拼接式望远镜光学共相探测技术

张龙[1,2,3], 王孝坤[1,2*], 程强[1,2], 王若秋[1,2]

[1]中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033;
[2]中国科学院光学系统先进制造技术重点实验室, 吉林 长春 130033;
[3]中国科学院大学, 北京 100049

摘要 为使拼接式望远镜的分辨率接近等效口径的衍射极限,各子镜必须具有极高的共面精度。针对拼接式望远镜的共相问题,首先,研究了拼接式望远镜光学共相探测中瞳面共相探测技术和焦面共相探测技术的原理。然后,总结了各项光学共相探测技术的优缺点、适用领域以及未来发展趋势。最后,分别为大平移误差、大倾斜误差的探测问题提供了解决方案。

关键词 测量与计量; 拼接式望远镜; 波前探测; 平移误差; 倾斜误差

中图分类号 O436.1; O439 **文献标志码** A **doi**: 10.3788/LOP57.230102

Optical Co-Phasing Detection Technology of Segmented Telescopes

Zhang Long[1,2,3], Wang Xiaokun[1,2*], Cheng Qiang[1,2], Wang Ruoqiu[1,2]

[1]*Changchun Institute of Optics Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun, Jilin* 130033, *China*;
[2]*Key Laboratory of Optical System Advanced Manufacturing Technology, Chinese Academy of Sciences, Changchun, Jilin* 130033, *China*;
[3]*University of Chinese Academy of Sciences, Beijing* 100049, *China*

Abstract In order to make the resolution of segmented telescopes close to the diffraction limit of equivalent aperture, each sub-mirror must have extra high coplanar precision. In this paper, aiming at the co-phasing problem of segmented telescopes, first, the principle of co-phasing detection technology of pupil plane and focal plane in segmented telescopes optical co-phasing detection technology is studied. Then, the advantages and disadvantages, application fields and future development trends are summarized. Finally, solutions are provided on the detection problems of large piston error and large tip-tilt error respectively.

Key words measurement and metrology; segmented telescopes; wavefront detection; piston error; tip-tilt error

OCIS codes 010.7350; 110.6770

1 引 言

随着科学技术的发展,天文学家需要分辨率更高的天文望远镜探索宇宙的奥秘。增大望远镜的主镜口径是提高观测分辨率和集光能力的有效手段[1-2],但主镜口径的不断增大会给望远镜的制造、加工、检测、集成装调等技术带来巨大的挑战。为了解决这一技术难题,人们提出用拼接式主镜代替单块主镜的方案[3],如凯克望远镜(KECK I/II)[4]、加那利大型望远镜(GTC)[5]、巨型麦哲伦望远镜(GMT)[6]、三十米望远镜(TMT)[7]、欧洲极大天文望远镜(E-ELT)[8]、詹姆斯韦伯太空望远镜(JWST)[9]。虽然拼接式主镜的设计具有很多优势,但各子镜的共相实现难度大[10]。其中,子镜沿光轴方向(z 轴)的平移误差(波前 Piston 误差)和绕 x、y 轴旋转的倾斜误差(波前 Tip-tilt 误差)对共相的影响最显著(下文所述的共相误差探测主要是对这两种误差的探测)[11]。根据共相探测的量程和精

收稿日期: 2020-02-24; **修回日期**: 2020-04-17; **录用日期**: 2020-04-27

基金项目: 国家重点基础研究发展计划(2016YFB0500100)、装备预研项目(30502010501HT01)

*E-mail: jimwxk@sohu.com

(C)1994-2021 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

度，可将拼接式望远镜共相探测的流程概括为子镜共焦（Co-focus）探测→子镜粗共相（Coarse co-phasing）探测→子镜精共相（Fine co-phasing）探测。其中，共焦探测是针对大倾斜量的探测，粗共相探测是针对大平移量的探测，精共相探测是针对小平移、小倾斜量的探测。

为了研究拼接式望远镜光学共相探测技术，本文介绍了几种典型光学共相探测技术的原理、实际应用、研究进展等，总结分析了各项光学共相探测技术的优缺点以及适用领域，并展望了光学共相探测技术的未来发展趋势，对拼接式望远镜的光学共相探测技术及光学成像技术的研究具有一定的借鉴意义。

2 光学共相探测技术的原理及进展

根据技术特点，可将光学共相探测技术分为瞳面共相探测技术和焦面共相探测技术[12]。瞳面共相探测技术包括夏克-哈特曼传感法（SHAPS）、衍射图像传感法（DIPSI）、四棱锥传感法（PYPS）、色散条纹传感法（DFS）、色散哈特曼传感法（DHS）、色散瑞利干涉仪（DRI）、泽尼克相衬传感法（ZPCS）等波前探测技术；焦面共相探测技术包括相位复原法（PR）、相位差法（PD）等波前探测技术[10]。其中，SHAPS 已经在 KECK 上成功使用，DFS/DHS 将在 GMT 上使用，PYPS 作为 E-ELT 共相探测的候选方案，PR/PD 将被用于天基望远镜 JWST。

2.1 瞳面共相探测技术的原理及进展

瞳面共相探测技术通常利用特定结构的传感器对系统的瞳面波前进行调制分析，从而获取共相误差信息。

2.1.1 夏克-哈特曼波前探测技术

传统 SHAPS 波前探测技术通过微透镜阵列后焦面上的像点质心位置计算子孔径的平均波前斜率，然后利用斜率信息反演波前相位，完成镜面面形检测或整镜系统的波前探测[13]。对于拼接式望远镜，传统 SHAPS 波前探测技术可进行子镜倾斜误差的探测，但无法完成子镜平移误差的探测。1994 年，Chanan 等[14]对传统 SHAPS 波前探测技术进行改进，重新设计了 SHAPS 微透镜阵列的排布方式，将微透镜阵列位于出瞳处，相当于加入光瞳掩模，掩模上分布着与相邻子镜一一对应的采样圆孔，如图 1(a)所示。为提升成像质量，常用微棱镜阵列与成像透镜组合的方式代替微透镜阵列。一方面，可利用中心采样圆孔对应的像点质心位置解算倾斜误差；另一方面，可利用边界采样圆孔（均匀分布于相邻子镜出瞳边界两侧）对应的焦面衍射光斑图像与样板光斑图像的互相关运算解算子镜的平移误差[15]。

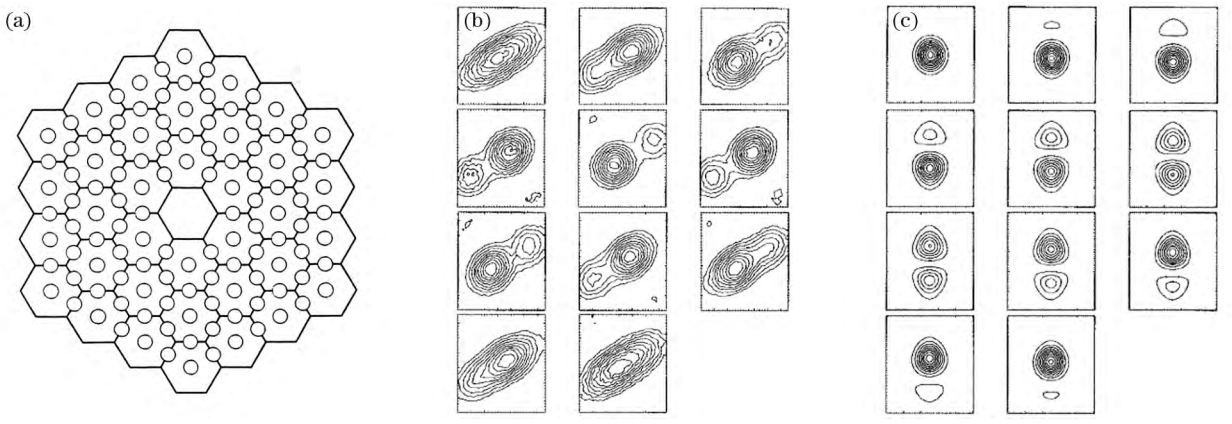

图 1 改进的 SHAPS 波前探测技术。(a)光瞳掩模[16]；(b)宽带算法模板[16]；(c)窄带算法模板[17]

Fig. 1 Improved SHAPS wavefront detection technology. (a) Pupil mask[16]; (b) broad-band algorithm template[16]; (c) narrow-band algorithm template[17]

1998 年，Chanan 等[16]结合宽带光和改进的 SHAPS 探测子镜间的平移误差，通过选取特定带宽光，可实现±30 μm 范围内的平移误差探测，探测精度可达 30 nm，宽带算法的模板如图 1(b)所示。宽带探测方法的精度较低，2000 年，Chanan 等[17]提出利用 SHAPS 窄带算法补充探测子镜间的平移误差，探测精度可达 6 nm，窄带算法的模板如图 1(c)所示。基于 SHAPS 宽、窄带算法的简单论证，Chanan 等[18]总结了 KECK 共相过程的具体参数，如表 1 所示，其中，FWHM 为半峰全宽。

(C)1994-2021 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

表 1　KECK 共相过程的参数[18]

Table 1　Parameter of the KECK co-phasing procedure[18]

Procedure name	Narrow-band SHAPS		Broad-band SHAPS	
Capture range/μm	0.100	±30	±3	±1
Accuracy/nm	6	1000	100	30
Number of exposures	1	11	11	11
Execution time/min	20	30	30	30
Star magnitude	5	4	5	6
Central wavelength/nm	852	891	870	700
Filter FWHM/nm	30	10	100	200

2000 年，基于 KECK 的 SHAPS 设计，Devaney 等[19]对 GTC 的 SHAPS 进行了初始设计，其光瞳掩模设计如图 2(a)所示。2002 年，Schumacher 等[20]对 KECK 的 SHAPS 窄带算法进行改进，通过计算所测图像的峰值比，并与标定数据(由模板衍射光斑两峰值的比组成)进行对比，获得子镜间的平移误差。与 KECK 的 SHAPS 窄带算法相比，该方法可提升探测精度。2004 年，Devaney 等[21]在 GTC 实验平台上验证了峰值比算法的可行性，其光瞳掩模布局如图 2(b)所示[22]。在建的 TMT 也采用 SHAPS 波前探测技术获取子镜间的共相误差，其光瞳掩模布局如图 2(c)所示[23]。

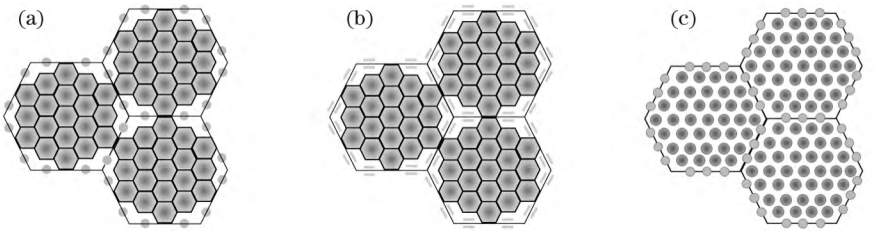

图 2　SHAPS的光瞳掩模布局。(a) GTC 的初始光瞳掩模设计[19]；(b) GTC 的光瞳掩模[22]；(c) TMT 的光瞳掩模[23]

Fig. 2　Pupil mask layout of SHAPS. (a) Initial pupil mask design of GTC[19]; (b) pupil mask of GTC[22]; (c) pupil mask of TMT[23]

为研究适用于 E-ELT 的共相探测技术，欧洲南方天文台(ESO)建立了主动共相实验(APE)平台[24]，其主动拼接镜的设计如图 3(a)所示。在 APE 中，Yaitskova 等[24]对 SHAPS 位于相邻子镜出瞳边界处的微透镜阵列进行改进，用圆柱形微透镜阵列使传感器件更小，如图 3(b)所示。2011 年，Gonte 等[25]在此基础上完成了不同星等下的测试实验，对于明亮的恒星，闭环校正后，整体平移误差的均方根(RMS)优于 10 nm；在星等为 14.5 时，平移误差的 RMS 可达到 22 nm。

1999 年，苏定强等[26]研究了 SHAPS 共相探测方法，并于 2002 年利用 SHAPS 进行了共焦实验，经过探测与调整，得到子镜倾斜误差的 RMS 小于 0.035″[27]。2010 年，林旭东等[28]利用 SHAPS 波前探测技术对三块拼接镜进行了共焦、共相实验，得到的共相探测结果优于 16 nm。2017 年，Li 等[29]结合宽带法与窄带双波长方法探测子镜的平移误差，实验结果表明，平移误差的探测范围可达到100 μm、探测精度优于 26 nm、调整精度约为55 nm。

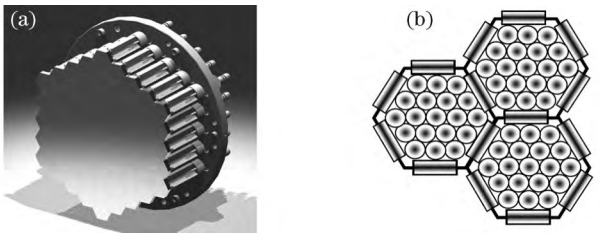

图 3　主动共相实验平台。(a)主动拼接镜设计[24]；(b) SHAPS 的微透镜阵列[24]

Fig. 3　Experiment platform of active co-phasing. (a) Design of active segmented mirror[24]; (b) micro lens array of SHAPS[24]

2.1.2　四棱锥波前探测技术

PYPS 波前探测技术的原理如图 4 所示[36]，其中，四棱锥是一个底面为正方形的金字塔型折射棱镜，棱镜的顶点与望远镜光学系统的轴上焦点重合，棱镜后依次放置中继透镜和 CCD 相机。对波前进

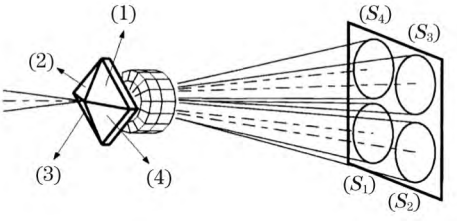

图 4　PYPS 波前探测原理图[36]

Fig. 4　Schematic diagram of PYPS wavefront detection[36]

(C)1994-2021 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

行计算时，可将探测器划分为四个大小相等的象限，分别对应四棱锥的四个棱面。光波通过拼接式望远镜系统后会聚于四棱锥的顶点，经过棱镜的四个棱面和中继透镜折射后，在 CCD 探测器的四个象限分别生成一个出瞳像，编号依次为 $S_1 \sim S_4$，根据出瞳像的轮廓、能量分布可分析出波前误差。

1996 年，PYPS 被用于自适应光学领域[30]。2001 年，Esposito 等[31]通过数值仿真证明了 PYPS 可同时探测拼接镜的平移误差和倾斜误差。2005 年，Esposito 等[32]利用 PYPS 波前探测技术在实验室中对拼接镜进行共相探测与调整，最终得到的波前残余误差约为 10 nm。

为了进一步改善 PYPS 的性能，2008 年，Tozzi 等[33]利用双四棱锥进行共相探测，双四棱锥的光学设计[34]与实物[35]如图 5 所示。其中 N-SK11、N-PSK53 为 Schott 目录中的材料，分别对应双四棱锥的前、后四棱锥。该设计方案可在降低四棱锥制造难度的同时减少色散效应，具备更大波长范围的探测能力。

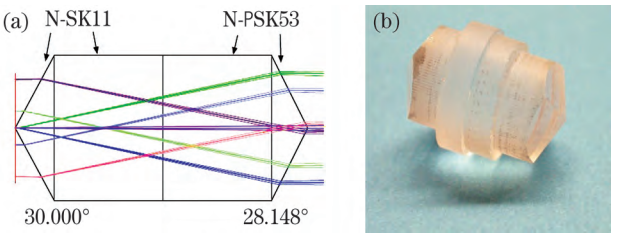

图 5 双四棱锥的光学设计与实物图。(a)光学设计[34]；(b)实物图[35]

Fig. 5 Optical design and physical image of the double quadrangular pyramid. (a) Optical design[34]; (b) physical image[35]

国内方面，2009 年，朱能鸿等[36]对 PYPS 的波前探测进行了仿真设计，并进行了平移误差的探测实验，在一个波长范围内，探测精度可达数十纳米；2016 年，颜召军等[37-38]研究了无调制 PYPS 的光瞳像标定问题以及共相探测的闭环控制；2010 年，王建新等[39]提出了一种两面锥的波前探测方案，并与无调制 PYPS 波前探测方案进行了对比，结果表明，两面锥的波前探测方案性能优于无调制 PYPS。

2.1.3 色散条纹/色散哈特曼波前探测技术

DFS 主要由干涉区域选择光阑(stop)、色散元件(dispersing element)、成像透镜(imaging lens)和相机靶面(CCD)等组成。其中，成像透镜均匀分布在相邻子镜出瞳边界两侧。以任意一组相邻子镜为例，复色光被光学系统反射，通过准直透镜形成平行光束，经过干涉区域选择光阑后，光谱被色散元件分开，经成像透镜后在 CCD 上成像，形成干涉条纹，其原理如图 6 所示。对于不同波长的光，当相邻子镜之间存在平移误差 Δz 时，会产生不同的相位差，衍射光斑能量极大值的位置对应不同的坐标偏移量。在干涉方向，光强的变化遵循双缝干涉规律；在色散方向，光强由双光束间的平移误差调制产生有规律的强度起伏，通过平移误差提取算法可从色散条纹中提取出平移误差。

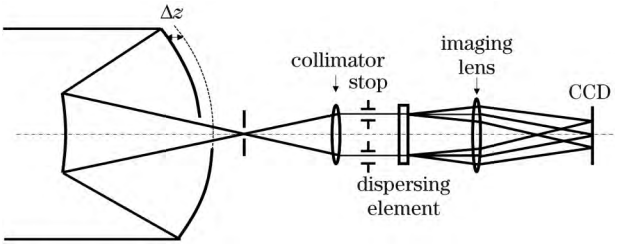

图 6 DFS 的波前探测原理

Fig. 6 Schematic diagram of DFS wavefront detection

若想同时测量多组相邻子镜的平移误差，需使用 DHS 波前探测技术，与 DFS 波前探测技术的原理相同，DHS 波前探测技术仅在结构上存在微小差异。DHS 克服了 SHAPS 用于粗共相时需更换滤波片、多次曝光的缺点，并保留了 DFS 大量程探测范围的优点。DHS 在传统 SHAPS 的微透镜阵列前加入色散元件，即棱栅或光栅，使成像光束沿着拼接子镜相邻边界方向色散，从而将 SHAPS 的多个单色光衍射图像有序排列，形成连续的色散条纹。同样可通过平移误差提取算法从色散条纹中提取出平移误差。

1996 年，DFS 在长基线共相干涉中得到了应用[40]。2000 年，喷气推进实验室(JPL)的 Shi 等[41]提出利用 DFS 测量拼接式望远镜平移误差的方案，并用透射相位板模拟子镜间的平移误差进行实验。结果表明，DFS 可以检测亚 mm 到亚 μm 范围内的平移误差，验证了其在下一代太空望远镜(NGST)粗共相过程中的实用性。2003 年，Shi 等[42]在 NGST 的波前控制试验台(WCT)上进行实验，结果表明，闭环情况下 DFS 的探测范围为 100 μm，探测精度为 50 nm。2004 年，Shi 等[43]通过测量 KECK 的平移误差验证 DFS 的性能，在初始平移误差范围为 16 μm 时，得到的最终探测精度可达 59 nm，如图 7(a)所示。图中掩模与色散条纹一一对应。2006 年，Albanese 等[44]提出利用 DHS 探测子镜间

(C)1994-2021 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

的平移误差，并在 KECK 上验证了该方法的可行性。随着 DFS/DHS 的不断发展，该方法被应用于 GMT、JWST 的粗共相系统中，如图 7(b)、图 7(c)所示[45-49]，其中，K、H 表示不同的光谱带宽。

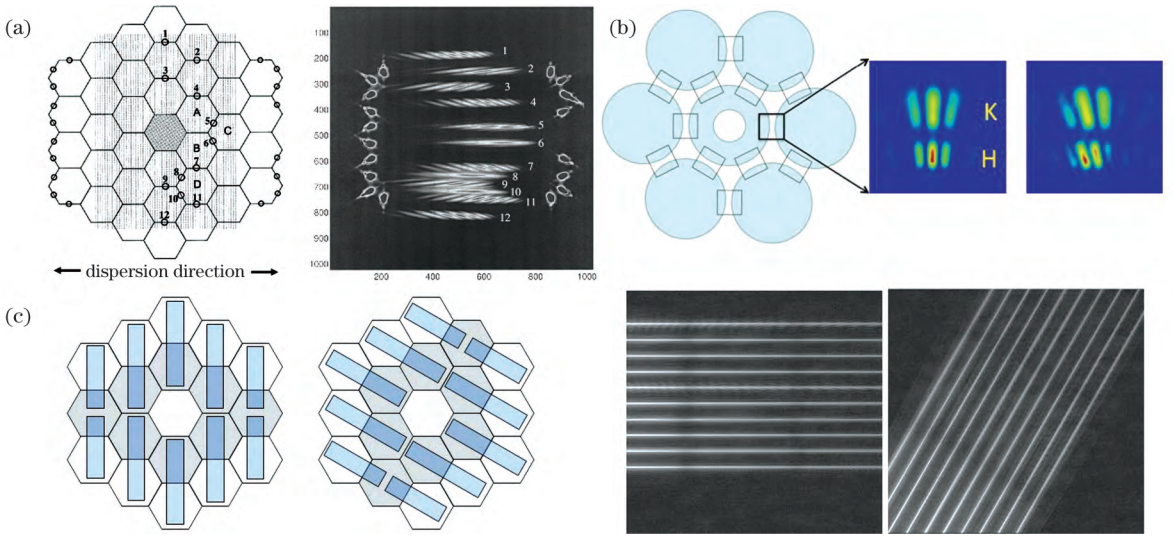

图 7 光瞳掩模和条纹图像。(a) KECK[43]；(b) GMT[48]；(C) JWST[49]

Fig. 7 Pupil mask and fringe image. (a) KECK[43]; (b) GMT[48]; (C) JWST[49]

为了更好地理解 DFS 条纹的形成、分析影响 DFS 算法性能的因素，Shi 等[50]分别仿真了掩模几何特性(形状、稀疏度、面积、方向等)对条纹可见度以及拼接子镜面形误差对条纹图像、DFS 信号、平移误差探测精度的影响，并提出了多路(Multi-trace) DFS 算法[51]，使 DFS 算法对波前像差的鲁棒性更强。2010 年，Spechler 等[52]提出了 Advanced DFS 算法，降低了 DFS 算法对系统标定误差的敏感度。

国内研究方面，2009 年，张勇等[53]开展了 DFS/DHS 的相关研究；该团队在 2011 年搭建了三块六边形子镜的平移误差探测系统[54]，室内探测的实验结果表明，在测量范围为±15 μm 时，测量精度可达 20 nm；并在 2012 年，利用该传感器装置完成了外场实验[55]。2016 年，颜召军等[56]提出了用色散条纹图像峰值比作为评价函数的共相零位标定方法，以两个子镜为研究对象，通过仿真分析和实验验证了该标定方法的可行性。实验结果表明，该方法不受 2π 周期性的影响，在几百微米的共相误差范围内，对共相零位标定的精度为 10 nm 左右，解决了现有标定方法动态范围受限的问题。Li 等[57-61]也研究了该技术及其色散条纹提取算法，提高了 DFS 提取算法的探测精度，增强了 DFS 的抗干扰能力和稳定性。

2.2 焦面共相探测技术的原理及进展

与瞳面共相探测技术不同，焦面共相探测技术不需要额外的传感器件，只需根据探测器采集的焦面或离焦面图像就能估计光学系统出瞳处的波前误差。根据光源的不同，可将焦面共相探测技术分为相位复原法(PR)、相位差法(PD)等波前探测技术。

2.2.1 相位复原波前探测技术

传统 PR 波前探测技术根据点光源经过光学系统所成的一幅焦面图像进行波前探测，由于探测结果具有不唯一性，通常需要采集多幅已知像差(常选择离焦)图像进行解算，其波前探测原理如图 8 所示。

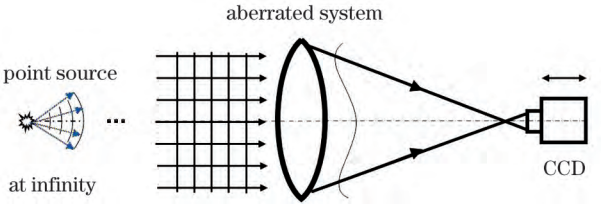

图 8 PR 波前探测原理图

Fig. 8 Schematic diagram of PR wavefront detection

PR 波前探测技术的核心思想为 GS(Gerchberg-Saxto)算法[62-63]，最著名的应用是对哈勃望远镜的波前探测。2006 年，Dean 等[64]提出用 PR 技术探测 JWST 波前的方法。目前 PR 技术可大致分为迭代变换相位复原法和参数相位复原法(非线性优化相位复原法)。

迭代变换相位复原法首先对瞳面相位信息 Φ_0 进行假设，利用已知的瞳面和焦面振幅信息(Amp)进行约束，利用正(F)、逆(F^{-1})傅里叶变换反复迭代，最终实现波前复原，其原理如图 9 所示[65]。从

(C)1994-2021 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

GS 算法衍生出的迭代变换相位复原算法有输入-输出算法、Misell-Gerchberg-Saxton 算法和混合算法等[66]。2012 年，Acton 等[49]将迭代变换相位复原法成功应用于 JWST 中，最终系统的波前误差可达 50 nm。

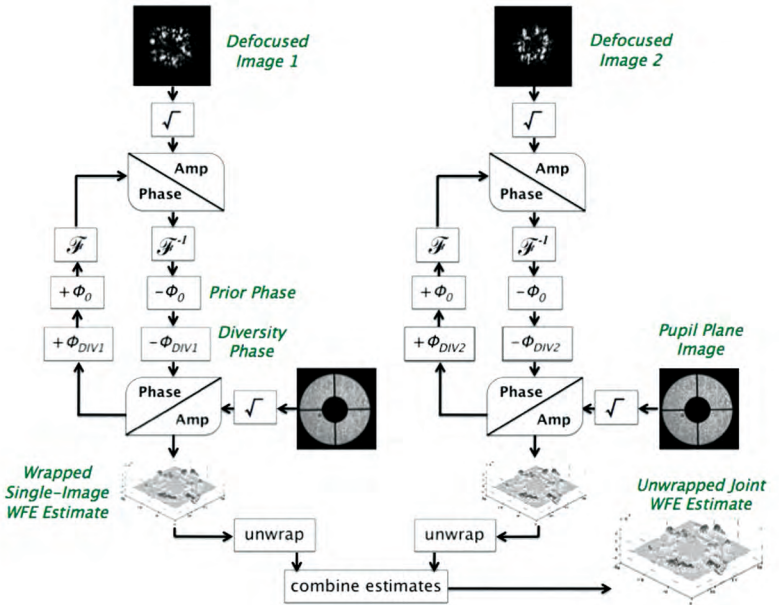

图 9 迭代变换相位复原法的原理图[65]

Fig. 9 Schematic diagram of iterative transformation phase retrieval method[65]

非线性优化相位复原算法也要对瞳面相位信息进行假设，与迭代变换法不同，该方法不是利用瞳面、焦面振幅信息进行约束，而是设定一个评价函数(E)来量化仿真结果与实测结果的关系。然后利用非线性优化算法，通过改变相位值减小评价函数。当评价函数满足设定值时，完成波前复原，其原理如图 10所示[67]。其中 $M(u,v)$和 $D(u,v)$分别为模拟和观测的点扩展函数(PSF)。

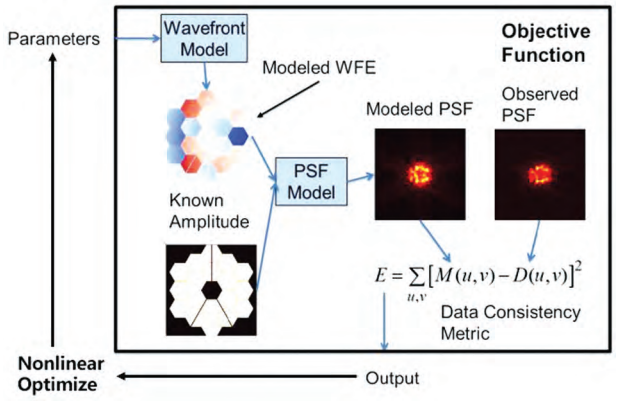

图 10 非线性优化相位复原算法的原理图[67]

Fig. 10 Schematic diagram of nonlinear optimized phase retrieval algorithm[67]

1982 年，Fienup[68]对非线性优化相位复原算法和传统迭代变换相位复原算法进行了对比，得出基于梯度的非线性优化算法收敛速度比传统迭代变换算法快的结论。1993 年，Fienup[69]推导了相位复原法的评价函数梯度，极大减少了非线性优化复原算法的计算量。1999 年，Fienup[70]通过改进相位复原算法评价函数的梯度解析式，将 PR 技术扩展到宽带系统、欠采样系统。2006 年，Brady 等[71]将 PR 技术扩展到未知瞳面振幅信息的系统。2009 年，Thurman 等[72]仿真分析了信号偏差(背景光、杂散光、探测器暗电流等)对 PR 技术的影响，并提出了解决方法。2014 年，Jurling 等[73]使用具有算法微分的模梯度方法，不需要推导出一个完整的梯度解析式，就能快速实现相位复原。

虽然迭代变换相位复原法具有实现简单等优势，但该方法存在相位缠绕、收敛速度慢、探测范围有限等问题。而非线性优化相位复原算法是基于评价函数进行误差度量的方法，可以更容易地分析噪声、抖动等因素对相位复原的影响，还能解决相位缠绕问题，具有更好的应用前景。

2.2.2 相位差法波前探测技术

PD 是 PR 的改进技术，通过采集未知扩展目标经过光学系统所成的多幅已知像差(常选择离焦)图像进行波前探测和未知扩展目标的估计。除光源选择扩展光源外，该技术原理与 PR 技术基本一致，其原理如图 11 所示，其中 Δz 为探测器(CCD)沿光轴

(C)1994-2021 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

方向的移动量。

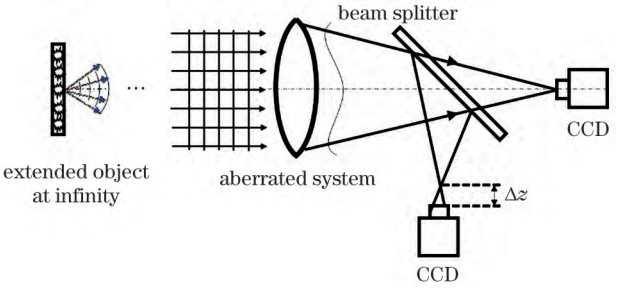

图 11 PD 波前探测原理图

Fig. 11 Schematic diagram of PD wavefront detection

1982 年，Gonsalves[74] 将 PD 技术应用于自适应光学领域，描述了该技术的数学表达式，并进行了简单的数值仿真。1988 年，Paxman 等[75] 利用 PD 技术探测拼接镜的平移误差，并通过仿真验证了该方法的有效性。1992 年，Paxman 等[76] 在高斯噪声和泊松噪声模型下，推导了 PD 技术的评价函数梯度，极大减少了非线性优化复原算法的计算量。1994 年，Kendrick 等[77] 改进了 PD 波前探测技术的评价函数，提出了无迭代广义回归神经网络(GRNN)相位复原方法，并通过实验验证了该方法的有效性。1998 年，Lofdahl 等[78] 基于 PD 技术搭建了一套用于 KECK II 望远镜子镜平移误差探测的实验平台，并完成了初步实验。结果表明，该算法需要在自适应光学系统的辅助下才能正常工作，原因是实验数据是在大气湍流情况下获得的。为了增强算法的鲁棒性，仍需进一步分析大气湍流对 PD 技术的影响。

国内研究方面，梁士通等[79] 利用基于遗传算法的 PD 技术求解拼接镜的平移误差，仿真结果表明，平移误差的估计值与实际值的 RMS 可达 0.04λ，其中，λ 为波长。2012 年，罗群等[80] 对 PD 探测拼接主镜平移误差的方法进行了理论分析和实验验证，结果表明，PD 对拼接镜平移误差的测量精度大于 $\lambda/20$。2015 年，Yue 等[81] 利用改进的 BFGS 算法求解拼接镜的共相误差，使 PD 算法的评价函数在凸函数和非凸函数情况下，都可得到收敛。

3 光学共相探测技术的性能对比及展望

3.1 光学共相探测技术的性能对比

不同光学共相探测技术的性能如表 2 所示，可以发现，传统 SHAPS 波前探测技术只能探测子镜的倾斜误差，虽然通过加入光瞳掩模，利用改进的宽窄带算法可实现子镜间大范围、高精度的平移误差探测，但存在掩模与子镜光瞳边界难对准的问题。PYPS 波前探测技术能同时测量平移误差和倾斜误差，且具有空间采样率高、光能利用率高、灵敏度高等优点，但也存在 PYPS 制作难度大、对装调精度敏感、PYPS 色散明显等缺点。DFS/DHS 波前探测技术仅能探测子镜的平移误差，与 SHAPS 波前探测技术相比，无需边缘传感器辅助测量，可用于天基望远镜。虽然该技术的探测范围较大，且探测精度较高，可以有效解决平移误差的 2π 周期性问题，但百 nm 级的精度依然不足以实现精共相。与其他方法相比，焦面共相探测技术 PR/PD 不需要额外的传感器件，但计算量较大。综上所述，瞳面共相探测技术一般具有较高的实时性，能实现拼接式系统共相误差的快速测量，更适合地基拼接式望远镜。焦面共相探测技术仪器简单，更适合天基望远镜。除此之外，E-ELT 在 APE 实验中将 DIPSI、PYPS、ZPCS 集成起来进行共相探测，但三者的探测水平相当，仍需不断完善[82]。王姗姗等[83] 对 DFS/DHS 进行了改进，提出了 DRI 波前探测技术，在保证较大探测范围的前提下，提高了探测精度。

表 2 光学共相探测技术性能比较

Table 2 Comparison of optical co-phasing detection techniques

Procedure name	SHAPS	DIPSI	PYPS	ZPCS	DFS/DHS	DRI	PR	PD
Capture	tens/ μm	tens/ μm	hundreds/ nm	hundreds/ nm	hundreds/ μm	hundreds/ μm	hundreds/ nm	hundreds/ nm
Accuracy/nm	few	few	few	few	tens	few	few	few
Piston detection	√	√	√	√	√	√	√	√
Tip/tilt detection	√	√	√	√	×	×	√	√
Applicable stage	coarse/fine	coarse/fine	fine	fine	coarse	coarse	fine	fine
Pupil registration	need	no need	need	no need	need	need	no need	no need
Data processing	average	average	simple	average	average	simple	complex	complex

(C)1994-2021 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

3.2 光学共相探测技术的展望

目前，大部分共相探测技术受其探测范围或探测精度的限制，需采用多种技术结合的方案完成共相，不仅会使仪器结构更复杂，还会导致过程繁琐异常。可通过扩大单一探测技术的探测量程，减少探测器或探测技术的种类，达到简化系统复杂度、探测流程的目的。

3.2.1 大平移量的探测

由于平移误差存在 2π 周期性问题，在准单色光情况下，无法通过成像特性解算拼接式望远镜的大平移误差。参考 SHAPS 的宽带算法，可通过结合多个波长的成像特性探测更大范围的平移误差。2006 年，Pinna 等[84]利用双波长闭环技术解决了 PYPS 共相探测中平移误差的 2π 周期性问题。2017 年，Paine 等[85]提出了用宽带光和一种特殊的网格搜索进行大平移误差探测，一定程度上解决了传统非线性优化算法易陷入局部极值的问题，扩大了 PR 技术探测平移误差的动态范围。2018 年，Guerra-Ramos 等[86]提出利用组合波长技术和卷积神经网络（CNN）进行大平移误差的探测。首先，将对应不同波长、不同 Piston 误差（随机生成）的图像作为训练集，然后利用 CNN 进行学习，最后通过测试集进行测试。根据不同的损失函数（loss function）将网络分为两个分支，一个分支有三个具有线性修正单元（ReLU）激活函数的卷积层，并在末端有一个全连接层（FC），损失函数是预测的 Piston 误差和真实 Piston 误差的均方根误差（RMSE）或 L2 范数，该分支使用单波长图像信息，用于预测[0，π]范围内的 Piston 误差；另一个分支有五个卷积层，在末端也有一个全连接层，损失函数为 Softmax 损失函数，该分支用来猜测 Piston 误差的模糊范围。网络的拓扑结构如图 12所示。

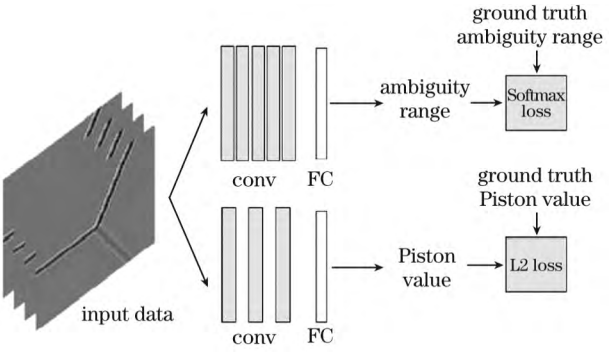

图 12 网络结构的示意图[86]

Fig. 12 Schematic representation of the network architecture[86]

经过 1600 个训练步骤，409600 个样本的学习，呈下降趋势的回归损失函数（regression loss）最终稳定在 0.003 rad^2，探测成功率为 98%，可实现 $\pm 11\lambda$ 范围内 Piston 误差的探测，精度约为 $\pm 0.0087\lambda$。这验证了该方法探测大平移误差的可行性，且具有收敛速度快（生成训练集后无需迭代）、除成像相机外无需额外器件等优点，具有很大的应用前景。但该方法仍处于初步研究阶段，一方面需要考虑噪声、欠采样等因素对算法鲁棒性的影响，另一方面还需进一步验证其可行性。

3.2.2 大倾斜量的探测

针对拼接镜的大倾斜量问题，通常利用质心提取算法获得各子镜的光斑质心，然后通过粗、精调节机构进行像点堆叠。该方法耗费时间长，且多个光斑堆叠在同一位置会使堆叠中心模糊。为了解决该问题，2011 年，Thurman[87]提出利用几何相位复原法对大倾斜量进行解算并通过数值仿真验证了该方法的可行性。该方法的核心思想是任何一个子镜的主光线都可以通过焦面或者离焦面确定像素位置，而该位置取决于子镜的位置、离焦量和离焦方向，原理如图13所示。将焦面和离焦面图像进行归一化

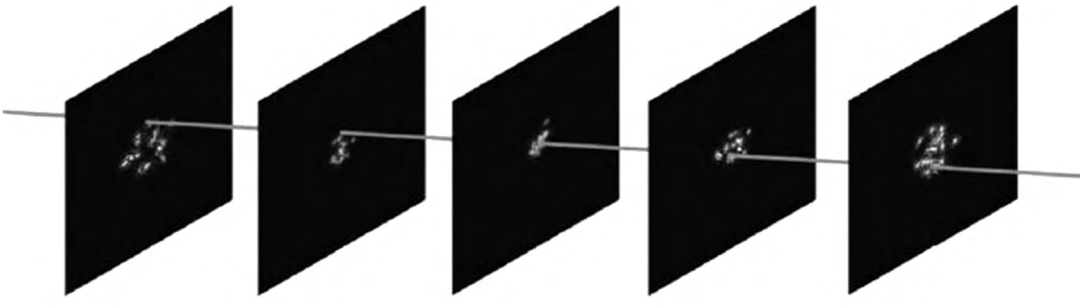

图 13 主光线通过焦面和离焦面[88]

Fig. 13 Chief ray passes through the focal and defocal plane[88]

(C)1994-2021 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

并相乘，可得到一个近似的概率分布函数。当子镜存在倾斜时，该光线在图像中的位置会根据相机尺寸和子镜的倾斜量发生偏移，此时概率密度函数的峰值也会移动到新的位置，从而根据函数峰值位置的变化求解子镜的倾斜方向和大小。但该方法的探测精度有限，为了进一步提升探测精度，可将其求得的倾斜值作为 PR 技术的初始值，降低非线性优化算法因远离真实值而陷入局部极值的可能性，进而完成大倾斜误差的探测。2015 年，Carlisle 等[88]将几何复原法用于 JWST 子镜大倾斜误差的探测中，并进行了数值仿真实验。结果表明，几何复原法可以为 PR 技术提供一个良好的初始估计，PR 技术结合几何复原法后探测范围扩大了 10 倍，并在缩小一定比例的 JWST 实验平台上验证了该方法的有效性。几何复原法具有探测大倾斜误差的能力，且具有收敛速度快（无需迭代）、除成像相机外无需额外器件等优点，有望在共相探测的像点堆叠过程得到广泛应用。但该方法在计算概率密度函数时可能出现多峰值问题，且其他子镜的光线也可能对求解概率密度函数峰值产生干扰，为了保证算法的鲁棒性，仍需进行深入的研究。

4 结　　论

光学共相探测技术是保证拼接式望远镜成像质量的关键，实现拼接式望远镜共相的技术主要包括瞳面共相探测技术和焦面共相探测技术。详细阐述了典型共相探测技术的原理及国内外研究进展，介绍了其在 KECK、GMT、E-ELT、JWST 等拼接式望远镜共相探测中的应用。对比分析结果表明：瞳面共相探测技术更适合地基拼接式望远镜，焦面共相探测技术更适合天基望远镜；SHAPS 波前探测方法功能强大、成熟度高，可用于验证其他共相探测方法；DFS/DHS 探测范围大，且无需边缘传感器辅助测量，可结合 PR/PD 技术应用于天基望远镜。结合当前光学共相探测技术的优缺点以及发展趋势，对大平移误差和大倾斜误差的探测进行了展望。对于大平移误差探测，多波长成像特性分析法可以有效解决平移误差的 2π 周期性问题，扩大平移误差的探测范围；对于大倾斜误差探测，几何相位复原法可以为 PR 技术提供良好的初始波前估计，一定程度上解决了传统非线性优化算法陷入局部极值的问题，扩大了倾斜误差的探测范围。

参 考 文 献

[1] Zhang X J, Fan Y C, Bao H, et al. Applications and development of ultra large aperture space optical remote sensors [J]. Optics and Precision Engineering, 2016, 24(11): 2613-2626.
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] Xu H, Yang L W, Yang H S. Recent progress of active support system for large optical telescope primary mirror[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2018, 55(10): 100002.
徐宏，杨利伟，杨会生. 大型光学望远镜主镜主动支撑系统研究进展[J]. 激光与光电子学进展，2018，55(10)：100002.

[3] Zhou C H, Wang Z L, Zhu F. Review on optical synthetic aperture imaging technique [J]. Chinese Optics, 2017, 10(1): 25-38.
周程灏，王治乐，朱峰. 大口径光学合成孔径成像技术发展现状[J]. 中国光学，2017，10(1)：25-38.

[4] Adkins S M, McLean I S, Fitzgerald M P, et al. New developments in instrumentation at the W. M. Keck observatory[J]. Proceedings of SPIE, 2016, 9908: 990805.

[5] Cabrera-Lavers A, Corradi R L M. Overview of the instrumentation programme of the 10.4 m GTC telescope [J]. Proceedings of SPIE, 2016, 9908: 990803.

[6] McCarthy P J, Fanson J, Bernstein R, et al. Overview and status of the giant Magellan telescope project [J]. Proceedings of SPIE, 2016, 9906: 990612.

[7] Nelson J, Sanders G H. The status of the thirty meter telescope project [J]. Proceedings of SPIE, 2008, 7012: 70121A.

[8] Tamai R, Cirasuolo M, González J C, et al. The E-ELT program status[J]. Proceedings of SPIE, 2016, 9906: 99060W.

[9] Greenhouse M. The James Webb space telescope: mission overview and status[C]//2019 IEEE Aerospace Conference, March 2-9, 2019, Big Sky, MT, USA. New York: IEEE, 2019: 1-13.

[10] Peng J T. Research on the optical testing andco-phasing technology for large aperture segmented mirror systems based on computer-generated holograms[D]. Changchun: Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, University of Chinese Academy of Science, 2017: 31-32.
彭建涛. 基于计算全息的拼接式大口径光学系统检测与共相技术研究[D]. 长春：中国科学院长春光学

(C)1994-2021 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

精密机械与物理研究所，2017：31-32.

[11] Zhang Y F, Xian H. Statistical properties of wavefront and image field of misaligned segmented optical systems [J]. Acta Optica Sinica, 2019, 39 (11): 1111004.

张永峰，鲜浩. 失调拼接式光学系统波前及像场统计特性研究[J]. **光学学报**，2019，39(11)：1111004.

[12] Dong L. Multi-spectral co-phasing error detection in optical synthetic aperture telescopes [D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2019: 22-31.

董理. 合成孔径望远镜共相误差多谱探测技术研究[D]. **北京：中国科学院大学**，2019：22-31.

[13] Wei H S. Large aperture space optical system test based on scanning Hartmann [D]. Changchun: Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, University of Chinese Academy of Science, 2018: 5-6.

魏海松. 基于扫描哈特曼的大口径空间光学系统检测技术[D]. **长春：中国科学院长春光学精密机械与物理研究所**，2018：5-6.

[14] Chanan G A, Mast T S, Nelson J E, et al. Phasing the mirror segments of the W. M. Keck telescope [J]. Proceedings of SPIE, 1994, 2199: 622-637.

[15] Zhang Y F, Xian H. Effects of gap and decenter of mask on narrow-band algorithm with ideal templates for co-phasing a segmented mirror [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2020, 57(8): 081101.

张永峰，鲜浩. 间隙及掩模偏心对采用理想模板窄带算法共相拼接镜的影响[J]. **激光与光电子学进展**，2020，57(8)：081101.

[16] Chanan G, Troy M, Dekens F, et al. Phasing the mirror segments of the Keck telescopes: the broadband phasing algorithm [J]. Applied Optics, 1998, 37(1): 140-155.

[17] Chanan G, Ohara C, Troy M. Phasing the mirror segments of the Keck telescopes II: the narrow-band phasing algorithm [J]. Applied Optics, 2000, 39 (25): 4706-4714.

[18] Chanan G A, Troy M, Ohara C M. Phasing the primary mirror segments of the Keck telescopes: a comparison of different techniques[J]. Proceedings of SPIE, 2000, 4003: 188-202.

[19] Devaney N, Cavaller-Marques L, Jochum L, et al. GUACAMOLE: the GTC guiding, acquisition, and calibration module[J]. Proceedings of SPIE, 2000, 4003: 146-153.

[20] Schumacher A, Devaney N, Montoya L. Phasing segmented mirrors: a modification of the Keck narrow-band technique and its application to extremely large telescopes [J]. Applied Optics, 2002, 41 (7): 1297-1307.

[21] Devaney N, Schumacher A. Cophasing techniques for extremely large telescopes[J]. Proceedings of SPIE, 2004, 5382: 431-439.

[22] Álvarez P, Castro J, Rutten R, et al. The GTC project: from commissioning to regular science operation. current performance and first science results [J]. Proceedings of SPIE, 2010, 7733: 773305.

[23] Troy M, Chanan G, Michaels S, et al. A conceptual design for the thirty meter telescope alignment and phasing system [J]. Proceedings of SPIE, 2008, 7012: 70120Y.

[24] Yaitskova N, Gonte F, Derie F, et al. The active phasing experiment: part I. concept and objectives [J]. Proceedings of SPIE, 2006, 6267: 62672Z.

[25] Gonte F, Mazzoleni R, Surdej I, et al. On-sky performances of an optical phasing sensor based on a cylindrical lenslet array for segmented telescopes[J]. Applied Optics, 2011, 50(12): 1660-1667.

[26] Su D Q, Cui X Q. Active optics: key technology of the new generation telescopes[J]. Progress in Astronomy, 1999, 17(1): 1-14.

苏定强，崔向群. 主动光学：新一代大望远镜的关键技术[J]. **天文学进展**，1999，17(1)：1-14.

[27] Su D Q, Zou W Y, Zhang Z C, et al. Experimental system of segmented-mirror active optics[J]. Proceedings of SPIE, 2000, 4003: 417-425.

[28] Lin X D, Wang J L, Liu X Y, et al. Co-phase experiment of active optics for segmented-mirrors [J]. Optics and Precision Engineering, 2010, 18(7): 563-569.

林旭东，王建立，刘欣悦，等. 拼接镜主动光学共相实验[J]. **光学 精密工程**，2010，18(7)：563-569.

[29] Li B, Yu W H, Chen M, et al. Co-phasing experiment of a segmented mirror using a combined broadband and two-wavelength algorithm[J]. Applied Optics, 2017, 56(32): 8871-8879.

[30] Riccardi A, Bindi N, Ragazzoni R, et al. Laboratory characterization of a Foucault-like wavefront sensor for adaptive optics[J]. Proceedings of SPIE, 1998, 3353: 941-951.

[31] Esposito S, Devaney N. Segmented telescopes co-phasing using pyramid sensor [EB/OL]. [2020-02-11]. https://www.researchgate.net/publication/

(C)1994-2021 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

234237604_Segmented_telescopes_co-phasing_using__Pyramid_Sensor.

[32] Esposito S, Pinna E, Puglisi A, et al. Pyramid sensor for segmented mirror alignment [J]. Optics Letters, 2005, 30(19): 2572-2574.

[33] Tozzi A, Stefanini P, Pinna E, et al. The double pyramid wavefront sensor for LBT [J]. Proceedings of SPIE, 2008, 7015: 701558.

[34] Pinna E. Study and characterization of the pyramid wavefront sensor for co-phasing[D]. Firenze: Università Degli Studi Di Firenze, 2010: 53-54.

[35] Pinna E, Quirós-Pacheco-F, Esposito S, et al. The pyramid phasing sensor (PYPS)[J]. Proceedings of SPIE, 2008, 7012: 70123D.

[36] Zhu N H, Chen X Y, Zhou D, et al. Study on measuring piston error of segmented mirror using pyramid sensor [J]. Chinese Journal of Sensors and Actuators, 2009, 22(3): 433-437.

朱能鸿，陈欣扬，周丹，等. 利用四棱锥传感器检测光学拼接镜的法向光程差[J]. 传感技术学报, 2009, 22(3): 433-437.

[37] Yan Z J, Yang P Q, Chen X Y. Pupil calibration method of non-modulation pyramid wavefront sensor [J]. Acta Optica Sinica, 2016, 36(6): 0601002.

颜召军，杨朋千，陈欣扬. 无调制四棱锥波前传感器的光瞳像标定方法[J]. 光学学报, 2016, 36(6): 0601002.

[38] Yan Z J, Zheng L X, Wang C Y, et al. Application of pyramid sensor for co-phasing space optical interferometric telescope[J]. Acta Photonica Sinica, 2018, 47(11): 1128002.

颜召军，郑立新，王超燕，等. 四棱锥传感器在空间光干涉望远镜共相中的应用[J]. 光子学报, 2018, 47(11): 1128002.

[39] Wang J X, Bai F Z, Ning Y, et al. Comparison between non-modulation four-sided and two-sided pyramid wavefront sensor[J]. Optics Express, 2010, 18(26): 27534-27549.

[40] Koechlin L, Lawson P R, Mourard D, et al. Dispersed fringe tracking with the multi-r_0 apertures of the Grand Interféromètre à 2 Télescopes [J]. Applied Optics, 1996, 35(16): 3002-3009.

[41] Shi F, Redding D C, Bowers C W, et al. DCATT dispersed fringe sensor: modeling and experimenting with the transmissive phase plates[J]. Proceedings of SPIE, 2000, 4013: 757-762.

[42] Shi F, Redding D C, Lowman A E, et al. Segmented mirror coarse phasing with a dispersed fringe sensor: experiments on NGST's wavefront control testbed [J]. Proceedings of SPIE, 2003, 4850: 318-328.

[43] Shi F, Ohara C M, Chanan G, et al. Experimental verification of dispersed fringe sensing as a segment-phasing technique using the Keck telescope [J]. Proceedings of SPIE, 2004, 5489: 1061-1073.

[44] Albanese M, Wirth A, Jankevics A, et al. Verification of the James Webb space telescope coarse phase sensor using the Keck telescope[J]. Proceedings of SPIE, 2006, 6265: 62650Z.

[45] Bouchez A H, McLeod B A, Scott Acton D, et al. The Giant Magellan telescope phasing system [J]. Proceedings of SPIE, 2012, 8447: 84473S.

[46] Kanneganti S, McLeod B A, Ordway M P, et al. A prototype phasing camera for the Giant Magellan telescope [J]. Proceedings of SPIE, 2012, 8447: 844752.

[47] van Dam M, Brian M, Antonin B. Measuring segment piston with a dispersed fringe sensor on the Giant Magellan telescope [EB/OL]. (2015-01-01) [2020-02-08]. https://www.mysciencework.com/publication/show/measuring-segment-piston-dispersed-fringe-sensor-giant-magellan-telescope-797c08d3.

[48] van Dam M A, McLeod B A, Bouchez A H. Dispersed fringe sensor for the Giant Magellan telescope[J]. Applied Optics, 2016, 55(3): 539-547.

[49] Scott Acton D, Scott Knight J, Contos A, et al. Wavefront sensing and controls for the James Webb space telescope [J]. Proceedings of SPIE, 2012, 8442: 84422H.

[50] Shi F, Redding D C, Green J J, et al. Performance of segmented mirror coarse phasing with a dispersed fringe sensor: modeling and simulations[J]. Proceedings of SPIE, 2004, 5487: 897-908.

[51] Shi F, Basinger S A, Redding D C. Performance of dispersed fringe sensor in the presence of segmented mirror aberrations: modeling and simulation [J]. Proceedings of SPIE, 2006, 6265: 62650Y.

[52] Spechler J A, Hoppe D J, Sigrist N, et al. Advanced DFS: a dispersed fringe sensing algorithm insensitive to small calibration errors[J]. Proceedings of SPIE, 2010, 7731: 773155.

[53] Zhang Y, Liu G R, Wang Y F, et al. Preliminary study of a dispersed fringe type sensing system [J]. Research in Astronomy and Astrophysics, 2009, 9(8): 945-952.

[54] Zhang Y, Zhang L, Liu G R, et al. Experimental

(C)1994-2021 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

study of segmented mirrors co-phase using dispersed fringe sensor[J]. Acta Optica Sinica, 2011, 31(2): 0212004.

张勇，张靓，刘根荣，等. 基于色散条纹传感器的拼接镜面共相的实验研究[J]. 光学学报，2011，31(2)：0212004.

[55] Zhang Y, Cui X Q, Liu G R, et al. Outdoors phasing progress of dispersed fringe sensing technology in NIAOT, China [J]. Proceedings of SPIE, 2012, 8444: 844461.

[56] Yan Z J, Chen X Y, Zheng L X, et al. Zero co-phasing reference calibration method based on dispersed interferogram for segmented mirror telescope[J]. Acta Physica Sinica, 2016, 65(19): 302-310.

颜召军，陈欣扬，郑立新，等. 基于色散干涉图像的拼接望远镜共相零位标定方法研究[J]. 物理学报，2016，65(19)：302-310.

[57] Li Y, Wang S Q, Rao C H. Dispersed-fringe-accumulation-based left-subtract-right method for fine co-phasing of a dispersed fringe sensor[J]. Applied Optics, 2017, 56(15): 4267-4273.

[58] Zhang Y F, Xian H. Coarse co-phasing method based on slope of visibility-enhanced dispersed fringe pattern for segmented telescope[J]. Optics Communications, 2020, 459: 124998.

[59] Zhang Y F, Xian H. Piston sensing via a dispersed fringe sensor with a merit-function-based active scanning algorithm at low light levels[J]. Chinese Optics Letters, 2019, 17(12): 121101.

[60] Meng Y H, Xu S Y, Xu B Q. Method of segmented mirrorco-phasing based on dispersed fringe sensing technology[J]. Acta Optica Sinica, 2016, 36(9): 0911006.

孟玉凰，徐抒岩，许博谦. 基于色散条纹传感技术的拼接镜共相方法[J]. 光学学报，2016，36(9)：0911006.

[61] Zhang C Y, Xu S Y, Xu B Q, et al. Correction for effect of calibration error on accuracy of co-phasing error detection of dispersed fringe[J]. Acta Optica Sinica, 2018, 38(7): 0711003.

张春悦，徐抒岩，许博谦，等. 标定误差对色散条纹共相误差检测影响的修正[J]. 光学学报，2018，38(7)：0711003.

[62] Gerchberg R W, Saxton W O. Practical algorithm for the determination of phase from image and diffraction plane pictures[J]. Optik (Stuttgart), 1972, 35(2): 237-250.

[63] Li Q, Wu Z, Xu J S, et al. Phase recovery algorithm based on pupil diversity[J]. Acta Optica Sinica, 2019, 39(6): 0626001.

李倩，吴桢，徐节速，等. 基于瞳面差异的相位复原算法[J]. 光学学报，2019，39(6)：0626001.

[64] Dean B H, Aronstein D L, Scott Smith J, et al. Phase retrieval algorithm for JWST flight and testbed telescope[J]. Proceedings of SPIE, 2006, 6265: 626511.

[65] Bikkannavar S, Redding D, Green J, et al. Phase retrieval methods for wavefront sensing[J]. Proceedings of SPIE, 2010, 7739: 77392X.

[66] Zielinski T P. Robust image-based wavefront sensing [D]. Rochester, NY: University of Rochester, 2011: 3-4.

[67] Jurling A S. Advances in algorithms for image based wavefront sensing [D]. Rochester, New York: University of Rochester, 2015: 5-6.

[68] Fienup J R. Phase retrieval algorithms: a comparison [J]. Applied Optics, 1982, 21(15): 2758-2769.

[69] Fienup J R. Phase-retrieval algorithms for a complicated optical system [J]. Applied Optics, 1993, 32(10): 1737-1746.

[70] Fienup J R. Phase retrieval for undersampled broadband images[J]. Journal of the Optical Society of America A, 1999, 16(7): 1831-1837.

[71] Brady G R, Fienup J R. Nonlinear optimization algorithm for retrieving the full complex pupil function[J]. Optics Express, 2006, 14(2): 474-486.

[72] Thurman S T, Fienup J R. Phase retrieval with signal bias [J]. Journal of the Optical Society of America A, 2009, 26(4): 1008-1014.

[73] Jurling A S, Fienup J R. Applications of algorithmic differentiation to phase retrieval algorithms [J]. Journal of the Optical Society of America. A, Optics, Image Science, and Vision, 2014, 31(7): 1348-1359.

[74] Gonsalves R A. Phase retrieval and diversity in adaptive optics [J]. Optical Engineering, 1982, 21(5): 215829.

[75] Paxman R G, Fienup J R. Optical misalignment sensing and image reconstruction using phase diversity [J]. Journal of the Optical Society of America A, 1988, 5(6): 914-923.

[76] Paxman R G, Schulz T J, Fienup J R. Joint estimation of object and aberrations by using phase diversity [J]. Journal of the Optical Society of America A, 1992, 9(7): 1072-1085.

(C)1994-2021 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

[77] Kendrick R L, Scott Acton D, Duncan A L. Experimental results from the Lockheed phase diversity test facility[J]. Proceedings of SPIE, 1994, 2302: 312-322.

[78] Lofdahl M G, Kendrick R L, Harwit A, et al. Phase diversity experiment to measure piston misalignment on the segmented primary mirror of the Keck II telescope [J]. Proceedings of SPIE, 1998, 3356: 1190-1201.

[79] Liang S T, Yang J F, Xue B. A new phase diversity wave-front error sensing method based on genetic algorithm [J]. Acta Optica Sinica, 2010, 30 (4): 1015-1019.

梁士通，杨建峰，薛彬. 基于遗传算法的改进相位差法波前误差传感技术研究[J]. **光学学报**, 2010, 30 (4): 1015-1019.

[80] Luo Q, Huang L H, Gu N T, et al. Experimental study on phase diversity wavefront sensing technology in piston error detection[J]. Acta Physica Sinica, 2012, 61(6): 529-536.

罗群，黄林海，顾乃庭，等. 相位差波前检测方法应用于平移误差检测的实验研究[J]. **物理学报**, 2012, 61(6): 529-536.

[81] Yue D, Xu S, Nie H. Co-phasing of the segmented mirror and image retrieval based on phase diversity using a modified algorithm [J]. Applied Optics, 2015, 54(26): 7917-7924.

[82] Gonté F, Araujo C, Bourtembourg R, et al. On-sky testing of the active phasing experiment [J]. The Messenger, 2009, 136: 25-31.

[83] Wang S S, Zhu Q D, Cao G R. Cophasing methods of segmented space telescope[J]. Acta Optica Sinica, 2009, 29(9): 2435-2440.

王姗姗，朱秋东，曹根瑞. 空间拼接主镜望远镜共相位检测方法[J]. **光学学报**, 2009, 29 (9): 2435-2440.

[84] Pinna E, Esposito S, Puglisi A, et al. Phase ambiguity solution with the pyramid phasing sensor [J]. Proceedings of SPIE, 2006, 6267: 62672Y.

[85] Paine S W, Fienup J R. Extending capture range for piston retrieval in segmented systems [J]. Applied Optics, 2017, 56(33): 9186-9192.

[86] Guerra-Ramos D, Díaz-García L, Trujillo-Sevilla J, et al. Piston alignment of segmented optical mirrors via convolutional neural networks[J]. Optics Letters, 2018, 43(17): 4264-4267.

[87] Thurman S T. Method of obtaining wavefront slope data from through-focus point spread function measurements[J]. Journal of the Optical Society of America A, 2011, 28(1): 1-7.

[88] Carlisle R E, Acton D S. Demonstration of extended capture range for James Webb space telescope phase retrieval[J]. Applied Optics, 2015, 54(21): 6454-6460.

(C)1994-2021 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net