

ITU-R P.676-6 建议书修订草案

无线电波在大气气体中的衰减

(ITU-R 201/3 号研究课题)

(1990-1992-1995-1997-1999-2001-2005)

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 1000 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 (MATLAB 中的软件编号见无线电通信局)；
- 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

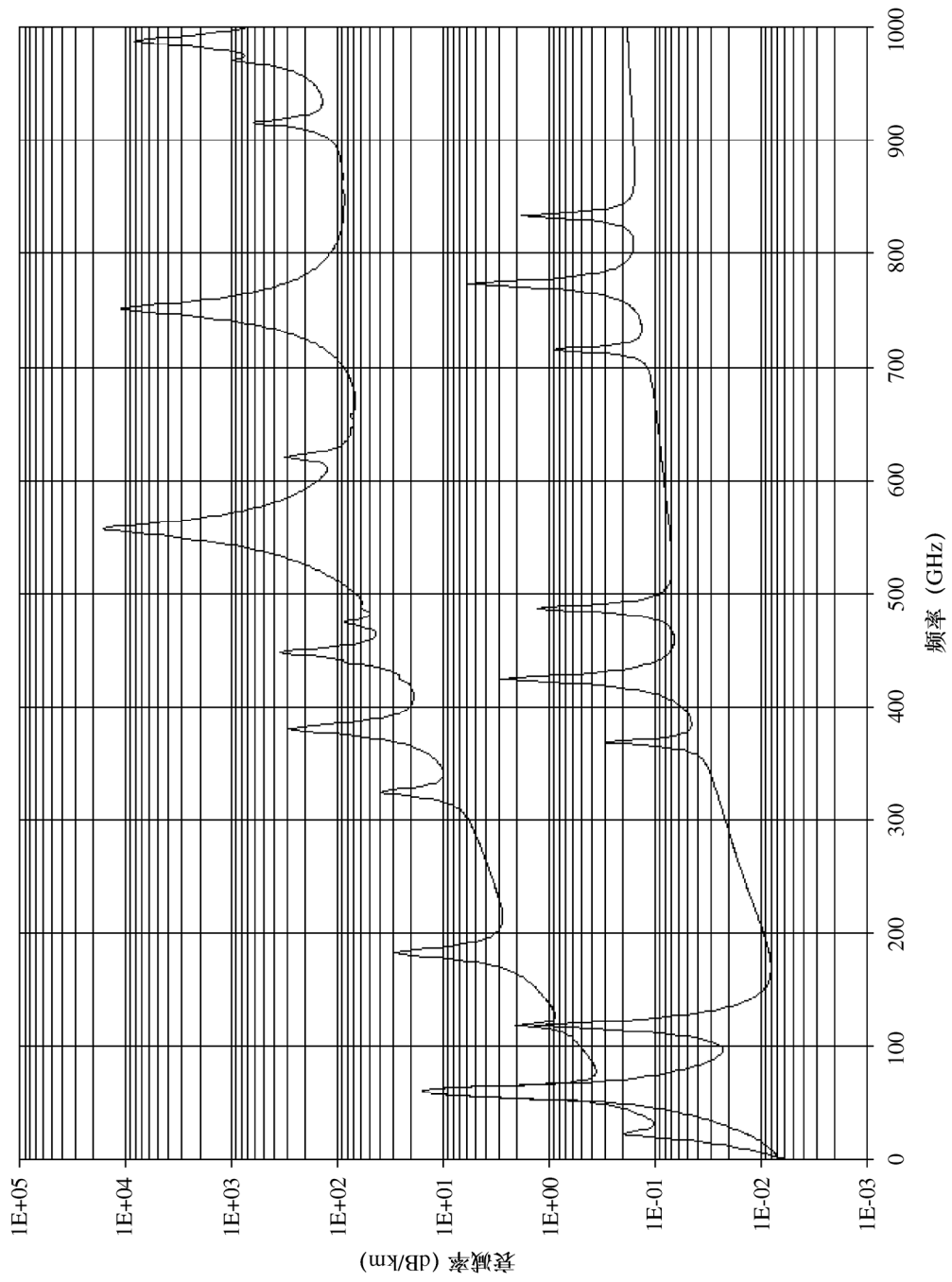
最高至 1 000 GHz 频率上的无线电波在大气中的特征衰减主要由于干燥空气和水汽所造成。在任何压力、任何温度和任何湿度下，采用累加氧气和水汽各自谐振线的方法，可以相当准确地计算无线电波在大气气体中的特征衰减。这一方法同时也考虑了一些其他相对影响较小的因素，如 10 GHz 以下氧气的非谐振的 Debye 频谱，100 GHz 以上的主要由大气压力造成的氮气衰减和计算实验上发现的过多水汽吸收的潮湿连续带。下图 1 给出了在气压 1013 hPa、温度 15 °C、水汽密度为 7.5 g/m³ (曲线 A) 和水汽密度为 0 的干燥空气 (曲线 B) 两种情况下，0-1000 GHz 频带的无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。

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。

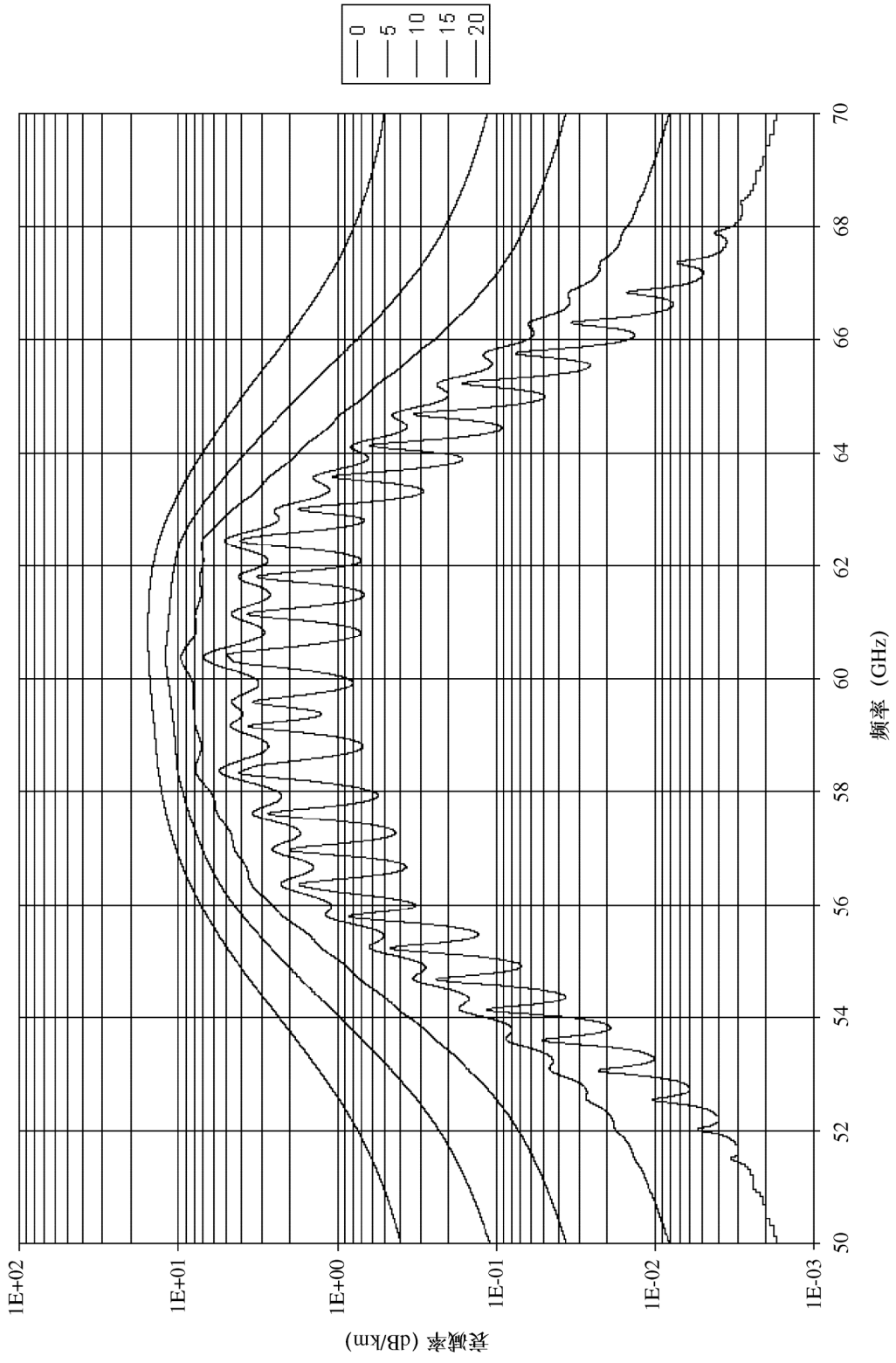
图 1

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
(标准: **7.5 g/m³**; 干燥: **0 g/m³**)



— 标准
— 干燥

图 2
在 50-70 GHz 频段内所示高度区的衰减率
(0 km, 5 km, 10 km, 15 km 和 20 km)



特征大气衰减值 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, $N''_D(f)$ 是大气压力造成的氮气吸收和 Debye 频谱的干燥连续带。

第 i 线的强度 S_i 计算如下:

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

其中:

p 为干燥空气压力, 单位为 hPa

e 为水汽压力, 单位为 hPa (总大气压力 $P = p + e$)

$\theta = 300/T$

T 为温度, 单位为 K

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：

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

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
50.474238	.94	9.694	8.90	.0	2.400	7.900
50.987749	2.46	8.694	9.10	.0	2.200	7.800
51.503350	6.08	7.744	9.40	.0	1.970	7.740
52.021410	14.14	6.844	9.70	.0	1.660	7.640
52.542394	31.02	6.004	9.90	.0	1.360	7.510
53.066907	64.10	5.224	10.20	.0	1.310	7.140
53.595749	124.70	4.484	10.50	.0	2.300	5.840
54.130000	228.00	3.814	10.70	.0	3.350	4.310
54.671159	391.80	3.194	11.00	.0	3.740	3.050
55.221367	631.60	2.624	11.30	.0	2.580	3.390
55.783802	953.50	2.119	11.70	.0	-1.660	7.050
56.264775	548.90	.015	17.30	.0	3.900	-1.130
56.363389	1344.00	1.660	12.00	.0	-2.970	7.530
56.968206	1763.00	1.260	12.40	.0	-4.160	7.420
57.612484	2141.00	.915	12.80	.0	-6.130	6.970
58.323877	2386.00	.626	13.30	.0	-2.050	.510
58.446590	1457.00	.084	15.20	.0	7.480	-1.460
59.164207	2404.00	.391	13.90	.0	-7.220	2.660
59.590983	2112.00	.212	14.30	.0	7.650	-900
60.306061	2124.00	.212	14.50	.0	-7.050	.810
60.434776	2461.00	.391	13.60	.0	6.970	-3.240
61.150560	2504.00	.626	13.10	.0	1.040	-670
61.800154	2298.00	.915	12.70	.0	5.700	-7.610
62.411215	1933.00	1.260	12.30	.0	3.600	-7.770
62.486260	1517.00	.083	15.40	.0	-4.980	.970
62.997977	1503.00	1.665	12.00	.0	2.390	-7.680
63.568518	1087.00	2.115	11.70	.0	1.080	-7.060
64.127767	733.50	2.620	11.30	.0	-3.110	-3.320
64.678903	463.50	3.195	11.00	.0	-4.210	-2.980
65.224071	274.80	3.815	10.70	.0	-3.750	-4.230
65.764772	153.00	4.485	10.50	.0	-2.670	-5.750
66.302091	80.09	5.225	10.20	.0	-1.680	-7.000
66.836830	39.46	6.005	9.90	.0	-1.690	-7.350
67.369598	18.32	6.845	9.70	.0	-2.000	-7.440
67.900867	8.01	7.745	9.40	.0	-2.280	-7.530
68.431005	3.30	8.695	9.20	.0	-2.400	-7.600
68.960311	1.28	9.695	9.00	.0	-2.500	-7.650
118.750343	945.00	.009	16.30	.0	-.360	.090
368.498350	67.90	.049	19.20	.6	.000	.000
424.763124	638.00	.044	19.30	.6	.000	.000
487.249370	235.00	.049	19.20	.6	.000	.000
715.393150	99.60	.145	18.10	.6	.000	.000
773.839675	671.00	.130	18.20	.6	.000	.000
834.145330	180.00	.147	18.10	.6	.000	.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
841.053937	0.0140	8.180	15.90	.33	5.760	.45
859.962313	0.1472	7.989	30.60	.68	4.090	.84
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:

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

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。

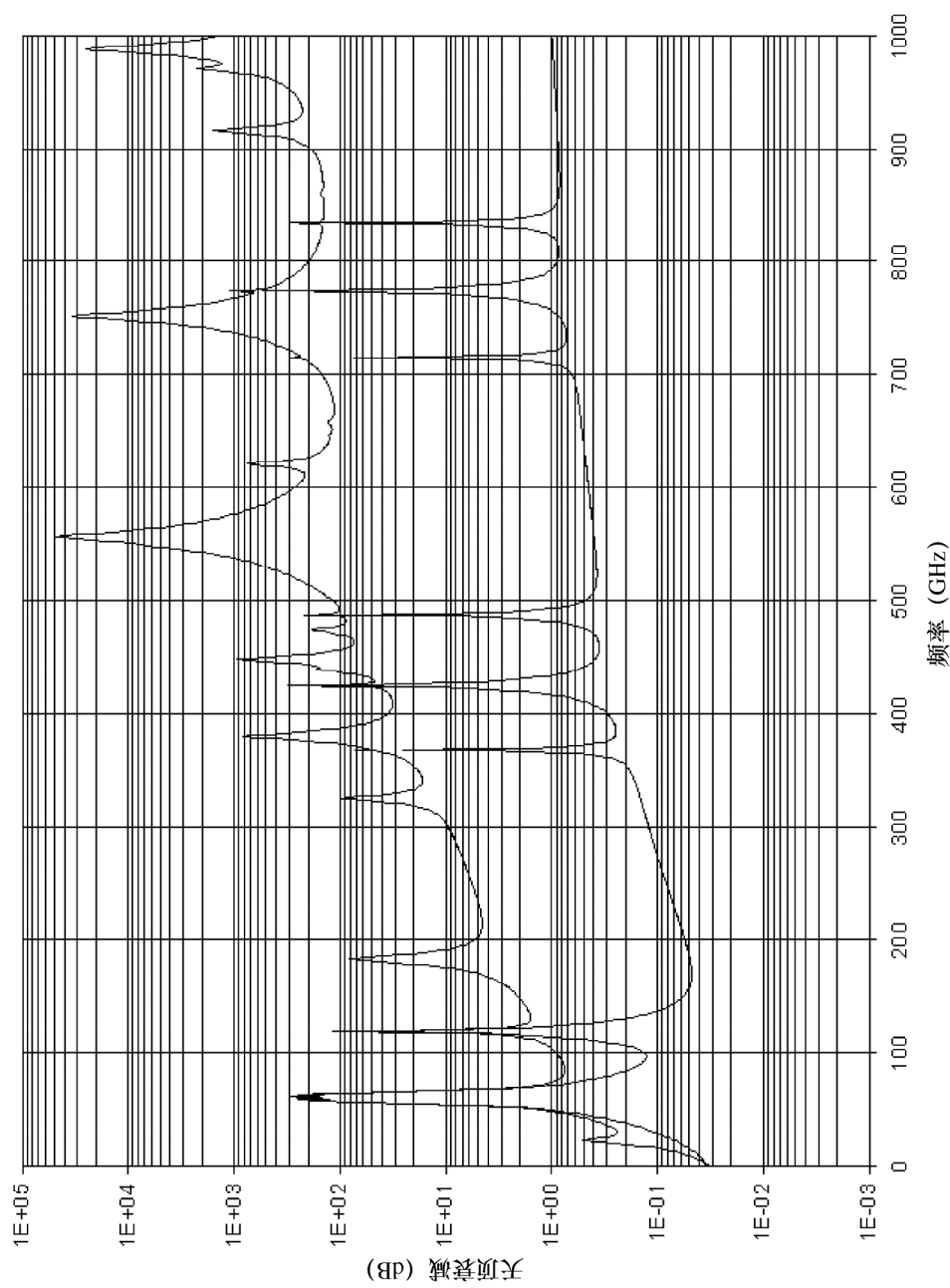
2.2 倾斜路径衰减

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。

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
(标准: 在海平面 **7.5 g/m³** ; 干燥: **0 g/m³**)



— 标准
— 干燥

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：

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

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。

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。

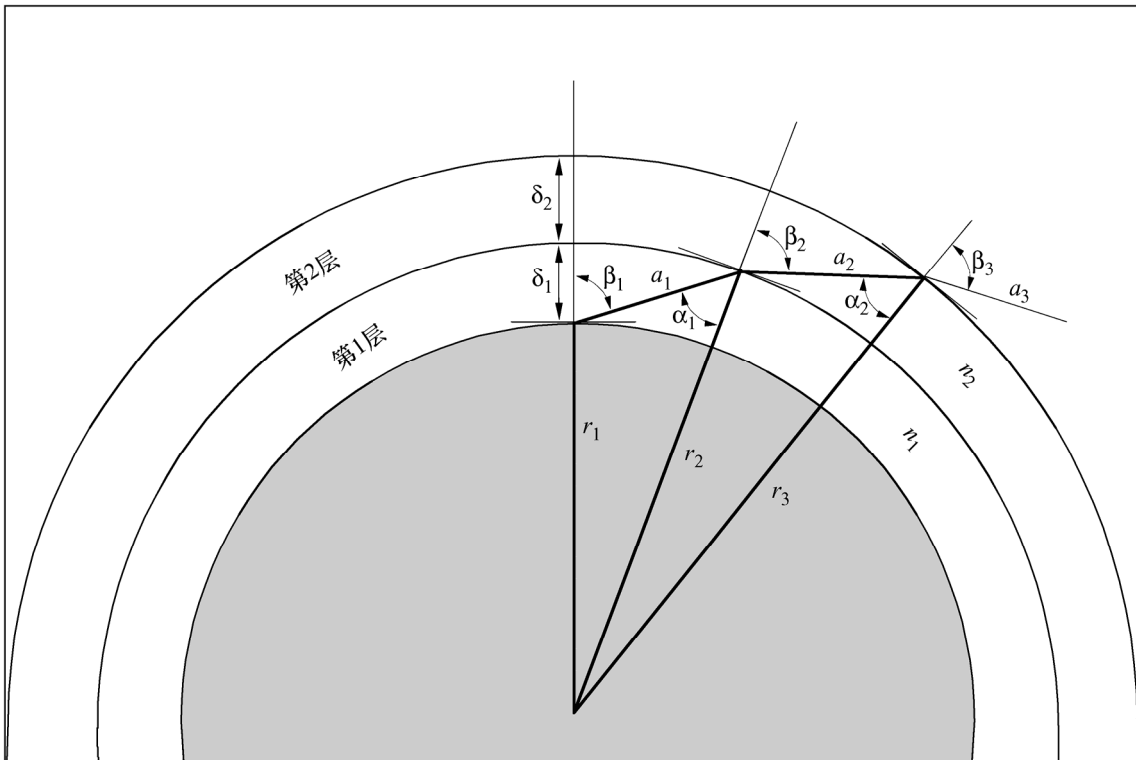
为了准确地计算路径衰减, 在最低层 (地面) 为 10 cm 到在 100 km 高度时为 1 km, 各层的厚度应以指数级增大, 通过下式:

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

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



0676-04

3 色散的影响

《ITU-R 射电天文手册》讨论了关于色散的影响，其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 $\pm 10\%$ 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:

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

对于 54 GHz $< f \leq 60$ 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 GHz $< f \leq 62$ GHz:

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

对于 62 GHz $< f \leq 66$ 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 GHz $< f \leq 120$ GHz:

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

对于 120 GHz $< f \leq 350$ GHz:

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

其中：

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

其中：

f ：(GHz) 频率

$$r_p = p/1013$$

$$r_t = 288/(273 + t)$$

p ：(hPa) 压力

t ：温度，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 γ_w (dB/km)计算如下：

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

其中：

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

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

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

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。

2 路径衰减

2.1 地面路径衰减

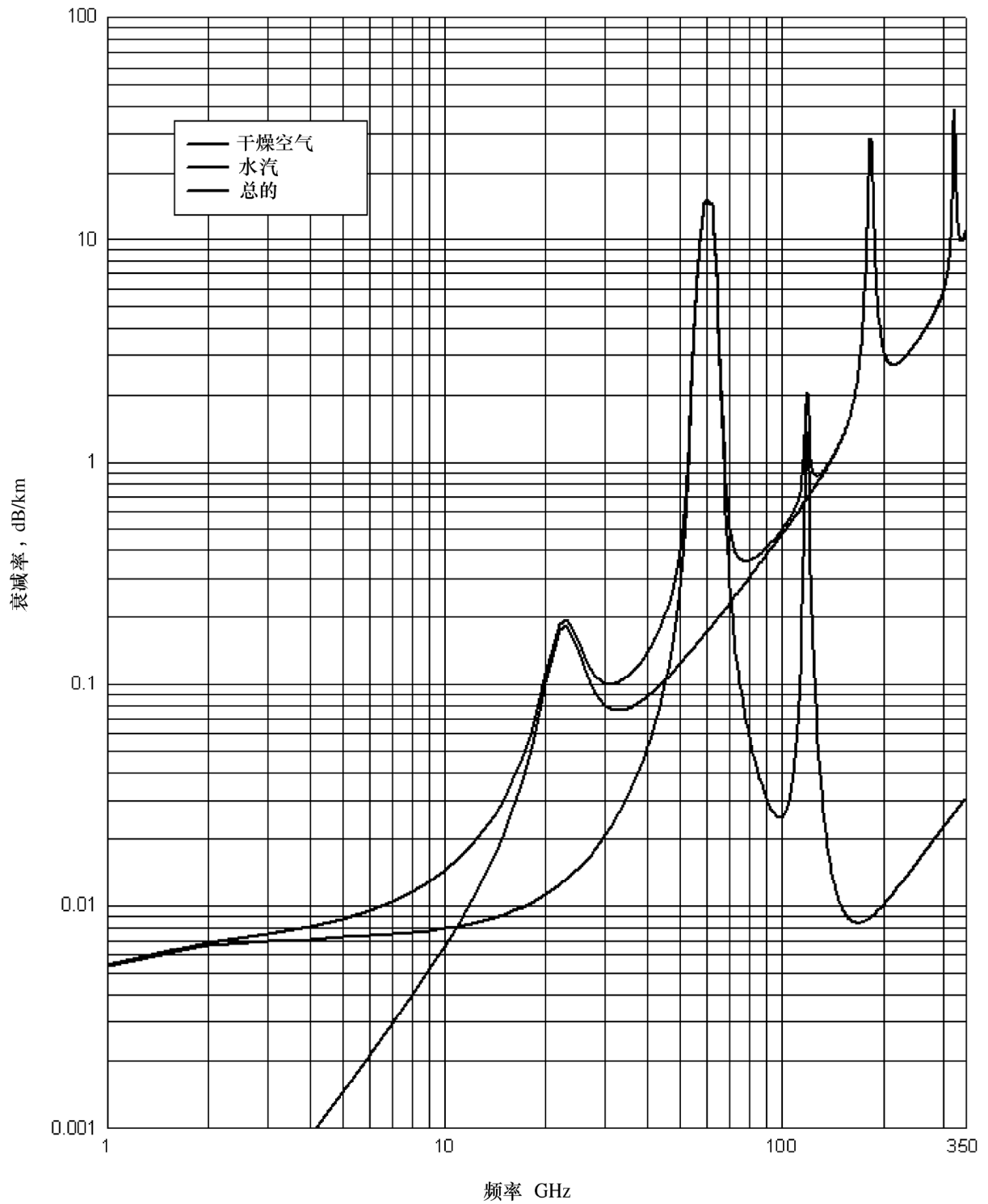
对水平路径，或者是微小倾斜的接近于地面的倾斜路径，其路径衰减 A 可由如下表示：

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

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：

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

其中：

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

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

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

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

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。

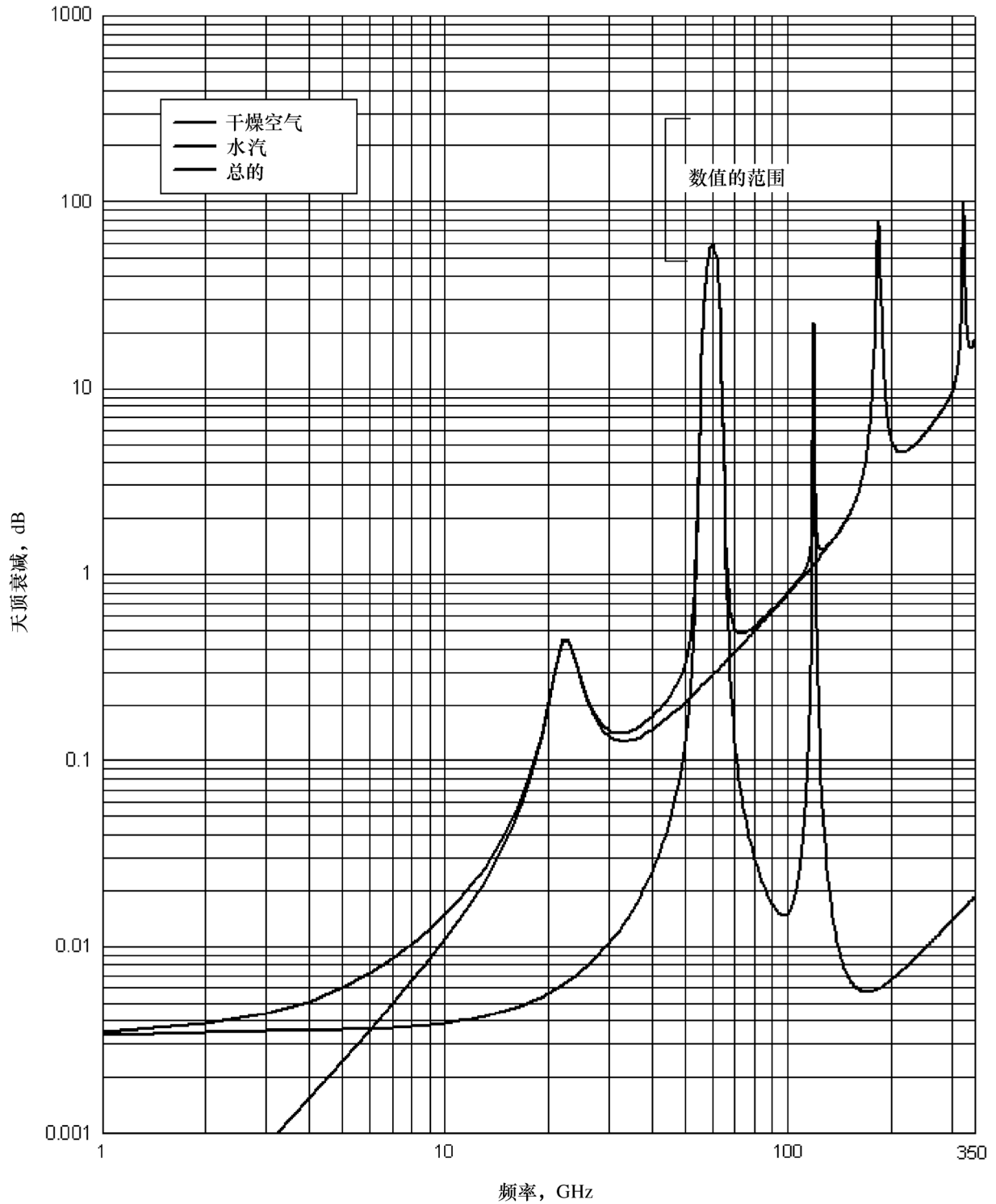
总的天顶衰减:

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

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, 该结果是采用附件的逐线计算得出的。

图 6

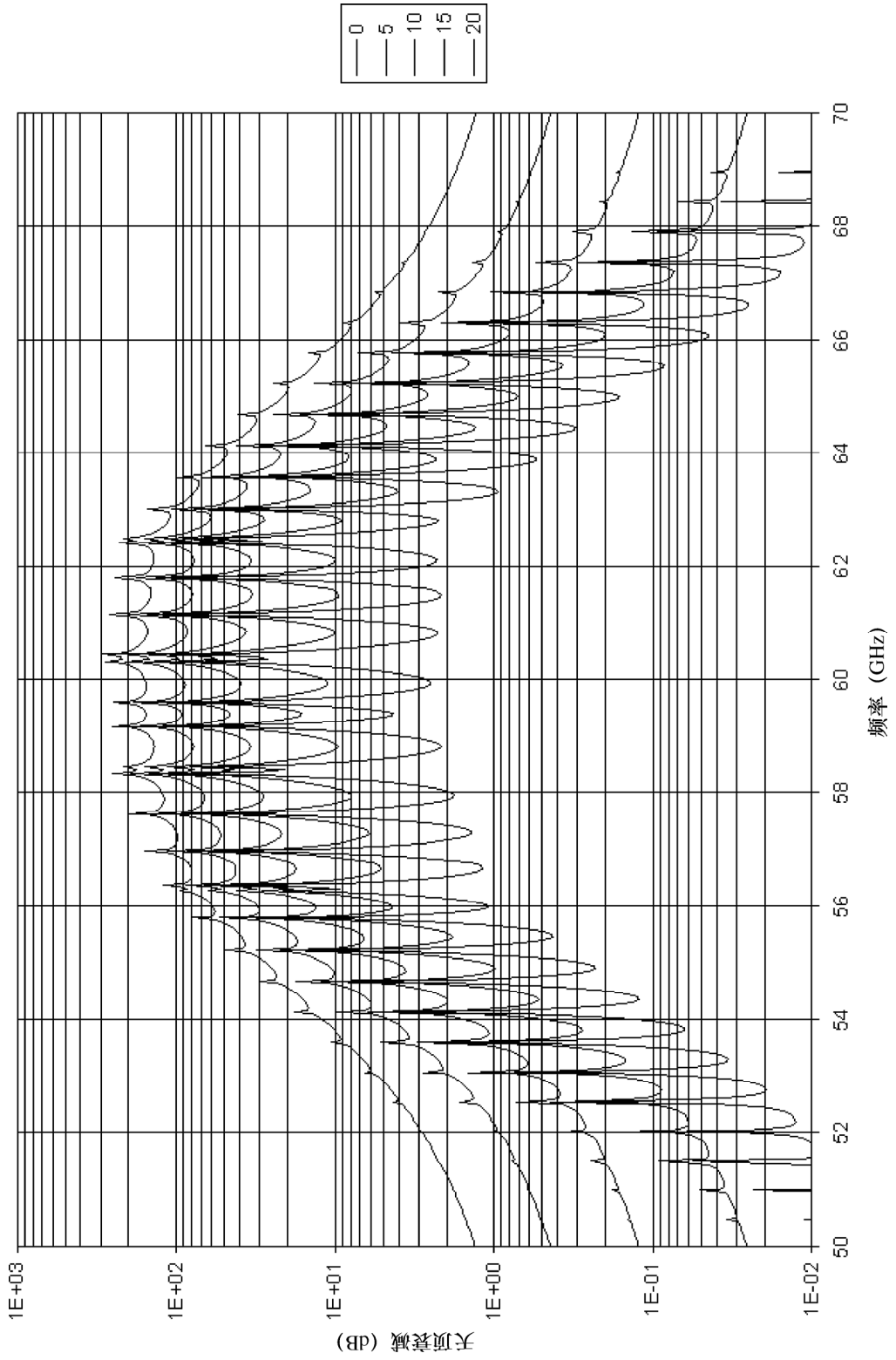
海平面的干燥空气和水汽造成的总的天顶衰减



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)



2.2.1 5°-90°之间的仰角

2.2.1.1 地对空路径

当仰角在 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:

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

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

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

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

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 最后列出了对应于干燥空气和水汽的不同的计算公式。

2.3 倾斜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_l 已知, 则可任选其中任一方法。总的水汽衰减计算如下:

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

其中:

f = 频率 (GHz)

θ = 仰角 (≥ 5 度)

f_{ref} = 20.6 (GHz)

p_{ref} = 780 (hPa)

$\rho_{v,ref}$ = $\frac{V(P)}{4}$ (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。

$\gamma_w(f, p, \rho, t)$ = 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。