

文章编号 1004-924X(2004)02-0165-04

信噪比对高速视频系统作用距离制约的分析

达争尚, 何俊华, 陈良益

(中国科学院 西安光学精密机械研究所 水下光电探测技术室, 陕西 西安 710068)

摘要:研究了在靶场测试中能否用高速视频系统替代高速摄影完成记录功能的问题, 讨论了这一问题涉及到的成像视场、信息量、作用距离等技术指标。依据系统作用距离的判据对高速摄影系统和视频系统的作用距离进行了分析。分析表明, 视频系统的信噪比、分辨率、帧频之间存在相互制约的关系而不能兼顾, 当帧频、分辨率提高时, 信噪比则下降, 对高速、高分辨视频系统, 信噪比是限制系统作用距离的首要因素。由于信噪比的限制, 高速视频系统达不到高速摄影的作用距离。

关键词:高速视频系统; 高速摄影; 作用距离; 信噪比(SNR)

中图分类号: V556.5 文献标识码: A

SNR limitation of high speed visual image system detection distance

DA Zheng-shang, HE Jun-hua, CHEN Liang-yi

(*Department of Underwater Optoelectronic Testing Engineering,
Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics,
Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710068, China*)

Abstract: Whether a high speed visual image system can do high speed photography to satisfy the recording need is a hot topic for researchers in the range test field. This involves several issues, such as image field, detection distance, and information acquisition capability, and detection distance is the core issue for necessary consideration. It is concluded from the analyses of the factors having effect on detection distance in the two systems that, in a high speed and high resolution visual image system, there is a contradiction between frame rate, resolution, and SNR. SNR decreases as frame rate and resolution increase, and SNR is the primary factor which limits the system detection distance, and therefore, a high speed visual image system can not reach the same distance as a high speed photography system.

Key words: high speed visual imaging system; high speed photography; detection distance; SNR

1 引言

目前, 视频成像系统在靶场测试中已得到广泛的应用, 其主要的功能是实现跟踪测量, 进行脱靶量的实时修正, 系统工作在标准模式下(PAL 或

NTSC制)。而能否用高速视频系统替代高速摄影完成记录功能是靶场测试人员一直关注的问题, 讨论这一问题涉及到成像视场、信息量、作用距离等技术指标。本文从作用距离的角度对这一问题进行阐述, 意在为靶场测试中用高速视频替代高速摄影作预研论证。

文中分析了影响系统作用距离的诸多因素,着重分析和讨论了高速视频系统的信号、噪声及信噪比。依据视频系统极限作用距离的相关判据^[1-3]对高速摄影系统和视频系统的作用距离进行了比较,并得出如下结论:视频系统的信噪比、分辨率、帧频之间存在相互制约的关系而不能兼顾;对高速、高分辨视频系统,信噪比是限制系统

作用距离的首要因素;由于信噪比的限制,高速视频系统达不到高速摄影的作用距离。

2 作用距离判据

目标经大气成像的主要环节如图 1^[4]:

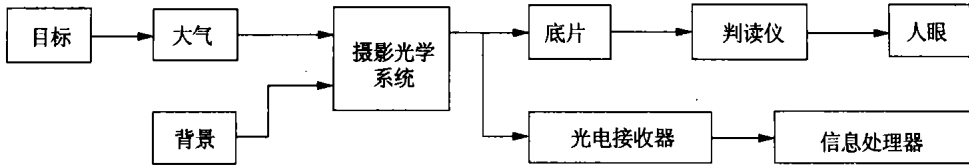


图 1 目标经大气传输环节

Fig. 1 Target transmission process in air

影响系统作用距离的因素很多,各因素之间的关系也很复杂。作用距离不仅与光学系统的参数有关,而且还与目标状况(包括目标的大小、发光度或辐射特性)、外界环境(大气衰减、大气抖动、天空亮度等)、接收器性能(胶片或光电探测器的光响应特性)等有关。目前,作用距离还很难直接用函数表示,测试人员在长期的实践中形成了如下判据:

(1) 目标在接收器上的像点尺寸要有一定的大小,满足判读识别要求;

(2) 目标和背景在接收器上的信噪比大于接收处理器信噪比阈值;

(3) 目标和背景的对比度满足电学系统提取信号的要求;其中满足条件(2)和(3)的前提是:

(4) 目标或背景在接收器上的能量要大于接收器的灵敏度阈值。

条件(4)为必要条件,条件(2)和条件(3)可能互相包含:即信噪比满足要求时,自然能够满足对比度的要求;或者相反,主要与系统的噪声和信号处理方法有关。

3 影响系统作用距离的因素分析

3.1 成像尺寸计算

像的尺寸由式(1)计算:

$$D'_{\min} = \frac{\sqrt{A}}{R} f' \quad (1)$$

A 为空间目标的等效面积; D'_{\min} 为要求的目标像最小尺寸; f' 为光学系统焦距; R 为目标斜距离。对于摄影胶片,要求 D'_{\min} 大于胶片的分辨率即可,摄影分辨率一般在 30~50 lp/mm,因此要求 $D'_{\min} \geq 0.020 \sim 0.033$ mm;对于视频系统的光电接收器,基于接收器件相移影响及接收器正确提取视频信号的需要,要求像的尺寸至少占 3 个像元,若像元尺寸按 12 μm 计算(在高速视频系统中,分辨率算比较高的),则要求 $D'_{\min} \geq 0.036$ mm。可见由分辨率决定的摄影作用距离比视频系统的作用距离要远一些。

3.2 对比度计算

对自身不发光,仅靠反射太阳光和地面光的目标和背景在像面上产生的对比度称为表观对比度 C_p ^[2]:

$$C_p = \left| \frac{E_m - E_b}{E_b} \right| \quad (2)$$

E_m 为目标像面照度 (lx); E_b 为背景像面照度 (lx)。

$$E_b = \frac{\pi \times B_b \times 10^4 \times (1 - \varepsilon^2)}{4} \times \left(\frac{D}{f'} \right)^2 \times K_1 \times K_2 \quad (3)$$

B_b 为天空背景亮度 ($B_b = 0.2 \sim 0.5$ sb); ε 为折反射光学系统的遮拦比,对透射系统为 $\varepsilon = 0$; D/f' 为相对孔径; K_1 为光学系统对背景的光谱透射率; K_2 为滤光片对天空背景的光谱滤光系数。

面目标形成的像面照度计算公式为:

$$E_m = \frac{\pi \times B_{mp} \times 10^4 \times (1 - \varepsilon^2)}{4} \times \left(D/f' \right)^2 \times K'_1 \times K'_2 \times K_a \times \left(\sigma_1 / \sigma_\Sigma \right)^2, \quad (4)$$

B_{mp} 为目标峰值亮度 (sb); K_a 为大气透过率; K'_1 为光学系统对目标的光谱透过率; K'_2 为滤光片对目标的光谱滤光系数; σ_1 为目标对仪器张角的均方根值; σ_Σ 为实际像点弥散均方根角值, 计算方法在文献[4]中有详细的论述, 其余参数同式(3)。

点目标形成的像面照度计算公式为^[5]:

$$E_m = \frac{I \times (1 - \varepsilon^2) \times D^2 \times \pi}{4 \times A \times R^2} \times K'_1 \times K'_2 \times K_a \times \left(\sigma_1 / \sigma_\Sigma \right)^2, \quad (5)$$

I 为目标总反射强度 (cd), 包括目标反射太阳光和地面光形成的反射强度的总和。

接收系统(包括人眼、胶片、光电探测器)要能准确地将目标和背景区分开, 要求目标信号和背景信号有一定的对比度。对于摄影用航空胶片, 要求目标和背景的光学密度差不小于 0.1^[6], 使人眼可分辨。取胶片反差系数 $r = 2$, 当密度差 $\Delta D = 0.1$ 时, 有:

$$\Delta D = r \lg \left| \frac{E_m}{E_b} \right|, \quad (6)$$

结合式(2)求得目标和背景在胶片上的表观对比度为:

$$C_p = \left| \frac{E_m - E_b}{E_b} \right| = 0.12, \quad (7)$$

对光电探测器, 对比度阈值主要与信号处理器的处理能力有关。目前视频系统采用的处理算法和硬件线路能在 $C_p = 0.05$ 时提取信号, 但这一指标不受处理时间的限制。对高速实时视频系统, 实际工程中要求目标和背景在靶面的表观对比度 $C_p \geq 0.1$, 这一要求与胶片系统相近。

3.3 信噪比计算

条件(2)、(4)可以用下式量化表达^[1]:

$$\text{SNR} \geq K$$

$$N_b + N_D \geq \max\{N_{A/D}, N_{\text{prea}}, N_{ST}\} \quad (8)$$

SNR 为信噪比; N_b 为背景信号强度; N_D 为光电器件暗电流信号; $N_{A/D}$ 为 A/D 量化分辨率; N_{prea} 为预放大器灵敏度; N_{ST} 为光电器件极限灵敏度; K 为信噪比阈值。

文献[1]的研究表明, 在白天探测的情况下, 条件(4)一般都能满足, 而基于信号提取和判读的需要, 信噪比阈值 K 取 2~3。

就灵敏度指标而言, 光电器件的灵敏度 (CCD 可达 0.1 lx) 较之摄影胶片的灵敏度高^[7], 但对摄影系统, 对比度是限制其作用距离的首要因素。3.2 的分析表明, 这一指标和视频系统的要求相当。

下面计算信噪比, 信噪比表达式为:

$$\text{SNR} = \frac{|N_m - N_b|}{\langle n_{\text{SYS}} \rangle}, \quad (9)$$

N_m 为目标信号; N_b 为背景信号; $\langle n_{\text{SYS}} \rangle$ 为噪声均方根值。

目标产生的光电探测器输出信号 N_m 计算^[8]:

$$N_m = \frac{A_D}{4F^2} \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} E_m \times K_m(\lambda) \times R_m(\lambda) \times t_{\text{INT}} d\lambda, \quad (10)$$

其中 E_m 为目标在靶面的照度, 用式(4)计算; A_D 为单个像元面积; $F = f'/D_0$ 为光圈数; t_{INT} 为积分时间; $R_m(\lambda)$ 为光电器件对目标谱的响应度; $K_m(\lambda)$ 为目标谱响应系数; $\lambda_1 \sim \lambda_2$ 为目标谱范围。

背景产生的接收器输出信号 N_b 计算:

$$N_b = \frac{A_D}{4F^2} \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} E_b \times K_b(\lambda) \times R_b(\lambda) \times t_{\text{INT}} d\lambda, \quad (11)$$

其中 E_b 为背景在靶面的照度, 用式(3)计算; $R_b(\lambda)$ 为光电器件对背景谱的响应度; $K_b(\lambda)$ 为背景谱响应系数; $\lambda_1 \sim \lambda_2$ 为背景谱范围。

系统噪声 $\langle n_{\text{SYS}} \rangle$ 计算^[8]:

$$\langle n_{\text{SYS}} \rangle = \sqrt{n_{\text{shot}}^2 + n_{\text{floor}}^2 + n_{\text{PRNU}}^2}, \quad (12)$$

n_{shot} 为信号电荷和暗电流电荷产生的冲击噪声; n_{floor} 为预放大器引起的噪声, 与线路的带宽有关, 预放大器的带宽越大, n_{floor} 越大; n_{PRNU} 为接收器响应的非线性引起的噪声。 n_{shot} 和 n_{PRNU} 与信号电荷的多少有关, 当信号强时, n_{shot} 和 n_{PRNU} 增大(信号增加更快); 信号弱时, n_{shot} 和 n_{PRNU} 减小, 并且当入射光弱时, n_{floor} 噪声占主导地位, 其次是 n_{shot} 噪声, 再次是 n_{PRNU} 噪声。

由式(10)、(11)、(12)得:

$$\text{SNR} = \frac{\left| \frac{A_D}{4F^2} \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} E_m \times K_m(\lambda) \times R_m(\lambda) \times t_{\text{INTd}} d\lambda - \frac{A_D}{4F^2} \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} E_b \times K_b(\lambda) \times R_b(\lambda) \times t_{\text{INTd}} d\lambda \right|}{\sqrt{n_{\text{shot}}^2 + n_{\text{floor}}^2 + n_{\text{PRNU}}^2}}, \quad (13)$$

针对式(13), 作如下讨论:

(1) 对靶场应用来说, 总是寻求探测尽可能远的作用距离, 系统工作在接近极限的状态下, 本身的信号很弱, 信噪比较一般的光电成像系统小; 而对高速视频系统, 要求传输的信息量大, 因此带宽必然大。由上面的讨论可知, 系统的信噪比将更小。

(2) 由式(13)可知, 信噪比与积分时间成正比。当积分时间短时, 允许的帧频提高, 但信噪比将降低。例如帧频从标准帧频 30 fps 提高 1 倍后, 信噪比降低一半, 当帧频提高到 100 fps 后, 信噪比将减小到原来的 1/4。

(3) 同时由式(13)知, 信噪比与像元面积成正比, 例如当像元尺寸从 20 μm 提高到 10 μm 后, 信噪比同样减小到原来的 1/4, 但分辨率提高。

上述分析表明, 高速视频成像系统的信噪比、分辨率、帧频存在相互制约的关系而不能兼顾。

参考文献:

- [1] 朱耆祥, 毛羽国. CCD 光电探测器系统对动目标探测极限的研究[J]. 光电工程, 1991, 18(8): 11-19.
ZHU L X, MAO Y G. The research on moving target detection limitation with CCD as a detector[J]. *Optoelectronic Engineering*, 1991, 18(8): 11-19. (in Chinese)
- [2] 田铁印. CCD 电视跟踪测量光学系统参数确定方法的探讨[J]. 光学 精密工程, 1993, 12(1): 21-25.
TIAN T Y. The discussion on the design of optics system's parameter of CCD TV tracking system[J]. *Optics and Precision Engineering*, 1993, 12(1): 21-25. (in Chinese)
- [3] 王家骥. 低飞小目标电视跟踪作用距离的分析[J]. 光学学报, 1994, 14(5): 523-528.
WANG J Q. The analysis of the TV tracking system's detection distance of low flying and small target[J]. *Acta Optica Sinica*, 1994, 14(5): 523-528. (in Chinese)
- [4] 何照才, 胡保安. 光学测量系统[M]. 北京: 国防工业出版社, 2002.
HE ZH C, HU B A. *Optics testing system* [J]. Beijing: National Defense Industry Press House, 2002. (in Chinese)
- [5] 赵文才. 影响电视作用距离的几个环节[J]. 光学 精密工程, 1994, 10(2): 27-34.
ZHAO W C. The several factors that influence the TV system's detection distance[J]. *Optics and Precision Engineering*, 1994, 10(2): 27-34. (in Chinese)
- [6] 杨延梧. EOMS 光电经纬仪作用距离研究分析[J]. 飞行试验, 1999, 3: 42-48.
YANG Y W. The analysis of the detection distance of EMOS altazimuth[J]. *Flying Experiment*, 1999, 3: 42-48. (in Chinese)
- [7] 谷忠昭. 彩色胶片与数字成像效率的分析及其对未来发展趋势的预测[J]. 感光科学与光化学, 2001, 1(2): 49-52.
GU ZH ZH. The analysis and the prediction for the future of image efficiency of color film and digital image system[J]. *Sensitization Science and Optochemistry*, 2001, 1(2): 49-52.
- [8] HOLST G C. *CCD arrays, cameras and displays* [M]. Bellingham, WA: SPIE Press, 2000.

作者简介: 达争尚(1973-), 男, 陕西渭南人, 2000 年于西安工业学院获得光学工程专业硕士学位, 现在中国科学院西安光学精密机械研究所攻读光学工程专业博士学位, 主要研究方向为靶场测量设备及水下光学。

当帧频提高时, 信噪比下降; 当像元尺寸减小时, 信噪比也随之下降。由此可以推断, 对本身信噪比就小的高分辨、高帧频视频系统, 信噪比将是限制系统作用距离的首要因素, 而对胶片摄影系统, 不存在信噪比的问题。

4 结 论

综合比较由成像尺寸(分辨率)、对比度、接收器灵敏度、信噪比等因素决定的系统作用距离, 可以得出结论: 高分辨率、高帧频视频系统由于提取信号所要求的信噪比的限制, 其作用距离还不能和摄影系统相比。视频系统信噪比的提高依赖于光电器件本身技术的发展, 而信号提取能力的提高同样会降低对信噪比阈值的要求, 但是对硬件线路和软件算法的速度和效率则会要求更高。