doi:10.3788/gzxb20174605.0510002

基于四波段图像融合的彩色夜视方法研究

吴海兵,陶声祥,顾国华,王书宇
(陆军军官学院,合肥 230031)

摘　要:为了在低照度条件下获取目标的彩色图像,提高夜间对目标的识别能力,提出了基于四波段图像融合的彩色夜视方法.采用 F-P 滤光片设计出了透射中心在三基色光中心波长及近红外波段的四波段滤光片,在各个透射区域的平均透射率均达 90%以上;将四波段滤光片设计成圆形滤色轮结构,用分光计测得了各波段滤光片的光谱透射性;对加入滤光片后的系统信噪比进行了分析和计算,分析结果表明加入滤光片不会引入噪声,计算结果表明加入蓝色、绿色、红色和近红外波段滤光片的成像系统的信噪比分别是原来单色微光夜视系统信噪比的 19.59%、38.45%、47.28%和 46.70%.借助国产超二代像增强器在微光实验室进行了四波段图像采集及彩色图像融合实验,实验时光照度分别为 1×10^{-3} lx 和 1×10^{-1} lx,对获取的图像质量进行了评价.结果表明:在照度为 1×10^{-3} lx 时,融合的彩色图像在均值、方差和熵这三项指标上均优于过滤后的蓝色和绿色的单色图像,且由于彩色图像中利用了近红外图像进行增强,使得彩色图像亮度更高,颜色分辨性更好;在照度为 1×10^{-1} lx 时,融合后的彩色图像的信息熵比红、绿、蓝三种基色图像的大,彩色图像携带的信息量更大.本文的研究对彩色夜视成像系统的设计和研发具有借鉴和指导意义.

关键词:彩色夜视;图像融合;四波段;滤光片;信噪比;图像质量评价
中图分类号:TN223　　**文献标识码**:A　　**文章编号**:1004-4213(2017)05-0510002-10

Study on Color Night Vision Image Fusion Method Based on Quadruple-band Images

WU Hai-bing, TAO Sheng-xiang, GU Guo-hua, WANG Shu-yu
(*Army Officer Academy*, *Hefei* 230031, *China*)

Abstract: In order to acquire color images of targets under Low Light Level(LLL) and improve the ability to distinguish targets from background at night, a color night vision image fusion method based on quadruple-band images was proposed. The quadruple-band filter with a transmittance at the center wavelength of three-band color lights and near-infrared band was designed by using Fabry-Perot(FP) filter, and the average transmittance is up to 90% at each transmission region. The quadruple-band filter was designed as a color-wheel filter structure, the spectral transmittance of each single band filter was measured by a spectrometer. The Signal Noise Ratio(SNR) of the night vision system after adding the filter was analyzed and calculated. The analysis results show that adding the filter will not introduce addition noise, and the SNR of the imaging system which added the blue, green, red and near-infrared band filters is equivalent to 19.59%, 38.45%, 47.28% and 46.70% to compare with that of the original monochromatic night vision system, respectively. Using a domestic Super Gen II image intensifier, quadruple-band image acquisition and color image fusion experiments were carried out in LLL laboratory, the experimental illumination is 1×10^{-1} lx and 1×10^{-3} lx, a set of images was adopted to conduct quality assessment. Experiment results show that, when the illumination is 1×10^{-3} lx, the fusion color image is superior to the filtered blue and green monochromatic images both in gray mean, gray variance and

基金项目:国家自然科学基金(No. 61272333)资助
第一作者:吴海兵(1982—),男,讲师,博士,主要研究方向为目标探测与全天时成像. Email:whb_aoa@163.com
收稿日期:2016-10-28;**录用日期**:2017-01-23

information entropy, and the color image is enhanced by the use of the near infrared image, as a result the color image brightness is higher and the color identification is better. When the illumination is 1×10^{-1}lx, the information entropy of the fusion color image is bigger than that of the red, green and blue color images. This research can give reference to the design and development of color night vision system.

Key words: Color Night Vision(CNV); Image fusion; Quadruple-band; Filter; Signal Noise Ratio(SNR); Image quality assessment(IQA)

OCIS Codes: 100.0100; 120.2440; 110.3000

0 引言

彩色夜视技术是对现有的微光夜视技术的一次革命性的技术跨越,在过去的五年里,彩色夜视技术得到各国军方的重视.美国军方在近五年内取得了多项彩色夜视方面专利[1-5],而随着先进的夜视成像装置和实时信号处理技术的飞速发展,彩色夜视技术的发展领域将进一步扩大.美国陆军投入4～5亿美元为单兵装备彩色夜视眼镜,已经有一些便携单兵手持、安装于头盔的设备进入美国陆军并开始服役.如2013年美国Tenebraex公司在研制医用彩色夜视成像仪基础上成功研制了ColorPath™CCNVD (Color Capable Night Vision Device)彩色夜视仪,并已部分装备部队使用.彩色夜视技术其核心思想是采用光学过滤的方式对夜晚物体反射的微光进行过滤,过滤出红、绿、蓝这三种光,并融合出彩色图像.

ColorPath输出的彩色图像,是可以反映物体本来颜色的彩色图像,同以NRL(Naval Research Laboratory)、MIT(Massachusetts Institute of Technology)等为代表的伪彩色融合图像有本质区别.伪彩色融合技术是指使用微光与红外热像[6-9]、微光与长波红外[10]、紫外与微光[11]、微光与中波长波红外[12]等双谱、三谱的单双通道的微光彩色融合夜视技术.多谱图像融合伪彩色成像技术,虽然在一定程度上弥补了现有单光谱器件在低照度条件下只能获取灰度图像的局限,但同时存在多设备间复杂的光学校准、系统成本高、融合出来图像配色不准、无法实时输出等问题,制约了其实际工程应用和装备化.

微光夜视系统的核心器件是微光像增强器,其主要功能是将微弱的光辐射图像通过光电成像系统进行光量子放大,并转换为人眼可见的光学图像,其性能指标直接制约着微光夜视装备的有效作用距离和图像质量[13].微光像增强器已从"一代"发展到目前的"四代",像增强器性能的提升,跟其光电阴极光子面使用的材料和制作工艺有密切相关,也决定了波长响应范围和量子效率.如使用多碱作为光阴极面,像增强器响应波长范围为185～900 nm;如使用InP/InGaAsP(Cs)作为光阴极面材料,作用波长范围可扩展至300～1 400 nm.在夜间低照度情况下,如无照明光月光下的照度10^{-1}lx数量级、无照明光星光环境下照度10^{-3}lx数量级,虽然在380～760 nm可见光范围的光能量很低,但是存在丰富的近红外光谱.现阶段,基于液晶可调滤光片或光学薄膜过滤技术的三基色图像融合方法,其主要过滤范围都是针对可见光范围[14],如ColorPath过滤的主要是红、绿和蓝光,而把丰富的近红外波段的光忽略.

因此,本文提出基于四波段图像融合的彩色夜视方法,其基本构想是在以往单色微光夜视系统的基础上增加一套四波段光学滤光片,利用滤光片动态过滤夜间目标反射光中红色、绿色、蓝色和近红外等四个波段的光;利用像增强器对过滤后四个波段的光进行增强放大,CMOS(Complementary Metal Oxide Semiconductor)图像传感器耦合像增强器荧光屏上增强后的红、绿和蓝三基色图像和近红外图像;利用近红外波段图像对三基色图像进行增强,进而融合出彩色图像.鉴于滤光片的加入可能会对系统的信噪比造成影响,本文对加入四波段滤光片后的信噪比进行了研究.

1 四波段滤光片设计

基于四波段图像融合的彩色夜视方法,其工作流程可归纳为:目标及背景反射光进入物镜,经物镜汇聚后;通过四波段光学滤光片过滤出四个波段单色光;过滤后的单色光投射到像增强器的光电阴极,经过微通道板增强放大,轰击到像增强器荧光屏;CMOS图像传感器耦合到像增强器荧光屏上的图像,采集的单色图像经FPGA(Field-Programmable Gate Array)处理及存储;完成四波段图像采集后,采用四波段图像融合方法实时融合成彩色图像输出,如图1所示.

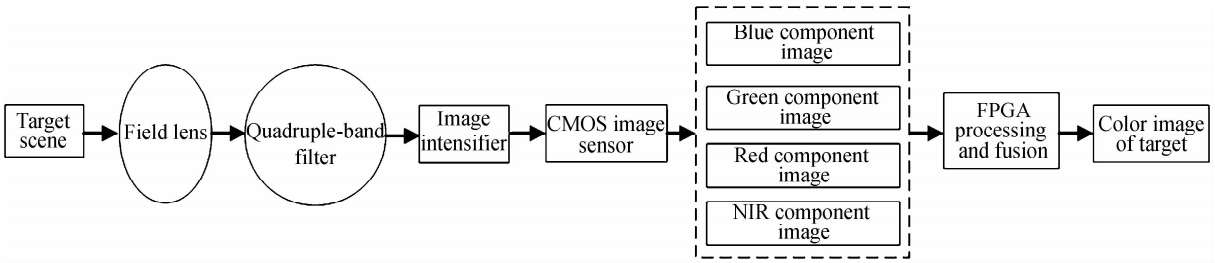

图 1　基于四波段图像融合的彩色夜视方法工作流程

Fig. 1　The workflow of color night vision image fusion method based on quadruple-band images

基于四波段图像融合的彩色夜视方法，首先需要获取目标的四波段图像，为此需设计出红、绿、蓝和近红外四个波段的滤光片. 可见光的波长范围为 380～760 nm，其中红光波长范围为 622～760 nm，绿光波长范围为 492～577 nm，蓝光波长范围为 435～450 nm. 国际照明委员会指定三基色红、绿、蓝的中心波长分别为 700 nm、546.1 nm 和 435.8 nm. 本文选用的像增强器为国产北方夜视超二代像增强器 DNT-6 型，其光谱响应范围为 300～900 nm，光阴极材料为多碱，阴极光照灵敏度典型值为 750 μA/lm，信噪比为 28 dB，分辨力为 70 lp/mm，照度动态范围为 1×10^{-6}～5×10^{4} lx，增益为 8 000～16 000Cd/m^2/lx.

在设计滤光片时，应注意：

1）高色纯度，即红（R）、绿（G）、蓝（B）三基色的透射光谱应适中，透射波长范围不能太窄，否则透光度太低；透射波长范围也不能太宽，否则三基色光谱将发生重叠，使滤光片的彩色还原能力变差；

2）高对比度，即要求三基色滤光片具有高透射率. 而传统的彩色滤光片红、绿、蓝三色光谱的带宽均为 150nm 左右[15]，三基色光谱发生重叠，影响了色纯度；

3）滤光片过滤的波长范围应该处于像增强器的光谱响应范围.

过滤片采用了 F-P 滤光片，F-P 过滤片是目前最常用的窄带干涉滤光片. 三基色 F-P 滤光片的结构为[16]

$$\mathrm{air}\,|\,(\alpha L\beta H)^{n}C(\beta H\alpha L)^{n}\,|\,\mathrm{sub} \tag{1}$$

式中：α 和 β 为光学薄膜厚度的系数（α 为高折射率介质厚度，β 为低折射率介质厚度）；L 为低折射率材料（选用 SiO_2，折射率为 1.458）；H 为高折射率材料（Ta_2O_5，折射率为 2.05）；C 表示腔体，取腔体材料为熔融石英固体（折射率为 1.458），基底 sub 材料为玻璃（折射率为 1.52）.

高折射率材料选用五氧化二钽（Ta_2O_5），是常用的可见光及红外区高折射率材料，该材料具有良好的蒸镀特性，无论是采用电子枪蒸镀或是离子镀都比 TiO_2 要稳定，且容易获得比 TiO_2 更低的吸收和散射，膜层沉积速率也较快，堆积密度接近 1，因此选用 Ta_2O_5 与 SiO_2 搭配镀制多层膜.

通过改变 α、β 的值及腔体厚度，可以分别得到透射峰中心波长为蓝光、绿光、红光和近红外波长之一，并在另外三个波段有较高反射率的 F-P 滤光片，应满足以下条件：

1）蓝色滤光片在波长 430～450 nm 透射区域的平均透射率不小于 90%，在其它波段范围内平均透射率不大于 10%；

2）绿色滤光片在波长 490～580 nm 透射区域的平均透射率不小于 90%，在其它波段范围内平均透射率不大于 10%；

3）红色滤光片在波长 620～760 nm 透射区域的平均透射率不小于 90%，在其它波段范围内平均透射率不大于 10%；

4）近红外滤光片在波长 760～900 nm 透射区域的平均透射率不小于 90%，在其它波段范围内平均透射率不大于 10%.

利用薄膜设计软件 TFCalc3.5 进行四波段滤光片设计及优化，得到蓝色、绿色、红色和近红外四个波段的滤光片光谱透射性曲线，如图 2.

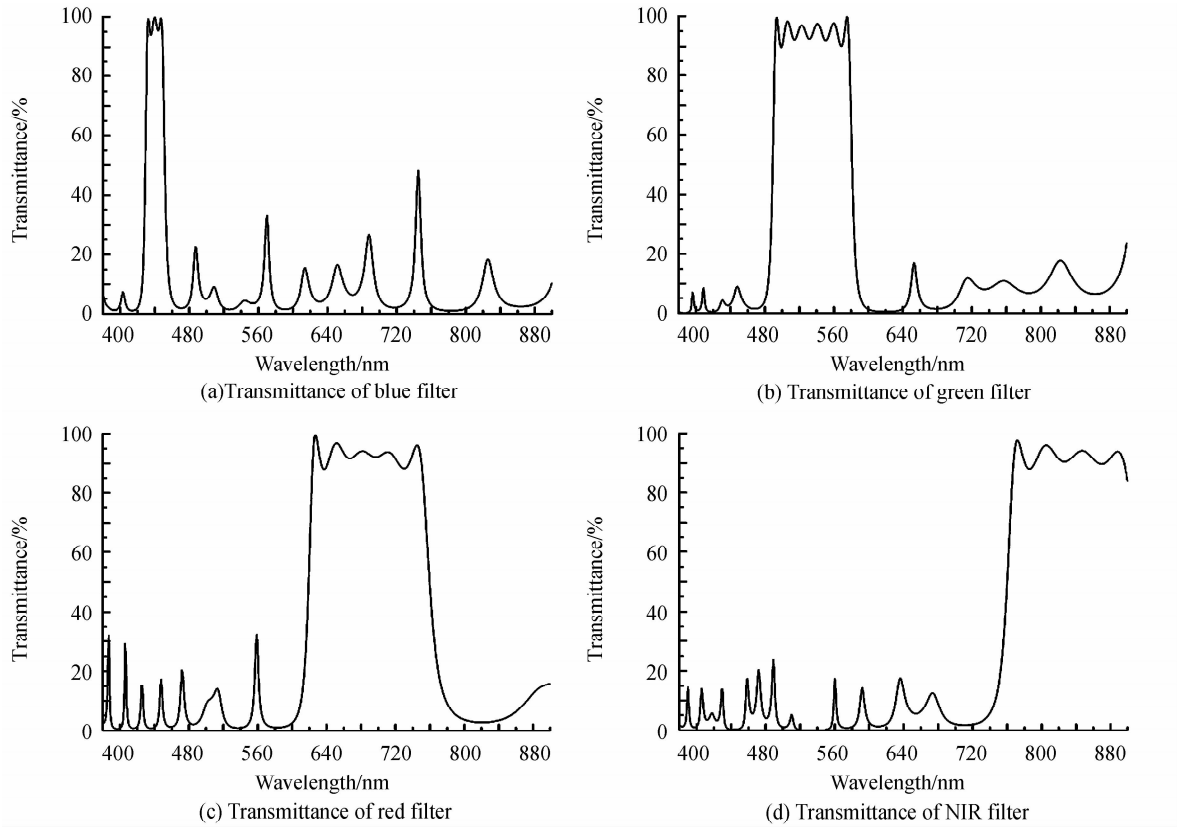

图 2　四波段滤光片光谱透过性

Fig. 2　The spectral transmittance of quadruple-band filter

计算出四波段滤光片的基本性能参数见表 1.

表 1　四波段滤光片特征参数

Table 1　Key parameters of quadruple-band filter

Filter type	Peak wavelength(nm) and transmittance(%)	Half peak breath (2Δλ/nm)	Average transmittance of transmission region (%)	Average transmittance of reflection region (%)
Blue	$\lambda_c=440.0, T_{max}=99.96$	22	94.59	6.94
Green	$\lambda_c=575.0, T_{max}=99.80$	92	93.59	6.90
Red	$\lambda_c=627.0, T_{max}=99.67$	141	90.48	6.78
NIR	$\lambda_c=772.0, T_{max}=97.62$	140	90.87	5.31

在进行四波段图像采集时，滤光片之间需要快速切换，为此将四块滤光片设计成圆形结构滤色轮，最终制作出来的四波段滤色轮外观结构如图 3.

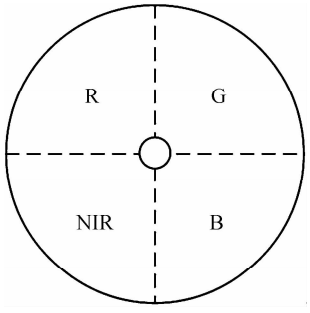

图 3　四波段滤色轮外观示意图

Fig. 3　Schematic diagram of quadruple-band color-wheel filter

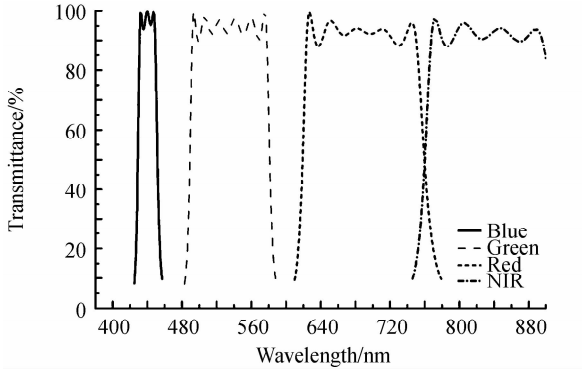

图 4　四波段滤色轮光谱透过性

Fig. 4　The spectral transmittance of quadruple-band color-wheel filter

其中红(R)、绿(G)、蓝(B)及近红外(NIR)四个波段的滤光片，均为扇形结构，其圆心角为 90°，中间小圆孔用于将滤色轮安装在电机上面以驱动滤色轮旋转.

利用 Color Eye 7000A 台式分光光度计测得四波段滤色轮各滤光片透射率，如图 4.

2 加入滤光片后信噪比分析

首先，分析在不加入四波段滤光片时单色夜视仪的信噪比. 在单色夜视仪中，可能产生噪声的器件包括：像增强器、CMOS 图像传感器，以及将像增强器和图像传感器进行连接耦合的中继组(当中继组使用光纤时，传输距离很短，噪声几乎可忽略). 在计算信噪比时，通常借助亮暗相间的方波条纹图案作为输入图像，并且是条纹的长度远大于宽度，以便将条纹简化为只有长度的一维物体.

亮条纹输入到像增强器光电阴极面上，再通过成像器件转换增益后，得到输出信号 S 表示为

$$S=Nh^2\tau\varepsilon\eta_{\mathrm{p}}\eta_{\mathrm{T}}C(f_{\mathrm{i}}) \tag{2}$$

式中，N 为投射到像增强器光电阴极面单位面积上的平均光子数，h 为亮暗条纹在阴极面上成像的宽度，τ 为探测器的有效积分时间，ε 为在忽略光谱分布情况下每个光子所对应的亮度，η_{p} 为像增强器光电阴极的量子效率，η_{T} 为 CMOS 图像传感器的量子效率，$C(f_{\mathrm{i}})$为方波对比传递函数.

阴极面上光电子发射的量子噪声强度分布均方差为

$$\Phi^2(\chi)=Nh^2\tau\eta_{\mathrm{p}}\delta(\chi) \tag{3}$$

式中：$\delta(\chi)$为每个入射光子的强度分布；χ 为光电阴极面的一维坐标.

对阴极面上量子噪声强度的均方差函数作傅里叶变化，δ 函数的傅里叶变换等于 1，有 $Nh^2\tau\eta_{\mathrm{p}}\delta(\chi)\rightarrow Nh^2\tau\eta_p$.

成像器件在传递这一噪声时附加了对应空间频率的衰减，其衰减程度可用乘调制传递函数 $T(f)$求出[12]. 通过对频率积分即可得到输出屏幕上用亮度表示的输出量子噪声均方差 N_{Q}^2 为

$$N_{\mathrm{Q}}^2 = Nh^2\tau\eta_{\mathrm{p}}\eta_{\mathrm{T}}^2\varepsilon^2\int_0^{\infty}[T(f)]^2\mathrm{d}f \tag{4}$$

背景涨落噪声的均方差 N_{D}^2 为

$$N_{\mathrm{D}}^2 = N_{\mathrm{b}}h^2\tau\eta_{\mathrm{T}}^2\varepsilon^2\int_0^{\infty}[T(f)]^2\mathrm{d}f \tag{5}$$

式中 N_{b} 为光电阴极单位面积上单位时间内产生的暗发射平均电子数.

荧光屏颗粒噪声的均方值 N_{S}^2 可以用其平均亮度 L 与其输出亮度的非均匀性差异函数 $\beta(x,y)$的均方差相乘来表示，即

$$N_{\mathrm{S}}^2=L^2[\beta(x,y)]^2 \tag{6}$$

荧光屏的平均输出亮度为

$$L=\left(\frac{N\eta_{\mathrm{p}}}{2}+N_{\mathrm{b}}\right)h^2\tau\varepsilon\eta_{\mathrm{T}} \tag{7}$$

将式(7)代入式(6)中，得到荧光屏颗粒噪声的均方值为

$$N_{\mathrm{S}}^2=\left[\left(\frac{N\eta_{\mathrm{p}}}{2}+N_{\mathrm{b}}\right)h^2\tau\varepsilon\eta_{\mathrm{T}}\right]^2[\beta(x,y)]^2 \tag{8}$$

信噪比 S/N 的定义为

$$\frac{S}{N}=\frac{S}{\sqrt{N_{\mathrm{Q}}^2+N_{\mathrm{D}}^2+N_{\mathrm{S}}^2}} \tag{9}$$

在实际条件中，背景发射光子数 N_{D} 很小，即 $N_{\mathrm{Q}}^2+N_{\mathrm{S}}^2\geqslant N_{\mathrm{D}}^2$，故 N_{D} 可以忽略，式(9)可以简化为

$$\frac{S}{N}=\frac{S}{\sqrt{N_{\mathrm{Q}}^2+N_{\mathrm{S}}^2}} \tag{10}$$

由此可知，在引入滤光片以后并不引入新的噪声，只是将某些光谱进行了反射，改变的是入射到像增强器光电阴极上的光子数量.

令放置滤光片以后投射到像增强器光电阴极面的单位面积上的平均光子数为 N_{avg}，滤光片的光谱透过率为 $\tau(\lambda)$，则有

$$N_{avg}=\frac{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2}\tau(\lambda)\mathrm{d}\lambda}{\lambda_{max}-\lambda_{min}}N \tag{11}$$

式中，$\frac{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2}\tau(\lambda)\mathrm{d}\lambda}{\lambda_{max}-\lambda_{min}}$ 与滤光片允许透射的波长范围相关，λ_{max} 和 λ_{min} 分别为像增强器的响应波长范围，$\lambda_{max}=900$ nm，$\lambda_{min}=300$ nm. 为便于表达，令 $p(\lambda_1,\lambda_2)=\frac{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2}\tau(\lambda)\mathrm{d}\lambda}{\lambda_{max}-\lambda_{min}}$，则式(11)可简化为

$$N_{avg}=p(\lambda_1,\lambda_2)N \tag{12}$$

加入滤光片后，输出信号 S_{after}，量子噪声均方差 N^2_{Qafter}，背景涨落噪声均方差 N^2_{Dafter}，荧光屏颗粒噪声均方差 N^2_{Safter} 可表示为

$$\begin{cases}S_{after}=p(\lambda_1,\lambda_2)S\\N^2_{Qafter}=p(\lambda_1,\lambda_2)N^2_{Q}\\N^2_{Dafter}=p(\lambda_1,\lambda_2)N^2_{D}\\N^2_{Safter}=p(\lambda_1,\lambda_2)N^2_{S}\end{cases} \tag{13}$$

忽略背景的涨落噪声，则加入滤光片后的信噪比 $\left(\frac{S}{N}\right)_{after}$ 为

$$\left(\frac{S}{N}\right)_{after}=\frac{S_{after}}{\sqrt{N^2_{Qafter}+N^2_{Dafter}+N^2_{Safter}}} \tag{14}$$

将式(13)代入式(14)后，求得

$$\left(\frac{S}{N}\right)_{after}=\sqrt{p(\lambda_1,\lambda_2)}\frac{S}{\sqrt{N^2_{Q}+N^2_{S}}} \tag{15}$$

将式(10)代入式(15)后，进一步求得

$$\left(\frac{S}{N}\right)_{after}=\sqrt{p(\lambda_1,\lambda_2)}\left(\frac{S}{N}\right) \tag{16}$$

由于滤光片的光谱透过率为 $\tau(\lambda)$ 总是小于 1，如制备的四波段滤色轮，在对微光过滤时，对红光、绿光、蓝光和近红外波段的平均透过率也仅仅在 0.90～0.95 之间，所以有 $p(\lambda_1,\lambda_2)=\frac{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2}\tau(\lambda)\mathrm{d}\lambda}{\lambda_{max}-\lambda_{min}}<1$，进而有 $\sqrt{p(\lambda_1,\lambda_2)}<1$，故

$$\left(\frac{S}{N}\right)_{after}<\left(\frac{S}{N}\right) \tag{17}$$

对图 4 中四波段滤光片的透过率曲线进行积分计算，分别计算得红、绿和蓝和近红外四种滤光片加入后 $p(430,450)=0.0384$，$p(490,580)=0.1478$，$p(620,760)=0.2236$，$p(760,900)=0.2181$. 加入四波段滤光片后，系统的信噪比与增加滤光片之前的系统的信噪比关系为

$$\begin{cases}\left(\frac{S}{N}\right)_{afterblue}=0.1959\left(\frac{S}{N}\right)\\\left(\frac{S}{N}\right)_{aftergreen}=0.3845\left(\frac{S}{N}\right)\\\left(\frac{S}{N}\right)_{afterred}=0.4728\left(\frac{S}{N}\right)\\\left(\frac{S}{N}\right)_{afterNIR}=0.4670\left(\frac{S}{N}\right)\end{cases} \tag{18}$$

由此证明，滤光片的加入导致进入像增强器光电阴极光子数的减少，进而导致像增强器及彩色微光夜视成像系统输出图像的信噪比降低.

3 四波段图像融合方法

现有的各类伪彩色融合方法，其实质都是围绕输出的 RGB 彩色图像中 R、G 和 B 三个分量的获取展开.

如 NRL 研究的红外与微光图像伪彩色融合法，利用红外热像仪获取的图像作为 R 分量，利用微光夜视仪获取图像作为 G 和 B 分量.

考虑到本文研究的四波段图像融合的彩色夜视方法，在使用时需要实时输出彩色图像，其进行融合计算的硬件平台是 FPGA，因此使用的方法必须运算速度快且便于硬件实现. 为此，设计出一种将近红外图像用于对红、绿和蓝三基色图像进行增强的方法，具体为

$$\begin{bmatrix} R_{out} \\ G_{out} \\ B_{out} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} (1-\alpha)\times R_{in}+\alpha\times IR_{in} \\ (1-\beta)\times G_{in}+\beta\times IR_{in} \\ (1-\chi)\times B_{in}+\chi\times IR_{in} \end{bmatrix} \tag{19}$$

式中，α、β 和 χ 为近红外图像参与融合的配比系数（$0\leqslant\alpha<1$，$0\leqslant\beta<1$，$0\leqslant\chi<1$），其值越大，则在融合中近红外图像所起作用越大；R_{in}、G_{in}、B_{in} 和 IR_{in} 分别为经过四波段滤光片过滤后输出的单色图像，由于使用相同的物镜和 CMOS 图像传感器，因此四个单色图像分辨率相同；R_{out}、G_{out} 和 B_{out} 为最终输出彩色图像的 RGB 各分量.

α、β 和 χ 具体取值跟成像时的环境照度相关，如在环境照度比较高情况，比如月光环境下的照度 10^{-1} lx 数量级，此时可令 $\alpha=0$、$\beta=0$、$\chi=0$，即此时环境照度足以使目标反射的微光经过红、绿、蓝三基色滤光片过滤后融合成彩色图像. 在星光环境下照度 10^{-3} lx 数量级，此时可令 $\alpha=0.1$、$\beta=0.1$、$\chi=0.2$，利用近红外图像对三基色图像进行非均匀性增强. 在照度情况更低的情况下，可通过增大配比系统达到对融合彩色图像增强的目的. 虽然，配比系数的增加，在一定程度上也会导致输出彩色图像与白天获取的真彩色图像有一定色差，但这种彩色图像也是逼近物体自身色彩的图像. 配比系数的取值，需要通过在不同照度等级下的实验效果来确定，但是在一次成像时，χ 的值应该略大于 α、β，因为蓝色光的光谱范围较窄，所成蓝色图像比红色和绿色图像偏暗.

4 实验结果及分析评价

4.1 四波段图像采集实验

彩色夜视成像时的基本参数为：

1）实验在微光实验室进行，实验室内放置了绿色色球、红色瓶体的灭火器、白色背景墙、黑色凳子等物体；

2）最后加工出来的滤色轮直径 60 mm，中间小圆孔用直接为 5 mm，通过 FPGA 的时序信号驱动滤色轮旋转；

3）借助 FPGA 上编写 VHDL 控制逻辑实现对滤色轮旋转周期和 CMOS 的曝光时间精确控制，滤色轮旋转速度为 20 转/s（即每秒产生80帧单波段图像），易知，滤色轮在单波段图像积分时间为12.50 ms. 在程

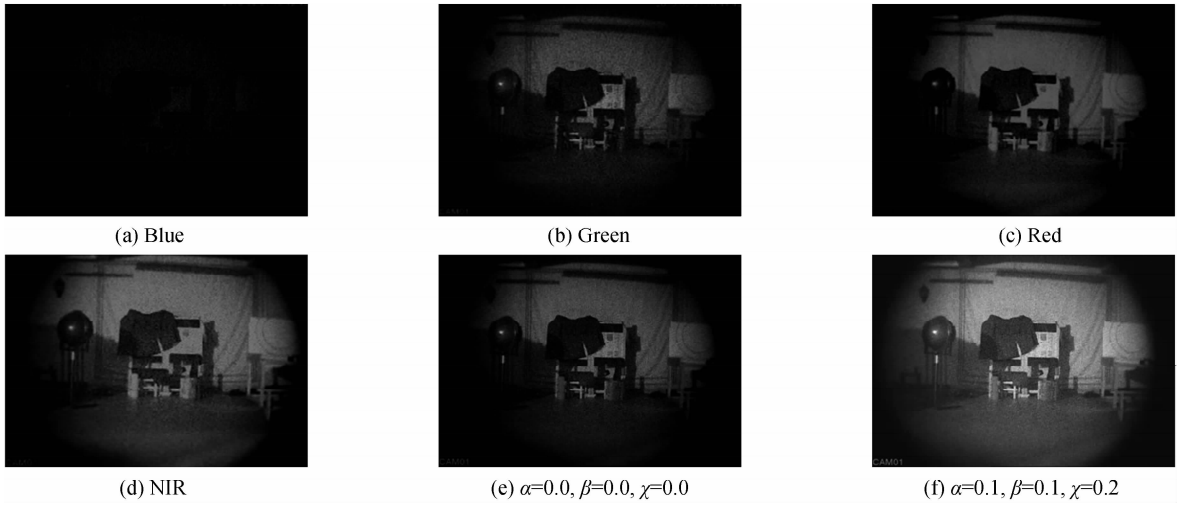

图 5 1×10^{-3} lx 采集的四波段图像及融合效果

Fig. 5 The effects of fused color image and quadruple-band acquisition images under 1×10^{-3} lx illumination

图 6 1×10^{-1}lx 采集的四波段图像及融合效果

Fig. 6 The effects of fused color image and quadruple-band acquisition images under 1×10^{-1}lx illumination

序控制下，当滤色轮的单波段滤光片进入像增强器范围时，启动 CMOS 开始曝光，经过积分时间后，输出该单波段图像；

4)实验时光照度分别为 1×10^{-3} lx 和 1×10^{-1} lx，成像距离为 8.5 m.

获取的四波段图像及融合的彩色图像如图 5 和图 6.

4.2 实验结果分析评价

在照度为 1×10^{-3}lx 时，直接使用三基色图像融合的彩色图像偏暗，目标之间空间感不强；使用近红外图像对三基色图像进行增强，且配比系数选择 $\alpha=0.1$、$\beta=0.1$、$\chi=0.2$ 时，经过增强后融合的彩色图像亮度得到提升，目视效果较好，物体颜色分辨性较好，不同颜色之间物体分界明显.

在照度为 1×10^{-1}lx，由于照度条件充分，直接使用三基色图像融合出的彩色图像亮度已足够，目视效果较好. 在使用近红外图像对三基色图像进行增强，融合的彩色图像偏亮，不利于人眼长时间连续对目标观察使用.

为了更好地对实验结果进行分析，采用图像质量评价的方法来进行. 由于本文提出的基于四波段图像融合的彩色夜视方法，其最终目的是为了获得夜视条件下目标的彩色图像. 而彩色图像是由四波段图像融合而成，本身并不存在参考图像，不能使用客观评价中的全参考和半参考方法，为此，只能选用经典的客观评价方法中的灰度均值、灰度方差和信息熵等指标[17].

图 7 给出在两种照度下，蓝色、绿色、红色、近红外及融合后彩色图像(图 5 中融合图像采用(f)，图 6 中融合图像采用(e))在灰度均值、灰度方差和信息熵的评价结果.

由评价结果可知，在照度 1×10^{-3}lx 时的情况下，融合后的图像在均值、方差和熵这三项指标上均优于滤色轮过滤后的蓝色和绿色的单色图像；且由于融合图像中利用了近红外图像进行增强，使得融合图像的灰度均值比红、绿、蓝三种基色图像大，表现为图像亮度更高. 在照度相对高一些，即 1×10^{-1}lx 下，融合后的图像在亮度上提升不是很明显(此时彩色图像由红、绿、蓝三基色图像直接融合)，但图像熵值比红、绿、蓝三种都大，说明携带信息量大.

从人眼直接观测来看，在低照度(照度低于 10^{-2}lx)情况下，利用四波段滤色轮过滤后融合的彩色图像，目视效果较好. 在照度 1×10^{-3}lx 时，由于照度较低，获取的四波段图像整体偏暗，但红色图像亮度值较高，虽然在融合时红色图像增强选择配比系数 $\alpha=0.1$，但由于红色图像本来亮度值较高，经过增强后进一步提升；而蓝色图像本来偏暗，虽然选择匹配系数 $\chi=0.2$ 已经较大，但是对蓝色增强幅度不及对红色增强幅度大，这导致融合的彩色图像有点“泛红”现象，但是颜色分辨性和空间层次感比单色图像有很大提升.

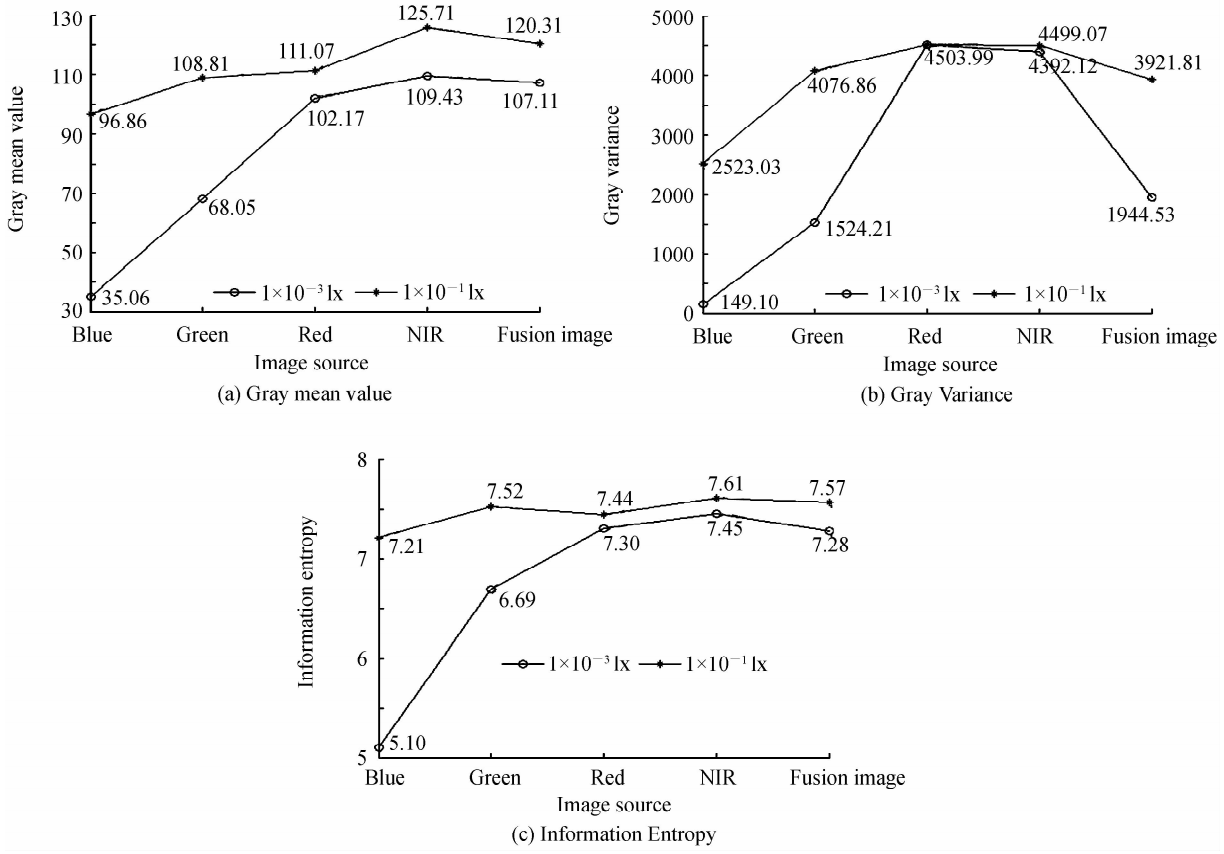

图 7　不同照度下采集图像及融合图像评价结果

Fig. 7　Accessment results under different illumination

5　结论

现阶段，国内对彩色夜视的研究主要采用微光、红外、紫外等两波段或三波段图像融合成伪彩色图像，伪彩色图像存在较大色差，会影响到目标判别. 在参考美军 ColorPath 彩色夜视仪工作原理的基础上，前期对夜视条件下三基色图像获取及真彩色融合方法进行了研究，设计了三基色光学滤光片对夜间条件下目标反射的微光进行过滤，利用像增强器对过滤后光进行增强放大，获取了目标三基色图像，将三基色图像融合成彩色图像，发现在照度低于 10^{-2}lx 的情况下，融合的彩色图像偏暗、颜色分辨性差.

鉴于夜天光中辐射的可见光非常微弱而近红外光谱很丰富这一特点，在研究像增强器光电阴极频谱响应范围的基础上，提出了一种利用滤光片过滤夜间目标反射光以获取目标的红、绿、蓝和近红外四个波段图像，并利用近红外波段图像对红、绿和蓝三基色图像进行增强的四波段图像融合的彩色夜视方法. 利用 F-P 滤光片设计了四波段滤光片，并将其加工成圆形滤色轮结构以便利用电机进行驱动. 对增加滤光片后的系统信噪比进行了分析，计算出增加蓝色、绿色、红色和近红外波段滤光片后，其成像时的信噪比相当于原来单色微光夜视系统的 19.59%、38.45%、47.28%和 46.70%. 借助国产超二代像增强器在微光实验室进行了成像实验，获得了等效于星光照度和月光照度的四波段图像及融合后彩色图像. 对两种照度下获取的图像进行了四波段融合实验并对实验结果进行了评价，结果表明在星光照度下，利用近红外图像对三基色图像进行增强，可使融合后的彩色图像在均值、方差和熵三项指标得到不同程度的提升，且由于融合图像中利用了近红外图像进行增强，这使得融合图像的灰度均值比红、绿、蓝三种基色图像大，表现为图像亮度更高、颜色分辨性更好.

基于四波段图像融合的彩色夜视方法，通过调整融合时的配比系数，可实现在不同照度下彩色图像的获取. 融合的彩色图像与现有微光夜视仪、红外热像仪等装备获取的灰度图像相比，彩色图像与目标自身颜色的色差更小，且可以体现目标的深度感，提高了人眼对伪装目标的分辨能力，在军事侦察领域有很高的价值.

参考文献

[1] KEESLING M, FERREN B, KAEHLER A, *et al*. Color night vision cameras, systems, andmethods thereof: US, US20150350629[P]. 2015.

[2] KRIESEL J, GAT N. True color night vision (TCNV) fusion: US, US8836793[P]. 2014.

[3] OTTNEY J C. Fusion night vision system with parallax correction: US, US8072469[P]. 2011.

[4] SHAMIR H, YAELI Y, EFRAT I. Synthetic colour night vision system: US, US8212876[P]. 2012.

[5] VAN D, BRINK A. Filtering device for a night vision system: US, EP2966500[P]. 2016.

[6] ZHANG Chuang, BAI Lian-fa, ZHANG Yi, *et al*. Spectrum matching and filtering technique in single channel dua-spectrum night vision system[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2007, **36**(9): 1668-1671.
张闯,柏连发,张毅,等. 单通道双谱夜视系统中的光谱匹配及滤光技术[J]. 光子学报, 2007, **36**(9): 1668-1671.

[7] LUO Yuan, WANG Ling-xue, JIN Wei-qi, *et al*. Developments of image processing algorithms and systems for LLL (Vis.)/IR color night vision[J]. *Infrared Technology*, 2010, **32**(06): 337-343.
骆媛,王岭雪,金伟其,等. 微光(可见光)/红外彩色夜视技术处理算法及系统进展[J]. 红外技术, 2010, **32**(06): 337-344.

[8] YANG Shao-kui, LIU Wen. Color fusion method for low-level light and infrared images[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2014, **43**(5): 1654-1659.
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.

[9] YANG Wen-bin, ZHANG Jun-ju, XU Hui, *et al*. Study of infrared and LLL image fusion algorithm based on the target characteristics[J]. *Laser & Infrared*, 2014, **44**(01): 56-60.
杨文彬,张俊举,许辉,等. 基于目标特性分析的红外与微光图像融合算法[J]. 激光与红外, 2014, **44**(01): 56-60.

[10] JIN Wei-qi, TAO Yu, SHI Feng, *et al*. Progress of low level light video technology[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2015, **44**(11): 3167-3176.
金伟其,陶禹,石峰,等. 微光视频器件及其技术的进展[J]. 红外与激光工程, 2015, **44**(11): 3167-3176.

[11] BAI Lian-fa, ZHANG Yi, GU Guo-hua, *et al*. Analysis and fusion methods on low light level image and ultraviolet image[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2007, **36**(1): 113-117.
柏连发,张毅,顾国华,等. 微光图像和紫外图像分析与融合方法研究[J]. 红外与激光工程, 2007, **36**(1): 113-117.

[12] CHEN Yi-chao, HU Wen-gang, WU Dong-sheng, *et al*. Triple-band low light level color night vision technology[J]. *Journal of Applied Optics*, 2015, **36**(3): 430-434.
陈一超,胡文刚,武东生,等. 三波段微光彩色夜视方法研究[J]. 应用光学, 2015, **36**(03): 430-434.

[13] ZHANG Jing-xian. Low light level and infrared imaging technology[M]. Beijing Institute of Technology Press, 1995: 46-51.
张敬贤. 微光与红外成像技术[M]. 北京理工大学出版社, 1995: 46-51.

[14] GUO Bang-hui, HUANG Jian-bo, LIU Jian-zhuo, *et al*. Measurement of radiance factor of ground target using triple-band optical imaging system[J]. *Acta Optica Sinica*, 2014, **34**(06): 126-130.
郭帮辉,黄剑波,刘建卓,等. 基于三波段光学成像系统的地物辐亮度系数测量[J]. 光学学报, 2014, **34**(06): 126-130.

[15] ZHOU Yun, YE Yan, SHEN Su, *et al*. Research on the characteristics of sub-wavelength grating color filter[J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, **31**(01): 231-235.
周云,叶燕,申溯,等. 亚波长光栅结构彩色滤光片研究[J]. 光学学报, 2011, **31**(01): 231-235.

[16] YU Peng, SHEN Wei-dong, ZHANG Yue-guang, *et al*. Reflective color filters based on metal-dielectric thin films[J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, **31**(12): 312-315.
余鹏,沈伟东,章岳光,等. 基于金属-介质薄膜的反射型彩色滤光片[J]. 光学学报, 2011, **31**(12): 312-315.

[17] ZHANG Yong, JIN Wei-qi. Objective assessment method of night vision fusion image quality[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2013, **42**(5): 1360-1365.
张勇,金伟其. 夜视融合图像质量客观评价方法[J]. 红外与激光工程, 2013, **42**(5): 1360-1365.

Foundation item: The National Natural Science Foundation of China (No. 61272333)