

# 短波天波传输损耗与场强计算

黄钢石 曹志耀 方胜良

(电子工程学院 230037)

**摘 要:**建立电波传播模型是进行电子对抗作战仿真模拟、效能评估的一项重要性的基础性工作。本文建立了短波天波传播模型,并对天波传输损耗和场强计算进行了分析。

**主题词:**短波 模型 电子对抗

## 1 短波天波传播的特点

短波天波通信是利用高空电离层的反射或散射而进行的通信,在军事上有广泛的应用。它的最大优点是传输损耗比较小,可以以较小的功率进行远距离的传输。在地形复杂、短波地波或视距微波受阻挡而使电波无法到达的地区,利用高仰角投射的天波也可以实现近距离的通信。

由于电离层特性存在着随昼夜、季节、纬度和太阳黑子平均 11 年的周期性变化,且天波传播过程中存在衰落、多径、多普勒频移等效应,使得天波传播具有时变色散的传输特性。因此,短波天波传输损耗与场强计算比较复杂。

## 2 短波天波传输损耗模型

短波天波传输损耗可以分成三个部分:一是因电波在传输过程中的扩散而产生的自由空间传输损耗;二是由于电离层对无线电波能量的吸收所引起的损耗;三是其它原因引起的损耗,包括地面反射损耗、极化损耗和电离层偏移吸收损耗等。由于电波在不同的电离层反射时,受到的吸收损耗就不同,因此计算给定条件的短波天波传输损耗时必须明确传输模式,即电波经由电离层的哪一层反射。本文以 ITU - R(国际无线电通信咨询委员会)的 Rec. 533 - 3 推荐报告为基础建立 4000 公里以内短波天波传输损耗和场强计算模型。

### (1) 路径参数计算

#### ① 大圆距离 $D$

假设收发两点  $A(\theta_1, \lambda_1)$ 、 $B(\theta_2, \lambda_2)$ ,  $\theta_1, \theta_2$  为经度 ( $-\pi \leq \theta \leq \pi$ ),  $\lambda_1, \lambda_2$  为纬度 ( $-\frac{\pi}{2} \leq \lambda \leq \frac{\pi}{2}$ ), 则  $A, B$  两点间球面最短距离  $D(\text{km})$  为:

$$D = R \cdot d$$

其中,  $R$  为地球半径, 取为 6371.2km;

$d$  为  $A$ 、 $B$  两点间的地心角(弧度):

$$\cos d = \sin \lambda_1 \times \sin \lambda_2 + \cos \lambda_1 \times \cos \lambda_2 \times \cos(\theta_1 - \theta_2)$$

## ② 跳数

由于地球曲率及电离层高度限制了电离层反射的最大一次跳跃的距离  $D_{\max}$ , 当传播距离大于这个距离时, 天线的水平视线受地面阻挡, 此时需用多一跳的模式传播。另外, 当用  $F_2$  模式传播而被  $E$  层屏蔽时, 也需要考虑用多一跳的模式传播。具体跳数按下式计算:

$$n = \text{INT}(D/D_{\max}) + 1$$

式中,  $\text{INT}(x)$  表示对  $x$  取整数;

$D_{\max}$  为天波一跳传播的最大距离(km):

$$D_{\max} = 2R \left[ \arccos \left( \frac{R}{R+h} \times \cos \Delta_{\min} \right) - \Delta_{\min} \right]$$

其中,  $\Delta_{\min}$  为天线波瓣在水平方向受地面阻挡时的最小仰角, 一般天线仰角要大于  $3^\circ$ ;

$h$  为电离层的反射虚高度(km)。

一般地, 对于  $E$  层传播模式, 一跳的球面距离在 2000 公里左右, 而对于  $F_2$  模式, 一跳传播的球面距离在 4000 公里左右。

## ③ 控制点

对于一跳情况, 一般以反射点( $\theta_0$ ,  $\lambda_0$ ) 作为控制点。

反射点的经度  $\theta_0$ (弧度):

$$\theta_0 = \arcsin \left( \sin \frac{d}{2} \times \frac{\sin \eta}{\sin \Psi} \right) + \theta_2$$

反射点的纬度  $\lambda_0$ (弧度):

$$\lambda_0 = \frac{\pi}{2} - \Psi$$

$\Psi$  为收发点间大圆弧的中点至北极的角距离(弧度);  $\eta$  为接收点到北极的大圆弧与接收点到发射点的大圆弧之间的夹角(弧度)。

对于多跳情况, 一般用“参考跳距法”求得控制点, 即求得跳数后, 用跳数等分球面距离得到“参考跳距” $D_n$ , 将收发两点间分别距发射点、接收点  $D_n/2$  的两点( $\theta_3, \lambda_3$ )、( $\theta_4, \lambda_4$ ) 作为控制点<sup>[1]</sup>。

## ④ 控制点磁参量

### 1) 修正磁倾角:

$$\beta = \arctg \left( \frac{I}{\sqrt{\cos \lambda}} \right)$$

这里,  $\beta$  为修正磁倾角(弧度)

$I$  为磁倾角, 即地磁场方向与水平面之间的夹角(弧度):

$$I = \arctg \left( \frac{F_z}{\sqrt{F_x^2 + F_y^2}} \right)$$

### 2) 磁旋频率:

$$f_H = 2.8 \times \sqrt{F_x^2 + F_y^2 + F_z^2}$$

式中,  $f_H$  为磁旋频率(MHz);

$F_x, F_y, F_z$  为地球基本磁场在高度为  $h$  处的北向、东向、垂直分量<sup>[1]</sup>.

## (2) 频率预测和传播模式

### ① E 层频率预测

#### 1) E 层临界频率 $f_0E$

$$f_0E = \max\{f_0E_{min}, (A_1 \times A_2 \times A_3 \times A_4)^{\frac{1}{4}}\}$$

这里,

$$f_0E_{min} = 0.171 + 0.0015(\Phi_{12} - 66)$$

$\Phi_{12}$  为 10.7 厘米太阳射电通量 12 个月的流动平均值;

$A_1$  为太阳活动因子:

$$A_1 = 1 + 0.0094 \times (\Phi_{12} - 66)$$

$A_2$  为季节因子:

$$A_2 = \cos^u \chi_{noon}$$

$u$  按下式计算:

$$u = \begin{cases} -0.193 + 1.92 \times \cos \lambda, & |\lambda| < \frac{8\pi}{45} \\ 0.11 - 0.47 \times \cos \lambda, & |\lambda| \geq \frac{8\pi}{45} \end{cases}$$

$\chi_{noon}$  为中午时的太阳天顶角, 弧度;

$A_3$  为主纬度变化因子:

$$A_3 = \begin{cases} 23 + 116 \times \cos \lambda, & |\lambda| < \frac{8\pi}{45} \\ 92 + 35 \times \cos \lambda, & |\lambda| \geq \frac{8\pi}{45} \end{cases}$$

$A_4$  为时间因子:

$$A_4 = \cos^v \chi_a$$

$\chi_a$  为修正太阳天顶角, 弧度:

$$\chi_a = \chi - 3 \times \ln(1 + e^{\frac{\chi - 89.58}{3}})$$

$\chi$  为太阳天顶角(弧度):

$$\chi = \arccos[\sin \lambda \sin \lambda_{sun} + \cos \lambda \cos \lambda_{sun} \cos(\theta - \theta_{sun})]$$

$v$  为日吸收指数:

$$v = \begin{cases} 1.2, & |\lambda| > \frac{\pi}{15} \\ 1.31, & |\lambda| \leq \frac{\pi}{15} \end{cases}$$

#### 2) E 层最高可用频率(MHz)

$$E(D)MUF = f_0E \times M_E$$

$M_E$  为 E 层一跳传播的传输因子, 是大圆距离的函数, 可按下式计算:

$$M_E = 3.94 + 2.80x - 1.70x^2 - 0.60x^3 + 0.96x^4$$

其中,

$$x = \frac{D-1150}{1150}$$

### 3) E 层截止频率 $f_c$

E 层截止频率是  $F_2$  层传播模式不被 E 层遮蔽的最低频率。对于 2000km 以内的通信电路, 可近似地参照路径中点的 E 层临界频率值; 对于 2000km 以远的通信电路, 可参照大圆路径上离电路收、发端各 1000km 处的两个反射点的  $f_0 E$  值中的较高者, 代入下式计算:

$$f_c = 1.05 \times f_0 E \times \sec \left( \arcsin \frac{R \times \cos \Delta_F}{R + 110} \right)$$

$\Delta_F$  为  $F_2$  模式下的射线仰角, 弧度:

$$\Delta_F = \arctg \left[ \operatorname{ctg} \frac{D}{2nR} \frac{R}{R + h_r} \times \csc \frac{D}{2nR} \right]$$

$h_r$  为  $F_2$  层反射虚高度 (km)<sup>[1]</sup>

### ② $F_2$ 层频率预测

#### 1) $F_2$ 层临界频率 $f_0 F_2$ 和 3000 公里传输因子 $M(3000) F_2$

目前国际上计算  $f_0 F_2$  和  $M(3000) F_2$  的通用方法是数字图函数法:

$$f_0 F_2 = \sum_{k=0}^{75} U_{0,k} G_k(\lambda, \theta) + \sum_{j=1}^6 \left[ \cos jT \sum_{k=0}^{75} U_{2j,k} G_k(\lambda, \theta) + \sin jT \sum_{k=0}^{75} U_{2j-1,k} G_k(\lambda, \theta) \right]$$

$$M(3000) F_2 = \sum_{k=0}^{40} U_{0,k} G_k(\lambda, \theta) + \sum_{j=1}^4 \left[ \cos jT \sum_{k=0}^{40} U_{2j,k} G_k(\lambda, \theta) + \sin jT \sum_{k=0}^{40} U_{2j-1,k} G_k(\lambda, \theta) \right]$$

$\lambda$  为地理纬度, 且  $-\frac{\pi}{2} \leq \lambda \leq \frac{\pi}{2}$ ;  $\theta$  为以东经表示的地理经度, 且  $0 \leq \theta \leq 2\pi$ ;

$T$  为以角度表示的世界时间 (弧度),  $-\pi \leq T \leq \pi$ ;

$G_k(\lambda, \theta)$  为表征地域变化的地理坐标函数。该函数是由特定的一系列整数  $k(k_0, k_1, k_2, \dots, k_l, \dots, k_m; k_m = K)$  确定<sup>[1]</sup>。

#### 2) $F_2$ 层最高可用频率 $F_2(D) MUF$

$$F_2(D) MUF = \left[ 1 + \left( \frac{C_D}{C_{3000}} \right) (B - 1) \right] \times f_0 F_2 + \frac{f_R}{2} \left( 1 - \frac{D}{D'_{\max}} \right)$$

其中,

$$B = M(3000) F_2 - 0.124 + \left[ [M(3000) F_2]^2 - 4 \right] \times \left[ 0.0215 + 0.005 \sin \left( \frac{7.854}{x} - 1.9635 \right) \right]$$

$$x = \max \left( \frac{f_0 F_2}{f_0 E}, 2 \right)$$

$$C_D = 0.74 - 0.591Z - 0.424Z^2 - 0.090Z^3 + 0.088Z^4 + 0.181Z^5 + 0.096Z^6$$

$C_{3000}$  ——  $D = 3000$ km 时的  $C_D$  值

$$Z = 1 - 2D/D'_{\max}$$

$$D'_{\max} = 4780 + (12610 + 2140/x^2 - 49720/x^4 + 68890/x^6)(1/B - 0.303)$$

## ③ 传播模式

传播模式是指天波的传播路径。由于短波天线波束较宽,射线发散性较大,电离层又是分层结构,因此天波传播有可能是多次反射的,即一条传播电路在同一时间内,可能有几种传播模式。其中起主导作用,即对接收点的场强包主要贡献作用的模式称为主控模式。若电波频率大于  $F_2$  层最高可用频率,电波将穿出电离层;若电波频率小于  $E$  层最高可用频率或截止频率,则电波将在  $E$  层被反射。对于 4000 公里以内的传播,其可能存在的传播模式如表 1 所示。

表 1 不同距离时可能存在的传播模式

传播距离(km)	传播模式
0 ~ 2000	1E, 1F, 2E, 2F
2000 ~ 4000	2E, 1F, 2F, 1E1F

## (3) 传输损耗

电波在传输过程中所引起的基本传输损耗  $L_b$  可由下式求得(用分贝表示):

$$L_b = L_{bf} + L_i + L_c + L_g + L_m + L_h + L_x$$

式中,  $L_{bf}$  为电离层传播路径上的自由空间基本传输损耗(dB):

$$L_{bf} = 32.4 \sqrt{f} + 20 \log f + 20 \log p$$

$f$  为工作频率(MHz);

$p$  为电波经过的射线距离(km), 即:

$$p = 2R \sum_{j=1}^n \left[ \frac{\sin \frac{D_j}{2R}}{\cos(\Delta_j + \frac{D_j}{2R})} \right]$$

$L_i$  为电离层吸收损耗。使用下述半经验公式来计算:

$$L_i = \frac{677.2n \times \sec i_{110}}{(f + f_H)^{1.98} + 10.2} \times \frac{1}{k} \sum_{j=1}^k I_j$$

式中,  $I_j = (1 + 0.0037 S_{p(12)}) \times (\cos 0.8 \chi_j)^{1.3}$

$i_{110}$  为 110 公里处的电波入射角(弧度);

$k$  为控制点的数目;

$f_H$  为控制点处的磁旋频率的平均值(MHz);

$\chi_j$  为第  $j$  控制点的太阳天顶角(弧度), 计算值大于 1.7829 时, 取 1.7829;

$L_c$  为吸收损耗修正(dB)。在  $F_2$  模式下, 电波依次穿透了  $D$  层、 $E$  层到达了  $F_2$  层, 上述吸收损耗包含了产生于  $D$  层、 $E$  层和  $F$  层下缘的非偏移吸收损耗。而在工作频率小于  $E$  层的基本 MUF 时, 电波将从  $E$  层反射而成为  $E$  模式, 电波没有穿透整个  $E$  层。因此在工作频率  $f$  小于  $E$  层基本 MUF 时需按下式对吸收损耗进行校正, 即:

$$L_c = \begin{cases} 1.359 + 8.617 \log_{10} \left[ \frac{f}{E(D)MUF} \right], & f < E(D)MUF \\ 0, & f \geq E(D)MUF \end{cases}$$

若  $L_c > 0$ , 令  $L_c = 0$ ; 若  $L_c \leq -9$ , 令  $L_c = -9$ .

$L_m$  为工作频率高于基本 MUF(最高可用频率) 时附加的传输损耗(dB):

$$L_m = \begin{cases} \min\left\{130\left[\frac{f}{f_b} - 1\right]^2, 81\right\}, & \text{对于 } E \text{ 模式} \\ \min\left\{36\left[\frac{f}{f_b} - 1\right]^{\frac{1}{2}}, 62\right\}, & \text{对于 } F_2 \text{ 模式} \end{cases}$$

这里,  $f_b$  为最高可用频率(MHz), 对于 E 模式,  $f_b$  为  $E(D)MUF$ , 对于  $F_2$  模式,  $f_b$  为  $F_2(D)MUF$ ;

$L_g$  为地面反射损耗:

$$L_g = 2(n - 1)$$

$L_h$  为随季节、本地时间和地磁纬度等偏离损耗月中值的变化量<sup>[2]</sup>;  $L_i$  为原因不明的其它损耗, 取 8dB.

#### (4) 场强中值

由基本传输损耗, 可以按下式计算在接收点的场强中值 dB(1 $\mu$ V/m):

$$E = 136.6 + P_t + G_t + 20\log f - L_b$$

其中,  $P_t$  为发射机输出功率(dB(kw));

$G_t$  为发射天线在电波射线方向上的增益(dB).

### 3 结束语

电子对抗作为一种作战手段, 已经成为渗透到各个作战领域的重要作战样式。电子对抗的实质就是交战双方对电磁频谱使用权和控制权的争夺。但是, 无论是电子侦察与反侦察, 还是电子干扰与反干扰, 对它们作战效能的评估都离不开电波传播。因此, 建立电波传播模型, 是进行电子对抗作战效能评估、仿真模拟的一项重要基础性工作。为此, 我们开发了电波传播通用程序库, 并已通过技术鉴定。上述短波天波传输损耗和场强计算模型是其中的一部分, 经实测数据验证, 该模型精度较高。但限于篇幅, 本文对模型的细节未予详细讨论。

### 参考文献

- 1 International Telecommunication Union, Rec. 434 - 5, CCIR Reference Ionospheric Characteristics And Methods of Basic MUF, Operational MUF And Ray - path Prediction, 1992.
- 2 International Telecommunication Union, Rec. 533 - 3, CCIR HF Propagation Prediction Method, 1992.
- 3 International Telecommunication Union, Report 340 - 4, CCIR Atlas of Ionospheric Characteristics, 1992.
- 4 王元坤. 电波传播概论. 国防工业出版社, 1984.