

利用光谱滤波技术提高 电视跟踪系统作用距离的研究

张宇华

(中国科学院长春光学精密机械研究所, 长春 130022)

摘要 详细分析了目标、天空背景的光谱辐射特性、大气条件以及电视跟踪系统各环节对探测靶面上目标与背景对比度的影响, 确定了利用光谱滤波提高电视跟踪系统作用距离的理论基础。实测了作为跟踪目标的3号曳光弹的光谱辐射特性, 根据与电视跟踪系统工作环境相近的大气模式, 从理论上计算、分析了天空背景的光谱辐射特性。通过计算机模拟与实测各种滤光片对天空背景辐射的抑制效果及对模拟目标信号衰减程度相结合的办法, 从理论及实验上研究了光谱滤波提高电视跟踪系统作用距离的规律。并且从光谱滤波角度提出了对系统所采用的探测器及合作目标信号的某些特性的改进意见。

对九种不同背景条件下光谱滤波效果的计算机模拟分析表明: 光谱滤波能稳定有效地提高探测器靶面上的目标与背景的对比度。对3号曳光弹, 在海平面45km, 水平路径上, 在 $0.810\mu\text{m}$ 处的窄带光谱滤波能使探测器靶面上的对比度提高4~7倍, 作用距离可由40km提高到(50~53)km。实验表明: 光谱滤波后, 本征对比度可提高1.25~3.59倍。

关键词: 对比度; 光谱滤波; 作用距离

1 概 述

现代电视跟踪技术的实践表明, 在采用高灵敏度的光电探测器后, 致力于提高探测器靶面上的目标与背景的对比度是提高电视跟踪系统作用距离的关键。通过光谱滤波, 尽量抑制背景辐射的影响, 是提高对比度, 进而提高作用距离的有效手段。

2 目标与背景对比度分析

(1) 远距离的目标所发出的辐射在大气中传输时, 其辐射能量一方面因空气成分的吸收与

散射而衰减,另一方面则与视场中未被其遮蔽的背景辐射相叠加。当在距离 R 处观察时,其表观辐射亮度为:

$$\begin{aligned} L's &= L_s \cdot e^{-\sigma R} + \int_0^R \sigma \cdot L_b \cdot e^{-\sigma R} dR \\ &= L_s \cdot e^{-\sigma R} + L_b(1 - e^{-\sigma R}) \end{aligned}$$

当 R 较大时, $e^{-\sigma R} \ll 1$, 所以

$$L's = L_s \cdot e^{-\sigma R} + L_b$$

式中 L_s 为目标的平均辐射亮度, L_b 为背景平均亮度, σ 为 R 距离上大气消光系数。

根据定义,目标与背景的对比度为:

$$C_1 = \frac{L's - L_b}{L_b} = \frac{L_s e^{-\sigma R}}{L_b} = C_0 \cdot \tau_a$$

C_0 称为目标与背景的本征对比度, τ_a 为大气透过率。考虑 1. 因大气抖动、光学系统的衍射、象差的影响以及跟踪过程中跟踪系统振动等引起的象点弥散而造成的对比度下降:

$$K_0 = \sigma_1^2 / \sigma \Sigma^2$$

σ_1 为目标对跟踪系统张角的均方根值, $\sigma \Sigma$ 为目标因上述影响造成的角弥散的均方和根值, K_0 为弥散衰减系数。

$$\sigma_1 = \sqrt{\frac{A_s}{\pi}} \cdot \frac{2}{R} \cdot \frac{1}{2.3} \cdot 2.063 \times 10^5$$

A_s 为目标面积, R 为目标距离

σ_2 为大气抖动在电视帧时间内引起的角弥散的均方根值,按经验取 $\sigma_2 = 2'$ 。

σ_3 为光电探测器分辨率限制而引起的角弥散均方根值:

$$\sigma_3 = \frac{1}{2.3} \cdot \frac{1}{n \cdot f} \cdot 2.063 \times 10^5$$

n 为探测器分辨率, f 为焦距

σ_4 为光学系统衍射造成的角弥散的均方根值:

$$\sigma_4 = \frac{2 \times 140}{D} \cdot \frac{1}{2.3}$$

D 为光学系统口径

σ_5 为电视帧时间内跟踪系统振动造成的角弥散的均方根值

$$\sigma_5 = \frac{a}{f} \cdot \frac{1}{\sqrt{3}} \cdot 2.063 \times 10^5$$

a 为电视帧时间内振动的最大振幅值, f 为焦距。

σ_6 为跟踪系统角速度误差在电视帧时间内造成的角弥散的均方根值

$$\sigma_6 = \theta \cdot t \cdot \frac{1}{\sqrt{3}} \cdot 3600'$$

t 为电视帧时间, θ 为跟踪系统角速度误差。

综上所述

$$\sigma^2 \Sigma = \sum_1^6 \sigma_i^2$$

$$K_0 = \sigma_1^2 / \sigma \Sigma^2$$

(2) 探测器象元为矩形,而目标象斑为圆形,这样,象斑所覆盖象元边缘不能被均匀辐照,对比度亦将下降,用非均匀辐照等效系数 K_r 表示:

$$K_r = \frac{\pi(dr/2)^2}{n^2 a \cdot b}$$

dr 为象斑直径, n 为象斑覆盖的象元数, a, b 分别为象元的长度与宽度。

(3) 跟踪过程中, 由于跟踪系统运动性能的限制, 目标象相对探测器靶面有一定的运动, 从而造成的对比度下降, 用系数 K_m 表示:

$$K_m = \frac{n}{n + n_d} = \frac{d}{Vt + d}$$

式中 n 为稳定跟踪时, 象斑所覆盖的象元数, n_d 为象斑相对靶面移动时所覆盖的象元数, d 为目标直径, v 为目标速度, t 为电视帧时间。这样, 探测器靶面上目标与背景的对比度为

$$C = \frac{L_s}{L_b} \cdot \tau_a \cdot K_0 \cdot K_r \cdot K_m$$

写成各量的光谱形式, 并考虑探测器光谱响应 $S(\lambda)$

$$C = \frac{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} L_s(\lambda) \cdot \tau_a(\lambda) \cdot \tau_0(\lambda) \cdot S(\lambda) \cdot d\lambda}{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} L_b(\lambda) \cdot \tau_0(\lambda) \cdot S(\lambda) \cdot d\lambda} \cdot K_0 \cdot K_r \cdot K_m$$

3 利用光谱滤波提高作用距离的理论依据

根据上一节所推导的对比度公式及保证电视跟踪的最小可探测对比度 C_{min} , 得到系统的最大作用距离方程

$$R_{max}^2 = \frac{4}{\pi} \cdot \frac{I_s}{L_b} \cdot \tau_a \cdot K_0 \cdot K_r \cdot K_m \cdot \frac{F^2}{C_{min}}$$

考虑 K_0, K_r 的关系后, 得

$$R_{max}^2 = \frac{1}{2 \cdot 3^2} \cdot \frac{F^2 \cdot f^2 \cdot d^2}{n^2 \cdot a \cdot b} \cdot \tau_a \cdot K_m \cdot \frac{1}{C_{min}} \cdot \frac{I_s}{L_b}$$

或

$$R_{max}^2 = \frac{4}{\pi} \cdot K_0 \cdot K_r \cdot K_m \cdot \frac{F^2}{C_{min}} \cdot \frac{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} I_s(\lambda) \cdot \tau_a(\lambda) \cdot \tau_0(\lambda) \cdot S(\lambda) \cdot d\lambda}{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} L_b(\lambda) \cdot \tau_0(\lambda) \cdot S(\lambda) \cdot d\lambda}$$

因为:

$$C \propto \frac{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} I_s(\lambda) \cdot \tau_a(\lambda) \cdot \tau_0(\lambda) \cdot S(\lambda) \cdot d\lambda}{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} L_b(\lambda) \cdot \tau_0(\lambda) \cdot S(\lambda) \cdot d\lambda}$$

所以, 提高探测器靶面上的对比度, 能提高作用距离。光谱滤波是实现这一目的的有效手段。式中, $I_s(\lambda)$ 为目标光谱辐射强度。

设光谱滤波后的最大作用距离为 R_{max} , 滤波波段上的大气透过率为 τ'_a , 那么:

$$R_{max}^2 / R_{max}^2 = (\tau'_a / \tau_a) \cdot K_c$$

K_c 为光谱滤波后的本征对比度增益。

4 目标与背景光谱辐射特性的研究

4.1 目标光谱辐射强度的测定

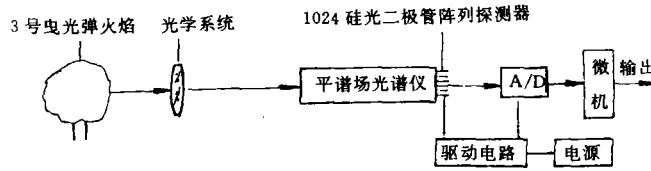


图1 3号电光弹光谱辐射强度的测定

4.2 背景光谱辐射特性的研究

天空光主要是由空气分子与气溶胶粒子散射太阳辐射形成的,如图3。

O 为观测点, θ_s 为太阳天顶角, θ_o 为观测天顶角, δ 为观测方位角, θ 为观测方向与太阳方向夹角, $\cos\theta = \cos\theta_s \cdot \cos\theta_o + \sin\theta_s \cdot \sin\theta_o \cdot \cos\delta$ 。这样,从 O 点观测到的天空辐射由下述两部分合成:

- (1) 经过衰减的太阳辐射照到沿 OP 线直至大气上界的所有体积元上所产生的角散射;
- (2) 这种散射在向 O 点传输时,继续受到吸收与散射而衰减。

根据太阳辐射学中计算大气散射太阳辐射的散射辐射强度的方法,假设:

- 1) 地球及大气是平面平行的; 2) 大气为折简高度为 Z 的均质层; 3) 不考虑空气成分的吸收及多次散射(观测表明,这项影响在可见光波段可以忽略); 4) 海面反射率很低,所以不考虑海面反射; 5) 由于上述假定,对于所有散射体积元选用相同的散射方向指数。

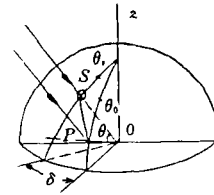


图3 太阳辐射在大气中的散射

$$P(\theta) = 1 + P_\lambda \cdot f(\theta) + Q_\lambda \cdot \cos^2\theta$$

$$f(\theta) = e^{-\theta} - 0.009$$

$$P_\lambda = 10,$$

$$Q_\lambda = 0.5$$

角散射系数为:

$$\begin{aligned} \sigma_{ma}(\theta) &= \frac{\mu}{\lambda^b} [1 + P_\lambda f(\theta) + Q_\lambda \cdot \cos^2\theta] \\ &= \frac{\mu}{\lambda^b} [0.91 + 10e^{-\theta} + 0.5\cos^2\theta] \end{aligned}$$

体散射系数为

$$\begin{aligned} \sigma_{ma} &= \int_0^4 \pi \sigma_{ma}(\theta) \cdot d\omega \\ &= 6.306\pi \cdot \frac{\mu}{\lambda^b} \end{aligned}$$

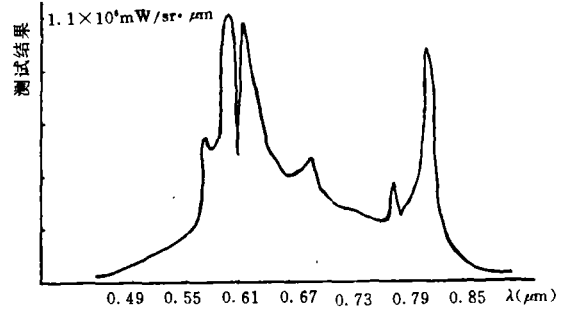


图2 3号电光弹光谱辐射强度

按图 3 所示散射模型,得沿 OP 观察时的天空亮度

$$L_b(\lambda, \theta) = S_{o\lambda} \cdot \frac{\sigma_{ma}(\theta)}{\sigma_{ma}} \cdot \frac{\exp(-\sigma_{ma} \cdot Z_o \cdot \sec\theta_s) - \exp(-\sigma_{ma} \cdot Z_o \cdot \sec\theta_o)}{1 - \cos\theta_o/\cos\theta_s}$$

$$= \frac{S_{o\lambda}}{6.306\pi} \cdot (0.91 + 10e^{-3\theta} + 0.5\cos^2\theta) \cdot \frac{\exp(-\sigma_{ma} \cdot Z_o \cdot \sec\theta_s) - \exp(-\sigma_{ma} \cdot Z_o \cdot \sec\theta_o)}{1 - \cos\theta_o/\cos\theta_s}$$

当天顶角大于 80° 时,地球曲率必须考虑,可用 Chapman 函数 $M(\theta_o)$ 、 $(M(\theta_s))$ 代替 $\sec\theta_o$ 与 $\sec\theta_s$ 。

由上述公式可以看出:某空域亮度取决于太阳高度,观测仰角及方位角,同时还取决于具体的大气条件。

本文选用 1962 年美国标准大气中纬度冬季大气模式以及“晴朗”状态(对应海平面能见距离为 23km)的气溶胶模型,以此为基础,计算了

$$\theta = 15^\circ, 30^\circ, 45^\circ, 60^\circ$$

$$\delta = 45^\circ, 90^\circ, 135^\circ, 180^\circ$$

$$\theta_o = 88^\circ, M(\theta_o) 20.0$$

十六种情况下的 $0.55\mu\text{m} \sim 0.850\mu\text{m}$ 内天空光谱亮度,结果表明:

(1) 太阳天顶角一定时,在 $0 \sim 180^\circ$ 内随着相对太阳方位角的增大,天空亮度变低。这是由于气溶胶具有较强的前向散射的缘故。在 $360^\circ \sim 180^\circ$ 内,规律与 $0^\circ \sim 180^\circ$ 相同。(2) 观测方位一定时,随太阳天顶角增大,天这亮度增大,在 45° 左右达到最大值,而后又逐渐降低。(3) 天空平均亮度为 $45\text{W}/\text{m}^2 \cdot S_r \sim 80\text{W}/\text{m}^2 \cdot S_r$,折合光度学单位为 $0.225 \sim 0.400$ 熙提。

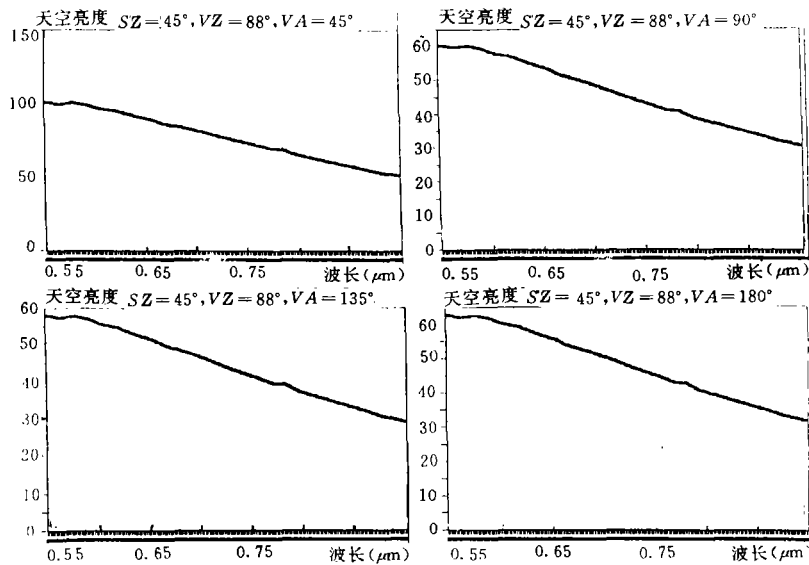


图 4 太阳天顶角 45° 时,相对太阳不同方位角的天空光谱亮度

5 利用光谱滤波提高作用距离的理论计算及模拟分析

在前节的分析基础上,采用计算机模拟了不同滤光片光谱滤波的效果。

5.1 模拟方法

以往的经验表明:如果仅仅采用直接求解作用距离方程而求得作用距离,计算结果与实际

结果往往具有较大偏差。为避免这个问题,本文采用对比电视跟踪系统在同一种背景条件下光谱滤波前后探测器靶面上的对比度的方法。以 40km 的探测器靶面上的对比度为最小可探测对比度,计算光谱滤波后 45km 时探测器靶面上的对比度看是否满足最小可探测对比度条件,并检验光谱滤波波段透过的目标照度是否大于探测器灵敏度。如满足上述条件,则可保证作用距离大于 45km。另外,按本文分析,光谱滤波后, $R_{max}^4/R_{min}^4 = (\tau' / \tau_s) \cdot k_s$, 检验 $(\tau' / \tau_s) \cdot k_s$ 是否大于 $(45/40)^4$, 亦可判断作用距离能否保证 45km。本文按上述两种方法,计算了太阳天顶角 20°、45°、70°, 相对太阳方位角别为 45°、90°、135°, 观测天顶角 88° 时九种低空背景条件下不同滤光片光谱滤波的效果。

5.2 模拟分析中有关数据

(1) 光学系统透过率 $\tau_s(\lambda) = 0.4$, (2) 在滤波波段上 $\tau_r(\lambda) = 1$, 在其它波段上 $\tau_r(\lambda) = 0$, (3) 动态衰减函数; 取导弹速度 1m, 曳光弹直径 0.5m, 电视帧时间 $t = 1/40s$, 得 $km = 0.056$, (4) 探测器 (TK66/66CECCD) 最小可用照度。

$$E_{min} = \tau \cdot E'_{min} \cdot \sin^2 u'$$

$$= 0.0003277 (\omega/m^2)$$

(5) 光学系统弥散衰减系数。取口径 $D = 300mm$, 焦距 $f = 3000mm$, 大气抖动弥散 $\sigma_2 = 2''$, 探测器空间频率 $n' 90.91$ 对线/mm, 电视帧时间 $t = 1/40s$, 电视帧时间内系统振动最大振幅 $a = \pm 0.01mm$, 角速度误差 $\theta = 0.005^\circ/s$, 那么, 当作用距离 $R = 40km$ 时, $K_0 = 0.2183$; 作用距离 45km 时, $K_0 = 0.1869$ 。

(6) 非均匀辐照衰减系数。当作用距离 40km 与 45km 时, 象点覆盖 3 个象元, 两种距离上的衰减系数近似相等, $K_r = 0.7850$ 。(7) 探测器的光谱响应, 见图 5。(8) 大气透过率, 选 1962 年美国标准大气中纬度冬季大气模式及代表海上气溶胶占优势的 Elttermann 气溶胶“晴朗”模式, 计算 $(0.55 \sim 0.850)\mu m$ 内 40km 与 45km 时的大气透过率如图 6 所示。

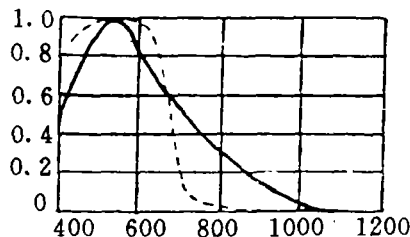


图 5 TK66/66CECCD 的光谱响应

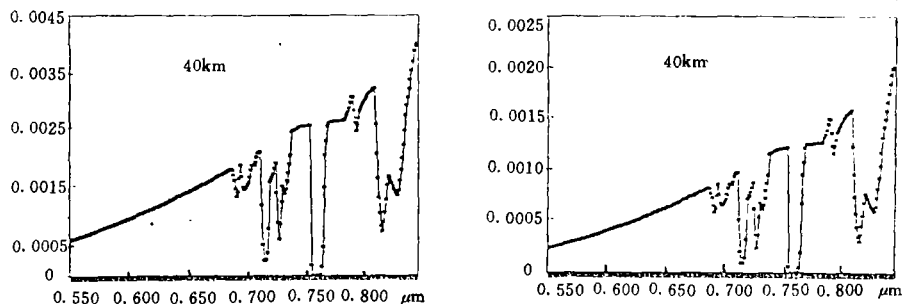


图 6 40km 与 45km 海平面水平路径大气透过率

5.3 模拟结果及分析

(1) 45km 时探测器靶面上的对比度与 40km 时相比,下降了近 2/3,可见不采取措施,是无法保证作用距离大于 45km 的。

(2)同一太阳天顶角下,不同方位上同一波段光谱滤波效果一对比度增益是一致的。

(3)光谱滤波后,目标与背景的本征对比度增益结果表明:1)颜色滤光片 CB6、HB13、HB16、ZB2、QB2、HWC2 使本征对比度下降。2)在曳光弹辐射光谱的三个峰值 0.570 μm 、0.595 μm 、0.810 μm 处用不同的窄带滤光片进行光谱滤波后,本征对比度都有提高。当带宽为 10A 时,上述三个波长处的增益分别为 1.648370(0.570 μm)、1.676931(0.595 μm)、2.445478(0.810 μm)。随着带宽的增加,本征对比度下降。这样

$$0.570\mu\text{m} \text{ 处 } (\tau'_{\lambda}/\tau_{\lambda}) \cdot K_c = 0.246431 < 1.125^4$$

$$0.595\mu\text{m} \text{ 处 } (\tau'_{\lambda}/\tau_{\lambda}) \cdot K_c = 0.323648 < 1.125^4$$

$$0.810\mu\text{m} \text{ 处 } (\tau'_{\lambda}/\tau_{\lambda}) \cdot K_c = 1.896408 > 1.125^4$$

这说明:在 0.570 μm 与 0.595 μm 处光谱滤波后,本征对比度虽有提高,但不足以补偿大气透过率的下降,作用距离不能达到 45km,而 0.810 μm 处,则可保证作用距离大于 45km。

(4)光谱滤波后,作用距离 40km 与 45km 时探测器靶面上的对比度增益结果表明:

1)(a)在 0.570 μm 处窄带光谱滤波后,探测器靶面上的对比度大多数情况下不但没有上升,反而有所下降。这是由于在 0.570 μm 附近的窄带内天空亮度高于全波段(0.550~0.850) μm 的平均亮度,而此处的大气透过率又低于全波段的大气透过率。这样,在此波长附近窄带光谱滤波时,目标平均亮度的增幅不足以抵消背景平均亮度的上升及透过率的下降,所以,对比度下降。显然,在 0.570 μm 处光谱滤波不能提高作用距离。

(b)在 0.595 μm 上的窄带光谱滤波使 40km 与 45km 时探测器靶面上的对比度都有所增加,从而使作用距离大于 40km。但光谱滤波未能使 45km 上的对比度增大到满足最小可探测对比度要求。所以,在 0.595 μm 处的窄带光谱滤波亦难以保证作用距离达 45km。

(c)在 0.810 μm 处光谱滤波后,40km 时,1nm 带宽内对比度增加了 5.94~6.51 倍,1nm 内增加了 3.88~4.25 倍,45km 时,1nm 带宽内增加了 6.58~7.21 倍,10nm 内增加了 4.28~4.69 倍,而且,光谱滤波使 45km 时探测器靶面上的对比度增大到大于最小可探测对比度,足以保证作用距离大于 45km(因为此时光谱滤波波段透过的目标辐照度满足探测器最小可用照度)。带宽越宽,探测器靶面上对比度增益越大,因而也越有利于作用距离的提高。

2)颜色滤光片 CB6、HB13、HB16、ZB2、QB2、HWC2 虽然使 45km 时探测器靶面上的对比度有所提高,但不能满足最小可探测对比度要求。这样,用颜色滤光片光谱滤波不能达到预期目的。

3)随着太阳天顶角的增大,在 0.570 μm 及 0.595 μm 处同一波段光谱滤波后探测器靶面上的对比度增益呈上升趋势,而 0.810 μm 处的对比度增益则呈下降趋势。这是由于随太阳天顶角的增大,大气质量增大,辐射在观测方向上的太阳辐照度光谱曲线趋于平缓,天空亮度光谱曲线亦趋于平缓。因此,在太阳天顶角较大时,0.570 μm 与 0.595 μm 处光谱滤波波段内平均亮度相对全波段(0.55~0.850) μm 上的天空亮度增幅 L'_{λ}/L_{λ} 与太阳天顶角较小时的 L'_{λ}/L_{λ} 相比较小,而 $(L'_{\lambda}/L_{\lambda}) \cdot (\tau'_{\lambda}/\tau_{\lambda})$ 不变,所以,对比度增益变大。而 0.810 μm 处的情况正好相反,对比度增益下降。这说明:当太阳天顶角较小时,在 0.810 μm 处光谱滤波效果好,更有利于作用距离的提高。

(5)模拟结果表明:在所试验的所有滤光片通带上透过的目标辐射能量均大于探测器最小

可用照度。这再次说明:采用高灵敏度的探测器后,致力于提高探测器靶面上的目标与背景的对比度是提高作用距离的关键。

5.4 光谱滤波后作用距离的估算

设最小可探测对比度为 C_{min} (用不采取光谱滤波时 40km 上的对比度代表), 光谱滤波后, 40km 上的对比度为 C_0 , 那么

$$C_{min} = C_0 \cdot \tau_1 \Delta R$$

ΔR 为增大的作用距离, τ_1 为单位水平距离上的大气平均透过率, 那么

$$\Delta R = \frac{\lg(C_{min}/C_0)}{\lg \tau_1}$$

太阳天顶角 20° , 观测方位角 90° 时, $0.810\mu\text{m}$ 处, 带宽 1nm。

$$C_{min} = 0.03$$

$$C_0 = 0.1918$$

$$\tau_1 = 0.8661$$

求得 $\Delta R \approx 13.03(\text{km})$

所以, 光谱滤波后最大作用距离为

$$R'_{max} = 40 + 13.03 = 53.03(\text{km})$$

$$R'_{max}/R_{max} = 1.33$$

带宽为 10nm 时, $C_{min} = 0.03$, $C_0 = 0.1251$, $\tau_1 = 0.8646$

求得 $\Delta R = 9.95(\text{km})$

此时, $R_{max} = 49.95\text{km}$, $R_{max}/R_{max} = 1.25$

表 1.2 列出了光谱滤波后目标本征对比度变化情况及 40km 与 45km 时探测器靶面上对比度的变化情况 (限于篇幅, 只列出太阳天顶角 45° , 方位角 45° 、 90° 、 135° 时本征对比度变化情况及太阳天顶角 20° , 方位角 90° 时 40km 与 45km 时探测器靶面上的对比度增益)。

表 1 光谱滤波后本征对比度提高情况 ($\theta_s = 45^\circ$)

方位角	45°	90°	135°	方位角 45°	90°	135°	
带宽	提高倍数	提高倍数	提高倍数	带宽	提高倍数	提高倍数	提高倍数
全通	1	1	1	全通	1	1	1
1nm	1.648370	1.648371	1.648371	1nm	2.445478	2.445478	2.445478
2nm	1.615089	1.615089	1.615089	2nm	2.281048	2.281048	2.281048
4nm	1.588354	1.588355	1.588355	4nm	1.121686	1.121686	1.121686
6nm	1.561662	1.561662	1.561662	6nm	1.962380	1.962380	1.962380
8nm	1.535010	1.535010	1.535010	8nm	1.803137	1.803137	1.803137
10nm	1.508399	1.508399	1.508399	10nm	1.643964	1.643964	1.643964
上表 $\lambda = 0.570\mu\text{m}$		下表 $\lambda = 0.595\mu\text{m}$		上表 $\lambda = 0.810\mu\text{m}$		下表颜色滤光片	
1nm	1.676930	1.676930	1.676930	CB6	0.949774	0.949774	0.949774
2nm	1.665692	1.665692	1.665692	HB13	0.783763	0.783763	0.783763
4nm	1.657816	1.657816	1.657816	HB16	0.754859	0.754859	0.754859

6nm	1.649956	1.649956	1.649956	QB2	0.774968	0.774968	0.774968
8nm	1.642115	1.642115	1.642115	ZB2	0.802864	0.802864	0.802864
10nm	1.634288	1.634288	1.634288	HWC2	0.859418	0.859418	0.859418

表 2 计算机模拟光谱滤波效果 $\theta_s=20^\circ, \theta_o=88^\circ, \delta=90^\circ$

距离	40km			45km		
	对比度	倍数	照度	对比度	倍数	照度
带宽						
全通	0.02945	1	—	0.01054	1	—
1nm	0.02898	0.9840	0.005989	0.009578	0.9089	0.001980
2nm	0.02853	0.9687	0.005897	0.009432	0.8950	0.001950
4nm	0.02805	0.9525	0.005798	0.009274	0.8800	0.001917
6nm	0.02758	0.9362	0.005699	0.009115	0.8649	0.001884
8nm	0.02709	0.9200	0.005601	0.008955	0.8498	0.001851
10nm	0.02662	0.9038	0.005502	0.008795	0.8347	0.001818

上表 $\lambda=0.570\mu\text{m}$

下表 $\lambda=0.595\mu\text{m}$

1nm	0.03722	1.2639	0.007408	0.012651	1.200	0.002518
2nm	0.03714	1.2610	0.007384	0.01262	1.1973	0.002508
4nm	0.03698	1.2550	0.007350	0.01255	1.1914	0.002497
6nm	0.03678	1.2488	0.007315	0.01249	1.1856	0.002485
8nm	0.03660	1.2326	0.007280	0.01244	1.1801	0.002474
10nm	0.03641	1.2363	0.007245	0.01237	1.1741	0.002462

距离	40km			45km		
	对比度	倍数	照度	对比度	倍数	照度
带宽						
全通	0.02945	1	—	0.01054	1	—
1nm	0.19176	6.5113	0.02186	0.07505	7.2164	0.008563
2nm	0.1794	6.0913	0.02042	0.07116	6.7535	0.008099
4nm	0.1668	5.6642	0.01898	0.06617	6.2792	0.007530
6nm	0.1542	5.2366	0.01755	0.06117	5.8048	0.006961
8nm	0.1395	4.7353	0.01587	0.05521	5.2395	0.006283
10nm	0.12509	4.2478	0.014237	0.04945	4.6924	0.005627

上表 $\lambda=0.810\mu\text{m}$

下表颜色滤光片

CB6	0.03198	1.0859	0.005192	0.01161	1.1009	0.001883
HB13	0.03317	1.1264	0.004923	0.01236	1.1729	0.001834
HB16	0.03555	1.2070	0.004815	0.01348	1.2793	0.001826

QB2	0.03748	1.2717	0.004892	0.01430	1.3573	0.001867
ZB2	0.04124	1.4003	0.005194	0.01584	1.5031	0.001995
HWC2	0.046911	1.5929	0.005595	0.01821	1.7282	0.002172

6 光谱滤波的实验

以实际天空为背景,以特制滤光片加平行光管模拟远方目标,测量各种滤光片对背景和目标的衰减系数,即可求出本征对比度增加的倍数,反映出光谱滤波的实际效果。测量装置见下图7。

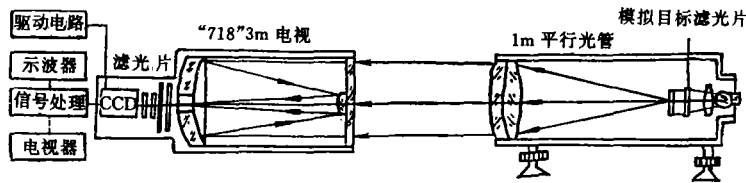


图7 光谱滤波实验

实验用滤光片包括:

(1) 颜色滤光片:JB8、CB6、HB13、HB16、HWC2、QB2、ZB2;

(2) 窄带滤光片:1" 峰值 590nm, 带宽

60nm

2" 峰值 570nm, 带宽

10nm

3" 峰值 570nm, 带宽

20nm

4" 峰值 593nm, 带宽

10nm

5" 峰值 593nm, 带宽

20nm

6" 峰值 803nm, 带宽

10nm

7" 峰值 807nm, 带宽 7nm

8" 峰值 807nm, 带宽 10nm

(3) 目标模拟滤光片,其光谱透过率曲线见图8。

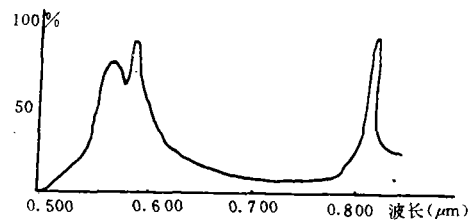


图8 模拟目标滤光片

表 1 对天空背景的观测及滤光片对背景的衰减系数

1992.12.12 上午 9:45~10:30

滤光片	全通	JB8	CB6	HB13	HB16	ZB2	HWC2	QB2	1"	2"	3"	4"	6"	8"
输出电压 (V)	0.60	0.55	0.60	0.50	0.35	0.30	0.20	0.55	0.25	0.15	0.20	0.10	0.20	0.15
衰减系数 (kb)		1.10	1.00	1.20	1.70	2.00	3.00	1.10	2.40	4.00	3.00	6.00	3.00	4.0

1993.1.12 下午 15:0~15:40

滤光片	全通	JB8	CB6	HB13	HB16	ZB2	HWC2	QB2	1"	2"	3"	4"	6"	8"
输出电压 (V)	0.63	0.63	0.60	0.60	0.60	0.50	0.33	0.60	0.40	0.23	0.25	0.25	0.5	0.35
衰减系数 (kb)		1.00	1.04	1.04	1.04	1.25	1.92	1.04	1.56	2.78	2.5	2.5	1.25	1.78

表 2 对模拟目标的测试结果

滤光片	全通	JB8	CB6	HB13	HB16	ZB2	HWC2	QB2	1"	2"	3"	4"	6"	8"
输出电压 (V)	0.24	0.23	0.20	0.10	0.08	0.08	0.07	0.15	0.2	0.12	0.12	0.14	0.08	0.12
衰减系数 (kb)		1.04	1.20	2.4	3.0	3.0	3.4	1.6	1.2	2.0	2.0	1.67	3.0	2.0

表 3 对比度提高的情况

滤光片	全通	JB8	CB6	HB13	HB16	ZB2	HWC2	QB2	1"	2"	3"	4"	6"	8"
顺光测量	1	1.06	0.83	0.50	0.56	0.67	0.88	0.69	2.0	2.0	1.5	3.59	1.0	2.4
逆光测量	1	0.96	0.87	0.43	0.37	0.42	0.56	0.65	1.3	1.39	1.25	1.49	0.42	0.89

从实验结果来看,颜色滤光片降低了本征对比度,而窄带滤光片效果显著,能提高对比度 1.25~3.59 倍,实际提高的潜力还大。因为模拟目标的滤光片峰值 802.5nm 前移了 30nm,6"、8"滤光片无法透过,所以测得的信号值明显偏低。此处计算的探测器靶面上的对比度可提高 6~7 倍。所以,对比度提高的潜力还是很大的。结果表明:顺光测量时,背景亮度低,滤波效果好,逆光测量不如顺光测量。同样峰值的滤光片,带窄的效果好。

7 光谱滤波在应用中有关问题的讨论

7.1 最佳光谱滤波波段的选择

要通过光谱滤波达到提高作用距离的目的,不仅要考虑目标与背景的光谱辐射特性,而且要考虑传输介质的光谱透过特性。简言之,必须在经大气光谱透过率“修形”后的最大的目标光谱辐射峰值处进行光谱滤波,使滤波后探测器靶面上的目标与背景对比度大于最小可探测对比度,并保证滤波波段透过的目标辐射能量大于探测器灵敏度,才能有效提高作用距离。

7.2 探测器光谱响应特性的选择

3" 曳光弹火焰的光谱辐射经大气传输投射到探测器靶面上后,0.570 μ m、0.595 μ m 及 0.

810 μm 处光谱峰值之比为 0.23:0.29:1($R=45\text{km}$)。而 G188 所选用的 TK66/66CE CCD 的光谱响应却是在 0.55 μm 处最高,并随波长增大而降低,0.810 μm 处仅为 0.55 μm 处 1/3。这样,经 CCD 光电变换后,0.810 μm 处的辐射峰值又大大降低,这是不利于信号提取的。所以,理想的探测器光谱响应峰值应在(0.750~0.820) μm 处,并应尽可能是均匀的。

7.3 合作目标光谱辐射特性的选择

前面已述:白天使用 3 号曳光弹做目标时,在 0.570 μm 与 0.595 μm 处大气透过率很低,目标光谱辐射经大气传输后能量衰减很大,而此两处背景又很亮,所以,在此两处波长上进行光谱滤波提高作用距离的效果不明显。在 0.810 μm 处的大气透过率虽然较高,背景也较弱,但 0.810 μm 处在水汽的吸收带上,对目标辐射仍有相当的衰减,因而不能得到尽可能高的对比度。文献^[1]选用 8 号曳光弹做目标对背景进行光谱滤波实验研究时,本征对比度提高了 13 倍,从而非常有效地提高了 CCD 对空中目标的作用距离。分析 8 号曳光弹光谱辐射特性以及背景和大气的光谱特性,可以发现:8 号曳光弹光谱辐射峰值在(0.750~0.800) μm 之间,此处天空背景辐射很弱,(0.780~0.790) μm 之间还有一无吸收的窗口,极有利于目标辐射的透过,因此,在此处光谱滤波,既充分利用了目标辐射能量,又有效地抑制了背景辐射,对比度也有效提高了。

从上述讨论可以看出:从提高光谱滤波效果角度提出的对曳光弹光谱、CCD 光谱响应以及大气窗口的选择实质是一种最佳光谱匹配问题。

7.4 提高作用距离的途径

应用光谱滤波技术提高电视跟踪系统作用距离,是一种光学处理方法。现代电视跟踪技术的实践证明:要提高电视跟踪系统的作用距离,单靠某一种单纯的处理手段,如纯光学方法、纯电学方法或纯机械方法等,是不能达到预期要求的。必须在仔细分析目标、背景及传输介质光谱特性的基础上,正确选择背景与目标特征波段,提高光学系统的质量以及跟踪精度,增强信号提取能力。即光—机—电技术有机结合,灵活应用,才能有效提高电视跟踪系统的作用距离。

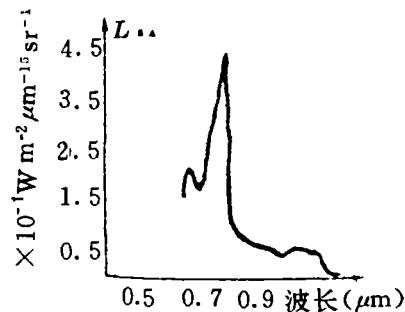


图 9 8 号曳光弹光谱

8 结 束 语

综合本文的理论分析及实验研究,得出以下结论:

(1) 利用光谱滤波提高电视跟踪系统作用距离的方案是可行的。根据光电经纬仪电视跟踪系统的目标及背景特性,在目标辐射光谱峰值 0.810 μm 处进行窄带光谱滤波,目标与背景的对比度可以得到有效而稳定的提高。

(2) 在本文理论研究的条件下,对各种不同的天空背景,带宽为 1nm 时,在 0.810 μm 处光谱滤波后,距离 45km 时,探测器靶面上目标与背景的对比度可增加 6.58~7.21 倍,作用距离可达 53km,带宽 1nm 时,对比度可提高 3.88~4.25 倍,作用距离可达 49.95km。本文的实验条件下,目标与背景的本征对比度可提高 1.25~3.59 倍。

(3) 本文提出的最佳光谱滤波波段的选择方法,以及有关的最佳光谱匹配的讨论,不仅适

用于电视跟踪系统,也同样适合于其它光测设备。

参 考 文 献

- [1] 朱耆祥,谢歆,利用光谱滤波技术提高 CCD 对天空微弱目标的探测能力. 飞行器测控技术,1989. 1
- [2] 张云熙,大气调制传递函数的计算. 舰船光学,1984. 4
- [3] K. R. 康德拉捷夫,《太阳辐射学》. 科学出版社,1962
- [4] E. J. 麦卡特尼,《大气光学》. 科学出版社,1988
- [5] J. E. A. Selby, Atmospheric Transmittance From 0. 25~28. 5 μ m Computer Code Lowtran 3. AFCRL Report,1975
- [6] R. A. McClatchey, Optical Properties of the Atmosphere (the third edition). AFCRL Report,1972

A Study of Using Spectral Filtering to Increase the Effect Range of TV Tracking System

Zhang Yu Hua

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

Abstract

On the basis of thoroughly analysing all the factors that influence the radiance contrast of the object to background on the target area of the detector, a method of using spectral filtering to increase the effect range of TV tracking system is put up.

For the sake of studying how to use spectral filtering to effectually raise the effect range, the author measured the objects spectral radiant intensity and studied the spectral radiance of the low sky background theoretically according to the optical properties of the atmosphere and the atmospherical optical principle. Based on these result of the measurement and theoretical computation, the author uses computer simulating the effect of various filter, the result showed, the spectral filtering can effectually and steadily raised the radiance contrast of th object to background that on the target area of the detector, under the studied circumstance, the contrast has been raised above 4~7 times, the maximum effect range has been raised from 40km to 50~53km. The experiment result shows, under the experimental circumstance, the original contrast has been raised 1.25~3.59 times.

Some improvemental proposal on the properties of the detector and the spectral properties of cooperate object are put up in this paper.

Key words: Radianec contrast, Spectral filtering, Effect range