

国 际 电 信 联 盟

ITU-R

国际电联无线电通信部门

ITU-R P.676-11 建议书

(09/2016)

无线电波在大气气体中的衰减

P 系列

无线电波传播



国际电信联盟

前言

无线电通信部门的职责是确保卫星业务等所有无线电通信业务合理、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
2017年，日内瓦

© ITU 2017

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.676-11建议书

无线电波在大气气体中的衰减

(ITU-R第201/3号研究课题)

(1990-1992-1995-1997-1999-2001-2005-2007-2009-2012-2013-2016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。

关键词

气体吸收，比衰减，斜路径衰减，总衰减，水汽，氧气，干空气

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。

本建议书指南

本建议书提供了以下三种预测由氧气和水汽造成的衰减率和路径气体衰减的方法：

- 1 在附件1中，假设与高度相对的气压、温度和水汽密度，采用逐线求和来计算衰减率和路径气体衰减；
- 2 在附件2中，假设地球表面的水汽密度，对衰减率和路径气体衰减进行近似估算；
- 3 在附件2中，假设沿路径的整层大气水汽含量，对路径衰减进行近似估算。

这些预测方法可使用当地气象数据，或在缺少当地数据的情况下，使用其他ITU-R P系列建议书中提供的与所需超出概率对应的参考大气或气象图。

比衰减

适用于最高至1 000 GHz的频率的附件1公式(1)或适用于最高至350 GHz的频率的附件2公式(22)与(23)之和可用于预测比衰减。两种方法均需要适用地点的气压、温度和水汽密度。如果当地数据不可用，可结合：a) ITU-R P.835建议书中的全球年平均参考大气、b) ITU-R P.1510建议书中的年平均地表温度图和c) ITU-R P.836建议书中的地表水汽密度与超出概率图来代替地平面标准地表水汽密度 7.5 g/m^3 。

斜路径（地-空）衰减

可使用附件1公式(20)或附件2公式(28)或(29)。

- 附件1公式(20)要求了解沿路径的温度、气压和水汽密度分布。如果当地分布数据不可知，可使用ITU-R P.835建议书中提供的参考大气分布图。ITU-R P.836建议书中相对于超出概率的地表水汽密度可用来代替地平面标准地表水汽密度 7.5 g/m^3 。
- 附件2公式(28)要求了解地表气压、地表温度和地表水汽密度。附件2公式(28)是适用于最高至350 GHz的频率的公式(20)的近似计算，假设了全球年平均参考大气和任意地表水汽密度以及水汽密度随高度的负指数分布。附件2公式(28)可用于预测：a) 特定的地表气压、地表温度和地表水汽密度值的瞬时气体衰减，或b)在理想的超出概率与地表水汽密度对应的气体衰减。如果当地地表水汽密度数据不可用，可使用ITU-R P.836建议书中的地表水汽密度图。
- 附件2公式(29)要求了解沿路径的地表温度、地表气压和整层大气水汽含量。与附件2公式(28)类似，附件2公式(29)可用于预测：a) 特定的地表气压、地表温度和整层水汽含量值的瞬时气体衰减，或b)在理想的超出概率与整层大气水汽含量对应的气体衰减。如果当地地表水汽总量数据不可用，可使用ITU-R P.836建议书中的整层大气水汽含量图。

如果当地地表水汽密度和整层大气水汽含量数据均可用，那么认为使用当地整层大气水汽含量的附件2公式(29)比使用当地地表水汽密度数据的附件2公式(28)更精确。同样，如果当地数据不可用，则认为使用ITU-R P.836建议书整层大气水汽含量图的附件2公式(29)比使用ITU-R P.836建议书地表水汽密度图的附件2公式(28)更精确。

	附件1 公式 (20)	附件2 公式 (28)	附件2 公式 (29)
频率范围	$\leq 1\ 000\ \text{GHz}$	$\leq 350\ \text{GHz}$	
准确性	最高, 逐线求和	近似值	
气压与高度	任意	全球年平均参考大气分布	
温度与高度			
水汽密度与高度		地表值随高度的负指数分布	代替水汽密度的整层大气水汽含量随高度的分布

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给出了使用预测方法计算的在气压1013.25 hPa、温度15°C、水汽密度为7.5 g/m³ (标准) 和干燥空气 (干燥) 两种情况下, 0-1 000 GHz频段的特征衰减 (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, 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

特征大气衰减值 γ 的计算方法如下:

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

此处， γ_o 和 γ_w 分别是干空气（氧气条件下，由气压造成的氮和非谐振Debye衰减）和水汽条件下的衰减率（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*条氧气或水汽谱线强度， F_i 是氧气或水汽谱线形状因子，对表1和表2中的所有谱线进行求和；

$N''_D(f)$ 是由大气压强造成的氮气吸收以及Debye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：

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

其中：

P : 干空气压强，单位为hPa

E : 水汽分压强，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无线电波的衰减率，以 1 GHz 为步长，包括线中心

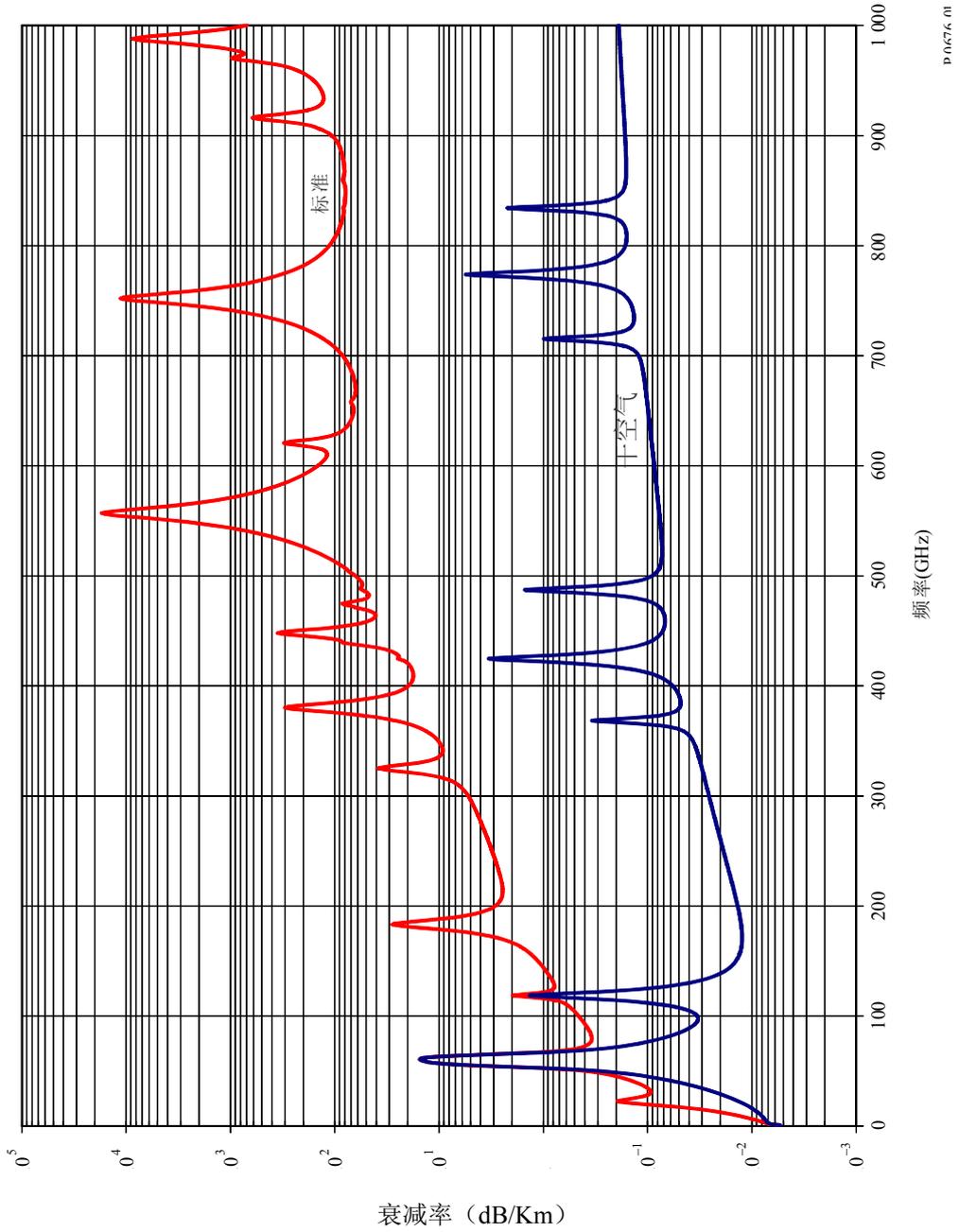
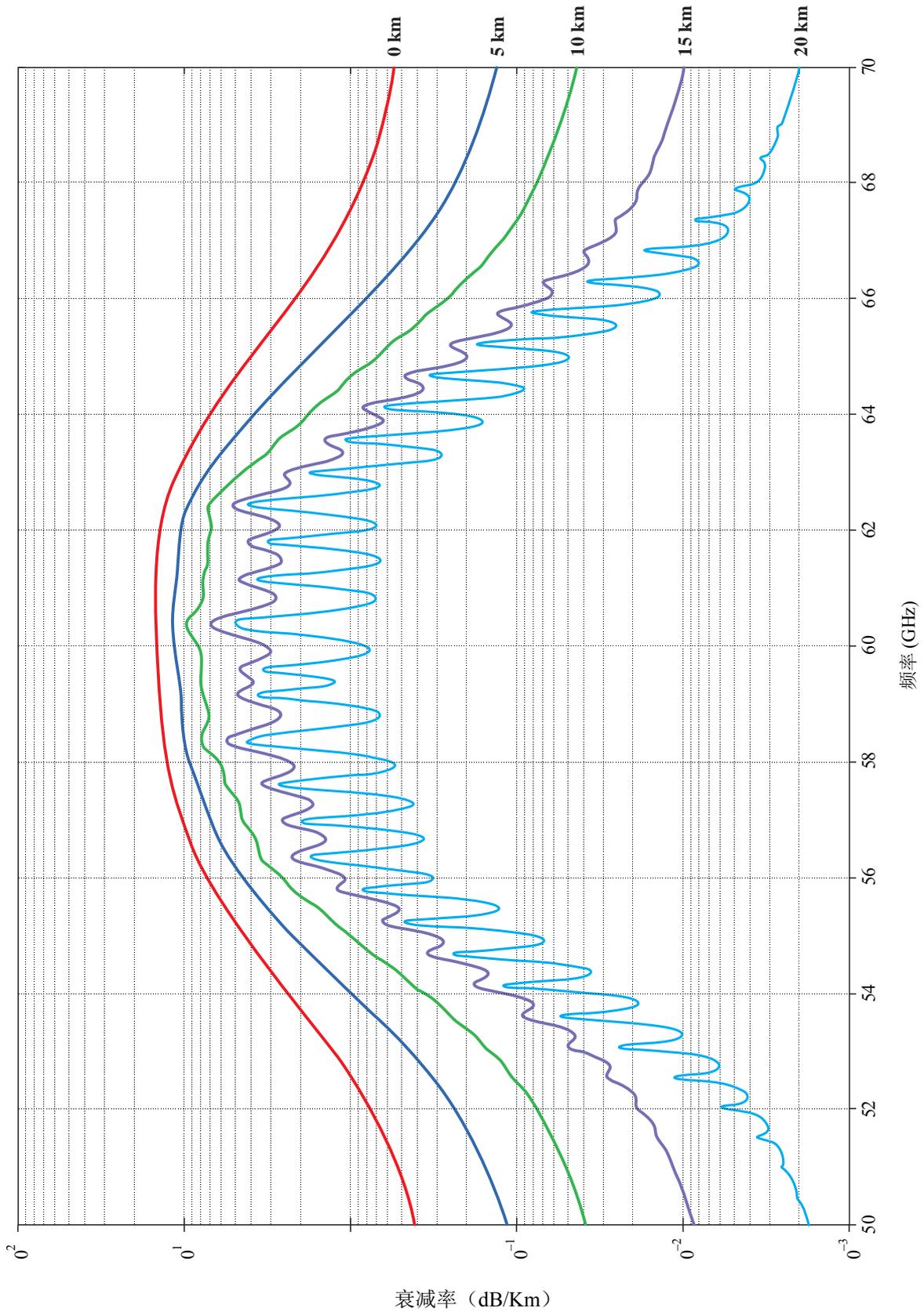


图 2

在 50-70 GHz 频率范围内的所示高度计算的衰减率 (步长为 10 MHz),
包括谱线中心 (0 km、5 km、10 km、15 km 和 20 km)



P.676-11

如果当地 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）。如缺少当地数据，应使用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，对于干空气和水汽衰减均使用水汽分压）

某个高度的水汽分压 e 可通过该高度的水汽密度 ρ 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，水汽的光谱数据见表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以下水汽共振的综合贡献（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 是氧气或水汽谱线频率， Δf 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 Δf ，将氧气谱线的塞曼分裂和水汽谱线的多普勒展宽考虑在内：

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：

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

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：

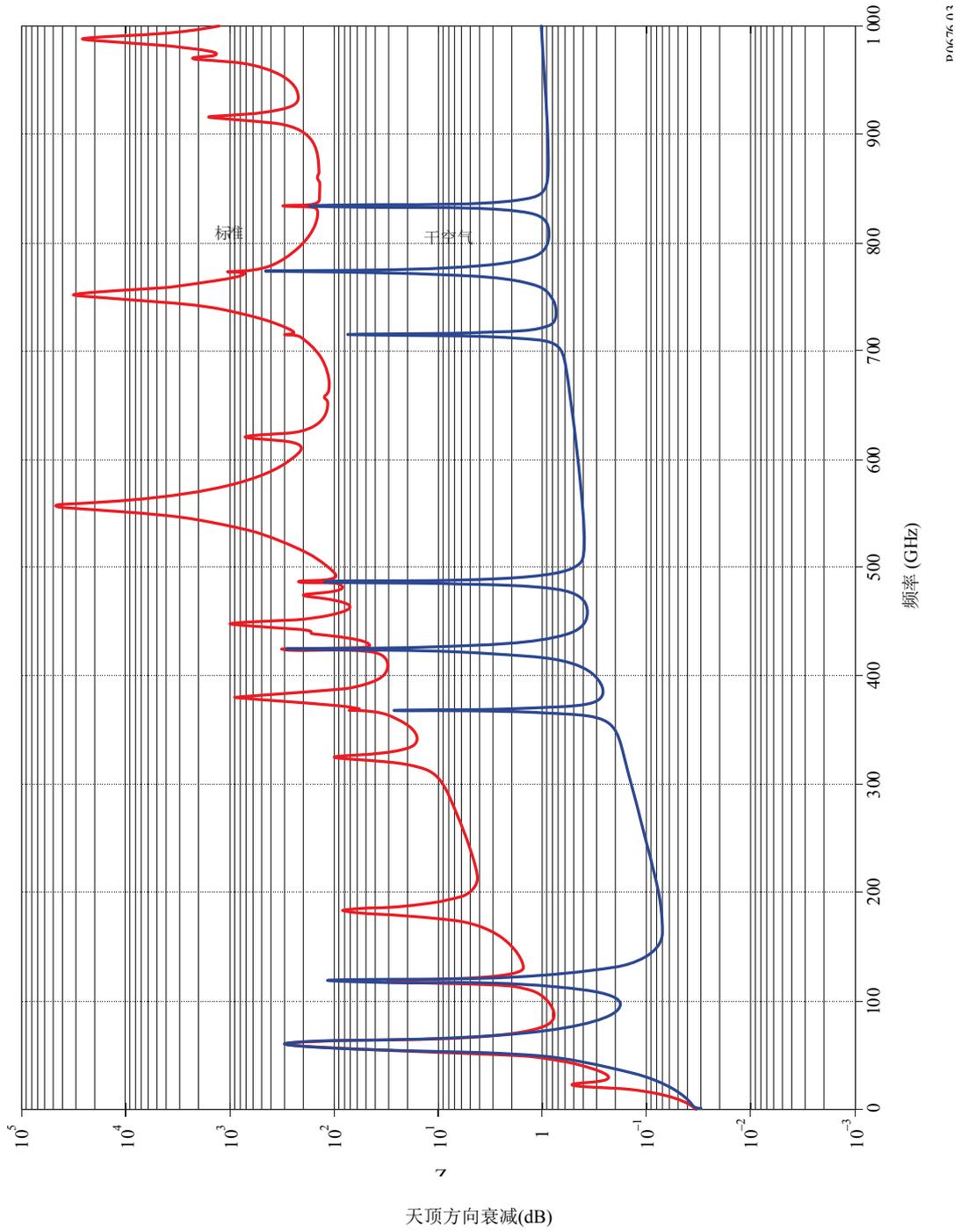
$$\beta_{n+1} = \arcsin \left(\frac{n_n}{n_{n+1}} \sin \alpha_n \right) \quad (19)$$

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



总衰减值 A_{gas} 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。

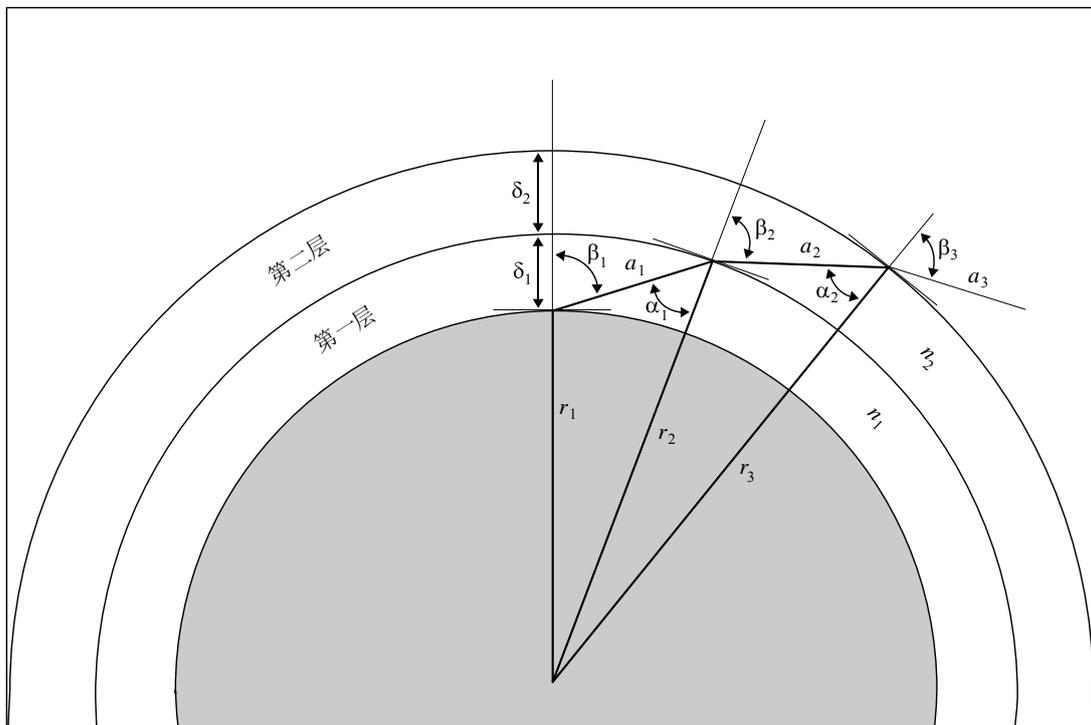
为了准确地计算路径衰减, 在最低层 (地面) 为 10 cm 到在 100 km 高度时为 1 km, 各层的厚度应以指数级增大, 通过下式:

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

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
穿过大气的路径



3 色散的影响

除上段所述基于频率相关复折射率虚部的衰减外，氧气和水汽亦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（度/公里）或相对于频率的群延迟（ps/km）对色散效应进行描述；与衰减类似，亦可计算斜路径色散。ITU-R《射电天文手册》第6章探讨了色散效应，该手册中还阐述了根据逐线预测方法计算色散的模型。在实际中，色散效应不对在远离主吸收线中心的频率上短距离（例如，小于约20公里）操作、带宽最高至几百MHz（特别是在频谱窗口区）的毫米波地面通信系统施加严重限制。对于卫星通信系统，穿过大气的较长路径会将操作频率限制在大气衰减和相应色散较低的窗口区内。

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，对无线电波在大气气体中的衰减进行近似估算。

1 比衰减

从海平面到10 km高度范围内，由于空气和水汽造成的无线电波衰减率，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氧气和水汽衰减率以及有效氧气和水汽高度。这些近似计算与逐线计算拟合。但在高度超过10 km且对精确度要求更高的情况，应采用逐线计算的方法。

干空气的大气衰减率 γ_o (dB/km)和湿空气的衰减率 γ_w (dB/km)计算如下：

$$\gamma_o = 0.1820 f \left(\sum_{i(Oxygen)} S_i F_i + N_D''(f) \right) \quad (22)$$

$$\gamma_w = 0.1820 f \sum_{i(Water\ Vapour)} S_i F_i \quad (23)$$

其中， S_i 、 F_i 和 $N_D''(f)$ 在公式(3)、(5)、(6a)、(7)、(8)和(9)对于氧气的情况中定义， S_i 和 F_i 在公式(3)、(4)、(5)、(6a)和(7)对于水汽的情况中定义。由于在10 km以下高度无需考虑氧气谱线的塞曼分裂和水汽谱线的多普勒展宽，因此不包括公式(6b)。在表1所有氧气谱线上针对氧气进行求和，在表2标有星号的9条水汽谱线上对水汽进行求和。

干空气气压 p 和温度 T 是地球表面的干空气气压和温度。如果当地数据不可用，可利用ITU-R P.835建议书中给出的年平均全球参考大气数据来确定地球表面高度处的干空气气压和温度。

图5显示了对于ITU-R P.835中年平均全球参考大气数据，海平面上1至350 GHz频率范围干空气（干空气）、水汽（仅在水汽密度为 7.5 g/m^3 的条件下）的衰减率以及总衰减率（总）。

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：

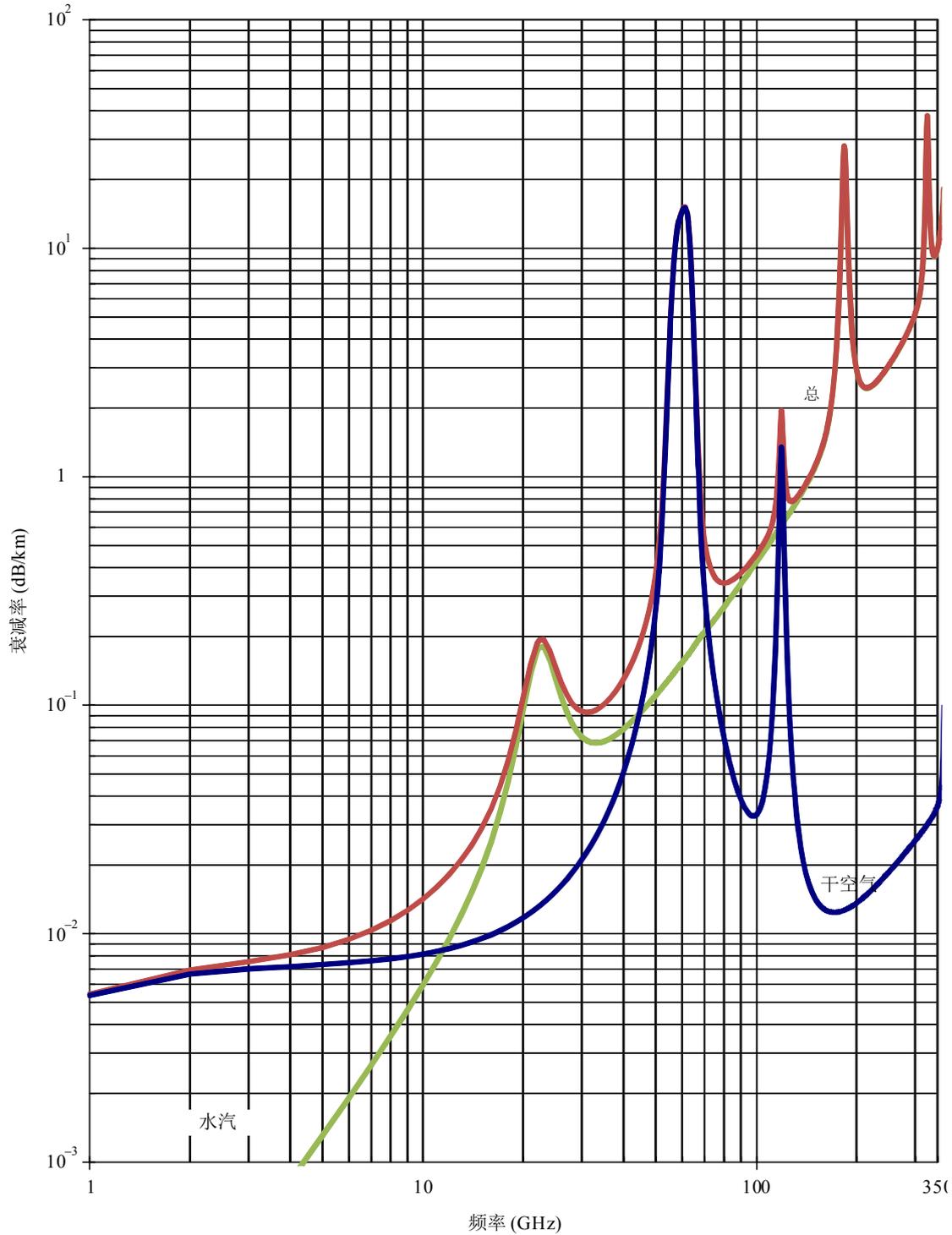
$$A = \gamma r_0 = (\gamma_o + \gamma_w) r_0 \quad \text{dB} \quad (24)$$

其中 r_0 为路径长度，单位为km。

图5

大气气体引起的衰减率

(气压 = 1 013.25 hPa; 温度 = 15°C; 水汽密度 = 7.5 g/m³)



P.676-11

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：

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

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

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

在约束条件下：

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

对水汽，等效高度计算如下：

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

for $f \leq 350$ GHz

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

其中：

$$r_p = (p + e)/1013.25$$

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：

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

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：

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

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

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

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

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）。

图6

海平面上总天顶衰减、干空气和水汽天顶衰减
(气压 = 1 013.25 hPa; 温度 = 15°C; 水汽密度 = 7.5 g/m³)

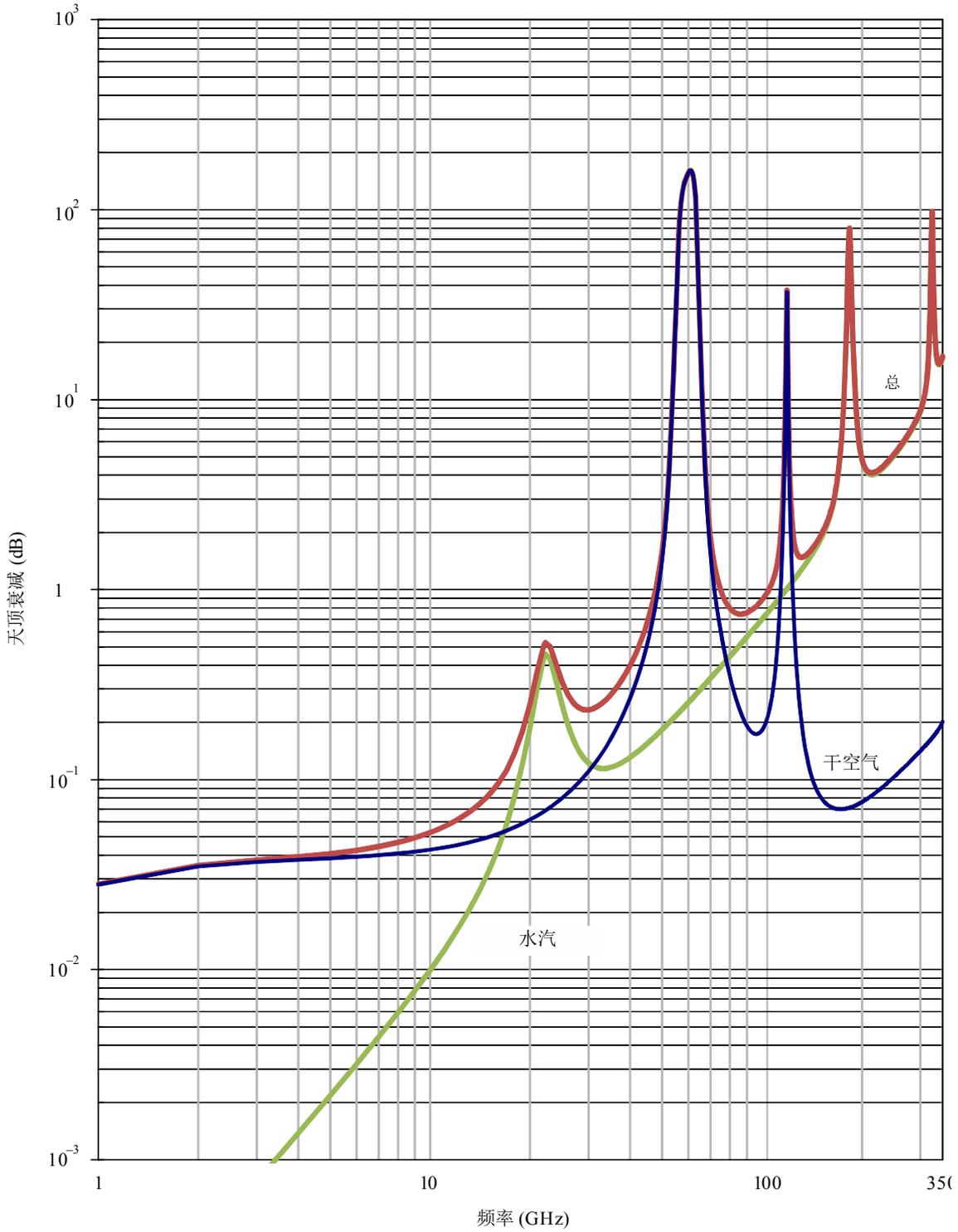
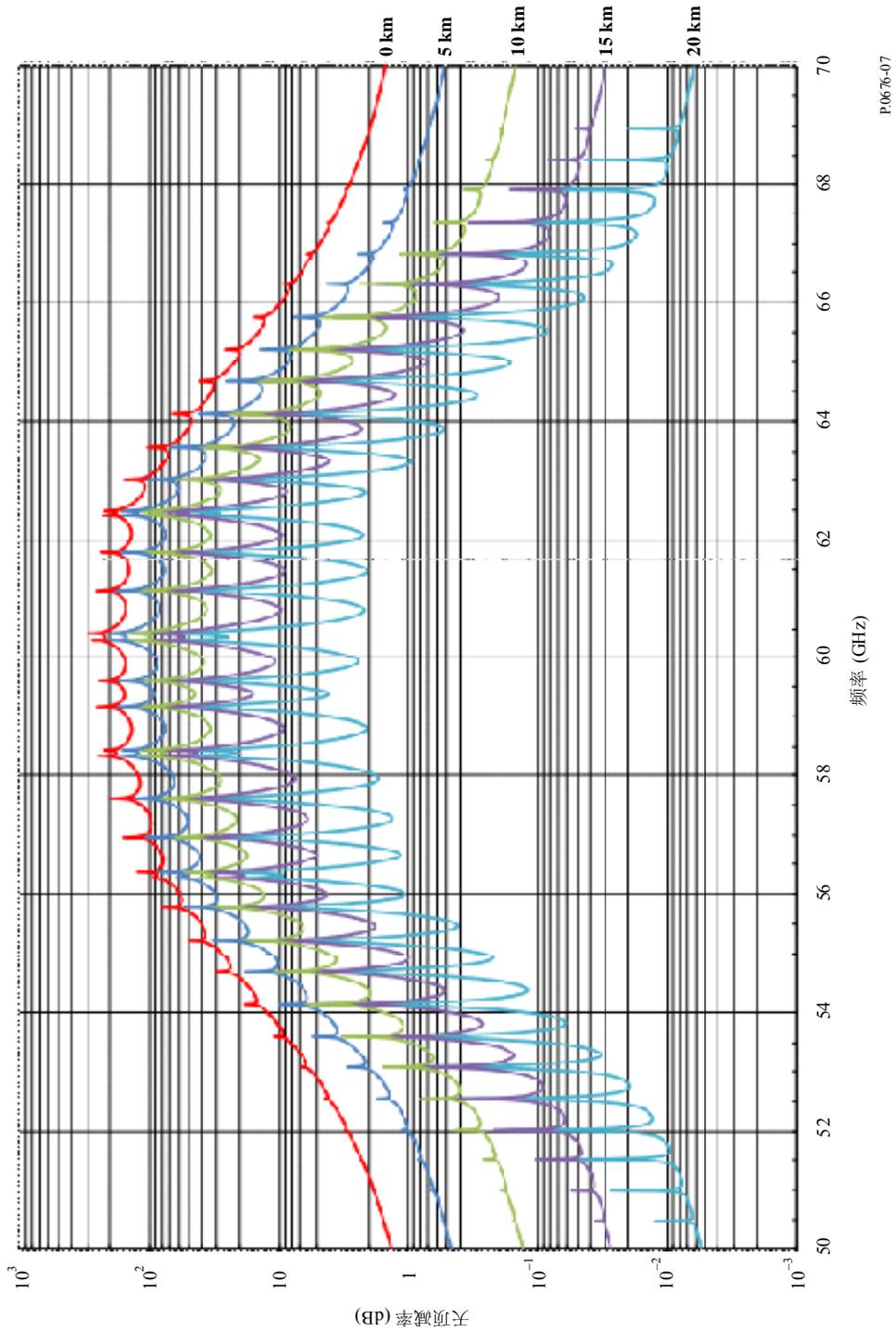


图7

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



地表 ρ_1 的值见ITU-R P.836建议书。

第2.2.2.2段阐述了干空气和水汽情况的不同公式。

2.3 方位角路径在水汽中的衰减

上述计算倾斜路径衰减的方法的前提是地表水汽密度已知。如果整层大气水汽密度 V_t 已知，那么总的水汽衰减可按如下计算：

$$A_w = \begin{cases} \frac{0.0176 V_t \gamma_w(f, p_{ref}, \rho_{v,ref}, t_{ref})}{\gamma_w(f_{ref}, p_{ref}, \rho_{v,ref}, t_{ref})}, & 1 \text{ GHz} \leq f \leq 20 \text{ GHz} \\ \frac{0.0176 V_t \gamma_w(f, p_{ref}, \rho_{v,ref}, t_{ref})}{\gamma_w(f_{ref}, p_{ref}, \rho_{v,ref}, t_{ref})} (ah^b + 1), & 20 \text{ GHz} < f \leq 350 \text{ GHz} \end{cases} \quad \text{dB} \quad (37)$$

其中：

$$a = 0.2048 \exp \left[- \left(\frac{f - 22.43}{3.097} \right)^2 \right] + 0.2326 \exp \left[- \left(\frac{f - 183.5}{4.096} \right)^2 \right] \\ + 0.2073 \exp \left[- \left(\frac{f - 325}{3.651} \right)^2 \right] - 0.113 \\ b = 8.741 \times 10^4 \exp(-0.587f) + 312.2f^{-2.38} + 0.723$$

$$h = \begin{cases} h_s & h_s \leq 4 \text{ km} \\ 4 & h_s > 4 \text{ km} \end{cases}$$

和

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)

$V_t(P)$: 整层大气水汽量 (kg/m²或mm)，可由以下方式获得：a) 当地无线电探空仪或辐射测量数据或b) 由ITU-R P.836建议书中的数字地图获得的在所需时间百分比的数据 (kg/m²或mm)

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

h_s : 地面站海拔高度 (a.m.s.l) (km)。