

doi: 10.3788/gzxb20164503.0330002

基于遗传算法的夜天光光谱匹配方法研究

郑少林¹, 王霞^{1,2}, 金伟其¹, 拜晓峰²

(1 北京理工大学 光电学院光电成像技术与系统教育部重点实验室, 北京 100081)

(2 微光夜视技术重点实验室, 西安 710065)

摘要: 为了满足微光夜视仪室内性能测试的需求, 对晴朗夜空满月光光谱和无月时星光光谱进行模拟. 首先, 对夜视仪的工作光谱范围进行研究, 确定需要拟合的光谱波段. 接着, 对该波段的夜天光谱进行分析, 选取合适的光源. 采用简单夜天光谱拟合方法, 根据目标光谱和光源光谱, 得出所需的滤光片衰减曲线, 找出该曲线近似对应的滤光片. 提出基于遗传算法的光谱构造方法, 根据光谱构造理论, 采用现有的 47 种滤光片进行光谱构造, 通过遗传算法求解该光谱构造函数, 计算出不同滤光片的最佳匹配模式, 并进行模拟. 实验结果表明, 采用基于遗传算法的光谱构造方法对夜天光谱拟合得到的光谱匹配度更高.

关键词: 微光夜视; 光谱匹配; 遗传算法; 夜天光; 像增强器; 月光光谱; 星光光谱

中图分类号: TN223

文献标识码: A

文章编号: 1004-4213(2016)03-0330002-5

Research of Night Sky Radiation Spectral Matching Method Based on Genetic Algorithm

ZHENG Shao-lin¹, WANG Xia^{1,2}, JIN Wei-qi¹, BAI Xiao-feng²

(1 Key Laboratory of Photo electronic Imaging Technology and System, Ministry of Education of China, School of Optoelectronics, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China)

(2 Science and Technology on Low-light-level Night Vision Laboratory, Xi'an 710065, China)

Abstract: In order to satisfy the needs of testing the performance of the low-light level night vision device indoor, the spectrums of sunny sky full moon and clear night sky stars were simulated. First of all, the spectral range of low-light level night vision device was studied to make sure the spectral bands. Then the night sky radiation was analyzed for the spectrum bands, the appropriate light source was selected. The filter transmittance curves was got by calculating target spectral and source spectrum, and the filter complied with the condition approximately was found out. Spectral structure based on genetic algorithm was proposed to calculate the best match model of the 47 existing kinds of filter to fit the spectrum. The experimental results show that the spectral structure technique based on genetic algorithm for night sky spectral fitting is higher compatibility.

Key words: Night vision system; Night sky radiator; Genetic algorithms; Spectral matching; Image intensifier; Moon spectrum; Star spectrum

OCIS Codes: 300.6170; 040.1880; 040.3780; 300.6170; 330.5370

0 引言

微光夜视成像技术作为目前关键的夜视技术手段之一, 在各个领域都有重要的应用. 微光夜视属于低照

度成像, 可利用环境微弱的可见和近红外辐射被动成像. 目前, 美国等发达国家已经研制出四代像增强器, 我国超二代/三代微光像增强器技术虽然取得了重大进展, 但是还有很大的发展空间^[1].

基金项目: 微光夜视技术重点实验室基金(No. J20130502)资助

第一作者: 郑少林(1990-), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为微光动态场景仿真. Email: 350654370@qq.com

导师: 王霞(1972-), 女, 副教授, 博导, 主要研究方向为光电检测技术、光电成像技术等. Email: angelniuniu@bit.edu.cn

收稿日期: 2015-09-05; 录用日期: 2015-12-16

<http://www.photon.ac.cn>

微光夜视仪器是被动成像仪器,主要依靠目标反射的夜天光信息来获取目标信息^[2].在实际使用中,其观察距离、闪烁噪声等性能指标,与实验室内检测到的指标差距较大,给实际使用带来很多不便,无法满足使用需求.因此,如何在室内模拟实际夜间环境及夜天光来检测并提高微光夜视系统性能,对理论计算提供指导和修正,具有非常重要的意义.

美国等西方一些发达国家建立的微光夜视器件及仪器性能检测实验室可实现对微光夜视仪器的实战条件模拟.但由于技术保密的缘故,至今未见其全面报道.对野外夜天光的模拟主要从光度和光谱两方面进行,以检测微光夜视器件及仪器的实际性能.

我国传统微光夜视系统的性能测试采用标准 A 光源(2856K 色温),通过野外试验来修正,但是实验室内测得的夜视仪性能和在野外的实际性能有较大差距^[3].文献[4-5]对夜天光的光度特性^[4]及典型夜天光的光谱分布^[5]进行了模拟,实现了在实验室内模拟使用微光夜视仪器的实际环境,从而为在室内精确测量微光夜视器件及仪器的性能提供基础,但是这些研究大多只是粗略的模拟,光谱匹配准确度不高.本文提出了基于遗传算法的光谱构造技术,对夜天光谱进行模拟,以达到更高的模拟准确度.

1 夜天光模拟技术

1.1 光谱的模拟范围

微光夜视仪的光学结构和望远观察系统很近似,它的核心器件是像增强器.微光夜视仪采用微光增强技术,有效地获取微弱的目标信息,实现在较低照度条件下对目标的观察.

微光像增强器主要组成部分是光阴极、电子光学系统和微通道板以及荧光屏.像增强器的功能实现主要通过 3 个过程,即微弱的可见光图像经过光电阴极转换成电子图像;电子图像通过特定的静电场或电磁场聚焦并获得能量增强;电子图像增强后会轰击荧光屏,而发出与入射图像强弱相应的被增强了的可见的光学图像^[6].

影响微光像增强器光谱特性的因素很多,但是主要由输入图像的光谱成分、光阴极光谱灵敏度、荧光屏以及人眼和光阴极的匹配程度决定.因此,模拟光源的光谱范围由微光像增强器的光阴极光谱响应范围和荧光屏的光谱响应范围决定.目前,微光像增强器的光阴极和荧光屏的光谱响应范围普遍为 0.3~0.8,具有红外延伸的夜视仪响应范围能够扩展到 1.所以用于微光夜视仪性能研究的模拟光源光谱范围选取为 0.3~1.0^[7].

1.2 夜天光光谱分析

夜天光的形成非常复杂,主要是指夜晚天空各种

自然辐射源的辐射综合,夜天光辐射不但含有大量的可见光外,而且包括有丰富的近红外辐射.这些都是被微光夜视技术关心和利用的区域^[8].

有月亮和没有月亮的情况下,夜天光的光谱特性完全不同^[9-10].图 1 是典型的满月光和明亮星光的光谱分布^[11-12].从图 1 中可以看出,满月光的强度和明亮星光的强度相差比较大,尤其是在 0.3~1.0 范围内,满月光强度几乎是星光强度的百倍.因此在有月亮的情况下,夜天光的辐射分布主要由月光的分布决定.在没有月亮的情况下,夜天光的主要由直射星光、散射星光以及大气辉光等组成,但是在所关注的 0.3~1.0 的波段内,直射星光和散射星光的光谱强度远大于大气辉光的辐射强度,所以在 0.3~1.0 光谱范围内,微光夜视仪器在没有月光的情况下,主要依靠直射星光和散射星光来获取目标.

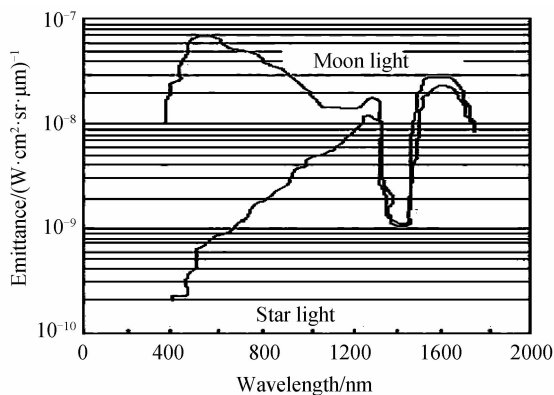


图 1 夜天光谱分布

Fig. 1 Night sky radiation

由于环境条件变化非常快,夜天光光谱分布非常复杂,不可能对各种条件下的夜天光进行实时的精确模拟.因此,室内模拟夜天光选取两种典型的情况,作为对夜天光的近似模拟,以满足室内测量微光夜视仪真实性能的需求.

1.3 光源的选择

溴钨灯是目前比较常见的电光源之一.由于它的光谱分布范围广,性能稳定,可重复性强,并且在 0.3~1 光谱范围内的辐射分布与星光辐射分布比较接近,因此采用溴钨灯作为光源拟合夜天光.为了实现均匀照明,光源采用积分球,光源及其控制部分由 FLD-03-100 积分球(300 mm,开孔 80 mm)+溴钨灯+直流稳流稳压电源+可调光阑组成.

2 简单的夜天光光谱拟合

图 2 是实验测得的积分球光源在 0.3~1.0 范围内的相对功率谱分布.为了模拟月光和星光光谱,在光源后面放置模拟月光和星光光谱的滤光片^[13],其表达式为

$$\tau(\lambda) = \frac{S^*(\lambda)}{S(\lambda)} \quad (1)$$

式中, $\tau(\lambda)$ 表示滤光片的透过率曲线, $S(\lambda)$ 是光源的光谱曲线, $S^*(\lambda)$ 是夜天光的光谱曲线。

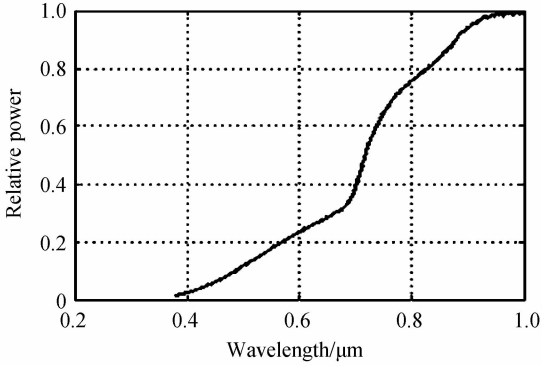


图2 积分球光源的相对功率谱分布

Fig. 2 The relative power spectrum distribution of integrating sphere light source

经过计算得出,模拟满月光和星光的滤光片透过率曲线分别如图3、图4。

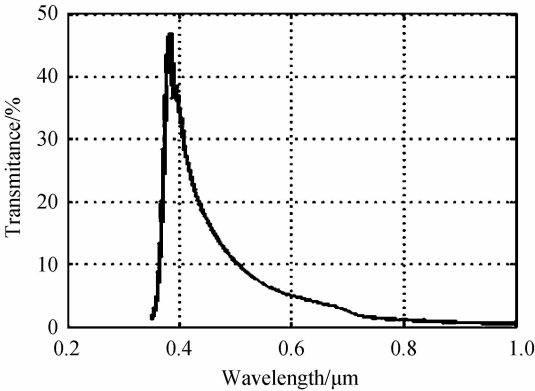


图3 模拟满月光的滤光片透过率曲线

Fig. 3 Filter transmittance curves for simulation of moon

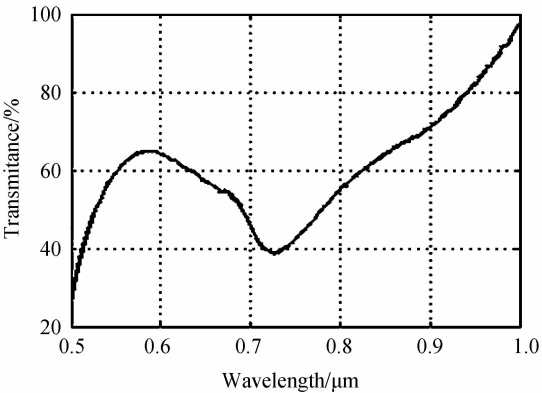


图4 模拟星光的滤光片透过率曲线

Fig. 4 Filter transmittance curves for simulation of star

经过调研发现,江苏海安县教育光学镜片厂的SSB200和LB11的透过率曲线分别和上述的曲线近似,用光谱仪测得的光源经过滤光片的光谱曲线如图5、图6。

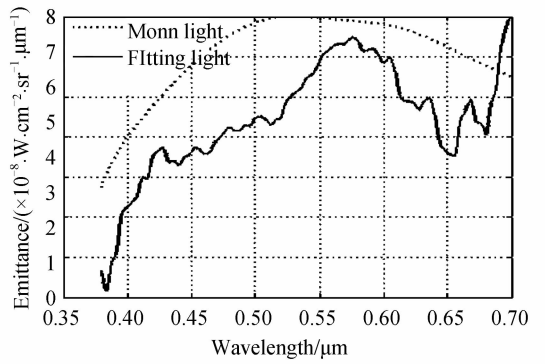


图5 月光拟合曲线

Fig. 5 Moon light fitting curve

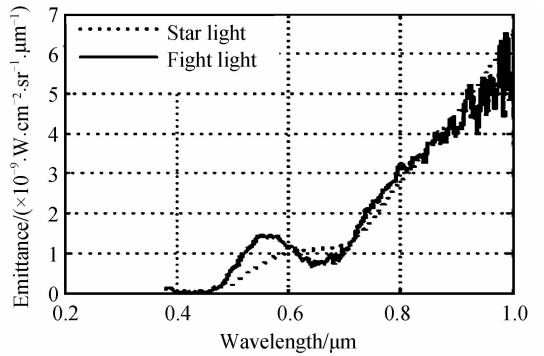


图6 星光拟合曲线

Fig. 6 Moon light fitting curve

从实验结果可以得出,用单片滤光片拟合夜天光谱,对于明亮星光的模拟效果不错,但是对于满月光模拟,只在0.38~0.7的范围内近似接近真实的夜天光谱,不能更好地满足室内测试微光夜视仪性能的要求。

3 基于遗传算法的光谱拟合

3.1 光谱构造理论

在色度学中,根据光谱叠加原理,可以得到用滤光片将光源光谱拟合成目标光谱的基本数学模型为^[14]

$$\begin{cases} \sum k_i \tau_i(\lambda) S(\lambda) = S_i(\lambda) \\ \sum k_i \tau_i(\lambda) = \frac{S_i(\lambda)}{S(\lambda)} = \tau_T(\lambda) \end{cases} \quad (2)$$

式中, $S(\lambda)$ 为光源光谱, $S_i(\lambda)$ 为目标光谱, $\tau_i(\lambda)$ 为滤光片的透过率曲线, k_i 为对应滤光片的系数。

构造 $\tau_i(\lambda)$ 的分布矩阵 $\tau_i(\lambda) = (\tau_{11}, \tau_{12}, \tau_{13}, \dots, \tau_{1n})$, 目标透过率矩阵 $\tau_T(\lambda) = (\tau_{T1}, \tau_{T2}, \dots, \tau_{Tm})$, 系数矩阵为 $\mathbf{K} = (k_1, k_2, \dots, k_n)^T$. 当 $n < m$ 时, 矩阵形式为

$$\begin{pmatrix} \tau_1(\lambda_1) & \tau_2(\lambda_1) & \cdots & \tau_{n-1}(\lambda_1) & \tau_n(\lambda_1) \\ \tau_1(\lambda_2) & \tau_2(\lambda_2) & \cdots & \tau_{n-1}(\lambda_2) & \tau_n(\lambda_2) \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \tau_1(\lambda_{m-1}) & \tau_2(\lambda_{m-1}) & \cdots & \tau_{n-1}(\lambda_{m-1}) & \tau_n(\lambda_{m-1}) \\ \tau_1(\lambda_m) & \tau_2(\lambda_m) & \cdots & \tau_{n-1}(\lambda_m) & \tau_n(\lambda_m) \end{pmatrix} \cdot \mathbf{K}$$

$$\begin{pmatrix} k_1 \\ k_2 \\ \vdots \\ k_{n-1} \\ k_n \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \tau_{T1} \\ \tau_{T2} \\ \vdots \\ \tau_{Tm-1} \\ \tau_{Tm} \end{pmatrix} \quad (3)$$

通常情况下,超定方程组式(3)是无解的,但可以求得其近似解.通常求其最小二乘解,使得总体上相对误差达较小.即

$$\| \tau_T - \tau_i K^* \|_2 = \min_{K \in \mathbb{R}^n} \| \tau_T - \tau_i K \|_2 \quad (4)$$

利用残差平方和(RSS)和相关指数(R^2)来评价光谱匹配拟合的效果.残差平方和的定义为

$$RRS = \sum_{i=1}^m (\hat{\tau}_{Ti} - \tau_{Ti})^2 \quad (5)$$

式中, τ_{Ti} 表示目标数据, $\hat{\tau}_{Ti}$ 表示拟合数据.光谱匹配的结果采用相关指数来评价,其公式为

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^m (\hat{\tau}_{Ti} - \tau_{Ti})^2}{\sum_{i=1}^m (\tau_{Ti} - \overline{\tau_{Ti}})^2} \quad (6)$$

式中, $\overline{\tau_{Ti}}$ 是目标滤光片透过率的数学期望.相关指数越接近于1,表明匹配的效果越好.对光谱匹配而言,相关指数越大,匹配的光谱和目标光谱的相似度就越高.

3.2 遗传算法

遗传算法是模拟达尔文生物进化论的自然选择和遗传机理的生物进化过程的计算模型,是一种通过模拟自然进化过程搜索最优解的方法^[15].Michigan大学的J. Holland教授提出了一种简单遗传算法,它由三大模块构成,即编解码、个体适应度评估和遗传运算^[16].该算法求解步骤为:

- 1)随机产生一定规模的十进制编码的初始群体;
- 2)以最小二乘误差平方和为目标,建立适应度函数.遗传算法根据适应度函数值的大小选定一组解,适应函数值越大,则目标值较大的解被选择的可能性就越大,相应的解的质量也越好;
- 3)在适应度的基础上,反复对群体进行交叉组合和变异运算,最后得到满意或最优解.

在本研究中,利用了MATLAB中自带的遗传算法工具箱来解决目标光谱的优化组合问题.其中,根据本课题研究的问题,所设计的适应度函数(约束条件)为

$$\min\{F(k_1, k_2, \dots, k_n)\} = \sum_{j=1}^m \left| \tau_{Tj} - \sum_{i=1}^n \tau_i(\lambda_j) k_i \right|^2 \quad (7)$$

3.3 采用遗传算法匹配夜天光

通过Matlab的遗传算法工具箱计算出式(3)的非负二乘解,即系数矩阵 K ,得出不同滤光片组合的最佳比例(本课题研究采用的是江苏海安县教育光学镜片厂的47种滤光片),数据详见表1,进而对满月和星光光谱进行匹配.

表1 用遗传算法计算出不同滤光片的比例
Table 1 With the genetic algorithm to calculate the proportion of different filter

Filter Type	The optimal matching of star light	The optimal matching of moon light
ZJB320	0	0
ZJB340	0	0
ZJB360	0	0
ZJB380	0	0
QB1	0	0
QB2	0	0
QB10	0	6.89
QB11	0	0
QB16	0	0
QB17	0	0
QB18	0	0
QB19	0	0
LB6	0	0
LB7	0	0
LB8	0	0
LB9	0	0
LB10	0	0
LB11	0	0
LB12	0	0
LB16	34.26	0
LB17	0	0
LB18	0	0
JB1	0	0
JB9	0	0
CB1	0	0
CB2	0	0
HB1	0	0
FB1	1.38	0
GRB1	0	0
GRB3	0	0
TB1	0	0
TB2	0	0
SSB40	0	0
SSB130	0	0
SSB145	0	0
SSB165	0	0
SSB200	27.38	93.11
SJB20	0	0
SJB80	0	0
SJB100	0	0
SJB130	0	0
SJB140	36.97	0
ZAB25	0	0
ZAB30	0	0
ZAB50	0	0
ZAB65	0	0
ZAB70	0	0

按照表中各个滤光片的百分比,选择对应的滤光片,采用镶嵌滤光片法^[16],便可获得如图7和图8所示的光谱拟合曲线.

从图7、图8中可以看出,用遗传算法拟合出的光谱曲线和实际的光谱曲线非常接近,表2是简单拟合

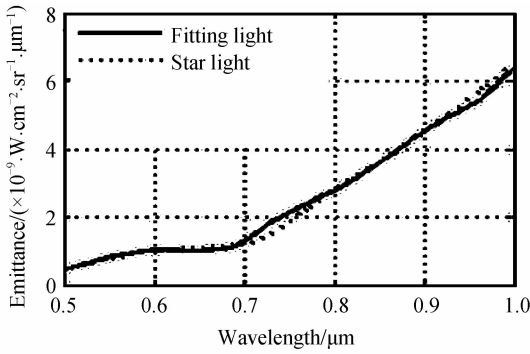


图7 星光拟合曲线
Fig.7 Star light fitting curve

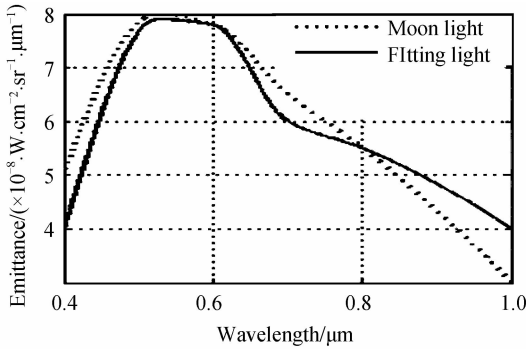


图8 月光拟合曲线
Fig.8 Moon light fitting curve

表2 不同方法拟合光谱的相关指数

Table 2 The related index of different methods for fitting the spectrum

	Simple fitting	Genetic algorithm fitting
Moon light	0.597 1	0.999 2
Star light	0.853 7	0.998 3

和遗传算法拟合两种方法进行光谱拟合的相关指数。

从表2中可以看出,用遗传算法拟合出的夜天光谱和真实的夜天光谱匹配度非常高,远大于简单拟合,并且近似接近于1,能够作为夜视仪性能的室内测试的光源。

4 结论

根据室内测量微光夜视仪性能的需求,采用单片滤光片对夜天光谱进行拟合,但是拟合结果并不理想,因此引进了基于遗传算法的光谱构造理论,采用现有的不同型号的滤光片对夜天光谱匹配,得出不同型号滤光片的比例,实现对满月和晴朗星空两种情况下,夜天光谱的高度拟合。采用简单遗传算法拟合的相关指数远大于简单拟合,近似接近于1,具有很高的光谱匹配度,为室内测量微光夜视仪性能提供了基础。

参考文献

[1] AI Ke-cong. Development and prospect of low-light-level (LLL) night vision technology[J]. *Journal of Applied Optics*,

2006, **27**(4): 303-307.
艾克聪. 微光夜视技术进展与展望[J]. *应用光学*, 2006, **27**(4):303-307.
[2] GUO Hui, XIANG Shi-ming. Review of the development of LLL night vision technology[J]. *Infrared Technology*, 2013, **35**(2): 63-68.
郭晖,向世明,田民强. 微光夜视技术发展动态评述[J]. *红外技术*, 2013, **35**(2):63-68.
[3] FANG Ru-zhang. Low-level- light night vision systems' performance indoor test and field [J]. *Cloud Light Technology*, 1984, **2**(2): 1-4.
方如章. 微光夜视仪的室内测试性能与野外性能的关系[J]. *云光技术*, 1984, **2**(2): 1-4.
[4] XIAO Zuo-jiang, GUO Xiao-xue, ZHU Hai-bin, et al. Research on generating device of infinite low light level weapon sight target simulation[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2015, **44**(3):0312003.
肖作江,郭晓雪,朱海滨,等. 无限远微光瞄具目标模拟发生装置研究[J]. *光子学报*, 2015, **44**(3):0312003.
[5] CHEN Wei. Research on optical system of low-light-level night[D]. Changchun: Changchun University of Science and Technology, 2012:6-7.
陈巍. 微光夜视仪光学系统的研究[D]. 长春: 长春理工大学, 2012 :6-7.
[6] SHI Ji-fang, LI Yu. Night sky radiation simulation for test of low-level- light night vision systems[J]. *Journal of Applied Optics*, 2003, **24**(4):11-13.
史继芳,刘宇. 用于微光夜视系统检测的夜天光模拟[J]. *应用光学*, 2003, **24**(4): 11-13.
[7] 张鸣平,张敬贤. 夜视系统[M]. 北京:北京理工大学出版社, 1993.
[8] LIU Lei, WANG Xin, CHEN Ji-lu. Spectral matching technology of a low-light-level night-vision system with a laser illuminator[J]. *Applied Optics*, 2010, **49**(3): 286-291.
[9] DI Hui-ge, LIU Lei. The research of spectral matching factors under the laser aids[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2006, **35**(2): 214-216.
狄慧鸽,刘磊. 激光助视下,光谱匹配系数的研究[J]. *光子学报*, 2006, **35**(2):214-216.
[10] MONGA J, BHAWE B. Spectral matching considerations in estimating the Field performance of low-light-level imaging systems[J]. *Applied Optics*, 1984, **23**(10): 1628-1631.
[11] BENNETT M, PODLESNY R. Two source simulator for improved solar simulation[C]. IEEE, 1990: 1438-1442.
[12] CAI Ke-jun, Fu Yue-gang, Gu Ping-ping, et al. Night simulation system for low-level-light night vision systems testing[J]. *Infrared Technology*, 2007, **29**(2):102-106.
蔡珂珺,付跃刚,顾平平,等. 用于微光夜视仪性能检测的夜间仿真环境[J]. *红外技术*, 2007, **29**(2):102-106.
[13] GAN Ru-ting, GUO Zhen-ning, LIN Jie-mu, et al. The genetic algorithm in the application of the LED light source spectral matching technology [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2014, **43**(7): 0730003.
甘汝婷,郭震宁,林介木,等. 遗传算法在LED光源光谱匹配技术中的应用[J]. *光子学报*, 2014, **43**(7): 0730003.
[14] JIN Fen. Application research of genetic algorithm in function optimization[D]. Soochow University, 2008:12-19.
金芬. 遗传算法在函数优化中的应用[D]. 苏州:苏州大学, 2008:12-19.
[15] HOLLAND J. Adaptation in natural and artificial systems: an introductory analysis with applications to biology, control, and artificial intelligence[M]. Cambridge: MIT Press, 1992.
[16] 高岳,王霞. 光电检测技术与系统[M]. 北京:电子工业出版社, 2009: 121-122.