

文章编号:1001-9014(2005)03-0203-04

风云三号(A)气象卫星红外分光计 大气透射率计算试验

漆成莉¹, 董超华¹, 张文建¹, 张凤英¹, 马刚¹, 张鹏¹, 王模昌², 王培纲²

(1. 国家卫星气象中心,北京 100081; 2. 中国科学院上海技术物理研究所,上海 200083)

摘要:利用 GENLN2 逐线光谱透射率数据库和 RTTOV7 快速辐射传输模式,计算了风云三号 A 星(FY-3A)红外分光计(IRS)的快速透射率系数,在此基础上计算了 IRS 的通道大气透射率和权重函数,结果表明 IRS 大多数通道权重函数分布曲线与 HIRS/3 相应通道趋于一致,通道能量贡献峰值高度(气压层)与设计要求基本符合。

关键词:大气科学;大气透射率;辐射传输;气象卫星;红外分光计

中图分类号:P4 **文献标识码:**A

ATMOSPHERIC TRANSMITTANCE CALCULATION OF INFRARED SPECTRAL RADIOMETER TO BE ONBOARD FY-3A METEOROLOGICAL SATELLITE

QI Cheng-Li¹, DONG Chao-Hua¹, ZHANG Wen-Jian¹, ZHANG Feng-Ying¹,
MA Gang¹, ZHANG Peng¹, WANG Mo-Chang², WANG Pei-Gang²

(1. National Satellite Meteorological Center, Beijing 100081, China;

2. Shanghai Institute of Technical Physics, CAS, Shanghai 200083, China)

Abstract: This study is concerned with the calculation of atmospheric transmittance and weighting functions of IRS based on GENLN2 spectral transmittance database and RTTOV7 fast transmittance model. The results indicate that most weighting functions of IRS are similar with that of HIRS/3. It also shows that the peak energy contribution levels satisfy the designed requirement basically.

Key words: atmospheric science; atmospheric transmittance; radiative transfer; meteorological satellite; IR spectral radiometer (IRS)

引言

为了满足数值天气预报的需要,我国第2代极轨气象卫星(风云3号系列)将装载大气垂直探测仪器-红外分光计(IRS)。它有26个光谱通道,反演技术复杂,仪器通道透射率计算是反演研究首先遇到的问题。另一方面 IRS 和 HIRS/3 的性能会有差异,需在卫星发射前做大量的模拟试验研究工作。本文计算了 IRS 光谱通道透射率和权重函数,并与 NOAA 卫星上 HIRS/3 相应的计算结果进行比较,以检验 IRS 仪器初样的性能指标。

1 IRS 和 HIRS/3 的主要技术指标

FY-3A/IRS 与 NOAA/HIRS 仪器在性能指标上类同,但 IRS 增加了6个光谱通道,主要是可见光和近红外,增强了对水汽的探测能力(表1)。

IRS 和 HIRS 均为滤光片式仪器,滤光片的物理性质决定了其对辐射的感应是波长的函数,即光谱响应函数^[1](Spectral Response Function, SRF)。为了更清晰地表示出每个通道宽度内光谱感应随波长的变化情况,光谱响应函数一般都进行了归一化。IRS 少数通道的光谱响应特征和 HIRS/3 有较大偏差。例如,通道15的中心波数右偏约 12 cm^{-1} ,

收稿日期:2004-10-21,修回日期:2005-01-24

基金项目:国防科工委民用航天预研项目(科工技20024402)

作者简介:漆成莉(1979-),女,湖南株洲人,国家卫星气象中心研究所硕士,主要从事气象卫星遥感信息研究。

Received date: 2004-10-21, revised date: 2005-01-24

表 1 红外分光计光谱通道特征

Table 1 Characteristics of IRSR sounding channels

通道 序号	中心 波数 (cm^{-1})	中心 波长 (μm)	半功率 带宽 (cm^{-1})	主要吸收 气体成份	最高 温度 (K)	NE Δ N (mW/m^2 $-\text{sr}-\text{cm}^{-1}$)	贡献 最大层 (hPa)
1	669	14.95	3	CO ₂	280	4.00	30
2	680	14.71	10	CO ₂	265	0.80	60
3	690	14.49	12	CO ₂	250	0.60	100
4	703	14.22	16	CO ₂	260	0.35	400
5	716	13.97	16	CO ₂	275	0.32	600
6	733	13.84	16	CO ₂ /H ₂ O	290	0.36	800
7	749	13.35	16	CO ₂ /H ₂ O	300	0.30	900
8	802	12.47	30	大气窗区	330	0.20	地表
9	900	11.11	35	大气窗区	330	0.15	地表
10	1030	9.71	25	O ₃	280	0.20	25
11	1345	7.43	50	H ₂ O	330	0.23	800
12	1365	7.33	40	H ₂ O	285	0.30	700
13	1533	6.52	55	H ₂ O	275	0.30	500
14	2188	4.57	23	N ₂ O	310	0.009	1000
15	2210	4.52	23	N ₂ O	290	0.004	950
16	2235	4.47	23	CO ₂ /N ₂ O	280	0.006	700
17	2245	4.45	23	CO ₂ /N ₂ O	266	0.006	400
18	2388	4.19	25	CO ₂	320	0.003	大气
19	2515	3.98	35	大气窗区	340	0.003	地表
20	2660	3.76	100	大气窗区	340	0.002	地表
21	14500	0.69	1000	大气窗区	100% A	0.10% A	云
22	11299	0.885	385	大气窗区	100% A	0.10% A	地表
23	10638	0.94	550	H ₂ O	100% A	0.10% A	地表
24	10638	0.94	200	H ₂ O	100% A	0.10% A	地表
25	8065	1.24	650	H ₂ O	100% A	0.10% A	地表
26	6098	1.64	450	H ₂ O	100% A	0.10% A	地表

HIRS/3 对应通道却左偏约 5 cm^{-1} . IRSR 所有通道的光谱响应函数都是单峰形状, 而 HIRS/3 水汽吸收通道的光谱响应函数出现了一高一低双峰现象, 通道 19 甚至有三峰现象. 这些光谱响应函数的形状对大气透射率、正演、反演结果都有潜在的影响.

2 IRSR 通道透射率及权重函数 (Weighting Function) 的计算

假设大气为局地热平衡的平面平行无散射介质, 同时忽略地球曲率的影响, 大气辐射传递方程可写成如下形式^[2]:

$$I(v, \theta) = \tau_s(v, p_s, \theta) B(v, T_s) + \int_{\ln p_s}^{\ln p_{\infty}} B(v, T(p)) \frac{\partial \tau(v, p, \theta)}{\partial \ln p} d \ln p \quad (1)$$

式(1)中 $I(v, \theta)$ 表示晴空条件下大气层顶向上的单色红外辐射率, $B(v, T(p))$ 为气压层在背景温度为 T 时的平均 Planck 函数, τ 为从气压层 p 到大气层顶的单色透射率. 由于卫星探测通道具有一定的光谱宽度, 对于卫星探测的大气层顶向上的红外辐射还需要将单色红外大气辐射与卫星探测通道的光谱响应函数作卷积处理:

$$\hat{I}(v^*, \theta) = \int_{v_1}^{v_2} I(v, \theta) f(v^* - v) dv \quad (2)$$

$$\hat{I}(v^*, \theta) = \int_{v_1}^{v_2} \tau_s(v, p_s, \theta) B(v, T_s) f(v^* - v) dv + \int_{v_1}^{v_2} \int_{\ln p_s}^{\ln p_{\infty}} B(v, T(p)) \frac{\partial \tau(v, p, \theta)}{\partial \ln p} f(v^* - v) d \ln p dv \quad (3)$$

由第二积分中值定理得到:

$$\hat{I}(v^*, \theta) = B(v^*, T_s) \tau_s(v^*, p_s, \theta) + \int_{\ln p_s}^{\ln p_{\infty}} B(v^*, T(p)) \frac{\partial \tau(v^*, p, \theta)}{\partial \ln p} d \ln p \quad (4)$$

$$B(v, T(p)) = c_1 v^3 \{ \exp[c_2 v / T(p)] - 1 \}^{-1} \quad (5)$$

定义权重函数

$$K = \frac{\partial \tau(v^*, p, \theta)}{\partial \ln p} \quad (6)$$

$\tau(v^*, p, \theta)$ 是中心波数为 v^* 的通道透射率, 下标 s 表示地面变量, $f(v^* - v)$ 为归一化通道光谱响应函数, c_1 和 c_2 为普朗克常数.

式(4)即为正演计算卫星辐射率测值公式, 首先要计算的就是通道透射率和权重函数, 可见大气透射率的计算是正演模拟的核心部分. 目前在大气遥感领域使用的透射率模式基本上有 2 类: 一类是精确模式, 特点是依次、逐条地计算气体吸收谱线的贡献, 计算精度高, 但速度慢, 如 GENLN2^[3]; 另一类是参数化模式, 特点是精确度满足使用, 且计算速度快, 如用回归方程定义光程计算系数的模式 (RTTOV^[4]、OPTRAN^[5]).

快速透射率模式需要一组有限数量的、覆盖范围广泛的大气温度和气体成分廓线和利用精确模式计算的不同等压面上单色透射率; 再利用卫星探测通道的光谱响应函数与单色透射率卷积得到等压面到大气层顶的通道透射率, 见式(7); 然后利用这组通道透射率廓线按回归方程(9)产生一组快速透射率模式的系数; 最后, 将快速模式按式(10)应用于其他廓线便可得到与其对应的大气透射率廓线.

$$\tau_{r,j} = \frac{\int \hat{\tau}_{v,j} \cdot F_r \cdot dv}{\int F_r \cdot dv} \quad (7)$$

$$y_{r,j} = - \ln \left(\frac{\tau_{r,j}}{\tau_{v,j-1}} \right) = \sigma_{v,j} - \sigma_{v,j-1} \quad (8)$$

$$\sigma_{v,j} - \sigma_{v,j-1} = \sum_{k=1}^M a_{v,j,k} \cdot X_{j,k} \quad (9)$$

$$\sigma_{\nu,j} = \sigma_{\nu,j-1} + \sum_{k=1}^M a_{\nu,j,k} \cdot X_{j,k} \quad (10)$$

这里, F_{ν} 是通道的光谱响应函数, $\hat{\tau}_{\nu,j}$ 是以波束为单位的单色透射率数据集中各个等压面到大气层顶的单色透射率, $\sigma_{\nu,j}$ 为模式相应气压层到大气层顶的通道光学厚度 ($\tau_{\nu,j} = \exp(-|\sigma_{\nu,j}|)$), $X_{j,k}$ 为依赖于大气状态廓线的预报因子, $a_{\nu,j,k}$ 为透射率计算系数. 下标 ν, j, k 分别表示中心波数为 ν 的通道、第 j 层模式气压层、第 k 个预报因子.

本文根据 IRSR 初样光谱响应函数, 利用 GENLN2 模式计算的大气透射率数据库和快速透射率模式 RTTOV7 首先计算了 IRSR 的快速透射率系数, 然后根据美国 1976 年标准大气状态廓线计算了 IRSR 的 20 个红外光谱通道 43 个气压层的大气透射率和权重函数.

3 IRSR 与 HIRS/3 通道权重函数的分析比较

图 1 和图 2^[6] 分别是美国标准大气下 IRSR 和 NOAA-16 卫星 HIRS/3 各通道的权重函数(WF)廓线. 可以看出 IRAS 各通道的 WF 曲线分布基本合

理. 前 7 个通道主要为 CO₂ 吸收谱带, IRSR 和 HIRS/3 的 WF 曲线差别不大; 随着通道的中心波数往短红外方向移动, 各通道的峰值能量贡献层也逐渐下移. 研制出的仪器滤光片性能指标不可能和设计指标完全一致, 会造成通道中心位置偏移, 其通道权重函数峰值层高度也会有偏差, 如两个仪器通道 1、2 权重函数峰值层高度比表 1 设计的都有所偏低, 实际是对应的光谱响应图 1 者通道中心位置右偏所致.

虽然两个仪器大气窗区通道的光谱响应函数相差比较大, 但对 WF 影响不大, 因为从图 2 和图 3 可知其权重函数峰值层均到达了地面. IRSR 第 10 通道(HIRS/3 第 9 通道)为 9.7 μ m 臭氧强吸收谱段, 其权重函数在 50-80 hPa 之间有一个峰值, 这是因为臭氧主要存在于平流层; 另外近地面也有一个权重函数大值区, 估计是受其它因子影响而引起的小扰动.

IRSR 第 11、12、13 三个通道位于 6.3 μ m 的强水汽吸收带, 而水汽主要分布在对流层, 因此 WF 峰值层也偏低, 但峰值高度比设计的略有抬升.

IRSR 的通道 14-17(HIRS/3 的通道 13-16)为 N₂O 和 CO₂ 的混合吸收谱带, 随着通道的中心波数

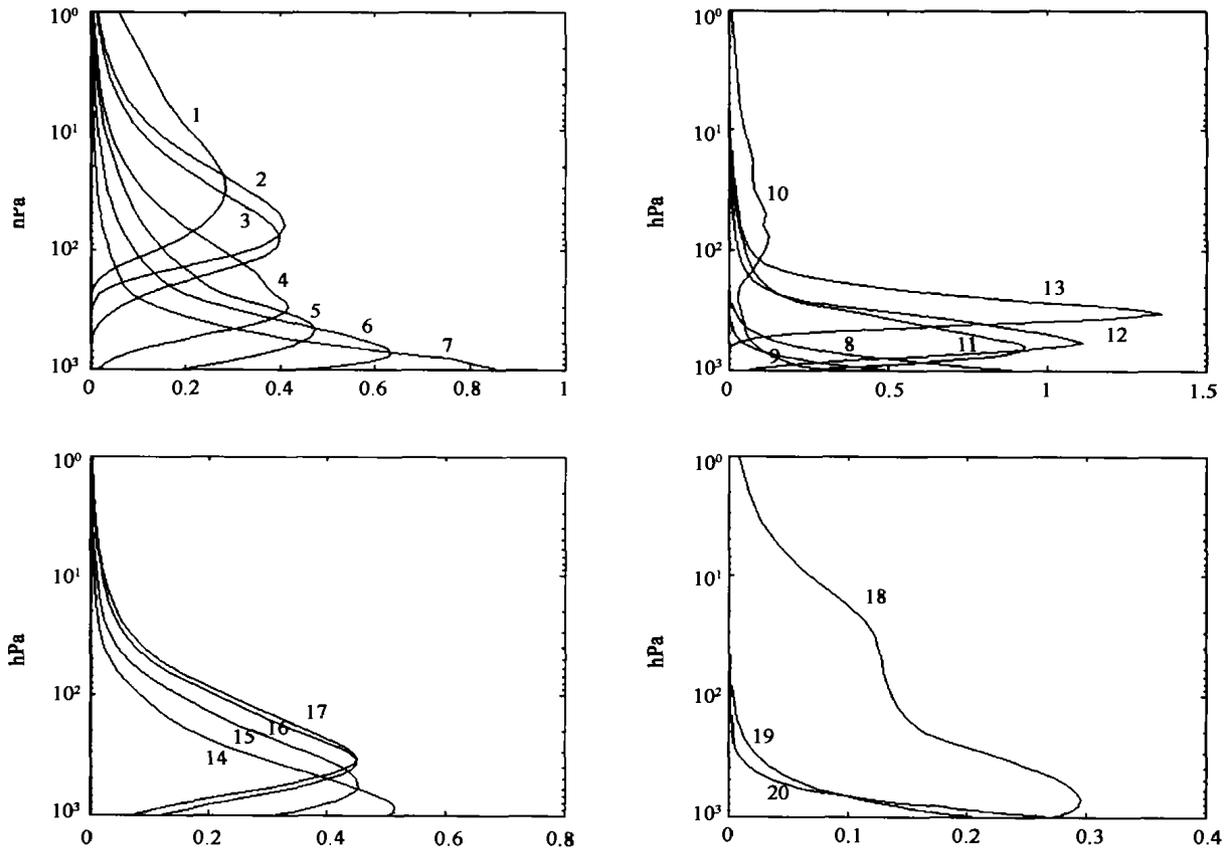


图 1 红外分光计的通道权重函数
Fig. 1 IRSR channel weighting functions

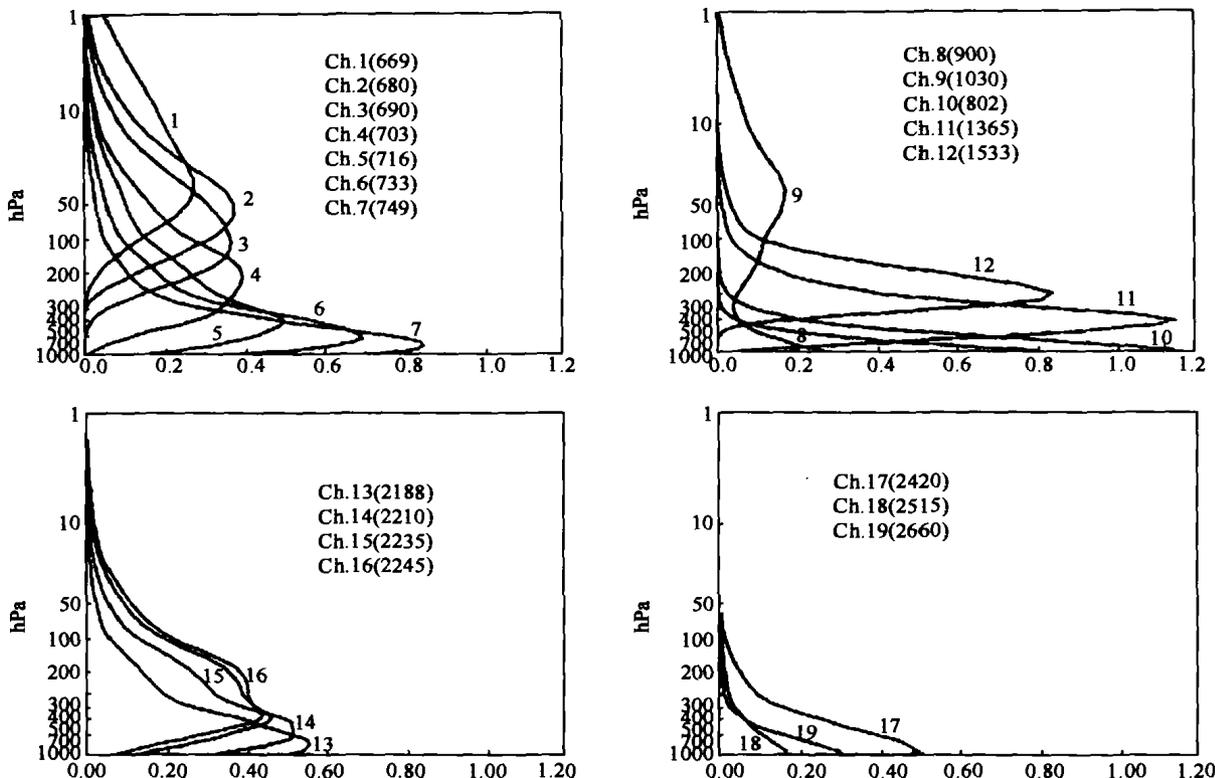


图2 HIRS/3 通道权重函数 (Jun Li, 2000)
Fig. 2 HIRS/3 channel weighting functions

往短红外方向移动,各通道的 WF 峰值能量贡献层逐渐上移.

4 结语

综上所述,利用 FY-3A 气象卫星红外分光计初样的光谱响应数据和 GENLN2 光谱透射率库计算的快速透射率系数,可用来快速精确计算红外分光计的通道透射率及权重函数. 计算结果合理,反映了大气中各个气压层的气体辐射对探测器的贡献大小,除个别通道外,仪器贡献最大气压层基本满足设计要求. 某些通道权重函数峰值高度和设计指标存在差异的原因,除与滤光片响应特性有关外,还与试验所选大气廓线和计算模式有关. 本文的研究结果可供大气参数反演研究使用^[7],也可为进一步改进仪器研制水平提供科学依据.

REFERENCES

[1] Weinreb M P, Fleming H E, McMillin L M, et al. *Transmittances for the TIROS Operational Vertical Sounder*

[R]. Washington, D. C: National Oceanic and Atmospheric Administration, 1981.

[2] DONG Chao-Hua, ZHANG Feng-Ying. Retrieve the vertical distributing of atmospheric temperature using NOAA-9 meteorological satellite measurement. [J]. *J. Infrared Res.* (董超华,张凤英. 利用 NOAA-9 气象卫星测值反演大气温度垂直分布. *红外研究*), 1988, 7A(2): 125-130.

[3] Edwards D P. *GENLN2: A general line-by-line atmospheric transmittance and radiance model* [R]. Colorado: National Center for Atmospheric Research, 1992.

[4] Matricardi M F, Chevallier, Tjemkes S. *An improved general fast radiative transfer model for the assimilation of radiance observations*[R]. Paris: ECMWF, 2001.

[5] Rayer P J. Fast transmittance model for satellite sounding [J]. *Applied Optics*, 1995, 34(31): 7387-7394.

[6] Jun Li, Wolf W, Menzel W P, et al. *International ATOVS Processing Package: The Algorithm development and its application in real data processing* [R]. Madison: University of Wisconsin-Madison, 2000.

[7] LIU Jian, DONG Chao-Hua, ZHANG Wen-Jian. Determination of the optical thickness and effective radius of water clouds by FY-1C data [J]. *J. Infrared Millim. Waves* (刘健,董超华,张文建. 利用 FY-1C 资料反演水云的光学厚度和粒子有效半径. *红外与毫米波学报*), 2003, 22(6): 436-440.