

新型红外空间遥感用傅里叶变换光谱仪

吴航行,华建文,王模昌

(中国科学院 上海技术物理研究所,上海 200083)

摘要:为了研制红外空间遥感用傅里叶变换光谱仪,将其作为风云三号、四号气象卫星的有效载荷,在比较国外各种航天工程项目中傅里叶变换光谱仪机械扫描方案的基础上,提出了一种新的机械扫描方案。它利用光通过平行平面镜组时光程随入射角度的改变而变化这一特性,同时把两支光路的光程改变量关联起来。该方案只使用平面反射镜,对于运动部件的精度要求比较低,对倾斜、磨损等不敏感。就国内的具体技术条件而言,这种方案是切实可行的。

关键词:傅里叶变换光谱仪; 红外空间遥感; 机械扫描; 光程差

中图分类号: TH744.1 **文献标识码:**A **文章编号:**1007-2276(2004)04-0397-04

New space-borne remote sensing Fourier transform infrared spectrometer

Wu Hang-xing, Hua Jian-wen, Wang Mo-chang

(Shanghai Institute of Technical Physics, Chinese Academy of Science, Shanghai 200083, China)

Abstract: To make a space-borne Fourier transform infrared spectrometer as an effective load on the FY 3 and FY4 satellites, the mechanical scanning methods of the Fourier Transform Spectrometers in the space-borne projects are compared and discussed, then a new method is put forward. It is based on the principle that when light passes through two parallel plane mirrors the optical path length depends on the incident angle. The new method correlates the optical path length changes between the two arms of the interferometer. This method requires only plane mirrors, and it is immune to tilt, wearing etc. Therefore this method is suitable for our project.

Key words: Fourier Transform Spectrometer(FTS); Infrared space remote sensing; Mechanical scanning; Optical path difference

0 引言

傅里叶变换光谱仪^[1,2]作为一种高分辨率的光

谱仪器,是现代工农业生产、国防、科学研究中心不可缺少的工具。对于航空航天红外空间遥感应用来说,傅里叶变换光谱技术是获得高精度大容量的大气温度、湿度、水汽高度分布、地表成分以及地面气压等信息

的一种重要手段。

目前在国内外航空航天领域,人们使用的大气测量用光谱仪大部分是用光栅或滤光片来实现分光的,在我国已发射的风云一号和风云二号气象卫星上使用的就是滤光片式光谱仪。这些光谱仪具有结构简单、性能可靠等优点,缺点是通道数较少、光谱分辨率不高。光栅光谱仪的光谱通道数相对较多,但由于光栅光谱仪中光栅前后狭缝的存在,使得它的光通量比较小,信噪比难以提高,光谱分辨率也不高。相对于传统的滤光片式光谱仪和光栅光谱仪,傅里叶变换光谱仪具有分辨率高、光通量大、可以提供较多的通道数和极高的光谱分辨率等优点。目前已经发射的或将要发射的傅里叶变换光谱仪的通道数可高达数千条,而光谱分辨率又远高于滤光片式光谱仪的分辨率。这些特性可以提高大气温度和湿度的反演精度,为数值气象预报提供条件。它在气象遥感上的应用已经成为一种必然的发展趋势。风云三号、四号气象卫星有望搭载这种仪器。

傅里叶变换光谱仪的光谱分辨率与干涉仪的光程差直接相关,光程差越大,光谱分辨率就越高。根据其原理可分为空间调制方式(静态)和时间调制方式(动态)。空间调制傅里叶变换光谱仪的一个特点是没有任何运动部件,从而使仪器结构紧凑、性能可靠,对于航空航天遥感应用来说,这是一个非常难得的优点,但由于它的光程差不可能做得很大,光谱分辨率就无法提高,所以它只适用于低、中分辨率的场合,但由于红外焦平面阵列的功耗相对较大,低温制冷也将是一个难题。对于航空航天大气遥感用光谱仪来说,空间调制傅里叶变换光谱仪的分辨率还是不够的,所以时间调制的扫描方式是必然的选择。时间调制方式是通过机械运动部件的扫描来改变干涉仪两支干涉光路之间的光程差,因为机械扫描的行程可做得很大,从而光程差大,仪器光谱分辨率很高。机械扫描可以用一维直线运动实现,也可绕一条轴线作旋转运动来实现。

1 系统原理和经典的机械扫描方案

最经典的傅里叶变换光谱仪的核心是迈克尔逊干涉仪,原理如图 1 所示,入射光被分束器分成两束,

一束反射,一束透射。反射光被固定平面反射镜 M_1

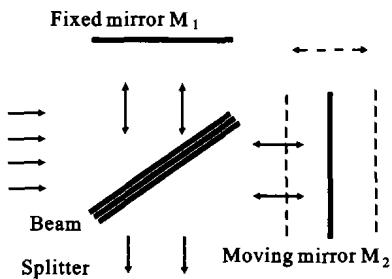


图 1 经典迈克尔逊式傅里叶变换光谱仪的原理

Fig. 1 Principle of FTS of the classical Michelson interferometer form

反射回来并透过分束器。透射光被平面反射镜 M_2 反射回来,并由分束器反射,这两束光发生干涉,形成干涉图。机械扫描是通过反射镜 M_2 的一维直线运动实现的。这种方案的优点在于所用到的光学元件最少、最简单,但是对于机械运动的要求非常高,通常,平面镜的倾斜角度要小于几秒。该方案在工程上被日本的 IMG 系统^[3] 和 ATRAS 系统^[4] 所采用,它们采用磁悬浮轴承来支撑运动轴,并且使用自适应校正系统,以保证运动过程中倾斜角小于精度要求。因此,尽管光学元件少,性能可靠,但它的技术难度非常高,研发成本高、周期长。若直线运动的支撑元件是机械轴承,则润滑将比较困难,尤其是在航空航天应用中,要求仪器长时间连续工作,所以寿命是一个问题。

另一种工程上广泛应用的直线运动方案是把上述方案中的两片平面镜都换成角镜或猫眼镜,即用光学自适应校正来代替机械自适应校正。MIPAS 系统^[5] 和 IASI 系统^[6] 就是使用这样的方案。这种方案采用了高精度的光学角镜或猫眼镜,使得直线运动中倾斜精度要求下降。这种方案的难点在于高精度的角镜或猫眼镜的装配精度非常高,在国内的技术条件下难以实现。另外,在航空航天应用中,要求光学仪器在低温条件下工作,但仪器的组装却是在常温下进行的,而且在卫星发射时振动很大,高精度的角镜或猫眼镜能否通过这些环境条件试验还有待证明。

采用摆动方式的傅里叶变换光谱仪,常见的形式如图 2 所示。这种摆动扫描是利用角镜的自反射特性来实现光束的原光路反射的。在工程上,这种机械扫描方式已经被加拿大的 ACE^[7] 和日本的 SOFIS^[8]

采用。它的优点是结构紧凑,机械扫描速度相对较低,不过与上述的方式一样,也使用角镜,而且角度的摆幅比较小(角镜顶点要对齐,否则信号调制度很快下降,甚至观察不到干涉信号)。

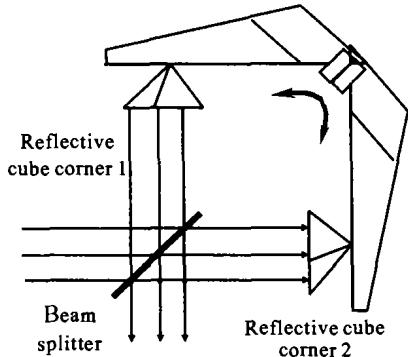


图2 摆动式傅里叶变换光谱仪的原理

Fig. 2 Principle of FTS of the swinging form

2 新提出的方案

平行平面镜组的原理如图3所示。光通过平行

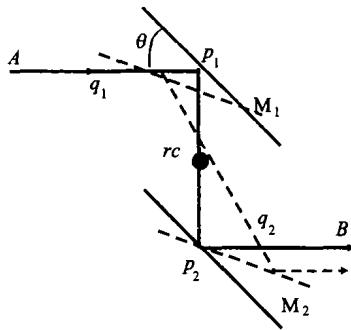


图3 光通过平行平面镜组(光程与入射角度的关系)

Fig. 3 The relationship between the optical path and the incident angle when light passes through the parallel mirrors

平面镜组时,光程与入射角度有关。光线从左边A处入射到平行平面反射镜 M_1 的 p_1 点,经 M_1 反射,光射到平行平面反射镜 M_2 的 p_2 点,再由 M_2 反射,出射到B处。若以平行平面镜组原来的位置作为参考位置,当它绕旋转中心 rc 转过一定角度 θ 时,从A来的入射光在 M_1 和 M_2 的入射点将分别变为 q_1 和 q_2 。因此,原来的光程为 $Ap_1 + p_1p_2 + p_2B$,经过旋转角度 θ 后,变为 $Aq_1 + q_1q_2 + q_2B$ 。利用简单的几何关系,可以推导出旋转角 θ 与光程改变量 OPC 的关系为:

$$OPC(\theta) = AB(\alpha + \theta) - AB(\alpha) = 2d[\cos(\alpha + \theta) - \cos(\alpha)] \quad (1)$$

式中 α 是平行平面镜组在参考位置时光线入射到平面镜 M_1 上的入射角; d 是两平行平面镜 M_1 和 M_2 之间的距离; θ 是平行平面镜组从参考位置摆过的角度值。若在B处放置一块平面反射镜,与入射光线垂直,则从A处入射的光线到达B处后将按原来的光路返回A处,因此光程的改变量可以增大一倍。

新提出的方案是利用摆动平行平面镜组改变光程这一原理,具体方案如图4所示。光入射到分束器上,被分成两束,每束光都通过平行平面镜组的反射,分别到达固定平面反射镜 M_3 和 M_4 , M_3 和 M_4 与这两束光分别垂直,光束又经过反射,按原来的光路返回到达分束器,并再一次被分束器分束,其中两束按原来的光路返回到光源处,另外两束则出射,到达光电转换器件,形成干涉图。

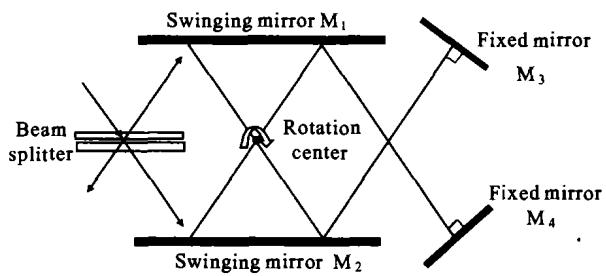


图4 新型摆动扫描方式光路结构

Fig. 4 The optical layout of the newly proposed scanning method

这种摆动方式实现了干涉光路中两支光路光程改变量的相关。只要仪器中各部件固定完毕,则平行平面反射镜组的参考位置也就固定了。当平行平面镜组沿一个方向摆动时,一支光路的光程增大,另外一支光路的光程则相应减小。因此干涉仪中两支光路之间的光程差 OPD 与摆动角度 θ 之间的关系为:

$$OPD = 2OPC(-\theta) - 2OPC(\theta) = 8d\sin(\alpha)\sin(\theta) \equiv k\sin(\theta) \quad (2)$$

式中 $k=8d\sin(\alpha)$, k 为比例常数。在摆动角度较小的情况下,有近似结论: $OPD \approx k\theta$ 。

这种摆动形式与直线运动相比,具有以下优点:

(1) 对于机械轴承的精度要求较低,仪器对机械扫描过程中的倾斜、磨损等不敏感;

(2) 对于运动光学元部件的装调精度要求相对较低;

(3) 光学元件只用平面镜,没有用到角镜、猫眼镜或者磁悬浮轴承、弹簧轴承以及自适应校正系统等高精度复杂元器件或系统,从而降低了仪器的研制难度和成本,缩短了研发周期;

(4) 由摆动而引入的光程差可以做得很大,足以满足航空航天遥感光谱仪的应用要求,而且在必要时还有继续增大光程差的潜力(增大摆幅),同时其机械结构却保持不变。

可以论证,两平面镜之间的平行度误差,对于两支光路的影响是一致的,所以这种误差不会引起两个出射波面之间的夹角(理想情况下为平行)发生变化,两平行平面镜之间的平行度误差小于 45" 时即可完全忽略它的影响。同时,机械轴承的磨损、平台的倾斜等对于信号的影响也非常小,只要平台倾斜小于 1°,对测量结果的影响也可以完全忽略。

当然,这种方案也有它的不足之处,即运动部分——平行平面镜片的长度与入射光的口径大小直接相关,当入射光束口径较大时,两平行平面镜片的长度会变得相当长,从而机械摆动结构、转动惯量会相应较大,这对于提高机械扫描速度是不利的。所以,这种系统不适于大光束口径的干涉系统。若要在该口径系统中使用,则需用望远镜系统来缩小光束口径。对于一般的航空航天红外空间应用来说,这不是问题(因为这种情况下通常都使用望远镜系统)。

从理论上来说,该结构简单、可靠,尤其是对于运动部件的倾斜、振动、机械磨损等不敏感,但要达到理论目标,就得保证仪器在运转过程中的准直性不被破坏。如何装调和校正光学系统以及如何保证系统在运动过程中的准直性将是该系统的一个难点,尤其是分光板、定镜等固定光学元件的机械振动、变形及温差等对于仪器的准直性影响比较大。以机械振动为例,一般固定的物体其固有频率可达数百赫兹而其振幅约为 $2\sim10 \mu\text{m}$,当 BS 口径约为 5 cm ,而定镜的大小为 $4 \text{ cm} \times 8 \text{ cm}$ 时,有振动引入的角度误差可达 $5\sim51''$ 。当然,其他扫描形式的傅里叶变换光谱仪也面临这些难题。

3 结 论

本文提出了一种傅里叶变换光谱仪机械扫描方案,论述了它的优点和不足之处。就目前国内外航空航天红外空间遥感的具体机械扫描方案而言,这是一种较新的方案。

该方案采用上述的摆动结构,就运动部件的机械精度来讲,其要求较低,而且不用角镜或猫眼镜,也不需要自适应光学校正系统,更不需要精密的弹簧轴承或磁悬浮轴承系统等,所以在国内的具体技术条件下,是一种切实可行的方案,对提高仪器的环境适应性、降低研发成本、缩短研发周期等都具有重要意义。

参考文献:

- [1] Chamberlain J E. The principles of interferometric spectroscopy [M]. New York: John Wiley & Sons, 1979.
- [2] Sean F Johnston. Fourier transform infrared—a constantly evolving technology [M]. Chichester: Ellis Horwood limited, 1991.
- [3] Hirokazu Kobayashi, Akiro Shimota, Kayoko Kondo, et al. Development and evaluation of the interferometric monitor for greenhouse gases: a high-throughput Fourier-transform infrared radiometer for nadir Earth observation[J]. Appl Opt, 1999, 38 (33):6801-6807.
- [4] Makoto Suzuki, Haruhisa Shimoda, Hirokazu Kobayashi, et al. Mission concept of atmospheric radiation spectrometer (AT-RAS): a follow-on instrument of ADEOS/IMG[A]. SPIE[C], 2000, 4131, 297-304.
- [5] Gessner R, Smith D J, Mosner P, et al. MIPAS on board ENVISAT: preparations for In-flight commissioning and calibration [A]. SPIE[C], 2001, 4540, 71-81.
- [6] Javelle, Pascale, Cayla, et al. Infrared atmospheric sounding interferometer instrument overview[A]. SPIE[C], 1994, 2209, 14-23.
- [7] Jacques G Giroux, Marc-Andre Soucy, Francois Châteauneuf, et al. Design of the atmospheric chemistry experiment instrument[A]. SPIE[C], 2000, 4131, 334-347.
- [8] Akihiko Kuze, Hideaki Nakajima, Jun Tanii, et al. Conceptual design of solar occultation FTS for inclined-orbit satellite (SOFIS) on GCOM-A1[A]. SPIE[C], 2000, 4131, 305-314.