

文章编号: 1672-8785(2018)04-0001-06

分块式平面光电探测成像技术研究

武冬梅^{1,2,3} 于清华^{1,2*} 乐应波^{1,2,3} 陈福春^{1,2}

(1. 中国科学院上海技术物理研究所, 上海 200083;
2. 中国科学院红外与成像技术重点实验室, 上海 200083;
3. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘 要: 分块式平面光电探测成像技术(Segmented Planar Imaging Detector for Electro-optical Reconnaissance, SPIDER)是基于干涉原理的新型光电成像技术, 其先利用含波导结构的光学系统对物面目标进行空间频域相干采样, 然后经图像处理对频域图像进行傅里叶逆变换, 从而恢复目标图像。深入研究了 SPIDER 成像技术的成像原理、实现方法以及结构参数对 SPIDER 成像系统的影响机制, 并在此基础上完成了波长在 $1.5\ \mu\text{m}\sim 1.9\ \mu\text{m}$ 范围的成像仿真验证。结果表明, SPIDER 成像技术具有良好的成像效果。

关键词: 傅里叶光学; 成像系统; 干涉成像; 光强分布; 计算机仿真

中图分类号: O438.2 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.1672-8785.2018.04.001

Study of Segmented Planar Imaging Detector for Electro-optical Reconnaissance

WU Dong-mei^{1,2,3}, YU Qing-hua^{1,2*}, YUE Ying-bo^{1,2,3}, CHEN Fu-chun^{1,2}

(1. Shanghai Institute of Technical Physics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200083, China;
2. Key Laboratory of Infrared System Detection and Imaging Technology, Shanghai 200083, China;
3. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: Segmented Planar Imaging Detector for Electro-optical Reconnaissance (SPIDER) is a new type of electro-optical imaging technology based on the principle of interferometric imaging. First, it utilizes the optical system with a waveguide structure to coherently sample the object in a spatial frequency domain. Then, it uses an image-processing module to restore the object image through inverse Fourier transform in the frequency domain. Its imaging principle, implementation and the influence of structure parameters on imaging are deeply studied. On this basis, the simulation verification of imaging in the wavelength range from $1.5\ \mu\text{m}$ to $1.9\ \mu\text{m}$ is completed. The results show that the segmented planar imaging detector for electro-optical reconnaissance has a good imaging effect.

Key words: Fourier optics; imaging system; interferometric imaging; light intensity distribution; computer simulation

收稿日期: 2018-03-05

基金项目: 中国科学院青年创新促进会基金项目(20150192)

作者简介: 武冬梅(1992-), 女, 河北衡水人, 硕士生, 主要研究方向为基于集成光学的干涉成像技术。E-mail: wudm1213@foxmail.com

0 引言

为了提高空间望远镜的光学性能,使其观测到更暗、更小、更远的目标,空间光学望远镜不断朝着大口径方向发展^[1]。传统的光学望远镜一般基于牛顿光学原理,在提高其光学性能的同时,往往需要增大光学系统的体积,这就需要使用大型的光学元件和庞大的刚性结构。同时,对于红外光学成像系统,由于衍射的限制,相同分辨率需求下,红外光学系统相对于可见光系统需要更大的光学口径,从而需要更大体积和重量的光学仪器。然而,过大的光学仪器不利于载荷向小型化和轻量化方向发展,而且大大加重了空间卫星平台的负担。因此,传统的空间光学系统难以满足空间光学观测的需求。2012年,洛克希德·马丁公司提出了一种基于干涉成像原理的新型 SPIDER 成像技术^[2-4]。不同于传统光学成像技术,该技术使用微透镜阵列进行物面光信息的收集,同时利用光子集成技术将数千个微透镜阵列和光波导阵列集成在一块平面基底上,利用正交探测器对光波导入的光信号进行干涉处理,从而获得物面空间频域信息。SPIDER 成像技术将光学部件、读出电路和处理系统集中在一个光子集成电路(Photonic Integrated Circuit, PIC)芯片上^[5],因此能够将传统望远镜的体积、质量和功耗减小 10%~100%^[6]。

本文主要对 SPIDER 的成像原理、实现方法进行详细介绍,对 SPIDER 成像系统中传感器阵列的光场分布和信息处理模块进行理论分析,根据成像原理得出影响成像系统分辨率、视场的因素,并通过计算机仿真对 SPIDER 成像技术进行仿真验证。

1 SPIDER 的成像原理

SPIDER 的成像原理如图 1 所示。图 1(a)为 SPIDER 成像系统的俯视图,它由若干个干涉臂组成,每个干涉臂上有多组配对的微透镜阵列^[2]。SPIDER 成像系统由两部分构成:传感器阵列和信息处理模块^[7-8]。传感器阵列由

微透镜阵列、光波导阵列、光栅分束器和相位延迟器组成,如图 1(b)所示。将光波导阵列、光栅分束器和相位延迟器集成在一个 PIC 芯片上。微透镜阵列收集光信息,并将光耦合进波导阵列中。通过配对微透镜,对应的光波导经光栅分束器、相位延迟器后,使两束光满足干涉条件,再将相干光输入到信息处理模块。信息处理模块由正交探测器和数字信号处理两部分组成原理如图 1(c)所示。两束光信号在正交探测器内干涉,得到两相干光经光电转换后的同相电流和正交电流;通过数字信号处理,得到两相干光的光强和相位差,经傅里叶逆变换后得到物面光强分布。

1.1 传感器阵列的光场分布

SPIDER 成像系统对较远物面成像,将光波导阵列置于微透镜的后焦平面处,如图 1(b)所示。其中,光信号从物面到微透镜阵列,再由微透镜阵列平面到像面的光场分布示意图如图 2 所示。 $S(\xi, \eta)$ 为物面上任意一点, $P(x, y)$ 为微透镜阵列平面上任意一点。根据夫琅和费衍射公式可知^[9],从物面点 $S(\xi, \eta)$ 到微透镜平面点 $P(x, y)$ 的点扩散函数为

$$h_1(\xi, \eta; x, y) = \frac{-i}{\lambda z} e^{ik[z + \frac{1}{2z}(x^2 + y^2)]} e^{\frac{-ik}{z}(x\xi + y\eta)} \quad (1)$$

式中, λ 为入射光的波长, z 为物面到微透镜阵列平面的距离, k 为波数。

光信号经微透镜折射后产生附加相位,第 j 个微透镜的复振幅透过率 $\tilde{\tau}_{1j}$ 为^[10]

$$\begin{aligned} \tilde{\tau}_{1j}(x, y) = & \exp \left\{ -i \frac{k}{2f'} [(x - m_j)^2 + (y - n_j)^2] \right\} \\ & \times \text{circ} \left[\frac{\sqrt{(x - m_j)^2 + (y - n_j)^2}}{a} \right], \quad j = 1, 2, \dots, n \end{aligned} \quad (2)$$

式中, f' 为微透镜的焦距, (m_j, n_j) 是第 j 个微透镜的圆心坐标, a 为微透镜的半径。

根据菲涅尔衍射公式^[9],微透镜后 $P(x, y)$ 点到像面上任一点 $R(u, v)$ 的点扩散函数为

$$h_2(x, y; u, v) = \frac{-i}{\lambda l'} \exp(ikl')$$

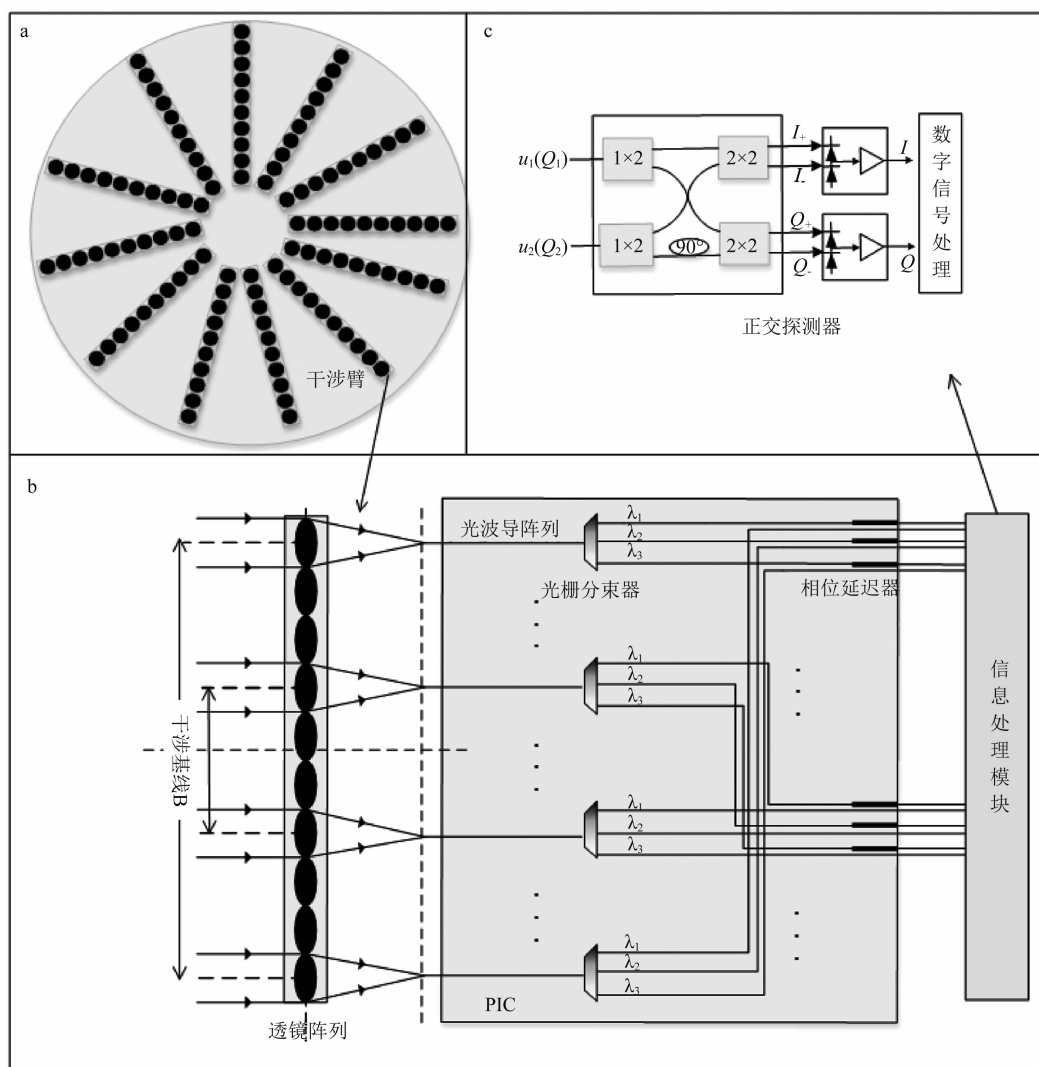


图 1 SPIDER 成像系统的原理图

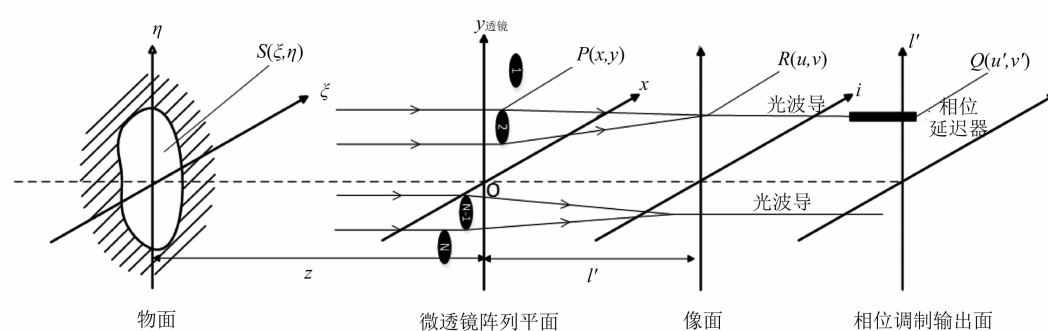


图 2 从物面到像面的光场分布示意图

$$\times \exp \left\{ \frac{ik}{2l'} [(u-x)^2 + (v-y)^2] \right\} \quad (3)$$

式中, l' 为像面距离。

像面处 $R(u, v)$ 的光束耦合进光波导阵列, 通过光栅分束器分成多个窄波段光束, 再通过

相位延迟器调节入射光的相位, 光束在光波导传输中产生相位延迟 $\Delta\varphi$, 光波导传输函数为

$$\bar{\tau}_{2j}(u', v') = e^{-i\Delta\varphi_j} \quad (4)$$

忽略 h_1 和 h_2 公式中的常相位, 光束从点 $R(u, v)$ 通过光波导传输至点 $Q(u', v')$, 仅产生

相位延迟, 不改变光束的复振幅分布及其他量, 因而存在关系式 $u' = u, v' = v$ 。利用高斯公式 $\frac{1}{l'} - \frac{1}{(-z)} = \frac{1}{f'}$ ^[10], 得到物面 S 到相位调制输出面 Q 的点扩散函数:

$$h(\xi, \eta; u', v') = \frac{-i}{\lambda z} \frac{-i}{\lambda l'} D(u', v') \times \exp \left[-ik \left(\frac{um_j}{l'} + \frac{vn_j}{l'} \right) \right] \times e^{-i\Delta\varphi}; \frac{aJ_1(2\pi a \sqrt{t_x^2 + t_y^2})}{\sqrt{t_x^2 + t_y^2}} \exp \left[-ik \left(\frac{\xi m_j}{z} + \frac{\eta n_j}{z} \right) \right] \quad (5)$$

式中, $t_x = \frac{\xi}{\lambda z} - \frac{m_j}{\lambda f'} + \frac{u'}{\lambda l'}$, $t_y = \frac{\eta}{\lambda z} - \frac{n_j}{\lambda f'} + \frac{v'}{\lambda l'}$, J_1 为 1 阶贝塞尔函数。

根据式(5), 经任意一组微透镜对(微透镜 α 、微透镜 β , 其中 $\alpha, \beta = 1, 2, \dots, N$, 且 $\alpha \neq \beta$)和相位延迟器后的点扩散函数为 $h(\xi, \eta; u'_\alpha, v'_\alpha)$, $h(\xi, \eta; u'_\beta, v'_\beta)$ 。根据互强度定义可知 ^[9], 经相位延迟器后两相干光信号的互强度与物面强度分布的关系为

$$J(u'_\alpha, v'_\alpha; u'_\beta, v'_\beta) = \iint \tilde{U}_0^*(\xi_1, \eta_1) h(u'_\alpha - \xi_1, v'_\alpha - \eta_1) d\xi_1 d\eta_1 \iint \tilde{U}_0^*(\xi_2, \eta_2) h(u'_\beta - \xi_2, v'_\beta - \eta_2) d\xi_2 d\eta_2 = \left[\frac{1}{\lambda z} \frac{1}{\lambda l'} \right]^2 \left[\frac{aJ_1(2\pi a \sqrt{t_x^2 + t_y^2})}{\sqrt{t_x^2 + t_y^2}} \right]^2 \iint I(\xi, \eta) \times \exp \left\{ -ik \left[\frac{\xi(m_\alpha - m_\beta)}{z} + \frac{\eta(n_\alpha - n_\beta)}{z} \right] \right\} d\xi d\eta \quad (6)$$

式中, $J(u'_\alpha, v'_\alpha; u'_\beta, v'_\beta)$ 表示两相干光的互强度, $\tilde{U}_0(\xi_1, \eta_1)$ 、 $\tilde{U}_0(\xi_2, \eta_2)$ 表示物面复振幅的分布, (m_α, n_α) 和 (m_β, n_β) 为两微透镜的圆心坐标。根据式(6)可知, 光信号通过 PIC 芯片后两相干光信号的互强度正比于物面强度的傅里叶变换。

1.2 信息处理模块

信息处理模块由正交探测器和数字信号处理两部分组成, 如图 1(c)所示。光波导内的信号在正交探测器 ^[11] 干涉, 得到的光信号经光

电转换后产生光电流, 经差分电路后得到光电流的同相分量 I 和正交分量 Q ^[12]:

$$I = 2(\tilde{U}_\alpha(u'_\alpha, v'_\alpha) \tilde{U}_\beta^*(u'_\beta, v'_\beta) + \tilde{U}_\alpha^*(u'_\alpha, v'_\alpha) \tilde{U}_\beta(u'_\beta, v'_\beta)) = 4\text{Re}(J(u'_\alpha, v'_\alpha; u'_\beta, v'_\beta)) \\ Q = 2i(-\tilde{U}_\alpha(u'_\alpha, v'_\alpha) \tilde{U}_\beta^*(u'_\beta, v'_\beta) + \tilde{U}_\alpha^*(u'_\alpha, v'_\alpha) \tilde{U}_\beta(u'_\beta, v'_\beta)) = 4\text{Im}(J(u'_\alpha, v'_\alpha; u'_\beta, v'_\beta)) \quad (7)$$

式中, $\tilde{U}_\alpha(u'_\alpha, v'_\alpha)$ 和 $\tilde{U}_\beta(u'_\beta, v'_\beta)$ 为经相位调制后输出面两相干光的复振幅分布。

经正交探测器得到两相干光互强度的实部和虚部, 计算可得到对应物面空间频率 (f_u, f_v) 的强度和相位。成对微透镜组成一基线 B, 采集到的光信号的物面空间频率 (f_u, f_v) 为 ^[13]

$$f_u = \frac{m_\alpha - m_\beta}{\lambda z}; f_v = \frac{n_\alpha - n_\beta}{\lambda z} \quad (8)$$

根据式(8)可知, 空间频率与微透镜对的相对位置、波长和物距有关, 可通过增加不同方向和间距的微透镜对组合, 或使用光栅分束器分离出多个波长通道, 增加空间频率采样的覆盖率, 从而获得物面更多的光学信息。再通过傅里叶逆变换, 即可得到物面的光强分布 ^[14]。

2 SPIDER 成像系统的性能

2.1 分辨率

根据式(8)可知, SPIDER 成像系统能采集到的最高空间频率 $f_{\max}$ 即截止频率由系统最长基线 $B_{\max}$ 、入射光的最短波长 $\lambda_{\min}$ 决定, SPIDER 成像系统的角分辨率为 ^[2]

$$\varphi_{\min} = \frac{1}{f_{\max}} = \frac{\lambda_{\min}}{B_{\max}} \quad (9)$$

2.2 视场

SPIDER 成像系统的每个微透镜后都有一组集光光波导阵列。成像系统的视场(Field of View, FOV)由微透镜的直径 D 和光波导的耦合效率 ρ 决定, 光波导端面上视场边缘的耦合效率约为中心耦合效率的 10% ^[16]。因而每个微透镜后单根光波导的视场限制在 $\pm\lambda/D$, 如果要扩大成像视场, 使用 $N \times N$ (其中 N 为正整数)的波导阵列, 则视场公式为

$$FOV=2N\frac{\lambda}{D} \quad (10)$$

由此可知, SPIDER 成像系统的视场是由入射光波长、微透镜的直径和波导阵列的大小决定的。

3 SPIDER 成像系统的计算机仿真

针对表 1 中的应用需求, 参照 SPIDER 成像系统的结构设计^[2], 进行 SPIDER 成像技术的仿真验证。根据成像原理及性能公式, SPIDER 成像系统的参数设计见表 2。微透镜的排布采用二维圆周排布, 单个干涉臂上微透镜的分布为均匀分布, 微透镜配对采用单个干涉臂上首尾配对的方式, 即 $(1, N), (2, N-1), \dots, (N/2, N/2+1)$, 其中 N 为偶数。

表 1 成像性能指标需求

预期性能指标	
工作波长	$1.5\ \mu\text{m}\sim 1.9\ \mu\text{m}$
角分辨率	$3''$
单根光波导对应视场	0.1°
全视场	10°

表 2 SPIDER 成像系统的参数设计

参数	数值
物距 z	500 km
光纤光栅分光数量	10
最长基线长度 $B_{\max}$	117 mm
单个微透镜直径 D	1.9 mm
微透镜焦距 f'	9 mm
单个干涉臂上微透镜个数	24
微透镜干涉臂的数量	37
波导阵列	100×100

考虑到对应 10° 视场的目标图像数据较大, 因而选择单根光波导对应 0.1° 视场的分辨率板作为仿真目标图像进行成像原理验证, 如图 3(a)所示。根据表 2 中的参数对目标图像进行 MATLAB 仿真。仿真过程遵循: 微透镜阵列收集物面光信息, 将光信号耦合进光波导阵列后进行光栅分光; 通过相位延迟器后, 经信息处理模块, 采集得到光电转换后的电流分

量; 经傅里叶逆变换后, 得到恢复图像。SPIDER 成像系统的空间频率采样如图 3(b)所示, 经过 SPIDER 成像系统后的恢复图像如图 3(c)所示, 成像后恢复图像与原始目标图像的残差如图 3(d)所示。由图 3 可知, SPIDER 成像系统具有较好的成像性能, 因而通过计算仿真验证了 SPIDER 成像技术的可行性。

4 结论

详细介绍了 SPIDER 的成像原理, 对 SPIDER 成像系统中传感器阵列的光场分布和信息处理模块中的信号处理进行了详细理论介绍, 并分析了影响 SPIDER 成像系统中分辨率和视场的因素。通过计算机仿真, 获得了 SPIDER 成像系统对目标图像成像后的恢复图像和恢复图像与目标图像的残差图, 对 SPIDER 成像系统在 $1.5\ \mu\text{m}\sim 1.9\ \mu\text{m}$ 波长范围内的成像质量进行了仿真验证。结果表明, SPIDER 成像技术具有良好的成像效果, 在光学红外成像领域拥有广阔的应用前景。研究报告显示, 目前 SPIDER 成像技术仍处于初级阶段, SPIDER 成像技术的研制包含了微纳制造技术、光子集成电路、空间频域欠采样图像反演等技术。本文为 SPIDER 成像技术的深入研究试验提供了重要理论支撑。

参考文献

- [1] 张学军, 樊延超, 鲍赫, 等. 超大口径空间光学遥感器的应用和发展 [J]. 光学精密工程, 2016, 24(11): 2613-2626.
- [2] Kendrick R, Duncan A, Ogden C, et al. Flat Panel Space Based Space Surveillance Sensor [C]. Maui: Advanced Maui Optical and Space Surveillance Technologies (AMOS) Conference, 2013.
- [3] Duncan A L, Kendrick R L. Segmented Planar Imaging Detector for Electro-optic Reconnaissance; US8913859 [P]. 2014-12-16.
- [4] Duncan A, Ogden C, Wuchenich D, et al. System Design for a SPIDER Imager [C]. San Jose: Frontiers in Optics, 2015.
- [5] Su T, Scott R P, Ogden C, et al. Experimental

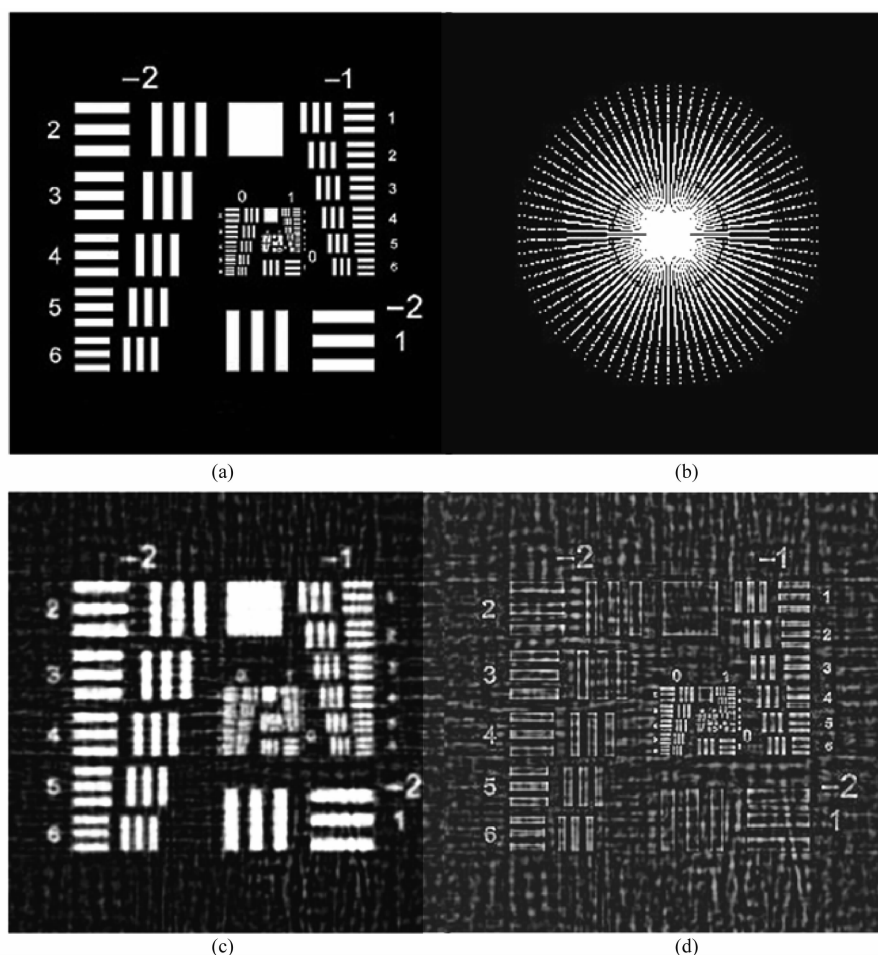


图 3 SPIDER 成像系统的仿真

- Demonstration of Interferometric Imaging Using Photonic Integrated Circuits [J]. *Optics Express*, 2017, **25**(11): 12653–12665.
- [6] Kendrick R, Thurman S T, Duncan A, et al. Segmented Planar Imaging Detector for EO Reconnaissance [C]. Arlington: Computational Optical Sensing and Imaging, 2013.
- [7] Duncan A, Kendrick R, Thurman S, et al. SPIDER: Next Generation Chip Scale Imaging Sensor [C]. Wailea: Advanced Maui Optical and Space Surveillance Technologies Conference, 2015.
- [8] Chu Q A, Shen Y J, Yuan M, et al. Numerical Simulation and Optimal Design of Segmented Planar Imaging Detector for Electro-Optical Reconnaissance [J]. *Optics Communications*, 2017, **405**: 288–296.
- [9] 吕乃光, 周哲海. 傅里叶光学 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2009.
- [10] 张凤林, 孙学珠. 工程光学 [M]. 天津: 天津大学出版社, 1997.
- [11] Wang Z, Zhou Z. Optical 90-degree Hybrids Based on Silicon-on-insulator Multimode Interference Couplers [C]. *SPIE*, 2012, **8255**: 82551Z.
- [12] 肖悦娱. 平面波导光耦合器及基于耦合器的光器件的研制 [D]. 杭州: 浙江大学, 2005.
- [13] 张仙玲, 裴晓芳, 陶纯堪. UV 覆盖优化标准的初步研究 [J]. *南京晓庄学院学报*, 2006, **22**(4): 27–30.
- [14] 顾德门, 秦克诚. 统计光学 [M]. 北京: 科学出版社, 1992.
- [15] Thibault S, Lacoursière J. Advanced Fiber Coupling Technologies for Space and Astronomical Applications [J]. *SPIE*, 2004, **5578**: 40–51.
- [16] Guyon O. Wide Field Interferometric Imaging with Single-mode Fibers [J]. *Astronomy and Astrophysics*, 2002, **387**(1): 366–378.