

国 际 电 信 联 盟

**ITU-R**

国际电联无线电通信部门

**ITU-R P.452-16 建议书**

**(07/2015)**

**评估在频率高于约0.1 GHz时  
地球表面上电台之间  
干扰的预测程序**

**P 系列**

**无线电波传播**



国际电信联盟

## 前言

无线电通信部门的职责是确保卫星业务等所有无线电电信业务合理、平等、有效、经济地使用无线电频谱，不受频率范围限制地开展研究并在此基础上通过建议书。

无线电通信部门的规则和政策职能由世界或区域无线电通信大会以及无线电通信全会在研究组的支持下履行。

## 知识产权政策 (IPR)

ITU-R的IPR政策述于ITU-R第1号决议的附件1中所参引的《ITU-T/ITU-R/ISO/IEC的通用专利政策》。专利持有人用于提交专利声明和许可声明的表格可从<http://www.itu.int/ITU-R/go/patents/en>获得，在此处也可获取《ITU-T/ITU-R/ISO/IEC的通用专利政策实施指南》和ITU-R专利信息数据库。

### ITU-R系列建议书

(也可在线查询<http://www.itu.int/publ/R-REC/en>)

系列	标题
<b>BO</b>	卫星传送
<b>BR</b>	用于制作、存档和播出的录制；电视电影
<b>BS</b>	广播业务（声音）
<b>BT</b>	广播业务（电视）
<b>F</b>	固定业务
<b>M</b>	移动、无线电测定、业余和相关卫星业务
<b>P</b>	<b>无线电波传播</b>
<b>RA</b>	射电天文
<b>RS</b>	遥感系统
<b>S</b>	卫星固定业务
<b>SA</b>	空间应用和气象
<b>SF</b>	卫星固定业务和固定业务系统间的频率共用和协调
<b>SM</b>	频谱管理
<b>SNG</b>	卫星新闻采集
<b>TF</b>	时间信号和频率标准发射
<b>V</b>	词汇和相关问题

**说明：** 该ITU-R建议书的英文版本根据ITU-R第1号决议详述的程序予以批准。

电子出版  
2016年，日内瓦

© 国际电联 2016

版权所有。未经国际电联书面许可，不得以任何手段复制本出版物的任何部分。

## ITU-R P.452-16 建议书\*

评估在频率高于约0.1 GHz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年)

**范围**

本建议书含有用于估计在频率从大约0.1 至50 GHz时地球表面上电台之间微波干扰的一种预测方法，该方法考虑了晴空和水汽凝结物散射干扰两种机制。

**关键词**

干扰，波导，对流层散射，衍射，水凝物散射，数字数据结果

国际电联无线电通信全会，

**考虑到**

- a) 由于无线电频谱拥挤，许多频带必须在不同的陆地业务之间，在同一业务的各系统之间以及陆地和地空业务中的各系统之间共享；
- b) 为了让共用同一频带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传播路径，

**建议**

**1** 采用附件1提供的预测程序估算约0.1 GHz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****1 引言**

由于无线电频谱拥挤，许多频带必须在不同的无线电业务之间，或相似业务的不同运营商之间分享。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

---

\* 无线电通信第3研究组于2016年根据ITU-R第1号决议对此建议书进行了编辑性修正。

精确度来预测它们之间的潜在干扰。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那些状态。

ITU-R P.452建议书所含的模型依据这样一种假设：干扰发射机和受干扰接收器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。已为在约0.1 GHz频率以上运行的无线电台测试了预测程序。该预测程序为工作于频率范围在约0.7 GHz到50 GHz之间的无线电台进行了测试。

ITU-R P.452建议书内的模型旨在计算未在 $0.001 \leq p \leq 50\%$ 范围内突破时间比例的传播损耗。这一假设并不暗示最大损耗将为 $p = 50\%$ 。

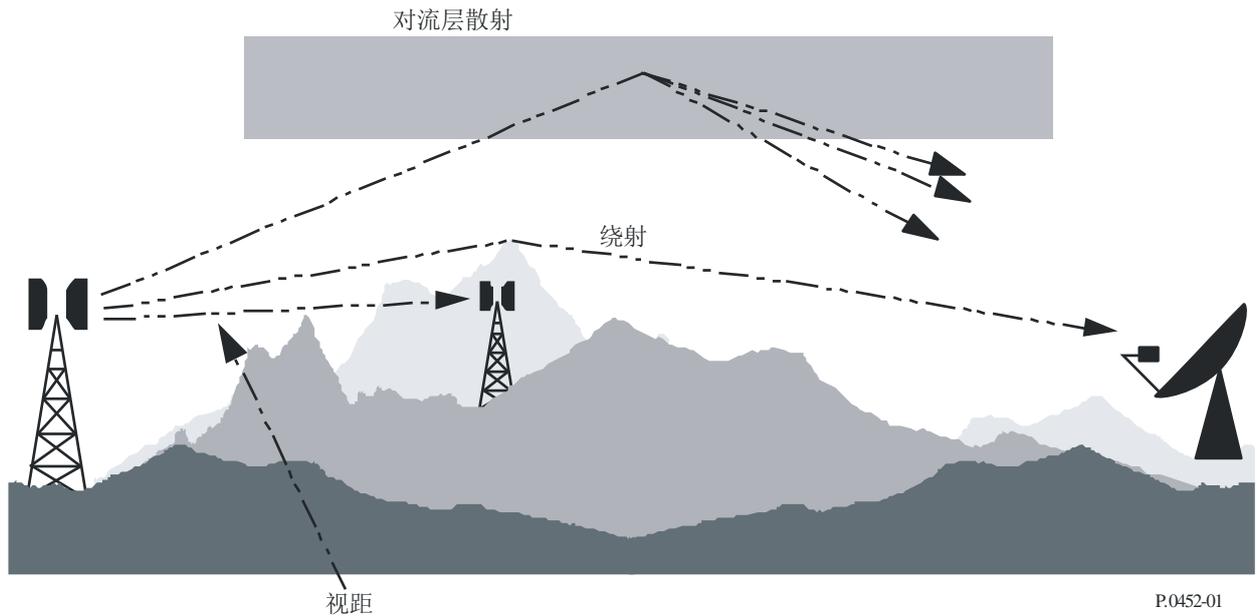
该方法包括一组补充的传播模型，确保预测值涵盖所有可能遇到的显著干扰传播机制。还提供了传播路径的无线电气象和地形特性的分析方法，对于程序所覆盖的不超过10 000 km距离限值的实际干扰路径，都可以用这些方法给出预测值。

## 2 干扰传播机理

微波干扰可能通过许多传播机理引起，哪一种传播机理为主取决于气候、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理或多个传播机理。主要干扰传播机理如下：

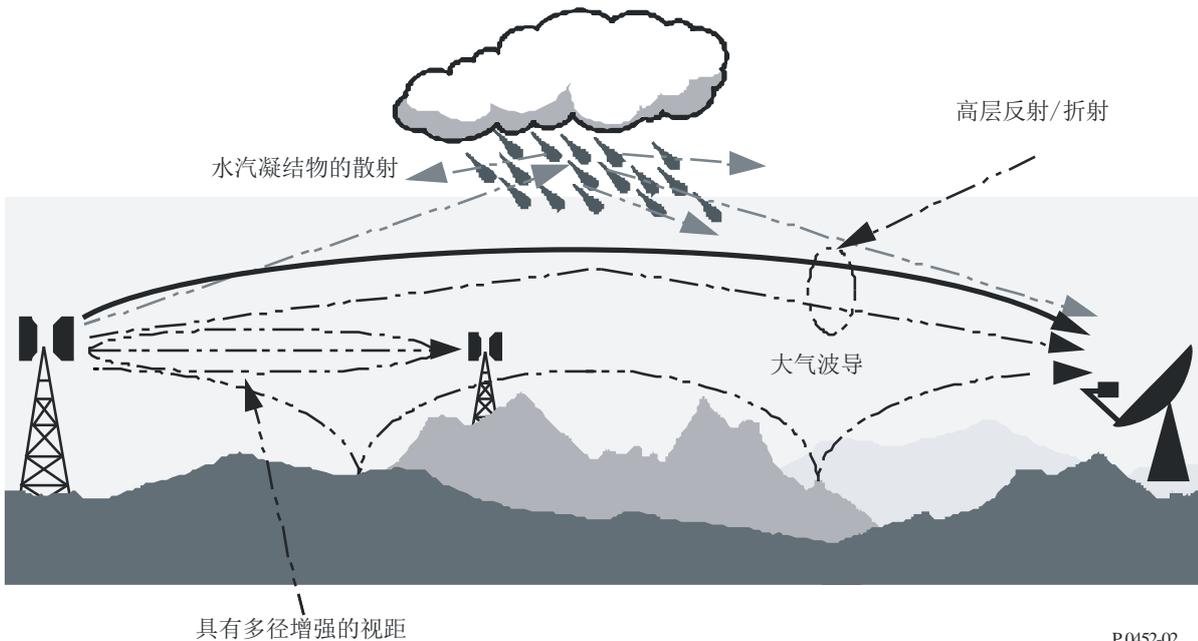
- 视距传播（图1）：在正常（即很好混合的）大气条件下存在视距传播路径，是最直接的干扰传播状态。然而，当部分路径的绕射使得信号电平比正常预测的值稍有增加时，可能还有一些复杂因素起作用。而且，在除最短的路径以外的所有路径上（即路径长于约5 km左右），由于大气分层引起的多径效应和聚焦效应，信号电平常常在短时间内显著增强（见图2）。
- 绕射（图1）：超过视距以外和在正常条件下，只要找到有用信号电平通常绕射效应是为主的。对于那些异常的短时间内的业务来说，可以建立的绕射模型的精度一般决定了系统可以达到的密度。绕射预测的性能一定要很好地适用于光滑地球、离散障碍物和不规则（非建造的）地形的情况。
- 对流层散射（图1）：这一机理决定了较长路径上（即长于100-150 km）的“背景”干扰电平。在这种情况下，绕射场很弱。但是，除了几个特殊情况下，如很灵敏的接收机或很高功率的干扰源（如雷达系统）等情况以外，通过对流层散射来的干扰电平将太低，以至于不必要考虑。

图1  
长期干扰传播机理



- 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主要短期传播机理，它可能在很远距离（海面上长于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）干扰传播机理



- 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，这些机理有可能使信号很有效地克服地形的绕射损耗。而且这种影响在相当长的距离内（直到250-300km）可能是显著的。

- 水汽凝结物散射（图2）：水汽凝结物的散射可能是地面链路发射机和地球站之间的潜在干扰的来源，因为它的作用实际上可能是无方向性的，所以它可能有偏离大圆干扰路径的效果。但是，干扰信号电平十分低，通常它不是一个严重的问题。

在干扰预测中的基本问题（当然，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应距离和时间百分比变化范围很大的情况，即对实际大气而言，随着气候和/或路径条件的改变，由一种机理为主的统计数据会逐步融合进另一种机理中去。特别是，在这些变化区域中，对于一总的时间百分比，可能出现一给定的信号电平，它是在不同机理下的信号电平之和。在这一程序中，采取的方法是对晴空和水汽凝结物散射干扰预测规定完全不同方法，分别如第4和第5节所述。

晴空法由绕射、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种结果组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，在等效的理想的视距模型中的信号增强是可能得到的最高的值。

### 3 净空干扰预测

#### 3.1 一般说明

尽管晴空法用三种不同的模型来实施，然后将其结果混合，但该程序考虑了五种基本类型的传播机理：

- 视距（包括由多径和聚焦效应引起的信号增强效应）；
- 绕射（包含光滑地球表面、不规则地形和部分路径的情况）；
- 对流层散射；
- 异常传播（大气波导和分层反射/折射）；
- 在杂散反射中的高度-增益变化（有关的地方）。

#### 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。所需要的所有其他信息，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)
$\varphi_t, \varphi_r$	0.001	电台的纬度 (度)
$\psi_t, \psi_r$	0.001	电台的经度 (度)
$h_{tg}, h_{rg}$	1	天线中心高于地平面的高度 (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的极化不是具有数值的参数。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结果

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)指标所决定的。因为一般干扰是一个双向的问题, 可能需要对两组这样的质量指标进行评估, 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, 质量指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。

传输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 $\varphi$ , 用下式计算出最差月份时间百分比 $p_w$ 相等效的年度时间百分比 $p$ :

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

其中:

$\omega$ : 路径跨越水面的比例(见表3)。

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

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 $\varphi$ (度)取“正”号。

则计算结果就代表了相应于最差月份所要求的时间百分比 $p_w\%$ 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基本（背景）传播条件和异常传播条件下的变化，预测程序使用了三个无线电气象数据。

- $\Delta N$  (N单位/km)，穿过最下面1 km大气层时平均大气折射率指数的梯度，它提供了计算相应的有效地球半径的数据。有效地球半径用于做路径剖面 and 绕射阻挡分析。请注意，在这一程序中， $\Delta N$ 是一个正的量。
- $\beta_0$  (%)，是在低层大气的第一个100 m中可预计出折射指数下降率超过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，充分显现出异常传播的相对发生率。所要用的 $\beta_0$ 值适合于路径中心的纬度。
- $N_0$  (N单位)，海平面的折射率。对流层散射模型仅用它作为对流层散射的散射体机理的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，它由年度或最差月份的 $\Delta N$ 值所决定，不再需要最差月份的 $N_0$ 值。从相应的地图所导出的路径中心值给出了正确的 $\Delta N$ 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 $\beta_0$  (%)：

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

其中：

$\varphi$ ： 路径中心纬度（度）。

参数 $\mu_1$ 取决于路径跨越陆地（内陆和/或沿海）和水面的比例，它可由下式求出：

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

其中 $\mu_1$ 的取值的范围应为 $\mu_1 \leq 1$ ，

而

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

其中：

$d_m$ ： 大圆路径的最长的连续的陆地（内陆加沿海）段（km）。

$d_{lm}$ ： 大圆路径的最长的连续的内陆段（km）。

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

$$\mu_4 = \begin{cases} 10^{(-0.935+0.017|\varphi|)\log \mu_1} & \text{对于 } |\varphi| \leq 70^\circ \\ 10^{0.3 \log \mu_1} & \text{对于 } |\varphi| > 70^\circ \end{cases} \quad (4)$$

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，即邻近海的相对于平均海平面或水平面的高度在100 m以下的陆地；但是离最近的海域距离限制为50 km。若无法得到精度为100 m的数据，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、洋和其他大片水域（覆盖直径至少100 km的圆形区域）

#### 内陆大型水体

被视为处于区B的“大”内陆水体定义的面积至少有7 800 km<sup>2</sup>的水体，但要排除河流的面积。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，应该把不满足这些标准的岛屿视为陆地。

#### 大的内陆湖泊或湿地区域

对包含许多小湖泊或河网的面积大于7 800 km<sup>2</sup>的大块内陆区域，若其中水的面积超过50%，而且90%以上的陆地的高度高于平均水平面不到100米，则主管部门应该将它们视为“沿海”区A1。

属于区A1的各气候区，包括大型内陆水体区、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，将它们的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，所有陆地区域也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，强烈要求本程序的计算应该基于无线电通信局（BR）的大型机或PC机中可取得的ITU数字化世界地图（IDWM）。如果路径的所有点都至少距海洋或其他大型水体50公里，那么只有内陆类别适用。

如果按无线电路径顺序点存储区域信息，就应假设地区编码不同的各点之间的中途会出现变化。

#### 有效地球半径

可用下式来计算有效地球半径的因子的中值 $k_{50}$ ：

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

假设真实的地球半径为6371 km，可以由下式计算出有效地球半径 $a_e$ 的中值：

$$a_e = 6371 \cdot k_{50} \quad \text{km} \quad (6a)$$

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

$$a_\beta = 6371 \cdot k_\beta \quad \text{km} \quad (6b)$$

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，总体有效地球半径 $a_p$ 将在50%的时间内设为 $a_e$ ，并在 $\beta_0\%$ 的时间内设为 $a_\beta$ 。

#### 步骤4：路径剖面分析

正如表3中所表明的那样，许多计算所必需的路径有关的参数，必须对基于公式(6a)得到的 $a_e$ 值做出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图的出处、制作和分析的资料。

表3  
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)
$d_{lt}, d_{lr}$	对于超视距路径，从发射天线和接收天线到相应的视界的距离。对于视距路径，每一参数均置为从终端到某个剖面点的距离，该剖面点在绕射法中被确定为50%时间的Bullington点。
$\theta_t, \theta_r$	对于超视距路径，分别为发射和接收视界的仰角（毫弧度）。对于视距路径，每一参数均置为另一终端的仰角。
$\theta$	路径角向距离（毫弧度）
$h_{ts}, h_{rs}$	天线中心的平均海拔高度 (m)
$h_{te}, h_{re}$	天线离地面的有效高度 (m)（定义见后附资料 2）
$d_b$	跨越水面的路径段的总长度 (km)
$\omega$	跨越水面的路径的比例： $\omega = d_b/d \quad (7)$ 其中 $d$ 是用公式（148）计算出的大圆距离。 全部是陆地的情况下： $\omega = 0$
$d_{ct,cr}$	从发射机和接收机天线到沿大圆干扰路径上跨越陆地的距离 (km)。对船上或海洋平台的终端置为零。

## 4 净空传播模型

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：

$$L_{bfs} = 92.5 + 20 \log f + 20 \log d + A_g \quad \text{dB} \quad (8)$$

其中：

$A_g$ : 总的气体吸收 (dB) :

$$A_g = [\gamma_o + \gamma_w(\rho)] d \quad \text{dB} \quad (9)$$

其中:

$\gamma_o, \gamma_w(\rho)$ : 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。

$\rho$ : 为水蒸气密度:

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

$\omega$ : 总路径中跨越水面的比例。

在 $p$ 和 $\beta_0$ 时间百分比内多径和聚焦效应的校正项:

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

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

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:

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

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:

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

## 4.2 绕射

假定由于绕射机理引起的额外损耗的时间变化是大气的体积无线电折射率的温度垂直梯度的改变所造成的, 即随着时间百分比 $p$ 减小, 假定有效地球半径因子 $k(p)$ 增加。当 $\beta_0 \leq p \leq 50\%$ 时, 可以认为这一假设是成立的。对小于 $\beta_0$ 的那部分时间百分比, 信号电平以异常传播机理为主导地位, 而不是以大气的体积折射率特性为主。所以, 对于 $p < \beta_0\%$ , 不超过的绕射损耗, 假定与 $p > \beta_0\%$ 时间的值相同。

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, 第一次用于半数有效地球半径因子 $k_{50}$  (公式(5)), 第二个用于极限有效地球半径因子 $k_{\beta}$ 等于3。第二项计算对不超过 $\beta_0\%$ 时间的衍射进行了估算, 而公式(2)给出了其中的 $\beta_0$ 。

随后利用第4.2.4款介绍的极限或内插程序, 计算出 $0.001\% \leq p \leq 50\%$ 不超过 $p\%$ 时间的衍射损耗 $L_{dp}$ 。

由绕射模型计算第4.6节所需的下列量值:

$L_{dp}$ : 对于 $p\%$ 时间不超过的绕射损耗

$L_{bd50}$ : 与绕射有关的基本传输损耗中值

$L_{bd}$ : 与绕射有关的对于 $p\%$ 时间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, 以控制自由空间和受阻绕条件之间的过渡。该方法的这部分使用了两次: 对于实际的路径剖面 and 对于一个零高度的平滑剖面, 其修改后的天线高度为天线的有效高度。也可用相同的有效天线高度计算球形的衍射损耗。最终的结果是得到按上述方法计算的3种损耗组合。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绕射损耗估计值，包括海上或内陆上或沿海陆地，而不论地面是平坦还是起伏，也无论是LoS还是超地平线。

该方法还大量使用了单楔形绕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：

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

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。

整体衍射计算在如下所示各小节中描述：

第4.2.1节描述Bullington衍射方法的一部分。对于给定有效地球半径，每个衍射计算使用了两次。第二次天线高度被修改且所有的剖面高度是零。

第4.2.2节描述球形地球的衍射模型的一部分。这时所使用的天线高度与第4.2.1节中的Bullington部分的第二次使用相同。

第4.2.3节描述对于一个给定的有效地球半径，第4.2.1节和第4.2.2节的方法如何组合使用以执行完整的衍射计算。由于使用了Bullington和球形地球两种方法，完整的计算被称作为的“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，对于发射机相对于接合海平面的基线，对于接收机相对于海平面，按m/km计算斜率。 $i$ -th剖面点的距离和高度分别为海拔 $d_i$  km和 $h_i$  m， $i$ 值从1至 $n$ ，其中 $n$ 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的末端称为发射机和接收机，分别为海拔高度 $h_{ts}$ 和 $h_{rs}$  m。有效地球曲率 $C_e$  km<sup>-1</sup>由下式给出 $1/a_e$ ，其中 $a_e$ 为有效地球半径km。波长由 $\lambda$ 表示单位为米。

采用从发射机到点的线的最高斜率查找中间剖面点。

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

其中剖面指数 $i$ 值从2到 $n-1$ 。

计算从发射机到接收机的线的斜率，假设LoS路径：

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

必须考虑两种情况。

情况 1. 路径是 LoS

如果 $S_{tim} < S_{tr}$  路径是 LoS。

采用最高衍射参数 $v$ 查找中间的剖面点：

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

其中剖面指数  $i$  值从 2 至  $n-1$ 。

在这种情况下，Bullington 点的边缘损耗由下式给出：

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

其中，公式 (13) 就  $v_b$  给出的函数  $J$  大于  $-0.78$ ，否则为 0。

情况 2. 路径是超地平

如果  $S_{tim} \geq S_{tr}$  the 路径是超地平。

采用从接收机到点的线的最高斜率查找中间剖面点。

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

其中剖面指数  $i$  值从 1 到  $n-1$ 。

从发射机计算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， $v_b$ ：

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

在这种情况下，Bullington点的边缘损耗由下式给出：

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

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 球状地球衍射损耗

对天线高度不超过 $h_{te}$ 和 $h_{re}$ (m), $L_{dsph}$ ,不超过 $p$ %时间的球状地球衍射损耗计算如下。

为顺畅路径计算边际LoS距离：

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

如果 $d \geq d_{los}$ 计算衍射损耗，采用下述第4.2.2.1节的方法， $a_{dft} = a_p$ 给出 $L_{dft}$ ，并设置 $L_{dsph}$ 等于 $L_{dft}$ 。不需要更多的球形地球衍射计算。

否则，请继续如下：

由下式计算曲线地球路径和天线间的射线之间的最小间隙高度 $h$ ：

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

其中:

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

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

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

其中的反余弦函数退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0衍射损耗 $h_{req}$ 的必要间隙, 表示为:

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

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

否则, 可按以下程序继续进行:

计算给出距离地的边际LoS的修正有效地球半径 $a_{em}$ , 表示为:

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

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

如果 $L_{dft}$ 为负, 球状地球衍射损耗 $L_{dsph}$ 为0。无需进一步的球状地球衍射计算。

否则, 请继续如下:

以内插法计算球状地球衍射损耗:

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

#### 4.2.2.1 球状地球衍射损耗的首项

本小节给出只使用残留系列的首项计算球形地球衍射的方法。对于有效地球半径 $a_{dft}$ 的给定值, 它构成第4.2.2节所描述的整体衍射方法部分, 给出衍射损耗 $L_{dft}$ 首项, 所使用的 $a_{dft}$ 值在第4.2.2节中给出。

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

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 $\sigma = 5.0 \text{ S/m}$ 并计算 $L_{dft}$ , 采用公式(30)到(37)调用结果 $L_{dftsea}$ 。

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  $\omega$  为海上路径部分。

开始计算并进行两次，如上所述：

对于水平和垂直极化归一化表面准入因子。

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

和：

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

如果极化矢量包括环形或倾斜的水平和垂直部分，将它分解为水平和垂直部分，从公式(30a)和(30b)开始逐一分别计算，并通过场幅度的矢量和进行结果综合。实际上，通常无需这一分解，因为300 MHz以上的数值1可用于公式(31)的 $\beta_{dft}$ 。

计算地球大地/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 $K$ 为 $K_H$ 或 $K_V$ 。

标称化距离：

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

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：

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

确定的标称高度函数表示为：

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

其中：

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

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

如 $G(Y)$ 小于 $2 + 20\log K$ ，通过限制 $G(Y)$ 得出 $G(Y) = 2 + 20\log K$ 。

现将首期球状地球衍射损耗表示为：

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

#### 4.2.3 完成“delta-Bullington”衍射损耗模型

第4.2.1节中的方法用于实际地形剖面天线高度。设定实际的路径产生的衍射损耗， $L_{bulla} = L_{bull}$  通过公式 (22) 计算：

再次使用第4.2.1节中的方法，剖面高度， $g_i$ ，设置为零，和改进的天线高度由下式计算：

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

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

其中发射机和接收机的平滑地球高度， $h_{std}$ 和 $h_{srd}$ 在附录2的第5.1.6.3节中给出。设定平滑路径产生的Bullington 衍射损耗 $L_{bulls} = L_{bull}$  由公式 (22) 计算。

采用第4.2.2节中的方法计算球形地球衍射损耗  $L_{dsph}$ ，实际路径长度 $d$  km 并且：

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

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

总体路径衍射损耗是：

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

#### 4.2.4 不超过 $p\%$ 时间衍射损耗

通过公式 (6a) 采用第4.2.3节中的方法计算有效地球半径中值 $a_p = a_e$  的衍射损耗  $L_d$ 。设置中值衍射损耗  $L_{d50} = L_d$ 。

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

如果  $p < 50\%$ ，继续如下。

通过公式(6b)，采用第4.2.3节中的方法计算衍射损耗  $L_d$ ，不超过 $\beta_0\%$ 时间有效地球半径  $a_p = a_\beta$ 。设置 $\beta_0\%$ 的时间衍射损耗不超过 $L_{d\beta} = L_d$ 。

两个有效地球半径因素的可能值的应用由插补因素控制， $F_i$ ，基于衍射损耗的正态分布，范围  $\beta_0\% \leq p < 50\%$ ，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  $I(x)$  是逆互补累积正态分布作为概率  $x$  的函数。近似值  $I(x)$  可以采用, 在附件1的后附资料3给出  $x \leq 0.5$ 。

不超过  $p\%$  的时间衍射损耗  $L_{dp}$ , 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  $\beta_0$  值的不同由公式(41a)和(41b)确定。

与绕射有关的基本传输损耗中值  $L_{bd50}$  由下式给出:

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

其中  $L_{bfsg}$  由公式(8)给出。

在  $p\%$  时间内不超过的与绕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和注2)

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。这就有可能连续一致地预测时间百分比  $p$  从 0.001% 到 50% 范围内的基本传输损耗, 所以, 在小时间百分比范围内将大气波导和层反射模型与真实的“散射”模型结合起来, 适用于最大时间百分比被超过的弱残留场。

注 2 – 这一对流层预测模型是为干扰预测用推导出来的, 它不适用于计算影响对流层散射无线电接力系统的各种性能的 50% 时以上的传播条件。

对于低于 50% 的任何时间百分比  $p$ , 可由下式求出不被超过的由对流层散射引入的基本传输损耗  $L_{bs}$  dB:

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

其中:

$L_f$ : 与频率有关的损耗:

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

$L_c$ : 中值耦合损耗的范围 (dB)

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

$N_0$ : 图6得到的路径中心海平面的表面折射率

$A_g$ : 对整个路径长度用  $\rho = 3 \text{g/m}^3$ , 从公式 (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 (除本地散射损耗外):

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

$A_{lf}$ : 对波导传播波长衰减不断加剧加以说明的经验校正项

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

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

$A_{st}, A_{sr}$ : 分别为干扰站和被干扰站的位置屏蔽绕射损耗:

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

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)必需的受限的条件集是有用的。

$A_d(p)$ : 在异常传播机理内与时间百分比和角度一距离有关的损耗:

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

其中:

$\gamma_d$ : 比衰减

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

$\theta'$ : 考虑到应用公式(48)中的位置屏蔽模型的角距离 (适用时经校正的角距离 (通过公式(52a))):

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

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

$A(p)$ : 时间百分比的可变性 (累积分布):

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

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

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

$\mu_2$ : 路径几何关系的校正量:

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

$\mu_2$ 的数值应该不超过1。

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

其中:

$$\varepsilon = 3.5$$

$\tau$ : 是公式(3a)中定义的,

而 $\alpha$ 的值不得减小到-3.4以下。

$\mu_3$ : 为地形粗糙度的校正量:

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

$$d_i = \min(d - d_{lt} - d_{lr}, 40) \quad \text{km} \quad (56a)$$

$A_g$ : 总大气吸收, 它由公式(9)和(9a)求出。

其余项已在表1和表2以及后附资料2中下了定义。

## 4.5 附加散射损耗

### 4.5.1 概述

天线放在本地地面散布物(建筑物、植被等)中得到的附加绕射损耗, 可以在防止干扰方面得到相当大的益处。这一程序可以根据已知的地面散布物的情况考虑在路径的任何一端或者两端附加这样的散射损耗。它预测了路径任一端的最大附加损耗, 并通过一个 S 形内插函数施用, 以避免对屏蔽损耗估计过高。0.9 GHz 频率以上的最大附加损耗为 20 dB, 并随频率的下降而递减, 0.1 GHz 时降至 5 dB。在对地面散布物环境的确实情况有疑问的地方, 不应该包含这一附加损耗。在采用校正项的地方, 请不要指望在独立高楼林立并有间隔的现代市中心区会出现散射损耗。据观测, 这些地区的散射损耗通常低于建筑连成一片的传统市中心。

对干扰站和被干扰站的散射损耗分别表示为  $A_{lt}$  (dB) 和  $A_{lr}$  (dB)。可以得到的附加保护与高度有关, 所以, 它以按地面散布物的正常高度归一化的高度 - 增益函数来建立模型。对一系列的地面散布物类型, 已可以得到适当的归一化高度。

校正项适用于本建议书中的所有净空预测，即适用于所有传播模式和时间百分比。

#### 4.5.2 地面散布物种类

表4按ITU-R P.1058建议书的定义列出了地面散布物（或地面覆盖物）的类型，这些类型可以应用高度 - 增益校正项。标称地面散布物高度 $h_a(m)$ 和离天线的距离 $d_k(km)$ 看做是该地面散布物类型的最有代表性的“平均”值。然而，考虑到在特殊情况下适用的实际高度存在不确定性，将校正模型做得比较保守。在更精确地知道地面散布物参数的情况下，可以用这些参数直接代替从表4中得到的数值。

在表4中给出的标称高度和距离近似于ITU-R P.1058建议书中规定的特征高度 $H_c$ 和间隙宽度 $G_c$ 。但是，这里用于估计由地面散布物（地面覆盖物）引入的附加损耗的模型定得比较保守。

#### 4.5.3 高度 - 增益模型

由当地地面散布物的保护引入的附加损耗由下式给出：

$$A_h = 10.25 F_{fc} \cdot e^{-d_k} \left( 1 - \tanh \left[ 6 \left( \frac{h}{h_a} - 0.625 \right) \right] \right) - 0.33 \quad \text{dB} \quad (57)$$

其中：

$$F_{fc} = 0.25 + 0.375 \{ 1 + \tanh[7.5(f - 0.5)] \} \quad (57a)$$

以及

$d_k$ : 从标称的地面散布物点到天线的距离 (km) (见图3)

$h$ : 天线离当地地平面的高度 (m)

$h_a$ : 标称的地面散布物离当地地平面的高度 (m)

表4

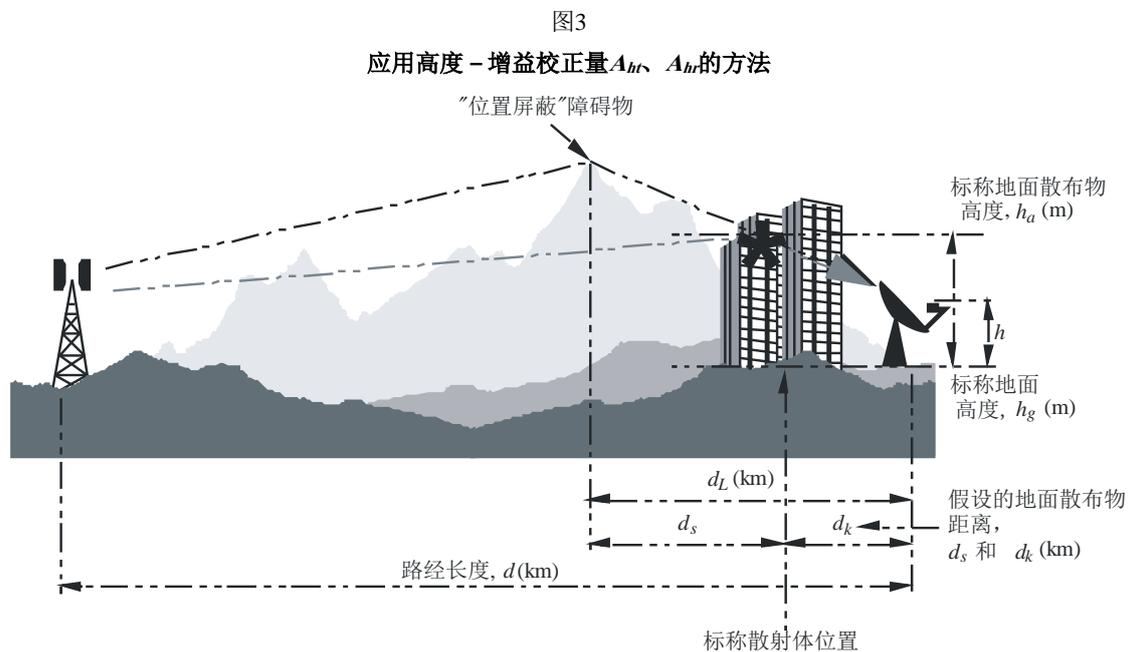
标称地面散布物高度和距离

杂波（地被）类别	标称高度, $h_a$ (米)	标称距离, $d_k$ (公里)
高的庄稼地 公园 间隔不一致的稀疏树林 果园（间距一致） 散落的房屋	4	0.1
村庄中心	5	0.07
落叶树（不规则间隔） 落叶树（规格间隔） 混合树林	15	0.05

表4 (续)

杂波（地被）类别	标称高度, $h_a$ (米)	标称距离, $d_k$ (公里)
针叶树（不规则间隔） 针叶树（规格间隔）	20	0.05
热带雨林	20	0.03
城郊	9	0.025
建筑密集的城市	12	0.02
城市	20	0.02
建筑密集的城市	25	0.02
有高层建筑的城市	35	0.02
工业区	20	0.05

对于在表4中没有列入的地面散布物种类，应该不考虑由地面散布物（地面覆盖物）的屏蔽引入的附加损耗。



P.0452-03

#### 4.5.4 应用的方法

使用高度-增益校正的方法， $A_{ht}$ 或 $A_{hr}$  (dB) 是简单明了的，如图3所示。

要增加的基本预测程序的步骤如下：

步骤1：若已知了地面散布物的类型或可以安全地做出地面散布物类型的假设，可以按照表4选出适当的地面散布物的参数，再用主程序对标称高度 $h_a$ 计算基本传输损耗。要使用的路径长度为 $d - d_k$  (km)。但是，若 $d \gg d_k$ ，忽略对 $d_k$ 的这一小的校正项，可以不必担心。

步骤2：在有“位置屏蔽”障碍物的场合，障碍物将对终端提供保护，在基本计算中仍应该包含这一项，但是屏蔽损耗 ( $A_{sr}$ 或 $A_{sr}$  (dB)) 应该对距离 $d_s$ 处的高度 $h_a$ 进行计算，而不是像其他情况下那样对 $d_c$ 处的 $h$ 进行计算。

步骤3: 一旦完成了主程序, 可以按公式(64)中所指出的那样, 加上由公式(57)得到的高度—增益校正项。

步骤4: 在无法取得有关地面散布物的资料的情况下, 应该用距离 $d$ 和 $d_L$  (如适用) 以及高度 $h$ 来进行基本计算。

注1— 在适用的情况下, 应该对两端都加上地面散布物高度—增益校正项。

注2— 在陆地高度—增益校正项和海大气波导耦合校正项 ( $A_{ct}$ 或 $A_{cr}$  (dB)) 都需要的情况下 (即除了有干涉地面散布物外, 天线邻近海洋), 当两个校正项互补和一致时, 它们可以一起使用。

注3— 若 $d$ 不是远大于 $d_k$ , 这一模型不适用。

#### 4.6 总预测

对于后面为所有路径进行的计算, 要对其结果采用下列程序:

计算内插系数 $F_j$ , 考虑路径的角向距离:

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

其中:

$\xi$ : 可调参数, 当前设为0.8

$(S_{tim} - S_{tr})$ : 等式(14)和(15)中定义的斜率参数

$\Theta$ : 可调参数, 当前设为0.3 mrad.

计算内插系数 $F_k$ , 考虑大圆路径长度:

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

其中:

$d$ : 大圆路径长度 (km) (在表3中规定)

$d_{sw}$ : 确定相关混合的距离范围的固定参数, 置为20

$\kappa$ : 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绕射有关的假想最小传输损耗 $L_{minb0p}$  (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 $p\%$ 时间内不超过的绕射损耗, 采用第4.2节的方法计算。

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

$$\eta = 2.5$$

计算与视距和超视距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 $p\%$ 时间内不超过的绕射的基本传输损耗。

$F_k$ : 依 $p$ 和 $\beta_0$ 的值由公式(59)得出的内插系数。

计算修正的基本传输损耗 $L_{bam}$  (dB), 该值纳入了绕射和LoS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):

$$L_b = -5 \log \left( 10^{-0.2L_{bs}} + 10^{-0.2L_{bam}} \right) + A_{ht} + A_{hr} \quad \text{dB} \quad (64)$$

其中:

$A_{ht,hr}$ : 是考虑了发射机和接收机散射屏蔽的附加损耗。若不存在这种屏蔽, 则该值应置为零。

#### 4.7 传输损耗的计算

上面在§4.1到§4.6中所介绍的方法用于计算两个站之间的基本传输损耗。为了计算在一个站上由其他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站在它们之间的无线电(即干扰)路径方向上的天线增益。

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, 它还提供了一些公式, 用于按表3中的假设, 根据各站的几何坐标, 计算大圆路径长度和角距离, 它们与根据路径剖面来得到这些量的过程正相反。

从各站的几何坐标计算在地球中心该路径所对的角,  $\delta$ , 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 $r$ 站的方位角（从真北顺时针方向的方位方向）:

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

完成了(67)式的计算后, 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 $t$ 站的方位角 $\alpha_{rt}$ 。

下面假定站 $t$ 的主射束（视轴）方向为 $(\varepsilon_t, \alpha_t)$ （俯仰角, 方位角），而站 $r$ 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 $\varepsilon_{pt}$ 和 $\varepsilon_{pr}$ ，必须区分视距路径和对流层散射路径。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）。而对对流层散射路径，用它们相应的视界角给出俯仰角：

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

和

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

请注意无线电视界角 $\theta_t$ 和 $\theta_r$ （mrad）是在表3中首先引进的和分别在附件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 $r$ 站的偏视轴角 $(\chi_t, \chi_r)$ ，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建议书中的资料得到增益随偏轴角的变化。

用下式求出传输损耗 $L$ ：

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

对于散射在无线电传播中占主导地位的净空干扰情景而言，俯仰角比无线电视界角 $\theta_t$ 和 $\theta_r$ 稍微大一些。用无线电视界角引入的误差应该可以忽略，但这些角与它们相应的视轴方向重合的情况除外。

## 5 降水散射干扰预测

与上面介绍过的净空预测相反，下面描述的降水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，因为它需要每一站的干扰天线和被干扰天线的辐射图资料。

该方法是很通用的，任何天线辐射图都可以用它。它提出了用于确定在任一偏视轴角下的天线增益的方法。例如诸如ITU-R P.620、F.699、F.1245、S.465和S.580建议书中提出的辐射图都可以使用，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）也可以使用。该方法也可以使用ITU-R F.1336建议书中表征的那类全向天线或扇区天线，这类天线的增益通常由垂直偏视轴角（即相对于最大增益角的俯仰角）来决定。

这一方法对特定的几何关系不受限制的场合也是通用的，只要知道了在 $\pm 180^\circ$ 覆盖范围内的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。该方法可以计算任何站在任何俯仰角和方位角下的长路径（ $> 100 \text{ km}$ ）和短路径几何关系（短到几公里以下）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，包括在所分配的双向频带上工作的两个地面业务站之间、地面业务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。

### 5.1 引言

该方法基于应用双稳态雷达公式，它可以用传输公式表示在接收站处接收到的由于发射站的发射功率 $P_t$ 的降雨散射所产生的功率 $P_r$ ：

$$P_r = P_t \frac{\lambda^2}{(4\pi)^3} \iiint_{\text{all space}} \frac{G_t G_r \eta A}{r_t^2 r_r^2} dV \quad \text{W} \quad (73)$$

其中：

$\lambda$ ： 波长

$G_t$ ： 发射天线的（线性）增益

$G_r$ ： 接收天线的（线性）增益

- $\eta$ : 每一单位体积 $\delta V$ 的散射截面积 ( $\text{m}^2/\text{m}^3$ )  
 $A$ : 从发射机到接收机的路径上的衰减 (用线性单位表示)  
 $r_i$ : 从发射机到散射体元的距离  
 $r_r$ : 从散射体元到接收机的距离

若用传输损耗 (dB) 来表示两个站 (即站1和站2) 之间的散射, 双稳态雷达公式变为如下形式:

$$L = 178 - 10 \log N - 20 \log f - 10 \log Z_R - 10 \log C - 10 \log S + A_g - M \quad \text{dB} \quad (74)$$

其中:

$N$ : 取决于折射率的瑞利散射项

$$N = \left| \frac{m^2 - 1}{m^2 + 2} \right|^2 \quad (74a)$$

$m$ : 取决于频率和大气条件的复折射率

$f$ : 频率 (GHz)

$Z_R$ : 在地平面上的雷达反射率, 它可以用降雨速率 $R$  (mm/h) 来表示:

$$Z_R = 400R^{1.4} \quad (75)$$

$10 \log S$ : 修正项 (dB), 它是考虑到在10GHz以上频率与瑞利散射的偏差后引入的修正项, 用下式表示:

$$10 \log S = \begin{cases} R^{0.4} \cdot 10^{-3} \left[ 4(f-10)^{1.6} \left( \frac{1 + \cos \varphi_S}{2} \right) + 5(f-10)^{1.7} \left( \frac{1 - \cos \varphi_S}{2} \right) \right] & \text{对于 } f > 10 \text{ GHz} \\ 0 & \text{对于 } f \leq 10 \text{ GHz} \end{cases} \quad (76)$$

其中:

$\varphi_S$ : 是散射角

$A_g$ : 是在从发射机到接收机的路径上由大气中的气体引入的损耗, 它根据ITU-R P.676建议书的附件2进行计算, 单位为dB。

$M$ : 是在发射系统和接收系统之间的极化失配损耗 (dB)。

在这里给出的模型中, 将散射限定为在降雨区域内的散射, 雨区的横截面视为圆的, 直径与降雨速率有关:

$$d_c = 3.3R^{-0.08} \quad \text{km} \quad (77)$$

在降雨区内, 在降雨高度 $h_R$ 以下, 假定降雨速率为常数, 因而雷达反射率也为常数。在这个降雨高度以上, 假定反射率随高度以 $-6.5 \text{ dB/km}$ 的速率线性地减小。

则散射转移函数 $C$ 是沿雨区的体积分, 在圆柱坐标系中, 可以将它写成如下形式:

$$C = \int_0^{h_{max}} \int_0^{2\pi} \int_0^{\frac{d_c}{2}} \frac{G_1 G_2}{r_1^2 r_2^2} A \zeta \cdot r \, dr d\varphi dh \quad (78)$$

其中:

$G_1, G_2$ : 分别为站1和站2的线性增益

$r_1, r_2$ : 分别为从积分元  $\delta V$  到站1和站2的距离 (km)。

$A$ : 是由降雨引入的损耗, 它包括雨区内和雨区外的损耗, 用线性项表示。

$\zeta$ : 为雷达折射率与高度的关系:

$$\zeta = \begin{cases} 1 & \text{对于 } h \leq h_R \\ 10^{-0.65(h-h_R)} & \text{对于 } h > h_R \end{cases} \quad (79)$$

$h_R$ : 降雨高度, km

$r, \varphi, h$ : 是在雨区内的积分变量

在圆柱坐标系中进行数值积分。然而, 一开始用笛卡尔坐标系, 取站1为坐标系的原点来考虑从发射站通过雨区到达接收站的散射几何条件比较方便, 因为雨区的实际位置并不是直接定下来的, 特别是侧散射情况下更是如此。

在笛卡尔坐标系内, 为了简化, 首先将各个几何参数从它们实际的有曲率的地球上的值变换为平面的地球的表达式比较有利。

从几何条件确定天线之间存在主射束与主射束的耦合, 则将降雨区定位在主射束轴的交点上。若不存在主射束与主射束之间的耦合, 则将雨区定位在站1的主射束的轴上, 而以与站2的主射束轴的最近的途径的那一点为中心。在这种情况下, 对第2种情况, 应该将每一站的参数对调, 而最坏情况下的损耗分布取为可能的干扰电平的典型值, 从而计算出传输损耗。

## 5.2 输入参数

表5列出了应用计算两个站之间由于降雨散射而引起的传输损耗累积分布的方法所需要的所有输入参数。

表5  
输入参数表

(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	站之间的距离
$f$	GHz	频率
$h_{1\_loc}, h_{2\_loc}$	km	站1和站2当地的平均海拔高度
$G_{max-1}, G_{max-2}$	dB	每个天线的最大增益
$h_R(p_h)$	km	降雨高度被超过的累积分布, 表示为时间百分数 $p_h$ 的函数。注一 若不能取得这一累积分布, 使用中值降雨高度 $h_R$ 。下面的表2将 中值降雨高度列在一起
$M$	dB	系统之间的极化失配
$P$	hPa	表面压力 (默认值1013.25 hPa)
$R(p_R)$	mm/h	降雨率被超过的累积分布, 表示为时间百分数 $p_R$ 的函数
$T$	°C	表面温度 (默认值15° C)
$\alpha_{1\_loc}, \alpha_{2\_loc}$	rad	站1到站2以及站2到站1的本地方位角 (以顺时针计)
$\epsilon_{H1\_loc}, \epsilon_{H2\_loc}$	rad	站1和站2的本地视界角
$\rho$	g/m <sup>3</sup>	表面水蒸气密度 (默认值8 g/m <sup>3</sup> )
$\tau$	degrees	链路的极化角 (水平极化为0°, 垂直极化为90°)

注 1 – 如果无法得降雨分布, 请与表6一同使用中等降雨高度 $h_R$ 。

### 5.3 程序的步骤

#### 步骤1: 确定气象参数

为了求出由降雨散射引起的传输损耗的累积分布 (用这样的损耗被超过的时间百分数表示), 所要求的输入参数是降雨速率和降雨高度的概率分布。若可以取得当地这些参数的数值, 应该采用这些数值; 若没有当地的数值, 则可以使用ITU-R P.837建议书得到任何地点的降雨速率的累积分布, 而中值降雨高度可以从ITU-R P.839建议书中得到。可以使用表6中降雨高度相对于中值的分布作为降雨高度累积分布的默认值。

表6

降雨高度相对于它的中值的累积分布

降雨高度差 (km)	超过的概率 (%)
-1.625	100.0
-1.375	99.1
-1.125	96.9
-0.875	91.0
-0.625	80.0
-0.375	68.5
-0.125	56.5
0.125	44.2
0.375	33.5
0.625	24.0
0.875	16.3
1.125	10.2
1.375	6.1
1.625	3.4
1.875	1.8
2.125	0.9
2.375	0.0

用下面的方法把降雨速率和降雨高度的累积分布变换为概率密度函数。对于降雨速率或降雨高度的两个相邻值之间的每一个间隔，把平均值作为该间隔的典型值，而它的发生概率是两相应的超过概率之间的差值。当用表5时，把 $h_R$ 小于零公里的任何值都置为零公里，它们的概率加起来。

假设降雨速率和降雨高度统计上是彼此独立的，因此，给定的一对降雨速率/降雨高度的组合的发生概率，简单地是它们单独概率的积。

对于每一对降雨速率和降雨高度数值，根据下面的步骤计算传输损耗。

步骤2: 将几何参数变换为平面的地球的表达式

两个站之间的降雨散射的几何条件由基本输入参数所决定，包括两个站之间的大圆距离、每一站天线的本地俯仰角 $\varepsilon_{1-loc}$ 和 $\varepsilon_{2-loc}$ 的值，和每一个站的天线主射束轴偏离其他站的方向的方位角偏离 $\alpha_{1-loc}$ 和 $\alpha_{2-loc}$ （顺时针方向为正）。站1定为参考位置，即笛卡尔坐标系的原点，所以，参考参数如下：

$$\varepsilon_1 = \varepsilon_{1-loc}, \alpha_1 = \alpha_{1-loc} \quad \text{和:} \quad \varepsilon_{H1} = \varepsilon_{H1-loc} \quad \text{rad} \quad (80)$$

把所有的几何参数变换为普通的笛卡尔坐标系，取站1作为原点，水平面作为 $x-y$ 平面， $x$ 轴指向站2的方向，而 $z$ 轴指向垂直向上。图4解释了弯曲的地球上的几何关系（对前向散射的被简化的情况，即沿着大圆），其中 $r_{eff}$ 是地球的有效半径，

$$r_{eff} = k_{50} R_E \quad \text{km} \quad (81)$$

而

$k_{50}$ : 为有效地球半径因子的中值 = 1.33

$R_E$ : 为真实的地球半径 = 6371 km

两个站之间的间隔为大圆距离  $d$  (km)，在地球中心所对的角  $\delta$  为:

$$\delta = \frac{d}{r_{eff}} \quad \text{rad} \quad (82)$$

站2上本地的垂线相对于站1处的垂线（即  $z$  轴）倾斜角度为  $\delta$ 。所以，将站2的俯仰角和方位角按如下方式变换为平面地球的代表值，下标  $loc$  表示当地的数值。

计算站2的俯仰角:

$$\varepsilon_2 = \arcsin(\cos \varepsilon_{2\_loc} \cos \alpha_{2\_loc} \sin \delta + \sin \varepsilon_{2\_loc} \cos \delta) \quad (83)$$

计算站2的视界角:

$$\varepsilon_{H2} = \arcsin(\cos \varepsilon_{H2\_loc} \cos \alpha_{2\_loc} \sin \delta + \sin \varepsilon_{H2\_loc} \cos \delta) \quad (84)$$

计算站2相对于站1的方位角偏移:

$$\alpha_2 = \arctan \left( \frac{\cos \varepsilon_{2\_loc} \sin \alpha_{2\_loc}}{\cos \varepsilon_{2\_loc} \cos \alpha_{2\_loc} \cos \delta - \sin \varepsilon_{2\_loc} \sin \delta} \right) \quad (85)$$

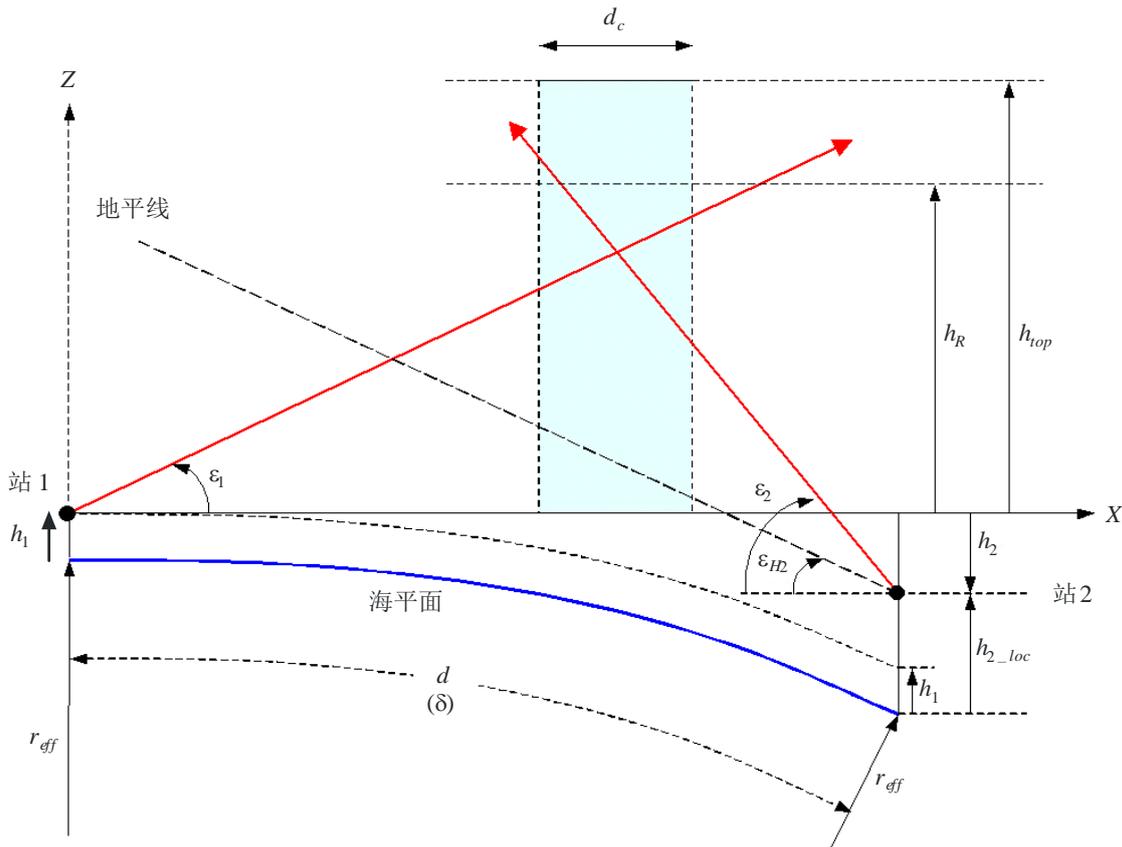
站2相对于参考平面的高度由下式给出:

$$h_2 = h_{2\_loc} - h_1 - d \frac{\delta}{2} \quad \text{km} \quad (86)$$

在两个站主射束轴的地平面投影的交点处两个站之间方位角的间隔为:

$$\alpha_S = \pi - (\alpha_1 - \alpha_2) \quad \text{rad} \quad (87)$$

图4  
有曲率的地球上各站的几何关系



P.0452-04

步骤3: 确定链路的几何关系

确定散射链路几何关系的方法使用矢量标记，其中三维空间中的矢量用三元素单列矩阵来代表。矩阵的三元素由该相关的线段在笛卡尔坐标系的x、y和z轴上的投影的长度所组成。矢量将由粗体字中的符号来代表。所以，通常一矢量的赋值可以写成如下形式：

$$\mathbf{V} = \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix}$$

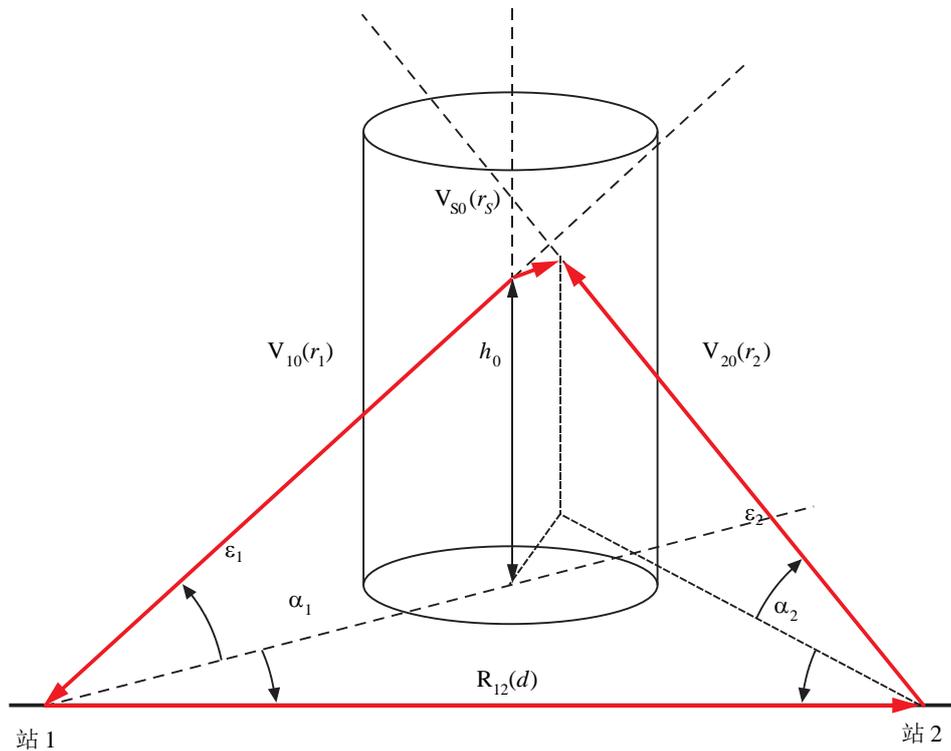
一般，一单位长度的矢量将用符号 $\mathbf{V}$ 来代表，而普通的矢量（即包括幅度）将用另一个适当的符号例如 $\mathbf{R}$ 来代表。

图5对侧散射的一般情况解释了降雨散射的基本几何关系，事实上，两个主射束轴是不相交的。换句话说，这个实例代表了旁瓣与主瓣的耦合。干扰路径可能是从站2的旁瓣干扰进入站1的主射束，反之亦然。

图5

## 侧散射一般情况下的降雨散射几何关系图

(请注意, 在这个例子中, 天线的两射束不相重叠, 且“斜视角”不为零 – 见公式(89)和(90))



P0452-05

雨区的中心放在站1的主射束天线轴上, 在两个天线射束之间最接近的途径的那一点处。按下面的步骤以矢量标记建立几何关系。

从站1到站2的矢量定义如下:

$$\mathbf{R}_{12} = \begin{bmatrix} d \\ 0 \\ h_2 \end{bmatrix} \quad \text{km} \quad (88)$$

矢量 $\mathbf{R}_{12}$ 、 $r_2\mathbf{V}_{20}$ 、 $r_s\mathbf{V}_{s0}$ 和 $r_1\mathbf{V}_{10}$ 形成或封闭的三维多边形, 而矢量 $\mathbf{R}_{12}$ 与 $\mathbf{V}_{10}$ 和 $\mathbf{V}_{20}$ 两矢量相垂直。在图5中描述的例子中, 矢量 $\mathbf{V}_{s0}$ 指向页面以内。

考虑了地球的曲率以后, 可用下式计算站1的天线主射束方向中的单位长度矢量 $\mathbf{V}_{10}$ :

$$\mathbf{V}_{10} = \begin{bmatrix} \cos\epsilon_1 \cos\alpha_1 \\ -\cos\epsilon_1 \sin\alpha_1 \\ \sin\epsilon_1 \end{bmatrix} \quad (89)$$

而可用下式计算站2的天线主射束方向中的单位长度矢量 $\mathbf{V}_{20}$ :

$$\mathbf{V}_{20} = \begin{bmatrix} \sin \varepsilon_{2\_loc} \sin \delta - \cos \varepsilon_{2\_loc} \cos \alpha_{2\_loc} \cos \delta \\ \cos \varepsilon_{2\_loc} \sin \alpha_{2\_loc} \\ \sin \varepsilon_{2\_loc} \cos \delta + \cos \varepsilon_{2\_loc} \cos \alpha_{2\_loc} \sin \delta \end{bmatrix} \quad (90)$$

现在的这个方法使用两个矢量的标量积，它可以写成下式并进行计算：

$$\mathbf{V}_1 \cdot \mathbf{V}_2 = x_1 x_2 + y_1 y_2 + z_1 z_2$$

其中：

$$\mathbf{V}_1 = \begin{bmatrix} x_1 \\ y_1 \\ z_1 \end{bmatrix}$$

散射角 $\varphi_S$ ，即两个天线射束之间的夹角，可以从两个矢量 $\mathbf{V}_{10}$ 和 $\mathbf{V}_{20}$ 的标量积求出：

$$\varphi_S = \arccos(-\mathbf{V}_{20} \cdot \mathbf{V}_{10}) \quad (91)$$

若 $\varphi_S < 0.001$  rad，则两个天线射束几乎是平行的，并且可以假定，降雨散射引起的任何耦合将可以忽略。

正如图5中所示出的那样，四个矢量 $\mathbf{R}_{12}$ 、 $r_2 \mathbf{V}_{20}$ 、 $r_S \mathbf{V}_{S0}$ 和 $r_1 \mathbf{V}_{10}$ 形成一闭合的三维多边形，即

$$\mathbf{R}_{12} + r_2 \mathbf{V}_{20} - r_S \mathbf{V}_{S0} - r_1 \mathbf{V}_{10} = 0 \quad (92)$$

并且这个公式可以对距离 $r_i$ 求解。这一方法使用了两个矢量的矢量积。矢量（或叉）积是：

$$\mathbf{V}_1 \times \mathbf{V}_2 = \begin{bmatrix} y_1 z_2 - z_1 y_2 \\ z_1 x_2 - x_1 z_2 \\ x_1 y_2 - y_1 x_2 \end{bmatrix}$$

单位长度矢量 $\mathbf{V}_{S0}$ 与两个天线射束都垂直，可以由矢量积 $\mathbf{V}_{20} \times \mathbf{V}_{10}$ 计算出来：

$$\mathbf{V}_{S0} = \frac{\mathbf{V}_{20} \times \mathbf{V}_{10}}{\sin \varphi_S} \quad (93)$$

现在可以用三个矢量的行列式求解公式(92)，它可以写成下式和计算出来：

$$\det[\mathbf{V}_1 \quad \mathbf{V}_2 \quad \mathbf{V}_3] = \det \begin{bmatrix} x_1 & x_2 & x_3 \\ y_1 & y_2 & y_3 \\ z_1 & z_2 & z_3 \end{bmatrix} = x_1(y_2 z_3 - y_3 z_2) + x_2(y_3 z_1 - y_1 z_3) + x_3(y_1 z_2 - y_2 z_1)$$

在它们最接近的途径处，计算两个射束之间的距离：

$$r_s = \frac{\det[\mathbf{V}_{10} \quad \mathbf{V}_{20} \quad \mathbf{R}_{12}]}{\det[\mathbf{V}_{10} \quad \mathbf{V}_{20} \quad \mathbf{V}_{s0}]} \quad (94)$$

从站1沿它的主射束到与站2的主射束最接近的途径的那点的斜路径距离 $r_1$ 为：

$$r_1 = \frac{\det[\mathbf{R}_{12} \quad \mathbf{V}_{20} \quad \mathbf{V}_{s0}]}{\det[\mathbf{V}_{10} \quad \mathbf{V}_{20} \quad \mathbf{V}_{s0}]} \quad (95)$$

而相应的从站2沿它的主射束到与站1主射束的最接近的途径的点的斜路径距离 $r_2$ （注意一项有负号）为：

$$r_2 = \frac{-\det[\mathbf{V}_{10} \quad \mathbf{R}_{12} \quad \mathbf{V}_{s0}]}{\det[\mathbf{V}_{10} \quad \mathbf{V}_{20} \quad \mathbf{V}_{s0}]} \quad (96)$$

计算在站2的主射束轴上最接近的途径的那一点斜视站1的偏轴“斜视”角：

$$\Psi_1 = \arctan\left(\frac{|r_s|}{r_1}\right) \quad (97)$$

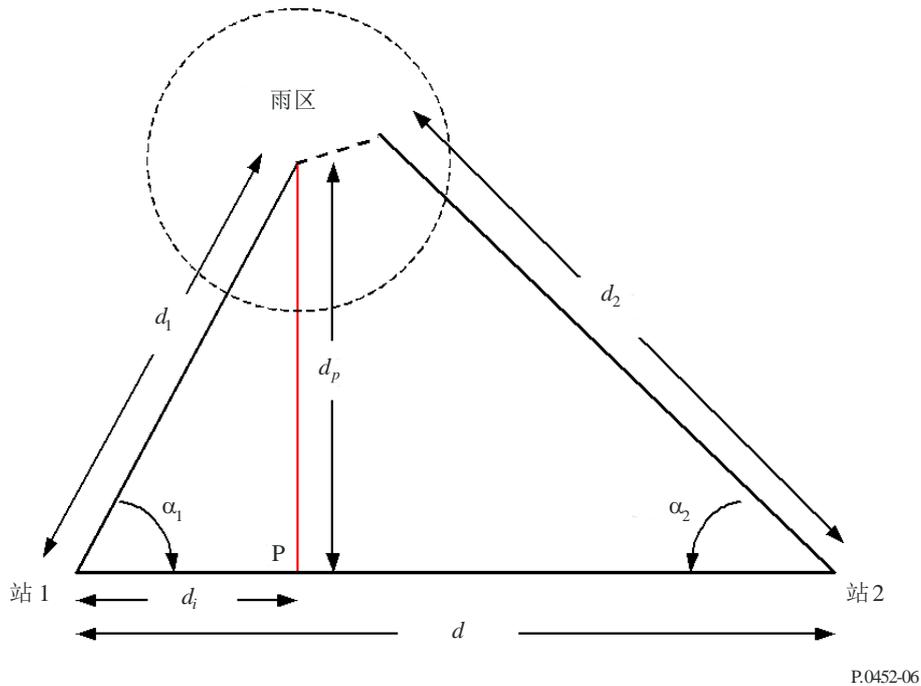
再计算在站1的主射束轴上最接近的途径的那一点斜视站2的相对应的偏轴“斜视”角：

$$\Psi_2 = \arctan\left(\frac{|r_s|}{r_2}\right) \quad (98)$$

从这些参数来确定在两个站之间是否存在主射束与主射束的耦合。对存在主射束与主射束耦合的场合，斜视角应该小于相关天线的3 dB射束宽度。在斜视角大于3 dB射束宽度时，则实际上几乎没有或没有主射束与主射束的耦合，而且传输路径将主要地受旁瓣与主射束耦合的影响。如果是这种情况，应该研究两种可能性，依次使雨区的中心位于每一天线主射束轴上，所得到的最低的传输损耗代表最坏情况下的状态。因为雨区的默认位置是在沿站1的主射束轴上最接近途径的点上，只要用站2的各个参数代替站1的参数，计算可以很容易完成，反之亦然。

最后，还必须确定上面所计算的各个距离的水平投影，由此可以确定雨区的位置。图6给出了侧散射的一般情况下的平面视图。

图6  
侧散射几何关系的平面视图



计算从站1到雨区中心的水平距离，雨区中心定义为在站1的主射束轴上正对着最接近的路径的那一点的下面的地面上的那一点：

$$d_1 = r_1 \cos \varepsilon_1 \quad \text{km} \quad (99)$$

而相应的从站2到它的最接近途径的点的地平面上的投影的水平距离为：

$$d_2 = r_2 \cos \varepsilon_2 \quad \text{km} \quad (100)$$

在站1的主射束轴上最接近途径的那一点离地面的高度为：

$$h_0 = |r_1| \sin \varepsilon_1 \quad \text{km} \quad (101)$$

在不存在主射束与主射束耦合的情况下，站2主射束轴上最接近途径的那个点的高度为：

$$h_{1,2-0} = |r_{1,2}| \sin \varepsilon_{1,2} - h_{c1,2} \quad \text{km} \quad (102)$$

在侧散射情况下，与雨区相联系的各高度参数必须对离大圆路径的任何偏移做出修正。两个站之间离大圆路径的距离为：

$$d_p = d_1 \sin \alpha_1 \quad (103)$$

而角的间隔为：

$$\delta_p = \frac{d_p}{r_{eff}} \quad \text{km} \quad (104)$$

现在计算侧散射的修正量：

$$h_{c1,2} = (r_{eff} + h_{1,2}) \left( \frac{1}{\cos(\delta_p)} - 1 \right) \quad \text{km} \quad (105)$$

请注意，也可以把这一修正量应用于与雨区相关的其他参数，即降雨高度 $h_R$ 和积分的上限 $h_{top}$ ，而且在计算气体衰减时（见步骤8），这一修正量需要使用当地的各个参数。

现在，已经确定了用于确定雨区相对于各站的位置和用于计算由降雨散射引入的传输损耗的主要静态几何参数。现在有必要研究一下有关积分元的几何关系，积分元可能是在雨区内的任何地方，一直到预定的积分上限 $h_{top}$ 为止，以便确定在雨区内每一点处的天线增益和在雨区内每一站的方向上的路径衰减。为了完成这一工作，应该把坐标系改变为以雨区为中心的圆柱坐标 $(r, \varphi, h)$ 。

#### 步骤4：确定用于天线增益计算的几何关系

为了用这样一个天线的辐射图来计算在坐标 $(r, \varphi, h)$ 处的积分元的每一天线的增益和在雨区内的路径衰减，必须计算在积分元位置上的偏视轴角和在每一站的方向上从积分元到雨区边缘的路径长度。图7示出了其几何关系。图中A点代表在坐标 $(r, \varphi, h)$ 处任何积分元，而点B是这一点在地平面上的投影。几何关系的平面视图如图8所示。

图7

用于确定雨区内的天线增益和路径衰减的几何关系

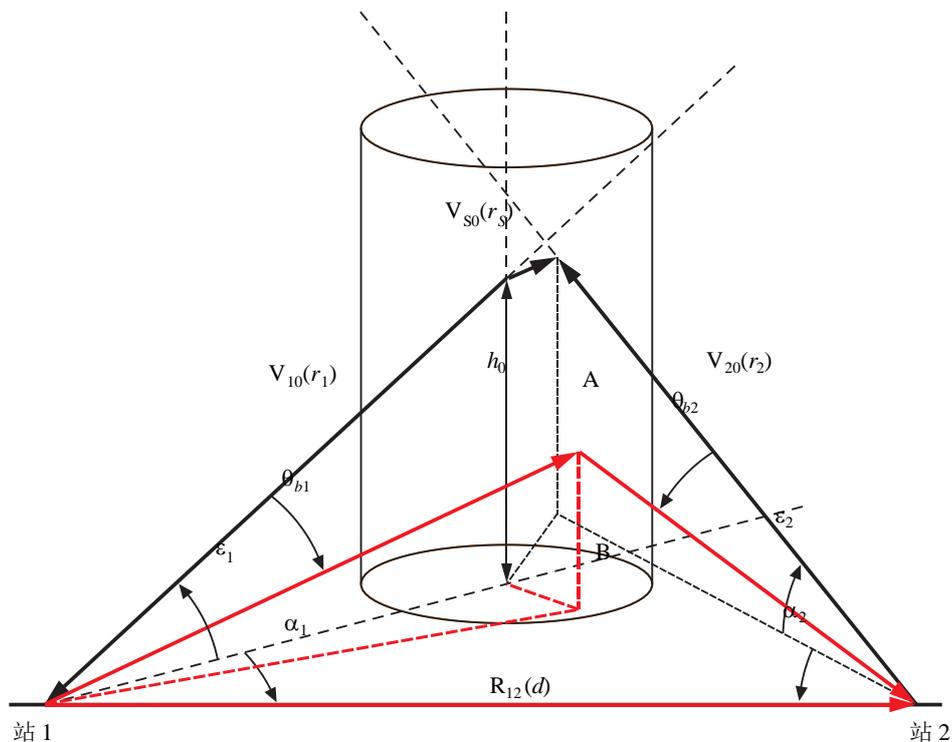
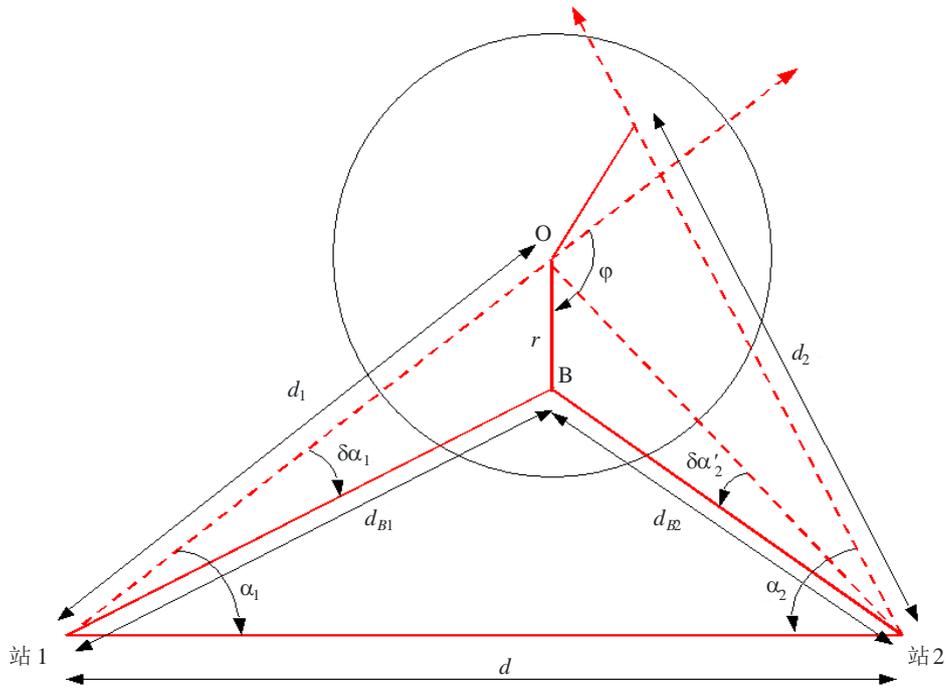


图8  
用于确定天线增益的几何关系的平面视图



P.0452-08

计算从站1到点B的水平距离：

$$d_{B1} = \sqrt{r^2 + d_1^2 + 2rd_1 \cos \varphi} \quad \text{km} \quad (106)$$

而在这个路径和站1天线的主射束轴的水平投影之间的夹角为：

$$\delta\alpha_1 = \arcsin\left(\frac{r \sin \varphi}{d_{B1}}\right) \quad (107)$$

从站1看点A的俯仰角由下式求出：

$$\varepsilon_{A1} = \arctan\left(\frac{h}{d_{B1}}\right) \quad (108)$$

从站1到点A的单位长度矢量定义为：

$$\mathbf{V}_{A1} = \begin{bmatrix} \cos\varepsilon_{A1} \cos(\alpha_1 - \delta\alpha_1) \\ -\cos\varepsilon_{A1} \sin(\alpha_1 - \delta\alpha_1) \\ \sin\varepsilon_{A1} \end{bmatrix} \quad (109)$$

计算点  $(r, \varphi, h)$  对站1天线的天线偏视轴角为：

$$\theta_{b1} = \arccos(\mathbf{V}_{A1} \cdot \mathbf{V}_{10}) \quad (110)$$

从站1到点A的距离为:

$$r_{A1} = \frac{d_{B1}}{\cos \varepsilon_{A1}} \quad \text{km} \quad (111)$$

并且注意到矢量 $\mathbf{R}_{12}$ 、 $\mathbf{R}_{A2}$ 和 $\mathbf{R}_{A1} = r_{A1}\mathbf{V}_{A1}$ 形成一闭合三角形, 从站2指向点A ( $r, \varphi, h$ ) 的矢量可以由下式求出:

$$\mathbf{R}_{A2} = \mathbf{R}_{12} - r_{A1}\mathbf{V}_{A1} \quad \text{km} \quad (112)$$

则从站2到点A的距离可由下式求出:

$$r_{A2} = |\mathbf{R}_{A2}| \quad \text{km} \quad (113)$$

而在积分元方向上, 从站1到点A的单位矢量为:

$$\mathbf{V}_{A2} = \frac{\mathbf{R}_{A2}}{r_{A2}} \quad (114)$$

然后, 用坐标 ( $r, \varphi, h$ ) 计算点A处积分元的站2天线的偏视轴角:

$$\theta_{b2} = \arccos(-\mathbf{V}_{A2} \cdot \mathbf{V}_{20}) \quad (115)$$

上面的计算天线增益的方法仅适用于圆天线。若站1的天线是扇区天线或全向天线, 例如点对多点广播系统中所用的天线那样, 使用稍有不同的方法来计算天线增益, 仅在垂直方向上增益有变化(在雨区所覆盖的区域内)。在这种情况下, 由下面更简单的公式计算在垂直方向上的偏视轴角:

$$\theta_{b1} = |\varepsilon_{A1} - \varepsilon_1| \quad (116)$$

同样, 若站2的天线是扇区天线或全向天线, 可以由下式计算垂直方向上的偏视轴角:

$$\theta_{b2} = |\varepsilon_{A2} - \varepsilon_2| \quad (117)$$

其中:

$$\varepsilon_{A2} = \arctan\left(\frac{h}{d_{B2}}\right) \quad (118)$$

和

$$d_{B2} = \sqrt{d^2 + d_{B1}^2 - 2d \cdot d_{B1} \cos(\alpha_1 - \delta\alpha_1)} \quad \text{km} \quad (119)$$

重要的是要记住, 在典型的天线辐射图中所用的偏视轴角习惯上是以前度来表示的, 而通常在大多数软件包中的三角函数是用弧度来表示的。所以, 将这些角应用于积分程序之前, 通常必须做一个简单的变换, 从弧度变换为度。

然后，可以从天线的辐射图、天线的最大增益和偏视轴角求得天线增益。在雨区内，偏视轴角是位置的函数。作为默认值，可以使用ITU-R P.620（还有ITU-R.F.699）或ITU-R F.1245建议书中任一个建议的辐射图，要注意的是后一建议中旁瓣电平更低一些。请注意，要求增益用线性项来积分。

#### 步骤5：计算雨区内的路径长度

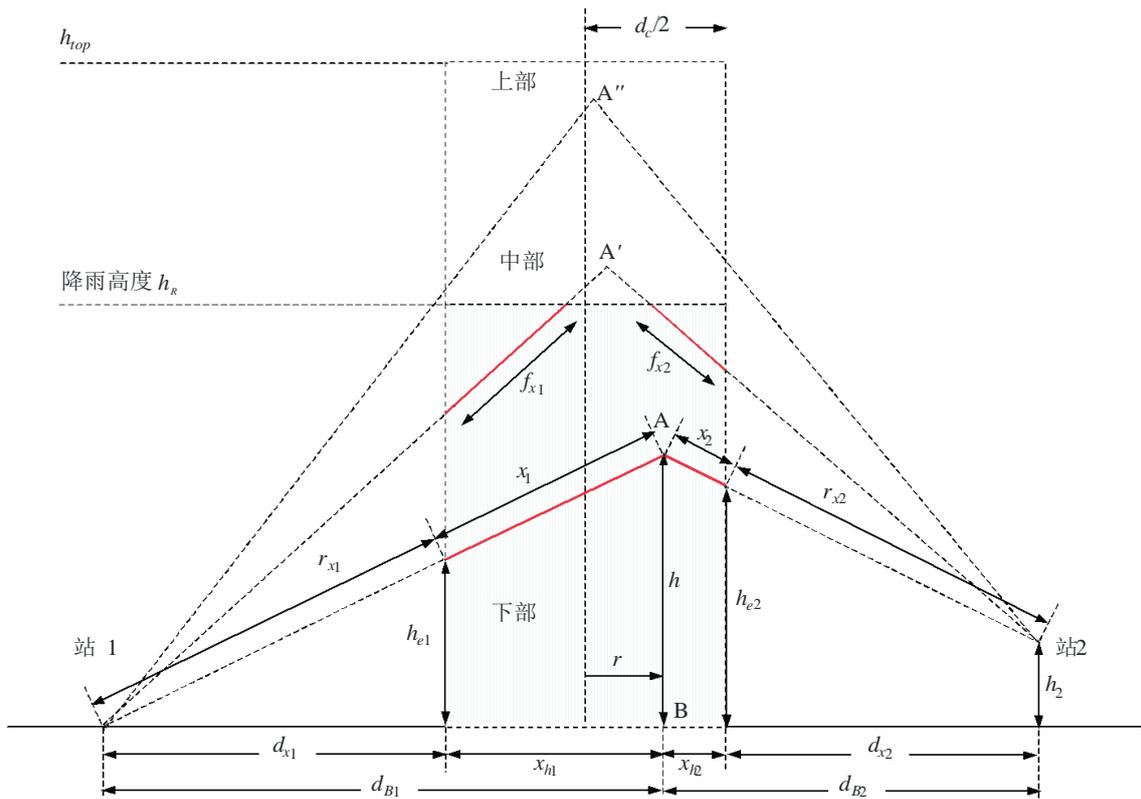
现在来计算从积分元到每一个站，即 $A_1$ 和 $A_2$ 中的每一个站的路径损耗，它取决于路径长度和积分元在雨区内的位置。

如图9所示，雨区被分成三部分。在较低的部分中，在整个雨区内散射横截面为常数，它由地平面处的雷达反射率 $Z_R$ 来确定，而 $\zeta(h)=1$ 。雨区内朝每一站的方向上的路径 $x_1$ 和 $x_2$ 会受到降雨引起的衰减。在中间部分，积分元位于降雨高度以上，散射横截面是高于降雨高度的高差的函数，以 $-6.5$  dB/km的速率减小。然而，每一路径中仍有路径的一部分 $f$ 通过降雨高度以下的有雨的区域， $f$ 的大小与几何条件有关。所以，这些路径中由于通过雨区中的那部分路径长度 $fx_{1,2}$ 会受到降雨引起的附加衰减。在上面的部分中，积分元在降雨区以上，路径的任何部分都不通过降雨高度以下的降雨区。所以，这样的路径不会受到降雨引起的任何衰减。

现在用下面的步骤来计算这三部分中的路径长度。

图9

降雨区内的积分体积



P.0452-09

下部

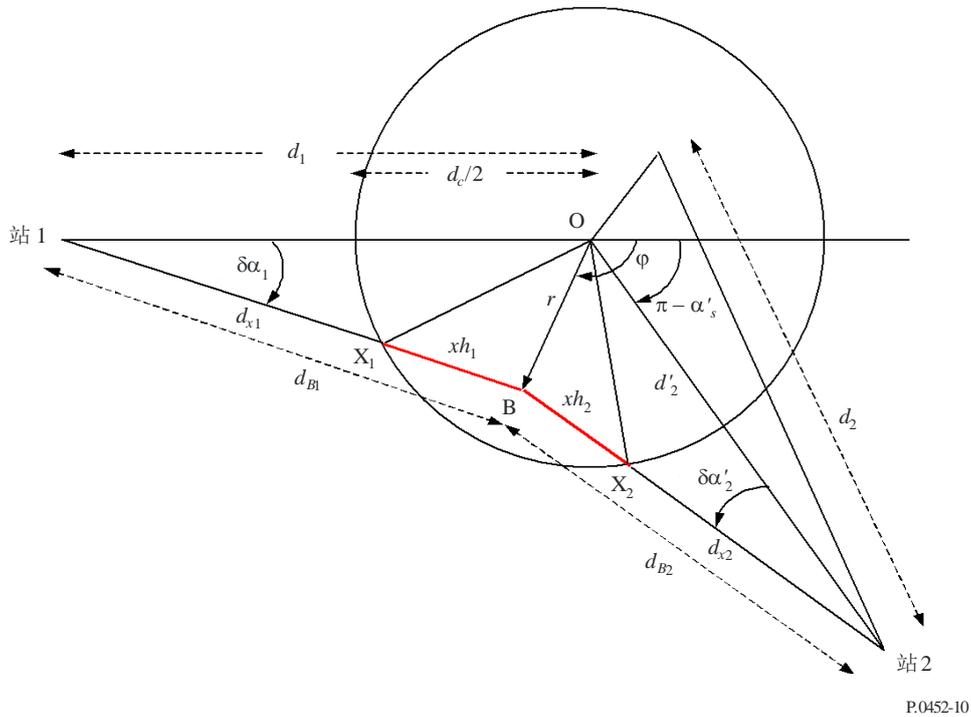
在较低的部分，积分元总是低于降雨高度 $h_R$ ，所以，在雨区内的路径都受到降雨引起的衰减，即

$$A_{1,2} = \gamma_{R1,2} x_{1,2} \quad \text{dB} \tag{120}$$

其中： $\gamma_{R1,2} = k_{1,2} R^{\alpha_{1,2}}$  是降雨比衰减，单位为dB/km。系数 $k_{1,2}$ 和 $\alpha_{1,2}$ 是频率 $f$ 、极化 $\tau$ 和俯仰角 $\epsilon_{1,2}$ 的函数，在ITU-R P.838建议书中给出。请注意，降雨比衰减取决于路径的俯仰角，并且原则上，应该对每一坐标 $(r, \varphi, h)$ 的值的每一积分元作计算。但是，若随俯仰角的变化不大，只要根据相关的天线俯仰角对朝每一站的路径的 $\gamma_R$ 计算一次数值就足够了。

路径长度 $\gamma_{x1}$ 、 $\gamma_{x2}$ 、 $x_1$ 和 $x_2$ 是由几何条件按如下方法求出的。图10表示积分元A通过地平面投影点B的水平平面视图。这里，假设一开始站2的修正高度 $h_2$ 为零。这一点后面加以考虑。

图10  
通过积分元的散射几何条件的平面视图



根据余弦定律，计算从站1到降雨区的边缘（点X<sub>1</sub>）的水平距离 $d_{x1}$ （取负号，因为这是最近的边缘），计算公式如下：

$$d_{x1} = d_1 \cos \delta\alpha_1 - \sqrt{d_1^2 \cos^2 \delta\alpha_1 - d_1^2 + \left(\frac{d_c}{2}\right)^2} \quad \text{km} \quad (121)$$

则到降雨区边缘的斜路径距离为：

$$r_{x1} = \frac{d_{x1}}{\cos \varepsilon_{A1}} \quad \text{km} \quad (122)$$

计算点A处的积分元对站2的偏角：

$$\delta\alpha_2 = \arctan\left(\frac{-r \sin(\varphi + \alpha'_s)}{d'_2 + r \cos(\varphi + \alpha'_s)}\right) \quad (123)$$

其中 $\alpha'_s$ 由下式求出：

$$\alpha'_s = \arcsin\left(\frac{d}{d'_2} \sin \alpha_1\right) \quad (124)$$

和

$$d'_2 = \sqrt{d^2 + d_1^2 - 2d \cdot d_1 \cos \alpha_1} \quad \text{km} \quad (125)$$

根据余弦定律求出水平距离 $d_{x2}$ ：

$$d_{x2} = d'_2 \cos \delta\alpha'_2 - \sqrt{\left(\frac{d_c}{2}\right)^2 - d_2'^2 \sin^2 \delta\alpha'_2} \quad \text{km} \quad (126)$$

计算站2到雨区边缘的距离：

$$r_{x2} = \frac{d_{x2}}{\cos \varepsilon_{A2}} \quad \text{km} \quad (127)$$

现在，必须考虑两种情况：

第1种情况：当站1位于雨区以外时，即当 $d_1 > d_c/2$ 时。在这种情况下，从积分元到站1的路径中只有一部分在雨区之内，因而会受到衰减。

第2种情况：当俯仰角很高和站1位于雨区以内时，即当 $d_1 \leq d_c/2$ 时。在这种情况下，在降雨高度以下的整个路径总在雨区以内，因而将受到衰减。

由下式求出在朝站1方向的路径上有降雨衰减的路径长度 $x_1$ ：

$$x_1 = \begin{cases} r_{A1} - r_{x1} & \text{如果 } d_1 > \frac{d_c}{2} \\ r_{A1} & \text{如果 } d_1 \leq \frac{d_c}{2} \end{cases} \quad \text{km} \quad (128)$$

并由下式计算朝站2方向的路径上有降雨衰减的路径长度 $x_2$ ：

$$x_2 = \begin{cases} r_{A2} - r_{x2} & \text{如果 } d_2 > \frac{d_c}{2} \\ r_{A2} & \text{如果 } d_2 \leq \frac{d_c}{2} \end{cases} \quad \text{km} \quad (129)$$

所以，积分元在降雨高度以下的情况下，可以由下式用线性项计算通过雨区的衰减：

$$A_b = \exp[-k(\gamma_{R1}x_1 + \gamma_{R2}x_2)] \quad \text{如果 } h \leq h_R \quad (130)$$

其中 $k = 0.23026$ 是把衰减从dB变换为Neper的一个常数。

### 中部和上部

在这些部分中，积分元在降雨高度 $h_R$ 以上，但是朝每一个站的路径中有部分可能通过降雨高度 $h_R$ 以下的有雨的区域。只有当积分元A的俯仰角 $\varepsilon_{A1,2}$ 小于在每一站处由雨区的最近的上拐角处所对的角 $\varepsilon_{C1,2}$ 时，才出现这种情况，即下列公式成立时：

$$\varepsilon_{A1} < \varepsilon_{C1} = \arctan\left(\frac{h_R}{d_{x1}}\right)$$

和：

$$\varepsilon_{A2} < \varepsilon_{C2} = \arctan\left(\frac{h_R - h_2}{d_{x2}}\right)$$

在这些情况下，必须要考虑所引起的衰减。这对上面的情况2) 特别适用，即对当天线之一的俯仰角很高并且该站位于雨区以内时特别适用。

从图9可知，根据从每一个站到降雨区的边缘和到点B的两水平距离之比，就可以求出从A点处的积分元发出的射线通过降雨区的边缘的高度：

$$\begin{aligned} h_{e1} &= h \cdot \frac{d_{x1}}{d_{B1}} \\ h_{e2} &= (h - h_2) \cdot \frac{d_{x2}}{d_{B2}} + h_2 \end{aligned} \quad \text{km} \quad (131)$$

然后，可以用下式从比值计算出路径中通过降雨区的那部分长度 $f_{x1,2}$ ：

$$f_{x1,2} = \begin{cases} x_{1,2} \left( \frac{h_R - h_{e1,2}}{h - h_{e1,2}} \right) & \text{如果 } h > h_R > h_{e1,2} \quad \text{和 } \varepsilon_{A1,2} < \varepsilon_{C1,2} \quad \text{km} \\ 0 & \text{否则} \end{cases} \quad (132)$$

最后，计算积分元在降雨高度 $h_R$ 以上的情况下用线性项表示的衰减：

$$A = \exp\left[-k\{6.5(h - h_R) + \gamma_{R1}f_{x1} + \gamma_{R2}f_{x2}\}\right] \quad \text{对于 } h \geq h_R \quad (133)$$

因而，这一步确定了散射传递函数的被积函数。

#### 步骤6：降雨区以外的衰减

在这里所用的公式中，降雨仅限于由步骤2中由几何条件所确定的直径为 $d_c$ 的一个区，而且认为在该区内降雨率是均匀的。通常，降雨将延伸到这一区域以外，随着离雨区中心的距离增加强度将逐步降低，这一点是必须加以考虑的。但是，若该站位于雨区以内，则对此站将不需考虑外面的雨衰。而且，若积分元在降雨高度以上足够远，到任一站的路径中没有任何部分通过降雨区，则沿该路径不考虑外面的衰减。

作为近似表达式，假定在雨区以外的降雨强度按下式所定义的换算距离而减小：

$$r_m = 600R^{-0.5}10^{-(R+1)^{0.19}} \quad \text{km} \quad (134)$$

散射低于降雨高度时，用下式计算雨区以外的衰减：

$$A_{\text{ext},1,2} = \begin{cases} \frac{\gamma_{R1,2} r_m}{\cos \varepsilon_{A1,2}} \left[ 1 - \exp\left(-\frac{d_{x1,2}}{r_m}\right) \right] & \text{如果 } d_{1,2} > \frac{d_c}{2} \quad \text{and } f_{x1,2} \neq 0 \\ 0 & \text{如果 } d_{1,2} \leq \frac{d_c}{2} \quad \text{or } f_{x1,2} = 0 \end{cases} \quad \text{dB} \quad (135)$$

即若相关的站位于雨区以内 ( $d_{1,2} \leq d_c/2$ ) 或若积分元位于降雨区以上并且路径中任何部分都不通过降雨区, 则沿任一路径的衰减都置为零, 即沿任一路径的衰减由通过降雨区的那部分路径的长度  $f_{x1,2}$  是否为零来决定。

步骤7: 散射传递函数的数值积分

该积分分成两部分, 即降雨高度以下的散射和降雨高度以上的散射:

$$C_b = \int_{h_{\min}}^{h_R} \int_0^{2\pi} \int_0^{\frac{d_c}{2}} \frac{G_1 G_2}{r_{A1}^2 r_{A2}^2} \exp[-k(\gamma_{R1} x_1 + \gamma_{R2} x_2 + A_{ext1} + A_{ext2})] \cdot r dr d\phi dh \quad (136)$$

$$C_a = \int_{h_R}^{h_{top}} \int_0^{2\pi} \int_0^{\frac{d_c}{2}} \frac{G_1 G_2}{r_{A1}^2 r_{A2}^2} \exp[-k(6.5(h - h_R) + \gamma_{R1} f_{x1} + \gamma_{R2} f_{x2} + A_{ext1} + A_{ext2})] \cdot r dr d\phi dh \quad (137)$$

其中天线增益用线性项表示, 它是偏视轴角  $\theta_{b1,2}(r, \phi, h)$  的函数, 其中:

$$r_{A1,2}(r, h, \phi) = \sqrt{(r \cos \phi - d_{1,2})^2 + r^2 \sin^2 \phi + (h - h_{1,2})^2} \quad \text{km} \quad (137a)$$

积分在圆柱坐标中完成。积分范围为  $r$  从 0 到雨区的半径  $d_c/2$ , 而  $\phi$  从 0 到  $2\pi$ 。对第 3 个积分变量  $h$ , 即雨区内的高度可能有某些限制条件。最低高度  $h_{\min}$  由从每一个站对雨区的可视度来决定。若在任何一个站的附近有任何地形上的屏蔽, 在雨区内从任一个站无法看到的高度上的散射应该从积分中排除出去。所以, 进行积分的最低高度可以根据每一个站的视线角求出, 表示为:

$$h_{\min} = \max(d_{x1} \tan \varepsilon_{H1}, d_{x2} \tan \varepsilon_{H2}) \quad \text{km} \quad (138)$$

请注意, 这里要用当地的数值, 因为在零俯仰角下由于地球曲率引起的固有屏蔽在计算偏视轴角时早就考虑到了。

为了减少所需要的计算量, 可以规定积分的最大高度  $h_{top}$ , 因为通常在旁瓣电平大大降低的高度处的散射横截面是不必要进行积分的。默认值是最大高度 15 km; 在这个高度以上积分终止可能没有精度的损失。

天线的近场强度主要取决于具体的硬件详情, 基本的干扰分析可能无法随时提供此类信息。因此, 最好假设场强大约在远场区域开始时测得的场强的一个数量级上。考虑到近场强度的实际测量结果, 这种近似是普遍成立的。

应用近似的近场散射功率的步骤:

- 1) 确定发射机或接收机的近场半径  $d_{nf} = \frac{2cG}{\pi^2 f}$  是否包含在雨区的半径范围内。此时的条件为  $d_{1,2} + d_{nf} < d_c/2$ 。如果只有部分包含，使得  $d_{1,2} - d_{nf} < d_c/2$ ，则近似假定全部包含。
- 2) 对等式(136)和(137)的积分步骤应用以下条件：

如果  $r_{A1,2} < r_{nf}$  那么  $r_{A1,2} = r_{nf}$ 。

数值积分：有许多可用于数值积分的方法，许多数学软件包包含可以有效地利用的固有积分函数。当用户希望用其他编程语言开发的专用软件包时，已经证明基于二段迭代技术的那些方法是有效的。Romberg法就是一个这样的技术，它是基本的梯形（即Simpson的）法则的一个高阶变量，以使用积分间隔的连续二分切割进行积分。

Romberg法使用两种数值方法的组合来对常义积分作近似计算，即

$$I = \int_a^b y(x) dx$$

将广义的梯形法则应用于计算对积分的近似序列，积分区间在函数估计值之间，在每一项之间除以2分开区间。然后用多项式外推法把该序列外推到区间长度为零。可以用如下伪码环对该方法加以总结：

*Index* = 1

WHILE estimated\_error > desired\_error DO

*S(Index)* = Trapezoidal Rule Approximation using  $2^{Index}$  intervals

*I* = Polynomial Extrapolation of *S*

*Index* = *Index* + 1

ENDWHILE

广义梯形法则

在  $N + 1$  个等间隔坐标  $(x_i, y_i)$  之间线性内插，就可近似求出该积分：

$$I \approx T^N = h(N) \left( \frac{1}{2} y_0 + y_1 \cdots y_{N-1} + \frac{1}{2} y_N \right)$$

其中：

$h(N) = \frac{b-a}{N}$ ：是坐标之间的间隔。

用递归法，可以将间隔的数目加倍：

$$T^{2N} = \frac{1}{2} T^N + h(2N) (y_1 + y_3 \cdots y_{N-3} + y_{N-1})$$

Romberg法递归地生成一个序列  $S(i) = T^{2^i}$ 。

多项式外推：在极限情况下，对 $I$ 的广义梯形近似的误差是 $h^2$ 的一个多项式，即：

$$I = T^N + \varepsilon^N$$

其中：

$$\varepsilon^N \cong P(h^2(N))$$

和

$P$ ：是一个未知多项式。

梯形近似的序列 $T_N = 1 - \varepsilon^N$ 也是 $h^2$ 的一个多项式，所以可以用多项式外推法来估算 $h \rightarrow 0$ 时的极限。若 $m$ 梯形近似是可以得到的，则可以将 $M-1$ 阶的独特多项式与对 $n = 1, 2, 4, 8, \dots, 2^{M-1}$ 的各点 $(h^2(n), T^n)$ 相拟合。求出 $h = 0$ 时的独特多项式，就得到了对梯形法极限的近似值。

通常，用Neville法计算 $h = 0$ 时该多项式的值。Neville法是有用的，并且产生一个误差估计值，它可以被用于结束Romberg积分的运算。这一方法是对高阶拉格朗日多项式内插的连续线性内插近似。将拉格朗日法介绍如下。对 $M + 1$ 个点 $(x_i, y_i)$ ，可以将 $m$ 阶的多项式定义为如下基本函数的线性组合：

$$P(x) \equiv \sum_{i=0}^n y_i L_i(x) \equiv \sum_{i=0}^n y_i \prod_{\substack{k=0 \\ k \neq i}}^n \frac{(x - x_k)}{(x_i - x_k)}$$

即

$$L_i(x) = \frac{(x - x_0) \dots (x - x_{i-1})(x - x_{i+1}) \dots (x - x_n)}{(x_i - x_0) \dots (x_i - x_{i-1})(x_i - x_{i+1}) \dots (x_i - x_n)}$$

这个内插法需要知道所有的纵坐标 $y_i$ ，以便求出 $x = 0$ 时解的估计值。而对大型问题，这是没有用的，因为迭代到更高阶时，它不能使用以前的内插。Neville法是一个递归过程，它基于在一个多项式的近似和它的前两个近似之间的关系。所以，对于任何两个点，有一零阶独特多项式，即通过这两点的一条直线 $p_k = y_k$ 。进行第2次迭代，在迭代中通过多对产生 $P_{12}$ 、 $P_{23}$ ...的点拟合该多项式，并且重复该程序，建立一个近似值的金字塔：

$$\begin{array}{cccc}
 P_1 & & & \\
 & P_{12} & & \\
 P_2 & & P_{123} & \\
 & P_{23} & & P_{1234} \\
 P_3 & & P_{234} & \\
 & P_{34} & & \\
 P_4 & & & 
 \end{array}$$

则最后结果可以表示为:

$$P_{i(i+1)\dots(i+m)} = \frac{(x - x_{i+m})P_{i(i+1)\dots(i+m-1)} + (x_i - x)P_{(i+1)(i+2)\dots(i+m)}}{x_i - x_{i+m}}$$

所以, Neville法是用一种有效的计算方法来完成金字塔形的逐列排列的递归过程。

实际上, 当大量的点进行拟合时, 多项式外推变得不稳定, 所以通常在Romberg积分中, 使用四阶多项式外推, 以拟合最后五个梯形近似值。

数值积分法, 如使用二分技术这样的方法, 迭代到精确(精)度标准被满足为止; 当连续的迭代之间的差值小于前一结果的预定的比例时, 迭代过程结束。

通常, 这一比值在 $10^{-3}$ 和 $10^{-6}$ 之间, 后一数值接近32位处理器的能力。当使用超过这个范围的更大的数值时应该非常谨慎, 因为所计算出的损耗中的误差可能增加。作为一般指导原则, 已经发现使用 $10^{-4}$ 的值较好地兼顾了精确度和计算速度。

为了在圆柱坐标内完成沿降雨区的三维体积分, 需要三个嵌套的数值积分, 例如外层积分是在高度参数 $h$ 上进行积分。这个积分调用在特定的 $h$ 值时的沿方位参数 $\varphi$ 的积分, 在方位参数上的积分转而调用在特定的 $(h, \varphi)$ 值下的在径向参数 $r$ 上的积分。

应该指出, 为了达到所要求的精度, 通常有必要进行散射传递函数的多次迭代, 特别是当天线增益很高, 而且两天线的增益之积在雨区的直径范围内可能会有60 dB或更大的变化时更是如此。所以, 计算时间可能需要数十分钟。对于极其复杂的情况, 即使使用高速的处理器也可能要用数小时计算时间。

#### 步骤8: 确定其他损耗因素

使用公式(76), 以公式(91)给出的散射角 $\varphi_s$ 计算与瑞利散射的偏差。

利用ITU-R P.676建议书的附件2中分别关于干燥空气和水蒸气的比衰减 $\gamma_0$ 和 $\gamma_w$ 的数据以及等效高度 $h_0$ 和 $h_w$ , 计算沿该路径由大气吸收引起的衰减。利用下面的关于两个海拔高度之间路径衰减的表达式来确定衰减, 而上面的高度由两个天线射束主轴之间的准相交点的高度来确定。这个方法是近似的, 因为对散射体内的每一散射元, 实际的气体衰减将是变化的。然而, 因为在总的传输损耗中, 气体衰减通常是很小的部分, 它的变化不大。当与其他参数(诸如降雨速率、降雨高度和降雨区本身的几何参数)的不可靠性相比较时, 可以认为这一简化是合理的。下面的方法提供了气体衰减的估计值, 整个程序的精度是可以接受的。

用当地的值 $h_{1\_loc} = h_1$ 和 $h_{2\_loc}$ 给出每一站的较低的高度。上面的高度 $h_p$ 是考虑了地球曲率后准相交点的高度，即当地的数值。它由下式求出：

$$h_p = h_0 + \sqrt{d_1^2 + r_{eff}^2} - r_{eff} + h_c \quad \text{km} \quad (139)$$

俯仰角在 $5^\circ$ 和 $90^\circ$ 之间时，两个高度之间的衰减根据每一高度下的总倾斜路径衰减之间的差值来求出。

$$A_{o\_i} = \frac{\gamma_o h_o - \gamma_o h_o \left[ \exp\left(-\frac{h_{i\_loc}}{h_o}\right) - \exp\left(-\frac{h_p}{h_o}\right) \right]}{\sin \varepsilon_{i\_loc}} \quad \text{dB} \quad (140)$$

$$A_{w\_i} = \frac{\gamma_w h_o - \gamma_w h_o \left[ \exp\left(-\frac{h_{i\_loc}}{h_w}\right) - \exp\left(-\frac{h_p}{h_w}\right) \right]}{\sin \varepsilon_{i\_loc}} \quad \text{dB} \quad (141)$$

其中下标 $i$ 表示两个站中的每一个站，而 $\varepsilon_{i\_loc}$ 是每一天线的本地俯仰角。

用于确定比衰减 $\gamma_w$ 的水蒸气密度 $\rho$ 是各站上从地平面的数值求出的假想的海拔高度的数值（假设它们是相同的）：

$$\rho = \rho_g \exp\left(\frac{h_{i\_loc}}{2}\right) \quad \text{g/m}^3 \quad (142)$$

俯仰角在 $0^\circ$ 和 $5^\circ$ 之间时，必须考虑折射效应。上面路径的俯仰角由下式求出：

$$\varepsilon'_{1,2} = \arccos\left(\frac{h_{1,2} + r_{eff}}{h_p + r_{eff}} \cos \varepsilon_{1,2\_loc}\right) \quad (143)$$

然后由下面各式求出路径衰减。

对于干燥空气的衰减：

$$A_{o\_i} = \gamma_o \sqrt{h_o} \left[ \frac{\sqrt{h_{i\_loc} + r_{eff}} \cdot F \left( \tan \varepsilon_i \sqrt{\frac{h_{i\_loc} + r_{eff}}{h_o}} \right) \exp \left( -\frac{h_{i\_loc}}{h_o} \right)}{\cos \varepsilon_{i\_loc}} \right. \\ \left. \frac{\sqrt{h_p + r_{eff}} \cdot F \left( \tan \varepsilon'_i \sqrt{\frac{h_p + r_{eff}}{h_o}} \right) \exp \left( -\frac{h_p}{h_o} \right)}{\cos \varepsilon'_i} \right] \quad \text{dB} \quad (144)$$

而对水蒸气的衰减:

$$A_{w\_i} = \gamma_w \sqrt{h_w} \left[ \frac{\sqrt{h_{i\_loc} + r_{eff}} \cdot F \left( \tan \varepsilon_i \sqrt{\frac{h_{i\_loc} + r_{eff}}{h_w}} \right) \exp \left( -\frac{h_{i\_loc}}{h_w} \right)}{\cos \varepsilon_{i\_loc}} \right. \\ \left. \frac{\sqrt{h_p + r_{eff}} \cdot F \left( \tan \varepsilon'_i \sqrt{\frac{h_p + r_{eff}}{h_w}} \right) \exp \left( -\frac{h_p}{h_w} \right)}{\cos \varepsilon'_i} \right] \quad \text{dB} \quad (145)$$

其中函数 $F$ 的定义如下:

$$F(x) = \frac{1}{0.661x + 0.339\sqrt{x^2 + 5.51}} \quad (146)$$

还包含任何适用的极化失配 $M$ 。

步骤9: 计算传输损耗的累积分布

对每一对降雨速率和降雨高度值的组合, 用下式根据步骤5到步骤8计算传输损耗:

$$L = 178 - 10 \log N - 20 \log f - 10 \log Z_R - 10 \log (C_b + C_a) - 10 \log S + A_s - M \quad \text{dB} \quad (147)$$

在计算完所有可能的降雨速率和降雨高度的组合以后, 就得到传输损耗值, 单位为dB。然后, 将它截取到最接近的高的那个整数dB值(例如用最高限值函数)和求产生相同损耗的所有那些组合的概率(用百分数)之和, 再导出每一传输损耗电平的总概率。然后, 用对增加的损耗值的百分数求和的方法, 把所得到的概率密度函数变换为相应的传输损耗的累积分布。

## 附件1的 后附资料1

### 净空预测程序所需要的无线电气象数据

#### 1 引言

净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）干扰机理，用平均年的 $\Delta N$ 值（大气的第1公里上的折射指数梯度）来表征该路径的净空无线电气象；而对异常（短期）机理，由低层大气的折射梯度低于 $-100 \text{ N单位/km}$ 的时间百分比来表征该路径的净空无线电气象。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中所描述的净空传播机理的模型。平均海平面折射率 $N_0$ 被用于对流层散射模型的计算。

如果未得到局部测量结果，这些量可从[REC-P.452-16 Supplement ZIP](#)压缩文件随本件书提供的综合数字产品地图中获得。这些数字地图是对历经十年（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 $0^\circ$ 至 $360^\circ$ ，纬度范围从 $+90^\circ$ 至 $-90^\circ$ ，而经纬度的分辨率为 $1.5^\circ$ 。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文件相应条目（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，对位于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7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。

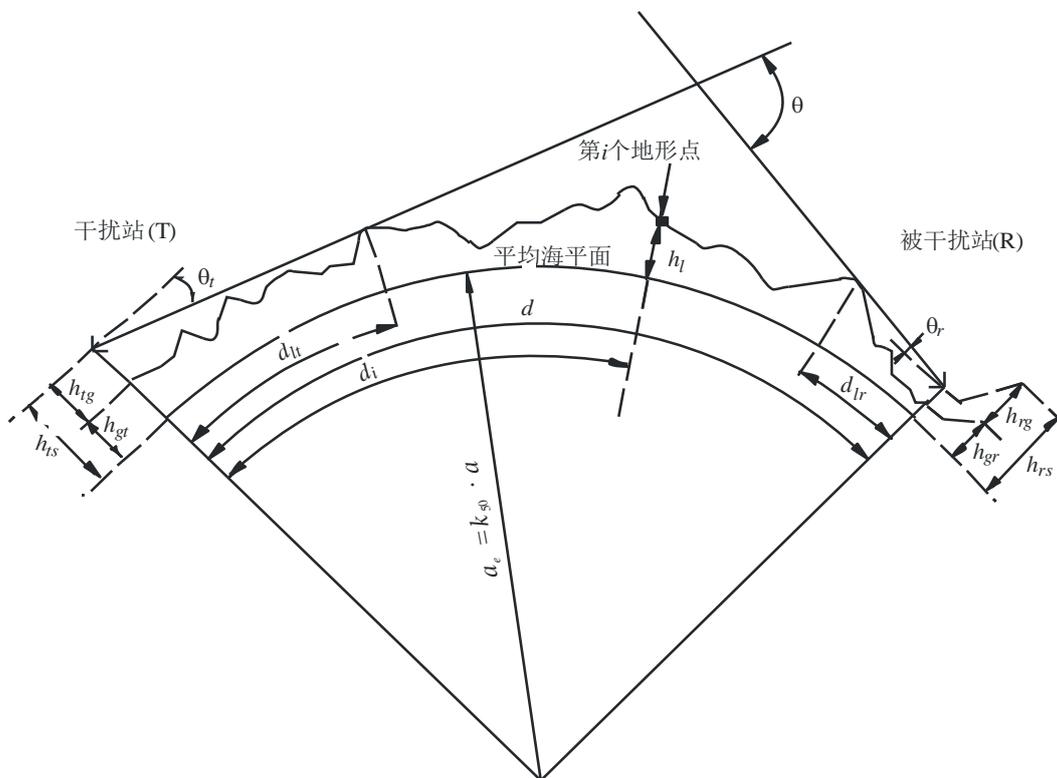
2 路径剖面图的制作

根据干扰站 ( $\varphi_t, \psi_t$ ) 和被干扰站 ( $\varphi_r, \psi_r$ ) 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和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。必要时应该根据公式(6a)求出的 $a_e$ 值, 在下列公式中纳入地球曲率。

虽然推荐使用等间距剖面图的点, 但也可以用非等间距断面图的点。当从地形等高线的数字地图做该剖面图时, 不等间距剖面的点可能是有用的。但是, 应该指出, 本建议是用等间距剖面图点用测试法开发出来的, 无法取得非等间距点对准确度的影响的资料。

为使用本建议, 将干扰源处的路径剖面视为零点, 而将被干扰站的点视为 $n$ 点。所以, 路径剖面图由 $n + 1$ 个点组成。图11给出了地形平均海拔高度的路径剖面图的一个例子, 图中示出了与实际地形有关的各个参数。

图11  
(对流层散射) 路径剖面图实例



P.0452-11

注1 - 所画出的 $\theta_r$ 值将是负值。

表7定义了路径剖面分析时所使用的或所导出的参数。

表7

路径断面的参数定义

参数	描述
$a_e$	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)
$d_{ii}$	对常规路径剖面图数据的距离增量 (km)
$f$	频率 (GHz)
$\lambda$	波长 (m)
$h_{ts}$	干扰源天线的平均海拔 (amsl) 高度 (m)
$h_{rs}$	被干扰天线的高度 (m) (amsl)
$\theta_t$	对于超视距路径, 从干扰天线起计算的当地视界线以上的水平仰角 (mrad)。对于视距路径, 该参数应为被干扰天线的仰角
$\theta_r$	对于超视距路径, 从被干扰天线起计算的当地视界线以上的水平仰角 (mrad)。对于视距路径, 该参数应为干扰天线的仰角
$\theta$	路径的角距 (mrad)
$h_{st}$	在干扰站位置处光滑地球表面的高度 (m) (amsl)
$h_{sr}$	在被干扰站位置处光滑地球表面的高度 (m) (amsl)
$h_i$	第 <i>i</i> 个地形点的高度 (m) (amsl) $h_0$ : 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 ( $\varphi_t, \psi_t$ ) 和被干扰站的地理坐标 ( $\varphi_r, \psi_r$ ) 得出的大圆尺寸计算路径长度。另外, 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:

$$d = \sum_{i=1}^n (d_i - d_{i-1}) \quad \text{km} \quad (148)$$

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:

$$d = n \cdot d_{ii} \quad \text{km} \quad (149)$$

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 $d_{ir}$ 和 $d_{tr}$ 时及仰角 $\theta_{tr}$ 和 $\theta_{ir}$ 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 $a_e$ 用路径剖面图确定路径是视距的还是超视距的。

若从干扰天线看的物理视界仰角（相对于本地水平线）大于被干扰天线所对的角（仍相对于干扰天线本地水平线），则这一路径是对流层散射路径。

所以，对流层散射路径条件的识别方法是：

$$\theta_{max} > \theta_{td} \quad \text{mrad} \quad (150)$$

其中：

$$\theta_{max} = \max_{i=1}^{n-1} (\theta_i) \quad \text{mrad} \quad (151)$$

$\theta_i$ : 到第 $i$ 个地形点的仰角

$$\theta_i = 1000 \arctan \left( \frac{h_i - h_{ts}}{10^3 d_i} - \frac{d_i}{2 a_e} \right) \quad \text{mrad} \quad (152)$$

其中：

$h_i$ : 第 $i$ 个地形点的平均海拔高度（m）

$h_{ts}$ : 干扰源天线的平均海拔高度（m）

$d_i$ : 从干扰源到第 $i$ 个地形元的距离（km）

$$\theta_{td} = 1000 \arctan \left( \frac{h_{rs} - h_{ts}}{10^3 d} - \frac{d}{2 a_e} \right) \quad \text{mrad} \quad (153)$$

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）

$a_e$ : 适合于该路径的中值有效地球半径（公式(6a)）。

## 5 从路径剖面图导出各参数

### 5.1 对流层散射路径

要从路径剖面图导出的各参数是表7中列出的参数。

#### 5.1.1 干扰天线视界仰角 $\theta_t$

干扰天线的视界仰角是将公式(151)应用于 $n-1$ 个地形剖面图的高度时的最大的天线视界仰角。

$$\theta_t = \theta_{max} \quad \text{mrad} \quad (154)$$

其中 $\theta_{max}$ 根据公式(151)求出。

### 5.1.2 干扰天线的视界距离 $d_{it}$

视界距离是指根据公式(151)计算出的天线视界仰角最大的点离发射机的最短距离:

$$d_{it} = d_i \quad \text{km} \quad \text{for max } (\theta_i) \quad (155)$$

### 5.1.3 被干扰天线视界的仰角 $\theta_r$

接收天线视界的仰角是指将公式(151)应用于 $n-1$ 个地形剖面高度时得到的天线视界仰角的最大值。

$$\theta_r = \max_{j=1}^{n-1} (\theta_j) \quad \text{mrad} \quad (156)$$

$$\theta_j = \frac{h_j - h_{rs}}{d - d_j} - \frac{10^3 (d - d_j)}{2 a_e} \quad \text{mrad} \quad (157)$$

### 5.1.4 被干扰天线的视界距离, $d_{ir}$

视界距离是指根据公式(151)计算出的天线视界仰角最大的点离接收机的最短距离。

$$d_{ir} = d - d_j \quad \text{km} \quad \text{for max } (\theta_j) \quad (158)$$

### 5.1.5 角距 ( $\theta$ ) (mrad)

$$\theta = \frac{10^3 d}{a_e} + \theta_t + \theta_r \quad \text{mrad} \quad (159)$$

## 5.1.6 “平滑地球”模型和有效天线高度

### 5.1.6.1 概述

“平滑地球”表面来自剖面, 以计算有效天线高度, 用于衍射模型以及管道/层反射模型所要求的评估路径粗糙度。对于这两个目的, 有效天线高度的定义是不同的。第 5.1.6.2 子节分别描述了未修正的发射机和接收机的平滑地球表面高度的推导  $h_{st}$  和  $h_{sr}$ 。第 5.1.6.3 描述了推导模型的衍射模型  $h_{std}$ 、有效天线高度  $h_{te}$  和  $h_{re}$ , 以及地形粗糙度参数  $h_m$ 。

### 5.1.6.2 求出光滑地球表面

对具有以下形式的地形海拔高度进行直线近似:

$$h_{si} = h_{st} + m \cdot d_i \quad \text{m} \quad (160)$$

其中:

$h_{si}$ : 离干扰源  $d_i$  (km) 处最小二乘方拟合表面的海拔高度 (m)

$h_{st}$ : 在路径起点, 即在干扰站上光滑地球表面的海拔高度 (m)

$h_{sr}$ : 接收机站等路径终点的平滑地球表面高度 (m) amsl

利用公式(161)-(164)以以下方式评估 $h_{st}$ 和 $h_{sr}$  :

$$v_1 = \sum_{i=1}^n (d_i - d_{i-1})(h_i + h_{i-1}) \quad (161)$$

其中:

$h_i$ : 第 $i$ 地形点的实际海拔高度 (m)

$d_i$ : 干扰装置至 $i$ 个地面部分之间的距离 (公里)

$$v_2 = \sum_{i=1}^n (d_i - d_{i-1})[h_i(2d_i + d_{i-1}) + h_{i-1}(d_i + 2d_{i-1})] \quad (162)$$

然后用下式求出干扰站上的光滑地球表面的高度 $h_{st}$ :

$$h_{st} = \left( \frac{2v_1 d - v_2}{d^2} \right) \quad \text{m} \quad (163)$$

和用下式求出被干扰站上光滑地球表面的高度 $h_{sr}$ :

$$h_{sr} = \left( \frac{v_2 - v_1 d}{d^2} \right) \text{m} \quad (164)$$

### 5.1.6.3 衍射模型的有效天线高度

查找从发射机到接收机直线路径以上的最高障碍物高度  $h_{obs}$ , 和地平线的仰角  $\alpha_{obt}$ ,  $\alpha_{obr}$ , 基于平面地球几何形状, 根据正式:

$$h_{obs} = \max_{i=1}^{n-1} \{H_i\} \quad \text{m} \quad (165a)$$

$$\alpha_{obt} = \max_{i=1}^{n-1} \{H_i / d_i\} \quad \text{mrad} \quad (165b)$$

$$\alpha_{obr} = \max_{i=1}^{n-1} \{H_i / (d - d_i)\} \quad \text{mrad} \quad (165c)$$

其中:

$$H_i = h_i - [h_{ts}(d - d_i) + h_{rs}d_i] / d \quad \text{m} \quad (165d)$$

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  $h_{obs}$  是小于或等于0, 则:

$$h_{stp} = h_{st} \quad \text{masl} \quad (166a)$$

$$h_{srp} = h_{sr} \quad \text{masl} \quad (166b)$$

否则:

$$h_{stp} = h_{st} - h_{obs}g_t \quad \text{masl} \quad (166c)$$

$$h_{srp} = h_{sr} - h_{obs}g_r \quad \text{masl} \quad (166d)$$

其中:

$$g_t = \alpha_{obt} / (\alpha_{obt} + \alpha_{obr}) \quad (166e)$$

$$g_r = \alpha_{obr} / (\alpha_{obt} + \alpha_{obr}) \quad (166f)$$

衍射模型所要求的, 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:

$$h_{std} = h_0 \quad \text{masl} \quad (167a)$$

否则:

$$h_{std} = h_{stp} \quad \text{masl} \quad (167b)$$

如果  $h_{srp}$  大于  $h_n$ , 则:

$$h_{srd} = h_n \quad \text{masl} \quad (167c)$$

否则:

$$h_{srd} = h_{srp} \quad \text{masl} \quad (167d)$$

#### 5.1.6.4 管道/层反射模型的参数

计算粗糙度因子所需的发射机和接收机的平滑地球高度:

$$h_{st} = \min(h_{st}, h_0) \quad \text{m} \quad (168a)$$

$$h_{srr} = \min(h_{sr}, h_n) \quad \text{m} \quad (168b)$$

如果  $h_{st}$  或  $h_{sr}$  中的一个或两个由公式 (168a) 或 (168b) 修改, 则平滑地球表面的斜率  $m$  也必须修改:

$$m = \frac{h_{sr} - h_{st}}{d} \quad \text{m/km} \quad (169)$$

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

$$h_{te} = h_{tg} + h_0 - h_{st} \quad \text{m} \quad (170)$$

$$h_{re} = h_{rg} + h_n - h_{sr} \quad \text{m}$$

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

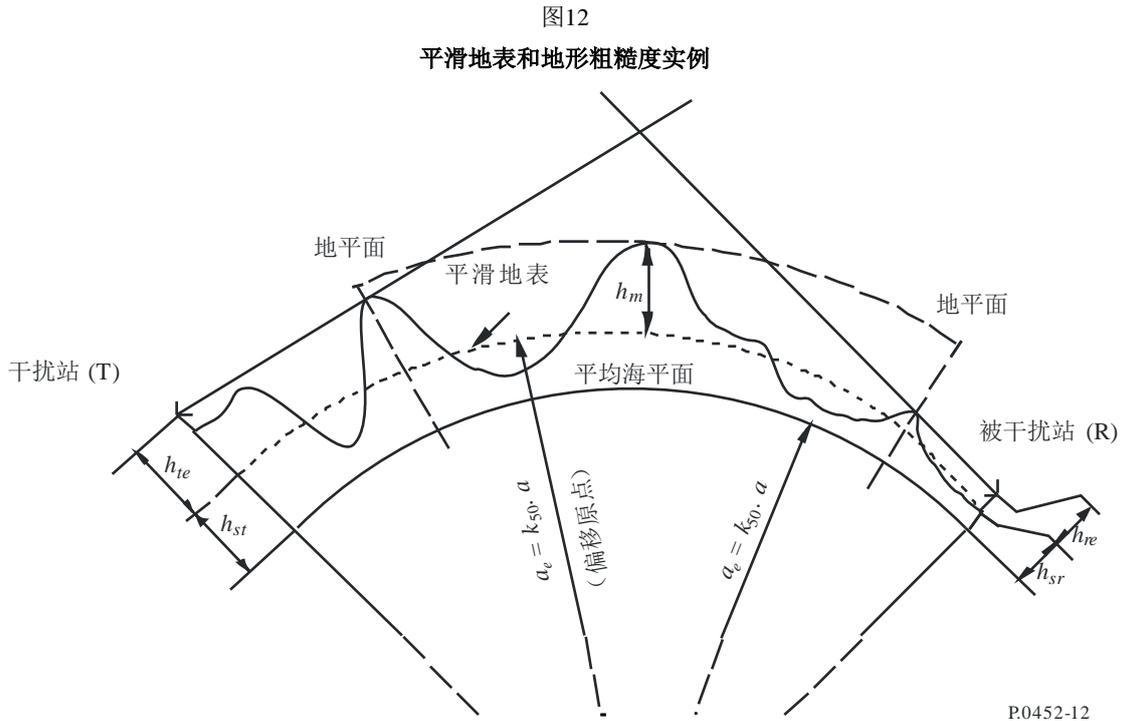
$$h_m = \max_{i=i_t}^{i_r} [h_i - (h_{st} + m \cdot d_i)] \quad \text{m} \quad (171)$$

其中:

$i_t$ : 距离发射机  $d_{it}$  处的剖面点的下标;

$i_r$ : 距离接收机  $d_{ir}$  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12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，对逆累积正态分布函数的如下近似式是正确的，并且误差最大值为0.00054。对公式(41b)中的内插函数可以在表达式中放心地使用。若 $x < 0.00001$ ，意味着 $B_0 < 0.0001\%$ ， $x$ 应该置为0.000001。而函数 $I(x)$ 由下式给出：

$$I(x) = \xi(x) - T(x) \tag{172}$$

其中：

$$T(x) = \sqrt{[-2 \ln(x)]} \tag{172a}$$

$$\xi(x) = \frac{[(C_2 \cdot T(x) + C_1) \cdot T(x)] + C_0}{[(D_3 \cdot T(x) + D_2) T(x) + D_1] T(x) + 1} \tag{172b}$$

$$C_0 = 2.515516698 \tag{172c}$$

$$C_1 = 0.802853 \tag{172d}$$

$$C_2 = 0.010328 \tag{172e}$$

$$D_1 = 1.432788 \quad (172f)$$

$$D_2 = 0.189269 \quad (172g)$$

$$D_3 = 0.001308 \quad (172h)$$

---