

ITU-R P.452-18 建议书

(08/2023)

P系列：无线电波传播

**评估在频率高于约100 MHz时地球
表面上电台之间干扰的预测程序**



前言

无线电通信部门的作用是确保所有无线电通信业务，包括卫星业务，合理、公平、有效和经济地使用无线电频谱，并开展没有频率范围限制的研究，在此基础上通过建议书。

无线电通信部门制定规章制度和政策的职能由世界和区域无线电通信大会以及无线电通信全会完成，并得到各研究组的支持。

知识产权政策（IPR）

国际电联无线电通信部门（ITU-R）的 IPR 政策述于 ITU-R 第 1 号决议所参引的《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/zh> 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 建议书系列

（可同时在以下网址获得：<https://www.itu.int/publ/R-REC/zh>）

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

注：本ITU-R建议书英文版已按ITU-R第1号决议规定的程序批准。

电子出版物
2024年，日内瓦

© 国际电联 2024

版权所有。未经国际电联书面许可，不得以任何手段翻印本出版物的任何部分。

ITU-R P.452-18 建议书

评估在频率高于约100 MHz时地球
表面上电台之间干扰的预测程序

(ITU-R第208/3号课题)

(1970-1974-1978-1982-1986-1992-1994-1995-1997-1999-2001-2003-2005-2007-2009-2013-
2015-2021-2023年)**范围**

本建议书含有用于评估在频率为大约100 MHz至50 GHz时地球表面上电台之间干扰的一种预测方法，该方法考虑了晴空和水凝物散射干扰两种机制。

关键词

干扰，大气波导，对流层散射，衍射，水凝物散射，数字数据结果

缩写词/词汇

Amsl 平均海平面之上

IDWM 国际电联的数字化世界地图

LoS 视距

相关ITU建议书、报告

ITU-R S.465建议书

ITU-R S.580建议书

ITU-R P.676建议书

ITU-R F.699建议书

ITU-R P.837建议书

ITU-R P.838建议书

ITU-R P.839建议书

ITU-R P.1058建议书

ITU-R P.1144建议书

ITU-R F.1245建议书

ITU-R F.1336建议书

注-应使用建议书/报告最新修订/版本。

国际电联无线电通信全会，

考虑到

a) 由于无线电频谱拥挤，不同的地面业务之间，同一业务的各系统之间以及地面和地空业务中的各系统之间必须共用频段资源；

- b) 为了让共用同一频段的各系统能够很好地共存，需要一些干扰预测程序。这些预测程序在运用上是精确的和可靠的，而且所有有关各方都是可以接受的；
- c) 为了满足“最差月份”的性能指标和可用性指标，往往需要进行适用于干扰预测程序的传播预测；
- d) 要求这些预测方法适用于世界上所有地区中所有类型的路径，

建议

应采用附件1提供的预测程序评估约100 MHz频率以上的地表电台间的现有无用信号路径的传播损耗。

附件1

目录

	页数
1 引言	4
2 干扰传播机制	4
3 晴空干扰预测	6
3.1 一般说明	6
3.2 导出预测结果	6
4 晴空传播模型	12
4.1 视距传播（包括短期效应）	12
4.2 衍射	13
4.3 对流层散射	19
4.4 大气波导/层反射	20
4.5 总预测	21
4.6 传输损耗的计算	23
5 水凝物散射干扰预测	24
5.1 水凝物散射造成传输损耗的理论基础	25
5.2 模型输入参数	26
5.3 应用水凝物散射算法的步骤	29
附件1的后附资料1 – 晴空预测程序所需要的无线电气象数据.....	42

1	引言	42
2	无线电折射率数据和表面折射的垂直变化图	42
	附件1的后附资料2 – 路径剖面分析	42
1	引言	42
2	路径剖面图的制作	43
3	路径长度	44
4	路径分类	45
5	从路径剖面图导出各参数	45
	5.1 超视距路径和视距路径	45
	附件1的后附资料3 – 对 $x \leq 0.5$ 时逆累积正态分布函数的近似	50

1 引言

由于无线电频谱拥挤，不同的无线电业务之间，或相似业务的不同运营商之间必须共用一些频段。为了保证涉及的地面系统和地空系统很好地共存，重要的是要能够以合理的精确度来预测它们之间的干扰可能。预测中所使用的预测程序和模型应为各方所接受，预测的精确度和可靠性要经过论证。

在地球表面上的电台之间以及在这些电台和空间电台之间可能存在许多类型的干扰路径及其干扰路径的组合，而且需要适用于每一情形的预测方法。本附件研究了一整套比较重要的干扰问题，即位于地球表面的无线电台之间存在潜在干扰的情形。

本建议书所含的模型依据这样一种假设：干扰发射机和被干扰接收机都在大气表层内运行。在航空系统等模型运行中采用超大天线高度不适用于这些模型。该预测程序为工作频率范围在约0.1 GHz到50 GHz之间的无线电台进行了测试。

本建议书内的模型旨在计算时间百分比在 $0.001 \leq p \leq 50\%$ 范围内的传播损耗上限。这一假设并不意味着最大损耗将出现在 $p = 50\%$ 的情况下。

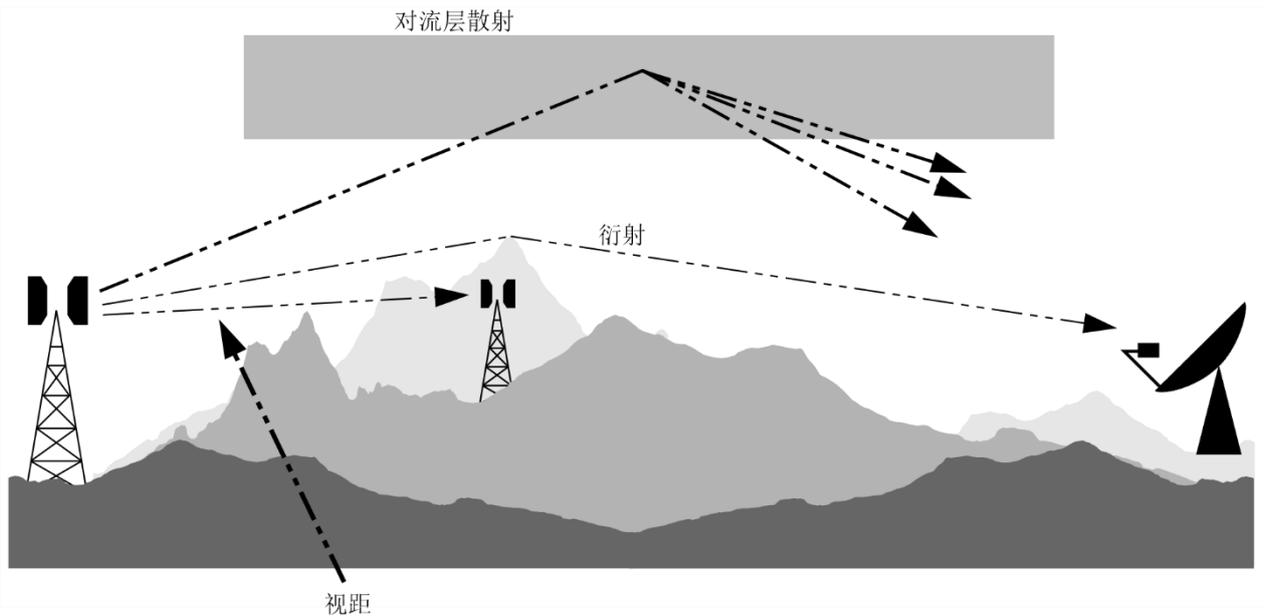
该方法包括一组补充的传播模型，确保预测涵盖所有可能遇到的主要干扰传播机制，还提供了传播路径的无线电气象和地形特性的分析方法，对于程序所覆盖的不超过10 000 km距离限值的实际干扰路径，都可以用这些方法给出预测值。

2 干扰传播机制

干扰可能出现在许多传播机制中，哪一种传播机制占据主导地位取决于气候、无线电频率、关心的时间百分比、距离和传播路径的地形。任何时候都可能存在单个传播机制或多个传播机制。主要干扰传播机制如下：

- 视距（图1）：在正常（即很好混合的）大气条件下存在的视距传输路径，是最直接的干扰传播情况。然而，当部分路径的衍射使得信号电平比正常预测的值稍有增加时，可能还有一些复杂因素起作用。而且，在除最短的路径以外的所有路径上（即路径长于5 km左右），由于大气分层引起的多径效应和聚焦效应，信号电平常常在短时间内显著增强（见图2）。
- 衍射（图1）：在正常条件下，当超过视距以外时，只要找到有用信号电平，通常情况下均为衍射效应占据主导地位。对于那些短时间内的异常问题并不太重要的业务来说，可以建立的衍射模型的精度一般决定了系统可以达到的密度。衍射预测的能力一定要很好地适用于光滑地球、离散障碍物和不规则（非建造的）地形和地物的情况。
- 对流层散射（图1）：这一机制决定了较长路径上（即长于100-150 km）的“背景”干扰电平。在这种情况下，衍射场很弱。但是，除了个别特殊情况外，如存在很灵敏的接收机或很高功率的干扰源（如雷达系统），对流层散射引起的干扰电平极低，以至于可忽略不计。

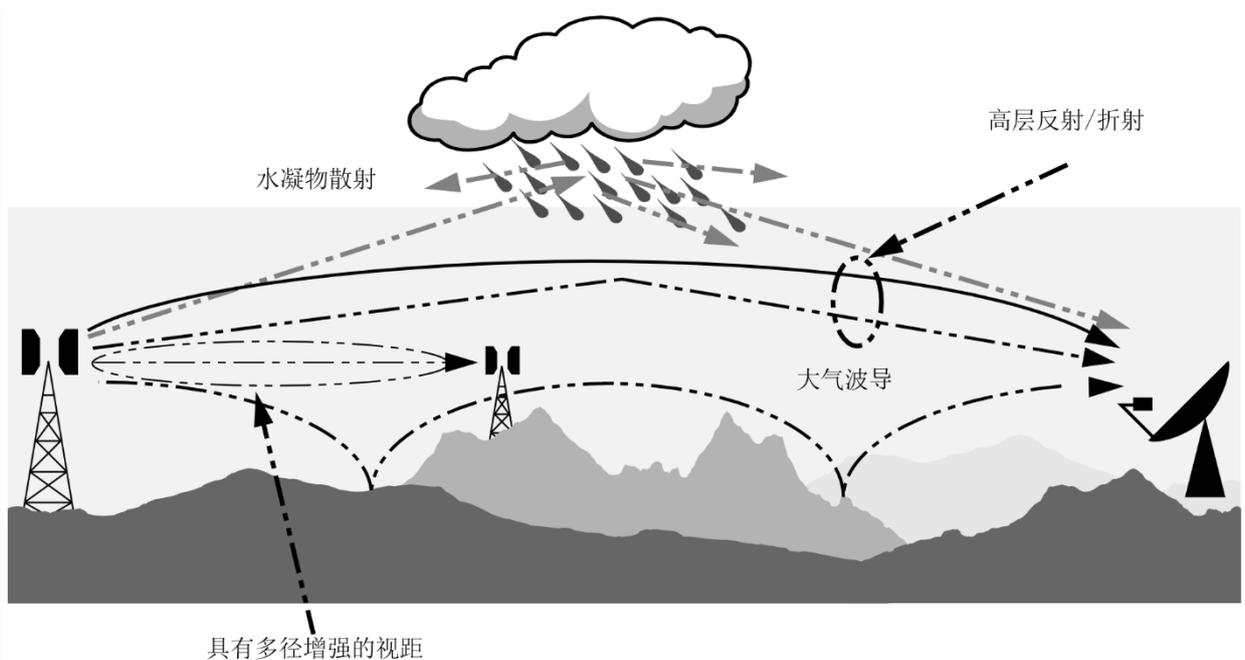
图1
长期干扰传播机制



P.0452-01

- 表面大气波导（图2）：在水面上和在平坦的沿海陆地区域，这是可能引起干扰的最重要短期传播机制，它可以在很远距离（海面上超过500 km）上产生高信号电平。在某些条件下，这样的信号可能超过等效“自由空间”电平。

图2
异常（短期）干扰传播机制



P.0452-02

- 高层的反射和折射（图2）：从高度达几百米的层上的反射和/或折射的处理是很重要的。因为在有利的路径地形情况下，这些机制有可能使信号很有效地克服地形的衍射损耗。而且这种影响在相当长的距离内（250-300 km）可能是显著的。
- 水凝物散射（图2）：水凝物散射可能是地面链路发射机和地球站之间的潜在干扰来源，因为它的作用几乎是无方向性的，所以它可能造成偏离大圆干扰路径的效果。但是，干扰信号电平十分低，因此，通常不是一个严重的问题。

干扰预测的基本问题（事实上它与所有对流层预测程序是共同的）是很难提出一套统一的、一致性好的实用方法来适用各种距离和时间百分比的情况，即对实际大气而言，随着气候和/或路径条件的改变，一种占据主导的机制的统计数据会逐步融合进另一种机制中去。特别是，在这些过渡区域中，对于一总的时间百分比，可能出现一给定的信号电平，它是在不同机制下的信号电平之和。本程序采取的方式是对晴空和水凝物散射干扰预测规定完全独立的方法，分别如第4和第5节所述。

晴空法由衍射、大气波导/层反射和对流层散射几个不同的模型组成。无论是视距路径还是超视距路径，这三种模型对每种情况都适用。然后用混合技术将各结果合成一个总的预测值，以保证对任一给定的路径距离和时间百分比，在等效的理想视距模型中的信号增强是可能得到的最高的值。

3 晴空干扰预测

3.1 一般说明

尽管晴空法通过三种不同的模型来实施，然后将其结果混合，但该程序考虑了四种基本类型的传播机制：

- 视距（包括由多径和聚焦效应引起的信号增强）；
- 衍射（包含光滑地球表面、不规则地形、地物和部分路径的情况）；
- 对流层散射；
- 异常传播（大气波导和层反射/折射）；

3.2 导出预测结果

3.2.1 程序概要

得到预测结果所需要的步骤如下：

步骤1：输入数据

表1列出了该程序所需要的基本输入数据。所需要的其他所有信息，都是在执行该程序过程中从这些基本数据中导出的。

表1
基本输入数据

参数	优选的分辨率	说明
f	0.01	频率 (GHz)
p	0.001	所要求的不超过计算出的基本传输损耗的时间百分比 (s)
φ_t, φ_r	0.001	电台的纬度 (度)
ψ_t, ψ_r	0.001	电台的经度 (度)
h_{tg}, h_{rg}	1	天线中心高于地面的高度 (m)
h_{ts}, h_{rs}	1	天线中心的平均海拔高度 (m)
G_t, G_r	0.1	大圆干扰路径的水平方向上的天线增益 (dBi)
Pol	未提供	如垂直或水平信号

注 1 – 对于干扰台和被干扰台：

t : 干扰台

r : 被干扰台。

表1的极化不是数值参数。这一信息结合公式(30a)、(30b)和(31)用于第4.2.2.1款。

步骤2：选择平均年份或最差月份的预测

选择年度预测或最差月份预测，通常是由在干扰路径的接收端的被干扰无线电系统的质量（即性能和可用性）目标所决定的。因为干扰通常是一个双向的问题，可能需要对两组这样的质量目标进行评估，以决定最差条件下的方向，根据最坏方向求出所需要的可容许的最小基本传输损耗。在大多数情况下，质量目标是用任何月份的百分比来表述的，所以将需要有最差月份的数据。

传播预测模型预测出基本传输损耗的年度分布。在平均年份预测中，在预测程序中直接使用时间的百分比 p ，在该 $p\%$ 时间内，基本传输损耗不超过一特定的值。若需要做平均最差月份预测，必须根据路径中心纬度 φ ，用下式计算出最差月份时间百分比 p_w 的等效年度时间百分比 p ：

$$p = 10^{\left(\frac{\log_{10}(p_w) + \log_{10}(G_L) - 0.186\omega - 0.444}{0.816 + 0.078\omega}\right)} \quad (1)$$

其中：

ω : 路径跨越水面的比例（见表4）。

$$G_L = \begin{cases} \sqrt{1.1 + |\cos 2\varphi|^{0.7}} & \text{对于 } |\varphi| \leq 45^\circ \\ \sqrt{1.1 - |\cos 2\varphi|^{0.7}} & \text{对于 } |\varphi| > 45^\circ \end{cases} \quad (1a)$$

必要时， p 的值必须加以限制，以使得 $12p \geq p_w$ 。

请注意，在北半球纬度 φ （度）取“正”号。

计算结果就代表了所要求的最差月份时间百分比 $p_w\%$ 的基本传输损耗。

步骤3: 无线电气象数据

为了描述全世界不同地点的背景和异常传播条件的变化, 预测程序使用了三个无线电气象参数。

- ΔN (N-单位/km), 穿过大气层最下面1 km时平均无线电折射递减率, 为计算有效地球半径提供数据以开展路径剖面 and 衍射障碍分析。请注意, 在这一程序中, ΔN 是一个正值。
- β_0 (%), 在低层大气的第一个100 m中可预计出折射递减率超过100 N-单位/km的时间百分比。用这个时间百分比来估计在所研究的纬度上, 充分发展的异常传播的相对发生率。所要用的 β_0 值适合于路径中心的纬度。
- N_0 (N-单位), 海平面的折射率。仅在对流层散射模型中用作对流层散射机制中局部变化的一个度量。因为散射路径计算是基于路径的几何参数, 由年度或最差月份的 ΔN 值所决定, 因此不再需要最差月份的 N_0 值。从适当地图中导出的路径中心值给出了正确的 ΔN 和 N_0 值。

用如下公式来确定路径中心位置的异常传播的点发生率 β_0 (%) :

$$\beta_0 = \begin{cases} 10^{-0.015|\varphi|+1.67} \mu_1 \mu_4 & \% \quad \text{对于 } |\varphi| \leq 70^\circ \\ 4.17 \mu_1 \mu_4 & \% \quad \text{对于 } |\varphi| > 70^\circ \end{cases} \quad (2)$$

其中:

φ : 路径中心纬度 (度)。

参数 μ_1 取决于路径跨越陆地 (内陆和/或沿海) 和水域的程度, 它可由下式求出:

$$\mu_1 = \left[10^{\frac{-d_{lm}}{16-6.6\tau}} + \left[10^{-(0.496+0.354\tau)} \right]^5 \right]^{0.2} \quad (3)$$

其中 μ_1 的取值范围应为 $\mu_1 \leq 1$,

而

$$\tau = \left[1 - e^{-(4.12 \times 10^{-4} \times d_{lm}^{2.41})} \right] \quad (3a)$$

其中:

d_{lm} : 大圆路径的最长的连续陆地 (内陆加沿海) 段 (km);

d_{lm} : 大圆路径的最长的连续内陆段 (km)。

表2中规定了用于导出 d_{lm} 和 d_{lm} 的无线电气候区的定义。

$$\mu_4 = \begin{cases} 10^{(-0.935+0.0176|\varphi|) \log_{10} \mu_1} & \text{对于 } |\varphi| \leq 70^\circ \\ 10^{0.3 \log_{10} \mu_1} & \text{对于 } |\varphi| > 70^\circ \end{cases} \quad (4)$$

表2
无线电气候区

气候区类型	代码	定义
沿海陆地	A1	沿海陆地和海岸区域，即邻近海且相对于平均海平面或水平面，高度在100 m以下的陆地；但是离最近的海域距离限制为50 km。若无法得到100 m时的精确数据，可以使用近似值，如300英尺
内陆	A2	除了上面定义为“沿海陆地”的沿海和海岸区域以外的所有陆地
海	B	海、洋和其他大型水体（覆盖直径至少为100 km的圆形区域）

内陆大型水体

处于区B的“大”内陆水体定义为面积至少有7 800 km²的水体，河流区域的面积除外。若在这样大的水体内的岛屿有90%的面积的高度不超过平均水平面以上100 m，则在计算这个面积时，把这些岛屿包括在水的面积中。在计算水的面积时，应该把不满足上述标准的岛屿视为陆地。

大的内陆湖泊或湿地区域

对于包含许多小湖泊或河网的面积大于7 800 km²的大块内陆区域，若其中水的面积超过50%，而且90%以上的陆地的高度不超过平均水平面以上100m，则主管部门应该将它们视为“沿海”区A1。

区A1的各气候区，包括大型内陆水体、大型内陆湖和湿地区域，很难分得清清楚楚。所以，请各主管部门和ITU无线电通信局（BR）一起，将它们领土国界内希望确认为属于这类气候区（区A1）的区域进行登记。若没有经过登记的资料，所有陆地区域将被视为属于气候区A2。

为了使各主管部门之间得到的结果尽可能一致，本程序的计算应该基于BR提供的ITU数字化世界地图（IDWM）。如果路径中的所有点距海洋或其他大型水体都不少于50公里，那么适用只有内陆类别。

如果按无线电路径中的连续点存储区域信息，则应假设地区代码不同的各点之间的中途会出现变化。

有效地球半径

可用下式来计算路径中有效地球半径系数的中值 k_{50} ：

$$k_{50} = \frac{157}{157 - \Delta N} \quad (5)$$

假设真实的平均地球半径 $a = 6371$ km，可以由下式计算出有效地球半径 a_e 的中值：

$$a_e = k_{50}a \quad \text{km} \quad (6a)$$

在 $\beta_0\%$ 的时间内超过的地球有效半径 a_β ，由下式给出：

$$a_\beta = k_\beta a \quad \text{km} \quad (6b)$$

其中 $k_{\beta} = 3.0$ 是在 $\beta_0\%$ 的时间内超过的地球有效半径系数的估计值。

在第4.2.1和4.2.2款中，一般有效地球半径 a_p 将在50%的时间内设为 a_e ，并在 $\beta_0\%$ 的时间内设为 a_{β} 。

步骤4：无线电路径剖面

下面描述的方法中使用的路径剖面图需要路径沿线的路径特定地形（裸露地面）和路径特定地物（地面覆盖）类别数据。方法包括：

- 使用实际地形高度构建地形剖面；
- 基于地物分类，在地形剖面中增加具有代表性的地物高度。

如果使用本方法计算无地物的地形剖面的衍射损耗，则与地形和地物组合的情况相反，将会低估地物环境中的衍射损耗。本方法已经通过数字地形数据与代表性的地物类别数据的结合，对数字地形数据进行了开发和验证，没有直接使用地表高度数据，因其包括地物但没有明确区分地形和地物。值得注意的是，如果地形剖面包括地表高度数据，则可能高估衍射损耗。如果可以获得精确的地表高度数据，可以探索其他技术，如3-D射线追踪，将建筑物周围衍射的影响纳入考虑，从而更精确地估计传播损耗。

传播预测方法的应用需要无线电路径的剖面。剖面应包括路径沿线的地形（裸露地面）高度和地物（地面覆盖）高度的信息。

信息将存储在三个数组中，每个数组具有相同数量的值 $n + 1$ ，如下所示：

$$d_i: \text{到第}i\text{个剖面点发射机的距离 (km)} \quad (6c)$$

$$h_i: \text{第}i\text{个剖面点在海平面以上的地形高度(m)} \quad (6d)$$

$$g_i = \begin{cases} h_i + \text{第}i\text{个剖面点的代表性地物高度 (m)} & \text{对于 } i = 1, \dots, n - 1 \\ h_0 & \text{对于 } i = 0 \\ h_n & \text{对于 } i = n \end{cases} \quad (6e)$$

其中：

i : 0, 1, 2, ..., n = 剖面点的指数

$n + 1$: 剖面点的数量

发射机和接收机之间必须至少有一个中间剖面点。因此， n 必须满足 $n \geq 2$ 。这样少的点只适用于小于1km量级的短路径。

注意，第一个剖面点位于发射机。因此， d_0 为零， h_0 为发射机处在海平面以上的地形高度，单位为米。类似地，第 n 个剖面点位于接收机。因此， d_n 为路径长度，单位为km， h_n 为接收机处在海平面以上的地形高度，单位为米。

程序没有给出剖面点之间的具体距离。假设从数字地形高程和地面覆盖（地物）数据集中提取剖面，合适的间距通常与彼此相似分辨率的源数据集的点间距相似。剖面点之间的间距不要求相等，但最好它们能在整个剖面上具有相似的间距，且间距不小于30m的量级。

用于计算的数组包括距离 d_i 、地形高度 h_i （如公式(6d)所示）和加上代表性地物高度的地形高度 g_i （如公式(6e)所示）。如果距离发射机或接收机小于50m，则不应将代表性地物高度加到发射机和接收机处的地形高度中。因此， g_0 为发射机处在海平面以上的地形高度，单位为米； g_n 为接收机处在海平面以上的地形高度，单位为米； g_i 为距离发射机或接收机小于50m的所有点在海平面以上的地形高度，单位为米。

公式(6e)中的“代表性地物高度”涉及与地面覆盖分类(如植被和建筑物)相关的统计高度信息,即为每个地面覆盖/地物类别分配一个单一的高度值。将代表性地物高度添加到剖面的做法是基于高度 h_i 代表地球裸露表面的假设。如果无线电路径经过出现衍射或部分路径阻碍的林地或城市,通常有效剖面高度会更高,因为无线电信号将在地物上方传播。因此,通过增加代表性高度来考虑地物,可以获得更合适的剖面表示。

适当的增加不一定是无形的,比如建筑物的屋顶高度。当地物之间存在间隙时,无线电波能量可能在它们中间穿过而不是在它们上方传播。在这种情况下,地物的存在预计会增加衍射损耗,但不会像将剖面提高到有形地物高度那样多。

这尤其适用于高层城市地区。“密集城市”或“高层城市”等类别往往与30m或以上的建筑高度联系在一起。但是,一些高层区域的高层建筑之间有很大的空间,可能存在一些低损耗路径,在高层建筑周围而不是其屋顶上传播。在这种情况下使用数值更小的代表性高度而不是有形地物高度可能是合适的。

另一种极端情况是即使在被归类为“开放”或“乡村”的地区,地面也不可能完全光秃秃的,也就是说,不可能没有任何可能增加传播损耗的物体。因此,在许多情况下,使用小数值的代表性高度而不是零可能是合适的。

因此,代表性地物高度不仅取决于地物的典型有形高度,还取决于物体之间的水平间距和间隙。在不同的国家,关于诸如“城市”之类的地物类别的实际代表意义,目前没有公认的标准。在可能的情况下,应使用基于本地地物高度统计数据或其他来源的代表性地物高度信息。表3给出了代表性地物高度的默认值,在没有区域/国家特定信息的情况下可以使用下列默认值。

表3

代表性地物高度默认值

地物类别	代表性地物高度 (m)
	添加到公式(6e)剖面 $i = 1$ 到 $n - 1$
水/海	0
开放/乡村	0
郊区	10
城市/树/森林	15
密集城市	20

表4给出了计算所必需的路径有关的一些参数值,这些参数须对基于通过公式(6a)得到的 a_e 值的路径剖面进行初步分析后,才能推算出来。附件1的后附资料2给出了有关路径剖面的出处、制作和分析的资料。

表4
由路径剖面分析导出的参数值

参数	描述
d	大圆路径距离 (km)
d_{lt}, d_{lr}	从发射天线和接收天线到相应视距的距离 (km)。
θ_t, θ_r	对于超视距路径, 分别为发射和接收的水平仰角 (mrad)。对于视距路径, 每一参数均置为指向另一终端的仰角。
θ	路径角向距离 (mrad)
h_{ts}, h_{rs}	天线中心的平均海拔高度 (m)
h_{te}, h_{re}	对于大气波导/层反射模型, 天线离地面的有效高度 (m) (定义见附件 1 后附资料 2) 请注意, 衍射模型中的有效高度使用了相同的参数名称, 但 h_{te} 和 h_{re} 在衍射模型中具有不同的定义。参见公式 (39a) 和 (39b)。
d_b	跨越水面的路径段的总长度 (km)
ω	跨越水面的路径的比例: $\omega = d_b/d \quad (7)$ 其中 d 是用公式(134)计算出的大圆距离。 全部是陆地的情况下: $\omega = 0$
$d_{ct,cr}$	从发射和接收天线沿大圆干扰路径到沿岸跨越陆地的距离 (km)。对于船上或海洋平台上的终端, 置为零。

4 晴空传播模型

按下列各小节所述估计在所需的年度时间百分比 p 内不超过的基本传输损耗 L_b (dB)。

4.1 视距传播 (包括短期效应)

对于视距路径和超视距路径, 应估计下列参数。

由自由空间传播和大气气体衰减引起的基本传输损耗:

$$L_{bfsg} = 92.4 + 20 \log_{10} f + 20 \log_{10} d_{fs} + A_g(d_{fs}) \quad \text{dB} \quad (8)$$

其中:

f : 频率 (GHz)

d_{fs} : 发射天线到接收天线的距离 (km):

$$d_{fs} = \sqrt{d^2 + \left(\frac{h_{ts} - h_{rs}}{1000}\right)^2} \quad (8a)$$

d : 大圆路径距离 (km)

h_{ts} : 海平面之上的发射天线高度 (m)

h_{rs} : 海平面之上的接收天线高度 (m)

A_g : 总的气体吸收 (dB):

$$A_g(d_{fs}) = [\gamma_0 + \gamma_w(\rho)] \cdot d_{fs} \quad \text{dB} \quad (9)$$

其中:

$\gamma_0, \gamma_w(\rho)$: 分别为干燥空气和水蒸气引入的特定衰减, 它们可由ITU-R P.676建议书
中的公式求得。

ρ : 水蒸气密度:

$$\rho = 7.5 + 2.5\omega \quad \text{g/m}^3 \quad (9a)$$

ω : 总路径中跨越水面的比例。

在 p 和 β_0 时间百分比内多径和聚焦效应的校正项:

$$E_{sp} = 2.6 [1 - \exp(-0.1 \{d_{lt} + d_{lr}\})] \log_{10} (p/50) \quad \text{dB} \quad (10a)$$

$$E_{s\beta} = 2.6 [1 - \exp(-0.1 \{d_{lt} + d_{lr}\})] \log_{10} (\beta_0/50) \quad \text{dB} \quad (10b)$$

在 $p\%$ 时间百分比内不超过的由视距传播引起的基本传输损耗:

$$L_{b0p} = L_{bfsg} + E_{sp} \quad \text{dB} \quad (11)$$

在 $\beta_0\%$ 时间百分比内不超过的由视距传播引起的基本传输损耗 (不管路径是否真的是视距路径):

$$L_{b0\beta} = L_{bfsg} + E_{s\beta} \quad \text{dB} \quad (12)$$

4.2 衍射

假定由于衍射机制引起的额外损耗的时间变化是大气整体无线电折射递减率的改变所造成的, 即假定随着时间百分比 p 减小, 有效地球半径系数 $k(p)$ 增加。当 $\beta_0 \leq p \leq 50\%$ 时, 可以认为这一假设是成立的。当时间百分比小于 β_0 时, 信号电平受异常传播机制主导影响, 而不是大气的整体折射特性。所以, 假定 $p < \beta_0\%$ 时, 不超过的衍射损耗与 $p = \beta_0\%$ 时相同。

考虑到这一点, 在 $p < 50\%$ 的一般情况下, 必须进行两次衍射计算, 第一次用于计算有效地球半径系数 k_{50} (公式 (5)) 中值, 第二次用于限制有效地球半径系数 k_{β} 等于3。第二次计算对 $\beta_0\%$ 时间内不超过的衍射损耗进行了估算, β_0 由公式 (2) 给出。

随后利用 § 4.2.4 介绍的限制或内插程序, 计算出当 $0.001\% \leq p \leq 50\%$ 时, $p\%$ 时间内不超过的衍射损耗 L_{dp} 。

由衍射模型计算§4.5所需的下列量值:

L_{dp} : $p\%$ 时间内不超过的衍射损耗

L_{bd50} : 与衍射有关的基本传输损耗中值

L_{bd} : 与衍射有关的 $p\%$ 时间内不超过的基本传输损耗

采用基于Bullington构建和球形地球衍射方法的组合计算衍射损耗。该方法的Bullington部分是基本Bullington构建的扩展，以控制自由空间和障碍条件之间的过渡。该方法的这部分使用了两次：一次为实际的路径剖面，另一次为一个零高度的光滑剖面，校正后的天线高度为有效天线高度。也可用相同的有效天线高度计算球形地球的衍射损耗。最终的结果是按上述方法计算的3种损耗的组合。对于一个完全光滑的路径，最后的衍射损耗将是球形地球模型的输出。

该方法给出了所有类型路径的衍射损耗估计值，包括海上或内陆上或沿海陆地，而且不论地面是光滑还是粗糙，也无论是视距还是超视距。

该方法还大量使用了单刃峰衍射损耗的一个近似值，该损耗是无量纲参数 v 的函数，由下式给出：

$$J(v) = 6.9 + 20 \log_{10} \left(\sqrt{(v - 0.1)^2 + 1} + v - 0.1 \right) \quad (13)$$

注意， $J(-0.78) \approx 0$ ，它规定了应采用该近似值的下限值。对于 $v < -0.78$ ， $J(v)$ 置为零。

整体衍射计算如下列所述各小节：

第4.2.1节描述衍射方法的Bullington部分。对于给定有效地球半径，每个衍射计算使用了两次。第二次校正了天线高度且所有的剖面高度是零。

第4.2.2节描述衍射模型的球形地球部分。这时所使用的天线高度与§4.2.1中的Bullington部分第二次使用的天线高度相同。

第4.2.3节描述对于一个给定的有效地球半径，§§4.2.1和4.2.2的方法如何组合使用以进行完整的衍射计算。由于使用了Bullington和球形地球两种方法，完整的计算被称作“delta-Bullington”模型。

第4.2.4节描述对于给定的时间百分比 $p\%$ ，不超过的衍射损耗的完整计算。

4.2.1 衍射计算的Bullington部分

在下列公式中，相对于连接发射机海平面与接收机海平面的基线，斜率计算单位为m/km。第 i 个剖面点的距离和高度（包括代表性地物高度）分别为 d_i （km）和平均海拔 g_i （m）， i 值从0取到 n ， $n+1$ 是剖面点数，完整的路径长度为 d （km）。为方便起见，将剖面的开始和结束端称为发射机和接收机，海拔高度分别为 h_{ts} 和 h_{rs} （m）。有效地球曲率 C_e km⁻¹由式1/ a_p 给出，其中 a_p 为有效地球半径（km）。波长由 λ 表示，单位为米。计算 a_p 的值在§4.2.4中给出。

在靠近两端的地方需要小心，以确保加入局部地物代表性高度不会引起每个天线水平仰角的不切实际的增加。

采用从发射机到点的线的最高斜率查找中间剖面点。

$$S_{tim} = \max \left[\frac{g_i + 500C_e d_i (d - d_i) - h_{ts}}{d_i} \right] \quad \text{m/km} \quad (14)$$

其中剖面指数 i 取值为1到 $n-1$ 。

假设为视距路径，计算从发射机到接收机的线的斜率，：

$$S_{tr} = \frac{h_{rc} - h_{tc}}{d} \quad \text{m/km} \quad (15)$$

必须考虑两种情况。

情况1.路径是视距路径

如果 $S_{tim} < S_{tr}$ 路径是视距路径。

采用最高衍射参数 v 查找中间的剖面点：

$$v_{\max} = \max \left\{ \left[g_i + 500C_e d_i (d - d_i) - \frac{h_{ts}(d-d_i) + h_{rs}d_i}{d} \right] \sqrt{\frac{0.002d}{\lambda d_i (d-d_i)}} \right\} \quad (16)$$

其中剖面指数 i 取值为1到 $n-1$ 。

在这种情况下，Bullington点的单刃峰损耗由下式给出：

$$L_{uc} = J(v_{\max}) \quad \text{dB} \quad (17)$$

其中，公式（13）给出了 v_b 大于-0.78的函数 J ，否则为0。

情况2.路径是超视距路径

如果 $S_{tim} \geq S_{tr}$ ，路径是超视距路径。

采用从接收机到点的线的最高斜率查找中间剖面点。

$$S_{rim} = \max \left[\frac{g_i + 500C_e d_i (d-d_i) - h_{rs}}{d-d_i} \right] \quad \text{m/km} \quad (18)$$

其中剖面指数 i 取值为1到 $n-1$ 。

计算从发射机到Bullington点的距离：

$$d_{bp} = \frac{h_{rc} - h_{tc} + S_{rim}d}{S_{tim} + S_{rim}} \quad \text{km} \quad (19)$$

计算Bullington点的衍射参数 v_b ：

$$v_b = \left[h_{ts} + S_{tim}d_{bp} - \frac{h_{ts}(d-d_{bp}) + h_{rs}d_{bp}}{d} \right] \sqrt{\frac{0.002d}{\lambda d_{bp}(d-d_{bp})}} \quad (20)$$

在这种情况下，Bullington点的单刃峰损耗由下式给出：

$$L_{uc} = J(v_b) \quad \text{dB} \quad (21)$$

对于采用公式（17）或（21）计算出的 L_{uc} ，路径的Bullington衍射损耗由下式给出：

$$L_{bull} = L_{uc} + [1 - \exp(-L_{uc}/6)](10+0.02d) \quad \text{dB} \quad (22)$$

4.2.2 球形地球衍射损耗

对于天线高度 h_{te} 和 h_{re} （m），球形地球衍射损耗 L_{dsph} 计算如下。

计算光滑路径的边际视距距离：

$$d_{los} = \sqrt{2a_p} \cdot \left(\sqrt{0.001h_{te}} + \sqrt{0.001h_{re}} \right) \quad \text{km} \quad (23)$$

§4.2.4提供了用于计算 a_p 的值。有效天线高度 h_{te} 和 h_{re} 在公式（39a）和（39b）中定义。

如果 $d \geq d_{los}$ 采用下述§4.2.2.1的方法计算衍射损耗， $a_{dft} = a_p$ 给出 L_{dft} ，并设置 L_{dsph} 等于 L_{dft} 。不需要进一步的球形地球衍射计算。

否则，继续如下：

由下式计算曲面地球路径和天线间射线之间的最小间距高度 h_{se} ：

$$h_{se} = \frac{\left(h_{te} - 500 \frac{d_{se1}^2}{a_p} \right) d_{se2} + \left(h_{re} - 500 \frac{d_{se2}^2}{a_p} \right) d_{se1}}{d} \quad \text{m} \quad (24)$$

其中：

$$d_{se1} = \frac{d}{2} (1 + b) \quad \text{km} \quad (25a)$$

$$d_{se2} = d - d_{se1} \quad \text{km} \quad (25b)$$

$$b = 2\sqrt{\frac{m+1}{3m}} \cos \left\{ \frac{\pi}{3} + \frac{1}{3} \arccos \left(\frac{3c}{2} \sqrt{\frac{3m}{(m+1)^3}} \right) \right\} \quad (25c)$$

其中的反余弦函数变回以弧度计量的角度。

$$c = \frac{h_{te} - h_{re}}{h_{te} + h_{re}} \quad (25d)$$

$$m = \frac{250d^2}{a_p(h_{te} + h_{re})} \quad (25e)$$

计算零衍射损耗 h_{req} 所需的间距，表示为：

$$h_{req} = 17.456 \sqrt{\frac{d_{se1} \cdot d_{se2} \cdot \lambda}{d}} \quad \text{m} \quad (26)$$

如果 $h_{se} > h_{req}$ ，球形地球衍射损耗 $L_{d sph}$ 为0。无需进行进一步的球形地球衍射计算。

否则按以下程序继续进行：

计算校正后的有效地球半径 a_{em} ，距离 d 处给出边际视距距离，表示为：

$$a_{em} = 500 \left(\frac{d}{\sqrt{h_{te}} + \sqrt{h_{re}}} \right)^2 \quad \text{km} \quad (27)$$

采用§4.2.2.1中的方法， $a_{dft} = a_{em}$ 给出 L_{dft} 。

如果 L_{dft} 为负，球形地球衍射损耗 $L_{d sph}$ 为0。无需进行进一步的球形地球衍射计算。

否则，继续如下：

以内插法计算球形地球衍射损耗：

$$L_{d sph} = \left[1 - h_{se} / h_{req} \right] L_{dft} \quad \text{dB} \quad (28)$$

4.2.2.1 球形地球衍射损耗的首项

本小节给出只使用剩余级数的首项计算球形地球衍射的方法。作为上文§4.2.2所描述的整体衍射方法的一部分，对于有效地球半径 a_{dft} 的给定值，给出首项衍射损耗 L_{dft} ，所使用的 a_{dft} 值在§4.2.2中给出。

设置陆地的典型地形电气特性，相对介电常数 $\epsilon_r = 22.0$ 和电导率 $\sigma = 0.003 \text{ S/m}$ 并采用公式(30)至(37)计算 L_{dft} ，输出结果 $L_{dftland}$ 。

设置海洋的典型地形电气特性，相对介电常数 $\epsilon_r = 80.0$ 和电导率 $\sigma = 5.0 \text{ S/m}$ 并采用公式(30)至(37)计算 L_{dft} ，输出结果 L_{dftsea} 。

首项球形衍射损耗计算如下：

$$L_{dft} = \omega L_{dftsea} + (1 - \omega) L_{dftland} \quad \text{dB} \quad (29)$$

其中 ω 为路径中海面的比例。

如上所述，开始两次计算：

对于水平和垂直极化归一化表面准入因子。

$$K_H = 0.036(a_{dft}f)^{-1/3} [(\epsilon_r - 1)^2 + (18\sigma/f)^2]^{-1/4} \quad (\text{horizontal}) \quad (30a)$$

和：

$$K_V = K_H \left[\epsilon_r^2 + (18\sigma/f)^2 \right]^{1/2} \quad (\text{垂直}) \quad (30b)$$

如果极化矢量包括水平和垂直分量，如圆形或倾斜，将其分解为水平和垂直分量，从公式(30a)和(30b)开始逐一分别计算，并通过场幅度求出结果的矢量和。实际上，通常无需这一分解，因为300 MHz以上时，可将数值1代入公式(31)的 β_{dft} 。

计算地球地面/极化参数：

$$\beta_{dft} = \frac{1 + 1.6K^2 + 0.67K^4}{1 + 4.5K^2 + 1.53K^4} \quad (31)$$

其中根据极化不同， K 可为 K_H 或 K_V 。

标称化距离：

$$X = 21.88 \beta_{dft} \left(\frac{f}{a_{dft}^2} \right)^{1/3} d \quad (32)$$

标称发射机和接收机高度：

$$Y_t = 0.9575 \beta_{dft} \left(\frac{f^2}{a_{dft}} \right)^{1/3} h_{te} \quad (33a)$$

$$Y_r = 0.9575 \beta_{dft} \left(\frac{f^2}{a_{dft}} \right)^{1/3} h_{re} \quad (33b)$$

距离期限的计算可表示为：

$$F_X = \begin{cases} 11 + 10 \log_{10}(X) - 17.6X & \text{对于 } X \geq 1.6 \\ -20 \log_{10}(X) - 5.6488X^{1.425} & \text{或 } X < 1.6 \end{cases} \quad (34)$$

确定标称高度函数表示为：

$$G(Y_{t/r}) = \begin{cases} 17.6(B_{t/r} - 1.1)^{0.5} - 5 \log_{10}(B_{t/r} - 1.1) - 8 & \text{对于 } B_{t/r} > 2 \\ 20 \log_{10}(B_{t/r} + 0.1B_{t/r}^3) & \text{否则} \end{cases} \quad (35)$$

其中：

$$B_t = \beta_{dft} Y_t \quad (36a)$$

$$B_r = \beta_{dft} Y_r \quad (36b)$$

如 $G(Y)$ 小于 $2 + 20 \log_{10} K$ ，通过限制 $G(Y)$ 得出 $G(Y) = 2 + 20 \log_{10} K$ 。

现球形地球衍射损耗首项表示为：

$$L_{dft} = -F_X - G(Y_t) - G(Y_r) \quad \text{dB} \quad (37)$$

4.2.3 完成“delta-Bullington”衍射损耗模型

使用§4.2.1中的方法得出路径剖面高度 (g_i) 和天线高度。设定实际路径产生的Bullington衍射损耗，公式 (22) 给出 $L_{bulla} = L_{bull}$ ：

再次使用§4.2.1中的方法，所有剖面高度 g_i 设置为零，校正后的天线高度由下式得出：

$$h'_{ts} = h_{ts} - h_{std} \quad \text{m (amsl)} \quad (38a)$$

$$h'_{rs} = h_{rs} - h_{srd} \quad \text{m (amsl)} \quad (38b)$$

其中发射机和接收机处的光滑地球高度 h_{std} 和 h_{srd} 在后附资料2的§5.1.6.3中给出。设定光滑路径产生的Bullington衍射损耗，公式 (22) 给出 $L_{bulla} = L_{bull}$ 。

采用§4.2.2中的方法计算球形地球衍射损耗 L_{dsph} ，以获得实际路径长度 d (km) 且：

$$h_{te} = h'_{ts} \quad \text{m (amsl)} \quad (39a)$$

$$h_{re} = h'_{rs} \quad \text{m (amsl)} \quad (39b)$$

一般路径衍射损耗是：

$$L_d = L_{bulla} + \max\{L_{dsph} - L_{bulls}, 0\} \quad \text{dB} \quad (40)$$

4.2.4 $p\%$ 时间不超过的衍射损耗

采用§4.2.3中的方法计算公式 (6a) 中有效地球半径 $a_p = a_\alpha$ 的衍射损耗 L_d 。设置衍射损耗中值 $L_{d50} = L_d$ 。

如果 $p = 50\%$ ， L_{d50} 给出 $p\%$ 时间不超过的衍射损耗 L_{dp} ，完成衍射计算。

如果 $p < 50\%$ ，继续如下。

采用§4.2.3中的方法计算公式 (6b) 中有效地球半径 $a_p = a_\beta$ 的衍射损耗 L_d 。设置 $\beta_0\%$ 的时间不超过的衍射损耗 $L_{d\beta} = L_d$ 。

两个有效地球半径系数的可能值的应用由内插系数 F_i 控制，对于 $\beta_0\% \leq p < 50\%$ ，基于衍射损耗的正态分布，由下式给出：

$$F_i = \frac{I\left(\frac{p}{100}\right)}{I\left(\frac{\beta_0}{100}\right)} \quad \text{对于 } 50\% > p > \beta_0\% \quad (41a)$$

$$= 1 \quad \text{对于 } \beta_0\% \geq p \quad (41b)$$

其中 $I(x)$ 是逆互补累积正态函数。附件1的后附资料3给出 $x < 0.5$ 时, 可以采用 $I(x)$ 近似值。

$p\%$ 时间不超过的衍射损耗 L_{dp} , 计算如下:

$$L_{dp} = L_{d50} + F_i (L_{d\beta} - L_{d50}) \quad \text{dB} \quad (42)$$

其中 L_{d50} 和 $L_{d\beta}$ 通过以上方法确定, F_i 依 p 和 β_0 值的不同由公式(41a)和(41b)确定。

与衍射有关的基本传输损耗中值 L_{bd50} 由下式给出:

$$L_{bd50} = L_{bfs_g} + L_{d50} \quad \text{dB} \quad (43)$$

其中 L_{bfs_g} 由公式(8)给出。

在 $p\%$ 时间内不超过的与衍射有关的基本传输损耗由下式给出:

$$L_{bd} = L_{b0p} + L_{dp} \quad \text{dB} \quad (44)$$

其中 L_{b0p} 由公式(11)给出。

4.3 对流层散射

注 1 – 时间百分比远低于50%情况下, 要把真正的对流层散射模型与其他引起类似传播效应的次要传播现象分离开来是相当困难的。本建议书中采用的“对流层散射”模型是对流层散射概念的经验概括, 它包含这些次要的传播效应。这就有可能在时间百分比 p 从0.001%到50%范围内连续一致地预测基本传输损耗, 所以, 在小时间百分比范围内将大气波导和层反射模型与适用于最大时间百分比下超过的弱剩余场的真正“散射模式”联系起来。

注 2 – 这一对流层散射预测模型是为干扰预测推导出来的, 它不适用于计算影响超视距无线电中继系统性能的50%时间以上的传播条件。

对于任何时间百分比 p 低于50%时, 可由下式求出不超过 p 时间内由对流层散射引入的基本传输损耗 L_{bs} (dB):

$$L_{bs} = 190 + L_f + 20 \log_{10} d + 0.573\theta - 0.15 N_0 + L_c + A_g - 10.1 [-\log_{10} (p/50)]^{0.7} \text{dB} \quad (45)$$

其中:

L_f : 与频率有关的损耗:

$$L_f = 25 \log_{10} f - 2.5 [\log_{10} (f/2)]^2 \quad \text{dB} \quad (45a)$$

L_c : 天线与媒质间的耦合损耗 (dB)

$$L_c = 0.051 \cdot e^{0.055(G_t + G_r)} \quad \text{dB} \quad (45b)$$

N_0 : 附件1后附资料1地图中的路径中心海平面的表面折射率

A_g : 对整个路径长度用 $\rho = 3\text{g/m}^3$, 通过公式(9)求出的气体吸收。

4.4 大气波导/层反射

在异常传播（大气波导和层反射）期间出现的基本传输损耗 L_{ba} (dB)的预测根据以下公式进行：

$$L_{ba} = A_f + A_d(p) + A_g \quad \text{dB} \quad (46)$$

其中：

A_f ： 大气内在天线和异常传播结构之间的固定耦合损耗的总和：

$$A_f = 102.45 + 20 \log_{10} f + 20 \log_{10}(d_{lt} + d_{lr}) + A_{lf} + A_{st} + A_{sr} + A_{ct} + A_{cr} \quad \text{dB} \quad (47)$$

A_{lf} ： 说明随波长诱导传播而增加的衰减经验校正量：

$$A_{lf}(f) = 45.375 - 137.0 \cdot f + 92.5 \cdot f^2 \quad \text{dB} \quad \text{如果 } f < 0.5 \text{ GHz} \quad (47a)$$

$$A_{lf}(f) = 0.0 \text{ dB} \quad \text{否则}$$

A_{st}, A_{sr} ： 分别为干扰站和被干扰站的场地屏蔽衍射损耗：

$$A_{st, sr} = \begin{cases} 20 \log_{10} \left[1 + 0.361 \theta''_{t,r} (f \cdot d_{lt,lr})^{1/2} \right] + 0.264 \theta''_{t,r} f^{1/3} & \text{dB 对于 } \theta''_{t,r} > 0 \text{ mrad} \\ 0 & \text{dB 对于 } \theta''_{t,r} \leq 0 \text{ mrad} \end{cases} \quad (48)$$

其中：

$$\theta''_{t,r} = \theta_{t,r} - 0.1 d_{lt,lr} \quad \text{mrad} \quad (48a)$$

A_{ct}, A_{cr} ： 分别为干扰站和被干扰站的跨海表面大气波导耦合校正量：

$$A_{ct, cr} = -3 e^{-0.25 d_{ct, cr}^2} \left[1 + \tanh (0.07 (50 - h_{ts, rs})) \right] \quad \text{dB} \quad \text{对于 } \omega \geq 0.75$$

$$d_{ct, cr} \leq d_{lt, lr} \quad (49)$$

$$d_{ct, cr} \leq 5 \text{ km}$$

$$A_{ct, cr} = 0 \quad \text{dB} \quad \text{对于其他所有情况} \quad (49a)$$

注意公式（49）需要有限的条件集。

$A_d(p)$ ： 在异常传播机制中与时间百分比和角度—距离有关的损耗：

$$A_d(p) = \gamma_d \cdot \theta' + A(p) \quad \text{dB} \quad (50)$$

其中：

γ_d ： 特定衰减

$$\gamma_d = 5 \times 10^{-5} a_e f^{1/3} \quad \text{dB/mrad} \quad (51)$$

θ' ： 允许应用公式（48）中的场地屏蔽模型的角距离（适用时（通过公式（52a）进行校正）：

$$\theta' = \frac{10^3 d}{a_e} + \theta'_t + \theta'_r \quad \text{mrad} \quad (52)$$

$$\theta'_{t,r} = \begin{cases} \theta_{t,r} & \text{对于 } \theta_{t,r} \leq 0.1 d_{lt,lr} \quad \text{mrad} \\ 0.1 d_{lt,lr} & \text{对于 } \theta_{t,r} > 0.1 d_{lt,lr} \quad \text{mrad} \end{cases} \quad (52a)$$

$A(p)$: 时间百分比的可变性（累积分布）：

$$A(p) = -12 + (1.2 + 3.7 \times 10^{-3} d) \log_{10} \left(\frac{p}{\beta} \right) + 12 \left(\frac{p}{\beta} \right)^{\Gamma} \quad (53)$$

$$\Gamma = \frac{1.076}{(2.0058 - \log_{10} \beta)^{1.012}} \times e^{-(9.51 - 4.8 \log_{10} \beta + 0.198 (\log_{10} \beta)^2) \times 10^{-6} \cdot d^{1.13}} \quad (53a)$$

$$\beta = \beta_0 \cdot \mu_2 \cdot \mu_3 \quad \% \quad (54)$$

μ_2 : 路径几何关系的校正量:

$$\mu_2 = \left[\frac{500}{a_e} \frac{d^2}{(\sqrt{h_{te}} + \sqrt{h_{re}})^2} \right]^{\alpha} \quad (55)$$

μ_2 的数值不应超过1。

有效天线高度 h_{te} 和 h_{re} 由公式（156）给出。

$$\alpha = -0.6 - \varepsilon \cdot 10^{-9} \cdot d^{3.1} \cdot \tau \quad (55a)$$

其中:

$$\varepsilon = 3.5$$

τ : 公式（3a）给出，

而 α 的值不得减小到-3.4以下。

μ_3 : 地形粗糙度的校正量:

$$\mu_3 = \begin{cases} 1 & \text{对于 } h_m \leq 10 \text{ m} \\ \exp \left[-4.6 \times 10^{-5} (h_m - 10) (43 + 6d_i) \right] & \text{对于 } h_m > 10 \text{ m} \end{cases} \quad (56)$$

$$d_i = \min (d - d_{lt} - d_{lr}, 40) \quad \text{km} \quad (57)$$

A_g : 总大气吸收，由公式（9）和（9a）求出。

其余项已在表1和表2以及附件1后附资料2中给出。

4.5 总预测

以下程序应应用于上述所有路径的计算结果。

计算内插系数 F_j ，以考虑斜率参数:

$$F_j = 1.0 - 0.5 \left(1.0 + \tanh \left(3.0 \xi \frac{(S_{tim} - S_{tr})}{\Theta} \right) \right) \quad (58)$$

其中:

ξ : 可调参数，当前设为0.8

$(S_{tim} - S_{tr})$: 公式(14)和(15)中定义的斜率参数，除在公式(14)中使用 h_i 而不是 g_i 外

Θ : 可调参数，当前设为0.3 mrad.

计算内插系数 F_k ，以考虑大圆路径距离：

$$F_k = 1.0 - 0.5 \left(1.0 + \tanh \left(3.0 \kappa \frac{(d - d_{sw})}{d_{sw}} \right) \right) \quad (59)$$

其中：

d ：大圆路径长度（km）（在表4中规定）

d_{sw} ：确定相关混合的距离范围的固定参数，置为20

κ ：确定在范围两端混合斜率的固定参数，置为0.5

计算与视距传播和海上部分路径衍射有关的理论最小传输损耗 L_{minb0p} （dB）。

$$L_{minb0p} = \begin{cases} L_{b0p} + (1 - \omega)L_{dp} & \text{对于 } p < \beta_0 \\ L_{bd50} + (L_{b0\beta} + (1 - \omega)L_{dp} - L_{bd50}) \cdot F_i & \text{对于 } p \geq \beta_0 \end{cases} \quad \text{dB} \quad (60)$$

其中：

L_{b0p} ：在 $p\%$ 时间内不超过的理论视距基本传输损耗，由公式(11)给出

$L_{b0\beta}$ ：在 $\beta\%$ 时间内不超过的理论视距基本传输损耗，由公式(12)给出

L_{dp} ：在 $p\%$ 时间内不超过的衍射损耗，采用§4.2的方法计算得出

F_i ：公式(41)给出的衍射内插系数。

计算与视距和超视距信号增强有关的理论最小基本传输损耗 L_{minbap} （dB）：

$$L_{minbap} = \eta \ln \left(\exp \left(\frac{L_{ba}}{\eta} \right) + \exp \left(\frac{L_{b0p}}{\eta} \right) \right) \quad \text{dB} \quad (61)$$

其中：

L_{ba} ：在 $p\%$ 时间内不超过的大气波导/层反射基本传输损耗，由公式（46）给出

L_{b0p} ：在 $p\%$ 时间内不超过的理论视距基本传输损耗，由公式（11）给出

$$\eta = 2.5$$

计算与衍射和视距或大气波导/层反射增强有关的理论基本传输损耗 L_{bda} （dB）：

$$L_{bda} = \begin{cases} L_{bd} & \text{对于 } L_{minbap} > L_{bd} \\ L_{minbap} + (L_{bd} - L_{minbap})F_k & \text{对于 } L_{minbap} \leq L_{bd} \end{cases} \quad \text{dB} \quad (62)$$

其中：

L_{bd} ：由公式（44）得出的在 $p\%$ 时间内不超过的衍射基本传输损耗。

F_k ：依大圆路径距离 d ，由公式（59）得出的内插系数。

计算基本传输损耗 L_{bam} （dB）校正值，该值考虑了衍射和视距或大气波导/层反射增强的影响：

$$L_{bam} = L_{bda} + (L_{minb0p} - L_{bda})F_j \quad \text{dB} \quad (63)$$

按下式计算在 $p\%$ 时间内不超过的最终基本传输损耗 L_b (dB) :

$$L_b = -5 \log_{10}(10^{-0.2L_{bs}} + 10^{-0.2L_{bam}}) \quad \text{dB} \quad (64)$$

4.6 传输损耗的计算

上面在§4.1到§4.5中所介绍的方法用于计算两站之间的基本传输损耗。为了计算在一个台站处由另一台站的干扰引起的信号电平，必须知道传输损耗，计算传输损耗要考虑到两个台站在它们之间的无线电（即干扰）路径方向上的天线增益。当无线电波的到达角已知时，可以使用该到达角方向上的天线增益。

下面的程序提供了用于计算两个地面站之间的传输损耗的方法。作为该方法中的中间步骤，它还提供了根据各站的地理坐标，计算大圆路径长度和角距离的公式，而不是像表4所假设的那样从路径剖面中推导这些量。

利用各站的地理坐标计算在地球中心该路径所对的角 δ ，可用下式：

$$\delta = \arccos(\sin(\varphi_t) \sin(\varphi_r) + \cos(\varphi_t) \cos(\varphi_r) \cos(\psi_t - \psi_r)) \quad \text{rad} \quad (65)$$

在台站之间的大圆距离 d 为：

$$d = 6371 \cdot \delta \quad \text{km} \quad (66)$$

用下式计算从 t 站到 r 站的方向角（从正北起顺时针方向）：

$$\alpha_{tr} = \arccos(\{\sin(\varphi_r) - \sin(\varphi_t) \cos(\delta)\} / \sin(\delta) \cos(\varphi_t)) \quad \text{rad} \quad (67)$$

完成了公式（67）的计算后，若 $\psi_t - \psi_r > 0$ ，则

$$\alpha_{tr} = 2\pi - \alpha_{tr} \quad \text{rad} \quad (68)$$

利用公式（67）和（68）的对称性来计算从 r 站到 t 站的方向角 α_{rt} 。

下面假定 t 站的主射束（视轴）方向为 $(\varepsilon_t, \alpha_t)$ （俯仰角，方向角），而 r 站的主射束方向是 $(\varepsilon_r, \alpha_r)$ 。为了分别得到在 t 站和 r 站处无线电（即干扰）路径的俯仰角 ε_{pt} 和 ε_{pr} ，必须区分视距路径和超视距路径。例如，对视距路径而言：

$$\varepsilon_{pt} = \frac{h_r - h_t}{d} - \frac{d}{2a_e} \quad \text{rad} \quad (69a)$$

和

$$\varepsilon_{pr} = \frac{h_t - h_r}{d} - \frac{d}{2a_e} \quad \text{rad} \quad (69b)$$

其中 h_t 和 h_r 为两站的平均海拔高度（km）。而对于超视距路径，俯仰角取决于它们各自的水平仰角：

$$\varepsilon_{pt} = \frac{\theta_t}{1000} \quad \text{rad} \quad (70a)$$

和

$$\varepsilon_{pr} = \frac{\theta_r}{1000} \quad \text{rad} \quad (70b)$$

请注意无线电水平仰角 θ_t 和 θ_r （mrad）是在表4中首先引进并且分别在附件1的后附资料2 §5.1.1和§5.1.3中作了定义。

为了分别计算在 t 站和 r 站的干扰路径方向上 t 站和 r 站的偏轴角(χ_t, χ_r)，建议用如下公式：

$$\chi_t = \arccos(\cos(\varepsilon_t) \cos(\varepsilon_{pt}) \cos(\alpha_{tr} - \alpha_t) + \sin(\varepsilon_t) \sin(\varepsilon_{pt})) \quad (71a)$$

和

$$\chi_r = \arccos(\cos(\varepsilon_r) \cos(\varepsilon_{pr}) \cos(\alpha_{rt} - \alpha_r) + \sin(\varepsilon_r) \sin(\varepsilon_{pr})) \quad (71b)$$

用它们相应的偏轴角，分别得到 t 站和 r 站的天线增益 G_t 和 G_r （dB）。若无法取得天线的实际辐射图，可以从ITU-R S.465建议书中得到增益随偏轴角的变化信息。

用下式求出传输损耗 L ：

$$L = L_b(p) - G_t - G_r \quad \text{dB} \quad (72)$$

晴空干扰场景中，对流层散射在无线电传播中占主导地位，俯仰角比无线电水平仰角 θ_t 和 θ_r 稍微大一些。使用无线电水平仰角应会引入可以忽略不计的误差，除非这些角也与它们各自的视轴方向重合。

5 水凝物散射干扰预测

对于约5 GHz以上的频率，如果水凝物的尺寸与波长相当或大于波长，那么由于水凝物散射造成的干扰可能具有明显的相互作用。与上面介绍过的晴空预测方法相反，下面描述的水凝物散射干扰预测方法直接开发出了两个站之间的传输损耗的表达式，因为它需要每一个站的干扰天线和被干扰天线的辐射图信息。

该方法是很通用的，任何天线辐射图都可以适用它。它提出了用于确定在任一偏轴角上的天线增益的方法。诸如ITU-R F.699、ITU-R F.1245、ITU-R S.465和ITU-R S.580等建议书中提出的辐射图都可以适用，更复杂的基于贝塞尔函数的辐射图和实测辐射图（如可以得到）也可以适用。该方法也可以适用如ITU-R F.1336建议书中表征的全向天线或扇形天线，这类天线的增益通常由垂直偏轴角（即相对于最大增益角的俯仰角）决定。

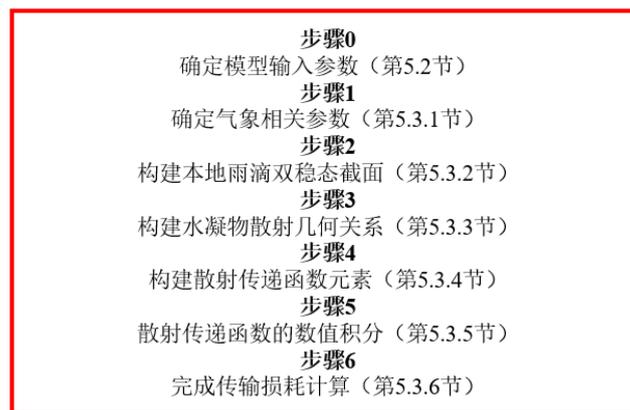
这一方法的通用还体现在该方法并不限于特定的几何关系，只要获得天线辐射图就可以了。所以，它既包含了主射束与主射束的耦合，也包含了旁瓣与主射束的耦合；它既包含了大圆散射，也包含了侧散射几何关系。该方法可以计算任一站在任何俯仰角和方位角下的长路径（> 100 km）和短路径（短到几公里以下）几何关系下的干扰电平。所以，这一方法适用的场景和业务的范围相对广泛，包括在获得双向划分的频段工作的两个地面站之间、地面站和地球站之间以及两个地球站之间的降雨散射干扰的计算。该方法基于描述两站之间由于水凝物散射造成的传输损耗的数学公式。传输损耗公式只考虑雨滴的单次散射。由于大气气体和降水造成了更高的衰减值，因此忽略了多次散射。此外，下列情况下可忽略水凝物散射：

- 两站之间没有降水；
- 工作频率在5GHz以下；
- 两站信道带宽没有重叠，因为这一散射机制不可能造成相邻信道干扰；
- 台站天线的主射束之间互相平行（78），和；
- 一站的偏轴斜视角（79）大于其波束宽度。

下面开发的方法计算了主射束与主射束耦合的情况下的水凝物散射损耗。然而，它可以适用于计算由于主射束与旁瓣耦合或旁瓣与主射束耦合造成的水凝物散射损耗。这可以通过用旁瓣的特性代替所需台站天线的主射束的特性来实现。在这种情况下，旁瓣的所有参数都将替换被代替的主射束的相应参数。例如，在用旁瓣代替主射束时，测量相对于所用旁瓣视轴的散射角（78）和斜视角（79）。

图3

水凝物散射算法流程图



P.0452-03

5.1 水凝物散射造成传输损耗的理论基础

基于双稳态雷达公式，由水凝物散射造成的两站（站1极化为 q ($q = v, h$)，站2极化为 p ($p = v, h$)）之间的传输损耗为：

$$L_{pq} = 73.4399 + 20 \log_{10} f - 10 \log_{10} C_{pq} \quad \text{dB} \quad (73)$$

其中：

f : 频率（GHz）

C_{pq} : 散射传递函数，包括对雨区的体积分（ $\text{m}^{-1}\text{km}^{-1}$ ）

$$C_{pq} = \iiint \frac{G_1 G_2 \sigma_{pq}}{r_{A1}^2 r_{A2}^2} \exp(-c[\mathcal{K}_{atm} + \mathcal{K}_{rain}]) \zeta(h) dV \quad (74)$$

注 – 该积分的数值表达式在本附件的其余部分中提供，见公式(132)和(133)。

$G_{1,2}$: 站1和站2相应的线性增益

$r_{A1,2}$: 积分元 dV 到站1和站2的距离 (km)

σ_{pq} : 单位体积雨滴的双稳态截面; § 5.3.4.4 (m^2m^{-3})

c : ($c = 0.23026$)将衰减单位从dB转化为奈培的常数

\mathcal{K}_{atm} : 从发射机经过积分元素到接收机的路径沿线的大气气体衰减 (dB); § 5.3.4.2

\mathcal{K}_{rain} : 从发射机经过积分元素到接收机的路径沿线的降雨衰减 (dB); § 5.3.4.3

$\zeta(h)$: 雷达反射率与高度的关系

$$\zeta(h) = \begin{cases} 1 & \text{for } h \leq h_R \\ 10^{-0.65(h-h_R)} & \text{for } h > h_R \end{cases} \quad (75)$$

h_R : 降雨高度 (km);

dV : 体积微分积分元 (km^3)

5.2 模型输入参数

表5

输入参数清单

(下标1表示站1的参数, 下标2表示站2的参数)

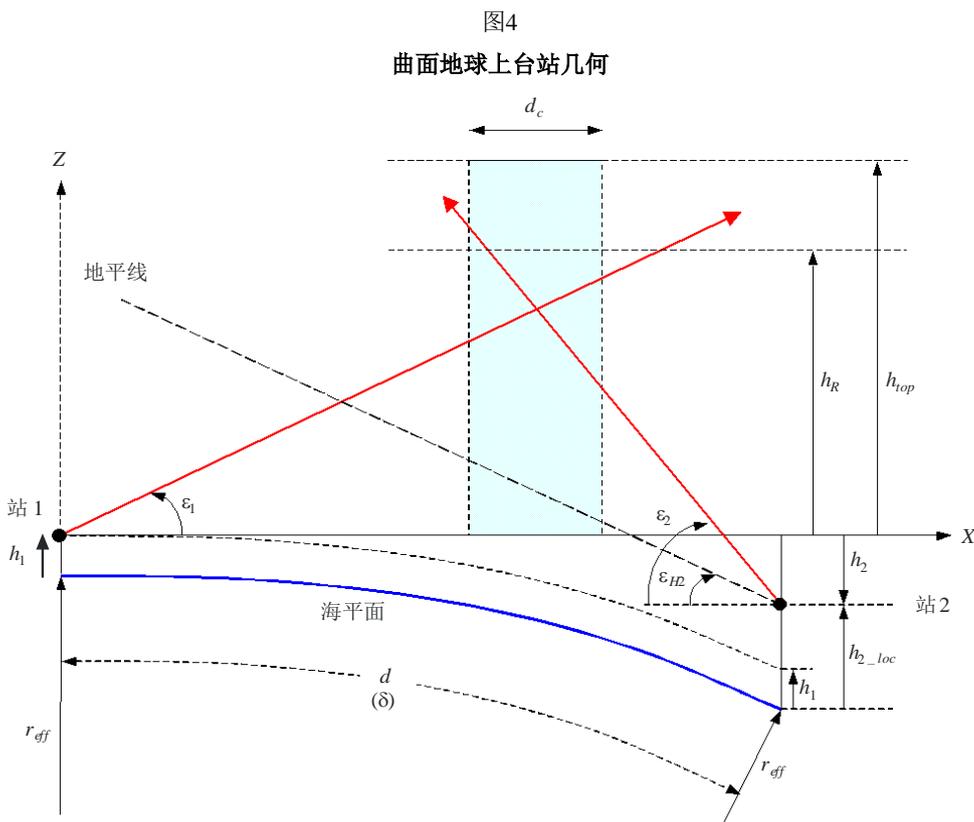
参数	单位	说明
d	km	大圆路径距离
f	GHz	频率
h_{1_loc}, h_{2_loc}	km	站1和站2本地的平均海拔高度
G_1, G_2	dB	每个天线的增益, 表示为天线视轴角和天线极化的函数
BW_1, BW_2	rad	天线波束宽度。根据所需的耦合, 波束宽度可以是主射束或旁瓣宽度。
$p_R(R)$		降雨率的概率分布
M	dB	系统之间的极化失配
P	hPa	表面压力 (默认值1 013.25 hPa)
$p_h(h)$		降雨高度的概率分布
T	°C	表面温度 (默认值15° C)
$\alpha_{1_loc}, \alpha_{2_loc}$	rad	站2到站1以及站1到站2的本地方向角 (以顺时针计)
$\epsilon_{H1_loc}, \epsilon_{H2_loc}$	rad	站1和站2的本地水平角

表5 (结束)

参数	单位	说明
ρ	g/m^3	表面水蒸气密度 (默认值 8 g/m^3)
τ	度	链路极化角 (0° 为水平极化, 90° 为垂直极化)
Lat_1,2 Lon_1,2	度	站1和站2的经纬度
R_p		不会超过的数量百分比

5.2.1 链路几何参数

除上述输入参数外, 链路几何参数也可视为输入参数。如果没有提供, 将计算得出这些参数并保存以备将来使用。



P0452-04

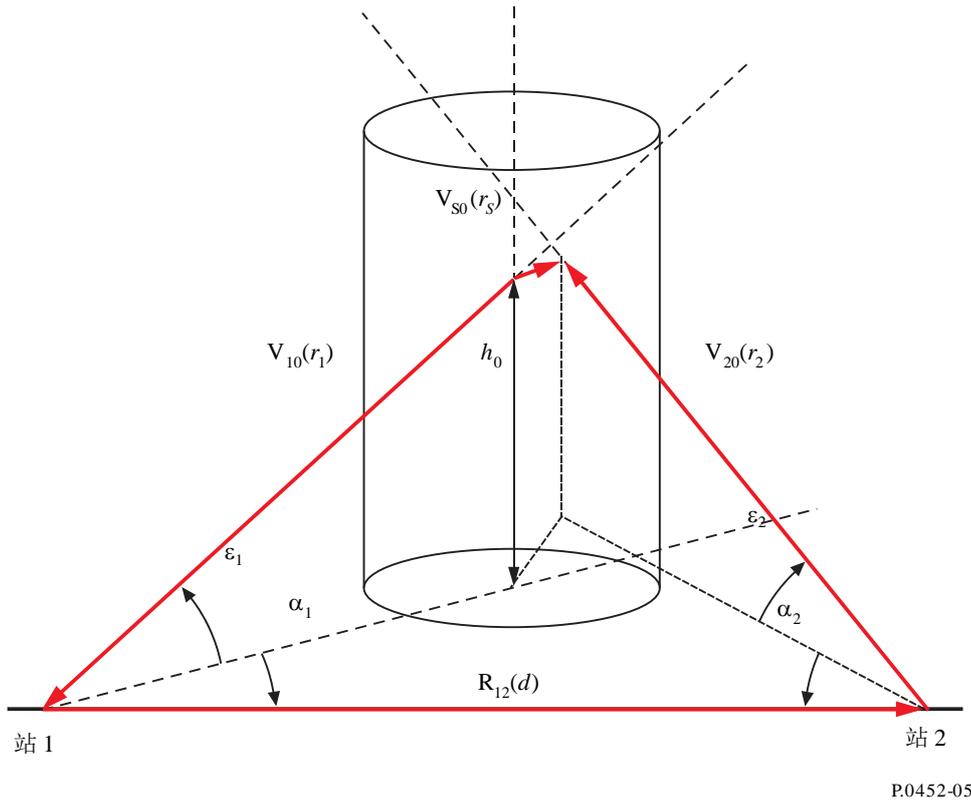
5.2.1.1 台站天线视轴 (主射束)

图5以站1的笛卡尔坐标为公共坐标, 描绘了水凝物散射链路的几何构型。在这个坐标中, 站1位于原点(0,0,0), x-y平面为水平面, x轴指向站2的方向, z轴指向垂直向上。站1天线视轴由单位矢量 V_{10} 给出:

$$V_{10} = \begin{bmatrix} \cos \varepsilon_1 \cos \alpha_1 \\ \cos \varepsilon_1 \sin \alpha_1 \\ \sin \varepsilon_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_{10} \\ y_{10} \\ z_{10} \end{bmatrix} \quad (76)$$

公式(76)中, $\varepsilon_1 = \varepsilon_{1_loc}$, $\alpha_1 = \alpha_{1_loc}$, ε_{1_loc} 和 α_{1_loc} 是站1天线视轴的本地俯仰角和方位角。

图5
一般侧散射情况下的水凝物散射链路几何示意图



站2天线视轴方向由单位长度矢量 \mathbf{V}_{20} 表示:

$$\mathbf{V}_{20} = \begin{bmatrix} \cos \varepsilon_2 \cos \alpha_2 \\ \cos \varepsilon_2 \sin \alpha_2 \\ \sin \varepsilon_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sin \varepsilon_{2_loc} \sin \delta - \cos \varepsilon_{2_loc} \cos \alpha_{2_loc} \cos \delta \\ -\cos \varepsilon_{2_loc} \sin \alpha_{2_loc} \\ \sin \varepsilon_{2_loc} \cos \delta + \cos \varepsilon_{2_loc} \cos \alpha_{2_loc} \sin \delta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_{20} \\ y_{20} \\ z_{20} \end{bmatrix} \quad (77a)$$

角 ε_2 和 α_2 是公共坐标系中站1到站2的仰角和方位角， ε_{2_loc} 和 α_{2_loc} 是本地坐标系中站2天线的对应角。此外， δ 是两站与地球中心的夹角（ $\delta = d/r_{eff}$ ， $r_{eff} = a_e = k_{50}a$ 是有效地球半径（中值）， a 是平均地球半径， a （通过公式（6a）得出）和 k_{50} （通过公式（5）得出）是半径系数中值）。 δ 值很小时，地球曲率可忽略不计； ε_2 和 α_2 分别等于 ε_{2_loc} 和 $\alpha_{2_loc} + \pi$ 。

站1至站2的矢量定义如下:

$$\mathbf{V}_{12} = \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \text{和} \mathbf{R}_{12} = \mathbf{V}_{12} \quad (77b)$$

5.2.1.2 主射束散射角

主射束散射角 φ_{ms} 是两天线主射束（视轴）之间的夹角，由两个单位矢量 \mathbf{V}_{10} 和 \mathbf{V}_{20} 的标量积求出:

$$\varphi_{ms} = \cos^{-1}(-\mathbf{V}_{20} \cdot \mathbf{V}_{10}) = \cos^{-1}(-\{\cos \varepsilon_1 \cos \varepsilon_2 \cos(\alpha_1 - \alpha_2) + \sin \varepsilon_1 \sin \varepsilon_2\}) \quad (78)$$

如果 $\varphi_{ms} < 0.01 \text{rad}$ ，则两天线射束几乎是平行或共线的。如果天线射束之间几乎是平行的，则降雨散射耦合可忽略不计，也无需计算水凝物散射。

5.2.1.3 偏轴斜视角

站1或站2与最接近另一站主射束轴的一点的偏轴斜视角 $\Psi_{1,2}$:

$$\Psi_{1,2} = \tan^{-1} \left(\frac{r_s}{r_{1,2}} \right) \quad (79)$$

可通过公式(80)获得距离 r_1 , r_2 和 r_s , (x_{10}, y_{10}, z_{10}) 和 (x_{20}, y_{20}, z_{20}) 分别为单位矢 \mathbf{V}_{10} 和 \mathbf{V}_{20} 的分量。

$$\begin{bmatrix} r_s \\ r_1 \\ r_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_{s0} & x_{10} & -x_{20} \\ y_{s0} & y_{10} & -y_{20} \\ z_{s0} & z_{10} & -z_{20} \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} d \\ 0 \\ h_2 \end{bmatrix}, \quad h_2 = h_{2_loc} - h_{1_loc} - d \frac{\delta}{2} \text{ km} \quad (80)$$

公式(80)中的 h_2 是站2在参考平面上的高度。

算子 $[\]^{-1}$ 为逆矩阵算子。 x_{s0} , y_{s0} ,和 z_{s0} 是源自单位矢量 \mathbf{V}_{10} 和 \mathbf{V}_{20} 乘积的单位矢量 \mathbf{V}_{s0} 的分量。

$$\mathbf{V}_{s0} = \frac{\mathbf{V}_{20} \times \mathbf{V}_{10}}{\sin \varphi_{ms}} = \frac{1}{\sin \varphi_{ms}} \begin{bmatrix} y_{20}z_{10} - z_{20}y_{10} \\ z_{20}x_{10} - x_{20}z_{10} \\ x_{20}y_{10} - y_{20}x_{10} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_{s0} \\ y_{s0} \\ z_{s0} \end{bmatrix} \quad (81)$$

如果斜视角度小于相关天线的3dB波束宽度,则可以实现主射束到主射束的耦合,并且需要计算水凝物散射。

5.3 应用水凝物散射算法的步骤

如果确定需要计算由于水凝物散射造成的传输损耗,可以按照以下算法步骤计算传输损耗。

5.3.1 步骤1: 确定气象相关参数

算法所需的气象相关参数如下:

- 特定大气衰减;
- 特定降雨衰减;
- 雨区结构; 和
- 降雨高度。

以下是关于各参数的说明。

5.3.1.1 特定大气衰减 γ_{atm}

计算从发射机经过散射体到接收机的传播路径上大气衰减 \mathcal{K}_{atm} 需要特定大气衰减 γ_{atm} (见§5.3.3)。特定大气衰减可从ITU-R P.676建议书附件1中通过大气温度、压力和水蒸气密度分布图获得。

5.3.1.2 特定降雨衰减 γ_R

本建议书中的特定降雨衰减预测模型与ITU-R P.838建议书中的模型不同，应仅用于计算§5中所需的水凝物散射干扰预测。这一提醒是因为ITU-R P.838建议书为针对扁圆球状雨滴制定的是特定降雨衰减预测模型，而水凝物散射模型是针对球形雨滴制定。这种差异对涉及特定降雨衰减公式(82)至(87)以及雨滴双稳态截面公式(123a)至(123d)的公式有影响。此外，ITU-R P.838建议书的特定降雨衰减模型与温度无关，而本节的特定降雨衰减和双稳态截面都与温度有关。

在计算从发射机经过散射体到接收机的传播路径上由于降雨引起的衰减 \mathcal{K}_{rain} 时，需要特定降雨衰减 γ_R ，以降雨率 R 表示为：

$$\gamma_{R1,2} = \kappa_{1,2} R^{\alpha_{1,2}} \quad (\text{dB/km}) \quad (82)$$

系数 $\kappa_{1,2}$ 和 $\alpha_{1,2}$ 是关于频率 f (GHz)的函数，雨滴温度见公式(83)至(85)。

$$\alpha_{1,2} = a_0 + a_1 x + a_2 x^2 + a_3 x^3 + a_4 x^4 + a_5 x^5 + a_6 x^6 \quad (83)$$

$$\kappa_{1,2} = \exp(b_0 + b_1 x + b_2 x^2 + b_3 x^3 + b_4 x^4 + b_5 x^5) \quad (84)$$

$$x = \ln(f) \quad (85)$$

公式(83)中的系数 a_m 和公式(84)中的系数 b_n 由温度 T (°C)决定。

系数 a_n 和 b_n 与温度的关系如下：

$$a_m = c_0^m + c_1^m T + c_2^m T^2, \quad m = 0,1,2,3,4,5,6 \quad (86)$$

$$b_m = d_0^m + d_1^m T + d_2^m T^2, \quad m = 0,1,2,3,4,5 \quad (87)$$

表6和表7给出了 c_i^m 和 d_i^m ($i = 0,1,2$)的值。

5.3.1.3 雨区结构

雨区的水平截面呈圆柱形对称，假设降雨率随远离雨区中心的情况呈指数衰减，可以表示为：

$$R(\rho) = R_m \exp(-\rho/\rho_0) \quad \text{mm/hr} \quad (88)$$

其中， ρ 是到雨区中心的径向距离， R_m 是中心的峰值降雨率， ρ_0 是到雨区中心的“特征距离”，有：

$$\rho_0 = \frac{10 - 1.5 \log_{10} R_m}{\ln\left(\frac{R_m}{0.4}\right)} \quad \text{km}, \quad R_m > 0.4 \text{ mm/hr} \quad (89)$$

5.3.1.4 降雨高度

通过0°C等温线高度 h_{iso} 可获得平均海平面以上的年平均降雨高度 h_R ，通常在4~5 km。

$$h_R = h_{iso} + 0.36 \quad \text{km} \quad (90)$$

使用ITU-R P.839-4建议书[R-REC-P.839-4-201309-I!!ZIP-E](#)可计算平均年0°C等温线在平均海平面以上的高度 h_{iso} 。

5.3.2 步骤2：构建本地雨滴双稳态截面

雨滴双稳态截面 η_1 在对称雨滴的本地坐标中可写为散射角 φ_s 的关系式，如下所示。

$$\eta_1(\varphi) = \exp\{u_0 + u_1(\sin 0.5\varphi_s)^2 + u_2(\sin 0.5\varphi_s)^4 + u_3(\sin 0.5\varphi_s)^6\} \quad (91)$$

公式(91)中的系数 u_i 's ($i = 0,1,2,3$)与公式(92)中的降雨率有关。

$$u_i = a_0^i + a_1^i \ln(R) + a_2^i \{\ln(R)\}^2, \quad i = 0, 1$$

$$u_i = a_0^i + a_1^i \ln(R) + a_2^i \{\ln(R)\}^2 + a_3^i \{\ln(R)\}^3, \quad i = 2, 3 \quad (92)$$

此外，公式（92）中每一个系数 a_n^i 's与频率 f 的关系，可以归纳为一个六阶多项式。

$$a_n^i = \sum_{m=0}^7 b_{n,m}^i f^m, \quad i = 0, 1, 2, 3 \text{ 和 } n = 0, 1, 2, 3 \quad (93)$$

另外，公式（93）中每一个系数 $b_{n,m}^i$ 's与公式（94）中的温度 T 有关。

$$b_{n,m}^i = c_0 + c_1 T + c_2 T^2 \quad (94)$$

表8至表21给出了系数 c_0 's, c_1 's 和 c_2 's的值。

5.3.3 步骤3: 构建水凝物散射几何关系

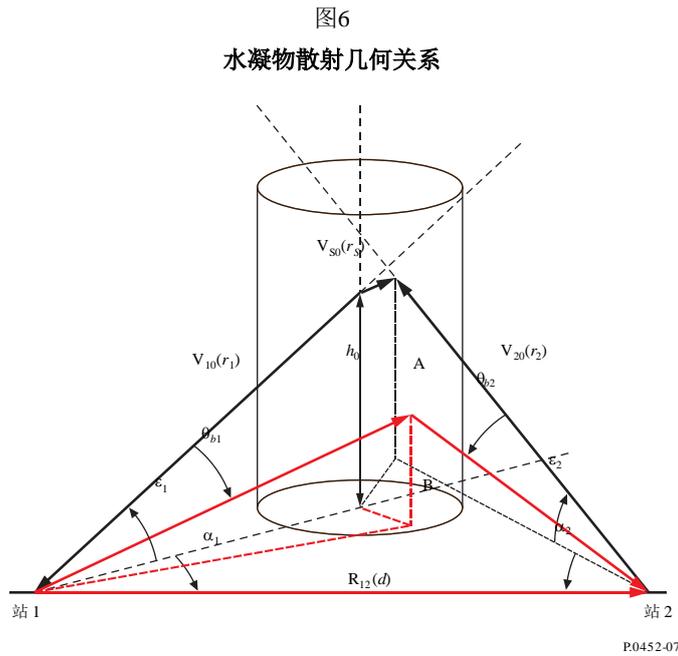
如图6所示，通过构建一个中心垂直轴与站1天线的主射束轴相交在0点(x_0, y_0, h_0)的雨区构建水凝物散射几何关系（采用平坦地球假设）。

$$x_0 = r_1 \cos \varepsilon_1 \cos \alpha_1$$

$$y_0 = r_1 \cos \varepsilon_1 \sin \alpha_1$$

$$h_0 = r_1 \sin \varepsilon_1 \quad (95)$$

公式（95）中的距离 r_1 可通过公式（80）获得。构建水凝物散射几何关系时，雨区中心可依据场景进行变化，以尽可能减少传输损耗，并尽可能增大干扰散射功率。雨区中A点(x, y, h)代表任一积分元，B点是A点在地平面上的投影（见图6）。



为方便对公式（74）的散射传递函数进行积分，将积分元A (x, y, h)的笛卡尔坐标转换为圆柱坐标(ρ, φ, z)。

$$\begin{aligned}
x &= x_0 + \rho \cos \varphi \\
y &= y_0 + \rho \sin \varphi \\
h &= h_0 + z \\
dV &= \rho \, d\rho \, d\varphi \, dz
\end{aligned} \tag{96}$$

圆柱坐标的中心是0点 (x_0, y_0, h_0) ，是雨区中心垂直轴与站1天线的视轴的相交点。在圆柱坐标系内，站1和站2到积分元A点 (ρ, φ, z) 的距离 $r_{A1,2}$ 可表达为下式：

$$\begin{aligned}
r_{A1} &= r'_1 D_{A1}, \quad D_{A1} = \sqrt{1 + \{\rho^2 + z^2 + 2\rho d'_1 \cos(\alpha_1 - \varphi) + 2h_0 z\}/(r'_1)^2} \\
r'_1 &= \sqrt{(d'_1)^2 + h_0^2}, \quad d'_1 = \sqrt{x_0^2 + y_0^2} \\
\alpha_1 &= \tan^{-1}\left(\frac{y_0}{x_0}\right) \\
r_{A2} &= r'_2 D_{A2} \\
D_{A2} &= \sqrt{1 + \{\rho^2 + z^2 + 2\rho d'_2 \cos(\alpha_2 - \varphi) + 2(h_0 - h_2)z\}/(r'_2)^2} \\
r'_2 &= \sqrt{(d'_2)^2 + (h_0 - h_2)^2}, \quad d'_2 = \sqrt{(x_0 - d)^2 + y_0^2} \\
\alpha_2 &= \tan^{-1}\left(\frac{y_0}{x_0 - d}\right)
\end{aligned} \tag{97}$$

位置矢量 $\mathbf{R}_{A1,2}(\rho, \varphi, z)$ 可由下式得出

$$\mathbf{R}_{A1}(\rho, \varphi, z) = \begin{bmatrix} x \\ y \\ h \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_0 + \rho \cos \varphi \\ y_0 + \rho \sin \varphi \\ h_0 + z \end{bmatrix} = r_{A1} \begin{bmatrix} \cos \varepsilon_{A1} \cos \alpha_{A1} \\ \cos \varepsilon_{A1} \sin \alpha_{A1} \\ \sin \varepsilon_{A1} \end{bmatrix} \tag{98a}$$

$$\mathbf{R}_{A2}(\rho, \varphi, z) = \begin{bmatrix} x - d \\ y \\ h - h_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_0 + \rho \cos \varphi - d \\ y_0 + \rho \sin \varphi \\ h_0 + z - h_2 \end{bmatrix} = r_{A2} \begin{bmatrix} \cos \varepsilon_{A2} \cos \alpha_{A2} \\ \cos \varepsilon_{A2} \sin \alpha_{A2} \\ \sin \varepsilon_{A2} \end{bmatrix} \tag{98b}$$

以及

$$|\mathbf{R}_{A1}| = \sqrt{(x_0 + \rho \cos \varphi)^2 + (y_0 + \rho \sin \varphi)^2 + (h_0 + z)^2} = r_{A1} \tag{99a}$$

和

$$|\mathbf{R}_{A2}| = \sqrt{(x_0 + \rho \cos \varphi - d)^2 + (y_0 + \rho \sin \varphi)^2 + (h_0 + z - h_2)^2} = r_{A2} \tag{99b}$$

此外，位置矢量 $\mathbf{R}_{A1,2}(\rho, \varphi, z)$ 的俯仰角 $\varepsilon_{A1,2}$ 可由下式得出

$$\varepsilon_{A1} = \tan^{-1}\left(\frac{h_0 + z}{d_{B1}}\right) \tag{100a}$$

$$\varepsilon_{A2} = \tan^{-1}\left(\frac{(h_0 - h_2) + z}{d_{B2}}\right) \tag{100b}$$

其中：

$$d_{B1} = \sqrt{x^2 + y^2} = \sqrt{d'^2_1 + \rho^2 + 2\rho d'_1 \cos(\alpha_1 - \varphi)}$$

和

$$d_{B2} = \sqrt{(x - d)^2 + y^2} = \sqrt{(d'_2)^2 + \rho^2 + 2\rho d'_2 \cos(\alpha_2 - \varphi)} \tag{101}$$

需要注意 $r_{A1} = \sqrt{(d_{B1})^2 + (h_0 + z)^2}$ ， $r_{A2} = \sqrt{(d_{B2})^2 + (h_0 - h_2 + z)^2}$ 。此外，使用公式（101）分别与公式（98a）和（98b）最右侧进行计算，得到公式（100a）和（100b）。

位置矢量 $\mathbf{R}_{A1,2}(\rho, \varphi, z)$ 的方位角 $\alpha_{A1,2}$ 为：

$$\begin{aligned}\alpha_{A1} &= \tan^{-1} \left(\frac{y_0 + \rho \sin \varphi}{x_0 + \rho \cos \varphi} \right) \\ \alpha_{A2} &= \tan^{-1} \left(\frac{y_0 + \rho \sin \varphi}{x_0 - d + \rho \cos \varphi} \right)\end{aligned}\quad (102)$$

基于公式（96），公式（74）的散射传递方程的积分可简化为：

$$C_{pq} = \int_{z_{min}}^{z_{max}} \int_0^{2\pi} \int_0^{\rho_{max}} \mathcal{F}(\rho, \varphi, z) \rho d\rho d\varphi dz \quad (103)$$

$$\mathcal{F}(\rho, \varphi, z) = \frac{G_1(\theta_{A1})G_2(\theta_{A2})\sigma_{pq}\exp(-c\mathcal{K}(A))\zeta(h)}{r_{A1}^2 r_{A2}^2} \quad (104)$$

$\mathcal{K}(A)$ 是从站1经过点A到站2的衰减

$$\mathcal{K}(A) = \mathcal{K}_{atm}(A) + \mathcal{K}_{rain}(A) \quad (105)$$

在公式（105）中， $\mathcal{K}_{atm}(A)$ 和 $\mathcal{K}_{rain}(A)$ 是从站1经过点A到站2的分别由大气气体和降雨造成的衰减。

对于公式（103）中的积分极限，站1和站2的波束宽度决定了最小和最大高度 z_{min} 和 z_{max} 。

$$z_{1max} = \sqrt{x_0^2 + y_0^2} \tan(\epsilon_1 + 0.5BW_1) - h_0 \quad (106)$$

$$z_{1min} = \sqrt{x_0^2 + y_0^2} \tan(\epsilon_1 - 0.5BW_1) - h_0 \quad (107)$$

$$z_{2max} = \sqrt{(x_0 - d)^2 + y_0^2} \tan(\epsilon_2 + 0.5BW_2) - h_0 \quad (108)$$

$$z_{2min} = \sqrt{(x_0 - d)^2 + y_0^2} \tan(\epsilon_2 - 0.5BW_2) - h_0 \quad (109)$$

$$z_{max} = \min\{\max(z_{1max}, z_{2max}), h_R\} \quad (110)$$

$$z_{min} = \min(z_{1min}, z_{2min}) \quad (111)$$

BW_1 和 BW_2 分别是站1和站2的波束宽度，以弧度值表示。对于 ρ_{max} 决定关于 $d\rho$ 的积分极限，由公式（112）给出。

$$\rho_{max} = \frac{1}{2}\{\rho_1 + \rho_2\} \quad \text{km} \quad (112)$$

$$\rho_1 = x_0 - \frac{d}{1 + \tan(\epsilon_1 + 0.5BW_1) \cot(\epsilon_2 - 0.5BW_2)} \quad \text{km} \quad (113)$$

$$\rho_2 = (d - x_0) - \frac{d}{1 + \tan(\epsilon_2 + 0.5BW_2) \cot(\epsilon_1 - 0.5BW_1)} \quad \text{km} \quad (114)$$

天线的近场强度取决于具体的硬件细节，而在进行干扰分析时可能无法获得这些细节。可以适当假设场强与远场边缘的场强是大致相等的数量级，这个近似值与实际测量的近场强度相符。

站1到积分点A的散射角 φ_s 是：

$$\varphi_s = \cos^{-1} \left(-\frac{r_{A1}}{r_{A2}} + \frac{d(x_0 + \rho \cos \varphi) + h_2(h_0 + z)}{r_{A1} r_{A2}} \right) \quad (115)$$

5.3.4 步骤4: 构建散射传递函数元素

5.3.4.1 天线增益

天线增益 G_1 和 G_2 在积分元 $A(\rho, \varphi, z)$ 可通过在表6输入参数中提供的相应增益模型中引入偏轴角 $\theta_{A1,2}$ 获得。偏轴角 θ_{A1} 是由站1延伸至积分元的单位矢量 V_{A1} 和站1主射束方向的夹角,可由下式获得:

$$\theta_{A1} = \cos^{-1} \{ \cos \varepsilon_1 \cos \varepsilon_{A1} \cos(\alpha_1 - \alpha_{A1}) + \sin \varepsilon_1 \sin \varepsilon_{A1} \} \quad (116)$$

偏轴角 θ_{A2} 是由站2延伸至积分元的单位矢量 V_{A2} 和站2主射束方向的夹角,可由下式获得:

$$\theta_{A2} = \cos^{-1} \{ \cos \varepsilon_2 \cos \varepsilon_{A2} \cos(\alpha_2 - \alpha_{A2}) + \sin \varepsilon_2 \sin \varepsilon_{A2} \} \quad (117)$$

5.3.4.2 大气衰减

由经过积分元点 $A(\rho, \varphi, z)$ 处的传播路径沿线中大气气体吸收引起的衰减 \mathcal{K}_{atm} 可通过§ 5.3.1.1提供的特定大气衰减 γ_{atm} 计算得出。

将传播距离 $r_{A1,2}$ 分为 $N_{1,2}$ 长度间隔 $\Delta h_{t1,2} / \sin \varepsilon_{A1,2}$ 可得出以下结论,间隔的定义见§ 5.3.4.3。

$$\mathcal{K}_{atm} = \sum_{t1=1}^{N_1} \frac{\gamma_{atm}(t1)\Delta h_{t1}}{\sin \varepsilon_{A1}} + \sum_{t2=1}^{N_2} \frac{\gamma_{atm}(t2)\Delta h_{t2}}{\sin \varepsilon_{A2}} \approx \sum_{t1=1}^{N_1} \frac{\gamma_{atm}(t1)r_{A1}}{N_1} + \sum_{t2=1}^{N_2} \frac{\gamma_{atm}(t2)r_{A2}}{N_2} \quad (118)$$

5.3.4.3 降雨衰减

与大气衰减相似,由经过积分元点 $A(\rho, \varphi, z)$ 处的传播路径沿线中降雨引起的衰减 \mathcal{K}_{rain} 可通过§ 5.3.1.2提供的特定降雨衰减 $\gamma_{R1,2}$ 计算得出。

将传播距离 $r_{A1,2}$ 分为 $N_{1,2}$ 长度间隔 $\Delta h_{t1,2} / \sin \varepsilon_{A1,2}$ 可得出以下结论。

$$\mathcal{K}_{rain} = \sum_{t1=1}^{N_1} \frac{\gamma_{R1}(t1)\Delta h_{t1}}{\sin \varepsilon_{A1}} + \sum_{t2=1}^{N_2} \frac{\gamma_{R2}(t2)\Delta h_{t2}}{\sin \varepsilon_{A2}} \quad (119)$$

首先,用参数 t 以间隔 $(0, 1)$ 参数化从点 $(0, 0, 0)$ 到积分点A的传播路径,如下所示:

$$s(t) = \mathbf{R}_{A1}t + (0,0,0) = \begin{bmatrix} x_0 + \rho \cos \varphi \\ y_0 + \rho \sin \varphi \\ h_0 + z \end{bmatrix} t \quad (120)$$

$$|\mathbf{R}_{A1}| = \sqrt{x^2 + y^2 + z^2} = \sqrt{(x_0 + \rho \cos \varphi)^2 + (y_0 + \rho \sin \varphi)^2 + (h_0 + z)^2} \quad (121)$$

所以对于 N_1 积分点因子 $\frac{\Delta h_{t1}}{\sin \varepsilon_{A1}} = \frac{r_{A1}}{N_1}$ 。

其次,用参数 t 以间隔 $(0, 1)$ 参数化从点 $(d, d \sin \alpha_1, h_{2_loc})$ 到积分点A的传播路径,如下所示:

$$s(t) = \mathbf{R}_{A2}t + \begin{bmatrix} d \\ d \sin \alpha_1 \\ h_{2_loc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_0 + \rho \cos \varphi - d \\ y_0 + \rho \sin \varphi + d \sin \alpha_1 \\ h_0 + z - h_2 \end{bmatrix} t + \begin{bmatrix} d \\ d \sin \alpha_1 \\ h_2 \end{bmatrix} \quad (122)$$

所以对于 N_2 积分点因子 $\frac{\Delta h_{t2}}{\sin \varepsilon_{A1}} = \frac{r_{A2}}{N_2}$ 。

5.3.4.4 公共坐标中双稳态截面

在积分元 $A(\rho, \varphi, z)$ ，公式(91)中的雨滴本地双稳态截面 η_1 可用于建立公共坐标中的双稳态截面 σ_{pq} 's。

$$\sigma_{vv} = \eta_1 \{ \cos \varphi_s \cos \alpha_{vs} \cos \alpha_{vi} + \sin \alpha_{vs} \sin \alpha_{vi} \}^2 \quad (123a)$$

$$\sigma_{vh} = \eta_1 \{ \cos \varphi_s \cos \alpha_{vs} \sin \alpha_{vi} - \sin \alpha_{vs} \cos \alpha_{vi} \}^2 \quad (123b)$$

$$\sigma_{hv} = \eta_1 \{ \cos \varphi_s \sin \alpha_{vs} \cos \alpha_{vi} - \cos \alpha_{vs} \sin \alpha_{vi} \}^2 \quad (123c)$$

$$\sigma_{hh} = \eta_1 \{ \cos \varphi_s \sin \alpha_{vs} \sin \alpha_{vi} + \cos \alpha_{vs} \cos \alpha_{vi} \}^2 \quad (123d)$$

角 α_{vi} 和 α_{vs} 是从入射 \hat{v}_i 和散射 \hat{v}_s 垂直极化逆时针旋转至垂直于§ 5.3.3散射平面极化方向的角度。雨滴的散射面是由入射方向和散射方向形成的平面。

下式可计算 α_{vi} ：

$$\alpha_{vi} = \tan^{-1} \left\{ \frac{(h_0+z)((x_0+\rho \cos \varphi)(x_0-d+\rho \cos \varphi) + (y_0+\rho \sin \varphi)^2) - d_{B1}^2(h_0-h_2+z)}{r_{A1}d(y_0+\rho \sin \varphi)} \right\} \quad (124)$$

旋转角 α_{vs} 是

$$\alpha_{vs} = \cos^{-1} \{ -\sin \alpha_{vi} (\hat{h}_{A1} \cdot \hat{v}_{A2}) + \cos \alpha_{vi} (\hat{v}_{A1} \cdot \hat{v}_{A2}) \} \quad (125)$$

和

$$(\hat{h}_{A1} \cdot \hat{v}_{A2}) = \frac{\{(h_0-h_2)+z\}(y_0+\rho \sin \varphi)}{d_{B1}d_{B2}r_{A2}} d \quad (126)$$

$$(\hat{h}_{A1} \cdot \hat{v}_{A2}) = \frac{1}{d_{B1}\sqrt{1+(h_0+z-h_2)^2}} \left(-(y_0 + \rho \sin \varphi) + \frac{(x_0+\rho \cos \varphi)}{d_{B2}(h_0+z-h_2)} \right) \quad (127)$$

和

$$(\hat{v}_{A1} \cdot \hat{v}_{A2}) = \frac{d_{B1}^2 r_{A2}^2 + \{(h_0-h_2)+z\} \{h_2 d_{B1}^2 - (h_0+z)(x_0+\rho \cos \varphi)d\}}{r_{A1}d_{B1}r_{A2}d_{B2}} \quad (128)$$

$$(\hat{v}_{A1} \cdot \hat{v}_{A2}) = \frac{1}{1+(h_0+z-h_2)^2} \left(1 + \frac{1}{d_{B1}^2(h_0+z-h_1)^2} + \frac{d_{B2}^2 r_2^2}{(h_0+z-h_2)^2} \right) \quad (129)$$

5.3.5 步骤5：散射传递函数的积分

公式(103)的散射传递函数的积分可通过使用任何合适的数值积分方法进行，例如下面应用的高斯-勒让德正交数值积分法。

5.3.5.1 高斯-勒让德正交数值积分法

在使用高斯-勒让德正交数值积分法时，应对变量进行下列改变：

$$\begin{aligned} \rho &= \frac{\rho_{max}}{2} (\chi + 1) \\ \varphi &= \pi(\eta + 1) \\ z &= \frac{(z_{max}-z_{min})}{2} \varsigma + \frac{(z_{max}+z_{min})}{2} \end{aligned} \quad (131)$$

其中 $-1 \leq \chi, \eta, \varsigma \leq 1$ 。

在公式 (103-104) 中引入公式 (131) 并使用高斯-勒让德正交数值积分法得出:

$$C_{pq} = \sum_{n=1}^{M_3} \mathcal{H}_n \quad (132)$$

$$\mathcal{H}_n = \frac{\pi(z_{max}-z_{min})d_c^2}{4} w_n \sum_{i=1}^{M_1} w_i \sum_{j=1}^{M_2} w_j \mathcal{F}_{ijn}(\chi_i, \eta_j, \varsigma_n) \quad (133)$$

注: $\mathcal{F}_{ijn}(\chi_i, \eta_j, \varsigma_n) \rightarrow \mathcal{F}(\rho, \varphi, z)$ 通过公式 (104)。

M_1 , M_2 和 M_3 是积分点的总数量。此外, χ_i ($i = 1, \dots, M_1$), η_j ($j = 1, \dots, M_2$), 和 ς_n ($n = 1, \dots, M_3$) 是高斯正交节点; w_i , w_j 和 w_n 是源自 ITU-R P.1144 建议书的相应权重。

使用公式 (131) 至 (133) 的积分过程如下:

- 1) 确定高斯正交节点 χ_i ($i = 1, \dots, M_1$) 和 η_j ($j = 1, \dots, M_2$); 以及依据 §5.3.7 获得相应权重 w_i 和 w_j 。
- 2) 在公式 (131) 中引入高斯正交点以在体积积分中计算半径 ρ_i 's、方位角 φ_j 's 和高度 z_n 's。
- 3) 从雨区 ($n = 1$) 内的下部开始计算, 正交节点为 ς_1 , 权重为 w_1 。
- 4) 使用得到的半径、方位角和高度 (ρ_i, φ_j, z_1) 计算公式 (97) 至 (102) 中参数数值。
- 5) 对于每一个点, 使用上面数值确定偏轴角 (公式 (116) 和 (117)), 从而得出每个天线增益、双稳态截面、公式 (123a) 至 (123d)、大气衰减 (公式 (118)) 和降雨衰减 (公式 (119))。
- 6) 使用过程 5) 的结果计算公式 (104) 中给出的相应函数 $\mathcal{F}_{ij1}(\chi_i, \eta_j, \varsigma_1)$ 。
- 7) 将每一个 $\mathcal{F}_{ij1}(\chi_i, \eta_j, \varsigma_1)$ 乘相应高斯权重 (w_i, w_j , and w_1)。
- 8) 对所有 $\mathcal{F}_{ij1}(\chi_i, \eta_j, \varsigma_1)$ 求和, 用结果乘 $\frac{\pi(z_{max}-z_{min})d_c^2}{4}$ 得到公式 (133) 中的 \mathcal{H}_1 , 此时 $n = 1$ 。
- 9) 重复过程 1 至过程 8, n 值依次递增 1 ($n = 1, \dots, M_3$), 得到公式 (133) 中的所有 \mathcal{H}_n ($n = 1, \dots, M_3$) 值。
- 10) 对所有 \mathcal{H}_n ($n = 1, \dots, M_3$) 求和, 用结果除以 $(r_1 r_2')^2$, 得到公式 (132) 中的散射传递函数值 C_{pq} 。

5.3.6 第 5.3.1.2 节表格

表 6

公式 (86) 中系数 c_i^m ($i = 0, 1, 2$) 取值

m	c_0^m	c_1^m	c_2^m
0	0.86481	0.0025984	-3.2727e-05
1	-0.32507	-0.025593	0.00040852
2	0.70075	0.041632	-0.00084479
3	-0.4162	-0.023144	0.00063446
4	0.11971	0.0054147	-0.00022071
5	-0.018495	-0.00049312	3.6339e-05
6	0.0012143	8.1571e-06	-2.2949e-06

表7

公式(87)中系数 $d_i^m (i = 0, 1, 2)$ 取值

m	d_0	d_1	d_2
0	-9.2859	-0.026677	7.4162e-05
1	1.5977	-0.021172	0.001127
2	0.45627	-0.0010862	-0.0014558
3	-0.15347	0.016763	0.00066036
4	0.040141	-0.0062665	-0.00012758
5	-0.0049951	0.00064387	8.9007e-06

5.3.7 第5.3.2节表格

表8

当公式(92)为 a_0^0 和 u_0 的关系式,
 计算公式(94) $b_{0,m}^0$ 所需的系数 $c_0^{0,0,m}$, $c_1^{0,0,m}$ 和 $c_2^{0,0,m}$ 取值

m	c_0	c_1	c_2
0	-23.033	-0.019039	-1.3511e-07
1	1.0988	0.0057909	-1.8732e-05
2	-0.053826	-0.00051258	2.8893e-06
3	0.0017167	2.0326e-05	-1.5242e-07
4	-3.3231e-05	-4.2625e-07	3.8089e-09
5	3.7396e-07	4.9297e-09	-4.969e-11
6	-2.2438e-09	-2.9763e-11	3.2787e-13
7	5.5409e-12	7.3317e-14	-8.6497e-16

表9

当公式(92)为 a_1^0 和 u_0 关系式,
 计算公式(94) $b_{1,m}^0$ 所需的系数 $c_0^{0,1,m}$, $c_1^{0,1,m}$ 和 $c_2^{0,1,m}$ 取值

m	$c_0^{0,1,m}$	$c_1^{0,1,m}$	$c_2^{0,1,m}$
0	1.758	0.0078061	-0.00019642
1	-0.034774	-0.0010409	4.8582e-05
2	0.0031934	1.2441e-05	-3.9051e-06
3	-0.00014758	1.6661e-06	1.5195e-07
4	3.3014e-06	-7.0142e-08	-3.2085e-09
5	-3.8772e-08	1.1439e-09	3.7652e-11
6	2.3188e-10	-8.5799e-12	-2.3101e-13
7	-5.5887e-13	2.4612e-14	5.779e-16

表10

当公式(92)为 a_2^0 和 u_0 关系式,
计算公式(94) $b_{2,m}^0$ 所需的系数 $c_0^{0,2,m}$, $c_1^{0,2,m}$ 和 $c_2^{0,2,m}$ 取值

m	$c_0^{0,2,m}$	$c_1^{0,2,m}$	$c_2^{0,2,m}$
0	-0.051224	0.00081531	1.1534e-05
1	0.0011587	-0.00031961	-2.3173e-06
2	-8.8754e-05	3.5484e-05	1.4933e-07
3	9.6328e-07	-1.6609e-06	-4.7112e-09
4	5.927e-08	3.9523e-08	8.0972e-11
5	-1.6618e-09	-5.0408e-10	-7.7464e-13
6	1.5626e-11	3.2862e-12	3.8749e-15
7	-5.0972e-14	-8.6057e-15	-7.8859e-18

表11

当公式(92)为 a_0^1 和 u_1 关系式,
计算公式(94) $b_{0,m}^1$ 所需的系数 $c_0^{1,0,m}$, $c_1^{1,0,m}$ 和 $c_2^{1,0,m}$ 取值

m	$c_0^{1,0,m}$	$c_1^{1,0,m}$	$c_2^{1,0,m}$
0	0.28927	0.037271	-0.00010078
1	-0.11742	-0.011059	6.6665e-05
2	0.010231	0.00093297	-8.6068e-06
3	-0.00041831	-3.5477e-05	4.2065e-07
4	8.8529e-06	7.2358e-07	-1.0192e-08
5	-1.0313e-07	-8.2014e-09	1.3111e-10
6	6.2591e-10	4.8736e-11	-8.5865e-13
7	-1.5469e-12	-1.1849e-13	2.2546e-15

表12

当公式(92)为 a_1^1 和 u_1 关系式,
计算公式(94) $b_{1,m}^1$ 所需的系数 $c_0^{1,1,m}$, $c_1^{1,1,m}$ 和 $c_2^{1,1,m}$ 取值

m	$c_0^{1,1,m}$	$c_1^{1,1,m}$	$c_2^{1,1,m}$
0	-0.2317	-0.005093	0.00045796
1	0.020016	-0.00076558	-0.00011298
2	0.00060157	0.00020785	9.1237e-06
3	-9.7303e-05	-1.2384e-05	-3.5392e-07
4	3.2711e-06	3.3064e-07	7.4324e-09
5	-5.0187e-08	-4.5084e-09	-8.6694e-11
6	3.6714e-10	3.0694e-11	5.2868e-13
7	-1.0386e-12	-8.2853e-14	-1.3148e-15

表13

当公式 (92) 为 a_2^1 和 u_1 关系式,
计算公式 (94) $b_{2,m}^1$ 所需的系数 $c_0^{1,2,m}$, $c_1^{1,2,m}$ 和 $c_2^{1,2,m}$ 取值

m	$c_0^{1,2,m}$	$c_1^{1,2,m}$	$c_2^{1,2,m}$
0	-0.036841	-0.0025519	-2.6162e-05
1	0.012953	0.00084793	5.2688e-06
2	-0.001305	-8.5265e-05	-3.3134e-07
3	5.9518e-05	3.7912e-06	9.6604e-09
4	-1.454e-06	-8.7204e-08	-1.4711e-10
5	1.91e-08	1.085e-09	1.1752e-12
6	-1.2719e-10	-6.9419e-12	-4.3973e-15
7	3.3748e-13	1.7914e-14	5.0804e-18

表14

当公式 (92) 为 a_0^2 和 u_2 关系式,
计算公式 (94) $b_{0,m}^2$ 所需的系数 $c_0^{2,0,m}$, $c_1^{2,0,m}$ 和 $c_2^{2,0,m}$ 取值

m	$c_0^{2,0,m}$	$c_1^{2,0,m}$	$c_2^{2,0,m}$
0	-0.0022144	-0.0014792	0.00030493
1	-0.008123	-0.00055742	-8.8598e-05
2	0.0018507	0.00015755	8.3245e-06
3	-8.484e-05	-8.944e-06	-3.572e-07
4	1.9127e-06	2.323e-07	7.9876e-09
5	-2.2827e-08	-3.1221e-09	-9.6893e-11
6	1.4148e-10	2.1074e-11	6.0585e-13
7	-3.5797e-13	-5.6545e-14	-1.5317e-15

表15

当公式 (92) 为 a_1^2 和 u_2 关系式,
计算公式 (94) $b_{1,m}^2$ 所需的系数 $c_0^{2,1,m}$, $c_1^{2,1,m}$ 和 $c_2^{2,1,m}$ 取值

m	$c_0^{2,1,m}$	$c_1^{2,1,m}$	$c_2^{2,1,m}$
0	-0.048207	-0.019603	3.8001e-06
1	-0.00041118	0.0045669	-1.0444e-05
2	0.0016887	-0.00031651	1.7242e-06
3	-0.00011195	1.0267e-05	-1.0534e-07
4	3.0478e-06	-1.776e-07	2.9975e-09
5	-4.1397e-08	1.6755e-09	-4.3294e-11
6	2.8014e-10	-8.0718e-12	3.0902e-13
7	-7.5246e-13	1.5353e-14	-8.6683e-16

表16

当公式 (92) 为 a_2^2 和 u_2 关系式,
计算公式 (94) $b_{2,m}^2$ 所需的系数 $c_0^{2,2,m}$, $c_1^{2,2,m}$ 和 $c_2^{2,2,m}$ 取值

m	$c_0^{2,2,m}$	$c_1^{2,2,m}$	$c_2^{2,2,m}$
0	-0.1208	-0.0018073	-7.7431e-05
1	0.039712	0.00099445	2.2037e-05
2	-0.0039312	-0.00012817	-2.1388e-06
3	0.00017579	6.5734e-06	9.7426e-08
4	-4.0495e-06	-1.669e-07	-2.3253e-09
5	5.0716e-08	2.2341e-09	3.0006e-11
6	-3.2704e-10	-1.512e-11	-1.9832e-13
7	8.496e-13	4.0796e-14	5.2636e-16

表17

当公式 (92) 为 a_3^2 和 u_2 关系式,
计算公式 (94) $b_{3,m}^2$ 所需的系数 $c_0^{2,3,m}$, $c_1^{2,3,m}$ 和 $c_2^{2,3,m}$ 取值

m	$c_0^{2,3,m}$	$c_1^{2,3,m}$	$c_2^{2,3,m}$
0	0.02176	0.0005804	9.4104e-06
1	-0.0067089	-0.00020457	-2.5829e-06
2	0.0006556	2.156e-05	2.4395e-07
3	-2.966e-05	-9.9711e-07	-1.0876e-08
4	6.9633e-07	2.3723e-08	2.5604e-10
5	-8.7919e-09	-3.0371e-10	-3.2742e-12
6	5.6633e-11	1.9905e-12	2.15e-14
7	-1.462e-13	-5.2428e-15	-5.6776e-17

表18

当公式 (92) 为 a_0^3 和 u_3 关系式,
计算公式 (94) $b_{0,m}^3$ 所需的系数 $c_0^{3,0,m}$, $c_1^{3,0,m}$ 和 $c_2^{3,0,m}$ 取值

m	$c_0^{3,0,m}$	$c_1^{3,0,m}$	$c_2^{3,0,m}$
0	-0.046298	-0.0057663	-0.00018642
1	0.01272	0.0017156	4.8813e-05
2	-0.0010278	-0.0001572	-4.0434e-06
3	3.4667e-05	6.2343e-06	1.5655e-07
4	-6.1228e-07	-1.3209e-07	-3.2237e-09
5	5.8573e-09	1.5529e-09	3.65e-11
6	-2.9595e-11	-9.5349e-12	-2.1505e-13
7	6.2019e-14	2.3843e-14	5.1597e-16

表19

当公式 (92) 为 a_1^3 和 u_3 关系式,
计算公式 (94) $b_{1,m}^3$ 所需的系数 $c_0^{3,1,m}$, $c_1^{3,1,m}$ 和 $c_2^{3,1,m}$ 取值

m	$c_0^{3,1,m}$	$c_1^{3,1,m}$	$c_2^{3,1,m}$
0	-0.15558	-0.0042536	-9.7633e-05
1	0.047606	0.0017754	3.2832e-05
2	-0.0046542	-0.00020881	-3.4242e-06
3	0.00020312	1.0088e-05	1.6314e-07
4	-4.6089e-06	-2.4592e-07	-4.0092e-09
5	5.6717e-08	3.2014e-09	5.2747e-11
6	-3.5983e-10	-2.1241e-11	-3.5329e-13
7	9.2209e-13	5.6467e-14	9.4664e-16

表20

当公式 (92) 为 a_2^3 和 u_3 关系式,
计算公式 (94) $b_{2,m}^3$ 所需的系数 $c_0^{3,2,m}$, $c_1^{3,2,m}$ 和 $c_2^{3,2,m}$ 取值

m	$c_0^{3,2,m}$	$c_1^{3,2,m}$	$c_2^{3,2,m}$
0	0.11087	0.0061252	5.7319e-05
1	-0.029622	-0.0017355	-1.5993e-05
2	0.0025942	0.00016036	1.5228e-06
3	-0.00010795	-6.8539e-06	-6.7714e-08
4	2.3816e-06	1.5498e-07	1.5828e-09
5	-2.8856e-08	-1.9149e-09	-2.0088e-11
6	1.8081e-10	1.2223e-11	1.3102e-13
7	-4.5761e-13	-3.1539e-14	-3.4402e-16

表21

当公式 (92) 为 a_3^3 和 u_3 关系式,
计算公式 (94) $b_{3,m}^3$ 所需的系数 $c_0^{3,3,m}$, $c_1^{3,3,m}$ 和 $c_2^{3,3,m}$ 取值

m	$c_0^{3,3,m}$	$c_1^{3,3,m}$	$c_2^{3,3,m}$
0	-0.015838	-0.00071563	-6.1847e-06
1	0.0042926	0.00019142	1.6456e-06
2	-0.00039171	-1.6809e-05	-1.5321e-07
3	1.6946e-05	6.9046e-07	6.7237e-09
4	-3.8371e-07	-1.5112e-08	-1.5611e-10
5	4.6824e-09	1.8183e-10	1.9738e-12
6	-2.9185e-11	-1.1361e-12	-1.2841e-14
7	7.3004e-14	2.8813e-15	3.3644e-17

附件1的 后附资料1

晴空预测程序所需要的无线电气象数据

1 引言

晴空预测程序依靠无线电气象数据提供预测用的基本的位置的可变性。这些数据以本后附资料所包含的地图的形式提供。

2 无线电折射率数据和表面折射的垂直变化图

对于全球的程序，对连续（长期）干扰机制，用年 ΔN 平均值（大气的第1公里上的折射指数递减率）来表征该路径的晴空无线电气象；而对异常（短期）机制，由低层大气的折射梯度低于 -100 N单位/km的时间百分比 $\beta_0\%$ 来表征该路径的晴空无线电气象。这些参数提供了一合理的基础，依据这一基础，建立附件1的§2中所描述的晴空传播机制的模型。平均海平面折射率 N_0 被用于对流层散射模型的计算。

如果无法获得本地测量结果，这些量可从随本建议书的补充文件[R-REC-P.452-18-202310-I!!ZIP-E.zip](#)的综合数字产品地图中获得。这些数字地图是基于长达十年（1983-1992年）的全球无线电探空仪升空数据集的分析制作的，分别包括在DN50.txt和N050.txt文件中。这些数据的经度范围为 0° 至 360° ，纬度范围为 $+90^\circ$ 至 -90° ，经纬度的分辨率均为 1.5° 。这些数据需结合LAT.txt和LON.txt附带数据文件使用，这两种文件分别包括DN50.txt和N050.txt文件对应条目（网格点）的纬度和经度。对于不同于网格点的位置，可根据ITU-R P.1144建议书所述，对4个最近网格点的数值进行双线性内插得出预定位置的参数。

附件1的 后附资料2

路径剖面分析

1 引言

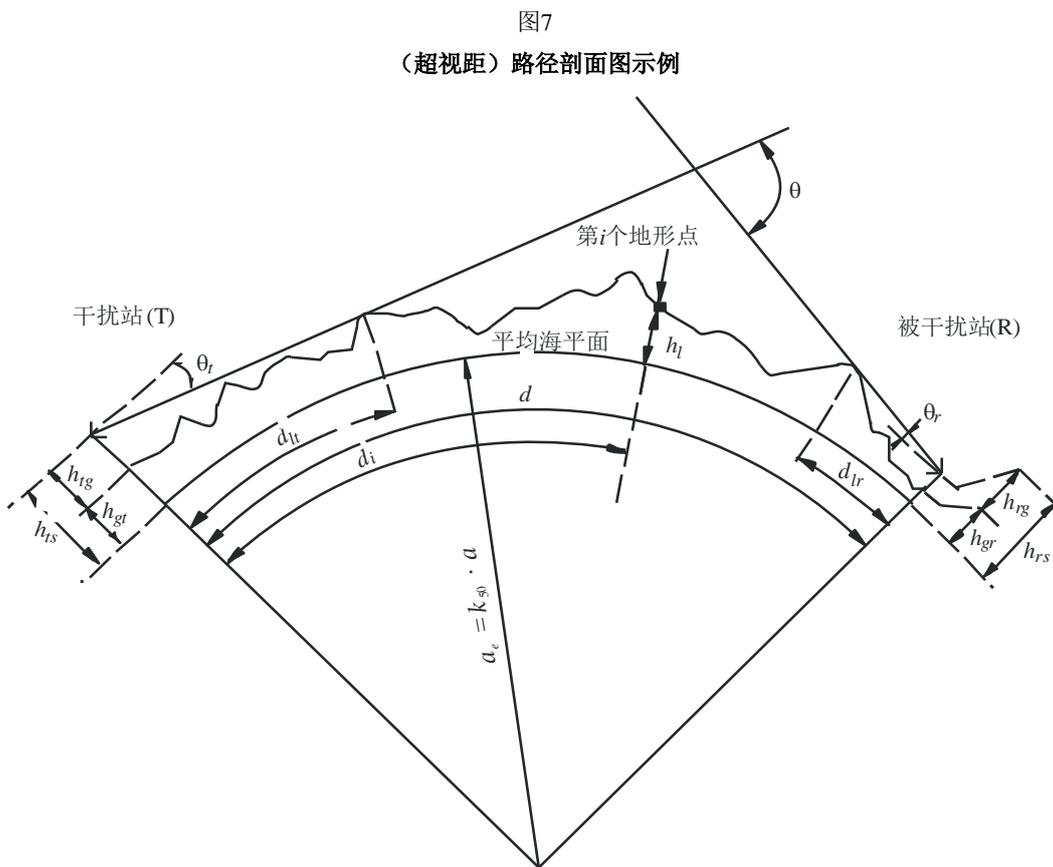
为了进行路径剖面分析，需要有地形平均海拔高度的路径剖面图。表22给出了必须由路径剖面分析得到的参数，以供建立传播模型用。

2 路径剖面图的制作

根据干扰站(φ_t, ψ_t)和被干扰站(φ_r, ψ_r)的地理坐标, 应该从地形数据库或从适当的大比例等高线地图来得到大圆路径上的地形高度(平均海拔高度)。剖面点之间的距离应尽实际可能抓住地形的显著特点。通常30 m到1 km之间的距离增量是适当的。总的来说, 对更长的路径采用更长的距离增量是适当的。剖面图应该包含作为起点和终点的干扰站和被干扰站位置上的地面高度。根据公式(6a)求出的 a_e 值, 必要时应该在下列公式中纳入地球曲率。

虽然推荐使用等间距的剖面点, 但也可以用非等间距剖面点。当利用地形等高线的数字地图制作剖面图时, 可以使用非等间距剖面点。但是, 应该指出, 本建议书是用等间距剖面点测试开发出来的, 无法获得非等间距点对准确度影响的具体信息。

为使用本建议书, 将干扰源在路径剖面上的点视为零点, 而被干扰站的点视为 n 点。所以, 路径剖面图由 $n + 1$ 个点组成。图7给出了地形平均海拔高度的路径剖面图示例, 图中示出了与实际地形有关的多个参数。



P.0452-07

图7注—所画出的 θ_r 值为负值。

表22定义了路径剖面分析时所使用的或所得出的参数。

表22
路径剖面的参数定义

参数	描述
a	实体地球的平均半径 (6371km)
a_e	有效地球半径 (km)
d	大圆路径距离 (km)
d_i	第 <i>i</i> 个地形点离干扰源的大圆距离 (km)
d_{ii}	常规路径剖面数据的距离增量 (km)
f	频率 (GHz)
λ	波长 (m)
h_{ts}	干扰源天线的平均海拔 (amsl) 高度 (m)
h_{rs}	被干扰天线的平均海拔 (amsl) 高度 (m)
θ_t	对于超视距路径, 从干扰天线起测量的本地地平线以上的水平仰角 (mrad)。对于视距路径, 该参数应为指向被干扰天线的仰角
θ_r	对于超视距路径, 从被干扰天线测量的本地地平线以上的水平仰角 (mrad)。对于视距路径, 该参数应为指向干扰天线的仰角
θ	路径的角距 (mrad)
h_{st}	干扰站处的光滑地球表面的平均海拔高度 (m)
h_{sr}	被干扰站处的光滑地球表面的平均海拔高度 (m)
h_i	第 <i>i</i> 个地形点的平均海拔高度 (m) h_0 : 干扰站的地面高度 h_n : 被干扰站的地面高度
h_m	地形粗糙度 (m)
h_{te}	干扰天线的有效高度 (m)
h_{re}	被干扰天线的有效高度 (m)

3 路径长度

可以从干扰站的地理坐标(φ_t, ψ_t)和被干扰站的地理坐标(φ_r, ψ_r)得出的大圆几何关系 (基于实体地球的平均半径 a) 计算路径长度。或者, 路径长度也可从路径剖面得出。一般情况下, 路径长度 d (km) 可以由下式根据路径剖面图数据求出来:

$$d = \sum_{i=1}^n (d_i - d_{i-1}) \quad \text{km} \quad (134)$$

然而, 对于间距规律的剖面图数据, 这个公式可以简化成下式:

$$d = n \cdot d_{ii} \quad \text{km} \quad (135)$$

其中 d_{ii} 是路径距离的增量（km）。

4 路径分类

只有在确定距离 d_{tr} 和 d_{tr} 及仰角 θ_t 和 θ_r 时，才必须将路径分为视距或超视距两类，见下文。

必须根据公式（6a）给出的有效地球半径中值 a_e ，用路径剖面图确定该路径是视距的还是超视距的。

若从干扰天线看的水平仰角（相对于本地地平线）大于被干扰天线所对的角（仍相对于干扰天线本地地平线），则这一路径是超视距路径。

所以，超视距路径条件的识别方法是：

$$\theta_{max} > \theta_{td} \quad \text{mrad} \quad (136)$$

其中：

$$\theta_{max} = \max_{i=1}^{n-1} (\theta_i) \quad \text{mrad} \quad (137)$$

θ_i ： 到第 i 个地形点的仰角

$$\theta_i = 1000 \arctan \left(\frac{h_i - h_{ts}}{10^3 d_i} - \frac{d_i}{2 a_e} \right) \quad \text{mrad} \quad (138)$$

其中：

h_i ： 第 i 个地形点的平均海拔高度（m）

h_{ts} ： 干扰天线的平均海拔高度（m）

d_i ： 从干扰源到第 i 个地形部分的距离（km）

$$\theta_{td} = 1000 \arctan \left(\frac{h_{rs} - h_{ts}}{10^3 d} - \frac{d}{2 a_e} \right) \quad \text{mrad} \quad (139)$$

其中：

h_{rs} ： 被干扰天线的平均海拔高度（m）

d ： 大圆路径的总距离（km）

a_e ： 适合于该路径的有效地球半径中值（公式（6a））。

5 从路径剖面图导出各参数

5.1 超视距路径和视距路径

从路径剖面图导出的各参数是表22中列出的参数。

5.1.1 干扰天线水平仰角 θ_t

干扰天线的水平仰角是将 $n-1$ 地形剖面高度代入公式(137)时的天线最大水平仰角。

$$\theta_t = \max(\theta_{max}, \theta_{td}) \quad \text{mrad} \quad (140)$$

其中 θ_{max} 根据公式(137)求出。因此,对于视距路径,干扰天线的水平仰角视为线到被干扰天线的仰角。

5.1.2 干扰天线的水平距离 d_{lt}

水平距离是指根据公式(137)计算天线最大水平仰角的点离发射机的最短距离:

$$d_{lt} = d_i \quad \text{km} \quad \text{对于最大}(\theta_i) \quad (141)$$

对于视距路径, i 应为给出最大衍射参数 v 的值。

$$v_{\max} = \max \left\{ \left[h_i + 500 C_e d_i (d - d_i) - \frac{h_{ts}(d - d_i) + h_{rs} d_i}{d} \right] \sqrt{\frac{0.002 d}{\lambda d_i (d - d_i)}} \right\} \quad (141a)$$

其中剖面指数 i 取值从1到 $n-1$, C_e 为附件1§4.2.1定义的有效地球曲率。

5.1.3 被干扰天线水平仰角 θ_r

接收天线水平仰角是指将 $n-1$ 地形剖面高度代入公式(137)时得到的天线最大水平仰角。

对于视距路径, θ_r 由下式给出:

$$\theta_r = 1000 \arctan \left(\frac{h_{ts} - h_{rs}}{10^3 d} - \frac{d}{2a_e} \right) \quad \text{mrad} \quad (142a)$$

否则, θ_r 由下式给出:

$$\theta_r = \max_{j=1}^{n-1} (\theta_j) \quad \text{mrad} \quad (142b)$$

$$\theta_j = 1000 \arctan \left(\frac{h_j - h_{rs}}{10^3 (d - d_j)} - \frac{(d - d_j)}{2a_e} \right) \quad \text{mrad} \quad (143)$$

5.1.4 被干扰天线的水平距离 d_{lr}

水平距离是指根据公式(142b)计算天线最大水平仰角的点离接收机的最短距离。

$$d_{lr} = d - d_j \quad \text{km} \quad \text{对于最大}(\theta_j) \quad (144)$$

对于视距路径, d_{lr} 由下式给出:

$$d_{lr} = d - d_{lt} \quad \text{km} \quad (144a)$$

5.1.5 角距 θ (mrad)

$$\theta = \frac{10^3 d}{a_e} + \theta_t + \theta_r \quad \text{mrad} \quad (145)$$

5.1.6 “光滑地球”模型和有效天线高度

5.1.6.1 概述

“光滑地球”表面来自于剖面，以计算有效天线高度，用于衍射模型以及大气波导/层反射模型所要求路径粗糙度的评估。对于这两个目的，有效天线高度的定义是不同的。

§ 5.1.6.2分别描述了未修正的发射机和接收机的光滑地球表面高度 h_{st} 和 h_{sr} 的推导。

随后，§5.1.6.3分别描述了衍射模型的发射机和接收机的修正光滑地球表面高度 h_{std} 和 h_{srd} 的推导，在附件1的§ 4.2.3中这两个参数用于计算衍射模型的有效天线高度。

§ 5.1.6.4描述了如何计算大气波导模型的有效高度 h_{te} 和 h_{re} ，以及地形粗糙度参数 h_m 。

5.1.6.2 光滑地球表面推导

对具有以下形式的地形平均海拔高度进行直线拟合：

$$h_{si} = [(d - d_i)h_{st} + d_i h_{sr}] / d \quad \text{m} \quad (146)$$

其中：

h_{si} ：离干扰源距离 d_i (km) 处最小二乘拟合表面的平均海拔高度 (m)

h_{st} ：在路径起点即干扰站处光滑地球表面的平均海拔高度 (m)

h_{sr} ：在路径终点即接收站处光滑地球表面的平均海拔高度 (m)

利用公式(147)-(150)以以下方式评估 h_{st} 和 h_{sr} ：

$$v_1 = \sum_{i=1}^n (d_i - d_{i-1})(h_i + h_{i-1}) \quad (147)$$

其中：

h_i ：第 i 个地形点的实际平均海拔高度 (m)

d_i ：干扰源至第 i 个地形部分之间的距离 (km)

$$v_2 = \sum_{i=1}^n (d_i - d_{i-1}) [h_i(2d_i + d_{i-1}) + h_{i-1}(d_i + 2d_{i-1})] \quad (148)$$

然后用下式求出干扰站的光滑地球表面高度 h_{st} ：

$$h_{st} = \left(\frac{2v_1 d - v_2}{d^2} \right) \quad \text{m} \quad (149)$$

和用下式求出被干扰站的光滑地球表面高度 h_{sr} ：

$$h_{sr} = \left(\frac{v_2 - v_1 d}{d^2} \right) \text{m} \quad (150)$$

5.1.6.3 衍射模型的光滑地球表面高度

基于平面地球几何学说，查找从发射机到接收机直线路径上的最高障碍物高度 h_{obs} ，和水平仰角 α_{obt} 、 α_{obr} ，根据：

$$h_{obs} = \max_{i=1}^{n-1} \{H_i\} \quad \text{m} \quad (151a)$$

$$\alpha_{obt} = \max_{i=1}^{n-1} \{H_i / d_i\} \quad \text{mrad} \quad (151b)$$

$$\alpha_{obr} = \max_{i=1}^{n-1} \{H_i / (d - d_i)\} \quad \text{mrad} \quad (151c)$$

其中:

$$H_i = h_i - [h_{ts}(d - d_i) + h_{rs}d_i] / d \quad \text{m} \quad (151d)$$

计算在路径两端的发射机和接收机的光滑表面高度的临时值:

如果 h_{obs} 小于或等于0, 则:

$$h_{stp} = h_{st} \quad (\text{m}) \text{ amsl} \quad (152a)$$

$$h_{srp} = h_{sr} \quad (\text{m}) \text{ amsl} \quad (152b)$$

否则:

$$h_{stp} = h_{st} - h_{obs}g_t \quad (\text{m}) \text{ amsl} \quad (152c)$$

$$h_{srp} = h_{sr} - h_{obs}g_r \quad (\text{m}) \text{ amsl} \quad (152d)$$

其中:

$$g_t = \alpha_{obt} / (\alpha_{obt} + \alpha_{obr}) \quad (152e)$$

$$g_r = \alpha_{obr} / (\alpha_{obt} + \alpha_{obr}) \quad (152f)$$

根据衍射模型要求, 计算在路径两端的发射机和接收机的光滑表面高度的最终值:

如果 h_{stp} 大于 h_0 , 则:

$$h_{std} = h_0 \quad (\text{m}) \text{ amsl} \quad (153a)$$

否则:

$$h_{std} = h_{stp} \quad (\text{m}) \text{ amsl} \quad (153b)$$

如果 h_{srp} 大于 h_n , 则:

$$h_{srd} = h_n \quad (\text{m}) \text{ amsl} \quad (153c)$$

否则:

$$h_{srd} = h_{srp} \quad (\text{m}) \text{ amsl} \quad (153d)$$

5.1.6.4 大气波导/层反射模型的参数

根据粗糙度因子需要, 计算发射机和接收机的光滑地球高度:

$$h_{st} = \min(h_{st}, h_0) \quad \text{m} \quad (154a)$$

$$h_{sr} = \min(h_{sr}, h_n) \quad \text{m} \quad (154b)$$

如果 h_{st} 和/或 h_{sr} 根据公式(154a)或(154b)进行了修正,则光滑地球表面的斜率 m 也必须修正:

$$m = \frac{h_{sr} - h_{st}}{d} \quad \text{m/km} \quad (155)$$

大气波导/层反射模型的末端有效高度 h_{te} 和 h_{re} 由下式给出:

$$\begin{aligned} h_{te} &= h_{tg} + h_0 - h_{st} & \text{m} \\ h_{re} &= h_{rg} + h_n - h_{sr} & \text{m} \end{aligned} \quad (156)$$

地形粗糙度参数 h_m (m) 为地平线点之间(包括地平线点)路径区域中光滑地球表面上的最大地形高度:

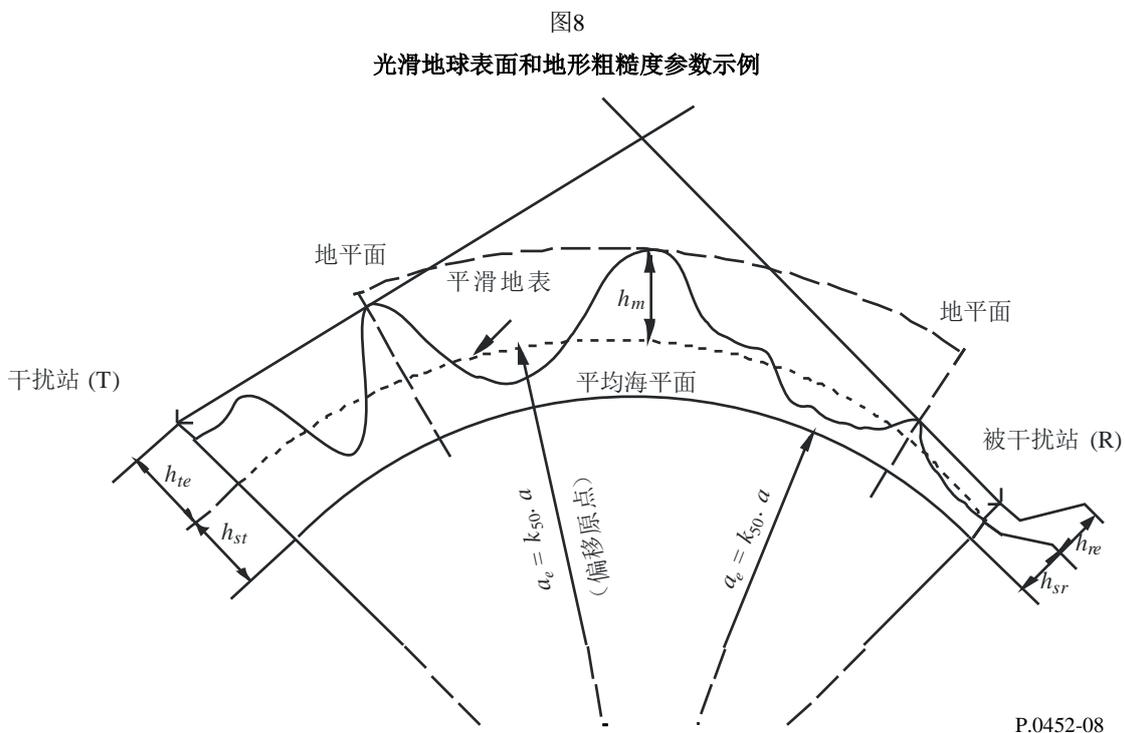
$$h_m = \max_{i=i_{lt}}^{i_{lr}} [h_i - (h_{st} + m \cdot d_i)] \quad \text{m} \quad (157)$$

其中:

i_{lt} : 距离发射机 d_{lt} 处的剖面点的下标;

i_{lr} : 距离接收机 d_{lr} 处的剖面点的下标。

光滑地球表面和地形粗糙度参数 h_m 如图8所示。



附件1的
后附资料3

对 $x \leq 0.5$ 时逆累积正态分布函数的近似

当 $0.000001 \leq x \leq 0.5$ 时，以下逆累积正态分布函数的近似式是正确的，并且误差最大值为0.00054，可以放心用于公式（41）中插值函数的表达式中。若 $x < 0.000001$ ，意味着 $\beta_0 < 0.0001\%$ ， x 应该置为0.000001。而函数 $I(x)$ 由下式给出：

$$I(x) = \xi(x) - T(x) \quad (158)$$

其中：

$$T(x) = \sqrt{[-2 \ln(x)]} \quad (158a)$$

$$\xi(x) = \frac{[(C_2 \cdot T(x) + C_1) \cdot T(x)] + C_0}{[(D_3 \cdot T(x) + D_2)T(x) + D_1]T(x) + 1} \quad (158b)$$

$$C_0 = 2.515516698 \quad (158c)$$

$$C_1 = 0.802853 \quad (158d)$$

$$C_2 = 0.010328 \quad (158e)$$

$$D_1 = 1.432788 \quad (158f)$$

$$D_2 = 0.189269 \quad (158g)$$

$$D_3 = 0.001308 \quad (158h)$$