

# 低飞小目标电视跟踪作用距离的分析

王家骥 任建岳 尤英奇 刘光亚

(中国科学院长春光学精密机械研究所, 长春 130022)

**摘 要** 结合长期从事光电跟踪仪器研制的实践, 针对低飞小目标远距离跟踪测量的特点, 从跟踪信号的大小及其对比度两个方面分析了它们对电视作用距离的影响, 深入探讨了目标穿越电视视场产生的动态对比度及其对作用距离的影响, 并提出采用电子快门和光谱匹配技术提高目标信号对比度, 提高电视跟踪作用距离的方法。

**关键词** 电视跟踪, 作用距离。

## 1 引 言

就跟踪电视而言, 与作用距有关的问题有2个。一是具有足够目标能量, 即使电视的CCD象探测器接收足够的光能量; 二是具有适应现有信号处理能力的目标与背景对比度。

低空远距离跟踪高速飞行的目标, 远比跟踪高空目标难得多。其主要问题是接近地表的大气衰减和湍流影响严重。例如标准大气条件、中纬度、波段 $0.5\sim 0.7\ \mu\text{m}$ , 当作用距离为10 km时, 海平面大气平均透过率约为0.2左右, 30 km为0.008, 50 km仅为0.00032。这样严重的衰减, 将大大降低跟踪电视接收的目标信号能量和目标对背景的对比度, 从而严重影响作用距离。另一个主要问题是高速目标穿越电视视场时, 将大大减少目标在接收器像素上的驻留时间, 从而降低动态对比度, 还将严重影响作用距离。

实践证明, 随着探测器灵敏度的大幅度提高, 电视跟踪测量作用距离愈来愈取决于目标对背景的对比度, 尤其是动态对比度。

## 2 作用距离分析

### 2.1 目标信号的分析

为保证足够高的跟踪捕获概率和很低的虚警概率, 一般要求目标象点至少覆盖2~3个CCD象元。这意味着进行光能计算时, 对目标不能按光学意义的点目标处理。

1) 目标象面光照度 一般来说, 有两种目标。一是加装曳光弹的飞行体, 目标即曳光弹; 二是不加装曳光弹的飞行体, 其漫反射体构成目标。对光能计算, 前者给出的是发光强度 $I$ , 它对应的光亮度<sup>[1]</sup>为:

$$N_{b1} = I/\pi d^2/4, \quad (1)$$

式中  $d$  为曳光火球直径. 后者给出的光亮度<sup>[1]</sup>为:

$$N_{b2} = E_s/\pi \rho, \quad (2)$$

式中  $E_s$ 、 $\rho$  分别为海平面上目标的照度和漫反射系数. 它们经光学系统成象在 CCD 象面上的光照度<sup>[1]</sup>为:

$$E'_b = [\tau_a N_b] [(\pi/4) K_0 \tau_0 (D/f')^2], \quad (3)$$

式中  $\tau_a$  为大气水平方向平均透过率, 与选择的光谱波段有关;  $\tau_0$  为光学系统透过率;  $K_0$  为光学系统的点扩散引起的衰减,  $K_0 = 1/K_1^2$ ,  $K_1 = d'_R/d'$ ,  $d'$ 、 $d'_R$  分别为几何和实际象点直径,  $d'_R = \sqrt{d'^2 + d_0^2}$ ,  $d_0$  为光学成象弥散直径;  $N_b$  为目标亮度, 可为  $N_{b1}$  或  $N_{b2}$ ;  $D/f'$  为光学系统相对孔径.

2) CCD 最小可用光照度 CCD 摄象机生产厂提供物方最小可用光照度  $E_{\min}$ , 与之相应的 CCD 象面最小可用光照度<sup>[1]</sup>为

$$E'_{\min} = \tau E_{\min} \sin^2 u', \quad (4)$$

$\tau$  为 CCD 摄象机镜头透过率,  $u'$  为 CCD 摄象机镜头象方孔径角.

3) CCD 接收的等效目标光照度 CCD 摄象机最小可用光照度  $E_{\min}$  是在均匀照明 CCD 光敏面的情况下测得的. CCD 的象元一般为矩形, 在均匀照明整个 CCD 光敏面时, 相当于用矩形光斑照明每一个象元. 而目标经电视光学系统所成象点近似为圆形, 这时目标经光学系统成象的光照度不能与  $E_{\min}$  相比较. 由此引入 CCD 的目标等效光照度系数  $K_r$ ,  $K_r = 1/K_2$ ,  $K_2 = (n^2 a b)/[(\pi/4)(d'_R)^2]$ ;  $n$  为象点覆盖 CCD 象元数;  $a$ 、 $b$  为 CCD 象元长度和宽度. 经修正后, CCD 象面接收的等效目标光照度为:

$$E'_{br} = [\tau_a \cdot N_b] [(\pi/4) K_0 \tau_0 (D/f')^2] [K_r]. \quad (5)$$

## 2.2 目标与背景对比度

1) 静态对比度 在目标处观测时, 背景在 CCD 象面上的照度为:

$$E'_g = [\tau_0 (\pi/4) (D/f')^2] [N_g], \quad (6)$$

$N_g$  为背景的平均亮度. 目标在 CCD 象面上的照度为:

$$E'_{0b} = [N_b] [(\pi/4) K_0 \tau_0 (D/f')^2]. \quad (7)$$

在目标处观测时的静态对比度<sup>[2]</sup>为:

$$C_0 = \left| \frac{E'_{0b} - E'_g}{E'_g} \right| = \left[ \frac{N_b}{N_g} K_0 K_r - 1 \right]. \quad (8)$$

在距离为  $R$  处观测时, 大气传输特性对目标与背景对比度产生很大影响, 这些影响主要由大气微粒散射和吸收, 以及大气扰动造成. 大气微粒散射和吸收对于对比度的影响, 等价于目标成象平行光束在传输过程中对比度的衰减, 其衰减系数<sup>[2]</sup>为:

$$K_s = [1 + K(e^{\sigma R} - 1)]^{-1},$$

$K$  为天空与背景的亮度比. 当背景就是天空时,  $K = 1$ ,  $K_s = e^{-\sigma R} = \tau_a$ , 即对比度衰减系数就是大气平均透过率. 大气扰动对于对比度的影响取决于跟踪测量光学系统象方分辨率  $\gamma$ 、焦距  $f'$ 、波长  $\lambda$ 、作用距离  $R$ 、大气折射率结构常数  $C_n$  (与扰动的强弱有关). 它引起的衰减系数<sup>[2]</sup>为:

$$K_t = \exp [-5.8 \pi^2 \gamma^3 f'^3 \lambda^{-1/2} R C_n^2]. \quad (9)$$

综合这两方面的影响, 由大气传输所造成的总衰减系数为:

$$K_a = \tau_a K_t$$

受大气传输影响, 在距离为  $R$  处, 对于以天空为背景的象面上目标与背景的对比如为:

$$C' = C_0 K_a = C_0 \tau_a K_t = [ (N_b/N_g) K_0 K_r - 1 ] \tau_a K_t \quad (10)$$

2) 动态对比度 当电视跟踪测量系统拦截捕获目标时, 目标以速度  $V$  相对视轴运动. 当目标距离为  $R$  时, 在每帧的积分时间  $t_s$  内, 目标象在电视视场内的穿越长度为  $M = V t_s f' / R$ . 所穿越的象元数为  $n_d = M/b = V t_s f' / Rb$ . 由于目标的相对运动, 使象点所覆盖的象元数从静态的  $n$  个增加到动态时的  $(n + n_d)$  个, 降低了目标实际曝光量, 为了分析方便, 使用动态照度和动态对比度的概念. 其动态照度为

$$E'_{bd} = E'_{bn} / (n + n_d) = (\tau_a N_b) [ (\pi/4) K_0 \tau_0 (D/f')^2 ] K_r K_d \quad (11)$$

其中  $n = f' d / Rb$ . 相应的动态对比度为:

$$C_d = E'_{bd} / E'_g = C' \cdot K_d = [ (N_b/N_g) K_0 K_r - 1 ] \tau_a K_t K_d \quad (12)$$

其中  $K_d = d / (V \cdot t_s + d)$  为动态衰减系数. 动态光照度和动态对比度下降  $K_d$  倍, 即为静态时的  $1/K_d$ . 当  $d = 0.4 \text{ m}$ ,  $V = 330 \text{ m/s}$ ,  $t_s = 0.02 \text{ s}$  时,  $K_d = 0.057$ . 如平稳跟踪情况下, 静态对比度余量不是很大时, 对于拦截捕获的动态对比度将下降  $1/K_d = 17.5$  倍, 这对电视的目标信号提取, 带来极为严重的甚至难以克服的困难.

### 2.3 从光谱辐射的角度考虑动态辐照度和动态对比度

当目标的光谱辐射强度  $I(\lambda)$  或目标的光谱辐照度  $E_s(\lambda)$  和目标的光谱反射率  $\rho(\lambda)$ 、大气光谱透过率  $\tau_a(\lambda)$ 、大气扰动光谱衰减系数  $K_t(\lambda)$ 、CCD 的光谱响应  $R(\lambda)$ 、背景的光谱辐亮度  $N_g(\lambda)$  为已知时, 可以应用前面推导的基本公式, 从光谱辐射的角度获得动态辐照度和动态对比度.

当目标为曳光弹时, CCD 象面上的动态辐照度为:

$$E'_{bd} = \left[ \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} I(\lambda) \tau_a(\lambda) R(\lambda) d\lambda / d^2 \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} R(\lambda) d\lambda \right] \tau_0 K_0 \left( \frac{D}{f'} \right)^2 K_r K_d \quad (13)$$

当目标为漫反射体时, CCD 象面上的动态辐照度为:

$$E'_{bd} = \left[ \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} E_s(\lambda) \rho(\lambda) \tau_a(\lambda) R(\lambda) d\lambda / 4 \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} R(\lambda) d\lambda \right] \tau_0 K_0 \left( \frac{D}{f'} \right)^2 K_r K_d \quad (14)$$

当目标为曳光弹时, CCD 象面上的动态对比度为:

$$C_d = \left\{ \frac{4 \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} I(\lambda) \tau_a(\lambda) K_t(\lambda) R(\lambda) d\lambda}{\pi d^2 \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} N_g(\lambda) R(\lambda) d\lambda} K_0 K_r - \frac{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \tau_a(\lambda) K_t(\lambda) R(\lambda) d\lambda}{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} R(\lambda) d\lambda} \right\} K_d \quad (15)$$

当目标为漫反射体时, CCD 像面上的动态对比度为:

$$C_d = \left\{ \frac{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} E_s(\lambda) \rho(\lambda) \tau_a(\lambda) K_t(\lambda) R(\lambda) d\lambda}{\pi \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} N_g(\lambda) R(\lambda) d\lambda} K_0 K_r - \frac{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \tau_a(\lambda) K_t(\lambda) R(\lambda) d\lambda}{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} R(\lambda) d\lambda} \right\} K_d \quad (16)$$

在论证跟踪测量电视时, 必须同时满足以下二个条件:

$$E_{td} \geq E_{\min}, \quad C_d \geq C_{\min}, \quad (17)$$

$C_{\min}$  为由视频处理技术水平决定的最小可用对比度.

### 3 提高作用距离的措施

由于 CCD 灵敏度的大幅度提高, 无论是外场试验, 还是分析计算, 都证明限制作用距离的主要因素是对比度. 以下从对比度这一因素出发, 分析提高作用距离的几个措施.

1) **光谱匹配** 光谱匹配是指在首先保证  $E_{td} \geq E_{\min}$  的条件下, 选择合适的曳光弹光谱, 考虑目标的光谱辐照度  $E_s(\lambda)$ 、目标的光谱反射率  $\rho(\lambda)$ 、大气的光谱透过率  $\tau_a(\lambda)$ 、背景的光谱辐射亮度  $N_g(\lambda)$  和 CCD 的光谱的响应  $R(\lambda)$ , 选择合适的光谱范围 ( $\lambda_1$  和  $\lambda_2$ ), 使 (15) 式和 (16) 式获得最大值. 对加装曳光弹的目标计算分析表明, 将光谱范围从  $0.5 \sim 0.7 \mu\text{m}$  移到  $0.6 \sim 0.85 \mu\text{m}$ , 则在  $45 \text{ km}$  的作用距离上大气平均透过率  $\tau_a$  可增加 3 倍, 背景得到抑制 (平均背景辐亮度可降低 1.5 倍), 同时可充分利用 CCD 光谱响应. 另据文献介绍, 总的对比度可提高 13 倍.

对漫反射体目标, 计算分析表明, 在 CCD 的光谱响应区  $0.4 \sim 0.9 \mu\text{m}$  内, 用  $0.6 \mu\text{m}$  前截止滤光片进行光谱滤波片后, 当作用距离为  $10 \text{ km}$  时, 可以将目标和天空背景的对比度提高 3 倍.

2) **提高光学系统的质量** 影响光学系统质量的因素很多. 首先要提高光学系统设计加工和装配质量, 使其接近衍射极限. 因为跟踪测量电视系统一般都具有自动调光、自动调焦、变换滤光片的功能及焦距长、系统复杂等特点, 稍有不妥就会造成象点弥散和杂光, 降低  $K_0$  值, 从而降低对比度. 同时还需采取温度补偿和消除杂光措施.

3) **减少 CCD 积分时间** 由于  $K_d = d / (V \cdot t_h + d)$ , 显然减少积分时间可以增加  $K_d$  值, 即增加动态对比度. 当  $t_h = 0$  时,  $K_d = 1$ , 即动态对比度将等于静态对比度, 但目标信号值也将降为零. 因此在选择积分时间时, 必须同时考虑目标信号值, 即保证  $E_{td} \geq E_{\min}$ .

目前愈来愈多的 CCD 器件本身就带有电子快门, 因此可以利用电子快门, 根据目标的速度  $V$  和目标尺度  $d$  合理地选取 CCD 的积分时间来提高动态对比度.

4) **提高跟踪精度** 在平稳跟踪时, 提高系统的跟踪精度可以提高作用距离. 所谓的提高系统的跟踪精度, 实际上是减小目标相对视轴的运动速度, 即减小  $v$  值. 由于  $K_d = d / (V t_h + d)$ ,  $V$  值减少, 即可增大动态衰减系数  $K_d$ , 同时增大了动态对比度.

5) **采用信号处理新技术** 在诸多抑制背景噪声的方法中, 比较有效的是背景抵消技术. 作者在原有基础上, 根据目标和背景的具体情况, 应用有效的背景抵消方法. 实践证明, 它可以把畸变严重的背景拉平, 保持信号波形基本不变, 从而降低了象面上所需的最小对比度, 可以在对比度不理想背景干扰很大的情况下, 提高信号的信噪比, 对提高作用距离和探

测概率极为有利.

#### 4 结束语

作者所在单位研制的一种设备, 电视光学系统口径  $\phi 200$ , 焦距为 3 m, 在我国北方海域跟踪高速掠海目标, 已达到 40 km 左右的作用距离. 另一种设备电视光学系统口径  $\phi 130$ , 焦距为 1 m, 在上述的相同条件下, 已达到 28 km 的作用距离. 外场应用中获得的数据表明, 以上的分析计算结果是合理的.

现在, 采用上述方法, 对正在研制的更高性能的跟踪测量电视进行作用距离的分析论证, 以期达到一个新的水平.

#### 参 考 文 献

- [1] 张以谟主编, 应用光学, 北京, 机械工业出版社, 1982, 102~103, 107  
[2] 张云熙, 大气调制传递函数计算. 舰船光学, 1984, (4): 1~6

### Analysis on the Effective Ranging of TV Tracking for Low Altitude Target

Wang jiaqi      Ren Jianyue      You Yingqi      Liu Guangya

(Changchun Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130022)

(Received 28 August 1993; revised 24 October 1993)

**Abstract** The influence on the TV tracking effective ranging in regard to both the signal and the target-to-background contrast is analysed on the features of long-distance tracking and measuring of the target travelling at low altitude, based on the experience in development of opto-electronic tracking and measuring instrument. The discussion is emphasized on the dynamic contrast formed as the target passing across the TV field of view and its influence to the effective ranging. A method is proposed to improve the dynamic target-to-background contrast and to expand the TV tracking effective ranging by adopting electronic shutter and spectral matching techniques.

**Key words** TV tracking, effective ranging.