

国 际 电 信 联 盟

**ITU-R**  
国际电联无线电通信部门

**ITU-R P.676-13 建议书**  
(08/2022)

**无线电波在大气气体中的  
衰减和相关效应**

**P系列**  
**无线电波传播**



国际电信联盟

## 前言

无线电通信部门的作用是确保所有无线电通信业务，包括卫星业务，合理、公平、有效和经济地使用无线电频谱，并开展没有频率范围限制的研究，在此基础上通过建议书。

无线电通信部门制定规章制度和政策的职能由世界和区域无线电通信大会以及无线电通信全会完成，并得到各研究组的支持。

## 知识产权政策（IPR）

国际电联无线电通信部门（ITU-R）的IPR政策述于ITU-R第1号决议所参引的《ITU-T/ITU-R/ISO/IEC的通用专利政策》。专利持有人用于提交专利声明和许可声明的表格可从<http://www.itu.int/ITU-R/go/patents/zh>获得，在此处也可获取《ITU-T/ITU-R/ISO/IEC的通用专利政策实施指南》和ITU-R专利信息数据库。

## ITU-R系列建议书

（也可在线查询<http://www.itu.int/publ/R-REC/zh>）

系列	标题
<b>BO</b>	卫星传送
<b>BR</b>	用于制作、存档和播出的录制；电视电影
<b>BS</b>	广播业务（声音）
<b>BT</b>	广播业务（电视）
<b>F</b>	固定业务
<b>M</b>	移动、无线电定位、业余和相关卫星业务
<b>P</b>	<b>无线电波传播</b>
<b>RA</b>	射电天文
<b>RS</b>	遥感系统
<b>S</b>	卫星固定业务
<b>SA</b>	空间应用和气象
<b>SF</b>	卫星固定业务和固定业务系统间的频率共用和协调
<b>SM</b>	频谱管理
<b>SNG</b>	卫星新闻采集
<b>TF</b>	时间信号和频率标准发射
<b>V</b>	词汇和相关问题

注：该ITU-R建议书的英文版本根据ITU-R第1号决议详述的程序予以批准。

电子出版  
2023年，日内瓦

© 国际电联 2023

版权所有。未经国际电联书面许可，不得以任何手段复制本出版物的任何部分。

## ITU-R P.676-13建议书

## 无线电波在大气气体中的衰减和相关效应

(ITU-R第201/3号课题)

(1990-1992-1995-1997-1999-2001-2005-2007-2009-2012-2013-2016-2019-2022年)

## 范围

本建议书提供了：

- a) 附件1中的方法，用于计算1至1 000 GHz频率范围内任意已知压力、温度和水蒸气高度分布下由氧气和水蒸气引起的倾斜路径气体衰减、相位非线性、大气弯曲、过剩大气路径长度以及下降流和上升流噪声温度；
- b) 当瞬时地表压力、地表温度和地表水蒸气密度或综合水蒸气含量<sup>1</sup>可从本地数据、参考分布图或参考数字地图获得时，附件2中的近似方法可估算1至350 GHz频率范围内氧气和水蒸气引起的瞬时倾斜路径气体衰减；
- c) 当地表压力、地表温度和地表水蒸气密度或综合水蒸气含量可从本地数据、参考分布图或参考数字地图获得时，附件2中的近似方法可估算1至350 GHz频率范围内氧气和水蒸气引起的倾斜路径气体衰减统计数据；
- d) 用于ITU-R P.1853建议书的倾斜路径水蒸气衰减的威布尔（Weibull）近似值。

## 关键词

气体衰减、比衰减、倾斜路径衰减、总衰减、水蒸气、氧气、相位色散、上行、下行、弯曲

## 首字母缩略词/缩写词/词汇表

Altitude（海拔）	相对于平均海平面的垂直距离
Dispersion（色散）	时间延迟相对于频率的变化
Downwelling（下行）	噪声通过大气向下传播
Exoatmospheric（大气层外）	在大气层外产生
Height（高度）	相对于地球表面的垂直距离
Isotope（同位素）	一种化学元素的多个物种
Upwelling（上行）	噪声通过大气向上传播
Zeeman splitting（塞曼分裂）	在存在静态磁场时下将光谱线分成若干部分

<sup>1</sup> 综合水蒸气含量指的是从地球表面到大气层顶部的垂直柱中水蒸气的总量。综合水蒸气含量、总的水蒸气含量、总的柱状水蒸气、综合柱状水蒸气含量和总的柱状水蒸气含量等术语是同义的。

### 相关的ITU-R建议书和手册

ITU-R P.528建议书

ITU-R P.530建议书

ITU-R P.618建议书

ITU-R P.619建议书

ITU-R P.676建议书

ITU-R P.836建议书

ITU-R P.1144建议书

ITU-R P.1510建议书

ITU-R P.1853建议书

ITU-R P.2001建议书

ITU-R P.2041建议书

《无线电气象学手册》

注 – 在任何情况下均应采用现行建议书的最新版本。

国际电联无线电通信全会，

#### 考虑到

- a) 需要预测1至1 000 GHz频率范围内任意已知压力、温度和水蒸汽高度分布下由氧气和水蒸气引起的倾斜路径气体衰减、相位非线性、大气弯曲、过剩大气路径长度以及下降流和上升流噪声温度；
- b) 当瞬时地表压力、地表温度和表面水蒸汽密度或综合水蒸气含量统计数据可从本地数据、参考分布图或参考数字地图中获取时，有必要预测1至350 GHz频率范围内由氧气和水蒸气造成的瞬时倾斜路径气体衰减；
- c) 当地表压力、地表温度和地表水蒸气密度或综合水蒸气含量统计数据已知时，需要估算1至350 GHz频率范围内氧气和水蒸气引起的倾斜路径气体衰减的统计数据；
- d) 有必要提供倾斜路径水蒸气衰减的威布尔（Weibull）近似值以供ITU-R P.1853建议书使用，

#### 做出建议

- 1 对于从本地数据（例如无线电探空仪测量或ITU-R P.835建议书附件1、2或3中的任何参考分布图）已知的任意温度、压力和水蒸气密度高度分布图，附件1中的方法应该用于计算1至1 000 GHz频率范围内氧气和水蒸气引起的倾斜路径气体衰减、相位非线性、大气弯曲、大气路径过长以及下降流和上升流噪声温度；
- 2 当地表温度、地表压力和地表水蒸气密度的瞬时值或综合水蒸气含量可从当地数据（例如气象站或历史数据）获得时，应使用附件2中的近似方法来估算1至350 GHz频率范围内氧气和水蒸气引起的瞬时倾斜路径气体衰减；

3 对于从长期历史数据或ITU-R P.2145建议书中的地图中获知的地表温度、地表压力和地表水蒸气密度或综合水蒸气含量统计数据值，应使用附件2中的近似方法预测1至350 GHz频率范围内氧气和水蒸气引起的倾斜路径气体衰减的统计数据；

4 在应用ITU-R P.1853建议书时，应使用附件2中的方法来预测倾斜路径水蒸气衰减的威布尔近似值。

## 附件1

### 逐线计算气体衰减

#### 1 比衰减

在任何气压、任何温度和任何湿度下，累加氧气和水蒸气各自谱线，可以准确地计算主要由于干空气和水蒸气所造成的高达1 000 GHz频率上的比衰减。这一方法同时也考虑了一些其他相对影响较小的因素，如10 GHz以下氧气的非共振的德拜频谱，100 GHz以上的主要由气压造成的氮衰减和计算实验上发现的过多水蒸气吸收的潮湿连续带。图1给出了使用预测方法计算的在气压1 013.25 hPa、温度15 °C、水蒸气密度为7.5 g/m<sup>3</sup>（标准）和干空气（干）两种情况下，0-1 000 GHz频段的比衰减（步长为1 GHz）。

图2详细给出了在60 GHz附近频率，在海平面的气压作用下，许多氧气吸收线合并形成一个单一的、宽的吸收带。该图也表明：在更高的高度上的氧气衰减，随着气压因高度的不断增加而减小，其各线亦逐渐变得清晰。一些额外的分子物种（如氧同位素物种、氧振动激发物种、臭氧、臭氧同位素物种和臭氧振动激发物种以及其他次要物种）未包括在逐线预测方法之中。这些额外的线对于典型气体是微不足道的，但对于干燥大气则可能非常重要。

气体比衰减的计算方法如下：

$$\gamma = \gamma_o + \gamma_w = 0.1820 f \left( N''_{Oxygen}(f) + N''_{WaterVapour}(f) \right) \quad (\text{dB/km}) \quad (1)$$

其中， $\gamma_o$ 和 $\gamma_w$ 分别是干空气（氧气条件下，由气压造成的氮和非共振德拜衰减）和水蒸气条件下的比衰减（单位dB/km）。 $f$ （单位GHz）是频率， $N''_{Oxygen}(f)$ 和 $N''_{Water Vapour}(f)$ 是该频率相关的复折射率的虚部：

$$N''_{Oxygen}(f) = \sum_{i(Oxygen)} S_i F_i + N''_D(f) \quad (2a)$$

$$N''_{Water Vapour}(f) = \sum_{i(Water Vapour)} S_i F_i \quad (2b)$$

$S_i$ 是第*i*条氧气或水蒸气谱线强度， $F_i$ 是氧气或水蒸气谱线形状因子，对表1和表2中的所有谱线进行求和；

$N''_D(f)$ 是由气压造成的氮吸收以及德拜频谱产生的干空气连续吸收谱，计算如公式(8)所示。

谱线强度为:

$$\begin{aligned}
 S_i &= a_1 \times 10^{-7} p \theta^3 \exp[a_2(1 - \theta)] && \text{对于氧气} \\
 &= b_1 \times 10^{-1} e \theta^{3.5} \exp[b_2(1 - \theta)] && \text{对于水汽}
 \end{aligned}
 \tag{3}$$

其中:

$P$ : 干空气气压, 单位为hPa

$e$ : 水蒸气分压, 单位为hPa (总气压,  $p_{tot} = p + e$ )

$\theta = 300/T$

$T$ : 温度, 单位为K。

图1

由于大气气体造成的比衰减，以1 GHz为步长，包括谱线中心

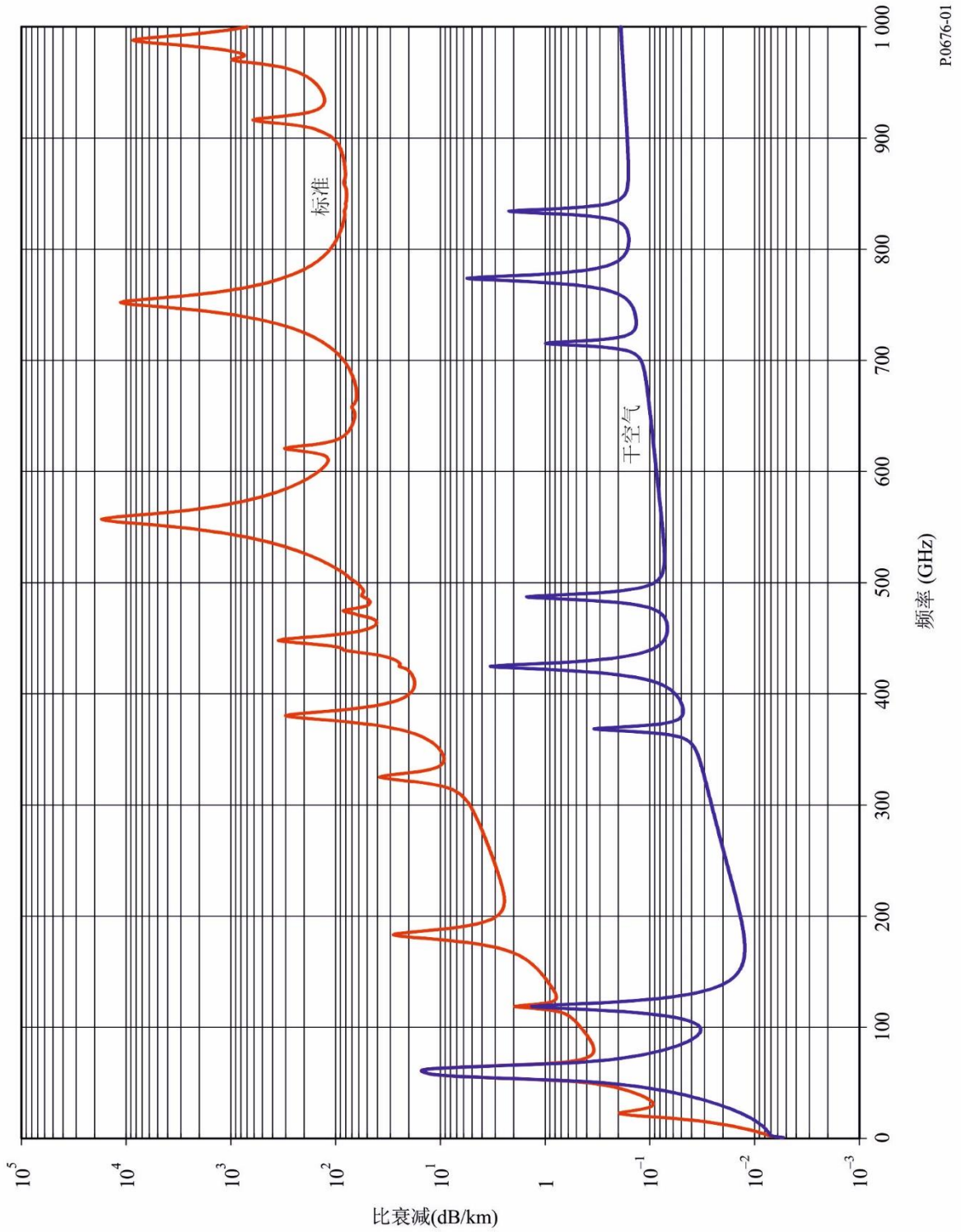
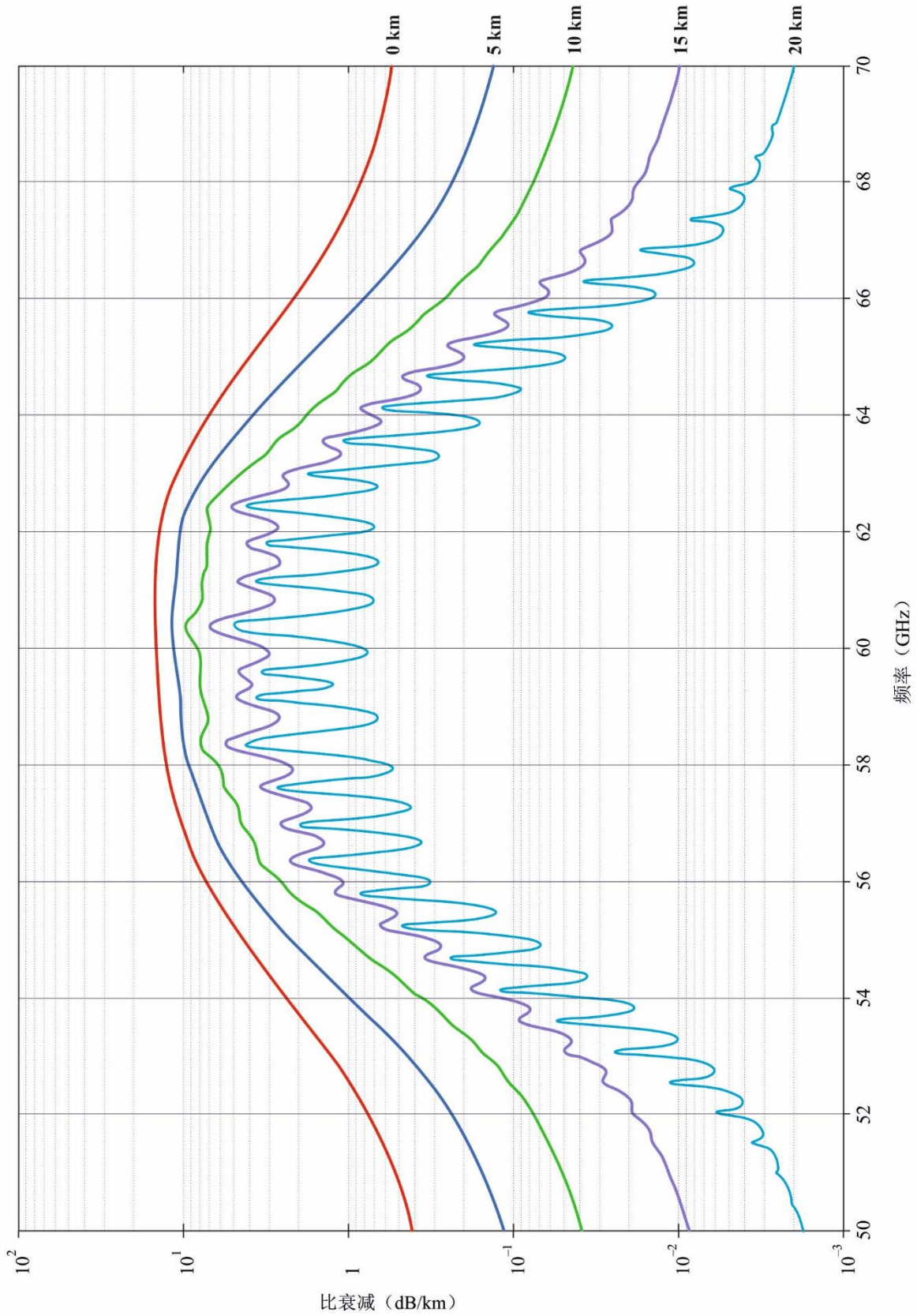


图2

在 50-70 GHz 频率范围内的所示高度计算的比衰减（步长为10兆赫兹（MHz）），  
包括谱线中心（0千米、5千米、10千米、15千米和20千米）



P.0676-02



如果局部 $p$ ， $e$ 和 $T$ 随高度的分布数据（可用，则应使用此类数据（如应用无线电探空仪测得）。如缺少局部数据，应使用ITU-R P.835建议书中适用的参考标准大气数据。（注意，计算总大气衰减时，对由氧气和水蒸气造成的衰减均使用相同的水蒸气分压。）

任何高度的水蒸气分压 $e$ 可通过该高度的水蒸气密度 $\rho$ 和温度 $T$ 计算得到，采用公式：

$$e = \frac{\rho T}{216.7} \quad (4)$$

氧气的光谱数据见表1，水蒸气的光谱数据见表2。表2中的最后一项是以1 780 GHz为中心的伪谱线，其下翼为逐线预测方法中未包含的1 000 GHz以下水蒸气共振的综合贡献（即湿空气连续吸收项）。调整伪谱线参数，将测得的大气窗区吸收与本地谱线吸收之差考虑在内。

谱线形状因子计算如下：

$$F_i = \frac{f}{f_i} \left[ \frac{\Delta f - \delta(f_i - f)}{(f_i - f)^2 + \Delta f^2} + \frac{\Delta f - \delta(f_i + f)}{(f_i + f)^2 + \Delta f^2} \right] \quad (5)$$

其中 $f_i$ 是氧气或水蒸气谱线频率， $\Delta f$ 是谱线宽度：

$$\begin{aligned} \Delta f &= a_3 \times 10^{-4} (p \theta^{(0.8 - a_4)} + 1.1 e \theta) && \text{对于氧气} \\ &= b_3 \times 10^{-4} (p \theta^{b_4} + b_5 e \theta^{b_6}) && \text{对于水汽} \end{aligned} \quad (6a)$$

修改谱线宽度 $\Delta f$ ，将氧气谱线的塞曼分裂和水蒸气谱线的多普勒展宽考虑在内：

$$\begin{aligned} \Delta f &= \sqrt{\Delta f^2 + 2.25 \times 10^{-6}} && \text{对于氧气} \\ &= 0.535 \Delta f + \sqrt{0.217 \Delta f^2 + \frac{2.1316 \times 10^{-12} f_i^2}{\theta}} && \text{对于水汽} \end{aligned} \quad (6b)$$

由于在氧气线中的干扰影响， $\delta$ 是修正因子：

$$\begin{aligned} \delta &= (a_5 + a_6 \theta) \times 10^{-4} (p + e) \theta^{0.8} && \text{对于氧气} \\ &= 0 && \text{对于水汽} \end{aligned} \quad (7)$$

表1

## 氧气衰减的谱线数据

$f_0$	$a_1$	$a_2$	$a_3$	$a_4$	$a_5$	$a_6$
50.474214	0.975	9.651	6.690	0.0	2.566	6.850
50.987745	2.529	8.653	7.170	0.0	2.246	6.800
51.503360	6.193	7.709	7.640	0.0	1.947	6.729
52.021429	14.320	6.819	8.110	0.0	1.667	6.640
52.542418	31.240	5.983	8.580	0.0	1.388	6.526
53.066934	64.290	5.201	9.060	0.0	1.349	6.206
53.595775	124.600	4.474	9.550	0.0	2.227	5.085
54.130025	227.300	3.800	9.960	0.0	3.170	3.750
54.671180	389.700	3.182	10.370	0.0	3.558	2.654
55.221384	627.100	2.618	10.890	0.0	2.560	2.952
55.783815	945.300	2.109	11.340	0.0	-1.172	6.135
56.264774	543.400	0.014	17.030	0.0	3.525	-0.978
56.363399	1331.800	1.654	11.890	0.0	-2.378	6.547
56.968211	1746.600	1.255	12.230	0.0	-3.545	6.451
57.612486	2120.100	0.910	12.620	0.0	-5.416	6.056
58.323877	2363.700	0.621	12.950	0.0	-1.932	0.436
58.446588	1442.100	0.083	14.910	0.0	6.768	-1.273
59.164204	2379.900	0.387	13.530	0.0	-6.561	2.309
59.590983	2090.700	0.207	14.080	0.0	6.957	-0.776
60.306056	2103.400	0.207	14.150	0.0	-6.395	0.699
60.434778	2438.000	0.386	13.390	0.0	6.342	-2.825
61.150562	2479.500	0.621	12.920	0.0	1.014	-0.584
61.800158	2275.900	0.910	12.630	0.0	5.014	-6.619
62.411220	1915.400	1.255	12.170	0.0	3.029	-6.759
62.486253	1503.000	0.083	15.130	0.0	-4.499	0.844
62.997984	1490.200	1.654	11.740	0.0	1.856	-6.675
63.568526	1078.000	2.108	11.340	0.0	0.658	-6.139
64.127775	728.700	2.617	10.880	0.0	-3.036	-2.895
64.678910	461.300	3.181	10.380	0.0	-3.968	-2.590
65.224078	274.000	3.800	9.960	0.0	-3.528	-3.680
65.764779	153.000	4.473	9.550	0.0	-2.548	-5.002
66.302096	80.400	5.200	9.060	0.0	-1.660	-6.091
66.836834	39.800	5.982	8.580	0.0	-1.680	-6.393
67.369601	18.560	6.818	8.110	0.0	-1.956	-6.475
67.900868	8.172	7.708	7.640	0.0	-2.216	-6.545
68.431006	3.397	8.652	7.170	0.0	-2.492	-6.600
68.960312	1.334	9.650	6.690	0.0	-2.773	-6.650
118.750334	940.300	0.010	16.640	0.0	-0.439	0.079

表1 (结束)

$f_0$	$a_1$	$a_2$	$a_3$	$a_4$	$a_5$	$a_6$
368.498246	67.400	0.048	16.400	0.0	0.000	0.000
424.763020	637.700	0.044	16.400	0.0	0.000	0.000
487.249273	237.400	0.049	16.000	0.0	0.000	0.000
715.392902	98.100	0.145	16.000	0.0	0.000	0.000
773.839490	572.300	0.141	16.200	0.0	0.000	0.000
834.145546	183.100	0.145	14.700	0.0	0.000	0.000

表2

水蒸气衰减的谱线数据

$f_0$	$b_1$	$b_2$	$b_3$	$b_4$	$b_5$	$b_6$
22.235080	0.1079	2.144	26.38	0.76	5.087	1.00
67.803960	0.0011	8.732	28.58	0.69	4.930	0.82
119.995940	0.0007	8.353	29.48	0.70	4.780	0.79
183.310087	2.273	0.668	29.06	0.77	5.022	0.85
321.225630	0.0470	6.179	24.04	0.67	4.398	0.54
325.152888	1.514	1.541	28.23	0.64	4.893	0.74
336.227764	0.0010	9.825	26.93	0.69	4.740	0.61
380.197353	11.67	1.048	28.11	0.54	5.063	0.89
390.134508	0.0045	7.347	21.52	0.63	4.810	0.55
437.346667	0.0632	5.048	18.45	0.60	4.230	0.48
439.150807	0.9098	3.595	20.07	0.63	4.483	0.52
443.018343	0.1920	5.048	15.55	0.60	5.083	0.50
448.001085	10.41	1.405	25.64	0.66	5.028	0.67
470.888999	0.3254	3.597	21.34	0.66	4.506	0.65
474.689092	1.260	2.379	23.20	0.65	4.804	0.64
488.490108	0.2529	2.852	25.86	0.69	5.201	0.72
503.568532	0.0372	6.731	16.12	0.61	3.980	0.43
504.482692	0.0124	6.731	16.12	0.61	4.010	0.45
547.676440	0.9785	0.158	26.00	0.70	4.500	1.00
552.020960	0.1840	0.158	26.00	0.70	4.500	1.00
556.935985	497.0	0.159	30.86	0.69	4.552	1.00
620.700807	5.015	2.391	24.38	0.71	4.856	0.68
645.766085	0.0067	8.633	18.00	0.60	4.000	0.50
658.005280	0.2732	7.816	32.10	0.69	4.140	1.00
752.033113	243.4	0.396	30.86	0.68	4.352	0.84
841.051732	0.0134	8.177	15.90	0.33	5.760	0.45
859.965698	0.1325	8.055	30.60	0.68	4.090	0.84
899.303175	0.0547	7.914	29.85	0.68	4.530	0.90
902.611085	0.0386	8.429	28.65	0.70	5.100	0.95
906.205957	0.1836	5.110	24.08	0.70	4.700	0.53

表2 (结束)

$f_0$	$b_1$	$b_2$	$b_3$	$b_4$	$b_5$	$b_6$
916.171582	8.400	1.441	26.73	0.70	5.150	0.78
923.112692	0.0079	10.293	29.00	0.70	5.000	0.80
970.315022	9.009	1.919	25.50	0.64	4.940	0.67
987.926764	134.6	0.257	29.85	0.68	4.550	0.90
1 780.000000	17506.	0.952	196.3	2.00	24.15	5.00

干空气连续带来自于10 GHz以下的氧气的非共振德拜频谱以及100 GHz以上的由气压造成的氮衰减。

$$N_D''(f) = f p \theta^2 \left[ \frac{6.14 \times 10^{-5}}{d \left[ 1 + \left( \frac{f}{d} \right)^2 \right]} + \frac{1.4 \times 10^{-12} p \theta^{1.5}}{1 + 1.9 \times 10^{-5} f^{1.5}} \right] \quad (8)$$

其中,  $d$ 是德拜频谱中的宽度参数:

$$d = 5.6 \times 10^{-4} (p + e) \theta^{0.8} \quad (9)$$

## 2 路径衰减

### 2.1 地面路径衰减

对于地面路径, 或者是微小倾斜的接近于地面的倾斜路径, 其路径衰减值 $A$ 计算如下:

$$A = \gamma r_0 = (\gamma_o + \gamma_w) r_0 \quad \text{dB} \quad (10)$$

其中,  $r_0$ 为路径长度, 单位为千米。

### 2.2 倾斜路径

对于已知气温、干空气气压和水蒸气密度的分布, 第2.2.1节和2.2.2节提供了使用附件1中的逐线方法计算在地球表面或接近地球表面的地点与高于地球表面的地点或者空间之间的上行路径的地对空倾斜路径的气体衰减的方法。第2.2.3节将该方法延伸至高于地球表面的地点或者空间与在地球表面或接近地球表面的地点之间的下行路径。第2.2.4和2.2.5节分别提供了在地对空路径计算弯曲和过剩大气路径长度的方法。

#### 2.2.1 非负视在仰角

高度 $h_1$ 和 $h_2$ 之间( $h_2 > h_1 \geq 0$  km)上行路径倾斜路径气体衰减为:

$$A_{gas} = \int_{h_1}^{h_2} \frac{\gamma(h)}{\sin \varphi(h)} dh = \int_{h_1}^{h_2} \frac{\gamma(h)}{\sqrt{1 - \cos^2 \varphi(h)}} dh \quad (11)$$

其中:

$$\cos \varphi(h) = \frac{(R_E + h_1)n(h_1)}{(R_E + h)n(h)} \cos \varphi_1 \quad (12)$$

$\gamma(h)$ 是高度 $h$ 的比衰减， $R_E$ 是平均地球半径（6 371千米）， $\varphi_1$ 是高度 $h_1$ 的局部视在仰角， $n(h)$ 是高度 $h$ 的折射率。

虽然公式(11)可通过数值积分<sup>2</sup>来估算，但倾斜路径气体衰减可通过把大气分成指数级增长的层，确定每层的比衰减（dB/km）和通过每层的路径长度（千米），对每一层的比衰减和通过每一层的路径长度的乘积求和来进行十分近似的估计，如公式(13)所示。在缺少与高度相对的局部气温、干空气气压和水蒸气分压的分布（例如无线电探空仪测得的数据）的情况下，可使用ITU-R P.835建议书提供的六个参考标准大气（即，全球年平均参考大气、低纬度参考大气、中纬度夏季参考大气、中纬度冬季参考大气、高纬度夏季参考大气或高纬度冬季参考大气）中的任何一个：

$$A_{gas} = \sum_{i=1}^{i_{max}} a_i \gamma_i \quad (\text{dB}) \quad (13)$$

其中 $\gamma_i$ 是每个公式(1)第 $i$ 层比衰减（dB/km）， $a_i$ 是通过第 $i$ 层的路径长度（单位为千米）。

对于地球表面和空间之间的倾斜路径，参考图5的几何结构，各层的厚度从地表10厘米到100千米高度的1千米，呈指数级增加，以确保对总倾斜路径气体衰减的准确估算。第 $i$ 层的厚度 $\delta_i$ 为：

$$\delta_i = 0.0001 e^{\frac{i-1}{100}} \quad (\text{km}) \quad (14)$$

在 $h_1 = 0$ 时，第 $i$ 层的底部高度（在 $i \geq 2$ 的情况下） $h_i$ 为：

$$h_i = \sum_{j=1}^{i-1} \delta_j = 0.0001 \frac{e^{\frac{i-1}{100}} - 1}{e^{\frac{1}{100}} - 1} \quad (15)$$

如果使用ITU-R P.835建议书规定的六个参考标准大气之一，则对高达100千米的几何高度规定大气剖面，在这种情况下， $i_{max} = 922$ ， $\delta_{922} = 0.999\ 66\ \text{km}$ ， $h_{922} = 99.457\ \text{km}$ 。

对于大气层内较低高度 $h_{lower}$ 和大气层内较高高度 $h_{upper}$ （ $0\ \text{km} \leq h_{lower} < h_{upper} \leq 100\ \text{km}$ ）之间的倾斜路径，倾斜路径衰减可通过将 $r_1$ 设置为从地球中心到较低高度的半径，并修正公式(14)和(15)以大致保持相对于地球表面的指数增长的高度累进，如下所示：

a) 计算 $i_{lower}$ 和 $i_{upper}$ ：

$$i_{lower} = \text{floor} \left\{ 100 \ln \left[ 10^4 h_{lower} \left( e^{\frac{1}{100}} - 1 \right) + 1 \right] + 1 \right\} \quad (16a)$$

$$i_{upper} = \text{ceiling} \left\{ 100 \ln \left[ 10^4 h_{upper} \left( e^{\frac{1}{100}} - 1 \right) + 1 \right] + 1 \right\} \quad (16b)$$

其中 $\text{floor}(x)$ 将 $x$ 下舍至下一个最接近整数， $\text{ceiling}(x)$ 将 $x$ 上入至下一个最接近整数。

b) 将公式(13)中的下限替换为 $i = i_{lower}$ ，上限替换为 $i_{upper} - 1$ 。

c) 将公式(14)中的0.0001替换为 $m$ ，其中

$$m = \left( \frac{e^{\frac{2}{100}} - e^{\frac{1}{100}}}{e^{\frac{i_{upper}}{100}} - e^{\frac{i_{lower}}{100}}} \right) (h_{upper} - h_{lower}) \quad (16c)$$

d) 将公式(15)替换为：

<sup>2</sup> 公式(11)可以使用不同方法来估算，取决于具体实现方式：例如a)Matlab中的积分函数，b)Octave中的quad函数，c)Python中的quad函数，d)若干Numerical Recipes函数，以及其他等效方法。

$$h_i = h_{lower} + \sum_{j=i_{lower}}^{i-1} \delta_j = h_{lower} + m \frac{e^{\frac{i-1}{100}-e^{\frac{i_{lower}-1}{100}}}}{e^{\frac{1}{100}}-1}, i_{lower} \leq i \leq i_{upper} \quad (16d)$$

应谨慎使用公式(16a)至(16d)，因为当 $i_{upper} - i_{lower} < 50$ （例如，两个机载平台之间的路径）时，倾斜路径的准确度可能会降低。

$a_i$ 是穿过厚度为 $\delta_i$ 的第 $i$ 层的路径长度， $n_i$ 是使用ITU-R P.453建议书公式(1)和(2)计算的第 $i$ 层干空气气压、温度和水蒸气分压之间的函数。 $\alpha_i$ 和 $\beta_{i+1}$ 是第 $i$ 层和第 $(i+1)^{st}$ 层之间界面的入射角和出射角， $r_i$ 是从地球中心到第 $i$ 层起点的半径， $r_{i+1} = r_i + \delta_i$ ， $r_1$ 是从地球中心到最底层起点的半径，通常是平均地球半径（6371千米）。第 $i$ 层的折射率 $n_i$ 和比衰减 $\gamma_i$ 分别是其在第 $i$ 层中点的值，即，在高度 $r_i + \delta_i/2$ 的值。

路径长度 $a_i$ 为：

$$a_i = -r_i \cos \beta_i + \sqrt{r_i^2 \cos^2 \beta_i + 2 r_i \delta_i + \delta_i^2} \quad (\text{km}) \quad (17)$$

角 $\alpha_i$ 为：

$$\alpha_i = \pi - \cos^{-1} \left( \frac{-a_i^2 - 2 r_i \delta_i - \delta_i^2}{2 a_i (r_i + \delta_i)} \right) \quad (18a)$$

$$= \sin^{-1} \left( \frac{r_i}{r_i + \delta_i} \sin \beta_i \right) \quad (18b)$$

公式(18a)因为准确度降低而被弃用。 $\beta_1$ 是地球表面或地球表面附近的局部天顶角（视在仰角的补角， $\varphi$ ；即 $\beta_1 = 90^\circ - \varphi$ ）。

可使用Snell定律从 $\alpha_i$ 递归计算出 $\beta_{i+1}$ ，如下所示：

$$\beta_{i+1} = \sin^{-1} \left( \frac{n_i}{n_{i+1}} \sin \alpha_i \right) \quad (19a)$$

或者，无须计算 $\alpha_i$ ，可在极坐标中使用Snell定律直接计算 $\beta_i$ ，如下所示：

$$\beta_i = \sin^{-1} \left( \frac{n_1 r_1}{n_i r_i} \sin \beta_1 \right) \quad (19b)$$

同样地，可按照如下公式计算 $\alpha_i$ ：

$$\alpha_i = \sin^{-1} \left( \frac{n_1 r_1}{n_i r_{i+1}} \sin \beta_1 \right) \quad (19c)$$

在地对空方向，当无线电折射率梯度 $dN/dh$ 小于 $-157$  N-units/km时（当世界上的某些易受波导条件影响的区域的无线电探空仪数据被用作大气剖面图时可能发生），公式(19a)或(19b)和(19c)在初始视在仰角 $< 1^\circ$ （即初始视在天顶角， $\beta_1, > 89^\circ$ ）的情况下可能无效。在这些情况下，无线电波被大气反射，遵循地球曲率（即在管道中行进），公式(19a)或(19b)和(19c)中的反正弦函数的自变量大于1。当采用ITU-R P.835建议书中的六个参考标准大气中的任何一个作为输入时，公式(19a)、(19b)和(19c)对所有非负视在仰角有效，因为这些参考大气没有波导的折射率梯度特性。

图4显示了以1 GHz步长计算的ITU-R P.835建议书中的全球年平均参考标准大气的天顶衰减。“标准”大气是 $\rho_o = 7.5 \text{ g/m}^3$ 的全球年平均参考大气，“干”大气是 $\rho_o = 0 \text{ g/m}^3$ 的全球年平均参考大气。

2.2.2 负视在仰角

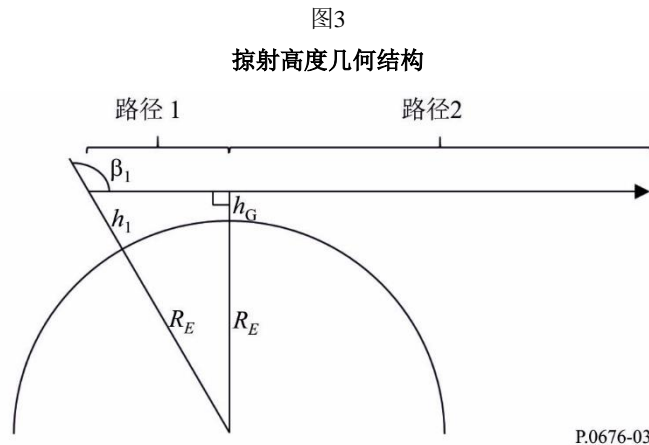
公式(13)假设地球站和空间电台之间的高度增加。然而，对于升高的地球站的负视在仰角，其高度沿地球站和最小掠射高度之间的传播路径降低，之后沿最小掠射高度和空间之间的传播路径增加。图3显示了高度 $h_1$ ，视在仰角为 $90^\circ - \beta_1$ 的地球站的这一情况。

在极坐标中，根据Snell定律：

$$n(h_G)(R_E + h_G) = n(h_1)(R_E + h_1) \sin \beta_1 \tag{20}$$

在这种情况下，掠射高度 $h_G$ 可通过迭代求解公式(20)确定。对于该特定大气剖面（通常是ITU-R P.835建议书的参考分布图之一），折射率 $n(h)$ 可通过ITU-R P.453建议书公式(1)和(2)确定。

净气体衰减是路径1和路径2的气体衰减总和。路径1为视在仰角为0度，在高度 $h_G$ 千米的虚拟地球站和在高度 $h_1$ 千米的实际地球站之间的气体衰减，路径2为视在仰角为0度，在高度 $h_G$ 千米的虚拟地球站和最大大气高度（通常为100千米）之间的气体衰减。



P.0676-03

2.2.3 空对地、地对空相互作用

对于空间电台和地球站之间的路径，当空间电台视在仰角 $\varphi_s$ 为负而地球站视在仰角为 $\varphi_e$ 时，视在仰角通过以下公式相关：

$$\varphi_s = -\cos^{-1} \left( \frac{r_e n_e}{r_s n_s} \cos \varphi_e \right) \tag{21a}$$

和

$$\varphi_e = \cos^{-1} \left( \frac{r_s n_s}{r_e n_e} \cos \varphi_s \right) \tag{21b}$$

其中， $n_e$ 是地球站高度的反射率， $r_e$ 是从地球中心到地球站的半径（ $r_e \geq R_E$ ）， $n_s$ 是空间电台高度的反射率， $r_s$ 是从地球中心到空间电台的半径（ $r_s > r_e$ ），若空间电台高度高于地表以上100千米，那么 $n_s = 1$ 。

由于通过大气的传播是相互的，当空间电台视在仰角为 $\varphi_s$ 时，空对地路径的气体衰减与地球站视在仰角为 $\varphi_e$ 的互反的地对空路径的气体衰减一致。因此，下行空对地路径的气体衰减可被计算为对应上行地对空路径的气体衰减。若 $\frac{r_s n_s}{r_e n_e} \cos \varphi_s > 1$ ，那么空对地路径不与地球相交。

### 2.2.4 大气弯曲

沿地对空路径的总大气弯曲*Bending*为:

$$Bending = \sum_{i=1}^{i_{max}-1} (\beta_{i+1} - \alpha_i) \quad (22a)$$

$$= \sum_{i=1}^{i_{max}-1} \left[ \sin^{-1} \left( \frac{n_1 r_1}{n_{i+1} r_{i+1}} \sin \beta_1 \right) - \sin^{-1} \left( \frac{n_1 r_1}{n_i r_{i+1}} \sin \beta_1 \right) \right] \quad (22b)$$

其中, 弯曲为正值意味着射线向地球弯曲。对于全球年平均参考大气, ITU-R P.834建议书的公式(9)与公式(22a)和(22b)近似。

### 2.2.5 过剩大气路径长度

由于对流层折射率大于1, 因此有效大气路径长度超过几何路径长度, 在这种情况下, 过剩大气路径长度 $\Delta L$ 为:

$$\Delta L = \sum_{i=1}^{i_{max}} a_i (n_i - 1) \quad (\text{km}) \quad (23)$$

过剩大气路径长度一词与ITU-R P.834建议书中的过剩无线电路径长度一词同义; ITU-R P.834建议书第6节提供了一种预估过剩无线电路径长度(由地点、一年中的某天和在仰角构成的函数)的方法。



图4

由大气气体造成的天顶衰减，以1 GHz为步长，包括谱线中心

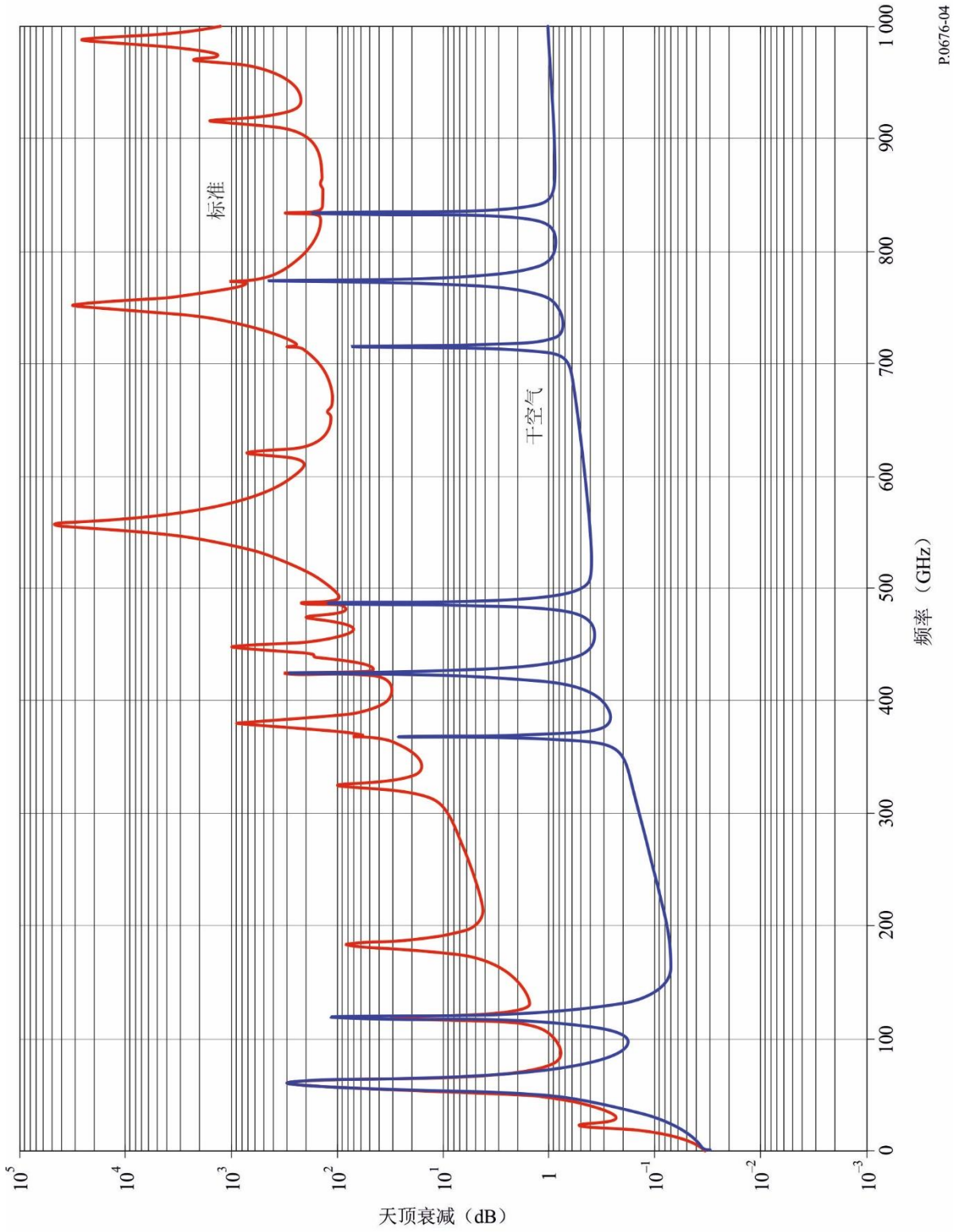
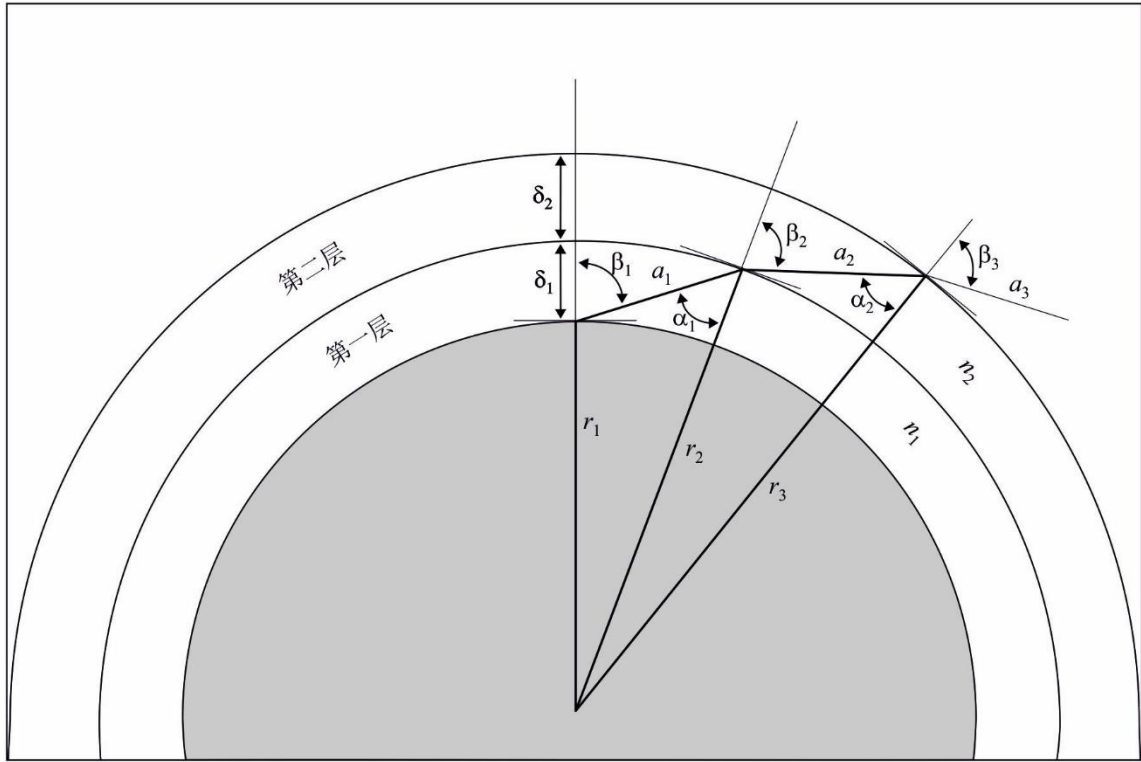


图5  
穿过大气的路径



P.0676-05

### 3 色散效应

除上段所述基于频率相关复折射率虚部的衰减外，氧气和水蒸气产生基于频率相关复折射率实部的色散。通过相对于频率的相位色散（deg/km）或相对于频率的群延迟（ps/km）对这一效应进行描述；与衰减类似，亦可计算倾斜路径色散。

与公式(1)类似，特定气体相位色散 $\varphi$ 由以下公式提供：

$$\varphi = \varphi_o + \varphi_w = -1.2008f(N'_{Oxygen}(f) + N'_{WaterVapour}(f)) \quad (\text{deg/km}) \quad (24)$$

其中， $\varphi_o$ 是干空气造成的特定相位色散(deg/km)， $\varphi_w$ 是水蒸气造成的特定相位色散； $f$ 是频率（GHz）； $N'_{Oxygen}(f)$ 和 $N'_{WaterVapour}(f)$ 是基于频率相关复折射率的实部：

$$N'_{Oxygen}(f) = \sum_i (Oxygen) S_i F'_i + N'_D(f) \quad (25a)$$

$$N'_{WaterVapour}(f) = \sum_i (WaterVapour) S_i F'_i \quad (25b)$$

其中：

$S_i$ 是从公式(3)得出的第*i*条氧气或水蒸气谱线强度， $F'_i$ 是氧气或水蒸气谱线形状因子的实部：

$$F'_i = \frac{f}{f_i} \left[ \frac{(f_i - f) + \delta \Delta f}{(f_i - f)^2 + \Delta f^2} - \frac{(f_i + f) + \delta \Delta f}{(f_i + f)^2 + \Delta f^2} \right] \quad (25c)$$

对表1和表2中的所有谱线进行求和。

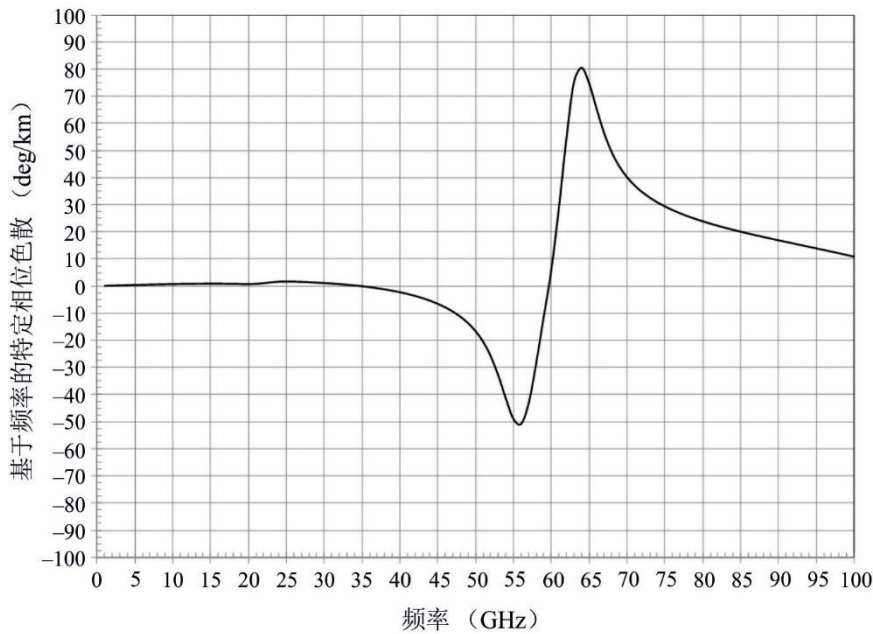
$N'_D(f)$ 是由气压造成的氮吸收产生的干空气连续吸收谱的实部：

$$N'_D(f) = \frac{-6.14 \times 10^{-5} p \theta^2 f^2}{f^2 + d^2} \quad (25d)$$

$\Delta f$ 在公式(6b)中定义， $\delta$ 在公式(7)中定义， $d$ 在公式(9)中定义

图6显示了标准大气 ( $p = 1\ 013.25\ \text{hPa}$ ,  $\rho = 7.5\ \text{g/m}^3$ ,  $T = 15^\circ\text{C}$ ) 的基于频率的特定相位色散。

图6  
标准大气的基于频率的特定相位色散  
( $p = 1\ 013.25\ \text{hPa}$ ,  $\rho = 7.5\ \text{g/m}^3$ ,  $T = 15^\circ\text{C}$ )



P.0676-06

#### 4 下行和上行微波亮温

微波亮温定义为无损天线输出端由于入射大气亮度而产生的噪声温度。噪声功率谱密度  $S(f)$ 和噪声温度  $T(f)$ 与  $S(f) = k T(f)$  相关，其中  $k$  是玻尔兹曼常数。可采用与公式(13)类似的公式来计算下行空对地微波亮温（仰视）和上行地对空微波亮温（俯视）。第一层通常是地球表面，第  $k$  层位于大气层顶部（通常100千米）。集总微波亮温是每个大气层的微波亮温乘以大气层和观测点之间的损耗的总和。假设大气处于局部热力学平衡，散射可以忽略不计。

在以下段落中， $T_B(f_{GHz}, T_j)$  是第  $j$  层的微波亮温，定义为：

$$T_B(f_{GHz}, T_j) = 0.048 f_{GHz} \left[ \frac{1}{\exp\left(\frac{0.048 f_{GHz}}{T_j}\right) - 1} \right] \quad (\text{K}) \quad (26)$$

其中 $T_j$ 是第 $j$ 层的物理温度。对于 $f_{GHz} < 0.42 T_j$ ,  $T_B(f_{GHz}, T_j)$ 可由 $T_j$ 十分近似地估计;  $\gamma_j$ 是公式(1)中给出的第 $j$ 层的特定衰减(dB/km),  $a_j$ 是通过公式(17)中给出的第 $j$ 层的路径长度(km)。

图7显示了物理温度 $T$ 和黑体源的微波亮温 $T_B$ 之间的差异。对于给定频率 $f_{GHz}$ , 随着物理温度 $T$ 增加,  $T - T_B \rightarrow 0.024 f_{GHz}$ 。

#### 4.1 下行微波亮温

如果已知沿路径的物理温度、气压和水蒸气的分布, 则下行微波亮温, 即a)因大气的衰减而衰减的宇宙微波亮温和b)下行大气微波亮温的总和, 可通过下式计算:

$$T_{downwelling} = T_B(f_{GHz}, 2.73) 10^{-\left(\frac{\sum_{j=1}^k a_j \gamma_j}{10}\right)} + \sum_{j=1}^k T_B(f_{GHz}, T_j) \left(10^{\frac{a_j \gamma_j}{10}} - 1\right) 10^{-\left(\frac{\sum_{i=1}^j a_i \gamma_i}{10}\right)} \quad (\text{K}) \quad (27)$$

但是, 使用以下递归方法将净微波亮温实现为递归可能更方便:

$$\text{第1步: 设定 } T_{B,downwelling} = 0.048 \left[ \frac{f_{GHz}}{\exp\left(\frac{0.048 f_{GHz}}{2.73}\right) - 1} \right] \quad (27a)$$

对 $j = k$ 到 $j = 1$ 重复步骤2到5, 在每次迭代中将 $j$ 递减1:

$$\text{第2步: 设定 } T_{B,downwelling,last} = T_{B,downwelling} \quad (27b)$$

$$\text{第3步: 设定 } T_B = 0.048 \left[ \frac{f_{GHz}}{\exp\left(\frac{0.048 f_{GHz}}{T_j}\right) - 1} \right] \quad (27c)$$

$$\text{第4步: 设定 } L_j = 10^{\frac{-a_j \gamma_j}{10}} \quad (27d)$$

$$\text{第5步: 设定 } T_{B,downwelling} = [T_{B,downwelling,last} L_j + (1 - L_j) T_B] \quad (27e)$$

其中, 2.73 K是大气层外宇宙微波背景黑体温度。

图8显示了天顶路径和标准大气的下行微波亮温。

如果分布未知, 可采用ITU-R P.618建议书附件1第3节的方法来估算包括总大气衰减的其他影响在内的下行微波亮温。

ITU-R P.372建议书可被用于确定源自亮温的地球站系统噪声温度。

#### 4.2 上行微波亮温

净上行微波亮温, 即a)上行大气微波亮温, b)因净大气衰减而衰减的地表反射的下行大气微波亮温和c)因大气衰减而衰减的地表上行微波亮温的总和, 可通过下式计算:

$$T_{B,upwelling} = (\epsilon T_B(f_{GHz}, T_{Earth}) + \rho T_{downwelling}) \times 10^{-\left(\frac{\sum_{j=1}^k a_j \gamma_j}{10}\right)} + \sum_{j=1}^k T_B(f_{GHz}, T_j) \left(10^{\frac{a_j \gamma_j}{10}} - 1\right) 10^{-\left(\frac{\sum_{i=j}^k a_i \gamma_i}{10}\right)} \quad (\text{K}) \quad (28)$$

但是，使用以下递归方法将净微波亮温实现为递归可能更方便：

第1步：设定  $T_{B,upwelling} = \epsilon \cdot 0.048 \left[ \frac{f_{GHz}}{\exp\left(\frac{0.048 f_{GHz}}{T_{Earth}}\right)} - 1 \right] + \rho T_{B,downwelling}$  (28a)

对  $j = 1$  到  $j = k$  重复步骤2到5，在每次迭代中将  $j$  增加1：

第2步：设定  $T_{B,upwelling,last} = T_{B,upwelling}$  (28b)

第3步：设定  $T_B = 0.048 \left[ \frac{f_{GHz}}{\exp\left(\frac{0.048 f_{GHz}}{T_j}\right)} - 1 \right]$  (28c)

第4步：设定  $L_j = 10^{-\frac{a_j \nu_j}{10}}$  (28d)

第5步：设定  $T_{B,upwelling} = [T_{B,upwelling,last} L_j + (1 - L_j) T_B]$  (28e)

其中：

$\epsilon$ ： 地表的发射率

$\rho$ ： 地表的反射率

$\rho = 1 - \epsilon。$

在缺少局部数据或其他指导原则的情况下， $\epsilon$ 值可采用0.95。

图9显示了天顶路径和标准（即，全球年平均参考大气）的上行微波亮温，其中 $\epsilon = 0.95$ ,  $\rho = 0.05$ ,  $T_{Earth} = 290$  K。

图7

黑体源的物理和微波亮温之间的差异

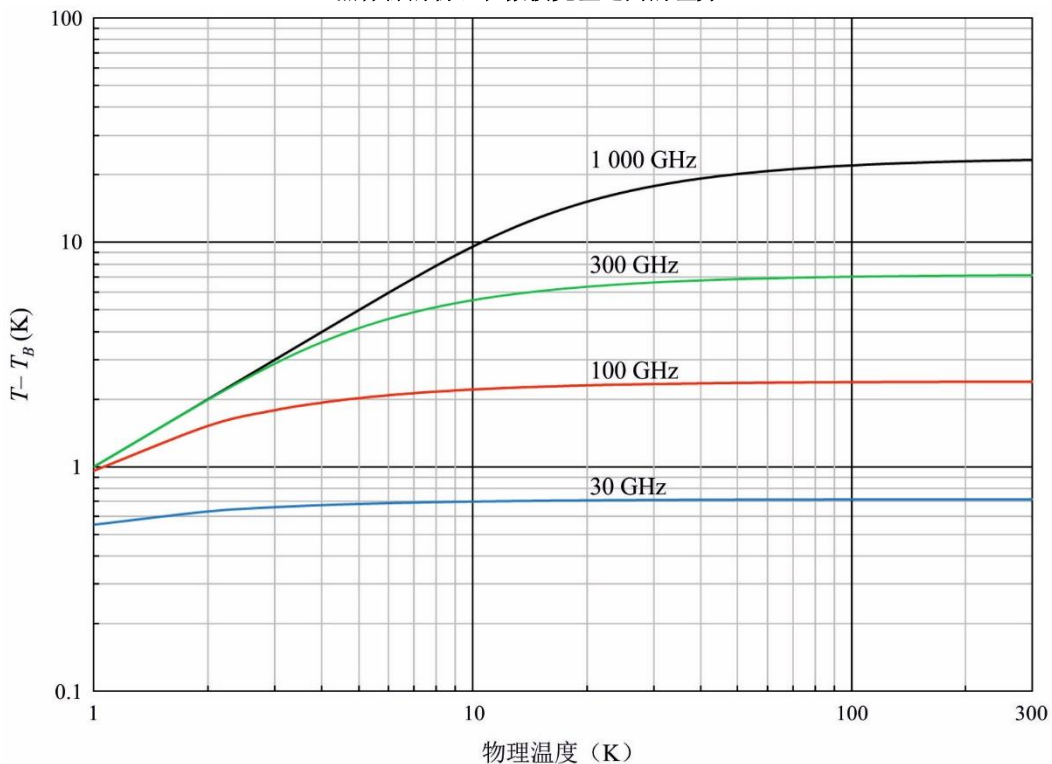


图8

标准大气（1 GHz中心）的天顶下行微波亮温

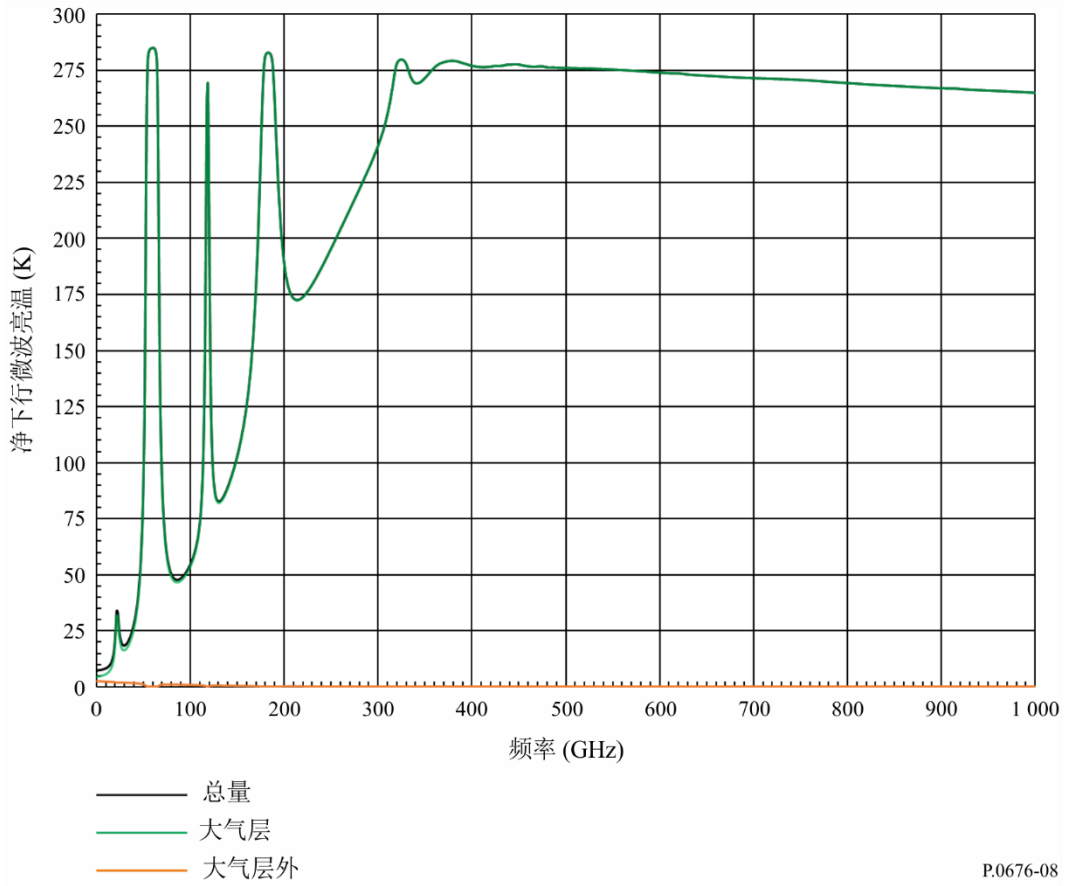
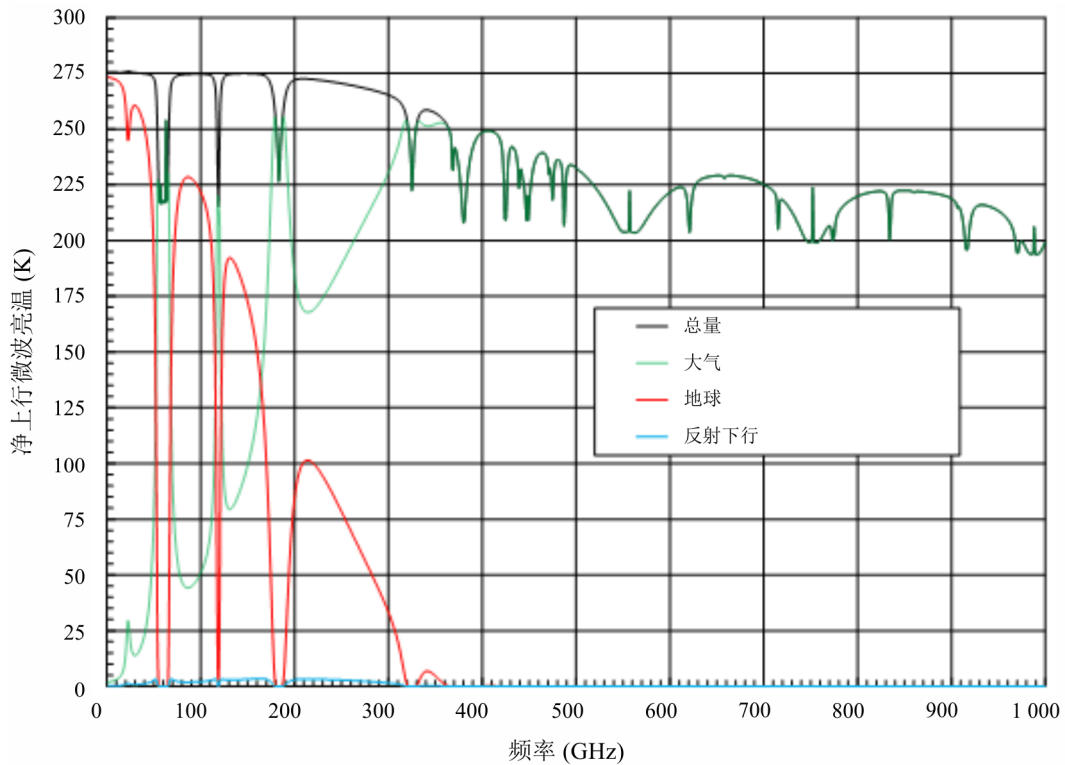


图9

标准大气（1 GHz中心）的天顶上行微波亮温



P.0676-09

## 5 使用垂直大气剖面的倾斜路径衰减

ITU-R P.835建议书附件3中的任何具体剖面分布的倾斜路径气体衰减可采用附件1第2.2节的程序计算，注意以下几点：

- 1) 采用公式(4)，将水蒸气密度 $\rho$ 转换为水蒸气分压 $e$ 。
- 2) 通过减去水蒸气分压 $e$ ，将总气压( $p_{tot} = p_{dry} + e$ )转换为干空气气压 $p_{dry}$ 。
- 3) 采用公式(13)计算总衰减；指数层厚度在公式(14)中规定。
- 4) 若无法获得高于平均海平面的地表高度的局部数据，可从ITU-R P.1511建议书中获取估算值。
- 5) 公式(13)的求和范围是从高于平均海平面的地表高度到数据集中的最大高度。
- 6) 每个剖面中的第32层应根据公式(14)中定义的每指数层厚度内插和外推（至地球表面，如需要），假设：
  - a) 气压与高度的对数之间的线性关系。
  - b) 温度与高度之间的线性关系。
  - c) 水蒸气密度与高度的对数之间的线性关系。

如需要，ITU-R P.834建议书附件1的公式(24a)至(24c)（以及相关地图）可被用于这些剖面的内插和外推。

- 7) 在地球表面或接近地球表面的仰角是视在仰角而非自由空间仰角。对于小于或等于10度的自由空间仰角，可采用ITU-R P.834建议书的公式(13)，通过自由空间仰角计算视在仰角。
- 8) 网格点之间的任何经纬度的倾斜路径气体衰减估算可采用ITU-R P.1144建议书附件1的程序，通过网格点周围的倾斜路径气体衰减的相应估值的双线性插值来估算。在每个周围网格点的倾斜路径气体衰减范围应从该经纬度的地球表面高于平均海平面的高度到每个剖面的最大高度。

## 附件2

### 1-350 GHz频率范围内倾斜路径的气体衰减

#### 符号列表

$A_o$	氧气造成的倾斜路径气体衰减
$A_w$	水蒸气造成的倾斜路径气体衰减
$A_{total}$	倾斜路径总气体衰减
$N_{oxygen}''$	氧气的复折射率造成的虚部
$N_{water\ vapour}''$	水蒸气的复折射率造成的虚部
$\theta$	仰角
$p$	超标概率
$\gamma_o$	氧气造成的比气体衰减
$\gamma_w$	水蒸气造成的比气体衰减
$f$	频率
$P_s$	瞬时总（气压）地表压力
$P_s(p)$	总地表压力与超标概率的关系
$p_s$	瞬时干地表压力
$\overline{p_s}$	平均干地表压力
$T_s$	瞬时地表温度
$\overline{T_s}$	平均地表温度
$T_s(p)$	地表温度与超标概率的关系
$\rho_{w_s}$	瞬时地表水蒸气密度
$\overline{\rho_{w_s}}$	平均地表水蒸气密度
$\rho_{w_s}(p)$	地表水蒸气密度与超标概率的关系
$e_s$	瞬时水蒸气分压



$\bar{e}_s$	平均水蒸气分压
$V_s$	平均综合水蒸气含量
$V_s(p)$	综合水蒸气含量与超标概率的关系
$a_o, b_o, c_o, d_o$	$h_o$ 的系数
$h_o$	氧当量高度
$A, B, f_i, a_i, b_i$	$h_w$ 的系数
$h_w$	水蒸气当量高度
$a_v, b_v, c_v, d_v$	$K_v$ 的系数
$K_v$	水蒸气质量吸收系数
$k_{V_s}$	综合水蒸气含量威布尔形状参数
$\lambda_{V_s}$	综合水蒸气含量的威布尔尺度参数

本附件包含预测频率为1至350 GHz，仰角为5度及以上的地球表面和空间之间倾斜路径气体衰减的预测方法。预测方法包括瞬时预测方法，其中局部总（气压）地表压力、地表温度和地表水蒸气密度或综合水蒸气含量（见脚注1）是已知的（例如来自气象站或无线电探空仪数据）；和统计数据预测方法，其中总（气压）地表压力、地表温度、地表水蒸气密度、综合水蒸气含量以及威布尔尺度和形状参数的超标概率可从长期局部数据或ITU-R P.2145建议书中内置的地图中获得。提供了水蒸气造成的倾斜路径气体衰减的Weibull近似值，供用于ITU-R P.1853建议书。

净倾斜路径气体衰减是氧气造成的倾斜路径气体衰减 $A_o$ 和水蒸气造成的倾斜路径气体衰减 $A_w$ 之和；即 $A_{total} = A_o + A_w$ 。瞬时和统计倾斜路径气体衰减预测方法总结在表3中。与附件1类似，这些预测方法不包括氧同位素、振动激发氧、臭氧、臭氧同位素、振动激发臭氧和其他微量分子造成的气体衰减。这些大气成分引起的气体衰减对于地球表面和空间之间的典型倾斜路径而言相对微不足道。

## 1 倾斜路径氧气衰减预测方法

氧气造成的倾斜路径气体衰减有两种预测方法：

- 1) 如第1.1节所述，一种瞬时预测方法，其中总（大气）地表压力、地表温度和地表水蒸气密度可从瞬时局部测量数据中获知；和
- 2) 如第1.2节所述，一种统计预测方法，其中总（大气）地表压力、地表温度和地表水蒸气密度的统计数据已知，来自本地数据或来自ITU-R P.2145建议书中内置的地图。

表3

瞬时和统计倾斜路径气体衰减预测方法总结

	瞬时预测方法	统计预测方法
氧气衰减	1.1节 $A_o(f, P_s, T_s, \rho_{w_s}) = \frac{\gamma_o(f, p_s, T_s, e_s) \cdot h_o(f, P_s, T_s, \rho_{w_s})}{\sin \theta}$ 其中: $h_o(f, P_s, T_s, \rho_{w_s}) = a_o(f) + b_o(f) \cdot T_s + c_o(f) \cdot P_s + d_o(f) \cdot \rho_{w_s}$ 且: $e_s = \frac{\rho_{w_s} T_s}{216.7}; \quad p_s = P_s - e_s$	1.2节 $A_o(f, p) = \frac{\gamma_o(f, \bar{p}_s, \bar{T}_s, \bar{e}_s) \cdot h_o(f, P_s(p), T_s(p), \rho_{w_s}(p))}{\sin \theta}$ 其中: $h_o(f, P_s(p), T_s(p), \rho_{w_s}(p)) = a_o(f) + b_o(f) \cdot T_s(p) + c_o(f) \cdot P_s(p) + d_o(f) \cdot \rho_{w_s}(p)$ 且: $\bar{e}_s = \frac{\bar{\rho}_{w_s} \bar{T}_s}{216.7}; \quad \bar{p}_s = \bar{P}_s - \bar{e}_s$
水蒸气衰减	2.1节 $A_w(f, p_s, T_s, \rho_{w_s}) = \frac{\gamma_w(f, p_s, T_s, e_s) \cdot h_w(f)}{\sin \theta}$ 其中: $h_w(f) = A \cdot f + B + \sum_{i=1}^3 \frac{a_i}{(f - f_i)^2 + b_i}$ 且: $e_s = \frac{\rho_{w_s} T_s}{216.7}; \quad p_s = P_s - e_s$	
	2.2节 $A_w(f, P_s, T_s, \rho_{w_s}) = \frac{K_V(f, P_s, T_s, \rho_{w_s}) \cdot V_s}{\sin \theta}$ 其中: $K_V(f, P_s, T_s, \rho_{w_s}) = a_V(f) + b_V(f) \cdot \rho_{w_s} + c_V(f) \cdot T_s + d_V(f) \cdot P_s$	2.3节 $A_w(f, p) = \frac{K_V(f, \bar{P}_s, \bar{T}_s, \bar{\rho}_{w_s}) \cdot V_s(p)}{\sin \theta}$ 其中: $K_V(f, \bar{P}_s, \bar{T}_s, \bar{\rho}_{w_s}) = a_V(f) + b_V(f) \cdot \bar{\rho}_{w_s} + c_V(f) \cdot \bar{T}_s + d_V(f) \cdot \bar{P}_s$

### 1.1 倾斜路径瞬时氧气气体衰减预测方法

预测的氧气造成的倾斜路径瞬时气体衰减 $A_o$ 为:

$$A_o(f, P_s, T_s, \rho_{w_s}) = \frac{\gamma_o(f, p_s, T_s, e_s) \cdot h_o(f, P_s, T_s, \rho_{w_s})}{\sin \theta} \quad (29)$$

其中:

- $f$ : 相关频率, 单位为GHz
- $P_s$ : 所需位置的瞬时总(大气)地表压力, 单位为hPa
- $e_s$ : 所需位置的瞬时地表水蒸气分压, 单位为hPa, 其中 $e_s = \frac{\rho_{w_s} T_s}{216.7}$
- $p_s$ : 所需位置的瞬时干地表压力, 单位为hPa,  $p_s = P_s - e_s$
- $T_s$ : 所需位置的瞬时地表温度, 单位为K
- $\rho_{w_s}$ : 所需位置的瞬时地表水蒸气密度, 单位为 $\text{g/m}^3$
- $\theta$ : 仰角
- $\gamma_o$ : 氧气造成的比气体衰减, 单位为dB/km, 由下式给定:

$$\gamma_o = 0.1820 f N''_{\text{oxygen}}(f) \quad (30)$$

$N''_{\text{oxygen}}(f)$ 为附件1等式(2a)给出的氧复无线电折射率的虚部; 且:

$$h_o(f, P_s, T_s, \rho_{w_s}) = a_o(f) + b_o(f) \cdot T_s + c_o(f) \cdot P_s + d_o(f) \cdot \rho_{w_s} \quad (31)$$

相关频率的系数 $a_o$ 、 $b_o$ 、 $c_o$ 和 $d_o$ 应在数据文件第1部分的频率之间进行线性插值, 该部分是本建议书的组成部分<sup>3</sup>。该数据文件包含1 GHz至350 GHz之间以0.5 GHz为增量的频率和118.75 GHz附加频率的系数 $a_o$ 、 $b_o$ 、 $c_o$ 和 $d_o$ 。

### 1.2 倾斜路径统计数据氧气气体衰减预测方法

预测的氧气造成的倾斜路径统计数据气体衰减 $A_o$ 为:

$$A_o(f, p) = \frac{\gamma_o(f, \bar{p}_s, \bar{T}_s, \bar{e}_s) \cdot h_o(f, P_s(p), T_s(p), \rho_{w_s}(p))}{\sin \theta} \quad (32)$$

其中:

- $f$ : 相关频率, 单位为GHz
- $\bar{P}_s$ : 所需位置的平均总(大气)地表压力, 单位为hPa
- $\bar{e}_s$ : 所需位置的平均地表水蒸气分压, 单位为hPa

其中:

- $\bar{e}_s = \frac{\bar{\rho}_{w_s} \bar{T}_s}{216.7}$
- $\bar{p}_s$ : 所需位置的平均干地表压力, 单位为hPa,  $\bar{p}_s = \bar{P}_s - \bar{e}_s$
- $\bar{T}_s$ : 所需位置的平均地表温度, 单位为K
- $\bar{\rho}_{w_s}$ : 所需位置的平均地表水蒸气密度, 单位为 $\text{g/m}^3$

<sup>3</sup> 数据文件第1和第2部分可在此查阅: <https://www.itu.int/oth/R1101000002/en>

- $p$ : 相关的超标概率 (CCDF)<sup>4</sup>, 以%表示
- $P_s(p)$ : 在所需位置超标概率为 $p$ 时的总 (大气) 地表压力, 以hPa为单位
- $T_s(p)$ : 在所需位置超标概率为 $p$ 时的地表温度, 单位为K
- $\rho_{w_s}(p)$ : 在所需位置超标概率为 $p$ 时的地表水蒸气密度, 单位为 $\text{g/m}^3$
- $\theta$ : 仰角
- $\gamma_o$ : 氧气造成的比气体衰减, 单位为dB/km, 由下式给定:

$$\gamma_o = 0.1820 f N''_{\text{oxygen}}(f) \quad (33)$$

$N''_{\text{oxygen}}(f)$ 为附件1等式(2a)给出的氧复无线电折射率的虚部; 且:

$$h_o(f, P_s(p), T_s(p), \rho_{w_s}(p)) = a_o(f) + b_o(f) \cdot T_s(p) + c_o(f) \cdot P_s(p) + d_o(f) \cdot \rho_{w_s}(p) \quad (34)$$

相关频率的系数 $a_o$ 、 $b_o$ 、 $c_o$ 和 $d_o$ 应在数据文件第1部分的频率之间进行线性插值, 该部分是本建议书的组成部分。该数据文件包含1 GHz至350 GHz之间以0.5 GHz为增量的频率和118.75 GHz附加频率的系数 $a_o$ 、 $b_o$ 、 $c_o$ 和 $d_o$ 。

## 2 倾斜路径水蒸气气体衰减预测方法

水蒸气造成的倾斜路径气体衰减有四种预测方法:

- 1) 如第2.1节所述, 一种瞬时预测方法, 其中总 (大气) 地表压力、地表温度和地表水蒸气密度可从瞬时局部测量数据中获知;
- 2) 如第2.2节所述, 一种瞬时预测方法, 其中总 (大气) 地表压力、地表温度、地表水蒸气密度和综合水蒸气含量可从瞬时局部测量数据中获知;
- 3) 如第2.3节所述, 一种统计预测方法, 其中总 (大气) 地表压力、地表温度、地表水蒸气密度和综合水蒸气含量的统计数据已知, 来自所需位置的本地数据或来自ITU-R P.2145建议书中内置的地图; 以及
- 4) 如第2.4节所述, 倾斜路径统计预测方法的Weibull近似, 其中Weibull尺度和形状参数已知, 来自所需位置的本地数据或来自ITU-R P.2145建议书中内置的地图。

如果瞬时地表水蒸气密度和瞬时综合水汽含量同时可用, 应使用采用瞬时综合水汽含量的瞬时水蒸气预测方法。

### 2.1 倾斜路径瞬时水蒸气气体衰减预测方法

预测的水蒸气造成的倾斜路径瞬时气体衰减 $A_w$ 为:

$$A_w(f, p_s, T_s, \rho_{w_s}) = \frac{\gamma_w(f, p_s, T_s, e_s) \cdot h_w(f)}{\sin \theta} \quad (35)$$

其中:

- $f$ : 相关频率, 单位为GHz
- $P_s$ : 所需位置的瞬时总 (大气) 地表压力, 单位为hPa
- $e_s$ : 所需位置的瞬时地表水蒸气分压, 单位为hPa, 其中 $e_s = \frac{\rho_{w_s} T_s}{216.7}$

<sup>4</sup> 超标概率与互补累积分布函数 (CCDF) 同义。

- $p_s$ : 所需位置的瞬时干地表压力, 单位为hPa,  $p_s = P_s - e_s$   
 $T_s$ : 所需位置的瞬时地表温度, 单位为K  
 $\rho_{w_s}$ : 所需位置的瞬时地表水蒸气密度, 单位为g/m<sup>3</sup>  
 $\theta$ : 仰角  
 $\gamma_w$ : 水蒸气造成的比气体衰减, 单位为dB/km, 由下式给定:

$$\gamma_w = 0.1820 f N''_{water\ vapour}(f) \quad (36)$$

$N''_{water\ vapour}(f)$ 为附件1等式(2b)给出的水蒸气复无线电折射率的虚部; 且:

$$h_w(f) = A \cdot f + B + \sum_{i=1}^3 \frac{a_i}{(f-f_i)^2 + b_i} \quad (37)$$

其中 $A = 5.6585 \times 10^{-5}$ ,  $B = 1.8348$ 且系数 $f_i$ 、 $a_i$ 和 $b_i$ 示于表4。

表4

系数 $f_i$ 、 $a_i$ 和 $b_i$ 

$i$	$f_i$ (GHz)	$a_i$	$b_i$
1	22.235080	2.6846	2.7649
2	183.310087	5.8905	4.9219
3	325.152888	2.9810	3.0748

## 2.2 倾斜路径瞬时水蒸气气体衰减预测方法2

预测的水蒸气造成的倾斜路径瞬时气体衰减 $A_w$ 为:

$$A_w(f, P_s, T_s, \rho_{w_s}) = \frac{K_V(f, P_s, T_s, \rho_{w_s}) \cdot V_s}{\sin \theta} \quad (38)$$

其中:

- $f$ : 相关频率, 单位为GHz  
 $P_s$ : 所需位置的瞬时总(大气)地表压力, 单位为hPa  
 $T_s$ : 所需位置的瞬时地表温度, 单位为K  
 $\rho_{w_s}$ : 所需位置的瞬时地表水蒸气密度, 单位为g/m<sup>3</sup>  
 $V_s$ : 地表以上所需位置的综合水蒸气含量, 单位为kg/m<sup>2</sup>或mm  
 $\theta$ : 仰角

且

$$K_V(f, P_s, T_s, \rho_{w_s}) = a_V(f) + b_V(f) \cdot \rho_{w_s} + c_V(f) \cdot T_s + d_V(f) \cdot P_s \quad (39)$$

相关频率的系数 $a_V$ 、 $b_V$ 、 $c_V$ 和 $d_V$ 应在数据文件第2部分的频率之间进行线性插值, 该部分是本建议书的组成部分<sup>5</sup>。数据文件的第2、3、4和5列分别包含第1列中1 GHz至350 GHz之间以0.5 GHz为增量的频率的系数 $a_V$ 、 $b_V$ 、 $c_V$ 和 $d_V$ 。

<sup>5</sup> 数据文件第1和第2部分可在此查阅: <https://www.itu.int/oth/R1101000002/en>

### 2.3 倾斜路径统计数据水蒸气气体衰减预测方法

预测的水蒸气造成的倾斜路径统计数据气体衰减 $A_w$ 为:

$$A_w(f, p) = \frac{K_V(f, \bar{P}_s, \bar{T}_s, \bar{\rho}_{w_s}) \cdot V_s(p)}{\sin \theta} \quad (40)$$

其中:

- $f$ : 相关频率, 单位为GHz
- $\bar{P}_s$ : 所需位置的平均总(大气)地表压力, 单位为hPa
- $\bar{T}_s$ : 所需位置的平均地表温度, 单位为K
- $\bar{\rho}_{w_s}$ : 所需位置的平均地表水蒸气密度, 单位为g/m<sup>3</sup>
- $p$ : 相关的超标概率(CCDF), 以%表示
- $V_s(p)$ : 地表以上所需位置超标概率为 $p$ 时的综合水蒸气含量, 单位为kg/m<sup>2</sup>或mm
- $\theta$ : 仰角

且

$$K_V(f, \bar{P}_s, \bar{T}_s, \bar{\rho}_{w_s}) = a_V(f) + b_V(f) \cdot \bar{\rho}_{w_s} + c_V(f) \cdot \bar{T}_s + d_V(f) \cdot \bar{P}_s \quad (41)$$

相关频率的系数 $a_V$ 、 $b_V$ 、 $c_V$ 和 $d_V$ 应在数据文件第2部分的频率之间进行线性插值, 该部分是本建议书的组成部分。数据文件的第2、3、4和5列分别包含第1列中1 GHz至350 GHz之间以0.5 GHz为增量的频率的系数 $a_V$ 、 $b_V$ 、 $c_V$ 和 $d_V$ 。

### 2.4 倾斜路径统计数据水蒸气气体衰减的威布尔近似

水蒸气造成的预测倾斜路径统计数据气体衰减的威布尔近似值 $A_w$ 为:

$$A_w(f, p) = \frac{\lambda_{V_s} \cdot K_V(f, \bar{P}_s, \bar{T}_s, \bar{\rho}_{w_s}) \cdot \left[ -\ln\left(\frac{p}{100}\right) \right]^{\frac{1}{k_{V_s}}}}{\sin \theta} \quad (42)$$

其中:

- $f$ : 相关频率, 单位为GHz
- $\bar{P}_s$ : 所需位置的平均总(大气)地表压力, 单位为hPa
- $\bar{T}_s$ : 所需位置的平均地表温度, 单位为K
- $\bar{\rho}_{w_s}$ : 所需位置的平均地表水蒸气密度, 单位为g/m<sup>3</sup>
- $p$ : 相关的超标概率(CCDF), 以%表示
- $\lambda_{V_s}$ : 所需位置的地表威布尔水蒸气尺度参数
- $k_{V_s}$ : 所需位置的地表威布尔水蒸气形状参数
- $\theta$ : 仰角

且

$$K_V(f, \bar{P}_s, \bar{T}_s, \bar{\rho}_{w_s}) = a_V(f) + b_V(f) \cdot \bar{\rho}_{w_s} + c_V(f) \cdot \bar{T}_s + d_V(f) \cdot \bar{P}_s \quad (43)$$

相关频率的系数 $a_V$ 、 $b_V$ 、 $c_V$ 和 $d_V$ 应在数据文件第2部分的频率之间进行线性插值, 该部分是本建议书的组成部分。数据文件的第2、3、4和5列分别包含第1列中1 GHz至350 GHz之间以0.5 GHz为增量的频率的系数 $a_V$ 、 $b_V$ 、 $c_V$ 和 $d_V$ 。