

基于光谱辐射信息的高温目标图像识别

范学良, 程晓舫, 许 军

(中国科学技术大学热科学和能源工程系, 合肥 230026)

[摘要] 利用光学及辐射度学的基本原理, 对成像过程进行理论分析, 建立了照明条件下识别视场中高温目标的数学模型, 揭示了影响识别效果的各物理因素。通过对这些物理因素进行分析, 指出“切割波段”可有效提高信噪比, 将高温目标识别出来, 并通过液晶光阀予以技术实现。实验结果验证了该方案的可行性及有效性。

[关键词] CCD 影像; 目标识别; 辐射信息; 液晶光阀

[中图分类号] O432.1 **[文献标识码]** A **[文章编号]** 1009-1742(2004)06-0057-06

1 引言

高温目标(800~1500 K)检测与识别在火灾监控领域具有重要意义。基于视频图像, 利用阈值分割法识别高温目标, 需满足2个条件:

1) 高温目标信号强度大于传感器响应阈值, 即 $G_{obj} > G_{min}$ (G_{obj} 代表高温目标信号强度, G_{min} 代表传感器响应阈值)。

2) 高温目标信号强度大于背景(常温物体)信号强度, 即 $G_{obj} > G_{sce}$ (G_{sce} 代表背景信号强度)。

条件1是识别的先决条件, 目标信号检测不到, 则识别无从谈起。条件2, 反映了信号处理中的信噪比概念。若将高温目标看作“信号”, 背景看作“噪声”, 则可定义信噪比 M 为

$$M = G_{obj}/G_{sce} \quad (1)$$

从而条件2也可表述为 $M > 1$ 。显然, 信噪比 M 的数值越大, 越有利于图像识别的进行。在无照明条件下, 条件1, 2容易实现。但在照明条件下, 由于背景对照明的反射, 使得背景和高温目标的信号强度几乎相当。因此, 在照明条件下, 如何识别出高温目标, 是论文要解决的问题。

2 成像过程的数学建模: 光谱辐射亮度与光敏面信号强度关系的建立

在图1所示的光学成像系统中, S 表示成像物体表面某一微元, 其光谱辐射亮度为 $L(\lambda)$, 且表面法线与成像系统的光轴平行; S' 为相应像元。由成像的几何关系、照度平方反比定律、朗伯余弦定律及比尔定律, 可推得像元 S' 的光谱辐射照度 $I(\lambda)$ 为^[1],

$$I(\lambda) = \frac{\pi V \times \cos^4 \theta}{4(f/d)^2 \times (1 + m/p)^2} \times \exp\left(\frac{-ku}{\cos \theta}\right) \times \tau(\lambda) \times L(\lambda) \quad (2)$$

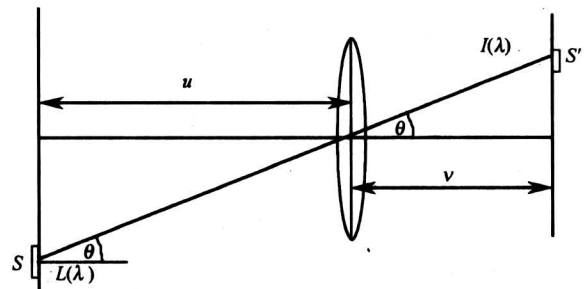


图1 光学成像系统示意图

Fig.1 Schematic sketch of optical imaging system

[收稿日期] 2003-10-27

[基金项目] 教育部高等学校博士学科点专项科研基金资助项目(97035821); 国家自然科学基金资助项目(59006847)

[作者简介] 范学良(1979-), 男, 山东枣庄市人, 中国科学技术大学热科学和能源工程系博士研究生

其中, $\tau(\lambda)$ 为成像系统光线透过率, f 为焦距, d 为透镜有效孔径, p 为非对称镜头光孔放大率, m 为放大率, k 为被测物体和测量仪器之间存在的气体(或半透明的液体及固体)介质之吸收特性, u 为物距, V 为透镜渐晕系数, θ 为物像主光线与透镜光轴之夹角。

结合 CCD 的光谱响应函数 $T_{ccd}(\lambda)$ (如图 2 所示) 及曝光时间 Δt , 并考虑到 V, θ, f, d, m, p, k 等为与波长无关的几何光学参数, 以及透过率函数 $\tau(\lambda)$ 接收的是具有一定宽度的波段辐射能量, 可做常数 τ 处理, 可得 CCD 光敏面信号强度与成像物体的光谱辐射亮度之间的关系为

$$G = \frac{\pi \times \Delta t \times V \times \cos^4 \theta}{4(f/d)^2 \times (1 + m/p)^2} \times \exp\left(\frac{-ku}{\cos \theta}\right) \times \tau \times \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} T_{ccd}(\lambda) \times L(\lambda) d\lambda \quad (3)$$

式中 λ_1, λ_2 分别表示 CCD 工作波段的波长下限及上限。

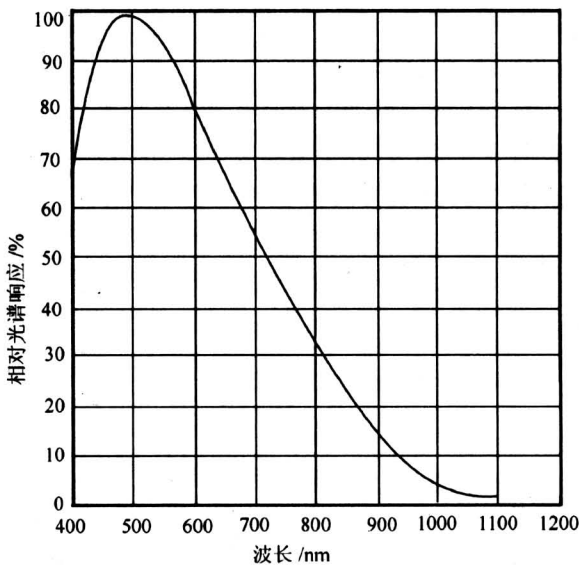


图 2 CCD 相对光谱响应曲线^[2]

Fig.2 Relative spectral response of CCD^[2]

若高温目标的物距为 u_{obj} , 物像主光线与透镜光轴之夹角为 θ_{obj} , 则目标信号强度为

$$G_{obj} = \frac{\pi \times \Delta t \times V \times \cos^4 \theta_{obj}}{4(f/d)^2 \times (1 + m/p)^2} \times \exp\left(\frac{-ku_{obj}}{\cos \theta_{obj}}\right) \times \tau \times \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} T_{ccd}(\lambda) \times L_{obj}(\lambda) d\lambda \quad (4)$$

相应的背景信号强度 G_{sce} 可表示为

$$G_{sce} = \frac{\pi \times \Delta t \times V \times \cos^4 \theta_{sce}}{4(f/d)^2 \times (1 + m/p)^2} \times \exp\left(\frac{-ku_{sce}}{\cos \theta_{sce}}\right) \times \tau \times \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} T_{ccd}(\lambda) \times L_{sce}(\lambda) d\lambda \quad (5)$$

式 (4), 式 (5) 分别给出了目标与背景的信号强度之数学表达式。

3 信噪对比度 M 的表达及其影响因素分析

式 (4), 式 (5) 代入式 (1), 可得

$$M = \left(\frac{\cos \theta_{obj}}{\cos \theta_{sce}}\right)^4 \times \exp\left[\frac{-k(u_{obj} \cos \theta_{sce} - u_{sce} \cos \theta_{obj})}{\cos \theta_{obj} \cos \theta_{sce}}\right] \times \frac{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} T_{ccd}(\lambda) \times L_{obj}(\lambda) d\lambda}{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} T_{ccd}(\lambda) \times L_{sce}(\lambda) d\lambda} \quad (6)$$

式 (6) 给出了信噪比 M 的数学表述。综合式 (4) 至式 (6) 分析可知, 参数 $V, \Delta t, f, m, p, d$ 仅对信号强度的绝对量有影响。影响对比度 M 的因素只有空间方位因子 u, θ ; CCD 响应函数 $T_{ccd}(\lambda)$; 光谱辐射功率 $L_{obj}(\lambda), L_{sce}(\lambda)$ 。

3.1 空间方位因子

当监视器的位置及观察角度确定后, 空间方位因子 u, θ 由成像物体的空间位置决定, 用参数 K 来表示它们的综合效应, 即为

$$K = \left(\frac{\cos \theta_{obj}}{\cos \theta_{sce}}\right)^4 \times \exp\left[\frac{-k(u_{obj} \cos \theta_{sce} - u_{sce} \cos \theta_{obj})}{\cos \theta_{obj} \cos \theta_{sce}}\right] \quad (7)$$

3.2 CCD 的光谱响应特性

对于一般的黑白 CCD, 光谱响应曲线如图 2 所示。其工作波段为 400~1 200 nm, 对可见光及近红外均有响应。

3.3 成像物体的光谱辐射特性

对高温目标, 其光谱辐射既有自身发射, 又有照明之反射辐射, 在不影响甄别效果的情况下, 作者仅考虑高温目标的自身辐射。视其为温度 T_{obj} 的 Planck 热辐射体, 且光谱发射率为与波长无关的常数, 则^[3]

$$L_{obj}(\lambda) = \epsilon_{obj} \times \frac{C_1/\pi}{\lambda^5 [\exp(C_2/\lambda T_{obj}) - 1]} \quad (8)$$

式中 C_1, C_2 表示 Planck 第一、第二常数; ϵ_{obj} 表

示高温目标的发射率。

对背景物体，因其处于常温状态（约为 300 K），自身辐射可以忽略，主要是照明的反射辐射。设照明光源是温度为 T_s 的 Planck 热辐射体，并且将光线传输空间的光学特性和背景物体的光谱反射率视为常数，则背景反射光谱依然保持照明光源的光谱成份。于是被 CCD 拍摄的景物之辐射为照明光源辐射乘以衰减系数 D_s 及反射率 ρ_{scc} ，

$$L_{scc}(\lambda) = \rho_{scc} D_s \times \frac{C_1}{\lambda^5 [\exp(C_2/\lambda T_s) - 1]} \quad (9)$$

式将至式 (9) 三代入式 (6)，得

$$M = K \frac{\epsilon_{obj}}{\rho_{scc} D_s} \times \frac{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} T_{ccd}(\lambda) \times \frac{1}{\lambda^5 [\exp(C_2/\lambda T_{obj}) - 1]} d\lambda}{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} T_{ccd}(\lambda) \times \frac{1}{\lambda^5 [\exp(C_2/\lambda T_s) - 1]} d\lambda} \quad (10)$$

从式 (10) 可知，目标发射率的增加，背景物体的反射率减小及照明衰减的加剧都将使信噪比增强。但是这些参数，对于特定的拍摄场景来说，都为常数，我们无法对其进行调整。

若太阳作为照明光源 ($T_s = 5762$ K)，辐射衰减系数 $D_s = 2.1644 \times 10^{-5}$ (白昼亮度)，则高温目标 (800~1500 K) 与衰减后的太阳照明辐射的相对光谱功率分布曲线如图 3 所示。

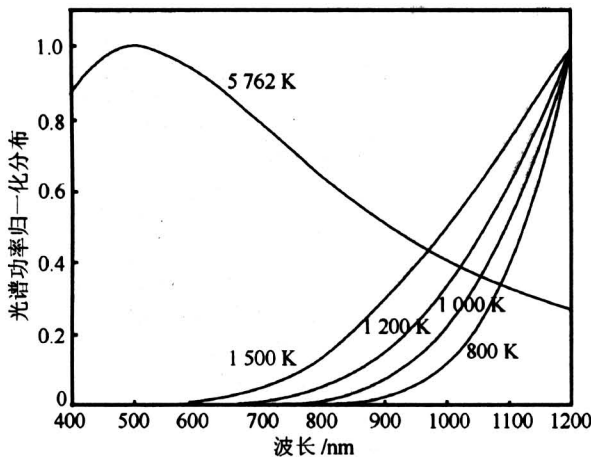


图 3 高温目标与衰减后的太阳照明辐射之相对光谱功率分布曲线

Fig.3 Normalized spectral distribution curves of the high-temperature targets and the attenuated sun light

从图 3 可以看出，高温目标光谱功率 L_{obj} 与背

景光谱功率 L_{scc} 在整个 CCD 响应波段 [400~1200] nm 都有能量分布，但是前者集中于较长波段 (近红外波段)，后者集中于较短波段 (可见光波段)。

4 增强信噪比 M 的方案

根据对 CCD 的光谱响应特性及成像物体光谱辐射特性的分析，作者推测，利用滤光片改变进入 CCD 的影像之光谱成份，使 CCD 的有效响应区由全工作波段变为近红外波段 (长波段)，则可能有助于提高信噪比 M 。但这只是直观的推测，尚需对此进行严格的理论证明。

4.1 理论证明

在理论分析之前，对将要用到的几个数学符号予以说明。

$M([\lambda_1, \lambda_2])$ 代表对全工作波段 $[\lambda_1, \lambda_2]$ 响应时的信噪比，由式 (10) 定义。 $M([\lambda_m, \lambda_2])$ 为长波段 $[\lambda_m, \lambda_2]$ 响应时的信噪比， $M([\lambda_1, \lambda_m])$ 为对短波段 $[\lambda_1, \lambda_m]$ 响应时的信噪比，分别由式 (11)，式 (12) 定义：

$$M([\lambda_m, \lambda_2]) = K \frac{\epsilon_{obj}}{\rho_{scc} D_s} \times \frac{\int_{\lambda_m}^{\lambda_2} T_{ccd}(\lambda) \times E_b(\lambda, T_{obj}) d\lambda}{\int_{\lambda_m}^{\lambda_2} T_{ccd}(\lambda) \times E_b(\lambda, T_s) d\lambda} \quad (11)$$

$$M([\lambda_1, \lambda_m]) = K \frac{\epsilon_{obj}}{\rho_{scc} D_s} \times \frac{\int_{\lambda_1}^{\lambda_m} T_{ccd}(\lambda) \times E_b(\lambda, T_{obj}) d\lambda}{\int_{\lambda_1}^{\lambda_m} T_{ccd}(\lambda) \times E_b(\lambda, T_s) d\lambda} \quad (12)$$

式中

$$E_b(\lambda, T_{obj}) = \frac{1}{\lambda^5 [\exp(C_2/\lambda T_{obj}) - 1]},$$

$$E_b(\lambda, T_s) = \frac{1}{\lambda^5 [\exp(C_2/\lambda T_s) - 1]}$$

理论分析要解决如下 2 个问题

1) 证明

$$M([\lambda_1, \lambda_2]) < M([\lambda_m, \lambda_2]) \quad (13)$$

2) 为使信噪比提高幅度最大， λ_m 应取何值？

第一个命题的证明见附录。通过严格的理论分析，作者证明了 $M([\lambda_1, \lambda_2]) < M([\lambda_m, \lambda_2])$ ，亦即，长波波段的选取有助于信噪比 M 的提高。

利用这一结果，我们继续选取 $[\lambda_m, \lambda_2]$ 的高通波段 $[\lambda_{m1}, \lambda_2]$ ，根据上面的证明我们可得 $M([\lambda_m, \lambda_2]) < M([\lambda_{m1}, \lambda_2])$ 。类似处理直到 λ_m 趋于 λ_2 。

$$M(\lambda_m, \lambda_2) < M(\lambda_{m1}, \lambda_2) < \dots <$$

$$M(\lambda_{mi}, \lambda_2) < \dots < M(\lambda_2, \lambda_2)$$

上式告诉我们 λ_m 越向 λ_2 偏移，越有助于 M 值的提高，当 λ_m 无限逼近于 λ_2 时，信噪比 M 取最大值。

从提高信噪比的角度来看， $\lambda_2 - \lambda_m$ 的值越小，越有利于 M 的提高。但是随着响应波段的缩短，必然会带来目标信号强度的衰减。为了使得目标信号强度大于 CCD 响应阈值，高通波段宽度不能过于窄。所以最佳波段的选择，应既有利于提高信噪比，又不至于信号强度的过度衰减。

λ_m 的具体数值由下述计算给出。

图 4，图 5 给出在约定条件下的计算结果。从图 4 可以看出，利用波段选择的方法来提高信噪比，其效果是非常显著的。

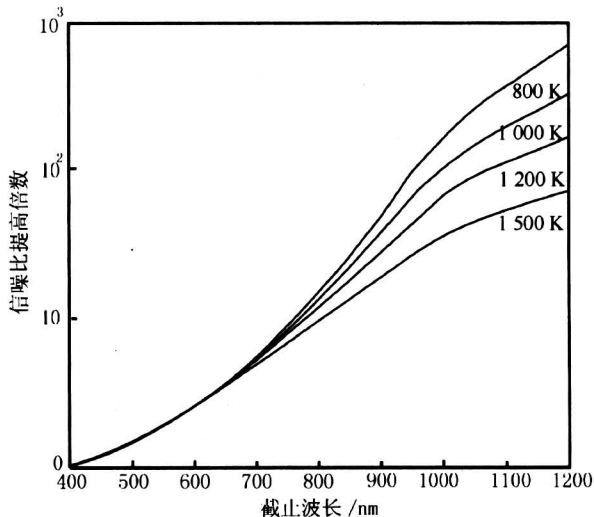


图 4 信噪比 M 的提高

Fig.4 Enhancement of signal-noise-ratio

综合图 4 及图 5，发现对处于温度区间为 $[800, 1500]$ K 的高温目标，当响应波段为 $[780 \sim 1200]$ nm，其信噪比较之于原响应波段 $[400 \sim 1200]$ nm，提高 10 倍；信号强度的衰减小于 20%。从工程实用的角度，取 λ_m 为 780 nm。

4.2 技术实现及辨识效果

理想的滤光片应当是对 400~780 nm 波段的可见光完全屏蔽，对 780~1200 nm 的近红外光完全透过。但在实际操作中，很难找到这种理想的滤

光片，作者采用正模式 PCTS (polymer stabilized cholesteric texture) 液晶光阀^[4]来实现这一滤光功能。

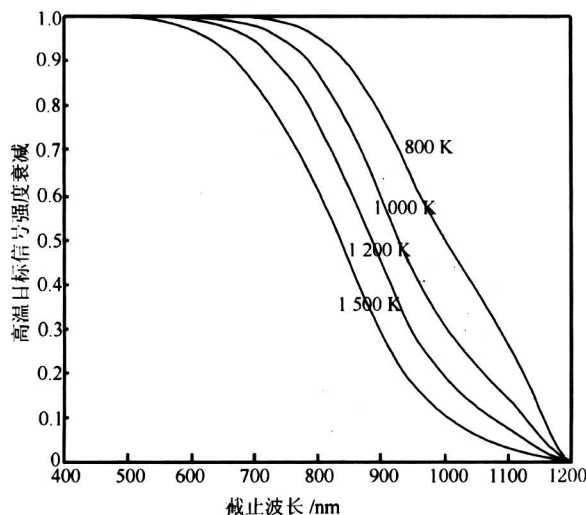


图 5 高温目标信号强度的衰减

Fig.5 Attenuation of signal intensity

图 6 给出这种液晶光阀在亮、暗两种工作状态下的透过率曲线：亮态（加电压）时在 $[400 \sim 1200]$ nm 波段呈现“波长无选择性”，暗态（不加电压）时在 $[780 \sim 1200]$ nm 波段表现为“高通”性质。

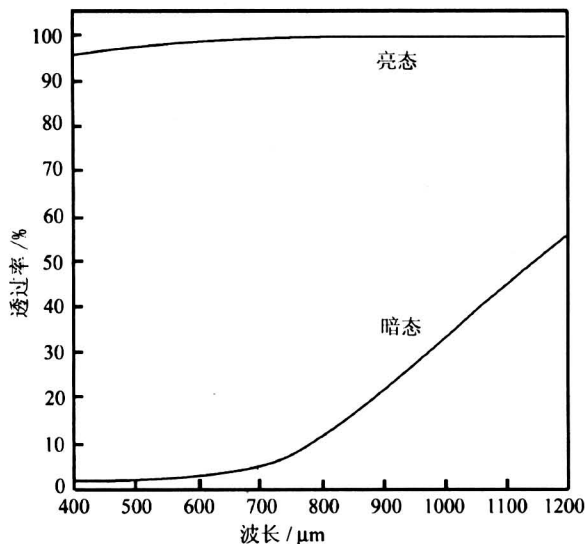


图 6 液晶光阀的光谱透过特性

Fig.6 The transmission spectrum curves of LCLV

将这种液晶光阀放置在 CCD 镜头前面，构成所谓的液晶光阀型 CCD。图 7 显示出液晶光阀型



图 7 亮态图像

Fig.7 Image taken under brightness state

CCD 亮态时摄影效果 (照明条件为正常日光, 火焰温度为 1 173 K), 图 8 则是液晶光阀处于暗态时的摄影结果。图 7 反映的是对全工作波段 [400 ~ 1 200] nm 响应的信噪比情况, 图 8 反映的是仅对长波段 [780 ~ 1 200] nm 响应的信噪比情况。显然, 图 8 较之于图 7 目标与背景的对比度已显著提高, 高温目标已从背景中凸显出来, 充分验证了式 (13)。

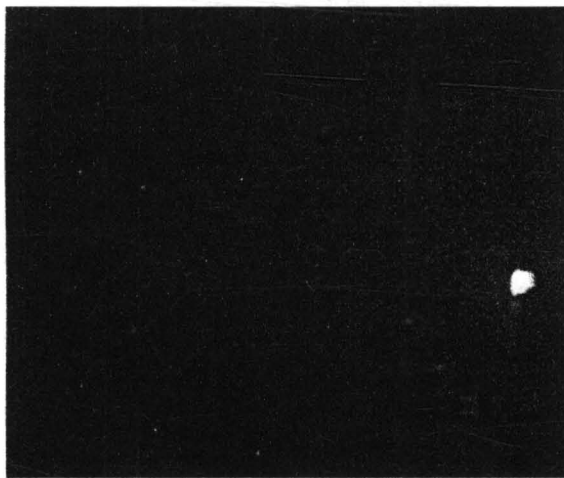


图 8 暗态图像

Fig.8 Image taken under darkness state

在实际应用中, 通过对液晶光阀所加电压的灵活控制, 可方便地得到亮、暗态图像, 实现既能正常监视、又可对影像中高温目标实现实时甄别的双重功能。

4 CCD 像感元件的信号饱和问题

以上讨论均建立在 CCD 像感元件线性工作的基础之上。注意到当影像 (景物和高温目标) 辐射

过强时, 像感元件会出现饱和现象。此时应通过对光圈及曝光时间的调整, 使得影像信号强度处于 CCD 线性工作范围内。

5 结论

在照明条件下, 由于背景对照明的反射, 使得背景的亮度和高温目标的亮度几乎相当。为了实现在此条件下对高温目标的识别, 必须采取措施以提高目标与背景的信噪比。通过对成像过程的数学建模, 建立了成像物体光谱辐射亮度与 CCD 光敏面信号强度的数学关系式, 揭示了影响识别效果的各物理因素。通过对这些物理因素的分析, 提出利用液晶光阀改变成像器件的响应波段, 可有效提高信噪比, 从而将高温目标方便地识别出来的方法。

该方法的优点在于, 只需利用普通的黑白 CCD 摄像头, 不需借助于专门的红外捕获设备, 即可有效地检测出图像中的高温物体, 并已在“火灾力克”火灾监控系统中得到成功的应用。

致谢: 感谢符泰然在本文写作过程中的有益讨论。

附录: $M([\lambda_1, \lambda_2]) < M(\lambda_m, \lambda_2)$ 的证明
令

$$h(\lambda) = \frac{T_{\text{ccd}}(\lambda) \times E_b(\lambda, T_{\text{obj}})}{T_{\text{ccd}}(\lambda) \times E_b(\lambda, T_s)} = \frac{\exp(C_2/\lambda T_s) - 1}{\exp(C_2/\lambda T_{\text{obj}}) - 1} \quad (\text{a} - 1)$$

则

$$\int_{\lambda_m}^{\lambda_2} T_{\text{ccd}}(\lambda) \times E_b(\lambda, T_{\text{obj}}) d\lambda = \int_{\lambda_m}^{\lambda_2} h(\lambda) \times T_{\text{ccd}}(\lambda) \times E_b(\lambda, T_s) d\lambda \quad (\text{a} - 2)$$

由积分中值定理^[5], 得

$$\int_{\lambda_m}^{\lambda_2} T_{\text{ccd}}(\lambda) \times E_b(\lambda, T_{\text{obj}}) d\lambda = h(\xi) \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} T_{\text{ccd}}(\lambda) \times E_b(\lambda, T_s) d\lambda \quad (\text{a} - 3)$$

从而有

$$M([\lambda_m, \lambda_2]) = K \frac{\epsilon_{\text{obj}}}{\rho_{\text{sce}} D_s} h(\xi) = K \frac{\epsilon_{\text{obj}}}{\rho_{\text{sce}} D_s} \frac{\exp(C_2/\xi T_s) - 1}{\exp(C_2/\xi T_{\text{obj}}) - 1} \quad (\text{a} - 4)$$

式中 $\lambda_m < \xi < \lambda_2$ 。

同理,

$$M([\lambda_1, \lambda_m]) = K \frac{\epsilon_{\text{obj}}}{\rho_{\text{sce}} D_s} h(\omega) = K =$$

$$\frac{\epsilon_{\text{obj}}}{\rho_{\text{sec}} D_s} \frac{\exp(C_2/\omega T_s) - 1}{\exp(C_2/\omega T_{\text{obj}}) - 1}, \lambda_1 < \omega < \lambda_m \quad (\text{a}-5)$$

易证, 当 $T_s > T_{\text{obj}}$ 时, 函数 $h(\lambda)$ 为 λ 的增函数。

又考虑有 $\omega < \xi$, 可得

$$M([\lambda_1, \lambda_m]) < M([\lambda_m, \lambda_2]) \quad (\text{a}-6)$$

再来将部分波段积分和全波段积分进行比较。若

$$a = \int_{\lambda_1}^{\lambda_m} T_{\text{ccd}}(\lambda) \times E_b(\lambda, T_{\text{obj}}) d\lambda,$$

$$b = \int_{\lambda_1}^{\lambda_m} T_{\text{ccd}}(\lambda) \times E_b(\lambda, T_s) d\lambda,$$

$$c = \int_{\lambda_m}^{\lambda_2} T_{\text{ccd}}(\lambda) \times E_b(\lambda, T_{\text{obj}}) d\lambda,$$

$$d = \int_{\lambda_m}^{\lambda_2} T_{\text{ccd}}(\lambda) \times E_b(\lambda, T_{\text{obj}}) d\lambda,$$

则

$$a + c = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} T_{\text{ccd}}(\lambda) \times E_b(\lambda, T_{\text{obj}}) d\lambda,$$

$$b + d = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} T_{\text{ccd}}(\lambda) \times E_b(\lambda, T_s) d\lambda.$$

于是不等式 (a-6) 也可简写为

$$\frac{a}{c} < \frac{b}{d}. \quad (\text{a}-7)$$

再由数学定理^[5]:

当 $a/b < c/d$ 且 b, d 同号时, 有

$$\frac{a}{c} < \frac{a+b}{c+d} < \frac{b}{d}.$$

综上所述可得

$$\frac{\int_{\lambda_1}^{\lambda_m} T_{\text{ccd}}(\lambda) E_b(\lambda, T_{\text{obj}}) d\lambda}{\int_{\lambda_1}^{\lambda_m} T_{\text{ccd}}(\lambda) E_b(\lambda, T_s) d\lambda} < \frac{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} T_{\text{ccd}}(\lambda) E_b(\lambda, T_{\text{obj}}) d\lambda}{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} T_{\text{ccd}}(\lambda) E_b(\lambda, T_s) d\lambda} < \frac{\int_{\lambda_{mid}}^{\lambda_2} T_{\text{ccd}}(\lambda) E_b(\lambda, T_{\text{obj}}) d\lambda}{\int_{\lambda_{mid}}^{\lambda_2} T_{\text{ccd}}(\lambda) E_b(\lambda, T_s) d\lambda},$$

亦即

$$M([\lambda_1, \lambda_m]) < M([\lambda_1, \lambda_2]) < M([\lambda_m, \lambda_2]),$$

证毕。

参考文献

- [1] 拉尔夫·雅各布逊. 照相手册 [M]. 第二版. 郭大梁, 唐志强译, 北京: 中国电影出版社, 1993. 92~98
- [2] 林家明. 黑白 CCD 摄像机的近红外特性和应用 [J]. 光学技术, 1996, (6): 33~34
- [3] Incropera F P, DeWitt D P. Fundamentals of Heat and Mass Transfer [M]. Second edition. New York: John Wiley & Sons. 1981. 546~625
- [4] 王庆兵, 程晓舫, 才勇, 等. 正模式 PCTS 光阀透过率随波长分布特性的研究及其应用 [J]. 液晶与显示, 1999, 14 (3): 199~206
- [5] 《数学手册》编写组. 数学手册 [M]. 北京: 高等教育出版社, 1979. 19, 245~246

High-Temperature Target Recognition Based on Spectral Radiation Information

Fan Xueliang, Cheng Xiaofang, Xu Jun

(Department of Thermal Science and Energy Engineering, USTC, Hefei 230026, China)

[Abstract] Based on the principles of optics and radiometry, the imaging mathematical model is established and the factors of the contrast (signal-noise-ratio) of high-temperature target and the scenery are given. By analyzing not only the differences in spectral properties between objects in the scene, but also the CCD spectral response theoretically, a new method of enhancement of contrast is given. By optimizing the initial image capture stage, using liquid crystal light valve to make a simple modification of the imaging system, the goal of high object recognition is achieved. The experimental results agree with the theoretical predicts.

[Key words] video image; object recognition; radiation information; liquid crystal light valve