

提高“ k 分布法”计算遥感通道透过率精度的方法

尹宏

(北京大学物理学院大气科学系,北京 100871)

摘 要

卫星测量地面或云面反射的氧气 $0.76 \mu\text{m}$ 吸收带一些通道的太阳辐亮度,可遥测洋面或地面气压场及云顶气压。由于洋面或地面气压相对变化约 10^{-3} 量级,用“ k 分布法”计算氧气通道透过率要求较高的精度和速度。提高“ k 分布法”计算精度的途径是:①减少产生误差的简化计算;②增加截点数,特别是波段内吸收线较多、吸收系数变化较复杂的通道。假设在卫星上用干涉光谱仪测量氧气 $0.76 \mu\text{m}$ 吸收带一些通道的带宽均为 1 cm^{-1} ,在 $12930 \sim 13220 \text{ cm}^{-1}$ 范围内,选 190 个波段,计算不同温度廓线下通道的平均透过率。大部分通道“ k 分布法”的截点数 $N \leq 20$,个别通道氧气吸收线较多,吸收系数变化较复杂,为了使“ k 分布法”通道平均透过率的计算误差小于 10^{-4} ,需增加通道内截点数 N , N 最多为 136,与逐线计算结果相比,通道垂直透过率的最大均方差小于 3×10^{-5} 。计算透过率的速度和精度都满足反演计算的要求。

关键词: 氧气 $0.76 \mu\text{m}$ 通道 透过率 k 分布法

引 言

由于氧气在空气中有固定容积百分比,用卫星测量氧气 $0.76 \mu\text{m}$ 吸收带一些通道地面反射太阳辐射的辐亮度,可遥测反演地面气压场及云顶气压^[1]。业务气象卫星将使用高级甚高分辨率的干涉光谱仪,卫星通道将更窄,取得更多通道的辐射信息。

假设干涉光谱仪卫星遥感通道带宽为 1 cm^{-1} 。氧气 $0.76 \mu\text{m}$ 吸收带分布在 $12847.1941 \text{ cm}^{-1}$ ($0.77949 \mu\text{m}$) 至 $13165.2576 \text{ cm}^{-1}$ ($0.75957 \mu\text{m}$) 范围内。在 $12930 \sim 13220 \text{ cm}^{-1}$ 的 290 cm^{-1} 范围内,选 190 个波段,大部分波段在氧气吸收带内,作为对比,有 11 个波段在氧气吸收带以外。由气象卫星各通道所测辐亮度物理反演气象要素,必须快速而高精度地计算各通道的透过率。逐线计算(LBL)法计算卫星通道的透过率精度较高,但计算量过大,只能作为其他简捷计算方法计算误差的标准,在卫星资料业务物理反演系统中还无法实用。

为了探索适于业务物理反演计算方法,Clough 等^[2]提出用 FASCOD 软件计算通道透过率。NESDIS 业务反演系统使用的是 Mc Minllin 等^[3]建立的透过率统计模式,即计算一些标准温度廓线下透过率与气压的关系,实际大气温度廓线与标准大气温度廓线有差别,卫星通道透过率也和标准大气有差别,用统计方法得出通道透过率差别 ΔT 与温度差别 ΔT 的统计关系,可以快捷地计算透过率。刘全华等^[4]改进了 Mc Minllin 等人的

统计算法,减少了 CO_2 通道透过率的计算误差。金心等^[5]用 k 分布法计算 CO_2 通道透过率,透过率的最大误差小于 0.0035。

由于洋面或地面气压的相对变化约 10^{-3} 量级,预研气压的物理反演,要求计算氧气通道透过率的误差小于万分之一。本文计算透过率的速度和精度都满足反演计算的要求。

1 卫星通道透过率的逐线计算

在响应函数没有实测数据前,假设响应函数为抛物线,响应函数在通道中心 u 最大,离中心 0.5 cm^{-1} 处响应函数是中心的一半,在响应函数大于零的范围内,即离中心波数 $u \pm 0.5 \sqrt{2} \text{ cm}^{-1}$ 以内,响应函数 $y(u)$ 与波数 v 的方程为

$$y(u) = 1 - 2(v - u)^2 \quad (1)$$

在一定高度以上,需要同时考虑 Lorentz 与 Doppler 加宽效应,即混合加宽。混合加宽的吸收系数公式为:

$$k_\nu = \frac{S(T)}{a_D \sqrt{\pi}} F(x, y) = \frac{yS(T)}{a_D \sqrt{\pi^3}} \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{\exp(-t^2) dt}{y^2 + (x - t)^2} \quad (2)$$

式(2)中, k_ν 是吸收系数,吸收线强度 $S(T)$ 是温度 T 的函数,取参数 $x = (v - u)/a_D$, $y = a_L/a_D$, a_L 是 Lorentz 半宽度, a_D 是 Doppler 谱线宽度,有几种计算程序可数值计算式(2)中的函数 $F(x, y)$ ^[6-7]。

由于加宽效应,每条吸收线在每个波数都会按混合加宽的式(2)对吸收系数产生或多或少的贡献,为了精确计算通道 Δv 内的平均透过率 $\tau(\Delta v)$,把所有吸收线对吸收系数产生的贡献累加,就是总的吸收系数,这种计算方法称为逐线算法。通道 Δv 内平均透过率为:

$$\tau(\Delta v) = \frac{\int_{\Delta v} \exp(-k_\nu U) y(u) d\nu}{\int_{\Delta v} y(u) d\nu} \approx \frac{\sum_N \exp(-k_\nu U) y(u) \Delta v}{\sum_N y(u) \Delta v} \quad (3)$$

式(3)中, U 是辐射传输路程上吸收气体的数量, $y(u)$ 是通道的响应函数。

2 逐线计算数值积分步长的选择

用式(3)计算通道内的平均透过率,步长 Δv 过小,计算量过大;步长过大,平均透过率的精度不足。步长是否合适,要看对应波数一个步长的变化,吸收系数 k 的变化是否在适当的范围内,即数值积分时,吸收系数 k 的变化是否有足够详细的描写。

对流层吸收线主要是 Lorentz 加宽,按 Lorentz 加宽公式,在 $v = u \pm a_L$ 处, $k = S/(2\pi a_L)$, $k'(dk/d\nu)$ 有极大值 $k'_{\max} = S/(2\pi a_L^2)$,乘步长 Δv 就是一个步长吸收系数的变化的极大值 Δk_{\max} ,吸收系数 k 在一个步长的相对变化为 $\Delta k_{\max}/k = \Delta v/a_L$,取 ε 是一个规定范围的数,若 $\Delta k_{\max}/k = \Delta v/a_L < \varepsilon$,即步长 $\Delta v < \varepsilon a_L$,就算满足吸收系数 k 在一个步

长的相对变化 $\Delta k_{\max}/k$ 是在适当的范围 ε 内。

对流层顶以上要考虑 Doppler 加宽, 在 $\nu = \nu_0 \pm a_D$ 处, $k = S/(e a_D \sqrt{\pi})$, $k'(d k/d \nu)$ 有极大值 $k'_{\max} = 2 S/(e a_D^2 \sqrt{\pi})$, 步长 $\Delta \nu$ 就是一个步长吸收系数变化的极大 Δk_{\max} , 吸收系数 k 在一个步长的相对变化 $\Delta k_{\max}/k = 2 \Delta \nu/a_D$, 步长 $\Delta \nu < \varepsilon a_D/2$, 就算满足吸收系数 k 的变化是在适当的范围内。

离 ν_0 越远, 吸收系数越小, 所以吸收系数 k 的相对变化 $\Delta k/k$ 的极大值所在的波数比 $\nu_0 \pm a_L$ 或 $\nu_0 \pm a_D$ 离吸收线中心 ν_0 更远。以中心在 13099 cm^{-1} 的通道为例, 通道范围为 $13098.2929 \sim 13099.7071 \text{ cm}^{-1}$, 有两条氧气吸收线, 中心在 $13098.83735 \text{ cm}^{-1}$ 的吸收线在温度 $T = 296 \text{ K}$ 时, 强度 $S = 8.476 \times 10^{-24} (\text{cm}^2/\text{mol})$, 是氧气吸收带内最强的吸收线之一。若通道均分为 30000 段, 步长 $= 1.4141/30000 \approx 4.7 \times 10^{-5} \text{ cm}^{-1}$, 按混合加宽计算 30000 段吸收系数的相对变化 $\Delta k/k$, 不同高度极大值 $(\Delta k/k)_{\max}$ 计算结果见表 1。

表 1 各高度 $a_L, a_D, (\Delta k/k)_{\max}, \Delta k$ 及 ν 的数值

p/hPa	T/K	a_L	a_D	$(\Delta k/k)_{\max}$	Δk	ν/cm^{-1}
0.001	187.6	0.77×10^{-7}	0.0136	0.0229	0.603×10^{-28}	13098.8848
0.1	231.6	0.66×10^{-5}	0.0152	0.0161	0.262×10^{-26}	13098.8797
10	227.7	0.00067	0.0150	0.0093	0.123×10^{-24}	13098.8662
100	216.7	0.0069	0.0147	0.0043	0.257×10^{-24}	13098.8618
1073	291.6	0.0603	0.0170	0.00077	0.159×10^{-25}	13098.9036

表 1 中, Δk 与 ν/cm^{-1} 分别是 $(\Delta k/k)_{\max}$ 处一个步长的吸收系数变化及波数。由表 1 可看出: 气压很低处如 0.001 hPa , a_L 小, 吸收系数 k 的最大相对变化 $(\Delta k/k)_{\max} = 0.0229$, 小于 2.5%, 当气压 $p \geq 10 \text{ hPa}$ 时, $(\Delta k/k)_{\max} < 1\%$ 。当步长 $\Delta \nu$ 变小, $(\Delta k/k)_{\max}$ 大致按比例减小。可以认为: 把通道范围 1.4141 cm^{-1} 等分为 30000 段, 即取步长 $\Delta \nu \approx 4.7 \times 10^{-5} \text{ cm}^{-1}$ 可以保证足够的精度。

3 计算透过率吸收线上、下限的选择

为了取得较好的计算精度, 在通道 $\Delta \nu = 1.4141 \text{ cm}^{-1}$ 范围内, 等间隔取 30000 个波数计算透过率, 由于逐线计算法要计算几百条吸收线在 30000 个波数吸收系数的和, 再按式 (3) 计算平均透过率。

计算一个通道 $\Delta \nu$ 内吸收系数 k 的分布, 波段外的吸收线对波段内的吸收系数 k 也有影响。吸收线强度 S 越小, 离该通道越远, 影响越小, 参与计算的吸收线多些, 可提高精确度, 但增加计算量。取选择标准为 ε , 如接近通道 $\Delta \nu$ 的若干条吸收线在波段边缘对吸收系数的贡献为 k_1 , 离通道 $\Delta \nu$ 较远的吸收线贡献若小于 εk_1 , 则此吸收线可忽略不计。以中心在 13099 cm^{-1} 的通道为例, 通道 $\Delta \nu (13098.2929 \sim 13099.7071 \text{ cm}^{-1})$ 内有两条吸收线, 这两条吸收线在通道边缘 $13098.2929 \text{ cm}^{-1}$ 及 $13099.7071 \text{ cm}^{-1}$ 处, 对吸收系数的贡献分别为 $k_1 = 5.4481 \times 10^{-25} \text{ cm}^2$ 及 $k_2 = 2.162 \times 10^{-25} \text{ cm}^2$, 吸收线中心波数小于 $13098.2929 \text{ cm}^{-1}$, 在 $13098.2929 \text{ cm}^{-1}$ 处对吸收系数 k 贡献小于 εk_1 , 吸收线中心波数大

于 $13099.7071 \text{ cm}^{-1}$, 在 $13099.7071 \text{ cm}^{-1}$ 处对吸收系数 k 贡献小于 εk_2 , 取 ε 分别等于 $10^{-8}, 10^{-7}, 10^{-6}$, 应入选的吸收线数目见表 2。

由表 2 可知, 选择 $\varepsilon=10^{-7}$ 比 $\varepsilon=10^{-6}$ 要多选 41 条吸收线, 计算量的增加不大。所以在逐线计算前按 $\varepsilon=10^{-7}$, 先计算各波段入选吸收线的上下限。

表 2 不同 ε 入选参加计算吸收系数的波数范围 cm^{-1}

ε	下限	上限	入选吸收线数
10^{-6}	13021.2899	13165.2577	193
10^{-7}	12988.7306	14456.0489	234
10^{-8}	12965.1252	14456.0489	486

4 Hitran 86 与 Hitran 2000 的比较——FASCOD2 的评价

Hitran database 是美国空军地球物理实验室 (AFGL) 公布的气体吸收线参数资料, 在 1982, 1986, 1991, 1996 年和 2000 年各出一个版本, 过去常用 FASCOD2 程序^[8] 计算大气透过率, 其说明书注明, FASCOD2 1.0 版公布于 1988 年 7 月 7 日, 2.0 版公布于 1989 年 12 月 16 日, FASCOD2 OS/2.1 版公布于 1989 年 6 月 10 日。由此推断 FASCOD2 所用的是 1986 年以前的 Hitran 版本。最新的 Hitran 2000 与 Hitran 86 相比, 以中心在 $13140 \sim 13145 \text{ cm}^{-1}$ 范围内吸收线 (共 7 条) 为例, $T = 296 \text{ K}$ 时, 线强 S (cm/mol) 有显著差别。

表 3 表明, Hitran 数据从 1986 年到 2000 年变化 10% 以上, 用 Hitran 86 的数据得出的软件 FASCOD2 计算氧气在 $0.76 \mu\text{m}$ 透过率将产生显著的误差。

表 3 Hitran 86 与 Hitran 2000 线强 S 的比较

2000 线强 S_{2k}	86 线强 S_{86}	$(S_{86} - S_{2k})/S_{2k}$
7.370×10^{-24}	6.43×10^{-24}	- 0.128
1.635×10^{-26}	1.45×10^{-26}	- 0.113
1.421×10^{-26}	1.26×10^{-26}	- 0.113
8.833×10^{-24}	7.71×10^{-24}	- 0.127
1.461×10^{-26}	1.30×10^{-26}	- 0.110
1.695×10^{-26}	1.51×10^{-26}	- 0.109
7.468×10^{-24}	6.52×10^{-24}	- 0.127

5 吸收系数随气压、温度变化的模拟

张华等^① 计算 22 个压力和 3 个温度下的吸收系数, 用指数多项式模拟吸收系数与温度的关系。22 个压力分别是 0.01, 0.0158, 0.0215, 0.0464, 0.1, 0.158, 0.215, 0.464, 1, 2.15, 4.64, 10, 21.5, 46.4, 100, 220, 460, 700, 1013.25 hPa; 3 个温度分别是 200, 260, 320 K。其表达式为

$$k = k(T_0) \left(\frac{T}{T_0}\right)^{(a+bT)} \quad (4)$$

由于外推比内插产生较大的误差, 大气下层吸收气体密度较大, 吸收系数的误差引起计算透过率的误差也大。海平面气压有时大于 1013.25 hPa, 张华等所取的最大气压 1013.25 hPa 的数值偏小。只用 3 个温度得出的式(4) 表示吸收系数随温度的变化, 难以保证较优的精度。所以本研究取 41 个气压、不同气压(高度) 按常见温度变化各取 8 个温

① 张华, 石广玉. 两种逐线积分辐射模式大气吸收的比较研究. 大气科学, 待发表。

度作为该气压的温度格点。41 个气压数值为 :0.049,0.149,0.348,0.749,1.251,1.751,2.503,3.502,4.502,6.005,8.505,12.51,17.50,22.50,27.50,40.03,55.0,77.5,92.5,107.5,125.0,142.5,175.0,224.9,274.9,324.9,374.9,415.0,452.4,487.5,534.9,594.9,644.9,685.0,739.9,814.9,884.9,935.0,1080 hPa。各气压取不同的 8 个温度,第一个温度 T_1 比此高度最低温度还低,第八个温度 T_8 比此高度最高温度还高,如地面的最高和最低温度分别为 210 K 及 330 K,对流层顶(226 hPa)的最高和最低温度分别为 196 K 及 260 K,平流层顶(1 hPa)的最高和最低温度分别为 211 K 及 319 K。在 T_1, T_8 之间大致等间隔取 6 个温度 T_2, \dots, T_7 。按上述气压、温度格点事先计算 41×8 组吸收系数,使用时按温度、气压双重样条内插,以提高计算不同温度气压条件下吸收系数的精度。

6 吸收线混合加宽计算的简化

在主频为 1.8 GHz 的 Pentium 4 计算机上,计算 Lorentz 公式需 1.5×10^{-7} s,计算混合加宽公式(2)需 4.4×10^{-7} s,计算时间为计算 Lorentz 公式的 2.93 倍。如计算精度要求不高,当式(2)中 a_L 比 a_D 大很多,即 $y > 3.2$ 时,可以忽略 Doppler 加宽效应,用较简单的 Lorentz 公式计算吸收系数。

由于用氧气吸收波段遥测气压分布要求通道平均透过率精度在万分之一以内,为考察 Lorentz 公式计算的精度,对不同 x, y 条件下按 Lorentz 公式及混合加宽公式(2)计算两者吸收系数比 k_L/k_m ,结果见表 4。误差大于万分之一的下加横线。

表 4 不同 x, y 条件下, k_L/k_m 的数值

x	y					
	3	5	70	80	90	100
3	<u>0.975423</u>	<u>0.999775</u>	<u>1.000101</u>	1.000078	1.000061	1.000050
30	<u>0.998373</u>	<u>0.998438</u>	1.000033	1.000035	1.000033	1.000031
100	<u>0.999850</u>	<u>0.999851</u>	0.999943	0.999956	0.999967	0.999975
200	0.999962	0.999963	0.999971	0.999974	0.999976	0.999978
500	0.999994	0.999994	0.999994	0.999994	0.999994	0.999995
1000	0.999998	0.999998	0.999998	0.999998	0.999999	0.999999
2500	1.000000	1.000000	1.000000	1.000000	1.000000	1.000000

注:下加横线者为误差大于万分之一。

由表 4 可知,若要求计算误差小于万分之一,用简化的 Lorentz 公式代替计算量较大的混合加宽公式(2),条件 $y > 3.2$ 是不够的,需提高到 $y > 80$ 或 $x > 200$,才能保证透过率精度在万分之一以内。目前计算机的速度加快,使大量使用混合加宽公式(2)计算吸收系数成为可行。

由于波数离吸收线中心越远,吸收线对吸收系数的贡献越小,所以一般计算中采取在 x 超过一定数值(如 1000)时,就忽略此吸收线对吸收系数的影响,以节省计算时间,称为线翼截断。目前计算机的速度加快, Lorentz 公式的每次计算时间为 1.5×10^{-7} s,不进行或减少线翼截断可提高计算精度,增加的计算量是计算机能承担的。

7 Gauss 数值积分的改进

为了较快地计算通道平均透过率,1981年石广玉^[9]提出,将 Gauss 数值积分法用于 k 分布法,取 N 为截点数,为了把 0 和 1 作为积分上下限,石广玉采取式(5)的变换后, t 的上下限为 0 和 1。 Δt 代表各分段的权重,其和为 1。

$$\int_{-1}^{+1} f(x) dx \approx \sum_{i=1}^N f(x_i) \Delta x_i \quad (5)$$

$$t = \left| \frac{1+x}{2} \right|^2, \quad \Delta t = \frac{(1+x)\Delta x}{2} \quad (6)$$

$$\bar{\tau}(\Delta \nu) = \sum_{i=1}^N \Delta t_i \exp \left| \sum_{j=1}^L [k_{ij}(\bar{T}_j, \bar{p}_j) \Delta U_j] \right| \quad (7)$$

在 41×8 个压强和温度组合下,等间隔计算 30000 个波数的吸收系数 k_ν 值。以响应函数为权重,按大小在通道 $\Delta \nu$ 内从大到小重新排列,使 k_ν 成为单调下降的函数,求 $N=6$ 及 $N=14$ 的 Gauss 截点 k_ν 值,得出各通道的吸收系数 k 分布数组 $H(N, 41, 8)$, N 为截点数,41 是压强个数,8 是温度个数。

在任意压、温廓线下,已知气压、温度,可由数组 $H(N, 41, 8)$ 用双重样条内插计算 N 个截点的吸收系数 k_i 值。式(7)中, i 是 k 分布各子分段标号, j 是大气分层高度标号, ΔU_j 是某层单位截面氧分子数。用式(7)可计算通道平均透过率。在标准大气温度廓线下,将 k 分布法与逐线计算法得出各高度的平均透过率相比,求出均方差。

为了缩小 k 分布法的误差,变化式(6)的指数 r ,不同的指数 r , k 分布法的均方差不同。以 13022 cm^{-1} 为中心的通道为例,将式(6)改为

$$t = \left(\frac{1+x}{2} \right)^r, \quad \Delta t = \frac{r(1+x)^{r-1} \Delta x}{2^r} \quad (8)$$

不同的 r 和 N 时的均方差见表 5。由表 5 知,选用 $N=14$, $r=4.3$,均方差为 6.26×10^{-6} ,误差数值较小。对含有 $S > 10^{-26}$ (cm^2/mol) 强线的通道,用式(8)变换,以 12990 cm^{-1} 通道为例,表 6 取 $N=6$ 和 $N=14$ 均方差都较大。

表 5 13022 cm^{-1} 通道不同变换指数 r 及截点数 N 时的均方差 ($\times 10^{-8}$)

N	r								
	1.5	2	2.5	3	3.5	4	4.3	4.6	5.3
14	10614	3144	1104	864	972	826	626	1200	937
6	88456	39892	28359	20232	28002	19705	23264	29502	26371

表 6 12990 cm^{-1} 通道不同变换指数 r 及截点数 N 时的均方差 ($\times 10^{-8}$)

N	r					
	1.2	2	2.8	3.6	4.4	5.2
14	6303	2484	2693	1179	5357	5384
6	117505	37912	41894	55529	65601	88356

石广玉用 k 分布法处理的波段较宽(约 100 cm^{-1}),波段内吸收线多达几百条,计算

的步长也较大,吸收系数重排的结果,吸收系数最大的区域吸收系数随波数变化最快(图 1 中 A 线)。为了使 Gauss 数值积分的分段在变化较快处分段更细一些,所以采用式(6)表示的变换。

氧气吸收带的通道波段较窄(1 cm^{-1}),波段内吸收线较少(多数 0~2 条,最多 20 条),计算的步长较小,吸收系数按大小重排后,吸收系数的相对变化 $dk/(kd\nu)$ 在离吸收线中心 Lorentz 或 Doppler 宽度以外有极大值,即吸收系数 k 不是在 k 最大的区域变化最快,而是在离吸收线中心 Lorentz 或 Doppler 宽度以外变化最快,图 1 中 B 线是中心波数为 13033 cm^{-1} 的通道,气压为 375 hPa,温度为 235 K,通道均分 30000 段,计算所得吸收系数按大小重排后的分布实况,B 线左方吸收系数极大处,代表吸收线中心附近,曲线斜率并不是最大。

为了减小 k 分布法的误差,在吸收系数相对变化 $dk/(kd\nu)$ 极大附近把 k 分布分为两段,分别用 $N=6$ 和 $N=14$ 的式(7)进行变换,使 $dk/(kd\nu)$ 极大附近, Gauss 数值积分的分段更细一些,分 20 段的 k 分布计算平均透过率均方差更小,以 12990 cm^{-1} 通道为例,表 6 取 $N=6$ 和 $N=14$ 均方差都较大,改为三参数, $N=20$,均方差显著缩小。

取三参数, Q 是百分数分界点,大致在吸收系数相对变化 $dk/(kd\nu)$ 极大值附近, r_2 是吸收系数较大一侧 $N=6$ 的指数, r_1 是吸收系数较小一侧 $N=14$ 的指数,反复调整 Q, r_2 及 r_1 的数值,由表 7 可见, $Q=0.945$, $r_1=1.92, r_2=1.5$ 这一组,均方差 $=1.34 \times 10^{-6}$ 最小(小于万分之一)。

有的通道内吸收线较多,吸收系数随波数变化较复杂,需把通道分更多段,分段用 k 分布模拟,截点数 >20 ,才能使平均透过率的均方差小于万分之一。如 13163 cm^{-1} 通道内有 16 条吸收线,取 $N=20$ 时,均方差为 0.00093257,仍大于 0.0009,把通道分 10 段,分段用 k 分布法模拟,共取 114 个截点,均方差为 0.0000148,缩小 63 倍,小于 0.0001。

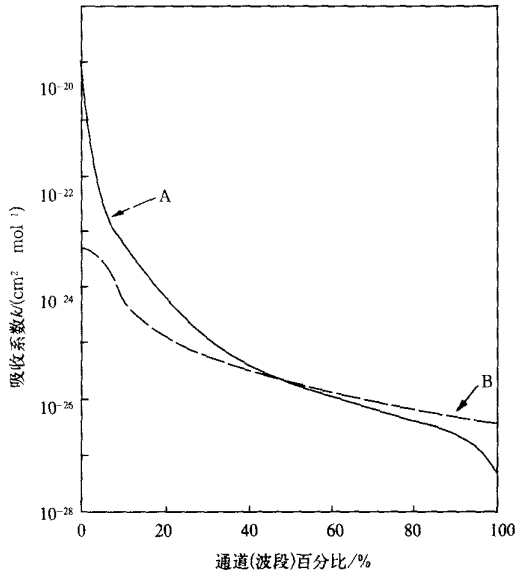


图 1 吸收系数按大小重排的图像 (A 线为石广玉计算值^[9], B 线为本文计算值)

表 7 12990 cm^{-1} 通道 $N=20$ 时不同分界点 Q 及变换指数 r_1 与 r_2 的均方差 ($\times 10^{-8}$)

Q	r_1	r_2	均方差
0.953	2.30	1.90	429
0.975	1.90	1.50	645
0.941	1.90	1.60	557
0.949	2.00	1.90	403
0.960	1.60	1.50	189
0.945	1.92	1.50	134

8 结 论

模拟计算了190个通道,在主频为1.8 GHz的 Pentium4 计算机上,用改进的 k 分布法计算41个高度到大气顶的通道平均透过率:截点数 $N=6$ 的有52个通道,计算机用时0.0095 s;截点数 $N=14$ 的有53个通道,用时0.0175 s;截点数 $N=20$ 的有59个通道,用时0.023 s; $N=6, 14, 20$ 的通道共165个,占190个通道的86.8%,其余25个通道,截点数 N 分别是28,34,42,48,54,60,62,82,88,108,114,120及136,其中 $N=48$,用时0.048 s; $N=136$,用时0.128 s。与逐线算法相比,通道透过率的均方差都小于 3×10^{-5} 。逐线算法计算通道透过率所需计算机时间与通道内吸收线的数量有关,所需时间为79至162 s。 k 分布法比逐线算法快得多。在逐线计算基础上设计的改进的 k 分布法,计算透过率的速度和精度都满足反演计算的要求。

参 考 文 献

- 1 Barton I J, Scott J C. Remote measurement of surface pressure using the oxygen A-band of absorption. *Appl Optics*, 1986, **25**(19):3502~3507.
- 2 Clough S A, Kneizy F X, Rothman L S, et al. Atmospheric Spectral Transmittance and Radiance: FASCOD1 B. Proceedings of SPIE, 1981, **277**:152~166.
- 3 Mc Minlin L M, Fleming H E. Atmospheric transmittance of an absorbing gas: A computationally fast and accurate transmittance model for absorbing gases with constant mixing ratio in inhomogeneous atmospheres. *Appl Opt*, 1976, **15**(2):358~363.
- 4 刘全华,董超华,黎光清. CO₂大气透过率的统计算法.大气科学,1989, **13**(2):228~237.
- 5 金心,尹宏.计算 HIRS/2 通道透过率的指数和模式.应用气象学报,1996, **7**(1):96~102.
- 6 Dayson S R. Rapid computation of Voigt profile, *J Quan Spec Rad Tran*, 1976, **16**(7):611~614.
- 7 Schreier F. The Voigt and complex error function: a comparison of computational methods, *J Quan Spec Rad Tran*, 1992, **48**(5-6):743~762.
- 8 Ridgway W L, Moose R A, Cogley A C. Atmospheric Transmittance/ Radiance: Computer Code FASCOD2. 1988, AFGL-TR-82-0392.
- 9 石广玉. 大气辐射计算的吸收系数分布模式. 大气科学, 1998, **22**(4):659~676.

IMPROVEMENT OF k -DISTRIBUTION PRECISION FOR CALCULATING THE TRANSMISSION OF SATELLITE REMOTE SENSING CHANNEL

Yin Hong

(*Department of Atmospheric Science, Peking University, Beijing 100871*)

Abstract

The absorption band of oxygen at $0.76 \mu\text{m}$ may be used for satellite remote sensing pressure of ocean, earth and cloud surface. The relative variation of pressure is about 10^{-3} , so the precision of vertical transmission calculated by k -distribution method must be less than 10^{-3} . According to the increase of computer velocity, the way to increase the precision of vertical transmission calculated by k -distribution method includes: (1) decreasing the simplify calculating processes, (2) when the variation of absorption coefficient is complicated in the channel, increasing the number of sectional points. The extreme number of sectional points is 136, the extreme standard error of vertical transmission calculated by k -distribution method is less than 3×10^{-5} .

Key words: The oxygen channels at $0.76 \mu\text{m}$ Transmission k -distribution method