

基于线阵 CCD 步进扫描的光照均匀度检测方法

张强¹, 蒋世磊^{2*}, 孙国斌², 王震¹, 张梦妮¹

(1. 西安工业大学 研究生院, 西安 710021; 2. 西安工业大学 光电工程学院, 西安 710021)

摘要: 为了提高 LED 照明系统均匀度检测方法的测量精度和速度, 提出了一种基于线阵电荷耦合器件 (CCD) 步进扫描的均匀度检测新方法。采用线阵 CCD 及步进扫描机构、控制系统、图像采集系统、积分球光源系统、非均匀性修正单元和计算机系统等构建了均匀度检测装置。对检测用的线阵 CCD 的非均匀性响应进行了检测与修正, 测试了光学暗室噪声与待测 LED 均匀照明系统的 CCD 图像灰度矩阵。分析表明, 这种方法测得暗室噪声的均方差约为 0.0038, 测得待测照明系统最佳参数设置时的均匀度为 92.3%。

关键词: 器件与测量; 线阵 CCD; LED 照明系统; 非均匀性修正单元; 光照均匀度

中图分类号: TH741; TN247 **文献标识码:** A **文章编号:** 1002-5561(2018)03-0047-05

DOI: 10.13921/j.cnki.issn1002-5561.2018.03.013

Illuminative uniformity measure method based on the step-scanning of linear array CCD

ZHANG Qiang¹, JIANG Shilei^{2*}, SUN Guobin², WANG Zhen¹, ZHANG Mengni¹

(1. Graduate School, Xi'an Technological University, Xi'an 710021, China; 2. College of Optoelectronic Engineering, Xi'an Technological University, Xi'an 710021, China)

Abstract: In order to improve the measurement accuracy and speed of the uniformity detection of LED lighting system, a new illuminative uniformity measure method based on the step-scanning of linear array CCD is proposed in this paper. The uniformity measure equipment is founded by using linear array CCD, stepping scanning mechanism, control system, image acquisition system, integrating sphere light source system, non-uniformity correction unit and computer system. The non-uniformity of the linear array CCD response is detected and corrected, and the CCD image gray matrix of the extinctive chamber noise and the test LED uniform luminance system are tested. The results show that the mean square error of the extinctive chamber noise in this paper is about 0.0038, and the best luminous uniformity of the test LED uniform luminance systems is 92.3%.

Key words: device and measurement; linear array CCD; LED luminance system; non-uniformity correction unit; illuminative uniformity

0 引言

可见光通信技术是一种将信息加载到 LED 光源

收稿日期: 2017-12-06。

基金项目: 国家自然科学基金项目(60940035)资助; 陕西省科技重点项目(No.2013SZS14-P01)资助; 陕西省教育厅重点实验室科研计划(No.13JS038)资助; 西安工业大学校长科研基金(No.2014-000176)资助。

作者简介: 张强(1993-), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为精密光学仪器设计。

* 通信作者: 蒋世磊 (E-mail: 2429765449@qq.com)。

上的新型无线数据传输方式, 与传统的照明设备相比, 白光 LED 在室内通信中要同时兼顾照明和通信的任务。传统基于照明的光源布局方式难免会存在光照度不均匀现象, 从而影响通信系统的可靠性。因此, 在光源布局时需要考虑光照度分布均匀性, 这将直接影响通信可靠性等问题^[1]。LED 光源因具备电光效率高、发热少和亮度高等优点而成为新一代绿色能源, 其在光学测量、投影和激光产生等领域的应用中, 均需要

张强,蒋世磊,孙国斌,等:基于线阵 CCD 步进扫描的光照均匀度检测方法

提供一个均匀的光场,均匀度是一个照明系统最重要的光束质量指标之一^[1-3]。因此,对光照均匀度的检测成为 LED 照明设备研制过程的一项重要工作。长期以来,LED 均匀照明系统照度均匀性的测量一直没有行之有效的测试手段,通常是将被测系统对准一个测试目标,利用相关检测装置来观察照明目标是否均匀,这种方法缺乏量化检测结果,误差较大^[2,3]。

近年来,国内测量光照均匀度的主要方法是照度计检测法,分为中心布点法和 4 角布点法。这两种方法检测都是采用单元探测器(照度计)在光场内分区逐点扫描,测量每一个点的照度值并记录,通过计算得出测量光斑照明均匀性,这种方法费时较长,扫描机构复杂且检测误差大。随着计算机技术和阵列探测器技术的飞速发展,有些发达国家出现了传感器阵列检测法、电荷耦合器件(CCD)检测法等,这些方法具有一次获取多点光强的优势。由于传感器阵列各通道参数的不同,导致探测到的光强分布存在较大误差^[4-7]。因此,为了对 LED 照明系统的均匀度进行快速、准确的检测,本文提出一种基于线阵 CCD 步进扫描的光照均匀度检测新方法。

1 线阵 CCD 扫描的光照均匀度检测原理

本文提出的照明系统均匀度检测系统如图 1 所示,主要由线阵 CCD 及其步进扫描结构、控制系统、图像采集系统、积分球光源系统、非均匀性修正单元和计算机系统等组成。该系统的核心思想是对线阵 CCD 的非均匀性响应进行修正,最大程度地保证检测精度^[8-10],其检测原理如下:采用积分球光源模拟标准均匀光,并垂直投射到线阵 CCD 光敏面上,标定 CCD 各个像素灰度值与输入光通量的关系,其发射光通量的大小通过改变积分球内部灯组数目来控制;非均匀性

修正单元处理每个像素的系数矩阵,并将实时采集到的 CCD 信号进行修正,构成新的 CCD 图像灰度矩阵;对 CCD 的不均匀响应进行修正后,把积分球光源换为待测光源,CCD 在被测系统的照明处,利用其步进扫描机构对待测光场进行不同方向的扫描,基于图像采集系统,最终可计算该图像灰度矩阵的均方差和均匀度。但是,线阵 CCD 的非均匀性响应是制约该系统检测精度的重要原因,因此必须对响应进行修正,将其非均匀性方差控制在可以接受的范围之内。而线阵 CCD 各个像素输出信号灰度值的偏差主要包括加性偏差和乘性偏差,其中乘性偏差与入射光的强度成正比^[11,12]。故 CCD 各像素的输出公式可以表示为:

$$V_i = G_i I_i + N_i \quad (1)$$

其中, G_i 是第 i 个像素的光电转换增益, N_i 是第 i 个像素的直流输出分量, I_i 是第 i 个像素的入射光辐照度。通常情况,每一个像素的光电转换增益和直流分量是固定的,但各个像素相互之间不相同,导致了 CCD 输出灰度值的不同,即引入了测量误差。

如果可以修正 G_i 和 N_i 这两个系数,使得每一个像素值的输出值在同一辐照度时均相同,即可以修正 CCD 的这种非均匀性响应。而通过最小二乘法可以对这两个参数进行最优估计,这种方法的原理是取线阵 CCD 的每个像素的实际输出值与理论输出值的平方和,通过选择合理的系数使其达到最小化。例如,对第 i 个像素,设 R_j 是其第 j 次的测量误差, V_j 为第 j 次的输出值, I_j 为第 j 次的输入辐照度,则有:

$$V_j - G_i I_j - N_i = R_j \quad (2)$$

只要给出 n 个不同的 I_j 值,就可以从线阵 CCD 中获得 n 个不同的 V_j 值,使误差的平方和 R_j^2 最小,从而可得 G_i 和 N_i 的估计值^[13-15]。在系统中,这 n 个不同的输入光强值可以由积分球给出,通过拟合的输入、输出曲线,就可以获取每一个像素的光电转换增益和直流分量。

修正好 CCD 的非均匀性响应之后,把积分球光源替换为需要检测的 LED 光源,对 LED 均匀照明系统的光场进行径向扫描,以全面地反映该光场的均匀性分布。如图 2 所示,CCD 两端的有效像元对准待测光场边缘。通过径向扫描,就可以知道在各个位置上的光场位置是否

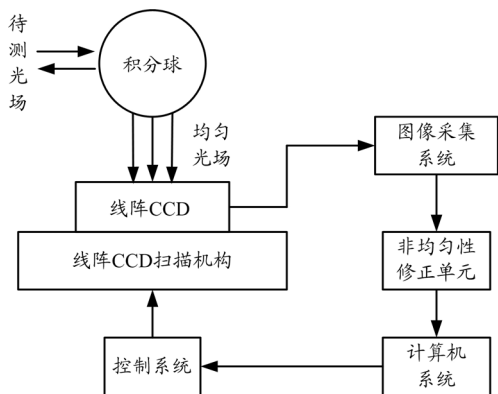


图 1 基于线阵 CCD 步进扫描的照明系统均匀度检测系统

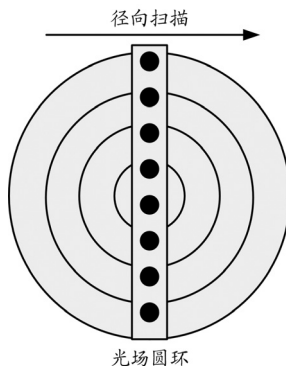


图 2 CCD 步进扫描示意图

均匀,如果光场沿径向分布均匀,则此光场整体分布也均匀。

2 实验测试与分析

待测均匀照明系统外观如图 3 所示,该系统采用 LED 光源,主要包括外筒、光阑、镜筒、透镜、点光源组件和面光源组件。照明系统有两种照明方式,即点光源照明和面光源照明。系统的入瞳约为 76mm,出瞳约为 38mm,镜筒长 150mm,工作距离约为 55mm;线阵 CCD 的型号为东芝 TCD1501,像素数为 5000,长度为 35mm,像素大小为 $7\mu\text{m}$,波长响应范围为 $300\sim 1100\text{nm}$,模/数转换(A/D)采样速率为 500kHz ,CCD 输出帧频为 100 帧/s,CCD 曝光时间为 $10\text{ms}\sim 1\text{s}$,步长为 $10\text{ms}^{[5]}$ 。

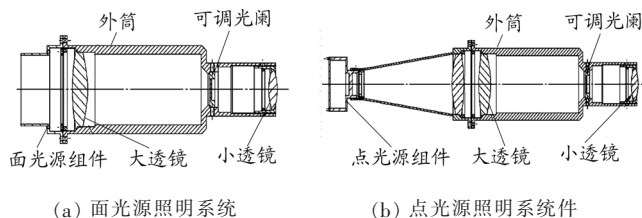


图 3 待测 LED 均匀照明系统

实验测试过程如下:首先,对线阵 CCD 的响应进行修正,用积分球光源模拟标准均匀光,并垂直投射到线阵 CCD 光敏面上,标定 CCD 各个像素灰度值与输入光通量的关系;非均匀性修正单元处理每个像素的修正系数矩阵,并将实时采集到的 CCD 信号进行修正,构成修正后的 CCD 图像灰度矩阵;将每一副图像输出的灰度平均后作为辐照度期望值,形成的辐照度期望与灰度的关系曲线如图 4 所示。然后,利用最小二乘法便可以求出辐照度期望与灰度的关系式,以及每一个像素辐照度与灰度的关系式,从而求出每一个像素的修正系数,进一步将实际输出修正为期望输出。本文进行几组读数后将输出信号进行平均处理,得到该线阵 CCD 输出的灰度值曲线如图 5(a) 所示,经过最小二乘法修正后的结果如图 5(b) 所示。修正前,均方差高达 0.63,修正后均方差约为 0.0038,这说明该修正方法可以充分减小测量误差。

将待检测的 LED 均匀照明系统设置为面光源照

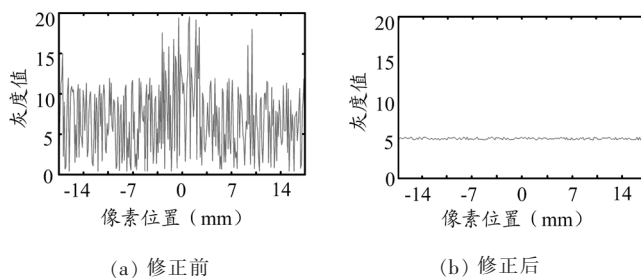
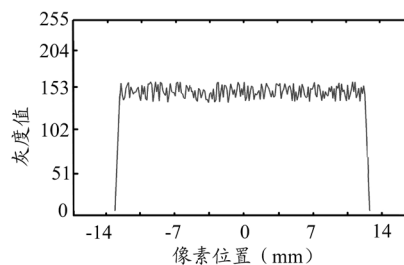
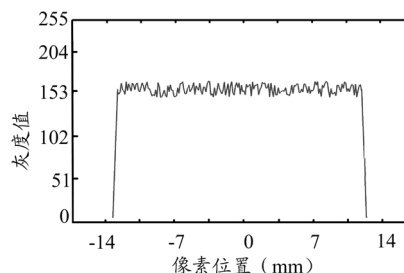


图 5 线阵 CCD 测量的光学暗室噪声灰度值

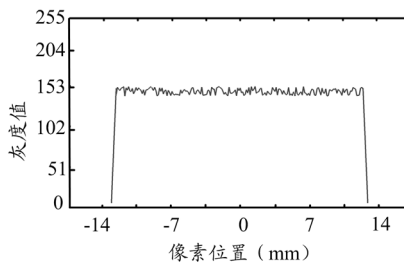
明系统,测试步进电机运动时不同位置的线阵 CCD 输出,步长为 1mm。设出瞳距离为 55mm,光斑大小约为 25mm,不同光阑孔径时线阵 CCD 在步进位置为 0 时的输出曲线如图 6 所示。可以看出,光阑孔径越小,均方差越小,出射光斑越均匀,但是光阑太小时,光斑的亮度较低。因此,我们认为光阑孔径为 1.5mm 时的光束质量最好,此时的均方差达到 0.0093,按照均匀度计算公式,可得 $I_{\min}/I=92.3\%$ 。若采用传统的网格等分方法,可将线阵 CCD 的 5000 个像素分为 10 个等分,



(a) 光阑孔径 $d=22\text{mm}$



(b) 光阑孔径 $d=15\text{mm}$



(c) 光阑孔径 $d=8\text{mm}$

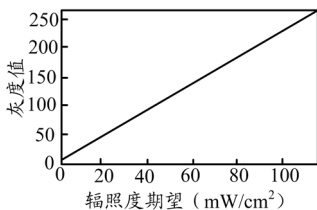


图 4 辐照度期望与灰度值的关系曲线

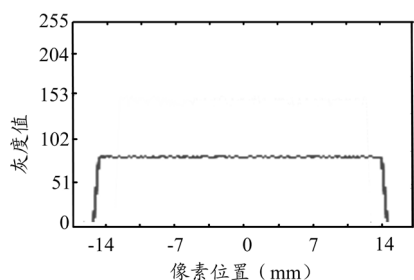
(d) 光阑孔径 $d=1.5\text{mm}$

图 6 不同光阑孔径时线阵 CCD 的输出曲线

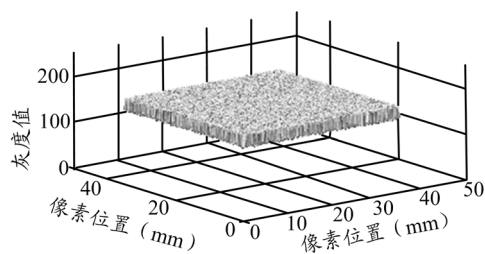
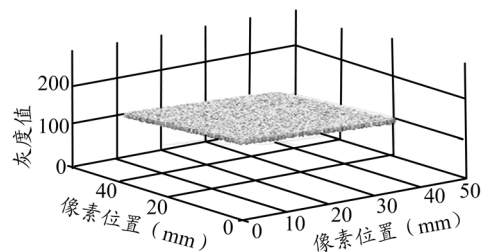
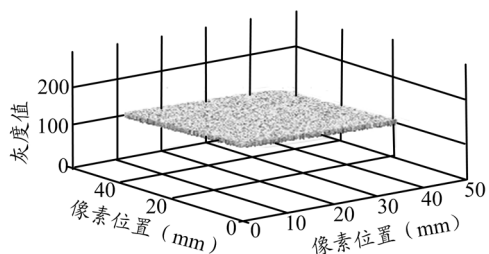
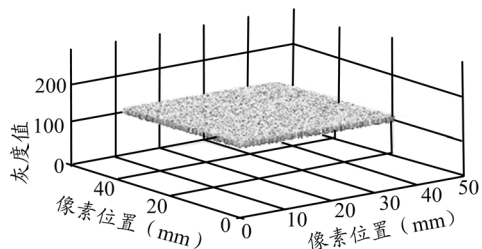
(a) 光阑孔径 $d=22\text{mm}$ (b) 光阑孔径 $d=15\text{mm}$ (c) 光阑孔径 $d=8\text{mm}$ (d) 光阑孔径 $d=1.5\text{mm}$

图 7 不同光阑孔径时线阵 CCD 的输出分布

每等分内的灰度值相加求平均后设为一个元素值,再求各个元素值的均方差,求得均方差为 0.0093。由此可见,与直接求取所有像素灰度值的均方差的结果相接近,这也验证了本文方法的有效性和准确性。

图 7 为不同光孔直径下,在光斑的不同坐标位置时灰度值的输出分布。我们对实验数据进行量化处理,可以有效地检测到个别亮点和暗点的坐标位置,这对 LED 光源的均匀性改善提供有效的数据支持。

若将设计的 LED 均匀照明系统设置为点光源照明系统,出瞳距离为 55mm,光斑大小约为 25mm,可以发现,光阑孔径变化时均方差变化不大,约为 0.29,此时的光束均匀度约为 75%,远小于面光源时的照明均匀度。

因此,本文检测方法对不同状态下的光源有准确的测量结果。

为了体现所提光照均匀度检测方法的优点,我们将单元探测器逐点扫描光源均匀性检测方法、传感器阵列检测法和 CCD 检测法视为对照组,设置相同的测试环境与条件,分别进行 4 组不同光阑孔径条件下的均匀性计算结果。其中,传统的单元探测器逐点扫描光源均匀性检测方法,是用网格等分待检测设备的出射光斑,出射光斑的直径为 25mm,等分网格的间距为 6mm×6mm (如图 8 所示),得到 n 个坐标点的位置;遮挡照度计的感光面,在感光面上留出一个 $\Phi 3\text{mm}$ 的圆孔;把照度计固定在二维导轨上,控制二维导轨上下、左右

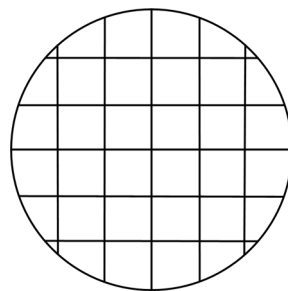


图 8 出射光斑等分示意图

移动照度计,测出每个坐标位置的勒克斯数值读数并记录。通过记录 4 种方法的每次检测时间和均匀性检测结果,得到相关数据如表 1~表 4 所示。

通过对比表 1 和表 2 的测试数据可知,单元探测

表 1 单元探测器逐点扫描面光源均匀性检测结果

序号	光斑大小 (mm)	出瞳距离 (mm)	光阑孔径 (mm)	均匀性 计算结果	检测时间 (min)
1	$\Phi 25$	55	22	0.6692	12
2	$\Phi 25$	55	15	0.0734	
3	$\Phi 25$	55	8	0.0291	
4	$\Phi 25$	55	1.5	0.0107	

表 2 线阵 CCD 步进扫描的光源均匀性检测结果

序号	光斑大小 (mm)	出瞳距离 (mm)	光阑孔径 (mm)	均匀性 计算结果	检测时间 (min)
1	$\Phi 25$	55	22	0.6647	1.7
2	$\Phi 25$	55	15	0.0709	
3	$\Phi 25$	55	8	0.0275	
4	$\Phi 25$	55	1.5	0.0093	

表 3 传感器阵列检测法的光源均匀性检测结果

序号	光斑大小 (mm)	出瞳距离 (mm)	光阑孔径 (mm)	均匀性 计算结果	检测时间 (min)
1	$\Phi 25$	55	22	0.6197	0.9
2	$\Phi 25$	55	15	0.0638	
3	$\Phi 25$	55	8	0.0209	
4	$\Phi 25$	55	1.5	0.0082	

表 4 CCD 检测法的光源均匀性检测结果

序号	光斑大小 (mm)	出瞳距离 (mm)	光阑孔径 (mm)	均匀性 计算结果	检测时间 (min)
1	$\Phi 25$	55	22	0.5879	1.3
2	$\Phi 25$	55	15	0.0611	
3	$\Phi 25$	55	8	0.0185	
4	$\Phi 25$	55	1.5	0.0069	

器逐点扫描方法得到的均匀性要略高于所提算法,但是其检测时间太多,约为 12min,严重降低其检测效率,且该方法的测量数据量较小,测量结果的精度有待认证。本文所提检测方法的均匀性检测精度与单元探测器逐点扫描方法相接近,具有较高的精度,且实现了自动测量和采集数据,所以扫描速度大幅提高,节约了数据采集和数据处理时间,使其检测时间仅为 1.7min。由于检测的精度可以达到像素量级,并且可以扫描检测到个别的亮点或暗点的坐标位置,极大的数据量保证了测试精度。

从表 2、表 3 和表 4 可知,虽然本文所提检测方法的效率要低于传感器阵列检测法和 CCD 检测法,分别为 1.7min、0.9min 和 1.3min,但是,其光照均匀性检测精度要远高于传感器阵列检测法和 CCD 检测法。

通过上述测试数据可知,本文光照均匀度检测方法具有更高的检测效率与精度,比单元探测器逐点扫描法的测量速度更快,比传感器阵列检测法和 CCD 检测法的测量精度更高。

3 结束语

针对 LED 照明系统均匀度检测需求,本文提出了

一种基于线阵 CCD 步进扫描的均匀度检测新方法构建了测试系统,测试了光学暗室噪声与待测 LED 均匀照明系统的 CCD 图像灰度矩阵。实验结果分析表明:本文方法优于传统的照度计网格测试方法。与传统测试方法相比,本文方法的扫描速度大大提高,节约了数据采集时间;测试精度显著提高,可以达到像素量级;线阵 CCD 有利于检测光场的高频误差,可以方便地扫描检测到个别的亮点或暗点(如灰尘等),而传统的检测方式不能有效检测高频误差;传统的检测波长响应基本上都在可见光波段,线阵 CCD 在器件可换性和应变能力方面比传统检测方式好,可以通过改变感光器件测量其它波段的光照均匀度,所以,这种检测方式不仅可以解决 LED 照明均匀性检测的问题,也可用于其它各种光源的均匀性检测。

参考文献:

- [1] 王洪,王海宏,张小凡,等. 旋转轴对称 LED 均匀照明系统设计方法[J]. 光电子·激光,2010,21(8):1163-1166.
- [2] 杨毅,钱可元,罗毅. 一种新型的基于非成像光学的 LED 均匀照明系统[J]. 光学技术,2007,33(1):110-115.
- [3] MOONEY J M, SHEPHERD F D. Characterizing IR FPA nonuniformity and IR camera noise[J]. Infrared Physics and Technology, 1996,37: 595-605.
- [4] ZHANG Q. Nonuniformity measurement of group 1 infrared imaging system [J]. SPIE, 1998, 3553: 275-279.
- [5] 沈湘衡,杨亮,贺庚贤,等. 光电测量设备光学系统的像面照度均匀性检测[J]. 光学精密工程,2008,16(12):2531-2536.
- [6] 孙玉杰,汪岳峰. 利用线阵 CCD 测量照明光场均匀度[J]. 中国测试技术,2003 (4):26-27.
- [7] REGINA MM, GERD O M. White Light emitting diodes for illumination[J]. SPIE, 2000, 3938: 30-41.
- [8] SCHRUBEN J. Formulation of a reflector design problem for alighting fixture[J]. J Opt Soc Am, 1972, 62 :1498-1501.
- [9] 寇峻,曹益平,翟爱平. 探测器尺寸对大面积脉冲激光光场均匀性检测精度的影响[J]. 工具技术,2012,46(1):73-76.
- [10] 杨宁,李振辉. 线阵 CCD 响应非均匀性的检测与校正[J]. 长春理工大学学报,2012,22(12):1468-1471.
- [11] 李洋,刘亚侠. TDI CCD 相机系统响应非均匀性校正[J]. 仪器仪表学报,2006,27(6):1226-1227.
- [12] GORDON J M, RABL A. Reflectors for uniform far-field irradiance: fundamental limits and example of an axisymmetric solution [J]. Applied Optics, 1998, 37(1): 44-47.
- [13] 刘妍妍,李国宁,张瑜,等. 可见光面阵 CCD 响应非均匀性的检测与校正[J]. 液晶与显示,2010,25(5):759-763.
- [14] WINSTON O R, MINANO J C, BENITEZ P, et al. Nonimaging optics [M]. Burlington: Elsevier Academic Press, 2005.
- [15] WINSTON R, RIES H. Nonimaging reflectors as functionals of the desired irradiance[J]. J. Opt. Soc. Am. A, 1993, 10(9): 1902-1908.