

中国晴空和云雨大气的 微波辐射和传播特性

中国科学院大气物理研究所微波遥感组 著

国防工业出版社

P427
DQWL

中国晴空和云雨大气的 微波辐射和传播特性

中国科学院大气物理研究所微波遥感组 著

TW33/119

国防工业出版社

001106

内 容 简 介

本书从微波通信、雷达、地球环境遥感、以及射电天文等工程和研究等各方面的实际需要出发,系统讨论了大气的气体成分和云雨对微波的衰减、吸收、散射、雷达反射率和大气自身的微波背景辐射,给出了系统的定量数据。全书由两部分组成,第一部分给出了上述各种特性的计算理论公式,讨论了建立符合我国实际情况的微波大气传输模式的各方面问题;第二部分以图和表的形式给出3~75千兆赫各频率上各项特性的具体数值,并提供了直接和间接利用这些图表的详细说明。

本书读者对象为微波通信、卫星通信、雷达工程的研究设计人员,雷达气象工作者,微波遥感研究和应用工作者,射电天文工作者以及大学有关专业师生。

中国大气和云雨大气的

微波辐射和传播特性

中国科学院大气物理研究所微波遥感组 著

国防工业出版社出版

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

国防工业出版社印刷厂印刷

787×1092¹/₁₆ 印张 10¹/₂ 239千字

1982年2月第一版 1982年2月第一次印刷 印数:0,001—1,700册

统一书号:1503·2199 定价:1.45元

前 言

微波在大气中的传播特性（强度、波形、传播方向）变化以及大气中自身存在的微波辐射是一个涉及到多方面学科和工程应用的重要问题。这些问题大致是：1）在微波通信工程和微波雷达工程中必须考虑大气引起的微波射线的弯曲，微波信号强度的衰减以及信号质量的变坏；2）在地球环境，即大气要素和地面特征的微波遥感问题中，既要了解大气对微波的衰减作用，也要了解大气自身的微波辐射（发射）；3）在射电天文研究中也需要了解大气的微波辐射和衰减特性。因此，从各种实际需要出发，长时期以来，国内外已经对微波在大气中的传播特性作了大量的理论研究和实际测量工作。

从物理本质上来说，大气对微波的作用可以归结为：1）大气温度和水汽分布的不均匀性造成微波折射指数在垂直方向和水平方向上的非均匀分布，从而导致微波在大气中传播时的路径弯曲、多路径传输以致相干性的信号衰落等等，这在近地面一层大气中显得最为重要；2）大气中气体成分引起的微波选择吸收和远翼吸收。对地球大气而言，在微波段最主要的选择吸收气体是氧气和水汽，这两种气体成分的吸收线处在短厘米波段和毫米波段，因此当考察短厘米波以下波段的传播时必须考虑大气气体吸收引起的微波信号衰减；3）大气中的云、雨、雪、雹等降水体引起的对微波的非共振散射和吸收。这种吸收和散射的总效果亦同样造成微波的衰减，而且这种衰减一般地要比大气气体在吸收线位置以外波段上引起的衰减厉害，即使在较长的厘米波段（例如10厘米）也不能对此完全不加考虑，波长愈短，引起的衰减愈强，因此它是一个需要着重考虑的因子。云雨对微波的影响除衰减外，还由于散射中极化特性的变化可能引起不同极化方向上微波信号的交叉干扰；4）大气气体和云雨除了作为微波吸收体和散射体外，它本身又是一个微波辐射体，既发射出微波热辐射（包括氧气、水汽和云雨等的微波热辐射），也偶尔发射微波非热辐射（例如闪电中的微波辐射成分）。大气微波辐射的存在既是一种背景噪声，又是一种可以利用的信号。

近年来，微波通信工程发展迅速，要求的信息容量愈来愈大，所用波段不断向更短波长（毫米波）扩展。除地面通信工程外，卫星和地面之间的通信已成为主要通信方式之一。地球环境遥感研究和应用亦迅速发展，它所涉及的波长领域从长厘米波（例如遥感海面温度用21厘米波长）直至短毫米波（例如探测大气上层的温度和水汽所用的2.53和1.64毫米波长）的整个微波波段内。此外，毫米波射电天文学的研究也开拓了天体物理研究的新领域。所有这些研究和工程的发展，都要求更全面地掌握在整个微波波段上大气的传输特性。

对有关的研究工作，特别是对工程设计而言，大气的微波衰减和大气微波热辐射的基本数值是十分重要的。这些参数的大小又直接取决于大气中的温度、水汽分布和云雨的出现情况。因而微波衰减和大气微波噪声的数值也会有明显的季节性和地区性。

本书的主要目的就是提供我国具体气候情况下微波衰减和微波辐射的基本数据，以便

供给电波传播、环境遥感以及射电天文等各方面使用。这些数据是根据微波吸收和散射的基本公式,并利用我国的平均气候资料以及实测的云、雨滴谱资料计算得到的。在书中同时给出基本公式和有关如何使用这些资料的说明。全书在内容上分为晴空大气微波传输和云雨微波辐射两大部分,在结构上则统一分为大气微波辐射特性的一般概念(包括基本公式,模式计算考虑和结果初步分析)以及计算结果整理所得图表两部分。给出的计算结果中所涉及的频率包括从3千兆赫(波长10厘米)到77千兆赫(波长约4毫米)的较宽范围。这些正是正在使用和即将被利用的频段。

本书是力求满足各方面需要而提供资料的初步尝试。随着今后工作的进一步开展,特别是对云雨大气微波传播特性的研究和测量的进一步开展,我们将补充和扩展这方面的资料。

本书是中国科学院大气物理研究所大气遥感研究室微波遥感组同志的部分工作成果。书稿的撰写者有吕达仁(前言),黄润恒(第一章§1, §2),林海(第一章§3,第三章和第二部分I、II),魏重(第一章§4),包玲明(第二章)。包玲明作了晴空大气的资料计算和分析工作,林海和魏重作了云雨大气资料计算和分析工作,忻妙新参加了部分计算和分析工作。全书由林海、吕达仁、包玲明整编定稿。大气遥感研究室主任周秀骥教授对本研究工作给予了关心和指导。在计算过程中还得到了本所计算机室和本室计算机房同志们的大力协助。全书插图是由张大平同志绘制的。

限于作者的水平,本书无论在编排和内容方面都会有不少错误和不妥之处,望读者指正。

作 者

一九八〇年七月

目 录

第一部分 大气微波辐射特性的一般概念	1
第一章 理论基础	1
§1 大气分子的微波吸收	1
(1) 氧分子的微波吸收	1
(2) 水汽分子的微波吸收	2
§2 大气的微波辐射传输	3
§3 水滴的散射公式	5
§4 水和冰的复折射指数	7
第二章 晴空大气微波传播特性模式	9
§1 模式的参数选择	9
(1) 资料来源	9
(2) 台站分布	9
(3) 频率范围	9
§2 模式的计算方法	10
§3 晴空大气微波辐射的基本特性	11
(1) 不同高度上的大气吸收系数	11
(2) 垂直大气的总衰减及透过率	13
(3) 晴空大气微波辐射强度	14
第三章 云雨的微波辐射特性	18
§1 单个球形水滴的辐射特性	18
(1) 散射强度的角分布	18
(2) 水滴的衰减	21
(3) 水滴的散射效应	21
§2 瑞利近似的适用范围	23
§3 雨滴谱微波衰减的计算方法	24
§4 各地降水微波衰减的比较	25
§5 建立云雨模式大气的设想	28
参考文献	28
第二部分 资料汇编	29
I 资料编排方式	29
(1) 晴空大气的微波辐射图表	29
(2) 云雨大气的微波辐射特性表	30
II 使用说明	30
(1) 直接数据利用	30
(2) 间接数据利用	31
资料图表	32
表1 我国台站一览表	32
表2 我国晴空大气微波辐射传输参数表	33
表3 不同波长, 不同散射角的水滴归一化相函数	113

表 4	不同雨滴大小的衰减截面、散射截面和后向散射截面	119
表 5	M-P 雨滴谱在不同雨强下的衰减系数、散射系数和雷达反射率因子	123
表 6	我国实际雨滴谱 $M-\alpha_e$, α_e-I , α_a-I 和 Z_e-I 统计回归关系	127
图 1	我国台站分布图	129
图 2	标准大气不同高度的氧气吸收系数	130
图 3	热带大气不同高度的氧气吸收系数	131
图 4	中纬度夏季不同高度的氧气吸收系数	132
图 5	中纬度冬季不同高度的氧气吸收系数	133
图 6	高纬度夏季不同高度的氧气吸收系数	134
图 7	高纬度冬季不同高度的氧气吸收系数	135
图 8	标准大气(1)、中纬度冬季(2)和高纬度冬季(3)整层大气透过率	136
图 9	热带大气(1)、中纬度夏季(2)和高纬度夏季(3)整层大气透过率	137
图 10	我国北京、西沙和拉萨三地的整层大气透过率(1月)	138
图 11	我国北京、西沙和拉萨三地的整层大气透过率(7月)	139
图 12	大气向下的微波辐射亮度温度 $T_b^\downarrow$	140
图 13	大气向下的微波辐射亮度温度 $T_b^\downarrow$	141
图 14	大气向下的微波辐射亮度温度 $T_b^\downarrow$	142
图 15	不同地表特征下标准大气微波辐射亮度温度	143
图 16	不同地表特征下热带大气微波辐射亮度温度	144
图 17	18千兆赫微波衰减厚度 1 月分布图	145
图 18	18千兆赫微波衰减厚度 7 月分布图	146
图 19	22.5千兆赫微波衰减厚度 7 月分布图	147
图 20	24千兆赫微波衰减厚度 1 月分布图	148
图 21	24千兆赫微波衰减厚度 7 月分布图	149
图 22	38千兆赫微波衰减厚度 1 月分布图	150
图 23	38千兆赫微波衰减厚度 7 月分布图	151
图 24	53千兆赫微波衰减厚度 1 月分布图	152
图 25	53千兆赫微波衰减厚度 7 月分布图	153
图 26	60千兆赫微波衰减厚度 7 月分布图	154
图 27	67千兆赫微波衰减厚度 1 月分布图	155
图 28	67千兆赫微波衰减厚度 7 月分布图	156
图 29	22.5千兆赫 7 月微波向下辐射亮度温度(K, 实线)与地面湿度场 (克/米 ³ , 虚线)分布图	157
图 30	60千兆赫 1 月微波向下辐射亮度温度(K, 实线)与地面温度场(K, 虚线)分布图	158
图 31	60千兆赫 7 月微波向下辐射亮度温度(K, 实线)与地面温度场(K, 虚线)分布图	159
图 32	60千兆赫 1 月晴空大气向上的微波辐射亮度温度(K)分布图	160
图 33	60千兆赫 7 月晴空大气向上的微波辐射亮度温度(K)分布图	161

第一部分 大气微波辐射特性的一般概念

第一章 理论基础

本章是本书之基础。主要论述和计算晴空和云雨大气中微波辐射传输最直接关联的理论知识,包括大气主要分子成分的微波吸收线、云和降水的微波散射、水和冰的复折射指数以及实际大气中微波辐射传输等等。其中除涉及到的基本物理概念外,还列出了计算书中数据所采用的基本公式。具备大气物理、电波传播基础知识的读者,阅读这一章后可以自行计算本书中没有列出的有关数据。

§1 大气分子的微波吸收

晴空大气对微波的衰减,主要是由于大气分子的吸收,分子对微波的散射作用可以忽略不计。大气中对微波有吸收作用的主要是氧分子和水汽分子,其他气体分子虽然在微波段有各自的吸收线,但是由于这些成分在大气中的含量甚微,一般它们对微波不会引起明显的吸收作用。

(1) 氧分子的微波吸收

氧分子在微波段有两个吸收区。一个是波长为 2.53 毫米单谱线结构的吸收线;一个是 5 毫米为中心的,由若干条吸收线组成的共振吸收带。

在我们这本资料汇编里,使用了米克斯-利利 (Meeks-Lilley) 的公式⁽¹⁾来计算氧分子的微波吸收系数。该公式的具体形式如下:

$$\alpha_{O_2} = c_1 P T^{-3} f^2 \sum_N S_N \exp\left(-\frac{E_N}{kT}\right) \quad (1-1)$$

α_{O_2} 是氧分子的吸收系数 (分贝/公里), P 为大气压力 (毫米汞柱), T 为大气温度 (K), f 为所考虑的微波频率 (千兆赫), c_1 为常数等于 2.6742, k 为玻尔兹曼 (Boltzmann) 常数。

N 为分子转动能级量子数,它决定了吸收谱线的位置以及处于该能级上的分子数。对于氧分子, N 只能取奇数值,即 $N = 1, 3, 5, \dots, 45$ 。表 1-1 是氧分子 46 条吸收线的中心频率。其中 $f_{1-} = 118.7505$ 千兆赫,就是波长为 2.53 毫米的单一吸收线。

E_N 为 N 阶转动能级,满足下式:

$$E_N/kT = 2.06844 N(N+1)/T$$

S_N 为考虑到线形以后的谱线强度:

$$S_N = \mu_{N+}^2 F_{N+} + \mu_{N-}^2 F_{N-} + \mu_{N_0}^2 F_{N_0}$$

μ_N 为跃迁矩阵元,分别为

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

表1-1 氧气5毫米吸收带的中心谱线

共振谱线频率 (千兆赫)			共振谱线频率 (千兆赫)		
序 数			序 数		
N	f_{N+}	f_{N-}	N	f_{N+}	f_{N-}
1	56.2648	118.7505	25	65.7626	53.5960
3	58.4466	62.4863	27	66.2918	53.0695
5	59.5910	60.3061	29	66.8313	52.5458
7	60.4348	59.1612	31	67.3627	52.0259
9	61.1506	58.3239	33	67.8923	51.5091
11	61.8002	57.6125	35	68.4205	50.9949
13	62.4112	56.9682	37	68.9478	50.4830
15	62.9980	56.3634	39	69.4741	49.9730
17	63.5685	55.7839	41	70.0000	49.4648
19	64.1272	55.2214	43	70.5249	48.9582
21	64.6779	54.6728	45	71.0497	48.4530
23	65.2240	54.1294			

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

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

F_N 为谱线形状因子。在 50 公里以下的大气层内，谱线加宽的主要机制是分子之间的碰撞，此时线形因子如下：

$$F_{N+} = \frac{\Delta f_p}{(f_{N+} + f)^2 + \Delta f_p^2} + \frac{\Delta f_p}{(f_{N+} - f)^2 + \Delta f_p^2}$$

$$F_{N-} = \frac{\Delta f_p}{(f_{N-} + f)^2 + \Delta f_p^2} + \frac{\Delta f_p}{(f_{N-} - f)^2 + \Delta f_p^2}$$

$$F_{N_0} = 2\Delta f_p / (\Delta f_p^2 + f^2)$$

其中 Δf_p 为碰撞加宽半宽度，它与温度和压力有关，近似地认为各条谱线具有相同的半宽度，并取

$$\Delta f_p = g^*(P) \left(\frac{P}{P_0} \right) \left(\frac{T_0}{T} \right) \quad (\text{千兆赫}) \quad (1-2)$$

其中 P_0 、 T_0 为参考气压和参考温度，分别取为 760 毫米汞柱和 300K， $g^*(P)$ 与压力有关，在米克斯-利利公式中取作

$$g^*(P) = \begin{cases} 0.64 & , P \geq 250 \text{ 毫米汞柱} \\ 0.64 + \frac{250 - P}{250 - 19} 0.717 & , 19 \leq P \leq 250 \\ 1.357 & , P \leq 19 \end{cases}$$

近年来关于氧分子微波吸收系数有不少理论和实验研究，在线形因子、谱线宽度等方面作了若干改进，但米克斯-利利公式在 5 毫米吸收带低频一侧仍然是适用的。

(2) 水汽分子的微波吸收

水汽分子在微波区有两条吸收线，其中心波长分别为 1.348 厘米和 0.164 厘米。此外，水汽分子在亚毫米和远红外波段还有许多强吸收线，它们的远翼延伸到微波区，在该处产生一定的吸收。水汽分子的微波吸收原则上就是这些吸收线贡献的总和。在实际计算中，根据所讨论的频率与吸收线的相对位置，常常把总吸收分为两部分：最靠近的吸收线的共振吸收以及其他各条吸收线的远翼吸收，即

$$\alpha_{\text{H}_2\text{O}} = \alpha_{\text{共振}} + \alpha_{\text{远翼}}$$

对于 1.348 厘米吸收线来说, 总吸收为

$$\alpha_{\text{H}_2\text{O}} = 1.57 \times 10^3 \frac{\rho_w f^2}{T^{5/2}} e^{-\frac{644}{T}} \left[\frac{\Delta f_p}{(f_0 + f)^2 + \Delta f_p^2} + \frac{\Delta f_p}{(f_0 - f)^2 + \Delta f_p^2} \right] + 1.11 \times 10^{-2} \frac{\rho_w f^2 \Delta f_p}{T^{3/2}} \quad (\text{分贝/公里}) \quad (1-3)$$

其中 f_0 为吸收线的中心频率, 即 22.235 千兆赫。 ρ_w 为水汽密度 (克/米³), Δf_p 为谱线碰撞加宽的半宽度:

$$\Delta f_p = 2.26 \left(1 + 0.011 \rho_w \frac{T}{P} \right) \left(\frac{P}{P_0} \right) \left(\frac{T_0}{T} \right)^{0.625} \quad (\text{千兆赫}) \quad (1-4)$$

其中 P 、 T 为大气压力和大气温度, 单位同式 (1-1), P_0 、 T_0 为参考气压和参考温度, 同式 (1-2)。

§ 2 大气的微波辐射传输

以下考虑大气的微波热噪声。在微波段, 通常用等效亮度温度来表示微波辐射强度。

假定大气是平面分层均匀的介质, 忽略气体分子和气溶胶粒子的散射, 并认为大气分子的微波辐射具有各向同性, 则大气的微波辐射与大气的温度分布以及气体分子的微波吸收有关。

参照图 1-1 大气中厚度为 Δz 的某一薄层在天顶角 θ 方向上的向上辐射和向下辐射为

$$\alpha(z) T(z) \sec \theta \Delta z \quad (1-5)$$

式中 $\alpha(z)$ 是 z 处的大气吸收系数, 它是频率的函数。对于晴空大气而言, 即为氧气和水汽分子的吸收系数之和。对于云雨大气, 就要考虑云雨的吸收。该层至地面以及该层至大气上界的微波透过率分别为

$$\tau^+(\theta) = \exp\left(-\int_0^z \alpha(z') \sec \theta dz'\right) \quad (1-6)$$

$$\tau^-(\theta) = \exp\left(-\int_z^\infty \alpha(z') \sec \theta dz'\right)$$

则相应的到达地面的向下辐射和到达大气上界的向上辐射贡献是

$$\Delta(T_b^+) = \alpha(z) T(z) \sec \theta \exp\left(-\int_0^z \alpha(z') \sec \theta dz'\right) \Delta z$$

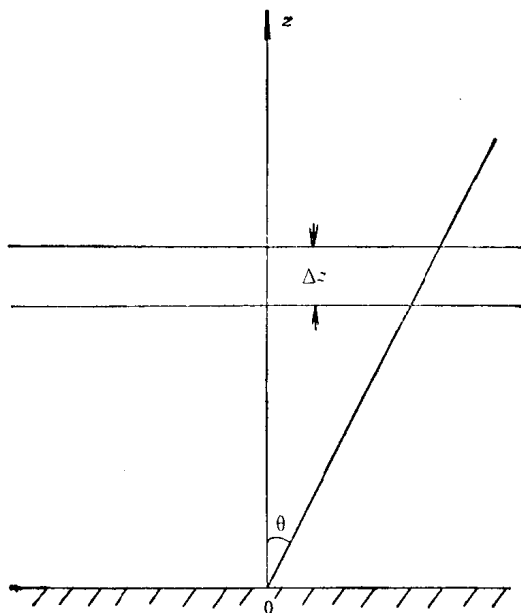


图1-1 平面分层大气

$$\Delta(T_b^\uparrow) = \alpha(z) T(z) \sec \theta \exp\left(-\int_z^\infty \alpha(z') \sec \theta dz'\right) \Delta z$$

整层大气的辐射是这些薄层辐射的总和, 所以

$$\begin{aligned} T_b^\downarrow &= \int_0^\infty \alpha(z) T(z) \sec \theta \exp\left(-\int_0^z \alpha(z') \sec \theta dz'\right) dz \\ T_b^\uparrow &= \int_0^\infty \alpha(z) T(z) \sec \theta \exp\left(-\int_z^\infty \alpha(z') \sec \theta dz'\right) dz \end{aligned} \quad (1-7)$$

整层大气的微波透过率为

$$\tau_s = \exp\left(-\int_0^\infty \alpha(z) \sec \theta dz\right) \quad (1-8)$$

在空对地微波辐射传输问题的讨论中, 还必须考虑地表的作用。地表作为大气的下边界, 不仅本身具有微波辐射, 而且对大气的向下辐射还起到反射作用。此时整个地-气系统的微波热噪声为

$$T_b = \varepsilon T_s \tau_s + (1 - \varepsilon) \tau_s T_b^\downarrow + T_b^\uparrow \quad (1-9)$$

式中 ε 为地表的微波比辐射率, 它与地表的物质组成和状态有关, T_s 是地表温度 (K)。

若在地面接收大气的微波辐射, 则还必须考虑宇宙微波辐射背景 $T_b^{(0)}$ 的贡献。此时

$$T_b = T_b^{(0)} \tau_s + T_b^\uparrow \quad (1-10)$$

上述水平分层大气的假定在天顶角 $\theta \leq 75^\circ$ 的范围内是比较适用的, 在大的天顶角时, 则必须进行地球曲率和大气折射作用的订正, 这时应把大气看成是球面分层介质。在球面分层大气中, 微波束的路径是弯曲的, 因此相应式 (1-7) 和式 (1-8) 中的垂直路径积分应改成沿射线轨迹积分, 成为

$$T_b^\downarrow = \int_0^\infty \alpha(l) T(l) \exp\left(-\int_0^l \alpha(l') dl'\right) dl \quad (1-11)$$

$$\begin{aligned} T_b^\uparrow &= \int_0^\infty \alpha(l) T(l) \exp\left(-\int_l^\infty \alpha(l') dl'\right) dl \\ \tau_s &= \exp\left(-\int_0^\infty \alpha(l) dl\right) \end{aligned} \quad (1-12)$$

根据斯涅尔 (Snell) 定理, 微波射线的轨道方程为

$$\frac{d}{dl}(n_a R_e \sin \theta) = 0 \quad (1-13)$$

其中微分是沿射线轨迹 $d\vec{l}$ 所进行的, R_e 为射线经过的空间某点至地心的距离, θ 为该点射线方向的天顶角, 这时 θ 为 z 的函数, n_a 为该点处空气的折射率, 它与该点的温度、气压和水汽有关, 具体公式是⁽²⁾

$$(n_a - 1) \times 10^6 = 77.6 \frac{P}{T} - 5.6 \frac{e}{T} + 3.75 \times 10^5 \frac{e}{T^2} \quad (1-14)$$

式中 T 为气温 (K), P 为气压 (毫巴), e 为水汽压 (毫巴)。这样, 从气象探空资料和初始天顶角 (如天线的天顶角) 就可以根据式 (1-13) 和式 (1-14) 求出射线的轨迹, 即计算出式 (1-12) 和式 (1-13) 中的积分路径, 从而实现对微波辐射传输方程的有关地球曲率和大气折射的订正。

§ 3 水滴的散射公式

当波长为 λ 的平面波照射到折射指数为 $m = n_r - in_i$, 半径为 r 的均匀介质球形粒子时, 其散射辐射场即为麦克斯威尔 (Maxwell) 电动力学方程组在相应边界条件下的解, 这就是所谓的米 (Mie) 散射。

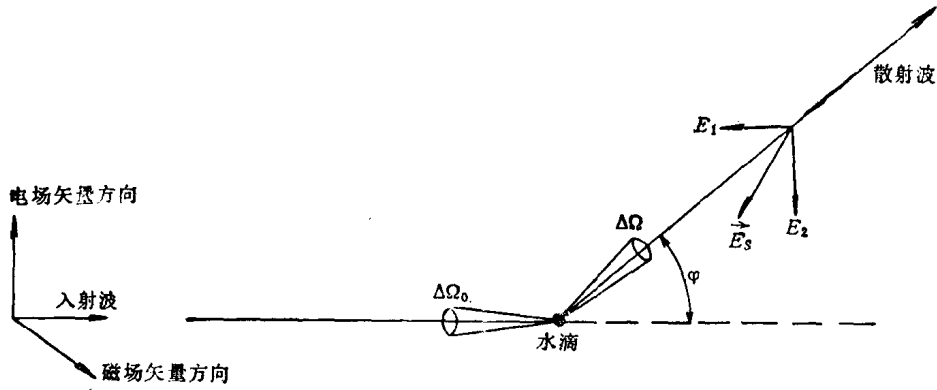


图1-2 水滴散射图

考虑到散射过程是围绕入射方向呈轴对称分布, 因此可单用散射角 φ 来描述。定入射方向与散射方向组成的平面为散射平面, 散射辐射电场矢量 $\vec{E}$ 由互为垂直的两个电场分量 E_1 和 E_2 组成, 它们分别垂直和平行于散射平面。假定入射波是非偏振的, 单位强度的辐射, 则由米氏解给出, E_1 和 E_2 分别为

$$E_1 = \frac{\lambda}{2\pi} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2n+1}{n(n+1)} (a_n \pi_n + b_n \tau_n) \quad (1-15)$$

$$E_2 = \frac{\lambda}{2\pi} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2n+1}{n(n+1)} (b_n \pi_n + a_n \tau_n) \quad (1-16)$$

式中 a_n , b_n 叫做米系数, 其表达式为

$$a_n = \frac{A_n(mx) \psi_n(x) - m d \psi_n(x)/dx}{A_n(mx) \zeta_n(x) - m d \zeta_n(x)/dx}$$

$$b_n = \frac{m A_n(mx) \psi_n(x) - d \psi_n(x)/dx}{m A_n(mx) \zeta_n(x) - d \zeta_n(x)/dx}$$

x 为尺度参数 $x = 2\pi r/\lambda$, ψ_n 和 ζ_n 可以用 $n + \frac{1}{2}$ 阶第一类贝塞尔 (Bessel) 函数表示

$$\psi_n(x) = \sqrt{\frac{\pi x}{2}} J_{n+\frac{1}{2}}(x)$$

$$\zeta_n(x) = \sqrt{\frac{\pi x}{2}} \{ J_{n+\frac{1}{2}}(x) + (-1)^n i J_{-n-\frac{1}{2}}(x) \}$$

A_n 为

$$A_n(mx) = \psi'_n(mx)/\psi_n(mx) = -\frac{d \psi_n(mx)}{d(mx)} / \psi_n(mx)$$

τ_n 和 π_n 为角度系数, 它们只是散射角 φ 的函数, 由勒让德 (Legendre) 多项式及其导数所决定

$$\pi_n = \frac{dP_n(\cos \varphi)}{d \cos \varphi} = \pi_n(\cos \varphi)$$

$$\tau_n = \cos \varphi \pi_n(\cos \varphi) - \sin \varphi \frac{d\pi_n(\cos \varphi)}{d \cos \varphi}$$

这时, 在 φ 方向单位立体角内的散射强度即为单位强度的入射能被散射到 φ 方向单位立体角内的比例, 该量用微分散射截面表示

$$\frac{d\sigma}{d\Omega} = \frac{|E_1|^2 + |E_2|^2}{2} = \frac{E_1 E_1^* + E_2 E_2^*}{2} \quad (1-17)$$

E_1^* 和 E_2^* 分别为 E_1 、 E_2 的共轭复数。通常还引入一个无因次量, 称为强度参数的 i_1 和 i_2 , 替代 E_1 、 E_2 。强度参数定义为

$$i_1 = \left(\frac{2\pi}{\lambda} \right)^2 E_1 E_1^* \quad (1-18)$$

$$i_2 = \left(\frac{2\pi}{\lambda} \right)^2 E_2 E_2^* \quad (1-19)$$

i_1 , i_2 经常用来表示米散射的强度分布和线偏振分布。代入式 (1-17) 得

$$\frac{d\sigma}{d\Omega} = \left(\frac{\lambda}{2\pi} \right)^2 \frac{i_1 + i_2}{2}$$

对微分散射截面进行全空间积分, 得粒子的散射截面

$$\sigma_s = \int \frac{d\sigma}{d\Omega} d\Omega$$

根据正交性, 此积分可化作无穷级数

$$\sigma_s = \frac{\lambda^2}{2\pi} \sum_{n=1}^{\infty} (2n+1) (|a_n|^2 + |b_n|^2) \quad (1-20)$$

当 $\varphi = \pi$, 则得后向散射截面 σ_β

$$\sigma_\beta = \frac{\lambda^2}{2\pi} |i_1|^2 = \frac{\lambda^2}{2\pi} |i_2|^2 \quad (1-21)$$

类似地, 从米氏解中也能推得衰减截面 σ_e

$$\sigma_e = \frac{\lambda^2}{2\pi} \sum_{n=1}^{\infty} (2n+1) \operatorname{Re}(a_n + b_n) \quad (1-22)$$

式中 $\operatorname{Re}(a_n + b_n)$ 为复数 $(a_n + b_n)$ 的实部, 衰减截面为散射截面和吸收截面之和, 因此吸收截面 σ_a 为

$$\sigma_a = \sigma_e - \sigma_s \quad (1-23)$$

根据特殊函数的递推公式, a_n 、 b_n 、 π_n 和 τ_n 可以进一步简化为^[3]

$$a_n = \frac{\left(\frac{A_n(y)}{m} + \frac{n}{x} \right) \operatorname{Re}\{W_n(x)\} - \operatorname{Re}\{W_{n-1}(x)\}}{\left(\frac{A_n(y)}{m} + \frac{n}{x} \right) W_n(x) - W_{n-1}(x)} \quad (1-24)$$

$$b_n = \frac{\left(mA_n(y) + \frac{n}{x}\right) \operatorname{Re}\{W_n(x)\} - \operatorname{Re}\{W_{n-1}(x)\}}{\left(mA_n(y) + \frac{n}{x}\right) W_n(x) - W_{n-1}(x)} \quad (1-25)$$

$$\pi_n = \cos \varphi \frac{2n-1}{n-1} \pi_{n-1} - \frac{n}{n-1} \pi_{n-2} \quad (1-26)$$

$$\tau_n = \cos \varphi [\pi_n - \pi_{n-2}] - (2n-1) \sin^2 \varphi \pi_{n-2} + \tau_{n-2} \quad (1-27)$$

式中 $y = mx$, $W_n(x)$ 为圆函数, 它们存在递推公式为

$$W_n(x) = \frac{2n-1}{x} W_{n-1}(x) - W_{n-2}(x)$$

当 $n = -1, 0$ 时

$$W_0(x) = \sin x + i \cos x$$

$$W_{-1}(x) = \cos x - i \sin x$$

π_n 和 τ_n 的初值为

$$\pi_0 = 0$$

$$\tau_0 = 0$$

$$\pi_1 = 1$$

$$\tau_1 = \cos \varphi$$

$$\pi_2 = 3 \cos \varphi$$

$$\tau_2 = 3 \cos 2\varphi$$

有了式 (1-24) 至式 (1-27) 就可以在电子计算机上计算散射场的各个特性值。

§ 4 水和冰的复折射指数

在散射公式中, 各散射参数值对复折射指数 m 的实部和虚部的变化都是非常敏感的。因此必须准确地选择 n_r 和 n_i 的值。水和冰的复折射指数是波长和温度的函数, 这个函数关系比较复杂, 许多学者曾在某些波谱区间上和某些特定温度下, 测量水和冰的复折射指数, 并在此基础上企图建立一个适用范围较广的经验函数表达式。1972 年雷 (Ray)⁽⁴⁾ 在德拜和科尔工作的基础上, 求得了原有公式中的系数与温度的经验关系, 由此建立的一套模式适用于相当宽的频谱和较大的温度变化范围。在我们这本资料汇编中就是采用了他的模式来计算水和冰的微波段的复折射指数。

复折射指数 $m = (n_r - in_i)$ 通常用介质的复介电常数 $\epsilon = (\epsilon' - i\epsilon'')$ 来表示, 它们的关系是:

$$\epsilon' = n_r^2 - n_i^2 \quad (1-28)$$

$$\epsilon'' = 2n_r n_i \quad (1-29)$$

为适用于微波, 科尔曾对德拜理论作了修正, 给出介电常数与频率的关系是:

$$\epsilon' = \epsilon_\infty + \frac{(\epsilon_s - \epsilon_\infty) [1 + (\lambda_s/\lambda)^{1-a'} \sin(\alpha' \pi/2)]}{1 + 2(\lambda_s/\lambda)^{1-a'} \sin(\alpha' \pi/2) + (\lambda_s/\lambda)^{2(1-a')}} \quad (1-30)$$

$$\epsilon'' = \frac{(\epsilon_s - \epsilon_\infty) (\lambda_s/\lambda)^{1-a'} \cos(\alpha' \pi/2)}{1 + 2(\lambda_s/\lambda)^{1-a'} \sin(\alpha' \pi/2) + (\lambda_s/\lambda)^{2(1-a')}} + \frac{\sigma \lambda}{18.8496 \times 10^{10}} \quad (1-31)$$

其中几个系数与温度的关系, 由雷根据许多实测资料得到相应的经验表达式:

$$\sigma = 12.5664 \times 10^8$$

$$\epsilon_s = 78.54 [1.0 - 4.579 \times 10^{-3} (t - 25.0) + 1.19 \times 10^{-5} (t - 25.0)^2 - 2.8 \times 10^{-8} (t - 25.0)^3]$$

$$\epsilon_{\infty} = 5.27137 + 0.0216474 t - 0.00131198 t^2$$

$$\alpha' = -16.8129 / (t - 273) + 0.0609265$$

$$\lambda_r = 0.00033836 \exp[2513.98 / (t + 273)]$$

式中 λ 为波长 (厘米), t 为摄氏温度 ($^{\circ}\text{C}$)。上述系数是适用于 1 毫米波长以上, 温度从 -20°C 到 $+50^{\circ}\text{C}$ 水的复折射指数。图 1-3 是 $t = 0^{\circ}\text{C}$ 时水的 n_r 和 n_i 计算值, 图中各种符号是不同作者的实验值, 具体出处可查文献〔4〕。

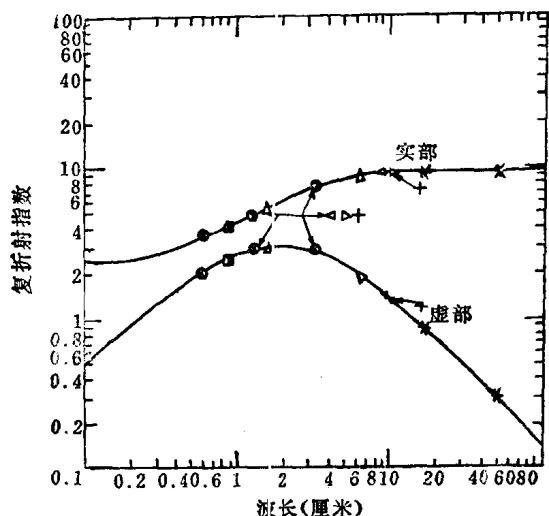


图1-3 水的复折指数

冰在微波段的复折射指数的公式与上面是相同的, 只是上述系数改为

$$\epsilon_{\infty} = 3.168$$

$$\alpha' = 0.288 + 0.0052 t + 0.00023 t^2$$

$$\sigma = 1.26 \exp \{-12500.0 / [(t + 273.0) 1.9869]\}$$

$$\lambda_r = 9.990288 \times 10^{-5} \exp \{13200.0 / [(t + 273.0) 1.9869]\}$$

$$\epsilon_r = 203.168 + 2.5 t + 0.15 t^2$$

此模式适用的温度范围为 -20°C 到 0°C 。

● 原文为 9.990288×10^{-4} , 经我们计算核对有误。改为 9.990288×10^{-5} 。

第二章 晴空大气微波传播特性模式

晴空大气对微波传输的影响主要体现在大气分子成份对微波的吸收。这种吸收与大气的气压、温度和湿度分布有着密切的关系，因而具有明显的地区性和季节性。这就有必要结合我国的实际气候情况作出定量的估计。作为初步尝试，我们建立了一个我国晴空大气的微波传输模式。该模式主要由模式基本特性和微波辐射特性图表两部分组成，其中以大量的图表形式为主，描绘出全国范围的微波辐射场（在本书第二部分）。数据图表占有相当大的篇幅的目的是：1）能够从中查到一些基本的微波辐射数据；2）提供为间接获得其他传输特性所必需的基本数据。本章就是模式的第一部分，包括模式的参数选择、计算方法以及基本特性。

§1 模式的参数选择

在模式计算中，把分布在全国各个有代表性的气象站，作为全国模式的数据点，其不同时间的温、湿、压气候资料就是该模式的原始数据。然后选择若干特定的频率，把这些频率下的计算结果制成需要的图表，就构成本模式。

（1）资料来源

所采用的气象资料，包括地面和不同高度上的气温、湿度、气压取自中央气象局整编的按月进行十年平均的气候资料。其中地面要素是1961年至1970年的月平均值，高空气象要素是1960年至1969年的月平均值。由于计算量较大，本书篇幅又有限，现仅选取1月与7月的气象资料，代表我国冬夏两季的典型情况。

另外，还选用了世界上通用的六种有代表性的大气模式^[6]，它们是：标准大气，热带大气，中纬度夏季大气，中纬度冬季大气，高纬度夏季大气和高纬度冬季大气。所计算的结果以供对比，并可直接参考利用。

（2）台站分布

为完整描绘出全国范围的微波辐射气候图，应尽可能把全国所有具备地面、高空气候资料的台站都选用。目前资料已整编的高空气象台站有104个，其中由于台湾省桃园、东港和香港（英占）三地因暂缺地面水汽资料未选外，计101个台站，均匀分布在全国各地（见第二部分图1）。

其次，我们根据辐射场的特点，同时考虑本书的篇幅，又从中选取有代表性的48个台站（如图中的实心圆点所示），将这些台站的某些主要结果制成我国晴空大气微波辐射传输参数表。

（3）频率范围

第二章中所列的公式是适用于整个微波频段。本模式计算中只选用了从9.3685（约3.2厘米波长）到76千兆赫频率范围，原始计算结果中频率间隔是相当密的，一般分别为4、1和0.5千兆赫，其中0.5厘米氧气吸收带完全是对所有吸收线逐条进行计算的，目的是

由此绘制的辐射特性曲线能完整反映出应有的结构,从而保证所得资料的正确性。当然,书中给出的微波辐射图表限于篇幅就不可能列出所有已计算过的频率的结果。但本书中所选的频率保证在透明段区间有足够的内插精度。在吸收区,如 22.235 和 60 千兆赫附近,只能选取了几个有特征的吸收峰,如 22.235、58.3853、59.1642 千兆赫等等,其他就不能通过内插求得,如果读者需要,还得另行计算。

§ 2 模式的计算方法

首先,计算晴空大气的微波吸收系数,即为水汽和氧气吸收系数之和

$$\alpha = \alpha_{\text{H}_2\text{O}} + \alpha_{\text{O}_2} \quad (\text{分贝/公里}) \quad (2-1)$$

整层大气的总衰减量为吸收系数在垂直方向传播路径上的积分

$$R_s = \int_0^s \alpha dz \quad (\text{分贝}) \quad (2-2)$$

s 为气象探空资料的最高点。 R_s 近似代表了整层大气总衰减。由于一般探空高度 s 都到达 25 公里以上,而此高度以上大气已相当稀薄,因此 R_s 的近似程度是相当好的。

同时,我们取了不同厚度的大气衰减,其定义为

$$R_z = \int_0^z \alpha(z') dz' \quad (\text{分贝}) \quad (2-3)$$

从地面到某高度 z 之间的大气衰减。当 α 取 $1/\text{公里}$,则称 R 为衰减厚度,它是一个无因次数。

其次,计算晴空大气的微波辐射,具体公式即为式 (1-7)。同样我们也选取若干特征高度,计算了从该高度向下探测时,该层 ($0 \sim z$) 大气的微波亮温贡献,这时式 (1-7) 成为

$$T_b^* = \int_0^z \alpha(z') T(z') \sec \theta \exp \left[- \int_{z'}^z \alpha(z'') \sec \theta dz'' \right] dz' \quad (2-4)$$

由式 (2-1) 到式 (2-4) 的计算结果构成了模式中的我国晴空大气微波辐射传输参数表,其中特征高度取作 3、6、12 和 s 公里。

另外,构成微波辐射图的计算参数除上述几个外,还有大气透过率〔见式 (1-8)〕以及大气向上的总微波噪声。整个地-气系统的微波热噪声由地面发射项、大气辐射被地表反射回空间的辐射和大气向上辐射三项组成,即式 (1-9)。前两项的大小主要取决于地表特征,而代表地表特征的微波比辐射率 ϵ 是一个极为复杂的物理量,它与地表的物质组成,日光投射角度等有关。因此我们不能详细研究地表的影响,只是取了两种典型的情况, $\epsilon = 0.5$ 和 0.9 分别代表了典型的海洋和陆地。

在计算过程中,为保证数值积分有足够的精度,对原始数据进行了内插,温度用线性内插,气压和湿度用指数内插。

根据气候资料得到的微波辐射特性只能代表一种平均的辐射状态,它与当地实际的某一特定时刻的状态有一定的差异,但在某些频段是能够加以订正的。