

# 低于 1000 GHz 电磁波的大气复折射率\*

胡大璋 周兆先

(中国电波传播研究所青岛研究中心, 山东, 青岛, 266003)

**摘要** 根据气体吸收理论和我国气象探空数据 P-T-U 剖面 (即压强-温度-露点差剖面), 给出了频率直到 1000 GHz, 低层大气复折射率在我国 104 个气象站的频率、时间和空间特性的计算结果. 讨论了在 50~70 GHz 频率范围内, 氧气吸收的压力展宽效应. 根据无线电工程的需要, 还对气体吸收产生的衰减和时延进行了计算.

**关键词** 大气吸收, 复折射率, 压力展宽效应, 衰减率, 时延率.

## 引言

10~1000 GHz 电磁波的开发, 对 21 世纪的通信、广播、遥感等领域具有重大意义. 低层大气中的气体吸收是该频段开发的重要的基础研究. 由于大气中的氧气和水汽分子的谐振频率位于 10~1000 GHz 范围, 从而使大气的复折射率特性复杂化. 自 20 世纪 40 年代以来, 不少科学家为此进行了理论和实验研究. 范弗莱克 (Van Vleck)<sup>[1]</sup>首先用量子理论推演出 60 GHz 附近有许多吸收谱线, 其中在 112 GHz 有一条孤立的氧吸收谱线, 他还揭示了大气吸收中的压力展宽效应<sup>[2]</sup>. 在范弗莱克理论的基础上, 赖伯 (Liebe)<sup>[3]</sup>给出了氧气和水汽吸收谱线的参数和经验公式. 此后, 基宾 (Gibbins)<sup>[4]</sup>提出了在海平面条件下大气吸收的简化公式, 该公式被国际无线电咨询委员会 (CCIR) 推荐为计算大气吸收的方法.

大气的吸收效应使得大气的折射率变成一个复数. 其值取决于大气中的压强、温度和湿度, 它是时空和频率的函数, 所以大气吸收特性包含着频率-时间-空间三维参数的影响. 本文利用我国 104 个气象台站探空数据 P-T-U 剖面, 求解出大气复折射率随频率、海拔高度 (压力展宽效应)、时间 (含季节) 和地区 (平面坐标) 的变化, 以及气体吸收产生的衰减和时延.

## 1 理论公式

电波在大气中传播, 其场强  $E$  可表示为

$$E = E_0 \times \exp(-ink_0L), \quad (1)$$

\* 电子科学基金资助项目

本文 1993 年 5 月 29 日收到, 修改稿 1994 年 5 月 4 日收到

式 (1) 中  $E_0$  为入射波场强,  $i = \sqrt{-1}$ ,  $n$  为大气的复折射指数,  $k_0$  为真空中传播常数,  $L$  为传播距离. 通常引入复折射率  $N$  来代替复折射指数  $n$ , 其关系为

$$N = (n - 1) \times 10^6. \quad (2)$$

由于大气中气体分子的吸收效应, 复折射率随频率而变化, 称之为色散现象. 为了突出色散特性, 通常将复折射率分解为与频率无关项  $N_0$  和色散项  $N(f)$ :

$$N = N_0 + N(f), \quad (3)$$

式 (3) 中  $N_0$  是实数,

$$N_0 = 77.64 \frac{P}{T} + 3.744 \times 10^5 \frac{e}{T^2}, \quad (4)$$

式 (4) 中  $P$  为大气压强 (mb),  $e$  为水汽压强 (mb),  $T$  为大气的绝对温度 (K).

根据气体分子吸收理论, 大气复折射率的色散项  $N(f)$  是 48 条氧气吸收谱线、30 条水汽吸收谱线和连续吸收谱 (频率为 1000 GHz 以上) 的贡献之和. 大气的复折射率色散项  $N(f)$  为<sup>[3]</sup>

$$N(f) = N'(f) + iN''(f),$$

式中

$$\left. \begin{aligned} N'(f) &= \sum_{j=1}^{48} (SF')_j + \sum_{j=1}^{30} (SF')_j + N'_p + N'_e, \\ N''(f) &= \sum_{j=1}^{48} (SF'')_j + \sum_{j=1}^{30} (SF'')_j + N''_p + N''_e; \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

式 (5) 中  $S$  为吸收谱线强度 (以 kHz 为单位),  $F'$  和  $F''$  分别为吸收谱线形状函数的实部和虚部 (以 1/GHz 为单位)<sup>[3]</sup>,  $N'_e$  和  $N''_e$  分别为频率高于 1000 GHz 水汽的连续吸收谱贡献的实部和虚部,  $N'_p$  和  $N''_p$  分别为频率高于 1000 GHz 干燥空气连续吸收谱贡献的实部和虚部. 上述参数与大气中压强、温度和湿度有关<sup>[3]</sup>.

## 2 标准海平面的大气复折射率

标准海平面的大气复折射率是大气吸收的最基础数据, 也是地面传播工程最必需的数据. 为此首先考虑标准海平面的气象参数: 大气压强 (含干项和湿项)  $P = 1013$  mb, 大气温度  $T = 288$  K, 大气水汽密度  $\rho = 7.5$  g/m<sup>3</sup>. 大气的水汽分压强可由水汽密度换算:

$$e = \frac{\rho \cdot T}{216.7}. \quad (6)$$

按上节的方法, 计算得到标准海平面的大气折射率与频率无关项  $N_0 = 318.2$ ; 色散项  $N(f)$  的实部和虚部如图 1 所示. 图 1 中实线和虚线分别表示氧气和水汽产生的大气复折射率. 由图 1(a) 可见, 在频率直至 1000 GHz 范围内, 大气复折射率的实部的频谱特性曲

线是由若干个 N 字形状的曲线组成. 每个 N 字形状曲线可分为 3 个区: 中间区称为反常色散区, 其复折射率的实部随频率增大而急剧减小. 两边区称为正常色散区. 其复折射率实部随频率增大而增大. 在 1000 GHz 频率范围内含有 3 个较强的反常色散区, 其中心频率为 556.9、752 和 987.9 GHz. 由图 1(b) 可见, 大气复折射率的虚部是由若干个尖峰大气吸收峰形状的曲线组成. 它是由气体分子吸收谱线形成的. 在 1000 GHz 频率范围内, 较强的水汽吸收峰有 11 个, 较强的氧气吸收峰有 9 个, 并以 60 GHz 吸收峰为氧气中最强的吸收峰.

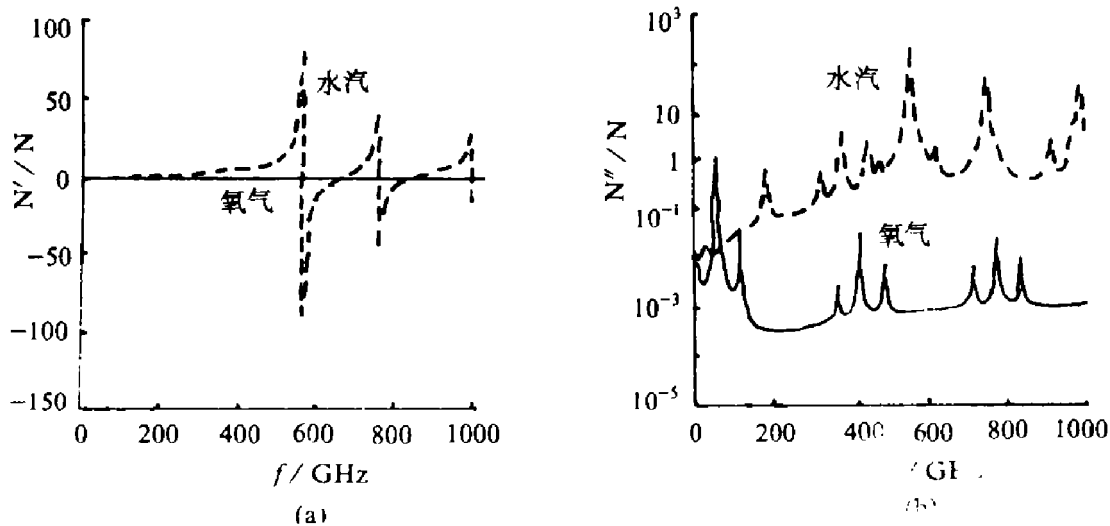


图 1 标准海平面条件下大气复折射率  
(a) 实部; (b) 虚部

Fig. 1 Atmospheric complex refractive index on the standard sea level  
(a) Real part; (b) Imaginary part

### 3 压力展宽效应

压力展宽效应是大气吸收的重要特性. 气象探空表明大气压强随海拔高度增加而减小. 典型的地面大气压强值为 1013 mb, 典型的 30 km 高空大气压强仅为 10 mb. 根据我们的计算, 当大气压强为 1013 mb 时, 吸收谱线的宽度为 1~3 MHz. 当大气压强为 10 mb 时, 吸收谱线宽度明显减小, 约为几十 kHz, 因此在研究 50~70 GHz 氧气吸收特性时, 将会出现压力展宽效应. 在 50~70 GHz 频带中含有 39 条氧吸收谱线, 即平均每 0.5 MHz 频带含有一条吸收谱线. 当大气压强为标准地面值时, 谱线宽度远大于谱线间隔, 谱线相互重叠, 形成一连续的氧吸收带. 当大气压强为 10 mb 时, 谱线宽度远小于谱线间隔, 连续的吸收带分裂成许多独立的吸收谱线.

取北京地区 1 月份探空数据 P-T-U 剖面的资料, 当海拔高度为 0.02、11、20 和 30 km 四种高度时, 大气复折射率实部和虚部的计算结果如图 2 所示.

由图 2 可见, 在 50~70 GHz 频率范围中有十分明显的压力展宽效应. 由图 2(a) 可见, 当大气压强较大时 (高度为 0.02 km), 复折射率的实部随频率变化形成一“N”字形的曲线, 其中心频率为 60 GHz. 57~63 GHz 频段为反常色散区, 其它为正常色散区. 随高

度增加, 曲线分裂为若干 N 字形曲线. 由图 2(b) 可见, 当海拔高度为 0.02 km 时, 大气复折射率的虚部随频率变化平稳. 在 57~63 GHz 频段内,  $N''=1$ . 当海拔高度为 30 km 时, 其虚部曲线裂变成成为若干个孤立的峰.

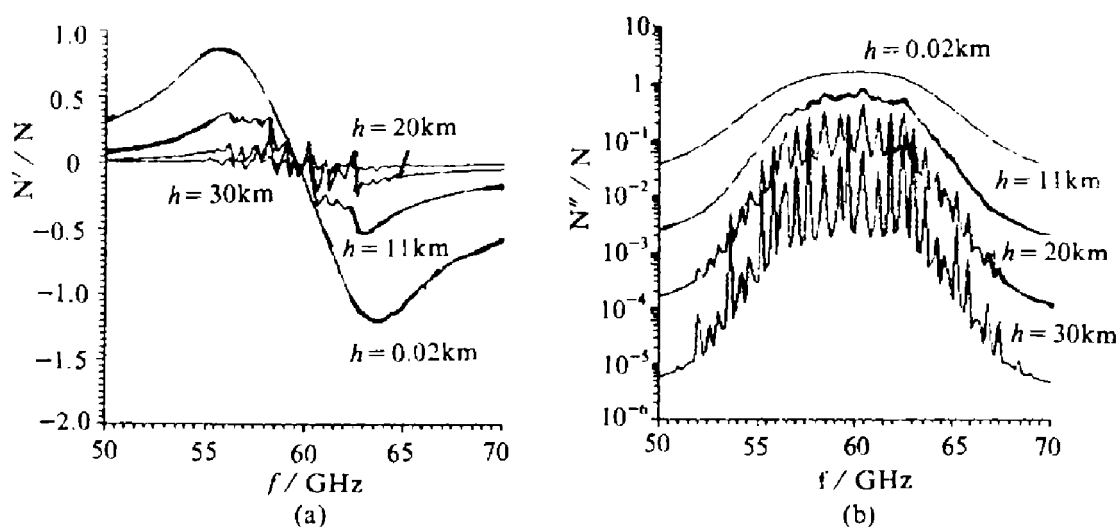


图 2 大气复折射率的压力展宽效应

(a) 实部; (b) 虚部

Fig. 2 The pressure broadened effect of atmospheric complex refractive index

(a) Real part; (b) Imaginary part

#### 4 大气复折射率随季节 (时间) 的变化

大气复折射率随季节的变化极其复杂. 从平均意义来看, 大气复折射率的季节变化具

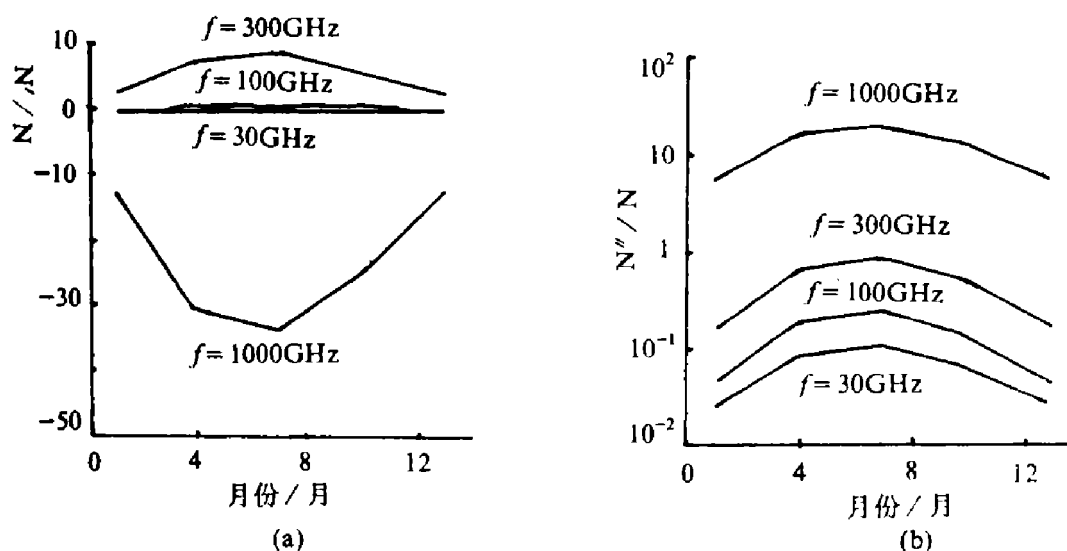


图 3 地面复折射率随季节的变化曲线

(a) 实部; (b) 虚部

Fig. 3 Variation of complex refractive index on the ground with the seasons

(a) Real part; (b) Imaginary part

有代表性. 用典型例子研究北京地区大气复折射率的季节特性. 取探空数据 P-T-U 剖面的地面值 (用 1、4、7 和 10 月数据分别代表春、夏、秋、冬的值), 分别对频率 30、100、300 和 1000 GHz 进行计算. 其大气复折射率实部和虚部的季节变化如图 3 所示.

由图 3(a) 可见, 大气复折射率实部的绝对值, 夏季值大于冬季值, 春秋值位于夏冬值之间; 频率越高, 随季节变化越大. 由图 3(b) 可见, 大气复折射率虚部的夏季值最大, 冬季值最小; 频率越高, 随季节变化越大.

## 5 大气复折射率的地域分布

大气复折射率的地域分布包含有不同频率、不同季节和不同高度的变化特性, 这是无线电工程设计的基础, 其结果将另在专门手册中给出. 本文作为一般的研究方法, 仅对频率为 1000 GHz, 夏季时间 (7 月), 我国 104 个气象站的地面复折射率的实部和虚部作定量的计算, 其结果见表 1.

由表 1 可见, 复折射率实部的绝对值分布趋势是东南沿海较大, 西北较小, 尤其是青海省较小; 复折射率的虚部分布趋势也是东南沿海较大, 西北较小, 尤其是西藏、青海和新疆较小.

## 6 大气吸收产生的衰减和时延

在路径  $S_0$  上, 大气吸收产生的衰减  $A$  (dB) 和时延  $D$  (ps) 分别为:

$$\left. \begin{aligned} A &= \int_0^{S_0} \alpha ds \quad (\text{dB}), \\ D &= \int_0^{S_0} \beta ds \quad (\text{ps}); \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

式 (7) 中  $\alpha$  (dB/km) 和  $\beta$  (ps/km) 分别表示大气吸收的衰减率和时延率. 它们分别与电波穿过大气的幅度和相位有关, 定义为

$$\left. \begin{aligned} \alpha &= 20 \log[Re(E/E_0)]/L, \\ \beta &= [(\phi - \phi_0)/2\pi f]/L; \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

式 (8) 中  $E$  如式 (1) 所示,  $\phi_0 = (2\pi f/C)L$  为真空中传播相位,  $\phi = n(2\pi f/C)L$  为穿过大气的传播相位,  $C$  为真空中光速,  $f$  为频率 (以 GHz 为单位),  $L$  为距离 (以 km 为单位), 则

$$\left. \begin{aligned} \alpha &= 0.182fN''(f) \quad (\text{dB/km}), \\ \beta &= 3.336N'(f) \quad (\text{ps/km}); \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

式 (9) 中 ps 为  $10^{-12}$  s. 图 4(a) 和 (b) 分别表示标准海平面条件下, 频率小于 1000 GHz 大气吸收产生的衰减率和时延率的计算结果.

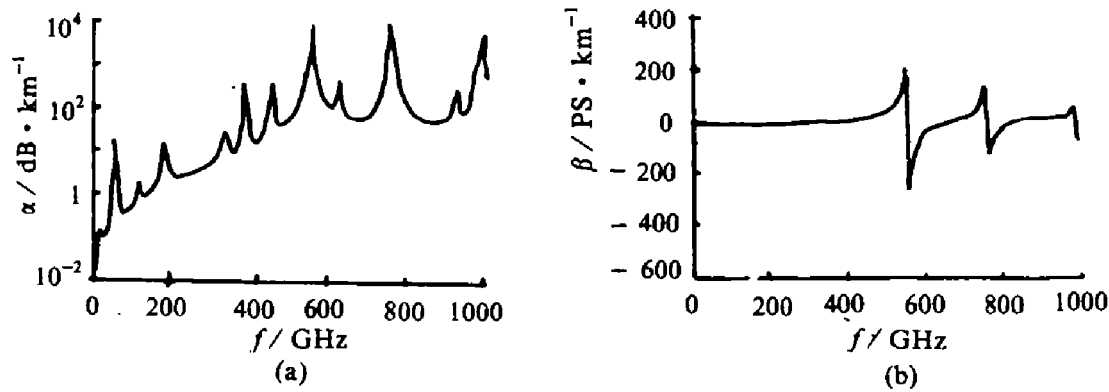


图 4 标准海平面条件下大气吸收产生的衰减率和时延率

(a) 衰减率; (b) 时延率

Fig. 4 Attenuation and delay due to atmospheric absorption on the standard sea level  
(a) specific attenuation; (b) specific delay表 1 频率为 1000 GHz, 夏季时间 (7 月) 地面的复折射率  
Table 1 Complex refractive index on the ground at  
frequency 1000GHz and in summer (July)

站名	$N'$	$N''$	站名	$N'$	$N''$	站名	$N'$	$N''$
海拉尔	-11.520	4.744	平凉	-12.666	4.652	东港	-20.069	9.809
嫩江	-12.501	5.466	甘南	-9.203	2.804	宜昌	-18.703	8.928
哈尔滨	-13.696	6.113	武都	-13.786	5.579	汉口	-18.509	8.918
长春	-14.732	6.387	冷湖	-4.330	1.281	恩施	-17.292	7.803
通辽	-14.920	6.724	芒崖	-5.040	1.404	长沙	-17.540	8.366
延吉	-14.303	6.349	西宁	-8.660	2.830	芷江	-18.140	8.444
临江	-15.159	6.698	都兰	-4.786	1.333	彬县	-16.759	7.823
赤峰	-12.495	5.271	格尔木	-4.855	1.441	汕头	-20.564	10.097
沈阳	-15.709	7.278	吉迈	-7.045	1.833	广州	-20.651	10.143
旅顺	-17.126	8.019	玉树	-7.666	2.089	香港	-18.846	8.947
北京	-16.597	7.782	阿尔泰	-8.090	3.217	阳江	-21.321	10.492
邢台	-15.152	6.993	塔城	-9.613	3.970	海口	-20.384	9.949
锡林浩特	-10.043	3.919	克拉玛依	-8.075	3.343	西沙	-21.096	10.414
二连浩特	-8.439	3.268	北塔山	-6.465	2.234	桂林	-17.908	8.445
呼和浩特	-11.112	4.371	伊宁	-10.176	4.161	百色	-18.221	8.574
巴彦高勒	-9.697	3.780	乌鲁木齐	-7.474	3.005	梧州	-13.415	5.956
东胜	-9.519	3.510	哈密	-8.092	3.227	南宁	-14.467	6.504
太原	-14.003	5.882	库尔勒	-8.822	3.440	威宁	-12.372	4.223
济南	-16.795	7.902	库车	-6.644	2.521	贵阳	-15.729	6.403
青岛	-17.723	8.311	喀什	-8.241	3.126	丽江	-11.945	4.007
郑州	-16.157	7.493	若羌	-7.528	2.939	腾冲	-15.166	5.751
南阳	-18.904	8.895	和田	-7.930	2.942	昆明	-14.550	5.316
延安	-12.788	5.139	上海	-20.269	9.901	思茅	-16.535	6.628
西安	-16.377	7.450	徐州	-18.379	8.753	河口	-19.516	9.273
汉中	-16.561	7.342	射阳	-20.107	9.758	甘孜	-8.546	2.429
安康	-17.116	7.874	南京	-20.093	9.814	达县	-16.767	7.586
哈日奥日布格	-7.735	2.997	阜阳	-18.332	8.756	成都	-17.570	7.853
银川	-11.506	4.540	合肥	-19.819	9.610	重庆	-17.509	8.004
老东店	-7.147	2.758	衡水	-17.140	8.132	宜宾	-18.285	8.402
野马街	-7.037	2.356	南昌	-17.431	8.335	西昌	-13.947	5.310
敦煌	-7.361	2.787	赣州	-17.616	8.334	那曲	-5.897	1.406
酒泉	-8.527	3.125	邵武	-17.010	8.010	昌都	-8.599	2.473
张掖	-9.383	3.422	福州	-18.984	9.038	拉萨	-8.044	2.227
民勤	-8.416	3.115	厦门	-19.938	9.697	定日	-7.458	1.883
兰州	-10.456	3.868	桃园	-19.871	9.651			

**致谢** 本文在计算和撰写过程中得到黄捷和张武良高级工程师的帮助, 在此谨表感谢.

### 参考文献

- 1 Van Vleck JH, Weisskopf V F. *Rev. Modern Phys.*, 1945,17(1):227~236
- 2 Van Vleck JH. *Phys. Rev.*, 1947,71(7):413~433
- 3 Leibe JH. *Radio Science*, 1985,20(5):1069~1089
- 4 Gibbins C J. *Radio Science*, 1986,21(6):949~954

## THE ATMOSPHERIC COMPLEX REFRACTIVE INDEX AT FREQUENCY UP TO 1000 GHz\*

Hu Dazhang Zhou Zhaoxian

(Qingdao Research Center of CRIRP, Qingdao, Shandong 266003, China)

**Abstract** Based on the theory of gaseous absorption and radiosonde data of P-T-U profile (i.e., pressure-temperature-dewpoint profile) at 104 stations in China, the calculated results of the frequency-time-space characteristic of complex refractive index due to the gaseous absorption at frequencies up to 1000 GHz in lower atmosphere are given. The pressure broadened effect of gaseous absorption by oxygen at frequencies 50~70 GHz is discussed. Attenuation and delay due to gaseous absorption are calculated according to the requirement of radio engineering.

**Key words** atmospheric absorption, complex refractive index, pressure broadened effect, specific attenuation, specific delay.

---

\*The project supported by the Electronic Science Foundation.