

空间实验室多光谱扫描器 (S-192) — 光学设计和工作时的像质

摘 要

本文我们介绍多光谱扫描器的设计和性能。空间实验室多光谱扫描器(S-192)是由一台象平面扫描器(望远镜),一台使辐射分离成13种光谱带的光谱仪和一个13单元(Hg、Cd)Te探测器阵列组成的。象平面扫描器是一种新的系统,它根据三个互相关联的主要特征:(1)用反射元件适应史密特原理;(2)圆锥形的行扫描,用它把所有的场单元引到轴上并校正;和(3)扫描装置,在这个装置中固定在中继部件上的系统的孔径光阑被成象在球面主镜的曲率中心上。当用虚光阑替换用在古典史密特结构上的具体光阑的时候,便使系统变成更紧凑。由于象平面扫描和史密特对称,系统以大的半径角(11° 直径)和非常高的速度(6000转/分)用比较小的扫描镜和大的入射光瞳(43厘米)来扫描。

光谱仪把辐射分成13种光谱带,其中之12种固定在0.4和2.35微米之间,而其另一条在10.2—12.5微米。二色分束器将12种较低波长带与远红外带分开,这12种较低波长带是用棱镜来作色散的。

实际飞行记录的照片重现示出在440公里高度上有80米分辨率。

绪 言

空间实验室S-192传感器是由主要的光学的、机械的、模拟电子学的、数字电子学的、低温(Cryogenic)冷却器和探测器部分组成的。本文集中在系统的光学设计和工作性能。

为了测绘地球资源起见,S-192提供用13种光谱带表示的辐射数据。

如图1所示,当卫星在地球附近沿着轨道飞行的时候,以瞬时有效视场为0.182毫弧的 120° 小圆弧扫描地球。在瞄准线扫描 360° 时,飞行器以瞬时有效视场的量在轨道方向推进。从瞬时有效场来的辐射在光谱上被分开并聚焦在各个探测器上。

为了满足光谱数据的要求,必须应用一个能用很高速度和比较大的收集孔径扫描的对宽光谱改正的系统。而且,系统必须遵从

严密的空间限制。为这个计划设计出了这样一种系统并且予以研制。为了满足光谱数据的要求,确定出下列的系统参数。

- 1.入射光瞳的尺寸 30.5厘米有效纯直径
- 2.扫描速度 6000转/分
- 3.扫描形式 圆锥形
- 4.扫描直径 11°
- 5.瞬时有效视场 0.182毫弧
- 6.极扫描角 120°
- 7.光谱带(用微米表示):

- 1) 0.41—0.46
- 2) 0.46—0.51
- 3) 0.52—0.55
- 4) 0.56—0.61
- 5) 0.62—0.67
- 6) 0.69—0.76
- 7) 0.78—0.88
- 8) 0.98—1.08
- 9) 1.09—1.19
- 10) 1.20—1.30
- 11) 1.55—1.75
- 12) 2.10—2.35
- 13) 10.2—12.5

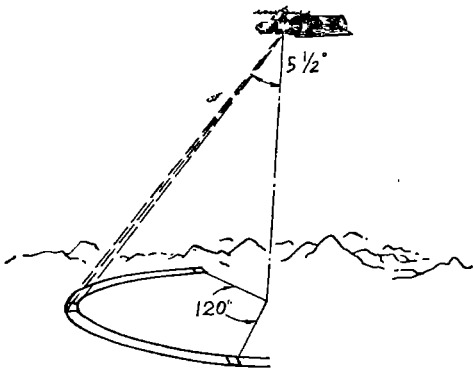


图1 圆锥形扫描图

系统的说明

如图2所示的光学系统是由一个望远镜、一个二色滤光器、两个进入飞行器内的窗口、一个远红外（带13）的中继光学系统、一个1—12带用的中继和色散系统和在一个共用的真空瓶中的13个（Hg、Cd）Te探测器。

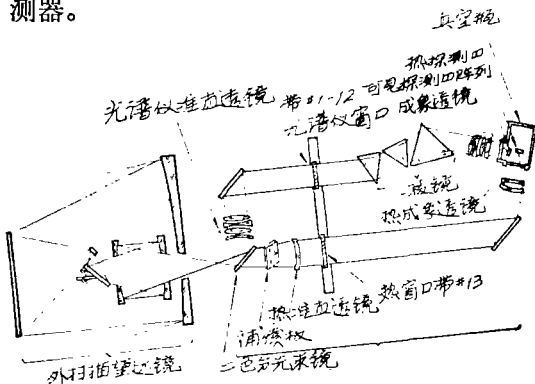


图2 系统的光学图

由于系统包含广阔的光谱区，又要求高分辨率，望远镜被作成完全反射式的。它就是一个象平面扫描器，这个扫描器是由一个物镜、扫描和中继的部件组成的。在第二个焦平面的场光阑限定瞬时有效视场并用作为到光谱仪的入射缝隙。

在透射到飞行器之前，来自场光阑的辐射用由锗基片作的二色滤光器分成两个光谱部分。辐射透过滤光器以后由锗透镜系统（包含一个窗口）中继到带13探测器。其它12个

带的辐射被反射、色散并中继到定位的和对1—12带合适的波长间隔的十二个探测器阵列。通过采用单个望远镜的场光阑，所有带的辐射都来自同一瞬时的有效视场。

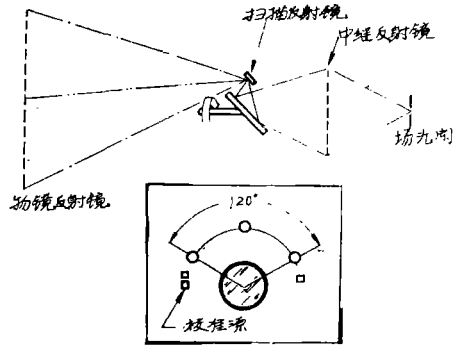


图3 主焦平面

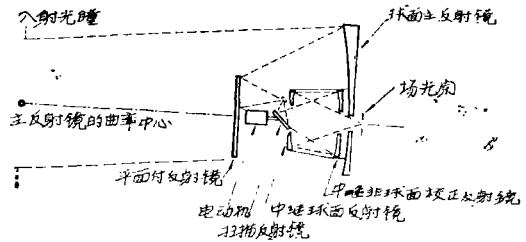


图4 望远镜结构

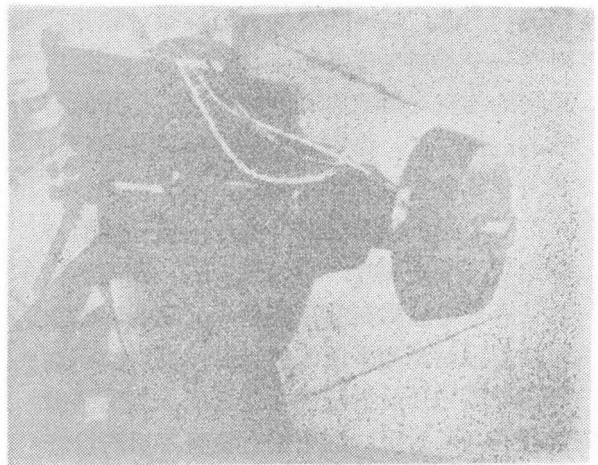


图5 望远镜外光学装置图

望远镜

扫描的方法

对于场复盖最直接要求的方法通常是物平面扫描，即藉装在物镜光学系统前面的平面镜的振荡或转动。虽然它有简单的优点

(不包括扫描部件本身),可是用高速去转动大的反射镜是主要的缺点。另一办法,象平面扫描器的运动元件可以作成很小的尺寸。

本系统所用的象平面扫描方法在图3示出。扫描是由定位在接近偏菱形装置的两个反射镜来执行,以便把在 $5\frac{1}{2}^\circ$ 半径的图象圆周上的所有点带到共同轴上。主象被形成在与外侧元件相交的球表面上;内侧反射镜固定在旋转轴上面。焦平面的位移改变两个反射镜的相对尺寸;接近物镜,则外侧元件的尺寸增大而减少内侧元件的尺寸。两个扫描反射镜绕中继光学系统轴作为一个单元而转动;这个中继光学系统在场光阑处把瞬时有效视场再成像。同样在垂直焦平面上显示出,扫描图形通过外侧反射镜的运动来画。在扫描线的末端示出校准源。

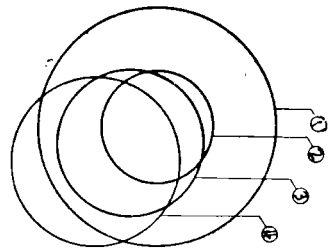
望远镜的说明

纯反射系统通常包含具有高象质的很小视场。在用象平面扫描方法时仍然必须作广角校正。这是通过在系统中采用一种对称得到的,藉此广场(11°)的象差旋转对称并且对于一个扫描角保持不变,因此在扫描之后采用的改正对所有瞬时有效场来说是同样有效的。换言之,沿着 11° 直径圆周的每个点,相对于象差来说,都成为轴上的。

图4示出系统而图5是表示望远镜的外部光学系统的照片。对光轴 $5\frac{1}{2}^\circ$ 取向的辐射是有效地被限制在系统的入射瞳孔。它是通过主反射镜和平面的付反射镜反射的,达到在外侧扫描反射镜的附近聚焦。然后辐射发散到内反射镜,这个反射镜将其对准沿着中继光学系统(由一个球面和一个非球面的反射镜组成的)的轴。它通过球面中继反射镜的中心口径然后微微有些会聚地从非球面反射镜反射出来。在从球面中继反射镜反射后,辐射通过非球面反射镜的中心口径,达到在场光阑上聚焦(应该注意到,非球面也能够在这另一中继反射镜上)。

当向后投影的时候,中继光学系统的折

叠轴与主反射镜的半径相重合。借助于这个装置,辐射束的中心在主反射镜的曲率中心上与旋转轴相交。换言之,相对于所有瞬时有效场的中心(沿着 11° 直径的图象圆周的一些点),在中继光学系统的非球面反射镜上的孔径光阑的象被形成在主反射镜的曲率中心上。总而言之,我们可以认为该系统运用了史密特原理,也就是非球面校正器是装在球面反射镜的曲率中心上。但是,有一些主要根据扫描和成像功能的集成方面与史密特系统有重要差别。第一,改正器是反射的而不是折射的。第二,改正是与扫描角完全无关;另一方面,在古典的史密特系统的情况下,轴外点的成像质量主要由于斜球面象差而随着场角变化。第三,改正器是具体地在系统之内的适当位置上,而只有它的象是在曲率中心上。因而,系统是比古典的史密特系统紧凑得多,史密特系统是太长了。



| 名称 | 中心 | 直径 |
|---------------|---------|--------|
| ① 入射光瞳 | 0 | 43.2厘米 |
| ② 中继球面反射镜孔的遮栏 | 0 | 20.5厘米 |
| ③ 付反射镜遮栏 | -6.3厘米 | 26.7厘米 |
| ④ 中继孔槽 | -12.7厘米 | 30.1厘米 |

图6 在入射孔瞳投影的遮栏部分

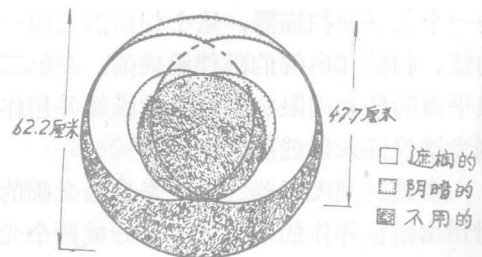


图7 净孔径在球面主反射镜上的遮栏部分的投影

的中心的高级分辨率。

遮栏部分的分析

光效率在辐射计量的应用方面它是特别重要的，即要求遮栏部分在整个扫描期间内是均匀的。遮栏的三种来源：最大的是付反射镜；中继壳体；和在中继球面反射镜的中心口径。由于所有三个来源对光轴是旋转对称的，所以遮栏部分在一个扫描角下保持不变。

图 6 示出向后投影到入射光瞳上的三个遮栏部分。这些遮栏部分随着扫描反射镜而绕光轴旋转。

图 7 示出在扫描周期内投影在主反射镜上面的遮栏部分。因为扫描角等于 120° ，而不是满圆，故主反射镜的孔径用不着对于光轴对称地滚边。

象的评定

因为系统对非球面反射镜，孔径光阑的安排使场点沿着 11° 直径的图象圆周，故瞬时有效视场的所有点的改正完全相同。对较大的扫描直径范围也产生同样的图象质量。

因为非球面反射镜的形状足以圆满地改正球面象差，瞬时有效场的中心对所有的波长是衍射一限制的。在瞬时有效视场的中心外面，彗星象差是主要的象差。在瞬时有效视场的边缘上，几何点的扩展完全包含在 4 弧秒之内。因为点图象扩展是接近于瞬时有效角成线性关系，既然主要的是第三级彗星象差，故扩展范围的图象质量容易求得。

望远镜在瞬时有效场的中心对 0.55 微米波长的调制传递函数如图 8 所示。它是与带有所介绍的遮栏形状的绕射限制系统相同的，切断频率接近 1320 周/毫米或 4 周/弧秒。作为比较也示出不受遮栏的绕射限制系统的调制传递函数。图 9 给出瞬时有效场的角上调制传递函数。虽然对于中心是降低了质量，它保持大体上相当于所感兴趣的低空间频率

材 料

所有反射镜是用铝作成的，除镀平面付反射镜以外，并且涂上无电的镍。银涂层用多层重迭防护来加强在整个宽光谱区内反射。

光谱仪的说明

由于在望远镜的非球面所作的改正，近轴的 $f/1.5$ 光束通过场光阑并进入 $f/1.3$ 的光谱仪。如图 2 所示，它首先入射到二色滤光镜，这个镜子在光谱上通过透射带 13 和反射其它的，于是把 1—12 带从带 13 分离出来。

热带(13)在低 $f/\text{数}$ 通过倾斜滤光镜（这个倾斜滤光镜有一个锗基片引进了轴上的球面象差和象散。因为用旋转对称的透镜元件不能消除象散，在二色滤光镜后面垂直于分光束镜倾斜面的平面上倾斜 45° 插入一块

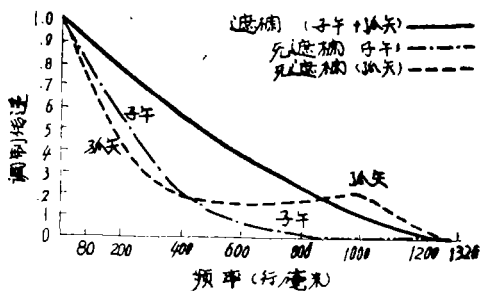


图 8 调制传递函数（轴上的、可见区）

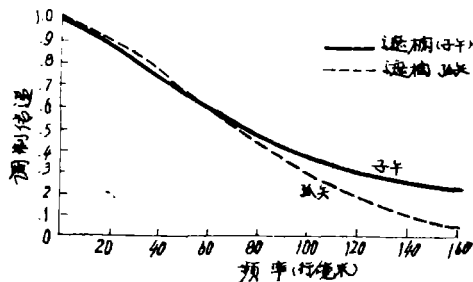


图 9 调制传递函数（瞬时有效场的角上、可见区）。

补偿锩板。所以，分光镜带进的非对称是以增大球面象差为代价被有效地消除掉，这种球面象差可用锩中继透镜改正。随着补偿板，用一锩单透镜使通过辐射准直地通过锩窗口，然后用锩双透镜使场光阑以放大率（demagnification）于接近0.76再成象落在探测器上，产生系统 f 数为1.0。

把多层膜涂在双透镜的平面表面上，以限制光谱透射达到所指定的带宽。此外，所有其它的锩表面有高效率的多层抗反射的涂膜。对热带的实际限制场孔径是探测器。

从二色滤光镜反射出来的辐射带1—12，是通过用特殊的红外透射Schott玻璃（IRG—7和IRG—9）玻璃作成的4单元透镜来使其准直的。在准直之后，它从一个平面反射镜反射出来并且透射通过熔石英窗口。然后辐射通过三个棱镜组合件（两个氟化钡和一个熔石英）色散。在这里用减色散的技术来产生较理想的与波长有关的色散作用，并因此使探测器的全部尺寸分布最佳化。用这种方法，氟化钡的色散（氟化钡的色散随着从可见到近红外波长的增大而比熔石英降低的快）用来使第一个带探测器的尺寸最佳化，并因此减少噪声，而保持探测器尺寸超过实际上的最小值的中间带的充分色散，使由1/2功率点定义的最后的线色散在表1给出，而带1—10探测器阵列的照片在图10示出。在色散棱镜之后成象透镜将光谱上分离出的象作单位放大，以提供系统 $1.3f$ 数。成象透镜用的玻璃是与准直仪用的玻璃一样。

带1—12用的透镜系统必须包含非常宽的光谱区。因此充分的改正需要应用特殊的红外透射材料的多单元，球色差和纵色差的适当组合和应用相对于随着波长变化而焦距变化的倾斜焦平面。校正的程度影响带外辐射的抑制以及能量集中的有效效率，而不影响空间分辨率，这种分辨率是由望远镜的场光阑决定的。

从整个系统观点出发抗反射涂膜的选择决定于要求最大效率的带。在本系统中，单

层的抗反射涂膜是用来使在较短波长时效率达到最大。正如在望远镜中，反射镜的表面涂上银和多层防护膜。

校 准

光谱仪包含在飞行中校准焦平面对准探测器用的设施。对于热带，通过把折叠式反射镜绕垂直于折叠平面的轴倾斜来作一个横向调整；通过把折叠式反射镜与双透镜一起绕窗口轴转动来作另一个横向调整。聚焦是通过双透镜的纵向运动来达到的。

在带1—12的情况，成象透镜用三种垂直方向的移动作纵向和横向上的调整。通过控制两个砷发光二极管照射的矩形孔的成象来作这些调整，每一个是在望远镜场光阑的一边上（棱镜的色散使一个孔的象落在带1上，而另一个在带11上）。

除发光二极管校准源以外，为了使探测器的时间常数变化达到最小及其响应度线性化起见，设计出小的辅助光学单元以受控制的直流背景照射探测器（1—12），这在图2中未曾示出。

操 作 结 果

数据处理

在地面站上从 EREP带来实现数据处理和重改幅面。数据处理依靠计算机适合带的纪录和通过阴极射线管显示的数据。输出的象被传送到信号带 B/W 胶片或3带的彩色胶片上。

可能的数据应用

S—192 数据的评定希望用在农产量确定、植物生长的测定、土地应用的测定、地质矿物测绘、土壤潮气测定，大片水的污染面积的确定和表面温度测绘方面是有用的。另一个目标是为从空间测定地球资源特性，确定应用光谱匹配技术的自动数据处理的现实性。

摄影测绘

示出用S-192系统作测绘的两张照片。第一张是如图11所示的 Washington—Baltimore区的3-色测绘。在图12上示出地图，在那里用线勾出对应S-192照片的部分，详图的某些可见部分包含Annapolis Bay Bridge, Baltimore—Washington Parkway Baltimore Beltway, Friendship International Airport(Baltimore) 和越过 Patomac到 Washington的桥。接近于 Baltimore 中心附近黑区的白区是低之及其阴影。在 Chesapeake Bay 的 Kent Island 南部是较高薄层的阴影，它们影响来自水的亮度。表2表示在作3-色测绘的时候存在的关系条件。

第二次S-192测绘为 Vermilion Bay 和用热带(13)作的和在图13示出的 Coastal Louisiana 区。因为正在提出出版之前公开这张热的照片，所以必需应用一张由遥测视频数据构成的照片。普通重现是由 EREP 带记录构成的，能给出更高的质量。

较轻的色调表示比较暖和的地壳，它包含从 Jennings 和 Eunice 东南区几乎到 Morgan 市的许多市镇和城市。美国的各州间也可看出，这是从 Jennings, Crowley 到 Lafayette, La 扩展的细线。较暗的色调通常表示较冷的水，例如海湾的内陆网路，Grand Lake 和沿海 Vermilion, Cote Blanche 和 Atchafalaga 海湾。还有另一种

水的特性是沿海间的水路（在海湾的北部）。

表3示出在种这热测绘期间相关的条件。

表2 3-色测绘相关条件

| | | | |
|-------|---|---------|--|
| 轨道周期 | 93.237分 | 跟踪 | 大致向东南旅行 |
| 轨道倾斜角 | 52° | 所用带 | No.(.46—51μ) No.7(.78—88μ) No.11(1.55—1.75μ) |
| 日期 | 8/5/73 | | |
| 白天时间 | 150GMT(Local Washington分接近80米 分辨率DC11:04EDT) 50秒 | | |
| 高度 | 439.5公里(测距数据) | 扫描时间范围 | 扫描期间 23.2公里 地球旋转 |
| 位置 | 38.9°纬度 | 75.7°经度 | 向东方方向 6.25% 图畸变 (与地球转动相反) (压缩) |
| 本机倾斜角 | 27° | | |

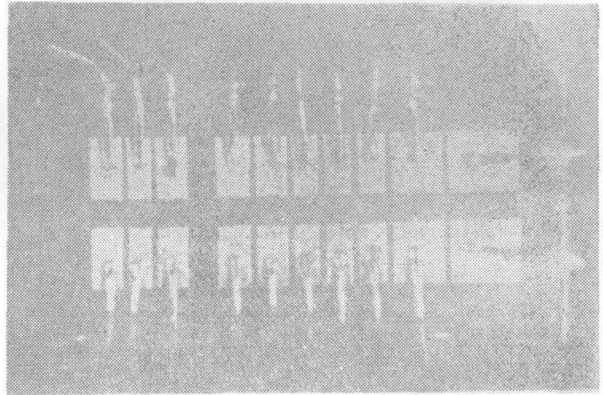


图10 探测阵列一带 No. 1—10的照片



图11 S-192 3色测绘的 Washington—Baltimore区

表1 带子1—12光谱的线色散

| 带的编号 | 长度(色散方向上) |
|------|-----------|
| 1 | ·282 毫米 |
| 2 | ·206 |
| 3 | ·112 |
| 4 | ·109 |
| 5 | ·102 |
| 6 | ·127 |
| 7 | ·132 |
| 8 | ·119 |
| 9 | ·089 |
| 10 | ·119 |
| 11 | ·282 |
| 12 | ·462 |



图12 表示3-色测绘区的地势图

表3 热测绘相关的条件

| | |
|--------|--|
| 轨道周期 | 93.237分 |
| 轨道倾斜角 | 52° |
| 日期 | 1/30/74 |
| 白天的时间 | 1654GMT(Local New Orleans La, 10:54CST) |
| 高度 | 440公里(近似) |
| 位置 | 30°纬度、92°经度 |
| 本机倾斜角 | 41° |
| 跟踪 | 大致东南旅行 |
| 使用的带 | No.13(10.2—12.5μ) |
| 分辨率 | 80米 |
| 扫描时间长短 | 20秒 |



图13 Vermilion湾与Louisiana
海岸的S-192单热带测绘

场范围和高扫描速度的要求。在设计中达到了扫描图象的最大稳定性与仪器紧凑性。操作时所成象表示，在440公里高度有相当于80米的分辨率的细节。

译自“Optical Engineering”

Vol.13, No.4, 1974 P.292

结 论

成功地设计及制造了多光谱扫描器，以满足宽光谱区内13条带、高空间分辨率、广