

面向6G可重构智能超表面使能的近场海洋通信信道建模与 信号传播机理研究

江浩^{*①②} 石旺旗^① 朱秋明^③ 束锋^④ WANG Jiangzhou^⑤

^①(南京信息工程大学人工智能学院 南京 210044)

^②(东南大学移动通信国家重点实验室 南京 210096)

^③(南京航空航天大学电子信息工程学院 南京 210016)

^④(海南大学信息与通信工程学院 海口 570228)

^⑤(英国肯特大学工学院肯特郡坎特伯雷市 CT2 7NT)

摘要: 可重构智能超表面(RIS)作为6G移动通信中的潜在关键技术之一,具有低成本、低能耗和易于部署等特点。该文提出将RIS技术引入至海洋无线通信场景中,可使无线传输环境从不可控变为可控。然而,现有的信道模型难以充分揭示RIS使能基站-海面无人船近场通信信号独特的传输机理,信道特性分析方法与建模理论难以在计算准确性与复杂度之间实现平衡。因此,该文通过对RIS使能近场海洋通信中各子信道进行建模,提出空时频多域信号传播机理分析方法,建立RIS使能基站-无人船近场海洋通信参数化统计信道模型,解决现有RIS信道建模方法难以兼顾精度与效率的技术瓶颈问题,提高RIS使能近场海洋通信系统设计过程中的信道模型匹配效率,为我国6G移动通信产业的快速发展提供技术支撑。

关键词: 可重构智能超表面; 近场通信; 信道模型; 海洋通信

中图分类号: TN929.5

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2024)12-4383-08

DOI: [10.11999/JEIT240518](https://doi.org/10.11999/JEIT240518)

Research on Channel Modeling and Characteristics Analysis for RIS-Enabled Near-Field Marine Communications Towards 6G

JIANG Hao^{①②} SHI Wangqi^① ZHU Qiuming^③ SHU Feng^④ WANG Jiangzhou^⑤

^①(School of Artificial Intelligence/School of Future Technology, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044, China)

^②(National Mobile Communications Research Laboratory, Southeast University, Nanjing 210096, China)

^③(College of Electronic and Information Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China)

^④(School of Information and Communication Engineering, Hainan University, Haikou 570228, China)

^⑤(School of Engineering, University of Kent, Canterbury CT2 7NT, U.K)

Abstract: Reconfigurable Intelligent Surfaces (RIS) is considered as one of the potential key technologies for 6G mobile communications, which offers advantages such as low cost, low energy consumption, and easy deployment. By integrating RIS technology into marine wireless channels, it has the capability to convert the unpredictable wireless transmission environment into a manageable one. However, current channel models are struggling to accurately depict the unique signal transmission mechanisms of RIS-enabled base station to ship channels in marine communication scenarios, resulting in challenges in achieving a balance between accuracy and complexity for channel characterization and theoretical establishment. Therefore, this paper develops a segmented channel modeling method for near-field RIS-enabled marine communications, and then proposed a multi-domain joint parameterized statistical channel model for RIS-enabled marine communications. This

收稿日期: 2024-06-25; 改回日期: 2024-08-23; 网络出版: 2024-08-30

*通信作者: 江浩 jianghao@nuist.edu.cn

基金项目: 国家自然科学基金(62471238, 62101275, 61771244, 62071234), 2021年海南省重大科技计划项目(ZDKJ2021022)

Foundation Items: The National Natural Science Foundation of China (62471238, 62101275, 61771244, 62071234), The 2021 Hainan Province Major Science and Technology Plan Project (ZDKJ2021022)

approach focus on addressing the technical bottleneck of existing RIS channel modeling methods that face difficulties in achieving a balance between accuracy and efficiency, ultimately facilitating the rapid development of the 6G mobile communication industry in China.

Key words: Reconfigurable Intelligent Surfaces (RIS); Near-field communications; Channel model; Marine communications

1 引言

伴随第五代(5G)移动通信开始商用,移动数据业务量呈指数增长^[1]。面对超高清移动视频、虚拟/增强现实、无人驾驶、空天地海一体化泛在网络等“高带宽、大连接”新兴业务的快速发展,无线通信对频谱资源的需求激增,全球研究人员开始将目光投向第6代(6G)移动通信网络,探讨未来的通信需求及应对方法^[2]。党的二十大报告中强调指出:“发展海洋经济,保护海洋生态环境,加快建设海洋强国。”因此,面向海洋通信开展无线通信信道理论研究,解决制约海洋通信系统设计与性能评估过程中的瓶颈问题,对于加快形成新质生产力,具有重要的理论价值和现实意义^[3]。

针对大尺度衰落信道中的无线传输方案设计、信道估计、信道容量分析和系统性能评估,以及小尺度多径信道中的链路预算、网络覆盖性能分析、网络/基站位置部署和优化,信道模型始终是系统设计、理论分析、性能评估及优化的重要基石^[4,5]。海洋通信物理层技术虽然通常能够适应空间与时间变化的无线环境,但信号传播本质上是随机的,在很大程度上不可控制。为解决这一难题,当引入智能反射面(Reconfigurable Intelligent Surfaces, RIS)技术于海洋通信信道的发射端与接收端之间时,能够独立地对入射信号的相位(或/和)幅度甚至频率进行调控,解决高频段通信方向性强但覆盖不足的问题^[6,7]。因此,探索RIS无线通信信道新特性,对于解决海洋通信信道环境下时域或频域非平稳、散射体丰富、多移动性等难题具有重要的理论指导意义和应用价值^[8]。在海洋通信场景中,信号传播主要受远通信距离、海浪运动、海面蒸发波导和海面曲度等海洋特殊地理水文环境的影响。因海面通信节点分布稀疏造成的海面散射体的稀疏性,以及节点因海面运动所造成的信道时变非平稳性,均会成为影响海洋通信信道传输机理的重要因素^[9]。研究表明,信号传播机理伴随RIS阵列维度的扩张而不断发生改变^[10]。当RIS阵列尺寸不是很大时,造成发射端/接收端到达RIS阵列的距离大于瑞利距离,则散射体一般分布于RIS信道的远场区域中,此时需要采用平面波模型对信道进行建模,而每条传输路径对应的阵列响应向量仅与路径角度相关。随着RIS阵列单元数目的增加,RIS阵列尺寸变大

致瑞利距离增大,则散射体很可能分布于RIS信道的近场区域中,此时需要采用更精确的球面波模型对信道进行建模,而近场阵列响应向量与散射体所在的具体位置有关。现有不少工作对信号在RIS信道中的传播机理进行了实测和仿真研究,证明RIS信道更加倾向于在近场区域中工作^[11,12]。因此,在探索RIS使能近场海洋通信系统性能时,需要同时考虑信道在时域、频域、空域等多个维度的网络资源。在空间维度上,通过部署RIS技术可以有效地提升网络的能量效率;在时间维度上,通过调整收发机的动态节点能够获取最优的能量效率;在频域维度上,通过增加频率信道数量,提升传输带宽同样实现了能量效率提升。但是,RIS使能近场海洋通信网络是联合多个资源维度的通信系统,由于在基站-无人船通信中引入RIS技术后会衍生出大量的信道参数,为数值仿真带来了严重的计算负担^[13]。尽管现有研究的机理模型正持续优化建模效率,但仍然难以实现高精度、低复杂度的技术指标。此外,在基站-无人船通信信道中,无人船在海平面上进行不规则运动,而现有的海洋统计信道模型并未探索海面波动效应对信号空域、时域和频域非平稳传输特性造成的影响,为满足RIS使能近场海洋通信网络的应用需求带来了困难^[14]。为解决上述难题,本文面向RIS使能海洋无线通信场景,通过对RIS使能近场海洋通信中的基站-RIS阵列子信道以及RIS阵列-无人船子信道分别进行建模,提出空时频多域信号传播机理分析方法,建立RIS使能无人船近场海洋通信参数化统计信道模型,揭示RIS阵列物理属性以及海面波动效应对空域、时域和频域信号传播机理造成的影响,解决现有RIS信道建模方法难以兼顾精度与效率的技术瓶颈问题,提高RIS使能近场海洋通信系统设计过程中的信道模型匹配效率,为我国6G移动通信产业的快速发展提供技术支撑。

2 RIS使能基站-无人船通信信道系统模型

在海洋无线通信场景中,基站和无人船之间的直达传输路径容易被障碍物遮挡,影响通信质量。为解决这一问题,引入RIS技术能够为基站和无人船间的信号传输提供虚拟直达路径,从而提升成本效率、能源效率以及频谱效率。针对图1所示的RIS使能基站-无人船无线通信场景,基站距离水平面的高度表示为 H_0 ,定义基站端和无人船端分别

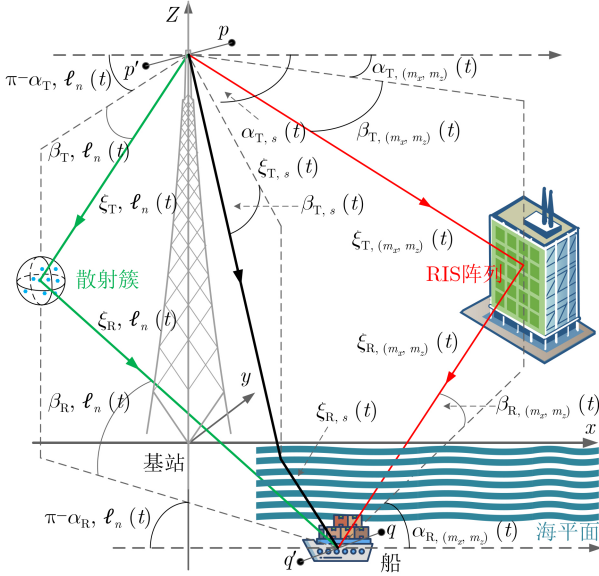


图1 RIS辅助无人船通信的3D通道模型

配置有数量为 P 和 Q 的全向均匀线型天线阵列。定义基站底部中点为全局坐标的原点，将 x 轴的正方向设定为从原点指向无人船的方向， z 轴垂直向上并且 y 轴遵循右手定则。在基站端，天线阵列中点距离坐标轴原点的距离矢量表示为 $\mathbf{d}_T = [0, 0, H_0]^T$ 。基站端第 p 个($p = 1, 2, \dots, P$)天线单元和无人船端第 q 个($q = 1, 2, \dots, Q$)天线单元到达阵列中点的距离矢量表示为

$$\mathbf{d}_{T,p}(\mathbf{d}_{R,q}) = k_{p(q)} \delta_T \begin{bmatrix} \cos \psi_{T(R)}^{\text{ver}} \cos \psi_{T(R)}^{\text{azi}} \\ \cos \psi_{T(R)}^{\text{ver}} \sin \psi_{T(R)}^{\text{azi}} \\ \sin \psi_{T(R)}^{\text{ver}} \end{bmatrix} \quad (1)$$

其中， $k_p = (P - 2p + 1)/2$, $k_q = (Q - 2q + 1)/2$ 。 ψ_T^{azi} 和 ψ_T^{ver} 分别表示基站端线型天线阵列在水平面和竖直面上的夹角； ψ_R^{azi} 和 ψ_R^{ver} 分别表示无人船端线型天线阵列在水平面和竖直面上的夹角。 δ_T 和 δ_R 分别为基站端和无人船端线型天线阵列中任意两相邻单元的间距。

由于海浪的波动特性，无人船的运动速度和运动方向在不同时刻是非平稳特征，因此不能采用单一匀速运动模型来描述无人船的运动状态。定义无人船的速度矢量为 $\mathbf{v}_R = [v_{R,x}(t), v_{R,y}(t), 0]^T$ ，其中， $v_{R,x}(t)$ 和 $v_{R,y}(t)$ 分别表示无人船沿着 x 轴和 y 轴的运动速度分量，计算为

$$v_{R,x}(t) = v_{R,x}(y)(0) + \int_0^t a_{R,x}(y)(t') dt' \quad (2)$$

在式(2)中， $v_{R,x}(0)$ 和 $v_{R,y}(0)$ 分别表示无人船在初始运动阶段沿着 x 轴和 y 轴的速度分量，无人船的加速度表示为

$$a_{R,x(y)}(t) = a_{R,x(y)}(0) + a'_{R,x(y)}(t) \quad (3)$$

其中， $a_{R,x}(0)$ 和 $a_{R,y}(0)$ 分别表示无人船在初始运动阶段沿着 x 轴和 y 轴的加速度分量； $a'_{R,x}(t)$ 和 $a'_{R,y}(t)$ 分别表示为 $a_{R,x}(t)$ 和 $a_{R,y}(t)$ 的梯度。因此，无人船在运动阶段的时变距离矢量计算为

$$\mathbf{d}_R(t) = \begin{bmatrix} d_{R,x}(t) \\ d_{R,y}(t) \\ H_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} D_0 + v_{R,x}(t)t \cos \eta_R^{\text{ver}} \cos \eta_R^{\text{azi}} \\ v_{R,x}(t)t \cos \eta_R^{\text{ver}} \sin \eta_R^{\text{azi}} \\ H_1 \end{bmatrix} \quad (4)$$

其中， D_0 表示无人船端天线阵列中点与坐标轴原点的距离， H_1 表示无人船的高度。 η_R^{azi} 和 η_R^{ver} 分别表示无人船的运动方向在水平面和竖直面上的夹角。

3 RIS阵列子阵列切割算法

在RIS使能基站-无人船通信信道中，由于无人船在RIS信道中一直处于运动状态，使无人船距离RIS阵列的传输距离时刻发生改变，造成RIS使能基站-无人船通信信道在近场区域和远场区域中不断地切换。因此，传统的平面波模型难以准确描述RIS使能基站-无人船通信空域、时域、频域非平稳传输特性。研究表明，在基站和无人船处于近场区域中时，采用球面波模型研究信道特性虽能够保证比较理想的计算准确性，但会造成非常大的计算复杂度和硬件开销。相反地，采用平面波模型研究信道特性虽能够降低计算复杂度，但会使信道特性仿真结果的计算准确性得不到保证。因此，本文面向RIS使能基站-无人船通信系统提出一种RIS子阵列切割方案。如图2所示，通过将RIS阵列划分为多个小尺寸子阵列，能够保证各个子阵列中信道参数求解都能满足平面波模型。定义 M_x 和 M_z 分别表示RIS阵列中横轴和纵轴的单元数目， d_M 为RIS阵列中任意两单元的间距，则RIS使能基站-无人船通信信道的瑞利距离表示为

$$L_{\text{RIS}} = \frac{2 \left((M_x - 1)^2 + (M_z - 1)^2 \right) d_M^2}{\lambda} \quad (5)$$

为降低RIS使能基站-无人船通信信道特性的计算复杂度，需保证基站-RIS阵列间子信道和RIS阵列-无人船间子信道均处于远场区域中，则基站端天线阵列中点到达RIS阵列中点的几何距离 $\xi_{T,\text{RIS}}(t)$ ，以及无人船端天线阵列中点到达RIS阵列中点的几何距离 $\xi_{R,\text{RIS}}(t)$ 应满足如下条件

$$\xi_{T,\text{RIS}}(t) \geq \frac{2 \left(P \delta_T + \sqrt{2} \left(M_{x/z,\text{max}}^{\text{sub}}(t) - 1 \right) d_M \right)^2}{\lambda} \quad (6)$$

$$\xi_{R,\text{RIS}}(t) \geq \frac{2 \left(Q \delta_R + \sqrt{2} \left(M_{x/z,\text{max}}^{\text{sub}}(t) - 1 \right) d_M \right)^2}{\lambda} \quad (7)$$

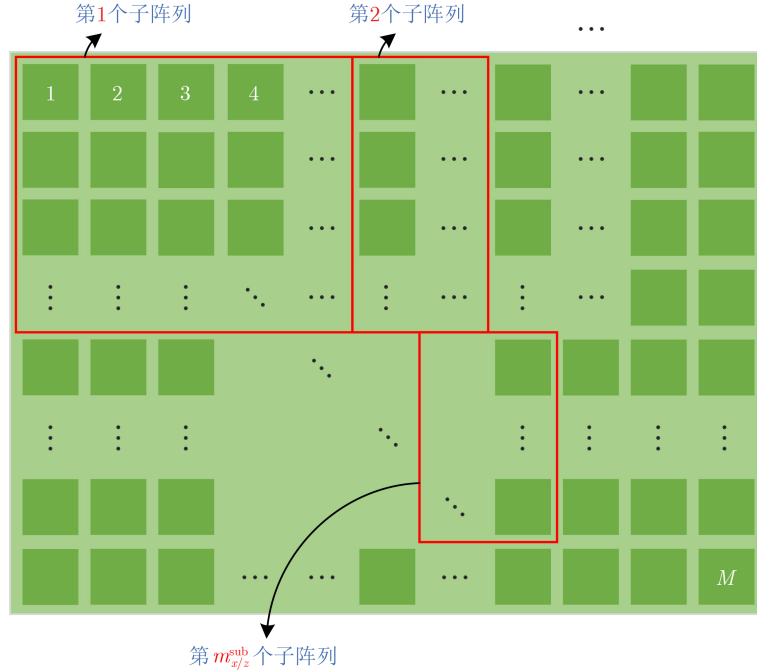


图2 RIS阵列子阵列切割方案示意图

此外，定义 $M_{x/z,\max}^{\text{sub}}(t)$ 表示RIS中的第 x 行第 z 列个子阵列，其中 $x = 1, 2, \dots, M_x$, $z = 1, 2, \dots, M_z$ 。则RIS子阵列 $M_{x/z,\max}^{\text{sub}}(t)$ 应当满足以下约束条件

$$M_{x/z,\max}^{\text{sub}}(t) = \begin{cases} \min \left\{ \left\lfloor \frac{\sqrt{\lambda \xi_{T,\text{RIS}}}}{2d_M} - \frac{P\delta_T}{\sqrt{2}d_M} + 1 \right\rfloor, \left\lfloor \frac{\sqrt{\lambda \xi_{R,\text{RIS}}(t)}}{2d_M} - \frac{Q\delta_R}{\sqrt{2}d_M} + 1 \right\rfloor, M \right\}, \\ \left\{ \left\lfloor \frac{\sqrt{\lambda \xi_{T,\text{RIS}}}}{2d_M} - \frac{P\delta_T}{\sqrt{2}d_M} + 1 \right\rfloor, \left\lfloor \frac{\sqrt{\lambda \xi_{R,\text{RIS}}(t)}}{2d_M} - \frac{Q\delta_R}{\sqrt{2}d_M} + 1 \right\rfloor, M \right\} > 1 \\ 1, & \left\{ \left\lfloor \frac{\sqrt{\lambda \xi_{T,\text{RIS}}}}{2d_M} - \frac{P\delta_T}{\sqrt{2}d_M} + 1 \right\rfloor, \left\lfloor \frac{\sqrt{\lambda \xi_{R,\text{RIS}}(t)}}{2d_M} - \frac{Q\delta_R}{\sqrt{2}d_M} + 1 \right\rfloor, M \right\} = 1 \end{cases} \quad (8)$$

其中， $\lfloor x \rfloor$ 表示不超过 x 的最大整数。式(8)可以理解为，RIS中的第 x 行第 z 列个子阵列需要同时满足发射和接收端的远场条件，并且最低为1。基于上述确定好的RIS子阵列调控单元数目，RIS阵列的维度表示为

$$M_{x/z}^{\text{sub}}(t) = \begin{cases} \frac{M_{x/z} - \text{mod}(M_{x/z}, M_{x/z,\max}^{\text{sub}}(t))}{M_{x/z,\max}^{\text{sub}}(t)} + 1, & \text{mod}(M_{x/z}, M_{x/z,\max}^{\text{sub}}(t)) \neq 0 \\ \frac{M_{x/z}}{M_{x/z,\max}^{\text{sub}}(t)}, & \text{mod}(M_{x/z}, M_{x/z,\max}^{\text{sub}}(t)) = 0 \end{cases} \quad (9)$$

其中， $\text{mod}(a, b)$ 表示整数 a 除以整数 b 所得的余数。由于参数 M_x 和 M_z 能够设置为任意数值，所提算法能够适用于任意调控单元布局的RIS阵列中。

4 RIS使能基站-船通信系统模型

在所提出的信道模型中，基站发出的信号经3种类型链路到达无人船，分别为：(1)RIS路径，即信号到达RIS阵列后经其幅度/相位调控到达无人船；(2)非直达路径，即信号经过基站附近的散射体反射后到达无人船；(3)镜面反射路径，即信号经过海平面镜面反射后到达无人船。在描述

RIS阵列的位置分布时，定义坐标原点到达RIS阵列中心位置的距离矢量为 $\mathbf{d}_{\text{RIS}} = [x_{\text{RIS}}, y_{\text{RIS}}, z_{\text{RIS}}]^T$ 。在散射体路径中，我们在基站周围设置了 L 个散射簇，从坐标原点到第 ℓ 个 ($\ell = 1, 2, \dots, L$) 散射簇中第 n 个 ($n = 1, 2, \dots, \ell_n$) 散射体的距离矢量定义为 $d_{\ell_n} = [x_{\ell_n}, y_{\ell_n}, z_{\ell_n}]^T$ 。此外，在描述镜面反射路径中，提出采用散射体来模拟海平面上的镜面反射点。具体来说，根据基站与无人船的几何位置计算镜面反射路径的到达水平方位角和到达竖直方位角，接着将其作为均值代入高斯分布生成多个到达角，从而模拟海面上的多条镜面反射路径。本文考虑了 S 条镜面反射路

径, 由于无人船的运动导致镜面反射路径不断变化, 定义从坐标原点到第 s 个($s = 1, 2, \dots, S$)镜面反射点的时变距离矢量为 $\mathbf{d}_s(t) = [x_s(t), y_s(t), z_s(t)]^T$ 。

假设上述3种路径相互独立, 则采用矩阵 $\mathbf{H}(t) = [h_{pq}(t, \tau)]_{Q \times P}$ 描述整个系统信道模型的物理特征, 其中 $h_{pq}(t, \tau)$ 表示基站端第 p 个天线与无人船端 $m_{x/z}^{\text{sub}}$ 第 q 个天线之间传输路径的复冲激响应, 表示为

$$\begin{aligned} h_{pq}(t, \tau) = & h_{pq}^{\text{RIS}}(t) \delta \left(\tau - \frac{\|\mathbf{d}_{\text{RIS}} - \mathbf{d}_T\| + \|\mathbf{d}_{\text{RIS}} - \mathbf{d}_R(t)\|}{c} \right) \\ & + h_{pq}^{\text{specular}}(t) \delta \left(\tau - \frac{\|\mathbf{d}_s(t) - \mathbf{d}_T\| + \|\mathbf{d}_s(t) - \mathbf{d}_R(t)\|}{c} \right) \\ & + h_{pq}^{\text{cluster}}(t) \delta \left(\tau - \frac{\|\mathbf{d}_{\text{cluster}} - \mathbf{d}_T(t)\| + \|\mathbf{d}_{\text{cluster}} - \mathbf{d}_R(t)\|}{c} \right) \end{aligned} \quad (10)$$

其中, c 表示光速。

4.1 RIS路径的复冲激响应

基于前文提出的RIS子阵列切割算法, 接下来面向RIS使能基站-无人船无线通信场景提出一种参数化统计信道建模方法。当基站天线阵列中第 p 个单元发出的信号经RIS阵列中第 $m_{x/z}^{\text{sub}}$ 个子阵列作用到达无人船天线阵列中第 q 个单元时, 信道复冲激响应表示为

$$\begin{aligned} h_{pq}^{\text{RIS}}(t) = & \sum_{m_{x/z}^{\text{sub}}=1}^{M_{x/z, \max}^{\text{sub}}(t)} \gamma_{m_{x/z}^{\text{sub}}}(t) e^{j\vartheta_{m_{x/z}^{\text{sub}}}(t)} \\ & \cdot e^{-j\frac{2\pi}{\lambda}(\xi_{p, m_{x/z}^{\text{sub}}}(t) + \xi_{q, m_{x/z}^{\text{sub}}}(t))} \\ & \cdot e^{j\frac{2\pi}{\lambda}(\langle \mathbf{d}_{T,p}, \mathbf{e}_{T, m_{x/z}^{\text{sub}}}(t) \rangle + \langle \mathbf{d}_{R,q}, \mathbf{e}_{R, m_{x/z}^{\text{sub}}}(t) \rangle)} \end{aligned} \quad (11)$$

在式(11)中, $\gamma_{m_{x/z}^{\text{sub}}}(t)$ 和 $\vartheta_{m_{x/z}^{\text{sub}}}(t)$ 分别表示RIS阵列中第 $m_{x/z}^{\text{sub}}$ 个子阵列的调控幅度和调控相位; $\xi_{p, m_{x/z}^{\text{sub}}}(t)$ 和 $\xi_{q, m_{x/z}^{\text{sub}}}(t)$ 分别表示基站天线阵列中第 p 个阵元和无人船天线阵列中第 q 个阵元距离RIS阵列中第 $m_{x/z}^{\text{sub}}$ 个子阵列的路径长度, 计算为 $\xi_{p, m_{x/z}^{\text{sub}}} = \|\mathbf{d}_{m_{x/z}^{\text{sub}}} - \mathbf{d}_T - \mathbf{d}_{T,p}\|$ 和 $\xi_{q, m_{x/z}^{\text{sub}}}(t) = \|\mathbf{d}_{m_{x/z}^{\text{sub}}} - \mathbf{d}_R(t) - \mathbf{d}_{R,q}\|$ 。其中, $\mathbf{d}_{m_{x/z}^{\text{sub}}}$ 表示RIS阵列中第 $m_{x/z}^{\text{sub}}$ 个子阵列距离坐标原点的导向矢量, 表示为 $\mathbf{d}_{m_{x/z}^{\text{sub}}} = [x_{m_{x/z}^{\text{sub}}}, y_{m_{x/z}^{\text{sub}}}, z_{m_{x/z}^{\text{sub}}}]^T$ 。

此外, $\mathbf{e}_{T, m_{x/z}^{\text{sub}}}$ 和 $\mathbf{e}_{R, m_{x/z}^{\text{sub}}}(t)$ 分别表示基站和无人船对应于RIS阵列中第 $m_{x/z}^{\text{sub}}$ 个子阵列的导向矢量, 表示为

$$\mathbf{e}_{T, m_{x/z}^{\text{sub}}} = \begin{bmatrix} \cos \alpha_{T, m_{x/z}^{\text{sub}}}^{\text{ver}} \cos \alpha_{T, m_{x/z}^{\text{sub}}}^{\text{azi}} \\ \cos \alpha_{T, m_{x/z}^{\text{sub}}}^{\text{ver}} \sin \alpha_{T, m_{x/z}^{\text{sub}}}^{\text{azi}} \\ \sin \alpha_{T, m_{x/z}^{\text{sub}}}^{\text{ver}} \end{bmatrix} \quad (12)$$

$$\mathbf{e}_{R, m_{x/z}^{\text{sub}}}(t) = \begin{bmatrix} \cos \alpha_{R, m_{x/z}^{\text{sub}}}^{\text{ver}}(t) \cos \alpha_{R, m_{x/z}^{\text{sub}}}^{\text{azi}}(t) \\ \cos \alpha_{R, m_{x/z}^{\text{sub}}}^{\text{ver}}(t) \sin \alpha_{R, m_{x/z}^{\text{sub}}}^{\text{azi}}(t) \\ \sin \alpha_{R, m_{x/z}^{\text{sub}}}^{\text{ver}}(t) \end{bmatrix} \quad (13)$$

其中, $\alpha_{T, m_{x/z}^{\text{sub}}}^{\text{azi}}$ 和 $\alpha_{T, m_{x/z}^{\text{sub}}}^{\text{ver}}$ 分别表示基站对应于RIS阵列中第 $m_{x/z}^{\text{sub}}$ 个子阵列的离开水平方位角和离开竖直方位角; $\alpha_{R, m_{x/z}^{\text{sub}}}^{\text{azi}}(t)$ 和 $\alpha_{R, m_{x/z}^{\text{sub}}}^{\text{ver}}(t)$ 分别表示无人船对应于RIS阵列中第 $m_{x/z}^{\text{sub}}$ 个子阵列的时变到达水平方位角和时变到达竖直方位角, 上述角度参数可通过几何关系计算得出。

4.2 海面镜面反射路径的复冲激响应

当基站发出的信号经海平面镜面反射到达无人船时, 发射端第 p 个天线单元与接收端第 q 个天线单元间的复冲激响应函数表达式为

$$\begin{aligned} h_{pq}^{\text{specular}}(t) = & \sum_{s=1}^S e^{j\varphi_s - j\frac{2\pi}{\lambda}(\xi_{p,s}(t) + \xi_{q,s}(t))} \\ & \times e^{j\frac{2\pi}{\lambda}(\langle \mathbf{d}_{T,p}(t), \mathbf{e}_{T,s}(t) \rangle + \langle \mathbf{d}_{R,q}(t), \mathbf{e}_{R,s}(t) \rangle)} \end{aligned} \quad (14)$$

其中, φ_s 表示海面随机波动因子。 $\xi_{p,s}(t)$ 和 $\xi_{q,s}(t)$ 分别表示基站端天线阵列中第 p 个阵元和无人船端天线阵列中第 q 个阵元距离海平面的时变路径长度, 计算为 $\xi_{p,s}(t) = \|\mathbf{d}_s(t) - \mathbf{d}_T - \mathbf{d}_{T,p}\|$ 和 $\xi_{q,s}(t) = \|\mathbf{d}_s(t) - \mathbf{d}_R(t) - \mathbf{d}_{R,q}\|$ 。

此外, 在式(14)中, $\mathbf{e}_{T,s}(t)$ 和 $\mathbf{e}_{R,s}(t)$ 分别表示从基站端和无人船端的天线阵列中点到达第 s 个镜面散射体的单位距离矢量, 计算为

$$\mathbf{e}_{T/R,s}(t) = \begin{bmatrix} \cos \alpha_{T/R,s}^{\text{ver}}(t) \cos \alpha_{T/R,s}^{\text{azi}}(t) \\ \cos \alpha_{T/R,s}^{\text{ver}}(t) \sin \alpha_{T/R,s}^{\text{azi}}(t) \\ \sin \alpha_{T/R,s}^{\text{ver}}(t) \end{bmatrix} \quad (15)$$

其中, $\alpha_{T,s}^{\text{azi}}(t)$ 和 $\alpha_{T,s}^{\text{ver}}(t)$ 分别表示镜面反射路径信号的时变离开水平方位角和时变离开竖直方位角; $\alpha_{R,s}^{\text{azi}}(t)$ 和 $\alpha_{R,s}^{\text{ver}}(t)$ 分别表示散射体路径信号的时变到达水平方位角和时变到达竖直方位角, 上述角度参数可通过几何关系计算得出。

4.3 非直达路径的复冲激响应

当基站发出的信号经障碍物反射到达无人船时, 发射端第 p 个天线单元与接收端第 q 个天线单元间的复冲激响应函数表达式为

$$\begin{aligned} h_{pq}^{\text{cluster}}(t) = & \sum_{\ell \in L} \sum_{n=1}^{\ell_N} e^{j\varphi_{\ell n} - j\frac{2\pi}{\lambda}(\xi_{p,\ell n} + \xi_{q,\ell n}(t))} \\ & \times e^{j\frac{2\pi}{\lambda}(\langle \mathbf{d}_{T,p}, \mathbf{e}_{T,\ell n} \rangle + \langle \mathbf{d}_{R,q}, \mathbf{e}_{R,\ell n}(t) \rangle)} \end{aligned} \quad (16)$$

其中, $\varphi_{\ell n}$ 表示独立且均匀分布的随机相位。 $\xi_{p,\ell n}$ 和 $\xi_{q,\ell n}(t)$ 分别表示基站端天线阵列中第 p 个阵元和

无人船端天线阵列中第 q 个阵元距离第 ℓ 个散射簇第 n 个散射体的路径长度, 计算为 $\xi_{p,\ell_n} = \|\mathbf{d}_{\ell_n} - \mathbf{d}_T - \mathbf{d}_{T,p}\|$ 和 $\xi_{q,\ell_n}(t) = \|\mathbf{d}_{\ell_n} - \mathbf{d}_R(t) - \mathbf{d}_{R,q}\|$ 。此外, $\mathbf{e}_{T,\ell_n}$ 和 $\mathbf{e}_{R,\ell_n}(t)$ 分别表示从基站端和无人船端的天线阵列中点到第 ℓ_n 个散射体的单位距离矢量, 计算为

$$\mathbf{e}_{T,\ell_n} = \begin{bmatrix} \cos \alpha_{T,\ell_n}^{\text{ver}} \cos \alpha_{T,\ell_n}^{\text{azi}} \\ \cos \alpha_{T,\ell_n}^{\text{ver}} \sin \alpha_{T,\ell_n}^{\text{azi}} \\ \sin \alpha_{T,\ell_n}^{\text{ver}} \end{bmatrix} \quad (17)$$

$$\mathbf{e}_{R,\ell_n}(t) = \begin{bmatrix} \cos \alpha_{R,\ell_n}^{\text{ver}}(t) \cos \alpha_{R,\ell_n}^{\text{azi}}(t) \\ \cos \alpha_{R,\ell_n}^{\text{ver}}(t) \sin \alpha_{R,\ell_n}^{\text{azi}}(t) \\ \sin \alpha_{R,\ell_n}^{\text{ver}}(t) \end{bmatrix} \quad (18)$$

其中, $\alpha_{T,\ell_n}^{\text{azi}}$ 和 $\alpha_{T,\ell_n}^{\text{ver}}$ 分别表示散射体路径信号的时变离开水平方位角和时变离开竖直方位角; $\alpha_{R,\ell_n}^{\text{azi}}(t)$ 和 $\alpha_{R,\ell_n}^{\text{ver}}(t)$ 分别表示散射体路径信号的时变到达水平方位角和时变到达竖直方位角, 上述角度参数可通过几何关系计算得出。

5 信道传输特性分析

前文推导表明信道复冲激响应函数表达式受时间、空间和频率等因素联合影响, 即在同一时间节点而不同空间节点或不同频点处, 其信道物理特征具有显著的差异性。这是因为RIS阵列中部署的大量阵元、无人船的高速移动以及信号大带宽传输会分别造成RIS使能基站-无人船通信信道在空间、时间频率资源节点具有非平稳特性。因此, 针对RIS使能基站-无人船通信信道非平稳传输特性, 需要从空间节点、时间节点和频率节点处定义信道模型参数, 定义为

$$\rho_{h_{pq}h_{p'q'}}(t, \Delta t) = \frac{\mathbb{E}[h_{pq}(t)h_{p'q'}^*(t + \Delta t)]}{\sqrt{\mathbb{E}[|h_{pq}(t)|^2]\mathbb{E}[|h_{p'q'}(t + \Delta t)|^2]}} \quad (19)$$

其中, $h_{p'q'}(t + \Delta t)$ 表示基站端天线阵列中第 p' 个阵元发出的信号到达无人船端天线阵列中第 q' 个阵元的信道复冲激响应, $\mathbb{E}[\cdot]$ 表示数学期望, $(\cdot)^*$ 为复共轭。本文将RIS通信多域信号传播机理应用于近场通信信道建模中, 提出基于RIS子阵列切割算法的RIS使能基站-无人船通信信道模型, 突破建模精度与计算复杂度难以实现平衡的技术瓶颈, 表征信道在空、时、频多域资源节点处的联合非平稳传输特性与海平面波动效应、RIS阵列物理属性以及散射环境等参数配置间的映射关系。

6 仿真结果与分析

本部分将仿真所提信道模型在不同参数配置下

的传输特性。具体的仿真参数设置为 $f = 5 \text{ GHz}$, $P = 3$, $Q = 4$, $H_0 = 30 \text{ m}$, $H_1 = 3 \text{ m}$, $D_0 = 150 \text{ m}$, $\delta_T = \delta_R = \lambda/2$, $\psi_T^{\text{azi}} = \psi_R^{\text{azi}} = \pi/2$, $\psi_T^{\text{ver}} = \psi_R^{\text{ver}} = 0$, $t = 2 \text{ s}$, $x_{\text{RIS}} = 60 \text{ m}$, $y_{\text{RIS}} = 25 \text{ m}$, $z_{\text{RIS}} = 20 \text{ m}$, $M_x = M_z = 50$, $d_M = \lambda/2$ 。

图3描述了RIS使能基站-无人船通信信道在不同时刻下的建模误差与RIS尺寸之间的机理关系。仿真结果显示, 当RIS尺寸较小时, 造成RIS和基站/无人船之间的距离大于瑞利距离, 此时采用远场平面波模型能够有效地用来分析信道传输特征。在这一条件下, 传统的平面波前信道模型与所提基于子阵列切割方案的信道模型在建模误差性能上表现相近, 能够达到相对同等的精准度。然而伴随着RIS阵列尺寸的不断增大, 造成RIS和基站/无人船之间的距离小于瑞利距离, 此时采用近场球面波模型描述信道传输特征显得更为合适。结合仿真结果比较可以发现, 相对于传输的信道建模方法, 所提出的子阵列切割方案能够在降低计算复杂度的基础上保证建模精度。此外, 由于RIS和无人船之间的距离在不同时间节点会发生变化, 从而会直接影响RIS使能海洋通信信道建模性能。上述仿真结果表明了基于子阵列的建模解决方案, 验证了RIS使能基站-无人船无线通信系统理想的性能。

图4描述了所提信道模型在不同RIS阵列空间位置下的空间互相关特性。仿真结果指出, 伴随接收端天线间距的不断增大, 所提信道模型中不同传输路径间的空间相关性呈现逐步减小的变化趋势。这一仿真结果和文献[15]中的结果拟合得很好, 验证了本文信道模型空间互相关特性推导和仿真结果的准确性。此外, 当RIS阵列的空间位置发生改变

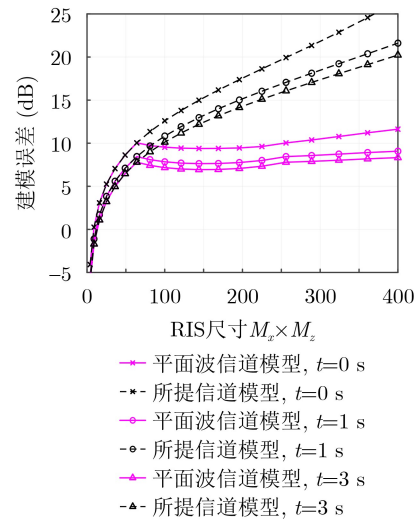


图3 RIS使能基站-无人船通信信道在基于所提子阵列方法与传统方法的建模误差对比

时, 所提信道模型的空间相关性的变化曲线展现出了显著的差异。这一现象揭示了RIS位置对信道空间特性的重要影响, 也提示在后期实际的系统设计中, 可以通过调控RIS的部署位置来优化信道的空间相关性。

图5描述了所提信道模型在不同距离参数 D_0 下的空间互相关特性。仿真结果指出, 当距离参数 D_0 设置不同的数值时, 不同传输路径间的空间互相关特性呈现不同的变化趋势, 表明所提模型在空间域具有非平稳特征。此外, 当距离参数 D_0 的数值大于200 m时, 无人船处于RIS的远场范围内。结合上述仿真结果可以发现, 伴随RIS使能基站-无人船通信信道中的距离参数 D_0 逐渐增加, 所提信道模型的空间相关性也会随之增大, 这一仿真结果与文献[15]中的结论相吻合, 验证所得结果的正确性。

图6描述了所提信道模型在不同运动时刻以及不同RIS阵列空间位置下的时域自相关特性。仿真结果指出, 当给运动时间参数 t 设置不同的数值时, 传输路径间的时域自相关特性呈现不同的变化

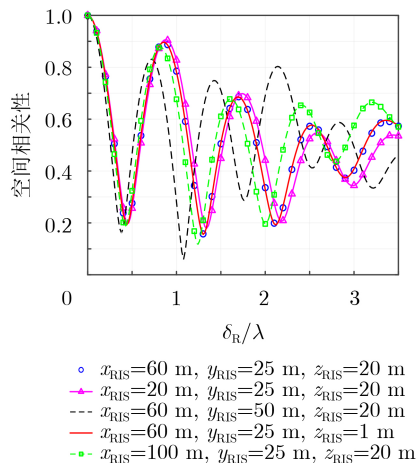


图4 RIS使能基站-无人船通信信道模型在不同RIS阵列空间位置下的空间互相关特性

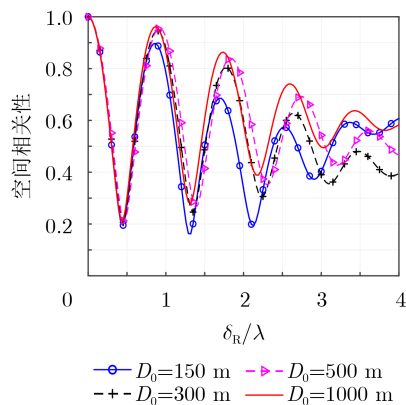


图5 RIS使能基站-无人船通信信道模型在不同距离参数 D_0 下的空间相关特性

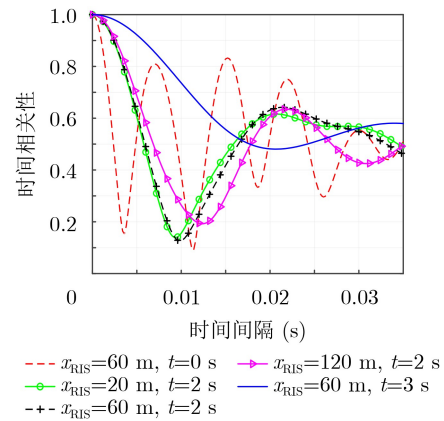


图6 RIS使能基站-无人船通信信道模型在不同时间节点下的时域自相关特性

趋势, 表明所提模型在时间域具有非平稳特征。此外, 伴随着运动时间 t 的不断增大, 所提信道模型的时间相关性曲线下幅明显增大, 这和文献[16]中的仿真结果一致, 验证了本文信道模型时域自相关特性推导和仿真结果的准确性。仿真结果还指出RIS阵列的空间部署位置会对所提信道模型的时间相关性造成显著影响。上述仿真结果能够为后续RIS通信系统的研究设计提供重要的技术参考。

7 结束语

本文面向RIS使能近场海洋通信提出了一种参数化统计信道模型。通过调整信道参数配置, 所提出的信道模型能够描述各种类型的RIS使能海洋通信场景。仿真结果指出, 所提出的子阵列切割算法能够在分析RIS使能无线通信信道传输特性时实现计算准确性和复杂度之间的平衡, 对于未来RIS使能无线通信系统设计具有重要的理论意义。此外, 仿真结果还指出, RIS阵列物理属性以及海面波动效应会对空域、时域和频域信号传播机理造成的影响。上述仿真结果将对RIS技术在未来信息网络中的应用提供重要的技术支撑, 目标形成多项知识产权与理论体系, 助力我国6G移动通信产业的快速发展。

参考文献

- [1] JIANG Wei, HAN Bin, HABIBI M A, *et al.* The road towards 6G: A comprehensive survey[J]. *IEEE Open Journal of the Communications Society*, 2021, 2: 334–366. doi: 10.1109/OJCOMS.2021.3057679.
- [2] YOU Xiaohu, WANG Chengxiang, HUANG Jie, *et al.* Towards 6G wireless communication networks: Vision, enabling technologies, and new paradigm shifts[J]. *Science China Information Sciences*, 2021, 64(1): 110301. doi: 10.1007/s11432-020-2955-6.
- [3] 何雨蓓. 6G海洋通信信道特性分析与建模[D]. [博士论文], 山

- 东大学, 2023. doi: [10.27272/d.cnki.gshdu.2023.007461](https://doi.org/10.27272/d.cnki.gshdu.2023.007461).
- HE Yubei. Channel characteristic analysis and channel modeling for 6G maritime communications[D]. [Ph. D. dissertation], Shandong University, 2023. doi: [10.27272/d.cnki.gshdu.2023.007461](https://doi.org/10.27272/d.cnki.gshdu.2023.007461).
- [4] JIANG Hao, MUKHERJEE M, ZHOU Jie, *et al.* Channel modeling and characteristics for 6G wireless communications[J]. *IEEE Network*, 2021, 35(1): 296–303. doi: [10.1109/MNET.011.2000348](https://doi.org/10.1109/MNET.011.2000348).
- [5] 孙华丽, 孟维晓, 张乃通. 空时频MIMO信道建模与实现[J]. 电子与信息学报, 2008, 30(9): 2279–2282. doi: [10.3724/SP.J.1146.2007.00209](https://doi.org/10.3724/SP.J.1146.2007.00209).
- SUN Huali, MENG Weixiao, and ZHANG Naitong. Modeling and implementation of space-time-frequency MIMO channel[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2008, 30(9): 2279–2282. doi: [10.3724/SP.J.1146.2007.00209](https://doi.org/10.3724/SP.J.1146.2007.00209).
- [6] 陈天贝, 李娜, 陶小峰. 低开销智能反射面辅助无线通信研究综述[J]. 中兴通讯技术, 2023, 29(6): 29–38. doi: [10.12142/ZTETJ.202306006](https://doi.org/10.12142/ZTETJ.202306006).
- CHEN Tianbei, LI Na, and TAO Xiaofeng. Survey on low-overhead reconfigurable intelligent surface assisted wireless communication[J]. *ZTE Technology Journal*, 2023, 29(6): 29–38. doi: [10.12142/ZTETJ.202306006](https://doi.org/10.12142/ZTETJ.202306006).
- [7] 李贵勇, 杜一舟, 王丹. 可重构智能表面辅助的多用户通信宽带信道估计[J]. 电子与信息学报, 2023, 45(7): 2443–2450. doi: [10.11999/JEIT220775](https://doi.org/10.11999/JEIT220775).
- LI Guiyong, DU Yizhou, and WANG Dan. Wideband channel estimation for multiuser communication based on reconfigurable intelligent surface assisted[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2023, 45(7): 2443–2450. doi: [10.11999/JEIT220775](https://doi.org/10.11999/JEIT220775).
- [8] 张在琛, 江浩. 智能超表面使能无人机高效通信信道建模与传输机理分析[J]. 电子学报, 2023, 51(10): 2623–2634. doi: [10.12263/DZXB.20221352](https://doi.org/10.12263/DZXB.20221352).
- ZHANG Zaichen and JIANG Hao. Channel modeling and characteristics analysis for high energy-efficient RIS-assisted UAV communications[J]. *Acta Electronica Sinica*, 2023, 51(10): 2623–2634. doi: [10.12263/DZXB.20221352](https://doi.org/10.12263/DZXB.20221352).
- [9] BASAR E and YILDIRIM I. Reconfigurable intelligent surfaces for future wireless networks: A channel modeling perspective[J]. *IEEE Wireless Communications*, 2021, 28(3): 108–114. doi: [10.1109/MWC.001.2000338](https://doi.org/10.1109/MWC.001.2000338).
- [10] 黄子轩, 姚刘嘉, 游昌盛. 超大规模智能反射面辅助的近场移动通信研究[J]. 无线电通信技术, 2024, 50(2): 263–268. doi: [10.3969/j.issn.1003-3114.2024.02.006](https://doi.org/10.3969/j.issn.1003-3114.2024.02.006).
- HUANG Zixuan, YAO Liujia, and YOU Changsheng. Research on extremely large-scale IRS assisted near-field mobile communications[J]. *Radio Communications Technology*, 2024, 50(2): 263–268. doi: [10.3969/j.issn.1003-3114.2024.02.006](https://doi.org/10.3969/j.issn.1003-3114.2024.02.006).
- [11] ZHANG Haiyang, SHLEZINGER N, GUIDI F, *et al.* 6G wireless communications: From far-field beam steering to near-field beam focusing[J]. *IEEE Communications Magazine*, 2023, 61(4): 72–77. doi: [10.1109/MCOM.001.2200259](https://doi.org/10.1109/MCOM.001.2200259).
- [12] CUI Mingyao, WU Zidong, LU Yu, *et al.* Near-field MIMO communications for 6G: Fundamentals, challenges, potentials, and future directions[J]. *IEEE Communications Magazine*, 2023, 61(1): 40–46. doi: [10.1109/MCOM.004.2200136](https://doi.org/10.1109/MCOM.004.2200136).
- [13] YUAN Jiwei, QIAN Hongbao, and WANG Donghai. Study on application of channel propagation model for maritime communication[C]. 2022 IEEE Asia-Pacific Conference on Image Processing, Electronics and Computers, Dalian, China, 2022: 855–859. doi: [10.1109/IPEC54454.2022.9777553](https://doi.org/10.1109/IPEC54454.2022.9777553).
- [14] MA Zhangfeng, AI Bo, HE Ruisi, *et al.* Modeling and analysis of MIMO multipath channels with aerial intelligent reflecting surface[J]. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 2022, 40(10): 3027–3040. doi: [10.1109/JSAC.2022.3196112](https://doi.org/10.1109/JSAC.2022.3196112).
- [15] SUN Guiqi, HE Ruisi, MA Zhangfeng, *et al.* A 3D geometry-Based non-stationary MIMO channel model for RIS-assisted communications[C]. 2021 IEEE 94th Vehicular Technology Conference, Norman, OK, USA, 2021: 1–5. doi: [10.1109/VTC2021-Fall52928.2021.9625374](https://doi.org/10.1109/VTC2021-Fall52928.2021.9625374).
- [16] SUN Yingzhuo, WANG Chengxiang, HUANG Jie, *et al.* A 3D non-stationary channel model for 6G wireless systems employing intelligent reflecting surfaces with practical phase shifts[J]. *IEEE Transactions on Cognitive Communications and Networking*, 2021, 7(2): 496–510. doi: [10.1109/TCCN.2021.3075438](https://doi.org/10.1109/TCCN.2021.3075438).
- 江 浩: 男, 副教授, 研究方向为RIS无线信道建模与仿真、近场通信、高效通信等.
- 石旺旗: 男, 硕士生, 研究方向为RIS无线通信信道建模与仿真等.
- 朱秋明: 教授, 研究方向为无线信道测量建模与数字孪生、电磁频谱态势可视化测绘与认知等.
- 束 锋: 男, 教授, 研究方向为RIS辅助的方向调制、空间调制、中继等.
- WANG Jiangzhou: 中国工程院外籍院士, 英国皇家工程院院士、IEEE Fellow、IET Fellow, 英国肯特大学教授, 研究方位为移动通信.

责任编辑: 马秀强