

\*\*\*\*\*  
\* 中国航海学会 \*  
\* 通信导航学术 \*  
\* 年会论文(1992) \*  
\*\*\*\*\*

# 高频电波传播的计算方法及 计算机辅助计算

杨秉曦 温铁江

(交通部上海船舶运输科学研究所)

高频无线电传播主要是天波和地波两种。

## 1 天波传输损耗

对于我国沿海和近洋海域 (覆盖范围在 2000 公里以内), 天波传播基本传输损耗可用下式表示:

$$L_b = L_{bf} + L_a + Y_p \quad (1)$$

(1)  $L_{bf}$  为以分贝表示的自由空间基本传输损耗

$$L_{bf} = 20 \lg \frac{4\pi r}{\lambda} \quad (2)$$

其中:  $r$  为传输路径的长度;  $\lambda$  为波长。

如果  $r$  以千米表示, 频率  $f$  以兆赫为单位, 则(2)式可以写为:

$$L_{bf} = 32.45 + 20 \lg f + 20 \lg r \quad (3)$$

在给定收发两地的经纬度之后, 电离层 ( $F_2$  层或 E 层) 所射点的经纬度也就确定了。再由反射点的地方时、纬度、月份, 就可以确定反射点的高度 (虚高)。根据这些数据, 就可以计算传播路径的长度  $r$  了。

设收发两地的大圆弧长用  $d$  表示, 以  $(\lambda_1, \varphi_1)$  和  $(\lambda_2, \varphi_2)$  表示收发两地的经纬度, 由球面三角公式可知:

$$\cos d = \sin \varphi_1 \sin \varphi_2 + \cos \varphi_1 \cos \varphi_2 \cos(\lambda_1 - \lambda_2) \quad (4)$$

收发两地的大圆距离:

$$D = R \cdot d \quad (5)$$

式中:  $R$  为地球半径。

$F_2$  层一次反射的最远距离  $D$  约 4000 千米, E 层一次反射的最远距离  $D$  约 2000 千米。如果超过最大反射距离, 就只有多跳模式了, 而在 2000 千米距离之内, 一般只须考虑一跳模式, 这就是(1)式中不包含地面反射损耗  $l_g$  的原因。

为了求得反射点  $(\lambda_0, \theta_0)$  处的极距  $m$  (见图 1), 要用下式计算:

$$\cos m = \sin \varphi_2 \cos \frac{d}{2} + \cos \varphi_2 \sin \frac{d}{2} \cos \alpha \quad (6)$$

式中  $\alpha$  为收发两地大圆弧与接收机所在地子午线的夹角。

$$\cos \alpha = \frac{1}{\sin d} [\sin \varphi_1 \cos \varphi_2 - \cos \varphi_1 \sin \varphi_2 \cdot \cos(\lambda_1 - \lambda_2)] \quad (7)$$

于是:

$$\varphi_0 = 90^\circ - m \quad (8)$$

$$\sin(\lambda_0 - \lambda_2) = \frac{\sin d / 2 \cdot \sin \alpha}{\sin m} \quad (9)$$

反射点的地方时

$$T_0 = (\lambda_0^0 - \lambda_1^0) / 15 + T_1 \quad (10)$$

式中  $T_1$  为发射点地方时

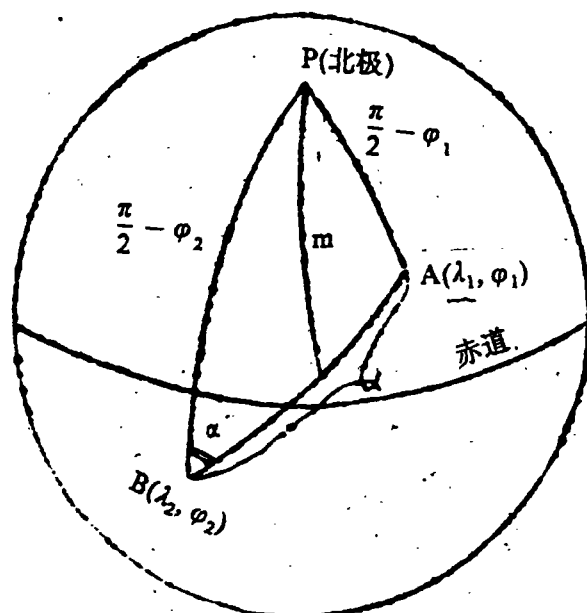


图 1

电离层反射点的高度 (虚高), E 层(h'E)为 110 千米, F<sub>2</sub> 层(h'F)则须查图表求得。在求得 D、h'F 或 h'E 之后, 可由下式计算传播路径长度 r (参见图 2)。

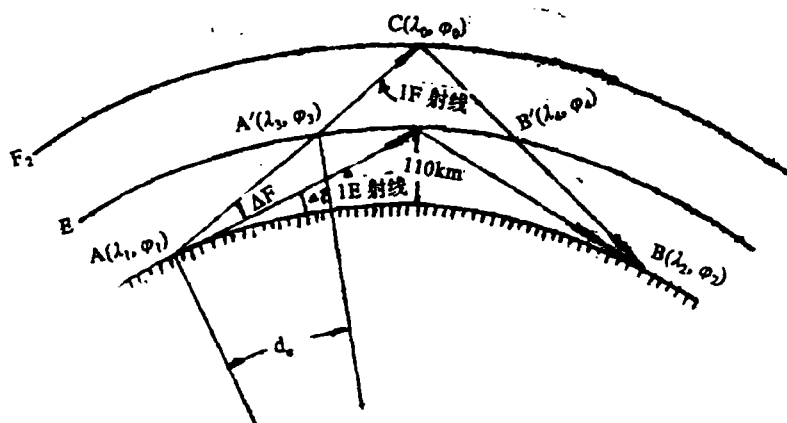


图 2

$$r = 2R \cdot \sin(D / 2R) / \cos(\Delta + D / 2R) \quad (11)$$

式中  $\Delta = \Delta F$  或  $\Delta E$ , 为射线仰角, 由下式求出:

$$\text{tg} \Delta = \text{ctg}(D/2R) - \frac{R}{(h' + R) \cdot \sin(D/2R)} \quad (12)$$

而  $h' = h'F$  或  $h'E$ . 当工作频率  $f$  选定后, 自由空间基本传输损耗  $L_w$  就可由(3)式计算.

## (2) $L_a$ 电离层吸收损耗

计算  $L_a$  的公式:

$$L_a = \Phi(Y) \cdot [A_{fo}(0,0) \cdot \cos \rho(0.881x) \cdot (1 + 0.0067R_{12}) \sec i_{100}] / (f + f_H)^2 \quad (13)$$

$L_a$  的单位 dB.

对于 E 层反射的传播模式, 在反射点 C 处计算  $L_a$ ; 对于  $F_2$  层反射的传播模式, 则须分别在电波射线向上穿过 E 层 (图 2 中点 A) 与从  $F_2$  层反射后向下再穿过 E 层 (点 B) 的两点计算  $L_{aA'}$  与  $L_{aB'}$ , 并取其平均值作为  $L_a$ .

上式中  $K_{12}$  为太阳黑子数预测值. 从 1990 年元月起, 位于北京的世界数据中心中国天文学中心, 将在每月初和月中发布太阳活动预报, 其中包括半个月太阳黑子数平均值. 但是在工程计算中应采用 12 个月的流动平均值. (13) 式中其它诸因子的计算方法如下:

### 1) $\Phi(Y)$

$$\Phi(Y) = \frac{1.2}{1.62 - Y} - 0.41 \quad (0 \leq Y < 1 \text{ 时}) \quad (14)$$

$$\Phi(Y) = 1 + \frac{0.07}{(Y - 0.75)^2} \quad (1 < Y \text{ 时}) \quad (15)$$

其中:

$$Y = \frac{f_v}{f_{OE}} \quad \text{而:}$$

$$f_v = f \cdot \cos \sin - 1(0.985 \cos \Delta) \quad (16)$$

$$f_{OE} = \{ [1 + 0.0094(\varphi_{12} - 66)] \cdot \cos^m x_{noon} \cdot (A + B \cos \varphi) \cdot D \} \quad (17)$$

当  $Y = 1$ , 意味着垂直入射频率等于电离层 E 层特征参数  $f_{OE}$ , 此时的吸收极大, 必须重新选择工作频率  $f$ .

上式中  $\Delta = \Delta F$  或  $\Delta E$ ,  $\varphi$  为吸收的纬度值.

$$\varphi_{12} = 63.7 + 0.728R_{12} + 0.00089R_{12}^1 \quad (18)$$

$x_{noon}$  为当地中午太阳天顶角.

参数  $m$ 、 $A$ 、 $B$  为:

当  $|\varphi| < 32^\circ$  时,

$$m = -1.93 + 1.92 \cos \varphi \quad (19)$$

$$A = 23$$

$$B = 116$$

$$\text{当 } |\varphi| > 32^\circ \text{ 时,} \\ m = 0.11 - 0.49 \cos \varphi \quad (20)$$

$$A = 92$$

$$B = 35$$

小时因子的计算, 首先计算  $x'$ .

当  $|\varphi| < 23^\circ$  时,

$x' = x$ ,  $x$  为当时太阳天顶角.

当  $|\varphi| > 23^\circ$  时,  $x$  取 0.05 小时前的  $x$ .

再求  $P$ .

当  $|\varphi| < 12^\circ$  时,  $P = 1.31$ ;

当  $|\varphi| > 12^\circ$  时,  $P = 1.20$ .

于是:

$$\text{当 } x' \leq 73^\circ \text{ 时, } \quad = (\cos P)^P \quad (21)$$

$$\text{当 } 73^\circ < x' < 90^\circ \text{ 时, } \quad = \cos^P(x' - \delta x') \quad (22)$$

$$\text{式中 } \delta x' = 6.27 \cdot 10^{-13} \cdot (x' - 50)^8 \quad (23)$$

当  $x' \geq 90^\circ$  时, 则

当子夜到黎明间, ( $6 \geq t > 0$ )

$$= (0.077)^P \exp[-1.68(Tu - t)] \quad (24)$$

当日落到子夜期间, ( $18 \leq t < 24$ )

$$= 0.077)^P \exp[-1.01 \cdot (t - Ta)] \quad (25)$$

式中  $t$  为当时时间,  $Tu$  为当地黎明时间( $x' = 90^\circ$ ),  $Td$  为当地日落时间( $x = 90^\circ$ ).

将以上诸值代入(16)、(17)式, 即可计算出  $Y$  值, 从而求出  $\Phi(Y)$ .

## 2) $A_{TO}(0,0)$

$A_{TO}(0,0)$  是当太阳黑子数  $R_{12} = 0$ , 太阳天顶角  $x = 0$  时, 电波沿天顶方向穿过电离层时的吸收因子. 它随季节与改进型磁倾角  $|X|$  而变化.

改进型磁倾角  $|X|$  的值与地理纬度有关, 可用图 3 查得.

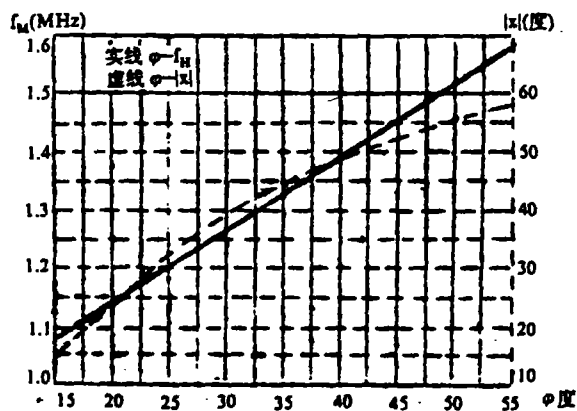


图 3 纬度  $\varphi$  和磁旋频率  $f_H$  与改进型磁倾角  $|X|$  的关系

再用查得的|X|值与月份，查图 4 求出  $A_{TO}(0,0)$  的值。

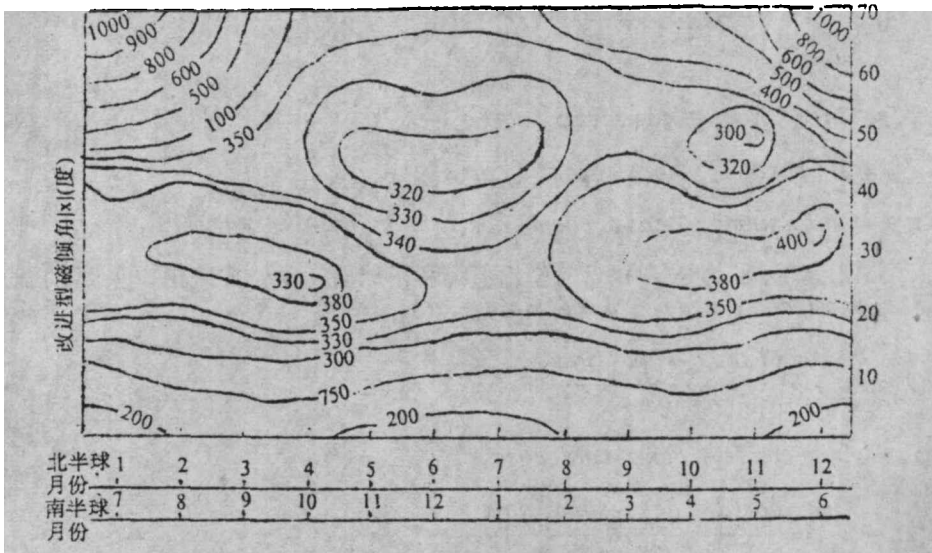


图 4 吸收因子  $A_{TO}(0,0)$

3) 指数  $p$  值的求法类似  $A_{TO}(0,0)$ ，利用|X|值与月份，查图求得。

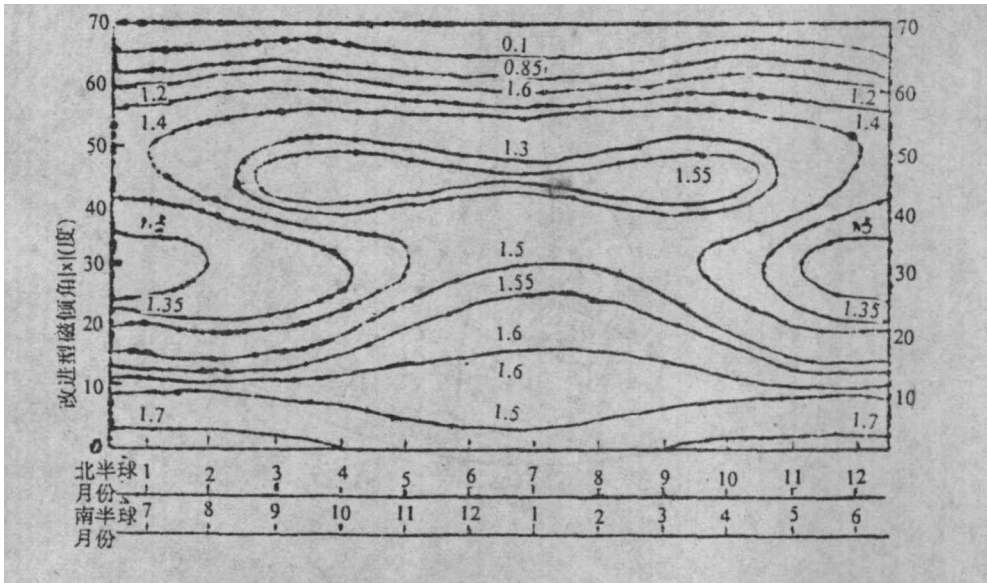


图 5 日吸收指数  $P$

4)x 的计算

$x$  为当地太阳天顶角。对于 E 层反射点 C、射线穿透 E 层点  $A'$ 、 $B'$ ，太阳天顶角  $x_c$ 、 $x_{A'}$ 、 $x_{B'}$  的计算方法为先求出日下点的位置：

$$\lambda_o = 180^\circ + \lambda_1 - T \cdot \frac{360^\circ}{24} \tag{26}$$

$$\varphi_o = \varepsilon \cdot \cos T \tag{27}$$

$$T = \frac{360^\circ}{365} (\text{月中日期距下一夏至日的天数}) \quad (28)$$
$$\cos x_c = \sin \varphi_0 \sin \varphi_0 + \cos \varphi_0 \cos \varphi_0 \cos(\lambda_0 - \lambda_0) \quad (29)$$

$$\cos x_{A'} = \sin \varphi_1 \sin \varphi_0 + \cos \varphi_1 \cos \varphi_0 \cos(\lambda_1 - \lambda_0) \quad (30)$$

$$\cos x_r = \sin \varphi_4 \sin \varphi_0 + \cos \varphi_4 \cos \varphi_0 \cos(\lambda_4 - \lambda_0) \quad (31)$$

$$\sin \varphi_3 = \sin \varphi_2 \cos(d - dc) + \cos \varphi_2 \sin(d - dc) \cos \alpha \quad (32)$$

$$\cos(\lambda_1 - \lambda_3) = \frac{\cos \delta c - \sin \varphi_1 \sin \varphi_3}{\cos \varphi_1 \cos \varphi_3} \quad (33)$$

$$\sin\varphi_A = \sin\varphi \cos dc + \cos\varphi \sin dc \cos\alpha \quad (34)$$

$$\cos(\lambda_2 - \lambda_4) = \frac{\cos(d - dc) - \sin\varphi_1 \sin\varphi_4}{\cos\varphi_1 \cos\varphi_4} \quad (35)$$

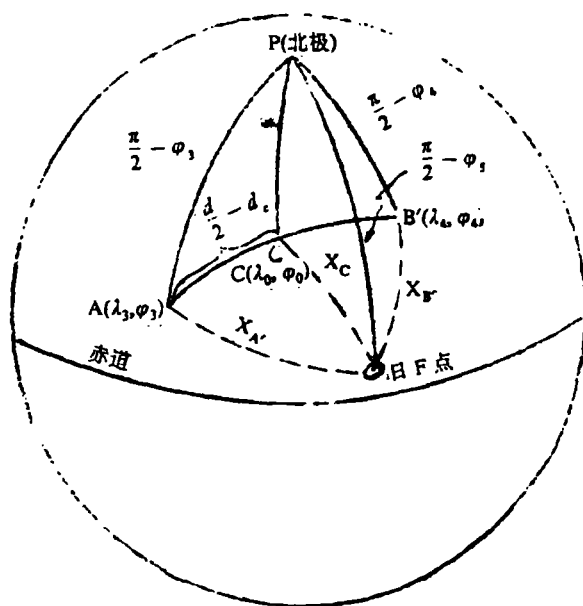
$$\sin i = \frac{R}{R + 110} \cdot \cos \Delta F \quad (36)$$


图 6

5)  $i_{100}$  计算

 $i_{100}$  为 100 千米高度处电波的入射角.

$$i_{100} = \sin^{-1}(0.985 \cos \Delta) \quad (37)$$

式中  $\Delta = \Delta F$  或  $\Delta E$

#### 6) $f_H$ 的计算

$f_H$  为地磁场磁感应强度产生的电子磁旋频率，它与地理纬度有关，可利用纬度值  $\varphi$  由图 3 查出，也可通过下式算出：

$$f_H = 0.012333\varphi + 0.892778 \quad (38)$$

将以上诸因子代入(13)式，就可算出电离层吸收损耗  $L_a$ 。

#### (3) $Y_p$ 额外系统损耗

试验表明， $Y_p$  的数值与地磁纬度、季节、本地时间及传输距离有关，但对我国国内及沿海附近地区而言， $Y_p$  基本上仅与本地时间有关。 $Y_p$  的取值可由表 1 查得。

表 1 额外系统损耗  $Y_p$

地方时 $T_0$	$Y_p$ dB
$22 < T_0, 04 > T$	18
$04 < T_0 < 10$	16.6
$10 < T_0 < 16$	15.4
$16 < T_0 < 22$	16.6

## 2 地波传输损耗

高频波段的低端 (1.6~5MHz) 为沿海船舶通信的主要频段，覆盖范围可达 1000 千米，也须选择合适频率，但昼夜，季节关系较小。影响地波传播的因素主要是地面或海面的电导率和介电常数，以及地面的植被、地形、气候条件等。

计算地波传输损耗，在路径长度较大时，必须考虑地球曲率。

地波传输损耗  $L_e$  可用下式表示：

$$L_e = 109.54 - 20 \lg D + 20 \lg A \quad (39)$$

式中： $L_e$  单位是 dB；

$D$  为收发两地大圆距离，以千米为单位，可用(4)·(5)式进行计算；

$A$  为衰减因子。

地球曲率可以忽略的最大距离称为临界距离，以  $D_{cr}$  表示。 $D_{cr}$  由下式确定：

$$D_{cr} = 80\sqrt{f} \quad (40)$$

式中： $D_{cr}$  的单位用千米。

当  $D < D_{cr}$  时，计算衰减因子  $A$  的步骤如下：

#### 1) 计算相位常数 $\beta$

$$\beta = 18 \frac{-1(\varepsilon + 1) \cdot f}{1.8 \cdot 10^4 \sigma} \quad (41)$$

式中： $f$  为工作频率，单位 MHz；

$\varepsilon$  为介电常数，对于海水  $\varepsilon = 80$ ；

$\sigma$  为电导率，对于海水  $\sigma = 4$ 。

#### 2) 计算数值距离 $p$

$$P = 1.745 \cdot 10^{-3} \frac{f \cdot \cos \beta \cdot D}{\sigma \cdot \lambda} \quad (42)$$

式中  $\lambda$  为波长, 单位为米。

3) 计算衰减因子 A

$$A = \frac{2 + 0.3\varphi}{2 + p + 0.6p^2} - \sqrt{p/2} \exp(-1.44p/\ln 10) \cdot \sin\beta \quad (43)$$

当  $D > D_{cr}$  时, 计算衰减因子的方法如下:

1) 计算相位常数  $\psi$

$$\psi = \operatorname{tg}^{-1} \frac{\varepsilon}{6 \cdot 10^{-8} \cdot \sigma \lambda} - \frac{1}{2} \operatorname{tg}^{-1} \frac{\varepsilon - 1}{6 \cdot 10^{-8} \sigma \lambda} \quad (44)$$

2) 计算参数  $\delta$

$$\delta = 0.002924 \sqrt[3]{\lambda} \cdot \frac{\sqrt{\varepsilon^2 + 3600\sigma^2\lambda^2}}{\sqrt[4]{(\varepsilon - 1)^2 + 3600\sigma^2\lambda^2}} \quad (45)$$

3) 计算数值距离 x

$$x = \sqrt[3]{2\pi R / \lambda} \cdot D / R \quad (46)$$

式中 R 为地球半径; D 为大圆距离。

4) 以  $\psi$  及  $\delta$  为引数由图 7, 求出  $I_m(\tau_0)$  值。

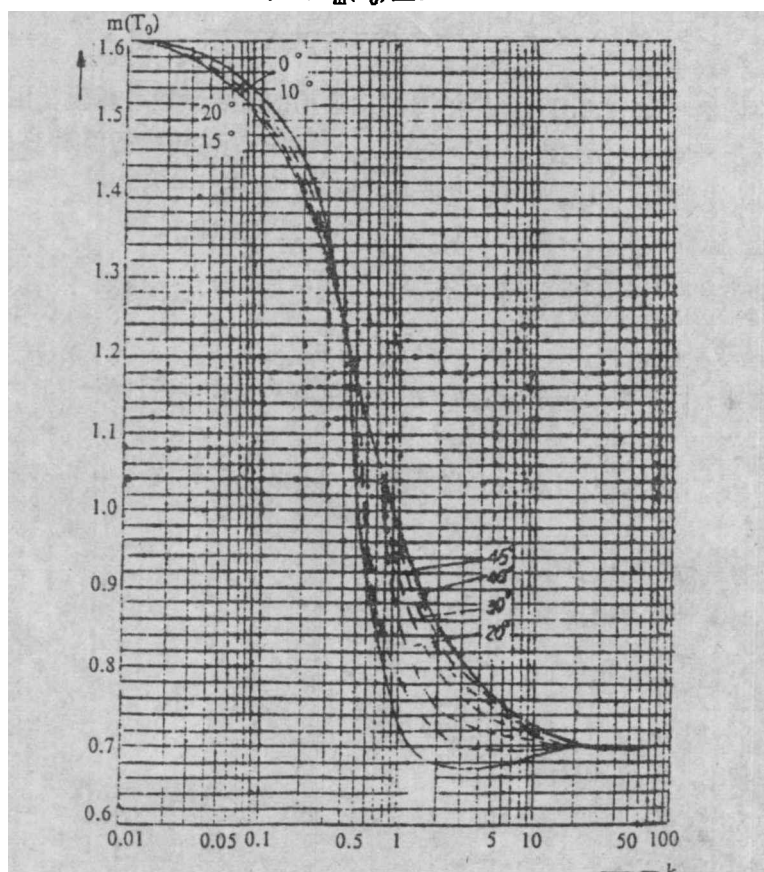


图 7 相位常数  $\varphi$  是参变量,  $I_m(\tau_0)$  与  $|\delta| = k$  的关系

5) 计算衰减因子 A



$$A = \sqrt{2\pi x} \cdot \delta^2 \exp[-I_m(\tau_0) \cdot x] \quad (47)$$

在计算出 D 及 A 之后, 代入(39)式, 即前求出地波传输损耗 Le.

### 3 计算方法的处理

为适应微机的计算, 对上述计算方法中的表格参数和曲线图参数要进行数字化的处理.

#### (1) 计算太阳天顶角 $\varphi_0$

公式(27)是  $\varphi_0$  的计算, 其基本假设是太阳在黄道上匀速运动. 虽然稍粗略, 但较假定  $\varphi_0$  本身匀速变化精确而合理得多, 而且便于计算, 适宜计算程序.

#### (2) 曲线图的数字化

对于一维曲线图比较简单, 如  $\varphi \sim f_H$  及  $\varphi \sim |X|$ , 以间隔均匀的  $\varphi$  值为索引, 求出曲线上的点的纵坐标值, 将  $\varphi$  值与点的纵坐标值构成数据系列. 对于  $\varphi \sim f_H$  曲线, 由于呈现为一直线, 按此方法求出诸点后, 用最小二乘法可解出直线参数, 更便于直接计算.

对于二维曲线图, 如月、 $|X| \sim A_r(0.0)$  及月、 $|X| \sim \rho$  图, 先按月份分割, 再取得每一割线上的曲线交点的  $|X|$  值及函数值, 以月、 $|X|$ 、函数值构成数据系列.

对一维曲线数据进行内插, 用的是线性内插法. 如  $\varphi \sim |X|$  数据, 所需数据为:

$$|X| = \frac{|X|_2 - |X|_1}{\varphi_2 - \varphi_1} \cdot (\varphi - \varphi_1) + |X|_1 \quad (40)$$

对于  $K \sim I_m(\tau_0)$  曲线数据, 因横坐标是对数数据, 索引值也应取对数.

$$I = \frac{I_2 - I_1}{\lg K_2 - \lg K_1} \cdot (\lg K - \lg K_1) + I_1 \quad (49)$$

对二维曲线数据的内插, 分两频进行. 第一步先由月、日确定月份区间分割线, 在分割线上, 以  $|X|$  为索引值进行线性内插. 例如:

$$Aa = \frac{Aa_2 - Aa_1}{|X|_2 - |X|_1} \cdot (|X|_2 - |X|_1) + Aa_1 \quad (50)$$

$$Ab = \frac{Ab_2 - Ab_1}{|X|_2 - |X|_1} \cdot (|X|_2 - |X|_1) + Ab_1 \quad (51)$$

第二步, 以日期为索引值在 Aa、Ab 间进行线性内插 (见图八), 得:

$$A = \frac{Ab - Aa}{b - a} (t - a) + Aa \quad (52)$$

式中 t 为以月份表示的日期.

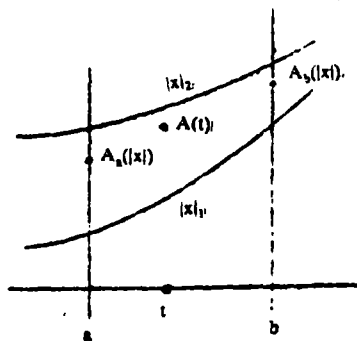
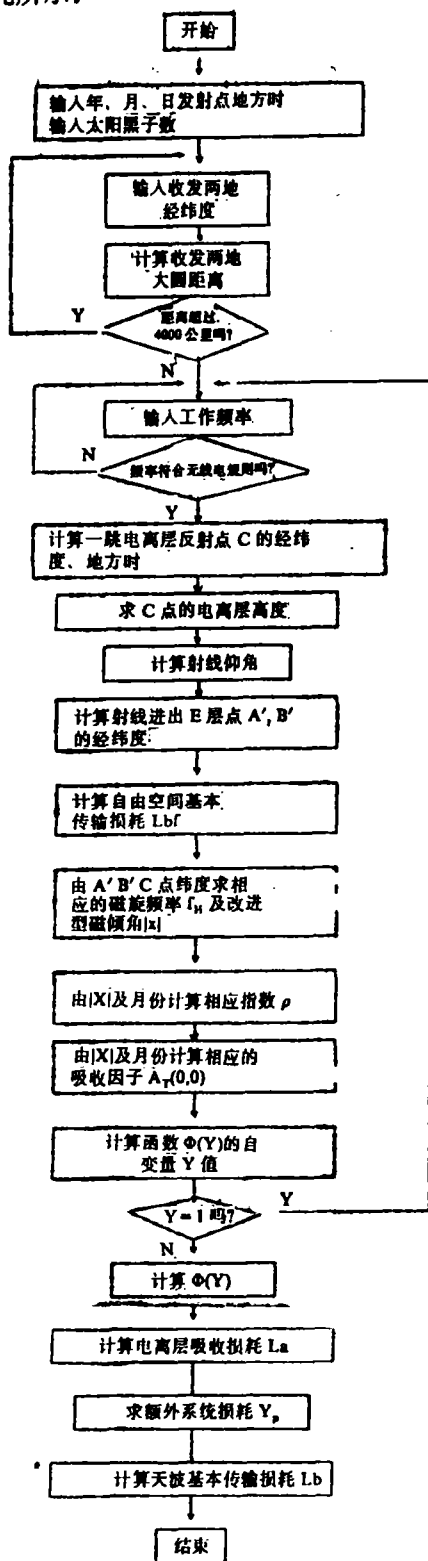


图 8

本计算的流程图如图九所示。



图九

我国的 HF-DOPPLER 效应观测离国际先进水平还有一段距离。有一些国家已形成了多点观测网,进行了信息的标集化记录,并使用了超级容量的激光存储记录仪。这一系列先进的作法和措施使各台站之间资料交换快,分析综合快,总之出成果快。

从世界范围的角度看,用 HF-DOPPLER 效应来研究电离层和电离层电波传播还处于高峰时期,预计,在 90 年代还会继续下去,会出现很多新的研究成果。

### 参 考 文 献

- (1) 权五畅等 远距离 HF-DOPPLER 效应观测 第五届全国日地空间物理学术讨论会 1988 年 10 月
- (2) 权五畅 鲍宏志等 HF-DOPPLER 频移观测系统 电波科学学报 VOL.4 NO.2、3 1989
- (3) 王祝和 远距离 HF-DOPPLER 探测的日出效应 中国航海学会通信导航学术年会(1989)论文集 1989 年 11 月
- (4) 权五畅 王祝和 台风季节我国上空电离层中的次声波扰动 武汉大学学报(自然科学版)电波传播专刊 1991 年 12
- (5) 权五畅 王祝和 太阳天顶角变化引起的 DOPPLER 效应 第四届全国电波传播学术会议论文集 1991 年 4 月
- (6) 权五畅 小川 [日本大阪电气通信大学] 在中国观测到的 3-5 分钟周期电离层扰动 日本地磁,地球卫星空间学术会议第 91 次会议论文集 1992 年 4 月

~~~~~

(上接 276 页)

传播损耗计算程序文件程序包 PGT90。(略)

传播损耗和信号场强数据输出程序文件程序包 PNT91。(略)

### 参 考 文 献

- (1) F.E.Terman, Radio Engineers Handbook, Section 10. Mc Graw-Hill, New York and London (1943)
- (2) H.Zuhrt, Elektromagnetische Strahlungsfelder, Chs 27 and 28. Springer-Verlag Berlin, Gottingen Heidelberg (1953)
- (3) CCIR 252-2