

国 际 电 信 联 盟

ITU-R

国际电联无线电通信部门

ITU-R P.533-12 建议书
(09/2013)

HF电路性能的预测方法

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
BO	卫星传送
BR	用于制作、存档和播出的录制；电视电影
BS	广播业务（声音）
BT	广播业务（电视）
F	固定业务
M	移动、无线电定位、业余和相关卫星业务
P	无线电波传播
RA	射电天文
RS	遥感系统
S	卫星固定业务
SA	空间应用和气象
SF	卫星固定业务和固定业务系统间的频率共用和协调
SM	频谱管理
SNG	卫星新闻采集
TF	时间信号和频率标准发射
V	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
2014年，日内瓦

© 国际电联 2014

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.533-12 建议书

HF电路性能的预测方法*

(1978-1982-1990-1992-1994-1995-1999-2001-2005-2007-2009-2012-2013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。

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

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。

附件1

目录

	页
1 引言	4
第1部分 – 频率可用性.....	4
2 控制点的位置	4
3 基本和工作最高可用频率	4
3.1 基本最高可用频率	4
3.2 E层临界频率(f_oE)	4
3.3 E层基本MUF	6
3.4 F2层特性	6
3.5 F2层基本MUF	6
3.5.1 最低阶模.....	6
3.5.2 高阶模（不超过9 000 公里的路径）	7
3.6 在支持电离层传播的月份概率之内	7
3.7 路径工作MUF.....	8
4 E层最高屏蔽频率(f_s)	8
第2部分 – 天波场强中值.....	9
5 天波场强中值	9
5.1 仰角	9
5.2 不超过7 000 公里的路径	11
5.2.1 模的考虑.....	11
5.2.2 场强确定.....	11
5.3 超过7 000 公里的路径	17
5.3.1 确定 f_M	18
5.3.2 确定 f_L	19
5.3.3 对场强 E_{it} 的估计.....	21
5.4 在7 000和9 000 公里之间的路径	22
6 可用接收机功率中值	22

页

第3部分 – 系统性能的预测.....	23
7 月信噪比中值.....	23
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.....	23
9 最低可用频率(LUF).....	24
10 基本电路可靠性(BCR).....	24
10.1 模拟调制系统的可靠性.....	24
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.....	24
10.2.1 系统参数.....	24
10.2.2 时间延迟.....	25
10.2.3 可靠性预测程序.....	25
10.3 赤道散射.....	26

附件1的后附资料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 公里的路径进行了射线路径分析，超过9 000 公里时应用了从拟合到测量数据的组合模经验公式，在7 000-9 000 公里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 公里范围）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。

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(f_oE)

月中值 f_oE 按照ITU-R P.1239建议书的规定确定。

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 (公里)	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 (公里)	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 (公里)	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 (公里)	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} : 在路径中间控制点计算出的F2模的最大跳跃长度

d_0 : 最低阶模的跳跃长度

距离单位为公里。

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 公里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 公里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 n_0 的 $n_0 E(D)MUF$ 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 公里高度估算的。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160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160。

3.5 F2层基本MUF

3.5.1 最低阶模

3.5.1.1 路径长达 d_{max} (公里)

最低阶模 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:

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

对n阶的模, F2层基本MUF的计算公式为:

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

其中:

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

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

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 和 d_{max} 单位都为公里

C_{3000} : 当 $d=3\ 000$ 公里时的 C_d 的值

x : f_oF_2/f_oE 或2, 选较大者
 f_oE 的计算如第3.2节所述。

用于最低阶模 n_0 的 $nF_2(D)MUF$ 为路径的基本MUF。为计算基本MUF, d_{max} 被限制在不超过4 000公里。

3.5.1.2 路径大于 d_{max} (公里)

对于路径长度 D 的最低阶模 n_0 $F_2(D)MUF$ 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 $F_2(d_{max})MUF$ 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 公里的路径)

3.5.2.1 不超过 d_{max} (公里)的路径

一个 n 跳模的 F_2 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} (公里)的路径

一个 n 跳模的 F_2 层基本MUF, 根据 $F_2(d_{max})MUF$ 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。为计算 M_n 和 M_{n_0} , 最大跳距 d_{max} 在控制点得到重新计算, 并可超过4 000公里。

$$n F_2(D)MUF = n_0 F_2(d_{max})MUF \cdot M_n / M_{n_0} \quad (7)$$

其中 M_n/M_{n_0} 由公式(3)推导如下:

$$\frac{M_n}{M_{n_0}} = \frac{n F_2(D)MUF}{n_0 F_2(D)MUF} \quad (8)$$

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 F_2 层传播的MUF(50)中值。

对于 F_2 模, ITU-R P.1239建议书的表2给出了一个月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_l , 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:

$$F_{prob} = 130 - \frac{80}{1 + MUF(50)/(f \cdot \delta_l)} \quad \text{或} = 100, \text{选较小者} \quad (9)$$

ITU-R P.1239建议书的表3给出了十分位比值的上限 δ_u ，也就是一个月內10%的天數內超過的MUF（即MUF(10)）與MUF(50)的比值，該值是當地時間、緯度、季節和太陽黑子數目的函數。

對於工作頻率 f 大於MUF(50)的情況，電離作用支持概率由下式給出：

$$F_{prob} = \frac{80}{1 + f / (\text{MUF}(50) \cdot \delta_u)} - 30 \quad \text{或} = 0, \text{ 選較大者} \quad (10)$$

對於E模，十分位間距的相應因子分別為1.05和0.95。

工作MUF在某個月份給定一小時內的分布可通過代入第3.6節給出的分布求得。

注意，在月內90%和10%的天數內超過的工作MUF分別被規定為優化工作頻率和可能最高頻率。

3.7 路徑工作MUF

路徑工作MUF對於F2模是較大的工作MUF，而對於E模就是工作MUF。工作MUF和基本MUF之間的關係取決於系統與天線特性並取決於路徑長度方向地理方面與其他方面的考慮，應根據電路性能方面的實際經驗確定。若沒有這種經驗，對於F2模，工作MUF = 基本MUF $\cdot R_{op}$ ，其中 R_{op} 由ITU-R P.1240建議書的表1給出；對於E模，工作MUF等於基本MUF。

對於10%和90%工作天數內超過的MUF，其估算值用ITU-R P.1239建議書表2和表3中F模情況所給出的適當因子相乘後得到。在E模的場合，合適的因子分別為1.05和0.95。

4 E層最高屏蔽頻率(f_s)

F2模的E層屏蔽頻率考慮的是最長4 000 公里的路徑（見表1b））。路徑中點的foE值（對於最長2 000 公里的路徑），或路徑的各端兩個1 000 公里的控制點中foE值較大的一個（對於大於2 000 公里的路徑），用於進行最大屏蔽頻率的計算。

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

而：

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

其中：

- i : 高度 $h_r = 110$ 公里時的傾角
- R_0 : 地球半徑，6 371公里
- Δ_F : F2層模的仰角（由公式(13)計算）。

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。对于不足7 000公里的路径距离，仅采用第5.2款给出的方法对天波场强中值做出预测。对于超过9 000公里的路径距离，仅采用第5.3款给出的方法对天波场强中值做出预测。对于7 000和9 000公里之间的路径距离，则同时采用两种方法，并利用第5.4款谈及的方法插入结果。

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：

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

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, $h_r=110$ 公里

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：

$$x = f_0 F_2 / f_0 E \quad \text{且} \quad H = \frac{1490}{M(3000)F_2 + \Delta M} - 316$$

而：

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

且 $y=x$ 或1.8，选较大者。

a) 对于 $x > 3.33$ 和 $x_r = f/f_0 F_2 \geq 1$ ，其中 f 是波频率：

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

其中：

$$\begin{aligned} h &= A_1 + B_1 2.4^{-a} \quad \text{for } B_1 \text{ and } a \geq 0 \\ &= A_1 + B_1 \text{ otherwise} \end{aligned}$$

当

$$\begin{aligned} A_1 &= 140 + (H - 47) E_1 \\ B_1 &= 150 + (H - 17) F_1 - A_1 \\ E_1 &= -0.09707 x_r^3 + 0.6870 x_r^2 - 0.7506 x_r + 0.6 \end{aligned}$$

F_1 则为:

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

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

且 a 随距离 d 和跳距 d_s 而变化:

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

其中:

$$d_s = 160 + (H + 43) G$$

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

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

b) 对于 $x > 3.33$ 和 $x_r < 1$:

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

其中:

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

$$\text{否则 } = A_2 + B_2$$

而:

$$A_2 = 151 + (H - 47) E_2$$

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

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

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

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:

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

其中:

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

c) 对于 $x \leq 3.33$:

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

而

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

且

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

在路径长达 d_{max} (公里)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 长达9 000 公里的路径

对于不足7 000公里的路径距离，仅采用第5.2款给出的方法预测天波场强中值。对于7 000和9 000公里之间的路径距离，则同时采用第5.2和5.3款给出的方法，然后利用第5.4款涉及的方法插入各方法得出的结果。

5.2.1 模的考虑

选择了最多3种的E模（对不超过4 000 公里的路径）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 $h_r = 110$ 公里起
 - 对F2模，自公式(2)确定的高度 h_r 起，其中M(3000)F2在路径中段估计（对于不超过 d_{max} (公里)的路径），或者在表1c)给出的路径中间控制点处估计（对于 d_{max} 与9 000公里之间的路径），该表中的foF2具有下限值；
- E模 – 跳距离不超过2 000公里的最低阶模，以及随后的两个次高阶模；
- F2模 – 跳距离不超过 d_{max0} (公里)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：

$$E_w = 136.6 + P_t + G_t + 20 \log f - L_b \quad \text{dB}(1 \mu\text{V/m}) \quad (17)$$

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 (公里)

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

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公里处的倾角

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公里高度的地球磁场的纵向分量。对于磁倾角 I , 其量可通过以下公式计算:

$$f_L = |f_H \cdot \sin(I)| \quad (23)$$

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得知是在100公里高度计算出的修正磁倾角 (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:

$$L_m = 0 \quad (24)$$

对于E模, 当 $f > f_b$ 时:

$$L_m = 130 [(f/f_b) - 1]^2 \quad \text{dB} \quad (25)$$

或81 dB, 选较小者。

对于F2模, 当 $f > f_b$ 时:

$$L_m = 36 [(f/f_b) - 1]^{1/2} \quad \text{dB} \quad (26)$$

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:

$$L_g = 2(n - 1) \quad \text{dB} \quad (27)$$

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 $G_n < 42.5^\circ$, $L_h = 0 \text{ dB}$

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10.3 dB。

注1 – 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。

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:

$$E_{ts} = 10 \log_{10} \sum_{w=1}^N 10^{E_{tw}/10} \quad \text{dB}(1 \mu\text{V/m}) \quad (28)$$

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。

图1
吸收因子 AT_{noon}

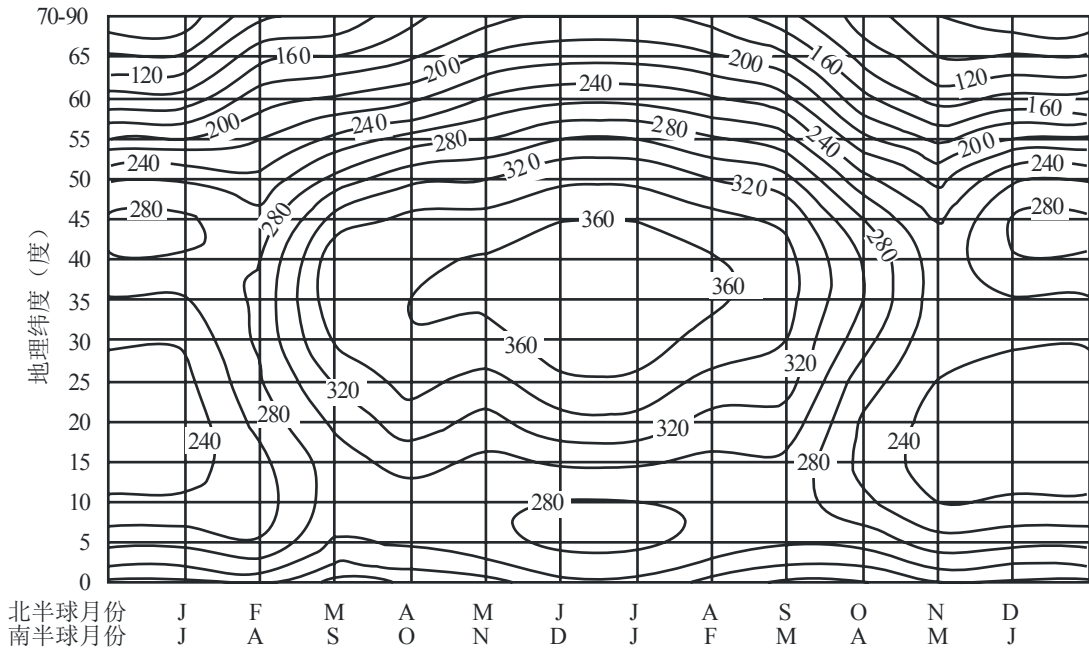


图2

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

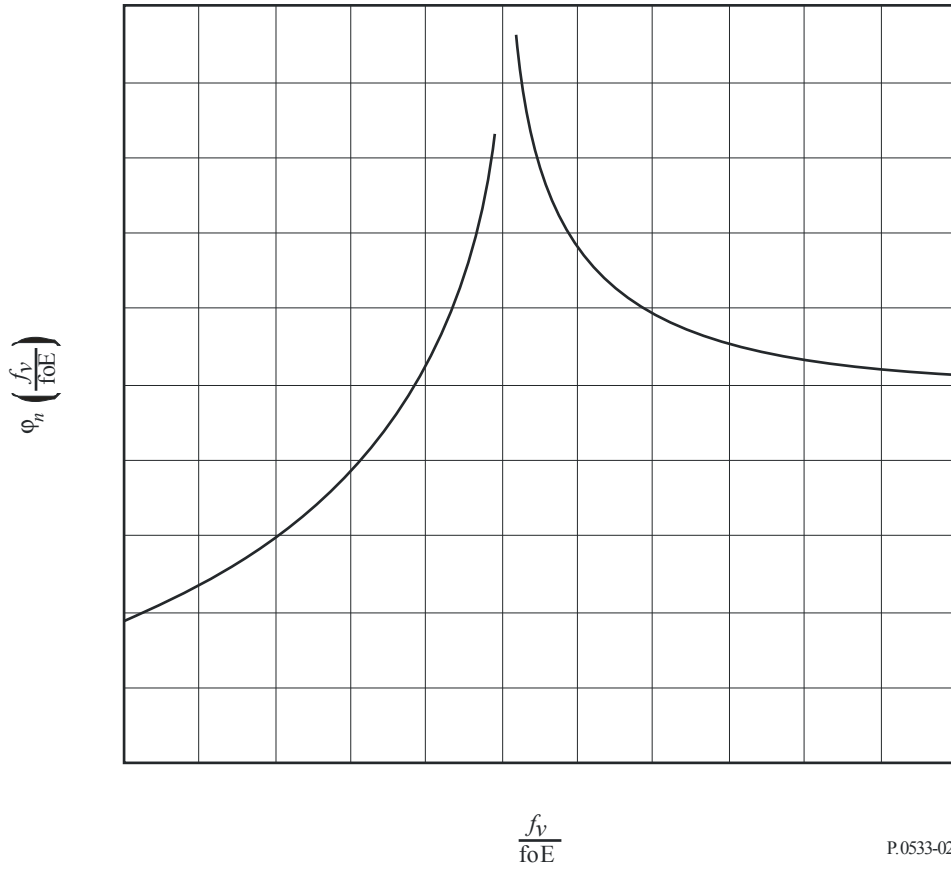


图3
日吸收指数 p

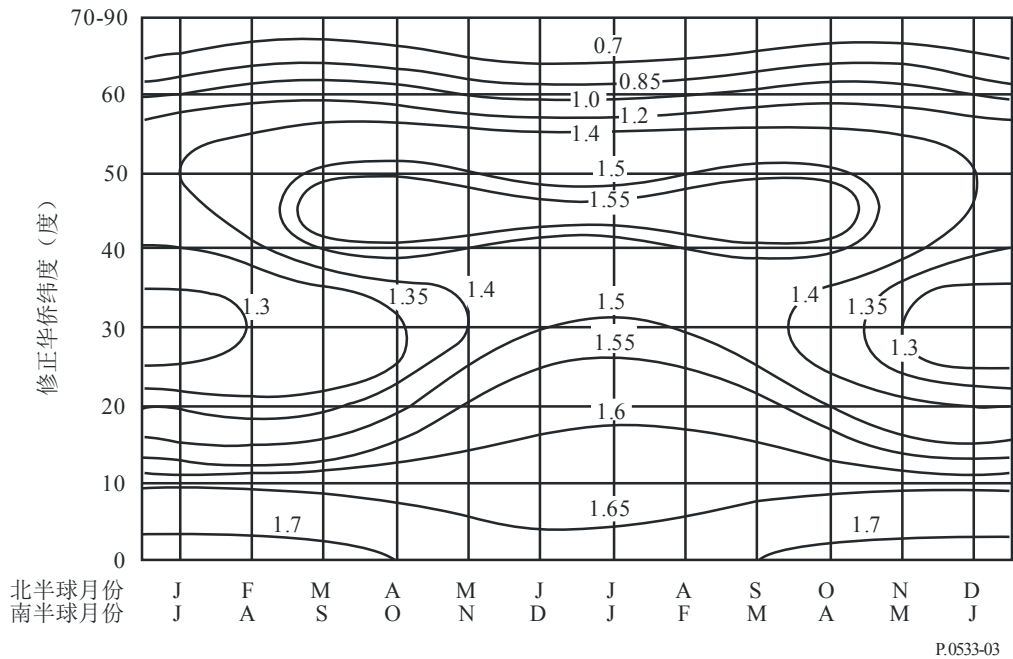


表2

给出极光信号损耗和其他信号损耗的 L_n 值 (dB)

G_n	a) 传输距离小于或等于2 500 公里								
	半路径当地时间 t								
	$01 \leq t < 04$	$04 \leq t < 07$	$07 \leq t < 10$	$10 \leq t < 13$	$13 \leq t < 16$	$16 \leq t < 19$	$19 \leq t < 22$	$22 \leq t < 01$	
$77.5^\circ \leq G_n$	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	

表2 (完)

$77.5^\circ \leq G_n$	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	
b) 传输距离大于2 500 公里									
半路径当地时间 t									
	$01 \leq t < 04$	$04 \leq t < 07$	$07 \leq t < 10$	$10 \leq t < 13$	$13 \leq t < 16$	$16 \leq t < 19$	$19 \leq t < 22$	$22 \leq t < 01$	
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7 000 公里的路径

对于超过9 000公里的路径距离，仅利用第5.3款给出的方法预测天波场强中值。对于7 000和9 000公里之间的路径距离，同时采用第5.2和5.3款给出的方法，然后利用第5.4款给出的方法插入各方法的结果。

对于超过7 000公里的路径，不可能对所有可能的模式进行计算。因此，在LUF (f_L)和可用的MUF (f_M)确定传输频率范围的情况下，可采用以下方法。 f_M 和 f_L 的值是经验式中计算场强的最重要参数。但是，对于7 000和9 000公里之间的路径长度，则需插入两种方法的结果，以实现平稳过渡（见第5.4款）。

此方法包括三个基本步骤：

- 确定 f_M ；
- 确定 f_L ；
- 估算场强。

5.3.1 确定 f_M

为确定 f_M ，需通过将路径划分成最低数量 (n_M) 的4 000公里或更小的等长跳跃 (d_M) 做出预测。仰角是根据等式(13)计算的，考虑到了跳长和3 00公里的固定高度。如果仰角低于3.0度，就要增加一跳，并在仰角超过3.0度前对跳长和仰角进行重新计算。下一个步骤是，根据表1a)确定两个控制点的位置。此时， d_0 等于 d_M ，因此控制点位于距发射机和接收机半跳的长度 ($d_M/2$)。

在两个控制点foF2，M(3000)和旋转频率 (f_H) 是根据第3.4款确定的。这些数值被用于计算F2(4000)MUF (f_4)、F2(Zero)MUF (f_z)和控制点的基本MUF (f_{BM})：

$$f_{BM} = f_z + (f_4 - f_z)f_D \quad \text{MHz} \quad (29)$$

其中：

$$f_4 = 1.1 \cdot f_oF2 \cdot M(3000)F2$$

$$f_z = f_oF2 + \frac{f_H}{2}$$

距离缩减因子 (f_D) 被用于将4 000公里MUF缩减至实际的跳跃长度。因此因子 f_D 在0.0 (0公里的跳跃长度) 和1.0 (4 000公里的跳跃长度) 之间变换。

$$f_D = \left(\left(\left(\left(\left((C_6 d_M + C_5) d_M + C_4 \right) d_M + C_3 \right) d_M + C_2 \right) d_M + C_1 \right) d_M + C_0 \right) d_M \quad (30)$$

其中：

$$C_6: -2.40074637494790 \cdot 10^{-24}$$

$$C_5: 25.8520201885984 \cdot 10^{-21}$$

$$C_4: -92.4986988833091 \cdot 10^{-18}$$

$$C_3: 102.342990689362 \cdot 10^{-15}$$

$$C_2: 22.0776941764705 \cdot 10^{-12}$$

$$C_1: 87.4376851991085 \cdot 10^{-9}$$

$$C_0: 29.1996868566837 \cdot 10^{-6}$$

$$d_M: \text{跳长 (公里)}。$$

为两个控制点分别确定数值 f_{BM} ，而较低值则作为整个路径的基本MUF。

数值 f_M 是根据K因子和基本MUF的乘积，分别为两个控制点确定的。较低值被作为整个路径的可用MUF。

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

K因子被用于从基本MUF f_{BM} 中计算可用的MUF f_M ：

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

其中：

$f_{BM,noon}$ ： 相当于当地正午时间的 f_{BM} 值

$f_{BM,min}$ ： 24小时当中出现的 f_{BM} 最低值。

W 、 X 和 Y 见表3。大圆路径方位角在整个路径的中心确定；此角被用来线性推导东西和南北数值之间的角。

表 3

用于矫正因子K的W、X和Y数值

	W	X	Y
东西	0.1	1.2	0.6
北南	0.2	0.2	0.4

5.3.2 确定 f_L

LUF受到非衍生吸收的强烈影响。HF波在穿透D层时被吸收。为确定LUF，路径被划分为 d_L 长度（无一超过3 000公里） n_L 个同距跳跃。穿越点是根据假设3 00公里的固定反射高度和90公里（每跳两个穿透点）的穿透高度确定的。

f_L 根据公示(33)计算得出：

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

其中：

m ： 穿透点 $2n_L$ 的数量

R_{12} ： 对高数值不饱和并可能超过160个的太阳黑子数量

χ ： 可通过以下公示计算的太阳天顶角：

$$\cos(\chi) = \sin(\varphi_m) \sin(\delta) + \cos(\varphi_m) \cos(\delta) \cos(\eta) \quad (34)$$

其中：

δ ： 太阳倾角（弧度）

φ_m ： m 个穿透点（弧度）的地理纬度

η ： 太阳时角（弧度）。

可从表4中(s_x)的太阳正下方纬度得出太阳倾角 δ 的近似值:

表 4

月中太阳正下方纬度

月份	一月	二月	三月	四月	五月	六月	七月	八月	九月	十月	十一月	十二月
s_x (度)	-21.2	-12.7	-2.2	9.7	18.8	23.3	21.6	14.1	3.1	-8.4	-18.4	-23.3

可通过以下公式得出太阳时角的近似值:

$$\eta \cong \left(\frac{UTC}{12} - 1\right) \cdot \pi + y_m \quad (35)$$

其中:

UTC : 世界时 (小时)

y_m : m 个穿透点的地理经度 (弧度)。

在总结中, 通过90公里高度为每个横向光程确定了 χ 。如 $\chi > 90^\circ$, $\cos^{0.5}\chi$ 则设为零

i_{90} : 90公里高度的迎角

p' : 倾斜路径长度

A_w : 在路径中间点确定的冬季反常因素, 该因素是 0° 至 30° 以及在 90° 地理纬度的统一, 并达到了表5给出的 60° 的最大值。中间纬度的数值是通过线性内插法确定的。

表 5

用于 f_L 公式的 60° 地理纬度冬季反常因素 A_w 的数值

半球	月份											
	一月	二月	三月	四月	五月	六月	七月	八月	九月	十月	十一月	十二月
北半球	0.30	0.15	0.03	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.03	0.15	0.30
南半球	0.00	0.00	0.00	0.03	0.15	0.30	0.30	0.15	0.03	0.00	0.00	0.00

最初, 24小时的 f_L 是通过公式(33)或夜间LUF确定的, 并通过以下公式算出夜间LUF (f_{LN}):

$$f_{LN} = \sqrt{\frac{D}{3000}} \quad (36)$$

对每个小时而言, 根据公式(32)和(35)计算的较大数值被作为该小时中的 f_L 。这样, 24小时的最小 f_L 值为 f_{LN} 。下一步是计算从白天LUF至夜间LUF的衰变。这是因为吸收并不完全遵循太阳的天顶角, 而是在落日时分被延迟。以下程序是确定白天至夜间LUF的必要条件。

白天LUF至夜间LUF小时 (t_r) 被定义为当前的 f_L 小于 $2*f_{LN}$ 而前一小时的 f_L 大于 $2*f_{LN}$ 的小时。如果存在 t_r , 那么就必须为 t_r 小时重新计算 f_L 和后续的3个小时。如果不存在 t_r , 那么 f_L 24小时确定工作即告完成。

当 t_r 存在时, 该小时的 f_L 和随后3小时必须以以下方式重新计算。对于小时 (t_r), f_L 的计算采用:

$$f_L(t_r) = e^{-0.23} \cdot f_L(t_r - 1) \cdot (dt \cdot (1 - e^{-0.23}) + e^{-0.23}) \quad (37)$$

其中:

$$dt = \frac{2 \cdot f_{LN} - f_L(t_r)}{f_L(t_r - 1) - f_L(t_r)}$$

至于随后的3小时 ($n = 1, 2$ 和 3), f_L 计算为:

$$f_L(t_r + n) = f_L(t_r + n - 1) \cdot e^{-0.23} \quad (38)$$

经重新计算的 f_L 数值只有在它们较大时才能取代最初的 f_L 值。一旦24小时的所有 f_L 值都计算完成, 便可选择当前小时的 f_L 数值, 而 f_L 计算即告完成。

5.3.3 估算场强 E_{tl}

场强中值 E_{tl} 是通过以下公式得出的:

$$E_{tl} = E_0 \left[1 - \frac{(f_M + f_H)^2}{(f_M + f_H)^2 + (f_L + f_H)^2} \left[\frac{(f_L + f_H)^2}{(f + f_H)^2} + \frac{(f + f_H)^2}{(f_M + f_H)^2} \right] \right] - 30.0 + P_t + G_{ul} + G_{ap} - L_y \quad \text{dB}(1 \mu\text{V/m}) \quad (39)$$

E_0 是对应3 MW e.i.r.p.的自由空间场强:

$$E_0 = 139.6 - 20 \log p' \quad \text{dB}(1 \mu\text{V/m}) \quad (40)$$

其中:

p' 采用公式 (19) 和 (13) 计算, $h_r = 300$ 公里

G_{ul} : 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:

$$G_{ap} = 10 \log \left[\frac{D}{R_0 \left| \sin\left(\frac{D}{R_0}\right) \right|} \right] \quad \text{dB} \quad (41)$$

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-0.9 dB

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 : 在两个控制点处确定的电子回转频率的平均值

f_M : MUF (见5.3.1款)

f_L : LUF (见5.3.2款)。

5.4 在7 000和9 000公里之间的路径

在该距离范围，天波场强中值 E_i 通过 E_s 和 E_l 值之间的内插来确定。 E_s 是由公式(28)给出的， E_l 指公式(39)所示的合成模。

$$E_i = 100 \log_{10} X_i \quad \text{dB}(1 \mu\text{V/m}) \quad (42)$$

而

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

其中：

$$X_s = 10^{0.01 E_s}$$

和

$$X_l = 10^{0.01 E_l}$$

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基本MUF值的较低值。

6 可用接收机功率中值

对长达7 000公里的距离，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_w (dB(1 μ 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：

$$P_{rw} = E_w + G_{rw} - 20 \log_{10} f - 107.2 \quad \text{dBW} \quad (43)$$

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：

$$P_r = 10 \log_{10} \sum_{w=1}^N 10^{P_{rw}/10} \quad \text{dBW} \quad (44)$$

当路径超过9 000公里时，场强用第5.3节的方法计算，场强 E_i 是合成模的总和。这种情况下 P_r 用公式(43)计算，其中 G_{rw} 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 公里中间范围的功率利用对应于 E_s 和 E_l 的功率由公式(42)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:

$$S/N = P_r - F_a - 10 \log_{10} b + 204 \quad (45)$$

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:

$$S/N_{90} = S/N_{50} - (S_{wh}^2 + S_{dd}^2 + N_{dd}^2)^{1/2} \quad (46)$$

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（建议书中以百分比表示）。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：

- 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。
- 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 则为强模强度与次强模强度的比值；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。

10.2.2 时间延迟

单个模的时间延迟由下式给出：

$$\tau = (p'/c) \times 10^3 \quad \text{ms} \quad (47)$$

其中：

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

c ：自由空间光速（公里/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 公里的路径：

步骤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。

步骤2：确定强度超过 $(E_w - A \text{ (dB)})$ 的所有其他有效模。

步骤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。

步骤4：对于不超过7 000公里的路径，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 公里之间的路径，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 。

步骤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。在没有散射的情况下，ITU-R P.842建议书步骤14给出的结果为数字电路的可靠性（DCR）。因此，多模干扰引起的可靠性恶化，即MIR，是为ITU-R P.842建议书表3步骤14至13确定的值，即 $DCR = ((BCR) \times (MIR)/100)\%$ 。

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。

步骤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 公里的路径：

组合信号的强度同第5.3节。假定在路径为7 000公里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公里时线性增至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

除第10.2段给出的程序外，为了计算由散射引起的扩展，要调用后附资料1给出的散射模型完成下列步骤。

步骤7：后附资料1第1段给出了散射引起的潜在时间扩展，这一后续时间的散射函数施用于时间窗口内的每一种F区域模，求出时间窗口 T_w 边缘的散射强度 $p_{Tspread}$ 。

步骤8：后附资料1第2段给出了散射引起的潜在频率扩展，这一频率散射函数 $p_{Fspread}$ 施用于最强的F区域模，求出频率窗口 F_w 两侧边缘的对称的散射强度。

步骤9：在窗口的边缘处，若任一 $p_{Tspread}$ 和/或 $p_{Fspread}$ 的比超过了比值 A ，则需在按后附资料1第3段给出的F区域模控制点确定散射发生的概率。如考虑对一个传播模采用多个控制点，则应取最大概率。

步骤10：下列函数给出了散射条件下的数字电路可靠性：

$$DCR = ((BCR) \times (MIR) \times (1 - prob_{occ})/100)\% \quad (48)$$

其中散射发生概率 $prob_{occ}$ 在后附资料1中规定。

附件1的后附资料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:

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

其中:

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

其中: λ_d 是磁倾角;

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

其中:

T_l : 是控制点的当地时间 (小时);

$F_R = (0.1 + 0.008R_{12})$ 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。