of optical system and detector size of photoelectric system[J]. *Optical Technique*, 2002, **28**(1): 63~66
左 昉,刘广荣,高稚允. 光电系统中探测器与光学系统的匹配设计[J]. *光学技术*, 2002, **28**(1): 63~66
- 周立伟. 目标探测与识别[M]. 北京: 北京理工大学出版社, 2004. 28~31
- Huang Jianqi. Study on Digital Focusing Technique Based on Spectrum Analysis[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2006. 67~75
黄剑琪. 基于频谱分析的数字对焦技术的研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2006. 67~75
- Wang Xin, Liu Chang. Algorithm of image definition evaluation based on lifting wavelet transform[J]. *J. Northeast Normal University (Natural Science Edition)*, 2009, **41**(4): 52~57
王 昕,刘 畅. 基于提升小波变换的图像清晰度评价算法[J]. *东北师范大学学报(自然科学版)*, 2009, **41**(4): 52~57