复杂海洋环境对流层散射与蒸发波导双机制耦合的路径损耗建模

廖希[1]，杨博文[1]，郑相全[2]，文武[1]
（1. 重庆邮电大学通信与信息工程学院，重庆 400065；2. 中国人民解放军 32008 部队，北京 100141）

摘要：海洋超视距通信中大气波导与对流层散射机制共存，导致电波传播路径损耗难以准确预测。针对现有模型多聚焦单一传播模式、无法有效刻画混合传播机制的问题，构建基于抛物方程的双机制耦合路径损耗模型。利用中尺度数值模式模拟高时空分辨率的非均匀气象参数，通过抛物方程法分别解算蒸发波导与对流层散射机制下的电场强度，进而提出加权因子非相干合成的混合场强求解方法，获得双机制共存的路径损耗。跨海链路实验验证表明，所提模型与实测值吻合良好，平均绝对误差低于 4 dB@300 km，均方根误差低于 5 dB@300 km，精度优于现有模型，可为海洋对流层超视距通信系统设计与性能评估提供支撑。

关键词：超视距通信；对流层散射；蒸发波导；路径损耗；抛物方程法
中图分类号：TN011
文献标志码：A
doi：10.11959/j.issn.1000–436x.TXXB260296

Path loss modeling of the coupling between tropospheric scatter and evaporation duct in complex maritime environments

Liao Xi[1], Yang Bowen[1], Zheng Xiangquan[2], Wen Wu[1]
1. School of Communications and Information Engineering, Chongqing University of Posts and Telecommunications, Chongqing 400065, China
2. PLA Unit 32008, Beijing 100141, China

Abstract: The coexistence of atmospheric duct and tropospheric scattering complicates path-loss prediction for maritime over-the-horizon communication. To address the limitations of single-mode models in representing hybrid propagation, a dual-mechanism coupled path loss model based on the parabolic equation (PE) was developed. A mesoscale numerical model was used to derive spatially inhomogeneous meteorological fields with high spatiotemporal resolution. The PE was then applied to calculate the electric fields associated with evaporation duct and tropospheric scattering. The two field components were incoherently combined using a weighting factor to obtain the path loss under dual-mechanism co-existence. Cross-sea link measurements showed good agreement between the predicted and measured path losses, with a mean absolute error below 4 dB and a root-mean-square error below 5 dB over 300 km. The proposed model provides higher prediction accuracy than existing models and supports the design and performance evaluation of maritime tropospheric over-the-horizon communication systems.

Key words: over-the-horizon communication, tropospheric scatter, evaporation duct, path loss, parabolic equation method

收稿日期：2026–05–22；修回日期：2026–07–30
通信作者：郑相全，zxqcy99@163.com
基金项目：重庆市自然科学基金资助项目（No.CSTB2025YITP-QCRC0045）
Foundation Item：The Natural Science Foundation of Chongqing (No.CSTB2025YITP-QCRC0045)

0 引言

海洋通信是未来空天地海一体化网络的关键支撑技术，在航运安全、海上资源开发及国防等军民领域具有重要战略价值。对流层散射通信因链路稳定性高、抗干扰能力强[1]，被视为建设海上超视距通信走廊的重要手段。海上信道建模与仿真是通信系统链路设计与性能评估的重要基础。海洋大气与海面环境受季节、潮汐、气海温差和风速等多因素影响，呈现高度动态性与复杂性，导致电波传播信道具有非线性、时变性和空间相关性特征；同时，对流层折射结构与散射特性会随气候条件显著变化，进一步加剧传播信道的复杂性。因此，建立能够精准反映海洋大气环境动态变化的对流层散射损耗模型，成为保障海上超视距通信性能的关键。

现有对流层散射信道建模方法分为经验性与确定性模型两类。经验性模型基于实测数据或工程统计构建，具有形式简洁、计算高效的特点，适用于快速系统规划和链路估算，其典型代表为国际电信联盟（International Telecommunication Union, ITU）发布的ITU-R P.617系列建议书中对流层散射平均年中值统计模型[2]。2025年发布的ITU-R P.617-6[3]模型存在明显局限：一是其建模数据主要基于200 MHz~4 GHz的历史链路测量数据，对C、X和Ku频段等高频段的适用性受限；二是采用区域年平均气象参数，难以精准刻画小时级别传播特性的动态变化。为提升预测精度，基于电磁理论的确定性模型逐渐成为研究热点，典型方法包括基于湍流非相干散射理论的L-C模型[4]、射线追踪法[5]和抛物方程法（parabolic equation method, PEM）[6]等，其中PEM兼顾计算效率与数值精度，适于处理复杂大气折射环境电波传播问题，已被广泛应用于海洋大气波导和对流层散射传播研究。然而，受海洋环境中大气结构时变性、空间非均匀性以及多种传播因素耦合作用的影响，电波传播过程呈现出显著时空动态演变特征，如何准确刻画复杂环境下的电波传播特性仍是当前研究面临的基础性难题。

海洋边界层中蒸发波导频发（在赤道和热带地区的发生频率高达90%[7]），是大气波导领域的研究重点。蒸发波导与对流层散射机制存在耦合作用，若仅考虑对流层散射模式，难以全面反映实际海洋环境中的传播特性，可能导致通信系统设计偏差。现有研究已逐步从现象观测、机理解析向混合建模发展。实验分析方面，早期成果揭示了海上超视距传播中多机制共存的特征。Shen等[8]基于11.6 GHz海上链路实测数据指出，海上路径损耗时变特性是多种机制共同作用的结果，其中对流层散射为基底，蒸发波导是产生异常值的关键。王红光等[9]开展L到X频段3条跨海链路（35.8 km、84.4 km和121.2 km）实验，发现蒸发波导信道相比散射信道具有更低的衰落幅度和速率，可显著提升通信质量。上述实测结果说明，蒸发波导可能在特定距离、频率和气象条件下改变散射主导传播机制，证实了双机制共存的事实。但上述研究停留在现象观测与统计描述层面，未建立双机制传播预测模型。机理分析方面，研究者开始关注两种传播机制在空间区域和作用强度上的差异。张沛[10]在理想大气环境下，将PJ模型生成的波导修正折射率剖面嵌入散射PEM，分析蒸发波导环境对目标散射场的影响。结果表明，当两种机制并存时，近距离传播区域主要由蒸发波导机制主导，远区域则以散射模式为主。屈利平等[11]系统论证了混合模式的可行性，并提出了基于对流层散射和蒸发波导混合模式的海上超视距通信应用方法。近年来，研究逐渐从定性分析转向数值建模改进。余洪鑫等[12]提出三维抛物方程法和物理光学的混合方法，考虑了波导环境对雷达目标散射的影响。Lei等[13]用高级传播模型（advanced propagation model, APM）模拟混合模式电波传播，表明当蒸发波导高度（evaporation duct height, EDH）低于7 m且频率超过3 GHz时，混合模型较单一波导模型路径损耗降低约100 dB。该研究揭示了双机制耦合传播的参数敏感性，但建模过程中侧重理想环境下的机理仿真，忽略了气象参数的影响，且未结合实测链路数据开展误差验证。Xu等[14]提出改进型APM模型（IAPMFS），在视距内利用自由空间传播模型，超视距范围使用IAPMFS计算混合机制的路径损耗，结果表明，所提模型在53.435 km链路中绝对误差不超过5 dB和10 dB的比例分别为70.73%和93.18%，但该模型主要针对自由空间传播与蒸发波导传播之间的模式衔接进行修正，对对流层散射机制的贡献考虑不足。具体对比如表1所示。

表 1　　已有文献方法与本文模型对比分析

方法	环境输入参量	多机制耦合方式	验证场景	相较本文模型
文献[10]	理想大气折射率剖面、PJ 模型、大气折射率结构常数	将修正波导折射率剖面嵌入散射 PEM，在单一场求解中体现波导影响	理想环境仿真	缺少长距离实测且未考虑气象参数对电波传播的影响
文献[13]	均匀变化的大气折射率环境	利用已有 APM 模型分析波导和散射的共同作用	理想环境仿真	未考虑气象参数动态变化对电波传播的影响
文献[14]	ERA5 再分析数据获取气象输入、NAVSLaM 模型获取 EDH	利用自由空间传播模型，结合视距范围内的损耗计算改进 APM 模型	53 km 实测数据	侧重提升 APM 模型在自由空间的精度，但对混合传播机制描述不足
本文	FNL 驱动 WRF 逐小时气象场、NPS 模型获取 EDH、大气折射率结构常数	根据陷获角域与主波束重叠关系引入加权因子、非相干耦合两种模式	300 km 实测数据	—

综上，现有研究已从实验、理论和数值模拟3个角度探讨了蒸发波导与对流层散射双机制的作用机理，但仍存在明显不足：一是现有多机制研究主要侧重传播现象解释、参数敏感性分析和不同传播模式之间的工程衔接，对蒸发波导传播分量与对流层散射传播分量相对贡献的定量描述相对有限；二是部分模型采用理想化折射率剖面作为输入，对海洋大气环境时空变化反应能力有限，难以充分描述路径损耗随气象条件变化的动态特征；三是现有混合传播研究多以理论仿真或中短距离链路分析为主，针对远距离跨海通信链路的实测研究相对较少。

针对现有模型的缺陷，本文提出蒸发波导–对流层散射共存场景下的双机制耦合路径损耗模型（dual-mechanism coupled path loss model for evaporation duct and tropospheric scattering, DMC-DSPLM），建模流程分为气象场模拟、折射率剖面生成、波导陷获判决、加权因子非相干合成、路径损耗计算五步。首先，借助天气研究和预报（weather research and forecasting, WRF）模型获取目标海域高分辨率气象参数，叠加大气湍流扰动生成对流层散射的大气折射率剖面，同时基于NPS模型生成蒸发波导环境的大气折射率剖面；其次，结合蒸发波导陷获条件及天线主波束角域与陷获角域的重叠关系，构建两类传播分量的能量分配权重；再次，依据电波是否陷获的判决，分别求解单一对流层散射、波导–散射耦合传播场景的空间电场分布，进一步求解路径损耗；最后，利用约300 km跨海链路连续48 h的实测数据，对模型在真实海洋大气环境下的路径损耗计算结果进行验证，并结合路径损耗时间变化分析模型对散射主导及局部蒸发波导增强现象的响应。

1　双机制耦合下的路径损耗建模

1.1　抛物方程法建模

电波在实际环境中某一位置的路径损耗L可表示为[10]：

$$L = 32.44 + 20\lg f + 10\lg d - 20\lg|u(x,z)| \tag{1}$$

其中，f为工作频率，单位为MHz；d为传播距离，单位为km；$u(x,z)$为传播路径上电波复场值。可见，路径损耗本质在于解算电场分布。

海洋对流层环境中，电波传播受大气折射率时空分布的影响。为兼顾传播角度适应性，本文采用宽角抛物方程（wide-angle parabolic equation, WAPE）对电场进行数值求解，表示为[13]：

$$\frac{\partial u(x,z)}{\partial x} = \mathrm{i}k_0\left(\sqrt{1+\frac{1}{k_0^2}\frac{\partial^2}{\partial z^2}}-1\right)u(x,z) + \mathrm{i}k_0(n-1)u(x,z) \tag{2}$$

其中，$n(x,z)$为折射率；k_0为自由空间波数；x为水平传播距离，z为海拔高度，单位均为m。

采用分步傅里叶变换法将折射效应和绕射效应分别在空间域和谱域中处理，从而实现沿传播方向的逐步推进，表示为：

$$u\left(x_0+\Delta x,z\right) = \mathrm{e}^{\mathrm{i}k_0(n-2)\Delta x}F^{-1}\cdot \left\{\mathrm{e}^{\mathrm{i}\Delta x\sqrt{k_0^2-p^2}}F\left[u\left(x_0,z\right)\right]\right\} \tag{3}$$

其中，$p = k_0\sin\theta$，θ为电波传播方向与水平方向的夹角；$F(\cdot)$和$F^{-1}(\cdot)$分别为傅里叶变换和傅里叶逆变换。通过初始场分布并结合边界条件处理，可获得传播区域内的电场分布。

1.2　DMC-DSPLM模型

在海洋对流层环境中，电波传播通常由多种物理机制共同作用，其中对流层散射传播通过大气湍流不均匀体的随机散射实现超视距通信，具有较好的稳定性，但路径损耗较大；在特定气象条件下，近海面区域由于水汽蒸发与大气热交换作用形成蒸发波导结构，陷获电波并沿波导层内传播，降低路径损耗。蒸发波导与对流层散射共存传播机理示意如图1所示。

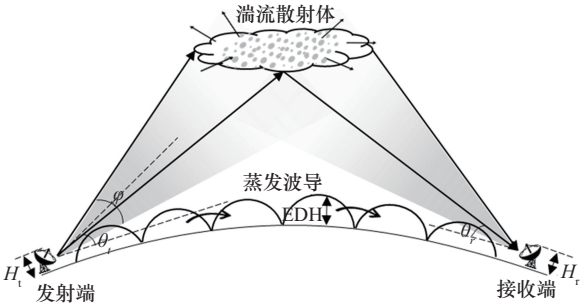


图1　蒸发波导与对流层散射共存传播机理示意

现有模型多局限于单一传播模式，难以准确刻画蒸发波导环境下对流层散射传播效应。本文针对海域蒸发波导下对流层散射电波传播开展研究，如图2所示。

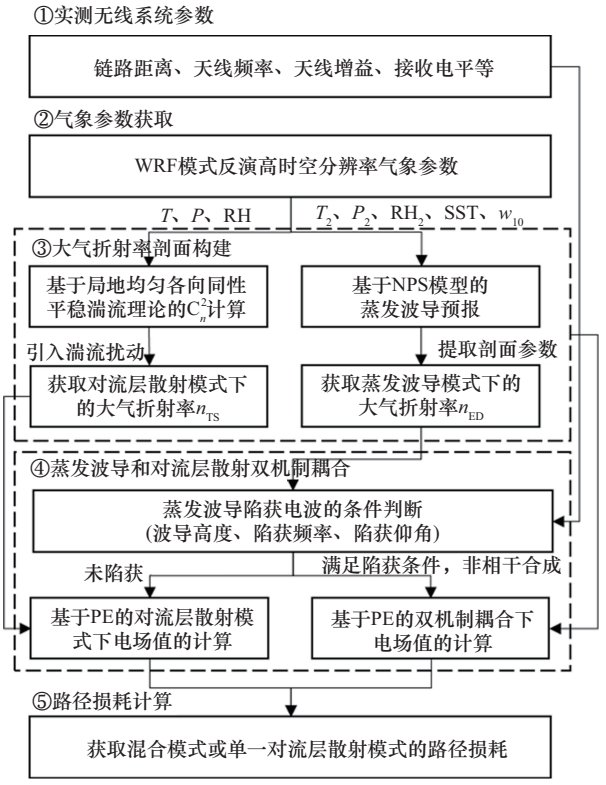


图2　DMC-DSPLM建模原理框架

（1）气象参数获取

利用WRF模式实现对目标区域高时空分辨率气象参数的获取。其中，对流层散射模式所需气象参数为大气温度T、相对湿度RH、大气压强P；蒸发波导模式所需近海面气象参数为海表面温度SST、2 m高度处的大气温度T_2、2 m高度处的大气压强P_2、2 m高度处的相对湿度RH_2以及10 m高度处的风速w_{10}。

（2）大气折射率剖面构建

在已知气象参数基础上，构建不同传播模式下大气折射率剖面模型，为后续电波传播建模提供环境输入。修正折射率剖面$M(z)$表示为：

$$M(z)=77.6\frac{P}{T}-5.6\frac{e}{T}+3.73\times10^5\frac{e}{T^2}+0.157z \tag{4}$$

其中，P为大气压强，单位为hPa；T为大气温度，单位为K；e为水汽压，单位为hPa。

对于对流层散射传播，参考文献[15]中PEM与湍流大气结构模型相结合的建模思路，在背景折射率基础上引入随机扰动，以描述大气湍流不均匀体对电波传播的影响。进一步地，本文利用WRF获得动态气象廓线，计算背景折射率及相关湍流参数，对流层散射大气折射率n_{TS}表示为：

$$n_{\mathrm{TS}}=n_c+n_f \tag{5}$$

其中，n_c为背景大气折射率；n_f为大气湍流引起的折射率扰动，表示为：

$$n_f=\frac{r_{\mathrm{rand}}-0.5}{0.408}\sqrt{S_n(k)} \tag{6}$$

$$S_n(k)=0.249\mathrm{C}_n^2k^{-\frac{5}{3}} \tag{7}$$

其中，r_{rand}为(0,1)之间服从均匀分布的随机数，该值的变化会引起路径损耗的随机波动；$S_n(k)$为一维折射指数谱；$k=\dfrac{2\pi}{L}$，L为湍流尺度；C_n^2为大气折射率结构常数，与温度、比湿、压强等气象参数有关[15]。

对于蒸发波导传播，蒸发波导预测模型是目前获取修正折射率分布的主要方法。目前国内外已有的蒸发波导预测模型包括PJ模型、NPS模型、BYC模型以及伪折射率模型等[16]，其中NPS模型稳定性更强，在蒸发波导预测中应用广泛。NPS模型属于基于莫宁–奥布霍夫相似理论的近海面蒸发波导参数化模型，利用海气界面附近可获取的平均气象量表征边界层湍流交换过程。海表面温度、近海面气温、气压、相对湿度和风速分别反

映海气温差、水汽含量、空气密度状态和动量交换条件，是驱动近海面温度、湿度及修正折射率垂直分布计算的主要输入量。蒸发波导 $M(z)$ 的关键参数包括EDH和蒸发波导强度，EDH为大气修正折射率最小时对应的高度，$|\Delta M|$ 为海表面的大气修正折射率与波导高度处对应的大气修正折射率的差值。

（3）双机制耦合

首先，根据蒸发波导陷获条件判断当前环境中是否存在有效的波导陷获效应：当满足陷获条件时，引入加权因子对两种传播模式进行耦合，计算混合传播模式下的路径损耗；当不满足陷获条件时，仅基于对流层散射模式的场值计算路径损耗。随后，采用WAPE分别对对流层散射传播模式与蒸发波导传播模式进行独立求解，获得对应的电场分布 $u_{\mathrm{TS}}(x,z)$ 和 $u_{\mathrm{ED}}(x,z)$。

在满足蒸发波导电波陷获条件的前提下，发射天线主波束内仅有部分电磁能量耦合进入蒸发波导传播通道。其中，天线发射仰角位于蒸发波导临界陷获角范围内的电场能量能够被波导层有效约束，并以低损耗方式沿近海面完成超视距远距离传播；超出陷获角的剩余能量则主要通过对流层散射机制进行传播。本文仅对初始发射能量进行双机制划分，暂未考虑远距离传播过程中，波导非均匀时空演变、边界层扰动引起的电波逸出，及后续向对流层散射二次转化的动态物理过程。与瞬时复场相干叠加不同，路径损耗建模更关注传播强度的平均统计贡献，不需要解析快速相位起伏所对应的精细时延结构。基于此物理特点，考虑两种传播机制相位不稳定的物理特性，本文引入加权因子，将混合传播模式下的接收场表示为蒸发波导传播贡献与对流层散射传播贡献的非相干合成，表示为：

$$I_{\mathrm{eq}}(x,z)=\omega\cdot|u_{\mathrm{ED}}(x,z)|^2+(1-\omega)\cdot|u_{\mathrm{TS}}(x,z)|^2 \tag{8}$$

其中，$\omega\in[0,1]$ 为加权因子，表示发射能量中满足蒸发波导陷获条件并耦合进入蒸发波导传播通道的比例。令 $|u_{\mathrm{eq}}(x,z)|=\sqrt{I_{\mathrm{eq}}(x,z)}$，将其代入式(1)，可得混合模式电波传播路径损耗。

理论上，加权因子能量分配受发射仰角、临界陷获仰角、天线方向图、波导高度和工作频率等多因素共同约束。考虑到本文面向长距离跨海链路平均路径损耗预测，工程测算中一般仅获取天线主瓣波束宽度，因此本文将主波束角域内能量分布近似为均匀分布。在该近似条件下，耦合进入蒸发波导传播通道的能量占比由陷获角域与主波束角域的重叠范围决定，表示为：

$$\omega_0=\frac{\theta_c+\frac{\varphi}{2}-\theta_t}{\varphi} \tag{9}$$

其中，θ_t 为发射仰角，θ_c 为临界陷获仰角，φ 为发射天线波束宽度，单位均为rad。因此，加权因子 ω 可表示为：

$$\omega=\begin{cases}0, & \omega_0<0\\ \omega_0, & 0\leqslant\omega_0\leqslant1\\ 1, & \omega_0>1\end{cases} \tag{10}$$

当发射频率、天线高度或蒸发波导结构不满足基本陷获条件时，$\omega=0$，模型退化为单一对流层散射传播模式；当发射波束完全处于陷获角范围时，$\omega=1$，模型退化为单一蒸发波导传播模式；当 $0<\omega<1$ 时，表示蒸发波导与对流层散射双机制耦合传播模式。ω 随 θ_c 增大而增大，说明波导强度增强、陷获角域扩宽时，耦合进蒸发波导通道的能量占比提高；ω 随发射仰角 θ_t 增大而减小，代表天线主波束轴向偏离陷获角域区间后，蒸发波导传播分量贡献减弱；天线波束宽度 φ 影响主波束能量与陷获角域内的重叠占比，改变两类传播机制的分配关系。蒸发波导陷获电波需要满足以下条件[17]。

① 存在蒸发波导，即满足 $\frac{\mathrm{d}M}{\mathrm{d}h}<0$。

② 发射天线必须位于EDH范围内。

③ 发射天线仰角 θ_t 小于电波临界陷获仰角 θ_c，θ_c 由几何光学与大气折射理论推导得出，表示为：

$$\theta_c=\sqrt{-2\times10^{-6}\cdot h\cdot\frac{\mathrm{d}M}{\mathrm{d}h}}=\sqrt{2\times10^{-6}\cdot|\Delta M|} \tag{11}$$

其中，$|\Delta M|$ 为蒸发波导强度，单位为M-units。

④ 天线发射频率必须高于电波最低陷获频率 $f_{\min}$，单位为GHz，表示为：

$$f_{\min}=\frac{120\Delta h^{-\frac{3}{2}}}{\sqrt{-\frac{\mathrm{d}M}{\mathrm{d}h}}} \tag{12}$$

其中，Δh 为蒸发波导高度（EDH），单位为m。

2 双机制耦合下路径损耗特性

海洋超视距电波传播路径损耗受大气气象因素、通信系统参数和海洋环境因素等共同影响。其中，大气气象因素通过改变大气折射率结构、蒸发波导高度和湍流强度影响电波传播；通信系统参数如天线高度、工作频率等，通过改变电波与传播环境之间的匹配关系影响电波传播；海洋环境因素如海况、潮汐等，主要通过反射、散射和附加吸收等方式影响路径损耗。

本文构建的混合模型主要基于大气折射率剖面及随机扰动进行建模，并结合WRF模式进行动态模拟获取的逐小时、千米级气象场，进而刻画传播机制随大气结构变化的时空演化过程。因此，模型重点针对影响传播机制的主导物理过程进行建模，未对海洋环境因素进行逐一显式参数化建模，仅作为影响传播特性的外部边界条件加以说明。

2.1 气象参数获取与时空演变规律分析

长距离跨海链路沿线海洋大气环境存在显著时空非均匀性特征，理想情况下需采集链路全程同步气象剖面数据以精细化构建电波传播环境。受限于海上观测条件，长距离跨海链路同步气象剖面实测数据难以获取。已有研究表明，以FNL再分析资料驱动的WRF模式能较好地模拟某海域海洋边界层气象要素的时空演变规律，已广泛应用于波导环境仿真并通过实测完成验证[18]。因此，本文采用WRF输出的气象场作为大气折射率剖面、蒸发波导高度和湍流扰动参数的基础输入。

本文以美国国家大气研究中心提供的FNL再分析数据驱动WRF开展海域气象预报，时间分辨率设为1 h，链路中心点坐标、网格划分随预报区域范围灵活配置。物理参数配置方案为：微物理过程选用WDM6方案，精细刻画大气液态水分布，以支撑电波折射计算，为水汽场模拟提供输入；辐射方案选用GFDL方案，模拟海气界面温度场与界面能量交换过程；核心边界层方案选用MYJ方案，配合Kain-Fritsch积云方案、Noah陆面模式，提升模拟稳定性与地表反馈精度。为系统分析跨海链路气象环境演变特征，本文选取中国某海域北部作为预报区域，完全覆盖2024年12月16日00:00至2024年12月17日23:00共计48 h气象要素的连续仿真。WRF模式参数配置如表2所示。

表2 WRF模式参数设置

区域参数	具体设置
空间分辨率	区域：2层嵌套 水平分辨率：25 km，5 km 垂直分辨率：60层
中心点	20.996° N，111.808° E
网格数	37×31，106×81
时间步长	150 s
微物理过程方案	WDM6
辐射方案	GFDL
边界层方案	MYJ
陆面过程	Noah
积云方案	Kain-Fritsch

两日内近海面大气温度、大气压强、相对湿度和风速均表现出明显时变特征，且存在一定差异，如图3所示。气象参数变化会进一步影响蒸发波导高度、折射率梯度和湍流散射强度。

（1）大气温度：两日气温均在凌晨至清晨时段达到最低值，随后逐渐升高，并于午后（14:00—16:00）达到峰值，之后缓慢回落。相比之下，17日整体气温略高于16日，变化更为平缓。

（2）大气压强：16日大气压强在凌晨至上午时段明显下降，随后逐渐趋于稳定；17日整体波动幅度较小，在傍晚后出现缓慢上升，且整体压强低于16日。

（3）相对湿度：16日相对湿度整体变化呈现出先下降后逐渐上升的趋势，傍晚后维持在相对较高水平；17日相对湿度整体水平明显高于16日，凌晨至中午持续上升并在中午前后达到峰值，随后逐步下降，晚间趋于平稳。

（4）风速：16日风速整体呈现先降后升的变化特征，夜间风速相对较高，清晨至上午逐渐减弱并在中午前后达到低值，随后逐步回升；17日风速整体高于16日，上午逐渐增强，中午略有回落，傍晚后缓慢增强。

针对两类传播模式采用不同的气象参数选取策略。对于对流层散射传播，主要散射贡献来自发射

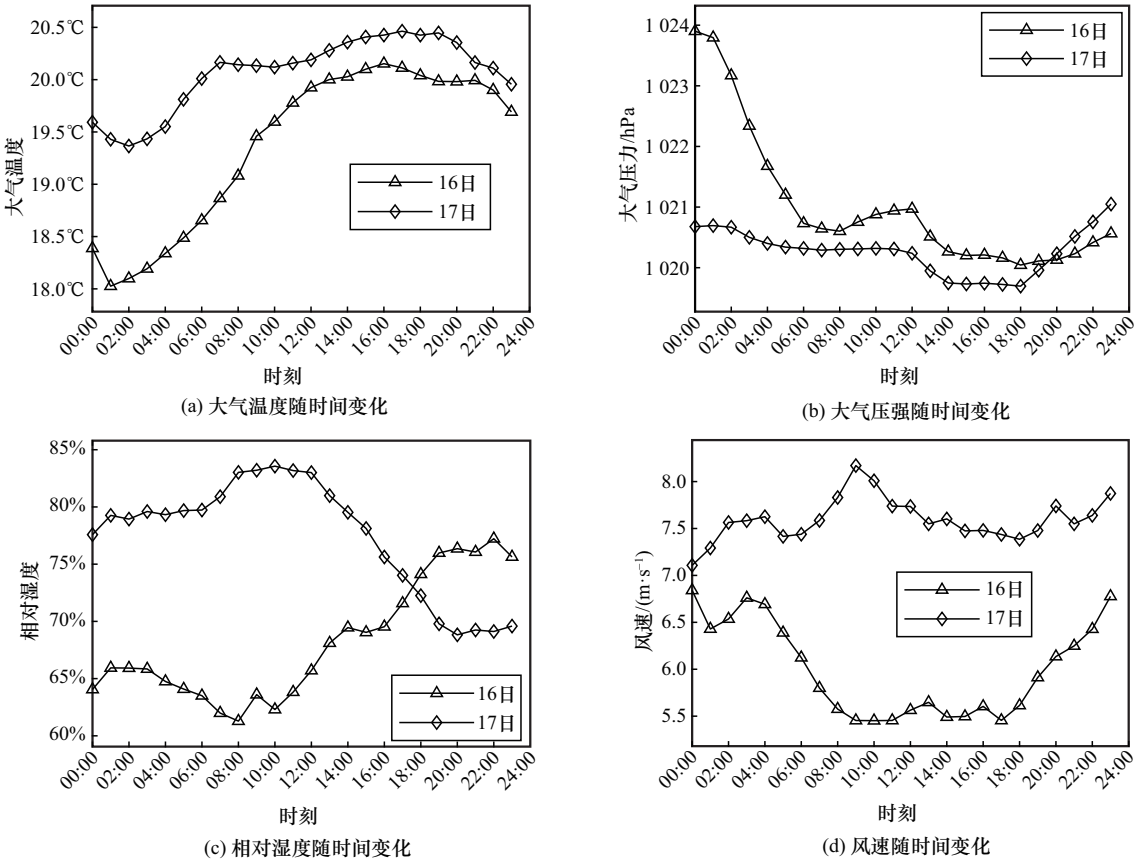


图 3　近海面气象参数随时间变化趋势

波束和接收波束交汇区域，因此选取波束交汇区中心位置的垂直气象廓线作为输入，从而得到 $M(z)$。对于蒸发波导传播，由于波导陷获效应可能作用于整个传播路径，为准确表征全链路的平均波导特征，本文在发射端与接收端之间均匀选取 5 个采样点，提取各点气象参数取平均值，结合 NPS 模型计算 $M(z)$。

2.2　EDH 对路径损耗的影响

EDH 是表征近海面蒸发波导结构的重要参数，能够反映温湿度梯度和修正折射率变化特征。本文通过对不同 EDH 下路径损耗随传播距离变化特性的对比分析，揭示气象条件对电波传播的影响。

散射模式输入参数采用 2.1 节 WRF 模拟得到的 2024 年 12 月 17 日 23 时垂直气象廓线；蒸发波导模式输入采用表 3 所示的近海面气象参数，通过 NPS 模型得到不同 EDH（分别为 15 m、20 m 和 25 m）的 3 组修正折射率剖面。设置系统工作频率为 4 GHz，发射、接收天线高度均为 4 m（即 H_t=H_r=4 m），确保天线位于波导层内，天线仰角为 0°，波束宽度为 3°。仿真结果如图 4 所示。

表 3　　不同 EDH 对应的气象参数设置

空气温度	海面温度	相对湿度	风速 /(m·s⁻¹)	大气压/ hPa	波导 高度/m
26℃	28℃	66%	7	1 020	15
28℃	28℃	55%	7	1 020	20
29℃	28℃	50%	7	1 020	25

图 4 结果表明，蒸发波导模型对 EDH 变化呈现高度敏感性。随着 EDH 增加，陷获能力增强，模型路径损耗明显降低。当 EDH 达到 25 m 时，蒸发波导模型路径损耗低于自由空间路径损耗，波导陷获效果良好。对流层散射模型路径损耗主要由大气湍流引起的折射率随机扰动决定，与 EDH 无关，视距范围外仅随传播距离缓慢增加。随着波导高度增加，两类模型路径损耗曲线相对位置发生变化，表明若仅考虑单一传播机制，无法准确表征电波在对流层环境中的传播效应。DMC-DSPLM 通过在对流层散射研究中引入蒸发波导陷获效应，实现了对不同 EDH 下主导传播机制的连续刻画，避免了单一模型适用范围受限的问题。

2.3　湍流扰动对路径损耗的影响

在进行对流层散射模式路径损耗计算时，单次仿真结果容易受到折射率随机扰动的影响，表现出起伏波动特性。为降低随机性对路径损耗的影响，本文采用蒙特卡洛法处理湍流随机扰动，用中值路径损耗刻画散射损耗，如图5所示。

图5结果表明，不同仿真次数下接收端的中值路径损耗随仿真次数的增加逐渐趋于稳定。当仿真次数达到300次后，路径损耗变化幅度趋于稳定，继续增加仿真次数对结果影响有限。因此，本文后续均采用300次蒙特卡洛仿真的中值路径损耗结果进行机理分析与实验验证。

2.4　通信频率对路径损耗的影响

通信系统参数通过改变电波入射角度分布及频率特性，影响其与传播环境匹配关系。工作频率作为通信系统的核心参数之一，与路径损耗变化存在

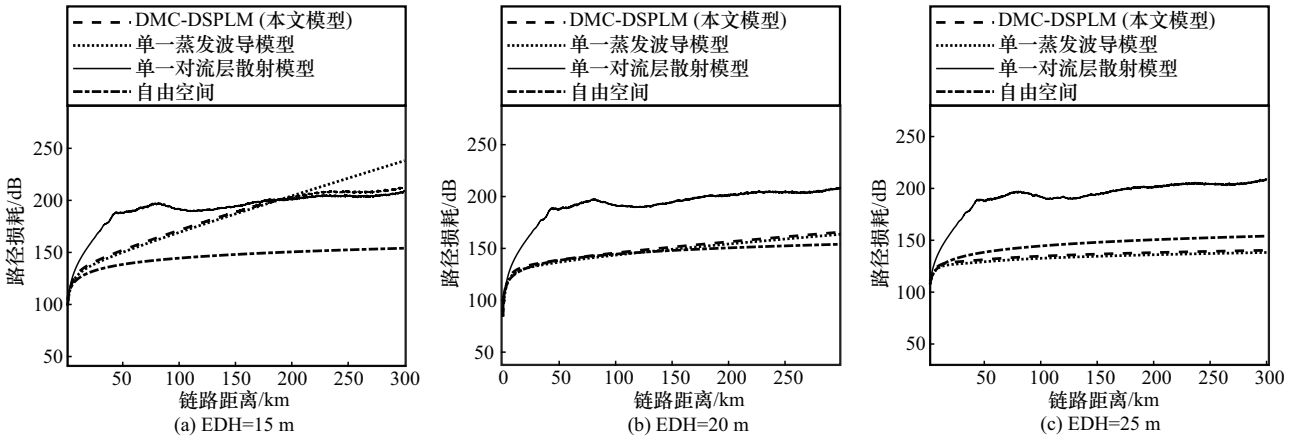
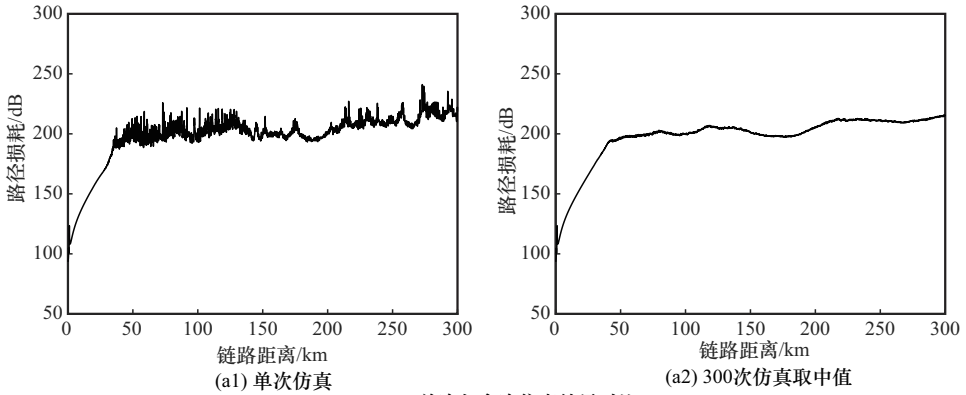


图 4　不同EDH下路径损耗随距离变化



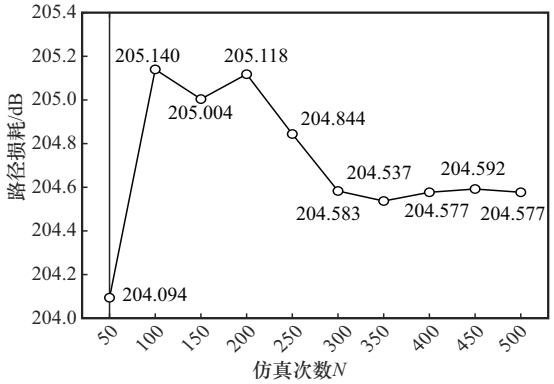


图 5　蒙特卡洛仿真结果对比

紧密关联。在海洋超视距传播场景中，蒸发波导陷获与对流层散射两类机制对频率变化的响应存在差异，因此有必要对不同频段下路径损耗的变化趋势进行分析。

为分析通信频率变化对两类传播分量及其混合模式的影响，本文在其他系统参数保持不变的条件下，分别设置EDH=15 m、EDH=20 m两种典型波导高度，完成3~10 GHz频段的路径损耗仿真，结果如图6所示。仿真设置发射、接收天线高度均为4 m，天线仰角为0°，波束宽度为3°。

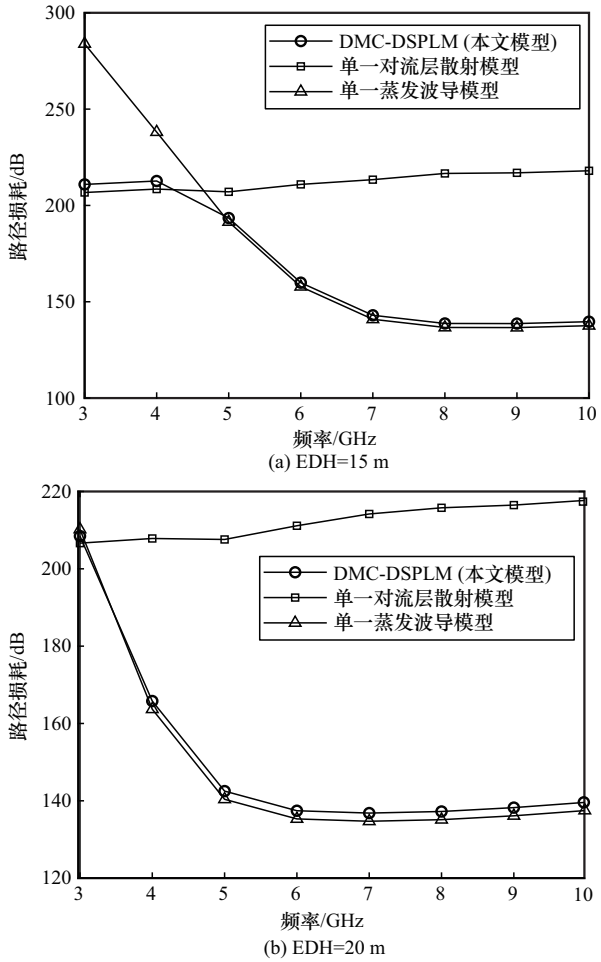


图 6　不同通信频率对路径损耗的影响

由图6可以看出，单一对流层散射模型的路径损耗随频率升高整体呈缓慢增加趋势，说明在该模型中频率变化主要表现为散射传播损耗的逐步增加。相比之下，蒸发波导模型对频率变化更敏感，表现出明显的频率选择性。在EDH=15 m条件下，3~5 GHz频段内波导模型路径损耗较大，表明该波导高度下，蒸发波导对低频电波的陷获能力较弱；随着频率升高至6~9 GHz，路径损耗快速下降，表明电波逐渐进入有效陷获区间；当频率进一步升高至10 GHz后，路径损耗基本趋于平缓并出现轻微回升，表明波导传播并非随频率升高而持续改善，而是存在相对有效的低损耗频段。在EDH=20 m条件下，蒸发波导模型的低损耗区间相比EDH=15 m明显向低频移动，4~6 GHz频段内路径损耗快速下降，并在6 GHz之后进入相对稳定的低损耗区间，说明波导高度的增加增强了低频段电波陷获能力，使最佳传播频段向低频扩展。

DMC-DSPLM的计算结果介于对流层散射模型和蒸发波导模型之间，并随频率变化呈现由散射主导向波导贡献增强的连续转换特征。当频率较低、波导陷获能力不足时，DMC-DSPLM结果更接近对流层散射损耗；当频率进入有效陷获区间后，蒸发波导分量对混合传播路径损耗的影响增强，模型结果逐渐向波导损耗靠近；在高频端同样表现出低损耗区间后轻微回升，与文献[16]仿真通信频率对路径损耗的影响结果一致。上述结果表明，所提模型能够合理地描述不同频段主导传播机制路径损耗的连续刻画。

2.5　天线高度对路径损耗的影响

天线高度决定电波初始辐射位置与蒸发波导层之间的几何关系，是影响蒸发波导陷获效应的重要因素。为分析DMC-DSPLM对天线高度选择性传播特征的刻画能力，本文在其他系统参数保持不变的条件下，对不同天线高度下的接收端路径损耗进行仿真。在EDH=15 m、通信频率为6 GHz的条件下，发射天线高度和接收天线高度在2~20 m范围内同步变化，仿真结果如图7所示。

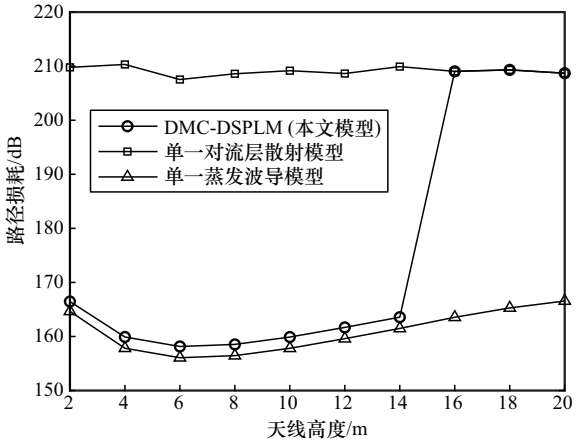


图 7　不同天线高度对路径损耗的影响

图 7 结果表明，单一对流层散射模型对天线高度变化不敏感，路径损耗仅在 208~210 dB 范围内小幅波动。相比之下，单一蒸发波导模型和 DMC-DSPLM 随天线高度变化呈现明显选择性[19]。当天线高度位于 EDH 范围内时，混合模型路径损耗明显低于散射模型，但其变化并非单调：天线高度由 2 m 增至 6~8 m 时路径损耗降低，继续增至 10~14 m 时路径损耗逐渐升高，说明波导层内不同高度处的模态匹配程度存在差异。当天线高度达到 16 m 及以上时，由于超过 EDH=15 m，不满足蒸发波导基本陷获条件，此时 DMC-DSPLM 中加权因子为 0，DMC-DSPLM 退化为对流层散射模式。

3 跨海实验与模型验证

3.1 实验链路部署

为验证 DMC-DSPLM 的有效性，本文结合 2024 年 12 月 16 日至 17 日中国某海域北部实测跨海链路数据开展对比分析。实验共布设 3 条跨海链路，通信频段为 C 频段，链路距离约为 300 km。实验链路参数如表 4 所示。

实测路径损耗表示为：

$$\mathrm{PL} = P_{\mathrm{t}} - P_{\mathrm{r}} + G_{\mathrm{t}} + G_{\mathrm{r}} + G_{\mathrm{a}} - L \tag{13}$$

其中，P_{t} 和 P_{r} 分别为发射功率和接收功率，单位为 dBm；G_{t} 和 G_{r} 分别为发射天线增益和接收天线增益，单位为 dBi；G_{a} 表示系统中的功率放大器增益；L 表示总的线缆损耗，单位为 dB。为减小系统误差，所有系统增益和固定损耗参数均在外场实验前完成标定，并在整个测试期间保持配置一致。因此，不同测点路径损耗计算均采用统一的系统参数，避免因设备增益或馈线损耗变化引起的系统性偏移。

由于实测过程中可能存在设备瞬时故障、外部突发干扰、链路短暂中断或数据记录异常的问题，接收电平中可能包含少量异常值。本文采用 3σ 准则在计算路径损耗前对接收电平数据进行了预处理。图 8 给出了链路 1 两端站接收信号电平去除异常值前后的变化情况。

从时间变化趋势来看，16 日接收电平整体变化较平缓，仅在中午前后轻微波动，表明当日大气环境相对稳定，蒸发波导结构及湍流散射强度变化较小。17 日链路 1 从 B 站到 A 站的接收电平相对稳定，而从 A 站到 B 站的接收电平呈现出显著的时变特性，白天时段接收电平相对稳定，凌晨（00:00—03:00）以及夜间（21:00—23:00）接收电平均出现明显增强，表明近海面折射率结构发生变化，可能形成较强蒸发波导，使部分电波能量被有效陷获并沿波导层传播。从发射频率变化角度来看，高频链路（A 站到 B 站）的接收电平变化幅度更为明显，表明高频电波对蒸发波导结构变化更为敏感，从而在传播环境中表现出更显著的波动特性。

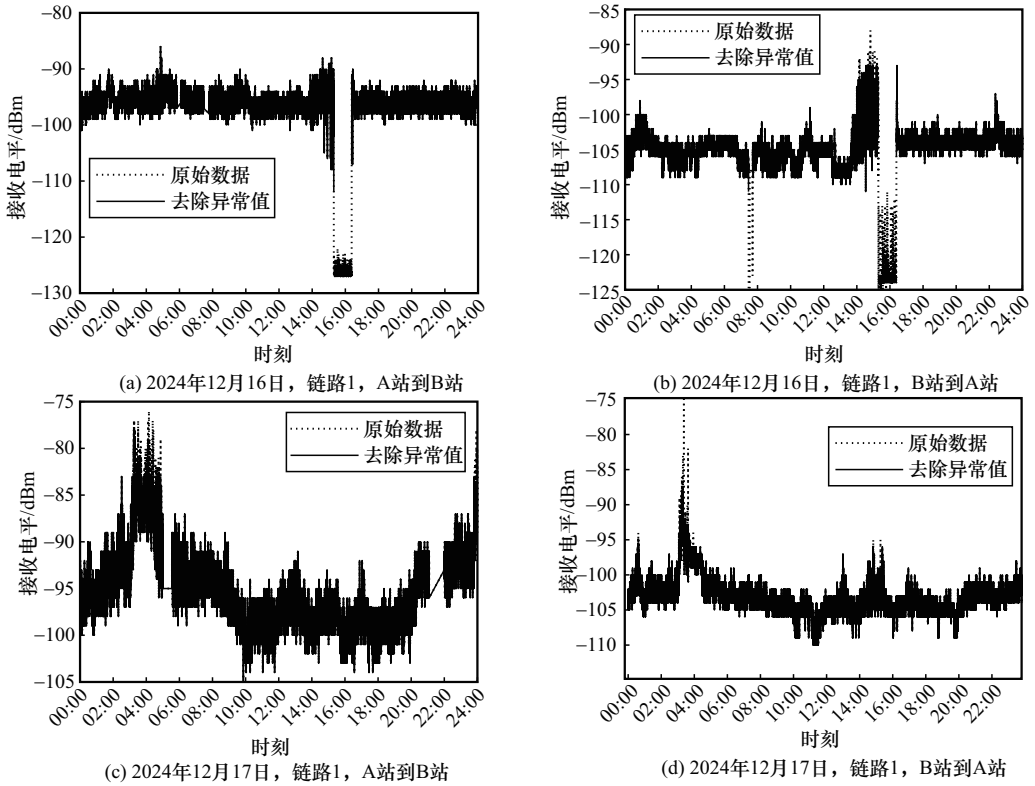
3.2 模型验证

由于链路 3 部署的天线高度较高，分别为 12 m 和 8.5 m，在多数低 EDH 时段容易超出蒸发波导层，有效陷获时段占比不足 10%，不利于分析蒸发波导对电波传播路径损耗的影响。因此本文从上述实验链路中选取链路 1 的 B 站到 A 站和链路 2 的 A 站到 B 站的实测数据，并与模型仿真路径损耗进行对比，采用平均绝对误差（mean absolute error, MAE）和均方根误差（root mean square error, RMSE）作为性能评估指标。图 9 为 DMC-DSPLM 模型、单一对流层散射模型、IAPMFS 模型[14]以及实测数据在两日内路径损耗变化趋势，同时呈现了两日内仿真 EDH 变化情况。

为提高模型对比的代表性，本文复现 IAPMFS 时，在其超视距 APM 计算过程中考虑了对流层散射湍流体的影响，使对比模型能够同时反映蒸发波导环境和远距离散射环境。APM 模型并未分别求解蒸发波导场和对流层散射场，也不能直接反映两类机制的能量贡献比例。

表 4 跨海实验链路参数

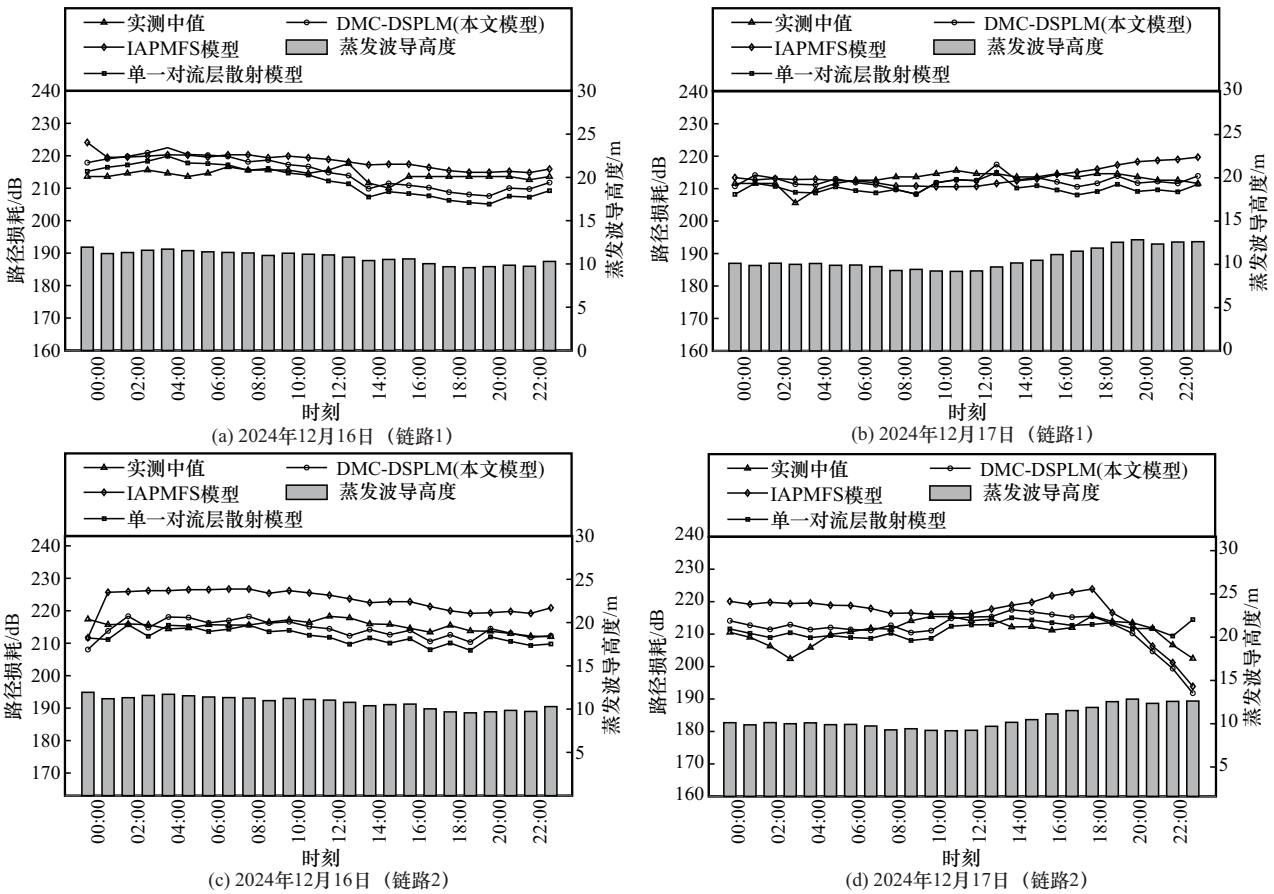
链路	A 站					B 站				
	发射功率/W	天线高度/m	频率/GHz	增益/dBi	仰角	发射功率/W	天线高度/m	频率/GHz	增益/dBi	仰角
链路 1	400	5	6.2	38	1.3°	10	2	4.7	31.8	0.5°
链路 2	400	6.5	6.2	35.3	0.43°	400	4	4.7	35.3	0.75°
链路 3	10	12	6.2	31.8	0.29°	400	8.5	4.7	38	−1.45°



(a) 2024年12月16日，链路1，A站到B站　(b) 2024年12月16日，链路1，B站到A站

(c) 2024年12月17日，链路1，A站到B站　(d) 2024年12月17日，链路1，B站到A站

图 8　接收电平变化趋势



(a) 2024年12月16日（链路1）　(b) 2024年12月17日（链路1）

(c) 2024年12月16日（链路2）　(d) 2024年12月17日（链路2）

图 9　实测路径损耗与模型仿真结果对比

结合图9中3种模型仿真路径损耗、EDH及表5误差统计结果可以看出，DMC-DSPLM与实测结果整体吻合较好。对于链路1，DMC-DSPLM在12月16日和17日的RMSE分别为4.22 dB和2.56 dB，相较于散射模型分别降低约6.4%和23.8%，相较于IAPMFS模型分别降低约9.2%和31.0%；对应MAE分别为3.78 dB和2.15 dB，相较于散射模型分别降低约0.8%和26.9%，相较于IAPMFS模型分别降低约7.6%和27.6%。对于链路2，12月16日DMC-DSPLM的RMSE和MAE分别为3.03 dB和2.24 dB，相较于散射模型分别降低约25.4%和35.4%，相较于IAPMFS模型分别降低约64.8%和73.1%，表明所提模型在该场景下具有较好的预测精度；12月17日DMC-DSPLM的RMSE和MAE分别为4.77 dB和3.78 dB，仍低于IAPMFS模型的8.23 dB和6.99 dB，但高于散射模型对应的3.94 dB和2.86 dB。

结合图9路径损耗随时间变化趋势可以发现，链路2在12月17日21:00—23:00时段内，实测路径损耗出现明显下降，同时DMC-DSPLM和IAPMFS模型均表现出相应路径损耗下降趋势，表明该时段存在蒸发波导陷获，且所提模型能够对波导陷获效应进行表征。虽然从整体误差统计结果来看，17日链路2散射模型的误差更低，但结合路径损耗随时间变化趋势可知，单一散射模型主要反映全天多数时段的散射主导特征，难以表征21:00—23:00时段由蒸发波导增强引起的路径损耗下降过程。DMC-DSPLM和IAPMFS模型在该时段均表现出相应下降趋势，说明双机制模型能够反映局部波导增强对传播损耗的影响。然而，DMC-DSPLM在损耗幅度上仍与实测值存在一定偏差，可能与弱波导或临界波导条件下EDH判断误差、耦合权重对波导贡献估计偏差，以及链路平均气象参数难以刻画水平非均匀波导结构有关。此外，模型未显式考虑海面粗糙度和海况变化对反射、散射及附加损耗的影响，也可能进一步引入路径损耗预测偏差。

综上，当前模型仍存在一定局限：一是模型构建中未考虑海面粗糙度、水平非均匀折射率等因素对路径损耗的影响；二是实验数据主要来自特定海域和有限时间段，尚未全面评估模型在不同季节、不同海域和不同海况下的适用性。

4　模型复杂度与计算效率分析

本文提出的DMC-DSPLM模型核心计算量在于每一距离步进过程中的正逆傅里叶变换，对于每一时刻，波导模式只需进行一次完整的距离步进；散射模式为了使折射率随机扰动对结果的影响尽可能小，采用多次蒙特卡洛仿真对结果取中值，每一次蒙特卡洛实现都需要重复完整的距离步进计算。设模型水平距离步进数为R，蒙特卡洛仿真次数为N，DMC-DSPLM模型单时刻计算复杂度为$O(R(S_{\mathrm{ED}}+N\cdot S_{\mathrm{TS}}))$，若去除蒙特卡洛仿真，仅保留一次散射传播计算，则复杂度降为$O(R(S_{\mathrm{ED}}+S_{\mathrm{TS}}))$。

本文计算平台配置为Intel Core i7-13700K处理器、32 GB内存和Intel UHD Graphics 770集成显卡，采用12个并行进程进行计算以提高效率。设R=3 000，当N=300时，DMC-DSPLM的计算时间为5 345 s；当N=1时，计算时间降低至46 s。结果表明，蒙特卡罗统计处理显著增加了模型复杂度，但能够有效抑制湍流随机扰动造成的路径损耗变化，提升模型的稳定性。

5　结束语

本文提出了一种适用于蒸发波导与对流层散射双机制耦合的路径损耗模型。该模型利用WRF

表5　　模型仿真值与实测值间的误差对比

链路	日期	DMC-DSPLM（本文模型）		单一对流层散射模型		IAPMFS模型		发射站
		RMSE/dB	MAE/dB	RMSE/dB	MAE/dB	RMSE/dB	MAE/dB	
链路1	12月16日	4.22	3.78	4.51	3.81	4.65	4.09	B站
	12月17日	2.56	2.15	3.36	2.94	3.71	2.97	B站
链路2	12月16日	3.03	2.24	4.06	3.47	8.62	8.34	A站
	12月17日	4.77	3.78	3.94	2.86	8.23	6.99	A站

模式获取目标海域高时空分辨率气象参数，引入湍流扰动构建对流层散射大气折射率剖面，结合NPS模型构建蒸发波导大气折射率剖面，并基于WAPE分别计算对流层散射和蒸发波导传播模式的电波场强。在此基础上，依据蒸发波导陷获条件及发射几何关系引入耦合权重，实现混合模式电波传播路径损耗计算。结合中国某海域北部300 km跨海链路实测数据的验证结果表明，所提模型能够较好描述路径损耗随气象环境和蒸发波导高度变化的趋势，在所选验证场景中，MAE低于4 dB，RMSE低于5 dB，多数场景下仿真结果优于现有模型，可为海洋对流层超视距通信系统设计提供建模参考和性能评估依据。未来将引入海面散射模型、耦合WRF三维折射率场的建模方法，以及利用不同季节、不同距离、不同频段和不同海况条件下的实测数据，验证模型准确性和适用性。

参考文献：

[1] 张涛. 对流层散射通信及其应用[M]. 北京: 电子工业出版社, 2020.
Zhang T. Troposcatter communication and application[M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2020.

[2] 李磊, 赵振维, 吴振森, 等. 对流层散射最坏月转换模式研究[J]. 通信学报, 2016, 37(5): 81-87.
Li L, Zhao Z W, Wu Z S, et al. Conversion model of annual statistics to worst-month statistics of troposcatter[J]. Journal on Communications, 2016, 37(5): 81-87.

[3] International Telecommunication Union(ITU). Recommendation P.617-6: Propagation prediction techniques and data required for the design of transhorizon radio-relay systems[S]. Geneva, 2025.

[4] 赵强, 张蕊, 林乐科, 等. 对流层散射传输损耗与大气折射率结构常数相关性研究[J]. 电子学报, 2020, 48(3): 518-523.
Zhao Q, Zhang R, Lin L K, et al. Research on the correlation of troposcatter transmission loss and structure constant of the refractive index[J]. Acta Electronica Sinica, 2020, 48(3): 518-523.

[5] Choi J. Performance comparison of tropospheric propagation models: ray-trace analysis results using worldwide tropospheric databases[R]. DTIC Document, 1997.

[6] Ko H W, Sari J W, Skura J P. Anomalous microwave propagation through atmospheric ducts[J]. Johns Hopkins APL Technical Digest, 1983, 4: 12-26.

[7] 吴佳静, 李清亮, 魏志强, 等. 对流层波导研究进展及人工智能应用综述[J]. 电波科学学报, 2026, 41(1): 17-41.
Wu J J, Li Q L, Wei Z Q, et al. Review on research progress of tropospheric duct and applications of artificial intelligence[J]. Chinese Journal of Radio Science, 2026, 41(1): 17-41.

[8] Shen X, Vilar E. Path loss statistics and mechanisms of transhorizon propagation over a sea path[J]. Electronics Letters, 1996, 32(3): 259-261.

[9] 王红光, 张利军, 郭相明, 等. 蒸发波导微波超视距信道衰落特性研究[J]. 微波学报, 2013, 29(3): 1-5.
Wang H G, Zhang L J, Guo X M, et al. Study of fading characteristics of evaporation duct channel for microwave over-the-horizon propagation[J]. Journal of Microwaves, 2013, 29(3): 1-5.

[10] 张沛. 海上对流层超视距传播及电磁盲区分布研究[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2017.
Zhang P. Study on maritime tropospheric OTH propagation and shadow zone distribution[D]. Xi'an: Xidian University, 2017.

[11] 屈利平, 张海勇, 王华, 等. 基于散射/波导模式的舰船超视距通信分析与应用研究[J]. 通信技术, 2021, 54(1): 9-18.
Qu L P, Zhang H Y, Wang H, et al. Analysis and application of ship's beyond-line-of-sight communication based on troposcatter/evaporation duct mode[J]. Communications Technology, 2021, 54(1): 9-18.

[12] 余洪鑫, 冯菊, 欧阳琪翔, 等. 基于PE-PO混合方法的海洋大气波导环境下电大目标电磁散射研究[J]. 电波科学学报, 2025(1): 29-36.
Yu H X, Feng J, Ouyang Q X, et al. Study on electromagnetic scattering of electrically large targets in ocean atmosphere duct environment based on PE-PO hybrid method[J]. Chinese Journal of Radio Science, 2025(1): 29-36.

[13] Lei X Y, Yang K D, Zhang T, et al. Over-the-horizon propagation characteristics of the coupled evaporation duct and tropospheric scatter channels at different frequencies and antenna heights[C]//Proceedings of the 2025 IEEE 15th International Conference on Signal Processing, Communications and Computing (ICSPCC). Piscataway: IEEE Press, 2025: 1-5.

[14] Xu W J, Zhang H, Yang K D, et al. An improved advanced propagation model considering free-space propagation in evaporation duct environment[J]. IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, 2025, 24(12): 4730-4734.

[15] 陈涛浪, 冯菊, 余洪鑫, 等. 基于抛物方程法的对流层散射通信信道建模及分析[J]. 电波科学学报, 2023, 38(6): 1082-1089.
Chen T L, Feng J, Yu H X, et al. Modeling and analysis of tropospheric scattering communication channel based on parabolic equation method[J]. Chinese Journal of Radio Science, 2023, 38(6): 1082-1089.

[16] 史阳. 蒸发波导建模及微波传输特性研究[D]. 西安: 西北工业大学, 2017.
Shi Y. The modeling of evaporation duct and investigation of microwave propagation characteristics[D]. Xi'an: Northwestern Polytechni-

cal University, 2017.

[17] 吴少华. 大气波导环境中电波传播的建模与仿真[D]. 新乡: 河南师范大学, 2009.
Wu S H. Modeling and simulation of radio propagation in atmospheric duct[D]. Xinxiang: Henan Normal University, 2009.

[18] 吴超. 基于 WRF 的南海海域蒸发波导中尺度数值模拟研究[D]. 天津: 天津大学, 2018.
Wu C. Mesoscale numerical simulation of evaporation duct in the South China Sea based on WRF[D]. Tianjin: Tianjin University, 2018.

[19] Wang S W, Han J, Shi Y, et al. The influence of antenna height on microwave propagation in evaporation duct[C]//Proceedings of the Global Oceans 2020. Piscataway: IEEE Press, 2020: 1-5.

[作者简介]



廖希（1988– ），女，博士，重庆邮电大学教授、博士生导师，主要研究方向为面向 6G 新场景新频段的电波传播与信道建模、广域无线通信、散射反射通信。



杨博文（2002– ），女，重庆邮电大学硕士生，主要研究方向为对流层散射通信。



郑相全（1972– ），男，博士，中国人民解放军 32008 部队高级工程师，主要研究方向为无线通信。



文武（1970– ），男，博士，重庆邮电大学正高级工程师，主要研究方向为无线通信网络、机器学习。