

微波波段氧分子吸收系数的简化公式*

赵柏林 刘 雯 唐承贤

(北京大学地球物理系)

研究氧分子在微波 5 mm 附近的吸收系数,对于卫星和地面微波遥感大气温度,有重要的意义。为了迅速而准确地遥感大气温度层结,需要有一个简单而精确的吸收系数表达式。我们分别求出:在一定温度、压力范围内,5mm 波段氧分子吸收系数近似表达式及标准等压面上 5 mm 波段氧分子吸收系数与温度关系的近似表达式。以这些公式取代 Meeks-Lilley 公式,来提高遥感的时效。

1. 5mm 波段氧分子吸收系数的简化公式

大气在 5 mm 波段的辐射带是以氧分子吸收为主体构成的,此波段常用来遥感大气温度层结,由辐射传输方程可知,在遥感温度时,必须准确地知道各个气压下各种温度的氧分子吸收系数。由于在微波区内,由于氧分子转动能级的跃迁,产生 46 根共振吸收线,并且随着气压的不同谱线产生不同程度的加宽,因此氧分子的吸收系数的计算变成十分复杂的问题。1945 年 Van Vleck 及 Weisskopf^[1,2]及 1955 年 Gross^[3]分别提出分子碰撞谱线形状因子的表达式。1963 年 Meeks 及 Lilley^[4]用半经典、半量子理论得到了氧分子吸收公式,1968 年 Carter 等^[5,6]在大气中实际测量,并用实测资料优选谱线参数。这就是当前遥感中常用的公式,但此公式复杂而要占用很多计算时间。近年来,遥感用于天气预报之中,特别是临近天气预报要争取速度,不少人开始研究吸收系数的近似公式,例如,1977 年 Poon^[7]提出在吸收区内,可用幂律形式 $A = K_s \left(\frac{p}{p_s}\right)^x \left(\frac{T}{T_s}\right)^y$, 来近似表达,其中 K_s, x, y 均为频率的函数。但此近似公式与 Meeks-Lilley 公式相比,其均方根误差达 8%。显然这个精度对于遥感大气温度是不够的。总之,为了满足于临近天气预报的需要,减少运算时间,这就要有新的简单而准确的 5 mm 波段氧分子吸收系数,供遥感大气温度使用。

1) 原理

在微波遥感大气温度时,选择氧气作为吸收物质。由氧分子辐射强度,反演大气温度层结。在微波波段氧分子有 46 根吸收线,其中 1 根在 2.53mm 波段,另外 45 根均在 4 mm—6 mm 波段之内。由这 46 根共振线组成了 5 mm 波段氧分子吸收带。1963 年 Meeks-Lilley 提出和 1968 年 Carter 等验证的氧分子吸收系数 α_{O_2} 为

$$\alpha_{O_2} = CPT^{-3} \nu^2 \sum_N S_N \exp\left(-\frac{E_N}{kT}\right) \text{ dB/km} \quad (1)$$
$$N = 1, 3, \dots, 45$$

其中 $C = 2.6742$, P 为气压(mmHg), T 为温度(K), ν 为频率(GHz), k 为波尔兹曼常数, E_N 为能级。

$$\frac{E_N}{kT} = 2.06844 \frac{N(N+1)}{T}$$

S_N 是氧分子跃迁下的平均偶极矩的矩阵元量。

$$S_N = |\mu_{N+}|^2 F_{N+} + |\mu_{N-}|^2 F_{N-} + |\mu_{N0}|^2 F_0$$

* 本文于 1987 年 1 月 19 日收到, 1987 年 7 月 27 日收到修改稿。

而

$$|\mu_{N+}|^2 = \frac{N(2N+3)}{(N+1)}$$

$$|\mu_{N-}|^2 = \frac{(N+1)(2N-1)}{N}$$

$$|\mu_{N_0}|^2 = \frac{2(N^2+N+1)(2N+1)}{N(N+1)}$$

$|\mu_{N+}|^2, |\mu_{N-}|^2, |\mu_{N_0}|^2$ 是氧分子偶极矩矩阵元量的模。 F_{N+}, F_{N-}, F_0 是谱线形状因子, 即

$$F_{N+} = \frac{\Delta\nu}{[(\nu_{N+}-\nu)^2 + \Delta\nu^2]} + \frac{\Delta\nu}{[(\nu_{N+}+\nu)^2 + \Delta\nu^2]}$$

$$F_{N-} = \frac{\Delta\nu}{[(\nu_{N-}-\nu)^2 + \Delta\nu^2]} + \frac{\Delta\nu}{[(\nu_{N-}+\nu)^2 + \Delta\nu^2]}$$

$$F_0 = \frac{\Delta\nu}{(\nu^2 + \Delta\nu^2)}$$

$\Delta\nu$ 是谱线的半宽度, ν_{N+}, ν_{N-} 是共振线频率。(其频率见附表 1)。谱线半宽度 $\Delta\nu$ 为

$$\Delta\nu = g^*(p) \left(\frac{p}{p_0} \right) \left(\frac{T_0}{T} \right)$$

其中 $p_0 = 1013.25 \text{ hPa}$, $T_0 = 300 \text{ K}$, p 为气压(hPa), T 为温度(K)

$$g^*(p) = \begin{cases} 0.64 \text{ GHz} & p \geq 333 \text{ hPa} \\ 0.64 + 0.717 \frac{333-p}{333-25} & 25 < p < 333 \text{ hPa} \\ 1.357 \text{ GHz} & p \leq 25 \text{ hPa} \end{cases}$$

此公式可用于 40 km 以下的大气层之中。

大气遥感的辐射传输方程^[8-11]

$$T_s = T_\infty e^{-\int_0^\infty \alpha \sec\theta dz} + \int_0^\infty T \alpha \sec\theta e^{-\int_0^z \alpha \sec\theta dz} dz \quad (2)$$

其中 T_s 是地面测量的亮度温度, T_∞ 是背景辐射温度 ($\sim 2.7 \text{ K}$), T 为温度, α 为吸收系数。它是氧分子吸收系数和水汽吸收系数之和。

用扫频法或扫角法测量亮度温度, 用方程(2)反演出大气温度层结。经常使用的频率为 $\nu = 52.8 - 52.9 \text{ GHz}$ 和 $\nu = 54.4 - 54.5 \text{ GHz}$, 用扫角法测量反演大气温度。前者遥感 10 km 以下, 后者遥感 3 km 以下的大气温度层结。

2) 简化公式的方法

氧分子吸收系数, 随着压力、温度、频率而变。我们将它表达为 $\alpha_{O_2} = T^x p^y f(T, p)$ 的型式。

a. 温度范围 取高温区和低温区两个区域。按平均大气减温率 $\gamma = 0.0065^\circ\text{C}/\text{m} \approx 0.05^\circ\text{C}/\text{hPa}$ 。在 1000 hPa 时, 高温区中心温度为 290 K, 变化范围为 265—315 K, 在低温区中心温度为 250 K, 变化范围为 225—275 K。取中心温度 T_0 随高度变化为 $T_0 = T_0^* + \frac{p}{20} \text{ K}$, 低温区 $T_0^* = 200 \text{ K}$, 高温区 $T_0^* = 240 \text{ K}$, p 为气压(hPa), 温度变化范围为 50 K, 见图 1。

b. 气压参数 分两种类型:

i 固定等压面上氧分子吸收系数: 从地面到高空分成许多等压面。统计回归等压面上不同温度下氧分子的吸收系数。等压面气压为 1040, 1020, 1000, 970, 930, 900, 850, 800, 700, 600, 500, 400, 300, 200 hPa 其公式为

$$\alpha_{O_2} = T^c \exp[C_1(T - T_0)^2 + C_2] \quad (3)$$

其中 C_0, C_1, C_2 为参数, 随气压和频率而变。它随气压的变化见图 2—4 中所示及附录 3。

ii 不同气压不同温度下的氧分子吸收系数

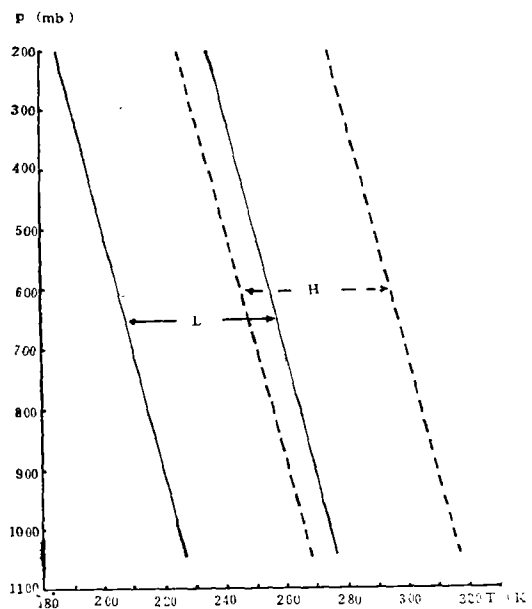


图 1 温度范围
(L: 低温区, H: 高温区)

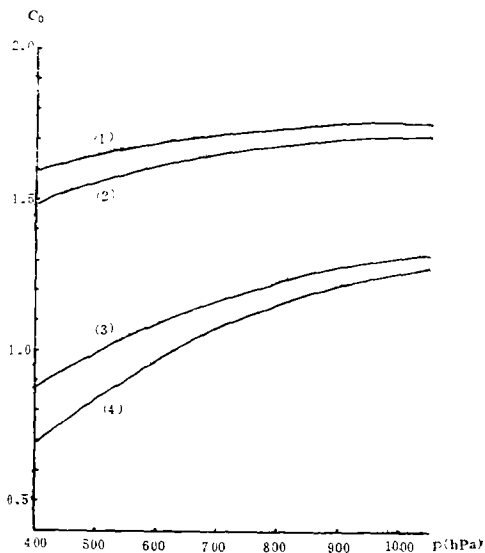


图 2 C_0 随气压的变化
(1: 52.8 GHz 低温区, 2: 52.9 GHz 低温区,
3: 52.8 GHz 高温区, 4: 52.9 GHz 高温区)

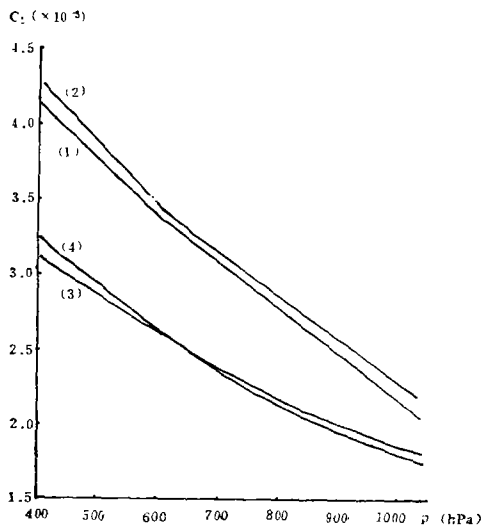


图 3 C_1 随气压的变化
(1: 52.8 GHz 低温区, 2: 52.9 GHz 低温区,
3: 52.8 GHz 高温区, 4: 52.9 GHz 高温区)

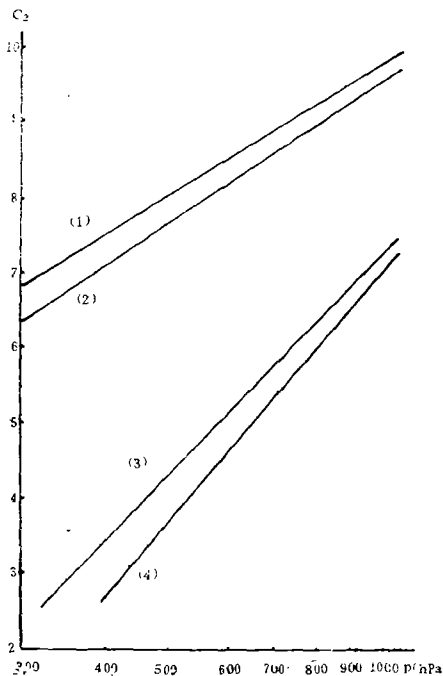


图 4 C_2 随气压的变化
(1: 52.8 GHz 低温区, 2: 52.9 GHz 低温区,
3: 52.8 GHz 高温区, 4: 52.9 GHz 高温区)

$$\alpha_{O_2} = T^{a+b} p^{c+d} \exp \left[(\gamma p + S) \left(T - T_0 - \frac{p}{20} \right)^2 + K(p - p_0)^2 + C_1 \right] \quad (4)$$

其中 $a, b, c, d, \gamma, S, K, C_1, p_0$ 随频率而变, 见附录 2。

公式(3)、(4)是独立统计得到的, 其特性见表 1—2。

表 1 不同气压、不同温度下氧分子的吸收系数

频 率 (GHz)	公 式**	适 用 范 围	最大误差	速度比*
52.8 52.9	$\alpha_{O_2} = T^{a+b} p^{c+d} \exp \left[(\gamma p + S) \left(T - T_0 - \frac{p}{20} \right)^2 + K(p - p_0)^2 + C_1 \right]$	$400 \text{ hPa} \leq p \leq 1040 \text{ hPa}$	5%	15
54.4 54.5	同 上	$650 \text{ hPa} \leq p \leq 1040 \text{ hPa}$	5%	15

* 速度比是指在微机上用上述公式计算吸收系数所需的时间与(1)式(Meeks-Lilley公式)计算吸收系数所需时间比值的倒数。

** 系数 $a, b, c, d, \gamma, s, K, c_1, p_0$ 随频率而变, 见附录。

表 2 固定等压面上氧分子的吸收系数

频 率 (GHz)	公 式**	适 用 范 围	最大误差	速度比*
52.8 52.9	$\alpha_{O_2} = T^{a_0} \exp [C_1 (T - T_0)^2 + C_2]$	任何气压	$8 \cdot 10^{-4}$	40
54.4 54.5	同 上	同 上	同 上	同 上

* 速度比是指在微机上用上述公式计算吸收系数所需的时间。

** 系数 $a, b, c, d, \gamma, s, K, c_1, p_0$ 随频率而变, 见附录。

3) 讨论

a. L. Poon(1977)建议以幂指数形式表示氧分子吸收系数 $\alpha_{O_2} = CT^y p^z$, 频率在两条谱线之间的谷区, 则 $0 < y < 2$, y 比较大接近于 2。在谱线的吸收中心处, $y \rightarrow 0$ 。我们选择的频率 $\nu = 52.8 \text{ GHz}, 52.9 \text{ GHz}, 54.4 \text{ GHz}$ 和 54.5 GHz 均在吸收线间的谷区, 因此 $y \approx 2$ 。从(4)式有 $\frac{d \ln \alpha_{O_2}}{d \ln p} \approx 2$, 所得结果与 L. Poon 一致, 但 L. Poon 公式用于低空大气误差太大, 不适于遥感之需。

b. 如用吸收系数 $\alpha_{O_2} = C' T^{y'} p^{z'}$ 的形式, 在 $52.8 \text{ GHz}, 52.9 \text{ GHz}, 54.4 \text{ GHz}$ 和 54.5 GHz 频率时, 计算误差最大达到 15%。这也说明了吸收区内吸收系数与气压和温度关系的复杂性。

c. 尽管氧分子吸收系数在吸收区内,它与温度、压力的关系十分复杂,但我们仍可用(3)式或(4)式来近似取代(1)式,它的精度符合于遥感的要求,其计算速度可提高15—40倍。

2. 微波窗区氧分子吸收系数的简化公式

1) 简化公式

通常使用的波段有9.37 GHz, 19.4 GHz, 22.235 GHz, 35.3 GHz和90 GHz。氧分子吸收系数以(1)式(Meeks-Lilley公式)为标准,进行回归得到简化公式为

$$\alpha_{\text{O}_2} = C' T^{\nu' p + S'} p^{d'} \text{ dB/km} \quad (5)$$

其中 $\nu' = 7 \times 10^{-8}$, $S' = -2.97$, $d' = 1.97$ 。 p 为气压(hPa), T 为温度(K), C' 随频率而变,见表3,它适于 $340 \leq p \leq 1050$ hPa 的高低温度区范围。

表3 系数 C' 随频率的变化

频率 (GHz)	9.37	19.4	22.235	35.3	90
C'	0.2004	0.2444	0.2695	0.5985	1.8885
最大相对误差(%)	<1.5	<1.5	<1.5	<1.5	<1.5

2) 讨论

在微波窗区波段氧分子吸收公式的简化型式有

a. 第一种近似型式^[12],在波长 $\lambda = 0.8 - 3$ cm 范围内表达为

$$\alpha_{\text{O}_2} = C_\lambda p^2 T^{-2.8} \quad (6)$$

其中 p 为气压(mmHg, 1mmHg=1.333Pa), T 是温度(K), C_λ 是系数, $\lambda = 0.8, 1.0, 2.0, 3.0$ cm 时, $C_\lambda = 0.662, 0.328, 0.131, 0.108$ 。(6)式求得氧分子吸收系数与(1)式(Meeks-Lilley公式)结果相比,两者相差 >10%,其精度是不高的。

b. 第二种近似型式^[13],当频率 $\nu < 45$ GHz 时,略去 $\nu_0 = 118.7503$ GHz 共振线的影响,并且 $N < 39$, 有下面公式

$$\alpha_{\text{O}_2} = 1.1 \times 10^{-2} \nu^2 \left(\frac{p}{1013} \right) \left(\frac{300}{T} \right)^2 \Delta \nu \left[\frac{1}{(\nu - 60)^2 + \Delta \nu^2} + \frac{1}{(\nu + 60)^2 + \Delta \nu^2} \right]$$

其中

$$\Delta \nu = \Delta \nu_0 \left(\frac{p}{1013} \right) \left(\frac{300}{T} \right)^{0.85} \text{ GHz}$$

$$\Delta \nu_0 = \begin{cases} 0.59 & p \geq 333 \text{ hPa} \\ 0.59 [1 + 3.1 \times 10^{-3} (333 - p)] & 25 \leq p \leq 333 \text{ hPa} \\ 1.18 & p \leq 25 \text{ hPa} \end{cases}$$

p 为气压(hPa), T 为温度(K), ν 为频率(GHz)。此式所得到的吸收系数小于公式(1)(Meeks-Lilley公式)的结果,它的精度也不高。

c. 利用本文所给的(5)式计算微波窗区氧分子吸收系数和(1)式(Meeks-Lilley公式)结果相比,其相差 <1.5%。而计算速度(5)式比(1)式提高40倍。

大气遥感中经常使用迭代反演法,就要反复地计算氧分子吸收系数,占用了大量的计算时间。我们建议用(3)~(5)式,它不但具有较高的精度,又可大幅度地提高速度。为临近天气预报节省了时间。

附录 1 微波波段氧分子的共振线频率

N	ν_{N+} (GHz)	ν_{N-} (GHz)
1	56.2648	118.7505
3	58.4466	62.4883
5	59.5910	60.9061
7	60.4348	59.1642
9	61.1506	58.3239
11	61.8002	57.6125
13	62.4112	56.9682
15	62.9980	56.3634
17	63.5685	55.7839
19	64.1272	55.2214
21	64.6779	54.6728
23	65.2240	54.1294
25	65.7626	53.5960
27	66.2978	53.0695
29	66.8313	52.5458
31	67.3627	52.0259
33	67.8923	51.5091
35	68.4205	50.9949
37	68.9478	50.4830
39	69.4741	49.9730
41	70.0000	49.4648
43	70.5249	48.9582
45	71.0497	48.4530

附录 2 $\alpha_{0_2} = T^{a_0 s^2 + b_0 p + c_0} p^d \exp \left[(\gamma p + s) \left(T - T_0^* - \frac{p}{20} \right)^2 - K(p - p_0)^2 + c_3 \right]$ dB/km

(T: K, p: hPa)中的系数

(1) 高温范围 $T_0^* = 240K, \Delta T = 50K$

频率 (GHz)	a	b	c	d	γ	s	K	c_3	p_0
52.8	5.93×10^{-7}	-1.53×10^{-5}	-0.368	4.23	-2×10^{-8}	3.4×10^{-5}	-1.44×10^{-6}	-21.843	812
52.9	5.93×10^{-7}	-1.53×10^{-5}	-0.368	4.21	-2×10^{-8}	3.4×10^{-5}	-1.44×10^{-6}	-21.645	812
54.4	2.42×10^{-7}	-1.1×10^{-5}	-0.185	4.40	-7.2×10^{-10}	6.7×10^{-6}	1.0×10^{-6}	-23.568	765
54.5	2.42×10^{-7}	-1.1×10^{-5}	-0.185	4.35	-7.2×10^{-10}	6.7×10^{-6}	1.0×10^{-6}	-23.160	765

(2) 低温范围 $T_0^* = 200K, \Delta T = 50K$

频率 (GHz)	a	b	c	d	γ	s	K	c_3	p_0
52.8	3.7×10^{-7}	-7.68×10^{-4}	-1.358	2.71	-3.2×10^{-8}	5.4×10^{-5}	-1.32×10^{-6}	-8.774	720
52.9	3.7×10^{-7}	-7.68×10^{-4}	-1.358	2.68	-3.2×10^{-8}	5.4×10^{-5}	-1.32×10^{-6}	-8.515	720
54.4	6.98×10^{-7}	-1.8×10^{-3}	-0.140	4.35	-1.3×10^{-8}	2.7×10^{-5}	-1.8×10^{-6}	-22.006	815
54.5	6.98×10^{-7}	-1.8×10^{-3}	-0.140	4.30	-1.3×10^{-8}	2.7×10^{-5}	-1.8×10^{-6}	-21.584	815

附录3 $\alpha_{O_2} = T^{c_0} \exp[c_1(T - T_0)^2 + c_2]$ dB/km (T, K, p, hPa) 中的系数(1) 低温范围 $T_0 = 200 + \frac{p}{20}$ K $\Delta T = 50$ K

a. 52.8 GHz

$p(\text{hPa})$	C_0	C_1	C_2	T_0	温度适用范围 ΔT	最大相对误差
1040	-1.75733	2.08×10^{-5}	9.9258	252	227—277	3×10^{-4}
1020	-1.75621	2.14×10^{-5}	9.8853	251	226—276	3×10^{-4}
1000	-1.75497	2.20×10^{-5}	9.8433	250	225—275	3×10^{-4}
970	-1.75260	2.30×10^{-5}	9.7761	248.5	223—273	3×10^{-4}
930	-1.74931	2.41×10^{-5}	9.6830	246.5	222—272	3×10^{-4}
900	-1.74614	2.50×10^{-5}	9.6070	245	220—270	3×10^{-4}
850	-1.74020	2.65×10^{-5}	9.4718	242.5	217—267	3×10^{-4}
800	-1.73299	2.80×10^{-5}	9.3231	240	215—265	3×10^{-4}
700	-1.71457	3.10×10^{-5}	8.9804	235	210—260	3×10^{-4}
600	-1.68826	3.40×10^{-5}	8.5558	230	205—255	3.5×10^{-4}
500	-1.65154	3.80×10^{-5}	8.0211	225	200—250	5×10^{-4}
400	-1.60208	4.15×10^{-5}	7.3402	220	195—245	4.5×10^{-4}

b. 52.9 GHz

$p(\text{hPa})$	C_0	C_1	C_2	T_0	温度适用范围 ΔT	最大相对误差
1040	-1.71268	2.20×10^{-5}	9.7332	252	227—277	2.5×10^{-4}
1020	-1.71090	2.25×10^{-5}	9.6804	251	226—276	2.6×10^{-4}
1000	-1.70896	2.30×10^{-5}	9.6441	250	225—275	2.6×10^{-4}
970	-1.70550	2.38×10^{-5}	9.5715	248.5	223—273	2.6×10^{-4}
930	-1.70064	2.50×10^{-5}	9.4705	246.5	222—272	2.8×10^{-4}
900	-1.69618	2.57×10^{-5}	9.3881	245	220—270	2.7×10^{-4}
850	-1.68787	2.71×10^{-5}	9.2410	242.5	217—267	2.7×10^{-4}
800	-1.67793	2.84×10^{-5}	9.0786	240	215—265	2.7×10^{-4}
700	-1.65251	3.12×10^{-5}	8.7005	235	210—260	2.7×10^{-4}
600	-1.61567	3.42×10^{-5}	8.2218	230	205—255	3.7×10^{-4}
500	-1.56142	4.00×10^{-5}	7.5964	225	200—250	3.7×10^{-4}
400	-1.47985	4.66×10^{-5}	6.7491	220	195—245	4.6×10^{-4}

c. 54.4 GHz

$p(\text{hPa})$	C_0	C_1	C_2	T_0	温度适用范围 ΔT	最大相对误差
1040	-1.28527	1.36×10^{-5}	8.2887	252	227—277	3.4×10^{-4}
1020	-1.27673	1.40×10^{-5}	8.2145	251	226—276	3.4×10^{-4}
1000	-1.26786	1.43×10^{-5}	8.1380	250	225—275	3.5×10^{-4}
970	-1.25346	1.48×10^{-5}	8.0160	248.5	223—273	3.4×10^{-4}
930	-1.23354	1.54×10^{-5}	7.8473	246.5	222—272	3.6×10^{-4}
900	-1.21706	1.55×10^{-5}	7.7105	245	220—270	3.6×10^{-4}
850	-1.18770	1.70×10^{-5}	7.4683	242.5	217—267	3.7×10^{-4}
800	-1.15527	1.72×10^{-5}	7.2044	240	215—265	3.7×10^{-4}
700	-1.08102	1.85×10^{-5}	6.6070	235	210—260	4.3×10^{-4}
600	-0.99086	1.98×10^{-5}	5.8924	230	205—255	4.9×10^{-4}
500	-0.88356	2.03×10^{-5}	5.0424	225	200—250	5.8×10^{-4}

d. 54.5GHz

$p(\text{hPa})$	C_0	C_1	C_2	T_0	温度适用范围 ΔT	最大相对误差
1040	-1.2786	1.30×10^{-5}	8.3167	252	227-277	3.3×10^{-4}
1020	-1.2698	1.35×10^{-5}	8.2147	251	226-276	3.3×10^{-4}
1000	-1.2606	1.36×10^{-5}	8.1639	250	225-275	3.3×10^{-4}
970	-1.2457	1.40×10^{-5}	8.0401	248.5	223-273	3.3×10^{-4}
930	-1.2250	1.45×10^{-5}	7.8670	246.5	222-272	3.5×10^{-4}
900	-1.2143	1.50×10^{-5}	7.6681	245	220-270	3.2×10^{-4}
850	-1.1769	1.54×10^{-5}	7.4795	242.5	217-267	3.5×10^{-4}
800	-1.1424	1.60×10^{-5}	7.2062	240	215-265	3.6×10^{-4}
700	-1.0615	1.82×10^{-5}	6.5771	235	210-260	4.1×10^{-4}
600	-0.9587	1.94×10^{-5}	5.7997	230	205-255	4.6×10^{-4}
500	-0.8266	2.10×10^{-5}	4.8254	225	200-250	5.7×10^{-4}

(2) 高温范围 $T_0 = 240 + \frac{P}{20}$ K $\Delta T = 50$ K

a. 52.8 GHz

$p(\text{hPa})$	C_0	C_1	C_2	T_0	温度适用范围 ΔT	最大相对误差
1040	-1.32093	1.82×10^{-5}	7.4849	292	267-317	3.0×10^{-4}
1020	-1.31380	1.85×10^{-5}	7.4125	291	266-316	3.0×10^{-4}
1000	-1.30638	1.85×10^{-5}	7.3337	290	265-315	3.0×10^{-4}
970	-1.29437	1.87×10^{-5}	7.2152	288.5	263-313	3.0×10^{-4}
930	-1.27770	1.97×10^{-5}	7.0510	286.5	262-312	3.0×10^{-4}
900	-1.26401	2.02×10^{-5}	6.9189	285	260-310	3.0×10^{-4}
850	-1.23952	2.08×10^{-5}	6.6852	282.5	257-307	3.0×10^{-4}
800	-1.21252	2.18×10^{-5}	6.4313	280	255-305	3.0×10^{-4}
700	-1.15076	2.38×10^{-5}	5.8634	275	250-300	3.1×10^{-4}
600	-1.07575	2.63×10^{-5}	5.1770	270	245-295	3.7×10^{-4}
500	-0.98617	2.80×10^{-5}	4.3647	265	240-290	4.4×10^{-4}
400	-0.88385	3.10×10^{-5}	3.4086	260	235-285	5.0×10^{-4}

b. 52.9GHz

$p(\text{hPa})$	C_0	C_1	C_2	T_0	温度适用范围 ΔT	最大相对误差
1040	-1.27835	1.74×10^{-5}	7.3006	292	267-317	2.6×10^{-4}
1020	-1.27032	1.78×10^{-5}	7.2234	291	266-316	2.7×10^{-4}
1000	-1.26195	1.81×10^{-5}	7.1437	290	265-315	2.7×10^{-4}
970	-1.24839	1.86×10^{-5}	7.0172	288.5	263-313	2.7×10^{-4}
930	-1.22947	1.93×10^{-5}	6.8412	286.5	262-312	2.8×10^{-4}
900	-1.21382	2.00×10^{-5}	6.6989	285	260-310	2.7×10^{-4}

续表

$p(\text{hPa})$	C_0	C_1	C_2	T_0	温度适用范围 ΔT	最大相对误差
850	-1.18564	2.06×10^{-5}	6.4460	282.5	257—307	2.8×10^{-4}
800	-1.15418	2.17×10^{-5}	6.1688	280	255—305	2.7×10^{-4}
700	-1.08012	2.34×10^{-5}	5.5316	275	250—300	3.4×10^{-4}
600	-0.98524	2.66×10^{-5}	4.7442	265	245—295	3.8×10^{-4}
500	-0.86192	2.95×10^{-5}	3.7526	260	240—290	4.5×10^{-4}
400	-0.70094	3.24×10^{-5}	2.4858	255	235—285	5.6×10^{-4}

c. 54.4GHz

$p(\text{hPa})$	C_0	C_1	C_2	T_0	温度适用范围 ΔT	最大相对误差
1040	-1.07212	5.94×10^{-6}	7.0970	292	267—317	2.0×10^{-4}
1020	-1.06129	5.96×10^{-6}	7.0109	291	266—316	2.0×10^{-4}
1000	-1.05013	5.98×10^{-6}	6.9225	290	265—315	2.1×10^{-4}
970	-1.03255	6.02×10^{-6}	6.7841	288.5	263—313	2.1×10^{-4}
930	-1.00834	6.04×10^{-6}	6.5932	286.5	262—312	2.1×10^{-4}
900	-0.98900	6.06×10^{-6}	6.4418	285	260—310	2.0×10^{-4}
850	-0.95521	6.11×10^{-6}	6.1774	282.5	257—307	2.0×10^{-4}
800	-0.91921	6.16×10^{-6}	5.8960	280	255—305	1.9×10^{-4}
700	-0.84147	6.20×10^{-6}	5.2844	275	250—300	2.8×10^{-4}
600	-0.75685	6.25×10^{-6}	4.6059	270	245—295	3.1×10^{-4}

d. 54.5GHz

$p(\text{hPa})$	C_0	C_1	C_2	T_0	温度适用范围 ΔT	最大相对误差
1040	-1.07975	5.60×10^{-6}	7.2052	292	267—317	1.8×10^{-4}
1020	-1.06857	5.64×10^{-6}	7.1177	291	266—316	1.9×10^{-4}
1000	-1.05701	5.68×10^{-6}	7.0275	290	265—315	1.9×10^{-4}
970	-1.03872	5.72×10^{-6}	6.8858	288.5	263—313	1.9×10^{-4}
930	-1.01326	5.78×10^{-6}	6.6892	286.5	262—312	1.9×10^{-4}
900	-0.99277	5.85×10^{-6}	6.5323	285	260—310	1.9×10^{-4}
850	-0.95644	5.96×10^{-6}	6.2555	282.5	257—307	1.9×10^{-4}
800	-0.91696	6.05×10^{-6}	5.9566	280	255—305	2.0×10^{-4}
700	-0.82794	6.10×10^{-6}	5.2874	275	250—300	2.3×10^{-4}
600	-0.72910	6.15×10^{-6}	4.5034	270	245—295	2.4×10^{-4}

参 考 文 献

- [1] Van Vleck, J. H., and V F Weisskopf, On the shape of collision-broadened lines, *Rev. Mod Phys.*, 17, 227—236, 1945.
- [2] Van Vleck, J. H., The absorption of microwave by oxygen, *Phys. Rev.*, 71, 413—424, 1947.
- [3] Gross, E P., Shape of collision-broadened spectral lines, *Phys. Rev.*, 97, 395, 1955.
- 4 Meeks, M. L., and A. E Lilley. The microwave spectrum of oxygen in the earth's atmosphere, *J Geophys. Res.*, 68, 1683—1703, 1963.
- [5] Carter, C J et al., Oxygen absorption measurement in the lower atmosphere, *J. Geophys. Res.*, 73, 3113, 1968.

- [6] Reber, E. E., Absorption of the 4 to 6 millimeter wave band in the atmosphere, *J. Geophys. Res.*, **77**, 3831—3845, 1972.
- [7] Poon, R. K. L., A power law fit to oxygen absorption at 60GHz and its application to remote sensing of atmospheric temperature, *Radio Science*, **15**, 25—34, 1980.
- [8] 赵柏林等, 微波遥感大气层结的原理和实验, 中国科学, 1980, 9, 874—882.
- [9] 赵柏林等, 多频微波辐射计遥感大气层结的实验研究, 中国科学, B 辑, 1984, 9, 855—862.
- [10] Westwater, E. R. et al., Experimental determination of temperature profiles by ground-based microwave radiometry, *J. Appl. Meteor.*, **11**, 524—539, 1975.
- [11] Decker, M. T., E. R. Westwater and F. O. Guirand, Experimental evaluation of ground-based remote sensing of atmospheric temperature and water vapor profiles, *J. Appl. Meteor.*, **17**, 1788—1795, 1978.
- [12] Башаринов, А. Е., А. С. Гурвич и С. Т. Егоров, Радионизлучение земли как планеты. издательство «Наука» М., 1974.
- [13] Ulaby, F. T., R. K. Moore and A. K. Fung, *Microwave Remote Sensing*, 1. Addison-Wesley Publishing Company, 1981.

THE SIMPLIFICATION OF OXYGEN-ABSORPTION COEFFICIENT FORMULA IN MICROWAVE BAND

Zhao Bolin Liu Wen Tang Chengxian

(Department of Geophysics, Peking University)

Abstract

Study of oxygen-absorption coefficient in 5mm wave band is important for remote sensing of atmospheric temperature profile from satellite or ground. In order to obtain the atmospheric profile speedly and accurately, it is necessary to have a simple formula of oxygen-absorption coefficient. In this paper, the oxygen-absorption coefficient formula in a certain range of temperature-pressure and the oxygen-absorption coefficient formula of the standard pressure surface have been derived. These formulae may substitute for Meek-Lilley formula in remote sensing of atmosphere.