

计算 HIRS/2 通道透过率的指数和模式

金 心

尹 宏

(空军第七研究所, 北京 100085) (北京大学地球物理系, 北京 100871)

提 要

气象卫星 HIRS/2 各通道的吸收系数, 透过率及权重函数与温度廓线一样随地点与时间而变化。把石广玉提出的指数和模式加上各通道仪器响应函数的修正, 得出适合气象卫星 HIRS/2 各通道不同气体吸收系数的指数和模式, 可以较快地计算 HIRS/2 各通道不同温度廓线下的透过率与权重函数。用修正的指数和模式计算 CO_2 一些通道的透过率, 与精确的逐线积分法的计算结果相比, CO_2 通道绝对差值小于 0.0036; 水汽 1364 cm^{-1} 通道绝对差值小于 0.0035。

关键词: 透过率; 指数和模式; 响应函数的修正。

引 言

第三代气象卫星上的红外辐射探测器(HIRS/2)可测到大气和地面的信息, 一个通道测得的辐射能量 I^* 为:

$$I^* = B(T_0)\tau^*(p_0) - \int_{\Delta} B[T(p)]d\tau^*(p) \quad (1)$$

式中: p 为气压, $T(p)$ 为气温, p_0 为地面气压, $B[T(p)]$ 为通道内温度为 $T(p)$ 的黑体辐射, $\tau^*(p)$ 为通道内卫星和气压 p 之间的平均透过率, 它表示为:

$$\tau^*(p) = \frac{\int_{\Delta} \varphi(\nu)\tau(\nu, p)d\nu}{\int_{\Delta} \varphi(\nu)d\nu} \quad (2)$$

式中: $\varphi(\nu)$ 是气象卫星该通道仪器响应函数, $\tau(\nu, p)$ 是卫星和气压 p 之间波数为 ν 的大气单色透过率。用物理反演方法, 由式(1)中的卫星测值 I^* 推算大气和地表参量(温度、湿度等)就需计算式(1), (2)中该通道平均透过率 $\tau^*(p)$ 。

既快又准确地计算通道平均透过率 $\tau^*(p)$, 是一个复杂的问题。逐线积分方法太费时, 很少在实际中应用。人们更多采用的是 NESDIS 提出的一种介于精确法与近似法之间的参数化方法^[1] 或法国 Scott^[2]、日本 Aoki^[3] 提出的快速逐线积分法。我国国家卫星气象

中心也做过很多这方面的工作^[4]。

一般反演计算常忽略散射过程. 辐射能在大气中传输时,不但被大气中各种成分吸收,而且被大气中各种粒子散射,在气溶胶较多(如火山爆发、沙尘暴)或有云出现时,就不能忽略散射的影响,考虑散射影响的大气称为浑浊大气. 计算大气红外透过率的指数和模式^[3,6]可用于计算浑浊大气的辐射传输. 本文把指数和模式加上仪器响应函数的修正,用逐线积分方法求出可用于 NOAA 卫星 HIRS/2 各通道的指数和模式,可较快而准确地计算不同大气层结曲线下的透过率及权重函数,又可在浑浊大气的反演中考虑散射的影响.

1 指数和模式

一个有许多吸收线的波数区间内,吸收系数 k 随波数 ν 迅速涨落,用数值积分的方法把波数区间分为 n 段,每段取一个代表性的吸收系数 k_n ,这个波段的平均透过率 $\tau^*(u)$ 为

$$\tau^*(u) = \frac{1}{\Delta\nu} \int_{\Delta\nu} \exp(-k_n u) d\nu = \sum_{n=1}^N P_n \exp(-k_n u) \quad (3)$$

$$\sum_{n=1}^N P_n = 1 \quad (4)$$

式中, k_n 是波数 ν 处的吸收系数, u 是吸收物质质量, k_n 是第 n 段具有权重 P_n 的等效吸收系数. 区间 $\Delta\nu$ 内的辐射传输问题就被简化为 N 个单色辐射的传输问题.

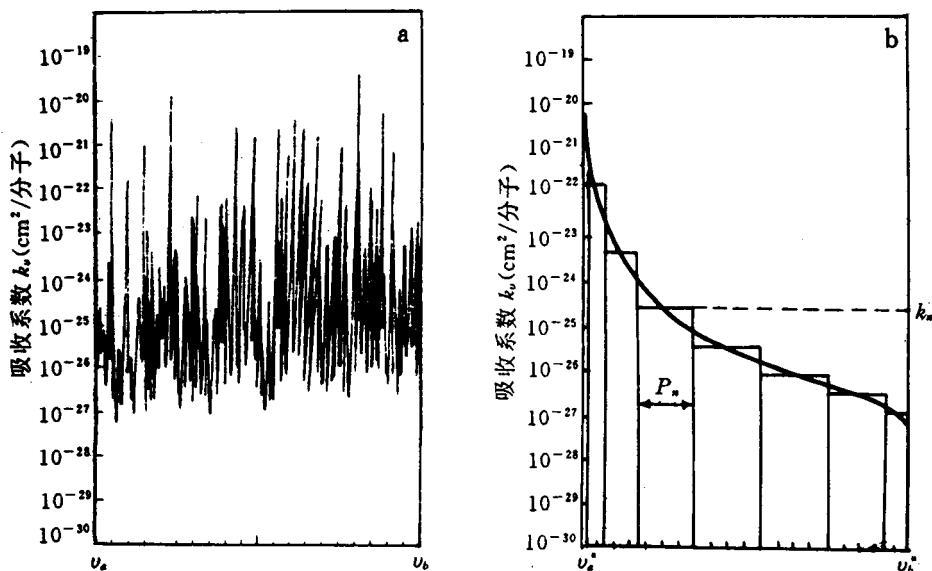


图 1 重排前后吸收系数的分布(a)吸收系数的原始分布(b)重排后吸收系数分布(引自文献[6])

Fig. 1 Distribution of absorption coefficient (a) Original distribution (b) Distribution after rearrange^[6]

1.1 石广玉提出的指数和模式

石广玉(1981)^[6]提出一种新的指数和模式(图1). 具体步骤是:

(1)由谱线参数用逐线积分法计算吸收系数 k_n .

(2)将吸收系数 k_n 按照由大到小的顺序进行重排。

(3)图 1(b)左边的吸收系数较大而斜率绝对值较大,即变化较快,代表吸收线的中心部分;其他大部分波段吸收系数较小而斜率绝对值较小,即变化较慢,代表吸收线的翼区。为了提高计算的精度,改变高斯数值积分的变量,取

$$z = \frac{(1+x)^2}{4}, \quad P_n = \Delta z = \frac{(1+x)\Delta x}{2} \quad (5)$$

这样改进的高斯求积公式可以使 k_n 变化快的波段,也就是吸收系数 k_n 大的波段,选取的样本密一些,使计算的精度提高。用改进的高斯求积公式(5)计算 $N(=9)$ 个等效吸收系数 k_n 和相应的权重 P_n 。

(4)认为等效吸收系数 k_n 与气压 p 、温度 T 的依赖关系是可分的,用式(6)计算任意气压 p 、温度 T 下的吸收系数 $k_n(p, T)$ 。

$$k_n(p, T) = k_n(p_r, T_r)F_1(p)F_2(T) \quad (6)$$

其中: p_r, T_r 是参考气压和温度, $F_1(p), F_2(T)$ 分别代表吸收系数 $k_n(p, T)$ 与气压 p 及温度 T 的依赖关系,可用参数化方法把 $F_1(p), F_2(T)$ 用解析式表达, n 是式(3)等效吸收系数的序号。用上述方法可以精确地计算各种温度廓线下非均匀大气路径的透过率函数^[7]。

1.2 仪器响应函数的考虑

要把指数和模式应用于卫星各通道大气透过率的计算,就要考虑仪器响应函数的影响。透过率的计算公式:

$$\tau = \int_{\omega} \exp(-k_n u) \varphi(\nu) d\nu = \sum_{i=1}^N \exp(-k_n u) \varphi(\nu_i) \Delta \nu_i \quad (7)$$

式(7)表示透过率是一系列矩形面积的和。每一个矩形面积等于高为 $\exp(-k_n u)$ 、底边长为 $\varphi(\nu_i) \Delta \nu_i$ 的面积。所以只要用 $\varphi(\nu_i) \Delta \nu_i$ 代替式(3)中不考虑响应函数 $\varphi(\nu_i)$ 的 p_n , 式(7)和式(3)在形式上完全一样。指数和方法的第 2 步给每个 k_n 有相同的权重,考虑响应函数 $\varphi(\nu_i)$ 只要在步骤 2 将 k_n 按照由大到小的顺序重排,改为将 k_n 以 $\varphi(\nu_i)$ 为权重并按照由大到小的顺序重排,就得到了考虑响应函数后改进的指数和方法。

大气的气压 p 、温度 T 随高度变化,计算通道内卫星和高度 p 之间的平均透过率 $\tau^*(p)$,要随辐射传输的路径把 $k_n(p, T)$ 对 du 积分

$$\tau^*(p) = \sum_{n=1}^N p_n \exp(-\int k_n(p, T) du) \quad (7)$$

1.3 几点说明

1.3.1 关于逐线积分 本文用 Scott^[2]提出的逐线积分方法,谱线参数取自美国空军地球物理实验室(AFGL)1986版的《大气吸收线参数汇编》^[8]。

1.3.2 HIRS/2 通道光谱特性 计算中所使用的仪器响应函数 $\varphi(\nu)$ 取自 NOAA-10 的数据。HIRS/2 通道的光谱特性如表 1。

表 1 HIRS/2 通道光谱特性

Table 1 Spectral characteristics of HIRS/2

通道序号	中心频率(cm^{-1})	中心波长(μm)	半功率带宽(cm^{-1})
1	668	15.0	3
3	691	14.5	12
5	716	14.0	16
11	1364	7.3	40

2 吸收系数的气压与温度依赖关系可分离性的分析

式(5)成立的前提是假设吸收系数 $k_n(p, T)$ 的变量 p, T 是可分离的, 在卫星气象的反演中对透过率计算的精度要求较高. 我们用两种方法计算 3 个卫星通道在不同大气条件下的透过率. 方法 1 认为 p, T 两变量不可分离, 方法 2 假设 p, T 两变量可分离, 取不同的参考气压 p_r , 表 2 给出两种方法计算透过率的误差.

表 2 两种方法计算透过率的误差(p_r 单位: hPa)

Table 2 Errors of transmittances for two methods (unit: hPa)

透过率误差 (通道 3)	p, T 两变量 不可分离	p, T 两变量可分离			
		$p_r=700$	$p_r=140$	$p_r=100$	$p_r=75$
最大值	0.0048	0.0381	0.0102	0.0080	0.0064
平均值	0.0010	0.0105	0.0034	0.0020	0.0008
均方根	0.0026	0.0159	0.0046	0.0036	0.0033

由表 2 可以看出不同的参考气压 p_r 对透过率的计算有较大的影响. $p_r=700\text{hPa}$ 的误差比 $p_r=75\text{hPa}$ 的误差大好几倍, 最大误差从 0.0064 增加到 0.0381, 均方差从 0.0033 增大到 0.0159. 取参考气压 p_r 在权重函数的最大值附近时误差最小. p_r 在 100hPa 附近变化时, 误差变化也不小, $p_r=75\text{hPa}$ 时误差最小(0.0064), $p_r=140\text{hPa}$ 时误差最大(0.0102), 这说明采用 p, T 两变量可分离的方法, 选取适当的参考气压 p_r 确实能减小计算误差. 按 p, T 两变量不可分离的方法 1, 计算误差最小.

根据以上分析, 严格地说, 等效吸收系数 $k_n(p, T)$ 中变量 p, T 是不可分离的, 用双重内插计算 $k_n(p, T)$ 并不复杂, 又能提高计算精度. 下面的计算均采用 p, T 不可分离, 用双重内插计算 $k_n(p, T)$.

3 指数和模式在气象卫星 HIRS/2 通道透过率计算中的应用

3.1 卫星通道指数和模式计算的步骤

(1) 求指数和模式的参数: ①由通道内及通道附近的光谱参数, 用逐线积分法计算 10 个气压(0.15, 0.75, 6.0, 22.5, 65, 125, 275, 535, 740, 975hPa)、6 个温度(220, 225, 250, 275, 296, 325K)下的吸收系数 $k(p_i, T_j)$ ($i=1\sim 10, j=1\sim 6$). ②将 $k(p_i, T_j)$ 以仪器响应函数 $\varphi(\nu)$ 为权重, 并按照由大到小的顺序进行重排. ③用式(5)即改进的高斯求积公式计算各高斯节点的 $k_n(p_i, T_j)$ 及权重 P_n .

表3 热带大气透射率指数和模式计算值与逐线积分计算值的差值

Table 3 The differences of transmittances between ESFT and line-by-line calculations for tropical atmosphere

气压 (hPa)	通道 1		通道 3		通道 5		通道 11	
	透过率	差值	透过率	差值	透过率	差值	透过率	差值
0.2	0.9682	0.0000	0.9966	-0.0001	0.9986	-0.001		
0.5	0.9360	0.0004	0.9924	0.0001	0.9961	0.0000		
1.0	0.8906	-0.0004	0.9863	0.0001	0.9935	0.0002		
1.5	0.8505	-0.0004	0.9808	-0.0001	0.9917	0.0001		
2.0	0.8149	-0.0004	0.9757	-0.0002	0.9900	0.0001		
3.0	0.7558	-0.0003	0.9659	-0.0001	0.9870	0.0000		
4.0	0.7102	-0.0005	0.9567	-0.0002	0.9842	-0.0001		
5.0	0.6740	-0.0005	0.9477	-0.0003	0.9814	-0.0001		
7.0	0.6191	0.0000	0.9304	-0.0004	0.9761	0.0001		
10.0	0.5567	0.0001	0.9056	-0.0003	0.9686	0.0002		
15.0	0.4746	-0.0003	0.8661	0.0000	0.9570	0.0000		
20.0	0.4081	-0.0001	0.8282	0.0000	0.9463	-0.0001		
25.0	0.3521	0.0004	0.7917	0.0001	0.9364	-0.0001		
30.0	0.3042	0.0004	0.7566	0.0003	0.9271	0.0000		
50.0	0.1695	0.0001	0.6285	0.0006	0.8948	0.0002		
60.0	0.1252	-0.0012	0.5725	0.0011	0.8817	0.002		
70.0	0.0918	-0.0012	0.5214	0.0015	0.8700	0.0002		
85.0	0.0565	-0.0010	0.4530	0.0020	0.8545	0.0004		
100.0	0.0342	-0.0007	0.3939	0.0022	0.8404	0.0009		
115.0	0.0206	-0.0006	0.3416	0.0019	0.8260	0.0012	0.9983	-0.0002
135.0	0.0104	-0.0001	0.2804	0.0019	0.8048	0.0015	0.9962	-0.0001
150.0	0.0063	-0.0001	0.2407	0.0016	0.7875	0.0014	0.9946	-0.0001
200.0	0.0011	0.0000	0.1420	0.0004	0.7244	0.0001	0.9868	0.0001
250.0	0.0002	0.0000	0.0820	-0.0002	0.6554	-0.0006	0.9602	0.0005
300.0	0.0000	0.0000	0.0466	0.0001	0.5855	-0.0001	0.9059	-0.0016
350.0			0.0262	-0.0001	0.6170	-0.0005	0.8235	-0.0006
400.0			0.0147	-0.0001	0.4527	-0.0012	0.7209	-0.0026
430.0			0.0104	0.0001	0.4163	-0.0012	0.6524	-0.0021
475.0			0.0064	-0.0001	0.3653	-0.0013	0.5463	-0.0011
500.0			0.0049	0.0001	0.3388	-0.0012	0.4873	-0.0012
570.0			0.0025	0.0001	0.2732	-0.0014	0.3296	-0.0015
620.0			0.0016	0.0001	0.2328	-0.0018	0.2375	-0.0025
670.0			0.0011	0.0001	0.1975	-0.0019	0.1617	-0.0004
700.0			0.0009	0.0001	0.1784	-0.0015	0.1204	-0.0035
780.0			0.0005	0.0001	0.1360	0.0009	0.0455	-0.0023
850.0					0.1073	-0.0008	0.0157	-0.0008
920.0					0.0842	-0.0006	0.0049	-0.0004
950.0					0.0759	-0.0008	0.0028	-0.0004
1000.0					0.0634	-0.0003	0.0010	-0.0003

(2) 用指数和模式计算透射率:①利用10个气压 p_i 、6个温度 T_j 格点下的 $k_n(p_i, T_j)$ 双重内插求出实测气压和温度下的 $k_n(p, T)$ 值。②用公式(8)计算各种层结下的平均透射率 $\tau^*(p)$,并用差商公式计算权重函数 $d\tau^*(p)/d(\log p)$ 。

3.2 CO₂和H₂O通道透射率的计算

用上述卫星通道指数和模式计算HIRS/2中的通道1,3,5,11在不同大气条件下的透射率,并与逐线积分的计算结果比较,结果见表3、表4。其中热带大气,亚北极夏季大气

的温湿廓线取自 McClatchey^[9], 温度廓线 19 取自 McMillin^[10].

表 4 不同大气条件下指数和模式与逐线积分计算透过率的最大差值

Table 4 The maximum differences of transmittances between ESFT and line by-line calculations in various conditions of atmosphere

大气廓线	通道 1	通道 3	通道 5	通道 11
热带大气	0.0012	0.0022	0.0019	0.0035
亚北极夏季	0.0012	0.0015	0.0013	0.0028
温度廓线 19	0.0030	0.0036	0.0023	
最大误差	0.0030	0.0036	0.0023	0.0035

4 结 论

(1) 计算表明, 计算吸收系数 $k(p, T)$, 用变量 p, T 不可分离的方案差值最小, 若选取适当的参考气压 p_r , 用变量 p, T 可以分离的方案, 也能达到一定的精度.

(2) 用指数和模式可以快速计算不同温度廓线下卫星通道的透过率与权重函数.

(3) 不同温度廓线下 HIRS/2 中 CO_2 在 $668, 691, 716 \text{ cm}^{-1}$ 通道的透过率, 指数和模式计算与精确的逐线积分相比绝对差值小于 0.0036 ; 水汽在 1364 cm^{-1} 通道的透过率, 指数和模式计算与精确的逐线积分相比绝对差值小于 0.0035 .

参 考 文 献

- 1 国家气象局卫星气象中心. 区域性极轨气象卫星资料定量处理及其软件系统. 1986.
- 2 Scott N A and Chedin A. A fast line-by-line method for atmospheric absorption computations; The automatized atmospheric absorption atlas. *J. Appl. Meteor.*, 1981, **20**:802~812.
- 3 Aoki T. Development of a line-by-line model for the infrared radiative transfer in the earth's atmosphere. *Papers in Meteorology and Geophysics*. 1988, **39**:53~58.
- 4 刘全华, 董超华, 黎光清. CO_2 大气透过率的统计算法. *大气科学*, 1989, **13**:228~237.
- 5 Arking A and Grossman K. The influence of line shape and band structure on temperature in planetary atmosphere. *J. Atmos. Sci.*, 1972, **29**:937~949.
- 6 Shi G Y. An accurate calculation and representation of the infrared transmission functions of atmospheric gas constituents. D. thesis, Dept. of science, Tohoko Uni. of Japan, 1981, p191.
- 7 尹宏, 韩志刚. 气溶胶大气对太阳辐射的吸收. *气象学报*, 1989, **47**:118~123.
- 8 Rothman L S, Gamache R R, Goldman A, et al. The HITRAN database, 1986 edition. *Appl. Opt.*, 1987, **26**:4058~4097.
- 9 McClatchey R A, Fenn R W, Selby J E A, et al. Optical properties of the atmosphere. Handbook of Optics, Section 14, McGraw-Hill, 1978.
- 10 McMillin L M and Fleming H E. Atmospheric transmittance of an absorbing gas; a computationally fast and accurate transmittance model for absorbing gases with constant mixing ratios in inhomogeneous atmospheres. *Appl. Opt.*, 1976, **15**:358~363.

CALCULATION OF HIRS/2 CHANNEL TRANSMITTANCES BY THE EXPONENTIAL SUM FITTING OF TRANSMISSION MODEL

Jin Xin

(Aviation Meteorological Research Institute, Beijing 100085)

Yin Hong

(Department of Geophysics, Peking University, Beijing 100871)

Abstract

The absorption coefficient, transmittance and weighting function of the channels of HIRS/2 depend on the temperature profile which varies with the location and/or time in turn. An improved ESFT (the Exponential Sum Fitting of Transmission) model suitable for calculating the HIRS/2 channel transmittance has been obtained by adding the instrument weighting function to the ESFT model proposed by Shi Guang-Yu. With this new ESFT model, the variations of transmittance and weighting function with the temperature can be calculated efficiently. Comparing with the exact line-by-line calculations, the results obtained show that the maximum absolute error in transmittance for CO₂ channels is smaller than 0.0036, and that for the H₂O channel is smaller than 0.0035.

Key words: Transmittance; ESFT model; Modification of the response function.