

ITU-R P.835-4 建议书

参考标准大气

(ITU-R 201/3 号研究课题)

(1992-1994-1997-1999-2005)

国际电联无线电通信全会，

考虑到

a) 在计算地—空路径上的气体衰减过程中，必须要使用参考标准大气，

建议

1 应该用附件 1 中的标准大气来确定温度、压力和水蒸气压力与高度的关系，用于无法获得更可靠的本地数据时计算气体衰减；

2 当要知道关心的地点的季度和月度的变化时，应该使用附件 2 和附件 3 中的实验数据。

附 件 1

1 平均年度全球参考大气

下面的参考标准大气反映了全球取平均时的年度平均分布。

1.1 温度和压力

参考标准大气是基于美国 1976 年的标准大气。在该标准大气中，大气被分为 7 个连续的层，随温度线性变化，如图 1 所示。

在高度 h 处的温度 T 用下式表示：

$$T(h) = T_i + L_i(h - H_i) \quad \text{K} \quad (1)$$

其中：

$$T_i = T(H_i) \quad (2)$$

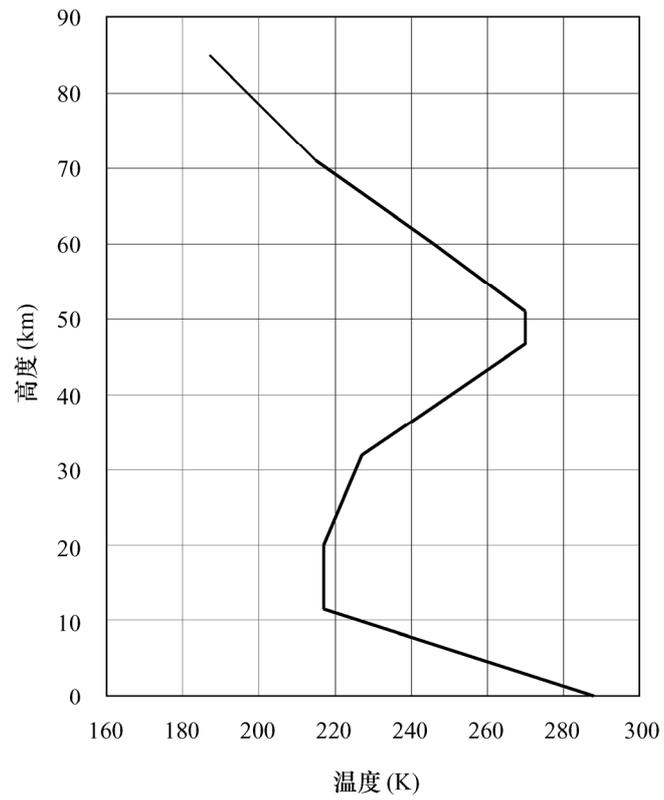
而 L_i 是以高度 H_i 为起点的温度梯度，并在表 1 中给出：

表 1

下标 i	高度 H_i (km)	温度梯度 L_i (K/km)
0	0	-6.5
1	11	0.0
2	20	+1.0
3	32	+2.8
4	47	0.0
5	51	-2.8
6	71	-2.0
7	85	

图 1

大气温度的参考分布图



0835-01

当温度梯度 $L_i \neq 0$ 时，压力由下式给出：

$$P(h) = P_i \left[\frac{T_i}{T_i + L_i(h - H_i)} \right]^{34.163/L_i} \quad \text{hPa} \quad (3)$$

当温度梯度 $L_i = 0$ 时，从以下公式来求出压力：

$$P(h) = P_i \exp \left[\frac{-34.163(h - H_i)}{T_i} \right] \quad \text{hPa} \quad (4)$$

地平面上的标准温度和压力为：

$$\begin{aligned} T_0 &= 288.15 & \text{K} \\ P_0 &= 1013.25 & \text{hPa} \end{aligned} \quad (5)$$

注意，在高度约 85 km 以上时，大气的热动力学方程开始被破坏，因此，作为上列公式基础的流体静力学方程不再成立。

1.2 水蒸气压力

通常，大气中水蒸气的分布变化很大，但是可以由下式近似获得：

$$\rho(h) = \rho_0 \exp(-h/h_0) \quad \text{g/m}^3 \quad (6)$$

其中标高 $h_0 = 2 \text{ km}$ ，而标准地平面水蒸气密度为：

$$\rho_0 = 7.5 \quad \text{g/m}^3 \quad (7)$$

用下列公式（见 ITU-R P.453 建议书）可以根据密度求出水蒸气压力：

$$e(h) = \frac{\rho(h)T(h)}{216.7} \quad \text{hPa} \quad (8)$$

在混合比 $e(h)/P(h) = 2 \times 10^{-6}$ 的高度以下，水蒸气密度随高度增加而呈指数减小。在这一高度以上，假定混合比为常数。

1.3 用于衰减计算的干燥大气

除水蒸气以外的大气中的各气体（“干大气”）的密度分布可以根据 § 1.1 中给出的温度和压力分布来求出。

为了计算衰减，这一密度分布可根据公式（6）用指数分布来近似，公式中代入：

$$h_0 = 6 \text{ km} \quad (9)$$

2 低纬度地区年参考大气

对于低纬度地区（小于 22° ），季节性变化不是很重要的，可以利用一个年度分布曲线。

在高度 h (km) 处的温度 T (K) 由下面的公式给出:

$$\begin{aligned} T(h) &= 300.4222 - 6.3533h + 0.005886h^2 && \text{对于} && 0 \leq h < 17 \\ T(h) &= 194 + (h-17)2.533 && \text{对于} && 17 \leq h < 47 \\ T(h) &= 270 && \text{对于} && 47 \leq h < 52 \\ T(h) &= 270 - (h-52)3.0714 && \text{对于} && 52 \leq h < 80 \\ T(h) &= 184 && \text{对于} && 80 \leq h \leq 100 \end{aligned}$$

而压力 P (hPa) 为:

$$\begin{aligned} P(h) &= 1012.0306 - 109.0338h + 3.6316h^2 && \text{对于} && 0 \leq h < 10 \\ P(h) &= P_{10} \exp[-0.147(h-10)] && \text{对于} && 10 \leq h < 72 \\ P(h) &= P_{72} \exp[-0.165(h-72)] && \text{对于} && 72 \leq h \leq 100 \end{aligned}$$

其中 P_{10} 和 P_{72} 分别为 10 km 和 72 km 处的压力。

对水蒸气 (g/m^3):

$$\begin{aligned} \rho(h) &= 19.6542 \exp[-0.2313h - 0.1122h^2 + 0.01351h^3 - 0.0005923h^4] && \text{对于} && 0 \leq h \leq 15 \\ \rho(h) &= 0 && \text{对于} && h > 15 \end{aligned}$$

3 中纬度地区参考大气

对中纬度 (在 22° 和 45° 之间) 地区, 夏季和冬季可以用下列分布。

3.1 夏季中纬度

在高度 h (km) 处的温度 T (K) 由下面的公式给出:

$$\begin{aligned} T(h) &= 294.9838 - 5.2159h - 0.07109h^2 && \text{对于} && 0 \leq h < 13 \\ T(h) &= 215.5 && \text{对于} && 13 \leq h < 17 \\ T(h) &= 215.5 \exp[(h-17)0.008128] && \text{对于} && 17 \leq h < 47 \\ T(h) &= 275 && \text{对于} && 47 \leq h < 53 \\ T(h) &= 275 + \{1 - \exp[(h-53)0.06]\}20 && \text{对于} && 53 \leq h < 80 \\ T(h) &= 175 && \text{对于} && 80 \leq h \leq 100 \end{aligned}$$

而压力 P (hPa) 为:

$$\begin{aligned} P(h) &= 1012.8186 - 111.5569h + 3.8646h^2 && \text{对于} && 0 \leq h < 10 \\ P(h) &= P_{10} \exp[-0.147(h-10)] && \text{对于} && 10 \leq h < 72 \\ P(h) &= P_{72} \exp[-0.165(h-72)] && \text{对于} && 72 \leq h < 100 \end{aligned}$$

其中 P_{10} 和 P_{72} 分别为 10 km 和 72 km 处的压力。

对水蒸气 (g/m^3):

$$\begin{aligned} \rho(h) &= 14.3542 \exp[-0.4174h - 0.02290h^2 + 0.001007h^3] && \text{对于} && 0 \leq h \leq 10 \\ \rho(h) &= 0 && \text{对于} && h > 10 \end{aligned}$$

3.2 冬季中纬度

在高度 h (km) 处的温度 T (K) 由下面的公式给出:

$$\begin{aligned} T(h) &= 272.7241 - 3.6217h - 0.1759h^2 && \text{对于 } 0 \leq h < 10 \\ T(h) &= 218 && \text{对于 } 10 \leq h < 33 \\ T(h) &= 218 + (h - 33)3.3571 && \text{对于 } 33 \leq h < 47 \\ T(h) &= 265 && \text{对于 } 47 \leq h < 53 \\ T(h) &= 265 - (h - 53)2.0370 && \text{对于 } 53 \leq h < 80 \\ T(h) &= 210 && \text{对于 } 80 \leq h \leq 100 \end{aligned}$$

而压力 P (hPa) 为:

$$\begin{aligned} P(h) &= 1018.8627 - 124.2954h + 4.8307h^2 && \text{对于 } 0 \leq h < 10 \\ P(h) &= P_{10} \exp[-0.147(h - 10)] && \text{对于 } 10 \leq h < 72 \\ P(h) &= P_{72} \exp[-0.155(h - 72)] && \text{对于 } 72 \leq h \leq 100 \end{aligned}$$

其中 P_{10} 和 P_{72} 分别为 10 km 和 72 km 处的压力。

对水蒸气 (g/m^3):

$$\begin{aligned} \rho(h) &= 3.4742 \exp[-0.2697h - 0.03604h^2 + 0.0004489h^3] && \text{对于 } 0 \leq h \leq 10 \\ \rho(h) &= 0 && \text{对于 } h > 10 \end{aligned}$$

4 高纬度地区参考大气

对高纬度 (高于 45°) 地区, 夏季和冬季可以用下列分布。

4.1 夏季高纬度

在高度 h (km) 处的温度 T (K) 由下面的公式给出:

$$\begin{aligned} T(h) &= 286.8374 - 4.7805h - 0.1402h^2 && \text{对于 } 0 \leq h < 10 \\ T(h) &= 225 && \text{对于 } 10 \leq h < 23 \\ T(h) &= 225 \exp[(h - 23)0.008317] && \text{对于 } 23 \leq h < 48 \\ T(h) &= 277 && \text{对于 } 48 \leq h < 53 \\ T(h) &= 277 - (h - 53)4.0769 && \text{对于 } 53 \leq h < 79 \\ T(h) &= 171 && \text{对于 } 79 \leq h \leq 100 \end{aligned}$$

而压力 P (hPa) 为:

$$\begin{aligned} P(h) &= 1008.0278 - 113.2494h + 3.9408h^2 && \text{对于 } 0 \leq h < 10 \\ P(h) &= P_{10} \exp[-0.140(h - 10)] && \text{对于 } 10 \leq h < 72 \\ P(h) &= P_{72} \exp[-0.165(h - 72)] && \text{对于 } 72 \leq h \leq 100 \end{aligned}$$

其中 P_{10} 和 P_{72} 分别为 10 km 和 72 km 处的压力。

对水蒸气 (g/m^3):

$$\begin{aligned} \rho(h) &= 8.988 \exp[-0.3614h - 0.005402h^2 - 0.001955h^3] && \text{对于 } 0 \leq h \leq 15 \\ \rho(h) &= 0 && \text{对于 } h > 15 \end{aligned}$$

4.2 冬季高纬度

在高度 h (km) 处的温度 T (K) 由下面的公式给出:

$$T(h) = 257.4345 + 2.3474h - 1.5479h^2 + 0.08473h^3 \quad \text{对于} \quad 0 \leq h < 8.5$$

$$T(h) = 217.5 \quad \text{对于} \quad 8.5 \leq h < 30$$

$$T(h) = 217.5 + (h - 30)2.125 \quad \text{对于} \quad 30 \leq h < 50$$

$$T(h) = 260 \quad \text{对于} \quad 50 \leq h < 54$$

$$T(h) = 260 - (h - 54)1.667 \quad \text{对于} \quad 54 \leq h \leq 100$$

而压力 P (hPa):

$$P(h) = 1010.8828 - 122.2411h + 4.554h^2 \quad \text{对于} \quad 0 \leq h < 10$$

$$P(h) = P_{10} \exp[-0.147(h-10)] \quad \text{对于} \quad 10 \leq h < 72$$

$$P(h) = P_{72} \exp[-0.150(h-72)] \quad \text{对于} \quad 72 \leq h \leq 100$$

其中 P_{10} 和 P_{72} 分别为 10 km 和 72 km 处的压力。

对水蒸气 (g/m^3):

$$\rho(h) = 1.2319 \exp[0.07481h - 0.0981h^2 + 0.00281h^3] \quad \text{对于} \quad 0 \leq h \leq 10$$

$$\rho(h) = 0 \quad \text{对于} \quad h > 10$$

参 考 资 料

BRUSSAARD, G., DAMOSSO, E. and STOLA, L. [October, 1983] Characterisation of the 50-70 GHz band for space communications. *CSELT Rapporti Tecnici*, Vol. XI, 5.

附 件 2

1 大气垂直分布的实验数据

在全世界 353 个地点, 历经 10 年 (1980-1989 年) 的无线电探空仪测试, 得到了关于温度、压力和相对湿度的垂直剖面分布的月平均值。这一数据集 (DST.STD) 可以由国际电联/无线电通信局 (ITU/BR) 取得, 它包含 00.00 UTC 和 12.00 UTC 两种情况下压力、温度和相对湿度的月平均垂直分布。这些分布是在不下雨的情况下计算出来的, 高度范围从 0 到 16 km, 间隔 500 m 计算一个点。平均月度分布数据放在名为 `<WMO_code>.dat` 的 ASCII 文件中, 其中 *WMO_code* 是按照世界气象组织 (WMO) 规定的站名代码 (例如: 03496.dat 文件中的 03496 是 WMO 对 Hemsby-in-Norfolk 的站代码)。表 2 给出了一个垂直剖面分布的例子。地址列表放在名为 `dst_std_lst.csv` 的 ASCII 文件中 (用逗号分开的数值文件, 即 CSV 文件格式)。这一文件的每一记录包括下列字段: WMO_CODE、站名、国家、纬度、经度、海拔高度。这样的记录的一个例子如表 3 所示。

在最大高度以上, 利用附件 1 给出的参考分布剖面, 可进行外插法运算。为了将相对湿度转化为水蒸气密度的绝对值, 应该使用 ITU-R P.453 建议书中的有关公式。

表 2

DST.STD 数据格式 — 月平均分布的实例(站号 10410)

YYMMDDHH NL			
99 199 0 33			
压力(hPa)	Z(km)	温度(K)	RH(%/100)
1 016.905	0.00	273.62	0.864E+00
956.686	0.50	273.33	0.830E+00
898.555	1.00	271.74	0.754E+00
844.014	1.50	269.59	0.665E+00
791.860	2.00	267.15	0.591E+00
742.661	2.50	264.56	0.518E+00
696.285	3.00	261.89	0.470E+00
651.977	3.50	258.94	0.458E+00
610.086	4.00	255.88	0.448E+00
570.467	4.50	252.69	0.445E+00
533.076	5.00	249.33	0.451E+00
497.767	5.50	245.90	0.453E+00
464.123	6.00	242.32	0.450E+00
432.441	6.50	238.75	0.450E+00
402.414	7.00	235.16	0.443E+00
374.177	7.50	231.59	0.437E+00
347.236	8.00	228.12	0.433E+00
322.281	8.50	224.88	0.427E+00
298.474	9.00	221.89	0.421E+00
276.492	9.50	219.27	0.416E+00
255.527	10.00	217.08	0.411E+00
236.297	10.50	215.62	0.402E+00
218.415	11.00	214.79	0.393E+00
201.366	11.50	214.14	0.348E+00
186.214	12.00	214.02	0.205E+00
172.093	12.50	214.24	0.104E+00
158.709	13.00	214.66	0.368E-01
146.492	13.50	214.94	0.351E-02
135.813	14.00	214.88	0.120E-02
125.690	14.50	214.50	0.117E-02
116.027	15.00	214.01	0.113E-02
106.798	15.50	213.56	0.110E-02
98.291	16.00	213.26	0.107E-02

表 2 的说明:

YY = 年 (99 为平均月垂直分布)

MM = 月 (1 = 1 月, 2 = 2 月……)

DD = 该月中的日子 (99 为平均月垂直分布)

HH = 一天的钟点 (UTC)

NL = 垂直高度的数值 (对 STD.DST, NL = 33)

压力 (hPa) = 大气总压力

Z (km) = 离地球表面的高度

温度 (K) = 空气温度

RH (%100) = 相对湿度 (以小数表示)

注 1 — 若记录不到, 则可以将温度和压力的值置为零。

表 3

DST-STD-LST.CSV 站资料文件 — 记录结构实例

世界气象组织代码	站名	国家	纬度 (度)	经度 (度)	海拔高度 (m)
10 410	ESSEN	DL	51.4	6.967	153

注 1 — 纬度和经度的数值用十进制度表示 (即 $51.4=51^{\circ} 24'$)。

附 件 3

1 大气垂直分布的数值气候预测数据

用重新分析项目取得的 ECMWF 15 年数据集 (ERA15) 计算温度、压力和水蒸气密度的垂直剖面分布的月平均值, 通常以一天的小时来平均。这一数据集 (ESA_STD_PROF) 是可以从国际电联/无线电通信局 (ITU/BR) 取得的。这一数据集包含在 00.00, 06.00, 12.00 和 18.00 UTC 时的空气总压力、空气温度和水蒸气密度的月平均垂直分布。这些剖面分布从当地地球表面周围的参考高度一直延伸到地球表面以上 30 km 左右, 它包含从 ERA15 模型水平导出的 32 个高度。该数据经度范围为 0 到 360° , 纬度范围为 $+90^{\circ}$ 到 -90° , 经度和纬度的分辨率都是 1.5° 。所有的数据以 BIG-Endian 格式, 用 IEEE 浮点单精度标准 (4 字节, 32 比特) 存储在文件中。

每一气象参数月平均分布放在名为 $\langle param \rangle_{\langle hh \rangle}.bin$ 的二进制文件中。其中 $param$ 是气象参数的名称 ($pres$ = 空气总压力 [hPa], $temp$ = 空气温度 [K], $vapd$ = 水蒸气密度 [g/m^3]), hh 是该点的钟点 (即 00, 06, 12 和 18 [UTC])。剖面分布水平的高度放在单独的二进制文件中, 名称为 $hght.bin$ 。在该文件中, 包含了月平均水平高度的垂直分布。表 4 给出了对一具体地点数据库中所包含的数据的实例。

表 4

ESA_STD_PROF 内容 — 在格状点处的实例
(纬度=45° 和经度=9°)
在 7 月的 12 点(UTC)时

高度 (m)	压力 (hPa)	温度 (K)	Vapd (g/m ³)
668.309	939.255	298.373	9.823
701.645	935.673	298.125	9.617
819.406	923.092	296.598	9.302
1 029.200	900.957	294.292	8.811
1 312.119	871.693	291.459	8.099
1 653.510	837.298	288.287	6.992
2 042.286	799.373	285.107	5.706
2 470.212	759.191	282.116	4.555
2 931.283	717.723	279.045	3.641
3 421.197	675.691	275.934	2.692
3 937.159	633.633	272.913	1.855
4 477.475	591.936	269.707	1.286
5 040.996	550.876	266.183	0.911
5 627.126	510.656	262.354	0.636
6 235.769	471.427	258.213	0.428
6 867.105	433.307	253.687	0.277
7 521.528	396.390	248.780	0.173
8 199.571	360.767	243.521	0.103
8 901.801	326.527	237.971	0.058
9 629.047	293.764	232.319	0.034
10 382.883	262.580	226.984	0.019
11 167.396	233.064	222.845	0.009
11 990.928	205.263	220.483	0.003
12 864.380	179.195	219.279	0.001
13 799.389	154.827	218.154	0.001
14 812.536	132.043	217.057	0.001
15 934.765	110.604	216.026	0.000
17 228.709	90.110	215.674	0.000
18 821.158	70.037	216.262	0.000
20 964.607	50.038	219.300	0.000
24 270.756	30.039	223.166	0.000
31 430.756	10.320	232.854	0.000

表 4 的说明:

Z (m) = 海拔高度

压力 (hPa) = 大气总压力

温度 (K) = 空气温度

Vapd (g/m³) = 水蒸气密度

注 1 — 访问 ESA_STD_PROF 数据集的 Matlab 和 Fortran 程序可以从有关无线电通信第 3 研究组的 ITU-R 网站得到。
