

ITU-R P.533-9 建议书**

HF 电路性能的预测方法*

(1978-1982-1990-1992-1994-1995-1999-2001-2005-2007 年)

范围

本建议书给出了 HF 模拟和数字两种调制系统的可用频率、信号电平和预计可靠性的预测方法，这些方法不但考虑了信噪比，也考虑了预期的信道时间和频率扩展。

国际电联无线电通信全会，

考虑到

- a) 对比 ITU-R 数据库 D1 的测试表明本建议书的附件 1 的方法具有与其他更复杂方法类似的精度；
- b) 为了该方法的实际应用需要发送和接收天线的性能特性方面的信息，¹

建议

- 1 附件 1 中的信息应用于频率在 2 和 30 MHz 之间的天波传播的预测；
- 2 主管部门和 ITU-R 应努力改进预测方法，以改善操作的简便程度和提高精度。

附件 1**目录**

- 1 引言
 - 第1部分 – 频率可用性
 - 2 控制点的位置
-

* 本建议书中有关预测步骤的计算机程序 (REC533)，可由 ITU-R 网页上有关无线电通信第 3 研究组的部分获得。

** 无线电通信局秘书处的说明 – 2008 年 2 月对第 1、3、18 和 23 页 (§3 中的等式) 进行了英文的编辑性修改。

¹ 涉及有关的计算机程序的天线的范围的详细资料可从国际电联获得；细节见 ITU-R BS.705 建议书。

- 3 基本和工作最高可用频率
 - 3.1 基本最高可用频率
 - 3.2 E层临界频率 (f_oE)
 - 3.3 E层基本 MUF
 - 3.4 F2层特性
 - 3.5 F2层基本 MUF
 - 3.5.1 最低阶模
 - 3.5.1.1 不超过 d_{max} (km) 的路径
 - 3.5.1.2 超过 d_{max} (km) 的路径
 - 3.5.2 高阶模 (超过 9 000 km 的路径)
 - 3.5.2.1 不超过 d_{max} (km) 的路径
 - 3.5.2.2 超过 d_{max} (km) 的路径
 - 3.6 在支持电离层传播的月份概率之内
 - 3.7 路径工作 MUF
- 4 E层最高屏蔽频率 (f_s)

第2部分—天波场强中值

- 5 天波场强中值
 - 5.1 仰角
 - 5.2 不超过 7 000 km 的路径
 - 5.2.1 模的考虑
 - 5.2.2 场强确定
 - 5.3 超过 9 000 km 的路径
 - 5.4 在 7 000 和 9 000 km 之间的路径

- 6 可用接收机功率中值

第3部分—系统性能的预测

- 7 月信噪比中值
- 8 对其他时间百分比的天波场强、可用接收机信号功率和信噪比
- 9 最低可用频率 (LUF)

- 10 基本电路可靠性 (BCR)
 - 10.1 模拟调制系统的可靠性
 - 10.2 在考虑了接收信号时间和频率扩展的情况下数字调制系统的可靠性
 - 10.2.1 系统参数
 - 10.2.2 时间延迟
 - 10.2.3 可靠性预测程序
 - 10.3 赤道散射

附录 1 — 一种 HF 信号赤道散射模型

1 引言

该预测程序对不超过 7 000 km 的路径进行了射线路径分析，超过 9 000 km 时应用了从拟合到测量数据的组合经验公式，在 7 000-9 000 km 距离范围内则是这两种方法的平滑过渡。

确定了月基本 MUF 中值、入射天波场强中值和来自给定增益的无损耗接收天线的可用接收机功率中值。所用的方法包括估计信道传递函数的参数，用于预测数字系统的性能。信号强度对照 ITU-R 测量数据库进行了标准化。该方法需要确定若干电离层特性和在规定的“控制点”的传播参数。

在赤道范围内，在晚间几小时（当地时间）内，由于该方法未全面考虑区域电离层结构的不稳定性，其预测结果可能有所失真。

第 1 部分

频率可用性

2 控制点的位置

假设传播是沿发射机和接收机位置之间的大圆路径通过 E 模（直至 4 000 km 范围）和 F2 模（对所有距离）进行的。根据路径长度和反射层，选择的控制点示于表 1 中。

表 1
确定基本 MUF、E 层屏蔽、射线路径镜面反射高度和
电离层吸收的控制点的位置

a) 基本 MUF 和相关的电子回转频率

路径长度 D (km)	E 模	F2 模
$0 < D \leq 2\,000$	M	M
$2\,000 < D \leq 4\,000$	$T+1\,000, R-1\,000$	–
$2\,000 < D \leq d_{max}$	–	M
$D > d_{max}$	–	$T+d_0/2, R-d_0/2$

b) E 层屏蔽

路径长度 D (km)	F2 模
$0 < D \leq 2\,000$	M
$2\,000 < D < 9\,000$	$T+1\,000, R-1\,000$

c) 射线路径镜面反射高度

路径长度 D (km)	F2 模
$0 < D \leq d_{max}$	M
$d_{max} < D < 9\,000$	$T+d_0/2, M, R-d_0/2$

d) 电离层吸收和相关的电子回转频率

路径长度 D (km)	E 模	F2 模
$0 < D \leq 2\,000$	M	M
$2\,000 < D \leq 4\,000$	$T+1\,000, M, R-1\,000$	–
$2\,000 < D \leq d_{max}$	–	$T+1\,000, M, R-1\,000$
$d_{max} < D < 9\,000$	–	$T+1\,000, T+d_0/2, M,$ $R-d_0/2, R-1\,000$

M : 路径中间点
 T : 发射机位置
 R : 接收机位置
 d_{max} : F2 模的最大跳跃长度
 d_0 : 最低阶模的跳跃长度
 距离单位为 km。

3 基本和工作最高可用频率

估算工作 MUF、无线电业务允许的可接受的最高工作频率分为两个步骤：第一步，从对电离层参数的考虑估算基本 MUF，第二步，确定允许频率在 MUF 之上的传播机制的校正因子。

3.1 基本最高可用频率

根据相应的电离层临界频率和一个对应跳跃长度的因子估算各种传播模式的基本最高可用频率 (MUF)。在考虑 E 模和 F2 模二者时, 最低阶 E 模和 F2 模的较高的两个基本 MUF 给出路径的基本 MUF。

3.2 E层临界频率(foE)

月中值 foE 按照 ITU-R P.1239 建议书的规定确定。

3.3 E层基本MUF

在表 1a) 所提示的控制点估算 foE 且对于 2 000-4 000 km 的路径长度选择较低的值。那么在长度大于 D 的路径 n 跳 E 模的基本 MUF 由下式给出:

$$n E(D)MUF = foE \cdot \sec i_{110} \quad (1)$$

其中 i_{110} 是一跳长度 $d=D/n$ 的 110 km 的半跳镜面反射高度的入射角。

路径的 E 层基本 MUF 是对最低阶 E 模的 $E(D)$ MUF 值。

3.4 F2层特性

电离层特性的月中值数值表示 foF2 和 $M(3000)F2$, 当太阳—指数值 $R_{12}=0$ 和 100 时, 每个月的这一数值出自于 ITU-R P.1239 建议书, 其中磁场是在 300 km 高度估算的。对于所需要的倍数和表 1a) 所给出的控制点, 这些数值表示法用于确定这些值。在 $R_{12}=0$ 和 150 之间对主要的指数值应用线性内插或外插 (见 ITU-R P.371 建议书)。对较高的太阳黑子活动, 仅在 foF2 的情况 R_{12} 设置为等于 150。

3.5 F2层基本MUF

3.5.1 最低阶模

3.5.1.1 路径长达 d_{max} (km)

最低阶模的阶数 n_0 利用由以下公式在半路径控制点推导出的镜面反射高度 h_r 通过几何考虑来确定:

$$h_r = \frac{1490}{M(3000)F2} - 176 \text{ km 或 } 500 \text{ km, 选较小者} \quad (2)$$

对该模, F2 层基本 MUF 也是该路径的 F2 层基本 MUF, 计算公式为:

$$n_0 F2(D)MUF = \left[1 + \left(\frac{C_d}{C_{3000}} \right) (B - 1) \right] \cdot foF2 + \frac{f_H}{2} \left(1 - \frac{d}{d_{max}} \right) \quad (3)$$

其中:

f_H : 在 300 km 高度对表 1a) 中给出的各适当控制点算出的电子回转频率的值

$$C_d = 0.74 - 0.591Z - 0.424Z^2 - 0.090Z^3 + 0.088Z^4 + 0.181Z^5 + 0.096Z^6 \quad (4)$$

其中 $Z = 1 - 2d/d_{max}$

$$d_{max} = 4780 + (12610 + 2140/x^2 - 49720/x^4 + 688900/x^6)(1/B - 0.303) \quad (5)$$

$$B = M(3000)F2 - 0.124 + [[M(3000)F2]^2 - 4] \cdot \left[0.0215 + 0.005 \sin \left(\frac{7.854}{x} - 1.9635 \right) \right] \quad (6)$$

其中:

$d =$ D/n_0 和 d_{max} , 单位都为 km
 C_{3000} : 当 $D=3000$ km 时的 C_d 的值
 $x =$ foF2/foE 或 2, 选较大者
foE 的计算如第 3.2 节所述。

3.5.1.2 路径大于 d_{max} (km)

对于路径长度 D 的最低阶模 n_0 F2 (D) MUF 的基本 MUF, 其值等于由公式 (3) 对表 1a) 中给的两个控制点确定出的 F2 (d_{max}) MUF 值中的较低值。它也是路径的基本 MUF。

3.5.2 高阶模 (不超过 9 000 km 的路径)

3.5.2.1 不超过 d_{max} (km) 的路径

一个 n 跳模的 F2 层基本 MUF, 对于跳跃长度 $d=D/n$, 在表 1a) 中给的半路径控制点对利用公式 (3) 至 (6) 计算。

3.5.2.2 超过 d_{max} (km) 的路径

一个 n 跳模的 F2 层基本 MUF, 根据 F2 (d_{max}) MUF 与一个取决于公式中模的各跳跃长度和最低可能阶模的距离比例因数计算。

$$n \text{ F2}(D)\text{MUF} = \text{F2}(d_{max})\text{MUF} \cdot M_n / M_{n_0} \quad (7)$$

其中 M_n/M_{n_0} 由公式 (3) 推导如下:

$$\frac{M_n}{M_{n_0}} = \frac{n \text{ F2}(d)\text{MUF}}{n_0 \text{ F2}(D)\text{MUF}} \quad (8)$$

选择在表 1a) 的两个控制点计算出的较低的值。

3.6 在支持电离层传播的月份概率之内

在某些情况下, 预测足以支持路径传播的电离作用概率就足够了, 不用考虑系统与天线的特性以及性能要求。对于这种情况, 需要知道 MUF 超过工作频率的概率。上面第 3.3 和第 3.5 节给出了 E 层和 F2 层传播的 MUF(50) 中值。

对于 F2 模, ITU-R P.1239 建议书的表 2 给出了一个月内 90% 的天数内超过的 MUF, 即 MUF(90), 与 MUF(50) 的十分位比值的下限 δ_1 , 该值是当地时间、纬度、季节和太阳黑子数目的函数。

对于工作频率 f 小于 MUF(50) 的情况, 电离作用支持概率由下式给出:

$$F_{prob} = 130 - (1 + \text{MUF}(50) \cdot \delta_v / f) \text{ 或 } = 100, \text{ 选较小者} \quad (9)$$

ITU-R P.1239 建议书的表 3 给出了十分位比值的上限 δ_u , 也就是一个月内 10% 的天数内超过的 MUF (即 MUF(10)) 与 MUF(50) 的比值, 该值是当地时间、纬度、季节和太阳黑子数目的函数。

对于工作频率 f 大于 MUF(50) 的情况, 电离作用支持概率由下式给出:

$$F_{prob} = (1 + f/\text{MUF}(50) \cdot \delta_u) \text{ 或 } = 0, \text{ 选较小者} \quad (10)$$

对于 E 模, 十分位间距的相应因子分别为 1.05 和 0.95。

工作 MUF 在某个月份给定一小时内的分布可通过代入第 3.6 节给出的分布求得。注意, 在月内 90% 和 10% 的天数内超过的工作 MUF 分别被规定为优化工作频率和可能最高频率。

3.7 路径工作 MUF

路径工作 MUF 对于 F2 模是较大的工作 MUF, 而对于 E 模就是工作 MUF。工作 MUF 和基本 MUF 之间的关系取决于系统与天线特性并取决于路径长度方向地理方面与其他方面的考虑, 应根据电路性能方面的实际经验确定。若没有这种经验, 对于 F2 模, 工作 MUF = 基本 MUF $\cdot R_{op}$, 其中 R_{op} 由 ITU-R P.1240 建议书的表 1 给出; 对于 E 模, 工作 MUF 等于基本 MUF。

对于 10% 和 90% 工作天数内超过的 MUF, 其估算值用 ITU-R P.1239 建议书表 2 和表 3 中 F 模情况所给出的适当因子相乘后得到。在 E 模的场合, 合适的因子分别为 1.05 和 0.95。

4 E 层最高屏蔽频率(f_s)

F2 模的 E 层屏蔽频率考虑的是最长 9 000 km 的路径 (见表 1b))。路径中点的 foE 值 (对于最长 2 000 km 的路径), 或路径的各端两个 1 000 km 的控制点中 foE 值较大的一个 (对于大于 2 000 km 的路径), 用于进行最大屏蔽频率的计算。

$$f_s = 1.05 \text{ foE sec } i \quad (11)$$

而:

$$i = \arcsin \left(\frac{R_0 \cos \Delta F}{R_0 + h_r} \right) \quad (12)$$

其中:

- i : 高度 $h_r = 110 \text{ km}$ 时的倾角
- R_0 : 地球半径, 6 371 km
- ΔF : F2 层模的仰角(由公式 (13) 计算)。

第 2 部分

天波场强中值

5 天波场强中值

预测场强是月内所有天数的月中值。根据路径长度的不同，预测程序分为三部分。

5.1 仰角

仰角适用于包括那些高于基本 MUF 的所有频率，由下式算出：

$$\Delta = \arctan \left(\cot \frac{d}{2R_0} - \frac{R_0}{R_0 + h_r} \operatorname{cosec} \frac{d}{2R_0} \right) \quad (13)$$

其中：

d ：用 $d=D/n$ 算出的 n 跳模的跳跃长度

h_r ：等效平面镜面反射高度

对于 E 模， $h_r=110$ km

对于 F2 模， h_r 看作是时间、位置和跳跃长度的函数。

对于 F2 模的镜面反射高度 h_r 计算如下，其中：

$$x = \text{foF2} / \text{foE} \quad \text{且} \quad H = \frac{1490}{M(3000)F2 + \Delta M} - 316$$

$$\Delta M = \frac{0.18}{y - 1.4} + \frac{0.096(R_{12} - 25)}{150}$$

且 $y=x$ 或 1.8，选较大者。

a) 对于 $x > 3.33$ 和 $x_r = f/\text{foF2} \geq 1$ ，其中 f 是波频率：

$$h_r = h \text{ 或 } 800 \text{ km, 选较小者} \quad (14)$$

其中：

$$h = A_1 + B_1 2.4^{-a} \quad \text{对于 } B_1 \text{ 和 } a \geq 0$$

否则 $= A_1 + B_1$

$$\text{而} \quad A_1 = 140 + (H - 47)E_1$$

$$B_1 = 150 + (H - 17)F_1 - A_1$$

$$E_1 = -0.09707x_r^3 + 0.6870x_r^2 - 0.7506x_r + 0.6$$

F_1 则为：

$$F_1 = -1.862x_r^4 + 12.95x_r^3 - 32.03x_r^2 + 33.50x_r - 10.91 \quad \text{对于 } x_r \leq 1.71$$

$$F_1 = 1.21 + 0.2x_r \quad \text{对于 } x_r > 1.71$$

且 a 随距离 d 和跳跃距离 d_s 而变化:

$$a = (d - d_s) / (H + 140)$$

其中: $d_s = 160 + (H + 43) G$

$$G = -2.102x_r^4 + 19.50x_r^3 - 63.15x_r^2 + 90.47x_r - 44.73 \quad \text{对于 } x_r \leq 3.7$$

$$G = 19.25 \quad \text{对于 } x_r > 3.7$$

b) 对于 $x > 3.33$ 和 $x_r < 1$:

$$h_r = h \text{ 或 } 800 \text{ km, 选较小者} \quad (15)$$

其中:

$$h = A_2 + B_2 b \quad \text{对于 } B_2 \geq 0$$

否则 $= A_2 + B_2$

而 $A_2 = 151 + (H - 47)E_2$

$$B_2 = 141 + (H - 24)F_2 - A_2$$

$$E_2 = 0.1906Z^2 + 0.00583Z + 0.1936$$

$$F_2 = 0.645Z^2 + 0.883Z + 0.162$$

其中: $Z = x_r$ 或 0.1, 选较大者, 且 b 随归一化的距离 d_f 、 Z 和 H 而变化:

$$b = -7.535d_f^4 + 15.75d_f^3 - 8.834d_f^2 - 0.378d_f + 1$$

$$\text{其中: } d_f = \frac{0.115d}{Z(H + 140)} \text{ 或 } 0.65; \text{ 选较小者}$$

c) 对于 $x \leq 3.33$:

$$h_r = 115 + HJ + Ud \text{ 或 } 800 \text{ km, 选较小者} \quad (16)$$

而 $J = -0.7126y^3 + 5.863y^2 - 16.13y + 16.07$

且 $U = 8 \times 10^{-5}(H - 80)(1 + 11y^{-2.2}) + 1.2 \times 10^{-3}Hy^{-3.6}$

在路径长达 d_{max} (km) 的情况下, h_r 在路径中点估算, 对较长路径要对表 1c) 给出的所有控制点进行估算且用平均值。

5.2 不超过 7 000 km 的路径

5.2.1 模的考虑

选择了最多 3 种的 E 模 (对不超过 4 000 km 的路径) 和最多 6 种的 F2 模, 每种都满足以下所有各条准则:

— 镜面反射高度:

— 对 E 模, 自高度 $h_r = 110$ km 起

— 对 F2 模, 自公式 (2) 确定的高度 h_r 起, 其中 M(3 000)F2 在路径中段估计 (对于不超过 d_{max} (km) 的路径), 或者在表 1c) 给出的控制点处估计 (对于 d_{max} 与 9 000 km 之间的路径), 该表中的 foF2 具有下限值;

- E模 - 跳距离不超过2 000 km的最低阶模, 以及随后的两个次高阶模;
- F2模 - 跳距离不超过 d_{max0} (km)的最低阶模, 以及随后的五个次高阶模, 其中的E层最高屏蔽频率按第4节所述估计, 其值小于工作频率。

5.2.2 场强确定

对于在第 5.2.1 节中选择的每一个模 w , 场强中值计算如下:

$$E_w = 136.6 + P_t + G_t + 20 \log f - L_b \quad (17)$$

其中:

f : 发射频率 (MHz)

P_t : 发射机功率 (dB (1 kW))

G_t : 相对于各向同性天线而言在所要求的方位角和仰角 (Δ) 上的发射天线功率

(dB)

L_b : 对于所考虑模的射线路径基本传输损耗, 由下式计算:

$$L_b = 32.45 + 20 \log f + 20 \log p' + L_i + L_m + L_g + L_h + L_z \quad (18)$$

而:

p' : 虚拟斜距 (km)

$$p' = 2R_0 \sum_1^n \left[\frac{\sin(d/2R_0)}{\cos[\Delta + (d/2R_0)]} \right] \quad (19)$$

L_i : 由下式计算的 n 跳模的吸收损耗 (dB)

$$L_i = \frac{n(1 + 0.0067R_{12}) \cdot \sec i}{(f + f_L)^2} \cdot \frac{1}{k} \sum_{j=1}^k AT_{noon} \cdot \frac{F(\chi_j)}{F(\chi_{jnoon})} \cdot \Phi_n \left(\frac{f_v}{foE} \right) \quad (20)$$

而:

$$F(\chi) = \cos P (0.881 \chi) \text{ 或 } 0.02, \text{ 选较大者} \quad (21)$$

其中:

$$f_v = f \cos i \quad (22)$$

且

i : 110 km 处的倾角

K : 控制点的数量 (来自表 1d))

f_L : 在表 1d) 所给出的控制点处确定的电子回转频率的平均值, 约为 100 km 高度的地球磁场的纵向分量

- χ_j : 第 j 个控制点处的太阳天顶角或 102° ，取较小者。对公式中要考虑的月份中间时间因素合并在该参数的计算中
- χ_{jnoon} : 当地午间的 χ_j 值
- AT_{noon} : 当地午间且 $R_{12}=0$ 时的吸收因子，从图 1 得知是地理纬度和月份的函数
- $\Phi_n\left(\frac{f_v}{foE}\right)$: 吸收层穿透因子，从图 2 得知是等效垂直入射波频率 f_v 与 foE 之比的函数
- p : 日吸收指数，从图 3 得知是修正磁倾角（见 ITU-R P.1239 建议书的附件 1）和月份的函数

对于在基本 MUF 以上的频率，吸收随频率持续变化，且应在与计算基本 MUF 时相同的射线路径的假设下计算。

L_m : “MUF 以上” 的损耗。

对频率 f 等于或小于给定模的基本 MUF (f_b) 时:

$$L_m = 0 \quad (23)$$

对于 E 模，当 $f > f_b$ 时:

$$L_m = 130 [(f/f_b) - 1]^2 \quad \text{dB} \quad (24)$$

或 81 dB，选较小者。

对于 F2 模，当 $f > f_b$ 时:

$$L_m = 36 [(f/f_b) - 1]^{1/2} \quad \text{dB} \quad (25)$$

或 62 dB，选较小者。

L_g : 在中间反射点的地面反射损耗的总和

对 n 跳模:

$$L_g = 2(n - 1) \quad \text{dB} \quad (26)$$

L_h : 考虑到极光和其他信号损耗的因子，由表 2 给出。各值根据对应位置在 78.5° N、 68.2° W 的地心偶极子的地磁纬度 G_n （赤道的 N 或 S）和当地时间 t 计算：采用了表 1d) 控制点的平均值。

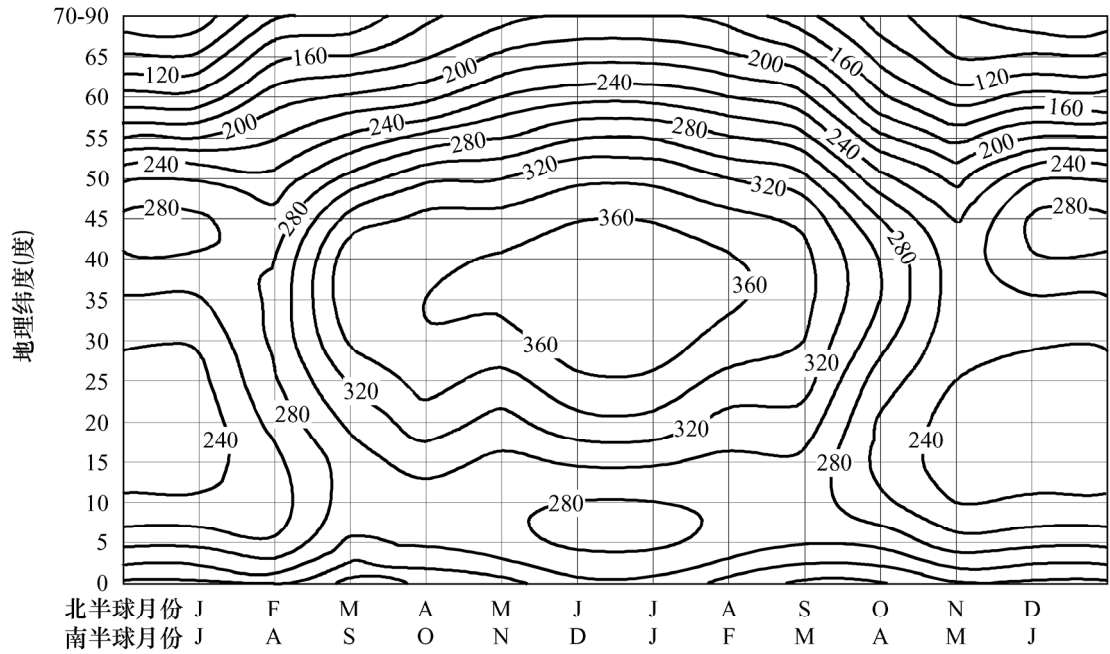
在北半球，冬天选取 12 月至下一年 2 月，春分秋分时选取 3 至 5 月和 9 至 11 月，而夏季选取 6 至 8 月。在南半球，冬季和夏季的月份正好与北半球相反。

对于 $G_n < 42.5^\circ$ ， $L_h = 0$ dB

L_z : 本项包括了不另外包括在该方法中的天波传播的那些影响。目前建议此值为第 5.2 节所给出的 9.9 dB。

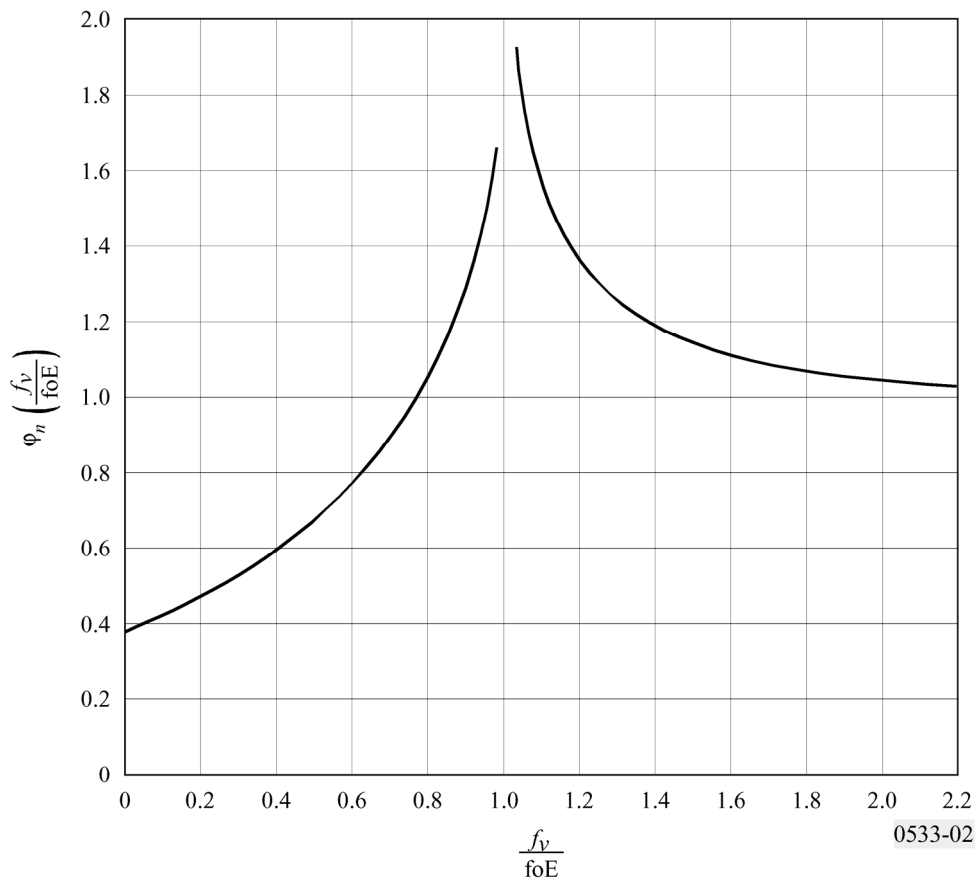
注 — 应注意的是， L_z 的值取决于预测方法的各要素，因此这些要素发生任何变化时应相应修改 L_z 值。

图 1
吸收因子 AT_{noon}



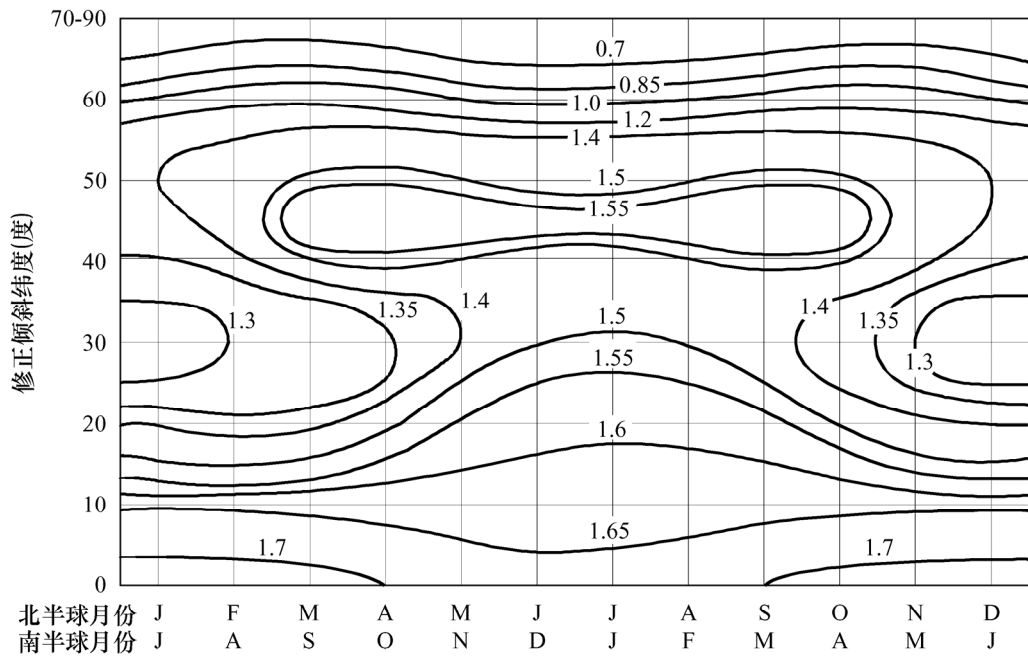
0533-01

图 2
吸收层穿透因子 $\phi_n \left(\frac{f_v}{foE} \right)$



0533-02

图 3
日吸收指数 p



0533-03

如果不把由 E 层引起的模屏蔽当回事，合成等效总天波场强中值 E_s 就看做是 N 模的方和根场强，其中选择 N 时要包含已经进行了预测的 F2 和 E 模，即：

$$E_{ts} = 10 \log_{10} \sum_{w=1}^N 10^{E_{tw}/10} \quad \text{dB}(1 \mu\text{V/m}) \quad (27)$$

对于数字调制系统的性能预测，要考虑每种模的等效天波场强中值，见第 10.2 节。

表 2
给出极光信号损耗和其他信号损耗的 L_h 值(dB)

	a) 传输距离小于或等于 2 500 km								
	半路径当地时间 t								
	01≤ t <04	04≤ t <07	07≤ t <10	10≤ t <13	13≤ t <16	16≤ t <19	19≤ t <22	22≤ t <01	
G_n									
$77.5^\circ \leq G_n$	2.0	6.6	6.2	1.5	0.5	1.4	1.5	1.0	冬季
$72.5^\circ \leq G_n < 77.5^\circ$	3.4	8.3	8.6	0.9	0.5	2.5	3.0	3.0	
$67.5^\circ \leq G_n < 72.5^\circ$	6.2	15.6	12.8	2.3	1.5	4.6	7.0	5.0	
$62.5^\circ \leq G_n < 67.5^\circ$	7.0	16.0	14.0	3.6	2.0	6.8	9.8	6.6	
$57.5^\circ \leq G_n < 62.5^\circ$	2.0	4.5	6.6	1.4	0.8	2.7	3.0	2.0	
$52.5^\circ \leq G_n < 57.5^\circ$	1.3	1.0	3.2	0.3	0.4	1.8	2.3	0.9	
$47.5^\circ \leq G_n < 52.5^\circ$	0.9	0.6	2.2	0.2	0.2	1.2	1.5	0.6	
$42.5^\circ \leq G_n < 47.5^\circ$	0.4	0.3	1.1	0.1	0.1	0.6	0.7	0.3	
$77.5^\circ \leq G_n$	1.4	2.5	7.4	3.8	1.0	2.4	2.4	3.3	春分 秋分
$72.5^\circ \leq G_n < 77.5^\circ$	3.3	11.0	11.6	5.1	2.6	4.0	6.0	7.0	
$67.5^\circ \leq G_n < 72.5^\circ$	6.5	12.0	21.4	8.5	4.8	6.0	10.0	13.7	
$62.5^\circ \leq G_n < 67.5^\circ$	6.7	11.2	17.0	9.0	7.2	9.0	10.9	15.0	
$57.5^\circ \leq G_n < 62.5^\circ$	2.4	4.4	7.5	5.0	2.6	4.8	5.5	6.1	
$52.5^\circ \leq G_n < 57.5^\circ$	1.7	2.0	5.0	3.0	2.2	4.0	3.0	4.0	
$47.5^\circ \leq G_n < 52.5^\circ$	1.1	1.3	3.3	2.0	1.4	2.6	2.0	2.6	
$42.5^\circ \leq G_n < 47.5^\circ$	0.5	0.6	1.6	1.0	0.7	1.3	1.0	1.3	
$77.5^\circ \leq G_n$	2.2	2.7	1.2	2.3	2.2	3.8	4.2	3.8	夏季
$72.5^\circ \leq G_n < 77.5^\circ$	2.4	3.0	2.8	3.0	2.7	4.2	4.8	4.5	
$67.5^\circ \leq G_n < 72.5^\circ$	4.9	4.2	6.2	4.5	3.8	5.4	7.7	7.2	
$62.5^\circ \leq G_n < 67.5^\circ$	6.5	4.8	9.0	6.0	4.8	9.1	9.5	8.9	
$57.5^\circ \leq G_n < 62.5^\circ$	3.2	2.7	4.0	3.0	3.0	6.5	6.7	5.0	
$52.5^\circ \leq G_n < 57.5^\circ$	2.5	1.8	2.4	2.3	2.6	5.0	4.6	4.0	
$47.5^\circ \leq G_n < 52.5^\circ$	1.6	1.2	1.6	1.5	1.7	3.3	3.1	2.6	
$42.5^\circ \leq G_n < 47.5^\circ$	0.8	0.6	0.8	0.7	0.8	1.6	1.5	1.3	

表 2 (续)
给出极光信号损耗和其他信号损耗的 L_h 值(dB)

	b) 传输距离大于 2 500 km								
	半路径当地时间 t								
	01≤ t <04	04≤ t <07	07≤ t <10	10≤ t <13	13≤ t <16	16≤ t <19	19≤ t <22	22≤ t <01	
G_n									
$77.5^\circ \leq G_n$	1.5	2.7	2.5	0.8	0.0	0.9	0.8	1.6	冬季
$72.5^\circ \leq G_n < 77.5^\circ$	2.5	4.5	4.3	0.8	0.3	1.6	2.0	4.8	
$67.5^\circ \leq G_n < 72.5^\circ$	5.5	5.0	7.0	1.9	0.5	3.0	4.5	9.6	
$62.5^\circ \leq G_n < 67.5^\circ$	5.3	7.0	5.9	2.0	0.7	4.0	4.5	10.0	
$57.5^\circ \leq G_n < 62.5^\circ$	1.6	2.4	2.7	0.6	0.4	1.7	1.8	3.5	
$52.5^\circ \leq G_n < 57.5^\circ$	0.9	1.0	1.3	0.1	0.1	1.0	1.5	1.4	
$47.5^\circ \leq G_n < 52.5^\circ$	0.6	0.6	0.8	0.1	0.1	0.6	1.0	0.5	
$42.5^\circ \leq G_n < 47.5^\circ$	0.3	0.3	0.4	0.0	0.0	0.3	0.5	0.4	
$77.5^\circ \leq G_n$	1.0	1.2	2.7	3.0	0.6	2.0	2.3	1.6	春分 秋分
$72.5^\circ \leq G_n < 77.5^\circ$	1.8	2.9	4.1	5.7	1.5	3.2	5.6	3.6	
$67.5^\circ \leq G_n < 72.5^\circ$	3.7	5.6	7.7	8.1	3.5	5.0	9.5	7.3	
$62.5^\circ \leq G_n < 67.5^\circ$	3.9	5.2	7.6	9.0	5.0	7.5	10.0	7.9	
$57.5^\circ \leq G_n < 62.5^\circ$	1.4	2.0	3.2	3.8	1.8	4.0	5.4	3.4	
$52.5^\circ \leq G_n < 57.5^\circ$	0.9	0.9	1.8	2.0	1.3	3.1	2.7	2.0	
$47.5^\circ \leq G_n < 52.5^\circ$	0.6	0.6	1.2	1.3	0.8	2.0	1.8	1.3	
$42.5^\circ \leq G_n < 47.5^\circ$	0.3	0.3	0.6	0.6	0.4	1.0	0.9	0.6	
$77.5^\circ \leq G_n$	1.9	3.8	2.2	1.1	2.1	1.2	2.3	2.4	夏季
$72.5^\circ \leq G_n < 77.5^\circ$	1.9	4.6	2.9	1.3	2.2	1.3	2.8	2.7	
$67.5^\circ \leq G_n < 72.5^\circ$	4.4	6.3	5.9	1.9	3.3	1.7	4.4	4.5	
$62.5^\circ \leq G_n < 67.5^\circ$	5.5	8.5	7.6	2.6	4.2	3.2	5.5	5.7	
$57.5^\circ \leq G_n < 62.5^\circ$	2.8	3.8	3.7	1.4	2.7	1.6	4.5	3.2	
$52.5^\circ \leq G_n < 57.5^\circ$	2.2	2.4	2.2	1.0	2.2	1.2	4.4	2.5	
$47.5^\circ \leq G_n < 52.5^\circ$	1.4	1.6	1.4	0.6	1.4	0.8	2.9	1.6	
$42.5^\circ \leq G_n < 47.5^\circ$	0.7	0.8	0.7	0.3	0.7	0.4	1.4	0.8	

5.3 超过 9 000 km 的路径

在本方法中，通过将路径分成最小数目 n 的方法来进行预测，路径分成等长的 n 跳，都不超过 4 000 km。

合成场强中值 E_l 由下式计算：

$$E_l = E_0 \left[1 - \frac{(f_M + f_H)^2}{(f_M + f_H)^2 + (f_L + f_H)^2} \left[\frac{(f_L + f_H)^2}{(f + f_H)^2} + \frac{(f + f_H)^2}{(f_M + f_H)^2} \right] \right] - 36.4 + P_t + G_{it} + G_{ap} - L_y \quad \text{dB}(1 \mu\text{V/m}) \quad (28)$$

E_0 是对应 3 MW e.i.r.p. 的自由空间场强：

$$E_0 = 139.6 - 20 \log p' \quad \text{dB}(1 \mu\text{V/m}) \quad (29)$$

其中 p' 采用公式 (19) 和 (13) 计算， $h_r = 300 \text{ km}$

G_{it} : 在仰角 0° 至 8° 范围内在所需方位的发射天线增益的最大值 (dB)

G_{ap} : 由于关注的是长距离的场强增量，计算如下：

$$G_{ap} = 10 \log \frac{D}{R_0 |\sin(D/R_0)|} \quad \text{dB} \quad (30)$$

在上面公式中当 D 是 πR_0 的倍数时， G_{ap} 趋向无穷大，将其限制在 15 dB

L_y : 一个概念与 L_z 类似的项。目前建议的值是 -3.7 dB

注— 应注意的是， L_y 的值取决于预测方法的各要素，因此这些要素发生任何变化时应相应修改 L_y 值

f_H : 在表 1a) 中给出的控制点处确定的电子回转频率的平均值

f_M : 较高基准频率。它分别对表 1a) 中给出的两个控制点确定，取较低值：

$$f_M = K \cdot f_g \quad \text{MHz} \quad (31)$$

$$K = 1.2 + W \frac{f_g}{f_{g, \text{noon}}} + X \left[\sqrt[3]{\frac{f_{g, \text{noon}}}{f_g} - 1} \right] + Y \left[\frac{f_{g, \text{min}}}{f_{g, \text{noon}}} \right]^2 \quad (32)$$

f_g : F2 (4000) MUF=1.1F2 (3 000) MUF

$f_{g, \text{noon}}$: 对应当地午间时间的 f_g 值

$f_{g, \text{min}}$: 发生在 24 h 时段中的 f_g 的最低值。

W 、 X 和 Y 由表 3 给出。大圆路径的方位角在整个路径的中心确定，且该角度用于东—西和北—南之间角度值中的线性内插。

表 3
用于确定校正因子 K 的 W X 和 Y 值

	W	X	Y
东—西	0.1	1.2	0.6
北—南	0.2	0.2	0.4

f_L : 较低基准频率:

$$f_L \left(5.3 \times I \left[\frac{(1 + 0.009 R_{12}) \sum_1^{2n} \cos^{0.5} \chi}{\cos i_{90} \log_e \left[\frac{9.5 \times 10^6}{p'} \right]} \right]^{1/2} - f_H \right) \cdot A_w \quad \text{MHz} \quad (33)$$

其中 R_{12} 对高值并不饱和。

在求和中, 对直到 90 km 高度的射线路径的各回转确定 χ 。当 $\chi > 90^\circ$, $\cos^{0.5} \chi$ 取为零。

i_{90} : 在 90 km 高度的倾角

I : 由表 4 给出。

表 4
计算 f_L 的等式中用的 I 值

地理纬度		月 份											
一端	另一端	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
>35°N	>35°N	1.1	1.05	1	1	1	1	1	1	1	1	1.05	1.1
>35°N	35°N-35°S	1.05	1.02	1	1	1	1	1	1	1	1	1.02	1.05
>35°N	>35°S	1.05	1.02	1	1	1.02	1.05	1.05	1.02	1	1	1.02	1.05
35°N-35°S	35°N-35°S	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
35°N-35°S	>35°S	1	1	1	1	1.02	1.05	1.05	1.02	1	1	1	1
>35°S	>35°S	1	1	1	1	1.05	1.1	1.1	1.05	1	1	1	1

A_w : 冬天异常因数在路径中点确定。对地理纬度 0° 至 30° 和 90° 它是唯一的, 而在 60° 时达到表 5 给出的最大值。在中间纬度的值是通过线性内插得到的。

表 5
用于计算 f_L 的等式中的冬天异常因数 A_w 的值，位于 60° 地理纬度

半 球	月 份											
	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
北半球	1.30	1.15	1.03	1	1	1	1	1	1	1.03	1.15	1.30
南半球	1	1	1	1.03	1.15	1.30	1.30	1.15	1.03	1	1	1

当 $f_L \leq 2f_{LN}$ 时，在每小时直到当地时间 t_r 时计算 f_L 值

其中：

$$f_{LN} = \sqrt{\frac{D}{3000}} \quad \text{MHz} \quad (34)$$

在后面的 3 小时 f_L 由下式计算：

$$f_L = 2f_{LN}e^{-0.23t} \quad (35)$$

其中 t 是 t_r 后以小时为单位的时间。对随后的小时 $f_L = f_{LN}$ ，直到公式 (32) 给出更高的值时。

5.4 在 7 000 和 9 000 km 之间的路径

在该距离范围，天波场强中值 E_{ti} 通过 E_s 和 E_l 值之间的内插来确定。 E_{ts} 是由公式 (27) 给出的， E_l 指公式 (28) 所示的合成模。

$$E_i = 100 \log_{10} X_i \quad \text{dB}(1 \mu\text{V/m}) \quad (36)$$

而

$$X_i = X_s + \frac{D - 7000}{2000} (X_l - X_s)$$

其中：

$$\begin{aligned} X_s &= 10^{0.01E_s} \\ X_l &= 10^{0.01E_l} \end{aligned}$$

该路径的基本 MUF 等于由公式 (3) 对表 1a) 所述的两个控制点算出的 F2 (d_{max}) MUF 值的较低值。

6 可用接收机功率中值

对长达 7 000 km 的距离，其中场强用第 5.2 节的方法计算，对一在频率 f (MHz) 时具有天波场强 E_{rw} (dB (1 $\mu\text{V/m}$)) 的给定模 w ，在信号入射方向上来自增益为 G_{rw} (相对于一个电离层辐射器的 dB 数) 无损耗接收天线的相应可用信号功率 P_{rw} (dBW) 为：

$$P_{rw} = E_{rw} + G_{rw} - 20 \log_{10} f - 107.2 \quad \text{dBW} \quad (37)$$

总的可用信号功率中值 P_r (dBW) 是由不同的模发出的功率的总和, 各个模所起的作用取决于该模入射的方向上接收天线的增益。对于 N 模, 它对总和做出的贡献为:

$$P_r = 10 \log_{10} \sum_{w=1}^N 10^{P_{r_w}/10} \quad \text{dBW} \quad (38)$$

当路径超过 9 000 km 时, 场强用第 5.3 节的方法计算, 场强 E_l 是合成模的总和。这种情况下 P_r 用公式 (37) 计算, 其中 G_{r_w} 是 0° 至 8° 仰角范围内要求方位角处接收天线增益的最大值。

7 000 至 9 000 km 中间范围的功率利用对应于 E_s 和 E_l 的功率由公式 (36) 计算。

第 3 部分

系统性能的预测

7 月信噪比中值

ITU-R P.372 建议书提供了在良好地面以上短垂直无损耗单极天线接收的大气噪声功率中值, 且给出了对应的人为噪声和宇宙噪声强度。规定频率 f (MHz) 处的合成外部噪声因子为 F_a (dB (kTb)), k 为玻耳兹曼常数, T 为 288 K 的参考温度的。通常, 当采用一些其他实际接收天线时, 合成噪声因子会与 F_a 的该值有差别。但是因为缺少不同天线的完整的噪声测量数据, 作为第一近似值, 假设代入由 ITU-R P.372 建议书中得到的 F_a 值是合适的。因此在带宽 b (Hz) 内可得到的信噪比中值 S/N (dB) 为:

$$S/N = P_r - F_a - 10 \log_{10} b + 204 \quad (39)$$

其中:

P_r : 是由上面第 6 节决定的可用接收机功率中值。

8 对其他时间百分比的天波场强、可用接收机信号功率和信噪比

可以按照信号和噪声在一个小时内的及逐日的偏差确定在规定的百分比内的天波场强、可用接收机功率和信噪比。若没有其他数据, 可以取 WARC HFBC-87 所接受的信号衰减允许值, 有短期的一个 5 dB 的十分位偏差上限和一个 8 dB 的十分位偏差下限。对于长期信号衰减, 将十分位偏差看做如 ITU-R P.842 建议书的表 2 所给出的工作频率与路径基本 MUF 之比的函数。

在大气噪声的情况，由逐日变化特性引起的噪声功率的十分位偏差由 ITU-R P.372 建议书得到。目前所用的还没有针对一小时的变化特性的。对于人为噪声，在缺乏时间变化特性方面的直接信息时，十分位偏差也取为 ITU-R P.372 建议书中给出的那些值，尽管这些偏差与时间和空间变化特性的组合确实有关。合成一小时和每日的星系噪声的十分位偏差取为 ± 2 dB。

在 90% 的时间内超过的信噪比由下式给出：

$$S/N_{90} = S/N_{50} - (\underline{S}_{wh}^2 + \underline{S}_{dd}^2 + N_{dd}^2)^{1/2} \quad (40)$$

其中：

S_{wh} ：是由一小时内的变化引起的小时场强中值得出的有用信号的十分位偏差下限 (dB)

S_{dd} ：是由逐日的变化引起的月份场强中值得出的有用信号的十分位偏差下限 (dB)

N_{dd} ：是由逐日的变化引起的月份场强中值得出的背景噪声十分位偏差下限 (dB)。

对于其他时间百分比，可由 ITU-R P.1057 建议书给出的关于某种对数正态分布的资料获得偏差。

9 最低可用频率(LUF)

LUF 是由 ITU-R P.373 建议书定义的。按照该定义，算出的值作为最低频率，最接近 0.1 MHz，在此频率要求的信噪比由信噪比的月中值达到。

10 基本电路可靠性(BCR)

10.1 模拟调制系统的可靠性

BCR 是由 ITU-R P.842 建议书规定的，其中的可靠性就是满足规定的性能准则（即规定的信噪比）的概率。对于模拟系统，它是在结合信号场强和噪声背景二者的一小时和每日十分位偏差的信噪比的基础上估算的。对中值的分布见的第 8 节所述。所用的程序在 ITU-R P.842 建议书中规定。

10.2 在考虑了接收信号时间和频率扩展的情况下数字调制系统的可靠性

对于在预期的时间和频率扩展方面很牢靠的调制系统，其可靠性是预计能达到所需信噪比的时间百分比，该信噪比用第 8 节所述的程序计算。

总的来说，对于数字调制系统，应考虑接收信号的时间和频率扩展。

10.2.1 系统参数

要用到简化的信道传递函数。对于相关的调制方法，可靠性估计值取决于下述 4 个参数：

所需信噪比 S/N_r ：小时信号模中值功率之和与噪声的比值；在所有信号模落入时间和频率窗口 T_w 与 F_w 内的情况下，要达到规定的性能必须具备该信噪比。

幅度比 A ：对于每种传播模，要在考虑该模的发射机功率和天线增益的情况下预测小时场强中值。要确定在该小时内最强的模，而幅度比 A 则为次强模强度与该最强模强度的比值；在超过时间延迟 T_w 或大于频率扩展 F_w 时，达到该幅度比才会影响系统性能。

时间窗口 T_w ：时间间隔，位于该间隔之内信号模将增强系统性能，位于该间隔之外则信号模会降低系统性能。

频率窗口 F_w ：频率间隔，位于该间隔之内信号模将增强系统性能，位于该间隔之外则信号模会降低系统性能。

10.2.2 时间延迟

单个模的时间延迟由下式给出：

$$\tau = (p'/c) \times 10^3 \quad \text{ms} \quad (41)$$

其中：

p' ：由公式（19）和公式（13）给出的有效斜距（km），反射高度 h_r 则由第 5.1 节确定

c ：自由空间光速（km/s）。

各模之间的微分时间延迟可由每种模的时间延迟确定。

10.2.3 可靠性预测程序

可靠性预测采用下列程序：

对于不超过 9 000 km 的路径：

- 1) 最强模的强度 E_w 采用第 5.2 和第 5.3 节给出的方法确定。
- 2) 确定强度超过 $(E_w - A)$ (dB) 的所有其他有效模。
- 3) 从步骤 1) 或 2) 确定的模中，确定第一个到达的模，并确定从第一个到达的模算起的时间窗口 T_w 内的所有模。
- 4) 对于不超过 7 000 km 的路径，求出时间窗口内到达的各模的功率之和，或者对于 7 000 和 9 000 km 之间的路径，采用第 5.4 节给出的内插程序，而基本电路可靠性 BCR 则由上面第 10.1 节的程序确定。此时要用到 ITU-R P.842 建议书表 1 中的程序。该表的步骤 10 要用到所需信噪比 S/N_r 。

- 5) 若上面步骤2) 确定的任一种有效模的微分时间延迟超过了时间窗口 T_w ，则由这些模引起的可靠性的降低采用类似于ITU-R P.842建议书表3中给出的确定电路总可靠性的方法确定，但表3步骤3的相对保护比由比值 A 代替，并将步骤5和步骤8的所有参数置为0 dB以忽略逐日变化。多模恶化因子 R_M 就是表3步骤12确定的值。

注意，可能必须重新考虑表3步骤6和步骤9给出的十分位偏差的值，因为单独考虑各模时概率分布可能会有所不同。

- 6) 超过这些频率和时间范围预计会出现散射，由各反射层的整体运动引起的频率偏移预计在1 Hz数量级，在本方法中这样的频率偏移可以忽略不计。

对于超过9 000 km的路径：

组合信号的强度同第5.3节。假定在路径为7 000 km时构成该组合信号各模是包含在3 ms的时间延迟扩展之内的，在路径为20 000 km时线性增至5 ms。若该系统规定的时间窗口小于该时间延迟扩展，则可以预计系统将无法满足其性能要求。

10.3 赤道散射

另外，为了计算由散射引起的扩展，要调用附录 1 给出的散射模型完成下列步骤。

- 7) 若路径涉及由附录1规定的时间和地理地区的散射引起的时间扩展，则将后续时间的散射函数施用于时间窗口内的每一种模，求出时间窗口 T_w 边缘的散射强度 $p_{Tspread}$ 。
- 8) 若路径涉及由附录1规定的时间和地理地区的散射引起的频率扩展，则将频率散射函数 $p_{Fspread}$ 施用于最强模，求出频率窗口 F_w 两侧边缘的对称的散射强度。
- 9) 在窗口的边缘处，若任一 $p_{Tspread}$ 和/或 $p_{Fspread}$ 与上面步骤1确定的最强模特定成分的功率电平 p_m 之比超过了比值 A ，则重复上面步骤5中的计算（将ITU-R P.842建议书表3步骤2中的参数 I_i 替换为 $p_{Tspread}$ 和/或 $p_{Fspread}$ ），以便得出散射恶化的最大概率 R_{Smax} 。
- 10) 电路总可靠性由下列函数给出：

$$(BCR) \times (R_M) \times (1 - (1 - R_{Smax}) (prob_{occ})) \quad (42)$$

其中散射发生概率 $prob_{occ}$ 在附录 1 中规定。

附录1

一种HF信号赤道散射模型

1 由散射分量 $p_{Tspread}$ 得出的可用功率时间散射模型是由一种 τ 大于 τ_m 时的半正态分布给出的:

$$p_{Tspread} = 0.056 p_m e^{-\frac{(\tau - \tau_m)^2}{2T_{spread}^2}}$$

其中:

p_m : 是来自特定反射模的可用接收功率

τ : 是关注的时间延迟

τ_m : 是特定模的时间延迟

T_{spread} : 是时间扩展的标准偏差, 取值 1 ms。

2 对于频率扩展, 散射是以类似于时间扩展变化的形式对称分布于发射频率周围的:

$$p_{Fspread} = 0.056 p_m e^{-\frac{(f - f_m)^2}{2F_{spread}^2}}$$

其中:

f : 是关注的频率;

f_m : 是发射的中心频率;

F_{spread} : 是频率扩展的标准偏差, 取值3 Hz。

3 在月内某一天散射发生的概率 $prob_{occ}$ 由下式给出:

$$prob_{occ} = F_{\lambda_d} F_{Tl} F_R F_S$$

其中:

$$\begin{aligned} F_{\lambda_d} &= 1 && \text{对于 } 0^\circ < |\lambda_d| < 15^\circ \\ F_{\lambda_d} &= \left(\frac{25 - |\lambda_d|}{10} \right)^2 \left(\frac{|\lambda_d| - 10}{5} \right) && \text{对于 } 15^\circ < |\lambda_d| < 25^\circ \\ F_{\lambda_d} &= 0 && \text{对于 } 25^\circ < |\lambda_d| < 90^\circ \end{aligned}$$

其中: λ_d 是磁倾角;

$$\begin{aligned}
 F_{T_1} &= 1 && \text{对于 } 00 < T_1 < 03 \\
 F_{T_1} &= \left(\frac{7 - T_1}{4} \right)^2 \left(\frac{T_1 - 1}{2} \right) && \text{对于 } 03 < T_1 < 07 \\
 F_{T_1} &= 0 && \text{对于 } 07 < T_1 < 19 \\
 F_{T_1} &= (T_1 - 19)^2 (41 - 2T_1) && \text{对于 } 19 < T_1 < 20 \\
 F_{T_1} &= 1 && \text{对于 } 20 < T_1 < 24
 \end{aligned}$$

其中：

T_1 ：是控制点的当地时间，表示为小时；

F_R ：为 $(0.1 + 0.008R_{12})$ 或 1，选较小值， R_{12} 是太阳黑子数目；

且

$$F_S = 0.55 + 0.45 \sin(60^\circ(m - 1.5))$$

其中：

m ：是月份编号。

4 在为所用调制系统规定的时间和频率窗口限值处，用预测程序确定时间和频率散射分量的电平。若这两个电平中的较大者与最强模特定分量的电平之比位于系统规定的符号间干扰限值之内，则可以预计系统无法达到由散射发生概率给出的某种概率。
