

国 际 电 信 联 盟

ITU-R

国际电联无线电通信部门

ITU-R P.676-10 建议书
(09/2013)

无线电波在大气气体中的衰减

P 系列
无线电波传播



前言

无线电通信部门的职责是确保卫星业务等所有无线电电信业务合理、平等、有效、经济地使用无线电频谱，不受频率范围限制地开展研究并在此基础上通过建议书。

无线电通信部门的规则和政策职能由世界或区域无线电通信大会以及无线电通信全会在研究组的支持下履行。

知识产权政策（IPR）

ITU-R的IPR政策述于ITU-R第1号决议的附件1中所参引的《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/en>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/en>）

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

说明： 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
2014年，日内瓦

© 国际电联 2014

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.676-10建议书

无线电波在大气气体中的衰减

(ITU-R第201/3号课题)

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

范围

本建议书提供对地面和斜径大气气体衰减进行评估的方法:

- a) 通过在1-1 000 GHz 频率范围内有效的、对独立吸收线进行仿真计算得出的大气衰减进行评估;
- b) 使用简化的近似值法, 对1-350 GHz频率范围内适用的大气衰减进行评估。

国际电联无线电通信全会,

考虑到

- a) 评估无线电波在地球表面和倾斜路径由于大气气体造成衰减的必要性,

建议

- 1 对于一般应用, 最高至1 000 GHz频率上, 应采用附件1中的方法来计算大气气体造成的衰减;
- 2 1-350 GHz频率范围, 应采用附件2中计算强度比较小的方法计算大气气体造成衰减的近似值。

附件 1**逐线计算无线电波在大气气体中的衰减****1 特征衰减**

最高至1 000 GHz频率上的无线电波在大气中的特征衰减主要由于干燥空气和水汽所造成。在任何压力、任何温度和任何湿度下, 采用累加氧气和水汽各自谐振线的方法, 可以相当准确地计算无线电波在大气气体中的特征衰减。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以下氧气的非谐振的Debye频谱, 100 GHz以上的主要由大气压力造成的氮气衰减和计算实验上发现的过多水汽吸收的潮湿连续带。下图1给出了在气压1013 hPa、温度15° C、水汽密度为7.5 g/m³ (曲线A) 和水汽密度为0的干燥空气 (曲线B) 两种情况下, 0-1 000 GHz频带的无线电波在大气中的特征衰减 (步长为1 GHz)。

图2详细给出了在60 GHz附近频率，在海平面的大气压力作用下，许多氧气吸收线合并形成一个宽的吸收带。该图也表明：在更高的高度上的氧气衰减，其各线在更低的压力上变得清晰。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它小动物）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，但对于干燥气体则可能非常重要。

附件2中列出了在有限的气象条件下的简化算法，在不需要特别高的准确性时，该方法可以快速和近似地计算最高到350 GHz频率的无线电波在大气中的衰减特性

特征大气衰减 γ 的计算方法如下：

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

其中： γ_o （单位dB/km）是干燥空气条件下的特征衰减（仅指氧气条件下，由于大气压力造成的氮和非谐振Debye衰减）。 γ_w （单位dB/km）是在一定水汽密度条件下的特征衰减。 f （单位GHz）是频率。 $N''(f)$ 是该频率相关的复合折射率的假设部分。

$$N''(f) = \sum_i S_i F_i + N''_D(f) \quad (2)$$

S_i 是第*i*线的强度， F_i 是曲线形状因子以及总和扩展至所有线（对于高于118.750343GHz氧气线的*f*频率而言，只应将高于60GHz复合率的氧气线包括在总结中）；总和应始于： $i = 38$ ，而不是*i* = 1； $N''_D(f)$ 是大气压力造成的氮气吸收和Debye频谱的干燥连续带；

线强度为：

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

其中：

P : 干燥空气压力，单位为hPa

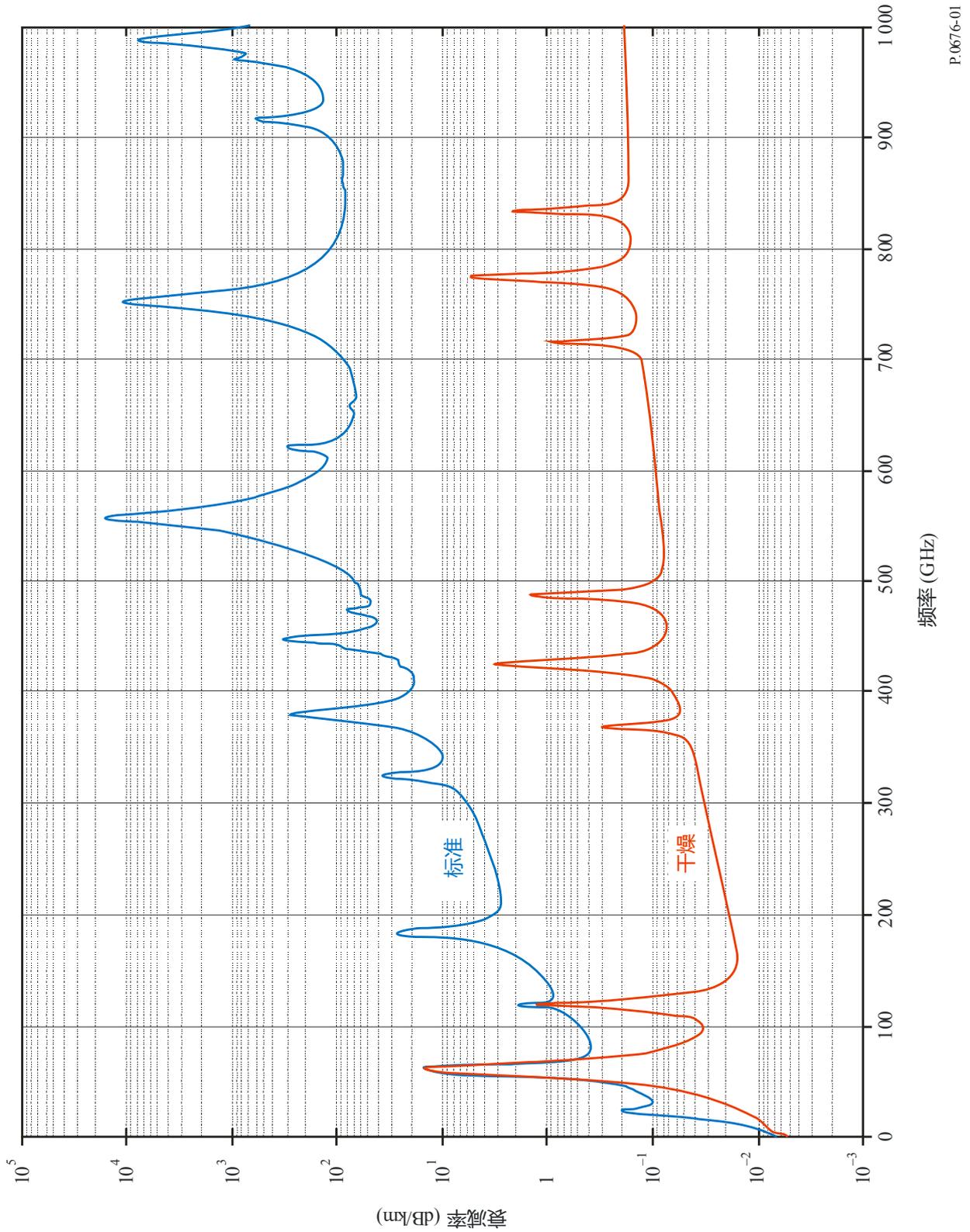
E : 水汽压力，单位为hPa（总大气压力 $p_{tot} = p + e$ ）

$\theta = 300/T$

T : 温度，单位为K。

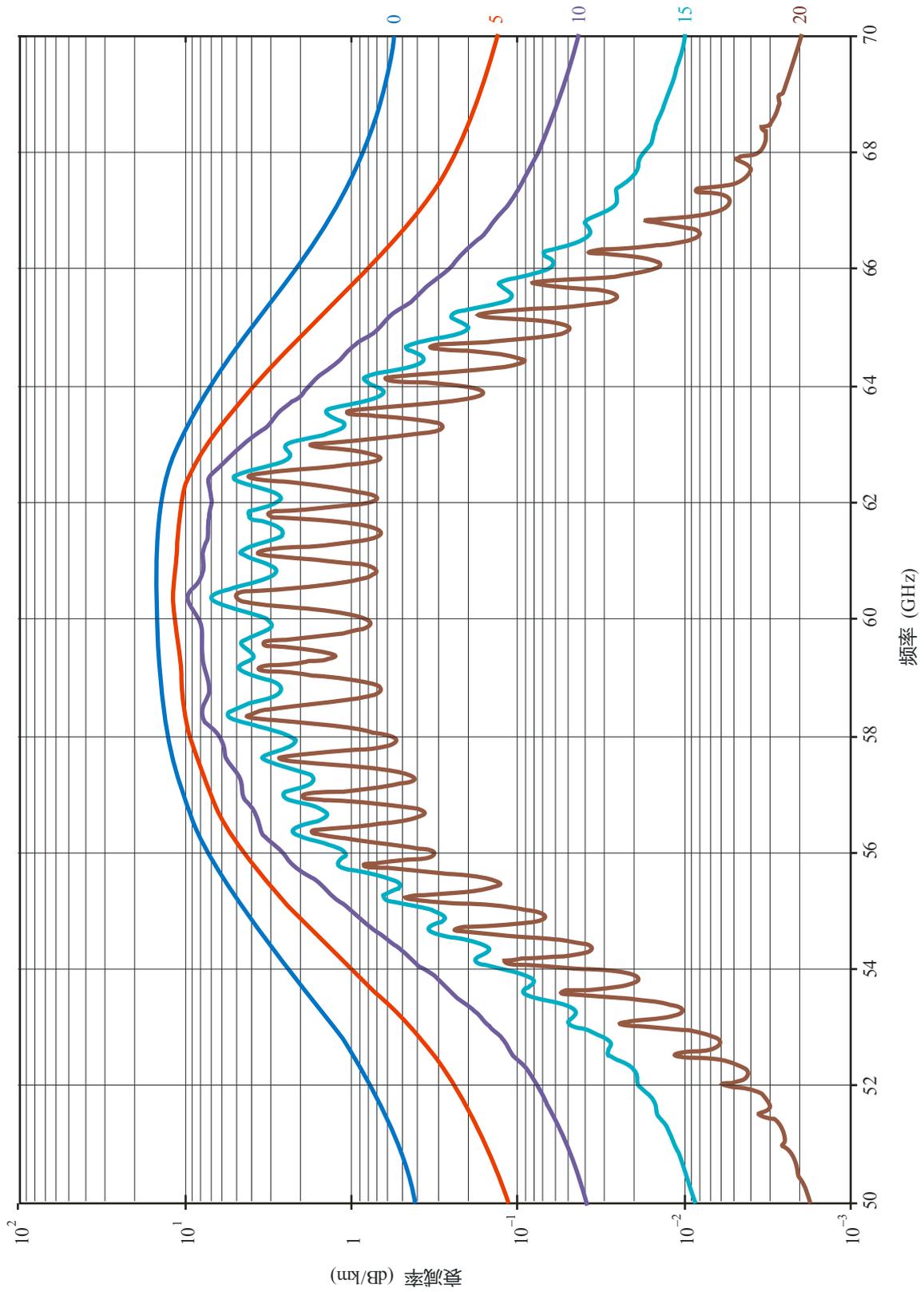
图 1

由于大气气体造成的无线电波的衰减率，以 1 GHz 为步长，包括线中心



P.0676-01

图 2
在 50-70 GHz 频带内所示高度区的衰减率



应使用 p , e 和 T 测得剖面（如应用无线电探空仪等）的当地测得的准确值，如缺少当地的准确资料，可采用 ITU-R P.835 建议书中的参考标准大气数据。（注意计算总大气衰减时，同样的水汽压力应被用于干燥空气的水汽衰减）

水汽压力 e 可通过水汽密度 ρ 计算得到，采用公式：

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

从表1中可得到在氧气中衰减的系数值 a_1 , a_2 ，从表2中可得到在水汽中衰减的系数值 b_1 , b_2 。

曲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 是线的频率， Δf 是线的宽度：

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

由于多普勒效应，线宽度 Δf 修正为：

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

由于在氧气线中的干扰影响， δ 是修正因子：

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

谱线系数值见表1和表2。

表1

在氧气中衰减的谱线数据

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 (完)

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

在水汽中衰减的谱线数据

f_0	b_1	b_2	b_3	b_4	b_5	b_6
22.235080	0.1130	2.143	28.11	.69	4.800	1.00
67.803960	0.0012	8.735	28.58	.69	4.930	.82
119.995940	0.0008	8.356	29.48	.70	4.780	.79
183.310091	2.4200	.668	30.50	.64	5.300	.85
321.225644	0.0483	6.181	23.03	.67	4.690	.54
325.152919	1.4990	1.540	27.83	.68	4.850	.74
336.222601	0.0011	9.829	26.93	.69	4.740	.61
380.197372	11.5200	1.048	28.73	.54	5.380	.89
390.134508	0.0046	7.350	21.52	.63	4.810	.55
437.346667	0.0650	5.050	18.45	.60	4.230	.48
439.150812	0.9218	3.596	21.00	.63	4.290	.52
443.018295	0.1976	5.050	18.60	.60	4.230	.50
448.001075	10.3200	1.405	26.32	.66	4.840	.67
470.888947	0.3297	3.599	21.52	.66	4.570	.65
474.689127	1.2620	2.381	23.55	.65	4.650	.64
488.491133	0.2520	2.853	26.02	.69	5.040	.72
503.568532	0.0390	6.733	16.12	.61	3.980	.43
504.482692	0.0130	6.733	16.12	.61	4.010	.45
547.676440	9.7010	.114	26.00	.70	4.500	1.00
552.020960	14.7700	.114	26.00	.70	4.500	1.00
556.936002	487.4000	.159	32.10	.69	4.110	1.00
620.700807	5.0120	2.200	24.38	.71	4.680	.68
645.866155	0.0713	8.580	18.00	.60	4.000	.50
658.005280	0.3022	7.820	32.10	.69	4.140	1.00
752.033227	239.6000	.396	30.60	.68	4.090	.84
841.053973	0.0140	8.180	15.90	.33	5.760	.45
859.962313	0.1472	7.989	30.60	.68	4.090	.84

表 2 (完)

f_0	b_1	b_2	b_3	b_4	b_5	b_6
899.306675	0.0605	7.917	29.85	.68	4.530	.90
902.616173	0.0426	8.432	28.65	.70	5.100	.95
906.207325	0.1876	5.111	24.08	.70	4.700	.53
916.171582	8.3400	1.442	26.70	.70	4.780	.78
923.118427	0.0869	10.220	29.00	.70	5.000	.80
970.315022	8.9720	1.920	25.50	.64	4.940	.67
987.926764	132.1000	.258	29.85	.68	4.550	.90
1 780.000000	22 300.0000	.952	176.20	.50	30.500	5.00

干燥连续带来自于10 GHz以下的氧气的非谐振的Debye频谱以及100 GHz以上的由压力造成的氮气衰减。

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

其中 d 是Debye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km。

2.2 倾斜路径衰减

对穿过不同压力、不同温度和不同湿度的大气线的无线电波，本节将给出一种方法总合采用上述逐线累加的方法得出的特征衰减。通过这种方法，在地球大气层内以及超出地球大气层的任何几何结构的通信系统的路径衰减都可以非常准确的计算出来：将大气细分为许多水平的层，规定沿路径的气象参数压力、温度和湿度的剖面。如果缺少无线电探空仪测得的当地的剖面数据，对于采用全球应用或低高度（年）、中高度（夏冬）和高高度（夏冬），应采用ITU-R P.835建议书中的参考标准大气。

图3给出了计算大气天顶衰减的模式，该模式采用ITU-R P.835建议书中的全球参考标准大气，以1 km间隔分层，以1 GHz为步长，累加每一层大气衰减值。潮湿大气的曲线为A曲线，干燥空气的曲线为B曲线。

总的倾斜路径衰减值 $A(h, \varphi)$ ，根据电台的海拔高度 h 和仰角 φ 计算如下：

当仰角 $\varphi \geq 0$ 时：

$$A(h, \varphi) = \int_h^{\infty} \frac{\gamma(H)}{\sin \Phi} dH \quad (11)$$

基于Snell's定律，在极化坐标下，其中 Φ 为：

$$\Phi = \arccos \left(\frac{c}{(r+H) \times n(H)} \right) \quad (12)$$

其中：

$$c = (r+h) \times n(h) \times \cos \varphi \quad (13)$$

$n(h)$ 为大气无线电折射率，可由该路径的压力、温度和水汽压力（见ITU-R P.835建议书）采用ITU-R P.453建议书的方法计算。

另外，当 $\varphi < 0$ 时，有一个最小海拔高度 h_{min} ，在这个高度上，无线电波束将平行于地球表面传播。 h_{min} 可通过解下面的超越方程得到：

$$(r+h_{min}) \times n(h_{min}) = c \quad (14)$$

这个方程可通过重复下面的计算容易求解，采用 $h_{min} = h$ 做初始值：

$$h'_{min} = \frac{c}{n(h_{min})} - r \quad (15)$$

因此， $A(h, \varphi)$ 计算如下：

$$A(h, \varphi) = \int_{h_{min}}^{\infty} \frac{\gamma(H)}{\sin \Phi} dH + \int_{h_{min}}^h \frac{\gamma(H)}{\sin \Phi} dH \quad (16)$$

在合并(11)和(16)式时,应当注意,当 $\Phi = 0$ 时,被积函数将为无穷大。通过适当的变换可以消除这个特例,如在(11)式中令 $u^4 = H - h$,在(16)式中令 $u^4 = H - h_{min}$ 。

无线电波在大气中的衰减的数量上的解决方案采用以下算法。

为了计算卫星链路的总大气衰减,不但要知道该路径所经过的每一点的特征衰减,还要知道整个路径的长度。路径长度的计算必须考虑球面形地球上出现的射线弯曲。

采用图4作为参考: a_n 是无线电波束在第 n 层内穿越的长度, δ_n 是第 n 层的厚度, n_n 是第 n 层的折射率, α_n 和 β_n 为第 n 层的入射和出射角。 R_n 是半径,指从地球中心到第 n 层起点的距离。由此 a_n 计算如下:

$$a_n = -r_n \cos \beta_n + \frac{1}{2} \sqrt{4 r_n^2 \cos^2 \beta_n + 8 r_n \delta_n + 4 \delta_n^2} \quad (17)$$

入射角度 α_n 计算如下:

$$\alpha_n = \pi - \arccos \left(\frac{-a_n^2 - 2 r_n \delta_n - \delta_n^2}{2 a_n r_n + 2 a_n \delta_n} \right) \quad (18)$$

β_1 是在地面站的入射角(与仰角 θ 互余)。应用Snell's定律, β_{n+1} 可由 α_n 计算如下:

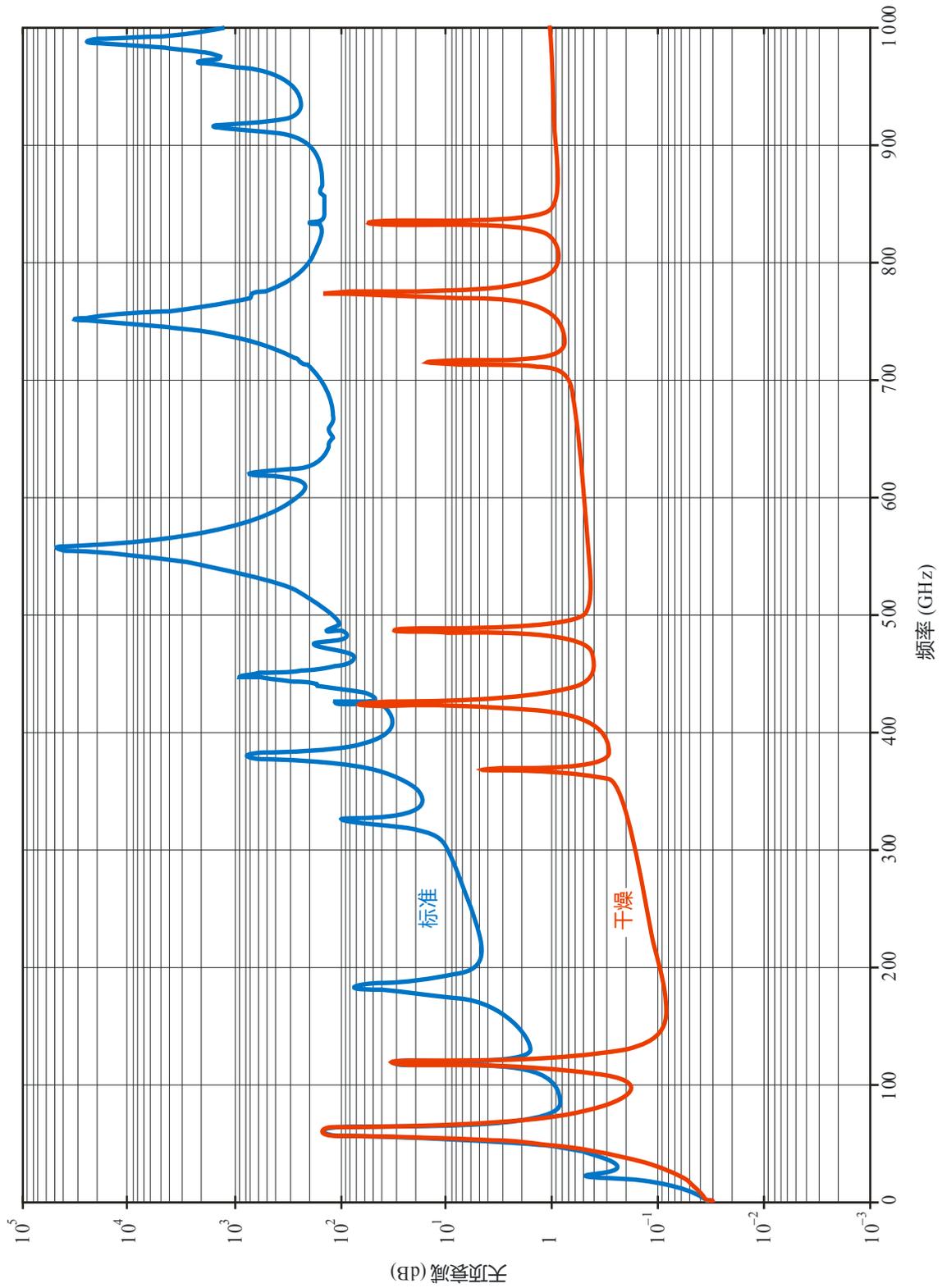
$$\beta_{n+1} = \arcsin \left(\frac{n_n}{n_{n+1}} \sin \alpha_n \right) \quad (19)$$

其中 n_n 和 n_{n+1} 分别为第 n 层和第 $n+1$ 层的折射率。

当世界某些区域易受波导条件影响无线电探空仪数据作为输入时,很低仰角($\varphi < 1^\circ$)的等式(19)可能无效。在这种情况下,就出现无线电折射率梯度小于 -157 N/km 的空气层,基于几何光学的光线跟踪算法(等式(17)至(19))不再适用。在这些异常条件下,等式(19)中的反正弦函数将变得复杂,因为其自变数将略大于1。应指出,当使用ITU-R P.835建议书所述参考标准大气作为输入时,等式(19)对所有仰角有效,因为这些理想的大气(显然无不良折射梯度)不支持异常传播条件。

图 3

由大气气体造成的天顶衰减，以 1 GHz 为步长，包括线中心



P.0676-03

残留频率相关性（色散）对计算结果存在边际效应（约为1%），可采用《ITU-R射电天文手册》中给出的方法计算。

总衰减值计算如下：

$$A_{gas} = \sum_{n=1}^k a_n \gamma_n \quad \text{dB} \quad (20)$$

其中 γ_n 为从公式（1）导出的特征衰减。

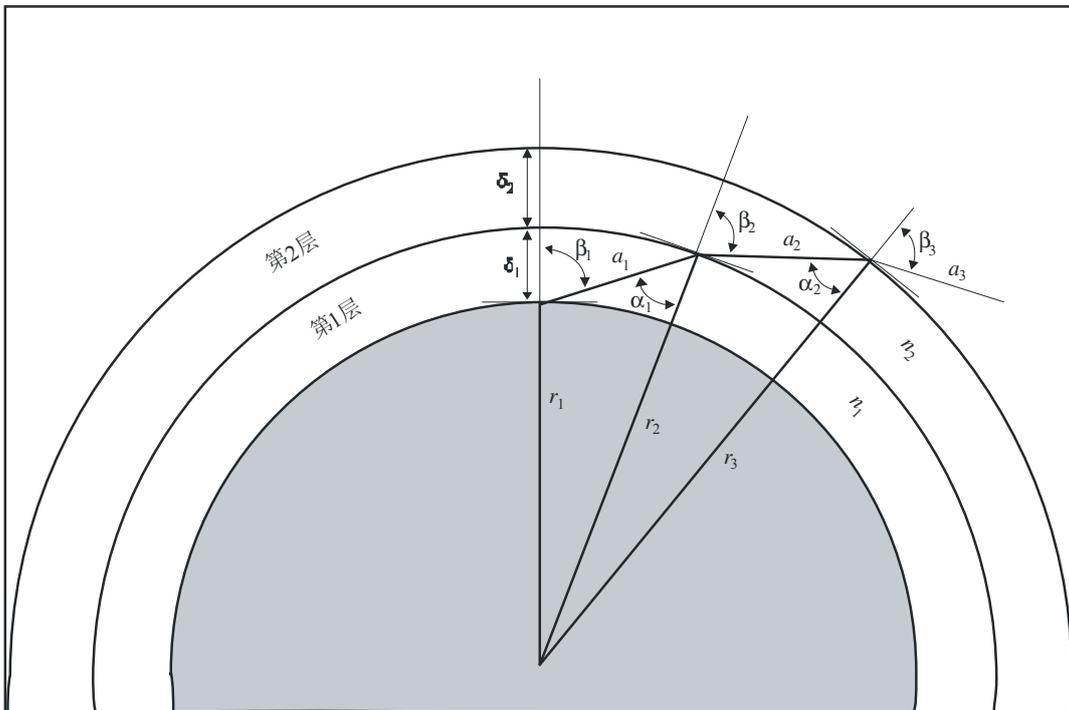
为了准确地计算路径衰减，在最低层（地面）为10 cm 到在100 km高度时为1 km，各层的厚度应以指数级增大，通过下式：

$$\delta_i = 0.0001 \exp \left\{ \frac{i-1}{100} \right\} \quad \text{km} \quad (21)$$

当 $i = 1$ 到922时，计算可得 $\delta_{922} \cong 1.0 \text{ km}$ ， $\sum_{i=1}^{922} \delta_i \cong 100 \text{ km}$ 。

对于地对空的情况，累计应至少到30 km，在氧气线中心频率可以到100 km。

图4



3 色散的影响

《ITU-R无线电气象学手册》讨论了关于色散的影响，其中包括基于逐线计算的方法计算色散的模式。在实际的应用中，色散的影响对短距离（如不超过20 km）、几百MHz频带的毫米波地面通信系统不会产生严重的影响。特别在频谱的窗口区域，在远离主吸收线中心的频率上。对于卫星通信系统，大气衰减及相应的色散都很低，通过大气层的很长的路径将工作频率制约在窗口区域。

附件 2

对1-350 GHz频率范围的无线电波 在大气气体中衰减的近似计算

对于有限范围的大气条件和有限数量的几何外形，本附件提供了简化算法，以便于快速、近似地计算无线电波在大气气体中的衰减。

1 特征衰减

从海平面到10 km高度范围内，由于干燥空气和水汽造成的无线电波特征衰减，可采用下列简化算法进行估算。这一方法是基于逐线计算的曲线拟合，并同意更准确的计算是在距主吸收线中心的频率偏移平均±10%之内。采用这种算法和采用逐线计算所得结果之间的绝对差值不超过0.1 dB/km，在60 GHz附近时达到最大为0.7 dB/km。当超过10 km高度时，由于要求更高的精确度，应当采用逐线计算的方法。

对于干燥空气，大气衰减 γ_o (dB/km)计算如下：

对于 $f \leq 54$ GHz：

$$\gamma_o = \left[\frac{7.2 r_t^{2.8}}{f^2 + 0.34 r_p^2 r_t^{1.6}} + \frac{0.62 \xi_3}{(54 - f)^{1.16 \xi_1} + 0.83 \xi_2} \right] f^2 r_p^2 \times 10^{-3} \quad (22a)$$

对于 $54 \text{ GHz} < f \leq 60 \text{ GHz}$ ：

$$\gamma_o = \exp \left[\frac{\ln \gamma_{54}}{24} (f - 58)(f - 60) - \frac{\ln \gamma_{58}}{8} (f - 54)(f - 60) + \frac{\ln \gamma_{60}}{12} (f - 54)(f - 58) \right] \quad (22b)$$

对于 $60 \text{ GHz} < f \leq 62 \text{ GHz}$ ：

$$\gamma_o = \gamma_{60} + (\gamma_{62} - \gamma_{60}) \frac{f - 60}{2} \quad (22c)$$

对于 $62 \text{ GHz} < f \leq 66 \text{ GHz}$:

$$\gamma_o = \exp \left[\frac{\ln \gamma_{62}}{8} (f - 64)(f - 66) - \frac{\ln \gamma_{64}}{4} (f - 62)(f - 66) + \frac{\ln \gamma_{66}}{8} (f - 62)(f - 64) \right] \quad (22d)$$

对于 $66 \text{ GHz} < f \leq 120 \text{ GHz}$:

$$\gamma_o = \left\{ 3.02 \times 10^{-4} r_t^{3.5} + \frac{0.283 r_t^{3.8}}{(f - 118.75)^2 + 2.91 r_p^2 r_t^{1.6}} + \frac{0.502 \xi_6 [1 - 0.0163 \xi_7 (f - 66)]}{(f - 66)^{1.4346 \xi_4} + 1.15 \xi_5} \right\} f^2 r_p^2 \times 10^{-3} \quad (22e)$$

对于 $120 \text{ GHz} < f \leq 350 \text{ GHz}$:

$$\gamma_o = \left[\frac{3.02 \times 10^{-4}}{1 + 1.9 \times 10^{-5} f^{1.5}} + \frac{0.283 r_t^{0.3}}{(f - 118.75)^2 + 2.91 r_p^2 r_t^{1.6}} \right] f^2 r_p^2 r_t^{3.5} \times 10^{-3} + \delta \quad (22f)$$

其中:

$$\xi_1 = \varphi(r_p, r_t, 0.0717, -1.8132, 0.0156, -1.6515) \quad (22g)$$

$$\xi_2 = \varphi(r_p, r_t, 0.5146, -4.6368, -0.1921, -5.7416) \quad (22h)$$

$$\xi_3 = \varphi(r_p, r_t, 0.3414, -6.5851, 0.2130, -8.5854) \quad (22i)$$

$$\xi_4 = \varphi(r_p, r_t, -0.0112, 0.0092, -0.1033, -0.0009) \quad (22j)$$

$$\xi_5 = \varphi(r_p, r_t, 0.2705, -2.7192, -0.3016, -4.1033) \quad (22k)$$

$$\xi_6 = \varphi(r_p, r_t, 0.2445, -5.9191, 0.0422, -8.0719) \quad (22l)$$

$$\xi_7 = \varphi(r_p, r_t, -0.1833, 6.5589, -0.2402, 6.131) \quad (22m)$$

$$\gamma_{54} = 2.192 \varphi(r_p, r_t, 1.8286, -1.9487, 0.4051, -2.8509) \quad (22n)$$

$$\gamma_{58} = 12.59 \varphi(r_p, r_t, 1.0045, 3.5610, 0.1588, 1.2834) \quad (22o)$$

$$\gamma_{60} = 15.0 \varphi(r_p, r_t, 0.9003, 4.1335, 0.0427, 1.6088) \quad (22p)$$

$$\gamma_{62} = 14.28 \varphi(r_p, r_t, 0.9886, 3.4176, 0.1827, 1.3429) \quad (22q)$$

$$\gamma_{64} = 6.819 \varphi(r_p, r_t, 1.4320, 0.6258, 0.3177, -0.5914) \quad (22r)$$

$$\gamma_{66} = 1.908 \varphi(r_p, r_t, 2.0717, -4.1404, 0.4910, -4.8718) \quad (22s)$$

$$\delta = -0.00306 \varphi(r_p, r_t, 3.211, -14.94, 1.583, -16.37) \quad (22t)$$

$$\varphi(r_p, r_t, a, b, c, d) = r_p^a r_t^b \exp[c(1 - r_p) + d(1 - r_t)] \quad (22u)$$

其中：

f ： 频率（GHz）

$r_p = p_{tot}/1013$ ，其中 p_{tot} 代表总空气压力

$r_t = 288/(273 + t)$

p ： 压力（hPa）

t ： 温度（°C），当缺少当地的温度数据时，可从ITU-R P.1510建议书中的地图上获取温度中值。

对在水汽中的衰减，大气衰减值 γ_w (dB/km)计算如下：

$$\begin{aligned} \gamma_w = & \left\{ \frac{3.98\eta_1 \exp[2.23(1-r_t)]}{(f-22.235)^2 + 9.42\eta_1^2} g(f,22) + \frac{11.96\eta_1 \exp[0.7(1-r_t)]}{(f-183.31)^2 + 11.14\eta_1^2} \right. \\ & + \frac{0.081\eta_1 \exp[6.44(1-r_t)]}{(f-321.226)^2 + 6.29\eta_1^2} + \frac{3.66\eta_1 \exp[1.6(1-r_t)]}{(f-325.153)^2 + 9.22\eta_1^2} \\ & + \frac{25.37\eta_1 \exp[1.09(1-r_t)]}{(f-380)^2} + \frac{17.4\eta_1 \exp[1.46(1-r_t)]}{(f-448)^2} \\ & + \frac{844.6\eta_1 \exp[0.17(1-r_t)]}{(f-557)^2} g(f,557) + \frac{290\eta_1 \exp[0.41(1-r_t)]}{(f-752)^2} g(f,752) \\ & \left. + \frac{8.3328 \times 10^4 \eta_2 \exp[0.99(1-r_t)]}{(f-1780)^2} g(f,1780) \right\} f^2 r_t^{2.5} \rho \times 10^{-4} \end{aligned} \quad (23a)$$

其中：

$$\eta_1 = 0.955 r_p r_t^{0.68} + 0.006 \rho \quad (23b)$$

$$\eta_2 = 0.735 r_p r_t^{0.5} + 0.0353 r_t^4 \rho \quad (23c)$$

$$g(f, f_i) = 1 + \left(\frac{f - f_i}{f + f_i} \right)^2 \quad (23d)$$

ρ 是水汽密度，单位为 g/m^3

图5表示了在海平面上干燥空气和湿润空气（水汽密度为 7.5 g/m^3 ）两种条件下，1到350 GHz频带内的特征衰减值。

2 路径衰减

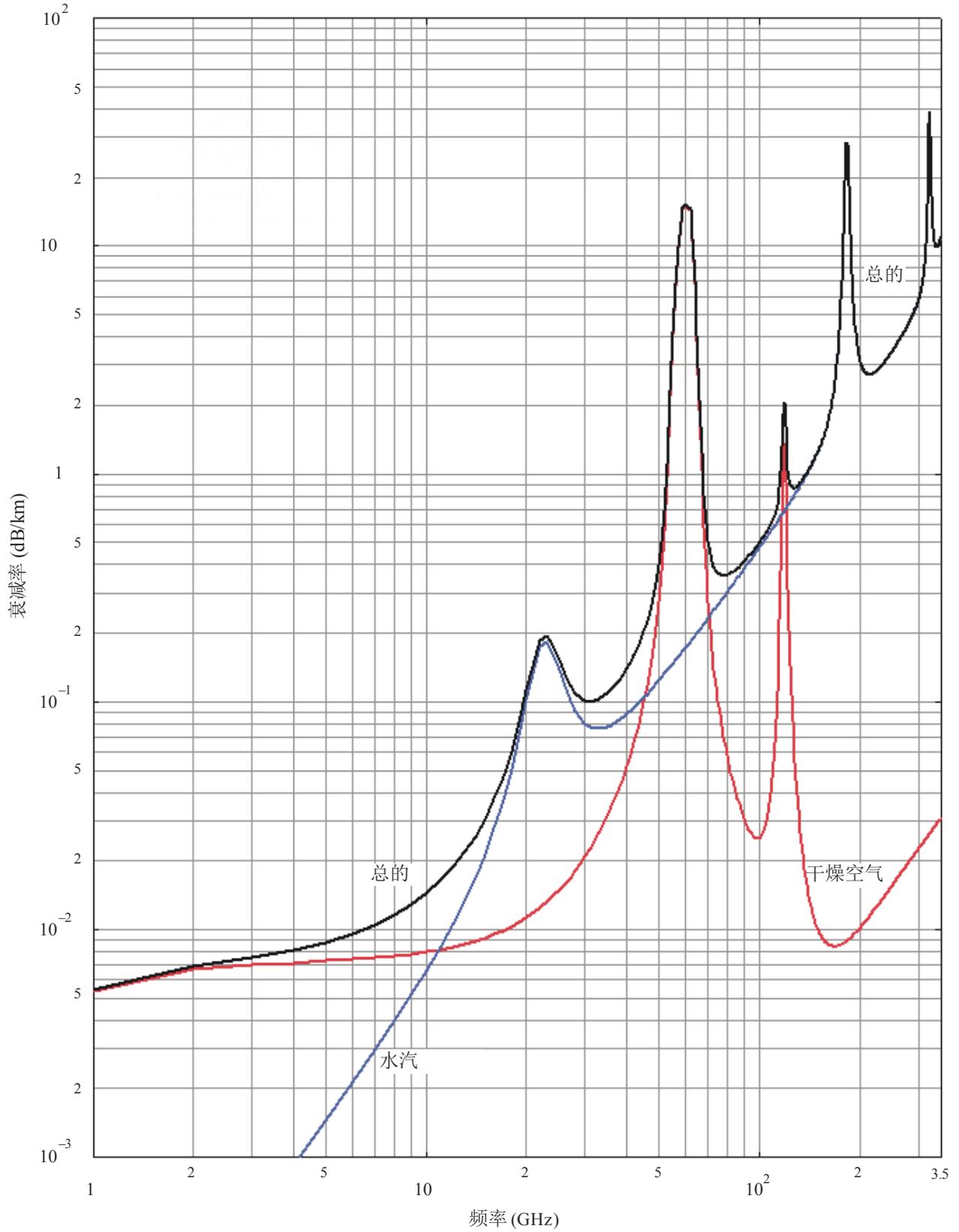
2.1 地面路径衰减

对水平路径，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 可由如下表示：

$$A = \gamma r_0 = (\gamma_o + \gamma_w) r_0 \quad \text{dB} \quad (24)$$

其中 r_0 为路径长度，单位为km。

图 5
由于大气气体造成的特征衰减



压力: 1 013 hPa ;
温度: 15 °C ;
水汽密度: 7.5 g/m³

2.2 倾斜路径衰减

对穿过地球大气层的倾斜路径的无线电波在大气中的衰减，本节给出简化算法：定义一个等效高度将§1中得出的特征衰减与之相乘得到天顶衰减。等效高度取决于气压，用它可计算从海平面到10 km高度范围内的天顶衰减。采用该高度准确的气压、温度和水汽密度，从海平面到10千米高度范围内，计算得到的最终天顶衰减在干燥空气条件下误差不超过10%，在水汽条件下不超过5%。当高度大于10 km时，特别是对于任何高度上谐振线中心的0.5 GHz内的频率，应采用附件1的过程。注意在公式（25b）中的高斯函数所表示的在60 GHz频带中氧气等效高度在某些频率上会产生超过10%的误差，这是因为该程序不能重现如图7的结构。下列公式来源于采用附件1过程计算得到的天顶衰减，数量上累积在500 MHz带宽上的各衰减；因此最终衰减值有效地表示在50-70 GHz频带内的近似最小值。除了天顶以外，其他仰角条件下的路径衰减可采用本节随后描述的方法计算。

对于干燥空气，等效高度计算如下：

$$h_o = \frac{6.1}{1 + 0.17 r_p^{-1.1}} (1 + t_1 + t_2 + t_3) \quad (25a)$$

其中：

$$t_1 = \frac{4.64}{1 + 0.066 r_p^{-2.3}} \exp \left[- \left(\frac{f - 59.7}{2.87 + 12.4 \exp(-7.9 r_p)} \right)^2 \right] \quad (25b)$$

$$t_2 = \frac{0.14 \exp(2.12 r_p)}{(f - 118.75)^2 + 0.031 \exp(2.2 r_p)} \quad (25c)$$

$$t_3 = \frac{0.0114}{1 + 0.14 r_p^{-2.6}} f \frac{-0.0247 + 0.0001 f + 1.61 \times 10^{-6} f^2}{1 - 0.0169 f + 4.1 \times 10^{-5} f^2 + 3.2 \times 10^{-7} f^3} \quad (25d)$$

在约束条件下：

$$h_o \leq 10.7 r_p^{0.3}, \quad f < 70 \text{ GHz 时} \quad (25e)$$

对水汽，等效高度计算如下：

$$h_w = 1.66 \left(1 + \frac{1.39 \sigma_w}{(f - 22.235)^2 + 2.56 \sigma_w} + \frac{3.37 \sigma_w}{(f - 183.31)^2 + 4.69 \sigma_w} + \frac{1.58 \sigma_w}{(f - 325.1)^2 + 2.89 \sigma_w} \right) \quad (26a)$$

对于 $f \leq 350 \text{ GHz}$

$$\sigma_w = \frac{1.013}{1 + \exp[-8.6 (r_p - 0.57)]} \quad (26b)$$

如图7所示，50-70 GHz频带的天顶衰减是一个复杂的频率的函数。上述的等效高度的方法仅能够提供一个近似的结果。总的来说，最小衰减会出现在这个频率范围。为了更准确的计算，应采用附件1的方法。

等效高度的概念是建立在一个采用标尺高度来描述密度随高度而变的理想大气的理论假设之上。需要注意的是，干燥空气和水汽的标尺高度随着高度、季节和气候的变化而变化。尤其是水汽在大气中的实际密度与理论值常常相差较大，此时对应的等效高度应随之变化。上述的方法适用于10 km高度以内。

总的天顶衰减：

$$A = \gamma_o h_o + \gamma_w h_w \quad \text{dB} \quad (27)$$

如图6给出了在海平面的总的天顶衰减以及由于干燥空气和水汽所造成的衰减，采用了ITU-R P.835建议书所给出的年平均全球参考大气。在50-70 GHz，可以从图7的0 km曲线得到更准确的结果，该结果是采用附件1的逐线计算得出的。

2.2.1 5-90°之间的仰角

2.2.1.1 地对空路径

当仰角 φ 在5°-90°之间时，路径衰减可采用余割法计算如下：

根据地表面气象数据得到路径衰减为：

$$A = \frac{A_o + A_w}{\sin \varphi} \quad \text{dB} \quad (28)$$

其中 $A_o = h_o \gamma_o$ 而 $A_w = h_w \gamma_w$

由累计的水汽得到的路径衰减为：

$$A(p) = \frac{A_o + A_w(p)}{\sin \varphi} \quad \text{dB} \quad (29)$$

其中 $A_w(p)$ 由§2.3给出。

2.2.1.2 倾斜路径

为了确定位于高度 h_1 和高度 h_2 的两个电台间倾斜路径的衰减值， $h_1 < h_2$ ，这里的两个电台都低于海拔10 km以下，公式（28）中的值 h_o 和 h_w 用 h'_o 和 h'_w 替代如下：

$$h'_o = h_o \left[e^{-h_1/h_o} - e^{-h_2/h_o} \right] \quad \text{km} \quad (30)$$

$$h'_w = h_w \left[e^{-h_1/h_w} - e^{-h_2/h_w} \right] \quad \text{km} \quad (31)$$

应该理解在公式（23）中的水汽密度 ρ 值是在海平面的假设数值，计算如下：

$$\rho = \rho_1 \times \exp(h_1/2) \quad (32)$$

其中 ρ_1 为对应于高度 h_1 电台的值，水汽密度的等效高度假定为2 km（见ITU-R P.835建议书）。

其中公式（30），（31）和（32）对于干燥空气和水汽等效高度采用了不同的归一化。海平面的空气压力中值可以认为在全世界是一个常数（全球均为1 013 hPa），水汽密度不仅有气候变化的更宽的范围，而且是在地球表面测量的（即位于地面电台某高度）。地表面水汽密度值见ITU-R P.836建议书。

2.2.2 0°-5°之间的仰角

2.2.2.1 地对空路径

在这种情况下，应采用本建议书附件1的方法。当仰角小于0°时也应采用本附件。

2.2.2.2 倾斜路径

对位于高度 h_1 和 h_2 的两个电台之间的倾斜路径， $h_1 < h_2$ ，其中电台高度在海拔10 km 内，路径衰减计算如下：

$$A = \gamma_o \sqrt{h_o} \left[\frac{\sqrt{R_e + h_1} \cdot F(x_1) e^{-h_1/h_o}}{\cos \varphi_1} - \frac{\sqrt{R_e + h_2} \cdot F(x_2) e^{-h_2/h_o}}{\cos \varphi_2} \right] \\ + \gamma_w \sqrt{h_w} \left[\frac{\sqrt{R_e + h_1} \cdot F(x'_1) e^{-h_1/h_w}}{\cos \varphi_1} - \frac{\sqrt{R_e + h_2} \cdot F(x'_2) e^{-h_2/h_w}}{\cos \varphi_2} \right] \quad \text{dB} \quad (33)$$

其中：

R_e ：含折射的有效的地球半径，见ITU-R P.834建议书，单位为km（对地球表面附近一般采用8 500 km的值）

φ_1 ：在高度 h_1 的仰角

F ：函数定义如下：

$$F(x) = \frac{1}{0.661x + 0.339\sqrt{x^2 + 5.51}} \quad (34)$$

$$\varphi_2 = \arccos \left(\frac{R_e + h_1}{R_e + h_2} \cos \varphi_1 \right) \quad (35a)$$

$$x_i = \tan \varphi_i \sqrt{\frac{R_e + h_i}{h_o}} \quad \text{对于 } i=1, 2 \quad (35b)$$

$$x'_i = \tan \varphi_i \sqrt{\frac{R_e + h_i}{h_w}} \quad \text{对于 } i=1, 2 \quad (35c)$$

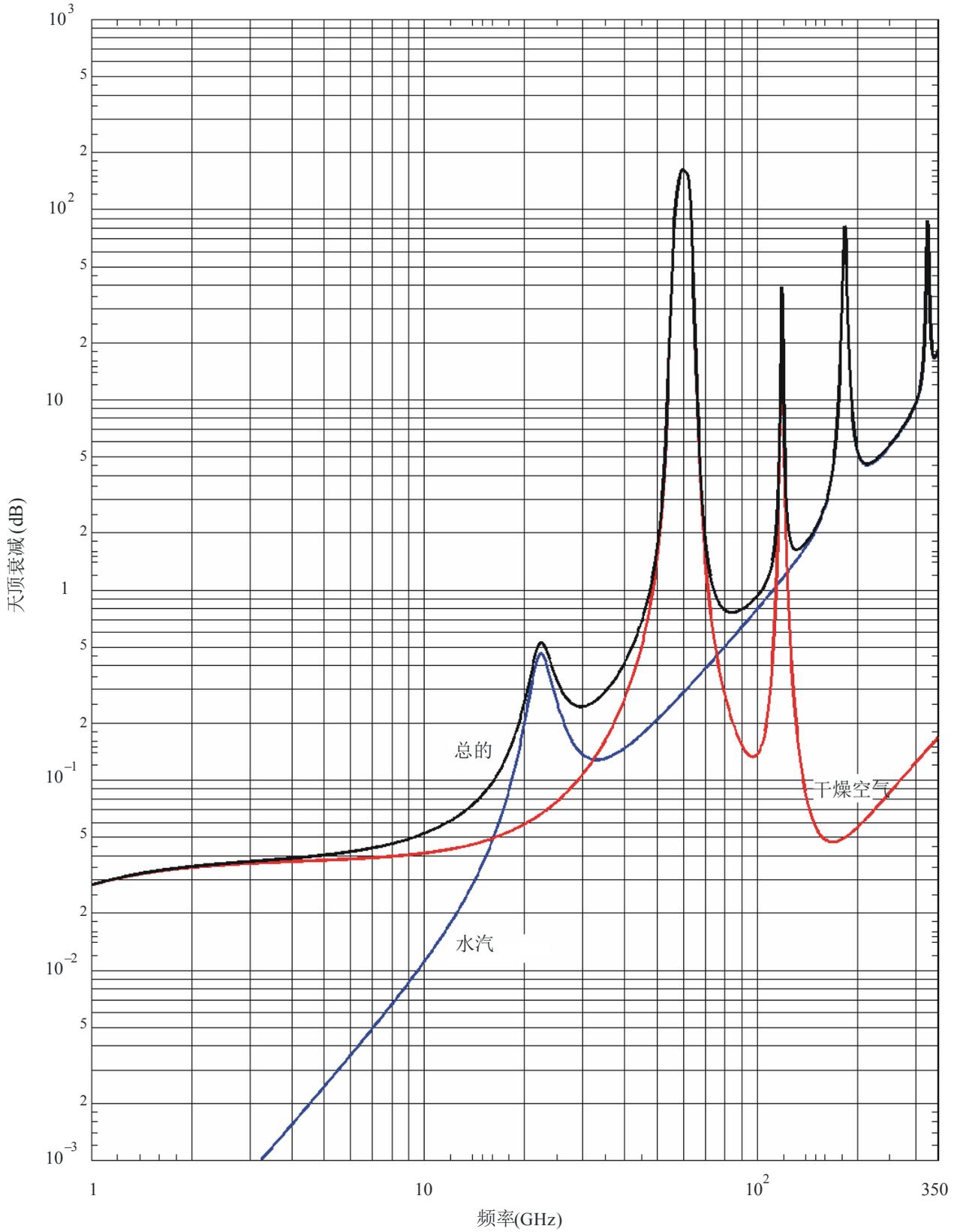
应理解在公式（23）中的水汽密度 ρ 值是在海平面的理论数值，计算如下：

$$\rho = \rho_1 \cdot \exp(h_1/2) \quad (36)$$

其中 ρ_1 为对应于高度 h_1 电台的值，水汽密度的等效高度假定为2 km（见ITU-R P.835建议书）。

地球表面的 ρ_1 值见ITU-R P.836建议书，§2.2结尾处列出了对应于干燥空气和水汽的不同的计算公式。

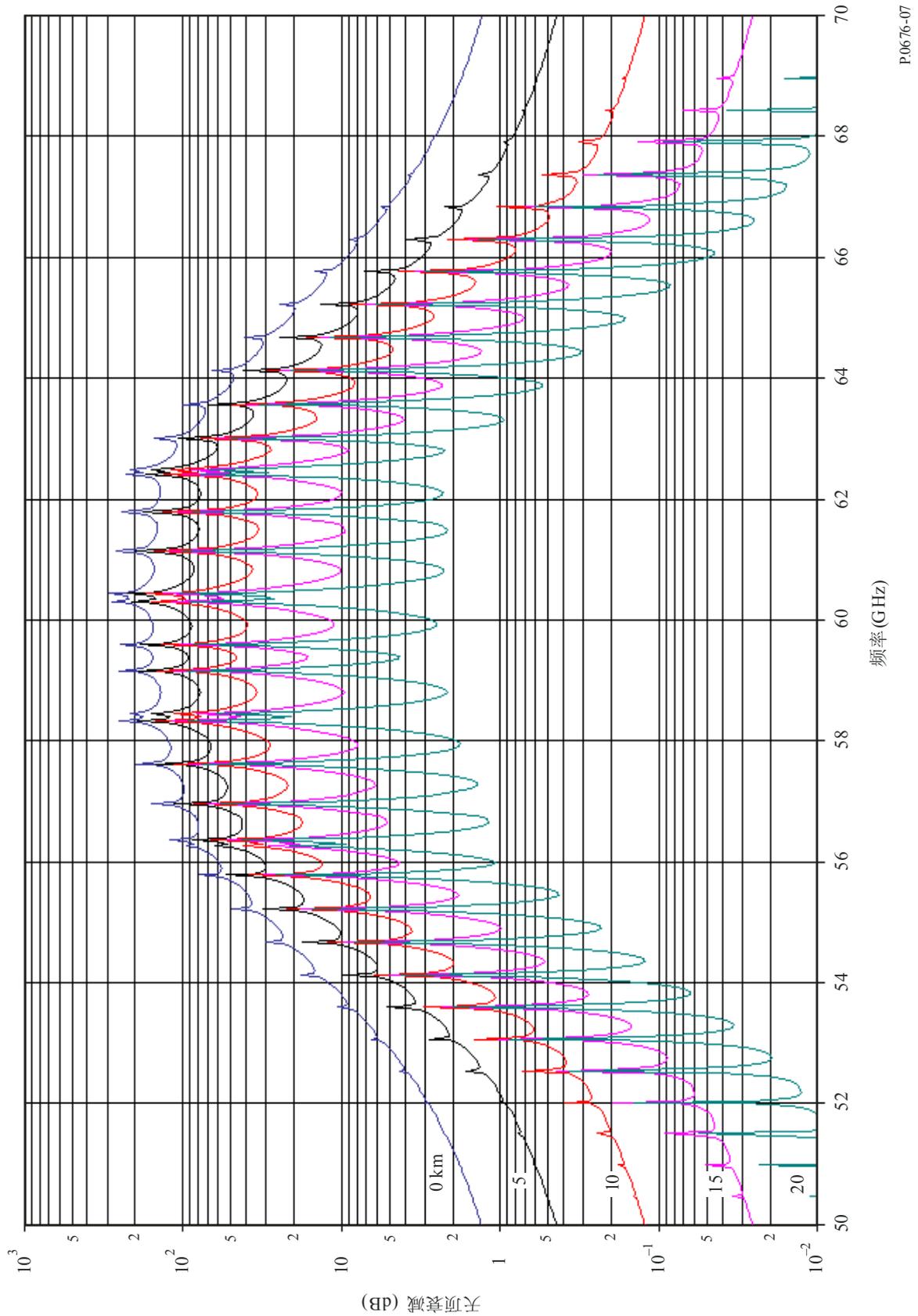
图 6
海平面的干燥空气和水汽造成的总的天顶衰减



地球表面压力: 1 013 hPa
地球表面温度: 15° C
地球表面水汽密度: 7.5 g/m³

图 7

所示不同高度的氧气天顶衰减，以50 MHz步长计算，包括线中心
(0 km, 5 km, 10 km, 15 km 和 20 km)



2.3 方位角路径在水汽中的衰减

上述的计算倾斜路径水汽衰减的方法依赖于沿该路径水汽压力（水汽密度）的剖面的知识。只要沿路径累计的水汽密度 V_t 已知，则可任选其中任一方法。总的水汽衰减计算如下：

$$A_w(P) = \frac{0.0173 V_t(P) \gamma_w(f, p_{ref}, \rho_{v,ref}, t_{ref})}{\gamma_w(f_{ref}, p_{ref}, \rho_{v,ref}, t_{ref})} \quad \text{dB} \quad (37)$$

其中：

f ：频率（GHz）

f_{ref} ：20.6 (GHz)

p_{ref} = 780 (hPa)

$\rho_{v,ref}$ = $\frac{V_t(P)}{4}$ (g/m³)

t_{ref} = $14 \ln \left(\frac{0.22 V_t(P)}{4} \right) + 3$ (°C)

$V_t(P)$ ：在所需时间百分比的累计的水汽量（kg/m²或mm），既可以从无线电探空仪剖面、辐射度测量值得到，也可参考ITU-R P.836建议书（kg/m²或mm）

$\gamma_w(f, p, \rho, t)$ ：作为频率、压力、水汽密度和温度函数的特征衰减，由公式(23a)计算得到，单位为dB/km。