

国 际 电 信 联 盟

ITU-R

国际电联无线电通信部门

ITU-R P.835-5 建议书
(02/2012)

参考标准大气

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
2013年，日内瓦

© 国际电联 2013

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.835-5 建议书

参考标准大气

(ITU-R 201/3号研究课题)

(1992-1994-1997-1999-2005-2012年)

范围

ITU-R P.835建议书提供计算地对空路径上气体衰减所需的参考标准大气的表达式和数据。

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：

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

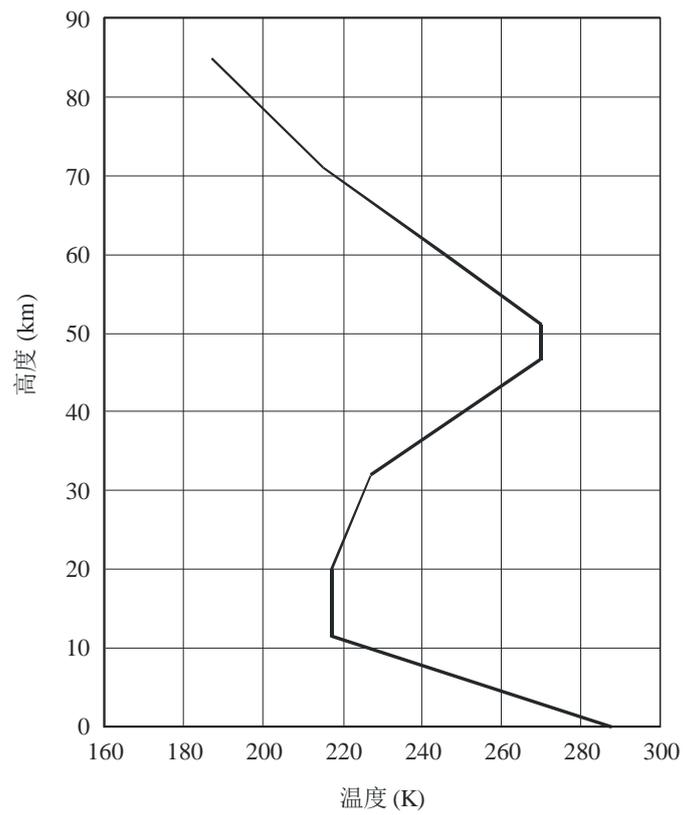
而 L_i 是以高度 H_i 为起点的温度梯度，并在表1中给出。

表1

下标 <i>i</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



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 $h_0 = 2$ 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:

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

而压力 P (hPa) 为:

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

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):

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

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:

$$\begin{aligned} T(h) &= 294.9838 - 5.2159 h - 0.07109 h^2 && \text{对于 } 0 \leq h < 13 \\ T(h) &= 215.15 && \text{对于 } 13 \leq h < 17 \\ T(h) &= 215.15 \exp [(h - 17) 0.008128] && \text{对于 } 17 \leq h < 47 \\ T(h) &= 275 && \text{对于 } 47 \leq h < 53 \\ T(h) &= 275 + \{ 1 - \exp [(h - 53) 0.06] \} 20 && \text{对于 } 53 \leq h < 80 \\ T(h) &= 175 && \text{对于 } 80 \leq h \leq 100 \end{aligned}$$

而压力 P (hPa) 为:

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

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):

$$\begin{aligned} \rho(h) &= 14.3542 \exp [-0.4174 h - 0.02290 h^2 \\ &\quad + 0.001007 h^3] && \text{对于 } 0 \leq h \leq 15 \\ \rho(h) &= 0 && \text{对于 } h > 15 \end{aligned}$$

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:

$$T(h) = 272.7241 - 3.6217 h - 0.1759 h^2 \quad \text{对于 } 0 \leq h < 10$$

$$T(h) = 218 \quad \text{对于 } 10 \leq h < 33$$

$$T(h) = 218 + (h - 33) 3.3571 \quad \text{对于 } 33 \leq h < 47$$

$$T(h) = 265 \quad \text{对于 } 47 \leq h < 53$$

$$T(h) = 265 - (h - 53) 2.0370 \quad \text{对于 } 53 \leq h < 80$$

$$T(h) = 210 \quad \text{对于 } 80 \leq h \leq 100$$

而压力 P (hPa) 为:

$$P(h) = 1018.8627 - 124.2954 h + 4.8307 h^2 \quad \text{对于 } 0 \leq h \leq 10$$

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

$$P(h) = P_{72} \exp [-0.155 (h - 72)] \quad \text{对于 } 72 < h \leq 100$$

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):

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

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

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:

$$T(h) = 286.8374 - 4.7805 h - 0.1402 h^2 \quad \text{对于 } 0 \leq h < 10$$

$$T(h) = 225 \quad \text{对于 } 10 \leq h < 23$$

$$T(h) = 225 \exp [(h - 23) 0.008317] \quad \text{对于 } 23 \leq h < 48$$

$$T(h) = 277 \quad \text{对于 } 48 \leq h < 53$$

$$T(h) = 277 - (h - 53) 4.0769 \quad \text{对于 } 53 \leq h < 79$$

$$T(h) = 171 \quad \text{对于 } 79 \leq h \leq 100$$

而压力 P (hPa) 为:

$$P(h) = 1008.0278 - 113.2494 h + 3.9408 h^2 \quad \text{对于 } 0 \leq h \leq 10$$

$$P(h) = P_{10} \exp [-0.140 (h - 10)] \quad \text{对于 } 10 < h \leq 72$$

$$P(h) = P_{72} \exp [-0.165 (h - 72)] \quad \text{对于 } 72 < h \leq 100$$

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):

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

$$\rho(h) = 0 \quad \text{对于 } h > 15$$

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:

$$\begin{aligned} T(h) &= 257.4345 + 2.3474 h - 1.5479 h^2 + 0.08473 h^3 && \text{对于 } 0 \leq h < 8.5 \\ T(h) &= 217.5 && \text{对于 } 8.5 \leq h < 30 \\ T(h) &= 217.5 + (h - 30) 2.125 && \text{对于 } 30 \leq h < 50 \\ T(h) &= 260 && \text{对于 } 50 \leq h < 54 \\ T(h) &= 260 - (h - 54) 1.667 && \text{对于 } 54 \leq h \leq 100 \end{aligned}$$

而压力 P (hPa):

$$\begin{aligned} P(h) &= 1010.8828 - 122.2411 h + 4.554 h^2 && \text{对于 } 0 \leq h \leq 10 \\ P(h) &= P_{10} \exp [-0.147 (h - 10)] && \text{对于 } 10 < h \leq 72 \\ P(h) &= P_{72} \exp [-0.150 (h - 72)] && \text{对于 } 72 < h \leq 100 \end{aligned}$$

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):

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

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ASC II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ASC II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	0445E+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° 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°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<param>_<hh>.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/m³]），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。
