

## 三波段真彩色夜视光谱匹配技术

陈一超, 胡文刚, 武东生, 何永强, 李晓明

(军械工程学院 电子与光学工程系, 河北 石家庄 050003)

**摘要:** 为了得到夜晚目标的真实色彩信息, 设计了三波段真彩色夜视系统, 并阐述了其工作原理。根据满月条件下月光的光谱特性, 结合典型目标的光谱反射特性和 S25<sup>+</sup>光电阴极的光谱响应特性, 采用对比度反转最大原则, 综合考虑人眼的光谱光视效率特性, 提出了三波段真彩色夜视技术的光谱分割方法。依据光谱匹配的理论计算结果制备了滤光片, 并对滤光片的光谱透过率进行了测量。利用制备的滤光片进行了实验并提出了一种三波段夜视图像彩色融合方法, 实验表明: 提出的光谱分割方法能够较好地还原目标的真实色彩。

**关键词:** 夜视系统; 真彩色; 光谱特性; 光谱分割; 滤光片

**中图分类号:** TN223   **文献标志码:** A   **文章编号:** 1007-2276(2015)12-3837-06

## Spectrum matching technique in triple-spectrum color night vision system

Chen Yichao, Hu Wengang, Wu Dongsheng, He Yongqiang, Li Xiaoming

(Department of Electronic and Optical Engineering, Ordnance Engineering College, Shijiazhuang 050003, China)

**Abstract:** True-color night vision system was designed to get true color of the targets at night. The theory of the system was analyzed. According to characteristics of full moon light spectrum, combining the spectral reflected characteristics of typical target and spectrum response soope of S25<sup>+</sup>, using the principle of cintrast reversion and considering characteristics of visual of human's eyes, the spectrum intersected idea of triple-spectrum true-color night vision was presented in the end. According to the spectrum intersected idea, filters were designed and then their transmittance were measured. Experiment was carried out by the filters and a method to fuse triple-spectrum low-level light images was presented. The result shows that the proposed method could restore the true color of target.

**Key words:** night vision system; true-color; spectrum characteristics; spectrum intersecte; filter

收稿日期: 2015-04-15; 修订日期: 2015-05-20

基金项目: 军械工程学院基础研究基金(YJXM12026)

作者简介: 陈一超(1991-), 男, 硕士生, 主要从事光电对抗与信息处理等方面的研究。Email: cyc12603@163.com

导师简介: 胡文刚(1962-), 男, 副教授, 硕士生导师, 博士, 主要从事光电对抗、光电检测与信息处理等方面的研究。

Email: jxgcxyhwg@sina.com

## 0 引言

目前军队所装备的微光夜视仪产生的都是单色图像,单色图像存在着信噪比较低、缺乏深度感等缺点。利用人眼对彩色相对比较高的分辨率和灵敏度的特点,实现彩色夜视能够大幅度提高目标被发现的概率<sup>[1]</sup>。因此国内外研究机构做了大量的工作,主要是利用不同波段成像进行融合,例如微光图像与红外图像融合<sup>[2]</sup>,微光双谱图像融合<sup>[3]</sup>等。微光与红外图像融合是采用双通道的方法实现,即将红外夜视仪与微光夜视仪相结合。融合图像显著地提高了目标被识别的概率,但双通道存在着视差等问题,前期的配准工作较难,实时性较差<sup>[4]</sup>。单通道双谱图像融合的方法因为利用了可见光区域以外的近红外波段,造成融合图像并不能反映物体真实色彩信息。而真实的彩色信息能够减轻人眼的疲劳感<sup>[5]</sup>。为了克服视差问题并实现真彩色夜视,提出了一种采用单通道的三波段真彩色夜视技术。

## 1 三波段真彩色夜视技术方案

根据 RGB 彩色模型,对任意彩色光  $C$  都是选用 3 种单色光  $R$ 、 $G$ 、 $B$  进行彩色合成,其配色方程可写成:

$$C=r(R)+g(G)+b(B)$$

所以,如果将目标的发射光谱透过不同透过率的滤光片分为  $R$ 、 $G$ 、 $B$  3 个波段,记录下 3 个波段比例,通过处理就能够得到真彩色信息。

三波段真彩色夜视系统设计方案如图 1 所示。目标发射或反射的光经过物镜的汇聚,汇聚后的光

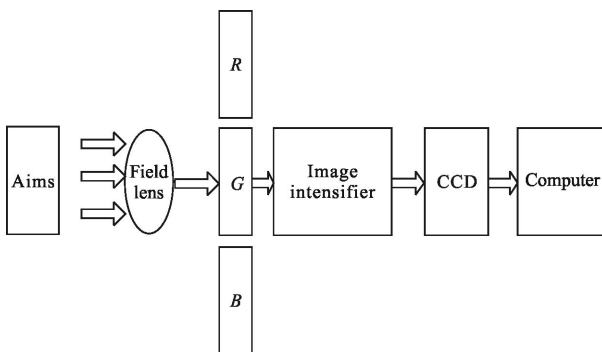


图 1 三波段真彩色夜视系统原理

Fig.1 Theory of triple-spectrum true-color night vision system

线经过分谱滤光片的滤光作用成像在增强器的光电阴极上产生光电子,光电子经过像增强器的倍增,成像在荧光屏上,最后被 CCD 采集、记录在计算机上得到反映目标在某一波段强度信息的图像。通过机械旋转的方式控制 3 块分谱滤光片转动实现依次采样。将采集到的图像经过图像预处理模块的消噪及增强处理后融合成反映目标真实色彩的图像。

三波段真彩色夜视技术的核心思想是在显示“绿色”图像的光电倍增管的基础上增加了一对嵌入了三原色不断旋转的光学滤光片,即滤光片将目标的发射和反射的颜色分离成“ $R$ ”、“ $G$ ”、“ $B$ ”三原色,记录不同波段的辐射强度比例。分谱滤光片的选择会直接决定被计算机采集到的图像亮度,也就是光强度。所以,滤光片的光谱透过范围和夜天光光谱需要进行匹配。

## 2 光谱匹配技术

### 2.1 夜视成像系统特性分析

像增强器第一光电阴极的光谱响应有两大作用:决定着光电阴极光电流;提供目标与背景之间的光电子图像对比,初始对比决定了输出信噪比。三波段真彩色夜视成像系统的光谱响应特性实际上就是第一个光电阴极的光谱响应特性<sup>[6]</sup>。光电阴极的工作过程是对目标的发射或反射辐射能通过物镜等光学系统之后,在其响应的光谱范围内积分的过程。一般对于微光夜视系统,目标的距离往往在数百米范围内,不考虑大气的吸收作用,目标物镜的光学透过率近似为 1,则忽略大气和透镜影响,产生的光电流为:

$$I = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \phi_m \phi(\lambda) \rho(\lambda) R_m R(\lambda) d\lambda \quad (1)$$

式中: $\phi(\lambda)$  为光源的相对光谱密度分布; $\phi_m$  为光源的相对光谱密度分布的峰值; $\rho(\lambda)$  为目标对光源的光谱反射比; $R(\lambda)$  为光电阴极的相对光谱响应; $R_m$  为光电阴极的相对光谱响应的峰值; $\lambda_1$ 、 $\lambda_2$  为光电阴极敏感范围的下、上限波长。

光源照射在相邻的目标和背景上,在实际应用中,目标和背景之间的距离相对于月亮、大气辉光、星光等光源到目标和背景的距离来说是很小的,可以认为目标和背景接收到的光源辐射强度完全相等。光源发出的光经过目标和背景反射之后,在阴极面上产生的光电流密度分别为  $I_1$  和  $I_2$ , 它们之间的

初始对比度为:

$$C = \frac{|I_1 - I_2|}{I_1 + I_2} = \frac{\left| \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \phi(\lambda) \rho_1(\lambda) R(\lambda) d\lambda - \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \phi(\lambda) \rho_2(\lambda) R(\lambda) d\lambda \right|}{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \phi(\lambda) \rho_1(\lambda) R(\lambda) d\lambda + \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \phi(\lambda) \rho_2(\lambda) R(\lambda) d\lambda} \quad (2)$$

式中:  $\rho_1(\lambda)$ 、 $\rho_2(\lambda)$  为目标和背景对光源的光谱反射比。

$$C_T' = \frac{\left| \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \phi(\lambda) \cdot (\rho_1(\lambda) - \rho_2(\lambda)) \cdot R(\lambda) d\lambda - \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} (\rho_1(\lambda) - \rho_2(\lambda)) \cdot R(\lambda) d\lambda \right|}{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \phi(\lambda) \rho_1(\lambda) R(\lambda) d\lambda + \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \phi(\lambda) \rho_2(\lambda) R(\lambda) d\lambda} \quad (3)$$

### 2.2 夜天光光谱特性和典型目标光谱反射特性

相比较白天,夜晚的照度很低,人类的眼睛并不能感知到物体的色彩信息。事实上,夜晚的月亮、天空、星光等作为夜间的主要光源仍然具有不同的光谱发射特性。夜天辐射的光谱分布在有月和无月时差异很大,在满月条件下可见光范围内星光强度相对于月光强度可以忽略,满月光的相对光谱密度如图 2 所示<sup>[8]</sup>。有月时与太阳辐射的光谱相似,此时月光是夜天光的主体,其辐射峰值约为 500 nm 附近。

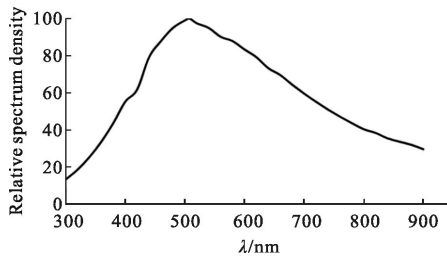


图 2 满月光相对光谱密度分布

Fig.2 Relative spectrum density distribution of full moon

微光夜视仪一般用于野外,野外环境常常以绿色草木为背景,在军事运用中,观察的目标往往是涂有暗绿色漆的装甲车辆等,所以取绿色草木和暗绿色漆作为典型背景和目标。夜晚情况下绿色草木和暗绿色漆的光谱反射特性如图 3 所示。

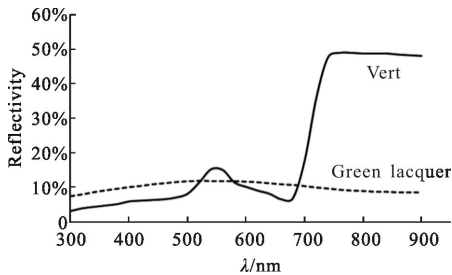


图 3 典型背景和目标的夜晚光谱反射特性

Fig.3 Spectrum reflective characteristics of typical target and background

从公式(2)中可以看出:不同的目标和背景具有不同的反射特性,经光电阴极积分以后可能产生相似或者相近的光电流,即造成信号的强度相似或者相近,从而造成输出图像的对比度降低。提高对比度有助于更快地发现、识别目标,所以最佳光谱匹配技术的关键是研究合适的光谱分割点( $\lambda_c$ )使对比度增大,采用的原则是对比度反转最大原则<sup>[7]</sup>,即公式(3)最大:

### 2.3 最佳光谱分割

根据实验室现有的条件,像增强器型号为 1XZ18/18WS-7,其主要参数如表 1 所示。1XZ18/18WS-7 的光电阴极类型是 S25<sup>+</sup>,其相对光谱响应如图 4 所示。

表 1 像增强器主要参数

Tab.1 Main parameters of image intensifier

Image intensifier model	Spectral response /min · (μA · Im <sup>-1</sup> ) <sup>-1</sup>	Resolving power /lp · mm <sup>-1</sup>	SNR /min	Luminance gain
1XZ18/18WS-7	500	50(Centre)	20	8 000

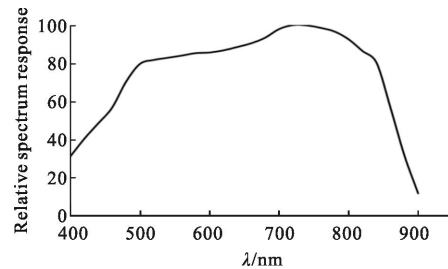


图 4 光电阴极相对光谱响应特性

Fig.4 Relative spectrum response characteristics of photoelectric cathode

利用计算机计算可以得到 S25<sup>+</sup>光电阴极对绿色草木和暗绿色漆产生的光电流差值的比较,如图 5 所示。可以看出:绿色草木和暗绿色漆在 550 nm 附近都有一个峰值,在 650 nm 附近绿色草木的产生的光电流有一个极小值,暗绿色漆产生的光电流则比较平稳,在 750 nm 附近绿色草木的发光强度远大于暗绿色漆。

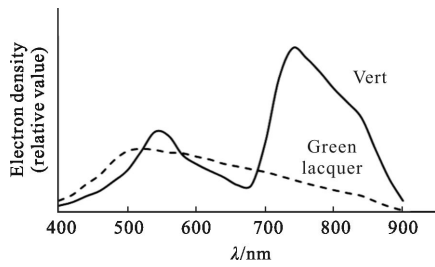


图 5 光电阴极对绿色草木和暗绿色漆的光电流的比较

Fig.5 Photocurrent of green plant compares to sap green lacquer on the photoelectric cathode

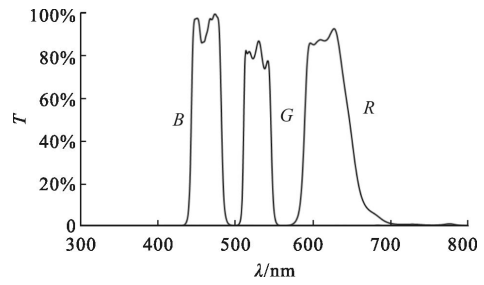


图 6 滤光片的光谱透过率

Fig.6 Spectrum characteristics of filters

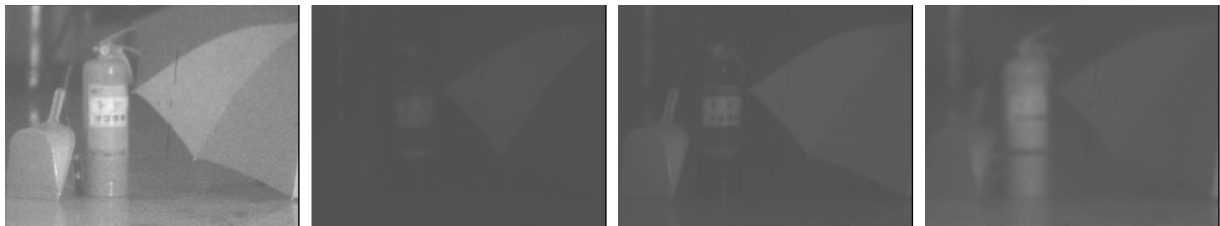
### 3 滤光片的设计

通过计算机计算  $C_r'$  取得最大值时的  $\lambda_c$  约为 510 nm, 580 nm 和 700 nm。在波长大于 700 nm 时, 人眼的光视效率变得很低<sup>[9]</sup>, 为了使得到的图像色彩更接近人眼的视觉, 所以将波长大于 700 nm 的部分予以截止。根据上述理论分析制作了 3 块滤光片, 经高精度分光光度计测得其光谱透过率如图 6 所示。

制备的 3 块滤光片的透过波段符合理论计算的结果, 并且在相应波段的透过率都超过或者接近 80%, 其透过率满足实验要求。

### 4 实验结果及分析

利用图 6 的滤光片以实验室设定的场景、绿色草木和红色墙体的城市建筑等目标进行了相关实验, 采集到的图样分别如图 7 中的(a)、(b)、(c), 从左



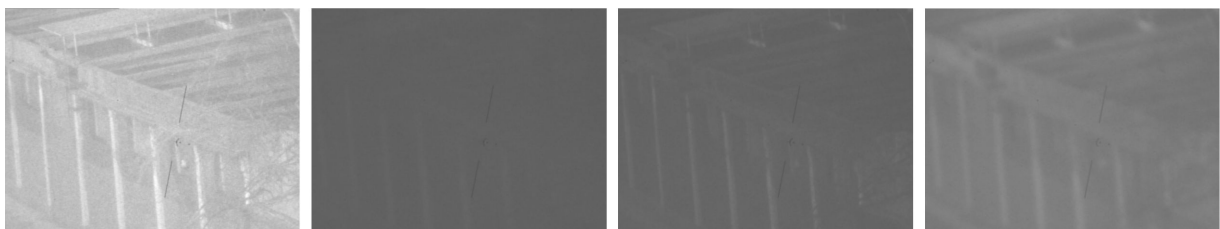
(a) 实验室设定的场景

(a) Laboratory scene



(b) 绿色树木等

(b) Green trees



(c) 城市建筑等

(c) City building

图 7 实验图像

Fig.7 Experiment images

至右分别是原始微光图像、短波图像、中波图像和长波图像 (图中中间部位的黑色线条是物镜自带的分划板所致)。

对于图 7,将短波、中波、长波图像与原始微光图像比较,由于窄带滤光片的加入降低了图像的信息,短波图像中人眼已经不能正确地分辨目标,但是不同颜色区域、标签、建筑上条纹轮廓较为清晰,说明短波图像可以辨别颜色较浅的区域。室内中波图像可以看出目标物体在 520 nm 波段的辐射强度明显大于背景地面,雨伞不同区域分界线较清晰,室外中波图像对目标的整体轮廓有一定反映。长波图像将目标中偏红色的区域明显突出。对于 3 个实验场景,根据原始微光图像不能辨别出雨伞的颜色、裸露的地面与草地、建筑的颜色等,且目标与背景、目标与目标之间的对比度较低,图像缺乏层次感。

为了使融合图像的色彩更逼近真实图像,根据彩色映射原则,提出了一种简单且快速的线性组合融合方法,方法如公式(4)所示:

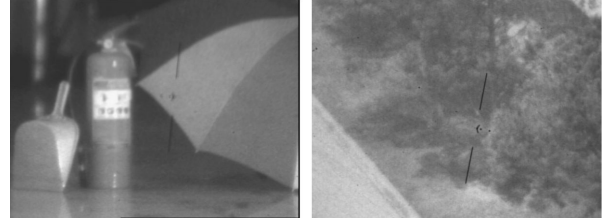
$$\begin{bmatrix} R \\ G \\ B \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} m_1(S-S_1)+m_2O \\ m_1(M-M_1)+m_2O \\ m_1(L-L_1)+m_2O \end{bmatrix} \quad (4)$$

式中: $S$  为短波图像; $M$  为中波图像; $L$  为长波图像; $O$  为原始微光图像; $S_1$ 、 $M_1$ 、 $L_1$  分别是  $S$ 、 $M$ 、 $L$  图像中的灰度最小值; $m_1$ 、 $m_2$  为配比系数。

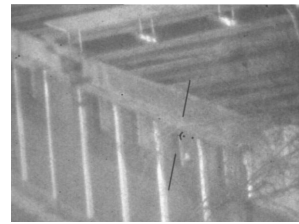
按照公式(4)的融合方法,结果如图 8 所示,其中(a)、(b)、(c)分别是以实验室设定场景、野外绿色草木和城市建筑为目标图像的融合结果。

公式(4)中,采集的图像和图像中的最小灰度值做差,可以部分消除噪声和杂闪光的影响,加入原始微光图像灰度值的一半,即避免了因窄带滤光片的加入而导致亮度过低的问题也增加了图像反映细节的信息,而且对必要的彩色信息也有较好的保留。目前尚无公认的理论和方法用以定量评价夜视彩色图像<sup>[10]</sup>,故文中对实验结果采用人眼观察的方式进行评价。对比图 7 中的原始微光和图 8 中的融合图像,能够明显感觉到彩色图像增强了景深,彩色雨伞和地面、树木与树木、树枝与建筑之间的层次更加明显。在色彩还原方面,图像较逼真地显示了目标的真实、自然色彩,能够快速分辨雨伞的颜色、裸露的黄土与草地、建筑的色彩等,与人的长期记忆中的色彩相近。同时,融合图像具有良好的颜色协调性,可以

较好地避免长时间观察带来的疲劳感。因此,采用上述方法进行光谱分割对于三波段真彩色夜视技术是合适的。



(a) 实验室设定场景 (a) Laboratory scene  
(b) 绿色树木等 (b) Green trees



(c) 城市建筑等 (c) City building

图 8 线性融合图像

Fig.8 Images of linear fusion

### 5 结 论

根据满月条件下的光谱辐射特性和军事典型目标的光谱反射特性,结合微光 CCD 光电阴极的光谱响应曲线,利用滤光片将光谱分为 3 个部分,分割点为 510 nm、580 nm 和 700 nm。为了实现真彩色显示,制备的滤光片在分割点的波段内选择合适的透过波段并对 700 nm 以上波段予以截止。实验证明制备的滤光片能够在不同波段突出不同的目标物体,对于融合图像通过人眼观察进行评价,证明理论分析的分割方式能够很好地实现三波段真彩色夜视。为了使显示的效果更逼近真实的色彩,下一步将对滤光片的光谱透过率的优化以及融合公式中的参数定标等问题进行研究。

### 参 考 文 献:

[1] Su Yu, Gao Shaoshu, Jin Weiqi, et al. Color-quality subjective evaluation for color fusion images of typical scenes based on color harmony [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2014, 44(4): 1198-1202. (in Chinese)  
苏宇, 高绍妹, 金伟其, 等. 典型场景彩色融合图像颜色协

- 调性的主观评价[J]. 红外与激光工程, 2014, 44(4): 1198–1202.
- [2] Yang Shaokui, Liu Wen. Color fusion method for low-level light and infrared images [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2014, 43(5): 1654–1659. (in Chinese)  
杨少魁, 刘文. 一种微光与红外图像彩色融合方法 [J]. 红外与激光工程, 2014, 43(5): 1654–1659.
- [3] Zhang Chuang. Low light level color night vision technology study on single-channel and dual-spectrum [D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2007. (in Chinese)  
张闯. 单通道双谱微光彩色夜视技术研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2007.
- [4] Hua Xiaoqiang, Wang Ping, Ji Kefeng, et al. A robust point set registration algorithm based on information geometry [C]//SPIE, 2014, 9301: 930110–1–6.
- [5] Song Fangwei, Sun Shaoyuan. Image fusion and colorization based on sparse representation and colour transfer [J]. *Laser & Infrared*, 2014, 44(6): 687–691. (in Chinese)  
宋芳伟, 孙韶媛. 基于稀疏表示和色彩传递的图像融合与彩色化[J]. 激光与红外, 2014, 44(6): 687–691.
- [6] Wang Guihua. Integrated Optoelectronic Devices [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 1988: 79–83.
- 汪贵华. 光电子器件 [M]. 北京: 国防工业出版社, 1988: 79–83.
- [7] Bai Lianfa, Chen Qian, Kong Jie, et al. Fusion technology for infrared and low light level images [J]. *J Infrared Millim Waves*, 1999, 8(1): 47–52. (in Chinese)  
柏连发, 陈钱, 孔捷, 等. 红外与微光图像融合技术研究 [J]. 红外与毫米波学报, 1999, 8(1): 47–52.
- [8] Li Wei, Chang Benkang. A study on the characteristics of reflection spectrum of field of view under night-sky radiation [J]. *Acta Armamentarii*, 2000, 21(2): 177–179. (in Chinese)  
李蔚, 常本康. 夜天光下景物反射光谱特性的研究 [J]. 兵工学报, 2000, 21(2): 177–179.
- [9] Wang Yongzhong. New military optoelectronic technology [M]. Beijing: Science Publishing Company, 2003: 16–20.  
王永仲. 现代军用光电技术[M]. 北京: 科学出版社, 2003: 16–20. (in Chinese)
- [10] Gao Shaoshu, Jin Weiqi, Wang Lingxue, et al. Quality evaluation for dual-band color fusion images based on scene understanding [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2014, 43(1): 300–305. (in Chinese)  
高绍妹, 金伟其, 王岭雪, 等. 基于场景理解的双波段彩色融合图像质量评价 [J]. 红外与激光工程, 2014, 43(1): 300–305.