

# **ITU-R P.1812-8 建议书**

**(09/2025)**

**P 系列：无线电波传播**

**30 MHz至6 GHz频段中有关  
点对面地面业务的一种路径特  
定的传播预测方法**



## 前言

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

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

## 知识产权政策（IPR）

国际电联无线电通信部门（ITU-R）的 IPR 政策述于 ITU-R 第 1 号决议所参引的《ITU-T/ITU-R/ISO/IEC 的通用专利政策》。专利持有人用于提交专利声明和许可声明的表格可从 <https://www.itu.int/ITU-R/go/patents/zh> 获得，在此处也可获取《ITU-T/ITU-R/ISO/IEC 的通用专利政策实施指南》和 ITU-R 专利信息数据库。

### ITU-R建议书系列

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

系列	标题
<b>BO</b>	卫星传输
<b>BR</b>	用于制作、存档和播放的记录；用于电视的胶片
<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、业余无线电以及相关卫星业务
<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>	卫星固定和固定业务系统之间频率共用和协调
<b>SM</b>	频谱管理
<b>SNG</b>	卫星新闻采集
<b>TF</b>	时间信号和标准频率发射
<b>V</b>	词汇和相关课题

注：本ITU-R建议书英文版已按ITU-R第1号决议规定的程序批准。

电子出版物  
2025年，日内瓦

© 国际电联 2025

版权所有。未经国际电联书面许可，不得以任何手段翻印本出版物的任何部分。

## ITU-R P.1812-8建议书

**30 MHz至6 GHz频段中有关点对面  
地面业务的一种路径特定的传播预测方法**

(ITU-R第203/3号研究课题)

(2007-2009-2012-2013-2015-2019-2021-2023-2025年)

**范围**

本建议书描述一种适于地面点对面业务的传播预测方法，其频率范围为30 MHz至6 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。

**关键词**

长距离特定路径传播、对流层路径/电路、基本传输损耗预测、时间和位置可变性

**缩略语/词汇表**

amsl 平均海拔高度

DTT 数字地面电视

IDWM 国际电联数字化世界地图

LoS 视距

NLoS 非视距

P-P 点对点

UHF 超高频

VHF 甚高频

**相关的ITU建议书和报告**

ITU-R P.452建议书 – 评估在频率高于约100 MHz时地表电台之间干扰的预测程序

ITU-R P.528建议书 – 使用VHF、UHF和SHF频段的航空移动和无线电导航业务的传播预测方法

ITU-R P.530建议书 – 设计地面视距系统所需的传播数据和预测方法

ITU-R P.617建议书 – 超视距无线电中继系统设计所需的传播预测技术和数据

ITU-R P.844建议书 – 影响VHF和UHF频段（30 MHz-3 GHz）频率共用的电离层因素

ITU-R P.1144建议书 – 无线电通信第3研究组传播方法的应用指南

ITU-R P.1406建议书 – 与VHF和UHF频段地面陆地移动和广播业务相关的传播效应

ITU-R P.1411建议书 – 300 MHz至100 GHz频率范围内的短距离室外无线电通信系统和无线局域网规划所用的传播数据和预测方法

ITU-R P.1546建议书 – 30 MHz至4 000 MHz频率范围内地面业务点对面预测的方法

ITU-R P.2001建议书 – 30 MHz至50 GHz频率范围内通用的广泛地面传播模型

ITU-R P.2040建议书 – 建筑材料和结构对约100 MHz以上无线电波传播的影响

注 – 应使用建议书的最新版本。

国际电联无线电通信全会,

考虑到

- 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。

认识到

- a) ITU-R P.528建议书为频率范围在100 MHz至30 GHz的航空移动业务提供了有关点对面基本传输损耗预测的指南;
- b) ITU-R P.452建议书为详细评估频率在约0.1 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传播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距系统点对点传播损耗预测的指南;
- 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波段上点对面场强预测的指南;
- g) ITU-R P.2001建议书为30 MHz至50 GHz的频率范围提供了范围广泛的地面传播模型, 其中包括非常适合在蒙特卡罗模拟中使用的衰落和增强方面的统计数据;
- h) ITU-R P.2040建议书就建筑材料特性和结构对无线电波传播的影响提供了指导,

建议

应将附件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。

注 – 远距离传播路径也可以通过电离层在VHF发生。对这些模式的总结见ITU-R P.844。

## 附件

### 目录

	目 录	页 码
1	引言 .....	5
2	传播预测方法的模型要素 .....	6
3	输入参数 .....	6
3.1	基本输入数据 .....	6
3.2	无线电路径剖面 .....	7
3.3	无线电气候区域 .....	9
3.4	距海岸的末端距离 .....	9
3.5	基本的无线电气象参数 .....	9
3.6	管道的入射 .....	10
3.7	有效地球半径 .....	11
3.8	从路径剖面分析中获得的参数 .....	11
4	预测程序 .....	11
4.1	概述 .....	11
4.2	视距传播（包括短期效应） .....	12
4.3	衍射的传播 .....	13
4.4	通过对流层散射的传播 .....	19
4.5	通过管道/层面反射的传播 .....	19
4.6	不超过 $p\%$ 时间和50%位置的基本传输损耗 .....	21
4.7	损耗位置的可变性 .....	23
4.8	建筑物入口损耗 .....	24
4.9	不超过 $p\%$ 时间和 $p_L\%$ 位置的基本传输损耗 .....	24
4.10	超过 $p\%$ 时间和 $p_L\%$ 位置的场强 .....	25
	附件的后附资料1 – 路径剖面分析 .....	25
1	引言 .....	25
2	构造路径剖面 .....	25

3	路径长度 .....	27
4	路径分类 .....	28
5	自路径剖面推导参数 .....	28
5.1	本地水平以上的发射天线地平线仰角, $\theta_t$ .....	28
5.3	本地水平以上的接收天线地平线仰角, $\theta_r$ .....	29
5.4	发射天线水平距离 $d_{lr}$ .....	29
5.5	角距离 $\theta$ (mrad) .....	29
5.6	“平滑地球”模型和有效天线高度 .....	29
	附件的后附资料2 – 对逆补累积正态分布函数的近似.....	32
	附件的后附资料3 – 计算球形地球衍射损耗 $L_{buls}$ 的另一种方法 .....	33

## 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30 MHz至6 000 MHz频段上的地面点对面业务结合起来使用。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，除ITU-R P.2040建议书所述的建筑物入口损耗要素外，在统计上描述与接收机位置有关的位置可变性要素。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( $\mu$ V/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-地无线电线路的传播预测。

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面预测，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。对该方法在点对面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要素和ITU-R P.2040建议书的建筑物入口损耗模型要素，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，那么使用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：

- 视距 (LoS)；
- 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）；
- 位置的可变性；
- 建筑物入口损耗（ITU-R P.2040建议书）。

## 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，对长路径则应选择路径中心。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。

表1  
基本输入数据

参数	最小值	最大值	描述
$f$ (GHz)	0.03	6.0	频率(GHz)
$p$ (%)	1.0	50.0	超过计算出的信号电平的年平均百分比
$p_L$ (%)	1	99	超过计算出的信号电平的位置百分比
$\varphi_t, \varphi_r$ (度)	-80	+80	发射机、接收机纬度
$\psi_t, \psi_r$ (度)	-180.0	180.0	发射机、接收机经度（正值 = 格林威治东）
$h_{tg}, h_{rg}$ (m)	1	3 000	地面以上的天线中心高度
极化			信号的极化，例如垂直或水平
$w_s$ (m)	1	100	街道宽度。除非已提供当地具体值，否则取值应为27。

表1中的极化并非数值参数。此信息在第4.3.3节中与公式（29a）、（29b）和（30）结合使用。

### 3.2 无线电路径剖面

下文所述方法使用的路径剖面需要有关地形高度的路径特定数据，另外需要沿着路径的路径特定的地物（地面覆盖物）类别或路径特定表面高度。地形高度指的是裸露地面，以区别于包括地形顶部的自然或人造结构的表面高度。

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：

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

$$h_i: \text{海平面之上第}i\text{个剖面点的地形高度 (m)} \quad (1b)$$

$$g_i: \text{海平面之上第}i\text{个剖面点的表面高度 (m)} \quad (1c)$$

其中：

$i: 1, 2, 3 \dots n =$  剖面点下标；

$n:$  剖面点数量。

地物的典型高度不应加到发射机和接收机的地形高度数据之上。因此， $g_1$ 是发射机处的海拔高度，单位为米， $g_n$ 是接收机处的海拔高度，单位为米。

在发射机和接收机之间必须至少有一个中间剖面点。因此， $n$ 必须满足 $n \geq 3$ 。这么小的点数只适用于量级小于1公里的短路径。

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。

没有给出具体的剖面点之间的距离，假设剖面是从数字地形高程和地面覆盖（地物）数据集中提取，合适的间距通常与解析度相近的源数据集点间距类似。剖面点不需要相等的间隔，但对于整个剖面可以在类似的间距上。

可以使用两种剖面计算方法来推导表面高度 $g_i$ ，将在以下各节中概述这两种方法。第一种使用地面覆盖数据来确定可添加到地形高度中的代表性地物高度，第二种使用表面高度数据，其中高度包括地物，地形与地物之间没有明确的区别。

#### 3.2.1 地形和地面覆盖物数据

该方法包括：

- 利用实际地形高度构建地形剖面图；
- 根据地物类别，将典型地物高度添加到地形剖面。

如果将这种方法用于计算衍射损耗（使用无地物地形剖面），则与地形和地物的组合相较，地物环境中的衍射损耗将被低估。此方法是针对数字地形数据开发并验证，将数字地形数据与有统计数据的典型地物类别相结合，而非直接使用地形高度数据，其中相关高度包含的地物在地形和地物之间没有明确区别。重要的是要注意，如果地形高度 $h_i$ 包括地形顶部的自然或人造结构，那么衍射损耗可能会被高估。如果可以获得精确的表面高度，则可以采用第3.2.2节中扩展的剖面计算方法，或者可以探索其他技术，例如3-D射线追踪，这些技术将包括建筑物周围的衍射效应。

在这种方法中，表面高度剖面是使用地形高度近似的，加上基于每个剖面点上的地物类别的代表性地物高度。

表面高度 $g_i$ 由下式给出：

$$g_i = \begin{cases} h_i + \text{“第I个剖面点的典型地物高度” (m)} & \text{对于 } i = 2, \dots, n - 1 \\ h_1 & \text{对于 } i = 1 \\ h_n & \text{对于 } i = n \end{cases} \quad (1d)$$

当采用这种方法时，剖面间距应不小于30 m量级。

公式(1c)中提及的“典型的地物高度”涉及与地面覆盖分类相关的高度统计信息，如植被和建筑物，即为每个地面覆盖/地物类别分配了单一的高度值。将典型地物高度加至剖面基于下列假设：高度 $h_i$ 代表地球的裸露表面。如果无线路径经过发生衍射或子路径阻塞的林地或城市，在一般情况下有效剖面高度会更高，因为无线电信号能够在地物上通过。因此可以通过将形成地物的典型高度相加更恰当地表示剖面。

恰当的相加不一定是实体的，如在建筑物的情况下屋顶高度。地物对象之间存在间隔，如从无线电波的角度看，能量可在其间通过而不是在其之上。在这种情况下，地物的存在预计增加衍射损耗，但不是通过尽可能提高剖面至物理地物高度。

这特别适用于高层的市区。如“密集城市”或“高层城市”的分类通常指30米或以上的建筑高度，但是，一些高层地区的高楼大厦之间有很大的空间，期间低损耗路径可以通过，而不是在屋顶上传输。在这种情况下，较小的典型高度值可能比物理地物高度值更合适。

在另一个极端，甚至在划定为“开放”或“农村”的地区，地面也不是完全裸露的，即，没有任何可能增加传播损耗的物体。因此，较小的典型地物高度值，而不是零，适用于许多情况。

因此，典型的物高度不仅取决于地物对象的典型的物理高度，还有对象的水平间距和它们之间的间隙。关于地物类别，如“城市”在不同的国家所代表的物理条件没有标准。在有条件时，应采用基于当地地物高度统计数据或其他来源的典型地物高度信息。或者，一些主管部门正在使用基于本地或区域地理空间数据开发并经测量结果验证的杂波分类模型。表2建议典型地物高度的默认值可用于缺乏区域/国家具体信息的情况。

表2  
默认典型地物高度值

地物类别	典型地物高度 (m)
	增加剖面公式(1c) $i = 2$ 到 $n - 1$
水/海洋	0
开放/农村	0
郊区	10
城市/树木/森林	15
密集城市	20

### 3.2.2 地形和表面数据

在这种方法中，直接从表面高度数据中提取表面高度曲线。

表面高度 $g_i$ 由下式给出：

$$g_i = \begin{cases} \text{第}i\text{个剖面点的海拔表面高度(m)} & \text{对于 } i = 2, \dots, n - 1 \\ h_1 & \text{对于 } i = 1 \\ h_n & \text{对于 } i = n \end{cases} \quad (1e)$$

注意到表面高度数据应使用与剖面间距类似的分辨率，当采用这种方法时，小于10 m量级的间距可能会导致过高估计基本传输损耗，因为数据将描述各个障碍。大量测试表明，使用大于50 m量级的剖面间距，不会获得比3.2.1节所述方法更好的结果。

### 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。

为参考的目的，各主管部可能希望使用国际电联数字化世界地图（IDWM）中提供的海岸线，该图可通过无线电通信局获取：<https://www.itu.int/pub/R-SOFT-IDWM>。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。

如果该区域的信息被存储在沿无线电波传播路径的连续点，应当假定，各点之间发生的变化具有不同的区域代码。

表3  
无线电气候区

区域类型	代码	定义
沿海地区	A1	沿海陆地和海岸地区，即毗邻大海的土地直到相对于平均海面或水位100米的高空，但仅限于距离最近的海域50千米。没有准确的100米数据处可使用近似值
内陆	A2	所有的土地，除以上定义为“沿海土地”的沿海和海岸地区
海洋	B	海域、海洋等大型水体（即涵盖直径至少100千米的圆周）

### 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递减率，它提供了一些数据，依据这些数据，可以为路径剖面和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。

若无法获得当地测量结果，则此类数量可从本建议书随附的整体数字产品的地图中获得。相关地图分别见DN50.txt和N050.txt文件。数据的经度范围为0°到360°，纬度范围为+90°到-90°，纬度和经度的分辨率为1.5°。该数据应与比较数据文件LAT.txt和LON.txt结合使用，这两份文件分别包含了DN50.txt和N050.txt文件中相应条目（网格点）的纬度和经度。对不同于网格点的位置而言，所需位置的参数可通过在四个最接近的网格点对相关取值执行双线性内插法获得，详见ITU-R P.1144建议书。

表4  
整体数字产品

文件名	出处	纬度			经度		
		从 (度)	到 (度)	间距 (度)	从 (度)	到 (度)	间距 (度)
DN50.txt	P.453	90	-90	1.5	0	360	1.5
N050.txt	P.453	90	-90	1.5	0	360	1.5
LAT.txt	P.453	90	-90	1.5	0	360	1.5
LON.txt	P.453	90	-90	1.5	0	360	1.5

这些数字地图源自无线电探空仪升空全球十年数据集（1983-1992年）的分析。

数字地图见压缩文件[R-REC-P.1812-8-202509-I!!ZIP-E.zip](#)。

### 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，折射递减率超过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：

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

其中， $\mu_1$ 的值将限于 $\mu_1 \leq 1$ ，

以及

$$\tau = 1 - \exp(-0.000412 d_{lm}^{2.41}) \quad (3)$$

$d_{tm}$ : 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 $d_{tm}$ 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 $d_{tm}$ 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：

$\phi$ : 路径中心纬度（度）。

计算 $\beta_0$ :

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

### 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，可以从完整数字地图DN50.txt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 $a_e$ :

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

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

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

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。

一般有效地球半径已获得定义，其中在50%时间内 $a_p = a_e$ ，在 $\beta_0\%$ 的时间内 $a_p = a_\beta$ 。

### 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本附件的后附资料1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 $L_b(\text{dB})$ 进行评估，如第4.2节至第4.6节中描述（即因视距传播、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）。在第4.7节至第4.8节中，描述了将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，第4.10节提供了表达式，将基本传输损耗与1 kW有效辐射功率的场强（dB  $\mu\text{V}/\text{m}$ ）联系起来。

表5  
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 $h_{ts}$ 和 $h_{rs}$
$h_{te}, h_{re}$	地形之上的天线有效高度 (m) 用于管道/层反射模型, 定义见附件1后附资料1
$d_b$	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 (73) 计算得到的大圆距离 (km)。 总的路面上路径为: $\omega = 0$

#### 4.2 视距传播 (包括短期效应)

对视距路径和超地平线路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:

$$L_{bfs} = 92.4 + 20 \log f + 20 \log(d_{fs}) \quad \text{dB} \quad (8)$$

式中:

$f$ : 频率 (GHz)

$d_{fs}$ : 发射天线和接收天线之间的距离 (km) :

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

$d$ : 大圆路径距离 (km)

$h_{ts}$ : 发射天线海拔高度 (masl)

$h_{rs}$ : 接收天线海拔高度 (masl)。

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:

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

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

通过以下公式计算因视距传播（不管路径是否真的是视距路径）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距传播（不管路径是否真的是视距路径）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 衍射的传播

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挠条件之间的过渡。该方法的这部分使用了两次：对于实际的路径剖面和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。

这种方法提供了对所有类型的路径的衍射损失估计，包括海上或内陆或沿海地区，而不论其路径是否光滑或粗糙，无论是LoS或超地平传播。

该衍射方法常用于有效地球半径中值。如果 $p=50\%$ 需要整体预测，则不需要更多的衍射计算。

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。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，使用一个第4.3.3节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 $1\% \leq p \leq 50\%$ 。

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。

整体衍射计算在如下所示各小节中描述：

第4.3.1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4.3.2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4.3.1节中的Bullington部分的第二次使用相同。

第4.3.3节描述对于一个给定的有效地球半径，第4.3.1节和第4.3.2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4.3.4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。

### 4.3.1 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 $g_i$  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 $^{-1}$ 由下式给出 $1/a_p$ ，其中 $a_p$ 为有效地球半径km。波长由 $\lambda$ 表示，单位为m。对 $a_p$ 采用的取值见第4.3.5节。

采用从发射机到点的线的最高斜率查找中间剖面点。

$$S_{tim} = \max \left[ \frac{g_i + 500 C_e d_i (d - d_i) - h_{tc}}{d_i} \right] \text{ m/km} \quad (13)$$

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：

$$S_{tr} = \frac{h_{rc} - h_{tc}}{d} \text{ m/km} \quad (14)$$

必须考虑两种情况。

#### 情况1. 衍射路径是LoS

如果 $S_{tim} < S_{tr}$ 衍射路径是LoS。

采用最高衍射参数 $v$ 查找中间的剖面点：

$$v_{\max} = \max \left\{ \left[ g_i + 500 C_e d_i (d - d_i) - \frac{h_{tc}(d - d_i) + h_{rc} d_i}{d} \right] \sqrt{\frac{0.002 d}{\lambda d_i (d - d_i)}} \right\} \quad (15)$$

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：

$$L_{uc} = J(v_{\max}) \text{ dB} \quad (16)$$

其中，对于 $v_b$ 大于-0.78，函数 $J$ 由公式(12)给出，否则为0。

#### 情况2. 衍射路径是超地平

如果 $S_{tim} \geq S_{tr}$ 衍射路径是超地平。

采用从接收机到点的线的最高斜率查找中间剖面点。

$$S_{rim} = \max \left[ \frac{g_i + 500 C_e d_i (d - d_i) - h_{rc}}{d - d_i} \right] \text{ m/km} \quad (17)$$

其中剖面指数 $i$ 值从2到 $n - 1$ 。

从发射机计算Bullington点的距离：

$$d_{bp} = \frac{h_{rc} - h_{tc} + S_{rim} d}{S_{tim} + S_{rim}} \text{ km} \quad (18)$$

计算Bullington点的衍射参数， $v_b$ ：

$$v_b = \left[ h_{tc} + S_{tim} d_{bp} - \frac{h_{tc}(d - d_{bp}) + h_{rc} d_{bp}}{d} \right] \sqrt{\frac{0.002 d}{\lambda d_{bp} (d - d_{bp})}} \quad (19)$$

在这种情况下，Bullington点的边缘损耗由下式给出：

$$L_{uc} = J(v_b) \quad \text{dB} \quad (20)$$

对于采用公式（16）或（20）计算出的 $L_{uc}$ ，路径的Bullington衍射损耗由下式给出：

$$L_{bull} = L_{uc} + \left[ 1 - \exp\left(\frac{-L_{uc}}{6}\right) \right] (10 + 0.02d) \quad \text{dB} \quad (21)$$

#### 4.3.2 球形地球衍射损耗

球形地球衍射损耗的有效天线高度 $h_{tesph}$ 和 $h_{resph}$ (m)， $L_{dsph}$ 计算方法如下。

计算平滑路径的边际LoS距离：

$$d_{los} = \sqrt{2a_p} \left( \sqrt{0.001h_{tesph}} + \sqrt{0.001h_{resph}} \right) \quad \text{km} \quad (22)$$

用于 $a_p$ 的值在第4.3.5节中给出。有效天线高度 $h_{tesph}$ 和 $h_{resph}$ 在公式（38a）和（38b）中定义。

如果 $d \geq d_{los}$ 计算衍射损耗，采用下述第4.3.3节的方法， $a_{dfi} = a_p$ 给出 $L_{dfi}$ ，并设置 $L_{dsph}$ 等于 $L_{dfi}$ 。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 $h$ ：

$$h_{se} = \frac{\left( h_{tesph} - 500 \frac{d_{sel}^2}{a_p} \right) d_{se2} + \left( h_{resph} - 500 \frac{d_{se2}^2}{a_p} \right) d_{sel}}{d} \quad \text{m} \quad (23)$$

其中：

$$d_{sel} = \frac{d}{2} (1 + b) \quad \text{km} \quad (24a)$$

$$d_{se2} = d - d_{sel} \quad \text{km} \quad (24b)$$

$$b = 2 \sqrt{\frac{m_c + 1}{3m_c}} \cos \left\{ \frac{\pi}{3} + \frac{1}{3} \arccos \left( \frac{3c}{2} \sqrt{\frac{3m_c}{(m_c + 1)^3}} \right) \right\} \quad (24c)$$

其中的反余弦函数返回一个角的弧度

$$c = \frac{h_{tesph} - h_{resph}}{h_{tesph} + h_{resph}} \quad (24d)$$

$$m_c = \frac{250d^2}{a_p(h_{tesph} + h_{resph})} \quad (24e)$$

由下式计算0衍射损耗所需的间隙 $h_{req}$ ：

$$h_{req} = 17.456 \sqrt{\frac{d_{sel}d_{se2}\lambda}{d}} \quad \text{m} \quad (25)$$

如果  $h_{se} > h_{req}$ , 球形地球衍射损耗  $L_{dsph}$  为 0。不需要更多的球形地球衍射计算。

否则, 请继续如下:

计算修改的有效地球半径  $a_{em}$ , 给出距离  $d$  的边际LoS:

$$a_{em} = 500 \left( \frac{d}{\sqrt{h_{tesph}} + \sqrt{h_{resph}}} \right)^2 \text{ km} \quad (26)$$

采用第4.3.3节中的方法,  $a_{dfi} = a_{em}$  给出  $L_{dfi}$ 。

如果  $L_{dfi}$  为负, 球形地球衍射损耗  $L_{dsph}$  为 0。不需要更多的球形地球衍射计算。

否则, 请继续如下:

通过插补计算球形地球衍射损耗:

$$L_{dsph} = \left[ 1 - \frac{h_{se}}{h_{req}} \right] L_{dfi} \text{ dB} \quad (27)$$

### 4.3.3 球形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  $a_{dfi}$  的给定值, 它构成第4.3.2节所描述的整体衍射方法部分, 给出衍射损耗  $L_{dfi}$  首项, 所使用的  $a_{dfi}$  值在第4.3.2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  $L_{dfi}$ , 采用公式 (29) 至 (36) 调用结果  $L_{dfiland}$ 。

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  $L_{dfi}$ , 采用公式 (29) 到 (36) 调用结果  $L_{dfisea}$ 。

首项球形衍射损耗计算如下:

$$L_{dfi} = \omega L_{dfisea} + (1 - \omega) L_{dfiland} \text{ dB} \quad (28)$$

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:

$$K_H = 0.036 (a_{dfi} f)^{-1/3} \left[ (\epsilon_r - 1)^2 + \left( \frac{18\sigma}{f} \right)^2 \right]^{-1/4} \quad (\text{水平}) \quad (29a)$$

和

$$K_V = K_H \left[ \epsilon_r^2 + \left( \frac{18\sigma}{f} \right)^2 \right]^{1/2} \quad (\text{垂直}) \quad (29b)$$

若极化矢量包含水平和垂直分量 (例如圆形或倾斜分量), 则将其分解成水平和垂直分量, 并对每个分量分别进行计算, 然后将相关结果与场振幅的矢量和相结合。在实践中, 这种分解通常是不必要的, 原因是在高于 300 MHz 时, 值 1 可被用于公式 (30) 中的  $\beta_{dfi}$ 。

计算接地/极化参数:

$$\beta_{df} = \frac{1 + 1.6K^2 + 0.67K^4}{1 + 4.5K^2 + 1.53K^4} \quad (30)$$

其中 $K$ 为 $K_H$ 或 $K_V$ , 根据极化。

归一化距离:

$$X = 21.88 \beta_{df} \left( \frac{f}{a_{df}} \right)^{1/3} d \quad (31)$$

归一化发射机和接收机的高度:

$$Y_t = 0.9575 \beta_{df} \left( \frac{f^2}{a_{df}} \right)^{1/3} h_{tesph} \quad (32a)$$

$$Y_r = 0.9575 \beta_{df} \left( \frac{f^2}{a_{df}} \right)^{1/3} h_{resph} \quad (32b)$$

计算距离项:

$$F_X = \begin{cases} 11 + 10\log(X) - 17.6X & \text{对于 } X \geq 1.6 \\ -20\log(X) - 5.6488X^{1.425} & \text{对于 } X < 1.6 \end{cases} \quad (33)$$

定义归一化高度函数:

$$G(Y) = \begin{cases} 17.6(B-1.1)^{0.5} - 5\log(B-1.1) - 8 & \text{对于 } B > 2 \\ 20\log(B+0.1B^3) & \text{否则} \end{cases} \quad (34)$$

其中:

$$B = \beta_{df} Y \quad (35)$$

限定 $G(Y)$ , 因此 $G(Y) \geq 2 + 20\log K$

计算首项球形地球衍射损耗:

$$L_{df} = -F_X - G(Y_t) - G(Y_r) \quad \text{dB} \quad (36)$$

#### 4.3.4 完成“delta-Bullington”衍射损耗模型

第4.3.1节中的方法用于路径剖面高度( $g_i$ )和天线高度( $h_{tc}$ ,  $h_{rc}$ )。设定实际的路径产生的衍射损耗,  $L_{bull} = L_{bull}$  通过公式 (21) 计算:

本附件后附资料3提供了一种不用地形剖面分析计算 $L_{bull}$ 的替代方法。

再次使用第4.3.1节中的方法, 剖面高度 $g_i$ 设置为零, 改进的天线高度由下式计算:

$$h'_{tc} = h_{tc} - h_{std} \quad \text{m} \quad (37a)$$

$$h'_{rc} = h_{rc} - h_{srd} \quad \text{m} \quad (37b)$$

其中发射机和接收机的平滑地球高度， $h_{std}$ 和 $h_{srh}$ 在本附件后附资料1的第5.6.2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（21）计算。

采用第4.3.2节中的方法计算球形地球衍射损耗 $L_{dsp}$ ，实际路径长度 $d$  km并且：

$$h_{tesph} = h_{tc}' \quad \text{m} \quad (38a)$$

$$h_{resph} = h_{rc}' \quad \text{m} \quad (38b)$$

总体路径衍射损耗是：

$$L_d = L_{bul} + \max\{L_{dsp} - L_{bul}, 0\} \quad \text{dB} \quad (39)$$

#### 4.3.5 不超过 $p\%$ 时间衍射损耗

通过公式（7a）采用第4.3.4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。

如果 $p < 50\%$ ，不超过 $p\%$ 时间的衍射损耗 $L_{dp}$ 应计算如下。

通过公式（7b），采用第4.3.4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， $F_i$ ，基于衍射损耗的对数正态分布，范围 $\beta_0\% \leq p \leq 50\%$ ，由下式给出：

$$F_i = \begin{cases} 0 & \text{如果 } p = 50\% \\ \frac{I(p/100)}{I(\beta_0/100)} & \text{如果 } \beta_0\% < p < 50\% \\ 1 & \text{如果 } 1\% \leq p \leq \beta_0\% \end{cases} \quad (40)$$

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，在本附件的后附资料2给出 $x \leq 0.5$ 。

不超过 $p\%$ 的时间衍射损耗 $L_{dp}$ ，计算如下：

$$L_{dp} = L_{d50} + (L_{d\beta} - L_{d50})F_i \quad \text{dB} \quad (41)$$

公式（40）中定义 $F_i$ ，取决于 $p$ 和 $\beta_0$ 的值。

与衍射相关的中值基本传输损耗 $L_{bd50}$ 计算如下：

$$L_{bd50} = L_{bfs} + L_{d50} \quad \text{dB} \quad (42)$$

其中 $L_{bfs}$ 由公式（8）给出。

不超过 $p\%$ 的时间与衍射相关的基本传输损耗，计算如下：

$$L_{bd} = L_{b0p} + L_{dp} \quad \text{dB} \quad (43)$$

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，很难将真正的对流层散射模式与其他产生类似传播效应的二次传播现象区分开来。因此，本建议书中采用的“对流层散射”模型是对流层散射概念经验的概括，也包含这些二次传播效应。此方法允许对时间百分比 $p$ 在0.001%到50%范围内的基本传输损耗进行连续、一致的预测，从而将小时间百分比的大气波导和层反射模型与适用于最大时间百分比被超过的弱残留场的真正“散射”模式联系起来。

注2 – 此对流层预测模型的推导是为预测干扰，不适用于计算影响超地平无线电中继系统性能50%以上时的传播条件。

由对流层散射引起的基本传输损耗 $L_{bs}$ (dB)，在任意小于50%的时间百分比 $p$ 下不会被超过，其计算公式如下：

$$L_{bs} = 190.1 + L_f + 20 \log_{10}(d) + 0.573\theta - 0.15N_0 - 10.125 \left[ \log_{10} \left( \frac{50}{p} \right) \right]^{0.7} \text{ dB} \quad (44)$$

式中：

$L_f$ : 频率相关损耗：

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

$N_0$ : 来自完整数字地图的路径中心海平面表面折射率N050.txt

#### 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)：

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

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：

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

$A_{lf}$ ：解释导管传播衰减随波长增加的经验校正

$$A_{lf}(f) = \begin{cases} 45.375 - 137.0f + 92.5f^2 & \text{dB} \quad \text{对于 } f < 0.5 \text{ GHz} \\ 0 & \text{dB} \quad \text{对于 } f \geq 0.5 \text{ GHz} \end{cases} \quad (47a)$$

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

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

其中：

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

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

$$A_{ct,cr} = \begin{cases} -3 \exp(-0.25 d_{ct,cr}^2) \{1 + \tanh[0.07(50 - h_{ts,rs})]\} & \text{dB for } \omega \geq 0.75 \\ -3 \exp(-0.25 d_{ct,cr}^2) \{1 + \tanh[0.07(50 - h_{ts,rs})]\} & \text{dB for } \omega \geq 0.75 \\ d_{ct,cr} \leq d_{lt,lr} \\ d_{ct,cr} \leq 5 \text{ km} \\ 0 & \text{dB for all other conditions} \end{cases} \quad (49)$$

需要注意公式 (49) 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:

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

其中:

$\gamma_d$ : 特殊的衰减:

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

$\theta'$ : 角距离 (需要的话进行修正 (通过公式 (48a)) , 以便应用公式 (46) 中的站点屏蔽模型) :

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

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

$A(p)$ : 时间百分比变异 (累积分布) :

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

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

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

$\mu_2$ : 对路径几何所做的修正:

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

$\mu_2$  值不得超过1。

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

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：

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

并且：

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

其余各项已在表1、表2和本附件的后附资料1中进行定义。

#### 4.6 不超过 $p\%$ 时间和50%位置的基本传输损耗

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：

$$F_j = 1.0 - 0.5 \left( 1.0 + \tanh \left( 3.0 \xi \cdot \frac{(\theta - \Theta)}{\Theta} \right) \right) \quad (57)$$

其中：

$\Theta$ : 用于确定相关接合部分角范围的固定参数；设为0.3 mrad；

$\xi$ : 用于确定范围末端接合部分斜度的固定参数；设为0.8；

$\theta$ : 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：

$$F_k = 1.0 - 0.5 \left( 1.0 + \tanh \left( 3.0 \kappa \cdot \frac{(d - d_{sw})}{d_{sw}} \right) \right) \quad (58)$$

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。

计算与视距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）：

$$L_{minb0p} = \begin{cases} L_{b0p} + (1 - \omega)L_{dp} & \text{for } p < \beta_0 \quad \text{dB} \\ L_{bd50} + (L_{b0\beta} + (1 - \omega)L_{dp} - L_{bd50})F_i & \text{for } p \geq \beta_0 \quad \text{dB} \end{cases} \quad (59)$$

其中：

- $L_{b0p}$  : 通过公式（10）计算得到的、不超过 $p\%$ 时间的、理论上的视距基本传输损耗；
- $L_{b0\beta}$  : 通过公式（11）计算得到的、不超过 $\beta_0\%$ 时间的、理论上的视距基本传输损耗；
- $L_{dp}$  : 通过公式（41），利用第4.3节中所述的方法计算得到的、不超过 $p\%$ 时间的衍射损耗；
- $L_{bd50}$  : 利用第4.3节中所述的方法计算得到的、与衍射和公式（42）相关的基本传输损耗中值；
- $F_i$  : 通过公式（40）计算得到的、两个有效地球半径的衍射插值系数。

计算与视距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）：

$$L_{minbap} = \eta \ln \left[ \exp \left( \frac{L_{ba}}{\eta} \right) + \exp \left( \frac{L_{b0p}}{\eta} \right) \right] \quad \text{dB} \quad (60)$$

其中：

- $L_{ba}$  : 通过公式（46）计算得到的、不超过 $p\%$ 时间的管道/层面反射基本传输损耗；
- $L_{b0}$  : 通过公式（10）计算得到的、不超过 $p\%$ 时间的、理论上的视距基本传输损耗；
- $\eta = 2.5$ 。

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

$$L_{bda} = \begin{cases} L_{bd} & \text{对于 } L_{minbap} > L_{bd} \\ L_{minbap} + (L_{bd} - L_{minbap})F_k & \text{对于 } L_{minbap} \leq L_{bd} \end{cases} \quad \text{dB} \quad (61)$$

其中：

- $L_{bd}$  : 通过公式（43）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（60）计算得到的、与视距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（58）计算得到的插值系数。

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

$$L_{bam} = L_{bda} + (L_{minb0p} - L_{bda})F_j \quad \text{dB} \quad (62)$$

其中：

- $L_{bda}$  : 通过公式（61）计算得到的、与衍射和视距或管道/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（59）计算得到的、与视距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（57）计算得到的插值系数。

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 $L_{bu}$ （dB）：

$$L_{bc} = -5 \log(10^{-0.2L_{bs}} + 10^{-0.2L_{bam}}) \quad \text{dB} \quad (63)$$

其中：

$L_{bs}$ ：通过公式（44）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（62）计算得到的、考虑到衍射和视距或管道/层面反射增强的、修改后的基本传输损耗；

#### 4.7 损耗位置的可变性

在本建议书中及在通常情况下，位置的可变性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。由于位置的可变性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，此类区域之地面覆盖范围变异而引起的局部平均场强分布大致呈对数正态分布。

标准差的值取决于预测的分辨率和频率，经验研究已表明这已经得到推广。由以下表达式给出与位置可变性标准偏差分布第50百分位相关的典型值：

$$\sigma_L = (0.024f + 0.52)w_a^{0.28} \quad \text{dB} \quad (64)$$

其中：

$f$ ：要求的频率（GHz）。

$w_a$ ：预测的分辨率（m）。

预测分辨率为可变性适用的正方形区域的宽度。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。

已发现表6中给出的值对规划数字地面电视（DTT）业务而言是合适的。研究发现，它们相当于100×100米区域中屋顶高度天线的测量累积分布函数的第93个百分点。

表6  
某些规划情况中使用的位置的可变性标准差之值

	标准差（dB）		
	100 MHz	600 MHz	2 000 MHz
广播，DTT	5.5	5.5	5.5

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，期望位置的可变性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的可变性的高度变化 $u(h)$ ：

$$\begin{aligned}
 u(h) &= 1 && \text{对于 } 0 \leq h < R \\
 u(h) &= 1 - \frac{(h-R)}{10} && \text{对于 } R \leq h < R+10 \\
 u(h) &= 0 && \text{对于 } R+10 \leq h
 \end{aligned} \tag{65}$$

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（64）或表6给出的位置的可变性的标准差 $\sigma_L$ 应乘以由公式（65）给出的高度变化函数 $u(h)$ 。

#### 4.8 建筑物入口损耗

关于建筑物入口损耗的定义、理论模型以及实证结果的引证见ITU-R P.2040建议书。

户内接收的场强变异为因建筑物衰减（ $\sigma_{be}$ ，见ITU-R P.2040建议书）而引起的户外变异（ $\sigma_L$ ）的联合结果。这些变异很可能是不相关的。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（ $\sigma_i$ ）。

$$\sigma_i = \sqrt{\sigma_L^2 + \sigma_{be}^2} \text{ dB} \tag{66}$$

其中 $\sigma_L$ 位置的可变性的标准差，由公式（64）或表6给出。

#### 4.9 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 $\sigma_{loc}$ ：

$$L_{loc} = 0 \quad (\text{户外}) \text{ dB} \tag{67a}$$

$$L_{loc} = L_{be} \quad (\text{户内}) \text{ dB} \tag{67b}$$

并且：

$$\sigma_{loc} = u(h) \cdot \sigma_L \quad (\text{户外}) \text{ dB} \tag{68a}$$

$$\sigma_{loc} = \sigma_i \quad (\text{户内}) \text{ dB} \tag{68b}$$

其中，在ITU-R P.2040建议书中给出了建筑物入口损耗中值 $L_{be}$ ，公式（65）给出了高度函数 $u(h)$ ，公式（64）（或表6）和公式（66）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）：

$$L_b = \max \left[ L_{b0p}, L_{bc} + L_{loc} - I \left( \frac{p_L}{100} \right) \sigma_{loc} \right] \text{ dB} \tag{69}$$

其中：

$L_{b0p}$ : 通过公式（10）计算得到的、与短期增强视距有关的、不超过 $p\%$ 时间和50%位置的基本传输损耗；

$L_{bc}$ : 通过公式（63）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（67a）和（67b）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。在后附资料2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（68a）和（68b）计算得到的联合标准差（即建筑物入口损耗和位置的可变性）。

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。

#### 4.10 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 $p_L\%$ 位置的、1 kW有效辐射功率的场强 $E_p$  dB ( $\mu\text{V}/\text{m}$ )：

$$E_p = 199.36 + 20 \log(f) - L_b \quad \text{dB}(\mu\text{V}/\text{m}) \quad (70)$$

其中：

- $L_{bc}$ : 通过公式（69）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）。

## 附件的 后附资料1

### 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。

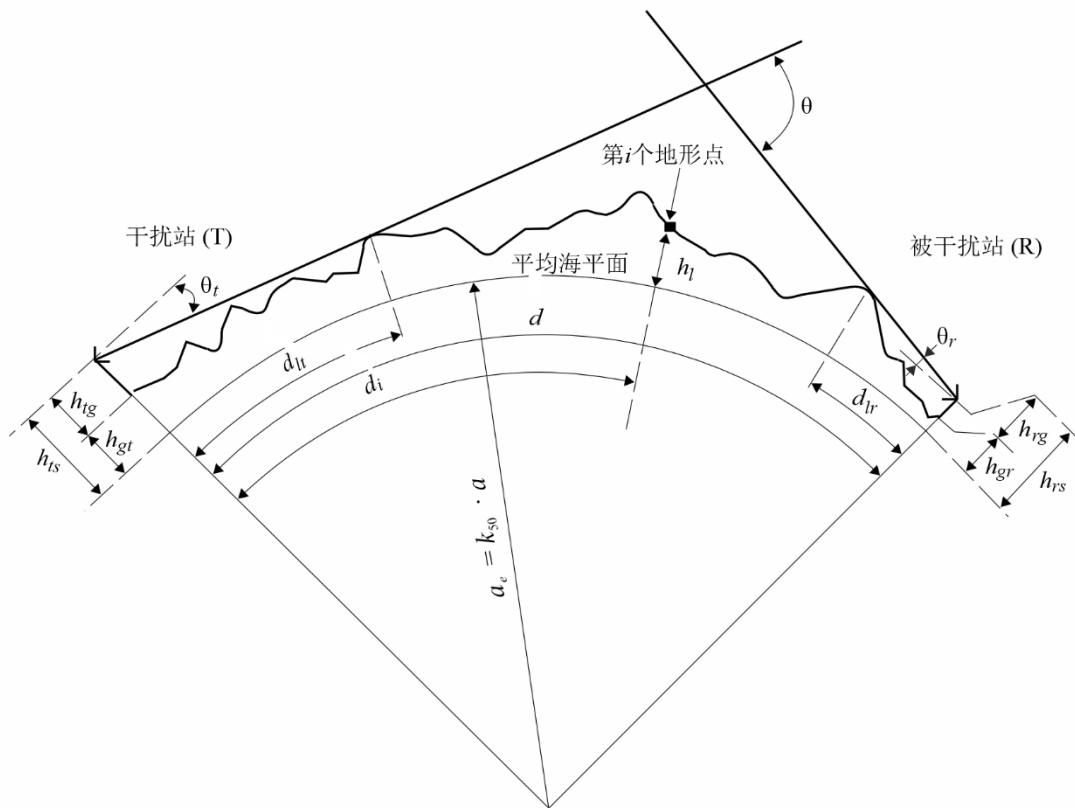
#### 2 构造路径剖面

基于发射 $(\phi_t, \psi_t)$ 和接收 $(\phi_r, \psi_r)$ 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 1  
(超地平线) 路径剖面的一个例子



注1—得到的  $\theta$  值将是负的。

P.1812-01

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
$a$	地球的平均物理半径 (6 371 km)
$a_e$	有效地球半径 (km)
$d$	大圆路径距离 (km)
$d_i$	距发射机第 <i>i</i> 个剖面点的大圆路径距离
$d_{ii}$	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)。对视距路径, 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)。对视距路径, 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) $h_l$ : 发射机的地高高度 $h_n$ : 接收机的地高高度
$h_m$	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 (根据地球的平均物理半径  $a$ ) 获得路径长度。可选地, 可以从路径剖面中找到路径长度。对于一般情况, 可以从路径剖面数据中找到路径长度  $d$  (km) :

$$d = d_n \quad \text{km} \quad (71)$$

对规则间隔的路径剖面数据, 以下也是对的:

$$d_i = (i - 1)d_{ii} \quad \text{km} \quad (72)$$

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

#### 4 路径分类

只有在确定距离 $d_{lt}$ 和 $d_{lr}$ 时及仰角 $\theta_t$ 和 $\theta_r$ 时，才必须将路径分为视距或超视距两类，见下文。

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距的还是超地平线的。

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（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：

$$\theta_{max} > \theta_{td} \quad \text{mrad} \quad (73)$$

其中：

$$\theta_{max} = \max_{i=2}^{n-1} (\theta_i) \quad \text{mrad} \quad (74)$$

$\theta_i$ : 第*i*个地形点的仰角

$$\theta_i = 1\,000 \arctan \left( \frac{h_i - h_{ts}}{10^3 d_i} - \frac{d_i}{2a_e} \right) \quad \text{mrad} \quad (75)$$

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）。

$$\theta_{td} = 1\,000 \arctan \left( \frac{h_{rs} - h_{ts}}{10^3 d} - \frac{d}{2a_e} \right) \quad \text{mrad} \quad (76)$$

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

从路径配置文件中导出的参数包含在表7中。

##### 5.1 本地水平以上的发射天线地平线仰角， $\theta_t$

相对于本地水平的发射天线的地平线仰角由下式给出的：

$$\theta_t = \max (\theta_{max}, \theta_{td}) \quad \text{mrad} \quad (77)$$

其中 $\theta_{max}$ 由公式（74）确定。因此对于LoS路径，发射天线的地平线仰角被认为是线到接收天线的仰角。

##### 5.2 发射天线水平距离 $d_{lt}$

水平距离为自发射机的最短距离，在该处通过公式（74）来计算最大的天线水平仰角。

$$d_{lt} = d_i \quad \text{km} \quad \text{对于 } \max(\theta_i) \quad (78)$$

对于LoS路径， $i$ 应为给出最大衍射参数 $v$ 的值。

$$v_{\max} = \max \left\{ \left[ h_i + 500 C_e d_i (d - d_i) - \frac{h_{ts}(d - d_i) + h_{rs} d_i}{d} \right] \sqrt{\frac{0.002 d}{\lambda d_i (d - d_i)}} \right\} \quad (78a)$$

其中剖面指数*i*取值从2到 $n - 1$ ， $C_e$ 为附件1第4.3.1节定义的有效地球曲率。

### 5.3 本地水平以上的接收天线地平线仰角， $\theta_r$

对于LoS路径， $\theta_r$ 由下式给出：

$$\theta_r = 1000 \arctan \left( \frac{h_{ts} - h_{rs}}{10^3 d} - \frac{d}{2a_e} \right) \text{ mrad} \quad (79)$$

否则， $\theta_r$ 由下式给出：

$$\theta_r = \max_{j=2}^{n-1} (\theta_j) \text{ mrad} \quad (80)$$

$$\theta_j = 1000 \arctan \left[ \frac{h_j - h_{rs}}{10^3 (d - d_j)} - \frac{d - d_j}{2a_e} \right] \text{ mrad} \quad (80a)$$

### 5.4 发射天线水平距离 $d_{lr}$

地平线距离为距接收机的最小距离，在该处，通过公式（80）来计算最大天线地平线仰角。

$$d_{lr} = d - d_j \text{ km} \quad \text{对于 } \max (\theta_j) \quad (81)$$

对于LoS路径， $d_{lr}$ 由下式给出：

$$d_{lr} = d - d_{lt} \text{ km} \quad (81a)$$

### 5.5 角距离 $\theta$ (mrad)

$$\theta = \frac{10^3 d}{a_e} + \theta_t + \theta_r \text{ mrad} \quad (82)$$

### 5.6 “平滑地球”模型和有效天线高度

“平滑地球”表面来自从剖面，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5.6.1节对剖面适用于平滑地球表面，并从中获得了此表面在末端的高度 $h_{st}$ 和 $h_{sr}$ 。

在第5.6.2节中， $h_{st}$ 和 $h_{sr}$ 被用来计算在末端经修改的平滑地球高度，在附件1第4.3.4节曾出现过的 $h_{std}$ 和 $h_{srd}$ 被用于计算衍射模型的有效天线高度。根据不同的剖面情况， $h_{std}$ 和 $h_{srd}$ 可能有不同于 $h_{st}$ 和 $h_{sr}$ 的取值。

在第5.6.3节中， $h_{st}$ 和 $h_{sr}$ 被用来计算有效天线高度 $h_{te}$ 和 $h_{re}$ 以及附件1第4.5节所述的管道/层反射模型所需的地形粗糙度参数 $h_m$ 。

#### 5.6.1 推导平滑地球表面

计算末端 $h_{st}$ 和 $h_{sr}$ 处的平滑地球表面高度，如下所示：

$$\nu_1 = \sum_{i=2}^n (d_i - d_{i-1})(h_i + h_{i-1}) \quad (83)$$

$$\nu_2 = \sum_{i=2}^n (d_i - d_{i-1})[h_i(2d_i + d_{i-1}) + h_{i-1}(d_i + 2d_{i-1})] \quad (84)$$

$$h_{st} = \left( \frac{2\nu_1 d - \nu_2}{d^2} \right) \quad \text{m} \quad (85)$$

$$h_{sr} = \left( \frac{\nu_2 - \nu_1 d}{d^2} \right) \quad \text{m} \quad (86)$$

其中：

$h_{st}$ ：路径原点即发射机处的平滑地球表面的amsl高度（m）；

$h_{sr}$ ：路径终点即接收机处的平滑地球表面的amsl高度（m）。

### 5.6.2 衍射模型的平滑表面高度

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：

$$h_{obs} = \max(H_i) \quad \text{m} \quad (87a)$$

$$\alpha_{obt} = \max\left(\frac{H_i}{d_i}\right) \quad \text{mrad} \quad (87b)$$

$$\alpha_{obr} = \max\left[\frac{H_i}{(d - d_i)}\right] \quad \text{mrad} \quad (87c)$$

其中：

$$H_i = h_i - \frac{[h_{ic}(d - d_i) + h_{rc}d_i]}{d} \quad \text{m} \quad (87d)$$

剖面指数*i*值从2到( $n - 1$ )。

计算在路径两端的发射机和接收机的光滑表面高度的临时值：

如果 $h_{obs}$ 小于或等于0，则：

$$h_{stp} = h_{st} \quad \text{m amsl} \quad (88a)$$

$$h_{srp} = h_{sr} \quad \text{m amsl} \quad (88b)$$

否则：

$$h_{stp} = h_{st} - h_{obs}g_t \quad \text{m amsl} \quad (88c)$$

$$h_{srp} = h_{sr} - h_{obs}g_r \quad \text{m amsl} \quad (88d)$$

其中：

$$g_t = \frac{\alpha_{obt}}{(\alpha_{obt} + \alpha_{obr})} \quad (88e)$$

$$g_r = \frac{\alpha_{obr}}{(\alpha_{obt} + \alpha_{obr})} \quad (88f)$$

计算衍射模型所要求的、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  $h_1$ , 则:

$$h_{std} = h_1 \quad \text{m amsl} \quad (89a)$$

否则:

$$h_{std} = h_{stp} \quad \text{m amsl} \quad (89b)$$

如果  $h_{srp}$  大于  $h_n$ , 则:

$$h_{srd} = h_n \quad \text{m amsl} \quad (89c)$$

否则:

$$h_{srd} = h_{srp} \quad \text{m amsl} \quad (89d)$$

### 5.6.3 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:

$$h_{st} = \min (h_{st}, h_1) \quad \text{m} \quad (90a)$$

$$h_{sr} = \min (h_{sr}, h_n) \quad \text{m} \quad (90b)$$

平滑地球表面的斜率  $m$  也应做如下修改:

$$m = \frac{h_{sr} - h_{st}}{d} \quad \text{m/km} \quad (91)$$

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

$$h_{te} = h_{tg} + h_1 - h_{st} \quad \text{m} \quad (92a)$$

$$h_{re} = h_{rg} + h_n - h_{sr} \quad \text{m} \quad (92b)$$

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:

$$h_m = \max_{i=i_{lt}}^{i_{lr}} [h_i - (h_{st} + md_i)] \quad \text{m} \quad (93)$$

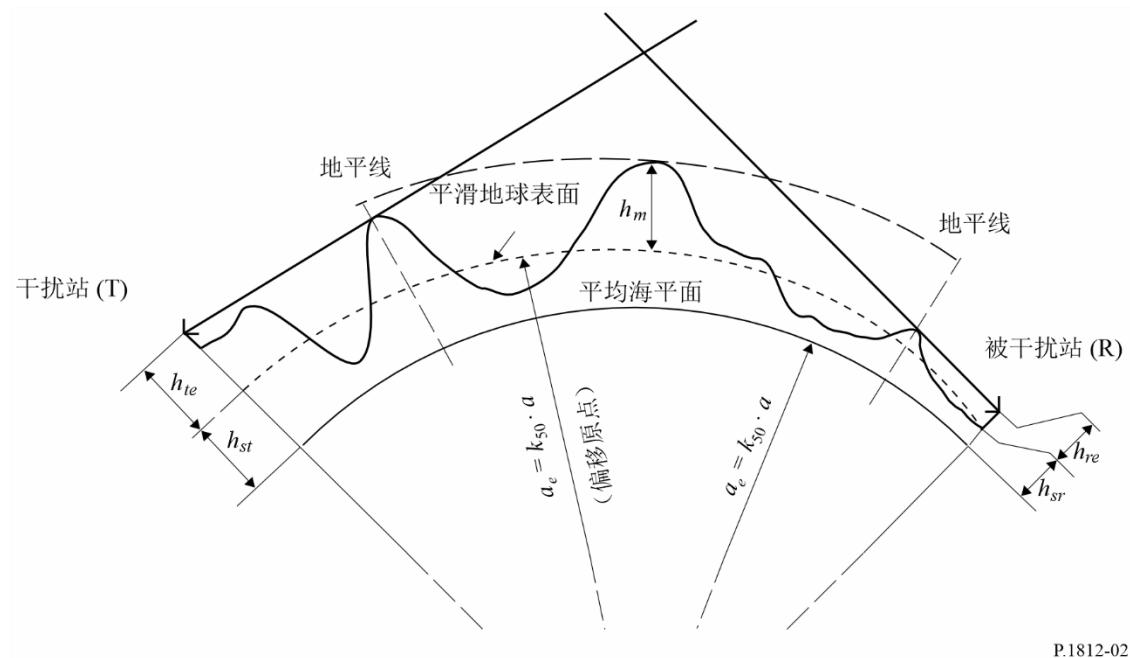
其中:

$i_{lt}$ : 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2所示。

图2  
平滑地球表面和地形粗糙度参数的一个例子



## 附件的 后附资料2

### 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(40)和公式(59)中的插值函数以及公式(69)中的插值函数时，可使用本近似。不过，对后一公式， $x$ 的值必须限于： $0.01 \leq x \leq 0.99$ 。

通过以下公式计算函数 $I(x)$ ：

$$I(x) = T(x) - \xi(x) \quad \text{对于 } 0.000001 \leq x \leq 0.5 \quad (94a)$$

由对称性：

$$I(x) = \xi(1-x) - T(1-x) \quad \text{对于 } 0.5 < x \leq 0.999999 \quad (94b)$$

其中：

$$T(x) = \sqrt{[-2 \ln(x)]} \quad (95a)$$

$$\xi(x) = \frac{[(C_2 T(x) + C_1) T(x)] + C_0}{[(D_3 T(x) + D_2) T(x) + D_1] T(x) + 1} \quad (95b)$$

$$C_0 = 2.515516698 \quad (95c)$$

$$C_1 = 0.802853 \quad (95d)$$

$$C_2 = 0.010328 \quad (95e)$$

$$D_1 = 1.432788 \quad (95f)$$

$$D_2 = 0.189269 \quad (95g)$$

$$D_3 = 0.001308 \quad (95h)$$

### 附件的 后附资料3

#### 计算球形地球衍射损耗 $L_{bulls}$ 的另一种方法

本附件提供了一种不使用地形剖面分析来计算 $L_{bulls}$ 的替代方法。如果 $d < d_{los}$  (LoS)，用距离 $d_{sel}$  (公式 (24a)) 计算弯曲地球路径和天线间射线之间的最小间隙高度 $h_{se}$  (公式 (23)) 的衍射参数：

$$v_{\max} = -h_{se} \cdot \sqrt{\frac{0.002d}{\lambda d_{sel}(d-d_{sel})}} \quad (96)$$

这一点的刀刃 (knife-edge) 损耗由下式给出：

$$L_{us} = J(v_{\max}) \quad \text{dB} \quad (97)$$

如果 $d \geq d_{los}$  (非视距(NLOS))，由要找到从发射机天线到弯曲地球路径线的最高斜率。

$$S_{tm} = 500 C_e d - 2\sqrt{500 C_e h_{tesph}} \quad \text{m/km} \quad (98)$$

然后找到从接收机天线到弯曲地球路径线的最高斜率。

$$S_{rm} = 500 C_e d - 2\sqrt{500 C_e h_{resph}} \quad \text{m/km} \quad (99)$$

使用这两个斜率来计算布林顿点：

$$d_s = \frac{h_{resph} - h_{tesph} + S_{rm}d}{S_{tm} + S_{rm}} \quad \text{km} \quad (100)$$

计算布灵顿点的衍射参数 $v_s$ ：

$$v_s = \left[ h_{tesph} + S_{tm}d_s - \frac{h_{tesph}(d - d_s) + h_{resph}d_s}{d} \right] \sqrt{\frac{0.002d}{\lambda d_s(d - d_s)}} \quad (101)$$

这一点的刀刃损耗由下式给出：

$$L_{us} = J(v_s) \quad \text{dB} \quad (102)$$

对于使用公式(97)或公式(102)计算的 $L_{us}$ ，平滑路径的布林顿衍射损耗由下式给出：

$$L_{bells} = L_{us} + \left(1 - \exp\left(\frac{-L_{us}}{6}\right)\right)(10 + 0.02d) \quad (103)$$

---