

〈系统与设计〉

单通道三波段彩色夜视系统设计及实验研究

陈一超¹, 胡文刚¹, 武东生¹, 何永强¹, 张冬晓¹, 何云峰²

(1. 军械工程学院 电子与光学工程系, 河北 石家庄 050003; 2. 66440 部队, 河北 石家庄 050081)

摘要: 针对目前微观夜视仪器产生单色图像的缺陷, 提出了一种单通道三波段的彩色夜视方案。简要介绍了单通道三波段彩色夜视系统的工作原理, 重点论述了该系统的设计方法, 并对滤光片的光谱透射率、色轮的窗口数量、荧光屏与 CCD 光电阴极的耦合方式等问题进行了计算和分析。在单通道三波段彩色夜视系统装置研制基础上, 开展了彩色夜视实验, 成功得到色彩较为真实的夜视图像。

关键词: 夜视系统; 彩色夜视; 三波段; 单通道; 像增强器

中图分类号: TN223 文献标识码: A 文章编号: 1001-8891(2017)01-0062-05

Experimental Study on Single-channel Triple-spectrum Color Night Vision System

CHEN Yichao¹, HU Wengang¹, WU Dongsheng¹, HE Yongqiang¹, ZHANG Dongxiao¹, HE Yunfeng²

(1. Department of Electronic and Optical Engineering, Ordnance Engineering College, Shijiazhuang 050003, China;

2. Unit 66440 of PLA, Shijiazhuang 050081, China)

Abstract: Low-light level night vision device produces black and white images, which isn't conducive to long time observation of human eyes. To solve this disadvantage, a night vision system of single-channel triple-spectrum is put forward. Working principle of the color night system is introduced briefly. And the design method of the system is discussed. The spectral transmittance of filters, the number of color wheel windows, the coupling modes of fluorescent screen with CCD and other questions are calculated and analyzed. Color night vision experiment is done by color night vision system of single-channel triple-spectrum. The result shows that the system designed could produce color night image preferably.

Key words: night vision system, true-color, triple-spectrum, single-channel, image intensifier

0 引言

目前广泛应用的微光夜视仪器产生的都是单色图像, 单色图像存在着信噪比低、立体感差、长时间观察容易疲劳等缺点。相比较单色图像, 人眼对彩色有相对较高的分辨率和灵敏度。彩色夜视的实现主要是利用不同波段进行成像、融合, 微光图像与红外图像融合^[1], 微光双谱图像融合^[2]等。微光与红外图像融合是基于双通道实现的, 即微光像增强器与红外变像管相结合, 这种双通道的方式能够明显提高目标被识别的概率, 但存在着图像配准困难、成本高等问题。微光双谱图像融合克服了双通道的问题, 将夜光光谱分为两部分分别成像, 经过处理、融合成假彩色图

像^[3], 而假彩色图像不利于人眼的长时间观察。为在单通道的基础上实现逼近真实色彩的彩色夜视技术, 提出了一种单通道三波段彩色夜视系统。

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 都选用 3 种单色光 R、G、B 进行彩色合成, 其配色方程可写成^[4]:

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

利用滤光片将目标的发射光谱分为 R、G、B 三个波段, 通过 CCD 采集每个波段辐射强度, 通过合成就能够得到目标的彩色信息。

单通道三波段彩色夜视系统设计方案如图 1 所

收稿日期: 2015-02-02; 修订日期: 2015-06-29。

作者简介: 陈一超 (1991-), 男, 硕士研究生, 主要从事光电对抗与信息处理方向的研究。

基金项目: 军械工程学院基础研究基金项目 (YJJXM12026)。

示。物镜将目标发射和反射光汇聚, 分谱滤光片将汇聚的光进行滤光后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, 通过中继元件被 CCD 采集、记录在计算机上, 得到则是反映目标在某一波段强度信息的图像。3 块分谱滤光片通过机械旋转的方式控制转动从而实现单通道。将采集到的图像经过处理后融合成彩色图像。

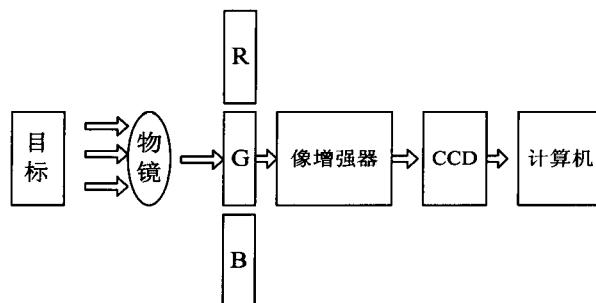


图 1 单通道三波段彩色夜视系统原理

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

单通道三波段彩色夜视技术的核心思想是在显示单色图像的像增强器的基础上增加了一对嵌入了 3 原色不断旋转的色轮, 通过滤光片的作用将目标的发射和反射的颜色成分分离成“R”、“G”、“B”三个波段。

2 系统设计

2.1 色轮的光谱透过率

色轮的作用是将目标的反射光谱分为“R”、“G”、“B”三个部分, 分割结果直接影响后期合成的图像是否接近目标的真实色彩, 是否能够提高目标被发现和识别的概率等。

微光夜视系统的工作过程是光电阴极对目标和背景反射光谱积分^[5], 产生的光电流为:

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

式中: $\phi(\lambda)$ 是光源的相对光谱密度分布; ϕ_m 是光源的相对光谱密度分布的峰值; $\rho(\lambda)$ 是目标对光源的光谱反射比; $R(\lambda)$ 是光电阴极的相对光谱响应; R_m 是光电阴极的相对光谱响应的峰值; λ_1 、 λ_2 是光电阴极敏感范围的下、上限波长。

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: I_1 、 I_2 分别是目标和背景产生的光电流值; $\rho_1(\lambda)$ 、 $\rho_2(\lambda)$ 分别是目标和背景对光源的光谱反射率。

军事观察中, 暗绿色漆和绿色草木往往是典型目标和背景, 在月光条件下其产生的电流相对值如图 2。

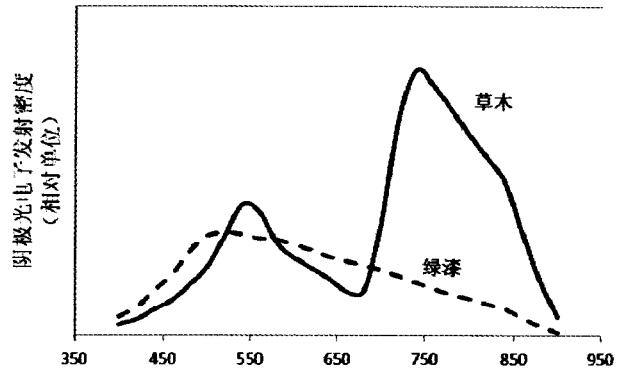


图 2 光电阴极对绿色草木和暗绿色漆的光电流的比较

Fig.2 Photocurrent of green plant compares to sap green lacquer on the photoelectric cathode

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 (λ_c) 使对比度增大, 采用的原则是对比度反转最大原则^[6], 即下式最大:

$$C'_r = \frac{\int_{\lambda_1}^{\lambda_c} \phi(\lambda) \cdot [\rho_1(\lambda) - \rho_2(\lambda)] \cdot R(\lambda) d\lambda - \int_{\lambda_c}^{\lambda_2} \phi(\lambda) \cdot [\rho_2(\lambda) - \rho_1(\lambda)] \cdot R(\lambda) d\lambda}{\int_{\lambda_1}^{\lambda_c} \phi(\lambda) \rho_1(\lambda) R(\lambda) d\lambda - \int_{\lambda_c}^{\lambda_2} \phi(\lambda) \rho_2(\lambda) R(\lambda) d\lambda} \quad (3)$$

通过计算机计算可得到, 分割点位于 510 nm、580 nm 和 700 nm 附近。在波长大于 700 nm 时, 人眼的光视效率变得很低, 为了使得到的图像色彩更接近人眼的视觉, 将波长大于 700 nm 的部分予以截止。根据以上计算实际制备的短波、中波、长波滤光片光谱的光谱透过率如图 3 中 1、2、3 所示。滤光片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。

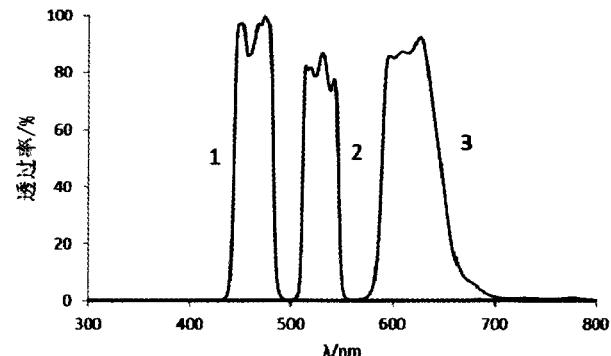


图 3 滤光片的光谱透过率

Fig.3 Spectrum characteristics of filters

2.2 色轮的窗口数

将反射光谱分为“R”、“G”、“B”三原色分别进

行放大、再进行合成，理论上可以合成任意颜色。加入滤光片会降低像增强器的信噪比，通过计算滤光片加入前后信噪比存在式(4)的关系^[7]：

$$\left(\frac{S}{N}\right)_1 / \left(\frac{S}{N}\right) = \sqrt{\frac{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \tau(\lambda) d\lambda}{\lambda_2 - \lambda_1}} \quad (4)$$

式中：(S/N)、(S/N)₁ 分为加入滤光片前后像增强器信噪比； λ_1 、 λ_2 分别是像增强器敏感波段的上、下限； $\tau(\lambda)$ 为滤光片的透过率；计算可得到短波、中波、长波滤光片加入前后信噪比之比约为 0.267、0.251、0.347。加入滤光片严重降低了像增强器的信噪比，将导致采集到的图像噪声过大抑制图像探测。为了克服这种情况，在原有 3 个窗口的基础上增加一组全波(W)窗口，即透全波。所以，色轮的窗口个数是 4 个，如图 4 所示：R、G、B 和 W。

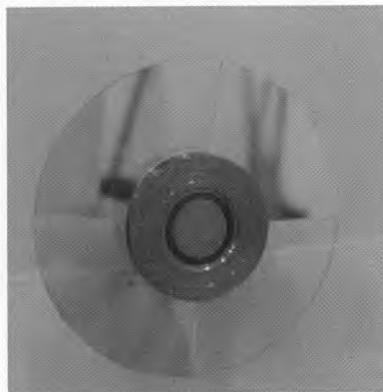


图 4 旋转式色轮照片

Fig.4 Picture of Rotating Color wheel

2.3 色轮转速及尺寸要求

当图像的转换速度大于 25 帧/s 的时候，人眼就认为是连续图像。色轮每旋转一圈完成一幅完整图像的采集。所以，色轮每秒旋转 25 圈，每圈 40 ms。一幅完整的图像由两个步骤完成：一，R、G、B 三帧图像合成一幅彩色图像；二，彩色图像和全波图像叠加。为了使获得的图像更逼近真实色彩，又不至于采集到的图像太暗或者太亮，R、G、B 和 W 的曝光时间为 1:1:1:1，即单帧曝光时间为 10 ms，通过设置 CCD 探测器的曝光时间实现同步采集。色轮窗口的尺寸应与像增强器阴极匹配以保证照射在光阴极上的光都经过滤光片的滤波。

2.4 电机和转速要求

电机驱动色轮旋转，对电机的要求有：转速的稳定性要好，电机的转速要求为 1500 f/s，并且能够保持稳定；转轴要稳定，否则会影响图像真实色彩的还原和图像精度；像增强器一般采用电池供电，电机的驱动电压最好为 12V，有利于设备的集成；电机的体

积和重量应尽可能的小，有利于设备的小型化。

2.5 荧光屏与 CCD 光电阴极耦合

荧光屏与 CCD 探测器光电阴极的耦合方式有两种：光纤耦合和透镜耦合^[8]。光纤耦合是利用光纤光锥或光纤面板将像增强器荧光屏输出的图像耦合到 CCD 光电阴极上，其主要原理都是基于光纤的传光特性。光纤耦合的优点是荧光屏的光能利用率较高，体积小，畸变小等，缺点是成本较高、耦合时几何对准困难和光纤元件本身的瑕疵造成光能损失。透镜耦合是通过透镜将像增强器的输出图像耦合到 CCD 光电阴极，透镜耦合具有调焦容易，成像质量高的特点，缺点是体积较大、光能利用率、系统有杂光干扰等缺点。

在实际的应用中，采用光纤耦合方式具有价格高，操作复杂的不利因素，综合考虑性能、价格比，实验采用透镜耦合的方式，如图 5。



图 5 中继透镜组照片

Fig.5 Picture of Relay Lens

2.6 荧光屏与 CCD 光电阴极光谱匹配

在三波段真彩色夜视系统中，荧光屏发出的光由下级 CCD 光电阴极接收。因此，对荧光屏的发射光谱就有一定的要求，即必须与 CCD 光电阴极的光谱较好匹配。

光电阴极对光源的积分响应与其峰值响应的比例关系称为光电阴极同辐射源的光谱匹配系数 a 。其数值表示光源的辐射通量被光电阴极接收的利用率。匹配系数 a 越大，则表明光源的能量利用率越高。表 1 所列出部分常见荧光屏与光电阴极光谱匹配系数的近似值^[9]。

表 1 荧光屏与光电阴极光谱匹配系数

Table 1 Spectrum matching modulus of screen and photoelectric cathode

	S-1	S-11	S-20	S-25
P ₁₁ 荧光屏	0.217	0.914	0.827	0.953
P ₂₀ 荧光屏	0.395	0.427	0.583	0.782
P ₃₁ 荧光屏	0.276	0.689	0.722	0.868

从表1数据可看出, P_{11} 荧光屏与 S_{11} 和 S_{25} 光电阴极、 P_{31} 与 S_{25} 光电阴极都有较大的光谱匹配系数。除了要考虑匹配系数以外, 还要兼顾其他特性参量: 发光效率、余辉等。 P_{31} 的发光效率要大于 P_{11} , 两者的余辉时间相近且都不大于 0.1 ms。 S_{25} 光电阴极的典型光响应度为 $200 \mu\text{A/lm}$, 远大于其他材料^[9]。因此, 像增强器荧光屏材料为 P_{31} , 像增强器光电阴极材料为 S_{25} 。根据以上理论分析, 选用的像增强器型号为 1XZ18/18WS-7, 其主要参数表2所示。

表2 像增强器主要参数

Table 2 Main parameter of imaging

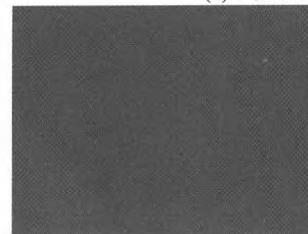
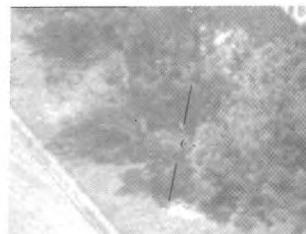
像增强器型号	光灵敏度 min/(\mu\text{A/lm})	分辨率 /lp/mm)	信噪比 /min	亮度 增益
1XZ18/18WS-7	500	50 (中心)	20	8000

3 实验结果及分析

利用上述单通道3波段彩色夜视系统在室内及室外进行了实验, 实验的主要目标为设定的实验场景、绿色草木、表面涂有红色颜料的建筑, 其照度条件分别是 0.268 lx, 0.135 lx, 0.142 lx。实验采集到的结果如图6所示, 其中(a)、(b)、(c)、(d)分别为全波、短波、中波和长波图像(图中中间部位的黑色线条是物镜自带的分划板所致)。从图中可以看出, 短波图像能明显的区分白色等浅色区域, 对于其他颜色则不敏感; 中波图像能够反应目标整体轮廓, 局部有所突出, 其他具体细节不明显; 长波图像对于目标整体颜色强度有明显的反应, 亮度较短波和中波高。



(a) 实验室设定的场景



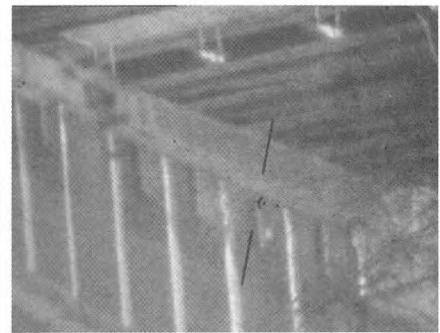
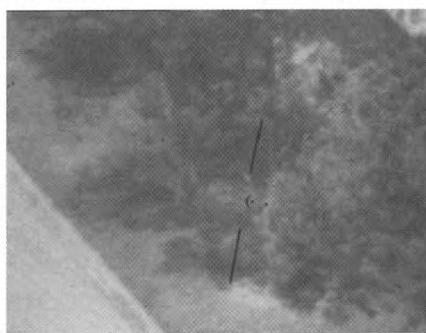
(b) 绿色树木等



(c) 城市建筑等

图6 实验图像

Fig.6 Experiment images



(a) 实验室设定场景

(b) 绿色树木等

(c) 城市建筑等

图7 融合图像

Fig.7 Fusion image

微光图像对比度低, 经过线性增强、融合, 得到的结果如图7。通过将图7中的融合图像与图6的原始微光图像对比, 在分辨率方面, 融合图像对于不同目标之间的纹理、边界显示得更为清晰。在色彩还原方面, 图像较真实地显示了目标的真实、自然色彩, 与人的长期记忆中的色彩相近颜色协调性较好, 可以较好地避免由于长时间观察带来的疲劳感。同时, 融合图像增强了目标景深, 目标和地面、树木和草地、树木和墙体等的层次比较明显, 有利于快速地识别目标、判断地形等。因此, 单通道三波段彩色夜视系统的设计方案具有一定的应用价值。

4 结论

通过对单通道三波段彩色夜视系统的原理分析, 设计出了系统的原型结构并利用该系统进行了相关的实验, 实验表明本文的设计能够在一定照度条件下实现色彩还原较为真实的彩色夜视。受制于像增强器性能、荧光屏与CCD的耦合方式等因素, 系统在更微弱光照的条件下的实用性存在困难以及对动态目标探测存在不足, 这些问题都是以后的工作中需要进一步研究优化的。

参考文献:

- [1] 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.
YANG Shaokui, LIU Wen. Color fusion method for low-level light and infrared images[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2014, 43(5): 1654-1659.
- [2] 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.
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.
- [3] 俞飞. 微光双谱单通道彩色夜视技术[D]. 南京: 南京理工大学, 2013.
Yu Fei. Low light level dual-spectrum color night vision technology [D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2013.
- [4] 王永仲. 现代军用光电技术[M]. 北京: 科学出版社, 2003: 31-32.
Wang Yongzhong. *New military optoelectronic technology*[M]. Beijing: Science Publishing Company, 2003: 31-32.
- [5] 汪贵华. 光电子器件[M]. 北京: 国防工业出版社, 1988: 79-83.
Wang Guihua. *Optoelectronic devices*[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 1988: 79-83.
- [6] 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(2): 47-52.
Bai Lianfa, Chen Qian, Kong Jie, et al. Fusion technology for infrared and low light level images[J]. *Journal of infrared Millim Waves*, 1999, 8(1): 47-52.
- [7] 秦飞, 马泳. 微光图像彩色合成的信噪比分析[J]. 海军工程大学学报, 2004, 15(4): 86-88.
Qin Fei, Ma Yong. SNR Analysis of Color Synthesis of Low Light Image [J]. *Journal of Naval University of Engineering*, 2004, 15(4): 86-88.
- [8] 田金生. 微光像传感器技术的最新进展[J]. 红外技术, 2013, 35(9): 527-534.
Tian Jinsheng. New Development of Low Light Level Imaging Sensor Technology [J]. *Infrared Technology*, 2013, 35(9): 527-534.
- [9] 白廷柱, 金伟其. 光电成像原理与技术[M]. 北京: 北京理工大学出版社, 2006: 130-131.
Bai Tingzhu, Jin Weiqi. *Principles and Techniques of Optical Imaging*[M]. Beijing: Beijing Institute of Technology Press, 2006: 130-131.