

大望远镜与高色散摄谱仪的匹配问题

蒋世仰

(中国科学院北京天文台)

提 要

本文指出大口径望远镜和高色散摄谱仪匹配中的狭缝允宽与光谱纯度及相机焦比之间的矛盾。分析了超大光栅、拼光栅及星像切分器等方案的优缺点。把类MMT型系统叫做子口径法，分析了MMT法的优缺点。引入主镜后子口径系统并分析了它的优缺点。最后引入全新的子口径自适应光学多光纤方案并分析了它的优缺点。

一、引 言

早在50年代，人们就已发现随着望远镜口径的加大，高色散摄谱仪的设计越来越难，造价越来越高^[1]。这可从下面两个公式看出：

$$R_p = \lambda / \Delta\lambda = HS / D\rho \quad (1)$$

$$F_c = l / D\rho \quad (2)$$

其中 R_p 为望远镜摄谱仪系统在完全没有狭缝光损失时可以获得的光谱分辨本领。 λ 为工作波长， $\Delta\lambda$ 为可分辨之最小波长元。 D 为望远镜口径， ρ 为望远镜焦平面所能获得的实际星象角直径， H 为摄谱仪准直光束直径， $S = (\sin\alpha + \sin\beta) / \cos\alpha$ ， α 为摄谱仪中光栅上的入射角， β 为衍射角， l 为检测器的元尺寸。表1列出在典型星像角直径条件下，对 $R_p = 10^6$ ，不同望远镜口径必须的光栅刻面宽度 $W = H / \cos\alpha$ 及相机焦比 F_c 。计算时取 $l = 0.027\text{mm}$ ，因 $(\sin\alpha + \sin\beta) \leq 2$ ，取1.8。由表可知，按现有的常规技术条件，即使对口径只有一米的望远镜，安放在世界上最好的天文台址上，星像视宁度直径可以经常达到 $0''.5$ 以下，也必须采用拼光栅或像切分器才能达到 10^6 的光谱分辨本领。这种技术用到口径4米级的望远镜上应当说已达到了极限。对口径8米或更大的望远镜要用八块刻面尺寸为 $270 \times 540\text{mm}^2$ 的阶梯光栅来拼成一块大光栅，还要把星像至少切成5条，才能获得 10^6 的光谱分辨本领。这就是著名的大口径光学望远镜与高分辨本领摄谱仪匹配中的难题。这个难题之所以出现，是由于地球大气湍流造成了恒星这类点光源总成为有一定角直径的视圆面。这个角直径就是常说的“视宁度圆面直径”，它是时间和地点的函数。

二、拼光栅的优缺点

最早使用拼光栅是50年代美国Bowen为帕洛马山的5米望远镜折轴焦点设计的

表 1 光栅刻面宽度和相机焦比随望远镜口径与视场直径的变化

D	ρ	0.1"	0.5"	1"	1.5"	2"	2.5"	3.0"
		mm						
1m	W	269	1 347	2 693	4 040	5 386	6 733	8 080
	F_c	54	10.8	5.4	3.6	2.7	2.2	1.8
2m	mm							
	W	538	2 693	5 386	8 080	10 772	13 465	16 160
	F_c	27	5.4	2.7	1.8	1.35	1.08	0.9
4m	mm							
	W	1 077	5 386	10 772	16 160	21 544	26 930	32 316
	F_c	13.5	2.7	1.35	0.9	0.68	0.54	0.45
8m	mm							
	W	2 154	10 772	21 544	32 316			
	F_c	6.75	1.35	0.68	0.45			

摄谱仪^[1-2]。后来 Richardson 为加拿大的 1.2 米望远镜的折轴摄谱仪也设计了拼光栅系统^[3-4]。由于他们采用的全是平面光栅,且拼出的刻面宽度仅 300mm,实际可获得的最高光谱分辨本领远小于 10^6 。近年来,在为 ESO 的 VLT 及日本的 JNNT 望远镜设计摄谱仪时,才提出了拼阶梯光栅的方案^[5-6]。如表 1 所示,对这种口径 8 米级的望远镜,即使放在像夏威夷或 Paranal 这类视宁度圆面直径常小到 0.5" 的台址上,单用拼光栅的方法,即使用现在可能刻出的最大光栅 $300 \times 600\text{mm}^2$ 来拼,要达到 10^6 的光谱分辨本领,共需要 72 块!其拼调难度及代价是可想而知的!更何况相机的焦比要小到 1.35。对如此巨大的通光口径(10 米!),焦比如此地小,像质要达到 0.4",实在是个难题。因此他们的方案只希望达到 10^6 的光谱分辨本领。

实际上拼光栅较适合于中、小望远镜,比如口径不大于 2 米,这时只需要四拼一或八拼一。对于 0.5" 级视宁度,相机焦比不会太小,制造相对容易且价格不会太贵。狭缝简单且不引入附加光损失。还可利用狭缝高度方向作长缝或多目标分光研究,与像切分器相比,它优良得多。但也有缺点,即对同一架摄谱仪,由于光栅总口径太大(1—2 米),相机的焦距不能太短,从而在不需要高达 10^6 的分辨本领时,必须更换准直镜才能不至于失光。这样一来,单纯的拼光栅就意味着对不同的天体和不同的色散,应设计分离的不同要求的摄谱仪。拼光栅的另一缺点是整架仪器的体积及造价均要成倍增加。因此,在实际使用中,多半是既适当地拼光栅,又适当地加用像切分器。

三、各种像切分器的优缺点

首次提出像切分器的是 Bowen^[7-8]。在他所提出的像切分器中,最大的优点是每一切条仅附加一次或最多两次反射失光。缺点是只能用于大焦比系统中且各切条不共焦,因而切条数不应太多。另一缺点是当视宁度发生变化时,各切条之间会变得不连续或附加失光。由于 CCD 的出现和普及,缝像高度不连续的缺点变得不重要了。

第二种像切分器是 Benesch 和 Strong^[9-10]提出的光学像变形器。它可以用于小焦比系

统中,且各切条共焦。但一般仅宜于切成三条,且除中切条外,另两条至少要附加三次反射失光。这种像切分器加多切条困难,切条宽度又不能变化,当天气变化时,效率也会变化。因此迄今很少推广。

第三种像切分器是 Richardson 的像切分器^[11-13]。它的优点在于各切条共焦,且缝像大小不因切条数多少而改变。并可设计成使相机的中心挡光损失变小。缺点是除中心切条外,越往外去的切条依次要增加两次反射,因而切条数也不能太多。另外,柱面透镜及场镜要引入吸光损失。虽然发明者已指出,可借拼合法来减少附加反射次数,但因其工艺的难度使之迄今尚未实用化。

第四种像切分器是 Walraven 的像切分器^[14]。它的优点是制造相对简单且利用玻璃内部的全反射,因而虽也存在反射次数越来越多的毛病,但光损失并不太大。缺点是较长的透射光程对短波段有较大的光吸收损失。另一缺点是各切条失焦量甚至比 Bowen 型还严重。

第五种是光纤像切分器。最早由 Kapany 提出^[15]。后来英澳天文台及法国巴黎天文台均有人试制并使用过^[16-17]。用多芯光纤束作像切分器是较容易的,但单根光纤的外包层及圆形光纤之间的缝隙会引入相当严重的光损失。因此并未获得普及。

第六种是我们提出的介于 Bowen 与 Walraven 像切分器之间的一种纯反射对称式像切分器。它的光学原理与 Walraven 的基本相同,只是光线的反射是在两个反射面之间进行而不是在玻璃与空气介面间的全反射,所以反射失光要严重些。但它没有透射元件,且中间那一条是没有任何光损失的。左、右的第一条均只有两次反射失光。因此当只用三条时,光损失将比上述像切分器的任何一种为少。另一优点是各切条间之失焦程度也较小,仅为 Bowen 及 Walraven 型中的一半。再者切条的宽度和条数较容易随实际情况而调整。由于有关这种

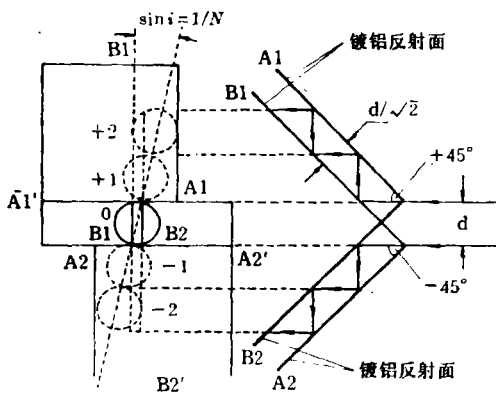


图 1 全反射星像切分器原理图

像切分器的论文尚未发表,在此特给出一张原理图如图 1 所示。图中 A_1 及 B_1 和 A_2 及 B_2 分别为两组平行平面反射镜。它们与入射光束光轴(在此为水平方向且垂直于图面)分别成 $\pm 45^\circ$ 夹角。两组反射镜之中 B 镜间之距离即切条宽度,是可改变的。 A 、 B 镜之间的间距等于星像视宁度圆面直径的 $(\sqrt{2})^{-1}$ 。图中圆斑代表星像。中间切条直穿而过,且正位于焦前一个星像直径宽处;左、右被 B 镜挡住的光线分别垂直向上或向下反射到 A 镜后再被 A 镜反射回到原来的水平方向上。由于左、右两组 A 、 B 反射镜的法线绕原

法线方向彼此相向地转过一个角度 i ,且满足条件 $\sin i = N^{-1}$, N 为切条数。因此被 B 镜挡住而来回反射于 A 、 B 镜之间的星像部分会分别逐次向左、右移动一个切条宽度,从而全部进入狭缝。调节这个角度 i 就可得出不同的切条数。在图中 $N = 5$ 。其中左、右的第一条正好位于焦面上。左、右的第二条则在焦面后一个星像直径宽的位置上。

单纯使用任何一种像切分器均会占用较高的入射狭缝高度,从而减少多天体摄谱中可同时观测的天体的个数以及增加二维摄谱仪中级次重叠的可能性或要求较大的横向色散,从而

减少可拍摄之级次数或波段宽度。使用像切分器的最大好处是减小摄谱仪的体积并降低造价。且易于给同一架摄谱仪配备不同焦距的照相机而获得不同的光谱分辨本领。随着用光导纤维作为望远镜与摄谱仪之间的光耦合器件的推广，像切分器会得到越来越多的应用。因为这时落在像切分器上的光斑大小仅取决于光导纤维的芯径而与视宁度的变化无关。

四、超宽光栅的优缺点

采用小口径准直镜大入射角或在入射狭缝前、后用柱面镜加大入射光束沿狭缝高度方向的焦比，就要求使用刻面宽度远大于刻线高度的光栅，即超宽光栅。这种光栅既可以一次刻成，也可以是一维拼光栅^[18]。由于光栅很宽，与正常光栅相比，达到同样的光谱纯度可允许的入射狭缝宽度会相应地加大。这是其优点。与常规拼光栅及像切分器相比，要简单、价廉而又少损失光量，且可利用色散后光束的长椭圆形状而设计离轴相机，从而避免常见的中心挡光损失。这在使用光导纤维传光的摄谱仪中是十分重要的。

超宽光栅的缺点是缝像高度要变高。但它仅为使用像切分器时的 $1/N$ ， N 为实际有用入射狭缝相对于不采取措施前之加宽倍数。在像切分器中 N 为切条数。

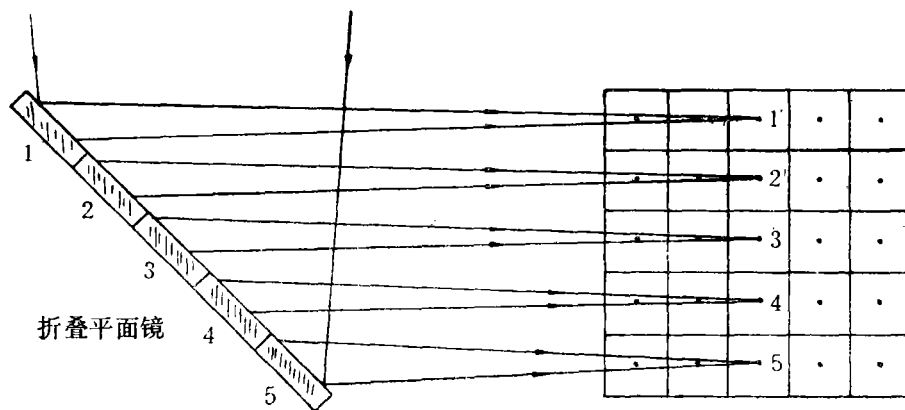
五、子口径法

到了70年代，人们在探讨下一代大口径望远镜的经济实用技术时，提出了用多个独立镜筒安装在同一座机架上的多镜望远镜即MMT方案^[19]。它是由6个1.8米的小反射镜组合成等效口径为4.5米的大望远镜的。若给每一镜筒安装一套光学系统(最简单的为一根光导纤维)，然后把6个镜筒的焦点像均引到同一架摄谱仪的入射狭缝上沿缝高方向排列，则摄谱仪的入射狭缝允宽公式(1)及公式(2)中的 D 将不是4.5米而是1.8米。同样，对于另一种由若干架口径相同的单独望远镜组成的望远镜阵，也有相同的效果。这样做不仅改变了上述公式中的 D ，还会大大降低系统的造价^[20]。这种方法的实质是用若干个子口径来合成一个大口径。与像切分器相比，它不存在失焦问题，也不存在多次反射失光问题。但它会加大星像高度，与像切分器完全相同。它的另一缺点是由于没有一个完整的大主镜面，因此对红外及光斑干涉不利。但它具备实现长基线干涉以获得高角分辨率的可能。

六、口径后分割法与自适应光学

对于完整大镜面的大口径望远镜，困难来源于地球大气湍流引起的星像视宁度圆面直径远大于衍射圆面直径。如果把望远镜安装在地球大气之外或采用自适应光学办法改正大气湍流的影响，问题也就解决了。但是要想把大口径望远镜安装在地球大气外是十分昂贵而困难的。另外，目前的自适应光学技术水平和地球上最佳台址相配合尚不能把口径大于1.5—2米望远镜的星像校正到衍射极限。因此，可以选用完整的大镜面而在其后的光路中专门设置为高色散摄谱仪及子口径光干涉使用的口径分割器。最简单而又不增加光损失的办法是在地

平式望远镜的 Nasmyth(耐司姆斯)系统中制作两块 45° 平面反射镜。其中之一块为完整镜面,供常规工作使用,另一块是由多块小镜拼组成的,供高色散摄谱仪和子口径光干涉使用。用法是适当地调节这些小镜的光轴方向,可使最后之像面变成大小相等而按一定规律排列的点阵(如图 2 所示)。各点的角直径及线直径虽然完全一样且只取决于视宁度及望远镜的合成焦距,但它们所对应的光束的焦比则只是单口径大望远镜的 \sqrt{N} 分之一。 N 为拼合镜面中子口径的数目。如果用光导纤维分别把点阵中的各点引到摄谱仪入缝上并沿高度方向排列,则与摄谱仪有关的上述两式中的 D 仅为满口径的 \sqrt{N} 分之一。这与上述的子口径法是完全一样的。因此也同样存在着缝像高度被加大的问题。为了解决这个问题,可以对每一子口



焦平面示意图每一子口径对应一个 CCD

图 2 利用 Nasmyth 焦点前的 45° 折叠平面镜实现主镜后口径分割的示意图

径实施自适应光学,从而使每一子口径的星像减小到子口径相应的衍射极限。比如对 VLT 的每一架 8 米望远镜,按它们台址常见的湍流元尺寸 32cm 分成 25 个口径约 1.6 米的子口径。在现有自适应光学技术水准下,可以获得约 $0''.08$ 的星像直径。于是总等效狭缝宽度为 $0''.08$ 而高度仅 $2''$ 。只需选用一块 $128 \times 256 \text{mm}^2$ 的阶梯光栅就可获得 10^6 的光谱分辨本领。不仅光谱仪器小巧、便宜,横向色散也易于安排。

自然有其得必有所付出。共需要 25 套完全相同的自适应光学系统。不过这个代价是值得的,且远低于一套由 625 个元组成的满口径自适应光学系统。另外,如果调节上述各子平面反应镜,使各相应之焦面间有足够大的距离。给每一个焦面配置一套低读出噪声、高性能的 CCD 系统,并在读出后对各 CCD 面上相应之天空图像元进行信号叠加而合成一幅总的图像。则这幅图的分辨率将仍为 $0''.08$ 或略低一点。考虑到相应的聚光口径为 8 米,其性能价格比将远优于正在太空工作着的空间望远镜。极限星等也会暗于迄今所有正在计划中的系统。更进一步,在此基础上还可实现单口径 1.6 米、基线长度 6.3 米的光干涉系统及综合口径光学望远镜系统。如果对所有 4 架 8 米望远镜都配置这样的自适应系统,就共需 100 套 25 单元自适应系统。可总共生产 110 套,以便于快速维修,从而保持 VLT 在一种高性能的不间断工作的状态中。由于系统中的镜间距离有许多种数值,且可远大于 6.3 米,因此可以很好地实现长距离光干涉及综合孔径成图。子口径直径为 1.6 米,在现有及计划中的光干涉

系统中仍是极为先进的系统。

七、结 论

综上所述，对于下一代望远镜，无论是完整大镜面系统，或其他任何子口径合成方案，均应采用子口径自适应光学，且随着技术的进步，子口径可越来越大。这种子口径自适应光学系统不仅能简化高分辨率摄谱仪的设计，还可获得适当视场内的高角分辨率及暗的极限星等。

参 考 文 献

- [1] Bowen, I. S., *Vistas in Astronomy*, 1 (1955), 400.
- [2] Bowen, I. S., in *Altronomical Techniques*, ed. by W. A. Hiltner, p. 34, University of Chicago Press, (1960).
- [3] Richardson, E. H., *Publ. Astron. Soc. Pac.*, 78 (1966), 436.
- [4] Richardson, E. H., *J. R. Astron. Soc. Can.*, 62 (1968), 313.
- [5] ESO, Proposal for the Construction of the 16 M Very Large Telescope, p. 262, (1987).
- [6] Okamura, S., *Astrophys. Space Sci.*, 160 (1989), 297.
- [7] Bowen, I. S., *Ap. J.*, 88 (1938), 113.
- [8] Pierce, A. K., *J. Opt. Soc. Am.*, 77 (1965), 216.
- [9] Benesch, W., *J. Opt. Soc. Am.*, 41 (1951), 252.
- [10] Strong, J., in *Concepts of Classical Optics*, p. 553, Freeman, San Francisco, (1958).
- [11] Richardson, E. H., Fletcher, J. M. and Grundmann, W. A., in *IAU Colloquium No. 79*: p. 469, (1984).
- [12] Richardson, E. H., in *Proc. ESO/CERN Conf. on Auxiliary Instrumentation for Large Telescope*, ed. by S. Lausten, and A. Reiz, p. 275, (1972).
- [13] Carleton, N., *Astrophysics of the Methods of Experimental Physics*, 12A (1974), 201.
- [14] Th. and J. H., Walraven, in *Proc. ESO/CERN Conf. on Auxiliary Instrumentation for Large Telescopes*, ed. by S. Lausten, and A. Reiz, p. 175, (1972).
- [15] Carleton, N., *Astrophysics of the Methods of Experimental Physics*, 12A (1974), 197.
- [16] AAO Newsletter, No. 26, (1984).
- [17] Felenbok, P. and Guerin, J., in *IAU Symposium No. 132*, p. 31, (1987).
- [18] Jiang Shiyang, *Publications of the Beijing Astronomical Observatory*, (1979), No. 2, 74.
- [19] Beckers, J. M. and Ulrich, B. L., in *Instrumentation for Astuonomy with Large Optical Telescopes*, ed. by C. M. Humphries, p. 11, (1982).
- [20] Bagnuolo, W. G. et al., *Publ. Astron. Soc. Pac.*, 102 (1990), 604.

(责任编辑 林一梅)

How to Match the Very Large Telescopes with a High Dispersion Spectrograph Efficiently?

Jiang Shiyang

(*Beijing Astronomical Observatory, Chinese Academy of Sciences*)

Abstract

In this paper, we point out the difficulties encountered in the case of matching efficiently a very large telescope with a high dispersion spectrograph. After analysing the advantages and disadvantages of the very large grating, the mosaic grating, the super-width grating and the image slicer, we mention out the MMT and its analogy, We call all these as sub-aperture methods. Then we introduce a new way, the sub-aperture adaptive optics-optical fiber system after the primary, and analyse its advantages and disadvantages.