

ITU-R P.620-6建议书*

**100 MHz-105 GHz频率范围内估计
协调距离所需的传播数据**

(ITU-R 208/3号研究课题)

(1986-1992-1995-1997-1999-2003-2005)

国际电联无线电通信全会,

考虑到

- a) 协调地区是围绕地球站的地区范围, 即在该地区之外, 涉及的地球站与各地面站之间的任何干扰均认为可以忽略不计;
- b) 确定协调地区时应基于能获得的最好的传播数据, 并应有充分的储备量;
- c) 世界无线电通信大会(2000年, 伊斯坦布尔)(WRC-2000)上, 根据ITU-R SM.1448建议书的资料已批准对无线电规则中附录7的修订(随后由WRC-03修改), 而ITU-R SM.1448建议书本身则基于ITU-R P.620建议书中关于100 MHz-105 GHz频率范围内的资料;
- d) 在第74号决议(WRC-03)中说明了保留现行的附录7内技术基础的处理,

建议

- 1 在确定100 MHz频率以上的协调地区时, 主管部门应采用本建议附件1内提出的传播计算方法。

附 件 1**1 引言**

本附件给出用于计算协调地区的传播数据, 并提出一种直截了当的方法对确定协调距离时涉及的传播因素进行评估。

协调地区是指在该地区之内, 地球站与各地面站之间(或是在双方向运行的地球站之间)工作于给定的储备前提下时, 两者间的干扰可以忽略。本建议的其余部分, “地面站”一词也可以表示双方向运行的地球站。所以, 确定协调距离的必要条件是根据所考虑的系统 and 干扰模型, 需求的传输损耗(最小许可的基本传输损耗 $L_b(p)$ (dB)不超出给定的年百分数时间 p)与传播媒介导致的传输损耗相比较。所需的协调距离是指在该距离下这两个传输损耗值相等。

* 应提请无线电通信第1研究组注意本建议书。

对于不同的频率范围并考虑到不同的传播机制，提出了各种传播模型。这些模型预示传播损耗与距离的函数关系。确定协调距离时以迭代方法计算传播损耗与距离的关系，直至或是达到需求的传播损耗，或是达到限定的距离。

必须指出，协调地区不是表明这样一种区域，即该区域内排斥地球站与地面两者间频率共享。此种共享往往是可能的，协调地区的确定有助于共享方面的安排。它可指明地球站与任一地面站之间可能有干扰的地方，对此需根据相关的ITU-R建议书实施更细致的分析进行估计。

本建议书除了给出协调等值线的计算方法外，还提供确定辅助等值线的预案信息，以便在随后对进入协调等值线内的地面站进行协调分析所能快速解决大部分干扰的可能性问题。

2 本建议书的结构

本建议书的结构如下：

- 附件1： 确定协调地区的总体方法
- 附件1的附录1： 输入参数的定义
- 附件1的附录2和3： 计算协调等值线所需的公式
- 附件1的附录4： 视距无线电中继系统天线的参考辐射方向图
- 附件1的附录5： 全部参数的定义

3 一般考虑

3.1 假设

对地球站确定协调距离传播特性时基于下面的假设：

- 与之协调的地面站的位置是未知的；
- 在干扰路径几何关系中，只有属于地球站的信息可得到；
- 对于干扰路径其余部分的几何关系，必须做出的谨慎限定假设明示于下面文本内。

本附件中，传播现象分为如下两种模式：

- 模式(1)：纯净空气中的传播现象：
 - 由于地球表面的存在而受到影响（绕射，折射，大气波导，电离层反射/折射），以及，
 - 对流层的散射。这些现象局限于大圆周路径的传播；
- 模式(2)：水汽散射；它不限于大圆周路径，但在本附件内的处理上限于配合静止卫星工作的地球站。

对于地球站的每个方位，以及对于上面两种传播模式之每一种，需要确定一个距离，它给出的传播损耗等于要求的最小许可基本传播损耗。该距离（协调距离）采用所求得两个距离中较大的那一个。

迭代方法总可以应用均匀步长，建议采用1 km的步长。此时在模式（1）场合下，确定传播损耗的函数是与距离呈现单调关系的；如果愿意，可以应用更高效的迭代方法。

3.2 传播模型概述

对传播模式（1）确定协调距离时，可供应用的频率范围划分成三部分：

- 100 MHz-790 MHz之间的VHF/UHF频带，传播模型以对所测量数据的经验拟合为基础；
- 790 MHz-60 GHz，采用的传播模型考虑到对流层散射、大气波导和电离层反射/折射；
- 60 GHz-105 GHz，采用的毫米波模型基于自由空间损耗和水汽吸收的保守估值，再加上短时百分数内信号增强的容限。

对于传播模式（1）中每种模型机理，参数输入范围一般是不同的。

对传播模式（2）确定协调距离时，传播模型在建模中应考虑可能的各干扰站主波束在共同容积内由水汽产生的各向同性散射。当实现频率协调时，可以忽略水汽对于1 GHz以下或40.5 GHz以上的频率产生的干扰。在1 GHz以下散射信号的电平很低，在40.5 GHz以上虽然发生显著的散射，但散射信号随后从散射体容积到地面站的路径中会有大的衰减。

模式（1）中，协调距离从一个确定的最小值起增大，该最小值依照与每一频率范围相关的传播因素变化。模式（2）中，协调距离从表2内给定的一个最大值起往下减。对于辅助传播模式（2），在相同的方位上不协调距离从主传播模式（2）的协调距离起往下减。

由地球站周围地形造成的屏蔽损耗应采用附录2 § 1中说明的方法进行计算，按照沿地球站不同视向的水平仰角做出计算。在100 MHz-105 GHz间的全部频率上，均应顾及到此种地形附加损耗。

4 无线电气候信息

4.1 无线电气候数据

计算传播模式（1）的协调距离时，依照无线电气候区域和无线电气象学参数 β_p 对全世界做出划分（见 § 4.2），该 β_p 参数反映纯净空气异常传播的相对发生率。

β_p 值随纬度而变。确定 β_p 的正确值时应用的纬度由下式给出：

$$\zeta_r = \begin{cases} |\zeta| - 1.8 & \text{对于 } |\zeta| > 1.8^\circ \\ 0 & \text{对于 } |\zeta| \leq 1.8^\circ \end{cases} \quad (1a)$$

$$(1b)$$

其中， ζ 是地球站纬度值（度）。

于是，应用下式可以确定 β_p 值：

$$\beta_p = \begin{cases} 10^{1.67-0.015\zeta_r} & \text{对于 } \zeta_r \leq 70^\circ \\ 4.17 & \text{对于 } \zeta_r > 70^\circ \end{cases} \quad (2a)$$

$$(2b)$$

对于790 MHz-60 GHz之间的频率，在传播模式（1）的计算中应用路径中心海平面表面折射率 N_0 。采用下式计算 N_0 值：

$$N_0 = 330 + 62.6 e^{-\left(\frac{\zeta-2}{32.7}\right)^2} \quad (3)$$

4.2 无线电气候区域

对传播模式（1）计算协调距离时，将全世界划分成4个基本的无线电气候区域。这些区域的定义如下：

- 区域A1：沿海陆地和海岸地区，也就是邻接区域B或区域C地区（见下文）直至比海平面或水平面高100 m的地区，但限制于与最近的区域B或区域C（当它们存在时）的最大距离为50 km；没有100 m高程等值线的精确资料时，可采用近似值（例如，300英尺）；
- 区域A2：除了上面区域A1中定义的沿海陆地和海岸地区之外的全部陆地；
- 区域B：纬度30°以上的冷海、大洋和大的内陆水域，但地中海和黑海除外；
- 区域C：纬度30°以下的暖海、大洋和大的内陆水域，以及地中海和黑海。

在各种频率模型中要求下面的区域距离参数：

d_{lm} (km)：当前路径距离内区域A2中最长的连续内陆距离；

d_{lm} (km)：当前路径距离内区域A1+区域A1中最长的连续陆地（也即内陆+沿海）距离。

需要时，对传播模型迭代循环内的每一个总路径距离，必须重新估计上述距离。

大的内陆水域

大的内陆水域如果存在，是指位于区域B或区域C内、为行政协调目的而定义的面积至少为7 800 km²的水域，但不包括河流地区。此类水域中的岛屿如果其面积的90%以上不比平均水平面高出100 m，则在计算该地区时将它划归为水域。在水域的计算中，不满足这些准则的岛屿应划归为陆地。

大的内陆湖泊或湿地区域

大于7 800 km²的大湿地区域内包含许多小湖泊或河流网时，如果该地区内50%以上为水域，并且90%以上的陆地比平均水平面不高出100 m，则主管部门应将它报告为沿海区域A1。

对附属于区域A1、大的内陆水域和大的内陆湖泊或湿地区域的无线电气候区域难以明确地确定。所以，要求主管部门对其领土边界内的那些区域向国际电联无线电通信局（BR）登记，说明希望将它们认定为归属这些类别中的哪一类。反之，不存在登记资料时，其全部陆地区域都看作归属为无线电气候区域A2。

4.3 其他建议书中的无线电气候资料的应用

对模式（1）和模式（2）进行计算的某些部分，可以参考从其他ITU-R建议书中得到的无线电气候资料。这些建议是：

- a) 有关水蒸气密度的ITU-R P.836建议书；
- b) 有关降水率的ITU-R P.837建议书；
- c) 有关降雨高度的ITU-R P.839建议书。

必要时可参考这些建议书以便对经度和纬度明确的特定地点得到无线电气候参数。在模式（1）和模式（2）进行计算的其他部分，对某些无线电气候参数使用其恒定值；此类场合下，不需参考其他建议书。

5 距离界限

5.1 最小距离界限

在任何给定方向上协调距离由上面陈述的许多因素所确定，单独基于传播因素时，协调距离可以从比较靠近地球站起延伸至几百公里远。然而，出于实际原因并且又顾及关于无线电路径必须做出的假设，有必要对协调距离设定下限（ d_{min} ），计算如下：

作为初始的第一步，按照与频率 f (GHz)的函数关系应用下式计算最小协调距离，频率上限为40 GHz：

$$d'_{min}(f) = 100 + \frac{(\beta_p - f)}{2} \quad \text{km} \quad (4)$$

然后，在100 MHz-105 GHz 范围内的任一频率上计算最小协调距离，计算式如下：

$$d_{min}(f) = \begin{cases} d'_{min}(f) & \text{km} & \text{对于} & f < 40 \text{ GHz} & (5a) \\ \frac{(54-f)d'_{min}(40)+10(f-40)}{14} & \text{km} & \text{对于} & 40 \text{ GHz} \leq f < 54 \text{ GHz} & (5b) \\ 10 & \text{km} & \text{对于} & 54 \text{ GHz} \leq f < 66 \text{ GHz} & (5c) \\ \frac{10(75-f)+45(f-66)}{9} & \text{km} & \text{对于} & 66 \text{ GHz} \leq f < 75 \text{ GHz} & (5d) \\ 45 & \text{km} & \text{对于} & 75 \text{ GHz} \leq f < 90 \text{ GHz} & (5e) \\ 45 - \frac{(f-90)}{1.5} & \text{km} & \text{对于} & 90 \text{ GHz} \leq f \leq 105 \text{ GHz} & (5f) \end{cases}$$

需要指出，公式（5b）中 $d'_{min}(40)$ 是应用公式（4）取 $f=40$ GHz 的值估计。

最小距离适用于模式（1）和模式（2）两者的传播中，55 km的最小距离应用于全部频率上。

5.2 最大距离界限

在传播模式（1）和（2）的迭代计算中，还需要对应用的最大距离分别设定上界（ d_{max1} 和 d_{max2} ）。传播模式（1）的最大计算距离界限（ d_{max1} ）由下面的公式给出：

$$d_{max1} = \begin{cases} 1200 & \text{km} & \text{对于} & f \leq 60 \text{ GHz} & (6a) \\ 80 - 10 \log\left(\frac{p_1}{50}\right) & \text{km} & \text{对于} & f > 60 \text{ GHz} & (6b) \end{cases}$$

传播模式（2）的最大计算距离界限（ d_{max2} ）由表2给出。

5.3 迭代计算中距离界限的应用

对于模式（1）的计算，协调距离从最小距离界限增大，但决不会不断增大以致超出距离界限之外。对于模式（2）的计算，协调距离从最大距离界限起（或者，在辅助模式（2）的场合下自主等值线起）减小，但决不会不断减小以致小于最小距离。

6 传播模式（1）协调距离的确定 — 大圆周传播机理

6.1 基于最差月份时间百分数的协调距离

协调距离的计算是基于不能超出平均的年时间百分数 p_1 的干扰电平。当协调要求应基于最差月份时间百分数 p_{w1} 时，该方法中需要的等效的年时间百分数 p_1 可如下确定：

令：

$$G_L = \begin{cases} \sqrt{1.1 + |\cos 2\zeta_r|^{0.7}} & \text{对于 } \zeta_r \leq 45^\circ \\ \sqrt{1.1 - |\cos 2\zeta_r|^{0.7}} & \text{对于 } \zeta_r > 45^\circ \end{cases} \quad (7a)$$

$$(7b)$$

于是，

$$p_1 = 10^{\frac{\log(p_{w1}) + \log(G_L) - 0.444}{0.816}} \quad (8)$$

其中， $p_1(\%)$ 是传播模式（1）的平均年时间百分数。

必要时， p_1 值必须限制为 $12p_1 \geq p_{w1}$ 。

6.2 传输模式（1）协调距离的计算

应采用下面的方法确定传输模式（1）的协调距离：

- 对于100 MHz-90 MHz之间的频率，采用附录2 § 2中说明的方法；
- 对于790 MHz-60 GHz之间的频率，采用附录2 § 3中说明的方法；
- 对于60 GHz-105 GHz之间的频率，采用附录2 § 4中说明的方法。

7 传播模式（2）协调距离的确定 — 水汽散射

7.1 概述

对于水汽散射（例如，雨水散射）的协调等值线的确定，是在与地球大圆周传播机理显著不相同的路径几何关系基础上预测的。作为一级近似，可认为雨水将造成各向同性的能量散射，因而会造成大散射角的干扰，并使波束与大圆周路径不相交。

对于该传播模式，不再采用前面的将地球表面划分成内陆、沿海和海面区域的方式。

7.2 基于最差月份时间百分数的协调距离

协调距离的计算是基于不能超出平均的年时间百分数 p_2 的干扰电平。当协调要求应基于最差月份时

间百分数 p_{w2} 时，该方法中要求的等效年时间百分数 p_2 可如下确定：

$$p_2 = 0.30(p_{w2})^{1.15} \quad (9)$$

其中，

$$1.9 \times 10^{-4} < p_{w2} < 7.8$$

7.3 传播模式（2）等值线的计算

在传播模式（2）场合下，应采用附录3中说明的方法计算协调距离。该计算只在1 GHz-40.5 GHz频率范围内是必需的。该频率范围之外，可以忽略雨水散射的干扰，传播模式（2）的协调距离等于由公式（5）给出的最小协调距离。

8 辅助等值线

8.1 概述

协调等值线是以就干扰而言为最差状况的假设为基础的。此类假设并不必须适用于实际，某些情况下它可描画出辅助等值线以便在进一步的考虑中去除若干地面站。

对于传播模式（1），在得出辅助等值线时不需要附加的传播信息。对于传播模式（2），生成用于不同回避角值的辅助等值线，该回避角是地面站主波束轴偏离地球站方向时的偏置方位角。这一点涉及一些附加的传播考虑事项，将在§ 8.2内阐述。

8.2 水汽散射（传播模式（2））

传播模式（2）中围绕地球站进行协调等值线计算时，假设有最差状况的几何关系，也就是，两个主波束在包含两个地球站的大圆周平面上准确地相交。于是，形成一个大的协调地区，在该地区内需要进行细致的水汽散射的干扰电平计算。实际上，与该大圆周平面之内的情况相比较，在大圆周平面之外远不会发生传播模式（2）；此外，两者的天线主瓣不大可能准确相交。无论这两种情况中的哪一种，都有可能形成一个辅助等值线，它给出的地区小于协调地区。传播模式（2）中，考虑到地面站天线波束相对于地球站方向的方位角偏置 φ 时，应按照附录3 § 4中说明的方法计算辅助等值线。位于对其回避角要求的有关等值线之外的任何地面站不认为是最重大的干扰源。

传播模式（2）的最小协调距离与传播模式（1）中给出的相同，亦即为 d_{min} 。应预先准备好2°、5°、10°、20°和30°以及适当的其他角度的回避角的传播模式（2）的辅助等值线。重要之点在于，当确定辅助等值线时，每次计算中应使用实际的天线辐射方向图；不过，得不到它们时，可以应用附录4中给出的天线辐射参考方向图。

附件 1 的附录 1

表1
输入参数

| 参 数 | 单 位 | 定 义 | 定义出处 | 状 态 |
|------------|-----|---|------------|-------|
| d_c | km | 地球站至所考虑方向海岸之间的距离，用于计算传播模式(1)的协调距离 | 公式(24) | 输入 |
| d_h | km | 从地球站天线中心看出去的无线电水平距离 | 附录 2 § 1 | 输入或导出 |
| d_{lm} | km | 距离 d_i 内区域 A2 中最长的连续内陆距离，用于传播模式(1)协调距离的计算 | 附件 1 § 4.2 | 输入 |
| d_{tm} | km | 距离 d_i 内区域 A1+区域 A2 中最长的连续陆地(也即内陆+沿海)距离，用于传播模式(1)协调距离的计算 | 附件 1 § 4.2 | 输入 |
| D | m | 天线直径，用于确定天线辐射参考方向图(附录 4) | 附录 4 | 输入 |
| f | GHz | 频率，100 MHz-105 GHz | — | 输入 |
| G_{max} | dB | 天线轴上增益，用于天线辐射参考方向图(附录 4) | 公式(83) | 输入或导出 |
| G_T | dB | 地面站天线增益，假定为 42 dB，应用于传播模式(2)协调距离的计算 | 公式(57) | 输入或导出 |
| h_R | km | 地面上方的有效降雨高度 | 附录 3 | 输入 |
| $L_b(p_1)$ | dB | 传播模式(1)中时间百分数 p_1 %需求的最小许可的基本传输损耗 | § 1 | 输入 |
| $L_b(p_2)$ | dB | 传播模式(2)中时间百分数 p_2 %需求的最小许可的基本传输损耗 | § 1 | 输入 |
| p_1 | % | 传播模式(1)中平均的年时间百分数， p_1 范围为:1%-5%， f 在 100M-790MHz 之间时；0.001%-50%， f 在 790MHz~105GHz 之间时 | 公式(8) | 输入或导出 |
| p_{w1} | % | 传播模式(1)中最差月份时间百分数 | § 6.1 | 输入 |

表1 (完)

| 参 数 | 单 位 | 定 义 | 定义出处 | 状 态 |
|---------------|------------------|---|-------------|-------|
| p_2 | % | 传播模式(2)中平均的年时间百分数, p_2 的范围为0.001%-10% | 公式(9) | 输入或导出 |
| p_{w2} | % | 传播模式(2)中最差月份时间百分数 | § 7.2 | 输入 |
| r_E | km | 地球有数半径(= 8 500 km) | 附录3 | 输入 |
| $R(p_2)$ | mm/h | 超出一年内 p_2 %平均时间百分数的表面降水率, 用于传播模式(2)中的计算 | 附录 3 | 输入 |
| s | km | 距离增量, 用于协调距离的迭代计算中(建议值为 1 km) | | 输入 |
| ε | 度 | 地球站天线主波束仰角 | 附录 3 § 3 | 输入 |
| φ | 度 | 相对于天线主波束轴的偏置角度, 用于天线辐射参考方向图(附录 4) | 附录 4 | 输入 |
| γ_P | dB/km | 雨水引起的特定衰减 | 附录 3 | 输入 |
| λ | m | 波长, 用于确定天线辐射参考方向图(附录 4) | 附录 4 | 输入 |
| θ_h | 度 | 地球站水平仰角 | 附录 2 § 1 | 输入 |
| θ_{bw} | 度 | 天线 3 dB 波束宽度, 用于天线辐射参考方向图(附录 4) | 公式(95)和(96) | 输入 |
| ρ | g/m ³ | 超出 50%时间的大气层水蒸气密度 | 公式(21)和(56) | 输入 |
| ρ_0 | g/m ³ | 地球站处超出 50%时间的大气层水蒸气密度 | 公式(22b) | 输入 |
| ρ_{dmin} | g/m ³ | 在有关方位角的 d_{min} 距离上超出 50%时间的大气层水蒸气密度 | 公式(22b) | 输入 |
| ρ_i | g/m ³ | 传播模式(1)迭代计算的每一步中超出 50%时间的大气层水蒸气密度 | 公式(32) | 输入 |
| ω | 度 | 相对于公共容积中心的地面站极坐标角, 用于计算传播模式(2)的辅助等值线 | 附录 3 § 4 | 输入 |
| ζ | 度 | 地球站纬度(北纬为正, 南纬为负) | 公式(1a)和(1b) | 输入 |

附件 1 的附录 2

传播模式 (1) 协调距离的计算

1 场地屏蔽

传播模式 (1) 中, 由于地球站周围地形会产生对地球站的某种屏蔽 (场地屏蔽)。在传播模式 (1) 的模型中, 采用术语 A_h 衡量该屏蔽。由地球站邻近处的场地屏蔽引起的附加损耗沿每一径向进行计算如下。

从地球站天线中心看出去, 无线电水平距离 d_h 如下确定:

$$d_h = \begin{cases} 0.5 \text{ km} & \text{如果没有可供应用的水平距离, 或是该距离} < 0.5 \text{ km} \\ \text{水平距离 (km)} & \text{如果 } 0.5 \text{ km} \leq \text{水平距离} \leq 5.0 \text{ km} \\ 5.0 \text{ km} & \text{如果水平距离} > 5.0 \text{ km} \end{cases}$$

计算水平角 θ_h (度)。这里, 角度 θ_h 定义为从地球站天线中心看出去, 由水平面与所述及方向上掠过物理实体视线之射线间的夹角。物理实体视线高于水平面时, 角 θ_h 为正值。对于地球站周围的全部方位都需要确定其水平角。实际上, 通常, 以 5° 的方位角增量进行计算已足够。然而, 每一次增量计算中都应认定和顾及到, 所检验的 5° 增量方位角内是否还存在最小的水平角。

然后, 可以应用下式计算沿地球站周围每个方位, 对视线距离的水平距离校正 A_d (dB):

$$A_d = 15 \left[1 - \exp\left(\frac{0.5 - d_h}{5}\right) \right] \left[1 - \exp(-\theta_h f^{1/3}) \right] \quad \text{dB} \quad (10)$$

沿地球站每个方位上由地形屏蔽造成的总传输损耗为:

$$A_h = \begin{cases} 20 \log(1 + 4.5\theta_h f^{1/2}) + \theta_h f^{1/3} + A_d & \text{dB 对于 } \theta_h \geq 0^\circ & (11a) \\ 3 \left[(f + 1)^{1/2} - 0.0001 f - 1.0487 \right] \theta_h & \text{dB 对于 } 0^\circ > \theta_h \geq -0.5^\circ & (11b) \\ -1.5 \left[(f + 1)^{1/2} - 0.0001 f - 1.0487 \right] & \text{dB 对于 } \theta_h < -0.5^\circ & (11c) \end{cases}$$

对 A_h 值必须加以限制, 以满足下列条件:

$$\begin{aligned} A_h &\leq (30 + \theta_h) \\ A_h &\geq -10 \end{aligned} \quad (12)$$

需要指出，公式（10）、（11）和（12）中， θ_h 的值其单位为度。又需指出，公式（12）中确定的界限是规范值，超出界限值时实际上不能得到保护。

2 100 MHz-790 MHz（最高且包括）的频率

本节中给定的传播模型限制于平均的年时间百分数 p_1 在1%-5%范围内。

如附件1 § 1中的说明，必须应用迭代处理。处理中对公式（14）进行估计，然后，从 § 5.1中说明的方法所给定的最小协调距离 d_{min} 开始，以合适的递增步长按公式（15）至（18）对距离 d_i 实施迭代，其中 $i=0,1,2,\dots$ 。每次迭代中， d_i 值视为当前距离。继续这一处理，直至下面的两个表达式都成立：

$$L_2(p_1) \geq L_1(p_1) \quad (13a)$$

或

$$d_i \geq d_{max1} \quad (13b)$$

然后，由最后一次迭代中的当前距离给定所需的协调距离 d_1 。

建议的距离增量 s (km) 为1 km。公式（16）、（17a）和（17b）分别适用相应路径分类中的全部路径。路径内包括一个以上区域的路段（陆地和/或冷海和/或暖海，见 § 4.2）时，通过假设路径全部是陆地和全部是海面计算出结果的内插，求得协调距离。在海面路径中包括暖海区域路段时，沿该路径的全部海面应假设为都是暖海。

$$L_1(p_1) = L_b(p_1) - A_h \quad (14)$$

其中， $L_b(p_1)$ (dB) 是 $p_1\%$ 时间下要求的最小许可的基本传输损耗。

迭代计算

每次迭代计算开始时，当前距离为 $i=0, 1, 2, \dots$ ：

$$d_i = d_{min} + i \cdot s \quad (15)$$

在假设路径为全部陆地（区域A1或A2）、全部冷海（区域B）或全部暖海（区域C）的各别情况下，传输损耗 $L_{b0}(p_1)$ 的估计依次如下：

$$L_{bl}(p_1) = 142.8 + 20 \log f + 10 \log p_1 + 0.1 d_i \quad \left. \begin{array}{l} \text{路径均在区域A1} \\ \text{或A2内} \end{array} \right\} (16)$$

$$L_{bs}(p_1) = \left\{ \begin{array}{l} 49.91 \log(d_i + 1840f^{1.76}) + 1.195f^{0.393}(\log p_1)^{1.38} d_i^{0.597} \\ + (0.01 d_i - 70)(f - 0.1581) + (0.02 - 2 \times 10^{-5} p_1^2) d_i + 9.72 \times 10^{-9} d_i^2 p_1^2 \\ + 20.2 \end{array} \right\} \left. \begin{array}{l} \text{路径均在区} \\ \text{域B内} \end{array} \right\} (17a)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} 49.343 \log(d_i + 1840f^{1.58}) + 1.266(\log p_1)^{(0.468 + 2.598f)} d_i^{0.453} \\ + (0.037 d_i - 70)(f - 0.1581) + 1.95 \times 10^{-10} d_i^2 p_1^3 + 20.2 \end{array} \right\} \left. \begin{array}{l} \text{路径均在区} \\ \text{域C内} \end{array} \right\} (17b)$$

当前距离下的基本传输损耗由下式给出：

$$L_2(p_1) = L_{bs}(p_1) + \left[1 - \exp\left(-5.5\left(\frac{d_{tm}}{d_i}\right)^{1.1}\right) \right] (L_{bl}(p_1) - L_{bs}(p_1)) \quad (18)$$

其中， d_{tm} 在附件1 § 4.2内定义。

3 790 MHz-60 GHz的频率

本节中给定的传播模型限制于平均的年时间百分数 p_1 在0.001%-50%范围内。

如附件1 § 1中的说明，必须应用迭代处理。处理中对公式（20）-（30）进行估计，然后，从 § 5.1中说明的方法所给定的最小协调距离 d_{min} 开始，以合适的递增长按公式（31）-（41）对距离 d_i 实施迭代，其中 $i=0,1,2,\dots$ 。每次迭代中， d_i 值视为当前距离。继续这一处理，直至下面的两个表达式均成立：

$$\begin{aligned} (L_5(p_1) &\geq L_3(p_1)) \\ (L_6(p_1) &\geq L_4(p_1)) \end{aligned} \quad (19a)$$

或

$$d_i \geq d_{max1} \quad (19b)$$

然后，由最后一次迭代中的当前距离给定要求的协调距离 d_1 。

建议的距离增量 s (km) 为1 km。

计算因干燥空气造成的特定衰减 (dB/km)：

$$\gamma_o = \begin{cases} \left[7.19 \times 10^{-3} + \frac{6.09}{f^2 + 0.227} + \frac{4.81}{(f - 57)^2 + 1.50} \right] f^2 \times 10^{-3} & \text{对于 } f \leq 56.77 \\ 10 & \text{对于 } f > 56.77 \end{cases} \quad (20a)$$

$$\quad (20b)$$

因水汽蒸气造成的特定衰减是水蒸气密度 ρ (单位 g/m^3) 的函数，由下式给出：

$$\gamma_w(\rho) = \left(0.050 + 0.0021\rho + \frac{3.6}{(f - 22.2)^2 + 8.5} \right) f^2 \rho \times 10^{-4} \quad (21)$$

对于对流层散射传播模型中因水汽蒸气造成的特定衰减 (dB/km) 的计算，应采用 3.0g/m^3 的水蒸气密度：

$$\gamma_{wt} = \gamma_w(3.0) \quad (22a)$$

从ITU-R P.836建议书中可得到地球站处适中的水蒸气密度 ρ_0 以及沿相关方位上距离 d_{min} 处的水蒸气密度 ρ_{dmin} 。

计算位于最小距离 d_{min} 内的通路部分因水汽蒸气造成的衰减，公式如下：

$$A_w = d_{min} \cdot \gamma_w\left(\frac{\rho_0 + \rho_{dmin}}{2}\right) \quad (22b)$$

其中， ρ_0 和 ρ_{dmin} 在附件1的附录1内定义。

计算频率依赖性的大气波导特定衰减 (dB/km)：

$$\gamma_d = 0.05 f^{1/3} \quad (23)$$

大气波导模型

计算直接关联海面波导的衰减校正量 (dB) :

$$A_c = \frac{-6}{(1 + d_c)} \quad (24)$$

其中, d_c (km) 是从陆地球站到所考虑方向上的海岸的距离。

在其他环境中 d_c 为零。

计算非距离依赖性部分的衰减 (dB) :

$$A_1 = 122.43 + 16.5 \log f + A_h + A_c + A_w \quad (25)$$

计算距离依赖性衰减的最小要求值 (dB) :

$$L_3(p_1) = L_b(p_1) - A_1 \quad (26)$$

设定一个对附加的通路依赖性衰减和其他衰减的容限进行控制的因数, 包括与地形高度相关的衰减:

$$\varepsilon_L = 8.5 \quad (27)$$

对流层散射模型

计算其频率依赖性的损耗部分 (dB)

$$L_f = 25 \log(f) - 2.5 \left[\log\left(\frac{f}{2}\right) \right]^2 \quad (28)$$

计算非距离依赖性的损耗部分 (dB) :

$$A_2 = 187.36 + 10 \theta_h + L_f - 0.15 N_0 - 10.1 \left(-\log\left(\frac{p_1}{50}\right) \right)^{0.7} \quad (29)$$

其中,

θ_h : 为地球站水平仰角 (度) ;

N_0 : 为路径中心海平面的表面折射率。

计算距离依赖性衰减的最小要求值 (dB) :

$$L_4(p_1) = L_b(p_1) - A_2 \quad (30)$$

迭代计算

每次迭代计算开始时, 当前距离为 $i=0,1,2,\dots$:

$$d_i = d_{min} + i \cdot s \quad (31)$$

在地球表面相关方位上距离 d_i 位置处, 从 ITU-R P.836 建议书中可得到超出 50% 时间的水蒸气密度 ρ_i (g/m^3)。然后, 计算因水汽吸收造成的距离依赖性衰减, 公式如下:

$$A_g = (\gamma_o + \gamma_d) \cdot d_i + \sum_{n=0}^i \gamma_w(\rho_n) \cdot s \quad (32)$$

其中, $\gamma_w(\rho_n)$ 由公式 (21) 给出。

计算下面的区域依赖性参数:

$$\tau = 1 - \exp \left[- \left(4.12 \times 10^{-4} d_{lm}^{2.41} \right) \right] \quad (33)$$

其中, d_{lm} 在附件1 § 4.2内定义。

$$\mu_1 = \left[10^{\frac{-d_{lm}}{16 - 6.6 \tau}} + \left[10^{-(0.496 + 0.354 \tau)} \right]^5 \right]^{0.2} \quad (34)$$

其中, d_{lm} 在附件1 § 4.2内定义。

μ_1 应限制于 $\mu_1 \leq 1$ 。

$$\sigma = -0.6 - \varepsilon_L \times 10^{-9} d_i^{3.1} \tau \quad (35)$$

σ 应限制于 $\sigma \geq -3.4$ 。

$$\mu_2 = \left(2.48 \times 10^{-4} d_i^2 \right)^\sigma \quad (36)$$

μ_2 应限制于 $\mu_2 \leq 1$ 。

$$\mu_4 = \begin{cases} 10^{(-0.935 + 0.0176 \zeta_r) \log \mu_1} & \text{对于 } \zeta_r \leq 70^\circ \\ 10^{0.3 \log \mu_1} & \text{对于 } \zeta_r > 70^\circ \end{cases} \quad (37a)$$

$$\text{对于 } \zeta_r > 70^\circ \quad (37b)$$

计算大气波导路径依赖性发生率 β 和相关参数 Γ , 二者用于计算基本传输衰减的时间依赖性:

$$\beta = \beta_p \cdot \mu_1 \cdot \mu_2 \cdot \mu_4 \quad (38)$$

$$\Gamma = \frac{1.076}{(2.0058 - \log \beta)^{1.012}} \exp \left[- \left(9.51 - 4.8 \log \beta + 0.198 (\log \beta)^2 \right) \times 10^{-6} d_i^{1.13} \right] \quad (39)$$

计算大气波导中距离依赖性的衰减部分 (dB):

$$L_5(p_1) = A_g + (1.2 + 3.7 \times 10^{-3} d_i) \log \left(\frac{p_1}{\beta} \right) + 12 \left(\frac{p_1}{\beta} \right)^\Gamma \quad (40)$$

并计算对流层散射的距离依赖性的衰减部分 (dB):

$$L_6(p_1) = 20 \log(d_i) + 5.73 \times 10^{-4} (112 - 15 \cos(2\zeta)) d_i + (\gamma_o + \gamma_{wt}) d_i \quad (41)$$

4 60 GHz-105 GHz之间的频率

在60 GHz-105 GHz的毫米波频率范围内, 传播模型是以自由空间衰减和保守估计的水汽吸收为基础的, 并加上小的时间百分数的信号增强的容限。该传播模型在年时间百分数 p_1 为0.001%-50%的范围内有效。

如附件1 § 1中的说明，必须应用迭代处理。处理中对公式（43）-（47）进行估计，然后，从 § 5.1中说明的方法所给定的最小协调距离 d_{min} 开始，以合适的递增步长按公式（48）-（49）对距离 d_i 实施迭代，其中 $i=0,1,2,\dots$ 。每次迭代中， d_i 值视为当前距离。

继续这一处理，直至下面的两个表达式均成立：

$$L_9(p_1) \geq L_8(p_1) \quad (42a)$$

或

$$d_i \geq d_{max1} \quad (42b)$$

然后，由最后一次迭代中的当前距离给定要求的协调距离 d_1 。

建议的距离增量 s (km) 为1 km。

计算60GHz-105 GHz频率范围内干燥空气的特定吸收 (dB/km)，公式如下：

$$\gamma_{om} = \begin{cases} \left[2 \times 10^{-4} (1 - 1.2 \times 10^{-5} f^{1.5}) + \frac{4}{(f - 63)^2 + 0.936} + \frac{0.28}{(f - 118.75)^2 + 1.771} \right] f^{2.624} \times 10^{-4} & \text{对于 } f > 63.26 \text{ GHz} \\ 10 \text{ dB/km} & \text{对于 } f \leq 63.26 \text{ GHz} \end{cases} \quad (43a)$$

$$(43b)$$

对于大气层3 g/m³的水蒸气密度，可计算特定的水蒸气吸收 (dB/km)，公式如下：

$$\gamma_{wm} = (0.039 + 7.7 \times 10^{-4} f^{0.5}) f^{2.2369} \times 10^{-4} \quad (44)$$

计算保守估计的特定水汽吸收，公式如下：

$$\gamma_{gm} = \gamma_{om} + \gamma_{wm} \quad \text{dB/km} \quad (45)$$

按本附录 § 1中所说明方法的计算，对于所需频率和地球站场地屏蔽值 A_h (dB)，计算非距离依赖性的基本传输损耗部分，公式如下：

$$L_7 = 92.5 + 20 \log(f) + A_h \quad \text{dB} \quad (46)$$

计算距离依赖性损耗的最小要求值 (dB)：

$$L_8(p_1) = L_b(p_1) - L_7 \quad \text{dB} \quad (47)$$

迭代计算

每次迭代计算开始时，当前距离为 $i=0,1,2,\dots$ ：

$$d_i = d_{min} + i \cdot s \quad (48)$$

计算当前距离的距离依赖性损耗：

$$L_9(p_1) = \gamma_{gm} d_i + 20 \log(d_i) + 2.6 \left[1 - \exp\left(\frac{-d_i}{10}\right) \right] \log\left(\frac{p_1}{50}\right) \quad (49)$$

附件 1 的附录 3

传播模式 (2) 协调距离的计算

1 概述

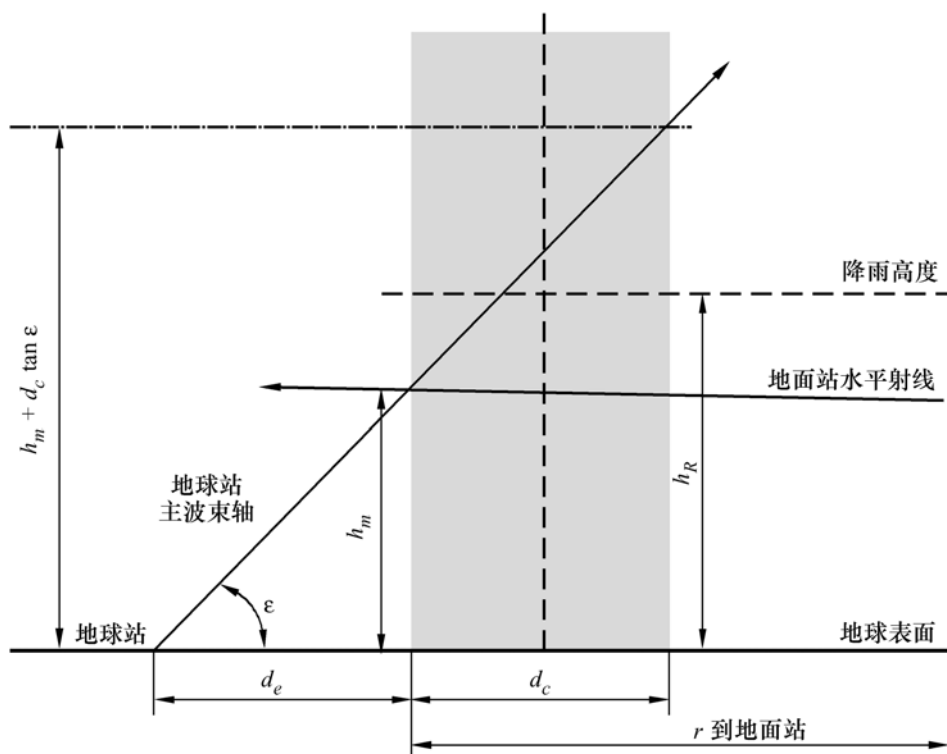
确定传播模式 (2) 的雨水散射干扰协调距离的方法基于收发分置雷达公式, 采用地球站天线所谓的“窄波束”近似, 由于其天线增益能对消从散射容积到地球站天线的扩散衰减。因此, 该方法中主要取决于从地面站到散射容积也即雨区的路径长度。

如果超出 $p_2\%$ 时间的降雨率 $R(p_2) \leq 0.1 \text{ mm/h}$, 则传播模式 (2) 的协调等值线应按假定降雨率为 0.1 mm/h 进行确定。

下面给出的算法可以得到传输损耗 $L_r(p_2)$ (dB), 它是降水率 $R(p_2)$ (mm/h) 的函数, 并以雨区边缘至可能的地面站位置间的间隔距离 r_i (km) 作为参变量。雨水散射处理的几何关系示于图1。

图1

雨水散射处理的几何关系



确定水汽散射等值线的方法如下：

对于要求的平均年时间百分数 p_2 （0.001%-10%）以及地球站位置所处的纬度和经度，应从ITU-R P.837建议书中找出 $R(p_2)$ 值。

然后，从表2中给定的传播模式（2）的最大计算距离 d_{max2} 开始以 r_i 的递减值计算 $L_r(p_2)$ 。建议的距离减量 s （km）为1 km。使 r_i 值递减，直至相应的 $L_r(p_2)$ 值正好小于要求的传输衰减 $L_b(p_2)$ ；或者，直至 r_i 小于一定值。也即，直至下面的两个条件均成立：

$$L_r(p_2) < L_b(p_2) \quad (50a)$$

或
$$r_i < d_{min} \quad (50b)$$

其中，后一个条件表示最小计算距离。

于是，由该 r_i 的前一个值计算距离 d_r ：

$$d_r = r_{i-1} = d_{max2} - s \cdot (i-1) \quad (51)$$

得到的计算距离 d_r 是地面站与雨区边缘之间的传播路径长度，它引起要求的传输路径衰减。假设，在各个方位上雨区造成的散射是各向同性的，则协调等值线定义为圆形，中心在雨区边缘处，半径为 d_r 。

于是，可以画出半径为 d_r 的圆形协调等值线，中心在沿地球站水平方向上离地球站相距 d_e 处，如图1中所指明， d_e 是从地球站到雨区边缘的距离；距离 d_e 的确定在下面的方法中给出。

2 最大计算距离

如附件1 § 5.2中所述，对最大距离必须设定上界以用于计算距离的迭代确定，从该上界起开始迭代计算。应用于传播模式（2）的最大计算距离（ d_{max2} ）是纬度依赖性的，在表2中给出。

表2

传播模式（2）的最大计算距离（ d_{max2} ）（km）

| 纬度（度） | 0-30 | 30-40 | 40-50 | 50-60 | > 60 |
|--------|------|-------|-------|-------|------|
| 距离（km） | 350 | 360 | 340 | 310 | 280 |

3 传播模式（2）协调等值线的计算

根据地球站的纬度和经度，按ITU-R P.837-3建议书确定超出 $p_2\%$ 时间的降雨率 $R(p_2)$ 。应当指出， $p_2\%$ 是适用于传播模式（2）的平均年时间百分数。

还应指出，由于地球站仰角低到 10° 时，地球站位置与沿地球站水平方向上雨区位置间的距离通常小于约30 km，所以，这两点之间的位置上降雨率和降雨高度不会有很大差异。

应用ITU-R P.838建议书，在假定垂直极化下确定因降雨造成的特定衰减 γ_R (dB/km)。

设定雨区直径 d_c (km) 为：

$$d_c = 3.3R(p_2)^{-0.08} \quad (52)$$

根据地球站的纬度和经度，按ITU-R P.839建议书确定地面上方的平均降雨高度 h_R (km)。

计算中间参数 η ：

$$\eta = (R(p_2) + 1)^{0.19} \quad (53)$$

对于公共散射容积之外的衰减，计算比例距离 r_m (km)：

$$r_m = 600R(p_2)^{-0.5} \times 10^{-\eta} \quad (54)$$

由下面的表达式估计干燥空气造成的特定衰减 (dB/km)：

$$\gamma_o = \left[7.19 \times 10^{-3} + \frac{6.09}{f^2 + 0.227} + \frac{4.81}{(f - 57)^2 + 1.5} \right] f^2 \times 10^{-3} \quad (55)$$

在相应的地球站的纬度和经度上，根据ITU-R P.836建议书确定超出50%时间的地面水蒸气密度 ρ (g/m^3)。应当指出，为简化起见，确定传播模式(2)的协调等值线时假设水蒸气密度在路径中为常数。由下式给出特定的水蒸气衰减 (dB/km)：

$$\gamma_{wv} = \left[0.050 + 0.0021\rho + \frac{3.6}{(f - 22.2)^2 + 8.5} \right] f^2 \rho \times 10^{-4} \quad (56)$$

设定地面站天线的增益 (假设为42 dBi)：

$$G_T = 42 \quad (57)$$

迭代计算

从表2上得到的最大计算距离开始，用递减的 r_i 值估计式(58) - (77)，这里的 r_i 是雨区与地面站可能位置之间的当前间隔距离 (km)， $i=0,1,2,\dots$ ：

$$r_i = d_{max2} - i \cdot s \quad (58)$$

继续这一处理，直至满足不等式(50)给定的条件。此时，由 r_i 的前一个值给出雨区散射的计算距离 d_r ，也即：

$$d_r = d_{max2} - (i - 1) \cdot s \quad (59)$$

如果迭代运算得到 $d_r < d_{min}$ ，则取 $d_r = d_{min}$ ，迭代运算结束，对于传播模式(2)， $d_{min} = 55$ km。

确定地面站天线波束与地球站天线波束间在地面之上相交点的高度：

$$h_m = r_E \left(\frac{1}{\cos \delta} - 1 \right) \quad (60)$$

其中， δ 是当前距离 r_i 上雨区与地球表面点间的夹角：

$$\delta = \frac{r_i}{r_E} \quad \text{rad} \quad (61)$$

其中， r_E 为地球有效半径， $r_E = 8500$ km。

确定从地面站到波束相交点的路径长度：

$$r_t = h_m \sqrt{1 + 2 \frac{r_E}{h_m}} \quad (62)$$

确定从波束相交点到地球站的路径长度：

$$r_r = \sqrt{r_E^2 \sin^2 \varepsilon + h_m^2 + 2h_m r_E - r_E \sin \varepsilon} \quad (63)$$

其中， ε 是地球站天线的仰角。

确定从地球站到雨区边缘的水平距离：

$$d_e = r_E \arcsin \left(\frac{r_r}{h_m + r_E} \cos \varepsilon \right) \quad (64)$$

计算在波束相交处的雨区内与区域相关的参数 h_c ：

$$h_c = \begin{cases} h_m & \text{对于 } h_R \leq h_m \\ h_R & \text{对于 } h_m < h_R < h_m + d_c \tan \varepsilon \\ h_m + d_c \tan \varepsilon & \text{对于 } h_R \geq h_m + d_c \tan \varepsilon \end{cases} \quad (65)$$

计算从当前距离点到波束相交点的衰减：

$$\Gamma_2 = \gamma_R r_m \left[1 - \exp \left(-\frac{r_t}{r_m} \right) \right] \quad (66)$$

以及计算从波束相交点到地球站的衰减：

$$\Gamma_1 = \begin{cases} \gamma_R r_m \left[1 - \exp \left(-\frac{d_e}{r_m} \right) \right] & \text{对于 } h_m \leq h_R \\ \gamma_R r_m \left[\exp \left(-\frac{(h_m - h_R) \cot \varepsilon}{r_m} \right) - \exp \left(-\frac{d_e}{r_m} \right) \right] & \text{对于 } h_m > h_R \end{cases} \quad (67)$$

按以上两个数值，估计在降雨高度之下由散射造成的总路径衰减：

$$\Gamma_b = \exp\left[-0.23\left(\frac{\Gamma_1}{\cos \varepsilon} + \Gamma_2\right)\right] \quad (68)$$

以及估计在降雨高度之上从溶解层和冰晶来的散射造成的总路径衰减：

$$\Gamma_a = \exp\left[-0.23\left(\frac{\Gamma_1}{\cos \varepsilon} + \gamma_R \frac{h_c - h_m}{\sin \varepsilon}\right)\right] \quad (69)$$

计算降雨高度之下由散射造成的有效散射传输函数：

$$C_b = \frac{4.34}{\gamma_R(1 + \cos \varepsilon)} \left[1 - \exp\left\{-0.23 \gamma_R (h_c - h_m) \frac{\sin \varepsilon}{1 - \cos \varepsilon}\right\}\right] \quad (70)$$

以及计算降雨高度之上由冰晶散射造成的传输函数：

$$C_a = \frac{0.67}{\sin \varepsilon_s} \left[\exp\{-1.5(h_c - h_R)\} - \exp\{-1.5(h_m - h_R + d_c \tan \varepsilon)\}\right] \quad (71)$$

于是，由下式给出总的有效散射传输函数：

$$C = \Gamma_b C_b + \Gamma_a C_a \quad (72)$$

确定10 GHz以上频率的瑞利散射的偏差：

$$10 \log S = \begin{cases} 0.005(f - 10)^{1.7} R(p_2)^{0.4} & \text{对于 } 10 \leq f \leq 40 \\ 0 & \text{对于 } f < 10 \text{ 或 } C_b = 0 \end{cases} \quad (73)$$

应当指出，该瑞利散射偏差仅适用于降雨高度之下的雨水散射。

现在，由下面的表示式估计大气层造成的衰减。首先，在计及大气造成的特定衰减随高度减小的情况下，确定等效的路径长度。对于从地面站到雨区的路径，有：

$$d_{to} = \begin{cases} 0.9r_t & \text{对于 } r_t < 270 \text{ km} \\ 243 + 0.4(r_t - 270) & \text{对于 } r_t \geq 270 \text{ km} \end{cases} \quad (74a)$$

$$d_{tv} = \begin{cases} 0.85r_t & \text{对于 } r_t < 220 \text{ km} \\ 187 + 0.4(r_t - 220) & \text{对于 } r_t \geq 220 \text{ km} \end{cases} \quad (74b)$$

以及，对于从雨区到地球站的路径，有：

$$d_{ro} = 0.8r_r \quad (75a)$$

$$d_{rv} = 0.5r_r \quad (75b)$$

然后，由下式确定大气衰减：

$$A_g = \gamma_o(d_{to} + d_{ro}) + \gamma_{wv}(d_{tv} + d_{rv}) \quad (76)$$

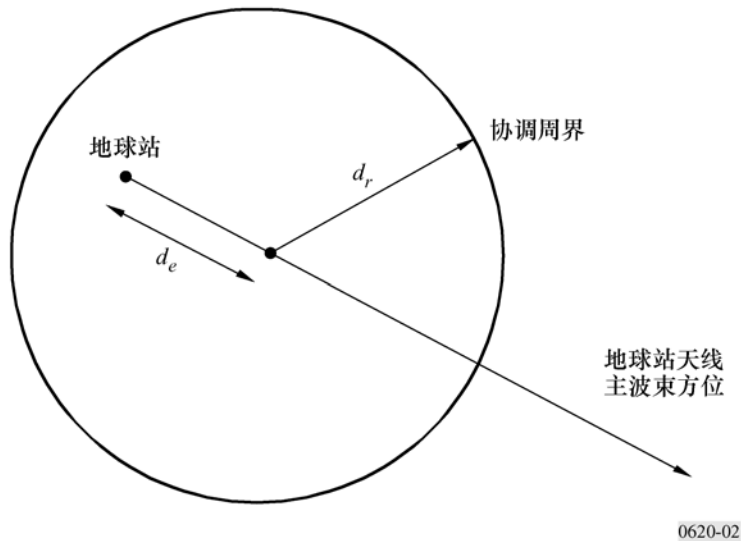
最后，由下式确定传输损耗：

$$L_r(p_2) = 173 + 20 \log r_i - 20 \log f - 14 \log R(p_2) - 10 \log C + 10 \log S - G_T + A_g \quad (77)$$

从迭代运算得到的距离是从地面站到雨区边缘的距离，于是，由半径 d_r 的圆给出协调等值线。如图2中指明，圆心在沿地球站水平方向上与地球站相隔距离 d_e 。

图2

协调等值线的位置



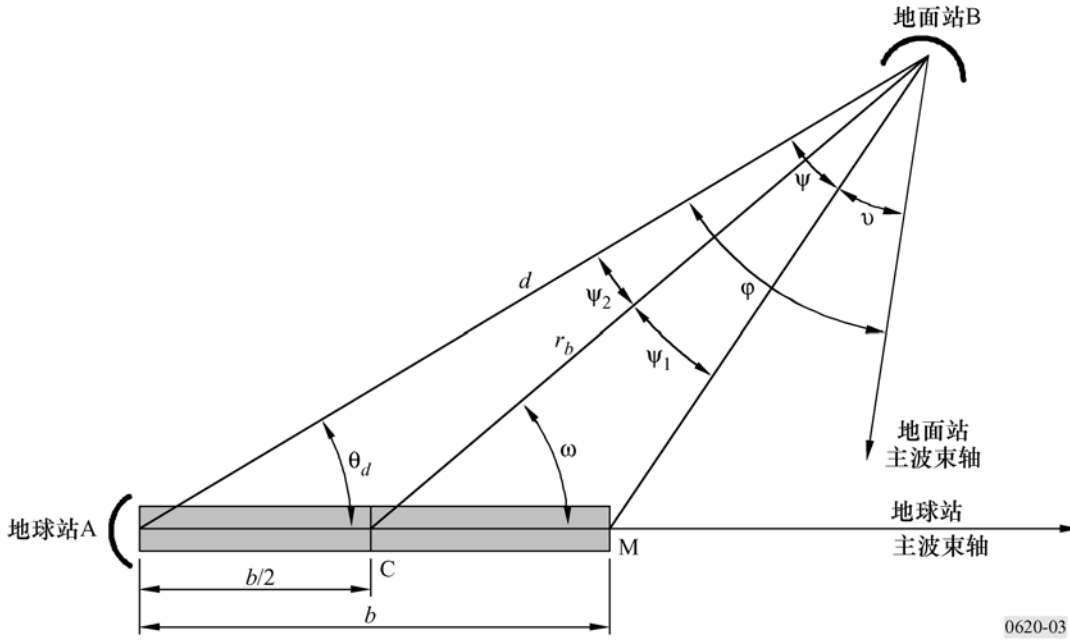
4 传播模式（2）辅助等值线的确定

传播模式（2）的辅助等值线容许地面站天线波束对于所考虑的协调的地球站位置有方位偏离。图3示明投影于水平面上的水汽散射区域。图3中，地球站和地面站分别位于点A和点B处，这里，地面站位置在地球站主波束轴上自点C出发由角度 ω 确定的径向上，点C是传播模式（2）主等值线或增补等值线的中心，也是辅助等值线的中心。

图3中的阴影线区域表示沿地球站主波束轴上在地球站与降雨高度之间的临界地区。这个临界地区内，地球站波束与传播模式（2）主等值线或增补等值线内任一个地面站波束之间会形成一个公共容积。该临界地区的长度为 b ，最大的水平长度达到点M。该临界地区与地面站主波束轴的相交处会通过主波瓣与主波瓣间的耦合产生相当大的水汽散射干扰。

图3

水平面内的传播几何关系



对于传播模式（2）主等值线或增补等值线内给定的点，其对临界地区所张的角为临界角 ψ 。图中的保护角 ν 表示地面站主波束轴偏离临界地区的角度。地面站主波束轴与地球站位置之间的回避角为 φ 。 φ 角是 ψ 角与 ν 角两者之和，该角度大小对于特定的辅助等值线具有固定的值。通过从点C到辅助等值线改变角度 ω 以及导出的距离 r_b ，生成了各个辅助等值线。角度 ω 从 0° 增大至 360° 时，角度 ψ 和 ν 随之变化，但它们的和值保持不变。

可以应用本附录 § 4.1 中的算法，对于给定的波束回避角 φ 的值计算出传播模式（2）的辅助等值线。

该方法基于从上面公式（59）给出的主等值线距离 d 开始，迭代地递减地面站与地球站之间的距离 r_b ，直至或是求得满足所要求最小损耗的最短距离 r_b 值，或是到达最小协调距离值。对每一个 r_b 值确定临界角 ψ ，然后计算保护角 ν 。于是，将对应于角 ν 的地面站天线增益和当前距离 r_b 代入公式（77）中，得到传播模式（2）的路径衰减。

对每一个角 ω 重复上面的过程，为给定的波束回避角 φ 的值产生一个闭合的辅助等值线。在波束回避角 φ 和角度 ω 的某些组合中，辅助等值线可能与传播模式（2）的主等值线或增补等值线重合。

4.1 步进算法

通过计算以地球站沿其主波束轴方位 $b/2$ 距离处的点C为中心，所形成的传播模式（2）主等值线或增补等值线内圆心处的径向距离，可得到传播模式（2）的辅助等值线。距离 $b/2$ 等于 d_e ，而 d_e 值由公式（64）给出。

对于选定的波束回避角 φ 的值, 为每个角度 ω 以步长 1° 在 0° - 180° 的范围内, 产生辅助等值线, 步骤如下:

- a) 按公式(59)中说明的计算式对传播模式(2)的主等值线或增补等值线半径 d_r 设定 r_b 值。
- b) 按下面的公式计算 ψ :

$$\psi_1 = \arctan \left(\frac{b \sin \omega}{2r_b - b \cos \omega} \right) \quad (78)$$

$$\psi_2 = \arctan \left(\frac{b \sin \omega}{2r_b + b \cos \omega} \right) \quad (79)$$

$$\psi = \psi_1 + \psi_2 \quad (80)$$

- c) 如果 $\psi > \varphi$, 则对于 ω 的当前值来说, 传播模式(2)的辅助等值线与传播模式(2)的主等值线或增补等值线相符, 对该 ω 值完成计算而转到步骤j)。否则, 进入以下的步骤d)一步骤i), 直至步骤f)和步骤c)中说明的结束条件之一得到满足。
- d) 从 r_b 的原先值上减去0.2 km, 递减 r_b 。
- e) 应用公式(78)、(79)和(80)重新计算临界角 ψ 。
- f) 如果 $(0.5 b \sin \omega / \sin \psi_2) < d_{min}$, 则传播模式(2)的辅助等值线与最小协调距离 d_{min} 相符, 对 ω 值完成计算而转到步骤j)。否则, 进入步骤g)。
- g) 计算保护角 $\upsilon = \varphi - \psi$ 。
- h) 应用附录4给出的天线辐射参考方向图, 计算相对于波束轴的角度 υ 的地面站天线增益 $G(\upsilon)$ 。
- i) 公式(77)中, 用步骤h)计算的增益取代 G_T , 并用新的 r_b 值, 计算传播模式(2)对应的路径损耗 L_r 。如果 $L_r < L_b(p_2)$, 则对 r_b 的原先值加上0.2 km, 递增 r_b , 将它作为当前视线距离。否则, 从步骤d)起重复。
- j) 对 ω 的当前值求出新的 r_b 值后, 计算对于地球站位置的角度 θ_d , 并当合适时, 到等值线点的距离 d 为:

$$d = 0.5 b \sin \omega / \sin \psi_2 \quad (81)$$

$$\theta_d = \omega - \psi_2 \quad (82)$$

传播模式(2)的辅助等值线是围绕地球站的主波束轴呈对称性的。因此, 注意对于给定的 ω 值, 且 $(-\omega)$ 或 $(360^\circ - \omega)$ 的运算结果都相同, 故能求得 ω 值为 181° - 359° 时对应的 d 值和 θ_d 值。

对于大多数情况来说, 对 r_b 的增量按上述采用0.2 km步长是合适的。将 r_b 值作为一个集合看, 该值可控制运算结果的精细度。当地球站波束仰角值小时, d 和 θ_d 值的精细度变得更需注意, 可采用更小的步长。

附件 1 的附录 4

1 GHz至约40 GHz频率范围内用于协调研究和 干扰评估的视距无线电中继系统 天线的参考辐射方向图 (根据ITU-R F.699建议书)

本附录给出视距无线电中继系统天线的参考辐射方向图，当得不到实际天线辐射方向图供应用时，它可用于传播模式（2）的协调计算。

在协调研究和干扰评估中，做出各种努力利用实际的天线辐射方向图十分重要。然而，如果得不到实际方向图可供应用，则在1 GHz-40 GHz频率范围内应采用下面的参考辐射方向图：

a) 在天线直径与波长之比大于100的场合下，应采用下面的公式：

$$G(\varphi) = G_{max} - 2.5 \times 10^{-3} \left(\frac{D}{\lambda} \varphi \right)^2 \quad \text{对于} \quad 0 < \varphi < \varphi_m \quad (83)$$

$$G(\varphi) = G_1 \quad \text{对于} \quad \varphi_m \leq \varphi < \varphi_r \quad (84)$$

$$G(\varphi) = 32 - 25 \log \varphi \quad \text{对于} \quad \varphi_r \leq \varphi < 48^\circ \quad (85)$$

$$G(\varphi) = -10 \quad \text{对于} \quad 48^\circ \leq \varphi \leq 180^\circ \quad (86)$$

$$G_1 = 2 + 15 \log \left(\frac{D}{\lambda} \right) \quad (87)$$

$$\varphi_m = \frac{20\lambda}{D} \sqrt{G_{max} - G_1} \quad (88)$$

$$\varphi_r = 15.85 \left(\frac{D}{\lambda} \right)^{-0.6} \quad (89)$$

b) 在天线直径与波长之比小于或等于100的场合下，应采用下面的公式（见注6和注7）：

$$G(\varphi) = G_{max} - 2.5 \times 10^{-3} \left(\frac{D}{\lambda} \varphi \right)^2 \quad \text{对于} \quad 0 < \varphi < \varphi_m \quad (90)$$

$$G(\varphi) = G_1 \quad \text{对于} \quad \varphi_m \leq \varphi < 100 \frac{\lambda}{D} \quad (91)$$

$$G(\varphi) = 52 - 10 \log \frac{D}{\lambda} - 25 \log \varphi \quad \text{对于} \quad 100 \frac{\lambda}{D} \leq \varphi < 48^\circ \quad (92)$$

$$G(\varphi) = 10 - 10 \log \frac{D}{\lambda} \quad \text{对于} \quad 48^\circ \leq \varphi \leq 180^\circ \quad (93)$$

c) 在只知道天线最大增益的场合下，可用下面的表示式估值 D/λ ：

$$20 \log \frac{D}{\lambda} \approx G_{max} - 7.7 \quad (94)$$

其中， G_{max} 是天线主瓣增益（dBi）。

d) 在只知道天线波束宽度的场合下，可用下面的表示式估值 D/λ （以相同单位表示）：

$$D/\lambda \approx 69.3 / \theta_{bw} \quad (95)$$

其中， θ_{bw} 是波束宽度（-3dB）（度）。

然后，应用下式可近似估值 G_{max} ：

$$G_{max} \text{ (dBi)} \approx 44.5 - 20 \log \theta_{bw} \quad (96)$$

注1 — 在协调研究和干扰评估中，做出各种努力以利用实际天线辐射方向图十分重要。

注2 — 应当指出，在一定的角度范围内实际天线的辐射方向图可能不如参考辐射方向图（见注3）。所以，对本附录内的参考辐射方向图不应解释为可对现有的或规划的无线电中继系统天线的辐射方向图建立最高界限。

注3 — 在应用参考辐射方向图时应注意到，在一定角度范围内特定的馈电系统可能产生较高水平的溢漏。

注4 — a)和b)项中的参考辐射方向图仅适用于一种极化（水平或垂直）。对两种极化（水平和垂直）的参考辐射方向图尚在研究中。

注5 — 本附录内包括的参考辐射方向图只是用于旋转对称的天线。具有非对称孔径的天线，其参考辐射方向图需进一步研究。对此类天线来说，上面的参考辐射方向图可考虑为暂时有效。

注6 — 关于某些协调研究和干扰评估用的平均辐射方向图的数学模型，在ITU-R F.1245建议书中有进一步的资料给出。

注7 — 需要更深入的研究以确保继续开发参考辐射方向图，适应于天线设计的进展。

注8 — a)和b)项中的参考辐射方向图虽然一般地可应用，但不适合在某些实际的固定业务天线中作为模型，在5°-70°的角度范围内应谨慎对待（参见注2和注3）。

附件 1 的附录 5

输入参数和导出参数

本建议书内，某些情况中的参数可以是输入参数或是导出参数。参数的状态（输入或导出）列于表3中。状态定义为：

- 输入：输入参数，其数值在本建议书内来给出或不能从中得到，例如频率、地球站纬度等。
- 导出：一种参数，其数值在本建议书内可导出、定义（例如是常数）或计算出，例如，表面降水率 $R(p)$ (mm/h)（可从地图和曲线图中得到）、 d_{max2} （表3中得到）和传播模式（1）的协调距离 d_1 (km)（计算）等。

表3

术语定义

| 参 数 | 单 位 | 定 义 | 定义出处 | 状 态 |
|------------|-----|---------------------------------------|---------------------------|-----|
| A_1 | dB | 大气波导衰减中非距离依赖性部分 | 公式(25) | 导出 |
| A_2 | dB | 对流层衰减中非距离依赖性部分 | 公式(29) | 导出 |
| A_c | dB | 直接关联海面波导的衰减校正量 | 公式(24) | 导出 |
| A_d | dB | 沿地球站每一方位其水平距离上的衰减校正量 | 公式(10) | 导出 |
| A_g | dB | 传播模式(1)和传播模式(2)计算中因大气中排放气体造成的衰减 | 公式(32)和(76) | 导出 |
| A_h | dB | 沿地球站每一方位因地形屏蔽造成的总衰减 | 公式(11a)至(11c) 附录 2 § 1 | 导出 |
| A_w | dB | 传播模式(1)最小距离内路径部分中因水蒸气造成的衰减 | 公式(22b) | 导出 |
| b | km | 地球站与最远可能公共容积之间的水平距离，用于计算传播模式(2)的辅助等值线 | 附录 3 § 4.1 | 导出 |
| C | — | 用于传播模式(2)的有效散射传递函数 | 公式(72) | 导出 |
| C_a, C_b | — | 降雨高度之上和之下散射的有效散射传递函数 | 公式(71)和(70) | 导出 |
| d | km | 从地球站至辅助等值线点之间的距离，用于计算传播模式(2)的辅助等值线 | 公式(81) 附录 3 § 4.1 | 导出 |

表3
术语定义

| 参 数 | 单 位 | 定 义 | 定义出处 | 状 态 |
|--------------------------------------|-----|--|-------------------------------|-----|
| d_1 | km | 传播模式(1)的协调距离 | 附录 2 § 2、3、4 | 导出 |
| d_c | km | 从地球站至所考虑方向的海岸的距离, 用于计算传播模式(1)的协调距离 | 公式(24) | 输入 |
| d_c | km | 雨区直径, 用于传播模式(2)的计算 | 公式(52) | 导出 |
| d_e | km | 地球站至雨区边缘的水平距离 | 公式(64) | 导出 |
| d_h | km | 从地球站天线中心看去的无线电视距 | 附录 2 § 1 | 输入 |
| d_i | km | 传播模式(1)协调距离迭代计算中应用的离地球站的当前距离 | 公式(15), (31)和(48) | 导出 |
| d_{lm} | km | 距离 d_i 内区域A2 中最长的连续内陆距离 | 附件 1 § 4.2 | 输入 |
| d_{max1} | km | 传播模式(1)的最大计算距离 | § 5.2 | 导出 |
| d_{max2} | km | 传播模式(2)的最大计算距离 | 表 2 | 导出 |
| d_{min} | km | 传播模式(1)和传播模式(2)两者的最小协调距离 | 公式(5a)至(5f) | 导出 |
| d'_{min} | km | 低频率的最小协调距离 | 公式(4) | 导出 |
| d_{to}, d_{tv} d_{ro}, d_{rv} | km | 传播模式(2)计算中用于确定气体衰减的距离 | 公式(74a), (74b) (75a)和(75b) | 导出 |
| d_r | km | 传播模式(2)中, 与衰减等于或超出要求的传输衰减之雨区间的距离 | 附录 3 § 1 | 导出 |
| d_{tm} | km | 距离 d_c 内区域A1+区域A2 中最长的连续陆地(即内陆+沿海地区)距离, 用于迭代计算传播模式(1)的协调距离 | 附录 1 § 4.2 | 输入 |
| D | m | 确定天线辐射参考方向图用的天线直径(附录 4) | 附录 4 | 输入 |
| f | GHz | 100 MHz-105 GHz 的频率 | 不使用 | 输入 |
| $G(\varphi)$ | dB | 在天线辐射参考方向上确定的偏轴角 φ 处的天线增益(附录 4) | 公式(83)至(86), (90)到(93) | 导出 |
| G_L | | 从最差月份时间百分数转换至年时间百分数时所用的一项 | 公式(7a)和 (7b) | 导出 |

表3
术语定义

| 参 数 | 单 位 | 定 义 | 定义出处 | 状 态 |
|--|--|--|---|-----|
| G_1 | dB | 在天线辐射参考方向图上确定的天线第一旁瓣的增益(附录4) | 公式(87) | 导出 |
| G_{max} | dB | 天线辐射参考方向图中应用的天线轴向增益(附录4) | 附录4 | 输入 |
| G_T | dB | 地面站天线增益, 假定为42 dB, 用于计算传播模式(2)的协调距离 | 公式(57) | 导出 |
| h_c | km | 取决于雨区内的地域, 用于传播模式(2)计算中的参数 | 公式(65) | 导出 |
| h_m | km | 传播模式(2)计算中波束相交点地面之上的高度 | 公式(60) | 导出 |
| h_R | km | 地面之上的有效降雨高度 | 不使用 | 输入 |
| $L(p_1)$ | dB | 对 $p_1\%$ 时间(传播模式(1))需求的最小许可的基本传输损耗 | § 1 | 输入 |
| $L_b(p_2)$ | dB | 对 $p_1\%$ 时间(传播模式(2))需求的最小许可的基本传输损耗 | § 1 | 输入 |
| $L_{bl}(p_1)$ | dB | 假设通路完全为陆地(区域 A1 或区域 A2)的路径适用损耗, 用于迭代计算传播模式(1)的协调距离 | 公式(16) | 导出 |
| $L_{bs}(p_1)$ | dB | 假设通路完全为冷海(区域 B)或暖海(区域 C)的路径适用损耗, 应用于迭代计算传播模式(1)的协调距离 | 公式(17a)至(17b) | 导出 |
| $L_1(p_1)$ $L_2(p_1)$ $L_3(p_1)$ $L_4(p_1)$ $L_5(p_1)$ $L_6(p_1)$ $L_7(p_1)$ $L_8(p_1)$ $L_9(p_1)$ | dB dB dB dB dB dB dB dB dB | 用于迭代计算传播模式(1)协调距离的损耗 | 公式(14), (18), (26), (30), (40), (41), (46), (47)和(49) | 导出 |
| L_f | dB | 频率依赖性损耗, 用于计算传播模式(1)的协调距离 | 公式(28) | 导出 |
| $L_r(p_2)$ | dB | 按降水率 R 的单调函数得到的传输衰减, 用于确定传播模式(2)的协调距离 | 公式(77) | 导出 |
| N_0 | — | 通路中心海平面表面折射率 | 公式(3) | 导出 |

表3
术语定义

| 参 数 | 单 位 | 定 义 | 定义出处 | 状 态 |
|--------------|------|---|----------------|-------|
| p_1 | % | 传播模式(1)的平均年时间百分数, p_1 的范围为: 10%-50%, 频率为100 MHz-790 MHz时; 0.001%-50%, 频率为790 MHz-105 MHz时 | 公式(8) § 6.1 | 输入 |
| p_{w1} | % | 传播模式(1)中最差月份时间百分数 | § 6.1 | 输入 |
| p_2 | % | 传播模式(2)中平均年时间百分数, 0.001%-10% | 公式(9) § 7.2 | 输入或导出 |
| p_{w2} | % | 传播模式(2)中最差月份时间百分数 | § 7.2 | 输入 |
| $R(p_2)$ | mm/h | 超出一年内平均 $p_2\%$ 的地面降雨率, 用于传播模式(2)的辅助等值线 | | 输入 |
| r_b | km | 从公共容积中心到辅助等值线的距离, 用于计算传播模式(2)的辅助等值线 | 附录 3 § 4.1 | 导出 |
| r_E | km | 地球有效半径(=8500 km) | 附录 3 § 3 | 输入 |
| r_i | km | 最大散射地区与地面站可能位置之间的当前距离, 用于迭代计算传播模式(2)的协调距离 | 公式(51) | 导出 |
| r_m | km | 传播模式(2)计算中公共散射容积之外衰减的比例距离 | 公式(54) | 导出 |
| r_r | km | 传播模式(2)计算中波束相交点至地球站的路径长度 | 公式(63) | 导出 |
| r_t | km | 传播模式(2)计算中波束相交点至地面站的路径长度 | 公式(62) | 导出 |
| s | km | 距离增量, 用于迭代计算协调距离(建议值为 1 km) | § 1 | 输入 |
| S | - | 传播模式(2)计算中的瑞利散射偏差 | 公式(73) | 导出 |
| β | - | 用于计算传播模式(1)协调距离 | 公式(38) | 导出 |
| β_p | % | 洁净空气异常传播的相对发生率 | 公式(2a)和(2b) | 导出 |
| δ | 弧度 | 地球站与传播模式(2)计算中的当前距离两点对地球中心的张角 | 公式(61) | 导出 |
| ϵ_L | - | 附加的距离依赖性衰减和其他衰减的容限, 包括与地形高度相关的衰减 | 公式(27) | 导出 |

表3
术语定义

| 参 数 | 单 位 | 定 义 | 定义出处 | 状 态 |
|---------------|-------|--|---------------|-----|
| ε | 度 | 地球站天线主波束仰角 | 附录3 § 3 | 输入 |
| φ | 度 | 对天线主波束轴的角度偏移，用于天线辐射参考方向图中(附录4) | 附录4 | 输入 |
| φ_r | 度 | 对天线主波束轴的角度偏移，用于天线辐射参考方向图中(附录4) | 公式(89) | 导出 |
| φ_m | 度 | 对天线主波束轴的角度偏移，用于天线辐射参考方向图中(附录4) | 公式(88) | 导出 |
| Γ | | 用于计算传播模式(1)协调距离的一项 | 公式(39) | 导出 |
| Γ_1 | dB | 用于计算传播模式(2)协调距离的一项 | 公式(67) | 导出 |
| Γ_2 | dB | 用于计算传播模式(2)协调距离的一项 | 公式(66) | 导出 |
| Γ_a | dB | 用于计算传播模式(2)协调距离的一项 | 公式(69) | 导出 |
| Γ_b | dB | 用于计算传播模式(2)协调距离的一项 | 公式(68) | 导出 |
| γ_d | dB/km | 特定的衰减项，用于迭代计算传播模式(1)的协调距离 | 公式(23) | 导出 |
| γ_{gm} | dB/km | 气体吸收造成的特定的衰减，用于频率范围 60 GHz-105 GHz | 公式(45) | 导出 |
| γ_o | dB/km | 干燥空气造成的特定衰减 | 公式(20)和(55) | 导出 |
| γ_{om} | dB/km | 干燥空气造成的特定衰减，用于频率范围 60 GHz-105 GHz | 公式(43a)和(43b) | 导出 |
| γ_R | dB/km | 雨水造成的特定衰减 | 附录 3 | 输入 |
| γ_w | dB/km | 水蒸气造成的特定衰减 | 公式(21) | 导出 |
| γ_{wv} | dB/km | 水蒸气吸收造成特定衰减，用于水汽散射模型 | 公式(56) | 导出 |
| γ_{wt} | dB/km | 水蒸气吸收造成的特定衰减，用于对流层传播模型(采用 3 g/m ³)的水蒸气密度 | 公式(22a) | 导出 |
| γ_{wm} | dB/km | 水蒸气吸收造成的特定衰减，用于频率范围60 GHz-105 GHz | 公式(44) | 导出 |
| η | - | 传播模式(2)计算中的中间参数 | 公式(53) | 导出 |
| λ | m | 波长，用于确定天线辐射参考方向图中(附录 4) | 附录 4 | 输入 |

表3
术语定义

| 参 数 | 单 位 | 定 义 | 定义出处 | 状 态 |
|---------------|----------------|---|---------------------|-----|
| μ_1 | — | 取决于路径在陆地(内陆和/或沿海)和水域之上的程度的参数,用于迭代计算传播模式(1)的协调距离 | 公式(34) | 导出 |
| μ_2 | — | 用于迭代计算传播模式(1)协调距离的参数 | 公式(36) | 导出 |
| μ_4 | — | 用于迭代计算传播模式(1)协调距离的参数 | 公式(37a)和(37b) | 导出 |
| θ_d | 度 | 相对于从地球站主波束方向到辅助等值线上一个点的方位角,用于计算传播模式(2)的辅助等值线 | 公式(82) 附录3 § 4.1 | 导出 |
| θ_h | 度 | 地球站水平仰角 | 附录2 § 1 | 输入 |
| θ_{bw} | 度 | 天线辐射方向图 3 dB 波束宽度,用于天线辐射参考方向图中(附录 4) | 公式(95)和(96) | 输入 |
| ρ | g/m^3 | 超出 50%时间的大气层水蒸气密度 | 公式(21)和(56) | 输入 |
| ρ_0 | g/m^3 | 地球站处超出 50%时间的大气水蒸气密度 | 公式(22b) | 输入 |
| ρ_{dmin} | g/m^3 | 相关方位上 d_{min} 处超出 50%时间的大气水蒸气密度 | 公式(22b) | 输入 |
| ρ_i | g/m^3 | 传播模式(1)迭代的每一步中超出 50%时间的大气水蒸气密度 | 公式(32) | 输入 |
| σ | — | 用于迭代计算传播模式(1)协调距离的参数 | 公式(36) | 导出 |
| τ | — | 用于迭代计算传播模式(1)协调距离的参数 | 公式(33) | 导出 |
| υ | 度 | 保护角,用于确定传播模式(2)的辅助等值线 | 附录 3 § 4.1 步骤 g) | 导出 |

表3
术语定义

| 参 数 | 单 位 | 定 义 | 定义出处 | 状 态 |
|-----------|-----|--|---------------------|-----|
| ω | 度 | 地面站相对于公共容积中心的极坐标角，用于计算传播模式(2)的辅助等值线 | 附录 3 § 4 | 输入 |
| ψ | 度 | 传播模式(2)中，地球站与任何地面站波束之间可能发生的公共容积内临界地区的张角 | 公式(80) 附录3 § 4.1 | 导出 |
| ζ | 度 | 地球站纬度(北纬为正，南纬为负) | 公式(1a)和(1b) | 输入 |
| ζ_r | 度 | 与地球站纬度相关的纬度，用于确定洁净空气异常传播相对发生率 β_p 的合适值 | 公式(1a)和(1b) | 导出 |