

红外分光计：液氮冷却火箭运载 圆形渐变滤光器

摘要：这里密述 ICECAP 极光测量计划所用一种红外分光计，从高度 45 公里到 200 公里的火箭上取得大气发射光谱，这仪器连续扫描 6.75—23.2 微米光谱区，扫速为 2 次扫描/秒，仪器使用一个圆形渐变滤光器 (CVF)，光谱分辨率从 3% 到 4%。全部光学组件、砷探测器、CVF、Irtran6 透镜、挡壳、可卸的冷却罩装在一个高真空杜瓦瓶系统内冷却到 10k 以下，分光计在 22 微米处噪音等效光谱辐射 (NESR) 优于 1×10^{-1} ($W \text{厘米}^{-2} \text{球面度}^{-1} \text{微米}^{-1}$)。两次火箭飞行观察到高空大气发射占优势的是 9.6—微米 O_3 和 15 微米 CO_2 。

导 言

1973 和 1974 年国防核管理局/空军剑桥研究试验室 ICECAP 极光测量计划包括两个火箭运载长波红外分光计 (今后记为 LWIR-CVF 分光计)，设计了求取大气辐射率 6.75—23.2 微米谱区的测量。图 1 是 LWIR-CVF 分光计和检测台的图。每个几乎相同的仪器成功地装上了一个 AFCRL (空军剑桥研究试验室) Black Brant VC 火箭进行发射作为 1969 年五月开始的发展计划的结束，这计划以前已有三次原始型仪器发射出去。

ICECAP (红外化学实验——协调的极光计划的简称) 是在北极扰动的大气中进行的。ICECAP 的特殊目的是执行协调现场测

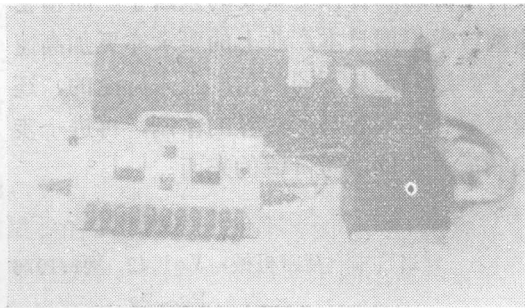


图 1 LWIR-CVF 分光计和检测台

量计划，研究在极光显示中导致短波和长波红外发射的电离和激发机制与化学过程。测量协调起来，利用火箭、气球、飞机和适当地面观察平台。

一 般 描 述

LWIR CVF 分光计的规范 (HS-1B 型) 包括峰值波长 (22 微米) 噪音等效值光谱辐射灵敏优于 1×10^{-11} ($W \text{厘米}^{-2} \text{球面度}^{-1} \text{微米}^{-1}$)，自由光谱区 7—23 微米，3—4% 分辨率，2 次光谱扫描/秒，液氮冷却保持时间 4 小时，以及能够适应火箭发射和飞行中机械环境的措施。

飞行仪器布置如图 2 所示。杜瓦瓶有气体罩一全部氮冷却式。杜瓦瓶有三个基本室：中间一个 2.8 公升氮容器在中心，一个热电子仪器室在后面，和一个冷光学室在前端。延伸到氮容器的导管容许电导线通过，和从电子仪器室到光学室一个电动机驱动轴通过。

仪器罩在进行系统检测时是必须具备的。在飞到 100 公里时必须用点著一个风箱驱动器把它拿掉，这罩子保留在负荷机头尖端两半、避开光程向外翻开；机头尖端两半在再入以前保持翻开，将冷光学系统暴露在

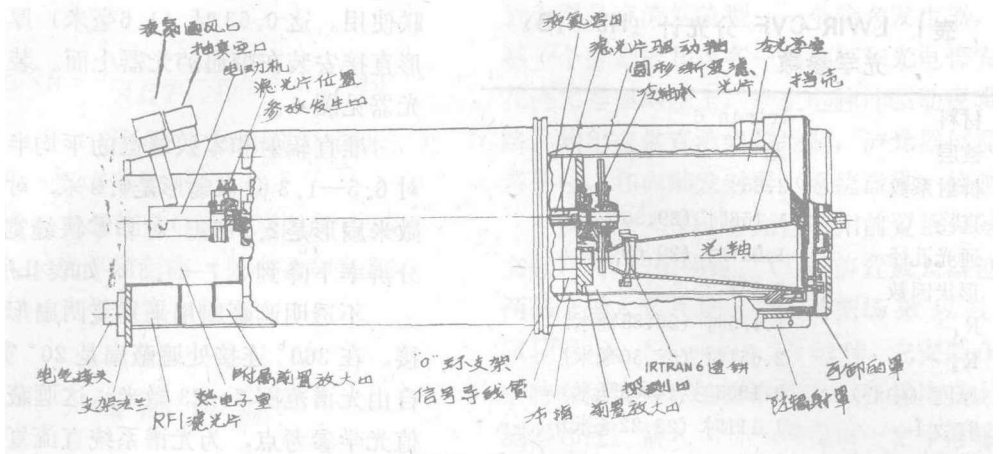


图2 LWIR-CVF 分光计布置图

测光器驱动电动机、测光器位置参考发生器、辅助前置放大器、和两个印刷线路卡片都设置在电子仪器室里。电动机驱动轴是一根热绝缘的无缝钢管、从热电动机直接通过氮容器到冷测光器轴承。用一个辅助电子仪器箱提供 0—5—V 遥测技术的信号调节和直流到直流转换使从有效负荷 28 伏直流电池供应提供操作。

光学系统

仪器设计为了得到在变化条件下活性的各种原子和分子气体在直立方向分布的光谱测量。光学系统包括一个前挡壳、无镀层的 Irtran6 f/1 透镜和透镜焦点内场阑如图 3 所示。掺砷的砷探测器本身用作场阑、圆形渐变测光器 (CVF) 转过场阑使仪器在测光片旋转一周时扫描过分光计的自由光谱范围。

LWIR-CVF 分光计的光学系统参数在表 I 列出。Irtran 6 透镜是伊斯门柯达公司制造的。用了一个不镀膜的透镜因为蒸镀 7—23 微米范围的减反膜层是不可能的。

CVF 是由光学镀膜试验室有限公司制造的正好放在探测器上面干涉膜面朝着探测器那边 (见图 3)。有如装在 LWIR 分光计的 CVF 参数内在表 II 列出。分辨率是锥角和缝宽度两数者的函数 (狭缝宽由干涉层处 f/1 锥直径所决定)。

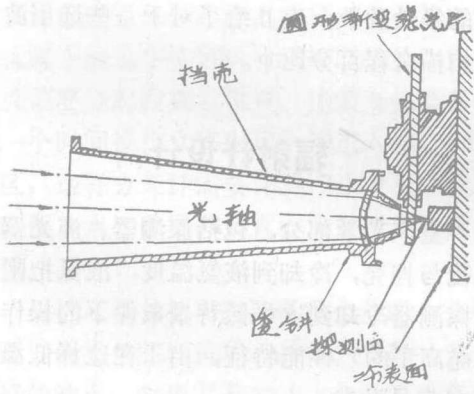


图3 LWIR-CVF 光学简图

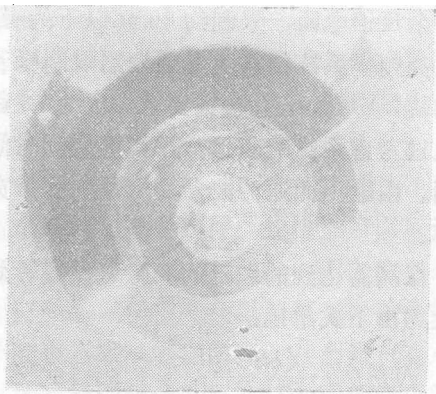


图4 组合的 CVF 测光器

大气辐射前面，透镜和挡壳组合安装成一个单元在光学室前端。探测器、前置放大器、铟砷发射器 (用在飞行系统作为激励器) 和 CVF 与联结的轴承都直接安装在光学室底部 (冷指)。

表 I LWIR-CVF 分光计 (HS-1B)
光学参数

材料	Irtran 6
镀层	无
折射系数	2.65
直径	1.156吋 (29.36毫米)
通光孔径	1.027吋 (29.09毫米)
形状因数	2.256
R ₁	1.175吋 (29.85毫米)
R ₂	2.651吋 (67.30毫米)
厚度 (中心)	0.1605吋 (4.08毫米)
有效 f	1.111吋 (28.22毫米)
f 数	1.08
角模糊圈	1.12° (0.019弧度)
模糊圈直径	0.0217吋 (0.57毫米)
场阑	0.039吋 (1.0毫米)
视场	2.01° (3.87 × 10 ⁻³ 球面度)

表 II 6.5—24 微米 CVF 的半功率
带宽和光学透射率

波长 (微米)	带宽 (微米)	带宽 (%)	透射率 (%)	扫描全程 百分比(φ)
扇				
7	0.294	4.20	53	1.01
8	0.300	3.75	52	8.75
9	0.304	3.38	49	16.50
10	0.310	3.10	47	24.24
11	0.315	2.86	44	31.98
12	0.320	2.67	38	39.72
扇				
13	0.406	4.29	55	50.91
14	0.585	4.18	37	54.80
16	0.618	3.86	39	62.56
18	0.651	3.62	25	70.32
20	0.684	3.42	22	78.09
22	0.717	3.23	9	85.85

标准 CVF 是直径 4 吋 (10 厘米), 由两个 180° 扇形组成。0—180° 扇形基底是由 0.125 吋 (3 毫米) 厚的锗制成, 镀膜提供从 6.5 微米到 13 微米连续扫描。这扇形需要一个氟化钡挡板串联使用。这工作用两个 90° 扇形 3 毫米厚直接装在泸光器上面来完成。180°—360° 扇形用 3 毫米厚 Irtran 6 制造, 加镀层提供从 12.5 微米到 24 微米的连续扫描。这扇形需要一个镀层的锗挡板串

联使用。这 0.63 吋 (1.6 毫米) 厚、180° 扇形直接安装在带通泸光器上面。装配好的泸光器见图 4。

准直辐射和零狭缝宽的平均半功率带宽对 6.5—1.3 微米扇形是 0.9%, 对 12.5—24 微米扇形是 2.21%。对非零狭缝宽和 f/1 锥, 分辨率下降到 2.7—4.3% 如表 II 所给出。

不透明遮蔽扇用来复盖两扇形之间的联接。在 360° 连接处遮蔽扇是 20° 宽, 限制自由光谱范围 7—23 微米。这遮蔽扇提供零值光学参考点, 为光谱系统直流复位电子装置之用。

泸光器中心波长是每个泸光器扇形角旋转的线性函数。表 II 给了对于一些选用波长的扫描全程百分比 φ。

辐射计设计

整个光学部分, 包括探测器、泸光器、透镜与挡壳, 冷却到液氮温度。液氮把附属的探测器冷却到这样低背景条件下的操作造成提高了的¹⁾性能特征, 由于在这样低温下没有背景噪音。

系统用一个互阻抗反馈放大器(TIA)²⁾, 是一个反馈电阻, 限制约 80 赫以下的噪音, 在更高频率系统依靠前置放大器限制噪音。由旋转 CVF 加给电带宽要求大致为 50 赫。这通过考虑系统响应单分辨元素所须时间来达到。由输出低通泸波器决定系统的带宽是 90 赫。

探测器达到的理论的 22 微米噪音等效功率大约由下式给出:

$$NEP = \frac{(4kT)^{1/2}}{R_i(R_f)^{1/2}} = 1.5 \times 10^{-16} \text{ (W/赫}^{1/2}\text{)}$$

其中 k = 玻耳兹曼常数 ($W/厘米^{-2} K^4$),

T = 绝对温度 (K)

R_i = 探测器电流响应度 (V/A)

R_f = 反馈电阻 (Ω)

理论的噪音当量光谱辐照在 22 微米由下式

给出:

$$NESR = \frac{NEP(\Delta f)^{1/2}}{A\Omega T_r \Delta\lambda} = 4.0 \times 10^{-12}$$

(W 厘米⁻²球面度⁻¹微米⁻¹)

其中 Δf = 噪音带宽 (赫)

$A\Omega$ = 光学流量(厘米²球面度)见表 I

T_r = 光学透射率(见表 I 和表 II)

$\Delta\lambda$ = 光学带宽(微米)。

低温设计

这仪器的设计是为一个 Black Bvant IVB 或 VC 火箭的发射程序相适应的。这要求能靠近通风口和抽真空口。当火箭在发出轨道上的水平位置时仪器可以维护。发射时火箭要竖起在直立位置。还需要仪器可继续一个时间操作允许射出火箭进入极光活动区, 这样分光计需要保持四小时可以操作, 以便从水平位置移到直立位置时处于低温状况。

杜瓦瓶是按习惯照低温企业联合会 USU 设计规格用铝制造的, 具备重量轻、热传导好的特点。氦容器和光学室由热绝缘塑料管支撑的。不锈钢和通风管用压力粘合的钢—铝钮子焊到铝上。冷外罩是用气体冷却的, 在全氦设计中避免了液氮的需要。通风口是隔热的旋转门型, 为了消除杜瓦瓶在通风过程中霜的积累。

跟低温联系的最大设计问题是 CVF 的适当冷却与光学部件的热接触可以通过用氦气对流的热沉^[3,4]来完成。可是这要求特别大口径的光学窗能经得起反复冷却和升温不碎裂也不破坏真空密封。甚至氦气有点漏进杜瓦瓶的绝缘真空、将造成低温失效。因此费了不少力量设计了一个高热传导的滚珠轴承, 使旋转的 CVF 冷却。

电子设计

系统的功能设计见图 5。“大信号”调节

放大器是直流复位型。一个参考发生器, 包括一个分划板和连在一起的灯和光电管安装在激光器驱动轴上, 产生电脉冲驱动逻辑线路。输出提供直流复位控制, 激光器位置参考信号, 和内部发射器(系统激励)控制。

LWIR-CVF 分光计所用前置放大器在文献²⁾中已描述过。TIA 前置放大器包括两部分输入装置是一个面结型场效应装置(JFET), Siliconix 2N 5199, 它安装在一个特殊温度控制的标准件上、在氦冷指上探测器邻近。输入 JFET 偶提供一个平衡输入给辅助前置放大器, 这前置放大器是集成线路操作放大器 741 型, 安装在后端(热)电子仪器室的。传递函数电阻 R_f 安装在冷前置放大器标准件上, 那里它可以被冷却。

这分光计选用——直流复位系统因为它和对称斩波比较相对简便。比高频对称斩波法的主要优点是直流复位系统中探测器前置放大器频率响应不需高于最后低通滤波器。此外在直流复位系统中斩波因素是一, 这和对称斩波比较给出信噪比改进 2 倍^[6]。

标 定

一个很敏感的低温冷却的辐射度量或光谱度量系统要进行标定需要特殊技术。这里因为仪器对热窗口和环境背景辐射能级要响应并因必须在操作和检验过程中维持真空绝缘的原故。

在孔径中使用安装的针孔来减少仪器对环境背景的灵敏度、曾往用来允许进行多少是常规的检测标定^[7]。可是这标定需要几次外推法来得出“扩展源”的响应, 并且违反了通常原则: 标定测量应在尽可能完整地复现根据标定进行测量的环境的条件下进行⁸⁾。由于使用针孔造成的分辨率和有效孔径面积等问题是最难使视场的更换达到合格的程度。仪器设计了测量扩展源, 就是以外空间为背景的上空(天顶)的大气谱辐射率。

模拟空间条件是把仪器耦合到含有大面

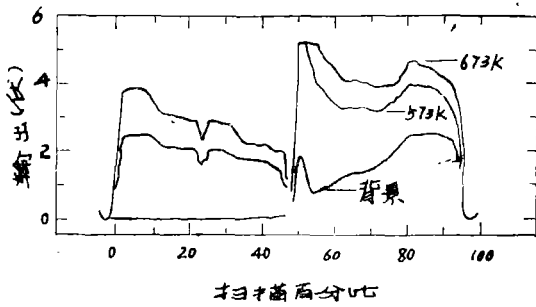


图7 对点源黑体的响应

波长位置标定 (和分辨率的某些测量) 用插入几个已知带通滤光片 (用冷滤光器轮) 到光程中, 并观察输出对位置参考信号的关系来求得。

点光源辐射标定可以外推到全场响应, 利用已测定视场并和扩展源响应作比较。这种把扩展源与点光源标定间的比较给出误差色的某种量度, 它可能不超过 $\pm 50\%$

LWIR-CVF 分光计对黑体经过聚苯乙烯滤光的响应如图 8 所示, 那里 13.368 微米和 14.20 微米带分辨很好, 但 8.54 微米和 8.74 微米带没有完全分辨。

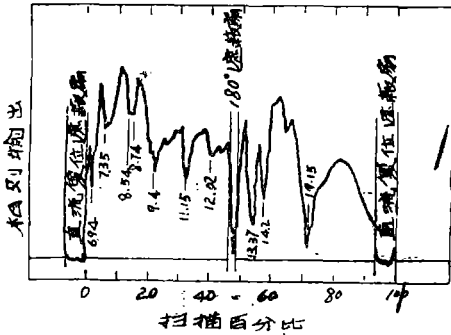


图8 对黑体经聚苯乙烯塑料过滤后的响应

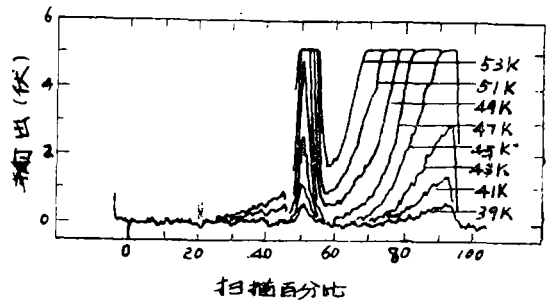


图9 在138公里处样本输出光谱, 显示点源种类在 9.6 毫米(O_3)和15毫米(CO_2)。

最后飞行标定 LWIR-CVF 分光计系统是在空军剑桥研究试验室 (Bedford, Massachusetts) 在 Thomas P. Condron^[9] 领导下完成的。

结 论

这里报告的液氮冷却的火箭运载红外分光计表示目前火箭运载红外测量和相关标定区域, 探测器——前置放大器电子学, 和冷轴承技术的成功发展计划的最高水平。

这分光计在两次火箭飞行^[10]中取得顶头上空辐射测量作为火箭高度在 45 公里到 200 公里在 7—24 微米范围内的大气发射的函数, 工作性能良好。光谱主要成分在 9.6 微米和 15 微米, 这归结为臭氧和二氧化碳共振和热发射, 在图 9 中例示, 这是在火箭上升达 138 公里过程所得。

(译自 Applied Optics, vol.14, No12, 1975 年 12 月) (吴学蔺译)