

文章编号: 0253-2239(2006)03-0362-5

# 微光景像匹配实时图模拟生成技术研究

祝永坚 陈 钱 王晓璇

(南京理工大学电子工程与光电技术学院, 南京 210094)

**摘要:** 景像匹配实时图模拟生成是导弹制导系统仿真和景像匹配算法验证的关键技术。研究了光照条件、气象条件、像增强型电荷耦合器 (ICCD) 相机特性以及地面光谱反射特性等因素对微光成像的影响, 建立了微光视景像生成的数学模型, 包括: 地面反射特性模型、像增强型电荷耦合器相机特性模型、大气传输模型和噪声模型, 研究了白天与夜间地面反射特性造成的日光图像与微光图像的衬比度差异, 提出了微光景像匹配实时图仿真方案, 并在此基础上研制了一个完整的蕴含 LOWTRAN7 计算内核和像增强型电荷耦合器后段仿真的微光景像匹配实时图生成系统。仿真实验结果说明了该方案的有效性。

**关键词:** 成像系统; 景像匹配; 实时图模拟; 微光成像; 地面光谱反射特性; 像增强型电荷耦合器相机  
中图分类号: TP391.9; TN223 文献标识码: A

## Study on Real-Time Low-Light Level Image Synthesis for Scene Matching

Zhu Yongjian Chen Qian Wang Xiaoxuan

(College of Electronics and Optics, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094)

**Abstract:** Scene matching real-time image synthesis plays an important role in simulation of aircraft navigation and performance evaluation of scene matching algorithm. The factors affecting low-light level (LLL) imaging including the change of illumination, meteorology, the characteristics of ICCD camera and the ground spectral reflectance are investigated. Mathematical models of LLL scene simulation are established, including ground reflectance model, ICCD camera model, atmosphere transmission model and noise model. The contrast difference between daytime image and LLL image is studied and a LLL image simulation scheme is proposed. Then a whole real-time LLL image matching synthesis system oriented to ICCD camera is developed using the computing kernel of LOWTRAN7. Simulation result shows this scheme is valid.

**Key words:** imaging system; scene matching; real-time image synthesis; low-light level imaging; ground spectral reflectance; ICCD camera

## 1 引 言

景像匹配技术在飞机辅助导航、远程武器或精确制导武器系统的制导以及光学或者雷达图像的目标搜索与定位等军事领域具有重要的应用价值。而景像匹配实时图模拟生成是制导系统仿真和景像匹配算法验证的关键技术, 因此成为国内外有关机构竞相开展的热门研究课题。目前国内主要停留在理论研究阶段, 例如文献[1]给出了一个基于数字高程图模拟生成数字景像图的框架, 但没有论述传感器成像的后段仿真; 文献[2]提出了传感器后段仿真的

成像链模型, 但对于描述各个环节空间响应的调制传递函数 (MTF) 链成像特性论述甚少; 文献[3]建立了比较完整的像增强型电荷耦合器 (ICCD) 相机模型, 但没有考虑微光条件下的地面反射特性以及由此带来的微光图像与日间图像的衬比度的改变。

本文旨在研究微光夜视条件下航空成像过程的虚拟仿真<sup>[4]</sup>, 针对光照条件的改变与地面反射特性的关系以及由此带来的衬比度变化, 通过完整地重现微光成像系统的各个工作环节, 建立了微光成像过程的统一模型。微光成像系统的各个环节都存在一个光

作者简介: 祝永坚 (1981~), 男, 江苏南京人, 南京理工大学电光学院 2002 级博士研究生, 主要从事光电信号处理与数字视频技术、微米与红外图像处理及视景生成等方面的研究。E-mail: zhu\_skykiss@163.com

收稿日期: 2005-05-30; 收到修改稿日期: 2005-09-06

谱匹配的问题,如不同景物有各自的光谱反射曲线,光阴极对于不同波长的光也有不同的光谱量子效率,因此成像过程应该是对光谱的积分。而且微光图像有许多特征,如图像衬比度低、信噪比低、灰度分布比较集中等等,这些因素在建立数学模型的时候必须加以考虑。另外由于微光成像系统的噪声来源比较复杂,时间域随机噪声和空间域随机噪声交织在一起,每个成像环节都会引入噪声,因此必须建立一个噪声模型来描述。据此,本文建立了综合地面反射特性、像增强型电荷耦合器相机特性、大气衰减效应和噪声模型的微光夜视航空成像过程的统一模型,对日间航拍图像进行微光夜视模拟仿真。

## 2 地面反射特性与像增强型电荷耦合器成像模型

夜间与白天最大的区别在于地面受到的光照不同。夜天空的辐射是由各种自然辐射源的辐射综合形成的,月光、星光、大气辉光以及太阳光、月光和星光的散射是形成夜间天空自然光的主要光源。这些统称为夜天空的夜天自然光,除含有可见光成份外,还包括丰富的近红外辐射。有月时月光是夜天光的主要来源;无月时,大气辉光、直射星光和散射星光也是夜天光的主要组成部分。日光的光谱辐射能量主要集中在可见光波段,辐射峰值出现在 400~600 nm 波段之间;月光由于是反射的太阳光,因此与日光有相同的光谱分布;而星光和大气辉光在近红外区增长得很快,峰值在 1000~1300 nm 之间,所以使得夜天光的光谱能量向近红外区偏移,满月时辐射峰值大约出现在 700~800 nm 之间,无月时则峰值出现在 1000 nm 之后。由于照明光源光谱分布的不同,致使夜间目标出现不同于白天的特性。

夜间景物的亮度源于景物反射夜天光,取决于本身的表面反射特性。而景物的表面反射特性与波长有关,是入射波长的函数。传统的计算公式中用一个数据表示景物的反射率<sup>[5]</sup>,但这个反射率其实是景物在可见光波段内反射的平均值,用一个平均值来表示景物反射系数,并不能反映出景物固有的反射系数的光谱分布特性。因此,应该采用  $\rho(\lambda)$  光谱反射曲线(见图 1)来描述景物的光谱反射特性,相应的亮度计算公式应为

$$L = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} L(\lambda) d\lambda = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \rho(\lambda) L_N(\lambda) d\lambda, \quad (1)$$

式中  $L$  为景物在零距离视图情况下(即尚未经过大

气传输和衰减)的反射亮度值, $\rho(\lambda)$  为景物的光谱反射率, $L_N(\lambda)$  为夜天光光谱辐射度, $\lambda_1$  和  $\lambda_2$  是光阴极的截止响应波长,目前微光像增强器的光阴极的光谱响应范围基本上都在 300~1000 nm 之间,因此取  $\lambda_1$  为 300 nm,取  $\lambda_2$  为 1000 nm。

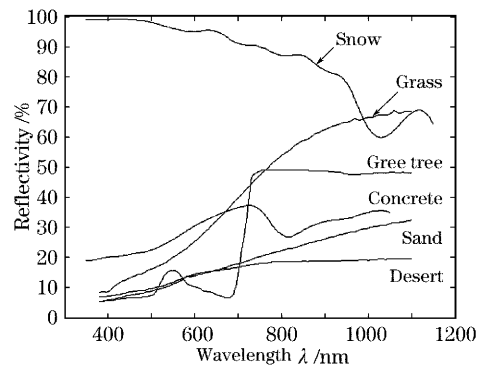


图 1 典型景物的光谱反射特性

Fig. 1 Spectral reflectance of several typical sceneries

由(1)式及图 1 可见,夜间景物衬比度取决于景物所处的不同环境,而且会随着光源光谱分布的改变发生相应的变化。对于夜晚条件下具有不同反射光谱分布的景物,经过积分后有可能具有相同的或相近的信号值,从而降低了输出图像的衬比度。而且夜间景物的光谱反射特性以及夜天光与日光的光谱能量分布的不同使得微光图像的衬比度与日间图像相比发生变化,甚至可能发生反转。就以绿色植物为例,夜天光在红外及近红外区域有着突出强烈的自然辐射,绿色植物在这个光谱范围内的反射非常强烈,在 720 nm 之前绿色植物的反射非常弱,而日光的辐射能量主要集中在 720 nm 之前,因此成像后绿色植物在日间图像中显得比较暗,而在微光图像中显得较亮,发生了衬比度反转。夜间景物成像的衬比度呈现复杂的光谱分布,这是微光视景仿真生成的图像与实际微光图像相比能否逼真的关键。

像增强型电荷耦合器的成像过程是<sup>[6]</sup>:由夜天空的自然微光照射目标,经目标反射的辐射进入光学系统的物镜,物镜把目标成像在位于其焦平面的微光像增强器的光阴极面上,像增强器对目标进行光电转换,电子成像和亮度增强,并在荧光屏上显示目标的增强图像,与像增强器耦合的 CCD 接收荧光屏上发出的光子,把生成的电荷转移出去进行成像显示。成像过程实质上就是目标(或景物)的辐射能(或反射辐射能)照射到光阴极之后,在其敏感的光谱范围内积分的过程,可以用统一的成像模型表示:

$$B = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} L(\lambda) \rho(\lambda) \tau_a(\lambda) \tau_o(\lambda) R_C(\lambda) R_M \eta_S(\lambda) R_{CCD}(\lambda) d\lambda, \quad (2)$$

式中  $B$  为目标景物的亮度值,  $L(\lambda)$  为夜天光的光谱辐射度,  $\rho(\lambda)$  为目标景物的光谱反射率,  $\tau_a(\lambda)$  为大气的光谱传输特性,  $\tau_o(\lambda)$  为成像光学系统的光谱透过率,  $R_C(\lambda)$  为光阴极的光谱响应率,  $R_M$  为微通道板(MCP)的增益,  $\eta_S(\lambda)$  为荧光屏的光谱量子效率,  $R_{CCD}$  为 CCD 阵列的光谱转移效率,  $\lambda_1, \lambda_2$  为光阴极的上下响应截止波长。由(2)式可见不同的成像器件、不同材料的光阴极在相同气象条件下对同一景

物成像, 所得图像的亮度和衬比度也各不相同。本文  $\lambda_1$  取 300 nm,  $\lambda_2$  取 1000 nm。

日光图像和微光图像的差别, 归根究底, 是由于日间和夜间照明光源辐射度的不同, 进而造成成像积分亮度值的不同。而亮度值与像素灰度值是成比例对应关系的, 因此微光视景生成的灰度计算模型则可写为

$$G_{\text{night}} = G_{\text{day}} \cdot \frac{B_{\text{night}}}{B_{\text{day}}} = G_{\text{day}} \cdot \frac{\int_{\lambda_{1N}}^{\lambda_{2N}} L_N(\lambda) \rho(\lambda) \tau_a(\lambda) \tau_o(\lambda) R_C(\lambda) R_M \eta_S(\lambda) R_{CCD}(\lambda) d\lambda}{\int_{\lambda_{1D}}^{\lambda_{2D}} L_D(\lambda) \rho(\lambda) \tau_a(\lambda) R_{CCD}(\lambda) d\lambda} + \text{noise}, \quad (3)$$

式中  $G_{\text{night}}$  为微光图像的像素灰度值,  $G_{\text{day}}$  为日间图像的像素灰度值,  $B_{\text{night}}$  为微光条件下景物的亮度值,  $B_{\text{day}}$  为日间景物的亮度值。  $\lambda_{1N}$  和  $\lambda_{2N}$  是夜间使用得像增强型电荷耦合器相机的光阴极的截止响应波长,  $\lambda_{1D}$  和  $\lambda_{2D}$  是日间使用的相机的光阴极的截止响应波长。本文假设日间和夜间使用同一个像增强型电荷耦合器相机, 因此  $\lambda_{1N}$  和  $\lambda_{1D}$  均取 300 nm,  $\lambda_{2N}$  和  $\lambda_{2D}$  均取 1000 nm。

### 3 大气传输模型

辐射在大气这种复杂的光学介质中传输时, 将产生折射、吸收和散射等物理过程而导致辐射能的衰减。大气衰减量与辐射波长、光程长度及大气物理特性等因素有关。由于大气的密度很小, 大气的折射比与真空折射比非常接近, 它对成像系统的影响主要在长距离探测和遥感中较为明显, 对微光成像系统的影响可以忽略不计。对于微光成像系统产生的影响主要是吸收和散射, 它使景物信息衰减, 图像边沿模糊<sup>[7]</sup>。但是, 大气的光学特性是非常复杂的。用气象数据来预测大气透射率及其光谱特性十分困难, 因为大气总是处于不断变化中, 很多参量难以精确测定。而要进一步考虑成像的大气效应则更难, 因为自然环境下的成像不仅取决于大气透射率, 而且取决于大气背景辐射、大气湍流以及气溶胶的多次前向散射效应, 还与大气温度梯度场、飞行器周

围的空气动力学流场等因素有关。目前大部分是用经验公式或半经验公式来近似计算大气传输特性。美国空军地球物理实验室的 LOWTRAN 7 是比较常用的大气传输/辐射计算软件。它可以计算近紫外到毫米波段在不同大气和气象条件下的传输特性。借助该软件, 可以模拟大部分典型气象条件下的大气传输特性, 因而可以建立不同的气象模型。

### 4 噪声模型

像增强型电荷耦合器系统, 由于其工作在微弱照度条件下, 因而所获取的视频信号具有很低的信噪比, 由此产生的输出图像没有足够的分辨力和衬比度, 并且附加有明显的图像噪声。输出图像噪声是其各组成部分各种类型噪声的综合, 也是整个系统时间域噪声与空间域噪声的综合<sup>[9]</sup>。图像噪声可以按照时空域随机过程统一描述。图像信号可以描述为  $S(j) = S_{\text{obj}}(j) + N_o(j) \cdot G + N_r(j) + N_b(j)$ , (4) 式中  $S(j)$  是从 CCD 阵列中读出的第  $j$  个像素值,  $S_{\text{obj}}(j)$  是由物体像产生的有效信号,  $N_o(j)$  为光阴极的光电转换噪声,  $G$  为微通道板(Micro channel plate, MCP)电子增益,  $N_r(j)$  是 CCD 读出噪声,  $N_b(j)$  是背景噪声(无信号时的探测器响应)。

像增强型电荷耦合器的噪声主要由像增强器部分和 CCD 部分产生, 而对成像质量影响更大的是像增强器的噪声, 主要表现为粒子噪声, 包括光阴极的

量子噪声和荧光屏输出的光子涨落噪声,以及微通道板倍增电子的涨落噪声,近似服从泊松分布<sup>[10]</sup>。

光阴极的电子涨落噪声产生的主要原因是半导

体中载流子的产生、复合等过程的无规性和随机性引起光生载流子浓度瞬时值的涨落,其统计规律服从泊松分布。其产生的噪声可表示为

$$N_C = \sqrt{N_{C1}^2 + N_{C2}^2 + N_{C3}^2} = \sqrt{(\sqrt{\bar{n}_p} A \tau \eta_C)^2 + (\sqrt{\bar{n}_p} A \tau \eta_C)^2 + (\sqrt{\bar{n}_d} A \tau \eta_C)^2}, \quad (5)$$

式中  $\eta_C$  为光阴极的量子效率,  $\bar{n}_p$  是光阴极单位时间单位面积上输入的平均光子数,  $\bar{n}_d$  为单位时间单位面积上平均暗发射电子数。

微通道板二次电子倍增产额符合玻利亚分布,其噪声为

$$N_m = \sqrt{(\bar{n}_p + \bar{n}_d) \eta_C \eta_m P_0 \left[ \left( \frac{1+b\delta}{\delta} \right) \left( 1 + \frac{1}{\delta P - 1} \right) + 1 \right]} \cdot G, \quad (6)$$

式中  $\eta_m$  是微通道板的量子效率,  $G$  为平均量子增益,  $P_0$  是入射电子能倍增的几率,取各级二次倍增电子的平均值都相同为  $\delta$ ,其再次倍增的概率为  $P$ ,  $b$  取决于玻利亚分布的特征,  $b$  为 0 时为泊松分布,  $b$  为 1 时为弗里分布。

荧光屏量子转换效率本身也存在随机性,由实测和理论分析证明,其概率分布也服从泊松分布,其噪声可表示为

$$N_s = \sqrt{(2\bar{n}_p + \bar{n}_d) \eta_C \eta_m P_0 G \eta_s}, \quad (7)$$

式中  $\eta_s$  为荧光屏的平均量子转换效率。

CCD 的读出噪声主要包括散粒噪声和转移噪声。由于各电荷包中的涨落独立无关,所以散粒噪声是白噪声。若设电荷包中光生载流子的总数为  $n_1$ ,则由  $n_1$  的随机变化而产生的散粒噪声为  $N_1 = (n_1)^{1/2}$ ; CCD 中还包括热生载流子,设其总数为  $n_2$ ,则由其引起的散粒噪声为  $N_2 = (n_2)^{1/2}$ ,那么,总的散粒噪声为

$$N_n = \sqrt{n_1 + n_2}. \quad (8)$$

CCD 的转移噪声来源于转移损失,界面态俘获及体内陷阱俘获。转移噪声可表示为

$$N_{\pi} = \sqrt{2\epsilon g (n_1 + n_2)}. \quad (9)$$

将各个环节的噪声转换到输出上之后,得到系统整体噪声的表达式为

$$N = [(N_C G \eta_{CCD})^2 + (n_m \eta_{CCD})^2 + (N_s \eta_{CCD})^2 + N_n^2 + N_{\pi}^2]^{1/2}, \quad (10)$$

式中  $\eta_{CCD}$  为 CCD 的量子效率,  $N_C$  为光阴极的电子涨落噪声,  $N_m$  为微通道板电子倍增噪声,  $N_s$  为荧光屏量子转换噪声,  $N_n$  为 CCD 的散粒噪声,  $N_{\pi}$  为 CCD 的转移噪声。

### 4 仿真过程与结果

基于上述模型,可实现微光夜视航空图像的视景

生成和模拟仿真。整个仿真系统采用 Visual C++ 实现,将大气仿真模型 LOWTRAN7 的计算内核转化为动态链接库,嵌入到仿真系统中,计算大气的衰减系数。其软件流程如图 2 所示。

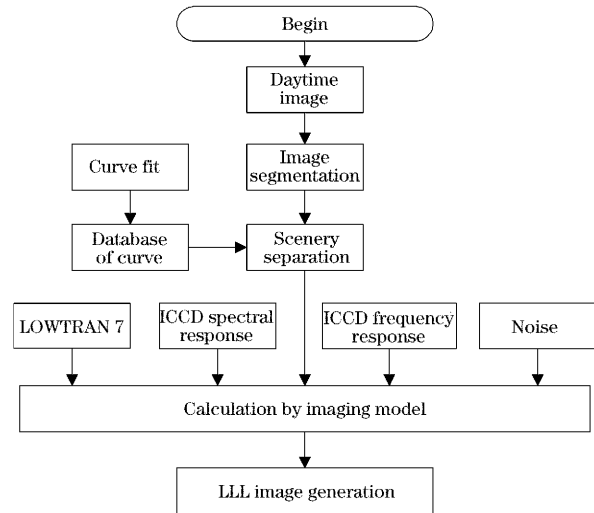


图 2 微光图像仿真流程

Fig. 2 Procedure of low light level image simulation

仿真过程主要包括如下关键步骤:

1) 仿真初始化。初始化步骤主要包括设置天气条件、大气参量、光照条件、像增强型电荷耦合器参量等。

2) 图像分割和景物反射率赋值。运用自己编写的“索套”工具从输入的原始日间图像中勾选出不同景物并用右键对景物进行反射率赋值。景物的反射率模型是由曲线拟合得到的波长的函数。

3) 调用光照模型,生成景物反射零距离视图。目前有三种光照模型:满月光、无月星光和闪光灯照射。步骤 1) 中选择其中一种模式,接下来就调用其对应模型的光谱辐射函数,与步骤 2) 中赋予的相应的反射率进行积分计算,生成景物反射的零距离视图。

4) 调用大气模型生成到达镜头前的景物亮度图像。通过步骤 1) 中设置的大气参量调用 LOWTRAN 进行计算, 使得步骤 3) 生成的景物反射零距离视图经过大气衰减, 生成镜头前景物亮度图像。

5) 调用像增强型电荷耦合器模型和噪声模型进行后段仿真, 生成微光仿真图像。

图 3 给出了原始日间图像(a1)、实拍夜间图像(b1)和生成的微光夜视图像(c1)。图 3(a2), (b2)

和(c2)为分别对应于(a1), (b1), (c1)的直方图。生成的微光图像的光照条件为晴朗月光下, 大气条件为中纬度夏季无气溶胶和无云雨模式下, 飞行高度 300 m, 像增强型电荷耦合器参量不便给出。由图中可以看出生成的微光图像与日间图像相比衬比度、分辨力以及平均亮度值均有明显的下降, 表现在直方图上就是灰度范围较为集中, 并且中心向低灰度值方向偏移。

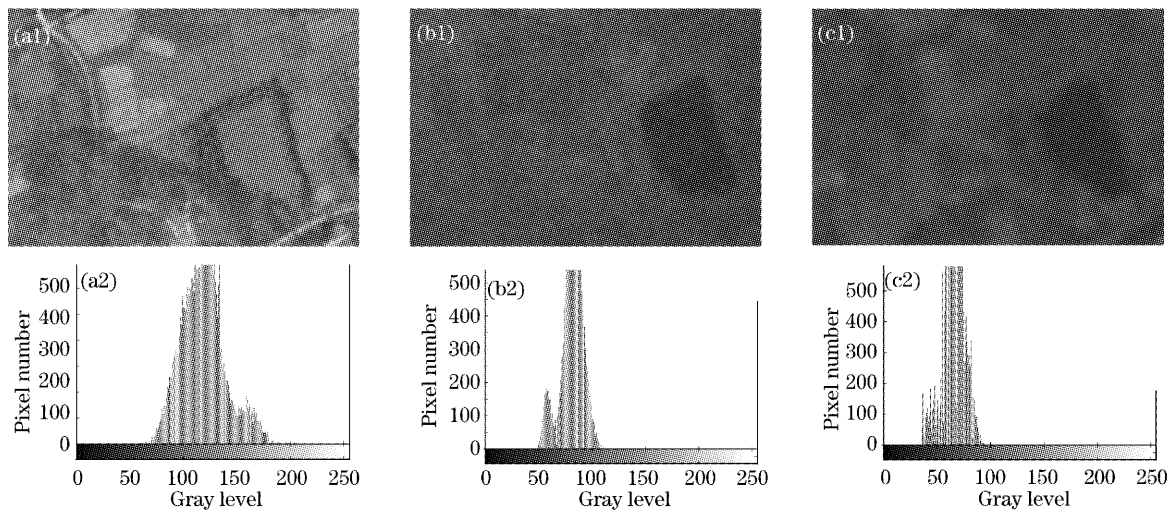


图 3 实拍日光图像、实拍微光图像与生成微光图像的对比

Fig. 3 Comparison of original daytime image, low light level image and generated low light level image

## 6 结 论

本文从微光图像的成像过程出发, 建立了成像过程各个环节的工作模型。并且针对日光与夜天光谱分布的不同以及地面景物的光谱反射特性使得微光图像与日间图像的衬比度不同甚至反转这一特点, 提出了基于地面光谱反射特性的由日光图像生成微光图像的微光视景生成技术, 并开发了微光景像匹配实时图生成系统, 对提高夜间导弹制导的精确性起到了积极有效的作用。本文的进一步工作包括研究如何自动分割图像并自动对景物加以识别和赋值, 研究地面灯光对微光成像的影响以及闪光灯后向散射对成像的影响, 这还需要大量的基础研究工作。另外, 对于生成图像仿真效果的评价, 也是一个需要理论研究和实践验证的重要课题。

## 参 考 文 献

- Zhang Tianxu, Hu Bo. Digital scene image synthesis[J]. *J. Astronautics*, 1999, **20**(2): 93~98 (in Chinese)  
张天序, 胡 礴. 数字景像图的计算机模拟生成[J]. *宇航学报*, 1999, **20**(2): 93~98
- Wang Gang, Yu Bingxi. Study on scientific visualization of earth remote sensing bases on imagery simulation [J]. *J. System*

*Simulation*, 2002, **14**(6): 756~760 (in Chinese)

王 刚, 禹秉熙. 基于图像仿真的对地遥感过程科学可视化研究 [J]. *系统仿真学报*, 2002, **14**(6): 756~760

- Xiao Liang, Wu Huihong, Tang Shuchun *et al.*. Modeling and simulation of real-time image synthesis under different weathers for scene matching[J]. *J. System Simulation*, 2005, **17**(2): 378~383  
肖 亮, 吴慧中, 汤淑春 等. 全天候景像匹配实时图模拟生成的建模与仿真[J]. *系统仿真学报*, 2005, **17**(2): 378~383

- Yang Xiaogang, Miao Dong, Cao Fei. A practical scene matching simulation method [J]. *J. System Simulation*, 2004, **16**(3): 363~369 (in Chinese)

杨小冈, 缪 栋, 曹 菲. 一种实用的景像匹配仿真方法[J]. *系统仿真学报*, 2004, **16**(3): 363~369

- Zhang Baoming. *Introduction to Imaging System Analysis* [M]. Beijing: Defense Industry Press, 1992 (in Chinese)

张保民. 成像系统分析导论[M]. 北京: 国防工业出版社, 1992

- Bai Lianfa, Chen Qian, Kong Jie *et al.*. Fusion technology for infrared and low light level images[J]. *J. Infrared Millim. Waves*, 1999, **18**(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, **18**(1): 47~52

- Wu Ying, Wang Qingbao, Yu Chunyu. Effect of external factors on low light level image[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2002, **31**(3): 225~228 (in Chinese)

武 英, 王庆宝, 喻春雨. 外界因素对微光图像的影响[J]. *红外与激光工程*, 2002, **31**(3): 225~228

- Bai Tingzhu, Li Na. Research of digital simulation for low-light-level night vision imaging system[C]. *Proc. SPIE*, 2000, **4222**: 100~104

- Emmett J. Ientiluuci, Scott D. Brown. Multispectral simulation environment for modeling low-light-level sensor systems [C]. *Proc. SPIE*, 1998, **3434**: 10~19

- Zou Zhengfeng, Lu Hansheng, Bai Tingzhu *et al.*. Simulation of quantum noise in the low-light-level imaging system [J]. *J. Beijing Institute of Technology*, 2001, **10**(2): 186~190