

文章编号: 100124322(2004)0921111205

微光电视成像系统表征方法^X

王晓蕊^{1,2}, 张建奇¹, 冯卓祥², 解卫博¹

(1. 西安电子科技大学 技术物理学院, 陕西 西安 710071;

2. 西安应用光学研究所, 陕西 西安 710100)

摘 要: 在分析微光电视成像系统的基础上, 提出了适用于微光电视成像系统仿真所用的微光场景图像数据的要求及生成方法; 针对第二代近贴聚焦系统和第三代像增强系统, 建立了微光电视成像系统的能量增益理论模型; 引入 3 维噪声理论模型表征了微光成像系统的噪声; 最后, 提出了微光电视图像噪声抑制算法的评价方法。仿真结果表明: 经微光系统传递后, 图像中的高频信息变模糊, 加入噪声后, 信噪比降低; 而经过 5 帧平均算法后的图像质量明显改善, 对比度增加。

关键词: 微光电视系统; 能量传递方程; 调制传递函数; 3 维噪声模型

中图分类号: TN223

文献标识码: A

随着微光成像技术在夜视、光学高速摄影、光子探测和自适应光学等领域的广泛应用, 有效评价微光成像系统的图像质量和性能, 设计高性能的微光成像系统成为必然要求。近年来, 研究人员开展了微光成像系统的仿真研究, 建立了多种理论模型^[1~5]。通过分析发现, 这些模型主要从系统的空间线性传递特性和噪声特性两方面进行了仿真, 没有考虑系统参数, 如光学系统物理参数、光电阴极灵敏度, 以及电子光学近贴聚焦、MCP 等增益参数对信号增益特性的影响, 也没有考虑非线性因素——图像处理算法对图像质量的影响。而完整的微光电视 (LLL TV) 系统仿真模型应包含辐射信号能量的增益传递特性模拟、线性空间调制模糊效应模拟、噪声特性模拟和信号处理算法模拟等模块。为此, 针对以第二代近贴像增强器或第三代像增强器为核心的微光电视系统, 本文分析了微光成像系统信号能量增益特性, 提出了场景数字图像数据的要求及生成方法; 建立了微光电视系统的能量增益理论模型; 利用调制传递函数表征了系统的空间分辨率传递特性; 引入 3 维噪声分析方法模拟系统的噪声; 研究了图像处理算法对系统噪声抑制的模拟方法; 建立了微光成像系统的数字仿真模型。

1 仿真思想及实现方法

要建立微光电视成像仿真模型, 就应全面了解影响微光电视成像质量的各种因素, 包括夜间目标和背景的光学特性、大气环境和微光成像系统组成部分的物理效应, 并构建准确的数学模型, 采用有效的方法综合表征系统的各种特性。图 1 表示微光电视成像系统原理, 其实现方法是: 首先生成微光场景图像, 然后利用能量传递方法模拟系统各组成部分对系统成像的增益效果; 再把微光成像系统看成线性系统, 利用光学传递函数方法来表征系统各组成模块的空间物理效应; 接着对输入图像作傅里叶变换, 使傅里叶变换频谱图与空间物理效

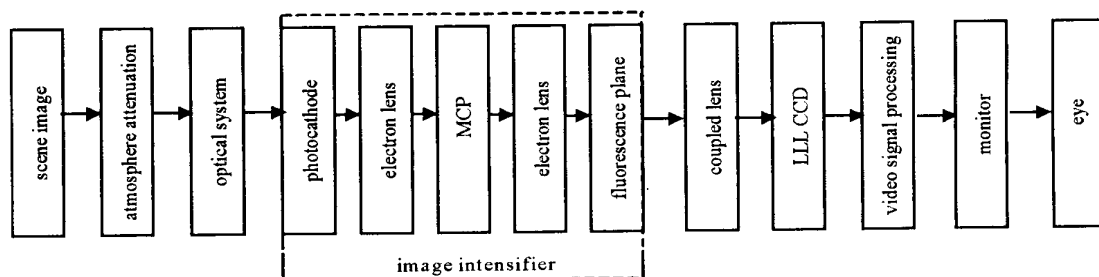


Fig. 1 Diagram of lowlightlevel TV imaging system

图 1 微光电视成像系统原理框图

X 收稿日期: 2003212205; 修订日期: 2004205209

基金项目: 国家自然科学基金资助课题 (60277005); 高等学校博士学科点专项科研基金资助课题 (20030701003)

作者简介: 王晓蕊 (1976—), 男, 博士生, 工程师, 主要从事光电成像系统性能评估、光电系统设计及实时图像处理等研究; E-mail: wx-ru@sohu.com。

应模型作用,然后再作傅里叶反变换;最后引入3维噪声模型表征系统的噪声,并考虑图像处理算法对系统噪声的抑制,得到系统作用后的效果图。图2给出了仿真实现流程。

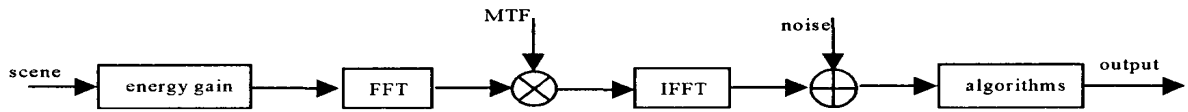


Fig. 2 Flow chart for LLL TV imaging system simulation

图2 微光电视成像系统仿真实现流程框图

2 微光场景图像数据要求及生成方法

微光场景生成图像是微光成像系统仿真的重要部分,准确地表征微光场景是实现微光系统数字仿真的关键。通常,夜天光或月光中目标的反射亮度及其与背景的对比度非常低,且微光成像系统灵敏度比较高,要准确模拟微光成像系统信号增益特性(其模型在3.1节给予推导),就需要使低照度场景输入信号和放大后的信号能在同一个灰度级量化范围内表示。假设夜天光中目标和背景输出也在此灰度级量化范围之内,能够反映夜天光中的目标和背景的对比度层次,就需要将微光场景量化为较高的灰度级动态范围。我们知道,如果生成一种低灰度级、低空间分辨率的场景图像,就不能准确表征微光场景的对比度层次,且增强后的图像会逸出饱和,无法有效仿真微光成像系统的能量传递特性。

为此,根据仿真的实时性和精度要求,先利用 MultiGen Creator 几何建模工具,建立不同分辨率的 LOD (level of detail) 目标和背景(地形)的几何模型,依据夜天光的亮度和目标背景反射特性,使用 TMM 材料纹理映射技术,为建立的模型设定材料信息(该材料信息决定了模型各部分的辐射特性),然后使用视景仿真驱动软件 Vega 和其微光模块,计算得到多级(高于10位)微光实时场景图像,作为微光成像系统数字仿真的输入。本文针对 10^{-3}lx 照度下的夜天光生成了微光图像,微光场景仿真图像如图4(a)所示。

3 微光成像系统建模

分别利用能量传递方法、线性系统频谱理论和3维噪声模型对微光成像系统的增益特性、空间分辨率传递特性和噪声特性完成建模,并在仿真图像系列的基础上模拟了数字图像处理算法对噪声的抑制效果。

3.1 信号能量增益特性建模

根据微光成像系统各环节对目标的反射能量的逐级传递,推导了微光电视成像系统的能量传递公式。假设夜天光的辐照度为 E_a ,目标为朗伯反射体,则目标反射后的光亮度 L_a 为

$$L_a = \rho_a E_a / \pi \quad (1)$$

式中 ρ_a 为目标反射系数,经大气衰减和物镜成像系统后成像于光电阴极输入面上的目标辐照度 E_k 为

$$E_k = \tau_o \left(\frac{D}{f} \right)^2 L_a r \quad (2)$$

式中: D 为光学系统有效孔径; f 为光学系统焦距; τ_o 为光学系统透射率; σ 为大气消光系数; r 为目标与成像系统间的距离。经过光电2电光转换后,成像器件荧光屏输出的目标光亮度 L_p 为

$$L_p = G E_k \quad (3)$$

式中 G 为器件亮度增益。令器件的电子光学放大倍数为 m ;光电阴极灵敏度为 S_k ,单位 $\mu\text{A}/\text{W}$;电子透镜1和电子透镜2的工作电压分别为 V_1, V_2 ,单位 V ;微通道板(MCP)的增益为 G_{mcp} ;荧光屏光视效能为 K_p ,单位 lm/W ,则可证明

$$G = S_k (V_1 + V_2) G_{\text{mcp}} K_p / m^2 \quad (4)$$

经目镜(耦合透镜)传递到人眼处的目标光亮度

$$L_e = \tau_e L_p \quad (5)$$

式中 τ_e 为目镜或耦合透镜的透射率。再经过微光 CCD 响应、视频电路处理和显示器后的光亮度为

$$L_m = L_e R_{\text{CCD}} G_v K_m \quad (6)$$

式中: R_{CCD} 为探测器响应率,单位为 V/W ; G_v 为视频信号放大倍数; K_m 为显示器的光视效能,单位为 lm/W 。综合(1)~(6)式,可得

$$L_m = (1/4 m^2) \cdot a E_a (D/f)^2 \cdot \sigma \cdot S_k (V_1 + V_2) G_{mcp} K_p \cdot e R_{CCD} G_v K_m \tag{7}$$

3.2 空间分辨率传递特性建模

调制传递函数是分析光电成像系统空间频率调制特性的有效方法。用 MTF 法仿真微光成像系统空间频率信息的传递,其思想是:把微光电视成像系统近似作为线性系统,利用不同的 MTF 表征系统各个组成环节的空间调制传递特性,系统总的传递函数为各个组成单元的 MTF 的乘积,使系统 MTF 与微光场景图像的傅里叶变换频谱图相乘,然后作傅里叶反变换,得到微光电视成像系统的输出图像。微光电视成像系统包括光学系统、光电阴极、电子透镜 1、MCP、电子透镜 2、荧光屏、耦合透镜、CCD、视频处理电路和显示器,其系统传递函数 MTF_{sys} 为

$$MTF_{sys} = MTF_{01} MTF_{cath} MTF_{e1} MTF_{mcp} MTF_{e2} MTF_p MTF_{02} MTF_{CCD} MTF_{ele} MTF_m \tag{8}$$

各组成部分的调制传递函数表达式见文献[6],本文不再详细叙述。

3.3 系统噪声模拟

在微光成像过程中,噪声的影响非常明显,噪声的模拟是微光成像系统仿真中的一个重要部分。微光像增强系统的噪声主要来源于 3 个方面:像增强管的噪声、CCD 噪声和放大电路噪声。像增强管的噪声主要来自于光子传输过程、MCP 的二次电子倍增过程的随机性质和荧光粉的荧光过程,而光子传输过程中产生的噪声包括 3 个部分:输入图像固定光子噪声、光电子发射过程中存在的噪声和光电阴极暗电流。这 3 种噪声都是量子噪声,服从 Bossion 分布。CCD 噪声主要包括像增强管的输出引起的量子噪声、CCD 暗电流散粒噪声和电路读出噪声。由于像增强管产生的噪声要比 CCD 噪声和放大电路噪声强得多,因此后两种噪声可忽略。

微光电视系统输出图像噪声是其各个组成部分各种类型噪声的综合,也是整个系统时间域和空间域噪声的综合。为了准确表征微光成像系统的各种类型噪声,本文引入了红外成像系统噪声分析采用的 3 维噪声理论模型^[7],该模型把噪声分成 8 个部分,这 8 个部分把时空噪声与 3 维坐标联系起来。3 维噪声模型表达式为

$$U(t, \theta, h) = S + N_T(t) + N_V(\theta) + N_H(h) + N_{TV}(t, \theta) + N_{TH}(t, h) + N_{VH}(\theta, h) + N_{TVH}(t, \theta, h) \tag{9}$$

式中: $U(t, \theta, h)$ 代表实验数据的总值,是时间、空间垂直方向和水平方向的函数; S 是所有图像数据的平均值,它与信号输入(固定平均背景)的响应有关;其余各项是用以表征沿 3 维方向具有特殊性能的 7 种类型的噪声。

由于微光电视系统成像过程是并行传输的,且采用 CCD 接收,因此微光成像系统的噪声在 3 维噪声模型中主要表现为 $N_{VH}(\theta, h)$ 和 $N_{TVH}(t, \theta, h)$ 两个分量,即固定图样噪声和随机噪声。两个噪声分量通过计算或测量得到,依据噪声的随机分布类型,产生随机数据点;利用图像生成技术,进行灰度量化的,产生噪声图像,实现噪声的模拟。

3.4 微光系统数字图像算法的仿真

微光图像的缺点是对比度差,信噪比低,对所有微光图像的处理都是围绕着增强对比度和提高信噪比而展开的,并出现了多种微光图像噪声抑制算法:如 2 维直方图拉伸,多帧平均、多点校正算法、空时域匹配滤波器^[8]等。为了有效评价这些算法对微光电视图像质量的改善,定量评价其对系统作用距离的扩展,我们根据系统的工作环境要求,利用微光场景生成方法产生微光场景,并考虑到系统的能量增益特性、空间调制特性、噪声特性,生成微光系统输出场景图像;然后根据系统的方位角、视场大小、目标相对微光成像系统的距离、目标运动轨迹,利用图像截频技术获取与系统工作帧频相对应的场景图像序列,建立不同环境下的微光场景图像序列库,并作为图像处理算法的输入序列图像;最后,利用人眼观察图像算法作用前后的微光图像,定性分析其对微光图像的改善效果,或利用对比度的统计分析法,定量表征算法作用前后的微光图像序列,评价其对图像质量及作用距离的改善,仿真流程如图 3 所示。

我们还可建立图像算法库,根据系统工作环境,通过仿真可有效地选择符合系统需要的最优噪声抑制算法,为算法的优化设计提供参考依据。这将在微光成像系统设计阶段,为微光图像算法仿真评价提供一条有效途径。

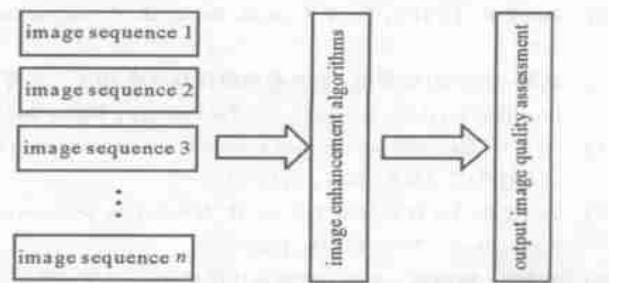


Fig. 3 Flow chart of image algorithm simulation

图 3 微光图像算法的仿真流程

4 微光成像仿真结果

针对典型微光成像系统,图4给出了微光电视成像系统的序列图像中的某一帧仿真结果,(a)为微光场景生成图像,(b)为在(a)基础上的微光电视成像系统能量增益传递仿真,(c)为在(b)基础上的系统空间调制传递特性仿真,(d)为在(c)基础上的微光系统噪声仿真,(e)为在(d)基础上的5帧平均算法的仿真。

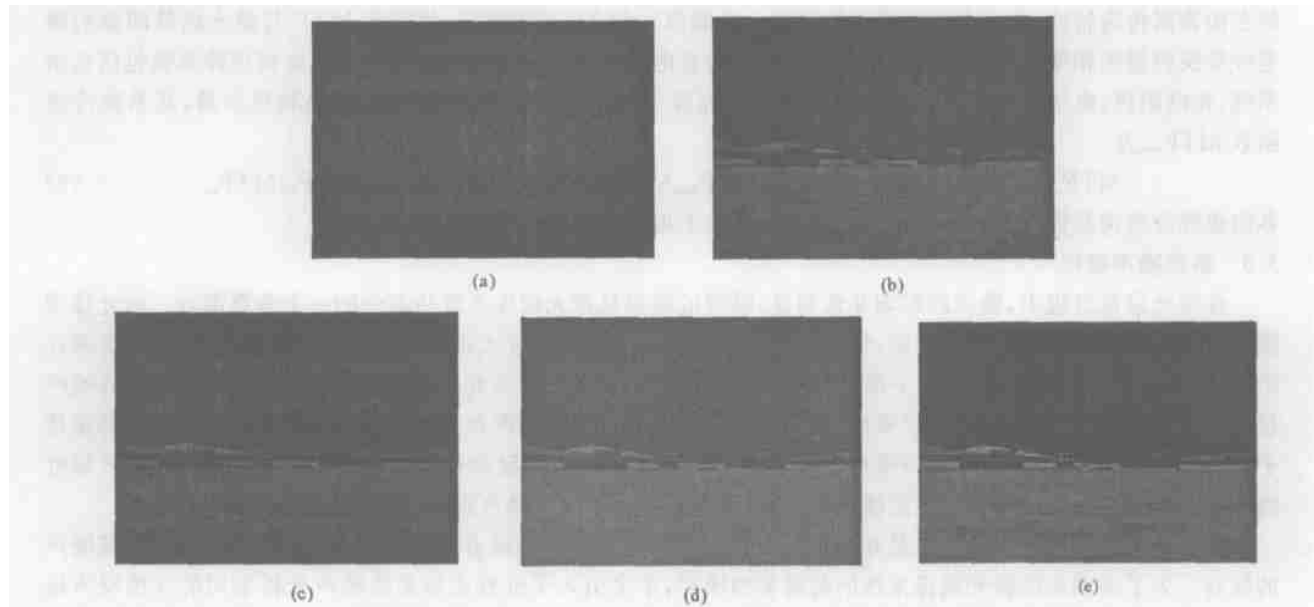


Fig. 4 Image simulation effects for LLL TV imaging system

图4 微光电视系统仿真效果

由仿真结果可看出:(b)显示了经微光系统放大后的增强图像;(c)与(b)相比,由于空间调制传递特性,高频信息变模糊;(d)为加了噪声后的图像,其信噪比明显降低;(e)为经过5帧平均算法后的图像效果,其图像质量明显改善,对比度增加。通过定性观察,这些仿真结果与实际成像结果具有较好的一致性。

5 结论

本文从微光成像系统的能量传递、空间传递特性、噪声和微光图像处理算法4个方面,系统分析了影响微光成像质量的主要物理因素,并建立了微光电视系统的仿真模型。此研究工作可为系统的优化设计、方案论证提供参考依据,还可以模拟各种恶劣自然条件下外场试验无法获得的微光图像,预测系统外场试验性能。为了进一步完善微光电视系统仿真模型,还需要考虑系统的几何扭曲效应、大气扰动、运动效应对系统成像质量的影响,这也将是以后系统仿真研究的重点。

参考文献:

- [1] Bai T Z, Li N, Zou Z F, et al. Research of digital simulation for low light level night vision imaging system[A]. Proc of SPIE[C]. 2000, **4222**: 100—104.
- [2] Zou Z F, Lu H S, Bai T Z, et al. Research of imaging simulation for photoelectric imaging system[A]. Proc of SPIE[C]. 2000, **4222**: 105—109.
- [3] 武英,王庆宝,喻春雨. 微光图像的计算机模拟[J]. 红外技术, 2002, **24**(1): 50—53. (Wu Y, Wang Q B, Yu C Y. Computer simulation of low light level image. *Infrared Technology*, 2002, **24**(1): 50—53)
- [4] Ai K C. Research on the new threshold detection theory and apparent distance detecting equation for low light level imaging system[A]. Proc of SPIE[C]. 1998, **3553**: 211—216.
- [5] Zou Z F, Lu H S, Bai T Z, et al. Simulation of quantum noise in the low light level imaging System[J]. *Journal of Beijing Institute of Technology*, 2001, **10**(2): 186—190.
- [6] 向世明,倪国强. 光电子成像器件原理[M]. 北京: 国防工业出版社, 1999. 232—233. (Xiang S M, Ni G Q. The principle of photoelectric imaging devices. Beijing: National Defense Industry Press, 1999. 232—233)
- [7] Agostino J D, Webb C. 3D analysis framework and measurement methodology for imaging system noise[A]. Proc of SPIE[C]. 1991, **1488**: 110—121.
- [8] 彭仁军,吴健. 环状干涉条纹成像技术的实验研究[J]. 强激光与粒子束, 2003, **15**(7): 635—638. (Peng R J, Wu J. Demonstration of tech2

nique of imaging with circular interference fringes. *High Power Laser and Particle Beams*, 2003, 15(7):635—638)

Characterization method for low2light2level TV imaging system

WANG Xiao2rui^{1,2}, ZHAN GJian2qi¹, FEN G Zhuo2xiang², XIE Wei2bo¹

(1. *Institute of Technical Physics, Xidian University, Xi 'an 710071, China;*

2. *Xi 'an Institute of Applied Optics, Xi 'an 710065, China)*

Abstract : On the basis of analyzing low2light2level (LLL) TV imaging system , this paper presents conditions required and gener2ation method of LLL scene digital image data suitable for LLL TV imaging system simulation. Focusing on the second generation prox2imity focusing system and the third generation imager intensifier system , energy gain theoretical model of LLL TV imaging system is de2rived. Then , main noise sources of the system are modeled by introducing 32D noise model. At last , the assessment method of the de2gression of image enhancement algorithm on image noise is proposed. Simulative results show that the high frequency information be2comes blur after being transfered through the system , signal to noise ratio reduces because of introduction of noise ,and image quality and contrast are greatly improved owing to 5 frame average algorithm.

Key words : Low2light2level TV system; Energy transfer equation; Modulation transfer function; Three2dimensional noise model