

6G新频段新场景信道测量与建模

黄杰^{1,2}

¹东南大学 信息科学与工程学院
移动通信全国重点实验室

²紫金山实验室

邮箱: j_huang@seu.edu.cn

微信: Ademore

提纲

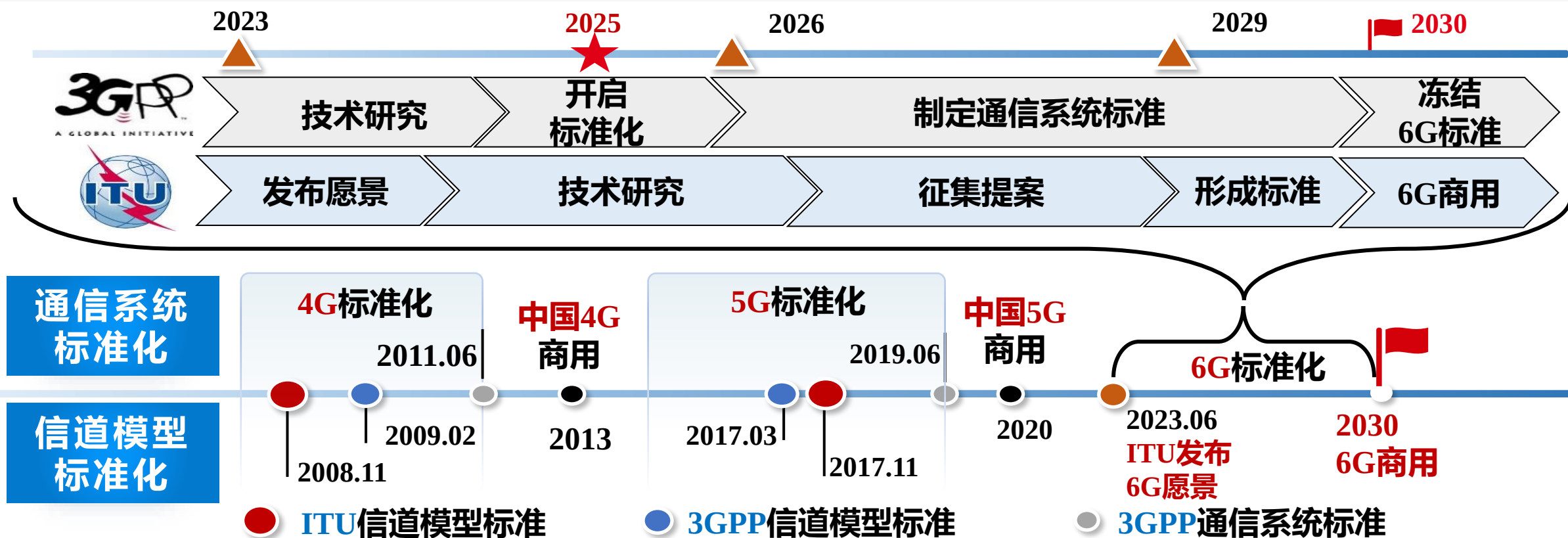
一、6G愿景与信道特性

二、6G多频段多场景信道测量与建模

三、6G普适几何随机信道模型

无线信道研究的基础性与重要性

- **信道理论**是无线通信的**基础理论**
- **信道模型**是通信系统设计、性能评估、部署和标准化的**基础**
- 历代通信系统标准化，**信道模型标准化先行**

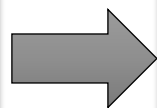


信道研究有助于巩固提升中国在通信领域的国际引领地位!

6G应用场景 (ITU): 量级提升 + 要素融合

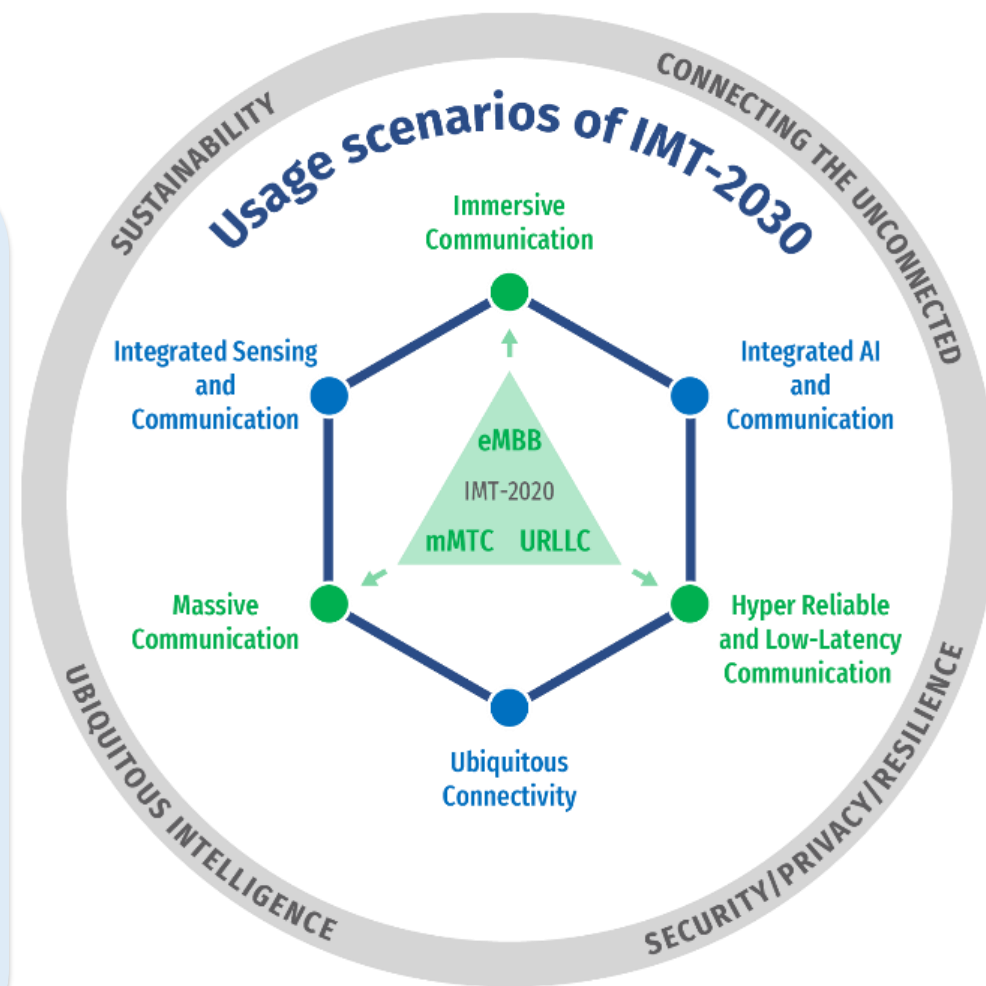
5G三大场景

- 增强型移动宽带
- 大规模机器类通信
- 超可靠低时延通信



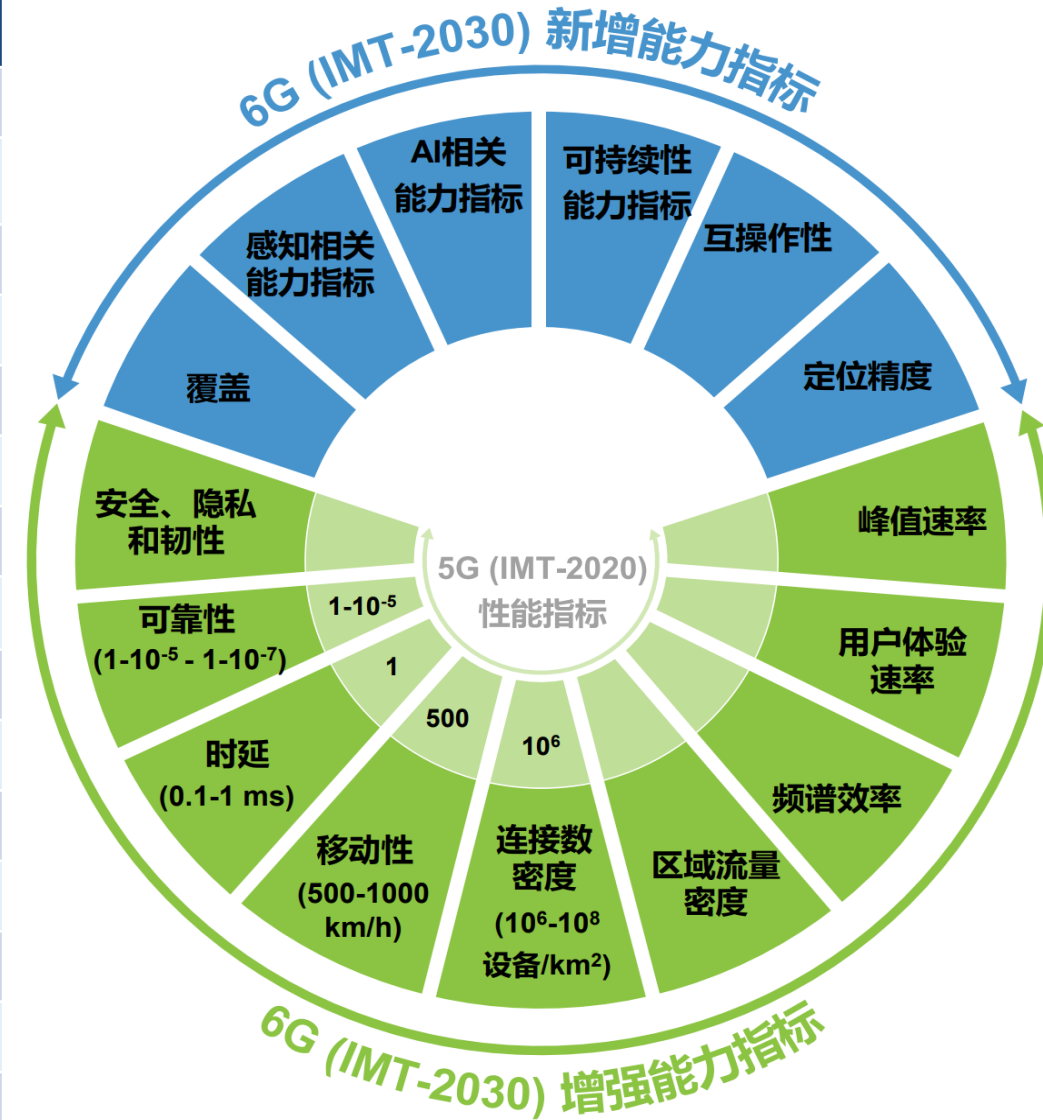
6G六大场景

- 沉浸式通信
- 超大规模连接通信
- 极高可靠低时延通信
- 人工智能与通信融合
- 感知与通信融合(通感一体化)
- 泛在连接(空天地海融合)

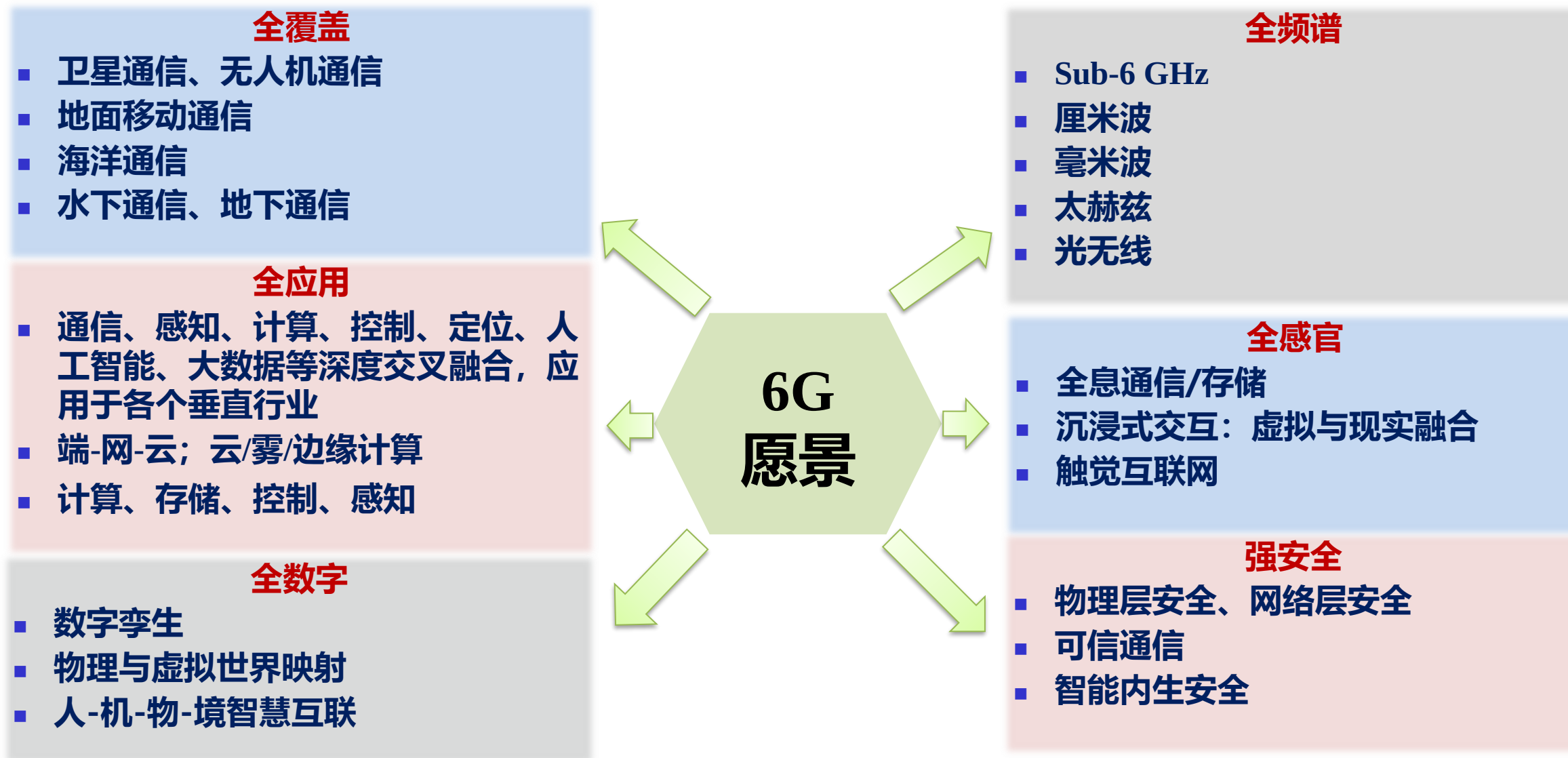


6G性能指标 (ITU): 15个

指标		5G	6G
9个 增强 指标	峰值速率	20 Gbps	1 Tbps
	用户体验速率	0.1-1 Gbps	10 Gbps
	频谱效率	30 bps/Hz	≥90 bps/Hz
	区域流量密度	≥10 Mbps/m ²	≥10 Gbps/m ²
	连接数密度	1M设备/km ²	1-100M设备/km ²
	移动性	500 km/h	500-1000 km/h
	时延	<10 ms	0.1-1 ms
	能量效率	10 ⁷ bit/J	10 ⁹ bit/J
	安全、隐私和韧性	存在安全风险	内生安全、高度可信
6个 新增 指标	覆盖	陆地局部覆盖	全球覆盖
	感知相关能力指标	无感知/成像能力	毫米级感知/成像精度
	AI相关能力指标	智能化水平低	智能化水平高
	可持续性能力指标	电池寿命10 年	电池寿命20 年
	互操作性	低	高
	定位精度 (室内和户外)	1 m & 10 m	10 cm & 1 m



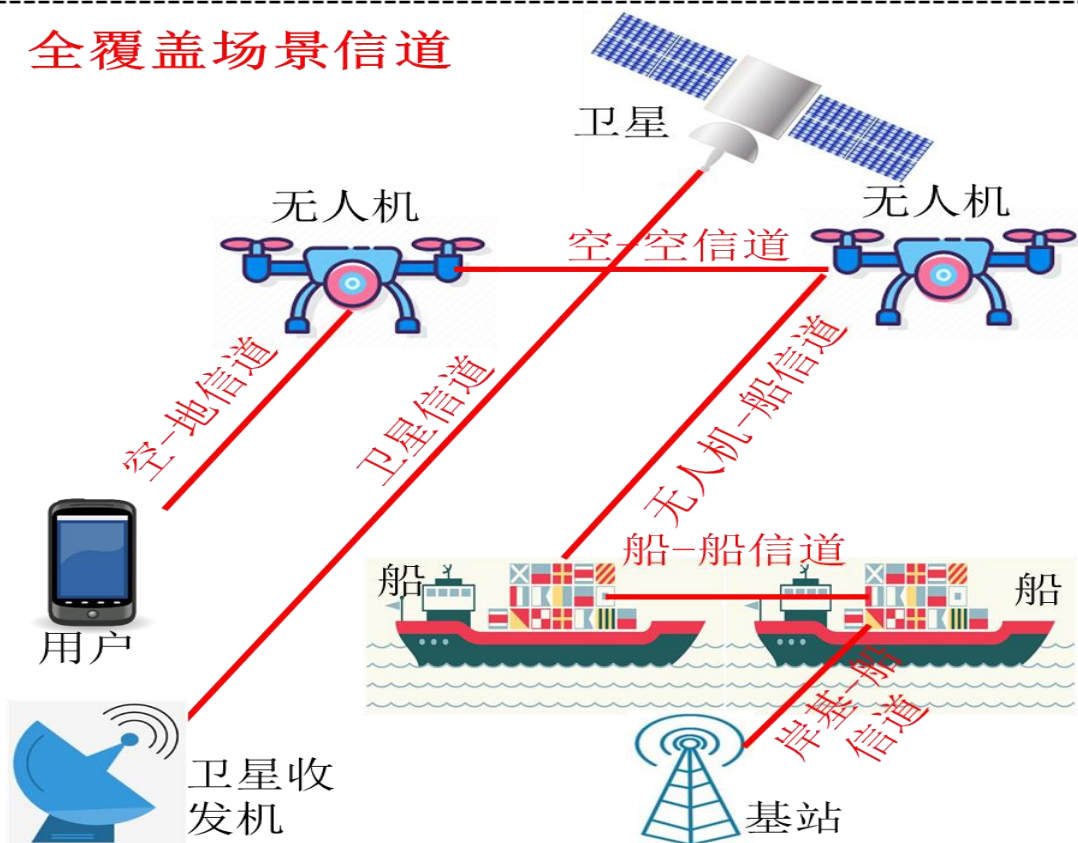
6G愿景：五全一强



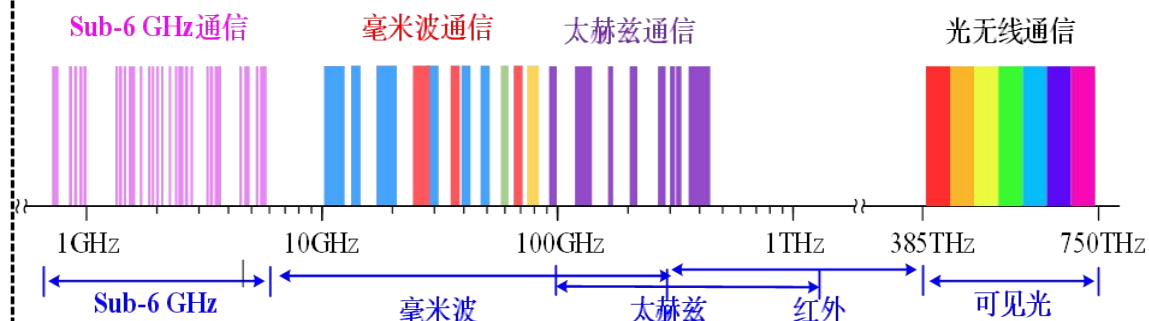
6G全频段全场景信道

- **全频段信道 (sub-6 GHz/毫米波/太赫兹/光无线): 实现频谱全面利用**
- **全覆盖场景信道 (卫星/无人机/海洋): 构建空天地海一体化网络, 全球深度覆盖**
- **全应用场景信道 (高铁/车联网/工业物联网/超大规模天线/智能超表面/通感一体化等): 6G关键技术全面应用于垂直行业, 催生全应用场景**

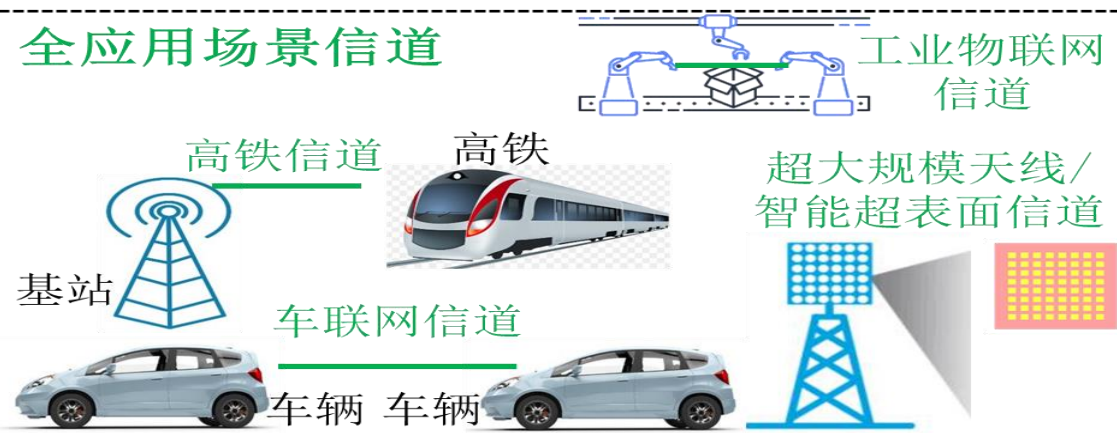
全覆盖场景信道



全频段信道



全应用场景信道

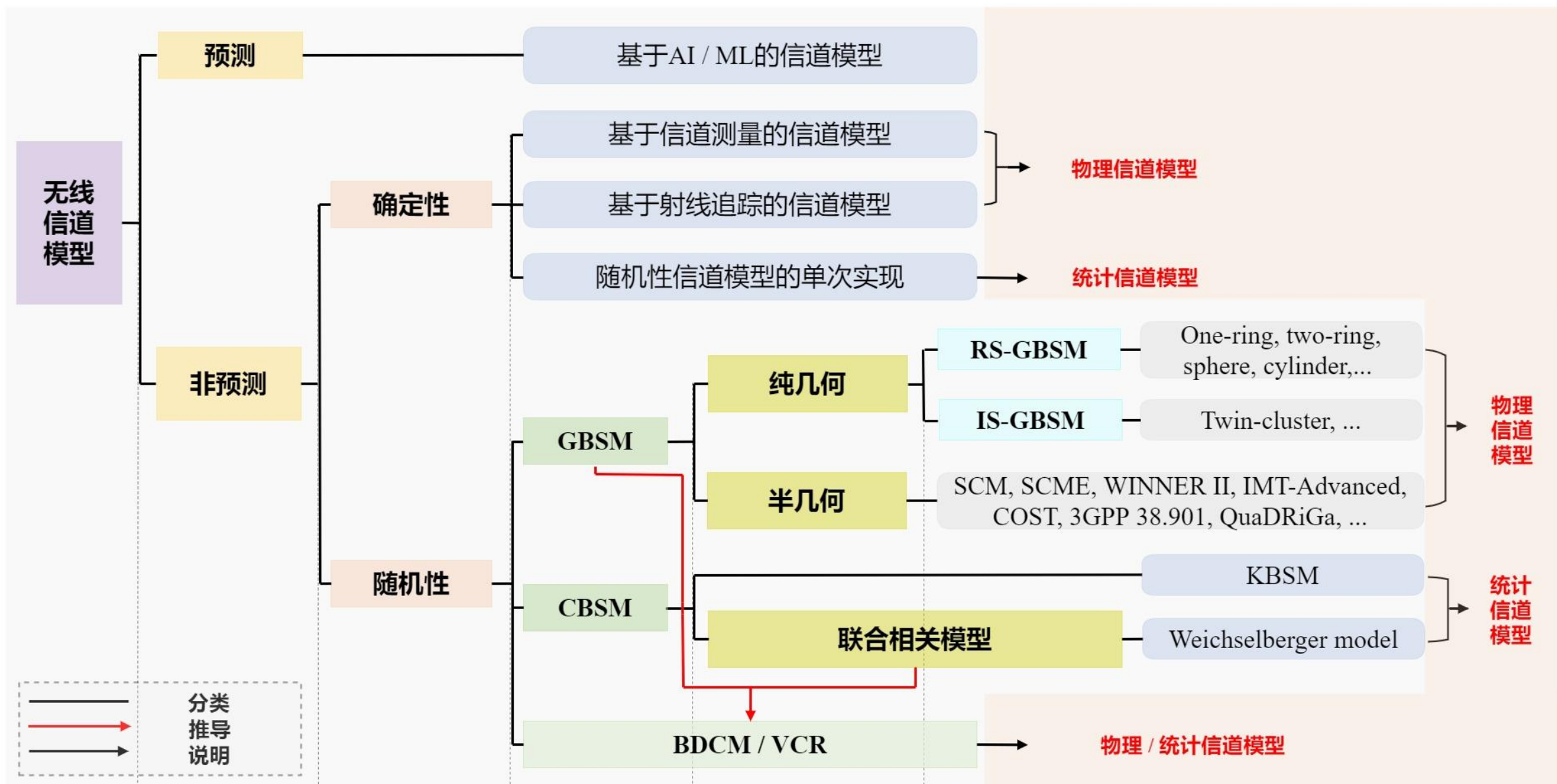


6G全频段全场景信道特性

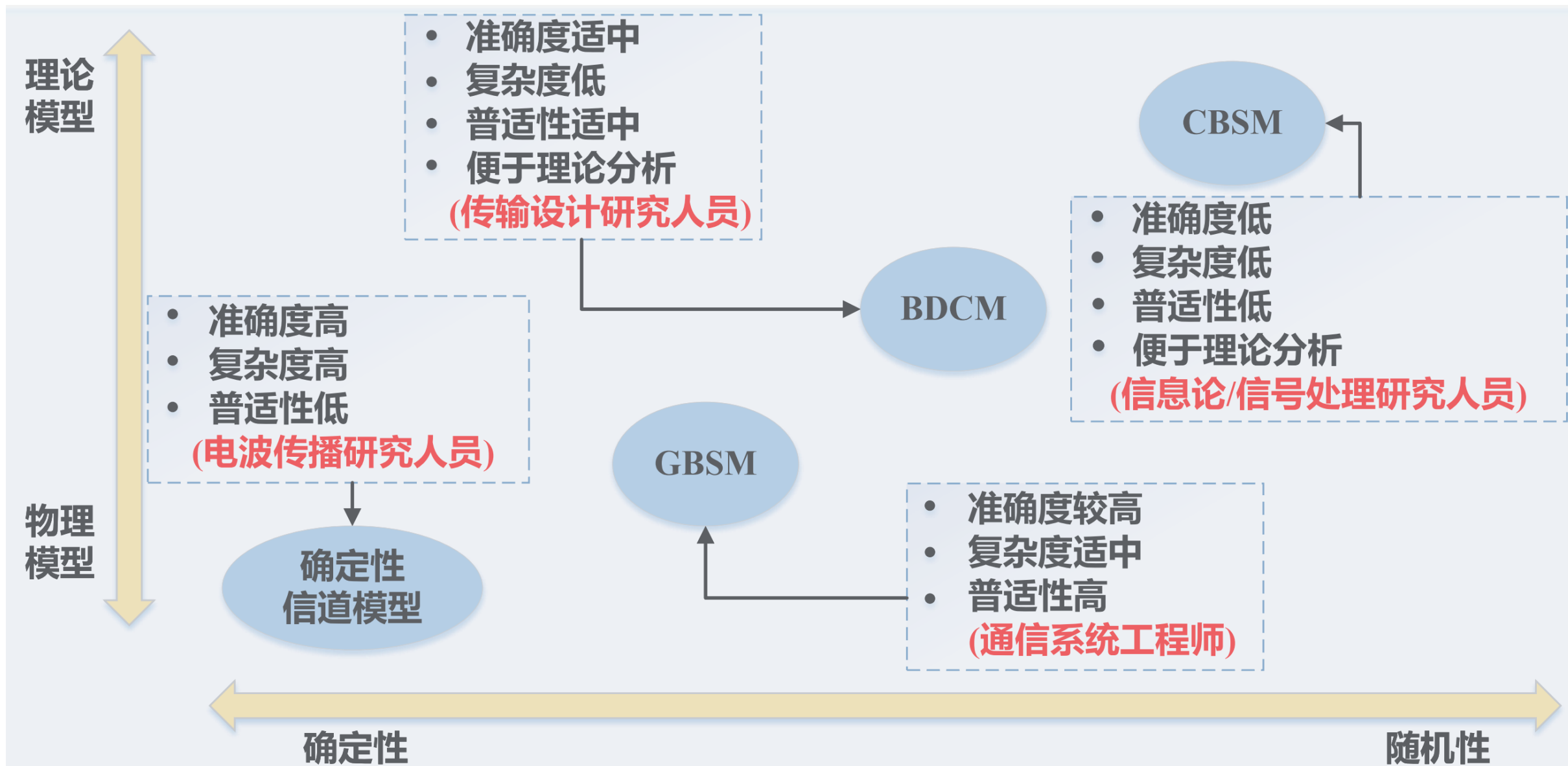
6G全频段全场景信道		需要建模的信道特性
全频段信道	毫米波/太赫兹信道	大信道带宽 (高时延分辨率、 频域非平稳)，高定向性，大路径损耗，阻挡效应，大气衰减，漫散射
	光无线信道	不同颜色的光信道特性不同 (频域非平稳)， 无小尺度衰落 ， 可忽略多普勒效应 ，非相干光无相位，光源具有特定的辐射强度分布，光接收器三维旋转影响
全覆盖场景信道	卫星信道	中/低轨卫星：极高移动性 (极大多普勒频移/扩展)，多移动性 静止地球轨道、中/低轨卫星： 时域非平稳性 ，长通信距离，雨/雪/云/雾衰减，氧气/水吸收，对流层闪烁，电离层效应
	无人机信道	三维任意高速移动轨迹 (大俯仰角)，多移动性， 时域非平稳性 ，机架阴影衰落，无人机高度影响，空空/空地信道
	海洋信道	散射体稀疏性，海浪运动影响 (船随海面三维波动)，海洋表面波导效应， 时域非平稳性 ，长通信距离，气候影响，位置依赖特性
全覆盖场景信道	ISAC信道	主动认知散射体特性 ，感知信道前向、后向散射特性，共享簇
	超大规模天线信道	单用户：球面波， 空域非平稳 ；多用户：信道硬化
	RIS信道	幅度/相位调控 ，电磁响应角度色散特性，子信道级联，子信道相关性
	高铁/车联网信道	高移动性 (大多普勒频移/扩展)，多移动性， 时域非平稳性 ，列车/车辆影响
	IIoT信道	散射体丰富 ，密集多径分量， 频域非平稳 ，机器阻挡衰减， 多移动性

1. 王承祥*, 黄杰, 王海明, 高西奇, 尤肖虎, 郝阳, “面向6G的无线通信信道特性分析与建模,”《物联网学报》, vol. 4, no. 1, pp. 19-32, Mar. 2020.
2. C.-X. Wang*, J. Huang, H. Wang, X. Gao, X.-H. You, and Y. Hao, “6G wireless channel measurements and models: Trends and challenges,” *IEEE Veh. Technol. Mag.*, vol. 15, no. 4, pp. 22-32, Dec. 2020.

信道建模方法总结



不同信道建模方法比较



提纲

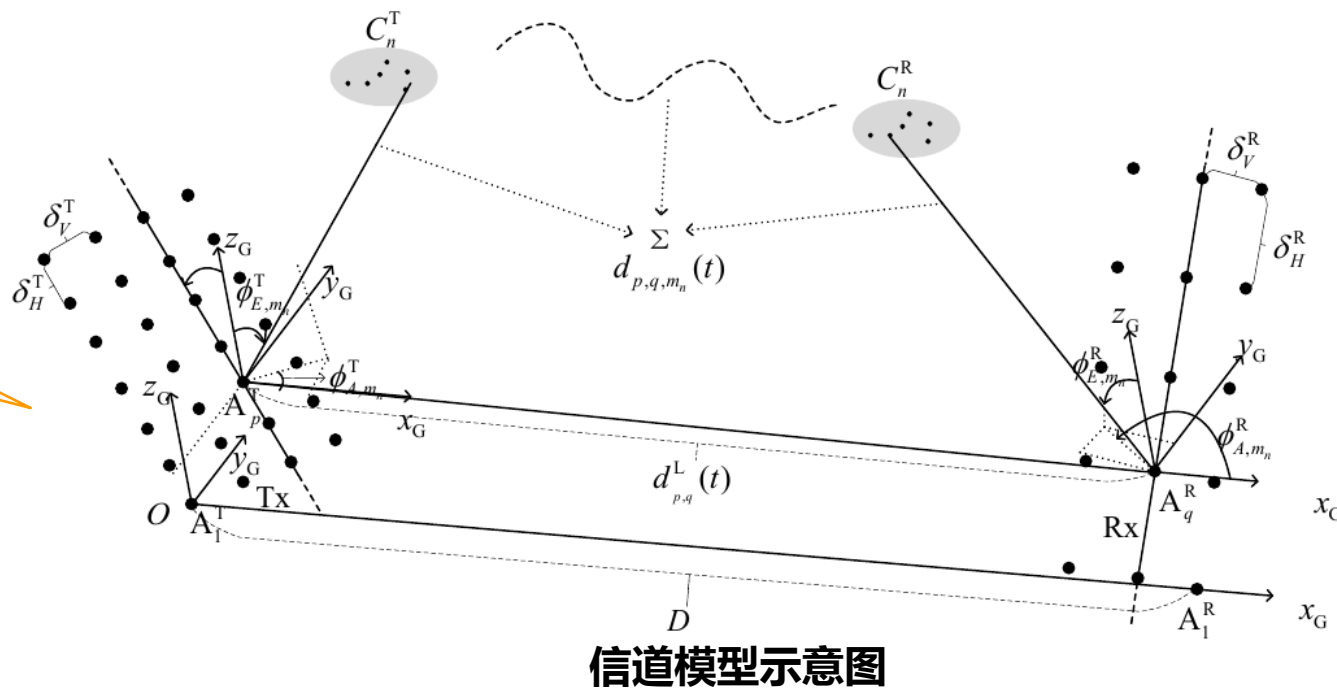
一、6G愿景与信道特性

二、6G多频段多场景信道测量与建模

三、6G普适几何随机信道模型

工作1：太赫兹通用几何随机信道模型

发射端和接收端假
设为**均匀面阵**，可
扩展为任意阵列



■ 模型特点

- 支持太赫兹频段多场景、漫散射特性
- 支持超大规模天线
- 考虑空时频非平稳特性

J. Wang, C.-X. Wang, J. Huang, H. Wang, and X. Gao, "A general 3D space-time-frequency non-stationary THz channel model for 6G ultra massive MIMO wireless communication systems," *IEEE J. Sel. Areas Commun.*, vol. 39, no. 6, pp. 1576-1589, June 2021.

信道冲激响应

■ 信道矩阵

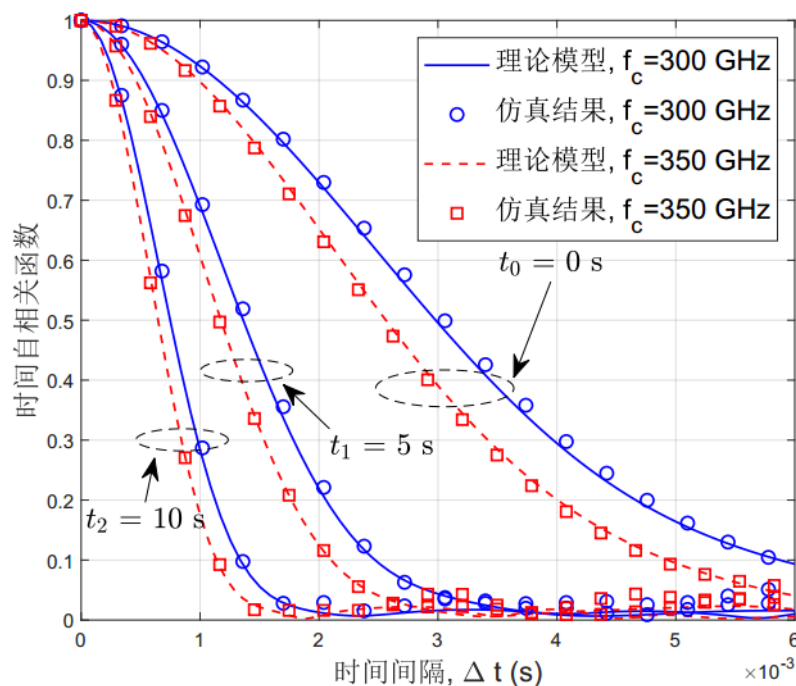
$$\mathbf{H} = [\overset{\text{路径损耗}}{PL} \cdot \overset{\text{阴影衰落}}{SH} \cdot \overset{\text{阻挡损耗}}{BL} \cdot \overset{\text{分子吸收}}{MA}]^{1/2} \cdot \overset{\text{小尺度衰落矩阵}}{\mathbf{H}_s}$$
$$\mathbf{H}_s = \sum_i \overset{\text{子带数量}}{N_F} H_{s,fi}$$

■ 子频带信道矩阵

$$\mathbf{H}_{s,fi} = [h_{p,q,fi}(t, \tau)]_{M^R \times M^T}$$
$$h_{p,q,fi}(t, \tau) = \sqrt{\frac{K^R}{K^R + 1}} h_{p,q,fi}^L(t, \tau) + \sqrt{\frac{1}{K^R + 1}} \sum_{n=1}^{N_{p,q}(t)} \sum_{m=1}^{M_{n,fi}} h_{p,q,fi,m_n}^N(t, \tau)$$

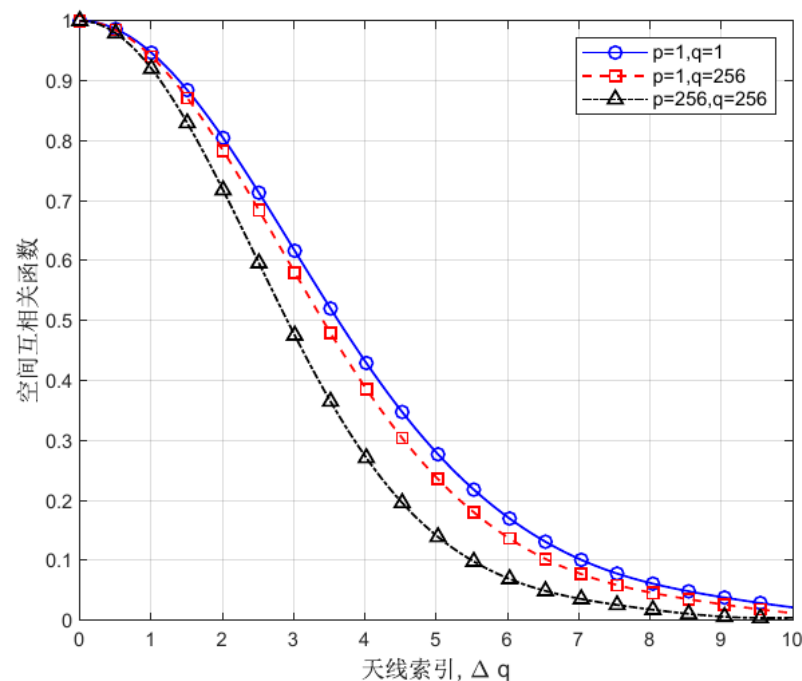
- M^T, M^R : Tx和Rx天线阵元数目
- $h_{p,q,fi}(t, \tau)$: 第 p 个发射天线到第 q 个接收天线间的信道冲激响应, 可表示成LoS和NLoS分量的和
- $N_{p,q,fi}$ 和 $M_{n,fi}$: 簇的数量和第 n 个簇内子径数量
- K^R : 莱斯因子

时间自相关函数和空间互相关函数



时间自相关函数

$t_0 = 0$ s, $t_1 = 5$ s, $t_2 = 10$ s, $f_c = 300/350$ GHz

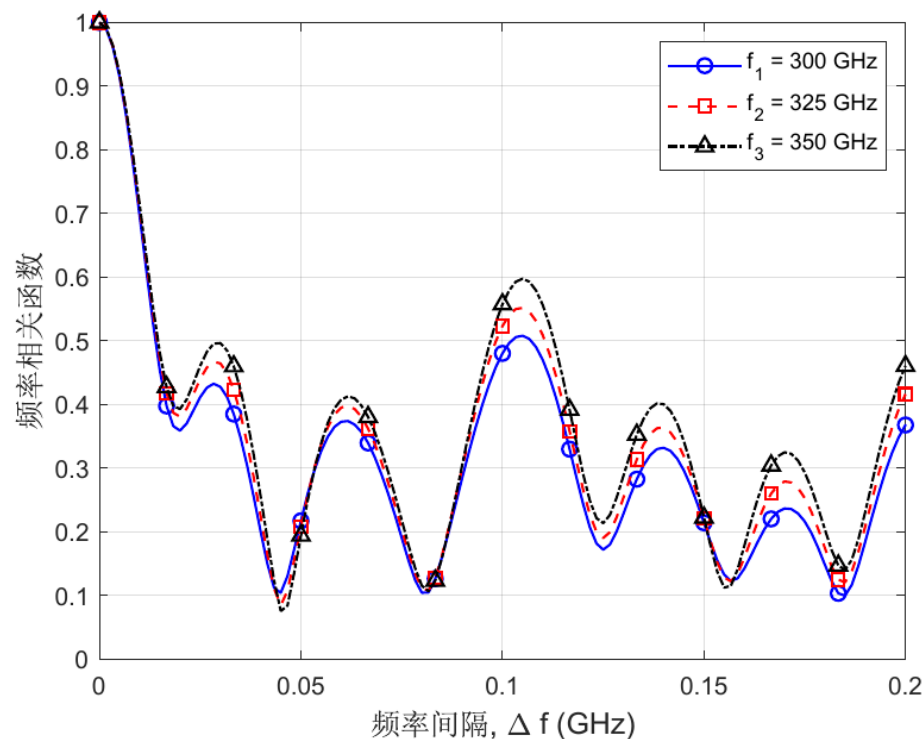


空间互相关函数

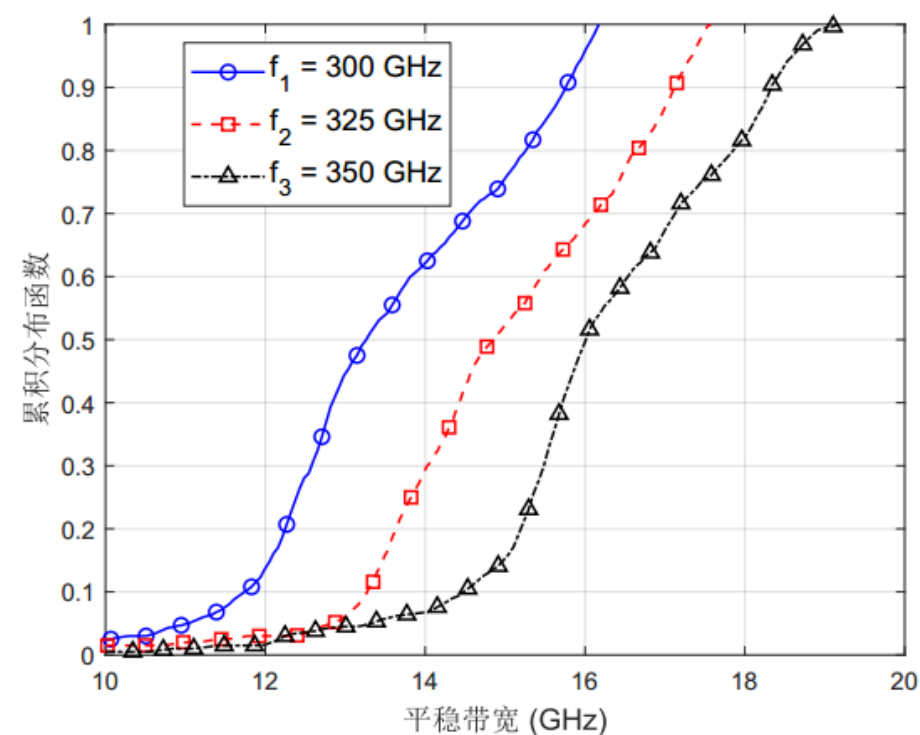
$(p = 1, q = 1), (p = 1, q = 256), (p = 256, q = 256)$

- 理论模型与仿真结果吻合，体现了所提模型的正确性
- 证明模型有能力表征时域和空域非平稳性
- 时间自相关函数随频率增大而变小，频率越高，波长越短，同样的速度影响更大

频率相关函数和平稳带宽



频率相关函数

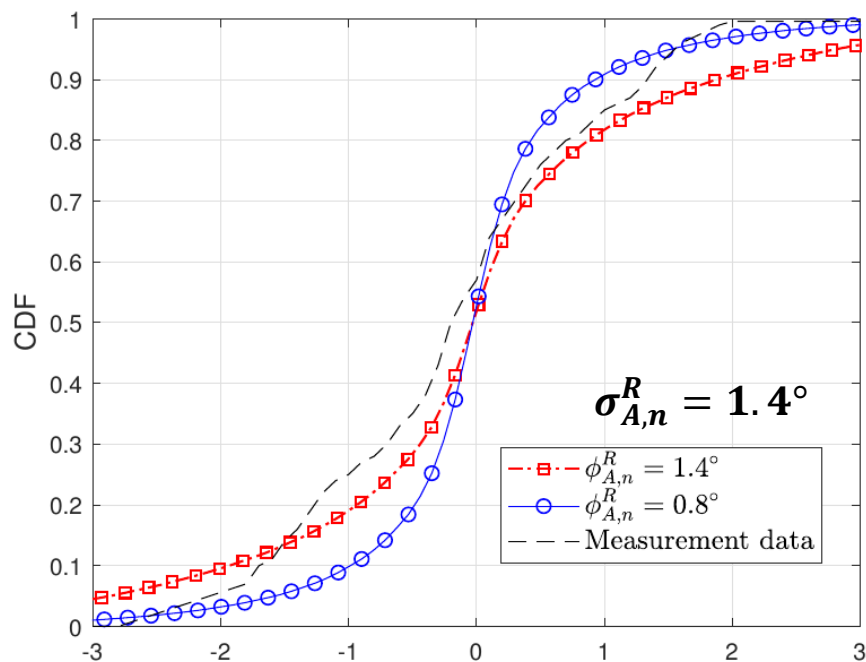


平稳带宽

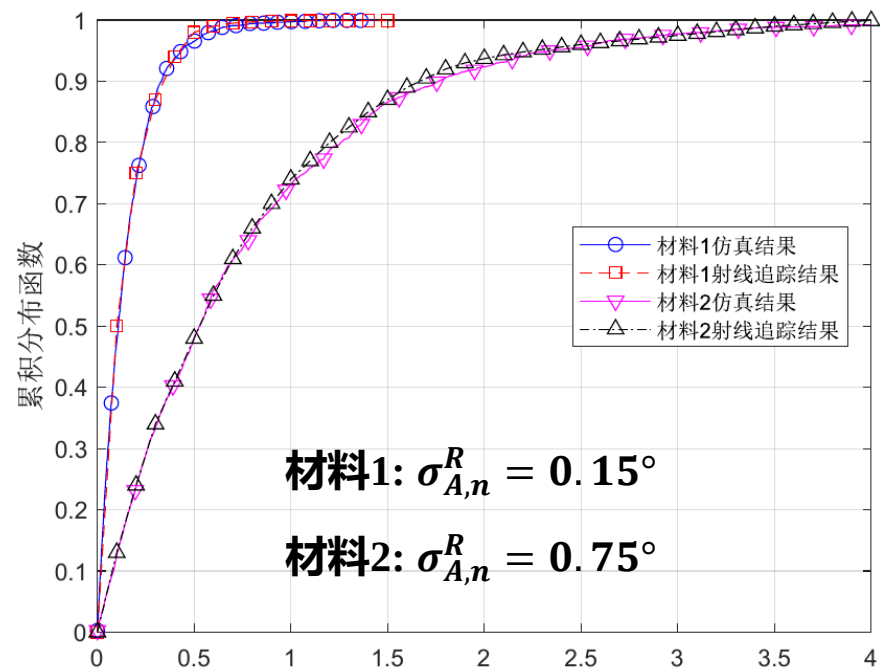
$f_1 = 300$ GHz, $f_2 = 325$ GHz, $f_3 = 350$ GHz, $D = 3$ m, $p = 1$, $q = 1$, $c_{th} = 0.9$

- 不同频段的频率相关函数之间的差异明显, 证明了大带宽引发的频域非平稳性
- 频率越高, 频率相关函数下降越快, 且平稳带宽越大
- 当阈值取0.9、CDF为0.5时, 300/325/350 GHz频段的平稳带宽约为13.5/14.8/16 GHz

漫散射特性：簇内角度分布和角度扩展



簇内相对角度和测量结果^[1]对比



簇内角度扩展和射线追踪^[2]对比

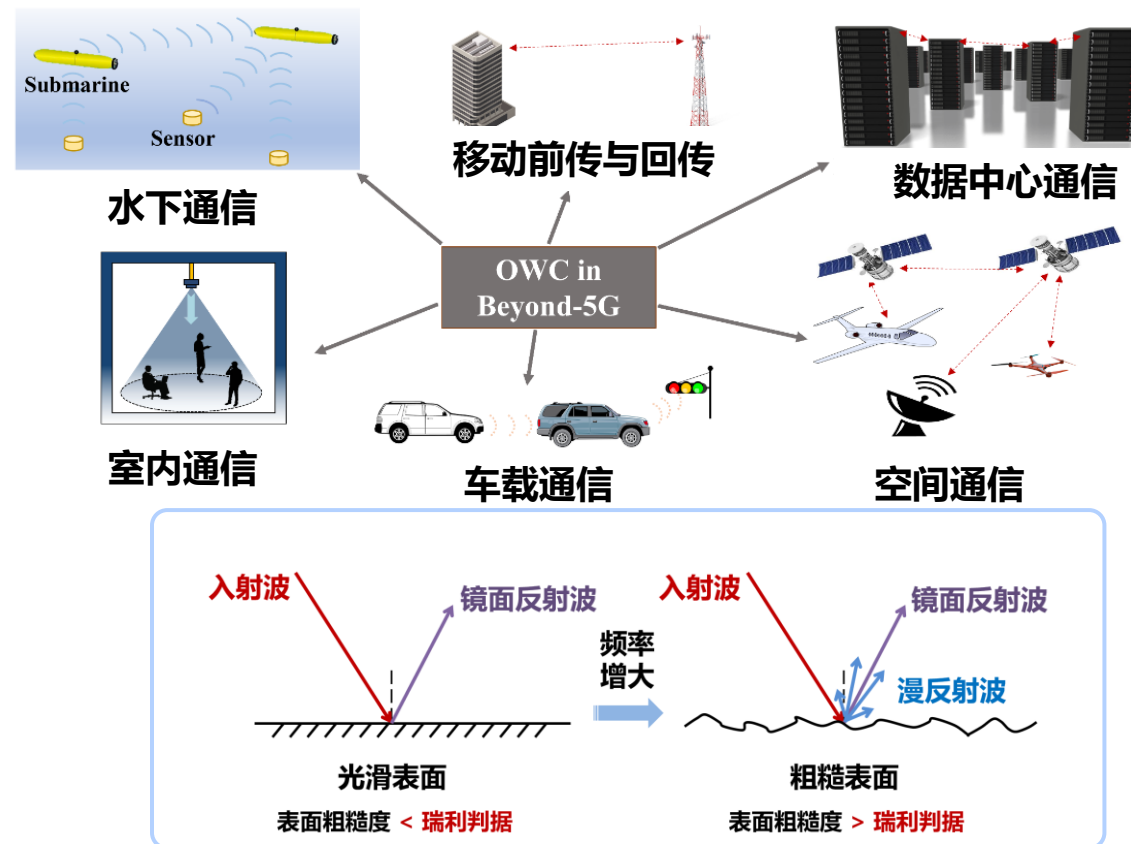
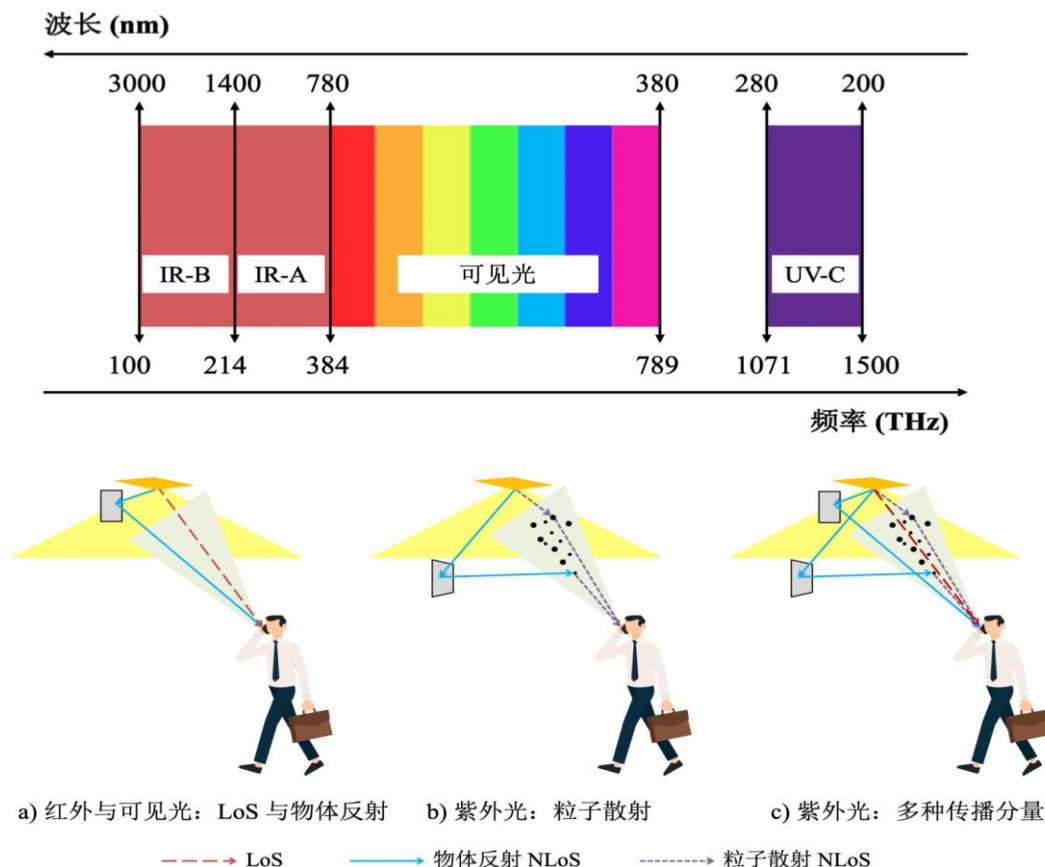
- 信道模型仿真结果与测量结果、射线追踪仿真结果拟合较好，证明了模型的准确性
- 物体表面越粗糙，漫散射径更加分散，簇内角度扩展更大

[1] S. Priebe, M. Kannicht, M. Jacob, and T. Kürner, "Ultra broadband indoor channel measurements and calibrated ray tracing propagation modeling at THz frequencies," *Journal of Communications and Networks*, vol. 15, no. 6, pp. 547-558, 2013.

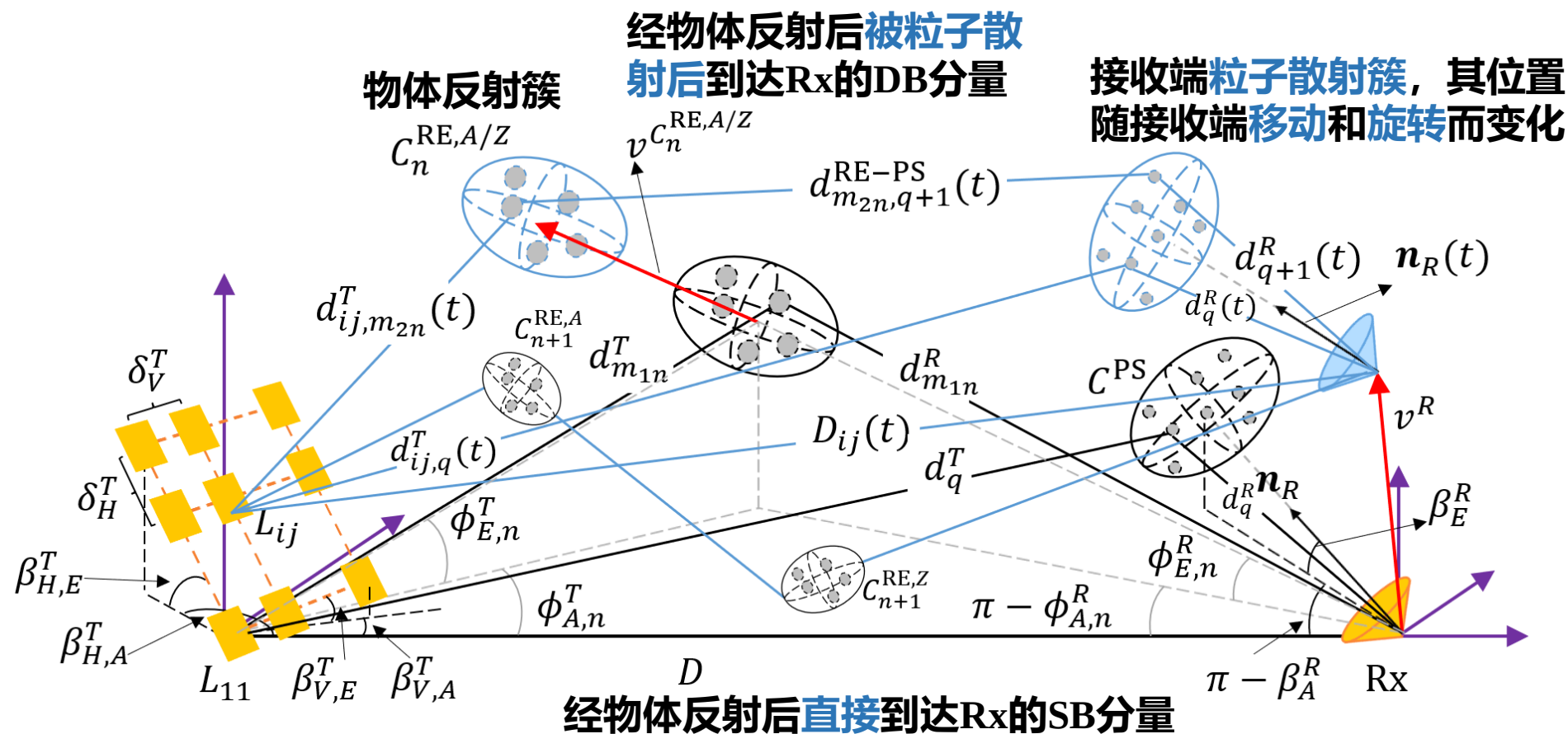
[2] Priebe S, Jacob M, Kürner T. Angular and RMS delay spread modeling in view of THz indoor communication systems[J]. *Radio Science*, 2014, 49(3):242-251.

工作2：室内光无线通用几何随机信道模型

- **光无线通信 (OWC)**：使用红外光、可见光与紫外光频谱资源实现通信，具有免许可的超宽频谱、数据安全性高、低成本、低功耗、抗电磁干扰等特点，广泛应用于室内、水下等通信场景
- **光无线信道共有特性**：无小尺度衰落、多普勒效应可忽略、收发端方向/阻挡效应影响显著等
- **室内场景光无线信道特性**：紫外光粒子消光效应、粒子散射效应，漫反射，反射系数与波长有关



信道模型框图



1. X. Zhu, C.-X. Wang, J. Huang, M. Chen, and H. Haas, "A novel 3D non-stationary channel model for 6G indoor visible light communication systems," *IEEE Trans. Wireless Commun.*, vol. 21, no. 10, pp. 8292-8307, Oct. 2022.
2. X. Zhu, J. Wang, R. Feng, J. Huang, and C.-X. Wang, "A general 3D GBSM for 6G indoor optical wireless communication systems," in *Proc. IEEE/CIC ICC3 '23*, Dalian, China, Aug. 2023.

信道冲激响应：LoS分量

$$h_{ij}(t, \tau) = h_{ij}^L(t, \tau) + h_{ij}^N(t, \tau)$$

LoS分量 NLoS分量 (SB, DB)

$$h_{ij}^L(t, \tau) = F_{ij} \left(\tilde{\psi}_{ij,E,L}^T(t), \tilde{\psi}_{ij,A,L}^T(t) \right) \cdot \frac{A_R \cos \left(\psi_{ij,L}^R(t) \right)}{\left(D_{ij}(t) \right)^2} \cdot G \left(\psi_{ij,L}^R(t) \right) T \left(\psi_{ij,L}^R(t) \right) V \left(\psi_{ij,L}^R(t) \right) \cdot \exp \left(-k_e D_{ij}(t) \right) \cdot \delta \left(\tau - D_{ij}(t)/c_l \right)$$

消光效应 Beer Lambert's Law

- $F_{ij} \left(\tilde{\psi}_E^T, \tilde{\psi}_A^T \right)$: LED单元 L_{ij} 归一化的辐射模式函数，定义为总功率为1W的光源在给定的方向上发出的单位立体角内的光功率 (W/sr)
- A_R : 接收端光电探测器的面积
- $\tilde{\psi}_{ij,E,L}^T(t), \tilde{\psi}_{ij,A,L}^T(t)$: 从 L_{ij} 出发的LoS射线在 L_{ij} 单元的局部坐标系中的俯仰离开角与方位离开角
- $\psi_{ij,p,L}^R(t)$: 从 L_{ij} 出发的LoS射线与接收端第 p 个光电探测器法线方向的夹角
- k_e : 消光系数
- $D_{ij}(t)$: 从 L_{ij} 到接收端的时变LoS路径的距离
- $G(\cdot), T(\cdot), V(\cdot)$: 光学透镜增益、光学滤波器增益，接收端的可视域函数

信道冲激响应：NLoS分量 (1/2)

$$\begin{aligned}
 h_{ij}^N(t, \tau) = & [p_{\text{particle}}] \cdot \sum_{q=1}^{Q^{\text{PS}}} P_{ij,q}^N(t) \cdot \delta(\tau - \tau_{ij,q}^N(t)) \quad \text{--- NLoS1: 经过粒子散射到达Rx的SB分量} \\
 & + \sum_{n=1}^{N_{ij}(t)} \sum_{m_1=1}^{M_n \cdot (1-p_{\text{particle}})} P_{ij,m_{1n}}^N(t) \cdot \delta(\tau - \tau_{ij,m_{1n}}^N(t)) \quad \text{--- NLoS2: 经过物体反射直接到达Rx的NLoS分量 (SB, DB)} \\
 & + \sum_{n=1}^{N_{ij}(t)} \sum_{m_2=1}^{M_n \cdot p_{\text{particle}}} P_{ij,m_{2n,q}}^N(t) \cdot \delta(\tau - \tau_{ij,m_{2n,q}}^N(t)) \quad \text{--- NLoS3: 经过物体反射后被再次粒子散射而到达Rx的DB分量}
 \end{aligned}$$

NLoS1

$$\begin{aligned}
 P_{ij,q}^N(t) = & F_{ij} \left(\tilde{\psi}_{ij,E,q}^T(t), \tilde{\psi}_{ij,A,q}^T(t) \right) \\
 & \times \frac{k_s \exp(-k_e d_{ij,q}^T(t))}{(d_{ij,q}^T(t))^2} \cdot V_{q,\text{eff}} \\
 & \times P(\theta_{ij,q}^{\text{PS}}(t)) \exp(-k_e d_q^R(t)) \frac{A_R \cos(\psi_q^R(t))}{(d_q^R(t))^2} \\
 & \times G(\psi_q^R(t)) T(\psi_q^R(t)) V(\psi_q^R(t))
 \end{aligned}$$

消光效应

粒子散射相函数

- $\tilde{\psi}_{ij,E,q}^T(t), \tilde{\psi}_{ij,A,q}^T(t)$: 从 L_{ij} 到 S_q^{PS} 的射线在 L_{ij} 单元的局部坐标系中的俯仰离开角与方位离开角
- k_s : 散射系数
- $V_{q,\text{eff}}$: S_q^{PS} 的等效体积
- $\theta_{ij,q}^{\text{PS}}(t)$: 从 L_{ij} 到 S_q^{PS} 的射线经粒子散射后的角度变化
- $\psi_q^R(t)$: 从 S_q^{PS} 到 Rx 的射线与 Rx 法线方向的夹角
- $d_{ij,q}^T(t), d_q^R(t)$: 从 L_{ij} 到 S_q^{PS} 及从 S_q^{PS} 到 Rx 的路径距离

信道冲激响应：NLoS分量 (2/2)

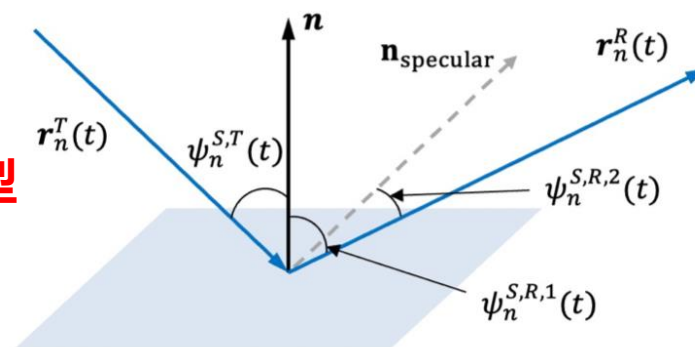
NLoS2
(单跳传播为例)

$$P_{ij,m_{1n}}^N(t) = F_{ij} \left(\tilde{\psi}_{ij,E,m_{1n}}^T(t), \tilde{\psi}_{ij,A,m_{1n}}^T(t) \right) \times \frac{A_{s,\text{eff}} \cos \left(\psi_{ij,m_{1n}}^{S,T}(t) \right)}{\left(d_{ij,m_{1n}}^T(t) \right)^2} \times \Gamma_{ij,\lambda_T,n} R_n \left(\psi_{m_{1n}}^{S,R,1}(t), \psi_{m_{1n}}^{S,R,2}(t) \right) \frac{A_R \cos \left(\psi_{m_{1n}}^R(t) \right)}{\left(d_{m_{1n}}^R(t) \right)^2} \times G \left(\psi_{m_{1n}}^R(t) \right) T \left(\psi_{m_{1n}}^R(t) \right) V \left(\psi_{m_{1n}}^R(t) \right) \times \exp \left[-k_e \left(D_{ij,m_{1n}}^T(t) + d_{m_{1n}}^R(t) \right) \right]$$

与波段相关的等效
反射系数

Phong's 反射模型

消光效应



可灵活支持完全漫反射、混合反射、
完全镜面反射类型

NLoS3

$$P_{ij,m_{2n,q}}^N(t) = F_{ij} \left(\tilde{\psi}_{ij,E,m_{2n}}^T(t), \tilde{\psi}_{ij,A,m_{2n}}^T(t) \right) \exp \left(-k_e d_{ij,m_{2n}}^T(t) \right) \times \frac{A_{s,\text{eff}} \cos \left(\psi_{ij,m_{2n}}^{S,T}(t) \right)}{\left(d_{ij,m_{2n}}^T(t) \right)^2} \times \Gamma_{ij,\lambda_T,n} R_n \left(\psi_{m_{2n,q}}^{S,R,1}(t), \psi_{m_{2n,q}}^{S,R,2}(t) \right) \times \frac{k_s \exp \left(-k_e d_{m_{2n,q}}^{\text{RE-PS}}(t) \right)}{\left(d_{m_{2n,q}}^{\text{RE-PS}}(t) \right)^2} \cdot V_{q,\text{eff}} \times P \left(\theta_{m_{2n,q}}^{\text{PS}}(t) \right) \exp \left(-k_e d_q^R(t) \right) \frac{A_R \cos \left(\psi_q^R(t) \right)}{\left(d_q^R(t) \right)^2} \times G \left(\psi_q^R(t) \right) T \left(\psi_q^R(t) \right) V \left(\psi_q^R(t) \right)$$

消光效应

Phong's 反射模型

与波段相关的等效反射系数

粒子散射相函数

信道模型特点

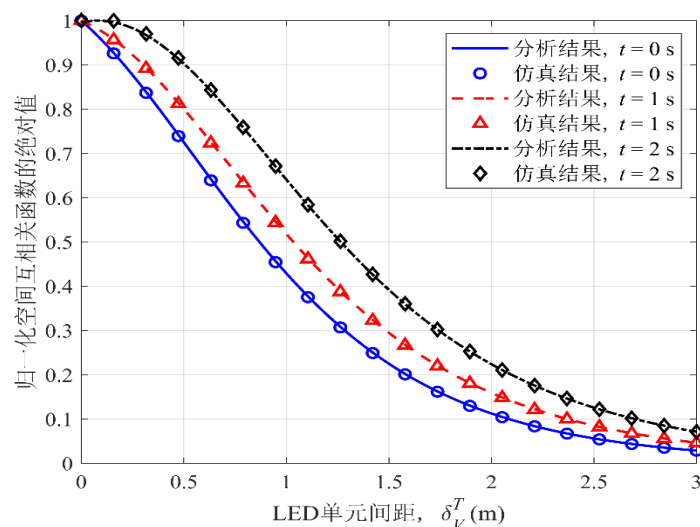
- 所提通用光无线信道模型考虑了光无线通信信道的共有特性，并支持任意辐射模式的光源、接收端的三维旋转运动等仿真设置
- 在可见光模型基础上，引入相关参数与建模方法，建模了红外光、可见光、紫外光的独特特性

信道特性	相关参数与建模方法
紫外光粒子消光效应	在功率计算中引入 消光效应衰减 $\exp(-k_e D_{ij}(t))$
紫外光粒子散射效应	引入接收端侧的 粒子散射等效簇 与 粒子散射相函数 刻画传播射线的功率损耗 引入 粒子散射概率 对不同传播分量进行分类
紫外光粒子散射区域与接收端波束范围相关	粒子散射簇在接收端生成， 随接收端旋转和移动
不同波长光信号的漫反射差异	基于 更加通用的Phong's模型 来建模光信号在物体表面的反射，可灵活支持完全漫反射、完全镜面反射及不同漫反射比例的混合反射类型
不同波长光信号物体反射系数差异	根据 波长范围 计算物体的等效反射系数
光无线信号阻挡效应	引入 阻挡概率

空时频相关函数

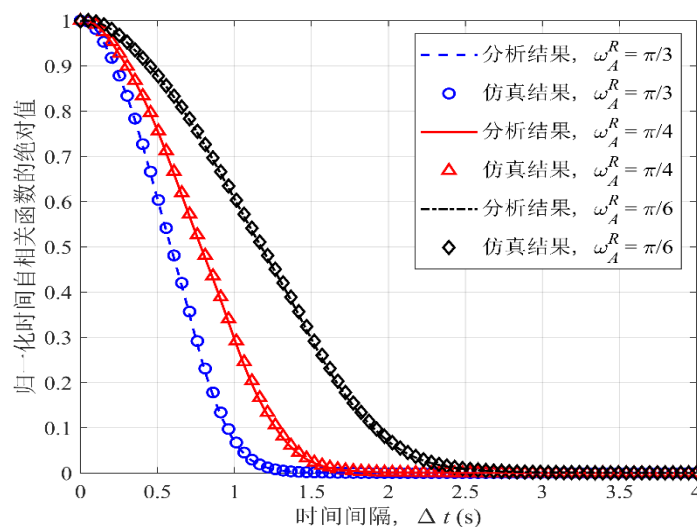
- 随着 R_x 的旋转，信道的**空间互相关函数**随着**时间**而发生改变
- 初始时刻收发端对准， C^{PS} 随着 R_x 而旋转，信道的**时间自相关函数**下降，随 R_x 旋转速度的增加下降地更快
- 红外光信道与可见光信道的频率相关性**比较接近**，**紫外光信道**中相干带宽**显著大于**其余两个波段
- 仿真结果与理论分析结果拟合良好，证明了**推导和仿真的正确性**

$$R_{ij,\bar{i}\bar{j}}(t, f; \Delta t, \Delta f) = \mathbb{E}\{H_{ij}(t, f)H_{\bar{i}\bar{j}}^*(t + \Delta t, f + \Delta f)\}$$



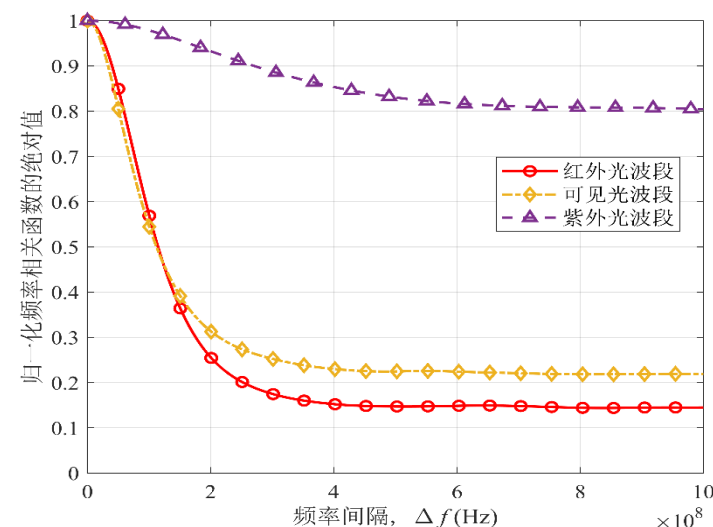
不同时刻空间互相关函数

可见光波段, $p_{\text{blockage}} = 0$ 、 $\omega_A^R = -\pi/8$ 、 $\lambda_B = 80 \text{ m}$ 、 $\lambda_D = 4 \text{ m}$ 、 $D_C^A = 10 \text{ m}$ 、 $t = 0 \text{ s}$



不同旋转速度时间自相关函数

紫外光波段, 子信道: $L_{11} - R_x$



不同波段的频率相关函数

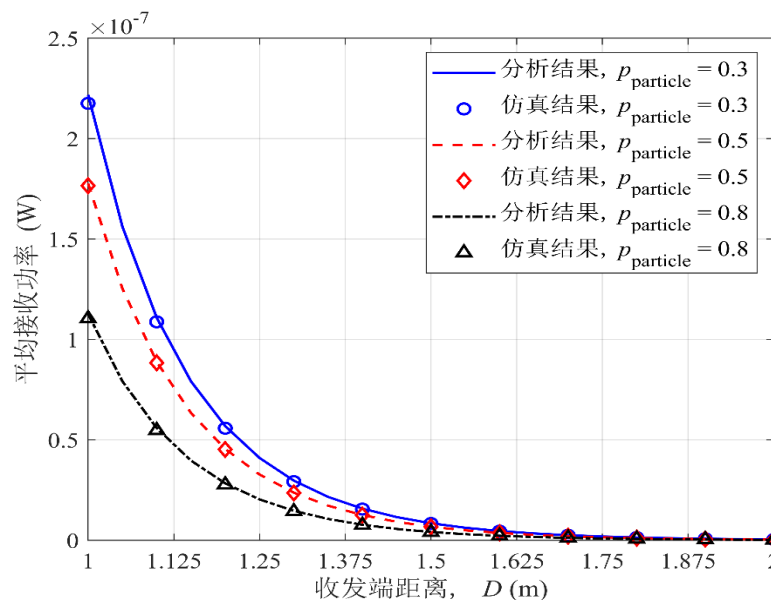
子信道: $L_{11} - R_x$, $d_1^T = 1.5 \text{ m}$ 、 $\phi_{E,1}^T = 45^\circ$ 、 $\phi_{A,1}^T = 30^\circ$ 、 $t = 0 \text{ s}$

平均接收功率

- 随着紫外光的LoS分量与经过物体反射后的NLoS分量被**散射概率的增大**，LoS分量存在的概率下降，同时NLoS分量功率被削弱，接收端的**平均总接收功率减小**
- 红外光波段与可见光波段的平均总接收功率**接近**，略高于可见光波段，紫外光信道的平均总接收功率**显著小于**其余两个波段，随着距离的增加而**快速下降**

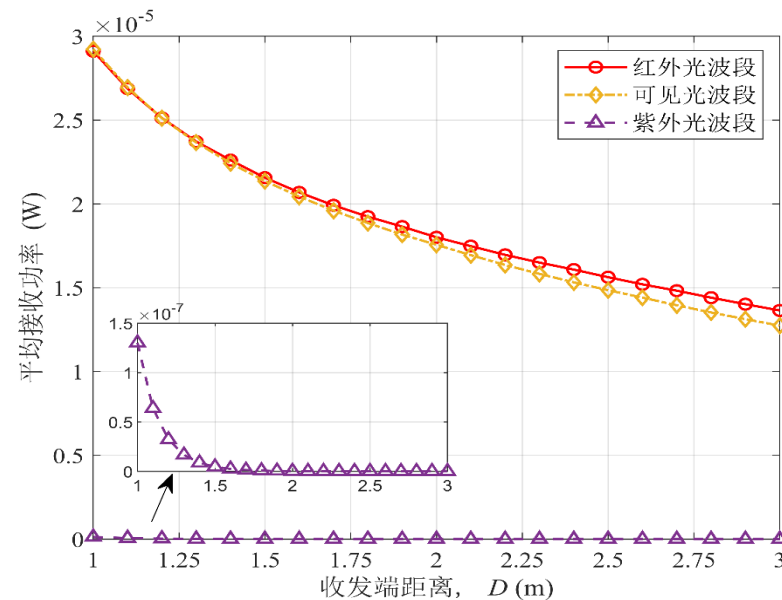
$$H_{ij}(t, 0) = \int_{-\infty}^{\infty} h_{ij}(t, \tau) d\tau$$

$$P_R(t) = \sum_{i=1}^{M_I} \sum_{j=1}^{M_J} P_{T,ij} \cdot H_{ij}(t, 0)$$



不同粒子散射概率设置下的平均总接收功率

紫外光波段, $p_{\text{blockage}} = 0$ 、 $\lambda_B = 80 \text{ /m}$ 、 $\lambda_D = 4 \text{ /m}$ 、 $D_c^A = 10 \text{ m}$ 、 $t = 0 \text{ s}$



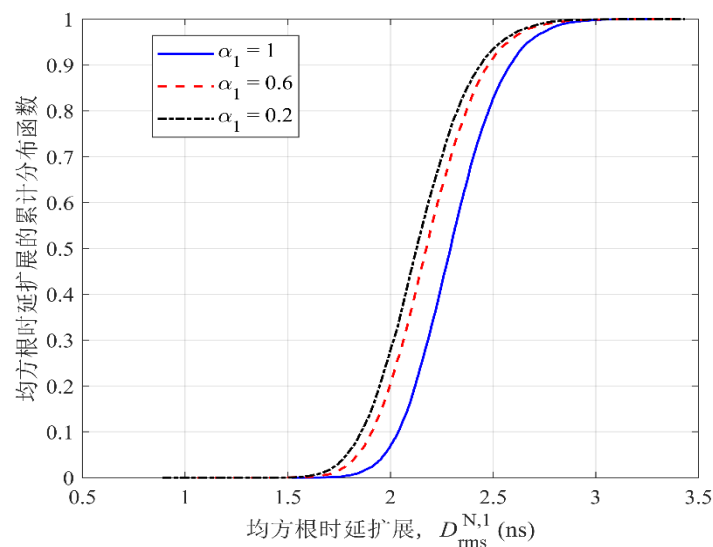
不同波段的平均总接收功率

$\lambda_B = 80 \text{ /m}$ 、 $\lambda_D = 4 \text{ /m}$ 、 $D_c^A = 10 \text{ m}$ 、 $t = 0 \text{ s}$

时延扩展

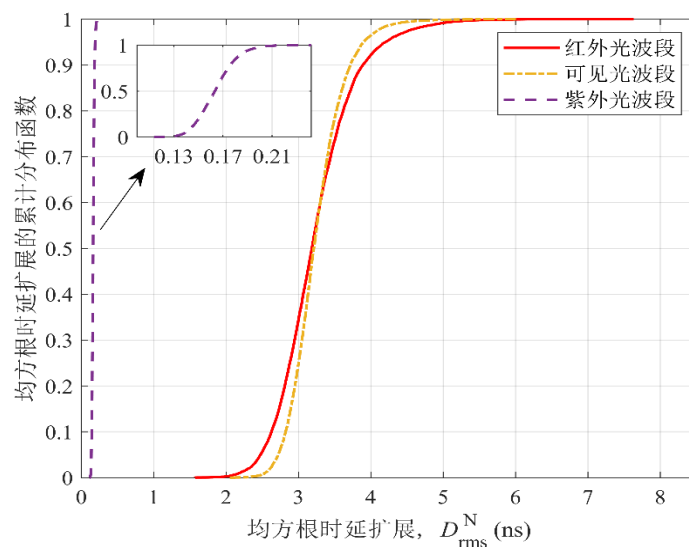
- 随着**镜面分量**所占比例的**增大**，信道多径传播的影响越弱，信道**时延扩展**越**小**
- 由于紫外光信道中Rx侧**粒子散射簇**对**多径分量的集中效应**，紫外光信道时延扩展**显著小于**其余两个波段
- 随着信号经过物体反射后被再次**散射概率**的**增大**，多径分量在Rx侧更加集中，多径**时延扩展**减小

$$D_{ij,\text{rms}}(t) = \sqrt{\int_{-\infty}^{\infty} (\tau - \mu_{ij,\tau}(t))^2 h_{ij}(t, \tau) d\tau / \int_{-\infty}^{\infty} h_{ij}(t, \tau) d\tau}$$



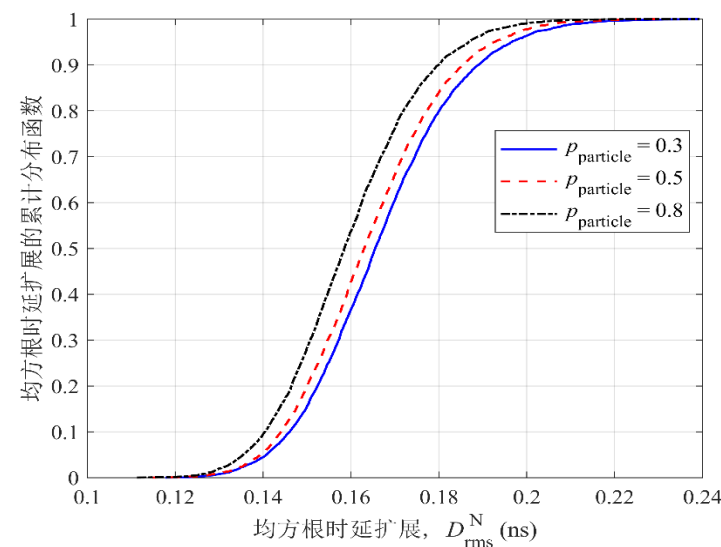
不同漫反射比例设置下信道均方根时延扩展的 CDF 曲线

可见光波段，子信道: $L_{11} - \text{Rx}$ 、 $d_1^T = 1.5 \text{ m}$ 、 $\phi_{E,1}^T = 45^\circ$ 、 $\phi_{A,1}^T = 30^\circ$



不同波段信道均方根时延扩展的 CDF 曲线

子信道: $L_{11} - \text{Rx}$, $t = 0 \text{ s}$



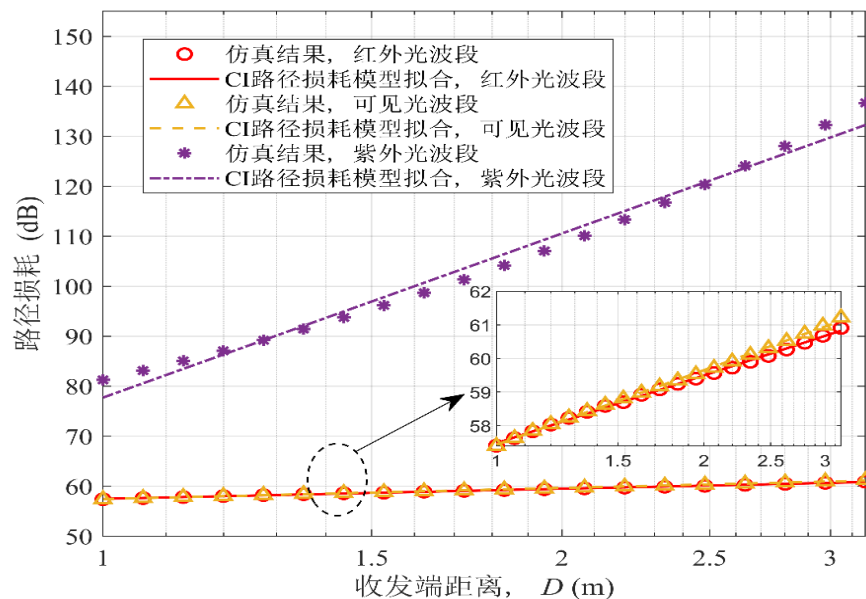
不同粒子散射概率设置下信道均方根时延扩展的 CDF 曲线

紫外光波段，子信道: $L_{11} - \text{Rx}$, $t = 0 \text{ s}$

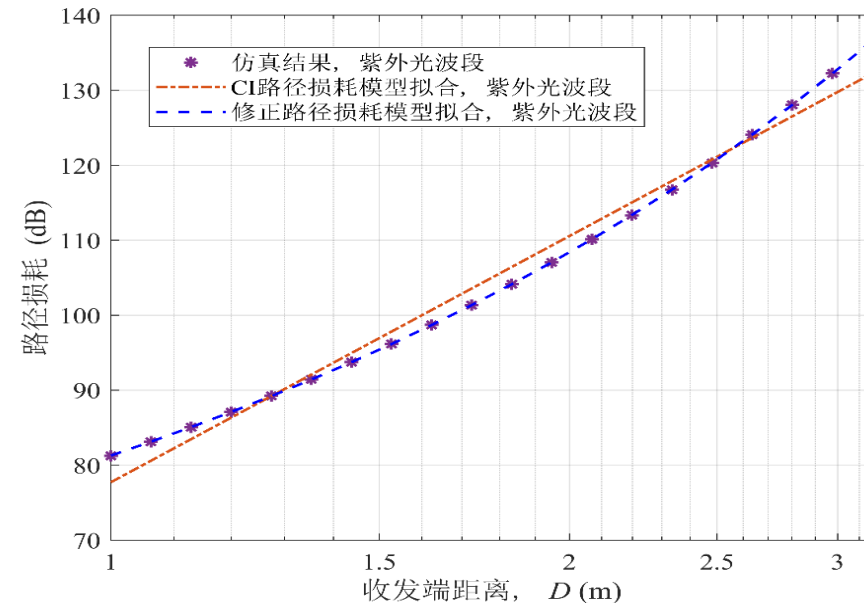
路径损耗

- 红外光与可见光信道路径损耗均与CI模型 $PL(d) = PL(d_0) + 10\gamma\log(d/d_0)$ **拟合良好**，紫外光信道的路径损耗**显著大于**其余两个波段，且与CI模型的**拟合差距较大**
- 考虑紫外光信道中的**粒子消光效应**，在CI模型中**添加与距离 d 线性相关的因子**得到修正的路径损耗模型，经分析修正的路径损耗模型与紫外光信道路径损耗的仿真结果**非常吻合**

$$PL = 10 \log_{10}(P_{T,\text{total}}/P_{R,\text{total}})$$



不同波段的平均路径损耗及与 CI 模型的拟合结果



紫外光波段平均路径损耗及与 CI 模型、修正PL模型的拟合结果

$$\lambda_B = 80 \text{ /m}、\lambda_D = 4 \text{ /m}、D_c^A = 10 \text{ m}、t = 0 \text{ s}$$

工作3：超大规模MIMO信道测量与特性分析



发射天线

功率放大器

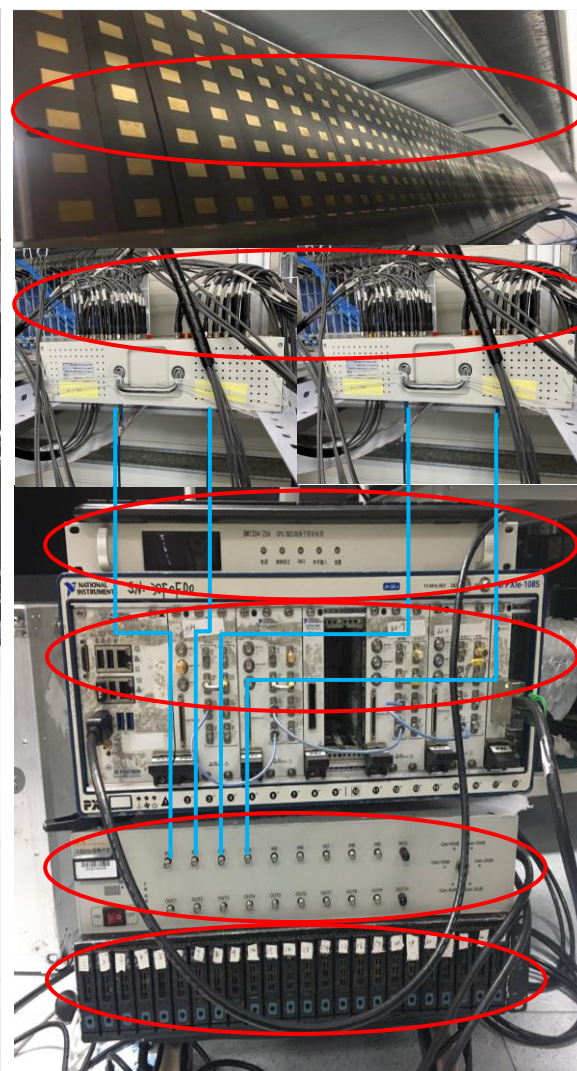
开关切换系统

GPS+铷钟

矢量信号收发仪 (VST)

移动电源

发射端



5.3 GHz 128×8
超大规模接收
天线阵列

4组1切32开关
切换系统

GPS+铷钟

矢量信号收发仪(VST)

低噪声功率
放大器

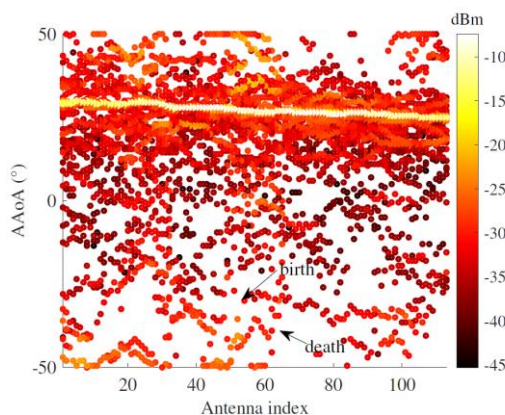
磁盘阵列

接收端

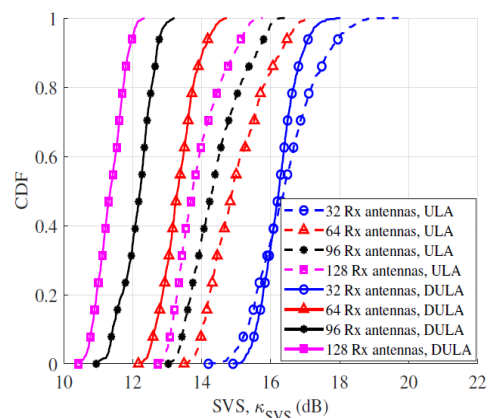
测量场景及天线配置



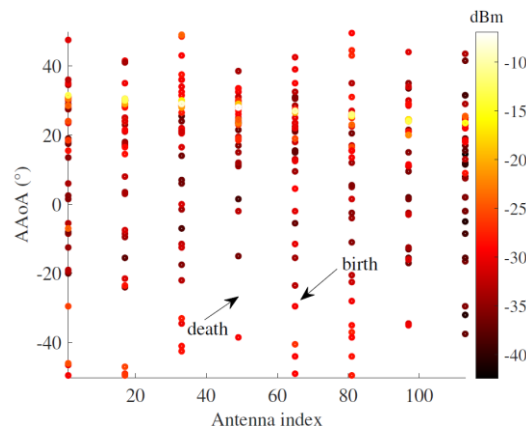
信道测量结果



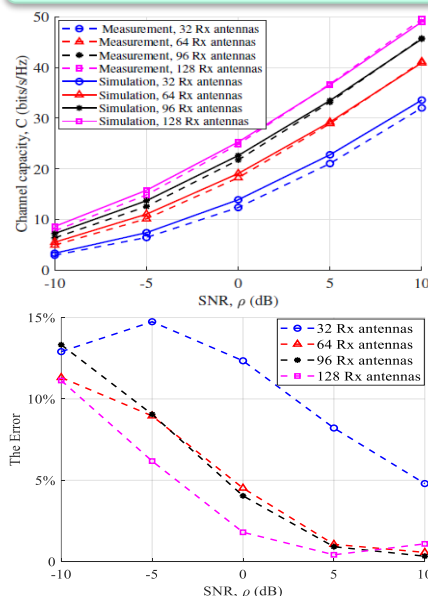
均匀线阵角度功率谱密度



视距环境下奇异值扩展随接收端天线数目及天线阵列配置的变化



分布式均匀线阵角度功率谱密度



测量和仿真的信道容量及误差

单用户球面波特性和

- 视距路径的方位到达角沿阵列的漂移表明了**球面波特性和**
- 分布式均匀线阵的角度变化范围较均匀线阵角度变化范围**更大**，表明**更大**天线阵列孔径呈现**更加明显**的球面波特性和

单用户空域非平稳特性和

- 多径沿阵列轴的**生灭过程**表明了超大规模MIMO信道的**空域非平稳特性和**

多用户信道硬化特性和

- 视距环境下，天线数目**越多**、天线阵列孔径**越大**，奇异值扩展**越小**，**信道硬化**现象越明显

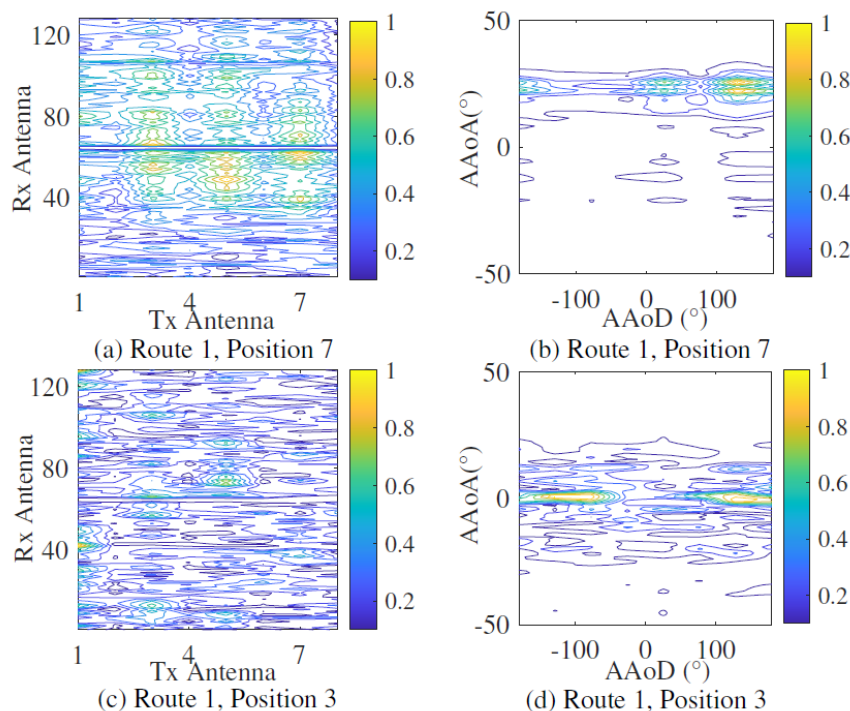
模型准确性

- 提出的通用信道模型对于信道容量的拟合精度**大于85%**，证明了模型的**准确性**

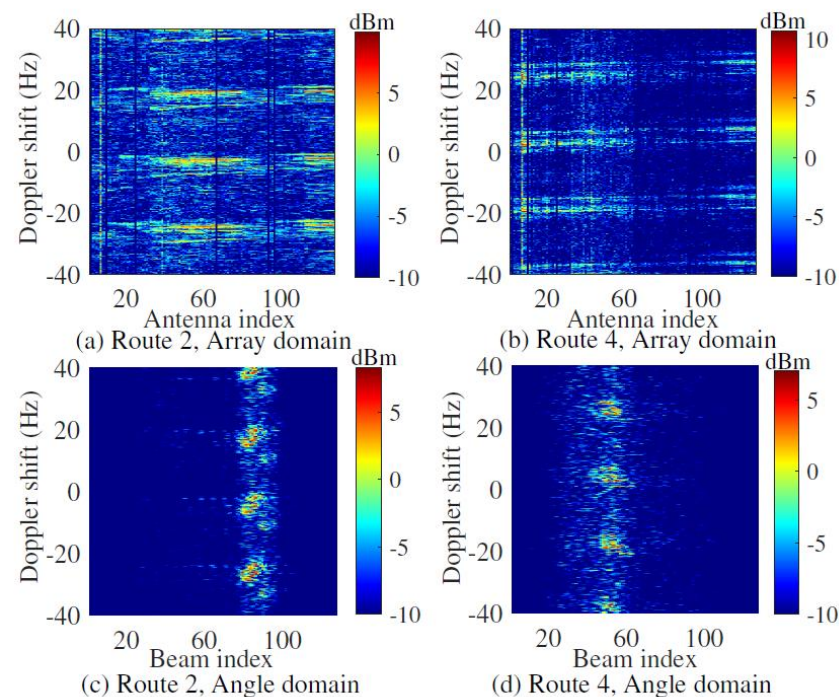
稀疏性: 归一化信道矩阵及多普勒功率谱密度

- 角度域归一化信道矩阵的大部分能量集中在很少范围的到达角内, 表明了**信道的空间稀疏特性**
- 视距环境的稀疏特性比非视距环境更**明显**
- 与阵列域相比, **角度域**多普勒功率谱密度呈现更明显的**稀疏特性**

视距环境(路线 1, 位置点 7)及非视距环境下的归一化信道矩阵 (路线 1, 位置点 3)

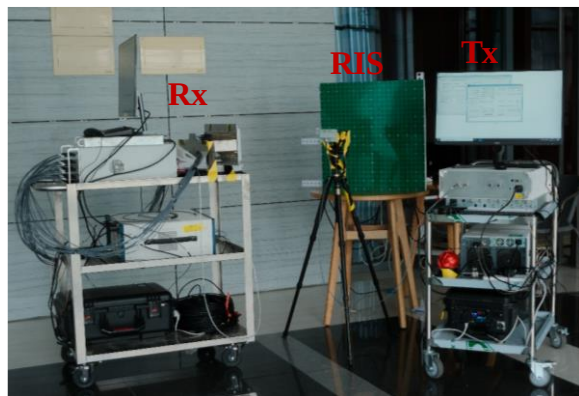


阵列域及角度域的多普勒功率谱密度

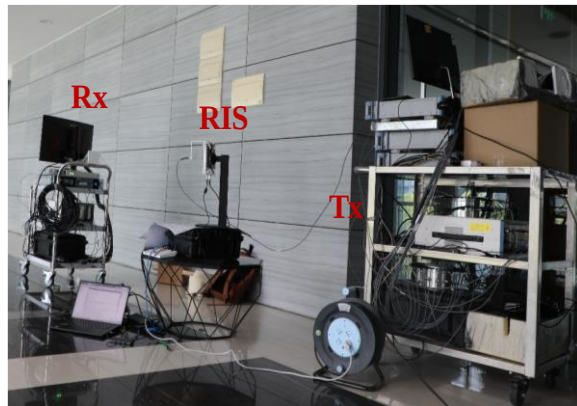


工作4: RIS信道测量与特性分析

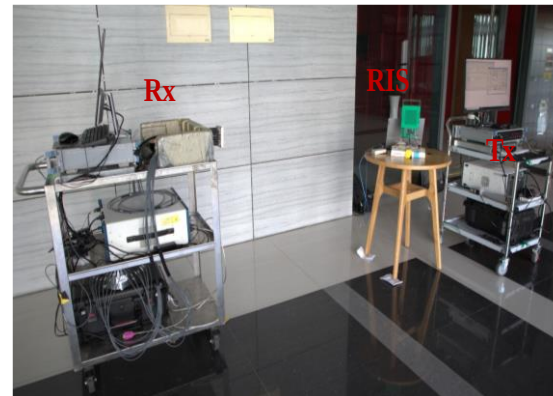
- Tx、RIS固定, Rx移动, $\theta_t=0^\circ$
- 反射型RIS的 θ_r 分别设置为 30° 和 45° , 透射型RIS的 θ_r 分别设置为 0° 、 30° 和 45°



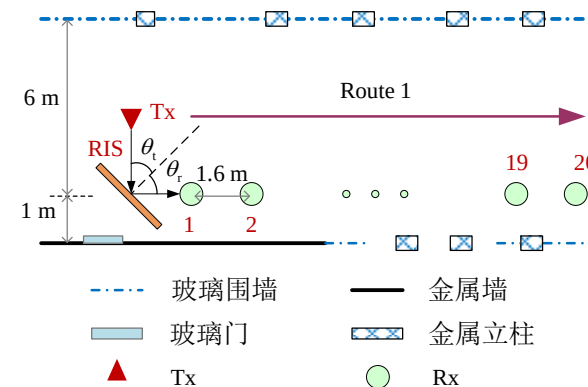
用例1: 5.4 GHz 反射型
RIS信道测量系统



用例2: 28 GHz 反射型
RIS信道测量系统



用例3: 28 GHz 透射型
RIS信道测量系统



RIS信道测量场景

测量场景	中心频率/带宽	天线配置	RIS配置
室内大厅	5.4 GHz / 200 MHz	Tx: 喇叭天线 Rx: 4×4双极化均匀面阵	单元数: 12×12 / 24×24 尺寸: 312 mm×312 mm / 624 mm×624 mm
	28 GHz / 200 MHz	Tx: RIS Rx: 4×4双极化均匀面阵	单元数: 32×32(反射型) / 18×18(透射型) 尺寸: 170 mm×170 mm / 90 mm×90 mm

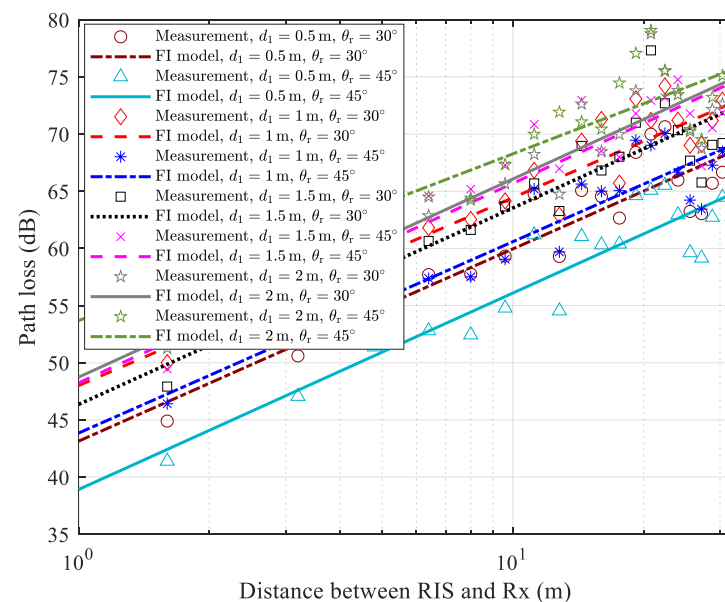
路径损耗

■ 主要创新点

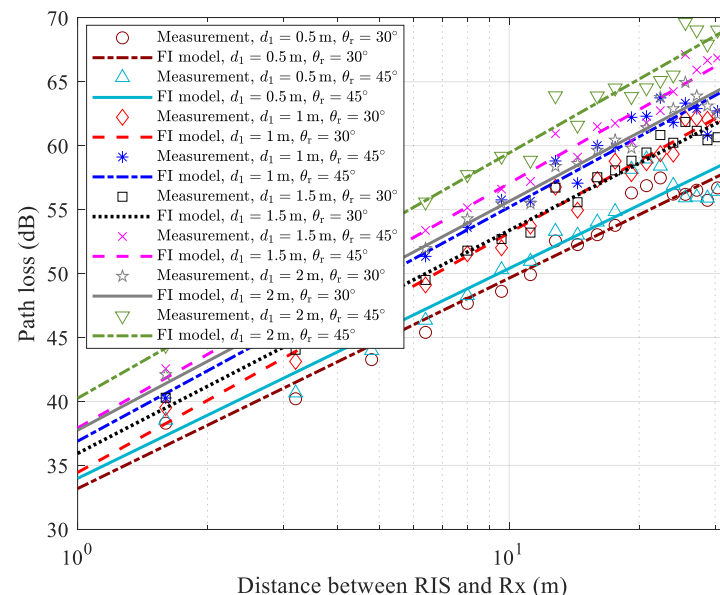
- 分析路径损耗，探究RIS规格大小、编码方式对路径损耗的影响

■ 主要结论

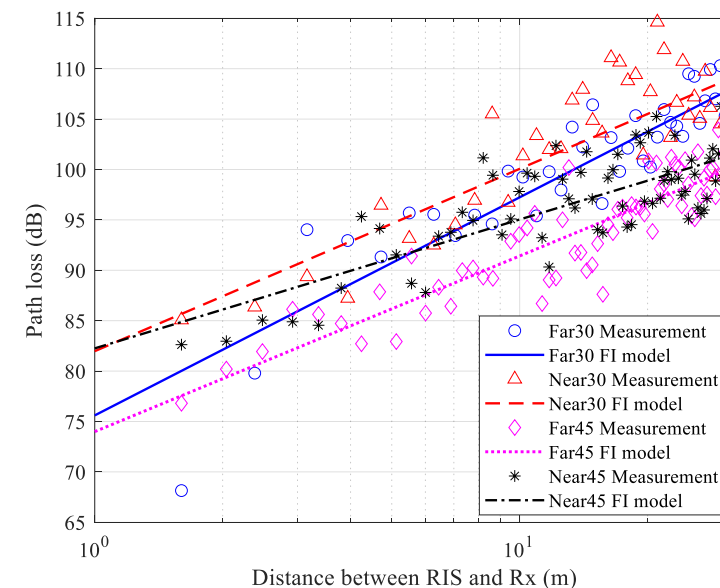
- 采用不同规格大小的RIS时，**T_x-RIS距离和反射角度**对路径损耗的影响规律存在**差异**
- 远场编码考虑均匀平面波，忽略了近场的能量损耗机制，因此使得计算的**路径损耗值偏低**



用例1的12×12 RIS时的路径损耗



用例1的24×24 RIS时的路径损耗



用例2的不同编码方式时的路径损耗

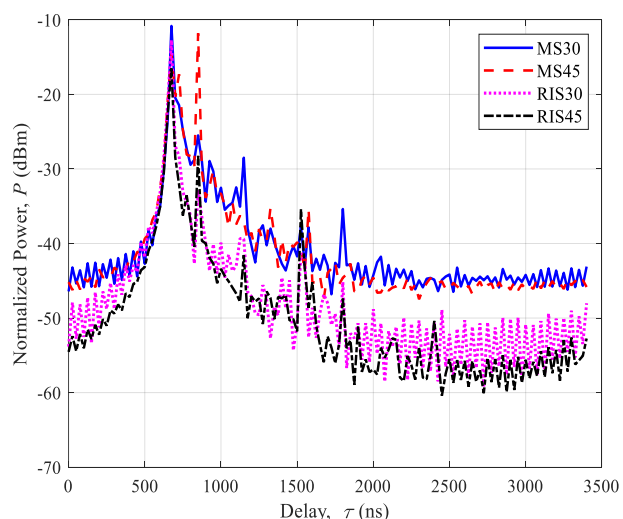
时延扩展与角度扩展

主要创新点

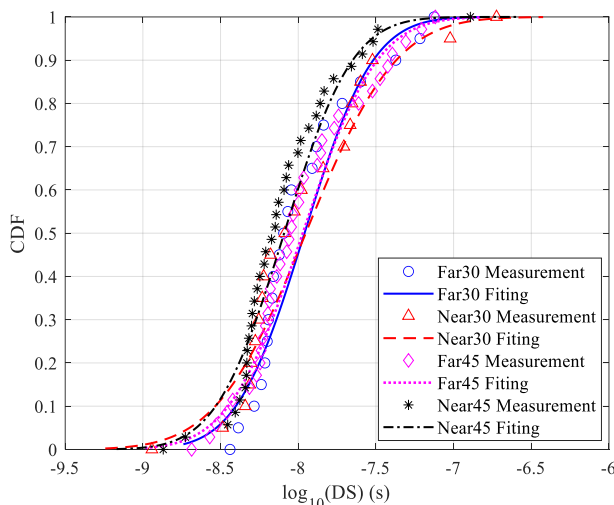
- 分析时延功率谱密度、时延扩展、角度扩展，探究不同类型RIS无线信道特性的区别

主要结论

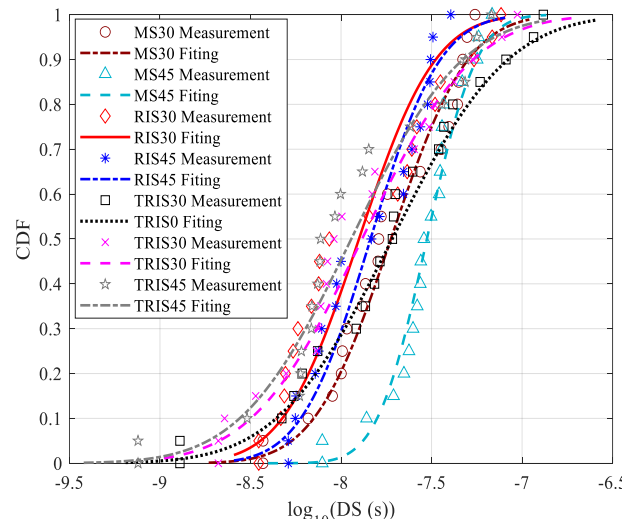
- 与金属板相比，RIS具有重构信道环境的能力，因此RIS反射具有**更少的多径、更小的时延扩展和角度扩展**
- 相较于反射型RIS，信号经**透射型RIS**时存在折射、衍射等多种传播机制，导致信号在时间和空间上的分布更加分散，从而使得**时延扩展和角度扩展波动范围（方差）更大**
- 不同编码方式时的多径环境类似，因此时延扩展具有较强的**相似性**



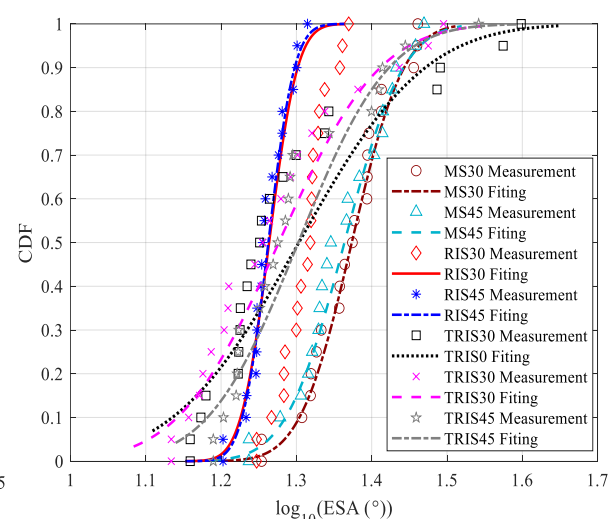
用例2的时延功率谱密度



用例2的不同编码
时延扩展

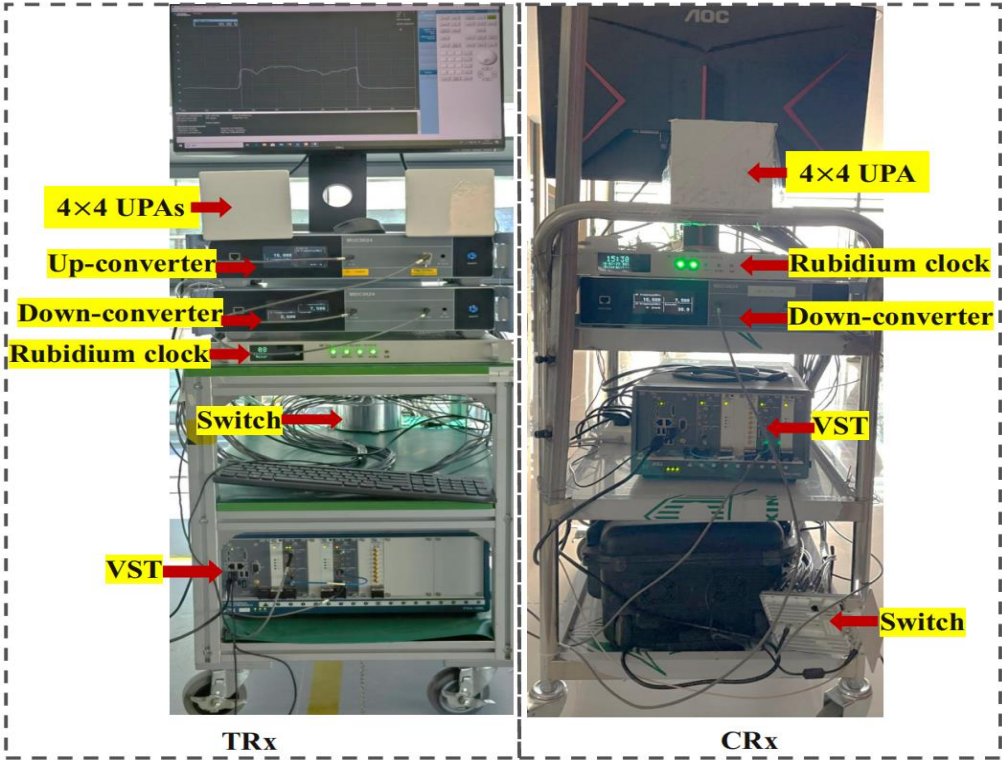


用例3的不同类型RIS
时延扩展



用例3的不同类型RIS
俯仰角扩展

工作5：ISAC信道测量与特性分析



ISAC信道测量系统

测量参数	参数值
频段/带宽	10 GHz/200 MHz
T _x 天线阵列	4×4 双极化均匀面阵 (UPA)
S _{Rx} 天线阵列	4×4 双极化均匀面阵 (UPA)
C _{Rx} 天线阵列	4×4 双极化均匀面阵 (UPA)

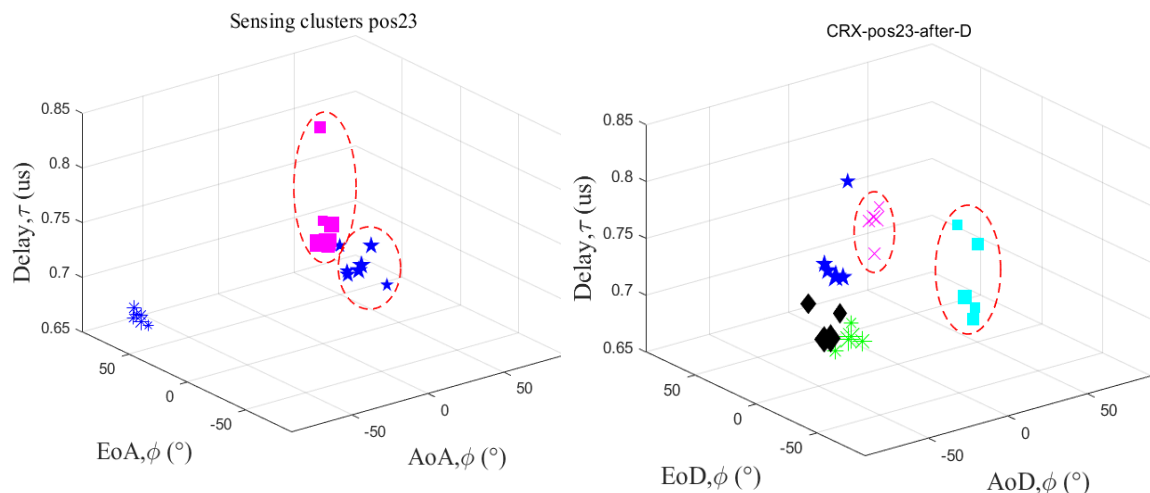
信道测量结果分析 (1/2)

■ 主要创新点

- 通过分析共有簇与共有簇功率占比，验证通信信道与感知信道之间的相似性
- 分析感知、通信信道发射角度/波束间相似性，验证连续空间动态环境下的感知辅助通信

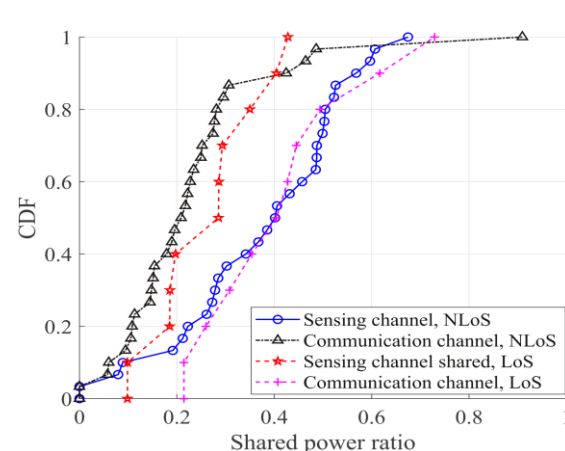
■ 主要结论

- 感知-通信共有簇存在，且共有簇功率占比较高，因此感知簇可以指导通信信道建模，减小通信信道随机性
- 感知-通信信道角度相似性较高，感知可以辅助通信信道建模，可降低通信信道估计复杂度

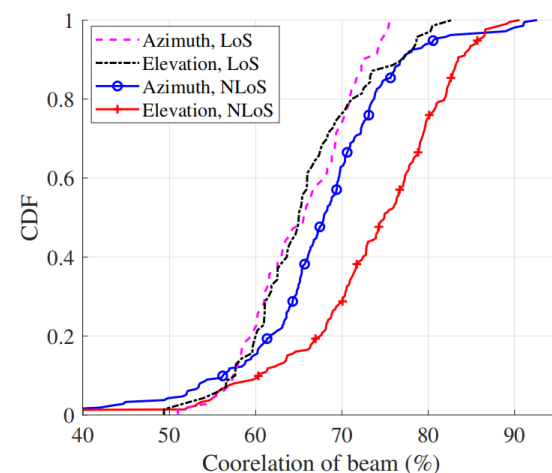


感知信道共有簇

通信信道共有簇



共有簇功率占比



角度相似性

信道测量结果分析 (2/2)

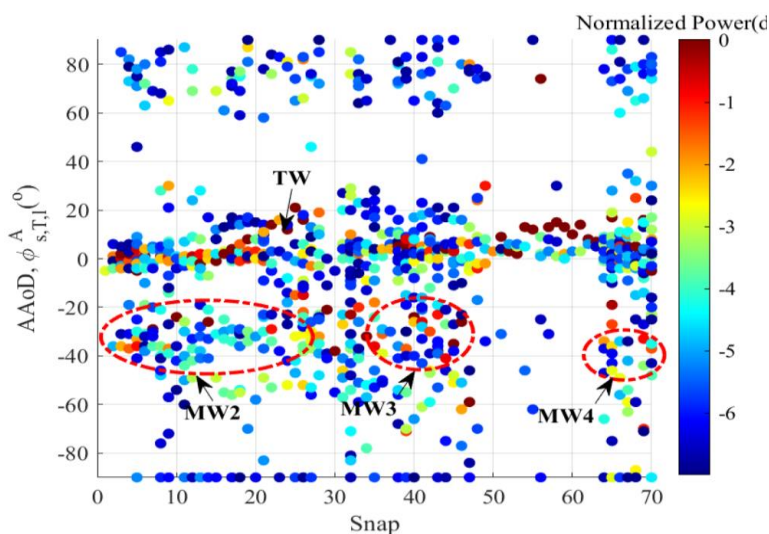
■ 主要创新点

- 连续空间运动状态下，验证感知信道与通信信道共有多径、生灭现象与空间一致性

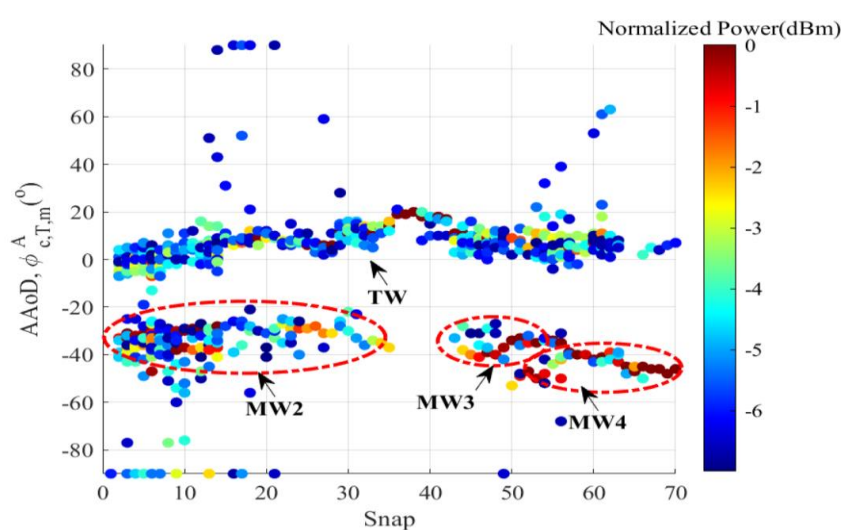
■ 主要结论

- 连续空间运动场景下，**通信信道**和**感知信道**都表现出明显的**多径生灭**现象，多径在空间中连续变化，体现出**空间一致性**特性
- 通过连续空间信道测量的多径信息，实现**环境感知**功能，且主要环境物体体现为**感知-通信共有多径**

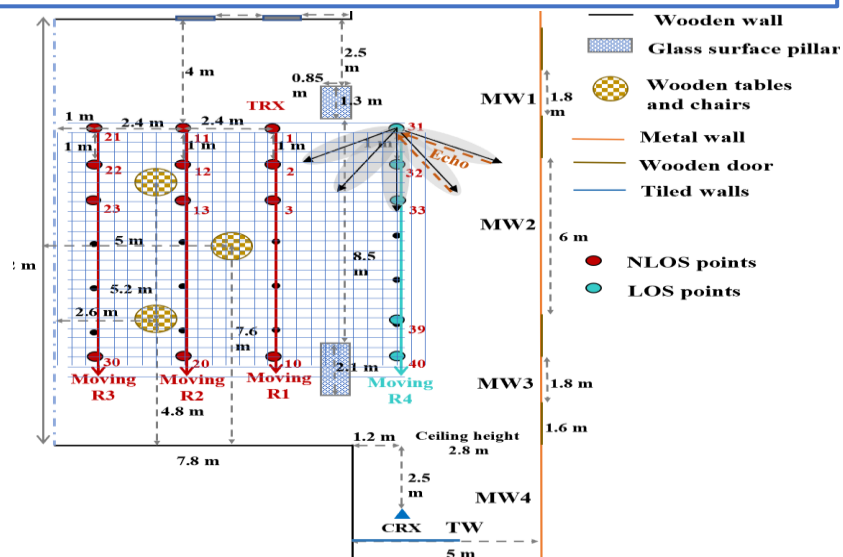
■ 未来工作：继续开展连续立体空间内**高密度网格点**的通感一体化信道测量研究



感知信道角度功率谱密度



通信信道角度功率谱密度



连续空间高密度网格点信道测量示意图

提纲

一、6G愿景与信道特性

二、6G多频段多场景信道测量与建模

三、6G普适几何随机信道模型

6G普适信道建模理论方法



普适信道建模理论与6G普适信道模型

统一的建模框架/方法

基于簇的建模框架

使用**不同簇**表征**不同频段/场景**中信道的传播环境

统一的信道冲激响应

簇内径的矢量叠加

簇内径参数：幅度、相位、时延、多普勒频率、角度等

融合6G全频段全场景信道特性

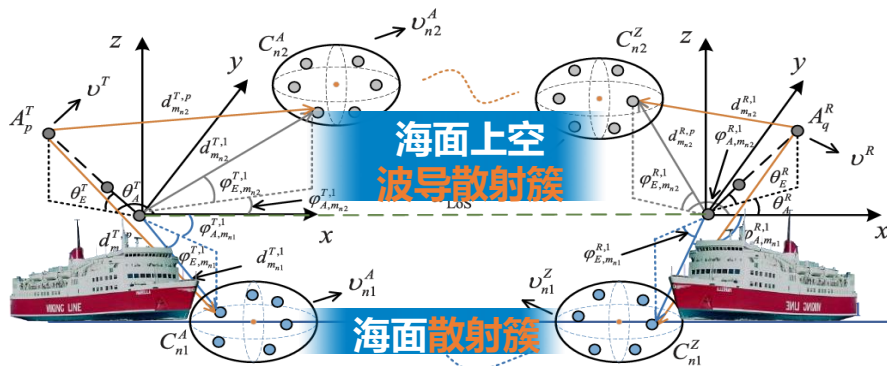
增加/修改信道模型参数

准确描述6G全频段全场景信道特性

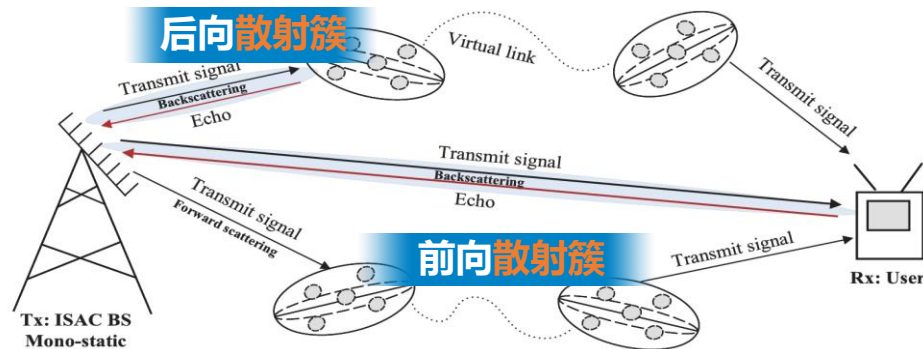
6G普适（通用、统一）信道模型 (6GPCM)

基于5G标准化信道模型扩展，兼容3GPP/ITU等2G-5G标准化信道模型，可简化为特定频段/场景的信道模型

海洋船舶对船场景



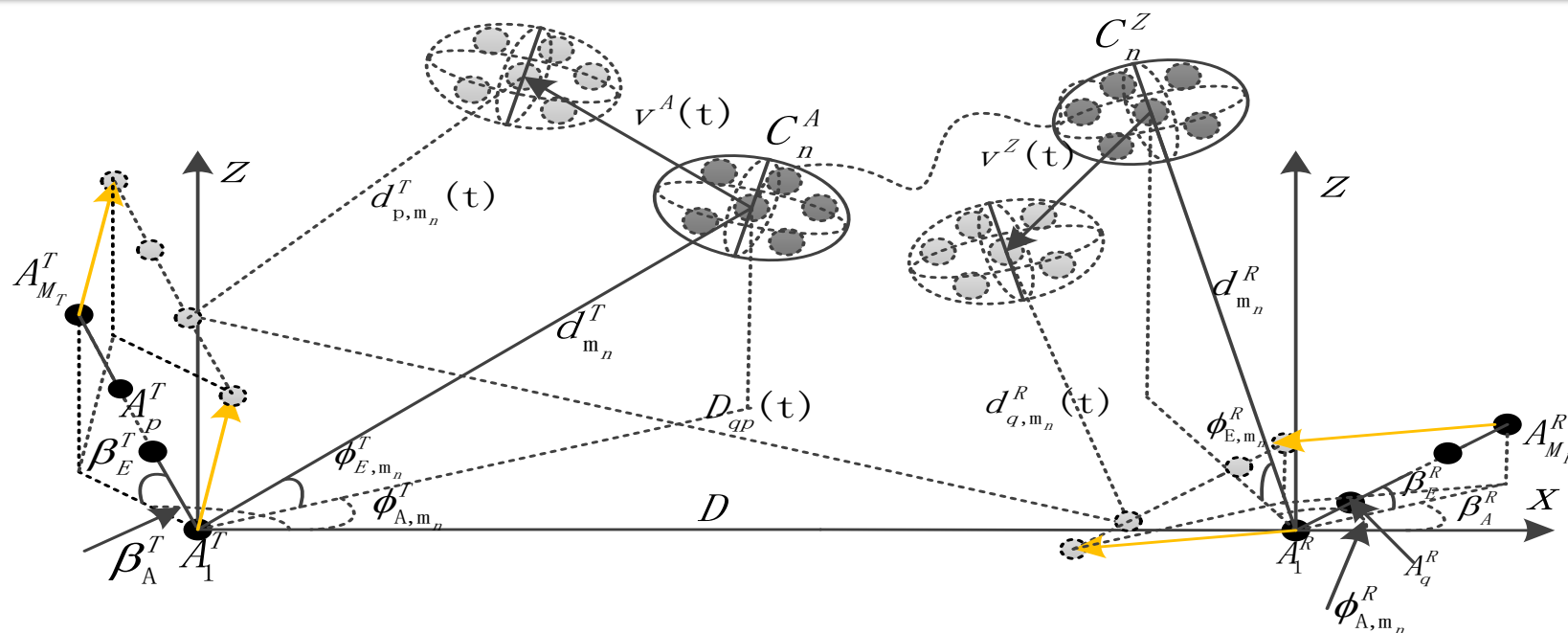
通感一体化场景



6G普适信道模型：模型框图

三维6G普适信道模型：

- 发送端： M_T 单元均匀线阵；
- 接收端： M_R 单元均匀线阵；
- 支持**多移动** (Tx, Rx, 簇) 及**任意速度和轨迹**
- **三维椭球高斯散射体分布**联合建模方位角、俯仰角、及散射体到发射端/接收端的距离



C.-X. Wang, Z. Lv, X. Gao, X.-H. You, Y. Hao, and H. Haas, "Pervasive channel modeling theory and applications to 6G GBsMs for all frequency bands and all scenarios," *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol. 71, no. 9, pp. 9159-9173, Sept. 2022.

6G普适信道模型：信道冲激响应

$$\begin{aligned}
 \blacksquare \quad h_{qp,fc}(t, \tau) &= \underbrace{\sqrt{\frac{K_R(t)}{K_R(t)+1}} h_{qp,fc}^L(t, \tau)}_{LOS} + \underbrace{\sqrt{\frac{1}{K_R(t)+1}} h_{qp,fc}^N(t, \tau)}_{NLOS} \\
 \blacksquare \quad h_{qp,fc}^L(t, \tau) &= \begin{bmatrix} F_{q,fc,V}(\phi_{E,L}^R(t), \phi_{A,L}^R(t)) \\ F_{q,fc,H}(\phi_{E,L}^R(t), \phi_{A,L}^R(t)) \end{bmatrix}^T \begin{bmatrix} e^{j\theta_L^{VV}} & 0 \\ 0 & -e^{j\theta_L^{HH}} \end{bmatrix} \mathbf{F}_r \begin{bmatrix} F_{p,fc,V}(\phi_{E,L}^T(t), \phi_{A,L}^T(t)) \\ F_{p,fc,H}(\phi_{E,L}^T(t), \phi_{A,L}^T(t)) \end{bmatrix} e^{j2\pi f_c \tau_{qp}^L(t)} \delta(\tau - \tau_{qp}^L(t)) \\
 \blacksquare \quad h_{qp,fc}^N(t, \tau) &= \sum_{n=1}^{N_{qp}(t)} \sum_{m=1}^{M_n(t)} \begin{bmatrix} F_{q,fc,V}(\phi_{E,m_n}^R(t), \phi_{A,m_n}^R(t)) \\ F_{q,fc,H}(\phi_{E,m_n}^R(t), \phi_{A,m_n}^R(t)) \end{bmatrix}^T \begin{bmatrix} e^{j\theta_{m_n}^{VV}} & \sqrt{\mu \kappa_{m_n}^{-1}(t)} e^{j\theta_{m_n}^{VH}} \\ \sqrt{\kappa_{m_n}^{-1}(t)} e^{j\theta_{m_n}^{HV}} & \sqrt{\mu} e^{j\theta_{m_n}^{HH}} \end{bmatrix} \mathbf{F}_r \begin{bmatrix} F_{p,fc,V}(\phi_{E,m_n}^T(t), \phi_{A,m_n}^T(t)) \\ F_{p,fc,H}(\phi_{E,m_n}^T(t), \phi_{A,m_n}^T(t)) \end{bmatrix} \sqrt{P_{qp,m_n,fc}(t)} e^{j2\pi f_c \tau_{qp,m_n}(t)} \delta(\tau - \tau_{qp,m_n}(t))
 \end{aligned}$$

- $N_{qp}(t)$: 簇的数量;
- $K_R(t)$: 莱斯因子;
- $M_n(t)$: 簇内径的数量;
- $\tau_{qp,m_n}(t)$: 从 p -th 天线至 q -th 天线的 n -th 簇的 m -th 径的时延(mmWave + THz);
- $\theta_L^{VV}, \theta_L^{HH}, \theta_{m_n}^{VV}, \theta_{m_n}^{VH}, \theta_{m_n}^{HV}, \theta_{m_n}^{HH}$: 在 $(0, 2\pi]$ 服从均匀分布的随机相位;
- $\kappa_{m_n}(t)$: 交叉极化功率比

参数时变

子径时延可分辨

考虑交叉极化比

考虑法拉第旋转

支持高移动性&时间演进/
多移动性/簇的移动

支持毫米波/太赫兹

支持天线极化

支持低轨卫星通信

6G普适信道模型：普适性 (1/2)

适用频段/场景		信道特性	相关参数与建模方法
全频段	毫米波/太赫兹信道	高时延分辨率	对簇内子径的时延建模 ($\tau_{qp,m_n}(t)$)
		频域非平稳	- 引入簇在频域的生灭过程; - 功率随频率变化 ($P_{qp,m_n,f_c}(t)$)
		大气吸收	考虑毫米波段氧气吸收/太赫兹波段分子吸收 (OL)对接收功率的影响
		阻挡效应	考虑阻挡效应(BL)对接收功率的影响
	可见光信道	多普勒效应可忽略	只对功率 ($P_{qp,m_n,f_c}(t)$) 和传播时延 ($\tau_{qp,m_n}(t)$) 建模
		接收端三维任意旋转	接收端法线的角度 ($\beta_A^R(t), \beta_E^R(t)$) 是时变的
		特殊的LED辐射模式	支持任何LED辐射模式 ($F_{pHPV}(\tilde{\theta}_{pHPV,E}^T, \tilde{\theta}_{pHPV,A}^T)$)
全覆盖场景	LEO信道	可见光频域非平稳	建模簇的有效反射率 ($\Gamma_{pHPV,n}$)
		电离层法拉第效应	建模为法拉第旋转矩阵(F_r)
	UAV信道	雨水衰落	对雨水衰落(RA)建模
		三维任意轨迹	运动有俯仰方向且随时间变化($\alpha_E^T(t), \alpha_E^R(t), \alpha_E^{A_n}(t)$, 和 $\alpha_E^{Z_n}(t)$)
	海洋通信信道	高度差异性	大尺度参数生成服从对数高斯分布, 分布的均值和标准差与无人机高度相关
		位置依赖特性	LoS径、粗糙的海洋表面和海面上空蒸发波导的多径传播分别建模为 $h_{qp,f_c}^{LoS}(t, \tau)$, $h_{qp,f_c}^{NLoS1}(t, \tau)$, 和 $h_{qp,f_c}^{NLoS2}(t, \tau)$, 并使用功率系数 K_R, S_1, S_2 控制对应部分随两船距离变化的消失和出现
		船随海面三维波动	使用经典的Pierson-Moskowitz模型建模船的3D轨迹

6G普适信道模型：普适性 (2/2)

适用场景		信道特性	相关参数与建模方法
全 应 用 场 景	车联网信道	任意轨迹	分别对收发端和簇运动速度建模，且速度大小和方向可变 ($\vec{v}^T(t)$, $\vec{v}^R(t)$, $\vec{v}^{An}(t)$, 和 $\vec{v}^{Zn}(t)$)
		多移动性	
	(超) 高铁通信信道	大多普勒频移	多普勒频移 ($f_{D,qp,m_n}(t)$) 具有时变性
		时域非平稳	- 引入簇在时域的生灭过程 - 信道参数是时变的
		波导效应	簇的数量 ($N_{qp}(t)$) 建模为受真空管道波导效应影响
	(超) 大规模MIMO信道	球面波特性和	分别建模每根天线到达角和离开角 ($\phi_{A,m_n}^T(t)$, $\phi_{E,m_n}^T(t)$, $\phi_{A,m_n}^R(t)$, 和 $\phi_{E,m_n}^R(t)$)
		空间非平稳	- 引入簇在阵列域的生灭过程 - 在功率 ($P_{qp,m_n,f_c}(t)$) 中引入沿阵列轴变化项 ($\xi_n(p, q)$)
	RIS信道	级联子信道	引入 $\mathbf{H}_{IR}$, $\mathbf{H}_{TI}$, 和 $\mathbf{H}_{TR}$ 对三个子信道分别建模
		相移矩阵	引入相移对角矩阵 Φ 实现对信道环境的智能调控
	IIoT信道	密集多径	对密集多径 ($h_{qp,f_c}^{DMC}(t, \tau)$) 进行建模
共有特性		空间一致性	使用SoS法生成具有空间一致性的大尺度参数
		多频段相关性	- 路径损耗 (PL) 与频率相关 - 大尺度参数中时延扩展和角度扩展与频率相关 - 功率 ($P_{qp,m_n,f_c}(t)$) 具有频率相关性

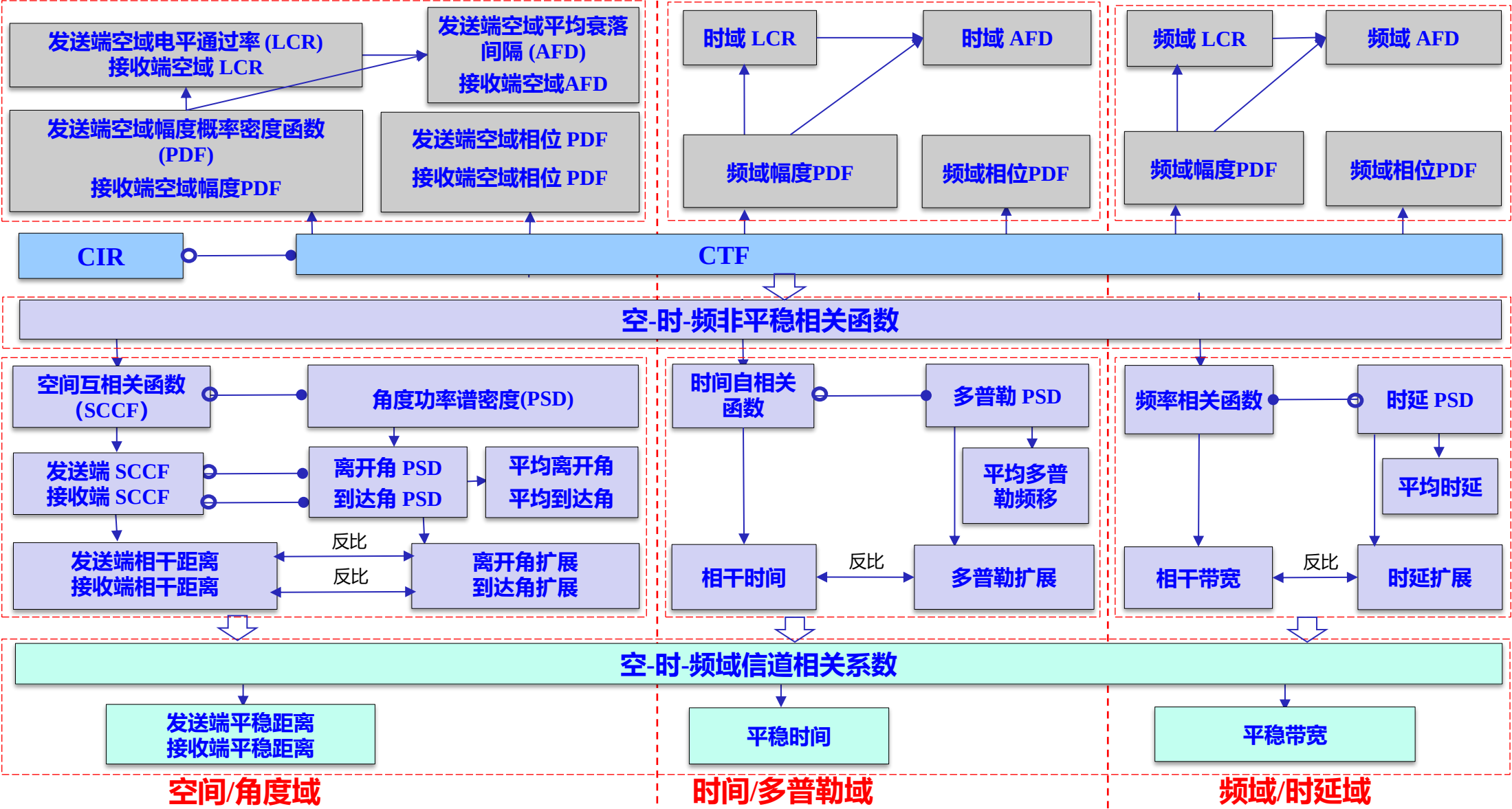
6G普适信道模型 & 5G标准化模型的比较 (1/2)

适用场景		信道特性	6GPCM	3GPP TR 38.901	IMT 2020	QuaDRiGa	B5GCM
全频段	毫米波/太赫兹信道	高时延分辨率	是	是	是	是	是
		频域非平稳	是	否	否	否	是
		大气吸收	是	是	是	否	是
		阻挡效应	是	是	是	否	是
	可见光信道	多普勒效应可忽略	是	否	否	否	否
		接收端三维任意旋转	是	否	否	否	否
		特殊的LED辐射模式	是	否	否	否	否
		可见光波长依赖性	是	否	否	否	否
全覆盖场景	LEO信道	电离层法拉第效应	是	否	否	否	否
		雨水衰落	是	否	否	否	否
	UAV信道	三维任意轨迹	是	否	否	是	否
		高度差异性	是	否	否	否	否
	海洋通信信道	位置依赖特性	是	否	否	否	否
		船随海面三维波动	是	否	否	否	否

6G普适信道模型 & 5G标准化模型的比较 (2/2)

适用场景		信道特性	6GPCM	3GPP TR 38.901	IMT 2020	QuaDRiGa	B5GCM
全 应 用 场 景	车联网信道	任意轨迹	是	否	否	是	是
		多移动性	是	双端移动	否	双端移动	是
	(超)高铁通信信道	大多普勒频移	是	是	是	是	是
		时域非平稳	是	否	否	是	是
		波导效应	是	否	否	否	否
	超大规模MIMO信道	球面波特性和	是	否	否	是	是
		空间非平稳	是	否	否	是	是
	RIS信道	级联子信道	是	否	否	否	否
		相移矩阵	是	否	否	否	否
	IIoT信道	密集多径	是	否	否	否	否
	共有特性	空间一致性	是	是	是	是	是
		多频段相关性	是	是	是	是	否

6G普适信道模型的空时频统计特性



6G普适信道仿真器(SEU-PML-6GPCS)软件

■ 支持6G全频段全场景信道仿真

- 短波到光无线全频段
- 卫星/UAV/海洋全覆盖场景
- 通感一体化/超大规模天线/工业物联网/智能反射面等全应用场景

■ 支持全域信道特性/信道容量仿真

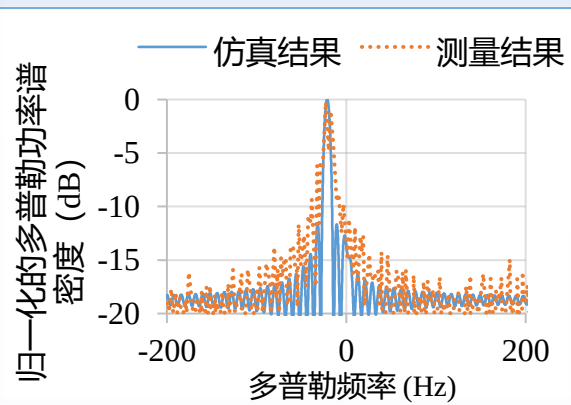
- 空域
- 时域
- 频域
- 角度域
- 多普勒域
- 时延域

■ 支持菜单式信道参数配置

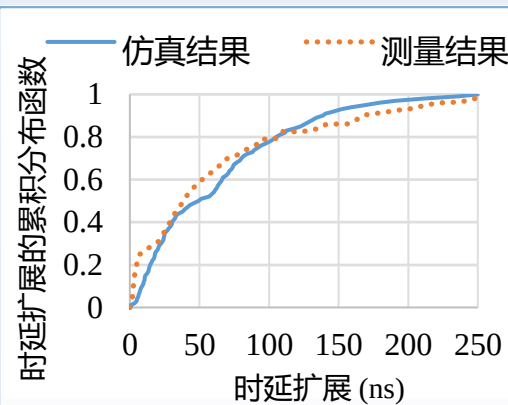
- 频段
- 场景
- 天线
- 运动轨迹

■ 支持基于信道测量数据的信道模型参数优化

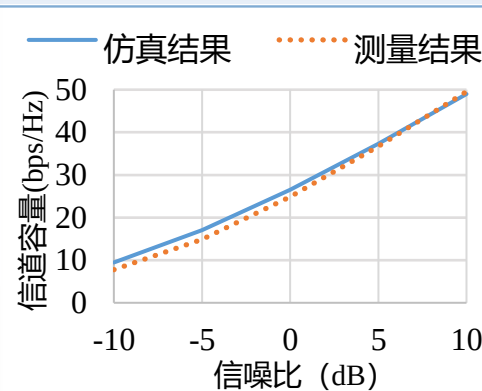
海洋船对船信道模型



海洋船对船信道模型



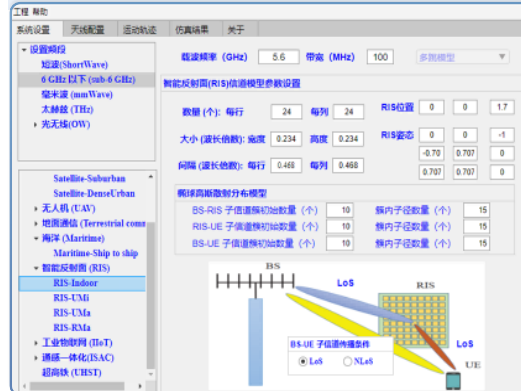
超大规模天线信道模型



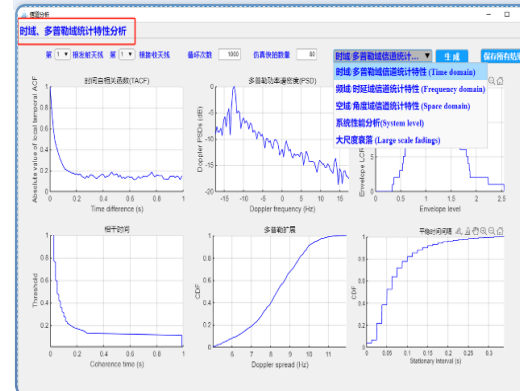
卫星通信场景系统设置界面



RIS通信场景系统设置界面



结果分析界面



空时频非平稳

近场、远场通用性

三维任意轨迹多移动性

支持多用户、多频段

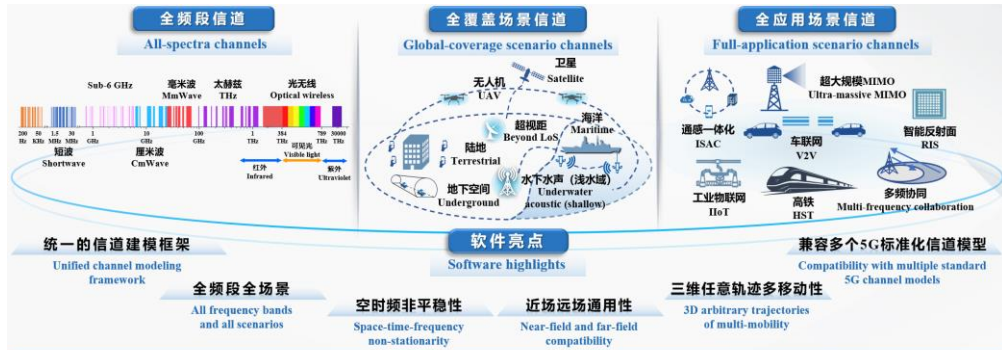
东南大学-紫金山实验室-6G普适信道仿真器软件 v3.0
SEU-PML-6G Pervasive Channel Simulator Software v3.0
(SEU-PML-6GPCS Software v3.0)

王承祥教授

主页: <https://ncrl.seu.edu.cn/chxwang>

Email: chxwang@seu.edu.cn

东南大学信息科学与工程学院移动通信全国重点实验室、紫金山实验室王承祥教授团队自主研发的SEU-PML-6GPCS软件是6G全频段全场景普适信道模型的实现。该模型基于团队首创的普适信道建模理论,使用统一的信道建模框架和方法、统一的信道冲激响应表达式,基于5G标准化信道模型(3GPP TR 38.901)扩展,融合6G全频段、全覆盖场景、全应用场景信道特性,而提出的一种面向标准化的6G普适几何随机信道模型。本成果是业界涵盖频段和场景最多、考虑的信道特性最全的信道模型和仿真软件。



输出(Outputs):

- 大尺度衰落: 自由空间损耗、阴影衰落、大气损耗、闪烁损耗、遮挡损耗、建筑物穿透损耗、雨水衰减(Large-scale fading: free space loss, shadow fading, atmospheric/scintillation/blockage/building penetration/rain attenuation loss)
- 小尺度衰落信道矩阵(Small-scale fading channel matrices)
- 空/时/频/角度/多普勒/时延域信道统计特性(Statistical properties in six domains (space/time/frequency/angle/Doppler/delay domains)), 信道容量(Channel capacity)
- 信道模型参数(Channel model parameters)

	全频段			全覆盖场景				全应用场景						
	短波	Sub-6 GHz /厘米波/毫米波	太赫兹/光无线	卫星	无人机/海洋	地下空间	水下声学通信	车联网	(超)大规模MIMO	智能超表面	工业物联网	通感一体化		
3GPP TR 38.901 Release 17	×	√	×	×	×	×	×	√	×	×	×	√	×	×
IMT-2020 ITU-R M.2412	×	√	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×
QuaDRiGa Version 2.8.1	×	√	×	√	×	×	×	√	×	√	×	√	×	×
6G普适信道模型 v3.0	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√
其他特定频段、特定场景模型	仅适用于有限频段、有限场景信道													

兼容多个3GPP和ITU标准化信道模型:

(1) 5G标准化信道模型: 3GPP TR 38.901、IMT-2020

(2) 卫星通信信道模型:

① 3GPP TR 38.811 (S频段和Ka频段)

② ITU-R (P618、P837-7、P.839-4), 仅大尺度衰落模型

(3) 短波通信信道模型: ITU-R (P.371-9、P.533-14、P.1239-4)

(4) 无人机通信信道模型(0.5-6 GHz): 3GPP TR 36.777

(5) 地面通信大尺度衰落信道模型: ITU-R (P.676、P.530、P.838)

(6) 车联网通信信道模型(0.5-100 GHz): 3GPP TR 37.885

支持仿真6G全频段全场景信道的全部六个域的统计特性和信道容量, 包含:

空域	时域	频域	角度、多普勒、时延域	系统性能
- 空间互相关函数 - 平稳距离 - 空域电平均割率 - 平均衰落距离	- 时间自相关函数 - 平稳时间 - 时域电平均割率 - 平均衰落时间	- 频率互相关函数 - 平稳带宽 - 频域电平均割率 - 平均衰落带宽	- 角度功率谱密度 - 多普勒功率谱密度 - 时延功率谱密度	信道容量等

支持跨频段、系统级多用户信道仿真

可基于信道测量数据进行信道模型参数优化

具有用户友好的可视化界面, 提供菜单式的6G信道参数配置选项, 可自定义配置频段、场景、天线阵列的规模、类型和极化方式, 以及收发端和散射簇的任意运动轨迹等

提供了18个6G典型频段典型场景信道模型案例及4个信道模型应用案例:

- 水下(浅海域) 水声通信信道模型
- 短波地面通信MIMO信道模型
- 超短波地面通信(包含超视距) MIMO信道模型
- Sub-6 GHz 卫星通信MIMO信道模型
- Sub-6 GHz 无人机通信MIMO信道模型
- Sub-6 GHz 海洋通信(包含超视距) MIMO信道模型
- Sub-6 GHz 地下空间通信MIMO信道模型
- Sub-6 GHz 超大规模MIMO信道模型
- Sub-6 GHz 工业物联网信道模型
- Sub-6 GHz 智能超表面信道模型
- Sub-6 GHz 车联网通信信道模型
- Sub-6 GHz 真空管道超高铁通信信道模型
- 面向标准化的厘米波超大规模MIMO信道模型
- 毫米波通感一体化室外通信信道模型
- Sub-6 GHz/厘米波/毫米波频段内跨频段地面通信信道模型
- 太赫兹室内通信MIMO信道模型
- 光无线室内通信信道模型
- 面向标准化的通感一体化信道模型
- 由发射端信号和信道模型输出接收端信号
- 应用信道模型仿真多种调制、解调方案的误码率
- 应用信道矩阵计算频谱效率与能量效率
- 仿真信道模型的幅度概率密度函数并拟合莱斯分布

参考文献

- [1] C.-X. Wang, Z. Lv, X. Gao, X.-H. You, Y. Hao, and H. Haas, "Pervasive wireless channel modeling theory and applications to 6G GBSMs for all frequency bands and all scenarios," *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol. 71, no. 9, pp. 9159-9173, Sept. 2022.
- [2] C.-X. Wang, Z. Lv, Y. Chen, and H. Haas, "A complete study of space-time-frequency statistical properties of the 6G pervasive channel model," *IEEE Trans. Commun.*, vol. 71, no. 12, pp. 7273-7287, Dec. 2023.
- [3] C.-X. Wang, X.-H. You, X. Gao, et al., "On the road to 6G: Visions, requirements, key technologies and testbeds," *IEEE Commun. Surveys Tuts.*, vol. 25, no. 2, pp. 905-974, 2nd Quart. 2023.

1) 可通过访问课题组主页获取软件下载链接: <https://ncrl.seu.edu.cn/chxwang>

2) 王承祥教授, 东南大学, 紫金山实验室, 邮箱: chxwang@seu.edu.cn

黄杰副教授, 东南大学, 紫金山实验室, 邮箱: j_huang@seu.edu.cn

黄晨副研究员, 紫金山实验室, 东南大学, 邮箱: huangchen@pmlabs.com.cn

吕振工程师, 紫金山实验室, 邮箱: lvzhen@pmlabs.com.cn

未来我们将进一步增加支持更多交叉通信场景、考虑更多信道特性, 优化可视化界面功能, 并推出C++版本, 敬请关注!



谢谢！ 请批评指正！