

影响电视作用距离的几个环节

赵文才

(中国科学院长春光学精密机械研究所, 长春 130021)

摘要 影响电视作用距离的因素较多, 本文只就目标、背景、大气及探测器等几个方面进行一下探讨, 旨在找出关于光度特性实用的计算方法。

关键词: 电视作用距离; 光度特性; 探测器

1 引言

早在六十年代, 长春光机所结合电影经纬仪的研制任务, 从对比和能量衰减的观点出发, 对作用距离的计算给出了如下公式:

$$C_P = \gamma \frac{B_m K_D \cdot K_g \cdot K_{mL} \cdot \sigma_m^2}{B_b \cdot K_{bL} \cdot (\sigma_m^2 + \sigma_g^2 + \sigma_D^2 + \sigma_x^2 + \sigma_P^2)} \quad (1)$$

式中, C_P 为对比度, γ 为底片反差系数; B_m 、 B_b 分别为目标和背景亮度; K_D 、 K_g 分别为大气和光学系统透过率; K_{mL} 、 K_{bL} 分别为滤光片对目标和背景的滤光系数; σ_m 、 σ_g 、 σ_D 、 σ_x 、 σ_P 分别为目标、光学系统、大气抖动、像点移动及底片等造成的像点弥散的均方根角值。多年的工程实践证明, 用公式(1)计算的作用距离与实际情况较为符合。电影经纬仪的接收器件为感光底片, 电视跟踪系统的接收器为电视摄像机的光敏面, 除此之外, 在影响作用距离的因素上是一样的, 因此, 在分析电视作用距离时, 仍可使用公式⁽¹⁾。

其中, 对比与能量传输是与各环节的光度特性有关的, 因此, 找出一种关于光度特性实用而简便的计算方法, 尤其重要。

2 目标

对于目标而言, 其照度计算可分为两部分, 一部分是其自身辐射的光谱特性, 另一部分是来自自然光照射后反射的光谱特性。下面就给出其计算公式。

设目标的表现光谱辐射强度为 I_m (单位: 坎德拉), 从目标到接收系统通道上的大气透过率为 K_D , 则到达接收系统的光谱辐射照度 E_m 为:

$$E_m = \frac{(1 - \theta^2)I_m}{R^2} \cdot \left(\frac{D^2}{f'}\right) K_D \cdot K_g \cdot K_{mL} \cdot \left(\frac{1}{\sigma_\Sigma^2}\right) \quad (2)$$

式中： E_m 为光谱辐射照度（单位：勒克司）； θ 为遮拦比； R 为作用距离（单位：m）； D/f' 为光学系统相对孔径； K_D 、 K_g 、 K_{mL} 分别为大气、光学、滤光片对目标的透过率； σ_Σ 为光学通道各环节均方根角值之和（单位：角秒）。

设太阳在目标上的辐射照度为 E_m （单位：勒克司），目标的光谱反射率为 $\rho_m(\lambda)$ ，则太阳对目标所贡献的表观光谱辐射亮度 B_{im} （单位：熙提）为：

$$B_{im} = \frac{\rho_m(\lambda)E_m}{\pi \times 10^4} \quad (3)$$

表 1 日照照度等级

太阳中心的实际高度角(度)	地平面上的照度 E (勒克司)	备 注
-18	6.51×10^{-4}	天文晨昏蒙影下限
-12	8.31×10^{-3}	
-6	3.40	
-5	10.8	航海晨昏蒙影下限
-0.8	453	民用晨昏蒙影下限
0	732	日出或日没
5	4760	整个变化有2.64个 星等(见6.3节)
10	1.09×10^4	
15	1.86×10^4	
20	2.73×10^4	
25	3.67×10^4	
30	4.70×10^4	
35	5.70×10^4	
40	6.67×10^4	
45	7.59×10^4	
50	8.50×10^4	
55	9.40×10^4	
60	10.2×10^4	
65	10.8×10^4	
70	11.3×10^4	
75	11.7×10^4	
80	12.0×10^4	
85	12.2×10^4	
90	12.4×10^4	

如目标被太阳照射后对接收系统的有效“辐射”面积为 A_m ，则太阳对目标所贡献的表观光谱辐射强度 I_{im} 为：

$$I_{im} = B_{im} \cdot A_m \quad (4)$$

(3) 式代入 (4) 得：

$$I_{im} = \frac{\rho_m(\lambda) E_m \cdot A_m}{\pi \times 10^4} \quad (5)$$

式中: A_{tm} 的单位为 m^2 。

设地面反射太阳光的反射率为 ρ_{dm} , 目标在观察方向的投影面积为 A_{dm} , 同上可得地面反射所贡献的目标的表现光谱辐射强度 I_{dm} 为:

$$I_{dm} = \frac{\rho_m(\lambda) \cdot E_{tm} \cdot \rho_{dm} \cdot K \cdot A_{dm}}{\pi \times 10^4} \quad (6)$$

式中: K 称为 A_{dm} 的可有效利用系数。

由于 $I_m = I_{tm} + I_{dm}$, 将 (5)、(6) 式代入 (1) 式整理后得:

$$E_m = \frac{(1 - \theta^2) K_D \cdot K_g \cdot K_{Lm} \rho_m(\lambda) \cdot E_{tm}}{R^2 \cdot \pi \cdot 10^4 \cdot \sigma_{\Sigma}^2} \left(\frac{D}{f'}\right)^2 [A_{tm} + \rho_{dm} \cdot K \cdot A_{dm}] \quad (7)$$

实际上, 光度辐射特性与观测方向、太阳高角及反射特性等有关, 不同地区、不同地面反射特性相差较大。如沙漠地区比海水反射率要高, 如在夜间观测; 则应计算月亮及各星座的光照辐射特性。表 1 列出太阳在不同高角时的照度等级^[2]。

3 背 景

所谓背景主要是指天空背景, 它主要是自然光照射大气颗粒后散射而形成的。其光度特性, 主要是指背景的亮度, 天空背景的亮度主要是由大气散射太阳光、地面的反射光形成的。

表 2 给出了各种情况下靠近地平天空亮度 B_b (单位: 熙提) 的近似值^[3]。

表 2 靠近地平天空的亮度

天 空 情 况	亮度 (熙提)	天 空 情 况	亮度 (熙提)
晴 天	10^8	晴天 (日落后半小时)	10^3
阴 天	10^7	明亮月光	10^2
阴沉天	10^6	无月晴空	10
阴天 (日落时)	10^5	无月阴空	1
明天 (日落后一刻钟)	10^4		

* 雾或云的上表面在日照下亦有此值。

有了此亮度值, 使可以计算出背景在接收系统的照度值。计算天空背景照度 E_b 的公式如下:

$$E_b = \frac{(1 - \theta^2) \cdot B_b \cdot \pi \cdot 10^4}{4} \left(\frac{D}{f'}\right)^2 K_g \cdot K_{bL} \quad (8)$$

式中符号的意义如前所述。

因此, 对比度可以如下计算:

$$C = \frac{E_m}{E_b} \quad (9)$$

算出对比度以后, 便可以计算出表观对比度 C_a 或调制对比度 M , 进而与接收系统的性质配合估算作用距离。

4 大 气

地球周围是一层很厚的大气层, 大气使光折射、散射、抖动和吸收。其结果使目标亮度

降低，目标像弥散。

4.1 大气透过率

表示大气传输特性的物理量之一为大气透过率 K_D ，它是目标到接收器影响光度特性较大的物理量之一，因此，准确地计算 K_D 值较为重要。

$$K_D = \exp(-\beta \sec Z) \quad (10)$$

式中： Z 为天顶距， β 为大气质量。

$$\beta = \sigma \cdot R \quad (11)$$

式中： R 为传输距离， σ 为光谱衰减系数或“消光系数”。此系数为臭氧吸收系数、瑞利散射系数及气悬体散射系数的总如。

$$\sigma = \sigma_{\text{臭氧}} + \sigma_{\text{瑞利}} + \sigma_{\text{气悬体}} \quad (12)$$

图1画出了一个典型晴朗标准大气（海平面能见度约为23.5km）水平路程上的海平面大气衰减系数。从图上可知，在光谱的紫外区，臭氧吸收的效果最为显著，而在较长的谱段处则可以忽略。瑞利散射系数 $\sigma_{\text{瑞利}}$ 与 λ^4 的倒数成正比。气悬体的散射系数 $\sigma_{\text{气悬体}}$ 是粒子大小、形状、折射率、散射角及波长的复杂函数。

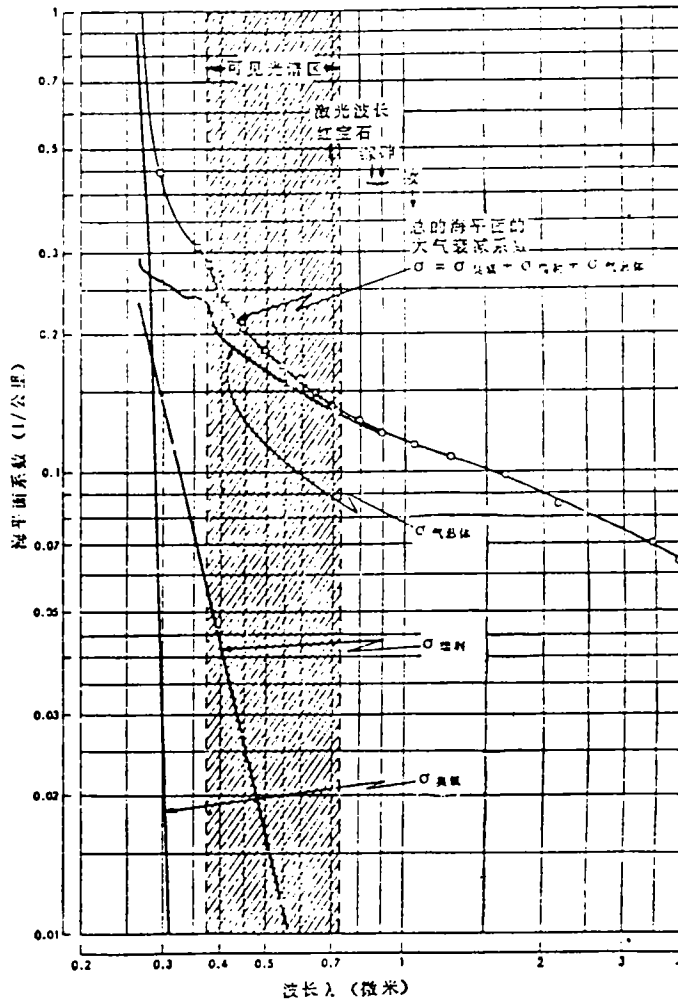


图1 水平传播下海平面大气衰减系数^[1]。

表3 大气透过率 K_D 值

Z						
K_D	75°	60°	45°	30°	15°	
β						
0.25	0.38	0.61	0.70	0.74	0.77	
0.50	0.14	0.37	0.49	0.56	0.60	

大气透过率与能见度、波段及太阳位置有直接关系。表3列出了能见度分别为50km和20km，波段为0.5~0.7 μm 时，太阳所处不同位置的 K_D 值。能见度50km和20km时的大气质量 β 分别取为0.25和0.5。

4.2 大气抖动

大气抖动是由于大气中各处的温度和气压不均匀使大气产生了对流作用，从而使大气中

折射率分布呈不均匀状态,致使像点弥散、能量衰减、目标对比降低,这大大降低了系统的成像质量。

大气抖动造成的像点弥散与抖动频率 P 、帧积分时间 t 、大气抖动的均方根角值有关,其计算如下:

$$\sigma_D = 2P \cdot \sigma \cdot t \quad (13)$$

$$\delta = \frac{\tau \sec Z}{\sqrt{D}} \quad (14)$$

式中: z 为天顶距 (单位: 度), D 为光学系统通光口径 (单位: cm), τ 为系数,其取值与天气状况有关。恶劣天气、较好天气、非常好天气 τ 分别取: $3.2 \text{ 秒} \cdot \text{cm}^{\frac{1}{2}}$ 、 $1.6 \text{ 秒} \cdot \text{cm}^{\frac{1}{2}}$ 、 $0.56 \text{ 秒} \cdot \text{cm}^{\frac{1}{2}}$ 。

大气抖动的频率在 $0.1\text{Hz} \sim 200\text{Hz}$ 左右,在 20Hz 附近概率最高。其抖动均方根角值与频率关系如图 2。

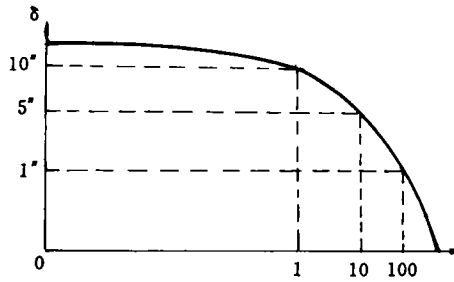


图 2 均方根角值 δ 与频率 P 的关系曲线

5 接收器

5.1 人眼

光学仪器总是直接或间接给人观察的,因此人眼的视觉特性是重要的设计起始数据。图 3 给出了察觉概率为 50% 时,亮度对比度阈值的变化情况 (物体较背景明亮,观测时间不限)。图中所有曲线均在 2×10 熙提附近有间断点,这表明了日间视觉过渡到夜间视觉的转折。根据此曲线便可查出眼睛在不同背景亮度、不同物体张角情况下的表现对比度阈值。

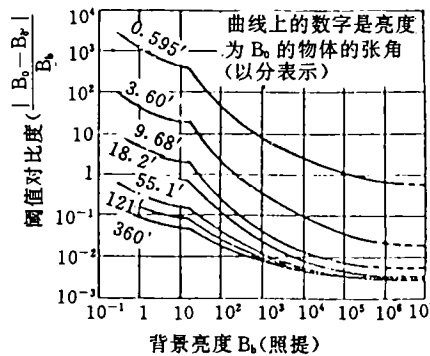


图 3 阈值对比度的变化

5.2 CCD 器件

CCD 器件具有灵敏度高、动态范围大,工作频率快、分辨率高、线性好、噪音低 (致冷条件下)、位置精度高、体积小、重量轻、可实时输出等优点,近年来应用十分广泛,尤其应用在空间遥感仪器及卫星侦察仪器上。在靶场经纬仪上亦广泛使用。因此,对其性能的了解颇为重要。

CCD 器件对灵敏度有一定要求,有的产品直接给出靶面上的最小照度 E_{min} ,有的产品提供物方最小可用照度 E_0 ,如果 CCD 镜头的相对孔径为 D/f' ,透过率为 τ ,则:

$$\frac{E_{min}}{E_0} = \frac{1}{4} \tau \cdot \left(\frac{D}{f'}\right)^2 \quad (15)$$

电视摄像机欲输出信号,则到达 CCD 靶面的最小背景照度应不小于 CCD 靶面的最小照

度，即：

$$E_b \geq E_{min} \quad (16)$$

电视系统欲取出目标信号，除了目标在靶面上产生的照度应大于 E_b 外，还应考虑目标与背景的对比度，它直接影响 CCD 的分辨率。

CCD 的分辨率与作用距离有关。其分辨率通常有两种表示方式：一种是极限分辨率，另一种是调制传递函数。

对于线阵传感器，极限分辨率用每毫米线对数来表示 (Lp/mm)；对于面阵传感器，极限分辨率用在图像范围内所能分辨的等宽度黑白线条数来表示。面阵传感器又有水平分辨率和垂直分辨之分。由于极限分辨率是通过仪器用人眼读出的，因此，带有很大的主观性。为了客观地表示图像传感器的分辨率，一般采用调制传递函数 MTF 来表示。MTF 的大小，反映光学成像系统成像的清晰程度。

目标和背景在 CCD 光电阴极上形成的照度 E_m 和 E_b 分别由式 (7) 和式 (8) 来计算，对比度按式 (9) 计算。由于调制传递函数定义为：

$$M = \frac{E_{max} - E_{min}}{E_{max} + E_{min}} \quad (17)$$

电视系统欲取出目标信号，则目标和背景的调制度要达到某一特定值，因此，(17) 式也可以写成：

$$M = \frac{E_m - E_b}{E_m + E_b} \quad (18)$$

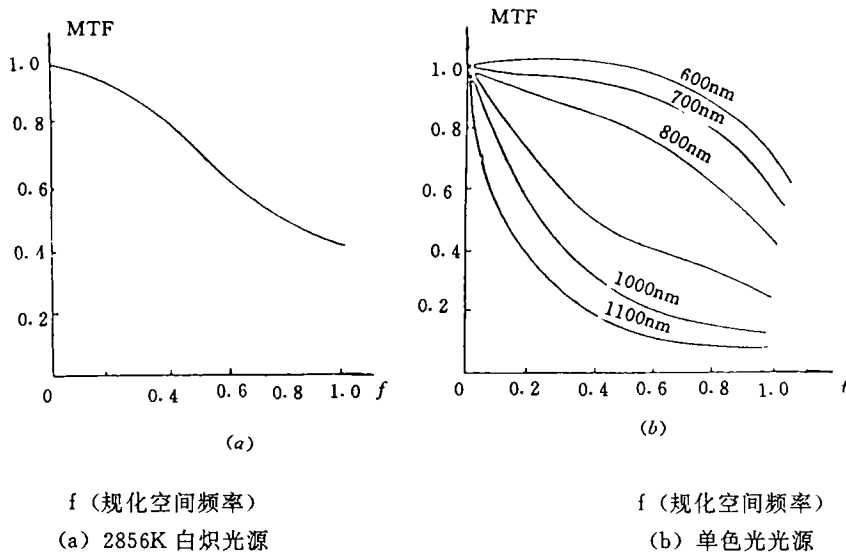


图4 CCD的MTF

结合式 (9) 可得：

$$C = \frac{1 + M}{1 - M} \quad (19)$$

CCD 的 MTF 计算理论上还没有准确的计算公式，有些产品提供了传递函数的实验曲线 (如图 4)，从中可以查得某一特征频率下的 MTF 值。

CCD 光电阴极照度 E 与电视系统分辨率 N 的关系是估算电视系统作用距离的基础。 N 与 E 的关系是通过实测得出的。对于给定的器件,如能得到实测的 $N-E$ 曲线,则对分析估算系统的作用距离是很方便的。设目标的大小为 d_m (单位: m),系统的焦距为 f' (单位: mm),分辨率为 N (单位: TVL),光电阴极有效直径为 D_c (单位: mm),探测目标时,目标象所占电视行数为 n (单位: TVL),则电视系统作用距离估算公式为:

$$R = \frac{d_m \cdot f' \cdot N}{0.6 \cdot D_c \cdot n} \quad (20)$$

此估算是在目标与靶面相对静止的前提下进行的。当它们存在相对运动时,对比度会下降,则分辨率会降低,下降的程度与积分时间对目标的滞留时间之比有关。

6 结 束 语

关于电影经纬仪和电视作用距离的分析,国内已见几篇文章发表,本文只是从光度的观点出发简单地介绍了影响电视作用距离的几个环节,并提供了一些公式和数据,如这些能够对进行电视作用距离分析的同志以参考,就是本文的目的所在。

参 考 文 献

- [1] 王大珩,电影经纬仪作用距离分析(长春光机所内部资料),1964
- [2] 史斯伍琐译,电光学手册,北京:国防工业出版社,1978
- [3] 袁详辉主编,固体图像传感器及应用.重庆:重庆大学出版社,1992
- [4] 王之江,光学设计理论基础.北京:国防工业出版社,1985
- [5] 殷贤湘译,光信号在地球大气中的传输.北京:科学出版社,1987
- [6] 王效文,电影经纬仪光学整体设计之一.光学工程,1982,(3):17-30
- [7] 朱焕才,电视跟踪作用距离方程式及其分析.光学工程,1982,(2):21-31
- [8] 朱耆详等,CCD光电探测器系统对动目标探测极限的研究.光电工程,1991,(4):11-19

Some Links Affecting the Working Distance of a Tracking and Measuring Television System

Zhao Wencai

(Changchun Institute of optics and Fine Mechanics,
Chinese Academy of Sciences, Changchun 130021)

Abstract

Some factors to effect the working distance of a tracking and measuring television system, such as , objects background, atmosphere, and detectors is studied. The aim is to find a practical calculating method.

Key words: Television-working distance, Photometric characteristics, Detectors