文章编号: 1672-8785(2014)07-0012-04

波前编码 Schmidt 系统的设计

张东阁^{1,2} 傅雨田¹
(1. 中国科学院上海技术物理研究所,上海 200083;
2. 中国科学院大学,北京 100049)

摘 要:利用波前编码技术实现了 Schmidt 系统在 -60 °C~+60 °C 的无热化设计。以视场角为 ±4°、相对口径为 1/2 的经典 Schmidt 系统为研究对象,设置一个三次立方表面 作为波前编码表面。以传递函数大于零为约束条件,在尽可能大的离焦量范围内对波前编码表面的参数进行优化,得到了离焦量达 ±0.6 mm 的 Schmidt 系统,焦深比经典的 Schmidt 系统延拓了 20 倍。分析了不同温度下的弥散班和传递函数数据。结果表明, 该波前编码 Schmidt 系统在 -60 °C~+60 °C 间具有良好的温度适应性,而且光学性能稳定,便于进行后续的图像复原。

关键词:波前编码; Schmidt系统; 光学设计; 无热化

中图分类号: TP311.5 文献标志码: A DOI: 10.3969/j.issn.1672-8785.2014.07.003

Design of Schmidt Optical System Using Wavefront Coding

ZHANG Dong-ge^{1,2}, FU Yu-tian¹

Shanghai Institute of Technical Physics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200083, China;
 University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: The athermalization of a Schmidt optical system in the temperature range from -60 °C to +60 °C is designed by using wavefront coding. Taking a classical Schmidt system with a field angle of $\pm 4^{\circ}$ and a relative aperture of 1/2 as an object to be studied, a cubic surface is used as the wavefront coding surface. Under the constraint condition of a transfer function greater than zero, the parameters of the wavefront coding surface are optimized in a defocus range as large as possible. A Schmidt system with a defocus amount up to ± 0.6 mm is obtained. Its focal depth is extended by a factor of 20 compared with that of the classical Schmidt system. Its defocused spot and transfer function data at different temperatures are analyzed. The result shows that this Schmidt system with wavefront coding has good adaptability in the temperature range from -60 °C to +60 °C. Its optical performance is stable, so it facilitates the subsequent image restoration.

Key words: wavefront coding; Schmidt system; optical design; athermalization

0 引言

红外光学材料的温度特性较差,其温度折 射率系数比可见光材料大一个数量级。环境温 度变化时,光学材料的折射率会发生变化,透镜 的轴向间距也会改变,两者都会使光学系统偏 离最佳焦面位置,从而产生温度离焦量。

收稿日期: 2014–04–12

作者简介:张东阁(1986-),男,河南汝州人,博士生,研究方向是光学设计和机械设计。 E-mail:done15@163.com Schmidt 系统是一种同轴的折射和反射光学 系统,具有视场大、成像质量好的优点,可满足 大视场、高分辨率的应用需求。但红外 Schmidt 系统的固有最大焦深仅为 ±40 µm,对温度离焦 量的补偿作用相当有限。为了适应变温大的环 境,必须对 Schmidt 系统进行温度离焦补偿。

主动离焦量补偿方法是依靠机电系统的闭 环控制实现的,具有补偿范围大、适应性好等优 点,但是它会增加系统的难度和成本。被动离焦 量补偿方法利用光学设计、光学材料的合理搭 配等实现一定程度的无热化设计,其温度补偿作 用有限,不能适应变温大的环境的应用需求。

国内外学者提出了利用波前编码扩展焦深 的设想^[1,2]。在光学系统中添加一个特殊面形的 相位板,对成像光束的波前进行编码,使光学系 统对离焦不敏感,保证在不同离焦位置处的传 递函数都大于零。对不同离焦位置的图像进行 复原,恢复出原始的清晰图案。这样就可实现焦 深延拓,使光学系统在很大的焦深范围内都能 成像^[3,4]。不同于传统的焦深延拓方法,波前编 码技术可以在不损失图像信息的前提下大幅度 增加系统的焦深。

利用波前编码技术,可以成倍地增加光学 系统的焦深,使光学系统在较大的焦深范围内 都能成像。这样不但能增强光学系统对变温环 境的适应性,而且还能降低光学系统的装调难 度。基于这样的优点,波前编码技术获得了广泛 的应用。

冯俐铜设计的红外透射系统利用一个波前 编码表面实现了在 -40 °C~+ 60 °C 范围内的无 热化设计^[5]。浙江大学的黄薇薇提出了用遗传 算法对波前编码相位掩膜板的参数进行优化的 方法^[6],并用双胶合系统进行了验证。长春光 机所张欣设计的波前编码系统^[7]在孔径光阑处 添加了一个相位掩膜板,结合后期数字图像处 理的优化,将光学系统的焦深扩展了 40 倍。

本文将波前编码技术应用于 Schmidt 系统的设计。以视场角为 ±4°、相对孔径为 1/2 的 Schmidt 系统为研究对象,设计了一个焦深延拓

20 倍的波前编码 Schmidt 系统,其传递函数和弥 散斑参数在-60°C~+60°C 范围内可保持一致, 对环境温度的适应性大大增强。

1 波前编码 Schmidt 系统的设计

波前编码系统设计的核心问题就是在保证 传递函数不过零的前提下,优化波前编码元件 的相位分布,尽可能地扩展光学系统的焦深。

为了获得一个较好的优化起点,首先设计 了一个经典的 Schmidt 系统。该系统可实现 -10 °C ~30 °C 范围内的无热化设计。以此为基础, 添加波前编码表面,然后再进行优化。

Schmidt 系统的光路如图 1 所示。标号 1 是校正板,标号 2 是球面反射镜,标号 3~5 是平场透镜组,用于校正场曲和色差;标号 6 是滤光片和探测器。校正板 1 的 B 面是非球面,同时也是孔径光阑。



图 1 波前编码的施密特系统

波前编码表面设置在校正板1的A面,采用 三次立方相位面,其面形见式(1),其中第一项 是二次曲面基底,第二、三项是三次多项式,表 示二次曲面基底上增加了三次位相的修正量。

$$z = \frac{cr^2}{1 + \sqrt{1 - (1+k)c^2r^2}} + \alpha x^3 + \beta y^3 \qquad (1)$$

波前编码优化的目标是在尽可能大的焦深内获 得一致的传递函数。约束条件是传递函数不能 过零。优化变量是三次位相板的系数,即式(1) 中的 α 和 β,其他参数与起始的 Schmidt 系统相 同。

2 波前编码 Schmidt 系统的成像质量

在光学设计软件中,优化得到的 Schmidt 系 统最大可在 $-0.6 \text{ mm} \sim +0.6 \text{ mm}$ 的离焦范围内保 证传递函数大于零。此时,三次位相表面的系数 $\alpha = -0.00398$, $\beta = -0.00437$ 。

以 0.3 mm 为间隔, 测量了 Schmidt 系统在 -0.6 mm~+0.6 mm 范围内 5 个离焦位置处的不 同视场的传递函数,结果见表 1。

表1 波前编码 Schmidt 系统在不同离焦 位置的传递函数

	$-0.6 \mathrm{mm}$	$-0.3 \mathrm{mm}$	$0 \mathrm{mm}$	$0.3 \mathrm{mm}$	$0.6 \mathrm{mm}$
0°	0.059	0.082	0.062	0.081	0.059
1°	0.057	0.084	0.067	0.081	0.060
2°	0.056	0.086	0.068	0.082	0.061
3°	0.055	0.086	0.063	0.083	0.062
4°	0.054	0.085	0.055	0.083	0.063

表1列举了截止频率处(17 lp/mm)5个离焦 位置的传递函数。在-0.6 mm~+0.6 mm 的离焦 范围内,每个视场的传递函数都大于零,而且传 递函数较一致。

按照焦深的近似公式,相同参数下经典 Schmidt系统的焦深约为±0.02 mm~±0.04 mm。 波前编码 Schmidt系统的焦深是±0.6 mm。与经 典 Schmidt系统相比,焦深扩展了 20 倍。

3 波前编码 Schmidt 系统的温度特性

为了验证波前编码 Schmidt 系统的温度适应 性,选择-60°C~+60°C 范围内的 5 个温度点为 环境温度,对 Schmidt 系统在不同温度下的传递 函数和弥散斑参数进行了比较。

表 2 波前编码 Schmidt 系统在不同 温度下的传递函数

	-60 °C	-30 °C	$0 \ ^{\circ}\mathrm{C}$	$30 \ ^{\circ}\mathrm{C}$	$60~^{\circ}\mathrm{C}$
0°	0.059	0.059	0.059	0.059	0.059
1°	0.060	0.060	0.059	0.060	0.060
2°	0.061	0.061	0.061	0.061	0.060
3°	0.064	0.063	0.062	0.061	0.060
4°	0.067	0.067	0.065	0.062	0.060

INFRARED (MONTHLY)/VOL.35, NO.7, JUL 2014

表 2 是 Schmidt 系统在 5 个温度点下不同视场的传递函数特性。在 -60 °C~ +60 °C 范围内, 波前编码系统获得了一致的传递函数特性。例如在 4°视场位置,截止频率上的传递函数分别是 0.067 (- 60 °C)、 0.060 (+60 °C)。相对于 0 °C 下的传递函数,变化幅度小于 7%。

表 3 波前编码 Schmidt 系统在不同温度 下的弥散斑直径 (μm)

	-60 °C	-30 °C	$0~^{\circ}\mathrm{C}$	30 °C	$60~^{\circ}\mathrm{C}$
0°	125.211	125.203	125.169	127.989	127.981
1°	125.908	125.931	125.960	128.851	128.876
2°	127.842	127.966	128.200	131.330	131.460
3°	130.226	130.521	131.102	134.625	134.937
4°	131.100	131.636	132.705	136.717	137.284

表 3 是波前编码 Schmidt 系统在不同温度 下的弥散斑数据。在 -60 °C~+60 °C 范围内, 波前编码 Schmidt 系统的弥散斑基本保持不变。 例如在 -60 °C 时, 4 °C 视场的弥散斑直径是 131.1 μm, 而在 +60 °C 时, 4 °C 视场的弥散斑 是 137.284 μm。以 0 °C 时 4 °视场的弥散斑为基 准,这两个温度下的弥散斑直径的变化幅度小于 4%。

作为设计基准的经典 Schmidt 系统,只能实现-10°C~30°C 范围内的无热化设计,而且随着温度的改变,其弥散斑和传递函数存在较大的波动。

根据表 2 和表 3 的数据,本文设计的波前编码 Schmidt 系统在 -60 °C~+60 °C 范围内可保持较一致的传递函数和弥散斑特性,有利于进行下一步的图像复原工作。

根据波前编码的原理,波前编码 Schmidt 系 统只能保证传递函数大于零,并不能实现离焦 位置的清晰成像,因此还需要用图像复原的办法 恢复出原始的清晰图像。

波前编码系统的传递函数大于零,保证了 图像信息不会损失。同时,波前编码的图像模糊 是由于人为添加相位表面而产生的,属于已知的 扰动,可以采用维纳滤波和小波变换等方法对 图像进行复原^[8,9],以后我们将对此问题进行深 入研究。

14

15

4 结论

本文对大视场 Schmidt 系统的波前编码技术进行了研究。通过添加一个波前编码表面,将施密特系统的焦深扩展了 20 倍。分析了波前 编码 Schmidt 系统在 -60 °C~60 °C 范围内的传递 函数和弥散斑参数,证明了波前编码 Schmidt 系 统具有良好的温度适应性,实现了 -60 °C~60 °C 范围内的无热化设计。

由于波前编码表面改变了光学系统初始的 成像条件,波前编码 Schmidt 系统得到的是模糊 的图像,后续还需要用图像复原的办法来得到 清晰图像。我们下一步将对 Schmidt 系统的波前 编码参数与图像复原参数进行联合优化,以进 一步增加离焦量和扩大系统的温度适应范围。

参考文献

 Dowski E R Jr, Cathey W T. Extended Depth of Filed through Wave Front Coding [J]. Applied Optics, 1995, 34(11): 1859–1995.

(上接第4页)

- [6] 张建奇, 王晓蕊. 光电成像系统建模及性能评估 理论 [M]. 西安: 西安电子科技大学出版社, 2010.
- [7] 陈治宣,周晓东,娄树理.红外热像仿真中光学系 统渐晕效应模拟研究 [J]. 电光与控制,2007,14(6): 166-169.
- [8] 张福娣,张建奇,徐茵.红外凝视传感器定量仿真 及模型验证 [J]. 光子学报, 2011, 40(4): 596-601.
- [9] 王学伟,周绍磊. 红外焦平面阵列探测器空间采样 效应模拟 [J]. 半导体光电, 2012, 33(6): 914-916.
- [10] 高思莉,于洋,汤心溢.红外焦平面阵列非线性响 应仿真 [J]. 红外与激光工程,2008,37(5):770-772.
- [11] Greif H J, Weiss A R, Wittenstein W. PcSitoS: A New Tool for Image-based IR System Simulation [C]. SPIE, 2009, 7481: 0701–0711.
- [12] 张志勇, 郭天天, 卢焕章. 红外传感器自身效应仿 真研究 [J]. 系统仿真学报, 2007, 19(3): 601-603.
- [13] Wang Xiaorui, Guo Qiang, Zhang Dongyang. Computational Reconstruction of Thermal Infrared Integral Image Based on Modeling Sensor Physical Effects[C]. SPIE, 2010, 7854: 281–288.
- [14] Garnier C, Collorec R, Flijla J, et al. General Framework for Infrared Sensor Modeling [C]. SPIE, 1998, 3377: 59–70.
- [15] Garnier C, Collorec R, Flijla J, et al. Infrared Sensor Modeling for Realistic Thermal Image Synthesis [J].

- [2] Dowski E R Jr, Kenneth S K. Modeling of Wavefront Coded Imaging Systems [J].Proc. of SPIE, 2002,4736: 116–126.
- [3] 雷广智,张新,张建萍,等.波前编码系统的新设计
 [J]. 光学精密工程, 2008,16(7): 1171–1176.
- [4] 陈守谦,范志刚,徐志高,等.基于波前编码的红 外无热化光学系统相位掩膜板热效应特性分析 [J].
 红外与毫米波学报, 2012,31(3): 210-215.
- [5] 冯俐铜, 孟军合, 顿雄, 等. 波前编码应用于红外 光学系统无热化的研究 [J].**红外与激光工程**, 2011, **40**(1): 83-86.
- [6] Zhao T Y, Ye Z, Zhang W Z, et al. Design Objective Lenses to Extend the Depth of Field Based on Wavefront Coding [J].Proc. of SPIE, 2007,6834: 683414.
- [7] 张欣,张新,张建萍,等.波前编码技术扩展焦深的系统实验[J].光学精密工程,2010,18(3):536-543.
- [8] 冯国平,刘兴春,贾伟,等.小波变换在大景深成像
 系统图像复原中的应用 [J]. 红外与激光工程, 2010, 39(6): 1173–1177.
- [9] 闫峰,张学军.波前编码离轴三反光学系统图像复原[J].红外与激光工程,2010,39(3):549-554.

Acoustics, Speech, and Signal Processing, 1999, 6: 3513–3516.

- [16] Christer Wigren. Model of Image Generation in Optronic (Electro-optical) Sensor Systems (IGOSS) [C]. SPIE, 1998, 3377: 89–96.
- [17] John D O, Jonathan H. Resampling Analysis of Participant Variance to Improve the Efficiency of Sensor Modeling Perception Experiments [C]. SPIE, 2010, 7662: 1–6.
- [18] David Tomkinson, Teresa Wilhelm, Eric Flug. NV-THERM Based Sensor Effects for Imaging Simulations [C]. SPIE, 2005, 5784: 157–169.
- [19] Dylan Payne, John Schroeder. Sensor Performance and Atmospheric Effects Using NvThermIP/NV-IPM and PcModWin/MODTRAN Models - A Historical Perspective [C]. SPIE, 2013, 8706: 1–13.
- [20] Eismann M T, Ingle S D, Slyz M. Utility Analysis of High-resolution Multispectral Imagery. Volume 4. Image Based Sensor Model (IBSM) Version 2.0 Technical Description [EB/OL]. http://oai.dtic.mil/oai/oai?verb=getRecord&metadataPrefix=html&identifier=ADA317762, 1996.
- [21] Moira I S, Mark B, Christopher R A. Validation and Acceptance of Synthetic Infrared Imagery [C]. SPIE, 2004, 5408: 9–21.

INFRARED (MONTHLY)/VOL.35, NO.7, JUL 2014