

对流层-电离层跨介质天波超视距传播统一信道建模方法

李国军^{1,2}, 詹喆宇^{1,2}, 叶昌荣², 刘意²

(1. 重庆邮电大学通信与信息工程学院, 重庆 400065; 2. 重庆邮电大学超视距可信信息传输研究所, 重庆 400065)

摘要: 传统天波超视距信道建模未充分考虑对流层电波射线传播影响, 难以有效表征电离层-对流层跨介质远距离传播路径几何畸变效应, 导致复杂大气环境下长距离信道预测误差显著。针对这一瓶颈, 提出一种对流层-电离层跨介质天波超视距统一信道建模方法, 首先基于电离层-对流层大气空间环境模型, 采用三维射线追踪算法进行跨介质传播模拟, 提取时延域、多普勒域信道参数, 进而通过计算建模驱动传统天波链路传输模型, 建立天波超视距链路传播模型和传输模型统一的信道建模方法。实验表明, 在 5 000 km 长距离链路上, 信道参数日变化趋势与实测相关系数达 86%, 多径时延均方根误差降低至 0.09 ms, 多普勒扩展建模误差控制在 0.06 Hz RMS 水平, 显著提升了复杂电磁环境下的天波超视距通信系统设计与性能评估能力。

关键词: 对流层; 电离层; 信道建模; 射线追踪

中图分类号: TN921

文献标志码: A

DOI: 10.11959/j.issn.1000-436x.2025198

Unified channel modeling method for troposphere-ionosphere cross-media HF over-the-horizon propagation

LI Guojun^{1,2}, ZHAN Zheyu^{1,2}, YE Changrong², LIU Yi²

1. School of Communications and Information Engineering, Chongqing University of Posts and Telecommunications, Chongqing 400065, China

2. Lab of Beyond LoS Reliable Information Transmission, Chongqing University of Posts and Telecommunications, Chongqing 400065, China

Abstract: Traditional skywave over-the-horizon (OTH) channel modeling inadequately accounted for tropospheric radio wave propagation effects, failing to effectively characterize the geometric distortion of ionosphere-troposphere cross-medium long-distance propagation paths in complex atmospheric environments, which led to significant prediction errors for long-range channels. To address this limitation, a unified ionosphere-troposphere cross-medium skywave OTH channel modeling method was proposed. Firstly, a 3D ray-tracing algorithm was employed based on an integrated ionosphere-troposphere atmospheric spatial environment model to simulate cross-medium propagation and extract channel parameters in delay and Doppler domains. Subsequently, a computational modeling-driven approach was developed to unify the propagation model and the traditional skywave link transmission framework. Experimental validation on a 5 000 km long-distance link demonstrates that the proposed model achieves an 86% correlation coefficient with measured data in diurnal variation trends, reducing the root mean square error (RMSE) of multipath delay to 0.09 ms, and controls Doppler spread modeling errors at an RMS level of 0.06 Hz. These advancements significantly enhance the design and performance evaluation capabilities of skywave OTH communication systems in complex electromagnetic environments.

Keywords: troposphere, ionosphere, channel modeling, ray tracing

收稿日期: 2025-07-05; 修回日期: 2025-10-24

通信作者: 叶昌荣, yecr@cqupt.edu.cn

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (No.U22A2006, No.62201106); 重庆市自然科学基金资助项目 (No.cstb2023nscq-lzx0082, No.cstb2025nscq-lzx0049); 科技委基础加强基金资助项目 (No.2023-zq-080)

Foundation Items: The National Natural Science Foundation of China (No.U22A2006, No.62201106), The Natural Science Foundation of Chongqing (No.cstb2023nscq-lzx0082, No.cstb2025nscq-lzx0049), Science and Technology Commission of the Basic Strengthening (No.2023-zq-080)

0 引言

短波通信作为基于电离层反射机制的天波超视距传输技术,在科考探测、军事战略通信及跨洋应急救援等领域展现出不可替代的应用价值^[1]。短波信道是短波通信系统性能分析的重要组成部分,直接影响无线通信系统的性能。短波由于在传播过程中受电离层、对流层等诸多环境因素以及多种噪声干扰的影响,使其成为最为复杂和严苛的无线信道之一^[2]。人们通常采用实测方式评估通信链路质量,但实现长距离信道测量费用高昂、复杂且耗时。构建能模拟真实情况的仿真信道可降低实验成本,简化对信道特性分析及通信设备性能评估的过程。

其信号传播路径涉及电离层-对流层-地磁场多物理场作用,导致传统信道模型面临两大核心挑战:第一,对流层作为大气层最低层(地表至 8~15 km 高度),呈现显著的温度垂直梯度(约 $-6.5^{\circ}\text{C}/\text{km}$),其内部剧烈的气象活动(如云系演化、降水过程、对流湍流等^[3])导致介质参数时空异质性,温湿度剖面变化引起折射指数梯度变化导致传播路径偏离^[4],现有模型普遍采用对流层时变扰动微弱、介质衰减可忽略的简化假设,未能有效表征折射率梯度引起的电磁波射线几何畸变效应;第二,电离层(60~500 km 高度)作为等离子体介质,其分层结构(D层 60~90 km, E层 90~150 km, F层 >150 km)^[5],受太阳辐射通量、地磁活动及昼夜周期的影响,电离层中的电子密度和电离层特征也会随着太阳周期和季节的变化而变化^[6],电离层等离子体参数的动态异质性(如突发性电子密度斑块、偶发 E层等现象^[7]),导致信道参数(如群时延、多普勒展宽)呈现非平稳特性以及短波可通频段上升,显著增加实时信道建模与自适应均衡的复杂度。

当前主流短波信道建模方法主要依托窄带 Watterson 模型^[8]与宽带 ITS 模型^[9]这两大统计性模型体系,其建模基础均建立在对实际信道参数的测量数据采集与分析之上。然而,对流层、电离层等大气空间环境动态特性中的随机扰动因素导致测量数据的长期稳定性与可靠性难以保障,形成制约模型泛化能力提升的关键瓶颈^[10]。

射线追踪技术能够有效地支持短波信道参数估计,其射线追踪算法能够模拟电磁波传播路径,从

而有效解析信道中多径传播、多普勒频移及功率衰减等关键参数。值得注意的是,信道参数计算精度与大气空间环境模型的逼真度呈现显著正相关,特别是电离层、对流层与磁场等复杂介质分布特征的建模,高精度射线追踪算法的构建本质上依赖于多尺度大气环境参数的精确表征,然而现有研究普遍进行单介质传播模型建模,导致传播路径完整性缺失以及信道参数评估出现偏差。文献[11]利用电离层射线追踪和数值方式描述电离层色散引起的多径时延,可得出短波宽带通信的模拟带宽,但其理论框架未纳入对流层折射率时变特性。文献[12]利用在高纬度更加精确的加拿大极地电离层模型以精确模拟高纬度电离层特性,结合 3D 电离层射线追踪模拟确定短程和长程超视距操作的可行发射频率和俯仰角参数,构建频率管理系统,但仍局限于单介质传播假设。文献[13]通过对流层射线追踪与数值天气模型结合计算对流层时延,验证了对流层对信号传播的影响,但尚未建立与电离层扰动的跨介质传播关联模型。在电磁波传播建模方面,射线追踪算法获取的信道参数与信道冲激响应之间的数学映射关系尚未建立严格的理论推导,文献[14]提出了基于时变因子对射线追踪获取的时延和多普勒频移参数进行精确度改进。然而上述实证研究仍局限于参数提取层面,尚未构建具有普适性的短波通信信道模型。

因此,传播模型虽基于大气参数实现区域级传播特性预测(频率可用性/覆盖范围),具备广域分析能力与低成本优势,却因缺乏精细化信道参量输出而难以支撑现代信道仿真;而统计传输模型(如 ITS)虽通过点对点架构支持全链路仿真,但其精度受限于经验数据完备性;天波测量虽可获取点对点高精度参数,却因主动探测机制面临高成本与覆盖范围约束。基于此,本文提出跨介质统一信道建模,该模型创新性地结合传播模型与统计传输模型,信道模型对比如表 1 所示。首先基于大气环境模型和电波传播机理计算时延、多普勒频移及路径损耗等信道参数;进而依托传输模型架构构建多模式信道散射函数。具有预测范围广、成本低、准确度相对较高的优点。本文主要的工作如下。

1) 建立了电离层-对流层的大气环境模型,通过整合国际参考电离层(IRI, international reference ionosphere)模型与同化加拿大北极电离层模型

表 1 信道模型对比

模型名称	预测范围	测量准确度	主要优势	主要劣势
电波传播模型	任意区域范围	一般	预测范围广、成本低	无法输出信道参数, 不能实现信道仿真
短波信道模型	任意点对点	较差	算法结构清晰、可仿真	对经验数据要求较高, 参数准确度较低
天波探测	指定点对点	很高	算法结构清晰、准确度很高	需要主动发射信号、成本高
统一信道建模	任意区域范围	高	预测范围广、成本低、可仿真、准确度高	依赖环境模型精确度

(ACHAIM, assimilation Canadian high arctic ionospheric model) 及欧洲中期天气预报中心 (EC-MWF, European center for medium-range weather forecast) 提供的气象数据等大气空间模型, 实现了跨介质传播环境重构。

2) 将传播模型与传输模型相结合, 采用对流层与电离层三维射线追踪算法进行跨介质传播模拟, 利用计算建模提取时频双选择性信道参数, 并基于其结果与传统传输模型架构结合建立包含多径时延、多普勒展宽等参数的信道散射函数。

3) 构建了短波信道仿真模型。以中国新疆至芬兰库萨莫的复杂空间环境链路为研究对象, 通过实测场强数据与信道参数的对比分析, 验证了模型在不同短波频段、5 000 km 级传输距离下的预测精度。

1 射线追踪技术

本文系统阐述射线追踪的理论基础, 解析关键参数的物理意义及其对信号模拟精度的影响机制, 进而确立高精度模型的构建准则, 为后续环境建模与参数计算提供理论支撑。

在经典动力学理论框架下, 电磁波在介质中的传播动力学可通过 Maxwell 方程组实现严格数学表征^[15]。针对折射率场具有空间渐变特性且满足几何光学近似条件的物理场景, 通过对无源介质 (自由电荷密度与传导电流密度均为零) Maxwell 方程组进行渐进展开解析, 可建立基于 Eikonal 方程的射线追踪理论模型^[16]。该理论体系在描述中性大气层 (涵盖对流层与平流层) 电磁波传播时展现出显著适用性, 其核心控制方程——Eikonal 方程的微分形式具体表示为^[17]

$$|\nabla L_i|^2 = n(\mathbf{r}_i)^2 \quad (1)$$

其中, ∇L_i 表示射线的不同分量, L 描述路径长度, n 是介质的折射率, \mathbf{r}_i 射线路径上各点的位置矢量。

式(1)通常使用哈密顿正则形式重新表示, 并在球坐标系 (r, θ, λ) 中表示哈密顿量 H , 其对流层射线追踪方程如式(2)所示。

$$\begin{cases} \frac{dr}{ds} = \frac{1}{B} L_r \\ \frac{d\theta}{ds} = \frac{1}{B} \frac{L_\theta}{r^2} \\ \frac{d\lambda}{ds} = \frac{1}{B} \frac{L_\lambda}{r^2 \sin^2 \theta} \\ \frac{dL_r}{ds} = \frac{\partial n(r, \theta, \lambda)}{\partial r} + \frac{1}{Br} \left(\frac{L_\theta^2}{r^2} + \frac{L_\lambda^2}{r^2 \sin^2 \theta} \right) \\ \frac{dL_\theta}{ds} = \frac{\partial n(r, \theta, \lambda)}{\partial \theta} + \frac{1}{B} \frac{L_\lambda^2}{r^2 \sin^3 \theta} \\ \frac{dL_\lambda}{ds} = \frac{\partial n(r, \theta, \lambda)}{\partial \lambda} \end{cases} \quad (2)$$

其中, r 是径向距离, θ 是余纬度, λ 是经度, $L_r = \frac{\partial L}{\partial r}$ 、 $L_\theta = \frac{\partial L}{\partial \theta}$ 和 $L_\lambda = \frac{\partial L}{\partial \lambda}$ 分别表示射线方向在径向、余纬度和经度方向的分量。

B 的表达式为

$$B = \left(L_r^2 + \frac{1}{r^2} L_\theta^2 + \frac{1}{r^2 \sin^2 \theta} L_\lambda^2 \right)^{\frac{1}{2}} = n(r, \theta, \lambda) \quad (3)$$

大气折射率 N 和大气折射指数 n 采用由 ITU-R P.453 中给出的计算方法^[18], 计算式为

$$N = (n - 1) \times 10^6 = (77.6 \frac{p}{T} - 5.6 \frac{e}{T} + 3.75 \times 10^5 \frac{e}{T^2}) \quad (4)$$

其中, p 和 e 分别表示空气和水蒸气的压强, T 表示绝对温度。基于三维气象数据, 可通过构建气象要素场的空间分布模型, 计算指定位置的大气折射指数及其偏导数。

在电离层这一各向异性等离子体介质中, 自由电子主导的电磁特性使其不满足无源介质条件, 对流层射线追踪理论失去适用性, 其折射率变化遵循 Appleton-Hartree 色散关系的广义形式。基于哈密

顿正则形式, 该射线追踪问题可转化为相空间中扩展哈密顿方程组的数值求解, 方程如式(5)所示^[19-20].

$$\left\{ \begin{aligned} \frac{dr}{dP'} &= -\frac{1}{c} \frac{\partial k_r}{\partial H} \\ \frac{d\theta}{dP'} &= -\frac{1}{rc} \frac{\partial k_\theta}{\partial H} \\ \frac{d\varphi}{dP'} &= -\frac{1}{r \sin \theta} \frac{\partial k_\varphi}{\partial H} \\ \frac{\partial k_r}{\partial P'} &= \frac{1}{c} \frac{\partial H}{\partial r} + k_\theta \frac{d\theta}{dP'} + k_\varphi \frac{d\varphi}{dP'} \\ \frac{\partial k_\theta}{\partial P'} &= \frac{1}{r} \left[\frac{1}{c} \frac{\partial H}{\partial \theta} - k_\theta \frac{dr}{dP'} + k_\varphi r \cos \theta \frac{d\varphi}{dP'} \right] \\ \frac{\partial k_\varphi}{\partial P'} &= \frac{1}{r \sin \theta} \left[\frac{\partial H}{\partial \varphi} - k_\theta \sin \theta \frac{dr}{dP'} - k_\varphi r \cos \theta \frac{d\theta}{dP'} \right] \end{aligned} \right. \quad (5)$$

其中, P' 表示群路径, r, θ, φ 为射线路径上某一点的球坐标, H 表示哈密顿算子, 其表达式为

$$H = \frac{1}{2} \left[\frac{c^2}{\omega^2} (k_r^2 + k_\theta^2 + k_\varphi^2) - \text{Re}(n^2) \right] \quad (6)$$

其中, k_r, k_θ, k_φ 为波矢量在球坐标系中的分量, ω 为电波角频率, c 为自由空间中电磁波的传播速度, n 为短波在电离层中的折射率, 计算式为

$$n^2 = 1 - \frac{X}{1 - iZ - \left(\frac{Y_T^2}{2(1 - X - iZ)} \right) \pm \left(\frac{Y_T^4}{4(1 - X - iZ)^2} + Y_L^2 \right)^{\frac{1}{2}}} \quad (7)$$

式(7)给出了折射率的平方值, 正负号表示在地磁场影响下, 寻常波和非寻常波 2 种不同极化方式, X, Z, Y_T 和 Y_L 分别表示电子密度、地球磁场和电子-粒子碰撞频率的影响, 定义为

$$Y_T = \frac{eB \cos \theta}{m\omega}, Y_L = \frac{eB \sin \theta}{m\omega}, X = \frac{Ne^2}{\epsilon_0 m \omega^2}, Z = \frac{\nu_e}{\omega} \quad (8)$$

其中, N 是电子密度, e 是基本电荷, m 是电子的质量, ν_e 是电子碰撞频率, B 是地球磁场的磁通密度, θ 是光线传播方向与地磁场之间的夹角。

2 传播模型

传播模型的精度直接决定了统一信道建模的准确性。本文构建了跨介质信道建模中传播模型的整体框架, 包括大气环境与信道参数精确提取。首先, 基于 IRI、A-CHAIM 与 ECMWF 等多源数据, 建立了电离层-对流层大气环境模型, 实现了从电子密度、碰撞频率到温湿压场的关键介质参数精确表征。进而, 在此环境模型下, 采用三维射线追踪算法进行跨介质传播路径的解算, 完成了时延、多普勒频移及路径损耗等核心信道参数的提取, 为后续传输模型融合与统一信道建模提供了准确的物理参数输入。

2.1 大气环境模型

传播模型准确度依赖于高分辨率大气环境模型的构建, 主要包含 2 个关键作用域: 具有折射效应的对流层介质, 存在等离子体各向异性分布的电离层介质, 其射线模拟如图 1 所示。值得注意的是, 平流层因具有稳定的热力学参数分布^[21], 其空间折射率扰动贡献量级低于模型分辨率阈值, 故在系统建模中予以忽略。

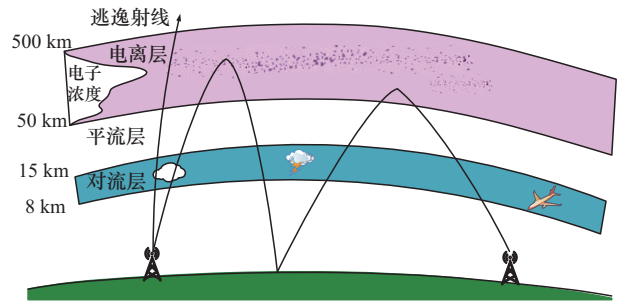


图 1 射线模拟

电离层作为典型的色散介质, 其反射效应与吸收损耗对电磁波传播产生显著影响, 其中电子密度的三维分布结构是决定射线轨迹偏移的关键参量。IRI 模型作为国际电信联盟与国际科学理事会联合维护的标准模型^[22], 通过同化全球电离层测高仪, 卫星原位探测等多源观测数据, 建立了涵盖不同地理坐标、季节周期与太阳活动条件的电离层参量 (电子密度、电子温度、电离层峰值高度) 经验预

测模型。然而受历史观测数据空间覆盖度的限制,该模型在高纬度区域的电子密度预测存在系统性偏差,为改善高纬度电离层建模精度,经验加拿大北极电离层模型(E-CHAIM, empirical Canadian high arctic ionospheric model)通过引入极光椭圆区粒子沉降参数化方案^[23],显著提升了高纬度区域电子密度剖面的精度。但经验模型在表征电离层瞬态扰动(如磁暴引发的等离子体密度骤变、太阳耀斑导致的弧形成等)方面仍存在局限性。为此发展的同化型加拿大高北极电离层模型^[24],以E-CHAIM为背景场,融合近实时全球GNSS-TEC、非相干散射雷达及Swarm卫星等离子体探测数据,实现了电离层动态扰动过程的3 h滞后更新。

基于上述模型特性分析,本文建立区域自适应的电离层建模策略:针对中低纬度地区(地磁纬度 $<50^\circ$),继承IRI2020的统计建模优势,确保计算效率与全球覆盖性;而对于高纬度电离层扰动活跃区(地磁纬度 $>50^\circ$),则引入A-CHAIM^[25]数据。数值实验表明,该混合架构构建的电子密度三维同化场能有效表征电离层等离子体不规则体(如极光、弧等),其空间分辨率设置为 $1^\circ \times 1^\circ \times 2 \text{ km}$ (纬度 \times 经度 \times 高度),北纬 40° 以上120 km电离层电子浓度分布如图2所示。

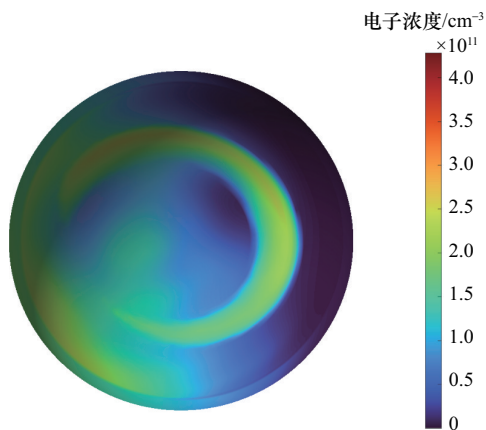


图2 北纬 40° 以上120 km电离层电子浓度分布

同时碰撞频率是表征电离层介质中能量耗散机制的关键参数,碰撞频率指在短波传播过程中,由于离子的质量较大,它们几乎不会移动,而较轻的电子则会对电磁场的变化做出反应。

电子在与其他粒子发生碰撞时,会吸收无线电波的能量,导致信号强度减弱。这种现象可以通

过电子碰撞频率来描述。总碰撞频率定义为离子和中性粒子碰撞频率之和: $\nu_e = \nu_{en} + \nu_{ei}$,电子与离子之间的碰撞频率 ν_{ei} 和电子与中性粒子的碰撞 ν_{en} 参见文献^[26],其涉及电子温度、离子温度, N_2 和 O_2 及原子氧(O)、氢(H)和氦(He)等5种成分多种中性粒子。本文采用经验型大气模型NRLMSISE-00 (naval research laboratory's mass spectrometer incoherent scatter extension 2000)进行空间环境参数化重构,作为美国海军研究实验室主导开发的新一代大气建模框架,其核心优势在于建立了基于Chapman函数扩展的中性成分剖面参数化方案,可精确输出中性粒子数密度、离子温度场分布以及电子浓度三维网格数据^[27]。

对流层作为无源介质层,对流层内温度、湿度及气压场的梯度分布通过改变大气折射率梯度,导致电磁波传播路径产生显著的弯曲效应。基于ECMWF第五代全球气候再分析数据集(ERA5, ECMWF reanalysis v5)构建的高分辨率大气模型^[28],为量化该效应提供了可靠的数据支撑。ERA5通过融合多源观测数据与先进四维变分同化技术(4D-Var),实现了从地面至平流层的垂直空间内,时间分辨率达小时级,水平网格精度达 $0.25^\circ \times 0.25^\circ$ 的全球大气参数重构。本文采用ERA5压力层逐时数据作为基础数据源,通过三维线性插值算法对缺失位置进行插值,将原始数据分辨率 $0.25^\circ \times 0.25^\circ \times 0.6 \text{ km}$ 插值为空间分辨率为 $0.125^\circ \times 0.125^\circ \times 0.5 \text{ km}$ 的网格,降低了模型因网格内跳变带来的误差。其插值后对流层10 km温度示意如图3所示。

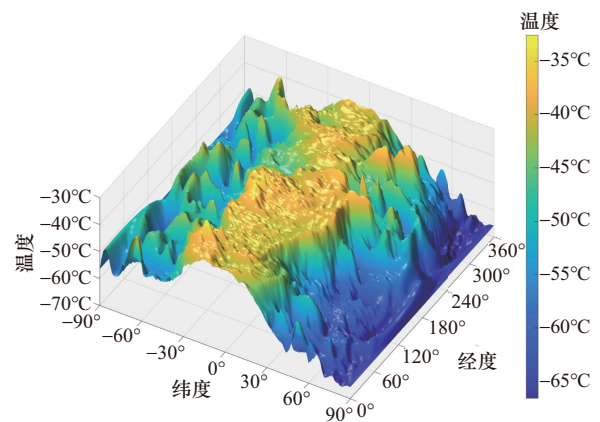


图3 对流层10 km温度示意

在短波频段电磁传播特性研究中,对流层介质对电磁波的主要影响表现为射线折射效应引起的传

播路径几何形变, 其能量损耗机制集中于路径偏转导致的自由空间路径损耗变化, 它精确捕捉了电磁波穿越对流层这一非均匀介质层时最主要物理效应(折射)对传播路径和损耗的影响。实验与理论研究表明^[29], GHz 以下频段对流层中水凝物(雨滴、冰晶)及气溶胶的附加衰减可忽略不计。因此, 本模型将对流层损耗建模明确限定于自由空间路径损耗范畴。

2.2 计算建模

本文所构建的信道模型以多维信道参数为关键数据支撑, 其建模方法采用三维射线追踪算法, 通过大气环境模型, 构建电磁波传播路径的精确几何解算; 继而采用麦克斯韦方程组的数值解结合路径积分法, 对每条射线进行独立参数化表征, 其信道参数主要包括多径时延、多普勒频移及接收功率。本文射线实际传输距离计算来源于对射线路径逐步积分求得, 计算式为

$$S = \int_{C_{AB}} \mu(s,t) \cos \alpha(s) ds \quad (9)$$

其中, C_{AB} 是积分的路径, 它代表信号从发射机位 A 传播到接收机位置 B 所实际走过的空间轨迹; $\mu(s,t)$ 代表折射率, 是关于空间位置和时间的函数; $\alpha(s)$ 是波的法线与射线方向之间的角度; ds 是沿传播路径的距离; S 代表射线从 A 传播到 B 沿路径 C_{AB} 经历的总路程。射线传输时延(ToF)与实际传输距离和传播速度有关, 通过仿真验证在电离层中的传播时延并未对结果造成明显影响, 因此本文中时延可表示为

$$\text{ToF} = \frac{S}{c} \quad (10)$$

电离层的运动以及磁场、太阳风等因素对电离层的扰动会导致短波在传播过程中频率发生变化。文献[30]基于费马原理, 推导出假设收发端静止条件下, 在电离层中传播的无线电波所经历的多普勒频移为

$$\delta f = -\frac{f}{c} \int_{C_{AB}} \frac{\partial \mu(s,t)}{\partial t} \cos \alpha(s) ds \quad (11)$$

射线链路全路径损耗模型采用多物理场耦合的链路预算分析框架, 其中发射与接收天线增益、发射功率、空间自由传输的传输损耗、地面反射损耗、频率高于基本 MUF 传播损耗、系统损耗带来的影响, 其数学表征遵循国际电信联盟 ITU-R

P.525 建议书定义的传输方程体系, 电离层吸收损耗取决于电子密度和信号传播路径上与中性粒子和离子碰撞的频率。电离层的总吸收量(以 dB 为单位)计算式为

$$L_a = -8.68 \int_{C_{AB}} \kappa ds \quad (12)$$

其中, κ 是复传播函数 k 的虚部; $k = \frac{2\pi f n}{c}$, f 是输入波的频率, n 是复折射率 ($n = u + i\chi$), u 是折射率的实部, χ 是折射率的虚部, c 是光速。为了提供一个简单的背景来理解电离层吸收的贡献, 文献[31]定义了吸收系数如式(13)所示。

$$\kappa = \frac{e^2}{2\epsilon_0 mc} \frac{1}{\mu} \frac{n_e v_e}{v_e^2 + (2\pi f \pm \omega_{\text{ecf}} \cos \theta)^2} \quad (13)$$

其中, n_e 是电子密度, v_e 是电子碰撞频率, f 是输入波的频率, ω_{ecf} 是电子回旋频率, θ 是传播方向与地球磁场之间的角度, 加减号分别用于寻常波和非寻常波。

3 传输模型

统一信道建模以传输模型为主要框架, 本章重点说明以 ITS 模型为代表的传输模型建模方法, 为后续构建跨介质统一信道模型提供理论依据。

ITS 信道模型是由各独立的传输模式的冲激响应之和所构成, 冲激响应可表示为^[32]

$$h(t,\tau) = \sum_n h_{pn}(t,\tau) = \sum_n \sqrt{P_n(\tau)} D_n(t,\tau) \psi_n(t,\tau) \quad (14)$$

其中, $h_{pn}(t,\tau)$ 为独立传播模式的信道冲激响应, n 表示单传播模式下的路径数, 每一个传播模式下的信道冲激响应由时延功率分布 $p_n(\tau)$ 、确定相位函数 $D_n(t,\tau)$ 以及随机调制函数共同表示。本文以传播路径中相似的传播路径和同一极化模式划分为独立传输模式。

ITS 模型中时延功率剖面反映信道时延特性, 函数 $p(\tau)$ 的确定过程较为复杂。为了降低模型复杂度, 采用文献[33]提出的利用 Nakagami-m 分布的概率密度函数来近似功率时延剖面函数。其函数的概率密度函数表示为

$$f(\tau) = \frac{2}{\Gamma(m)} \left(\frac{m}{\Omega}\right)^m \tau^{2m-1} \exp\left(-\frac{m\tau^2}{\Omega}\right) \quad (15)$$

其中, $m = \frac{E^2[\tau^2]}{\text{var}(\tau^2)}$, $\Omega = E[\tau^2]$, $\Gamma(m)$ 为伽马函数, τ 为时延变量。

随机调制函数反映多普勒扩展特性,短波信道的频谱扩展谱型分别为 Gauss 谱和 Lorentz 谱, Gauss 谱更符合中低纬度地区, Lorentz 谱更符合高纬度地区,其散射函数表达式为

$$\begin{aligned} \text{Gauss: } S(\tau, f_D) &= A \cdot p(\tau) \cdot e^{-\pi[\sigma_f(f_D - f_B)]^2} \\ \text{Lorentz: } S(\tau, f_D) &= A \cdot P(\tau) \frac{\sigma_f}{\sigma_f + j2\pi(f_D - f_B)} \end{aligned} \quad (16)$$

δ_f 是多普勒扩展半带宽的函数,表示为

$$\begin{aligned} \text{Gauss: } \sigma_f &= \sigma_D \left[\frac{2\pi}{-\ln s_v} \right]^{\frac{1}{2}} \\ \text{Lorentz: } \sigma_f &= 2\pi\sigma_D \left[\frac{s_v}{1 - s_v} \right]^{\frac{1}{2}} \end{aligned} \quad (17)$$

其中, $s_v = \frac{A_f}{A}$, σ_D 是多普勒扩展的半带宽, A 是接收信号阈值。

$$\begin{aligned} f_B &= f_s + m(\tau - \tau_c) \\ m &= \frac{f_s - f_{sL}}{\tau_c - \tau_L} \end{aligned} \quad (18)$$

其中, τ_c 是信号功率为时延功率分布最大值时的时延偏移量, τ_L 为最小的时延, m 是多普勒频移随延时的变化率, f_s 是 $\tau = \tau_c$ 时的多普勒频移, f_{sL} 是 $\tau = \tau_L$ 时的多普勒频移。

4 跨介质统一信道建模

本文旨在提出并阐述一种创新的跨介质统一信道建模方法,以解决传统模型在复杂跨介质环境中表征能力不足的问题。

传播模型与传输模型分别承担物理层传播机制分析与信息传递效能评估的功能:前者聚焦电磁波空间传播的时频域特性(如多径时延扩展、多普勒频移展宽),其精度受限于电离层环境模型的完备

性;后者评估端到端通信性能指标,但高度依赖信道参数输入的准确性。

本文将传播模型物理机理与传输模型参数体系融合^[34]。通过射线追踪算法与大气环境模型,构建跨介质全链路的短波信道模型。该模型基于数值分析方法提取时延、多普勒频移、损耗等信道特征参量,并依托 ITS 模型架构建立具有多传输模式的信道散射函数,实现多传输模式冲激响应的信道建模;考虑到传统 ITS 信道模型作为统计性建模方法表现出分布表征能力不足的限制性,通过引入具有环境感知能力的 A-CHAIM、EC-MWF 等大气空间模型,从而使本文统一信道模型具有最低可达 5 min 的环境感知能力,并建立动态校正机制。该机制的核心在于:利用传播模型(射线追踪结合跨介质环境模型)实时计算得到反映当前对流层-电离层状态的信道特征参量集合,包括第 i 条路径的时延、多普勒频移和损耗,采用最小二乘拟合算法对目标统计模型预设的散射函数进行优化。该方法突破传统统计模型对局部实测数据的强依赖性,通过环境参数与传输方程的显式关联,提升复杂电磁环境下的信道表征能力,跨介质信道建模流程如图 4 所示。鉴于对流层-电离层时变特性与复杂传播机制的影响,ITS 统计信道模型对动态信道特征的表征能力不足。传播模型精度受限于大气空间环境模型的准确性,导致参数估计存在误差。本文将传播模型与传输模型相结合,具体流程为首先基于传播模型获取的实时信道参数分布仿真结果(初始散射函数与修正散射函数对比如图 5 所示,圆圈表示分布),依据 ITS 模型框架(式(16))推导出初始散射函数;然而,该函数在时延-多普勒二维域内的分布特征与 ITS 模型存在显著偏差,揭示了统计性模型与大气动态环境下仿真获得的数据间的差异。

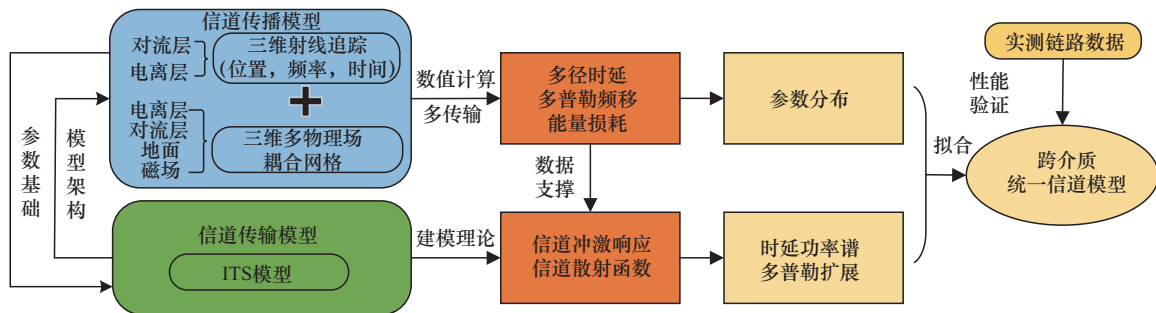


图 4 跨介质信道建模流程

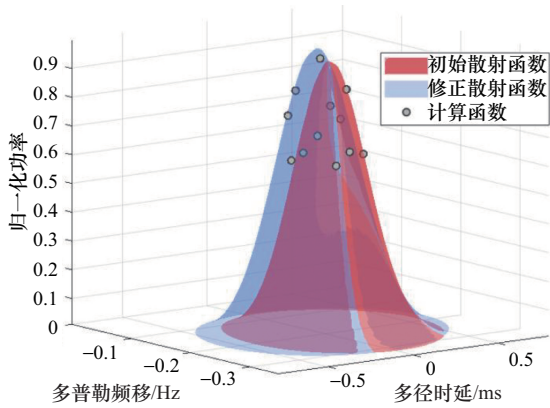


图5 初始散射函数与修正散射函数对比

为了弥合初始模型与仿真数据间的差异，本文采用拟合对散射函数进行修正，其过程如下。

1) 全局拟合。针对对流层-电离层跨介质传播中由多物理过程（如电离层闪烁、对流层折射突变）诱发的复杂多径效应，全局拟合意指在二维散射函数域内，独立且完整地拟合接收点处由上述物理过程产生的每一条可分辨多径分量的时延-多普勒特性。

2) 求解最优幅度因子。在全局拟合过程中，不同传输模式的数据在拟合时幅度维度上可能存在偏差。为克服此问题，通过求解模型与仿真数据间的均方根误差，求解出一个因子对幅度进行缩放。该因子的作用在于评估径间相对关系，精确量化不同多径分量之间的相对幅度比。

3) 构建修正散射函数。初始散射函数经过上述两步得到修正散射函数，该函数精确吻合仿真参数的空间分布特性，并符合传输模型的统计分布规律，从而实现对初始散射函数的有效更新与校正。

5 模型仿真

为验证本文方法的仿真性能，基于前述跨介质

统一信道建模框架，对中国新疆至芬兰库萨莫的 5 000 km 天波超视距链路进行了全链路仿真。

射线追踪仿真参数如表 2 所示。针对短波信道建模对链路的敏感性特征，优选信道稳定性最佳的工作频段进行全链路电磁传播仿真，频率使用如表 3 所示。

仿真参数	参数设置
方位范围	-90°~90°
方位步长	0.25°
仰角范围	3°~50°
仰角步长	0.05°
网格精度	1°×1°×2 km
仿真日期	2024-12-04

时刻	频率/MHz
16:23	7.408
23:04	9.445
04:12	18.400
12:14	16.375
14:16	9.266

仿真采用 IRI2020, A-CHAIM 作为电离层模型，ERA5 作为对流模型，IGRF2020 作为地磁场模型。其中电离层射线追踪采用 PHaRLAP^[35] 工具箱，本文使用版本号为 4.7.0。目标地 50 km^[36] 内认为射线到达了目的地。对目的地的射线进行计算和分析获取仿真结果。对流层-电离层射线追踪与仅电离层射线追踪对比如图 6 所示。

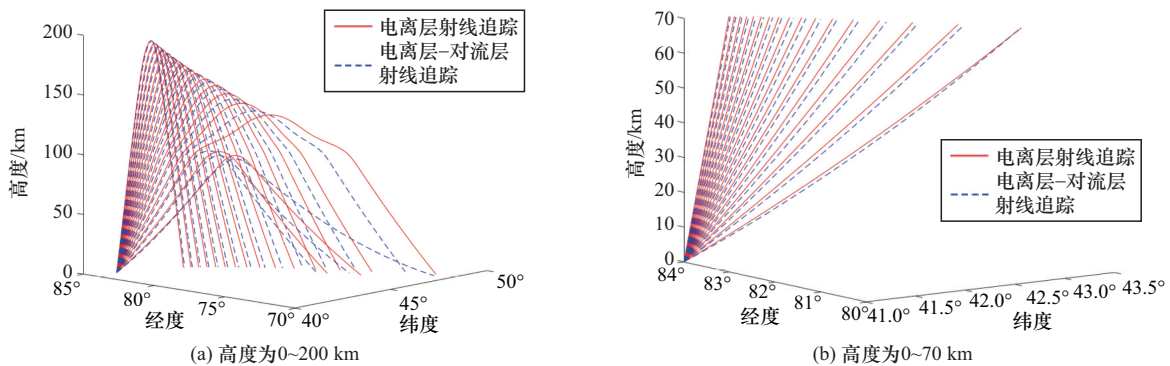


图6 对流层-电离层射线追踪与仅电离层射线追踪对比

通过对比电离层单域射线追踪与跨介质(对流层-电离层)射线追踪的传播轨迹特征,揭示了跨介质效应对电磁波传播的显著影响。实验结果表明:在低仰角传输场景下,射线受对流层折射率梯度影响产生传播轨迹偏移,导致一跳落点位置产生定位偏差。值得注意的是,虽然该介质效应在高仰角射线中单跳的扰动可忽略,但在远距离多跳传播时,其累积误差不可忽视,会致使射线传播路径预测出现偏差。这一发现修正了现有射线追踪模型普遍忽视对流层-电离层耦合建模的理论缺陷,为建立跨介质传播的精确信道模型提供了关键实验依据。通过第4节、第5节信道参数以及模型构建方法获得仿真时刻散射函数,其中能量最高的作为主径,其时延设置为0,电离层-对流层射线追踪散射函数仿真如图7所示,展示了仿真时间中4个时刻的拟合信道散射函数图。

6 模型验证

为验证仿真结果及模型有效性,本文采用实测数据对模型进行对比分析。实测数据来源于重庆邮电大学超视距可信信息传输研究所于中国搭建的超视距传输实证平台,此平台可覆盖西部地区,辐射

一些重要区域(可实现100~5 000 km超视距传输链路),可提供短波信道测量,短波频率探测,机载多模组网电台,短波电台自动抄发报等多种测量与通信设备,具有重庆、新疆、内蒙古、山东、海南等十余个短波和超短波发射与接收能力的平台,配备倒V、八木天线、短波三线宽带双极、对数周期等多种天线。

本文选用新疆发射站进行验证,发射天线采用前高18 m、后高36 m的双层对数周期偶极子天线,其为定向天线,主瓣方位角 345° 。天线发射正向功率约为500 W,反向功率约为15 W,发射频率如表2所示。接收点使用NTi Mega Loop天线,发射信号选取线性调频信号(LFM, linear frequency modulated signal),在芬兰由KiwiSDR2接收机接收。实测测量与仿真设置一致,发送LFM信号探测真实信道情况,实测散射函数如图8所示。基于散射函数的时变特性分析表明,实测信道特性在不同时间节点呈现显著动态变化特征。通过与图7仿真散射函数的对比研究发现,尽管数值模型能够有效模拟实际信道的时变特征,但在06:24与11:42时刻仍存在局部参数差异。该差异主要源于以下两方面因素:其一,电离层与对流层模型

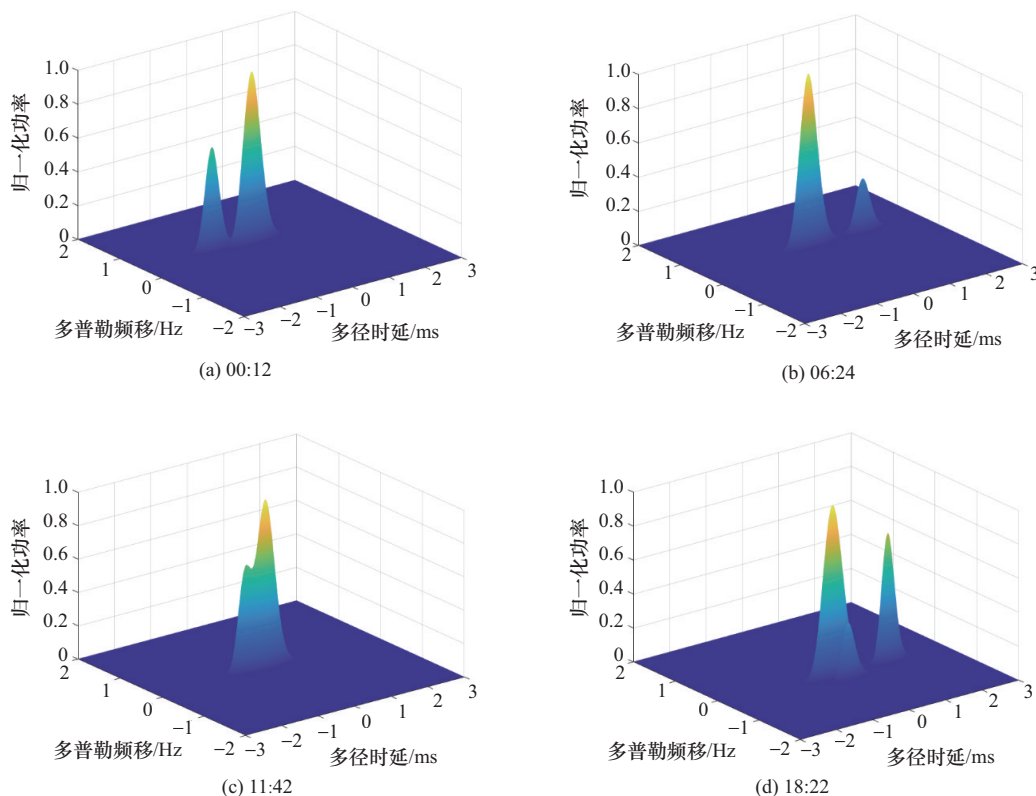


图7 电离层-对流层射线追踪散射函数仿真

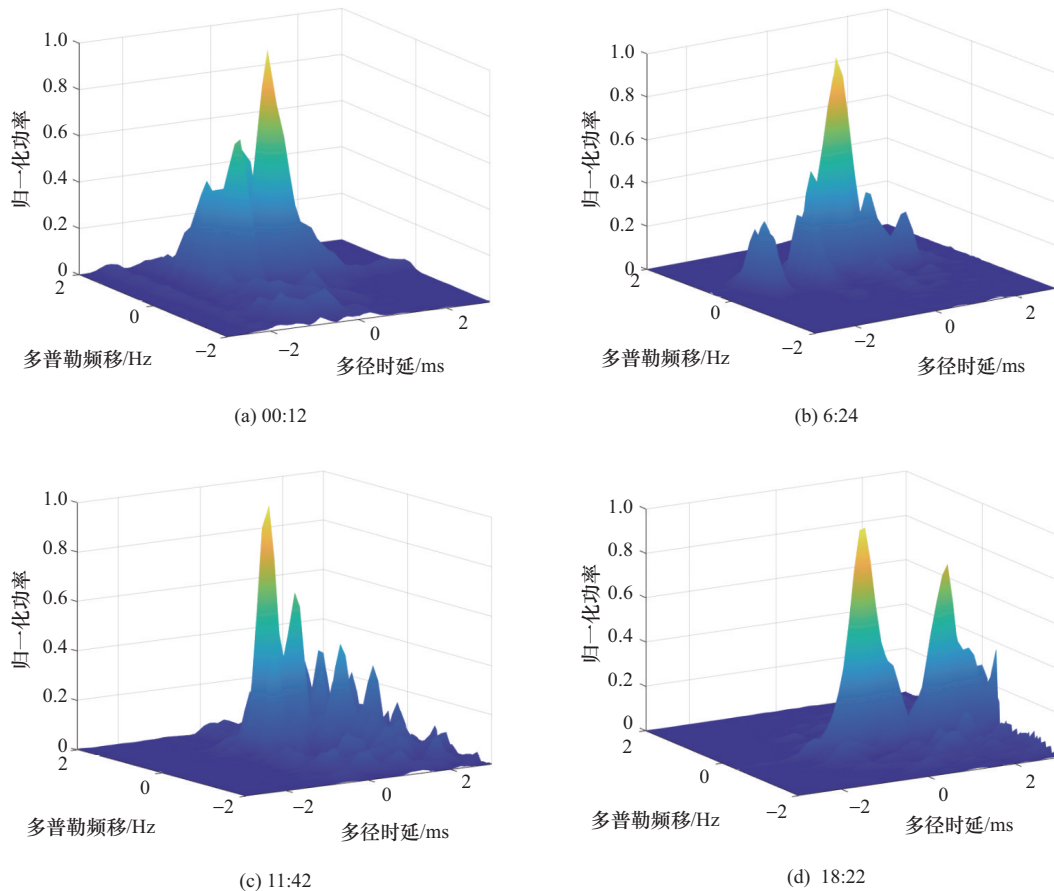


图8 实测散射函数

的参数更新周期（分别为 5 min 和 1 h）与实测环境中的突发扰动及不规则体现象存在同步偏差，导致路径预测偏差和部分路径缺失；其二，仿真建模过程中未充分纳入环境噪声因素，进而导致模型精度下降。为进一步验证本文信道模型的可靠性，本文基于 24 h 连续观测的实测日全时段数据，构建了信道参数对比验证方法：1) 首先依托实测平台进行长达 24 h 的连续数据采集，确保获取覆盖完整昼夜周期、包含丰富信道状态变化的原始音频样本；2) 从这些实测音频中精确提取关键信道特征参数（如时延扩展、多普勒频移）以及散射函数；3) 与采用本文所构建的仿真模型在相同条件下生成的仿真数据进行比对；4) 通过计算并分析两者之间的相关系数、均方根误差等关键指标，评估仿真模型对真实信道特性的趋势一致性与预测精度，为模型的有效性和实用性提供强有力的实证支撑。2024 年 12 月 4 日的实验结果，多普勒频移对比、时延扩展对比和多普勒扩展对比分别如图 9、图 10 和图 11 所示，对比分析结果

直观呈现了实测主径与仿真主径在时延扩展、多普勒频移等关键参数上的匹配度关系，为模型准确度提供了数据支撑。根据对比分析可知，未纳入对流层效应的模型输出呈现相对平滑，而跨介质建模结果能捕捉到更多的扰动细节，其与实测数据的匹配度提升 6 个百分点（平均相关系数从 80% 增至 86%）。这一现象证实对流层折射梯度是引发信道参数非平稳性的关键物理机制，跨介质建模有效解决了传统单介质假设下的路径表征失真问题。实测信道时变梯度在 11:00—12:00 及 18:00—19:00 明显高于仿真结果，该现象主要归因于日出/日落过程引发的电离层扰动效应。晨昏交替期间太阳辐射强度及天顶角的剧烈变化会导致电离层 D/F 层电子密度梯度增大，从而加剧了信道参数的时变特性。其余时段的观测偏差主要源于以下两方面：1) 现有信道模型依赖于模型的准确度以及射线追踪算法的精确度，其突变现象难以完全捕捉，具有一定的误差；2) 本文未考虑硬件与空间环境噪声的累积效应，导致实测数据包

含未建模的随机干扰分量。基于 24 h 连续观测数据的对比验证表明, 该模型在信道参数日变化趋势预测中展现出高吻合度, 其输出结果可为无线通信系统的设计提供有效的参考。

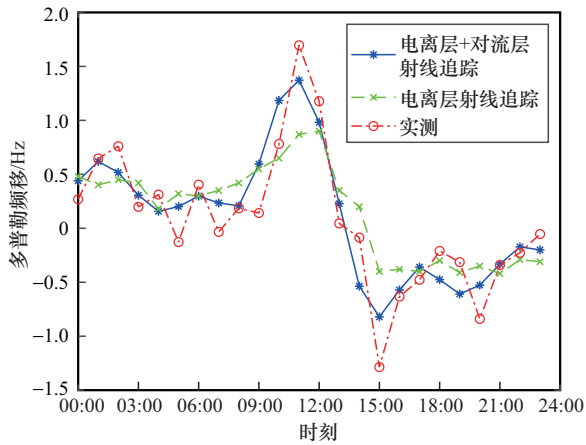


图9 多普勒频移对比

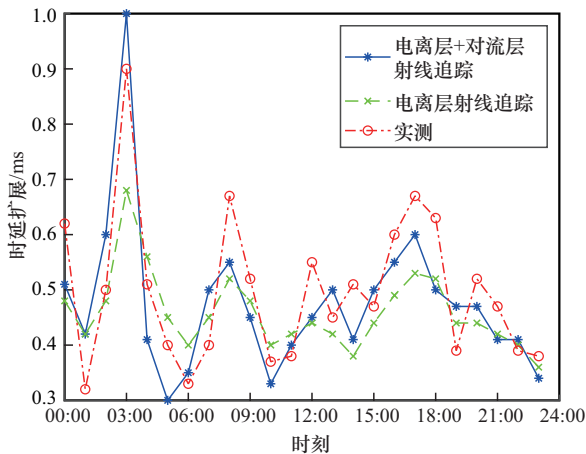


图10 时延扩展对比

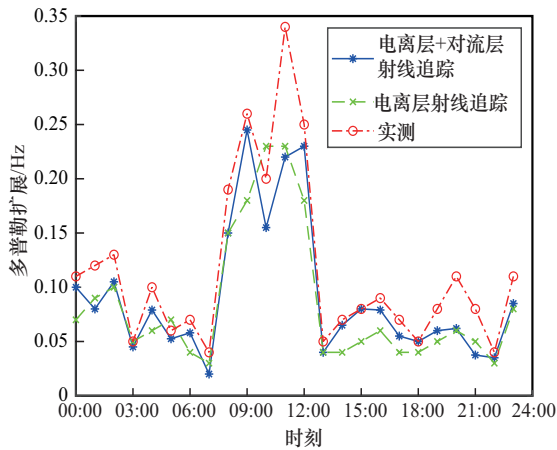


图11 多普勒扩展对比

7 结束语

本文聚焦于跨介质天波超视距通信信道建模, 成功构建了电离层-对流层大气环境模型。通过融合电离层和对流层三维射线追踪算法与大气环境网格化表征, 突破了传统统计模型对实测数据的过度依赖, 有效解决了复杂电离层-对流层结构与大气环境动态耦合所引发的时频双色散建模难题。进一步将多径时延、多普勒频移及路径损耗等关键参数嵌入 ITS 模型框架, 构建了信道散射函数, 并通过全天候 24 h 实测与仿真数据对比, 充分验证了模型的准确性。这一成果为短波通信系统的构建与抗衰老设计提供了重要的分析工具。

然而, 本文也存在一定的局限性。当前大气环境模型的时间分辨率尚难以捕捉瞬时扰动, 这可能导致在某些极端或快速变化的大气环境下, 模型的精度受到影响。同时, 未对噪声进行建模也对数据分析产生了一定的影响, 使模型在实际复杂电磁环境中的表现可能存在偏差。

参考文献:

- [1] 王金龙, 陈瑾, 徐煜华. 短波通信技术研究进展与发展需求[J]. 陆军工程大学学报, 2022, 1(1): 1-7.
WANG J L, CHEN J, XU Y H. On research advances and development requirements of high frequency communication technologies[J]. Journal of Army Engineering University of PLA, 2022, 1(1): 1-7.
- [2] HUNSUCKER R D, HARGREAVES J K. The high-latitude ionosphere and its effects on radio propagation[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2002.
- [3] 薛晓清. 对流层与电离层中电波传播的相关问题研究[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2009.
XUE X Q. Research on issues related to radio wave propagation in the troposphere and ionosphere [D]. Xi'an: Xidian University, 2009.
- [4] TANG W J, CHEN J P, ZHANG Y Z, et al. Refined troposphere delay models by NWM ray-tracing for pseudolite positioning system and their performance assessment[J]. Advances in Space Research, 2024, 73(10): 5017-5030.
- [5] BILITZA D, PEZZOPANE M, TRUHLIK V, et al. The international reference ionosphere model: a review and description of an ionospheric benchmark[J]. Reviews of Geophysics, 2022, 60(4): e2022RG000792.
- [6] THAYAPARAN T, VILLENEUVE H, THEMENS D R, et al. Frequency management system (FMS) for over-the-horizon radar (OTHR) using a near-real-time ionospheric model[J]. IEEE Transactions on Geo-

- science and Remote Sensing, 2022, 60: 5116011.
- [7] SHEN Q, GUAN J Y, ZENG T, et al. Experimental simulation of time and frequency transfer via an optical satellite - ground link at 10^{-18} instability[J]. *Optica*, 2021, 8(4): 471-476.
- [8] 李国军, 马欢, 叶昌荣, 等. 基于 Watterson 模型的短波航空移动信道建模与仿真[J]. *电子与信息学报*, 2022, 44(1): 332-338.
- LI G J, MA H, YE C R, et al. Modeling and simulation of HF aero nautical mobile channel based on Watterson model[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2022, 44(1): 332-338.
- [9] 李国军, 王彦淞, 叶昌荣, 等. 基于 ITS 模型的短波宽带移动信道建模与仿真[J]. *科学技术与工程*, 2024, 24(2): 611-621.
- LI G J, WANG Y S, YE C R, et al. Modeling and simulation of high frequency broadband mobile channel based on ITS model[J]. *Science Technology and Engineering*, 2024, 24(2): 611-621.
- [10] . THAYAPARAN T, HUM R, POLAK J, et al. Ionospheric condition monitoring system for over-the-horizon radar (OTHR) in Canada[C]// *Proceedings of the 2017 18th International Radar Symposium (IRS)*. Piscataway: IEEE Press, 2017: 1-10.
- [11] 吴永宏, 王程林, 任渊博, 等. 基于电离层色散的短波信道多径特性分析[J]. *电子与信息学报*, 2020, 42(8): 2006-2012.
- WU Y H, WANG C L, REN Y B, et al. High frequency channel multipath analysis based on ionosphere dispersion[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2020, 42(8): 2006-2012.
- [12] THAYAPARAN T, KELSALL A, MARCHIONI J, et al. Frequency monitoring system for over-the-horizon radar (OTHR) using the empirical Canadian high Arctic ionospheric model (E-CHAIM)[C]// *Proceedings of the 2019 20th International Radar Symposium (IRS)*. Piscataway: IEEE Press, 2019: 1-8.
- [13] DING J S, CHEN J P, WANG J G, et al. Characteristic differences in tropospheric delay between Nevada Geodetic Laboratory products and NWM ray-tracing[J]. *GPS Solutions*, 2023, 27(1): 47.
- [14] XUE R, WANG Y. An improved high-latitude HF channel model based on ray tracing with time-varying parameter factor[C]// *Proceedings of the 2022 IEEE 8th International Conference on Computer and Communications (ICCC)*. Piscataway: IEEE Press, 2022: 36-40.
- [15] JACKSON J D. *Classical electrodynamics*[M]. New York: John Wiley & Sons, Inc., 1998.
- [16] NILSSON T, BÖHM J, WIJAYA D D, et al. Path delays in the neutral atmosphere[M]. Berlin: Springer, 2013.
- [17] NAFISI V, URQUHART L, SANTOS M C, et al. Comparison of ray-tracing packages for troposphere delays[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2011, 50(2): 469-481.
- [18] DAVIS J L, HERRING T A, SHAPIRO I I, et al. Geodesy by radio interferometry: Effects of atmospheric modeling errors on estimates of baseline length[J]. *Radio Science*, 1985, 20(6): 1593-1607.
- [19] 李佳文, 李慧敏, 郭立新, 等. 基于射线追踪方法的电离层点对点传播问题研究[J]. *电波科学学报*, 2024, 39(1): 91-99.
- LI J W, LI H M, GUO L X, et al. Research on ionospheric point-to-point propagation based on ray tracing method[J]. *Chinese Journal of Radio Science*, 2024, 39(1): 91-99.
- [20] BARNES R I. Some phase path modeling applications of Haselgrove ray tracing[J]. *URSI Radio Science Bulletin*, 2008, 2008(325): 49-55.
- [21] 卞建春. 上对流层/下平流层大气垂直结构研究进展[J]. *地球科学进展*, 2009, 24(3): 262-271.
- BIAN J C. Recent advances in the study of atmospheric vertical structures in upper troposphere and lower stratosphere[J]. *Advances in Earth Science*, 2009, 24(3): 262-271.
- [22] SHERIF A, RABAH M, MOUSA A E, et al. Assessing the performance of IRI-2016 and IRI-2020 models using COSMIC-2 GNSS radio occultation TEC data under different magnetic activities over Egypt[J]. *Journal of Applied Geodesy*, 2024, 18(1): 163-176.
- [23] THAYAPARAN T, MARCHIONI J, KELSALL A, et al. Improved frequency monitoring system for sky-wave over-the-horizon radar in Canada[J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2020, 17(4): 606-610.
- [24] THEMENS D R, JAYACHANDRAN P T, REID B, et al. The limits of empirical electron density modeling: examining the capacity of E-CHAIM and the IRI for modeling intermediate (1 to 30-day) timescales at high latitudes[J]. *Radio Science*, 2020, 55(4): 1-15.
- [25] THAYAPARAN T, VILLENEUVE H, CHIU M. Over-the-horizon radar frequency management system using the assimilation Canadian high Arctic ionospheric model (A-CHAIM) [C]// *Proceedings of the 2023 IEEE International Radar Conference (RADAR)*. Piscataway: IEEE Press, 2023: 1-6.
- [26] ZAWDIE K A, DROB D P, SISKIND D E, et al. Calculating the absorption of HF radio waves in the ionosphere[J]. *Radio Science*, 2017, 52(6): 767-783.
- [27] THAYAPARAN T, IBRAHIM Y, POLAK J, et al. High-frequency over-the-horizon radar in Canada[J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2018, 15(11): 1700-1704.
- [28] 孙浩冉, 刘强, 胡邓华, 等. 基于 ERA5 压力分层气象数据的对流层散射传播斜延迟分析[J]. *空军工程大学学报*, 2024, 25(6): 60-67.
- SUN H R, LIU Q, HU D H, et al. An analysis of troposcatter propagation slant delay based on ERA5 pressure level meteorological data[J]. *Journal of Air Force Engineering University*, 2024, 25(6): 60-67.
- [29] 李磊. 对流层散射超视距传播预测建模与应用[D]. 西安: 西安电子

科技大学, 2016.

LI L. Modeling and application of tropospheric scatter over-the-horizon propagation prediction[D]. Xi'an: Xidian University, 2016.

- [30] BENNETT J A. The calculation of Doppler Shifts due to a changing ionosphere[J]. Journal of Atmospheric and Terrestrial Physics, 1967, 29(7): 887-891.
- [31] THAYAPARAN T, VILLENEUVE H, CHIU M. Modelling absorption loss in the high-latitude ionosphere for over-the-horizon radar (OTHR)[C]//Proceedings of the 2024 International Radar Symposium (IRS). Piscataway: IEEE Press, 2024: 108-113.
- [32] ZENG Y X, TU X, YANG Q, et al. Simulation and frequency selection of improved its aviation channel model based on Nakagami-m function[C]// Proceedings of the 2021 40th Chinese Control Conference (CCC). Piscataway: IEEE Press, 2021: 3374-3379.
- [33] YIP K W, NG T S. A simulation model for Nakagami-m fading channels, $m < 1$ [J]. IEEE Transactions on Communications, 2000, 48(2): 214-221.
- [34] 周思女. 基于 ITS 的宽带短波信道模型的研究[D]. 海口: 海南大学, 2016.
ZHOU S N. Research on broadband shortwave channel model based on ITS[D]. Haikou: Hainan University, 2016.
- [35] GREEN A, LONGLEY W J, OPPENHEIM M M, et al. An open source code for modeling radio wave propagation in earth's ionosphere[J]. Frontiers in Astronomy and Space Sciences, 2025, 12: 1521497.
- [36] CERVERA M A, HARRIS T J. Modeling ionospheric disturbance features in quasi-vertically incident ionograms using 3-D magnetoionic ray tracing and atmospheric gravity waves[J]. Journal of Geophysical Research: Space Physics, 2014, 119(1): 431-440.

[作者简介]



李国军 (1978-), 男, 四川资阳人, 博士, 重庆邮电大学教授、博士生导师, 主要研究方向为复杂恶劣环境超视距无线网络。



詹喆宇 (2000-), 男, 四川资阳人, 重庆邮电大学硕士生, 主要研究方向为短波信道建模。



叶昌荣 (1989-), 男, 重庆人, 博士, 重庆邮电大学副教授, 主要研究方向为短波通信、信号处理、异构链路融合组网等。



刘意 (1996-), 男, 四川南充人, 重庆邮电大学硕士生, 主要研究方向为超视距高频通信信道建模与测量。