

文章编号 1004-924X(2011)12-2877-07

## Golay3 望远镜系统的设计

范君柳<sup>1</sup>, 吴泉英<sup>1\*</sup>, 王福亮<sup>2</sup>, 沈婷婷<sup>2</sup>

(1. 苏州科技学院 数理学院, 江苏 苏州 215009; 2. 苏州大学 信息光学工程研究所, 江苏 苏州 215006)

**摘要:** 提出用 Golay3 稀疏孔径取代望远镜两镜系统中的主镜, 以在保证望远镜角分辨率的同时减少系统的质量和体积。首先利用三级像差理论设计了一套两镜系统, 其中主镜是球面镜, 次镜是双曲面镜。用 Golay3 稀疏孔径代替主镜, 分析了填充因子与子镜半径的关系。然后, 通过 Zemax 程序对系统进行模拟, 分析了系统的调制传递函数特性及点列图。最后, 在次镜后加入两块熔石英校正镜, 并优化校正镜表面曲率半径以及成像工作距离以改进视场。通过 Zemax 程序模拟发现: 系统的截止频率随着主镜填充因子的减小而减小, 从  $F=22.2\%$  的  $114.5 \text{ lp/mm}$  到  $F=15\%$  的  $97.7 \text{ lp/mm}$ , 再到  $F=10\%$  的  $77.8 \text{ lp/mm}$ ; 另外, 在成像面之前加入校正镜极大地提高了系统的视场, 在  $0.3^\circ$  视场下, 加入校正镜之前的最大像斑半径均方根值是加入后的 2.5 倍左右。

**关键词:** 望远镜; Golay3 稀疏孔径; 两镜系统; 填充因子; 校正镜

**中图分类号:** TH751 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20111912.2877

## Design of Golay 3 telescope system

FAN Jun-liu<sup>1</sup>, WU Quan-ying<sup>1\*</sup>, WANG Fu-liang<sup>2</sup>, SHEN Ting-ting<sup>2</sup>

(1. School of Mathematics and Physics, Suzhou

University of Science and Technology, Suzhou 215009, China;

2. Institute of Information Optical Engineering, Suzhou University, Suzhou 215006, China)

\* Corresponding author, E-mail: wqycyhoo@yahoo.com.cn

**Abstract:** The primary mirror of a two-reflective system for a telescope was replaced by a Golay 3 sparse aperture to reduce its weight and volume while remaining high angular resolution. Firstly, the two-reflective system with a spherical primary mirror and a hyperbolic secondary mirror was designed according to the third-aberration theory. Then, the primary mirror was substituted by a Golay 3 sparse aperture, and the relationship between fill factor and sub-mirror radius was analyzed. The whole system was simulated by Zemax software to obtain the Modulation Transfer Function(MTF) and the spot diagram of the system. Finally, two silicon correcting lenses were inserted behind the secondary mirror to optimize the radius of the correcting lens and imaging distances and to improve the field of the system. By Zemax simulation, it is shown that the cutoff frequency of the system has been decreased from  $114.5 \text{ lp/mm}$  to  $97.7 \text{ lp/mm}$  and to  $77.8 \text{ lp/mm}$  as the fill factor reduces from  $22.2\%$  to  $15\%$  and to  $10\%$ , respectively. Moreover, inserting the correcting lens in front of the image plane can greatly enlarge the field of the system, which shows the RMS value of maximum spot radius with-

收稿日期: 2011-03-23; 修订日期: 2011-05-06.

基金项目: 江苏省自然科学基金资助项目(No. BK2009129); 江苏省“333”人才工程和“六大人才高峰”资助项目

out correcting lens is about 2.5 times larger than that with a correcting lens in the field of  $0.3^\circ$ .

**Key words:** telescope; Golay3 sparse aperture; two-reflective system; fill factor; correcting lens

## 1 引言

角分辨率是天文望远镜的关键参数之一,为提高其值往往需要增大望远镜的口径,但这同时增加了望远镜的体积和重量,从而导致望远镜制造成本的上升,目前解决二者矛盾的有效途径之一就是采用稀疏孔径。稀疏孔径通过将数个较小的光学孔径按照一定的排列规则构成一个大的光学孔径来捕获与单个大孔径系统相当的目标信息,可有效地降低光学镜面的加工难度和制造成本。稀疏孔径在具体应用上有 2 种形式,即多子镜望远镜系统 (Multiple-mirror Telescope, MMT) 和多子望远镜系统 (Multiple-telescope Telescope, MTT),各自的代表分别有美国波音 SVS 公司的 Golay6 稀疏孔径望远镜<sup>[1]</sup> 和美国麻省理工学院 (MIT) 的自适应侦查 Golay-3 光学卫星 (Adaptive Reconnaissance Golay-3 Optical Satellite, ARGOS)<sup>[2]</sup>。

关于稀疏孔径的报道大部分都围绕理想的稀疏孔径模型<sup>[3-5]</sup> 进行讨论,并未将稀疏孔径置入望远镜体系<sup>[6-7]</sup> 从整体上对望远镜性能进行分析。本文设计了一套两镜系统,并用 Golay 3 稀疏孔径来替换主镜,得到了系统的调制传递函数随着稀疏孔径填充因子的变化规律;并为了改善系统的视场,提高像质,在像接收面之前加入校正镜。研究结果对 MMT 望远镜系统应用于天文和空间光学系统中提供了很好的理论指导。

## 2 Golay 3 望远镜设计

### 2.1 两镜系统设计步骤

两镜系统的基本结构如图 1 所示,次镜遮拦比  $\alpha = h_2/h_1$ ,次镜放大率  $\beta = l_2'/l_2$ ,利用高斯光学公式可得

$$R_2 = \frac{\alpha\beta R_1}{1+\beta}, \quad (1)$$

其中  $R_1$  和  $R_2$  分别为主镜  $M_1$  和次镜  $M_2$  的曲率

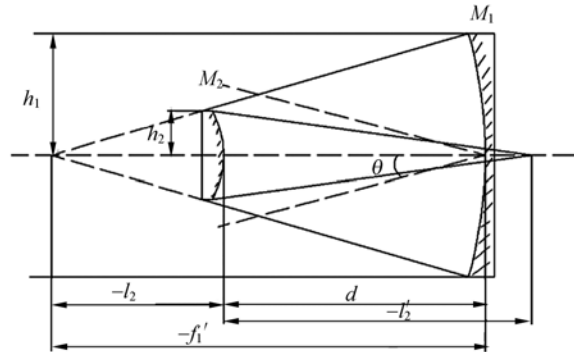


图 1 两镜系统结构

Fig. 1 Configuration of two-reflective system

半径。

两镜系统的设计首先要确定系统的通光孔径  $D$ <sup>[8]</sup>、相对口径、主镜相对口径以及系统焦点伸出量  $\Delta$  来计算  $\alpha$  和  $\beta$ ; 然后,利用公式  $l_2 = \frac{-f_1' + \Delta}{\beta - 1}$ ,  $d = f_1'(1 - \alpha)$  以及式(1)算出次镜位置  $l_2$ 、两镜相对位置  $d$  以及  $R_1$  和  $R_2$ ; 再根据三级像差理论,算出主镜及次镜的面形系数  $e_1^2$  和  $e_2^2$ ; 最后,以  $e_1^2$  和  $e_2^2$  作为优化变量,利用光学设计自动优化程序对系统进行优化。

根据以上步骤,本文设计了一套两镜系统,系统参数见表 1。

表 1 两镜系统结构参数

Tab. 1 Parameters of two-reflective system

系统参数	数值	系统参数	数值
通光口径	250	副镜位置	-226.666
$D/\text{mm}$		$l_2/\text{mm}$	
系统相对口径	1:4	两镜间距离	-273.334
		$d/\text{mm}$	
主镜相对口径	1:2	主镜曲率半径	-1 000.00
		$R_1/\text{mm}$	
系统伸出量	180	次镜曲率半径	-906.666
$\Delta/\text{mm}$		$R_2/\text{mm}$	
遮拦比 $\alpha$	0.456	主镜面形系数	0
		$e_1^2$	
副镜放大率 $\beta$	-2.012	优化后副镜面	8.591
		形系数 $e_2^2$	

考虑到主镜将由 Golay3 稀疏孔径替代,为了

控制子镜的 tilt 和 piston 误差自由度<sup>[2]</sup>,故主镜取为球面,即面形系数  $c_1^2$  为 0;同时由  $\alpha$  和  $\beta$  的大小和符号可知,该系统次镜小于主镜,位于主镜焦点同侧。

### 2.2 主镜为 Golay3 稀疏孔径的望远镜

在上述两镜系统的基础上(见图 2),用 Golay 3 稀疏孔径代替主镜,3 个子镜在主镜上的位置分布如图 3 所示:取光线传播方向为轴,根据右手坐标定则,  $xy$  平面与纸面平行。3 子镜都为球面,大小相等且均匀分布在主镜面上,3 个子镜的面形中心分别关于主镜面形中心  $120^\circ$  旋转对称,因此,3 子镜的曲率半径与主镜的曲率半径相同(见图 4)。

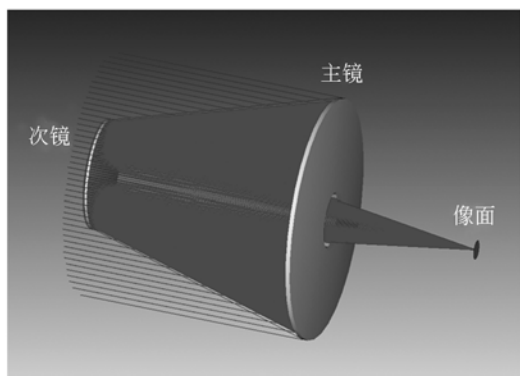


图 2 两镜系统的三维结构

Fig. 2 Three dimensional structure of two-reflective system

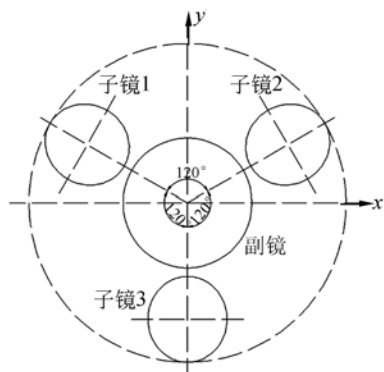


图 3 3 子镜相对位置关系

Fig. 3 Relative position of Golay 3 sub-mirrors

当主镜面与 3 子镜均为球面时,3 个子镜在  $xy$  面上的投影均为椭圆<sup>[9-10]</sup>,因此,实际上远处物体发出的光线只能通过该椭圆口径再被子镜反射到次镜。假设子镜的口径为  $2a$ ,则在  $xy$  面上与之对应的椭圆口径长轴为  $2a$ ,短轴为  $2b$ 。

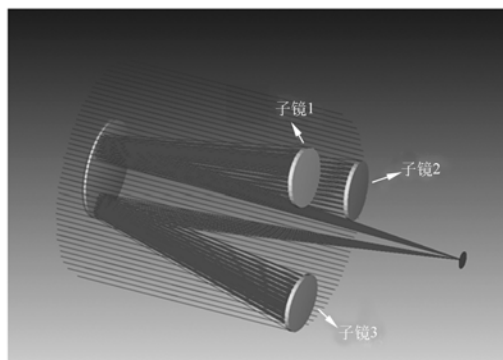


图 4 Golay 3 替代主镜的望远镜系统三维结构

Fig. 4 Three dimensional structure of Golay 3 telescope system

其中  $b$  满足以下关系:

$$\frac{2b}{D} = \left(\frac{2a}{D}\right)^2 \left\{ \left(\frac{D}{2R}\right)^2 + \sqrt{\left(\frac{D}{2R}\right)^4 - \left[\left(\frac{D}{2R}\right)^2 - \left(\frac{D}{2a}\right)^2 + \left(\frac{D}{2R}\right)^2 \left(\frac{D}{2a}\right)^2}\right\}, \quad (2)$$

式(2)中,  $D$  是主镜的通光口径,  $R$  是主镜的曲率半径,根据公式可以看出:如果在给定  $D$  和  $R$  (即给定主镜  $F/\#$ ) 的前提下,  $b$  的大小依赖于  $a$ , 其关系如图 5 所示。

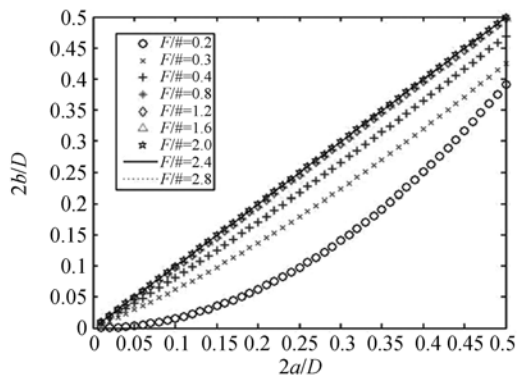


图 5 不同主镜焦比下椭圆长轴  $a$  与短轴  $b$  关系

Fig. 5 Relation between major semi-axis  $a$  and minor semi-axis  $b$  with different  $F/\#$

由图 5 可以看出:当  $F/\#$  增至 0.4 时,  $b$  与  $a$  几乎成线性关系;随着  $F/\#$  的增大,  $b$  与  $a$  的线性关系进一步加强。当  $R \rightarrow \infty$  时,主镜面为平面即  $b$  等于  $a$ 。

对于稀疏孔径,通常用填充因子  $F$  来表示该孔径收集光线能力的强弱<sup>[3]</sup>。  $F$  定义为:

$$F = \frac{nS_{\text{sub}}}{S_{\text{major}}}, \quad (3)$$

$n$ 表示子镜的数目,对于在  $xy$  平面投影为椭圆的 Golay3 而言,

$$F = \frac{12ab}{D^2} = 3\left(\frac{2a}{D}\right)^3 \left\{ \left(\frac{D}{2R}\right)^2 + \sqrt{\left(\frac{D}{2R}\right)^4 - \left[\left(\frac{D}{2R}\right)^2 - \left(\frac{D}{2a}\right)^2 + \left(\frac{D}{2R}\right)^2 \left(\frac{D}{2a}\right)^2}\right\}, \quad (4)$$

该式表明:在给定  $F/\#$  的前提下,填充因子的大小取决于子镜半径  $a$  的大小,其关系如图 6 所示。由图可知:随着子镜半径  $a$  的增加,填充因子也逐渐增加;当  $F/\#$  达到 0.4 时,填充因子的变化趋势趋于一致。考虑到次镜对主镜的遮拦,因此,并不是一味地增加子镜的半径  $a$  就能提高填充因子。

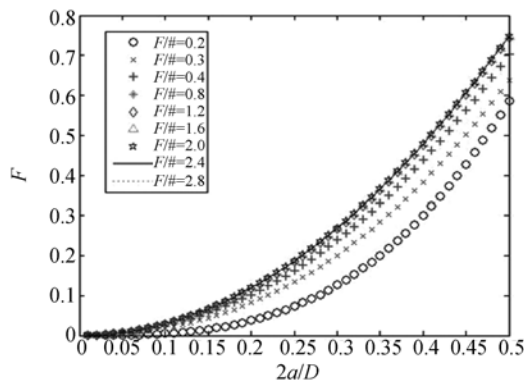
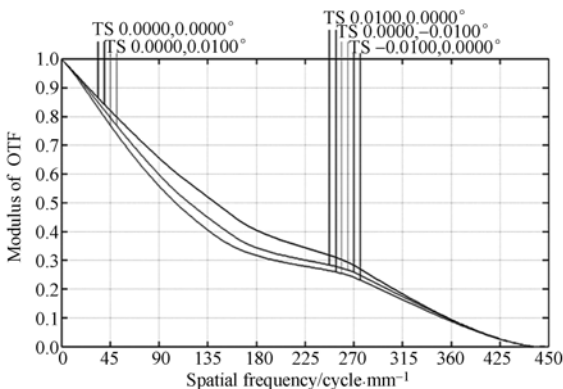


图 6 不同主镜焦距下长轴  $a$  与填充因子  $F$  关系  
Fig. 6 Relationship between  $a$  and fill factor  $F$  with different  $F/\#$

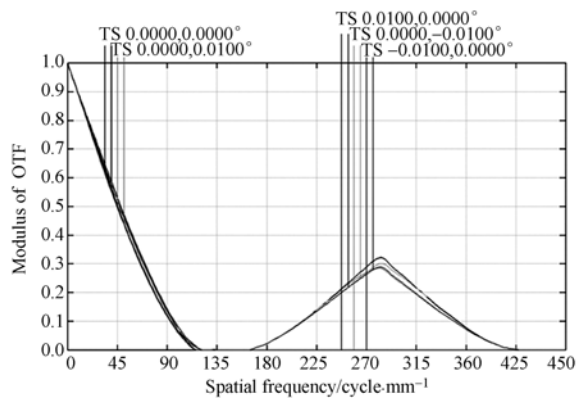
### 3 望远镜像质评价

#### 3.1 望远镜调制传递函数 MTF

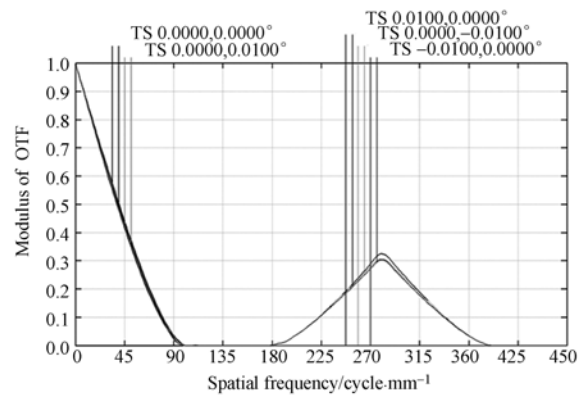
望远镜系统普遍常用光学传递函数和点列图来作为像质评价方法<sup>[11]</sup>,本文通过 Zemax 程序



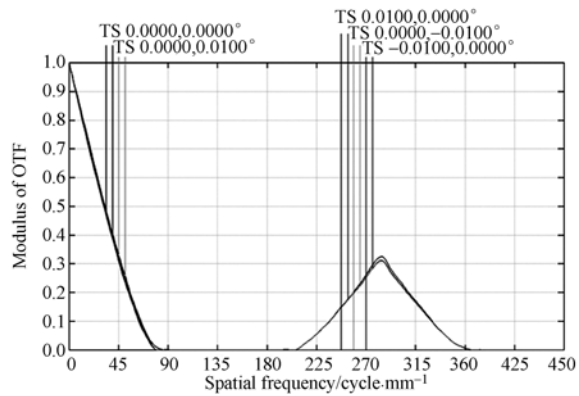
(a)未采用 Golay 3 的 MTF  
(a) MTF without Golay 3



(b) 填充因子  $F=22.2\%$  的 MTF  
(b) MTF with  $F$  of 22.2%



(c) 填充因子  $F=15\%$  的 MTF  
(c) MTF with  $F$  of 15%



(d) 填充因子  $F=10\%$  的 MTF  
(d) MTF with  $F$  of 10%

图 7 各种填充因子下系统传递函数关系图

Fig. 7 MTFs of all kinds of fill factors

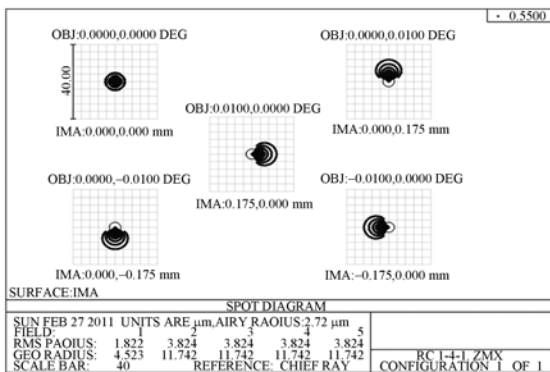
分别对上述设计的望远镜主镜未采用 Golay 3 稀疏孔径以及采用 Golay 3 时填充因子分别为 22.2%、15%和 10% (对于子镜的主半径分别为

34.000,27.951,22.822 mm)这 4 种情况进行模拟分析,其中设计的工作波段为 0.486~0.626  $\mu\text{m}$ ,视场范围为  $2\omega=0.02^\circ$ 。

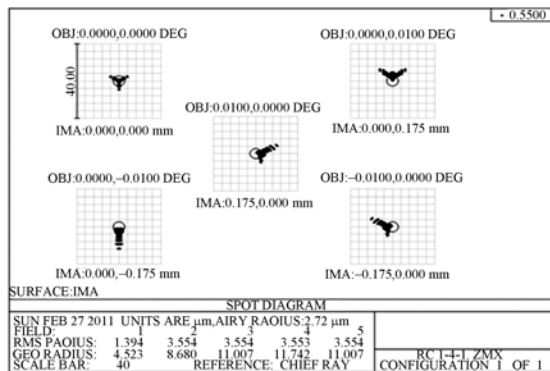
由图 7 可知,当系统主镜采用 Golay3 稀疏孔径时,由于通光孔径与采用全口径相比大大减小,所以前者 MTF 与后者 MTF 相比也有所减小,并且在低频区域有一段对比度信息丢失。当主镜采用 Golay3 稀疏孔径时,随着填充因子的减小,系统的 MTF 实际截止频率也在逐渐减小,从  $F=22.2\%$  的 114.5 lp/mm 到  $F=15\%$  的 97.7 lp/mm 再到  $F=10\%$  的 77.8 lp/mm,由于实际截止频率的倒数与角分辨率相关,这就意味着系统的角分辨率随着  $F$  的减小也在不断下降。

### 3.2 望远镜点列图

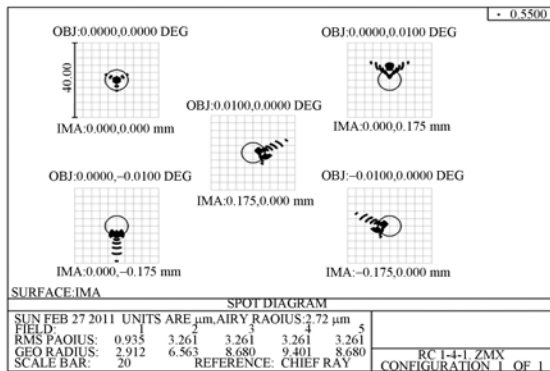
图 8(a)至图 8(d)是 4 种情况下的点列图,最大像斑半径均方根值分别为 3.824,3.554,3.261 和 3.128  $\mu\text{m}$ ,均稍大于艾里斑尺寸(2.72),说明



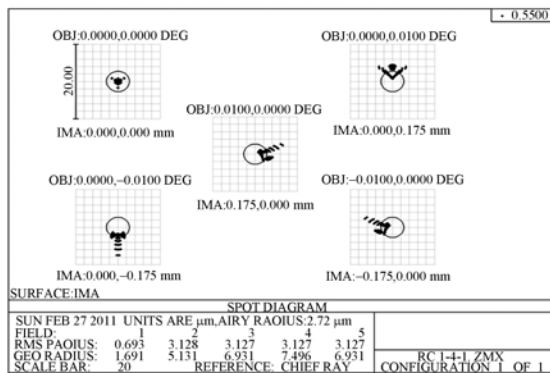
(a) 未采用 Golay3 的点列图  
(a) Spot diagram without Golay3



(b) 填充因子  $F=22.2\%$  的点列图  
(b) Spot diagram with  $F$  of 22.2%



(c) 填充因子  $F=15\%$  的点列图  
(c) Spot diagram with  $F$  of 15%



(d) 填充因子  $F=10\%$  的点列图  
(d) Spot diagram with  $F$  of 10%

图 8 各种填充因子下的点列图

Fig. 8 Spot diagrams of all kinds of fill factors

成像质量一般;由于 Zemax 程序在 4 种情况下模拟时追迹的光线数量不一样,可知像斑尺寸在未采用 Golay 3 时要比采用 Golay 3 时稍微大些。

## 4 Golay 3 望远镜优化设计

尽管主镜采用 Golay3 稀疏孔径的望远镜系统通过增大填充因子,MTF 仍能在低频区域(0~100 lp/mm)获得较好的线性效果,但此时系统的视场较小;当视场增大时,其轴外像差也会加大,望远镜系统的成像质量也会受到影响。使用非球面镜虽然可消除系统的部分像差,但由于其制造、加工比球面镜困难得多,装调难度大且成本高,因此,为了能够将视场扩大并且避免使用非球面镜,本文选择在副镜后面加入两块熔石英球面校正镜(见图 9)。

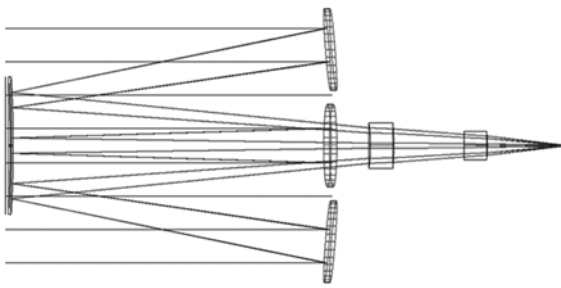


图 9 优化后系统结构图

Fig. 9 System's configuration after optimization

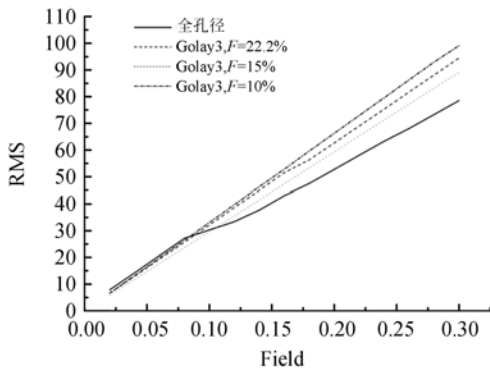
通过 Zemax 程序进行优化,以 2 块校正镜前后表面的曲率半径以及后工作距离为优化变量,以获得良好成像为目标,得到优化后的结构数据如见表 2。

表 2 优化后熔石英参数

Tab. 2 Parameters of silica lens after optimization (mm)

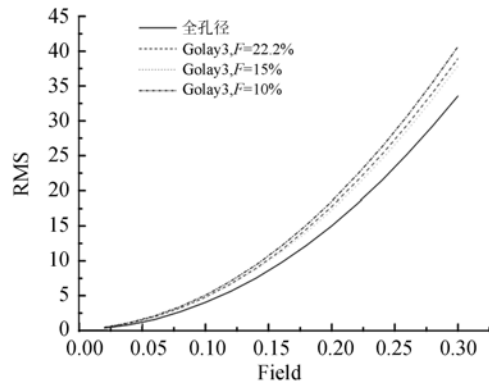
系统参数	数值	系统参数	数值
副镜至第一表面距离	305.334	$r_3$	-1 947.288
$n_1$	-129.972	$d_3$ (熔石英)	20.000
$d_1$ (熔石英)	20.000	$n_1$	-86.319
$r_2$	-180.216	后工作距离	64.439
$d_2$ (空气)	60.000		

通过全波段、全视场的最大像斑半径均方根值来比较加入校正镜前后系统的成像质量,如图 10(a)和图 10(b)所示,系统采用校正镜后,像斑尺寸大大减小,像质得到明显改善;视场等于 $0.1^\circ$



(a) 优化前各视场最大像斑半径均方根值

(a) RMS of maximum radius with different fields before optimization



(b) 优化后各视场最大像斑半径均方根值

(b) RMS of maximum radius with different fields after optimization

图 10 优化前后各视场最大像斑半径均方根值

Fig. 10 RMSs of maximum radius with different fields before and after optimizations

时,加入校正镜之前像斑尺寸是加入校正镜之后的 5 倍左右;视场达到 $0.3^\circ$ 时,加入校正镜前后像斑尺寸比值仍能达到 2.5 倍,由此看出加入校正镜优化系统,可以大幅度地增大系统的视场。另外随着视场的增加,由于系统本身以及加入校正镜后引入的轴外像差也在逐渐增大,优化前后未采用 Golay 3 的系统像斑均小于采用 Golay 3 时的系统像斑。

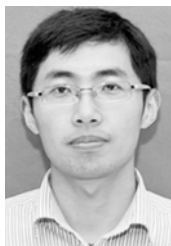
## 5 结 论

本文设计了两镜望远镜系统,系统的主镜采用 Golay 3 稀疏孔径,3 子镜均匀分布在球面上,次镜采用双曲面,通过 ZEMAX 程序模拟发现系统的截止频率或者角分辨率随着填充因子的减小而减小;同时由于存在中心遮拦使得视场也较小,为增大视场和提高像质,在系统的副镜后部加入 2 块熔石英校正镜,通过 Zemax 程序优化得到校正镜的参数;校正镜的加入使得在 $0.3^\circ$ 的视场下,最大像斑半径均方根值比加入校正镜前减小 2.5 倍左右;在相同视场下,像斑尺寸随着填充因子的变化影响不大。本文还设计了单个 Golay 3 望远镜实例,但未就遮拦比和主镜焦比对光学系统的特性影响展开讨论,考虑到两镜系统在大口径天文望远镜系统中的重要应用,其主镜由稀疏孔径代替在减轻系统质量和降低望远镜制造成本方面具有重要的意义。

## 参考文献:

- [1] DEYOUHNG D, DILLOW J, CORCORAN S, *et al.*. Ground demonstration of an optical control system for a space-based sparse aperture telescope [J]. *SPIE*, 1998, 3356:1156-1167.
- [2] CHUNG S J, MILLER D W, WECK O L. ARGOS testbed: study of multidisciplinary challenges of future spaceborne interferometric arrays[J]. *Optical Engineering*, 2004, 43(9):2156-2167.
- [3] FIETE R D, TANTALO T A, CALUS J R, *et al.*. Image quality of sparse-aperture designs for remote sensing[J]. *Optical Engineering*, 2002, 41(8):1957-1968.
- [4] 吴泉英, 钱霖, 沈为民. 两种稀疏孔径系统的成像研究[J]. *光学精密工程*, 2006, 14(1):26-33.  
WU Q Y, QIAN L, SHEN W M. Imaging research of two kinds of sparse-aperture systems[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2006, 14(1):26-33. (in Chinese)
- [5] MILLER N J, DIERKING M P, DUNCAN B D. Optical sparse aperture imaging[J]. *Appl. Opt.*, 2007, 46(23):5933-5943.
- [6] 钱义先, 梁伟, 高晓东. 含多个非球面大视场卡塞格林系统光学设计[J]. *光子学报*, 2009, 38(4): 896-899.  
QIAN Y X, LIANG W, GAO X D. Optical design of Cassegrain system with wide angle and multiple aspheric surfaces[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2009, 38(4):896-899.
- [7] 林旭东, 陈涛, 明名, 等. 球面拼接镜的相对曲率半径测量[J]. *光学精密工程*, 2010, 18(1):75-82.  
LIN X D, CHEN T, MING M, *et al.*. Measurement of relative curvature radius for spherical segmented mirrors[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2010, 18(1):75-82. (in Chinese)
- [8] 潘君骅. 光学非球面的设计、加工与检验[M]. 苏州:苏州大学出版社,2004.  
PAN J H. *The design, Manufacture and Test of the Aspherical Optical Surfaces* [M]. Suzhou: Suzhou University Press, 2004. (in Chinese)
- [9] WU F, WU Q Y, QIAN L. Analysis of the characteristics of the Golay3 multiple-mirror telescope[J]. *Appl. Opt.*, 2009, 48(3): 643-652.
- [10] WU F, WU Q Y, QIAN L. Golay 3 sparse aperture systems designed on a spherical surface[J]. *SPIE*, 2008, 6624: 66240R-1-66240R-11.
- [11] 张伟, 邓键, 龙夫年, 等. 拼接镜面合成孔径光学系统的像质评价[J]. *光学精密工程*, 2008, 16(2): 208-214.  
ZHANG W, DENG J, LONG F N, *et al.*. Imaging quality of segmented mirror synthetic aperture optics[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2008, 16(2): 208-214. (in Chinese)

## 作者简介:



范君柳(1983—),男,江苏海门人,实验师,2005年、2008年于苏州大学分别获得学士、硕士学位,主要研究方向为光学设计和光学信息处理。E-mail: fj1280@163.com



王福亮(1986—),男,河北衡水人,硕士研究生,主要研究方向为光学仪器与光学设计。E-mail: wflgucheng@126.com



吴泉英(1965—),女,江苏吴江人,博士,教授,主要研究方向为光学仪器设计与图像信息处理。E-mail: wqycyh00@yahoo.com.cn



沈婷婷(1986—),女,江苏省吴江人,硕士研究生,主要研究方向为光学仪器与光学设计。E-mail: 15862502585@139.com