

国 际 电 信 联 盟

**ITU-R**

国际电联无线电通信部门

**ITU-R F.1096-1 建议书**

(04/2011)

**计算对固定无线系统的视距干扰  
以说明地形散射的方法**

**F 系列  
固定业务**



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>	<b>固定业务</b>
<b>M</b>	移动、无线电定位、业余和相关卫星业务
<b>P</b>	无线电波传播
<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  
2011年，日内瓦

© ITU 2011

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 F.1096-1建议书  
计算对固定无线系统的视距干扰  
以说明地形散射的方法<sup>1</sup>

(1994-2011年)

## 范围

本建议书旨在帮助计算陆地表面对于形成固定无线系统干扰信号的影响。

国际电联无线电通信全会，

考虑到

- a) 来自其他固定无线系统和其他业务的干扰可对视距无线系统的性能产生影响；
- b) 通过视距（LoS）大圆路径，一个系统发射天线的信号功率可作为干扰传播至另一个系统的接收天线；
- c) 通过地球表面自然或人为地物的散射机制，一个系统发射天线的信号功率可作为干扰传播至另一个系统的接收天线；
- d) 产生此种干扰耦合的地形区域也许并不靠近大圆路径，但必须处于产生干扰的发射天线及受干扰系统的接收天线均可见的位置；
- e) 因地形散射造成的干扰功率部分可大大超过两个天线之间通过大圆路径抵达的干扰功率；
- f) 已制定了计算源于地形散射的干扰功率的有效方法，

做出建议

- 1 当干扰是由一个系统发射天线的信号进入另一个系统的接收天线造成、并且适用下述两个条件或其中之一时，应酌情将地形散射效应纳入干扰功率的计算（见注1）：
  - 1.1 在干扰系统的发射天线及受干扰系统的发射天线之间，存在着LoS传播路径；
  - 1.2 在干扰发射天线及受干扰接收天线均可见的地球表面存在着自然或人为地物；
- 2 使用附件1给出的方法计算地形散射造成的干扰。

---

<sup>1</sup> 无线电通信第3研究组的IUT-R P.452建议书 – “评估在频率高于约0.1G赫兹时地球表面上电台之间干扰的预测顺序” 涉及了其它传播机制。

注 1 – 本建议书中介绍的计算方法未涉及由衍射造成的镜面反射或传播。

## 附件 1

### 地形散射对固定无线系统造成的干扰

#### 1 引言

人们发现，在两条路径交集而且交集所在地形位于一跳的发射天线及另一跳的接收天线均可见的位置时，地形散射是促成无线电中继系统之间耦合干扰的尤为重大的因素。在这种情况下，两个天线的主瓣通过一个共同地域发生耦合，其干扰就如同一个双站雷达系统中接收到的地物干扰。

过去，人们通过对大圆附近传播机制的计算来确定固定无线系统之间的干扰，包括LoS路径、大气折射效应、地球表面衍射以及对流层前向散射。多年来，一些主管部门也一直使用这种大圆方法并结合天线旁瓣耦合来确定地面固定无线系统的系统内及系统间干扰。近年来的现场测量表明，与地形散射相比，大圆传播通常是一个较小的干扰因素。

相对于系统间干扰，对于系统内干扰的大圆预测以及测量之间的差异变小，主要的案例一般发生在同一路径的两个邻跳之间。

在地球站和地面电台之间发生干扰的情况下，也可通过地面天线主束、地球站周围的区域以及地球站天线旁瓣产生耦合。根据不同的几何条件，地面散射或大圆耦合二者均可成为主要的干扰机制。

#### 2 地面散射的数学模型

可采用双站雷达等式确定通过源自发射天线辐射功率 $P_t$ 的地面散射机制所接收到的干扰功率 $P_r$ ：

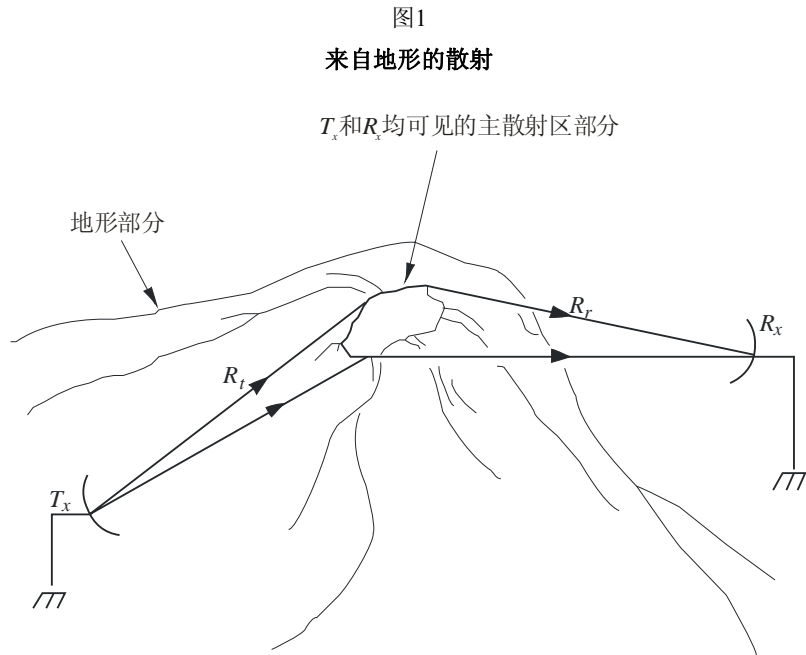
$$P_r = P_t \frac{\lambda^2}{(4\pi)^3} \int_{\Omega} \frac{G_t G_r}{R_t^2 R_r^2} \gamma dA_e, \quad (1)$$

其中， $t$ 和 $r$ 分别表示发射机和接收机， $G(\theta, \varphi)$ 表示主散射区 $dA_e$ 在散射体方向的天线功率增益， $\theta$ 代表方位角， $\varphi$ 代表自天线中心线的高度（见图1）， $R_t$ 和 $R_r$ 分别为天线至散射体的斜距， $\lambda$ 为波长， $\gamma$ 为修正后的散射系数，用来说明被主区域散射的不连贯能量。主区域 $dA_e$ 被定义为散射体与发射机和接收机的斜矢量正相交的最小区域。



等式(1)假定来自不同区域或对象的散射场是不连贯的，而 $\Omega$ 区域包含构成接收的散射能量的所有主区域。在计算地表某一部分的积分时，有必要考虑个别主区域的屏蔽情况。只有发射天线和接收天线均可看见的未屏蔽区域才会造成散射。

通过比较测量及计算出的干扰值，表明可假定修订后的散射系数 $\gamma$ 在相当大的地形区域内是常量。表1给出了一个主管部门针对若干不同的土地覆盖类形确定的 $\gamma$ 的特征值。



F.1096-01

表1

散射体类型	$\gamma$ (dB)
土地覆盖类型（取自美国数据库）	
- 城市居民区	-8
- 商业服务区	-7
- 落叶林区	-16
- 混合林区	-20
人造结构（取自联邦航空管理局数据库）	10.4

确定干扰功率的积分(1)可表示为有限相加：

$$P_r = C_t \sum_{\Omega} \frac{G_t(p_i)G_r(p_i)}{R_t^2(p_i)R_r^2(p_i)} \gamma_i A_{e,i} \tag{2}$$

$$C_i = P_i \frac{\lambda^2}{(4\pi)^3} \quad (3)$$

其中:

- $\gamma_i$ : 第*i*个单元的系数
- $p_i$ : 单元中点
- $A_{e,i}$ : 在各单元总体 $\Omega$ 中包含的第*i*个单元的有效区域

在某个固定频率上进行的干扰测量值通常显示出围绕等式(2)得出的均值的时间波动。这是因树木或植物这类散射体的运动或大气条件的短暂变化造成的，这些变化可能会引起来自不同散射区域的散射回波之间的振幅及相位变化。同样，当实验中改变载波频率时，也会观测到围绕同一平均值的上下波动。幸运的是，对于数字无线电系统之间的干扰这种重要情况而言，只有等式(2)得出的平均值才具有价值。另一方面，如果某个低指数FM信号的强载波是干扰源，则必须考虑该载波在平均值以上的波动（增强）。

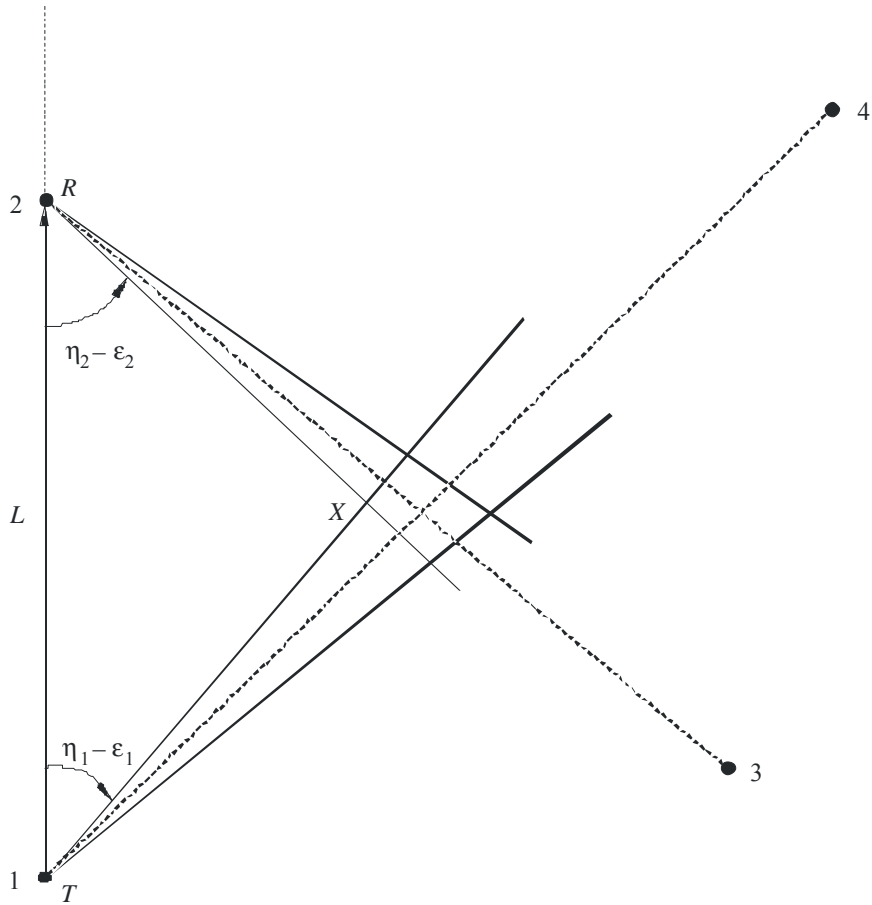
## 2.1 模型的应用

对于计算机资源的实用考虑限制了将要对其进行积分求值的 $\Omega$ 区域部分的有形面积。一种方法是将积分区域作为地球表面的一个四边形区域，该区域通过以发出干扰信号的天线为中心的方位角扇区与接收干扰天线为中心的方位角扇区的交集加以定义。图2即显示了这样一个区域，其中电台1至电台4的路径与电台2至电台3的路径相交，导致来自电台1对电台2的地形散射干扰。这些扇区以各自天线的主波束方位角为中心，并可包括那些方位角方向的方向增益不超过最大增益以下30dB的方位角。对此类区域之上的干扰积分求值详见第3.1节。

边界限定法提供了一种随意性较小、更准确和更有效的估算散射干扰功率的手段。在接收到的大部分受到地形散射的能量中，一般都是由干扰天线和受干扰天线主波束交集附近区域的散射造成的，因而只有在该交集附近才要求精确积分。 $\Omega$ 其余部分造成的散射可通过一个上限来确定。边界限定法的应用详见第3.2节。

只有在未被屏蔽的情况下，主地形区域才可能会对干扰累积造成非零的贡献。即，主地形区域必须处于发射和接收天线均可见的位置。在判断某个主区的屏蔽时，需考虑大幅屏蔽和微幅屏蔽。在大幅屏蔽中，由于更靠近两个天线之一的较高地形的阻挡，某个物体是看不见的；在微幅屏蔽中，由于其定向，该物体对两个天线之一显示不出有效区域 $A_{e,i}$ 。确定某个主区域属于大幅屏蔽还是微幅屏蔽区域的必要条件分别见第4.1和4.2节的介绍。

图2  
干扰的几何图形



F.1096-02

在以下演算中，假定能够获得有关积分地形的可靠的数字高程图。这些数据采用基于经纬度测量坐标定义的点集的高程形式。尽管可以得到并使用基于3角秒间隔的高分辨率地图数据，但使用15角秒数据便能够获得足够的精度。

在计算中，天线方向图大多基于存储在电脑查询表中的量度，或者它们也可以是测量过的方向图的分析表达式。为简便起见，现有的方位角方向图可能会绕波束中心线轴心旋转。

### 3 积分过程

#### 3.1 直接求值

对选定的 $S_0$ 区域上的积分可进行如下计算：

$$P_{r,o} = C_t \sum_{p_i \in S_0} \frac{G_t(p_i)G_r(p_i)}{R_t^2(p_i)R_r^2(p_i)} \gamma_i A_{e,i} \tag{4}$$

其中，点 $p_i$ 属于 $A_{e,i}$ 区域，后者是 $S_0$ 区域的一个正常分隔区：

$$S_0 = \bigcup_i A_{e,i} \quad A_{e,i} \cap A_{e,j} = \varnothing \quad \text{在 } i \neq j \text{ 的条件下} \quad (5)$$

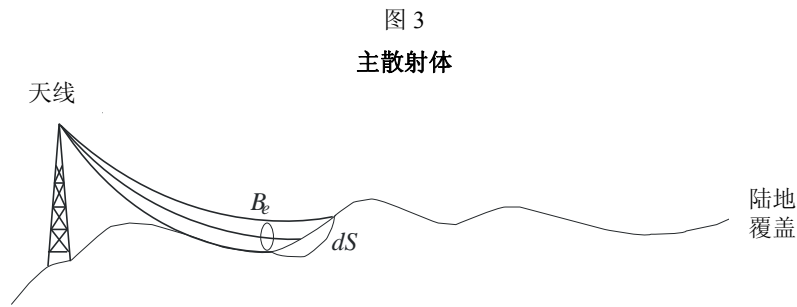
虽然被积分函数是在直角坐标网上定义的，但使用点三元组定义平面主区域还是很方便的。这些确定了用来获得 $A_{e,i}$ （能够被发射机和接收机看到的最小区域）的三角形区域。

$$A_{e,i} = \min\{A_{t,i}, A_{r,i}\} \quad (6)$$

如果某个区域被屏蔽，则从积分中去除相应的项。

通过地面 $\Delta S_i$ 投射至与射线方向垂直的面的可见部分确定主区域 $A_{e,i}$ （见图3）：

$$A_{e,i} = \min\{B_{t,i}, B_{r,i}\} \quad (7)$$



F.1096-03

最大可见主区域可表示为：

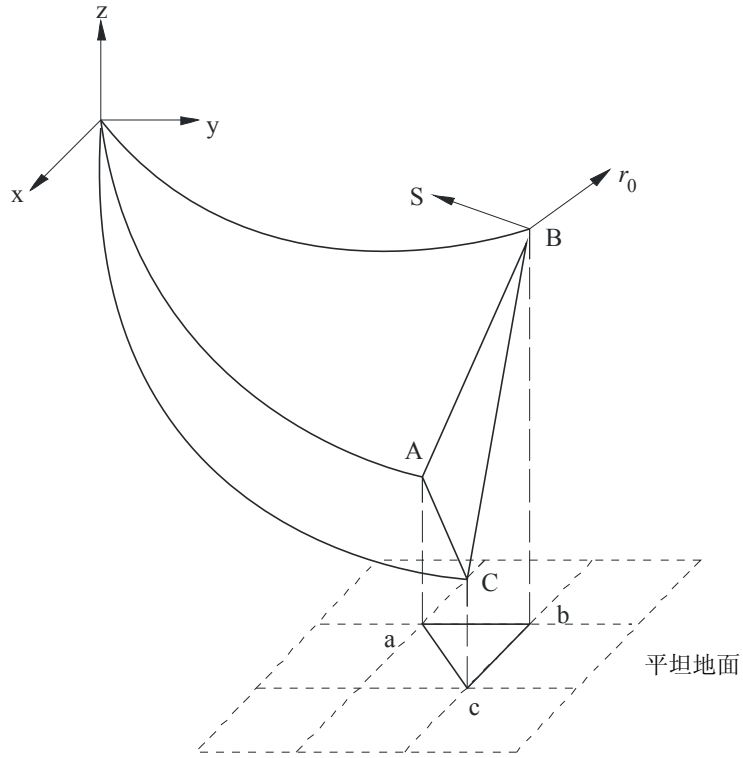
$$B_e = 0.5 \cdot [h(\sin\theta, \cos\theta) \cdot \cos(\varphi + 2\mu) - \Delta x \Delta y \cdot \sin(\varphi + 2\mu)] \quad (8)$$

$$h(u, v) = u \cdot \Delta y \Delta z_{cb} + v \cdot \Delta x \Delta z_{ab}$$

其中， $\Delta z_{ba}$ 和 $\Delta z_{bc}$ 为网格三角各点相对于直角点高程的高程增量（见图4）； $\Delta x$ 和 $\Delta y$ 为网格单元尺寸， $\varphi$ 和 $\theta$ 为三角形中点的高和方位角； $\mu$ 为散射射线的弦和切线之间的角（见图5）。须注意， $A_{e,i}$ 为投射到不取决于传播条件的地形区域 $S_i$ 的单位球面的区域。

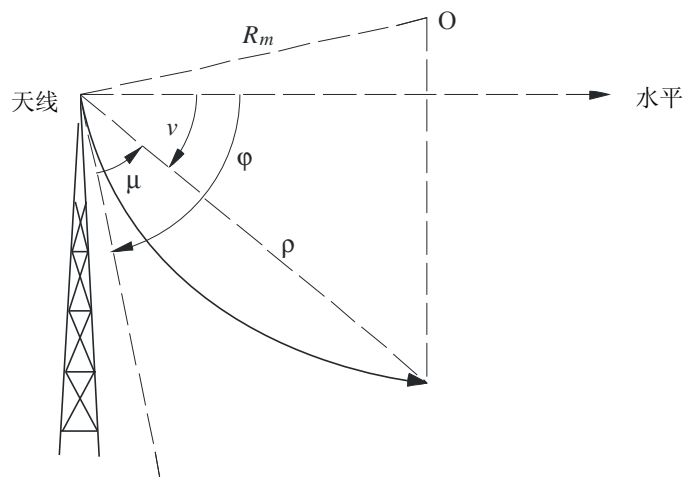


图4  
散射体的有效区域



F.1096-04

图5  
高度角



F.1096-05

该等式不需要对任何角进行计算，因为等式(8)中所有的三角函数都可以清晰地计算出来：

$$\begin{aligned} \sin \theta &= \frac{x}{(x^2 + y^2)^{1/2}}, & \cos \theta &= \frac{y}{(x^2 + y^2)^{1/2}}; \\ \sin(\varphi + 2\mu) &= \frac{z}{\rho} \left(1 - \frac{\rho^2}{4R_e^2}\right)^{1/2} + \frac{d}{2R_e}; \\ \cos(\varphi + 2\mu) &= \frac{d}{\rho} \left(1 - \frac{\rho^2}{4R_e^2}\right)^{1/2} - \frac{z}{2R_e}, \end{aligned} \quad (9)$$

其中， $\rho = (x^2 + y^2 + z^2)^{1/2}$  是天线和散射体之间的距离， $d = (x^2 + y^2)^{1/2}$  是其对水平面的投影， $R_e = a \cdot k$ ， $a$  为地球半径， $k$  为取决于大气变化率的地球半径因子。

将(9)代入(8)，得出：

$$B_e = 0.5 \cdot \left[ h(x, y) \cdot \left( \frac{1}{\rho} \cdot \sqrt{1 - \left( \frac{\rho}{2R_e} \right)^2} - \frac{z}{2R_e} \right) - \Delta x \Delta y \cdot \left( \frac{z}{\rho} \cdot \sqrt{1 - \left( \frac{\rho}{2R_e} \right)^2} + \frac{d}{2R_e} \right) \right] \quad (10)$$

其中， $(x, y, z)$  为三角中点坐标。由于  $z \ll R_e$ ，以上等式可简化为：

$$B_e = \frac{0.5}{\rho} \cdot [h(x, y) - \Delta x \Delta y \cdot z] - \Delta x \Delta y \frac{d}{4R_e} \quad (11)$$

### 3.2 边界限定法

可通过将域 $\Omega$  分割为两个互相排斥的子集 $S_0$  和 $Q_0$ ，获得计算 $P_r$ 的递归方法：

$$S_0 \cup Q_0 = \Omega, \quad S_0 \cap Q_0 = \varphi \quad (12)$$

将积分(1)表示为两项积分之和：

$$P_r = C_t \int_{S_0} \frac{G_t G_r}{R_t^2 R_r^2} \gamma dA_e + C_t \int_{Q_0} \frac{G_t G_r}{R_t^2 R_r^2} \gamma dA_e \quad (13)$$

这个表达式通过对第一项进行数值积分并对第二项进行边界限定进行计算。如果边界比第一个积分的计算值小很多，则 $\Omega$ 区域上的积分可由 $S_0$ 区域上的积分代替。所需的计算准确率决定了边界必须要比积分小多少。在多数应用中，如果边界小于积分的0.1倍，则 $\Omega$ 区域上的积分可由 $S_0$ 区域上的积分代替，导致在 $P_r$ 的估算中出现小于0.41 dB的误差。特别是考虑到确定散射系数和映射坐标的不确定性，接受这一估算误差是合理的。一般而言，由于天线有很高的指向性，精确积分的 $S_0$ 区域要比整个区域小很多。

在 $Q_0$ 上的边界与 $S_0$ 上的积分相差不大的情况下，将 $S_0$ 积分区域替换为更大的 $S_0 \cup S_1$  ( $S_1 \subset Q_0$ ) 区域。将 $Q_1$  定义为与 $Q_0$  相对应的 $S_1$  的补集，使  $S_1 \cup Q_1 = Q_0$ ,  $S_1 \cap Q_1 = \varnothing$ 。求 $Q_1$  上边界的值。由于 $Q_1$  上的积分不能大于 $Q_0$  上的积分，一般而言， $Q_1$  上的边界要小于 $Q_0$  上的边界。此外， $S_0 \cup S_1$  上的积分必须大于 $S_0$  上的积分。因此，如果该过程重复 $n$  次，边界就会小于 $\cup_i S_i$  上的积分，从而使 $\Omega$  总体区域上的积分能够被子集 $\cup_i S_i$  上的积分代替。在实践中， $n$  不宜过大，例如，1或2。这可通过适当选择 $S_0$  并适当设计算法，使 $Q_0$ （和其他 $Q_i$ ）上的边界越紧凑越好。

需注意，能够把 $S_i$  添加到实际积分区域中，并利用此前的得数，从而在任一区域 $S_i$  上仅进行一次积分。由于较容易计算边界，为了估算准确，可视需要反复重复这一过程。

$Q_0, Q_1, \dots$  上限的计算，利用不等式 $\gamma dA_e \leq \gamma R_t^2 d\omega_t$ ，其中 $d\omega_t$  为以 $dS$  元素的天线为中心的立体角（见注释）。使用以发射机为中心的球面坐标，

$$P_{r,e} = C_t \int_{Q_0} \frac{G_t G_r}{R_t^2 R_r^2} \gamma dA_e \leq C_t \max_{Q_0} \left[ \frac{\gamma G_t G_r}{R_r^2} \right] D_0 \quad (14)$$

其中， $D_0$  为 $Q_0$  积分区域投射至以发射机为中心的单元球面的面积， $\varphi_t$  和 $\theta_t$  为主散射体的高度和方位角。

由于：

$$\max_{Q_0} \left[ \frac{\gamma G_t G_r}{R_r^2} \right] \leq \left[ \frac{\gamma_{\max} G_{t,\max} \cdot G_{r,\max}}{R_{r,\min}^2} \right] \quad (15)$$

其中，在 $Q_0$  区域取极大值和极小值：

$$P_{r,e} \leq C_t \frac{G_{t,\max} \cdot G_{r,\max}}{R_{r,\min}^2} \gamma_{\max} D_0 \quad (16)$$

使用以发射机为中心的球面坐标，得出模拟结果：

$$P_{r,e} \leq C_t \frac{G_{t,\max} \cdot G_{r,\max}}{R_{t,\min}^2} \gamma_{\max} D_0 \quad (17)$$

这两个边界中的较紧凑者具有以下形状：

$$P_{r,e} \leq C_t \frac{G_{t,\max} G_{r,\max}}{R_m^2} \gamma_{\max} D_0 \quad (18)$$

其中：

$$R_m = \max \{R_{r,\min}, R_{t,\min}\} \quad (19)$$

可通过选择不同的区域 $S_0$ 找到不同的边界。在最重要的实例中， $S_0$ 代表一个位于角交集 $|\theta_{r,0} - \theta_r| < \varepsilon_1$ 、 $|\theta_{t,0} - \theta_t| < \varepsilon_2$ 的地形区域，其中， $\theta_{r,0}$ 和 $\theta_{t,0}$ 为天线的方向方位角（见图2）。如果 $\varepsilon_1$ 和 $\varepsilon_2$ 达到角内的天线增益在其旁瓣大于局部极值的程度，则以上边界可改写为：

$$P_{r,e} \leq C_t \frac{G_r(\theta_{r,0} + \varepsilon_1, \varepsilon_2) \cdot G_t(G_{t,0} + \varepsilon_1, \varepsilon_2)}{R_m^2} \gamma_{max} D_0 \quad (20)$$

在这一特定事例中，可从图2显示的三角RXT中得出 $R_{t,min}$ 和 $R_{r,min}$ 。

$$R_{t,min} = \frac{L \sin(\eta_2 - \varepsilon_2)}{\sin(\eta_1 + \eta_2 - \varepsilon_1 - \varepsilon_2)},$$

$$R_{r,min} = \frac{L \sin(\eta_1 - \varepsilon_1)}{\sin(\eta_1 + \eta_2 - \varepsilon_1 - \varepsilon_2)}. \quad (21)$$

附件2介绍了计算 $D_0$ 区域的方法。然而，为避免复杂的计算过程，这一区域可限定为等于 $4\pi$ 的单位球面的总面积。

此前的边界基于天线指向性。其他边界可通过等式(2)得出。例如，可从积分中排除边远区域。相应边界拥有以下形状：

$$P_{r,x} \leq C_t \frac{G_r(\theta_{r,0}, 0) \cdot G_t(\theta_{t,0}, 0)}{R^2} \gamma_{max} \bar{D}_0 \quad (22)$$

其中， $\bar{D}_0$ 为 $S_0$ 区域投影至单位球面的区域，选择 $R$ ，使 $P_{r,x} + P_{r,e}$ 小于所需的精确度。

无线电通信局主任的注 - 作为参考，本计算方法的推导过程见：

SMITH, W.E., SULLIVAN, P.L., GIGER, A.J. 和 ALLEY. G.D. [1987年6月]微波干扰预测领域的近期进展。IEEE 国际通信大会 (ICC '87)，论文23.2。

## 4 屏蔽

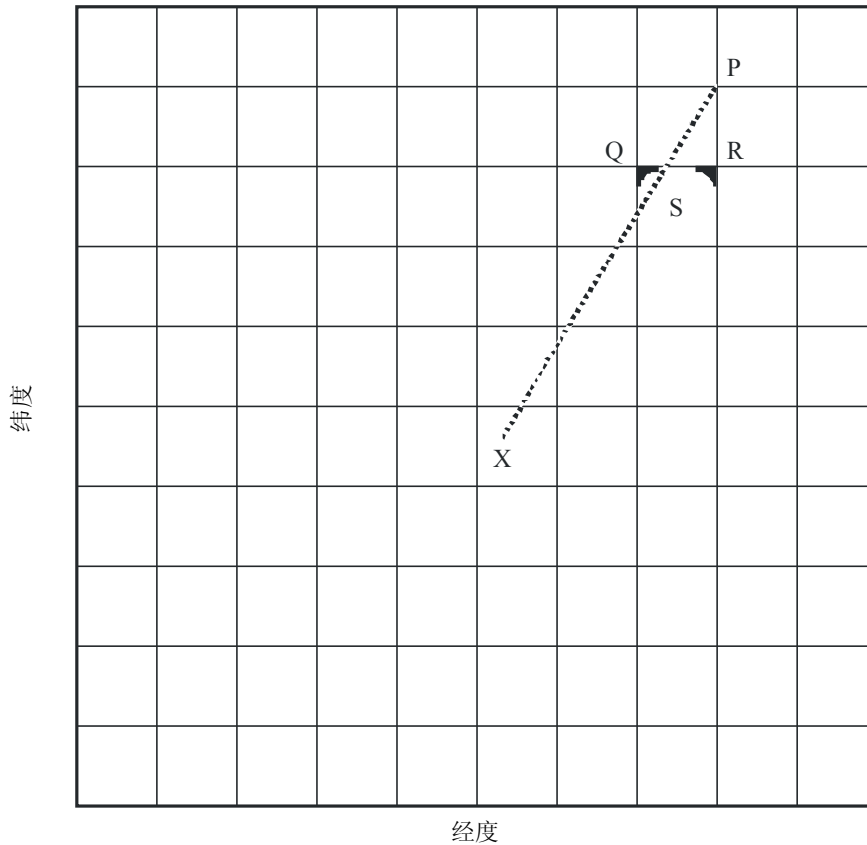
### 4.1 大幅屏蔽

由于主区域的屏蔽可与每个点的屏蔽相关，因此需要确定组成该区域各点的屏蔽。为此使用以天线为中心的球面坐标将十分方便。在屏蔽计算过程中，通过使用球面坐标系，算法只需沿辐射面跟踪最大发射角便可，仅在必要时才更新最大发射角。

使用网格坐标系统时，屏蔽的概念不会发生变化，但不能轻易确定任何网格点的可见度，因为无法保证能够找到以相同方位角作为测试点的一个或更多的网格点。必须估算辐射方向最大发射角的近似值，以便将测试点的发射角与该值比较，从而确定其是否可见。对于给定的测试点P，我们首先必须确定比测试点更近的两个网格点Q和R，横跨天线到测试点的辐射，得出最小方位角差，并得出最小发射角。这些点在水平面上的投影见图6。

图 6

在Q和R点利用可见的发射角屏蔽测试点P



F.1096-06

需要比较对至测试点P的发射角和可与辐射面和连接两个网格点的线段交集点S相关的可见发射角。该辐射面见图7。假定S是可见的，在比较发射角 $\phi_S$ 和 $\phi_P$ 时，决定在并仅在 $\phi_P \geq \phi_S$ 的情况下，P点才是可见的。否则，它就是被屏蔽或看不到了。

可从图5中推导出任何点的发射角 $\phi$ ：

$$\phi = \arcsin \left[ \frac{z}{\rho} \left( 1 - \frac{\rho^2}{4R_e^2} \right)^{1/2} - \frac{d}{2R_e} \right] \quad (23)$$

其中:

$$R_e = k \cdot a;$$

$k$ : 有效地球半径因子, 它取决于折射率的变化曲线;

$a$ : 地球半径;

$d$ : 天线和测试点之间的水平距离;

$z$ : 天线上测试点的高程;

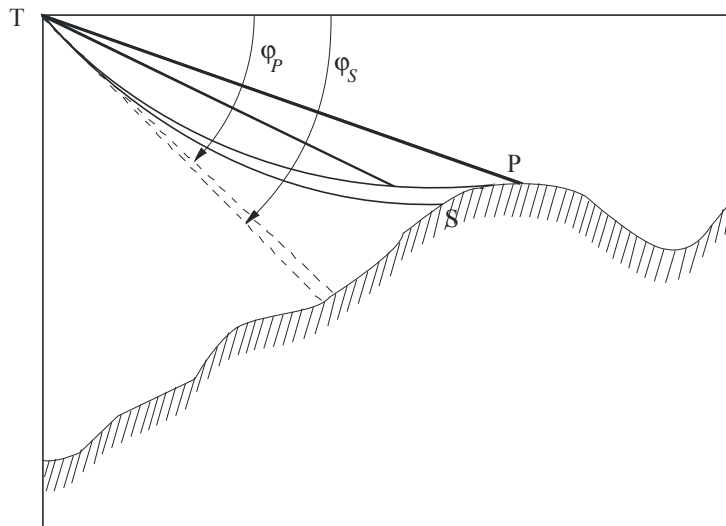
$$\rho = (x^2 + y^2 + z^2)^{1/2}.$$

由于弧 $\sin(x)$ 是一个无变化增加函数, 考虑到 $S$ 是可见的, 在确定 $P$ 是否可见时, 仅需比较弧 $\sin$ 函数的自变量即可。

$$\frac{z_p}{\rho_p} - \frac{d_p}{2R_e} < \frac{z_s}{\rho_s} - \frac{d_s}{2R_e} \quad (24)$$

在网格坐标系统中, 可通过线性插值确定 $S$ 点的发射角 $\varphi_S$ :

图 7  
对测试点P的屏蔽



F.1096-07

$$\varphi_S = \frac{d_{QS}}{d_{QR}} \varphi_Q + \frac{d_{RS}}{d_{QR}} \varphi_R, \quad (25)$$



其中:

$d_{QS}$ : Q和S之间的距离

$d_{QR}$ : Q和R之间的距离

$d_{RS}$ : R和S之间的距离。

在屏蔽中, 从最靠近发射机的网格点开始, 并假定它们是可见的。从同心矩形中的这些点中移开, 使整个网格被覆盖, 从而确定了各点的屏蔽。

## 4.2 微幅屏蔽

对主区域的微幅屏蔽是由其定向决定的。考虑图4中的主三角区域。如果并且仅在其表面的外法线 $N$ 和对应射线的单位切线向量是锐角时, 该三角形才被屏蔽。这可表示为:

$$N \cdot r_0 \geq 0 \quad (26)$$

假定 $z_a$ 、 $z_b$  和 $z_c$ 是网格上三个相邻点的高(见图4), 并且这些点中至少有一个点未被屏蔽。可通过笛卡尔坐标定义近似面积元素的三角ABC的顶点:  $A(x_b, y_b + \Delta y, z_a)$ 、 $B(x_b, y_b, z_b)$ 、 $C(x_b + \Delta x, y_b, z_c)$ 。则不等式(26)相当于(见注释):

$$\begin{aligned} \delta[h(\sin \theta, \cos \theta) \cos(\varphi + 2\mu) - \Delta x \Delta y \sin(\varphi + 2\mu)] &\geq 0 \\ h(u, v) &= u \cdot \Delta y \Delta z_{cb} + v \cdot \Delta x \Delta z_{ab} \\ \delta &= \text{sign}(\Delta x \Delta y) \end{aligned} \quad (27)$$

其中 $\varphi$ 为发射角、 $\mu$ 为发射角与高度角之差,  $\theta$ 为散射体的方位角。该不等式左边绝对值的一半等于等式(8)中给出的散射体有效面积。因此, 在计算主散射体的干扰时, 我们可以计算表达式(27)左边的数值, 并将之用于计算微幅屏蔽。

在确定微幅屏蔽以及计算 $B_e$  (主三角区的有效面积)时, 附件3给出了简化的近似方法。通过将 $\varphi$ 中的一阶近似应用于等式(11)和(27), 该方法缩减了计算时间。每当干扰天线和被干扰天线主波束交集附近区域的发射角小于约 $5^\circ$ 时, 便可使用这种方法, 其造成的误差小于10%。

无线电通信局主任的注-该等式的推导过程见:

KAHN, A.L.、PRABHU, V.K.和TURIN, W. [1991] 估算地面散射体干扰时的屏蔽算法, 《会议记录》, IEEE 全球电信大会 (GLOBECOM '91)。

## 附件 2

## 计算单位球面上四边形的面积

以下公式给出了四边形 $D_0$ 的面积:

$$D_0 = A_1 + A_2 + A_3 + A_4 - 2\pi \quad (28)$$

其中,  $A_1, A_2, A_3$  和  $A_4$  分别是单位球面上四边形的角。

角 $A_i$  等于球体中心的平面和形成该角的大圆之间的角。该角可从以下等式获得:

$$\cos A_i = \frac{N_j \cdot N_k}{|N_j| \cdot |N_k|} \quad (29)$$

其中,  $N_j$  和  $N_k$  为平面正交,  $|N_j|$  和  $|N_k|$  为其长度。这些向量通过球体表面对应各点的向量径的叉积得出。例如, 顶点 $A_i$  的向量径表示为 $r_i$ ,

$$\cos A_2 = \frac{(r_2 \times r_1) \cdot (r_3 \times r_2)}{|r_2 \times r_1| \cdot |r_3 \times r_2|} \quad (30)$$

要导出明确的等式, 考虑采用以球体中心为原点的笛卡尔和球面坐标, 则单位球体上 $A_i$  点的向量径可表示为:

$$r_i = \{\cos \varphi_i \sin \theta_i, \cos \varphi_i \cos \theta_i, \sin \varphi_i\} \quad (31)$$

这些向量的叉积等于:

$$r_{ij} = r_i \times r_j = \{x_{ij}, y_{ij}, z_{ij}\} \quad (32)$$

其中,

$$\begin{aligned} x_{ij} &= \cos \varphi_i \cos \theta_i \sin \varphi_j - \cos \varphi_j \cos \theta_j \sin \varphi_i \\ y_{ij} &= \cos \varphi_j \sin \theta_j \sin \varphi_i - \cos \varphi_i \cos \theta_i \sin \varphi_j \end{aligned} \quad (33)$$

$$z_{ij} = \cos \varphi_i \sin \theta_i \cos \varphi_j \cos \theta_j - \cos \varphi_j \sin \theta_j \cos \varphi_i \cos \theta_i$$

由以下得出等式(30)中叉积的内积:

$$r_{ij} \cdot r_{kl} = x_{ij} x_{kl} + y_{ij} y_{kl} + z_{ij} z_{kl} \quad (34)$$

则向量长度为:

$$r_{ij} = (x_{ij}^2 + y_{ij}^2 + z_{ij}^2)^{1/2} \quad (35)$$

## 附件 3

## 计算有效面积和微幅屏蔽的替代方法

对于三角形区域内发射角和方位角的小幅变异（如图4所示），可按照方位角 $P_1(\rho_1, \varphi_1, \theta_1)$ 、 $P_2(\rho_2, \varphi_2, \theta_2)$ 、 $P_3(\rho_3, \varphi_3, \theta_3)$ ，通过初选三角形的顶点，从而近似确定微幅屏蔽。

$$\theta_1 \leq \theta_2 \leq \theta_3 \quad (36)$$

使用线性插值确定点 $P_x$ 的坐标，该点位于连接 $P_1$ 和 $P_3$ 直线上的方位角 $\theta_2$ 。如果点 $P_2$ 所在位置较点 $P_x$ 距离天线更远，其标高小于 $P_x$ 的标高，则该区域受到微幅屏蔽。同样，如果点 $P_2$ 所在位置较点 $P_x$ 距离天线更近，且其标高大于 $P_x$ 的标高，则该区域受到微幅屏蔽。

将点 $P_2$ 的标高减点 $P_x$ 的标高定义为 $\Delta\varphi$ ，并将点 $P_2$ 至天线的距离超过点 $P_x$ 至天线的距离的数值定义为 $\Delta\rho$ 。在以下条件下，某一单元格会被屏蔽：

$$\Delta\rho \cdot \Delta\varphi \leq 0 \quad (37)$$

其中：

$$\Delta\rho = \rho_2 - \rho_1 \frac{\theta_3 - \theta_2}{\theta_3 - \theta_1} - \rho_3 \frac{\theta_2 - \theta_1}{\theta_3 - \theta_1} \quad (38)$$

$$\Delta\varphi = \varphi_2 - \varphi_1 \frac{\theta_3 - \theta_2}{\theta_3 - \theta_1} - \varphi_3 \frac{\theta_2 - \theta_1}{\theta_3 - \theta_1}$$

三角形的有效投射面积可近似计算如下：

$$B_e = \frac{\rho^2 \cos \varphi}{2} |\Delta A| \quad (39)$$

其中， $\rho$  为天线至主三角区的距离，并且：

$$\Delta A = (\theta_3 - \theta_1) \Delta\varphi \quad (40)$$

因此，值 $\Delta\varphi$ 不仅可用于微幅屏蔽，也可用于估算投射面积。须注意，由于对 $\theta$ 的测量以 $2\pi$ 为模，而且主三角的方位角扩展范围很小，因此在等式(38)和(40)中，任何 $\theta_i - \theta_j$ 之差如超过 $\pi$ ，则必须减去 $2\pi$ 。