

文章编号: 2095-4980(2025)06-0615-06

短波电离层多径与极化匹配关系

吕明杰, 周 晨, 乔 玮, 赵正予

(武汉大学 电子信息学院, 湖北 武汉 430072)

摘 要: 针对短波侦测定位的现状及发展需求, 开展电离层波传播多径与极化信息处理的研究工作。对短波电离层多径传播时延与极化匹配仿真数据进行研究, 定量分析电磁波信号被接收天线接收到时的极化状态、电磁波信号发射时的极化状态以及电磁波在电离层中传播时的极化状态变化这三者之间的关系, 构建短波电离层多极化传播模型, 完成短波电离层多径传播时延与极化匹配关系研究。仿真结果表明, 对于短波信号, 当其穿出电离层后, 其极化率只与传播方向和地磁场的夹角有关。

关键词: 电离层; 短波多径; 极化传播; 射线追踪; 短波侦测

中图分类号: TN914.42

文献标志码: A

DOI: 10.11805/TKYDA2023398

Relationship between the HF multipath and polarization matching

LYU Mingjie, ZHOU Chen, QIAO Wei, ZHAO Zhengyu

(School of Electronic Information, Wuhan University, Wuhan Hubei 430072, China)

Abstract: In response to the current state and developmental requirements of HF(High Frequency) reconnaissance and localization, research work on the processing of ionospheric wave propagation multipath and polarization information has been conducted. This research investigates the simulation data of shortwave ionospheric multipath propagation delay and polarization matching, and quantitatively analyzes the relationship among the polarization state of the electromagnetic wave signal when it is received by the antenna, the polarization state when the electromagnetic wave signal is emitted, and the changes in the polarization state of the electromagnetic wave during its propagation in the ionosphere. A shortwave ionospheric multipolarization propagation model is constructed, and the research on the relationship between shortwave ionospheric multipath propagation delay and polarization matching is completed. The simulation results indicate that for shortwave signals, their polarization rate after passing through the ionosphere is only related to the angle between the propagation direction and the geomagnetic field.

Keywords: ionosphere; HF(High Frequency) multipath propagation; polarization; ray-tracing; HF reconnaissance

短波作为获取远距离目标情报的重要频段之一, 在电子信息对抗中一直发挥着重要作用。在短波波段工作的众多短波系统都具有传播距离远、传播范围广、链路稳定性高等优点。这些优点主要源于短波系统工作时, 高频电波利用电离层^[1]作为传输媒质实现远距离传播。

由于地磁场的作用, 任何通过磁化等离子体传播的电磁波都会分解为两种传播模式: 寻常波模式(O波模式)和非寻常波模式(X波模式)。由于O波和X波在电离层中的偏振因子不一样, 导致每个模式电磁波的偏振椭圆的极化角发生变化, O波和X波在穿出电离层时的合成波的极化方式与射线发射时的极化方式完全不同。磁离子理论的偏振方程^[2-3]给出了射线的电场和射线传播环境参数之间的关系, 利用该偏振方程, 结合射线追踪建立模型

收稿日期: 2023-11-30; 修回日期: 2023-12-28

引用格式: 吕明杰, 周晨, 乔玮, 等. 短波电离层多径与极化匹配关系[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2025, 23(6): 615–620. DOI:10.11805/TKYDA2023398.

Citation format: LYU Mingjie, ZHOU Chen, QIAO Wei, et al. Relationship between the HF multipath and polarization matching[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2025, 23(6): 615–620. DOI:10.11805/TKYDA2023398.

(以下称矢量射线追踪), 模拟以不同极化方式发射的电磁波从发射端射入电离层、在电离层中传播、穿出电离层时的电磁波极化状态变化。

本文基于真实电离层时空变化特点构建短波电离层多极化传播模型, 通过对短波电离层多径传播与极化匹配关系数据研究, 定量分析电磁波信号发射时的极化状态、电磁波信号被接收天线接收到时的极化状态以及电磁波在电离层中传播时的极化状态变化三者之间的关系, 研究短波电离层传播的极化状态与传播模式、传播时延、电离层背景、地磁场等因素的匹配关系。

1 矢量射线追踪算法介绍

1.1 数值型三维射线追踪

数值射线追踪是通过求解微分方程组的形式获取射线的传播过程。根据 Haselgrove 给出的球坐标系下的三维哈密顿方程^[4], Jones 将时间因子考虑进去, 形成了关于空间和时间的四维哈密顿射线方程^[5], 使数值射线追踪方法具有较高的完备性。在电离层信息已知且给定射线频率、地点、仰角和方位角时, 射线方程便能求解射线传播路径上不同点处的坐标矢量和波矢量^[6]。考虑到工程实用性, Jones 将方程变换成以群路径 P 为自变量的射线方程形式^[7]:

$$\begin{cases} \frac{dr}{dP} = -\frac{1}{c} \times \frac{\partial H}{\partial k_r} / \frac{\partial H}{\partial \omega} \\ \frac{d\theta}{dP} = -\frac{1}{rc} \times \frac{\partial H}{\partial k_\theta} / \frac{\partial H}{\partial \omega} \\ \frac{d\varphi}{dP} = -\frac{1}{rc \sin \theta} \times \frac{\partial H}{\partial k_\varphi} / \frac{\partial H}{\partial \omega} \\ \frac{dk_r}{dP} = -\frac{1}{c} \times \frac{\partial H}{\partial r} / \frac{\partial H}{\partial \omega} + k_\theta \frac{d\theta}{dP} + k_\varphi \frac{d\varphi}{dP} \\ \frac{dk_\theta}{dP} = \frac{1}{r} \left(\frac{1}{c} \times \frac{\partial H}{\partial \theta} / \frac{\partial H}{\partial \omega} - k_\varphi \frac{dr}{dP} + k_\varphi r \cos \theta \frac{d\varphi}{dP} \right) \\ \frac{dk_\varphi}{dP} = \frac{1}{r \sin \theta} \left(\frac{1}{c} \times \frac{\partial H}{\partial \varphi} / \frac{\partial H}{\partial \omega} - k_\theta \sin \theta \frac{dr}{dP} - k_\theta r \cos \theta \frac{d\theta}{dP} \right) \\ \frac{d(\Delta f)}{dP} = \frac{1}{2\pi} \times \frac{d\Delta\omega}{dP} = -\frac{1}{2\pi} \times \frac{\partial H}{\partial t} / \frac{\partial H}{\partial \omega} \end{cases} \quad (1)$$

式中: (r, θ, φ) 为射线的球坐标; k_r 、 k_θ 、 k_φ 分别为波矢在球坐标下的分量; ω 为电波角频率; c 为电波在真空中的传播速度, 即光速; Δf 为由于电离层时变特性引起的电波频率漂移; θ 为电磁波波矢量与地磁场方向的夹角; H 为哈密顿算符^[8]:

$$H = \text{real} \left\{ \frac{1}{2} \left[\frac{c^2}{\omega^2} (k_r^2 + k_\theta^2 + k_\varphi^2) - n^2 \right] \right\} \quad (2)$$

式中 $\text{real}\{A\}$ 表示取复数 A 的实部, n 为折射率^[9]:

$$n = 1 - \frac{X(1-X)}{1-X - \frac{1}{2}Y^2 \sin^2 \theta \pm \left[\frac{1}{4}Y^4 \sin^4 \theta + Y^2 \cos^2 \theta (1-X)^2 \right]^{1/2}} \quad (3)$$

式中: 分母中“ $\pm$ ”的“+”和“-”分别代表 O 波模式(寻常波模式)和 X 波模式(非寻常波模式); X 、 Y 、 Z 是著名的 Appleton 参数, 分别为:

$$X = \frac{Ne^2}{m\omega^2 \epsilon_0} = \frac{\omega_N^2}{\omega^2} \quad (4)$$

$$Y = |\mathbf{Y}| = \frac{e\mathbf{B}}{m\omega} = \frac{\omega_B}{\omega} \quad (5)$$

$$Z = \frac{v}{\omega} \quad (6)$$

式中: $\mathbf{B}$ 为地磁场磁感应强度矢量; e 、 m 分别为电子电量和质量; ω_B 为电子磁旋频率; ν 为电子与其他粒子的碰撞频率; ω_N 为等离子体频率; ω 为电波频率。

1.2 短波电离层极化传播模型

基于磁离子理论的偏振方程, 可得到在电离层中传播的两种特征波的极化率方程:

$$\rho = \frac{-jY_T^2}{2Y_L(1-X-jZ)} \pm j \left\{ 1 + \frac{Y_T^4}{4Y_L^2(1-X-jZ)^2} \right\}^{1/2} \quad (7)$$

式中: $Y_L = Y \cos \theta$, $Y_T = Y \sin \theta$ 分别为 Y 矢量平行和垂直于波矢量 $\mathbf{k}$ 的分量。

此外 Z 方向的极化可表示为:

$$\rho_z = \frac{E_z}{E_x} = -\cot \theta (\rho^2 + 1)(n^2 + 1) \quad (8)$$

式(4)中的正负号说明, 对于给定频率、给定传播方向的电磁波, 等离子体中有2个独立的波模能够传播, 它们对应不同的偏正状态。值得注意的是, 显然有: $\rho_+ \cdot \rho_- = 1$ 。此式表明, 考虑外磁场的影响后, 电离层变为各向异性的双折射介质。对某一给定频率的电波, 出现2个不同的折射率。即一线偏振波进入电离层后, 分裂为2个特征波, 它们各自以不同的相速度独立传播, 并在不同高度反射回来。在不考虑碰撞的前提下, 对于传播方向平行于外磁场的纵传播, 2个特征波的场是位于垂直传播方向的平面内旋转方向相反的2个圆偏振波; 对于传播方向垂直于外磁场的横传播, 2个特征波中1个为线偏振的寻常波, 另1个则为椭圆偏振的非寻常波, 这个波不是横电磁波(Transverse Electromagnetic Wave, TEW)。实际应用中, 除接近磁赤道区域外, 垂直向电离层发射的电波都可按照准纵近似进行处理。

2 短波电离层多径与极化传播仿真

2.1 短波射线进入电离层时的极化分解

由于三维射线追踪可以给出短波射线在空间中传播时的传播路径, 因此可结合三维射线追踪和磁离子理论, 给出短波射线在传输中每一点的极化状态。

利用式(4)仿真当短波射线以不同的极化状态射入电离层时的极化分解。参数设置为: 发射方位角: 正南; 射线发射地点: 武汉; 射线发射点经纬度: (30.40 N, 114.30 E); 发射频率: 7 MHz; 射线发射仰角: 45°; 射线发射时的极化方式: 左旋圆极化、右旋圆极化、垂直线极化、水平线极化。仿真结果如图1所示, 图1中(a)图显示了电离层背景和电波穿入电离层的点, (b)、(c)、(d)和(e)图依次为垂直线极化、水平线极化、右旋圆极化、左旋圆极化的短波射线射入电离层时的极化分解。

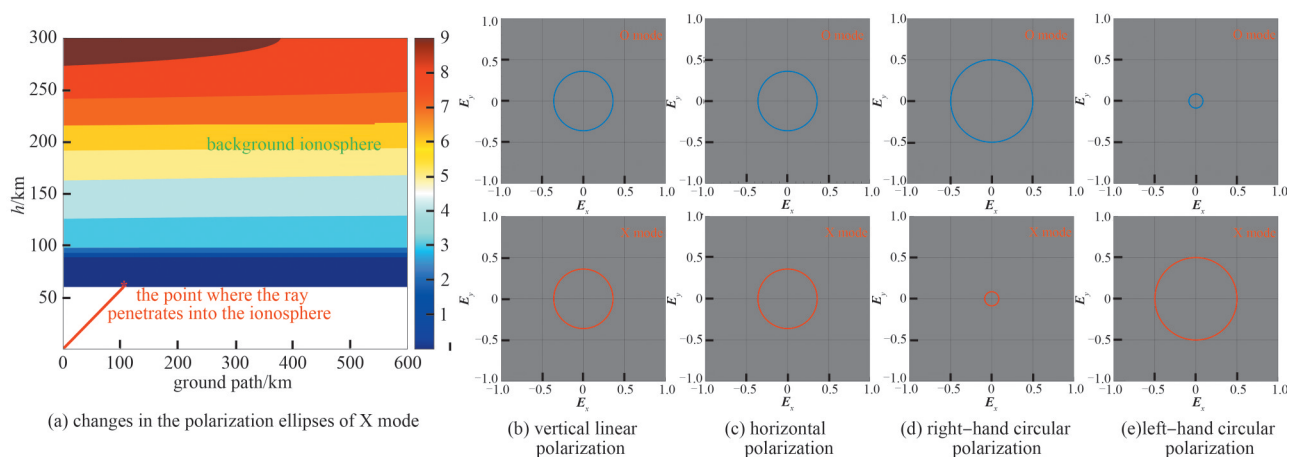


Fig.1 Polarization decomposition of shortwave rays entering the ionosphere

图1 短波射线射入电离层时的极化分解

由图1的仿真结果可以看出: 射线进入电离层后, 任何通过磁化等离子体传播的电磁波都会分解为两种传播模式, 即O波模式和X波模式。其中O波是一个右旋椭圆极化的偏振波, X波是一个左旋圆极化的偏振波; 单位

强度左旋圆极化波进入电离层时分解为 1 个幅值(能量)大的 X 波和 1 个幅值较小的 O 波；单位强度右旋圆极化波进入电离层时分解为 1 个幅值(能量)大的 O 波和 1 个幅值较小的 X 波；而单位强度垂直线极化波和水平线极化波进入电离层时分解为 2 个等幅的 O 波和 X 波。

2.2 短波射线在电离层中的极化传播

短波射线到达电离层可能发生 3 种情况：被电离层完全吸收、折射回地球或穿过电离层进入外层空间，这些情况的发生与频率密切相关。当射线折射回地球时，由于电离层介质呈多层结构，传播路径为射线经不同层的路径组合，构成了多模式传播^[10]。而短波多径效应则是指用某个频率探测低空的一个目标时，由于多模式传播，将会在多个距离门上出现目标回波，即一个目标被误认为多个目标。

短波传播的多径有很多种情形，实际情况是多种情形的复杂组合。短波电离层传播中主要的多径种类有：a) 通过不同电离层(D、E、F 层)传播构成的多径；b) 通过电离层同层高低仰角模式传播构成的多径；c) O 波和 X 波之间的干扰构成的多径。

本文重点关注和研究的多径情况为 O 波和 X 波之间的干扰构成的多径，这种多径与信号的极化方式密切相关。参数设置如下：发射方位角：正南；发射地点：武汉；射线发射点经纬度：(30.40 N, 114.30 E)；发射频率：7 MHz；射线发射仰角：45°(X 波)、41°(O 波)。电离层背景选取 2022 年 12 月 22 日电离层同化模型^[11]输出的电子密度文件，地磁场模型选用国际地磁参考场模型^[12]。

仿真结果如图 2 所示，其中图 2(a)为矢量射线追踪结果。可以看出，2 条射线的仰角、群路径(时延)和到达角相差很小，很难将其区分开来。对于通过电离层同层高低仰角模式传播构成的多径，利用矢量射线追踪方法可得到一条特定射线的传播路径和路径上每一点的极化方式。图 2(b)和 2(c)为一个信号经过 E 层和 F 传播构成的 X 波模式和 O 波模式的传播路径及本文选择的 8 个节点对应的 O 波和 X 波极化方式。除了进入电离层和穿出电离层的 2 个射线上的点，还有射线在 $h=100$ 、140、180 km 时的 6 个点。

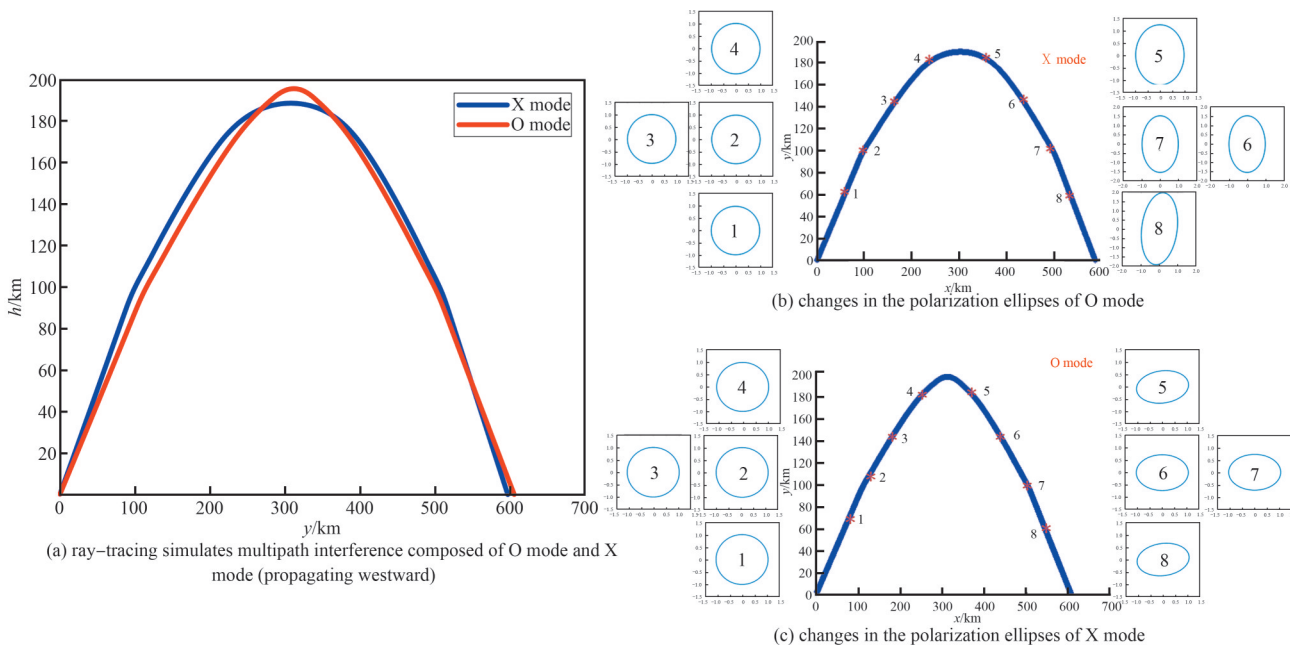


Fig.2 Changes in the polarization ellipses of O and X waves(propagating southward)

图2 向南传播时,O波和X波干扰构成多径以及对对应点的极化椭圆

保持其他参数不变，发射方位角改为正西。此时，对于极化传播，改变最大的是磁场与传播方向的夹角，背景电离层电子密度和碰撞频率的变化可忽略。仿真结果见图 3。

由图 2 和图 3 可以看出，当射线向南发射时，短波射线近似位于磁子午面内；当射线向西发射，短波射线近似垂直于磁子午面。无论射线向南或向北发射，其经过的背景电离层相差并不大。但仿真结果表明，当射线向南或向西发射时，无论是 O 波还是 X 波，射线的极化状态区别很大。由此可以说明地球磁场在射线传播过程中对极化状态的影响非常明显。

造成上述仿真结果的原因是在电离层波传播过程中，特征极化主要取决于电离层的电子密度、电子与离子

或分子等重粒子的碰撞频率、地磁场的强度、传播矢量与地磁场的夹角以及电磁波本身的工作频率等。

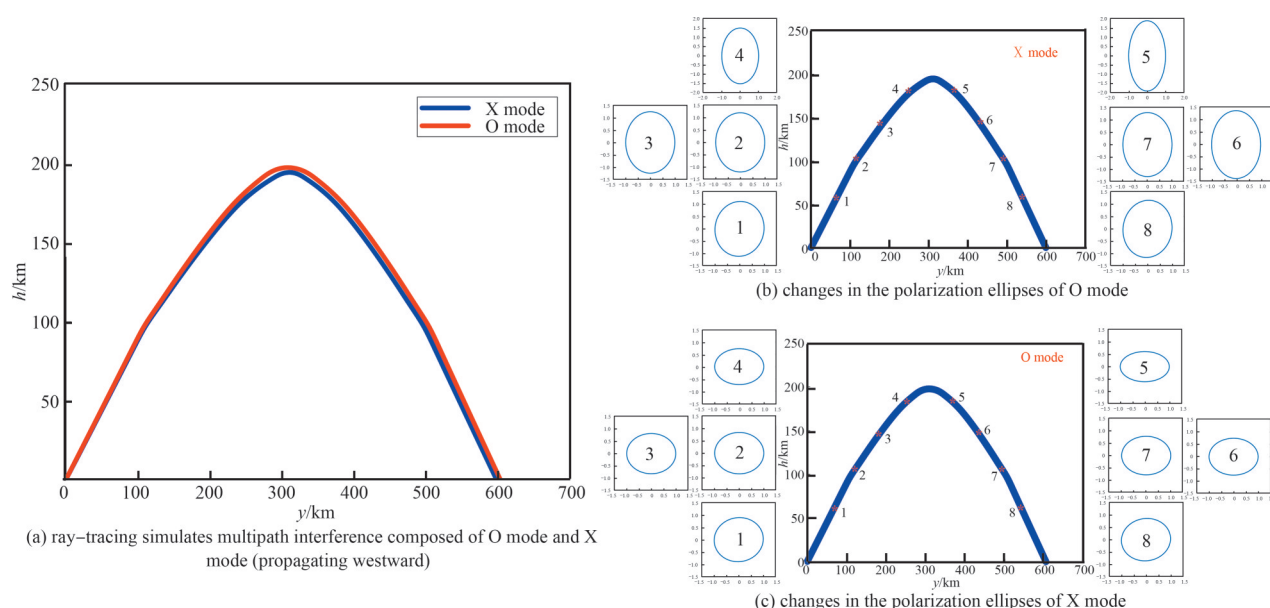


Fig.3 Changes in the polarization ellipses of O and X waves(propagating westward)

图3 向西传播时, O波和X波干扰构成多径以及对应点的极化椭圆

在电离层底部, 电离层电子密度趋于0, 电磁波的极化称为极限极化(Limiting Polarization)。此时, 极限极化率为:

$$\rho = \frac{j}{2Y_L} \left\{ \frac{Y_T^2}{1-jZ} \pm \left[\frac{Y_T^4}{(1-jZ)^2} + 4Y_L^4 \right]^{1/2} \right\} \quad (9)$$

在不考虑碰撞的情况下, 有

$$\rho = \frac{j}{2Y_L} \left\{ Y_T^2 \pm [Y_T^4 + 4Y_L^4]^{1/2} \right\} \quad (10)$$

从式(10)可以看出, 无论是O波还是X波穿出电离层时, 其极化率为纯虚数, 因此O波和X波的极限极化可近似为正椭圆极化波(即椭圆主轴平行或垂直地磁场)。因此可以得出: 对于X波或O波, 当穿出电离层后(包括穿出电离层时), 其极化率只受波矢量 $\mathbf{k}$ 与地磁场 $\mathbf{B}$ 之间的关系影响。更具体地说, 只与传播方向与地磁场的夹角有关。当波矢量 $\mathbf{k}$ 平行于地磁场 $\mathbf{B}$ 时, 电磁波的极限极化率可写为: $\rho = \pm j$, 此时穿出电离层的O波为一个右旋圆极化波, 穿出电离层的X波为一个左旋圆极化波; 当波矢量 $\mathbf{k}$ 垂直于地磁场 $\mathbf{B}$ 时, $\rho_O = 0$, $\rho_X = \infty$, 此时O波为横波, 有平行于地磁场的线极化, 且折射率不受地磁场的影响; X波的极化在垂直于地磁场的平面内, 一般情况下不是横波。一般情况下, 波矢量 $\mathbf{k}$ 与地磁场 $\mathbf{B}$ 之间夹角 $\theta \neq 0 \neq 90^\circ$ 时, O波是一个椭圆主轴平行地磁场的正椭圆右旋极化, X波是一个椭圆主轴垂直地磁场的正椭圆左旋极化波。

3 结论

本文结合三维射线追踪和短波电离层极化传播模型构建了矢量射线追踪算法, 该算法可仿真给出短波信号在电离层中的传播路径和传播路径上每点的极化状态。结果表明, O波和X波构成的多径, 其仰角、群路径(时延)和到达角相差很小, 传统手段很难将其区分。但2条射线的极化率相差很大, 后续短波侦测系统可利用O/X波的极化状态不同来分离天波信号。对于短波信号, 当穿出电离层后, 其极化率只与传播方向和地磁场的夹角有关, 即后续短波侦测系统计算到达波的极化状态, 再利用侦收系统位置处的地磁场信息可反推来波到达角。

参考文献:

- [1] HEELIS A R, MAUTE A. Challenges to understanding the Earth's ionosphere and thermosphere[J]. Journal of Geophysical Research: Space Physics, 2020, 125(7): A027497. DOI:10.1029/2019JA027497.

- [2] VASYLIŪNAS M V. The physical basis of ionospheric electrodynamics[J]. *Annales Geophysicae*, 2012, 30(2):357–369. DOI: 10.5194/angeo-30-357-2012.
- [3] KELLEY C M. The earth's ionosphere[electronic resource]: plasma physics and electrodynamics[M]. Amsterdam, Boston: Academic Press, 2009.
- [4] HASELGROVE J. Ray theory and a new method of ray tracing[M]. London: Physics in the Ionosphere, 1955.
- [5] JONES R M. A three-dimensional ray-tracing computer program[J]. *Radio Science*, 1968, 3(1): 93–95. DOI: 10.1002/rds.19683193.
- [6] 王严, 李雪, 尹文禄, 等. 电离层吸收衰减预测方法的比较研究[J]. *电波科学学报*, 2022, 37(1): 129–136. (WANG Yan, LI Xue, YIN Wenlu, et al. Comparative study on prediction methods of ionospheric absorption attenuation[J]. *Chinese Journal of Radio Science*, 2022, 37(1): 129–136.) DOI: 10.12265/j.cjors.2020269.
- [7] JONES R M, STEPHENSON J J. A versatile three-dimensional ray tracing computer program for radio waves in the ionosphere[M]. Washington D C: U.S. Dept. of Commerce, 1975.
- [8] 索玉成. 电离层短波射线追踪[J]. *空间科学学报*, 1993, 13(4): 306–312. (SUO Yucheng. Short wave ray tracing in the ionosphere[J]. *Chinese Journal of Space Science*, 1993, 13(4): 306–312.) DOI: CNKI: SUN: KJKB. 0. 1993-04-008.
- [9] SEN H K, WYLLER A A. On the generalization of the Appleton–Hartree magneto-ionic formulas[J]. *Journal of Geophysical Research*, 1960, 65(12): 3931–3950. DOI: 10.1029/JZ065i012p03931.
- [10] GULDOGAN M B, ARIKAN O, ARIKAN F. A new technique for direction of arrival estimation for ionospheric multipath channels[J]. *Advances in Space Research*, 2009, 44(6): 653–662. DOI: 10.1016/j.asr.2009.04.031.
- [11] QIAO Jiandong, ZHOU Chen, LIU Yi, et al. Ionospheric Kalman filter assimilation based on covariance localization technique[J]. *Remote Sensing*, 2022, 14(16): 4003. DOI: 10.3390/rs14164003.
- [12] ALKEN P, THÉBAULT E, BEGAN C D, et al. International geomagnetic reference field: the thirteenth generation[J]. *Earth Planets Space*, 2021(49): 73. DOI: 10.1186/s40623-020-01288-x.

作者简介:

吕明杰(1996–), 男, 在读博士研究生, 主要研究方向为短波电离层电波传播 .email: mingjielv@whu.edu.cn.

乔 玮(1991–), 男, 在读博士研究生, 主要研究方向为短波天线与测向技术.

周 晨(1983–), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为电波传播.

赵正予(1952–), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为空间电磁环境与空间天气、高频雷达技术.