

# 基于 OMR 的 2.16 米望远镜积分视场单元方案\*

高东洋<sup>1 2 4</sup>, 赵飞<sup>2 4</sup>, 邱鹏<sup>2 3 4</sup>, 姜晓军<sup>2 4</sup>

(1. 山东大学威海分校空间科学与物理学院, 山东 威海 264209; 2. 中国科学院国家天文台, 北京 100012;  
3. 中国科学院研究生院, 北京 100049; 4. 中国科学院光学天文重点实验室(国家天文台), 北京 100012)

**摘要:** 基于积分视场单元的三维成像光谱技术日趋成熟, 并且与传统的狭缝光谱仪相比有许多明显的优势。2.16 m 望远镜的 OMR 光谱仪是采用平面光栅分光的低色散卡焦光谱仪器, 可以考虑对其进行积分视场单元的升级优化。在不改变 OMR 光谱仪自身结构, 不影响现有功能的同时, 利用“微透镜阵列+光纤束”的技术可以实现积分视场单元与 OMR 光谱仪的耦合。设计了两种方案, 给出了升级积分视场单元后的空间分辨率和视场。

**关键词:** 天文技术; 积分视场光谱仪; 展源天体; 光纤

**中图分类号:** P111.3 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-7673(2012)02-0143-07

积分视场光谱仪(Integral Field Spectrograph, IFS)是在光谱仪上装备积分视场单元(Integral Field Unit, IFU), 具有同时摄谱和成像功能的一种光学仪器。积分视场光谱仪在天体物理学中有着重要的应用, 比如中等红移星系的动力学特征、活动星系核的核区结构、行星状星云和超新星遗迹等展源的观测研究。

如图 1, 积分视场单元的功能是将二维视场中的展源目标进行采样, 然后把每一个采样单元的能量送入光谱仪, 通过单次曝光同时获得展源的三维信息(空间域  $x, y$  和光谱域  $\lambda$ )。随着望远镜口径的增加和自适应光学技术的应用, 积分视场光谱仪在光谱域和空间域都可以获得高信噪比的信号, 促进了积分视场单元技术的快速发展。

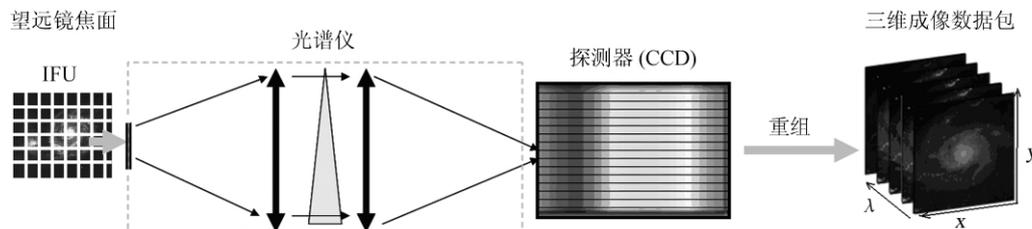


图 1 光谱仪配备积分视场单元后获取光谱的示意图

Fig. 1 An illustration of spectral acquisition by a spectrograph attached to an IFU

在进行展源目标观测时, 积分视场光谱仪与传统的狭缝光谱仪相比优势明显: (1) 积分视场光谱仪不需要对展源目标进行多次扫描, 避免了观测中因为大气状况(透明度和视宁度等)随时间变化造成的影响; (2) 节省了望远镜的时间; (3) 积分视场光谱仪没有狭缝切割带来的光损失, 具有高光效率<sup>[1]</sup>。在现有光谱仪上配备积分视场单元系统可以扩展光谱仪的功能, 提高观测效率。

## 1 国内外研究现状

自 20 世纪末国际上相继研制出了不同的积分视场单元系统, 在 10 m 级地面光学和红外望远镜中

\* 基金项目: 国家自然科学基金(10778701, 10978014)资助。

收稿日期: 2011-04-21; 修定日期: 2011-05-06

作者简介: 高东洋, 男, 硕士, 研究方向: 天文光谱仪器及光谱处理, Email: gaodongyang@sdu.edu.cn

均配置或者计划配置积分视场单元。现有的 2 m 以上中小型望远镜在升级计划中大部分增加了积分视场单元的新建或改造<sup>[1]</sup>。

积分视场单元主要有 3 种技术<sup>[2-3]</sup>：微透镜阵列、“微透镜阵列+光纤束”和像切分器。目前“微透镜阵列+光纤束”和像切分器这两种技术在积分视场单元中应用最为广泛，其中“微透镜阵列+光纤束”是实现积分视场单元最行之有效的技术<sup>[4]</sup>。

现阶段我国还没有成型的积分视场单元系统，国家天文台兴隆观测站的 2.16 m 望远镜和云南天文台高美古观测站的 2.4 m 望远镜都可以装备积分视场单元和与之辅助的系统扩展望远镜的功能，即符合天文学家的需求，又可以促进我国积分视场单元技术的发展。2.4 m 望远镜的积分视场单元系统正在设计建造之中<sup>[5-6]</sup>。2.16 m 望远镜是我国开展天体物理观测的主要设备之一，其中超过 85% 的时间用于光谱观测，为其设计建造积分视场单元具有重要意义。

## 2 2.16 m 望远镜积分视场单元的方案设计

本文的方案设计思想是基于 2.16 m 天文望远镜已有的光谱设备，不影响仪器现有的功能，不改变仪器的结构，通过对其升级积分视场单元后实现积分视场光谱仪，扩展仪器的功能，提高观测效率。

OMR 是 1995 年为 2.16 m 望远镜从美国引进的低色散卡焦光谱仪器，采用平面光栅低色散的分光方式，只有缝高固定的单一狭缝，结构相对简单，易于积分视场单元的升级。

### 2.1 2.16 m 望远镜卡焦参数和 OMR 参数

2.16 m 望远镜卡焦参数(表 1)和 OMR 的主要性能指标(表 2)都是积分视场单元方案设计的限制条件。

### 2.2 2.16 m 望远镜积分视场单元方式的选择

综合积分视场单元不同技术的优缺点和 OMR 的结构特点，选择“微透镜阵列+光纤束”的形式为 OMR 升级积分视场单元。积分视场单元共分为 4 部分：阵列前装置(Fore-optics)、输入微透镜阵列、光纤和输出微透镜。示意图见图 2。

表 1 2.16 m 望远镜卡焦参数

Table 1 The parameters of the Cassegrain focal plane of the 2.16m telescope

卡焦焦比	卡焦焦距	卡焦焦面比例尺
$F/9$	19.44 m	10.61 "/mm(94.25 $\mu\text{m}/"$ )

表 2 OMR 的性能指标

Table 2 The characteristics of the OMR

波长范围/nm		370 ~ 1 000
狭缝	宽度/mm	0.05 ~ 1.0(0.5" ~ 10.6")
	高度/mm	28.8(5.1')
准直镜	口径 $D$ /mm	110
	焦距 $f$ /mm	674
照相镜	口径 $D$ /mm	100
	焦距 $f$ /mm	150
	有效视场/ $\text{mm}$	25
主 CCD	厂家型号	Princeton Instruments
	像元尺寸/ $\mu\text{m}$	Spec-10 1 340×400 20×20
导星视场		3.0'×4.5'
缩焦		4.5
单像元对应的天空张角		0.95"

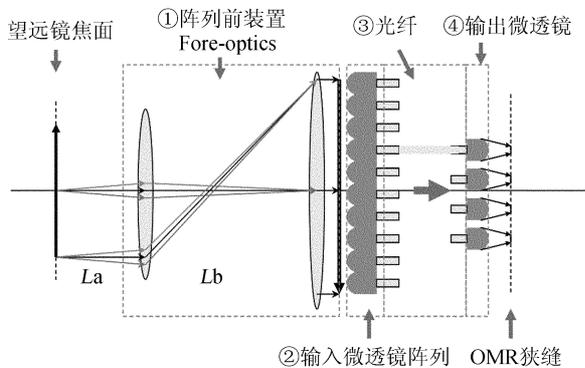


图 2 2.16 m 望远镜积分视场单元的“微透镜阵列+光纤束”实现方式

Fig. 2 The realization of IFU with an array of lenses+fibers

### (1) 阵列前装置(Fore-optics)

阵列前装置有两个功能: ①调整像的大小, 使得积分视场单元的空间分辨率和微透镜阵列的子孔径相匹配; ②形成远心光路。

阵列前装置中第 1 组透镜  $L_a$  为消色差透镜组, 并且可以前后移动, 而  $L_b$  固定不动, 从而可以获得不同的放大率和不同的空间分辨率。此类型的阵列前装置也可以使积分视场单元与不同的望远镜耦合<sup>[4]</sup>。

### (2) 输入微透镜阵列

光纤端面抛光之后需要粘合微透镜把来自阵列前装置的光束转化为适合光纤输入的光束(例如快于  $F/4$  的光束), 主要是因为光纤的特性焦比退化——光纤输出的光束会比输入的光束快。

### (3) 光纤

考虑到 Nyquist 采样定理, 光纤芯径在 OMR 的 CCD 上成像应多于 2.2 pixel, 所选光纤芯径不能太细。同时考虑到光纤涂覆层的直径不可以大于微透镜的子孔径, 并且让 OMR 狭缝处排列尽可能多的采样单元, 所选光纤又不可以太粗。

### (4) 输出微透镜阵列

为了使光纤输出光束转化为适合 OMR 准直镜输入的光束, 需要在光纤的输出端粘合微透镜。考虑到在 OMR 主 CCD 上相应的光谱间隔要多于 2.2 pixel, 因此输出微透镜排列需要每两个单元间有一定的间隔。根据光纤芯径在狭缝处的成像直径和单元间隔计算出 OMR 狭缝可以排列的单元数, 即采样数。

## 2.3 两种具体的方案

由于 OMR 光谱仪的限制, 积分视场单元采样单元的数量有限, 设计时需要在视场和空间分辨率两个之间做一些协调。

2.16 m 望远镜卡焦高色散光纤光谱仪项目中将在卡焦接口安装倾斜镜, 可以有效地改善卡焦星像, 在拍摄展源目标时可以获得较高空间分辨率的图像; 星系中心区域性质研究(比如元素丰度、恒星动力学、星族分布等)、视场比较小的近邻星系或星云、活动星系核的核区结构(Seyfert 星系等)、球状星团核心的激波过程和 X 射线源的研究等, 高的空间分辨率、较小视场的积分视场单元也可以提供有效的观测数据。基于以上两种原因, 设计中考虑到了高空间分辨率、小视场的积分视场单元方案(方案一)。虽然视场较小, 但是比狭缝扫描的观测方式有很多优点, 比如, 传统的狭缝光谱仪获得高空间分辨率光谱时需要把狭缝开的很窄, 并且需要在空间方向上进行扫描, 尤其是在大气视宁度状况不是很好时, 浪费了大量的光能。一些星系等展源的二维结构比较复杂, 比如差动消光效应、星系的合并和相互作用造成的复杂速度场, 传统的狭缝光谱仪扫描观测这些目标时, 不同的狭缝位置及方向会对测量结果带来影响<sup>[7-8]</sup>。

同时针对近邻星系、河内星云、密集星场等视面积比较大的展源目标, 也设计了低空间分辨率、稍大视场的积分视场单元方案(方案二)。

### 2.3.1 方案一

2.16 m 望远镜卡焦焦面的星像平均为  $2''$ , 方案一确定空间分辨率为  $1.0''$ 。方案一积分视场单元系统的总体参数见表 3, 整体效果示意图如图 3。

表 3 方案一积分视场单元的参数

Table 3 The parameters of IFU in the first scheme

空间分辨率	$1'' \times 1''$
采样数	$8 \times 8$
视场	$8'' \times 8''$
阵列前装置	$L_a: D=11.2 \text{ mm}, f=100 \text{ mm}$ $L_b: D=11.2 \text{ mm}, f=263 \text{ mm}$ 放大率 2.63 输入焦比 $F/9$ 输出焦比 $F/23.7$
输入微透镜	$D=0.25 \text{ mm}, f=1.0 \text{ mm}$ 光束由 $F/23.7$ 变为 $F/4$ 后端面望远镜光瞳像 $D=0.042 \text{ mm}$
光纤	芯径 $D=0.1 \text{ mm}$
输出微透镜	$D=0.325 \text{ mm}, f=0.9 \text{ mm}$ 光束由 $F/4$ 左右变为 $F/9$ 单元间隔 $0.1 \text{ mm}$
OMR 狭缝处光纤瞳像	芯径成像直径为 $0.225 \text{ mm}$ 像间隔: $0.2 \text{ mm}$
光谱分辨率	若使用 4 号光栅 ( $0.12 \text{ nm/pixel}$ ), 光纤芯径成像为 2.5 像元, 则能分辨的波长间隔是 $0.12 \text{ nm} \times 2.5 = 0.3 \text{ nm}$

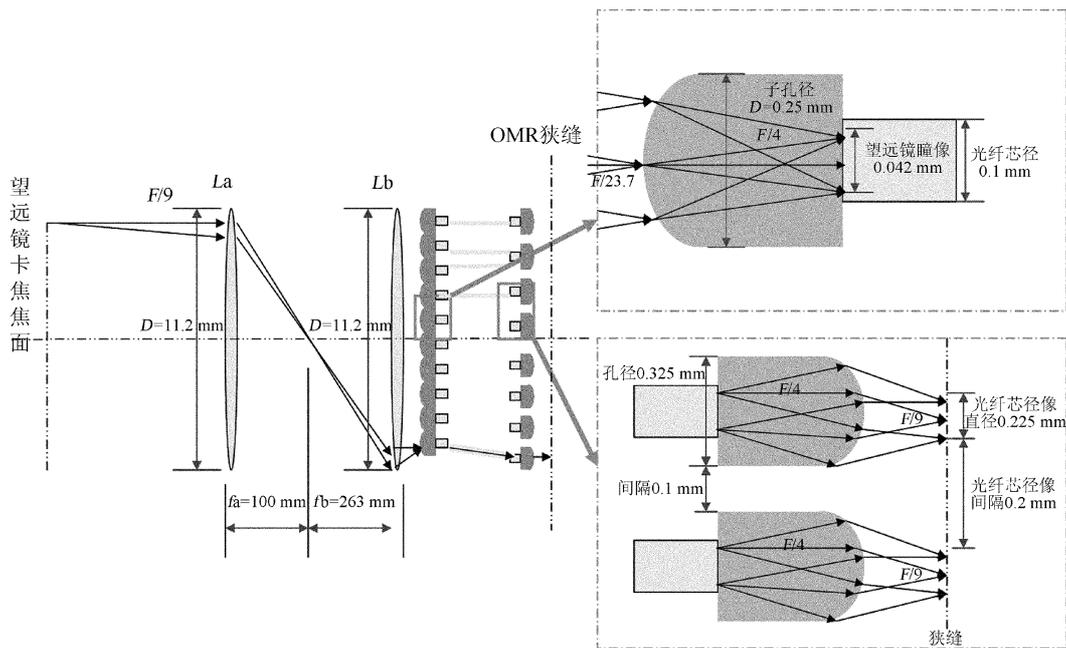


图3 方案一的积分视场单元参数及示意图

Fig. 3 The parameters and light-ray diagram of IFU in the first scheme

阵列前装置的设计和制造较为简单。美国 Adaptive Optics Associates Incorporation( AOA) 公司的微透镜阵列产品中有一款型号为 0250-1.0-S, 子孔径为 250  $\mu\text{m}$ , 焦距为 1 000  $\mu\text{m}$ , 焦比为  $F/4$ , 阵列  $100 \times 100$ 。该产品符合需求, 但在使用时只会用到阵列的一部分, 未使用的微透镜用光阑挡住, 以减少杂散光。Polymicro 公司宽波段光纤 FBP100140170 可供选择, 芯径为 100  $\mu\text{m}$ , 它包含涂覆层后的直径为 170  $\mu\text{m}$ , 在  $F/4$  的光束入射时焦比退化已经很小。目前正在联系厂家订做输出微透镜。

简单估算一下, 阵列前装置中两个透镜均采用高透过率镜片, 则阵列前装置的效率为  $0.98 \times 0.98 \approx 0.96$ , 微透镜和光纤的效率为  $0.98 \times 0.98 \times 0.92 \approx 0.88$ , 则积分视场单元的总效率为  $0.96 \times 0.88 \approx 0.85$ 。在实际安装调试过程中, 微透镜和光纤端面很难精确对准, 那么由于位置偏差造成的光损会很大。假设积分视场单元的峰值效率为 75%。

假设 OMR 在对展源目标进行扫描观测时, 每次曝光使用的时间相同, 设为  $T$ , 同时假设展源目标为方形。计算方案一积分视场单元升级前与升级后, 对不同大小的展源观测时所需要的时间见表 4。

在此情况下, 观测  $0.75' \times 0.75'$  以下的展源时可以节省望远镜的时间。

### 2.3.2 方案二

阵列前装置在此方案中起到像的放大作用, 如果是像的缩小作用时, 可以在降低空间分辨率的情况下得到较大的视场。方案二中阵列前装置放大率定为 0.6 左右, 一个子孔径对应的天空张角为  $4.5'' \times 4.5''$ , 此时的视场为  $27'' \times 31.5''$ 。

方案二总体参数见表 5。效果示意图如图 4。

输入微透镜阵列还是采用 AOA 0250-1.0-S。选用 Polymicro 公司 FBP200220240 光纤, 芯径为 200  $\mu\text{m}$ , 含涂覆层的直径为 240  $\mu\text{m}$ 。输出微透镜的订做正在进行当中。

同样基于方案一的假设, 方案二观测不同大小的展源目标所需的时间见表 6。

表 4 OMR 按照方案一的积分视场单元升级前后的观测时间对比

Table 4 The exposure times of OMR to observe extended objects of different sizes with and without the IFU in the first scheme

目标视场	扫描时间 (OMR 单次曝光时间的倍数, 单位 $T$ )	
	升级前	升级后
$0.5' \times 0.5'$	30	21.3
$0.75' \times 0.75'$	45	48
$1.0' \times 1.0'$	60	85.3

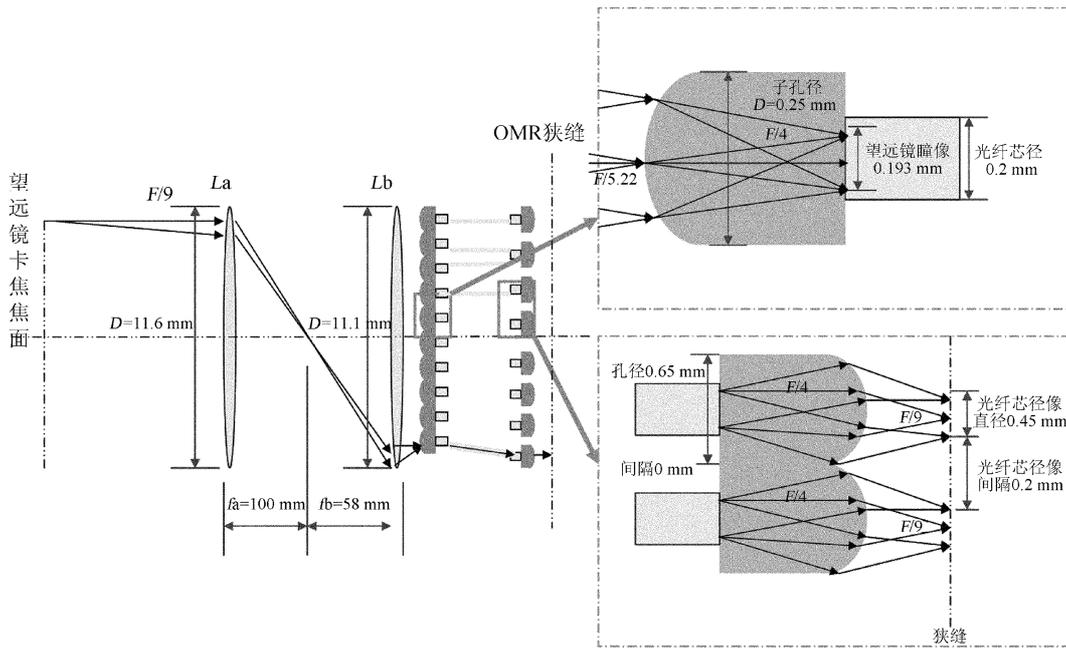


图 4 方案二的积分视场单元参数及示意图

Fig. 4 The parameters and light-ray diagram of the IFU in the second scheme

表 5 方案二积分视场单元的参数

Table 5 The parameters of IFU in the second scheme

空间分辨率	4.5"×4.5"
采样数	6×7
视场	27"×31.5"
阵列前装置	La: D=11.6 mm, f=100 mm Lb: D=11.1 mm, f=58 mm 放大率 0.58 输入焦比 F/9 输出焦比 F/5.22
输入微透镜	D=0.25 mm, f=1.0 mm 光束由 F/5.22 变为 F/4 后端面望远镜光瞳像 D=0.193 mm
光纤	芯径 D=0.2 mm
输出微透镜	D=0.65 mm, f=1.8 mm 光束由 F/4 左右变为 F/9 单元间隔 0 mm
OMR 狭缝处光纤瞳像	芯径成像直径为 0.45 mm 像间隔: 0.2 mm
光谱分辨率	若使用 4 号光栅 (0.12 nm/pixel), 光纤芯径成像为 5 像元, 则能分辨的波长间隔是 0.12 nm×5=0.6 nm

在此情况下, 观测 2.5'×2.5' 以下的展源时可以节省望远镜时间。积分视场单元的视场越大在扫描展源目标时就更有优势。

表 6 OMR 按照方案二的积分视场单元升级前后的观测时间对比

Table 6 The exposure times of OMR to observe extended objects of different sizes with and without the IFU in the second scheme

目标视场	扫描时间 (OMR 单次曝光时间的倍数, 单位 T)	
	升级前	升级后
0.5'×0.5'	7	1.3
1.0'×1.0'	14	5.3
1.5'×1.5'	20	12
2.0'×2.0'	27	21.3
2.5'×2.5'	34	34

### 3 总结与展望

2.16 m 望远镜现有 BFOSC、OMR 等多个光谱仪终端, 对其进行集成积分视场单元的探讨具有重要意义。在 OMR 光谱仪现有的条件下设计出两种积分视场单元方案(见表 7)。

表 7 OMR-积分视场单元不同方案的参数

Table 7 The parameters of the OMR-IFU in the two schemes

方案	空间分辨率	视场
1. 小视场、高空间分辨率	1"×1"	8"×8"
2. 稍大视场、低空间分辨率	4.5"×4.5"	27"×31.5"

该积分视场单元的研制具有一定的试验性质, 预计完成后可满足部分天文研究的需求。由于采用的方案中未改变 OMR 光谱仪的结构, 不影响 OMR 光谱仪的原功能, 希望积分视场单元和 OMR 耦合之后能够做为 2.16 m 望远镜的常规设备供天文学家选用。

致谢: 感谢 Polymicro 公司和 Adaptive Optics Associates 公司提供的产品数据; 感谢国家天文台赵刚研究员和吴宏研究员提出的宝贵意见。

#### 参考文献:

- [1] 王俊凡, 朱永田, 胡中文. 基于积分视场单元的三维天文成像光谱技术 [J]. 天文学进展, 2008, 26(1): 73-79.  
Wang Junfan, Zhu Yongtian, Hu Zhongwen. Techniques for 3D Imaging Spectroscopy in Astronomy [J]. Progress in Astronomy, 2008, 26(1): 73-79.
- [2] R M Sharples, J R Allington-Smith, D F Buscher, et al. Recent Developments in Spectroscopy [J]. New Astronomy Reviews, 2001(45): 78.
- [3] Jeremy Allington-Smith, Graham Murray, Robert Content, et al. Integral Field Spectroscopy with the Gemini Multiobject Spectrograph. I. Design, Construction, and Testing [J]. Publications of Astronomical Society of the Pacific, 2002(114): 892-893.
- [4] Deqing Ren. On the Application of Integral Field Unit Design Theory for Imaging Spectroscopy [J]. Publications of Astronomical Society of the Pacific, 2002(114): 866-891.
- [5] Zhang Jujia. The Study of IFU for the Li Jiang 2.4m Telescope [R]. Li Jiang: Sino-French IFU Workshop, 2010.
- [6] Hao Lei. IFUS on the 2.4m Telescope: VIRUS from HETDEX [R]. Li Jiang: Sino-French IFU Workshop, 2010.
- [7] S Arribas, P Ferruit, P Jakobsen, et al. The Integral Field Unit of the NIRSpec Spectrograph for JWST [EB/OL]. <http://www.springerlink.com/content/017wm5621210w00w/fulltext.pdf>.
- [8] 张居甲, 程向明, 宋佳阳, 等. 光纤式积分视场光谱仪实验研究 [J]. 天文研究与技术——国家天文台台刊, 2011, 8(2): 139-145.  
Zhang Jujia, Cheng Xiangming, Song Jiayang, et al. An Experimental Optical-Fiber Integral Field Spectrograph [J]. Astronomical Research & Technology——Publications of National Astronomical Observatories of China, 2011, 8(2): 139-145.

## A Design of OMR-IFU for the 2.16m Telescope of NAOC

Gao Dongyang<sup>1,2,4</sup>, Zhao Fei<sup>2,4</sup>, Qiu Peng<sup>2,3,4</sup>, Jiang Xiaojun<sup>2,4</sup>

(1. School of Space Science and Physics, Shandong University at Weihai, Weihai 264209, China, Email: gaodongyang@sdu.edu.cn;

2. National Astronomical Observatories, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100012, China; 3. Graduate University

of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 4. Key Laboratory of Optical Astronomy,

National Astronomical Observatories, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100012, China)

**Abstract:** With the development of telescope technologies, e. g., the increase of telescope apertures and the application of adaptive optics, astronomical instruments can obtain images of higher Signal-to-Noise Ratios (SNR) in both wavelength and spatial domains. An Integral Field Spectrograph (IFS) equipped with an Integral Field Unit (IFU) has several obvious advantages in comparison with traditional slit spectrographs for certain astrophysical research fields, such as those of dense star clusters, supernova remnants, nebulae, cores of nearby galaxies, and other extended celestial objects. An OMR low-dispersion slit spectrograph on the

Cassegrain focal-plane, which has been equipped on the 2.16m telescope at the Xinglong Station, National Astronomical Observatories of China (NAOC) since 1995, can be upgraded to an IFS by adopting a "lenticules+fibers" array without changing configuration. To reduce the cost, we use existing products, such as the fibers from the Polymicro Technologies Inc. and arrays of lenticules from the Adaptive Optics Associates Inc. The slit of the OMR is not very long (28.8mm, or 5.1'), so we cannot set many IFU sampling units. The IFU consists of a fore-optics system, an array of lenticules, fibers, and output microlenses. Two different IFU upgrade plans are discussed in this paper. The first has a spatial sampling scale of 1" and a field of view of 8"×8", while the second has a wider field of view (27"×31.5") but lower spatial resolution (4.5"). Because of the unchanged configuration, the new IFU will have no effect on the original function of the OMR. The IFU will be an experimental equipment. We expect it to meet the demands of some astronomical research, such as stellar kinematics in the cores of nearby galaxies, the structures of nebulae and supernova remnants, circumnuclear environments in active galactic nuclei, etc. After completion, it can be used as a routine equipment for astronomers on the 2.16m telescope.

**Key words:** Astronomical techniques; Integral Field Spectroscopy; Extended celestial objects; Fibers

---

上接第 128 页 (Continued from page 128)

**Abstract:** The main structure of the Five-hundred-meter Aperture Spherical radio Telescope (FAST) will be constructed in a complex Karst landform. The FAST primary reflector will have to function with the presence of wind load. A wind-resistant design is necessary for the FAST. Currently, the field-test, wind-tunnel test, and numerical-simulation approaches are the three main methods to acquire the wind-pressure coefficients. Normally, a field test is not economic either in labor cost or financial expense. A wind-tunnel test is also expensive. For this study, numerical simulations are chosen for a preliminary study. Any field test will be performed in future if necessary. We construct certain geometric models, mesh models, and CFD (Computational Fluid Dynamics) analysis models for the FAST reflector and its surrounding terrains. The CFD models are built for the FAST reflector and the surrounding landform within 40km×10km×5.5km. A reference altitude of 810m is used for the profile of wind velocity at the inlet. We use the model to investigate the pressure coefficients of the reflector for different wind directions. For a panel of 35.4% perforation rate, we perform numerical analyses to acquire the relation between wind speed and pressure drop across the panel. The calculated aerodynamic coefficients are consistent with previous screen test results within 3%. Combining with porous jump boundary conditions, we use the methods to simulate the aerodynamic performance of the FAST reflector. We obtain the distributions of the wind pressure coefficients for multiple wind directions. The results show that the wind direction is a major factor and at the 5.5 o'clock direction wind can have the most sever effects. Our simulation results show that the choice of windbreak height is of more importance than the choice of windbreak position. The results can be used as references for the wind-resistant design of the FAST, the subsequent construction procedure, and the high-precision measurement and control of the FAST reflector.

**Key words:** Wind load; Wind-resistant design; Numerical simulation; Computational Fluid Dynamics; Pressure coefficient; Aerodynamic coefficient; Windbreak