

# 昼夜过渡区低频一跳天波中不同模式 区分及特性分析

周丽丽<sup>1</sup>, 郑悦<sup>1</sup>, 穆中林<sup>2</sup>, 胡欣悦<sup>1</sup>, 朱新月<sup>1</sup>, 何立风<sup>1</sup>

(1. 陕西科技大学电子信息与人工智能学院, 陕西西安 710021; 2. 空军工程大学航空航天工程学院, 陕西西安 710038)

**摘要:** 昼夜混合路径条件下低频天波传播特性的研究对导航授时系统中应用模式拓展及低电离层参数反演均具有重要的研究意义. 本文以地-电离层中 100 kHz 载频罗兰-C 信号的时域有限差分(Finite Difference Time Domain, FDTD)仿真为前提, 基于传统的过零检测和快速傅里叶变换(Fast Fourier Transform, FFT)/逆快速傅里叶变换(Inverse Fast Fourier Transform, IFFT)频谱相除算法, 对昼夜混合信道(传播路径为东西取向)中地面接收的一跳天波进行模式区分及特性分析. 给出了在白天至夜晚、夜晚至白天两种突变电离层下罗兰-C 一跳天波中不同模式随收发距离的变化规律, 同时给出了模式干涉区域优势场量的分布情况. 结果表明, 对于昼夜混合模型, 一跳天波中存在来自不同高度及昼夜突跳边界反射的多种模式, 基于传统方法检测的幅度相位存在不稳定干涉效应, 模式界定困难, 而基于 FFT/IFFT 频谱相除算法能够将主要模式进行细化区分, 从而获得更高精度、更平稳的模式特性.

**关键词:** 一跳天波; 波跳理论; FDTD; FFT/IFFT; 频谱相除算法; 昼夜模型

**基金项目:** 国家自然科学基金(No.62171265)

**中图分类号:** TN011

**文献标识码:** A

**文章编号:** 0372-2112(2023)07-1964-06

**电子学报 URL:** <http://www.ejournal.org.cn>

**DOI:** 10.12263/DZXB.20220659

## Distinction and Characteristic Analysis of Different Modes of Low-Frequency One-Hop Sky Wave in the Day-Night Transition Area

ZHOU Li-li<sup>1</sup>, ZHENG Yue<sup>1</sup>, MU Zhong-lin<sup>2</sup>, HU Xin-yue<sup>1</sup>, ZHU Xin-yue<sup>1</sup>, HE Li-feng<sup>1</sup>

(1. School of Electronic Information and Artificial Intelligence, Shaanxi University of Science and Technology,

Xi'an, Shaanxi 710021, China;

2. College of Aeronautics and Astronautics Engineering, Air Force Engineering University, Xi'an, Shaanxi 710038, China)

**Abstract:** It is of great significance to study the propagation characteristics of low-frequency sky waves under the condition of day-night mixed paths for the application of navigation and time service systems and the inversion of low ionosphere parameters. Based on the finite difference time domain (FDTD) simulation of Loran-C signal (carrier frequency: 100 kHz) in the day-night mixed Earth-ionosphere waveguide, this paper uses the traditional zero crossing detection and the fast Fourier transform/inverse fast Fourier transform (FFT/IFFT) spectrum division methods to distinguish the different modes of one-hop sky waves received on the ground in the mixed channel (assuming the propagation path is east-west orientation), and analyzes the propagation characteristics of the main modes. The propagation characteristics of different modes in one-hop Loran-C sky waves are given under two mixed ionosphere conditions, i. e. from day to night and from night to day. At the same time, the distribution of the dominant field in the mode interference region is given. The results show that for the diurnal mixed path, there are multiple reflection modes from the ionosphere at different heights and its abrupt boundary. The amplitude and phase detected by the traditional method have unstable interference effect, and it is difficult to distinguish the modes. However, the FFT/IFFT spectral division algorithms can refine and distinguish the main modes, so as to obtain more stable and accurate mode features.

**Key words:** one-hop sky wave; wave-hop theory; FDTD; FFT/IFFT; spectrum division algorithm; day-night mixed model

**Foundation Item(s):** National Natural Science Foundation of China (No.62171265)

## 1 引言

低频导航授时系统是我国综合定位导航授时 (Positioning Navigation Timing, PNT) 体系的重要组成部分, 可实现远程、物理遮蔽区域覆盖<sup>[1]</sup>. 该系统必须在确知由传播路径非真空、时变引起的电波传播相位延迟<sup>[2]</sup>及其不确定性<sup>[3]</sup>的基础上, 对测得的总相位进行修正. 校除该延迟, 才能以恒定的电磁波速进行解算, 实现高精度定位、导航及授时. 为确保接收机接收性能的准确性和稳定性, 目前该类系统采用纯地波模式. 相位幅度检测是基于电波时域过零或峰值特性进行判断的. 实际上, 当收发距离较远时, 天波信号幅度将逐渐大于地波. 此时, 天波信号相位特性及其跟踪方式研究对系统应用范围拓展具有重要意义.

受电离层复杂特性影响, 天波的幅度与相位有明显的昼夜和季节变化<sup>[4,5]</sup>, 易受一些太阳和地球物理事件影响产生异常变化, 低频天波的稳定性很差. 为了研究地—电离层波导对低频电波传播特性的影响, 近年各种时、频域计算电磁学方法被开发用于正演电离层粒子密度、碰撞频率等参数时变、分布不均匀及磁化情况下的电波传播过程, 以阐释低频电波与电离层的相互作用机理<sup>[6,7]</sup>. 昼夜混合路径模型是天波传播理论中的一个典型场景下的模型, 可以表征东西取向传播路径上昼夜过渡区域电离层参数的变化. 在昼夜混合路径模型中, 电离层反射高度发生跳变. 与均匀电离层相比, 地—电离层波导系统中将激发更多的模式及多径形式<sup>[8]</sup>, 尤其是在高空接收的情况下, 提前到达的优势模式发生变化, 来自地面、电离层的多径耦合效应亦更加复杂. 由于各种模式相互干涉, 用时域过零 (峰值) 特性进行相位 (幅度) 判断将存在较大不稳定性.

针对昼夜过渡区域低频天波信号存在相位与幅度起伏、不同模式难以界定的问题, 本文以给定昼夜混合路径模型的 FDTD 时域仿真为前提 (并非一般信号假设叠加方式), 分别采用传统过零检测和 FFT/IFFT 频谱相除算法<sup>[9,10]</sup>对昼夜过渡区域罗兰-C<sup>[11]</sup> (载波频率 100 kHz) 一跳天波中的主要模式进行区分界定, 分析不同模式作用主区及幅度相位特点.

## 2 模型算法

### 2.1 波跳理论及昼夜信道模型

对于低频信号, 发射天线可以理想化为地面的垂直电偶极子, 依据波跳理论<sup>[12]</sup>, 此时地面接收的电场垂直分量可表示为<sup>[13,14]</sup>

$$E_z = \sum_{n=0}^{\infty} E_n \quad (1)$$

$$E_0 = 3\sqrt{10} \sqrt{P_t} W e^{-jk_0 d} / d \quad (2)$$

$$E_1 = 6\sqrt{10} \sqrt{P_t} (\cos \varphi)^2 R_s D F_t F_r e^{-jk_0 L_1} / L_1 \quad (3)$$

其中,  $E_0$  表示沿地面传播的地波,  $P_t$  是发射功率,  $W$  是地波衰减因子,  $d$  是收发点大圆距离;  $E_1$  表示一跳天波,  $L_1$  是一跳天波射线总长度,  $\varphi$  是一跳天波在地面上的出射角和到达角,  $R_s$  表示一跳天波的电离层反射系数,  $D$  是由于电离层球面弯曲引起的会聚系数,  $F_t$  和  $F_r$  分别表示由于地面的曲率和有限电导率引起的发射点和接收点天线的背景因子. 对于各向同性电离层, 二跳天波表示为

$$E_2 = \left( 6\sqrt{10} \sqrt{P_t} (\cos \varphi_2)^2 e^{-jk_0 L_2} \right) / L_2 \quad (4)$$

$$\times R_{s1} R_{s2} D^2 D_g R_g F_t F_r$$

其中,  $L_2$  是二跳天波射线总长度,  $\varphi_2$  是二跳天波在地面上的出射角和到达角,  $R_{s1}$  和  $R_{s2}$  表示一跳天波和二跳天波的电离层反射系数,  $D_g$  是发散系数,  $R_g$  是地球的有效反射系数. 由于三跳  $E_3$  及其以上的天波场要小得多, 这里省略了三跳及多跳天波公式. 上述公式的单位采用国际单位制.

对于均匀电离层, 当收发位置均在地面时, 一跳天波的传播分量可表示为从地面发射, 经特定高度电离层反射的单一信号, 如图 1(a) 所示. 而在昼夜混合模型下, 存在沿电离层突跳面绕射现象, 过渡区域的电波传播模式将会增加, 一跳天波分量则表现为从电离层不同区域 (白天/夜晚、突跳边界) 反射信号的组合, 如图 1(b) 和 (c) 所示. 在图 1(b) 和 (c) 中, 根据天波不同传播路径特点, 将相应的地面接收区域分为 A 区、B 区及 C 区. A 区和 B 区是指不考虑边界突跳影响时, 所在范围一跳天波场仅来自白天或者夜晚电离层反射的地面区域, 而 C 区则是指在边界突跳影响下, A 和 B 指代区域中多模耦合现象较为明显的地面区域.

参考地波系统中“二次时延”<sup>[15]</sup>的定义方法, 此处将由天波传播路径非真空引起的附加延迟, 称为天波二次时延. 将 A 区和 B 区的二次时延分别定义为

$$t_{\omega} = t - L_1 / n_s c \quad (5)$$

$$t_{\omega} = t - L'_1 / n_s c \quad (6)$$

其中,  $t$  为总传播时延;  $L_1$  和  $L'_1$  分别为不考虑突跳边界影响时, A 和 B 区中来自其相应高度电离层反射的一跳天波的传播路径总长;  $L_1 / n_s c$  和  $L'_1 / n_s c$  分别指的是电磁信号以空气中固定波速传播, 传播路径总长为  $L_1$  和  $L'_1$  时所需要的时间延迟;  $n_s$  是大气折射指数 (下文  $n_s = 1$ ).

### 2.2 一跳天波场二次时延及幅度检测

通过对 FDTD 计算区域媒质的不同设置, 可以分别模拟垂直电偶极子在地、电离层共同作用下辐射的罗兰-C“总场”信号以及只有地面作用的“纯地波场”信号, 并将两者的结果相减, 理论上即可获得纯天波场.

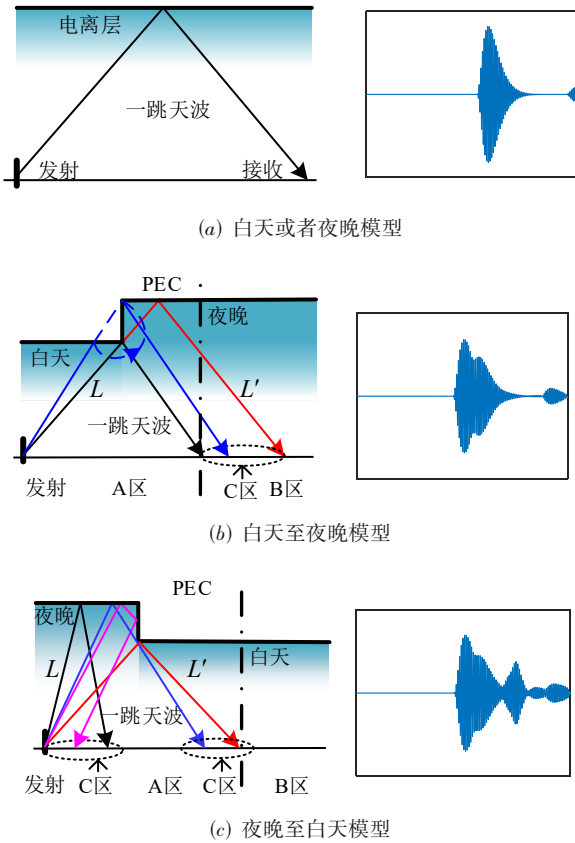


图1 一跳天波模式变化区域示意

下面分别采用两种方法对其中一跳天波的二次时延及幅度进行提取.

### 2.2.1 过零检测法

传统测量系统中对罗兰-C地波场的相位跟踪是通过辨识第三载波周期正向过零时刻实现的,同时检测该周期的负峰值,以此作为地波场幅度.与式(5)和(6)相对应,A区和B区的罗兰-C一跳天波场二次时延的获取公式可分别定义为

$$t_w = T_0 - L_1/n_s c - \Delta t + \tau_0 \quad (7)$$

$$t_w = T_0 - L'_1/n_s c - \Delta t + \tau_0 \quad (8)$$

其中, $T_0$ 是一跳天波信号第三载波周期正向过零点时刻(与当前接收机时延测量时刻一致); $\Delta t = 30 \mu\text{s}$ ,为信号波形起始时刻与提取时刻的差值; $\tau_0 \approx 2.5 \mu\text{s}$ ,是偶极子电流与辐射电场信号的初相差.实际上,式(7)和式(8)仅适用于理想状态下只存在单一位置电离层反射时,一跳天波场二次时延的获取.在昼夜模型中,由于模式出现混叠,且每个模式对应的 $T_0$ 时刻并不相同,在上述C区时域信号中很难判断主模,并解析其相应的 $T_0$ 时刻位置.因此,本文在A区域中,以 $L_1/n_s c + \Delta t - \tau_0$ 时刻为参考,提取其后续天波信号中第三个正向过零时刻及周期内负峰值作为该区域一跳天波场的 $T_0$ 时刻

及幅度.对于B区域,一跳天波场的 $T_0$ 时刻及幅度提取时采用的参考时刻为 $L'_1/n_s c + \Delta t - \tau_0$ .

### 2.2.2 FFT/IFFT 频谱相除算法

假设天波信号各分量、模式包络形状完全相同,具有不同的幅值和不同的延迟时间,由FDTD仿真得到的天波场信号在时域上可近似表示为

$$x_c(t) = \sum_{n=1}^N k_n x_0(t - \tau_n) + n_0(t) \quad (9)$$

其中, $x_0(t)$ 为归一化标准场信号; $n_0(t)$ 为数值色散、边界反射等引入的误差(可视为非高斯特性的弱噪声,该噪声随着剖分尺度的减小而减小);天波各模式分量的幅值和延时分别对应 $k_n$ 和 $\tau_n$ .该天波场信号在频域上表示形式为

$$X_c(f) = X_0(f) \sum_{n=1}^N k_n e^{j2\pi f \tau_n} + N_0(f) \quad (10)$$

其中, $X_c(f)$ , $X_0(f)$ , $N_0(f)$ 分别为 $x_c(t)$ , $x_0(t)$ , $n_0(t)$ 的傅里叶变换.将式(10)得到的耦合信号的频谱除以罗兰C标准场的频谱可以得到

$$\frac{X_c(f)}{X_0(f)} = \sum_{n=1}^N k_n e^{j2\pi f \tau_n} + \frac{N_0(f)}{X_0(f)} \quad (11)$$

再对式(11)进行IFFT可得

$$F^{-1}\left[\frac{X_c(f)}{X_0(f)}\right] = \sum_{n=1}^N k_n \delta(t - \tau_n) + F^{-1}\left[\frac{N_0(f)}{X_0(f)}\right] \quad (12)$$

其中, $\tau_n$ 为第 $n$ 个天波模式分量到达时间.由于文中电离层高度已知,可以依据对不同模式信号到达时刻的先验估计,进而区分混叠信号中的一跳、二跳,或者同一波跳中的不同模式成分到达时刻,再根据观测点的FDTD信号、标准波形函数构建超定矩阵,通过最小二乘方法求解矩阵系数,即可得到不同模式的幅度.

C区一跳天波场传播模式比较复杂,文中只对其中最先到达的两种模式进行研究区分,并对模式一的二次时延采用式(5)来定义,模式二的二次时延则采用式(6)来定义.

## 3 计算结果

该部分首先采用FDTD方法模拟了白天至夜晚、夜晚至白天电离层突跳模型下地面接收到的天波场,然后基于过零检测对A区和B区一跳天波二次时延及幅度进行提取,同时又基于FFT/IFFT频谱相除算法对A区和B区一跳天波中的前两个模式进行区分,获得前两种模式的二次时延,继而采用最小二乘法获得其相应幅度.设收发点大圆距离总长为200 km.辐射源功率为1 kW.在离地30 km高处开始设置电离层,白天和夜晚均采用指数渐变模型,电子密度 $N$ 和碰撞频率 $\nu$ 设置满足<sup>[13]</sup>

$$N = 1.43 \times 10^{13} e^{-0.15h'} e^{(\beta - 0.15)(h - h')} \quad (13)$$

$$\nu = 1.816 \times 10^{11} e^{-0.15h} \quad (14)$$

其中,  $h$  是离地高度, 单位为 km. 白天模型中  $\beta = 0.3, h' = 72$  km; 夜晚模型中  $\beta = 0.5, h' = 87$  km. 电离层顶部及突跳分界面均设置为 PEC 边界, 其中白天和夜晚电离层顶部离地高度分别设置为 70 km 和 86 km. 地表面为均匀光滑平面, 电导率为  $\sigma = 3 \times 10^{-3}$  s/m, 相对介电常数为  $\epsilon_r = 13$ .

### 3.1 白天至夜晚路径模型

下面首先对白天至夜晚突跳电离层模型下的电波传播特性进行研究. 该例中, 传播路径 0~50 km 范围上空电离层取白天参数, 传播路径 50~200 km 范围上空的电离层取夜晚参数.

图 2 给出的是距辐射偶极子源 100 km 处地面接收信号与标准信号谱相除后(采用式(12))归一化的结果. 可以清晰地看到, 600  $\mu$ s 附近有两个比较大的来波信号, 根据传播时延初步判断, 它们均属于经电离层一次反射的天波信号.

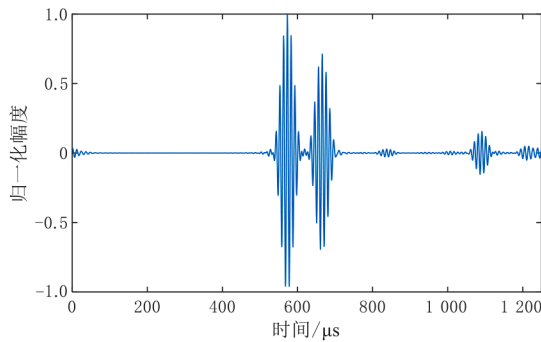


图 2 白天至夜晚路径模型下, 传播路径 100 km 处  $F^{-1}[X_c(f)/X_0(f)]$  归一化处理结果

图 3 分别给出了采用过零检测和 FFT/IFFT 频谱相除法得到的一跳天波二次时延. 当采用过零检测法时, A 区和 B 区域的时延计算分别根据式(7)和式(8)得到; 而当采用 FFT/IFFT 频谱相除法时, 对一跳天波信号前两个模式来波时刻进行了区分. 图 4 则分别给出了采用峰值检测和最小二乘法得到的一跳天波幅度. 图 3 和图 4 只在模式耦合比较明显的 C 区, 即收发距离大于 73 km 的范围进行了模式区分. 而收发距离小于 73 km 时, 认为一跳天波仍是单一模态. 在实际应用中, 可以通过比较两种主模幅度比来限定过渡区域范围.

从图 3 可以看出, 在 A 区 ( $d \in [0, 100]$  km), 采用过零检测法获取的二次时延与采用 FFT/IFFT 频谱相除法获取的模式一的二次时延一致. 在 B 区 ( $d \in [100, 200]$  km), 采用传统方法所得的时延与采用频谱相除法模式二得到的时延趋势一致, 但是前者存在干涉起伏效应, 此效应随着距离的增大逐渐减弱,

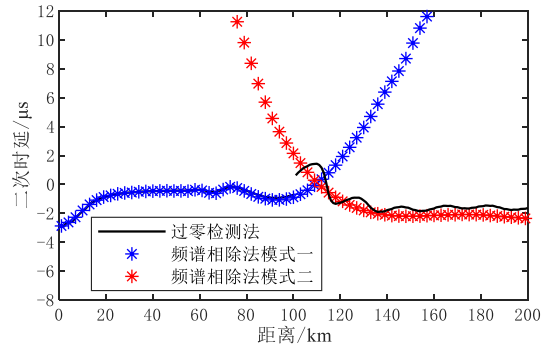


图 3 白天至夜晚突跳电离层路径模型的一跳天波二次时延

而后者平稳性更好. C 区主要位于传播路径 100 km 附近及之后的范围. 根据图 3 频谱相除算法所得两种模式的来波时刻, 波幅解算结果如图 4 所示. 从图 4 可以看出, B 区幅度也出现干涉, 在 100 km 附近, 由于两种模式波幅相当, 此区域耦合效应最强. 此外, 在远离突跳边界区域时, 基于 FFT/IFFT 频谱相除算法的模式区分性能会减弱, 幅度解算出现不稳定现象, 这主要是由于两种模式幅度相差较大或不同模式来波时刻相距较短, 此时, 一跳天波场可以近似为单一模态形式.

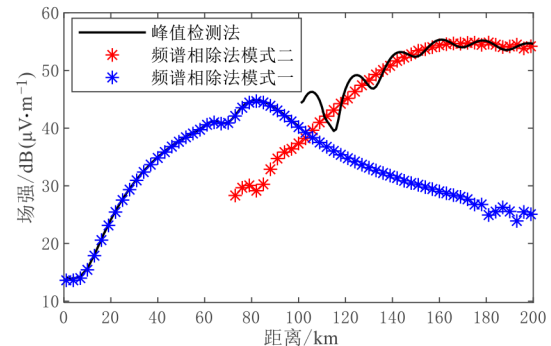


图 4 白天至夜晚突跳电离层路径模型的一跳天波幅度

### 3.2 夜晚至白天路径模型

该部分对夜晚至白天突跳电离层模型下电波传播特性进行研究. 传播路径 0~50 km 对应的电离层采用夜晚参数, 50~200 km 对应的电离层采用白天参数.

图 5 给出了距辐射偶极子源 100 km 处地面接收信号与标准信号谱相除后归一化的结果. 可以看到 600  $\mu$ s 附近出现两个波峰. 除了通过传播时延进行先验预估来判定模式“跳数”, 也可以用全白天和全夜晚模型下的信号结果作为参考, 辅助判定来波属性.

图 6 分别给出了采用过零检测和 FFT/IFFT 频谱相除法得到的一跳天波二次时延. 同样, 采用 FFT/IFFT 频谱相除法对一跳天波信号前两个模式来波时刻进行了区分. 在此基础上, 图 7 则分别给出了采用峰值检测和最小二乘法得到的一跳天波幅度.

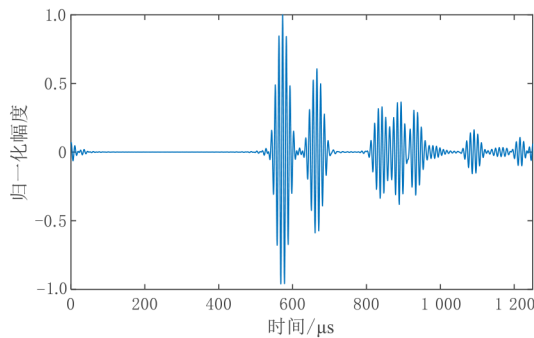


图5 夜晚至白天路径模型下,传播路径 100 km 处  $F^{-1}[X_c(f)/X_0(f)]$  归一化处理结果

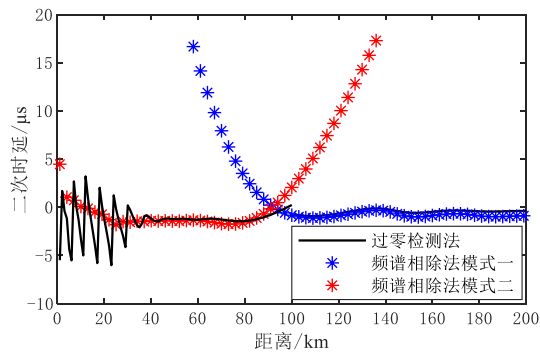


图6 夜晚至白天突跳电离层路径模型的一跳天波二次时延

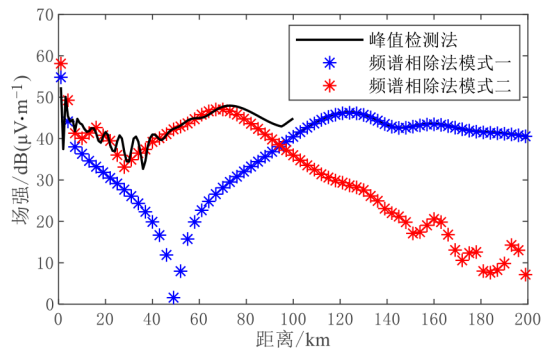


图7 夜晚至白天突跳电离层路径模型的一跳天波幅度

从图6和图7可以看出,在B区( $d \in [100, 200]$  km),基于过零检测法得到二次时延和幅度与基于FFT/IFFT频谱相除得到的模式一的时延和幅度基本吻合,而在A区( $d \in [0, 100]$  km),基于传统检测法得到二次时延和幅度与基于FFT/IFFT频谱相除得到的模式二的时延和幅度总体趋势一致.对比图3、图4、图6、图7可以发现,由于夜晚至白天传播路径上来自突跳边界的反射较强,除了传播路径 100 km 附近,在A区中0~40 km 路径范围,也出现了较强的模式耦合,此耦合主要由电离层突跳边界引起,耦合位置范围与白天、夜晚电离层的高度落差、FDTD 二维模型的轴向近似相关(经研究当昼夜突跳边界远离发射源时,该效应会逐渐减弱).此时,

C 区主要位于传播路径 100 km 附近及之前的范围.在传播路径距离大于 127 km 区域,可将一跳天波近似为单一模态.

文中模型结果可以理解为东西取向传播路径上、某一时刻得到的整个路径上一跳天波波特性分布,通过对不同时刻(昼夜边界发生迁移,电离层参数随太阳天顶角变化)的仿真,则可以进一步得到更加完备的沿整个昼夜混合传播路径的天波动态时空特性分布.

### 4 结论

在关于低频天波受电离层影响的昼夜传播效应研究中,目前大量的实测研究集中于对固定位置测量数据时变特性的统计处理<sup>[16]</sup>,极少对整个传播路径上的昼夜过渡区域不同模式电波干涉特性进行分析;而理论预测或是电磁场数值仿真中又多关注的是整个传播路径耦合总场形式、幅度,以及相位存在的高频次、大范围的抖动<sup>[3,4]</sup>.本文基于过零检测和FFT/IFFT频谱相除算法研究了低频一跳天波在东西向昼夜突跳电离层模型下的模式区分及其特性,在一定程度上突破了昼夜过渡区域存在幅度与相位起伏、不同模式难以界定的问题,给出了昼夜过渡区域不同模式的界定及优势场量范围,解耦后的主模特性更加单调平稳,有利于接收机对天波信号进行处理.实际上,即使在文中传统方法表现良好的区域,也会因为电离层反射高度无法确知,进而出现检测所得的干涉区域增大的现象.此外,由于实际电离层反射复杂,一跳天波传播总时延中一次、二次时延的界定要比地波困难得多.本文对昼夜路径模型在实测过程中的天波相位跟踪及解算具有一定的借鉴意义,也可以进一步促进昼夜过渡区域低电离层剖面参数反演<sup>[17]</sup>.

### 参考文献

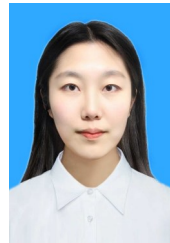
- [1] 甄卫民,丁长春.陆基远程和超远程无线电导航系统发展现状与趋势[J].全球定位系统,2019,44(1):10-15.  
ZHEN W M, DING C C. Development status and trend of land-based radio navigation system[J]. GNSS World of China, 2019, 44(1): 10-15. (in Chinese)
- [2] SON P W, RHEE J H, HWANG J, et al. Universal kriging for Loran ASF map generation[J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 2019, 55(4): 1828-1842.
- [3] PU Y R, YANG H J, WANG L L, et al. Analysis and modeling of temporal variation properties for LF ground-wave propagation delay[J]. IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, 2019, 18(4): 641-645.
- [4] GU T T, XU H L, LI K. Mode interferences of VLF waves

- in an anisotropic waveguide due to sunrise and sunset[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2018, 66(12): 7255-7264.
- [5] WANG J C H. Seasonal variation of LF/MF sky-wave field strengths[J]. IEEE Transactions on Broadcasting, 2008, 54(3): 437-440.
- [6] NIKNAM K, SIMPSON J J. A review of grid-based, time-domain modeling of electromagnetic wave propagation involving the ionosphere[J]. IEEE Journal on Multiscale and Multiphysics Computational Techniques, 2021, 6: 214-228.
- [7] BÉRENGER J P. FDTD propagation of VLF-LF waves in the presence of ions in the earth-ionosphere waveguide[J]. Annals of Telecommunications, 2020, 75(7): 437-446.
- [8] 赵珍珠, 刘江凡, 蒲玉蓉, 等. 基于 IRI 电离层模型的低频天波信号特性分析[J]. 电波科学学报, 2022, 37(5): 898-904. ZHAO Z Z, LIU J F, PU Y R, et al. Analysis of low frequency sky wave signal characteristics based on IRI ionospheric model[J]. Chinese Journal of Radio Science, 2022, 37(5): 898-904. (in Chinese)
- [9] MOHAMMED A, LAST D. IFFT technique for skywave detection in Loran-C receivers[J]. Electronics Letters, 2001, 37(6): 398-400.
- [10] MOHAMMED A F. Effect of Loran-C signal parameters on skywave delay estimation of IFFT technique[J]. Electronics Letters, 2003, 39(14): 1091-1093.
- [11] WANG D D, XI X L, PU Y R, et al. Parabolic equation method for Loran-C ASF prediction over irregular terrain [J]. IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, 2016, 15: 734-737.
- [12] CUMMER S A. Modeling electromagnetic propagation in the Earth-ionosphere waveguide[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2000, 48(9): 1420-1429.
- [13] THÈVENOT M, BÉRENGER J P, MONEDIÈRE T, et al. A FDTD scheme for the computation of VLF-LF propagation in the anisotropic earth-ionosphere waveguide[J]. Annales Des Télécommunications, 1999, 54(5/6): 297-310.
- [14] WAKAI N, KURIHARA N, OTSUKA A. Numerical method for calculating LF sky-wave, ground-wave and their resultant wave field strengths[J]. Electronics Letters, 2004, 40(5): 288-290.
- [15] 潘威炎. 长波超长波极长波传播[M]. 成都: 电子科技大学出版社, 2004. PAN W Y. LF VLF ELF Wave Propagation[M]. Chengdu: Chengdu University of Electronic Science and Technology Press, 2004. (in Chinese)
- [16] MAEKAWA S, HAYAKAWA M. A statistical study on the dependence of characteristics of VLF/LF terminator times on the propagation direction[J]. IEEE Transactions on Fundamentals and Materials, 2006, 126(4): 220-226.
- [17] 鲁转侠, 柳文, 蔚娜, 等. 基于数据预处理的电离层剖面反演方法[J]. 电子学报, 2018, 46(3): 575-581. LU Z X, LIU W, WEI N, et al. Inversion method of ionospheric profile based on data preprocessing[J]. Acta Electronica Sinica, 2018, 46(3): 575-581. (in Chinese)

### 作者简介



周丽丽 女, 1981 年生, 江苏连云港人. 陕西科技大学电子信息与人工智能学院副教授、博士生导师. 主要研究方向为电磁理论及电磁场数值计算、无线接收与抗干扰技术、图像处理技术.  
E-mail: zhoulili@sust.edu.cn



郑悦 女, 1999 年生, 吉林洮南人. 陕西科技大学电子信息与人工智能学院硕士研究生. 主要研究方向为电磁理论及电磁场数值计算.  
E-mail: 3128578831@qq.com