

文章编号 1004-924X(2008)02-0241-07

陆-陆光电成像系统识别能力分析

撤芑芑^{1,2}, 张 葆¹, 丁金伟¹, 王 锋³

(1. 中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033;

2. 中国科学院 研究生院, 北京 100039; 3. 中国人民解放军 驻一三三厂军事代表室, 吉林 长春 130033)

摘要:从最基本的光电系统成像指标入手,从影响系统分辨率的艾里斑出发,推出光电系统的分辨率。为满足使用要求,对镜头的参数如焦距、相对孔径等各项指标进行逐一确定。从大气、光学系统的影响等方面讨论了整体光电系统对比度的问题。通过分析论证系统的光电指标,对陆-陆光电成像系统的各个性能参数进行匹配计算以确定其中各环节的参数,并对整体的光学系统探测能力进行了详细分析和预估。最后,通过拍摄6 km处1.5 m×1.5 m大小的目标在变倍过程中的清晰效果,证明了这些分析的必要性 with 正确性。

关键词:光电系统; CCD; 光学系统; 探测能力

中图分类号: V557.3; TH703 **文献标识码:** A

Analysis on recognized capability of land based photoelectrical imaging system

HAN Peng-peng^{1,2}, ZHANG Bao¹, DING Jin-wei¹, WANG Feng³

(1. *Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China;*

2. *Graduate School of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China;*

3. *Military Representative Office of PLA in 133 Factory, Changchun 130033, China*)

Abstract: The resolution of a photoelectrical system was educed by analysing Airy spot, and the focus and F number of the system were confirmed according to the use's request. The effects of atmosphere and optical systems on the contrast of object to background were discussed. The every parameter of a land based imaging system was calculated to determine the exact parameter values for each element by demonstrating the photoelectrical properties of the optical system and also the recognized capability of the photoelectrical system was pre-estimated and analyzed. Finally, these analysis is proved necessary and accuracy through taking pictures of a objective with size of 1.5 m×1.5 m from 6 km away.

Key words: photoelectricity system; CCD; optical system; recognized cap ability

1 引言

目标成像到接收器表面的整个传递过程中,有很多因素制约着成像质量的好坏,在图像传递过程中主要发生了三种传递作用^[1-3]:一是视角的传递,即远处的目标通过光学系统后,对人眼张角必须 $>1'$,人眼才能看清物体;二是亮度的传递,远处物体辐射的光通过大气的衰减、吸收,到达 CCD 靶面上的亮度必须大于 CCD 的感光度;三是对比度的传递,对比度是目标的亮度与背景的亮度之比,当目标逐渐变远时,目标与周围背景之间的亮度对比会逐渐变小,直至目标看不清。本文在以往的工程经验的基础上,从系统分辨率的分析开始进行镜头参数的确定^[4],并对系统的探测能力进行了理论计算^[5],总结出一套用于分析光学系统成像质量的理论方法,并将其应用于实际工作中,取得了良好的结果。

2 系统分辨率

成像系统中,光学系统、光电探测器和电子电路都具有其本身的分辨率。系统的分辨率是各部分分辨率的合成。通常一个良好的成像系统,电子电路和显示器的分辨率不会给图像的形成带来不利影响,而光学系统和光电器件的分辨率对成像质量起决定性作用。系统的分辨率决定于光学艾里斑的大小和光电探测器的大小。

当像素面积大于艾里斑面积时(如图 1),艾里斑大小少量的变化几乎对光学系统分辨率没有影响,系统的分辨率由 CCD 探测器像元大小决定;当像素面积小于艾里斑面积时(如图 2),系统的分辨率由光学艾里斑的大小所决定。

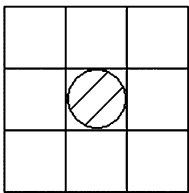


图 1 艾里斑

Fig. 1 Ariy spot

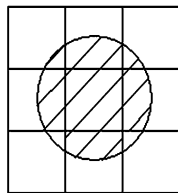


图 2 艾里斑

Fig. 2 Ariy spot

系统的等效分辨长度可以表示为:

$$R_e \approx \sqrt{R_o^2 + R_d^2}, \quad (1)$$

式中: R_o 为光学系统等效分辨长度;

R_d 为光电探测器的等效分辨长度。

对于光学分辨率来说,假设系统不存在光学像差,是衍射极限决定了光学分辨率。光学分辨长度可表示为 $R_o = 1.854\lambda F$ (F 是镜头 F 数)。

对于光电成像器件来说,分辨长度 R_d 等于像素的有效感光宽度 d ,即:

$$R_d = d,$$

因此系统的等效分辨长度可表示为:

$$R_e = d \sqrt{\left(\frac{1.845\lambda F}{d}\right)^2 + 1}. \quad (2)$$

当 $\frac{\lambda F}{d} = 0.41$ 时, $R_e = 1.25d$,表明系统的等效弥散圆为探测器像素有效宽度的 125%,此时认为光学系统分辨率和像素分辨率基本平衡;当 F 数变小时,系统的等效分辨长度减小到等于或小于器件的有效感光宽度 d ,此时是像素的大小限制系统的分辨率;当 F 数增大时,系统的等效分辨长度增大,等效弥散圆将限制系统分辨率。

光学系统的等效分辨长度 $R_o = \sqrt{R_c^2 - R_d^2} = \sqrt{(1.25d)^2 - d^2} = 0.75d$.

即光学系统的等效分辨长度为 $0.75d$ 时,可以认为光学分辨率和像素分辨率之间达到了匹配。已知选用的 CCD 像元大小为 0.00645 mm ,则系统的分辨率为:

$$\frac{1}{2 \times 0.00645} = 77.5 \text{ lp/mm} \approx 78 \text{ lp/mm}.$$

3 镜头参数的确定

需要确定的镜头参数有焦距和相对孔径,它们决定了系统对目标进行探测和识别的能力。

3.1 焦距的确定

连续变焦的光学镜头的短焦和长焦应由探测和识别目标所需要的空间分辨角、最大视场角和 CCD 像元尺寸来决定。

空间分辨角为:

$$\Delta\theta = \frac{W}{2nR}, \quad (3)$$

式中: W —目标的外形尺寸;

R —探测或识别的距离;

n —目标在靶面上所压的线对数。

长焦距应为:

$$f_{\max}' = \frac{P}{\Delta\theta}, \quad (4)$$

式中: P —CCD 像元大小。

短焦距则为:

$$f_{\min}' = \frac{f_{\max}'}{g}, \quad (5)$$

式中: g —变倍比。

美军电子作战部在佛州贝福瓦堡的夜视实验室实验测定过特殊目标的探测与识别概率。当 $n=1.2$ 时,探测概率可达 80%,当 $n=4$ 时,识别车辆的概率可达 80% 以上。

假设目标为 10 km 处 $2.3 \text{ m} \times 2.3 \text{ m}$ 坦克, CCD 像元为 0.00645 mm , 则满足战技指标(即长焦识别,短焦分辨)的焦距为:

$$f_{\max}' = 224.3 \text{ mm},$$

$$f_{\min}' = 67.3 \text{ mm},$$

取 $f_{\max}' = 250 \text{ mm}$, $f_{\min}' = 50 \text{ mm}$ 。

表 1 焦距对应的像素

Tab.1 Focus to pixel

焦距 f' (mm)	所压像元数
50	1.78
67.3	2.4
224.3	8
250	8.9

3.2 相对孔径的确定

由系统的分辨率可知当 $R_o = 0.75d$ 时,光学分辨率和像素分辨率之间达到了匹配,则光学系统的等效分辨长度即艾里斑直径 $D_{\text{Airy}} = 0.75d$, 且

$$D_{\text{Airy}} = 1.22\lambda F, \quad (6)$$

因此: $1.22\lambda F = 0.75d$, $F = 7.14$ 。

由于 F 数增大,系统的分辨率会降低,所以取 F 数为 6.3(长焦时)和 4.5(短焦时)。

相对孔径直接影响系统的靶面照度和分辨力,因此确定的相对孔径必须满足如下要求:

3.2.1 照度原则

要使目标成像在 CCD 上,需使目标在靶面的照度大于 CCD 的最小照度,这里假定选用的 CCD 最小照度为 0.02 lx ,地面照度取黄昏时(太阳高度角为 0°) 1000 lx ,漫反射系数取 0.3;目标被照射后所获得的反射亮度:

$$B_o = \frac{E_g}{\pi} \times R. \quad (7)$$

$$B_o = \frac{1000}{\pi} \times 0.3 = 95.5,$$

$$\tau_o = 0.99^{24} \times 0.98^9 \approx 65\%.$$

根据公式:

$$T_a(R) = \exp[-3.912RR_v(0.55/\lambda)]^{0.585R^{1/3}}, \quad (8)$$

式中: R ——观测距离;

R_v ——能见距离;

λ ——波长(在可见光波段取 $0.55 \mu\text{m}$)。

计算大气透过率

$$T_a(R) = 0.074,$$

所以 $\tau_a = 0.074$

$$E = \frac{\pi}{4} B_o \left(\frac{D}{f}\right)^2 \times \tau_1 \times \tau_2. \quad (9)$$

由表 2 可以看出目标照度到达 CCD 靶面的照度大于 CCD 靶面最低灵敏度 0.02 lx 。

表 2 F 数对应的角度

Tab.2 F number to angle

相对孔径	太阳高度角为 0° 时
1 : 4.5	0.178 lx
1 : 6.3	0.091 lx

综上所述,通过分析,在能见度为 15 km 时,该镜头从拂晓到黄昏可以看到 10 km 远处的 $2.3 \text{ m} \times 2.3 \text{ m}$ 的目标。

3.2.2 分辨力原则

为了使目标 $2.3 \text{ m} \times 2.3 \text{ m}$ 的坦克在靶面上至少压 8 个像元,每个 CCD 像元为 0.00645 mm ,则镜头的最低分辨率为:

$$N = \frac{1}{8 \cdot p} = \frac{1}{8 \times 0.00645} = 20 \text{ lp/mm}.$$

为了保证有较高的识别概率,这里取镜头的极限分辨率 $N_{\max} = 2N$,则相对孔径为:

$$\frac{D}{f'} = N_{\max} \times 1.22\lambda = 1/37.$$

式中: $\lambda = 0.000555 \text{ mm}$,为光学系统的主波长。

因此相对孔径 1 : 4.5 和 1 : 6.3 可以满足系统要求。

综上所述,光学系统的参数可确定如下:

焦距: $f' = 50 \sim 250 \text{ mm}$;

变倍比: $g = 5$;

相对孔径: $D/f' = 1/4.5 \sim 1/6.3$ 。

4 对比度分析

目标成像到接收器表面的整个传递过程中, 有很多因素制约着成像质量的好坏, 中间影响图像质量的信息传输环节如图 3 所示。

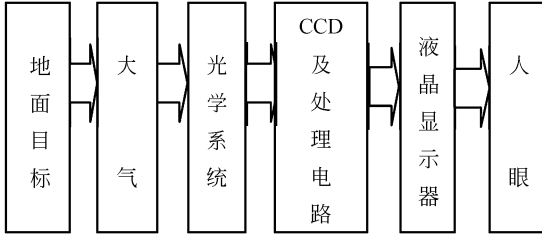


图 3 传输环节

Fig. 3 Taches of transfer

图像质量评价的原则是: 探测发现目标时, 目标的像在探测器靶面上占两个像元以上, 而且目标像的反衬度值要大于或等于人眼可探测的最小反衬度; 识别辨认目标(车辆)时, 目标像在探测器靶面上占 8 个以上像元, 而且目标像的调制传递函数要大于人眼可分辨的极限调制度。

4.1 大气的影响

大气的影响有两种: 一种是大气抖动, 另一种是大气吸收和散射, 它们都会引起目标反衬度下降。

由于大气紊流使得图像在积分时间内作无规则的抖动, 其抖动摆幅的均方根值为:

$$\alpha = \delta \cdot f_{\max} \cdot f_Q \cdot t, \quad (10)$$

式中: δ —— 大气抖动角的均方根值;

f_Q —— 抖动频率;

t —— 积分时间。

当 $\delta = 2''$, $f_Q = 20$ Hz 时, $\alpha = 0.000 504$ mm。

大气抖动所引起的传递函数为:

$$M_d = e^{-2 \cdot \pi^2 \cdot \alpha^2 \cdot N^2}. \quad (11)$$

探测目标时, $N = \frac{1}{2 \times 0.006 45} = 78$ lp/mm,

$M_d = 0.97$;

识别目标时, $N = \frac{1}{8 \times 0.006 45} = 20$ lp/mm,

$M_d = 0.997$ 。

大气中气体分子和气溶胶的吸收和散射使目标反衬度下降, 且与大气的洁净度有关。这种影

响的公式为:

$$C_R = C_O \cdot \tau_a, \quad (12)$$

C_O — 目标的反衬度;

C_R — 经过大气吸收和散射后的目标反衬度;

τ_a — 大气透过率。

这里反衬度为:

$$C = (I_{\max} - I_{\min}) / I_{\min}. \quad (13)$$

经过大气吸收和散射后目标的调制为:

$$M_{a,a} = \frac{I_{\max} - I_{\min}}{I_{\max} + I_{\min}} = \frac{C_R}{C_R + 2}. \quad (14)$$

由于大气的影响, 目标的调制度为:

$$M_a = M_{a,a} \cdot M_d. \quad (15)$$

能见度为 15 km, 探测并识别 10 km 的目标时地面水平大气层的透过率为:

$$\tau_a = 0.074.$$

探测结果如表 3 所示。

表 3 对比度与 F 数

Tab. 3 Contrast and F number

目标对比度	C_O	C_R	$M_{a,a}$	M_{dis}
低对比: 15/1	14	1.036	0.341 2	0.331
中对比: 30/1	29	2.146	0.517 6	0.502 1
高对比: 40/1	39	2.886	0.590 7	0.573

识别结果如表 4 所示。

表 4 对比度与 F 数

Tab. 4 Contrast and F number

目标对比度	C_O	C_R	$M_{a,a}$	M_{ide}
低对比: 6.3/1	5.3	0.392 2	0.164	0.163 5
中对比: 12/1	11	0.814	0.289 3	0.288 4
高对比: 20/1	19	1.406	0.412 8	0.411 6

4.2 光学系统的影响

光学系统的影响包括窗口玻璃和变焦距镜头两个部分。

窗口玻璃受到内外温差和气压差的影响会使面形发生变化, 降低了目标的反衬度。取窗口玻璃面形变化的波象差值为 $\lambda/5$, 相当于离焦量 $\Delta = 0.015$ mm。由这种变化所引起的调制传递函数表示为:

$$M_{win} = \frac{2J_1(x)}{x}, \quad (16)$$

式中: $J_1(x)$ —— 一阶贝塞尔函数, 且

$$x = \frac{\pi \cdot \Delta \cdot N}{F^\#} (1 - N \cdot \lambda \cdot F^\#). \quad (17)$$

该光学系统的主波长 $\lambda = 0.000\ 555\ \text{mm}$, $F^\# = \frac{f'}{D} = 4.5 \sim 6.3$ 。

探测目标时, $N = 78\ \text{lp/mm}$, $x = 0.424\ 3$, $M_{\text{win}} = 0.978$;

识别目标时, $N = 20\ \text{lp/mm}$, $x = 0.139\ 1$, $M_{\text{win}} = 0.998$ 。

变焦距镜头的调制传递函数由衍射、残余像差制造及装调误差、环境条件变化等因素所决定,它是降低目标像反衬度的主要环节。

镜头衍射所引起的调制传递函数表示为:

$$M_{\text{dif}} = \frac{2}{\pi} [\arccos(y) - y\sqrt{1-y^2}], \quad (18)$$

式中: $y = \lambda \cdot F^\# \cdot N$ 。

探测目标时, $N = 78\ \text{lp/mm}$, $y = 0.272\ 7$, $M_{\text{dif}} = 0.494$;

识别目标时, $N = 20\ \text{lp/mm}$, $y = 0.069\ 9$, $M_{\text{dif}} = 0.59$ 。

光学系统设计存在着残余像差,由像差所引起的调制传递函数是根据光学设计的传递函数图给出的。

探测目标时, $N = 78\ \text{lp/mm}$, $M_{\text{des}} = 0.4$;

识别目标时, $N = 20\ \text{lp/mm}$, $M_{\text{des}} = 0.7$ 。

制造及装调误差控制在 $\lambda/4$ 以内,相当于离焦量 $\Delta = 0.019\ \text{mm}$,其调制传递函数表示为:

$$M_{\text{mod}} = \frac{2J_1(x)}{x}, \quad (19)$$

式中: $J_1(x)$ ——一阶贝塞尔函数,且 $x = \frac{\pi \cdot \Delta \cdot N}{F^\#}$

$(1 - N \cdot \lambda \cdot F^\#)$,该光学系统的主波长 $\lambda = 0.000\ 555\ \text{mm}$, $F^\# = \frac{f'}{D} = 4.5 \sim 6.3$ 。

探测目标时, $N = 78\ \text{lp/mm}$, $x = 0.537\ 5$, $M_{\text{mod}} = 0.964$;

识别目标时, $N = 20\ \text{lp/mm}$, $x = 0.176\ 2$, $M_{\text{mod}} = 0.996$ 。

环境温度和气压变化,在采取一些相应的措施后所引起的离焦量控制在 $0.015\ \text{mm}$ 以内,则调制传递函数为:

$$M_{\text{cir}} = \frac{2J_1(x)}{x}. \quad (20)$$

探测目标时, $N = 78\ \text{lp/mm}$, $x = 0.424\ 3$, $M_{\text{cir}} = 0.978$;

识别目标时, $N = 20\ \text{lp/mm}$, $x = 0.139\ 1$, $M_{\text{cir}} = 0.998$ 。

光学系统的调制传递函数为:

$$M_o = M_{\text{win}} \cdot M_{\text{dif}} \cdot M_{\text{des}} \cdot M_{\text{mod}} \cdot M_{\text{cir}}. \quad (21)$$

探测目标时, $M_o = 0.183$;

识别目标时, $M_o = 0.41$ 。

4.3 CCD探测器的影响

CCD阵列的调制传递函数是像素空间频率的函数,其计算公式为:

$$M_{\text{CCD}} = \frac{\sin(\pi \cdot P \cdot N)}{\pi \cdot P \cdot N}, \quad (22)$$

式中: P ——像元尺寸, $0.006\ 45\ \text{mm}$;

N ——空间频率, lp/mm 。

探测目标时, $N = 78\ \text{lp/mm}$, $M_{\text{CCD}} = 0.632\ 7$;

识别目标时, $N = 20\ \text{lp/mm}$, $M_{\text{CCD}} = 0.97$ 。

处理电路对传递函数影响较小,在此不予以考虑。

4.4 液晶显示器的影响

显示器的调制传递函数为一高斯函数,用下式表示为:

$$M_d = \exp\left[-\left(\frac{fr}{fr_{\text{max}}}\right)^2\right], \quad (23)$$

式中: fr_{max} ——显示器的截止频率;

fr ——工作频率。

利用 CCD 摄像机电子变焦功能使其在半截止频率处工作,则有:

$$M_d = 0.779.$$

目标信息经过整个传输通道,在显示器上图像的调制传递函数为:

$$\text{MTF} = M_a \cdot M_o \cdot M_{\text{CCD}} \cdot M_d. \quad (24)$$

探测目标时,监视器上图像的反衬度 C_{overall} 列于表 5。

表 5 计算结果

Tab. 5 Results

目标对比度	$C_{\text{overall}} = 2M/(1-M)$
低对比 15/1	0.062
中对比 30/1	0.094 9
高对比 40/1	0.109

表 5 中低对比目标的 C_{overall} 达到了人眼可探测的最小反衬度 (5%) 的值,系统完全可以探测 10 km 处的目标。

识别辨认目标时,监视器上目标像的传递函

数如表 6。

表 6 对比度与 MTF

Tab. 6 Contrast and MTF

目标对比度	MTF
低对比 6.3/1	0.05
中对比 12/1	0.089 3
高对比 20/1	0.127 5

由表 6 可以看到低对比目标的传递函数大于人眼的极限调制传递函数值(0.026),该系统可以完全识别 10 km 的目标。

通过以上分析,在能见度为 15 km 的条件下,要探测发现 10 km 的目标,必须满足目标与

背景的对比度高于 15/1。而识别辨认 10 km 的目标,则需满足目标与背景的对比度高于 6.3/1。

5 实例分析

在上述理论分析指导下,研制了某型号摄像机。

该摄像机的参数为:

焦距: $f' = 100 \sim 400$ mm;

相对孔径: $D/f' = 1/4.5 \sim 1/6.3$;

变倍比: $g = 4$;

视场角: $6.33^\circ \sim 1.59^\circ$ 。

其观测结果的图片如图 4 所示。



图 4 拍摄结果图

Fig. 4 Pictures of shot

上述图片是在能见度为 10 km 的气候条件下观察的结果,图中黑圈处是所要观察的目标,目标距离为 6 km,目标中每个字母的大小为

1.5 m×1.5 m。几幅图片显示了在焦距变化过程中,目标在 CCD 像面上从被发现到可识别的过程。该过程符合理论分析的结果。

6 结 论

一套光学系统能否满足使用要求,需要考虑很多因素,任何一个小的环节出现纰漏,都可能使整套系统不能满足使用要求。本文在光学系统建立之前就通过理论分析的方法对光学系统的镜头

分辨率、几何探测能力和靶面照度进行预先估算,并在理论计算的基础上指导光学系统的建立,同时进行对比度的分析,最后通过实验结果来验证这一套理论的正确性。通过这一过程,充分说明了该理论分析方法的正确性,将其应用在工作中有利于光学系统的建立和成像质量的分析。

参考文献:

- [1] 贾平,张葆,孙辉. 航空成像像移模糊恢复技术[J]. 光学精密工程,2006,14(4):697-703.
JIA P,ZHANG B,SUN H. Restoration of motion-blurred aerial image[J]. *Opt. Precision Eng.*,2006,14(4): 697-703. (in Chinese)
- [2] 刘金国,李杰,郝志航. APS星敏感器探测灵敏度研究[J]. 光学精密工程,2006,14(4): 553-557.
LIU J G, LI J, HAO ZH H. Study on detection sensitivity of APS star tracher[J]. *Opt. Precision Eng.*,2006,14(4): 553-557. (in Chinese)
- [3] 王家骥. 光学仪器总体设计[M]. 长春: 长春光机所研究生部,2003.
WANG J Q. *Overall Design of Optical Instrument* [M]. Changchun: Post Student Department of Changchun Institute of Optics,Fine Mechanics and Physics,Chinese Academy of Sciences,2003. (in Chinese)
- [4] 王肇圻,张轶楠,傅汝廉,等. 折/衍混合 Petzval 光电摄像物镜设计[J]. 光学精密工程,2005,13(1):1-4.
WANG ZH Q, ZHANG Y N, FU R L, *et al.*. Design of hybrid refractive/diffractive Petzval objective in visiblebe-
md[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2005,13(1): 1-4. (in Chinese)
- [5] 何照才,胡保安. 光电测量[M]. 北京: 国防工业出版社,2002.
HE ZH C,HU B A. *Photoelectrical Measurement* [M]. Beijing: Publish House of Defense Industry,2002. (in Chi-
nese)

作者简介:撇芑芑(1977—),女,山西永济人,助理研究员,主要从事光电仪器总体设计、精密仪器设计等方面的研究。E-mail: cuihanpengpeng@sina.com.cn

(本栏目编辑 严寒)

●下期预告

光谱非匹配对光学遥感器定标精度的影响

陈 风,郑小兵

(中国科学院安徽 光学精密机械研究所 遥感研究室,安徽 合肥 230031)

通过数值模拟计算,定量分析了光谱非匹配所产生的测量相对误差及其与遥感器光谱带宽的关系。对于 20 nm 以内的分光谱光学遥感器,光谱非匹配对测量精度的影响基本可以忽略;而对中低光谱分辨或全色光学遥感器,在带宽为 300 nm 时,光谱非匹配造成的测量相对误差可达 7.9%,故采用光谱匹配的定标光源是非常必要的。