

国 际 电 信 联 盟

**ITU-R**

国际电联无线电通信部门

**ITU-R P.1812-1 建议书**  
(10/2009)

**VHF和UHF波段中有关点对面  
地面业务的一种路径特定的  
传播预测方法**

**P 系列**  
无线电波传播



国际电信联盟

## 前言

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

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

## 知识产权政策 (IPR)

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

### ITU-R系列建议书

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

系列	标题
<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、无线电定位、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  
2010年，日内瓦

© ITU 2010

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.1812-1建议书

**VHF和UHF波段中有关点对点地面业务的一种路径特定的传播预测方法**

(ITU-R 203/3号研究课题)

(2007-2009年)

**范围**

本建议书描述一种适于地面点对点业务的传播预测方法，其频率范围为30 MHz~3 GHz，用于详细评估超过某特定时间百分比 $p\%$ （其范围为 $1\% \leq p \leq 50\%$ ）以及某特定位置百分比 $p_L$ （其范围为 $1\% \leq p_L \leq 99\%$ ）的信号水平。该方法提供了基于地形剖面的详细分析。

该方法适于预测使用路径长度从0.25 km到大约3 000 km的地面线路的无线电通信系统，其两个终端距离地面的高度都大约为3 km。它不适于空-地或天-地无线电线路的传播预测。

本建议书用于补充ITU-R P.1546建议书。

国际电联无线电通信全会，

认识到

- a) 有必要为工程师们提供有关在VHF和UHF波段上规划地面无线电通信业务的指南；
- b) 对工作于相同或邻近频道的站，要求确定最小的地理间隔，以避免因长距离地面传播而引起的不可接受的干扰，这是一个非常重要的问题。

注意到

- a) ITU-R P.528建议书为频率范围在125 MHz~30 GHz、距离范围在1 800 km内的航空移动业务提供了有关点对点路径损耗预测的指南；
- b) ITU-R P.452建议书为详细评估频率在约0.7 GHz以上、地球表面站间的微波干扰提供了指南；
- c) ITU-R P.617建议书为频率范围在30 MHz以上、距离范围在100~1 000 km的超地平线无线电中继系统的点对点路径损耗预测提供了指南；
- d) ITU-R P.1411建议书提供了有关短距离（至1 km）户外业务预测的指南；
- e) ITU-R P.530建议书提供了有关地面视线系统点对点路径损耗预测的指南；
- f) 主要依据对实验数据所做的统计分析，ITU-R P.1546建议书提供了有关VHF和UHF波段上点对点场强预测的指南，

## 建议

- 1 应将附件1中给出的程序用于详细评估与这些业务有关的点对面信号水平。

## 附件1

## 1 引言

建议将本附件中所述的传播预测方法用于信号水平的详细评估，这些信号水平适于与VHF和UHF波段上的地面点对点业务结合起来使用。它预测超过某个特定的百分比 $p\%$ （年平均在 $1\% \leq p \leq 50\%$ 范围内）以及超过 $p_L\%$ （在 $1\% \leq p_L \leq 99\%$ 范围内）位置的信号水平（即电场强）。因此，该方法可用于预测期望信号水平（覆盖）的业务范围和可用性，以及因非期望的、共同与/或相邻信道信号（干扰）而引起的业务范围与可用性的减小。

该方法的传播模型以相同的方式来对待两个无线电终端，从这种意义上来看，它是对称的。从模型的角度来看，无论哪个终端是发射机、哪个终端是接收机并不重要。不过，为方便对模型的描述起见，术语“发射机”和“接收机”分别用于表示无线电路径起点和终点处的终端。

该方法首先根据计算的基本传输损耗（dB）来描述，对位置中值，基本传输损耗不超过 $p\%$ 时间。然后，在统计上描述与接收机位置有关的位置变异和建筑物入口损耗要素。然后提供一个程序，将1 kW的有效辐射功率转换为电场强，以dB( $\mu\text{V}/\text{m}$ )为单位。

该方法最初计划与使用低增益天线的系统一起使用。不过，当使用高增益天线时，精确性的变化只会影响到整个方法中的对流层散射要素，并且预测方面的变化很小。例如，即使在链路的两端使用40 dBi的天线，对对流层散射信号的过高估计也将大约仅为1 dB。

该方法适于预测使用路径长度从0.25 km到大约3 000 km的地面线路的无线电通信系统，其两个终端距离地面的高度都大约为3 km。它不适于空-地或天-地无线电路径的传播预测。

本附件中的传播预测方法是路径特定的。使用该方法进行点对点预测，包括一系列多个点对点（即一个发射机点对多个接收机点）预测，它们均衡地分布于理论上的业务范围。点的数量应足够多，以确保这样获得的基本传输损耗或场强的预测值，对其所代表的基本区域相应数量、有关位置的中值是合理的估计。

结果是，假设本建议书的用户能够为许多不同的终端位置（接收机点）规定详细的地形剖面（即平均海平面之上的海拔高度），作为沿大圆路径（即大地曲线）各终端间的距离函数。对该方法在点对点覆盖范围和干扰预测中的最实际应用，该假设意味着可以使用数字化地形高度数据库，涉及有关一致测地数据的纬度和经度，从中可通过自动方法提取出地形剖面。如果这些详细的地形剖面无法使用，那么ITU-R P.1546建议书应改为用于预测。



从上述角度来看，本建议书的位置可变性和建筑物入口损耗要素，通过接收机位置的对数正态分布统计数据来描述。尽管点对面传播问题的这一统计特征似乎使总的模型变得不对称起来（即非相互的），但本建议书的用户应注意到，原则上，位置可变性可应用于路径的任意一端（即任意一个终端），或者甚至可应用于路径的两端（即发射机和接收机）。不过，位置可变性修正只在以下情形下才是有意义的，即当不知道某个特定终端的准确位置、并且要求对该终端的可能位置在统计上做出表述时。不可能存在很多这样的情况，即将之用于发射机位置可能是有意义的。如果准确知道两个终端的位置，且该程序用在点对点模式中，那么只有当  $p_L=50\%$  时，本建议书才是适用的。

关于建筑物入口损耗，类似的观点是正确的。由于入口损耗经修正中值不为零这一事实，该观点比针对位置可变性的观点更复杂。在发射机一端，如果发射机位于建筑物内，那么用户还应对基本传输损耗增加建筑物入口损耗，但用户还必须意识到，如果发射机不在“中间”位置，那么表 6 中的损耗值中值可能会引起误解。

## 2 传播预测方法的模型要素

本传播预测方法考虑了以下模型要素：

- 视线
- 衍射（环绕平滑地球、不规则地形和二次路径情况）
- 对流层散射
- 不规则传播（管道和层面反射/折射）
- 地物的高增益变异
- 位置变异
- 建筑物入口损耗。

## 3 输入参数

### 3.1 基本输入数据

表 1 描述了基本输入数据，它定义了无线电终端、频率，以及需要预测的百分比时间和位置。

两个站的纬度和精度描述为基本的输入，这基于以下事实，即需要利用它们来获得路径剖面。必须为与无线电路径相关的单个位置获得无线电—气象参数必须，对长路径，应选择路径中心。当预测其覆盖范围时，为发射机位置获得无线电—气象参数是合适的。

### 3.2 地形剖面

为了应用传播预测方法，需要一个有关无线电路径的地形剖面。原则上，这由三个数组组成，各数组拥有相同数量  $n$  个值，如下所示：

$$d_i = \text{距第 } i \text{ 个剖面点发射机的距离 (km)} \quad (1a)$$

$$h_i = \text{海平面之上第 } i \text{ 个剖面点的高度 (m)} \quad (1b)$$

$$g_i = h_i + \text{第 } i \text{ 个剖面点的典型地物高度 (m)} \quad (1c)$$

其中：

$i = 1, 2, 3 \dots n$  = 剖面点下标；

$n$  = 剖面点数量。

注意，第一个剖面点位于发射机处。因此， $d_1$ 为零， $h_1$ 为发射机处、海平面以上的地形高度，以米为单位。同样，第 $n$ 个剖面点也位于发射机处。因此， $d_n$ 为路径长度，以km为单位， $h_n$ 为接收机处、海平面以上的地形高度，以米为单位。如果对路径剖面，没有任何典型的地物高度信息可用，那么 $g_i = h_i$ 。

由于不存在标准化的地物分类集，因此，本建议书不定义要用的地物类型或高度。应当注意的是，如果使用的话，那么地物高度应成为“典型的”地物高度，它改善了模型的准确度，而不应是典型地物的物理高度。处于指南之目的，表2中提供的地物类型可能是有用的。在本建议书中，将地物高度设为0，相当于消除了地物损耗。

表 1

基本输入数据

参数	单位	最小值	最大值	描述
$f$	GHz	0.03	3.0	频率 (GHz)
$p$	%	1.0	50.0	超过所计算信号水平的平均年百分比
$p_L$	%	1	99	超过所计算信号水平的位置百分比
$\phi_t, \phi_r$	deg	-80	+80	发射机、接收机的纬度
$\psi_t, \psi_r$	deg	-180.0	180.0	发射机、接收机的精度 (正数=格林威治东面)
$h_{tg}, h_{rg}$	m	1	3 000	高于地面的天线中心高度

表 2

典型的地物类型

地物类型	典型的地物高度 (m)	末端地物损耗模型
开放的/农村的/水上的	10	公式 (54b)
郊区的	10	公式 (54a)
城区的/树木的/森林的	15	公式 (54a)
密集城区的	20	公式 (54a)

### 3.3 无线电气候区域

也需要以下信息，即什么长度的路径处于如表3所示的无线电气候区域内。

为实现各主管部门间的结果最大一致性，强烈建议本程序的计算应基于国际电联数字化世界地图 (IDWM)，大型机或微机环境下的IDWM可从BR处获得。如果路径上的所有点至少距离大海或其它大的水体50 km，那么只有内陆类别可用。

表 3  
无线电气候区域

区域类型	代码	定义
沿海陆地	A1	海岸和海滨地区，即临近海、相对平均海平面或水平面最高100m的陆地，但限于距最近海域50km的距离。对准确的100m无法使用的地方，可使用一个近似值。
内陆	A2	所有陆地，海岸和海滨地区除外，如上面所定义的“海岸地区”。
海洋	B	海洋和其它大的水体（即覆盖直径至少为100 km的一个圆圈）。

### 3.4 距海岸的末端距离

如果路径越过了区域B，那么要求两个更深层次的参数 $d_{ct}$ 、 $d_{cr}$ ，分别给出发射机和接收机在其它终端方向上距海岸的距离（km）。对船上或海洋平台上的终端，距离为0。

### 3.5 基本的无线电气象参数

预测程序要求两个无线电气象参数，以描述大气折射率的可变性。

- $\Delta N$  ( $N$ -单位/km)，穿越最低1 km大气的平均无线电折射指数递减率，它提供了一些数据，依据这些数据，可以为路径剖面 and 衍射障碍物分析计算相应的有效地球半径。注意，在本程序中， $\Delta N$ 是一个正数。
- $N_0$  ( $N$ -单位)，海平面表面折射率，仅供对流层散射模式使用，作为对流层散射机制可变性的一种度量方法。

附录1提供了 $\Delta N$ 和 $N_0$ 的全球地图，包含数字化地图的数据文件也可以从该局处获得。

### 3.6 管道的入射

因不规则传播、尤其是管道传播而将增强的信号水平程度，将通过参数 $\beta_0$ (%) 来量化，折射指标衰减率超过100  $N$ -单位/km的时间百分比有望在较低大气的最初100 m中实现。 $\beta_0$ 的值计算如下：

计算参数 $\mu_1$ ，它取决于路径相对地面（内陆与/或海岸）和水面的角度：

$$\mu_1 = \left( \frac{-d_{lm}}{10^{16-6.6\tau} + 10^{-5(0.496+0.354\tau)}} \right)^{0.2} \quad (2)$$

其中， $\mu_1$ 的值将限制于 $\mu_1 \leq 1$ ，

并且：

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

$d_{lm}$ ：大圆路径的最长连续陆地（内陆+海岸）区域（km）；

$d_{lm}$ ：大圆路径的最长连续内陆区域（km）。

用于推导 $d_{lm}$ 和 $d_{lm}$ 的无线电—气象区域在表3中定义。如果路径上的所有点至少距大海或其它大型水体50 km，那么只能应用内陆类别，且 $d_{lm}$ 和 $d_{lm}$ 等于路径长度 $d$ 。

计算参数 $\mu_4$ ，它取决于 $\mu_1$ 以及路径中心的纬度（单位为度）：

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

其中：

$\varphi$ ：路径中心纬度（度）。

计算  $\beta_0$ ：

$$\beta_0 = \begin{cases} 10^{-0.015|\varphi| + 1.67} \mu_1 \mu_4 & \% & \text{对于 } |\varphi| \leq 70^\circ \\ 4.17 \mu_1 \mu_4 & \% & \text{对于 } |\varphi| > 70^\circ \end{cases} \quad (5)$$

### 3.7 有效地球半径

通过以下公式计算路径的有效地球半径中值系数 $k_{50}$ ：

$$k_{50} = \frac{157}{157 - \Delta N} \quad (6)$$

利用路径中心的纬度和经度作为整个路径的代表，可以从图1获得平均无线电折射下降率的值 $\Delta N$ 。

通过以下公式计算有效地球半径的中值 $a_e$ ：

$$a_e = 6371 \cdot k_{50} \quad \text{km} \quad (7a)$$

通过以下公式计算超过 $\beta_0$ 时间的有效地球半径 $a_\beta$ ：

$$a_\beta = 6371 \cdot k_\beta \quad \text{km} \quad (7b)$$

其中， $k_\beta = 3.0$ 是超过 $\beta_0$ 时间的有效地球半径系数的一个估计值。

### 3.8 从路径剖面分析中获得的参数

计算所需的诸多路径相关参数值如表4所示，它们必须依据公式（7a）给出的 $a_e$ 值，经对路径剖面的初步分析来得到。有关路径剖面推导、构建和分析的信息在附录2中提供。

## 4 预测程序

### 4.1 概述

本节描述了总的预测程序。首先，对不超过要求之年度百分比时间 $p\%$ 和50%位置的基本传输损耗 $L_b$ （dB）进行评估，如§ 4.2~§ 4.6中描述（即因视线传播、衍射传播、对流层散射传播、管道/层面反射传播以及这些传播机制相结合而引起的基本传输损耗，以分别预测



基本传输损耗)。在§ 4.7~4.10中,描述了将末端地物效应、位置可变性效应和建筑物入口损耗等考虑在内的方法。最后,§ 4.11提供了表达式,将基本传输损耗与1 kW有效辐射功率的场强(dB  $\mu$ V/m)联系起来。

表 4

从路径剖面分析中获得的参数值

参数	描述
$d$	大圆路径距离 (km)
$d_{lt}, d_{lr}$	从发射和接收天线到其各自地平线的距离 (km)
$\theta_t, \theta_r$	分别为发射和接收水平仰角 (mrad)
$\theta$	路径角距离 (mrad)
$h_{ts}, h_{rs}$	平均海平面之上的天线中心高度 (m)
$h_{tc}, h_{rc}$	分别为最大值 ( $h_{ts}, g_t$ ) 和最大值 ( $h_{rs}, g_n$ )
$h_{te}, h_{re}$	地形之上的天线有效高度 (m)
$d_b$	水面之上的路径区域合计长度 (km)
$\omega$	水面之上的总路径分数: $\omega = d_b/d$ 其中, $d$ 为通过公式 (63) 计算得到的大圆距离 (km)。 总的路上路径为: $\omega = 0$

## 4.2 视线传播 (包括短期效应)

对视线路径和超地平线路径都应做以下评估。

通过以下公式计算因自由空间传播而引起的基本传输损耗:

$$L_{bfs} = 92.44 + 20 \log f + 20 \log d \quad \text{dB} \quad (8)$$

分别通过以下公式对  $p$  和  $\beta_0$  百分比时间处的多路径和聚焦效应进行修正:

$$E_{sp} = 2.6 \left( 1 - e^{-\frac{d_{lt} + d_{lr}}{10}} \right) \log \left( \frac{p}{50} \right) \quad \text{dB} \quad (9a)$$

$$E_{s\beta} = 2.6 \left( 1 - e^{-\frac{d_{lt} + d_{lr}}{10}} \right) \log \left( \frac{\beta_0}{50} \right) \quad \text{dB} \quad (9b)$$

通过以下公式计算因视线传播 (不管路径是否真的是视线路径) 而引起的、不超过时间百分比  $p\%$  的基本传输损耗:

$$L_{b0p} = L_{bfs} + E_{sp} \quad \text{dB} \quad (10)$$

通过以下公式计算因视线传播 (不管路径是否真的是视线路径) 而引起的、不超过时间百分比  $\beta_0\%$  的基本传输损耗:

$$L_{b0\beta} = L_{bfs} + E_{s\beta} \quad \text{dB} \quad (11)$$

### 4.3 衍射传播

注1 – 来自ITU-R P.452建议书的这种方法已被证明存在一些局限<sup>1</sup>，因此，正在提议一种改进的方法。特别地，目前正在考虑其它的衍射方法，这将导致对本节内容的更新。

衍射损耗通过一种基于 Deygout 结构的方法来计算，最多取三个边缘。主边缘总是存在，标识为具有最高衍射参数值 $v$ 的剖面点。次边缘也可能存在于主边缘的发射机与接收机侧。然后，通过经验修正，对存在的边缘，将各刀锋损耗结合起来。该方法提供了对所有路径类型的衍射损耗评估，包括跨海或跨内陆或沿海陆地，并且与路径是平滑的还是粗糙的无关。

如§ 4.3.1 所述，以上方法总是用于有效地球半径中值。如果总的预测要求  $p = 50\%$ ，那么无需进行更多的衍射计算。

在  $p < 50\%$  的一般情况下，必须为等于 3 的有效地球半径系数执行第二次计算，如 §4.3.2 所述。这种第二次计算提供了对不超过  $\beta_0\%$  时间的衍射损耗的评估，其中， $\beta_0$  由公式 (5) 给出。

然后，使用一个§ 4.3.3 中所述的有限或插值程序，来计算不超过  $p\%$  时间的衍射损耗，其中  $0.001\% \leq p \leq 50\%$ 。

该方法使用一个单一刀锋衍射损耗的近似值作为无维参数 $v$ 的函数，通过以下公式计算  $v$ ：

$$J(v) = 6.9 + 20 \log \left( \sqrt{(v-0.1)^2 + 1} + v - 0.1 \right) \quad (12)$$

注意： $J(-0.78) \approx 0$ ，并且这定义了应使用该近似值的下限。对  $v \leq -0.78$ ， $J(v)$  设为 0。

#### 4.3.1 衍射损耗中值

通过公式 (7a) 给出的有效地球半径中值  $a_e$  来计算衍射损耗中值  $L_{d50}$  (dB)。

主边缘的衍射损耗中值

通过以下公式计算对总的路径斜度的修正 $\zeta_m$ ：

$$\zeta_m = \cos \left( \tan^{-1} \left( 10^{-3} \cdot \frac{h_{rc} - h_{tc}}{d} \right) \right) \quad (13)$$

找到主边缘，并通过以下公式计算其衍射参数 $v_{m50}$ ：

$$v_{m50} = \max_{i=2}^{n-1} \left( \zeta_m H_i \sqrt{\frac{2 \times 10^{-3} d}{\lambda d_i (d - d_i)}} \right) \quad (14)$$

其中，垂直间隙  $H_i$  为：

$$H_i = g_i + 10^3 \frac{d_i(d - d_i)}{2a_e} - \frac{h_{tc}(d - d_i) + h_{rc} \cdot d_i}{d} \quad (14a)$$

<sup>1</sup> 特别地，在瑞士的测量结果发现了与标准偏差15 dB不相一致的结果。

并且:

$\lambda$ : 波长 (m) =  $0.3/f$ ;

$f$ : 频率 (GHz) ;

$d$ : 路径长度 (km) ;

$d_i$ : 第  $i$  个剖面点距发射机的距离 (km) , 参见§ 3.2;

$h_{tc,rc}$ : 最大值 ( $h_{ts,rs},g_{l,n}$ ) , 分别地。

设  $i_{m50}$  为剖面点下标, 最大值为  $v_{m50}$ 。

通过以下公式计算主边缘的刀锋衍射损耗中值  $L_{m50}$ :

$$L_{m50} = \begin{cases} J(v_{m50}) & \text{如果 } v_{m50} \geq -0.78 \\ 0 & \text{否则} \end{cases} \quad (15)$$

如果  $L_{m50} = 0$  , 那么衍射损耗中值  $L_{d50}$  以及不超过  $\beta_0\%$  时间的衍射损耗  $L_{d\beta}$  均为 0 , 且无需进一步计算衍射。

否则, 应对因主边缘发射机和接收机一侧的副边缘而可能引起的额外损耗进行研究, 如下所述。

发射机一侧副边缘的衍射损耗中值

如果  $i_{m50} = 2$  , 那么不存在发射机一侧的副边缘, 且相关的衍射损耗  $L_{t50}$  应设为 0。否则, 按如下所述继续进行计算。对从发射机到主边缘的路径斜度, 计算修正  $\zeta_t$ :

$$\zeta_t = \cos \left( \tan^{-1} \left( 10^{-3} \cdot \frac{g_{i_{m50}} - h_{tc}}{d_{i_{m50}}} \right) \right) \quad (16)$$

找到发射机一侧的副边缘, 并通过以下公式计算其衍射参数  $v_{t50}$ :

$$v_{t50} = \max_{i=2}^{i_{m50}-1} \left( \zeta_t H_i \sqrt{\frac{2 \times 10^{-3} d_{i_{m50}}}{\lambda d_i \cdot (d_{i_{m50}} - d_i)}} \right) \quad (17)$$

其中:

$$H_i = g_i + 10^3 \frac{d_i (d_{i_{m50}} - d_i)}{2a_e} - \frac{h_{tc} (d_{i_{m50}} - d_i) + g_{i_{m50}} \cdot d_i}{d_{i_{m50}}} \quad (17a)$$

将  $i_{t50}$  设为发射机一侧副边缘剖面点的下标 (即对应于值  $v_{t50}$  的地形高度数组元素的下标)。

通过以下公式计算发射机一侧副边缘的刀锋衍射损耗中值  $L_{t50}$ :

$$L_{t50} = \begin{cases} J(v_{t50}) & \text{如果 } v_{t50} \geq -0.78 \text{ 和 } i_{m50} > 2 \\ 0 & \text{否则} \end{cases} \quad (18)$$

接收机一侧副边缘的衍射损耗中值

如果  $i_{m50} = n - 1$ ，那么不存在接收机一侧的副边缘，且相关的衍射损耗  $L_{r50}$  应设为 0。否则，按如下所述继续进行计算。对从主边缘到接收机的路径斜度，计算修正  $\zeta_r$ ：

$$\zeta_r = \cos \left( \tan^{-1} \left( 10^{-3} \cdot \frac{h_{rc} - g_{im50}}{d - d_{im50}} \right) \right) \quad (19)$$

找到接收机一侧的副边缘，并通过以下公式计算其衍射参数  $v_{r50}$ ：

$$v_{r50} = \max_{i=i_{m50}+1}^{n-1} \left( \zeta_r H_i \sqrt{\frac{2 \times 10^{-3} (d - d_{im50})}{\lambda (d_i - d_{im50}) (d - d_i)}} \right) \quad (20)$$

其中：

$$H_i = g_i + 10^3 \frac{(d_i - d_{im50})(d - d_i)}{2a_e} - \frac{g_{im50}(d - d_i) + h_{rc}(d_i - d_{im50})}{d - d_{im50}} \quad (20a)$$

将  $i_{50}$  设为接收机一侧副边缘剖面点的下标（即对应于值  $v_{r50}$  的地形高度数组元素的下标）。

通过以下公式计算接收机一侧副边缘的刀锋衍射损耗中值  $L_{r50}$ ：

$$\begin{aligned} L_{r50} &= J(v_{r50}) && \text{如果 } v_{r50} \geq -0.78 \text{ 和 } i_{m50} < n-1 \\ &= 0 && \text{否则} \end{aligned} \quad (21)$$

计算地球曲率中值的边缘损耗

通过以下公式计算衍射损耗中值  $L_{d50}$ ：

$$\begin{aligned} L_{d50} &= L_{m50} + \left( 1 - e^{-\frac{L_{m50}}{6}} \right) (L_{t50} + L_{r50} + 10 + 0.04d) && \text{如果 } v_{m50} > -0.78 \\ &= 0 && \text{否则} \end{aligned} \quad (22)$$

在公式 (22) 中，如果发射机一侧的副边缘不存在，那么  $L_{t50}$  将为 0，并且同样地，如果接收机一侧的副边缘不存在，那么  $L_{r50}$  将为 0。

如果  $L_{d50} = 0$ ，那么不超过  $\beta_0\%$  时间的衍射损耗也将为 0。

如果只需要对  $p = 50\%$  进行预测，那么将无需进行更多的衍射计算（参见 § 4.3.3）。否则，必须按如下所述对不超过  $\beta_0\%$  时间的衍射损耗进行计算。

#### 4.3.2 不超过 $\beta_0\%$ 时间的衍射损耗

利用由公式 (7b) 给出的、超过  $\beta_0\%$  时间的有效地球半径  $a_\beta$  来计算不超过  $\beta_0\%$  时间的衍射损耗。对该二次衍射计算，对 Deygout 构造应使用那些等同于中值情况下找到的边缘。然后按如下所述继续进行该衍射损耗的计算。

不超过 $\beta_0\%$ 时间的主边缘衍射损耗

通过以下公式计算主边缘衍射参数 $v_{m\beta}$ :

$$v_{m\beta} = \zeta_m H_{im\beta} \sqrt{\frac{2 \times 10^{-3} d}{\lambda d_{im50} (d - d_{im50})}} \quad (23)$$

其中:

$$H_{im\beta} = g_{im50} + 10^3 \frac{d_{im50} (d - d_{im50})}{2a_\beta} - \frac{h_{tc} (d - d_{im50}) + h_{rc} \cdot d_{im50}}{d} \quad (23a)$$

通过以下公式计算主边缘的刀锋衍射损耗 $L_{m\beta}$ :

$$\begin{aligned} L_{m\beta} &= J(v_{m\beta}) && \text{如果 } v_{m\beta} \geq -0.78 \\ &= 0 && \text{否则} \end{aligned} \quad (24)$$

不超过 $\beta_0\%$ 时间的发射机一侧副边缘衍射损耗

如果 $L_{t50} = 0$ , 那么 $L_{t\beta}$ 将为 0。否则, 通过以下公式计算发射机一侧副边缘衍射参数 $v_{t\beta}$ :

$$v_{t\beta} = \zeta_t H_{it\beta} \sqrt{\frac{2 \times 10^{-3} d_{im50}}{\lambda d_{it50} (d_{im50} - d_{it50})}} \quad (25)$$

其中:

$$H_{it\beta} = g_{it50} + 10^3 \frac{d_{it50} (d_{im50} - d_{it50})}{2a_\beta} - \frac{h_{tc} (d_{im50} - d_{it50}) + g_{im50} \cdot d_{it50}}{d_{im50}} \quad (25a)$$

通过以下公式计算发射机一侧副边缘的刀锋衍射损耗 $L_{t\beta}$ :

$$\begin{aligned} L_{t\beta} &= J(v_{t\beta}) && \text{如果 } v_{t\beta} \geq -0.78 \\ &= 0 && \text{否则} \end{aligned} \quad (26)$$

不超过 $\beta_0\%$ 时间的接收机一侧副边缘衍射损耗

如果 $L_{r50} = 0$ , 那么 $L_{r\beta}$ 将为 0。否则, 通过以下公式计算接收机一侧副边缘衍射参数 $v_{r\beta}$ :

$$v_{r\beta} = \zeta_r H_{ir\beta} \sqrt{\frac{2 \times 10^{-3} (d - d_{im50})}{\lambda (d_{ir50} - d_{im50}) (d - d_{ir50})}} \quad (27)$$

其中:

$$H_{ir\beta} = g_{ir50} + 10^3 \frac{(d_{ir50} - d_{im50}) \cdot (d - d_{ir50})}{2a_\beta} - \frac{g_{im50} \cdot (d - d_{ir50}) + h_{rc} \cdot (d_{ir50} - d_{im50})}{d - d_{im50}} \quad (27a)$$

通过以下公式计算接收机一侧副边缘的刀锋衍射损耗 $L_{r\beta}$ :

$$\begin{aligned} L_{r\beta} &= J(v_{r\beta}) && \text{如果 } v_{r\beta} \geq -0.78 \\ &= 0 && \text{否则} \end{aligned} \quad (28)$$

综合不超过 $\beta_0\%$ 时间的边缘损耗

通过以下公式计算不超过 $\beta_0\%$ 时间的衍射损耗  $L_{d\beta}$ :

$$L_{d\beta} = L_{m\beta} + \begin{cases} \left(1 - e^{-\frac{L_{m\beta}}{6}}\right) (L_{t\beta} + L_{r\beta} + 10 + 0.04d) & \text{如果 } v_{m\beta} > -0.78 \\ 0 & \text{否则} \end{cases} \quad (29)$$

### 4.3.3 不超过 $p\%$ 时间的衍射损耗

通过以下公式，基于  $\beta_0\% < p \leq 50\%$  范围内衍射损耗的对数正态分布，通过插值系数  $F_i$  来控制有效地球半径系数两个可能值的应用。

$$F_i = 0 \quad \text{if } p = 50\% \quad (30a)$$

$$= \frac{I\left(\frac{p}{100}\right)}{I\left(\frac{\beta_0}{100}\right)} \quad \text{if } 50\% > p > \beta_0\% \quad (30b)$$

$$= 1 \quad \text{if } \beta_0\% \geq p \quad (30c)$$

其中， $I(x)$ 为逆补累积正态分布，作为概率  $x$  的一个函数。在附录 3 中给出了可信度  $x \leq 0.5$  可用的一个  $I(x)$  近似值。

现通过以下公式计算不超过  $p\%$ 时间的衍射损耗  $L_{dp}$ :

$$L_{dp} = L_{d50} + (L_{d\beta} - L_{d50}) F_i \quad \text{dB} \quad (31)$$

其中，依据  $p$  和  $\beta_0$  值， $L_{d50}$  和  $L_{d\beta}$  分别由公式 (22) 和公式 (29) 定义， $F_i$  由公式 (30a-c) 定义。

通过以下公式计算与衍射相关的基本传输损耗中值  $L_{bd50}$ :

$$L_{bd50} = L_{bfs} + L_{d50} \quad \text{dB} \quad (32)$$

其中， $L_{bfs}$  由公式 (8) 给出。

通过以下公式计算与不超过  $p\%$ 时间的衍射相关的基本传输损耗:

$$L_{db} = L_{b0p} + L_{dp} \quad \text{dB} \quad (33)$$

其中， $L_{b0p}$  由公式 (10) 给出。

## 4.4 通过对流层散射的传播

注1 - 当百分比远低于50%时，很难将真的对流层散射模式与其它具有类似传播效应的二次传播现象区别开来。因此，本建议书中所用的“对流层散射”模型是对流层散射概念的一种经验概括，它也包括这些二次传播效应。这允许在0.001%~50%的时间百分比范围内持续、一致地预测基本传输损耗，因而将小时间百分比上的管道和层面反射模型与适用于超过最大时间百分比的微弱剩余区域的、真的“散射模式”连接起来。

注2 - 本对流层散射预测模型是为干扰预测目的而推导的，不适于传播条件大于50%时间的计算，它对超地平线的无线电中继系统性能有影响。



通过以下公式计算因对流层散射而引起的、不超过任何时间百分比  $p$ 、小于 50% 的基本传输损耗  $L_{bs}$  (dB):

$$L_{bs} = 190.1 + L_f + 20 \log d + 0.573\theta - 0.15 N_0 - 10.125 \left( \log \left( \frac{50}{p} \right) \right)^{0.7} \quad \text{dB} \quad (34)$$

其中:

$L_f$ : 取决于频率的损耗:

$$L_f = 25 \log(f) - 2.5 \left[ \log \left( \frac{f}{2} \right) \right]^2 \quad \text{dB} \quad (35)$$

$N_0$ : 路径中心海平面折射率, 它可从图 2 中获得。

#### 4.5 通过管道/层面反射的传播

通过以下公式计算不超过  $p\%$  时间的、与管道/层面反射相关的基本传输损耗  $L_{ba}$  (dB):

$$L_{ba} = A_f + A_d(p) \quad \text{dB} \quad (36)$$

其中:

$A_f$ : 天线和大气层内反常传播结构之间的固定耦合损耗总量 (不包括地物损耗):

$$A_f = 102.45 + 20 \log f + 20 \log(d_{lt} + d_{lr}) + A_{lf} + A_{st} + A_{sr} + A_{ct} + A_{cr} \quad \text{dB} \quad (37)$$

$A_{lf}$ : 解释导管传播衰减随波长增加的经验校正

$$A_{lf}(f) = 45.375 - 137.0 f + 92.5 f^2 \quad \text{dB} \quad \text{如果 } f < 0.5 \text{ GHz} \quad (37a)$$

$$A_{lf}(f) = 0.0 \text{ dB} \quad \text{其他情况时}$$

$A_{st}, A_{sr}$ : 分别为发射站和接收站的站点屏蔽衍射损耗:

$$A_{st, sr} = \begin{cases} 20 \log \left( 1 + 0.361 \theta''_{t,r} (f \cdot d_{lt,lr})^{1/2} \right) + 0.264 \theta''_{t,r} f^{1/3} & \text{dB} \quad \text{对于 } \theta''_{t,r} > 0 \text{ mrad} \\ 0 & \text{dB} \quad \text{对于 } \theta''_{t,r} \leq 0 \text{ mrad} \end{cases} \quad (38)$$

其中:

$$\theta''_{t,r} = \theta_{t,r} - 0.1 d_{lt,lr} \quad \text{mrad} \quad (38a)$$

$A_{ct}, A_{cr}$ : 分别为对发射站和接收站所做的海平面上管道耦合修正:

$$A_{ct, cr} = -3 e^{-0.25 d_{ct, cr}^2} (1 + \tanh(0.07(50 - h_{ts,rs}))) \quad \text{dB} \quad \text{对于 } \omega \geq 0.75 \quad (39)$$

$$d_{ct, cr} \leq d_{lt, lr}$$

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

$$A_{ct, cr} = 0 \quad \text{dB} \quad \text{对于所有其它条件} \quad (39a)$$

需要注意公式 (39) 所需的条件有限集。

$A_d(p)$ : 不规则传播机制中取决于时间百分比和角距离的损耗:

$$A_d(p) = \gamma_d \cdot \theta' + A(p) \quad \text{dB} \quad (40)$$

其中:

$\gamma_d$ : 特殊的衰减:

$$\gamma_d = 5 \times 10^{-5} a_e f^{1/3} \quad \text{dB/mrad} \quad (41)$$

$\theta'$ : 角距离 (需要的话进行修正 (通过公式 (38a)), 以便应用公式 (36) 中的站点屏蔽模型):

$$\theta' = \frac{10^3 d}{a_e} + \theta'_t + \theta'_r \quad \text{mrad} \quad (42)$$

$$\theta'_{t,r} = \begin{cases} \theta_{t,r} & \text{mrad} & \text{对于 } \theta_{t,r} \leq 0.1 d_{t,lr} & \text{mrad} \\ 0.1 d_{t,lr} & \text{mrad} & \text{对于 } \theta_{t,r} > 0.1 d_{t,lr} & \text{mrad} \end{cases} \quad (42a)$$

$A(p)$ : 时间百分比变异 (累积分布):

$$A(p) = -12 + (1.2 + 3.7 \times 10^{-3} d) \log \left( \frac{p}{\beta} \right) + 12 \left( \frac{p}{\beta} \right)^\Gamma \quad \text{dB} \quad (43)$$

$$\Gamma = \frac{1.076}{(2.0058 - \log \beta)^{1.012}} \times e^{-(9.51 - 4.8 \log \beta + 0.198 (\log \beta)^2) \times 10^{-6} \cdot d^{1.13}} \quad (43a)$$

$$\beta = \beta_0 \cdot \mu_2 \cdot \mu_3 \quad \% \quad (44)$$

$\mu_2$ : 对路径几何所做的修正:

$$\mu_2 = \left( \frac{500}{a_e} \frac{d^2}{(\sqrt{h_{te}} + \sqrt{h_{re}})^2} \right)^\alpha \quad (45)$$

$\mu_2$  值不得超过 1。

$$\alpha = -0.6 - \varepsilon \cdot 10^{-9} \cdot d^{3.1} \cdot \tau \quad (45a)$$

其中:

$\varepsilon$ : 3.5;

$\tau$ : 在公式 (3) 中定义,  $\alpha$  值不允许小于 -3.4。

$\mu_3$ : 对地形粗糙度所做的修正:

$$\mu_3 = \begin{cases} 1 & \text{对于 } h_m \leq 10 \text{ m} \\ e^{-4.6 \times 10^{-5} (h_m - 10)(43 + 6 d_l)} & \text{对于 } h_m > 10 \text{ m} \end{cases} \quad (46)$$

并且:

$$d_l = \min(d - d_{lt} - d_{lr}, 40) \quad \text{km} \quad (46a)$$

其余各项已在表 1、表 2 和附录 2 中进行定义。

#### 4.6 不超过 $p\%$ 时间和50%位置、忽略末端地物效应的基本传输损耗

应将以下程序用于前述所有路径的计算结果，以便计算不超过  $p\%$ 时间和 50%位置的基本传输损耗。为了避免在预测的、理论上的基本传输损耗中出现物理上不合理的间断，必须将前面所述的各传播模型接合在一起，以便获得修改后的基本传输损耗值，从而实现对  $p\%$ 时间和 50%位置的总的预测。

计算插值系数  $F_j$ ，以考虑到路径角距离：

$$F_j = 1.0 - 0.5 \left( 1.0 + \tanh \left( 3.0 \xi \cdot \frac{(\theta - \Theta)}{\Theta} \right) \right) \quad (47)$$

其中：

- Θ：用于确定相关接合部分角范围的固定参数；设为 0.3；
- ξ：用于确定范围末端接合部分斜度的固定参数；设为 0.8；
- θ：在表 7 中定义的路径角距离（mrad）。

计算插值系数  $F_k$ ，以考虑到路径大圆距离：

$$F_k = 1.0 - 0.5 \left( 1.0 + \tanh \left( 3.0 \kappa \cdot \frac{(d - d_{sw})}{d_{sw}} \right) \right) \quad (48)$$

其中：

- $d$ ：在表 3 中定义的大圆路径长度（km）；
- $d_{sw}$ ：用于确定相关接合部分距离范围的固定参数；设为 20；
- $\kappa$ ：用于确定范围末端接合部分斜度的固定参数；设为 0.5。

计算与视线传播和海上分路径衍射有关的、理论上的最小基本传输损耗  $L_{minb0p}$ (dB)：

$$L_{minb0p} = \begin{cases} L_{b0p} + (1 - \omega)L_{dp} & \text{对于 } p < \beta_0 \\ L_{bd50} + (L_{b0\beta} + (1 - \omega)L_{dp} - L_{bd50}) \cdot F_i & \text{对于 } p \geq \beta_0 \end{cases} \quad (\text{dB}) \quad (49)$$

其中：

- $L_{b0p}$ ：通过公式（10）计算得到的、不超过  $p\%$ 时间的、理论上的视线基本传输损耗；
- $L_{b0\beta}$ ：通过公式（11）计算得到的、不超过 $\beta_0\%$ 时间的、理论上的视线基本传输损耗；
- $L_{dp}$ ：通过公式（31），利用§ 4.3 中所述的方法计算得到的、不超过  $p\%$ 时间的衍射损耗；

$L_{bd50}$ : 利用§ 4.3 中所述的方法计算得到的、与衍射和公式 (32) 相关的基本传输损耗中值;

$F_i$ : 通过公式 (30) 计算得到的、两个有效地球半径的衍射插值系数。

计算与视线和超地平线信号增强有关的、理论上的最小基本传输损耗  $L_{minbap}$  (dB) :

$$L_{minbap} = \eta \cdot \ln \left( e^{\left( \frac{L_{ba}}{\eta} \right)} + e^{\left( \frac{L_{b0p}}{\eta} \right)} \right) \quad \text{dB} \quad (50)$$

其中:

$L_{ba}$ : 通过公式 (36) 计算得到的、不超过  $p\%$  时间的管道/层面反射基本传输损耗;

$L_{b0p}$ : 通过公式 (10) 计算得到的、不超过  $p\%$  时间的、理论上的视线基本传输损耗;

$$\eta = 2.5。$$

计算与衍射和视线或管道/层面反射增强有关的、理论上的基本传输损耗  $L_{bda}$  (dB) :

$$L_{bda} = \begin{cases} L_{bd} & \text{对于 } L_{minbap} > L_{bd} \\ L_{minbap} + (L_{bd} - L_{minbap}) \cdot F_k & \text{对于 } L_{minbap} \leq L_{bd} \end{cases} \quad \text{(dB)} \quad (51)$$

其中:

$L_{bd}$ : 通过公式 (33) 计算得到的、衍射不超过  $p\%$  时间的基本传输损耗;

$L_{minbap}$ : 通过公式 (50) 计算得到的、与视线传播和超地平线信号增强有关的、理论上的最小基本传输损耗;

$F_k$ : 依据路径大圆距离值  $d$ , 通过公式 (48) 计算得到的插值系数。

计算考虑到衍射和视线或管道/层面反射增强的、修改后的基本传输损耗  $L_{bam}$  (dB) :

$$L_{bam} = L_{bda} + (L_{minb0p} - L_{bda}) \cdot F_j \quad \text{dB} \quad (52)$$

其中:

$L_{bda}$ : 通过公式 (51) 计算得到的、与衍射和视线或管道/层面反射增强有关的、理论上的基本传输损耗;

$L_{minb0p}$ : 通过公式 (49) 计算得到的、与视线传播或海上分路径衍射有关的、理论上的最小基本传输损耗;

$F_j$ : 依据路径角距离值  $\theta$ , 通过公式 (47) 计算得到的插值系数。

通过以下公式计算忽略末端地物效应、不超过  $p\%$  时间和 50% 位置的基本传输损耗  $L_{bu}$  (dB) :

$$L_{bu} = -5 \log \left( 10^{-0.2L_{bs}} + 10^{-0.2L_{bam}} \right) \quad \text{dB} \quad (53)$$

其中:

$L_{bs}$ : 通过公式 (34) 计算得到的、不超过  $p\%$  时间的、因对流层散射而引起的基本传输损耗;

$L_{bam}$ : 通过公式 (52) 计算得到的、考虑到衍射和视线或管道/层面反射增强的、修改后的基本传输损耗;

#### 4.7 末端地物损耗

当发射机或接收机天线位于覆盖发射机或接收机之典型地面高度  $R_t$  或  $R_r$  之下时, 发射机和接收机地物损耗  $A_{ht}$ 、 $A_{hr}$  计算如下。对发射机和接收机的计算方法是一样的, 合适的话, 在下面的计算中,  $A_h = A_{ht}$  或  $A_{hr}$ ,  $h = h_{tg}$  或  $h_{rg}$  以及  $R = R_t$  或  $R_r$ 。

如果  $h \geq R$ , 那么  $A_h = 0$ 。

如果  $h < R$ , 那么依据地物类型,  $A_h$  可取两种形式 (参见表 2):

$$A_h = J(v) - 6.03 \quad \text{dB} \quad (54a)$$

或者:

$$A_h = -K_{h2} \log(h/R) \quad \text{dB} \quad (54b)$$

通过公式 (12) 计算  $J(v)$ 。

通过以下公式计算  $v$  项和  $K_{h2}$  项:

$$v = K_{nu} \sqrt{h_{dif} \theta_{clut}} \quad (54c)$$

$$h_{dif} = R - h \quad \text{m} \quad (54d)$$

$$\theta_{clut} = \tan^{-1}(h_{dif}/27) \quad \text{度} \quad (54e)$$

$$K_{h2} = 21.8 + 6.2 \log(f) \quad (54f)$$

$$K_{nu} = 0.342 \sqrt{f} \quad (54g)$$

其中:

$f$ : 频率 (GHz)

公式 (54a) 的形式表示一个障碍物的菲涅耳衍射损耗, 并将适用于诸如建筑物这样的地物类别。城区的地物将尤其为这种类型地物。

公式 (54b) 用于表示第一个干扰之下的高度增益函数, 由地面双射线干扰引起的干扰最大。这不是一个真正的地物问题, 但这种简单的方法允许在同一框架内将之视为地物。需要的话, 将通过利用一个“地物高度” $R$  规定一个“非地物的”地物类型来使用该方法, “地物高度” $R$  表示第一个干扰波瓣的高度。

通过以下公式计算不超过  $p\%$  时间和 50% 位置的基本传输损耗, 包括末端地物损耗效应  $L_{bc}$  (dB):

$$L_{bc} = L_{bu} + A_{ht} + A_{hr} \quad \text{dB} \quad (55)$$

其中：

$L_{bu}$ ：通过公式（53）计算得到的、典型地物高度（合适的话，或者高于之）处的、不超过  $p\%$  时间和 50% 位置的基本传输损耗；

$A_{ht,hr}$ ：合适的话，通过公式（54a 和 54b）计算得到的、因屏蔽发射机和接收机之地物而引起的额外损耗。如果没有此类屏蔽，那么应将它们设为 0。

#### 4.8 损耗的位置变异

在本建议书中及在通常情况下，位置变异指的是本地地面覆盖范围变化的空间统计结果。对比地面覆盖范围变化大得多的范围而言，以及对路径变化无关紧要的路径而言，这是一个有用的结果。由于位置变异定义为排除多路径变异，因此它独立于系统带宽。

在规划无线电系统过程中，也将需要考虑到多路径效应。这些效应的影响将随系统不同而不同，取决于带宽、调制和编码方案。在 ITU-R P.1406 建议书中提供了有关这些效应建模的指南。

广泛的数据分析显示，因城区和郊区环境中此类区域之地面覆盖范围变异而引起的场强中值分布大致呈对数正态分布，均值为 0。

标准差的值取决于频率和环境，经验研究已表面这相当普遍。通过以下表达式来计算  $500\text{ m} \times 500\text{ m}$  区域的典型值：

$$\sigma_L = K + 1.3 \log(f) \quad \text{dB} \quad (56)$$

其中：

$K$  = 在城区或郊区环境中，对全向天线处于小车车顶高度的移动系统，对天线低于地物高度的接收机，为 5.1；

$K$  = 对屋顶天线接近地物高度的接收机，为 4.9；

$K$  = 对农村地区的接收机，为 4.4；

$f$ ：要求的频率（GHz）。

如果应用变异的区域大于  $500\text{ m} \times 500\text{ m}$ ，或者如果变异与某个给定范围内的所有区域都相关，而不是仅与单个区域相关，那么  $\sigma_L$  的值将更大。经验研究显示，（有关小区域值的）位置变异，对 2 km 半径可增至 4 dB，对 50 km 半径可增至 8 dB。

百分比位置  $p_L$  可在 1% 与 99% 之间发生变化。对小于 1% 或大于 99% 的百分比位置，该模型无效。

应注意到，对某些规划目的（例如多边分配计划），通常需要使用一个“位置变异”定义，包括一定程度的多路径衰减。这将虑及移动接收机的情况，它在多路径为空的情况下是固定的，或者对一个屋顶天线，将要接收许多频率，但不可能为所有频率确定最佳的位置。另外，此类规划可能还需要考虑在比本建议书所假设之区域更大区域上的变异。

在本文中，已发现表 5 中给出的值对规划许多无线电业务而言是合适的。



表 5

某些规划情况中使用的位置变异标准差之值

	标准差 (dB)		
	100 MHz	600 MHz	2 000 MHz
广播, 模拟 (dB)	8.3	9.5	—
广播, 数字 (dB)	5.5	5.5	5.5

当接收机/移动物体邻近大海时, 不应进行位置变异修正。

当接收机/移动物体位于陆地和户外但其地面之上的高度大于或等于典型地物的高度时, 期望位置变异将随高度增加而单调下降是合理的, 直至在某个点它消失。在本建议书中, 通过以下公式计算位置变异的高度变化  $u(h)$ :

$$\begin{aligned}
 u(h) &= 1 && \text{对于 } 0 \leq h < R \\
 u(h) &= 1 - \frac{(h-R)}{10} && \text{对于 } R \leq h < R+10 \\
 u(h) &= 0 && \text{对于 } R+10 \leq h
 \end{aligned} \tag{57}$$

其中,  $R$  (m)为接收机/移动物体位置处典型地物的高度。因此, 对户外的一个接收机/移动物体, 当计算不同于 50%的  $p_L$ %值的基本传输损耗值时, 由公式 (56) 或表 5 给出的位置变异的标准差  $\sigma_L$  应乘以由公式 (57) 给出的高度变化函数  $u(h)$ 。

#### 4.9 建筑物入口损耗

建筑物入口损耗定义为地面之上某个给定高度处、建筑物外 (有关位置的) 平均场强与地面之上相同高度处、相同建筑物内 (有关位置的) 平均场强之间的差 (dB)。

对户内接收, 还必须考虑两个重要的参数。第一个参数为建筑物入口损耗, 第二个参数为因不同建筑物材料而引起的建筑物入口损耗变异。以下给出的标准差考虑到了建筑物入口损耗的广泛散步, 但不包括不同建筑物内的位置变异。应注意到, 有关建筑物入口损耗的可靠信息和测量结果是有限的。暂时地, 在下面的表 6 中给出了可以使用的建筑物入口损耗值。

表 6

建筑物入口损耗<sup>(1)</sup>,  $L_{be}$ ,  $\sigma_{be}$ 

$F$	中值 $L_{be}$ (dB)	标准差 $\sigma_{be}$ (dB)
0.2 GHz	9	3
0.6 GHz	11	6
1.5 GHz	11	6

<sup>(1)</sup> 当有更多的实验数据可用时, 可能需要对这些值进行更新。

对小于 0.2 GHz 的频率,  $L_{be} = 9$  dB,  $\sigma_{be} = 3$  dB; 对大于 1.5 GHz 的频率,  $L_{be} = 11$  dB,  $\sigma_{be} = 6$  dB; 对 0.2 GHz 与 0.6 GHz 之间的频率 (以及 0.6 GHz 与 1.5 GHz 之间的频率),  $L_{be}$

和  $\sigma_{be}$  的适当值可通过表中为 0.2 GHz 和 0.6 GHz（以及 0.6 GHz 和 1.5 GHz）给出的  $L_{be}$  与  $\sigma_{be}$  值之间的线性插值来获得。

户内接收的场强变异为因建筑物衰减 ( $\sigma_{be}$ ) 而引起的户外变异 ( $\sigma_L$ ) 的联合结果。这些变异很可能是无关的。因此，可通过取单个标准差平方和的平方根来计算户内接收的标准差 ( $\sigma_i$ )。

$$\sigma_i = \sqrt{\sigma_L^2 + \sigma_{be}^2} \quad (58)$$

其中： $\sigma_L$ ：位置变异的标准差，由公式 (56) 或表 5 给出。

例如，对 VHF 上带宽大于 1 MHz 的数字式传播，其信号标准差分别为 5.5 dB 和 3 dB，联合值为 6.3 dB。在波段 IV/V 中，其信号标准差为 5.5 dB 和 6 dB，联合值为 8.1 dB。

#### 4.10 不超过 $p\%$ 时间和 $p_L\%$ 位置的基本传输损耗

为了计算要求的百分比位置，通过以下公式计算损耗中值  $L_{loc}$  和标准差  $\sigma_{loc}$ ：

$$L_{loc} = 0 \quad (\text{户外}) \quad (59a)$$

$$L_{loc} = L_{be} \quad (\text{户内}) \quad (59b)$$

并且：

$$\sigma_{loc} = u(h) \cdot \sigma_L \quad (\text{户外}) \quad (60a)$$

$$\sigma_{loc} = \sigma_i \quad (\text{户内}) \quad (60b)$$

其中，在表 6 中给出了建筑物入口损耗中值  $L_{be}$ ，公式 (57) 给出了高度函数  $u(h)$ ，公式 (56)（或表 5）和公式 (58) 分别给出了标准差  $\sigma_L$  和  $\sigma_i$ 。

通过以下公式计算不超过  $p\%$  时间和  $p_L\%$  位置的基本传输损耗  $L_b$  (dB)：

$$L_b = \max \left\{ L_{b0p}, L_{bc} + L_{loc} - I \left( \frac{p_L}{100} \right) \cdot \sigma_{loc} \right\} \quad \text{dB} \quad (61)$$

其中：

- $L_{b0p}$ ：通过公式 (10) 计算得到的、与短期增强视线有关的、不超过  $p\%$  时间和 50% 位置的基本传输损耗；
- $L_{bc}$ ：通过公式 (55) 计算得到的、不超过  $p\%$  时间和 50% 位置的基本传输损耗，包括末端地物损耗效应；
- $L_{loc}$ ：通过公式 (59a) 和 (59b) 计算得到的位置损耗中值；
- $I(x)$ ：作为概率  $x$  函数的逆补累积正态分布。在附录 3 中给出了  $I(x)$  的一个近似值，可用于  $0.000001 \leq x \leq 0.999999$ ；
- $\sigma_{loc}$ ：通过公式 (60a) 和 (60b) 计算得到的联合标准差（即建筑物入口损耗和位置变异）。

在 1% 与 99% 间的百分比位置  $p_L$  可以发生变化。对小于 1% 或大于 99% 的百分比位置，该模型无效。

#### 4.11 超过 $p\%$ 时间和 $p_L\%$ 位置的场强

可以通过以下公式计算归一化为超过  $p\%$ 时间和 50%位置的、1 kW 有效辐射功率的场强  $E_p$  dB ( $\mu\text{V}/\text{m}$ ) :

$$E_p = 199.36 + 20 \log(f) - L_b \quad \text{dB}(\mu\text{V}/\text{m}) \quad (62)$$

其中:

- $L_{bc}$ : 通过公式 (61) 计算得到的、不超过  $p\%$ 时间和  $p_L\%$ 位置的基本传输损耗;
- $f$ : 要求的频率 (GHz)。

### 附件1的 附录1

#### 预测程序所需的无线电 – 气象数据

图 1 给出了 $\Delta N$ 的年平均值, 为正值, 单位为  $N$ -单位/ $\text{km}$ 。

图 1

$\Delta N$  的年平均值,  $N$ -单位/ $\text{km}$

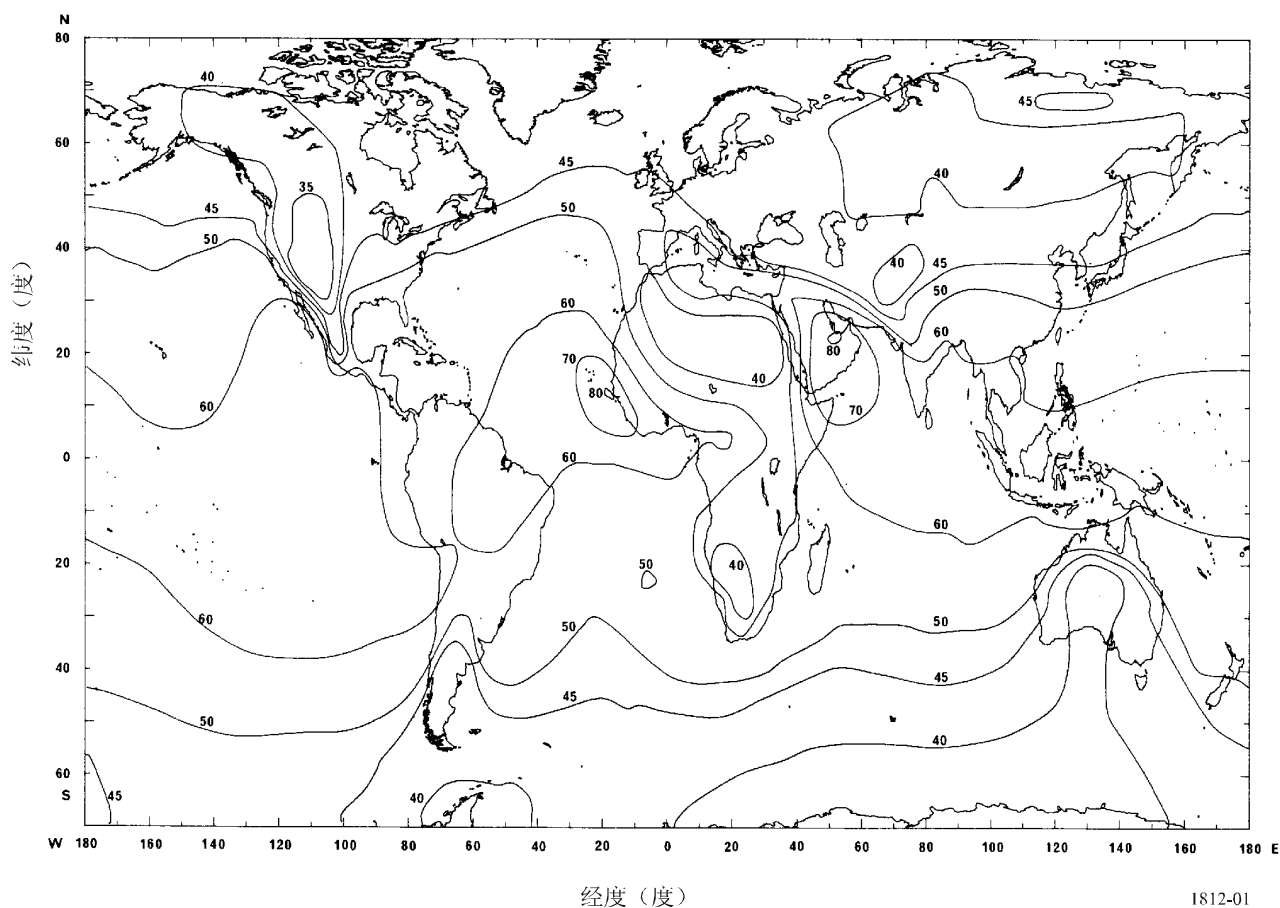
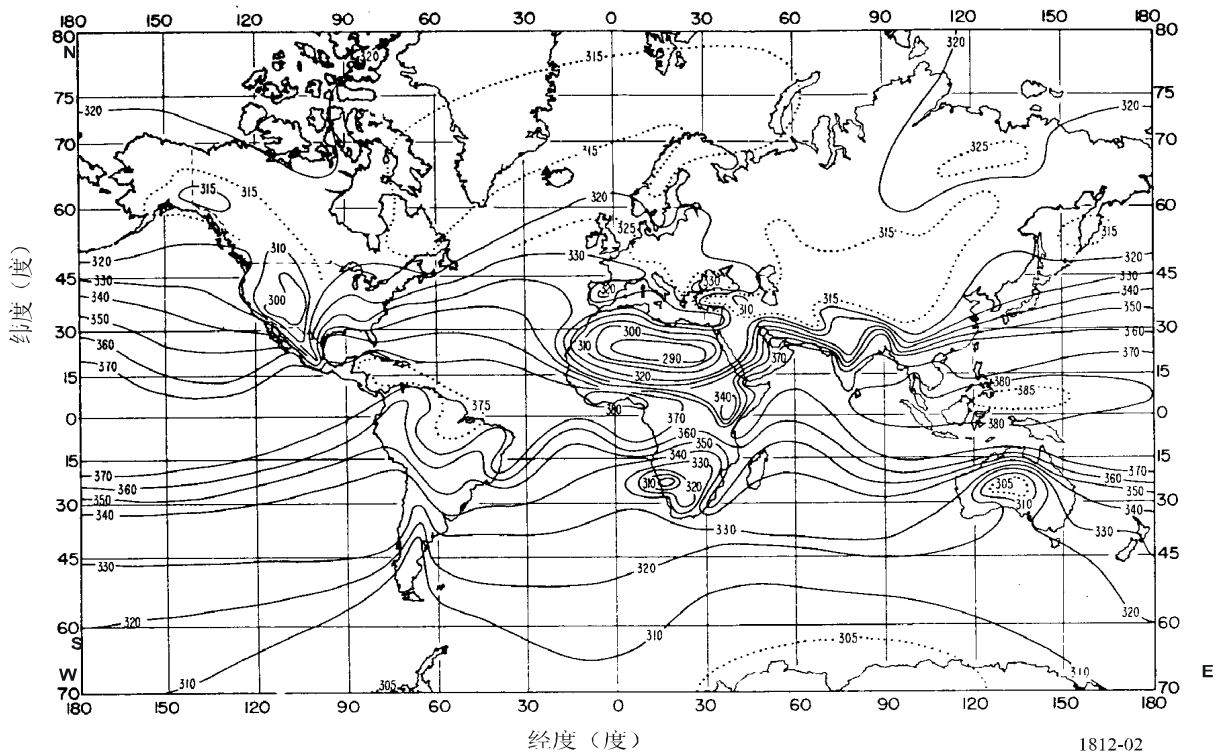


图 2 给出了海平面折射率的年平均值  $N_0$ ，单位为  $N$ -单位。参数  $N_0$  仅用在整个方法的对流层散射部分中。

图 2  
海平面折射率,  $N$ -单位



## 附件1的 附录2

### 路径剖面分析

#### 1 引言

对路径剖面分析, 需要一个平均海平面之上的地形高度的路径剖面。表 7 中给出了用于传播模型、需要从路径剖面分析中得到的各参数。

## 2 构造路径剖面

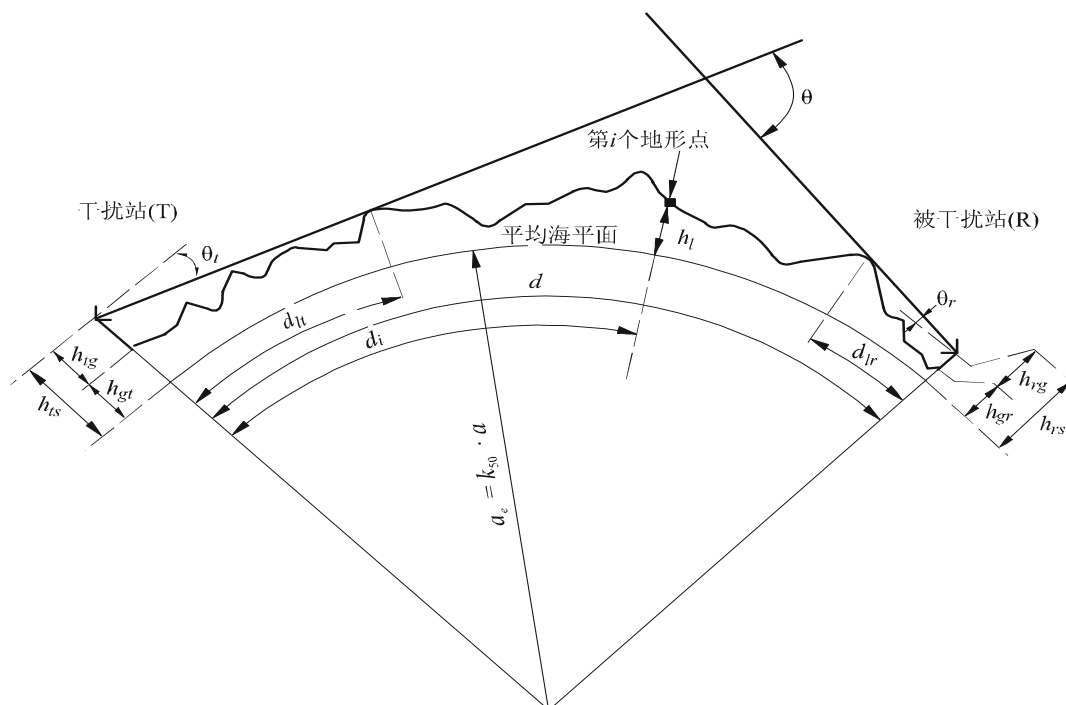
基于发射 ( $\varphi_t, \psi_t$ ) 和接收 ( $\varphi_r, \psi_r$ ) 站的地理坐标, 地形高度 (平均海平面之上) 与大圆路径一起, 都应从地形数据库或适当的大规模等高线图中获得。剖面的距离分辨率应尽可能贴近实际, 以获得地形的重要特征。典型地, 合适的距离增量为  $30\text{ m} \sim 1\text{ km}$ 。总体而言, 为更长的路径使用更长的距离增量是合适的。剖面应包括发射和接收站位置上的地面高度, 将其作为起点和终点。基于在公式 (7a) 中找到的  $a_e$  值, 需要的话, 以下各公式应考虑到地球曲率。

尽管最好是考虑等间隔的剖面点, 但也可能使用带有非等间隔剖面点的方法。当剖面是从地形高度等高线的数字地图中获得时, 这可能是有用的。不过, 应注意的是, 本建议书是在使用等间隔的剖面点进行了测试后形成的; 有关非等间隔点对精确性影响的信息尚不可用。

出于本建议书的目的, 在发射站上的路径剖面点被认为是点 1, 而在接收站上的点被认为是点  $n$ 。因此, 路径剖面包含  $n$  个点。图 3 提供了一个有关平均海平面之上地形高度路径剖面的例子, 显示了与实际地形有关的各种各样的参数。

图 3

(超地平线) 路径剖面的一个例子



注1 – 得到的  $\theta$  值将是负的。

1812-03

表 7 定义了路径剖面分析期间使用或得到的参数。

表 7

路径剖面参数定义

参数	描述
$a_e$	有效地球半径 (km)
$d$	大圆路径距离 (km)
$d_{ii}$	规则 (即等间隔的) 路径剖面数据的递增距离 (km)
$f$	频率 (GHz)
$\lambda$	波长 (m)
$h_{ts}$	平均海平面之上 (amsl) 的发射机天线高度 (m)
$h_{rs}$	接收机天线高度 (m) (amsl)
$\theta_t$	对超地平线路径, 为自发射天线测得的、本地水平之上的水平仰角 (mrad)。对视线路径, 这应为接收天线的仰角。
$\theta_r$	对超地平线路径, 为自接收天线测得的、本地水平之上的水平仰角 (mrad)。对视线路径, 这应为发射天线的仰角。
$\theta$	路径角距离 (mrad)
$h_{st}$	发射站位置处的平滑地球表面的高度 (amsl) (m)
$h_{sr}$	接收站位置处的平滑地球表面的高度 (amsl) (m)
$h_i$	第 <i>i</i> 个地形点高度amsl (m) $h_l$ : 发射机的地面高度 $h_n$ : 接收机的地面高度
$h_m$	地形粗糙度 (m)
$h_{te}$	发射天线的有效高度 (m)
$h_{re}$	接收天线的有效高度 (m)

### 3 路径长度

可以利用来自发射站 ( $\varphi_t, \psi_t$ ) 和接收站 ( $\varphi_r, \psi_r$ ) 地理坐标的大圆几何获得路径长度。可选地, 可以从路径剖面中找到路径长度。可以从路径剖面数据中找到路径长度  $d$  (km) :

$$d = d_n \quad \text{km} \quad (63)$$

对规则间隔的路径剖面数据, 以下也是对的:

$$d_i = (i-1) \cdot d_{ii} \quad \text{km} \quad (64)$$

对  $i = 1, \dots, n$ , 其中,  $d_{ii}$  为递增的路径距离 (km)。

### 4 路径分类

必须基于公式 (7a) 给出的、有效地球半径中值  $a_e$ , 使用路径剖面来确定路径是视线的还是超地平线的。



如果发射天线看到的物理水平仰角（相对当地地平线）大于接收天线相对的角度（也相对发射机的当地地平线），那么路径是超地平线的。

因而超地平线路径条件的测试为：

$$\theta_{max} > \theta_{td} \quad \text{mrad} \quad (65)$$

其中：

$$\theta_{max} = \max_{i=2}^{n-1} (\theta_i) \quad \text{mrad} \quad (66)$$

$\theta_i$ ：第  $i$  个地形点的仰角

$$\theta_i = \frac{h_i - h_{ts}}{d_i} - \frac{10^3 d_i}{2 a_e} \quad \text{mrad} \quad (67)$$

其中：

$h_i$ ：第  $i$  个地形点的高度（m）amsl；

$h_{ts}$ ：发射机天线的高度（m）amsl；

$d_i$ ：从发射机到第  $i$  个地形元素的距离（km）。

$$\theta_{td} = \frac{h_{rs} - h_{ts}}{d} - \frac{10^3 d}{2 a_e} \quad \text{mrad} \quad (68)$$

其中：

$h_{rs}$ ：接收天线的高度（m）amsl；

$d$ ：总的大圆路径距离（km）；

$a_e$ ：适用于路径的有效地球半径中值（公式（7a））。

## 5 自路径剖面推导参数

### 5.1 所有路径

自路径剖面推导得到的参数为表7中所含的那些参数。

#### 5.1.1 发射天线水平仰角 $\theta_t$

当公式（66）应用于  $n - 2$  地形剖面高度时，发射天线的水平仰角为最大的天线水平仰角。

$$\theta_t = \max (\theta_{max}, \theta_{td}) \quad \text{mrad} \quad (69)$$

其中， $\theta_{max}$  由公式（66）确定。

#### 5.1.2 发射天线距离 $d_{it}$

水平距离为自发射机的最短距离，在该处通过公式（66）来计算最大的天线水平仰角。

$$d_{it} = d_i \quad \text{km} \quad \text{对于 } \max (\theta_i) \quad (70)$$

如果没有找到地平线，那么设  $d_{it} = d_{im50}$ （参见§ 4.3.1）。

### 5.1.3 接收天线水平仰角 $\theta_r$

如果没有找到地平线 ( $\theta_r = \theta_{td}$ )，那么设：

$$\theta_r = \frac{h_{ts} - h_{rs}}{d} - 10^3 \frac{d}{2a_e} \quad \text{mrad} \quad (71)$$

不过，如果找到了发射地平线，那么当将公式 (66) 应用于  $n - 2$  地形剖面高度时，接收天线地平线仰角为最大天线地平线仰角。

$$\theta_r = \max_{j=2}^{n-1} (\theta_j) \quad \text{mrad} \quad (72)$$

$$\theta_j = \frac{h_j - h_{rs}}{d - d_j} - \frac{10^3 (d - d_j)}{2a_e} \quad \text{mrad} \quad (72a)$$

### 5.1.4 发射天线距离 $d_{tr}$

地平线距离为距接收机的最小距离，在该处，通过公式 (64) 来计算最大天线地平线仰角。

$$d_{tr} = d - d_j \quad \text{km} \quad \text{对于 } \max(\theta_j) \quad (73)$$

如果没有找到地平线，那么设  $d_{tr} = d - d_{im50}$  (参见§ 4.3.1)。

### 5.1.5 角距离 $\theta$ (mrad)

$$\theta = \frac{10^3 d}{a_e} + \theta_t + \theta_r \quad \text{mrad} \quad (74)$$

## 5.1.6 “平滑地球”模型和有效天线高度

### 5.1.6.1 概述

为了确定有效天线高度，并允许对路径粗糙度做出适当的评估，需要推导一个有效的“平滑地球”表面，作为基准平面，认为在其上存在不规则路径地形。一旦推导得到它，则可以得到地形粗糙度参数值 (§ 5.1.6.4) 以及发射站和接收站的有效天线高度。

### 5.1.6.2 例外

对直接“海上”路径，即 $\omega \geq 0.9$ ，且两个天线地平线均落在海平面上，如果需要，可以省略对平滑地球表面计算的推导。在这种情况下，基准平面可取为整个路径之上的一个平均海平面（或水平面），地形粗糙度可以假设为0 m，且有效天线高度等于海平面之上的真实高度。

对所有其它路径，需要应用§ 5.1中详述的平滑地球地形近似程序，并按§ 5.1.6.4所述，推导有效天线高度和地形粗糙度。

### 5.1.6.3 推导平滑地球表面

推导一条接近以下形式的地形高度amsl的直线：

$$h_{si} = h_{st} + m \cdot d_i \quad \text{m} \quad (75)$$

其中:

$h_{si}$ : 距干扰源  $d_i$  (km) 距离处的、最小二乘适当表面的高度 (m) amsl;

$h_{st}$ : 路径原点即发射站处的平滑地球表面的高度 (m) amsl;

$m$ : 相对海平面的、最小二乘表面的斜度 (m/km)。

在计算的下两步中可用可选的方法。如果各剖面点是等间隔的, 那么可以使用公式 (76a) 和公式 (77a)。如果各剖面点不是等间隔的, 那么必须使用更加复杂的公式 (76b) 和公式 (77b), 并且在任何一种情况下都可以使用。

对等间隔的剖面:

$$m = \frac{\sum_{i=1}^n (h_i - h_a) \left( d_i - \frac{d}{2} \right)}{\sum_{i=1}^n \left( d_i - \frac{d}{2} \right)^2} \quad \text{m/km} \quad (76a)$$

对任何剖面:

$$m = \left( \frac{1}{d^3} \right) \sum_{i=2}^n 3(d_i - d_{i-1})(d_i + d_{i-1} - d)(h_i + h_{i-1} - 2h_a) + (d_i - d_{i-1})^2 (h_i - h_{i-1}) \quad \text{m/km} \quad (76b)$$

其中:

$h_i$ : 第  $i$  个地形点的真实高度 (m) amsl;

$h_a$ : 通过以下公式计算从  $h_0$  到  $h_n$  (包括) 的真实路径高度均值 (m):

对等间隔的剖面:

$$h_a = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n h_i \quad \text{m} \quad (77a)$$

对任何剖面, 计算加权均值:

$$h_a = \left( \frac{1}{2d} \right) \sum_{i=2}^n (d_i - d_{i-1})(h_i + h_{i-1}) \quad \text{m} \quad (77b)$$

而后通过以下公式计算发射站处的、平滑地球表面的高度  $h_{st}$ :

$$h_{st} = h_a - m \frac{d}{2} \quad \text{m} \quad (78)$$

因此, 通过以下公式计算接收站处的、平滑地球表面的高度  $h_{sr}$ :

$$h_{sr} = h_{st} + m \cdot d \quad \text{m} \quad (79)$$

如果平滑地球高度落于真实地面高度之上, 那么必须进行修正, 即:

$$h_{st} = \min (h_{st}, h_1) \quad \text{m} \quad (80a)$$

$$h_{sr} = \min (h_{sr}, h_n) \quad \text{m} \quad (80b)$$

如果通过公式 (80a) 或公式 (80b) 对  $h_{st}$  或  $h_{sr}$  做了修改或者对二者都做了修改, 那么也必须对平滑地球表面的斜度  $m$  进行修正。

$$m = \frac{h_{sr} - h_{st}}{d} \quad \text{m/km} \quad (81)$$

通过以下公式计算末端有效高度  $h_{te}$  和  $h_{re}$ :

$$\begin{aligned} h_{te} &= h_{tg} + h_1 - h_{st} & \text{m} \\ h_{re} &= h_{rg} + h_n - h_{sr} & \text{m} \end{aligned} \quad (82)$$

### 5.1.6.4 地形粗糙度 $h_m$

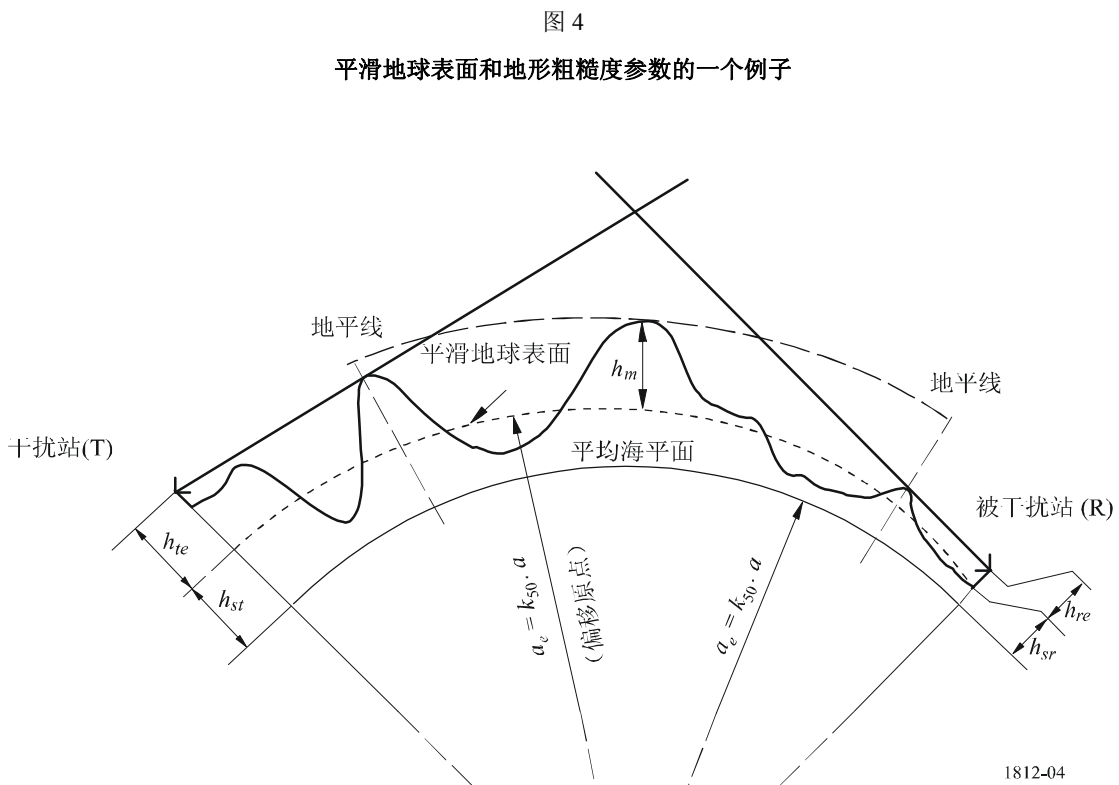
地形粗糙度参数  $h_m$  (m) 为地平线点之间 (包括地平线点) 路径区域中平滑地球表面之上的最大地形高度:

$$h_m = \max_{i=i_{lt}}^{i_{lr}} [h_i - (h_{st} + m \cdot d_i)] \quad \text{m} \quad (83)$$

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。

平滑地球表面和地形粗糙度参数  $h_m$  如图4所示。



## 附件1的 附录3

### 对逆补累积正态分布函数的近似

以下对逆补累积正态分布函数的近似，在 $0.000001 \leq x \leq 0.999999$ 时是正确的，在最大值为 $0.00054$ 时是错误的。如果 $x < 0.000001$ ，它意味着 $\beta_0 < 0.0001\%$ ，那么 $x$ 应设为 $0.000001$ 。对 $x > 0.999999$ ，也应做类似考虑。当信任公式（30b）和公式（49）中的插值函数以及公式（61）中的插值函数时，可使用本近似。不过，对后一公式，即公式（61）， $x$ 的值必须限于： $0.01 \leq x \leq 0.99$ 。

通过以下公式计算函数  $I(x)$ ：

$$I(x) = T(x) - \xi(x) \quad \text{for } 0.000001 \leq x \leq 0.5 \quad (84a)$$

并且，对称地：

$$I(x) = \xi(1-x) - T(1-x) \quad \text{for } 0.5 < x \leq 0.999999 \quad (84b)$$

其中：

$$T(x) = \sqrt{[-2 \ln(x)]} \quad (85a)$$

$$\xi(x) = \frac{[(C_2 \cdot T(x) + C_1) \cdot T(x)] + C_0}{[(D_3 \cdot T(x) + D_2) T(x) + D_1] T(x) + 1} \quad (85b)$$

$$C_0 = 2.515516698 \quad (85c)$$

$$C_1 = 0.802853 \quad (85d)$$

$$C_2 = 0.010328 \quad (85e)$$

$$D_1 = 1.432788 \quad (85f)$$

$$D_2 = 0.189269 \quad (85g)$$

$$D_3 = 0.001308 \quad (85h)$$