

100kHz 天波的实验和计算

王先林 沈力 黄泽荣
(中国科学院武汉物理研究所)

摘 要

本文通过对长波的实验和理论分析,得到了 100kHz 罗兰-C 脉冲波讯号的年、月、日变化和相位的均方差分布;求得了计算实测相位、三角形高和反射相高的近似公式。

一、引 言

电离层 D 区可以反射 30Hz—300kHz 的无线电波,这一波段具有衰减小、传播距离远、讯号稳定等特点,因而在通讯、导航、授时等方面得到广泛应用。

影响上述波段在 D 区传播的一个重要参数是电子密度,而电子密度与太阳活动周期、地理经纬度的时空环境等有关。因此在研究长波传播特征之前,首先应把 D 区电子密度随高度的分布确定下来,我们的计算是引用文献[1]给出的结果。

30Hz—300kHz 电波可用波导模理论来计算,但对于长波来说所需解的模方程的阶数很高,收敛慢,精度差,一般用波跳(wave-hop)理论求全波解去代替。本文通过实验和理论计算,对长波在实用中的一些重要参数:反射系数、反射相高、三角形高等进行了研究,得到了一组近似计算它们的公式。

二、长波传播实验

此长波传播实验,是用定时接收机接收罗兰-C 远东太平洋台链发射的 100kHz 脉冲编码讯号。发射台在琉璜岛($24^{\circ}48'0.36''N, 141^{\circ}19'30.3''E$),接收在武昌($30^{\circ}32'30.6''N, 114^{\circ}20'26.5''E$),两地大圆距离约 2730.016km。一跳天波的反射位置接近冲绳($26^{\circ}16'9''N, 127^{\circ}48'4.''E$)垂直探测站的上空。仪器 24 小时连续工作,笔尖式纪录。

从几年的实验观测结果来看,相位、幅值的逐日变化,白天的变化比夜间小,冬季月份比夏季月份变化大,分月次之;幅度跟相位比,前者波动较大,后者波动较平缓。这些基本特征,在月均值和测量均方差值的插图上有具体地体现。

1. 幅度、相位的月均值和拟合测量值的计算公式

图 1 是 1981—1983 年共九个月的幅值和相位月均值的日变化曲线。它们的基本特征是一致的。幅值白天比夜间约小 10—12dB;相位白天比夜间约小 18—20 μs 。若以 1 μs

差近似对应反射高度变化以 1km 计, 此即表示白天相对夜间反射高度有 18—20km 之差。

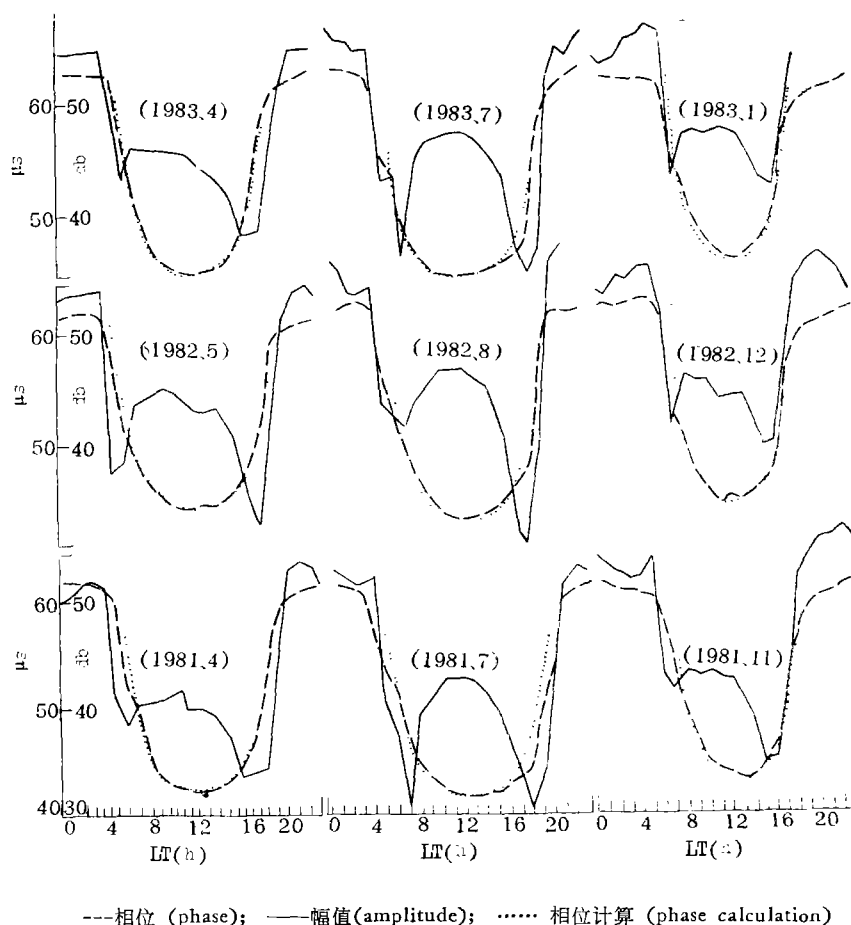


图 1 幅值、相位月均值的日变化曲线

Fig. 1 Variational curve of the amplitude and the phase with the days for monthly average value

正午时的相位微秒数夏季月份最小, 冬季月份最大, 分月次之。但幅度并不都是这样, 这和不同季节日照条件不同且还有冬季异常等有关。幅度和相位在所有月份, 上、下午是不对称的。幅值下午比上午小; 相位微秒数上午比下午大; 过渡区幅度变化所形成的“谷”, 日落比日出时深。这些都说明上、下午在同样日照情况, 下午的电子密度数比上午大。由此求出下列公式能很好地拟合实验曲线。

$$\varphi = \varphi_{T=12} + 5.5 \ln \left[\sec \left(\frac{T - 12}{12 - T_0} \cdot \frac{\pi}{2} \right) \right]. \quad (1)$$

当 $T > 12^{\text{h}30^{\text{m}}}$ 时,

$$\varphi = \varphi_{T=12} + 5.5 \ln \left[\sec \left(\frac{T - 12.5}{12 - T_0} \cdot \frac{\pi}{2} \right) \right]. \quad (2)$$

这里 φ 为天、地波时延差*, T 为北京时, $\varphi_{T=12}$ 是 12 点时的天、地波时延差, 可由公式 $\varphi_{T=12} = 2.5 / [(1 + 0.001R_z) \cdot \cos^{3/2}\chi] + A$ 计算, R_z 是月平均太阳黑子数, χ 是 $T = 12$ 时的太阳天顶角,

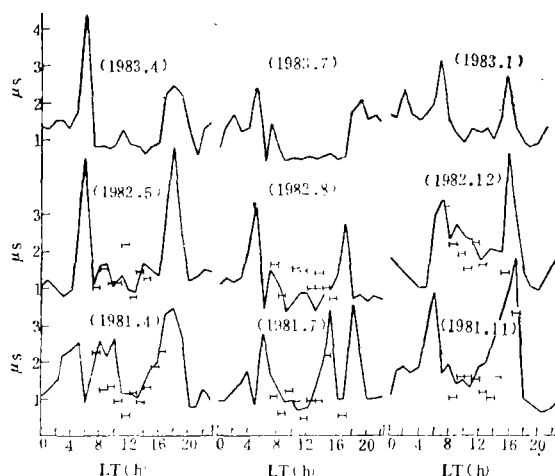
$$T_0 = 12 - \frac{1}{15^\circ} \arccos \{ -\operatorname{tg} L \cdot \operatorname{tg} [-23.5^\circ \cos(\text{月} \times 30 - 7)] \},$$

L 为地理纬度, 1981、1982、1983 年 A 分别取 40, 41, 42.

用 $L = 27.67^\circ$ 进行计算, 其结果在图上用圆点线示出. 它表明与测量值拟合得较好, 下午值比上午值后移半小时. 该公式表明: 相位测量值的日变化跟地理纬度、地方时、月份、太阳天顶角、太阳黑子数等有关. 从图 1 还可看出幅度和相位日出比日落变化快, 日出时幅度的变化先于相位的变化; 日落时反之, 但冬季月份近乎同步变化.

2. 1981—1983 年九个月相位测量的均方差值

图 2 是 1981—1983 年九个月相位测量的均方差值. 它和逐日变化情况一样, 显示出夏季月份小(约 $1\mu\text{s}$), 冬季月份大(约 $2.5\mu\text{s}$), 分月次之的特点. 白天跟黑夜比, 夜间大. 在日出日落过渡区分别形成一个驼峰. 1983 年低于 1982 年和 1981 年, 这是因为该年月份发生太阳耀斑次数少的缘故.



— 为太阳耀斑发生频数的平均值

图 2 相位测量的均方差日变化曲线

Fig. 2 Variational curve of the mean-square error of the phase measurement with the days

它们提高了均方差值并使有的月份日出或日落时出现了双峰, 模糊了日出、日落过渡区只有单峰的正常情况. 从图 2 还可看出: 白天均方差值跟测量幅度值有负相关的关系, 即白天幅度大时, 均方差小, 反之亦然, 夜间这种情况不明显.

* 天、地波时延差的测量详见: 沈力, 韩一敏, “长波, 超长波实验” 武汉物理所集刊, 第 13 卷, 第 3 期, 1984.

三、长波传播计算

长波的相位、幅值与电子密度、电子跟中性气体分子的碰撞频率、地球磁场、波频、波的入射角和方位角等有关。实际计算表明：碰撞频率在白天可用 $\nu = 5.6 \times 10^6 \times \exp[-0.15(Z - 70)]$ 来计算, 其中 Z 是计算的高度。为了能和实验数据比较, 下面以琉璜岛到武昌这一条传播路径进行计算。

1. 反射系数和转换系数随高度的变化

由于电离层因地磁场的存在而成为各向异性的双折射介质, 故电磁波入射后分裂成寻常波和非常波, 并且各种波之间(如寻常波和非常波, 上行波与下行波等)具有强的耦合。其反射性质需用反射系数 $_{//}R_{//}$ ($_{\perp}R_{\perp}$) 和转换系数 $_{//}R_{\perp}$ 、 $_{\perp}R_{//}$ 去描述。

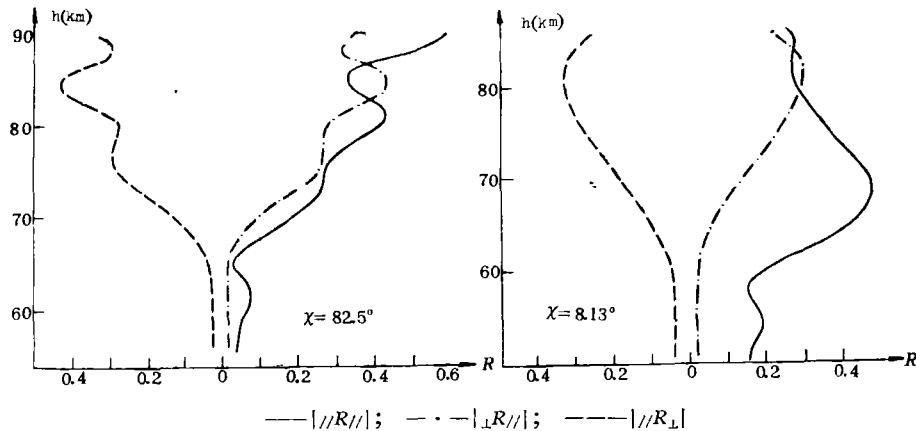


图3 $|_{//}R_{//}|$, $|_{//}R_{\perp}|$, $|_{\perp}R_{//}|$ 随高度变化的曲线

Fig. 3 $|_{//}R_{//}|$, $|_{//}R_{\perp}|$, $|_{\perp}R_{//}|$ variational curve with geometric height

将电离层进行水平分层然后对波方程求全波解, 认为在每一薄层波都有部分反射和透射, 但在 $x = 1$ 和 $x = 1 + y$ 处反射最强。 $x = (f_p/f)^2$; $y = f_N/f$; f_p 是等离子体频率; f 是工作频率; f_N 是磁回旋频率。图3 $\chi = 8.13^\circ$ $|_{//}R_{//}|$ $x = 1$ 的对应高度是 68km, $|_{//}R_{\perp}|$ $x = 1 + y$ 的对应高度是 81.5km; 图3 $\chi = 82.5^\circ$ $|_{//}R_{//}|$ $x = 1$ 的对应高度是 82km, $|_{//}R_{\perp}|$ $x = 1 + y$ 的对应高度是 102km, $|_{//}R_{\perp}|$ 和 $|_{\perp}R_{//}|$ 随高度的变化基本一样。在反射系数最大值的高度往下, 部分反射贡献小而吸收大, $|_{//}R_{//}|$ 经过一个小鼓包后, 达到计算收敛值。小鼓包的出现由文献[2]可知是电离层的底边弱反射同折射指数 $\eta = 0$ 处的反射相干的结果。

图3 还示出在大天顶角时 $|_{//}R_{//}|$ 和 $|_{//}R_{\perp}|$ 都有“波动”, 这种“波动”可能是由积分给定的初始值偏离实际太远引起。因为这时的初始积分高度由于计算机条件限制取在 100km 以下, 不满足 $x \geq 10(1 + y)$ 应对应的高度。

2. 相高、三角形高的理论计算和实测结果

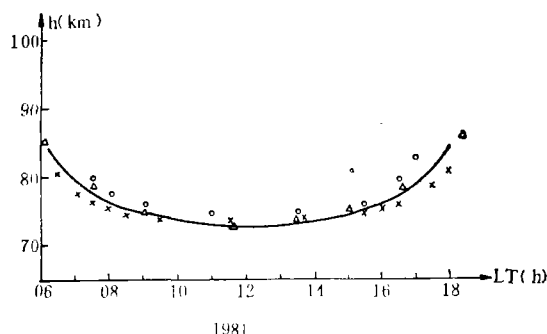
当电子密度随时间和高度变化时, 半径也随着变化, 因而造成反射高度也不同。文献[3]给出的相高计算公式:

$$h_1(\chi) = h_1(0) + H \cdot \ln(\sec \chi). \quad (3)$$

这里 χ 为太阳天顶角, $h_1(0)$ 为 $\chi = 0$ 时的相高. 对 $h_1(0)$ 和 H , 不同作者给的数值不一样, 我们取 $h_1(0) = 73\text{km}$, $H = 7.5\text{km}$ 计算时与全波解的反射系数相位是 180° 的高度比较, 夏季很一致, 其它月份则有较大偏离. 如用公式:

$$h_1(T) = 73 + 5.5 \ln \left[\sec \left(\frac{T - 12}{24} \cdot 2\pi \right) \right], \quad (4)$$

T 为北京时, 来计算, 白天除 6 和 18 点钟外, 其它月份也较一致. 可见(4)更接近全波解的相反射高度.



△△△ June; ××× Sept.; ○○○ Dec.; —公式(3) (Formula (3))

图4 反射相高随时间的变化曲线

Fig. 4 Variational curve of the phase height of reflection with time

测量三角形高的计算公式:

$$h_1 = 70 + \Delta h_1, \quad \Delta h_1 = \Delta \varphi \lambda / 4\pi \cdot \cos I.$$

这里 $\Delta \varphi$ 为测量的天波时延与 70km 作为初值计算的天波时延之差 (μs), λ 为波长, I 为波的人射角.

I 可由公式 $\sin(I + D/2R_e) = (1 + h_1/R_e) \cdot \sin I$ 计算. D 为沿地面的大圆距离, R_e 为地球半径. 先给一个初值 h_1 算出 I 而后把 I 代入上式算出 Δh_1 , 迭代几次就能得到较精确值.

根据正割定律测量的三角形高, 不是 $x = 1$ 对应的高度, 也不是 $x = 1 + y$ 对应的高度, 而是在它们两者之间. 这说明寻常波和非常波虽能各自在电离层中传播, 但在每一薄层的交接面上除有部分反射、透射外, 还受到边界条件的约束, 使两波产生耦合; 只有在大天顶角(电子密度小时)这种关系才逐渐消失. 对我们研究的传播路径, 可求出近似计算它们的公式:

$$h_1 = h_0 + h_x \cdot \cos I \cdot \cos \theta, \quad h_1 = (h_0 + h_x)/2. \quad (5)$$

其中, h_0 为寻常波的反射高度, h_x 为非常波的反射高度, θ 为地磁场向量跟其垂直分量的夹角.

在冬季当 $\chi > 80^\circ$ 时 $h_1 = h_0$; 夏季和分月当 $\chi > 75^\circ$ 时 $h_1 = h_0$. 公式(5)能较好地跟实测值拟合, 只是前者在中午附近更接近实测值; 后者在日出、日落的时候更接近实测值. 这样对于超无线电距传播, 就使我们能够直接用电离层模式求出 $x = 1$ 和 $x =$

$1 + y$ 的对应高度而不去求全波解得到三角形高。这对实际应用是很有意义的。

四、结 语

本文利用文献[1]计算电子密度剖面的公式,对低频波在电离层D区中的传播进行了计算分析,并根据从琉璜岛到武昌这条传播路径的实验和全波解的结果得出了近似计算实测相位的公式(1),(2);近似计算反射相高的公式(4);近似计算三角形高的公式(5)。它们的适用范围只限于中纬度超无电视距传播情况。

图上所标出的理论计算值,由于计算时所取的打印间隔是两公里,存在一定的估值误差;日出、日落过渡区无论是测量还是理论计算误差都比正常情况大,这是因为这时电子密度变化很快,反射面不可避免有倾斜,从而降低了该时刻的天波使用价值。

衷心感谢李凤芹、贾惠娣同志完成该项实验和数据处理工作,长波组其他同志也给予了很多帮助,在此深表谢意。

参 考 文 献

- [1] 王先林和黄泽荣,空间科学学报,第5卷,第199页,1985.
- [2] Budden, K. G., *J. Atmos. Terr. Phys.*, Vol. 24, p. 609, 1962.
- [3] Piggott, W. R., M. L. V. Pitteway and E. V. Thrane, *Phil. Trans. Roy. Soc. London Ser. A*, Vol. 257, p. 243, 1965.

Experiments and Calculations of the 100 kHz Sky-wave

Wang Xian-lin Shen Li Huang Ze-rong

(Wuhan Institute of Physics, Academia Sinica)

Abstract

In this paper, the annual, monthly and day-to-day variations the 100 kHz Loran-C pulse signal are given for both before and afternoon times by analyses of some experimental results and calculations, An approximate formulae for estimating the observational phase, phase height of reflection and the triangulation height is also given.