经验交流

红外长窗区大气透过率的测量*

张广顺　　吴承权

王光华　　张玉香

（卫星气象中心）

提　要

本文简要地介绍了卫星气象中心红外长窗区大气透过率测量的实验装置、数据处理方法。处理了10.3—11.3μ，10.5—12.5μ，11.5—12.5μ3个气象卫星遥感仪器通道的大气透过率数据，并对处理结果进行了初步分析。对测量误差进行了初步估计，其透过率的均方根误差大约为1%。

一、引言

大气的光学参数，尤其是大气透过率，对气象遥感仪器的通道选择和卫星气象资料的反演工作都是至关重要的参数。国外在这方面做了很多工作，但在国内尚少，远远不能满足我们工作的需要。基于这种情况，我们建立了太阳光谱观测实验室，经几年筹建，于1988年9月已开始正式使用。1988年，仅就1300—750cm^{-1}（红外长窗区）光谱区进行了观测，对其中10.3—11.3μ，10.5—12.5μ和11.5—12.5μ3个气象卫星遥感仪器通道进行了处理，得到了整层大气透过率，并对所获得的结果进行了初步分析。

二、实验装置

该系统包括定天镜（主镜和副镜）、导光系统、分光计及其计算机、打印机。此外，还配有粒子计数器，温、湿、压自记仪等。

实验装置光路简图如图1所示。

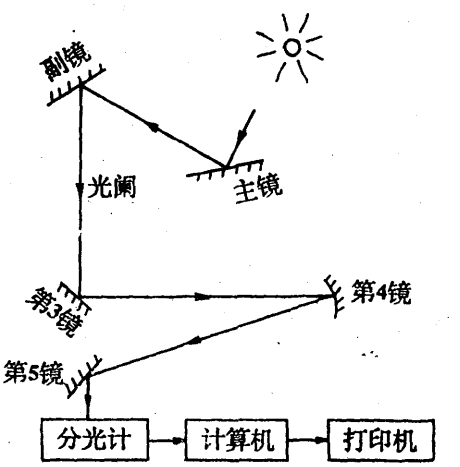


图 1　测量大气透过率的实验装置

定天镜由主镜和副镜组成，都是420mm口径的平面镜。导光系统由第3、第4、第5镜组成，其中第3镜是口径为460mm的平面镜，第4镜是口径为370mm的球面镜，第5镜是一块透可见光反射红外线的宽带滤光片，口径

* 参加本项工作的还有高二薇。

为50mm。定天镜和导光系统均由南京天文仪器厂制造；983G红外分光计及其计算机、打印机是美国珀金-埃尔默（Perkin-Elmer)公司生产，分光计波长范围为4000—180cm^{-1}，分辨率为0.5—10cm^{-1}之间共7档，最高分辨率为0.5cm^{-1}；粒子计数器是美国布尔德（Boulder）公司生产，它测的粒子直径范围为0.2—12μ及12μ以上共16档，定时自动记录；温、湿、压自记仪是长春气象仪器厂生产。

定天镜所包括的主、副镜用以跟踪太阳。主镜将太阳光反射到副镜后，穿过光阑，导入实验室内，经第3镜到第4镜（球面镜）聚焦成像到第5镜导入分光计测试，经计算机处理打印出太阳光谱的谱图及其强度。

三、数据处理

1. 整层大气透过率的确定

根据土盖-朗伯定律[1]

$$s_{m\nu}=s_{0\nu}\ e^{-\varepsilon_\nu\cdot m} \qquad (1)$$

其中，$s_{m\nu}$和$s_{0\nu}$分别为地面观测的和大气外界的单色太阳辐射强度，ε_ν为大气光学厚度，m为大气质量数。

在实验过程中，由于分光计本身的局限性，不可能直接测量出单色辐射强度，只能测出有限光谱区$\Delta\nu$的辐射强度，则

$$s_{m\Delta\nu}=s_{0\Delta\nu}\ e^{-\varepsilon_{\Delta\nu}\cdot m} \qquad (2)$$

式中，$\Delta\nu$为仪器的分辨率。

在分光计测量范围内，其测量电压值$V_{m\cdot\Delta\nu}$反映出太阳辐射传输到地面再输入到分光计的值$s_{m\Delta\nu}$的大小。

$$V_{m\cdot\Delta\nu}=c\ s_{m\Delta\nu}=c\int_{\nu_1}^{\nu_2}s_{m\nu}\sigma(\nu'-\nu)d\nu \qquad (3)$$

式中，c是与探测器灵敏度、放大增益、光学透过率等有关的常数，$\sigma(\nu'-\nu)$为仪器光谱响应函数。

在实际资料处理中，我们选择的波段$\Delta\nu'$与气象卫星遥感仪器通道一致，这个波段宽度$\Delta\nu'>\Delta\nu$，则可用数值积分中梯形求积分公式，求得$\Delta\nu'$的太阳辐射强度的电压计算值，即

$$V_{m\Delta\nu}'=\sum_{i=1}^{n}\left\{\frac{1}{2}\left[V_{m\Delta\nu}(i)+V_{m\Delta\nu}(i+1)\right]\cdot\left[\nu(i)-\nu(i+1)\right]\right\} \qquad (4)$$

式中，n为节点个数，$V_{m\Delta\nu}(c')$为第i节点的红外分光计测值。

实验期间，天空无云，大气是稳定的，即垂直方向的大气光学厚度不随时间而变化，根据公式（2）、（3）可得

$$\ln V_{m\Delta\nu}'=\ln V_{0\Delta\nu}'-\varepsilon_{\Delta\nu}'\cdot m \qquad (5)$$

只要测出不同大气质量数m时的太阳辐射强度的电压$V_{m\Delta\nu}'$，用最小二乘法对$\ln V_{m\Delta\nu}'$-m进行曲线拟合，即可求出$V_{0\Delta\nu}'$。图2为1988年9月26日的线性关系。

则大气透过率可通过下式求得

$$\tau_{\Delta\nu}=\frac{V_{m\Delta\nu}}{V_{0\Delta\nu}'} \qquad (6)$$

在实验中，可根据大气物理学和天文学理论[2]，求出大气质量数m。

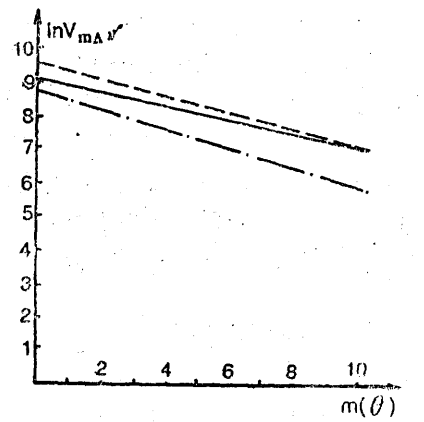


图 2 AVHRR第4通道（横坐标）、第8通道（纵坐标）辐射率值

2. 数据分析

图3为利用本实验装置测得的1300—750 cm^{-1}太阳光谱图。它与苏联过去测得的太阳光谱图的形状是一致的。

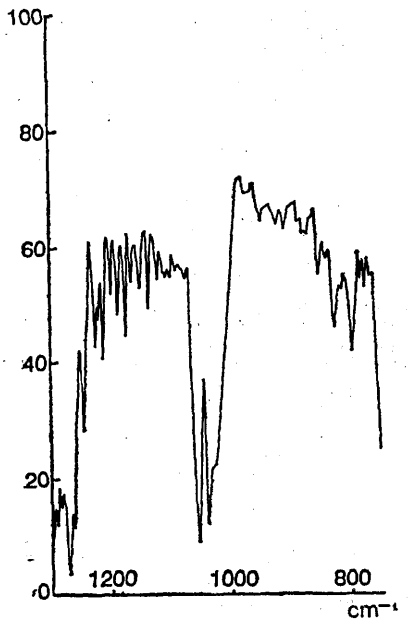


图 3 太阳光谱图

我们对10.3—11.3μ，10.5—12.5μ，11.5—12.5μ气象卫星遥感仪器通道进行实验数据处理，得到大气透射率，如表1、表2所示。表中，τ_1，τ_2，τ_3分别对应上述3个通道的透射率，θ为太阳高度角（度），m为大气质量数。透过率总的趋势与国外资料相比是相符的*。

我们在1988年共处理了15天的资料，现将1988年9月26日和11月4日两天资料进行分析如下。

（1）在同一个通道，由于每天的天气条件不同，透过率明显不同。从表3粒子计数器测定的粒子数密度可知，9月26日的粒子数密度大于11月4日的粒子数密度，因此，同一通道，在同一太阳高度角下，9月26日的透过率比11月4日的透过率要小。

* 可见光和红外辐射在大气中的透过率（第三册），大气物理研究所，1978年。

表1 大气透射率（1988年9月26日）

θ	m	τ_1	τ_2	τ_3
5.00	10.6059	0.069	0.099	0.045
10.00	5.6385	0.242	0.292	0.192
15.00	3.8279	0.382	0.434	0.326
20.00	2.9090	0.481	0.530	0.427
25.00	2.3589	0.552	0.598	0.502
30.00	1.9961	0.605	0.647	0.558
35.00	1.7413	0.645	0.684	0.601
40.00	1.5542	0.676	0.712	0.635
45.00	1.4133	0.701	0.735	0.661
50.00	1.3047	0.720	0.752	0.683
55.00	1.2204	0.736	0.766	0.700
60.00	1.1545	0.748	0.777	0.713
65.00	1.1034	0.757	0.786	0.724
70.00	1.0643	0.765	0.793	0.733
75.00	1.0354	0.771	0.798	0.739
80.00	1.0156	0.774	0.801	0.743
85.00	1.0037	0.777	0.803	0.746
90.00	1.0003	0.777	0.804	0.746

表2 大气透射率（1988年11月4日）

θ	m	τ_1	τ_2	τ_3
5.00	10.6224	0.412	0.431	0.384
10.00	5.6410	0.654	0.639	0.601
15.00	3.8288	0.726	0.738	0.708
20.00	2.9094	0.784	0.794	0.769
25.00	2.3591	0.821	0.829	0.808
30.00	1.9962	0.847	0.854	0.835
35.00	1.7411	0.865	0.871	0.855
40.00	1.5544	0.878	0.884	0.869
45.00	1.4132	0.889	0.894	0.880
50.00	1.3048	0.897	0.902	0.889
55.00	1.2203	0.903	0.908	0.896
60.00	1.1548	0.908	0.912	0.901
65.00	1.1033	0.912	0.916	0.905
70.00	1.0645	0.915	0.919	0.908
75.00	1.0353	0.917	0.921	0.911
80.00	1.0157	0.919	0.923	0.912
85.00	1.0040	0.920	0.923	0.913
90.00	1.0001	0.920	0.924	0.914

（2）由处理15天资料得到的透过率来看，在同一天的三个通道中，同一太阳高度角下，10.3—11.3μ的透过率最大，10.5—12.5μ次之，11.5—12.5μ最小。这显然是由于在1300—750cm^{-1}之间，最透明的窗口在

表3　　粒子数密度(个/m^3)

粒子直径(r) \ 时间	9月26日	11月4日
>12.0	49125	44625
9.0—12.0	67375	41958
7.0—9.0	130250	65417
5.0—7.0	318458	146792
4.0—5.0	292583	132167
3.0—4.0	427083	205042
2.0—3.0	1013729	437000
1.5—2.0	478583	0
1.2—1.5	994583	539792
1.0—1.2	828333	230375
0.8—1.0	1156524	244458
0.6—0.8	1825375	216625
0.5—0.6	28512458	2301208
0.4—0.5	6594542	4316167
0.3—0.4	151880667	24501667
0.2—0.3	136709125	65520250

$900cm^{-1}$，即11.1μ处。

四、误差分析

该实验是在晴朗天气下，测量太阳光通过整层大气消光后的辐射量，经计算，透过率的均方根误差约1%（见表4）。

表4　　透过率均方根误差

时间 \ 通道	10.3—11.3μ	10.5—12.5μ	11.5—12.5μ
9月26日	0.0048	0.0064	0.0095
11月4日	0.0105	0.0117	0.0144

误差来源主要有两部分：

(1)系统误差　主要由定天镜及导光系统各反射镜的反射率变化，仪器本身测量精度，数据处理模拟等误差造成。但是，由于我们在数据处理过程中，采用分光计在地面上的测值$V_{m\Delta\nu}'$与大气外界值$V_{0\Delta\nu}'$（由m=0时，推导出大气外界的值）之比，推导出大气透过率，因此，系统误差影响不大。

(2) 随机误差　由于定天镜主镜放置的位置及其本身跟踪精度所带来的误差。入射光与红外分光计的同轴性不好，每次观测都要进行微调，在观测过程中，由于天气等各因素在变化，也有影响。

五、结束语

经试验证明，该系统的定天镜跟踪精度较好，自动化程度较高，处理出的整层大气透过率值与国外资料相比规律是一致的。因此，用该套设备测得的整层大气透过率，对卫星气象工作有一定价值，并且是可信的。

参考文献

〔1〕 太阳辐射能,К.Я康德拉捷夫，李怀瑾等译，科学出版社，1962年。

〔2〕 气象学和气候学中辐射过程,G.W.帕尔特里奇等，吕达仁等译，科学出版社，1981年。

〔3〕 Физика атмосферы и океана, 1973, том. Ⅸ., но.1.

〔4〕 Applied Optics, Sep 1963 , Vol.2. No9.