

5G-Advanced 通感融合 指标与评价方法研究报告

2025

A stylized, light blue silhouette of a city skyline with various skyscrapers of different heights and shapes, positioned at the bottom of the page.

研究报告要点

在 5G-A 的演进蓝图中，通信与感知融合技术受到业界重点关注，使能通信网络的“智慧感知能力”，服务于智慧低空、智能交通等领域创新应用。通感融合指标与评估方法研究是科学评估不同场景下通感技术方案应用性能的关键，也是推动通感技术落地应用的必要前提。

本研究报告基于 IMT-2020(5G)推进组发布《5G-Advanced 通感融合仿真评估方法》感知信道建模基础上，结合 3GPP 信道建模最新研究进展，与业界研讨共识一套基于 3GPP TR 38.901 通信信道以及实测结果的通感仿真信道模型，包括目标与环境物体、大尺度衰落与小尺度衰落、以及空间一致性的通感融合建模方法。面对感知场景的差异化需求，研究通感指标定义及其评估方法，明确无人机、车辆及室内外行人等场景下的仿真配置，提供业界最新感知性能评估结果，为后续 5G-A 通感融合技术方案性能评估和标准化提供重要参考。

目录

目录.....	2
1. 概述.....	4
1.1. 通感业界进展.....	4
1.2. 本报告研究目标.....	5
2. 5G-A 通感信道模型假设.....	5
2.1. 无线感知模式分类.....	6
2.2. 目标信道.....	7
2.2.1. 目标 RCS 建模.....	7
2.2.2. 环境物体 (EO) 建模.....	8
2.2.3. 大尺度衰落建模.....	9
2.2.4. 小尺度衰落建模.....	12
2.2.5. 空间一致性建模.....	14
2.3. 背景信道.....	15
3. 5G-A 通感评估配置.....	16
3.1. 系统仿真配置.....	16
3.1.1. 无人机感知.....	17
3.1.2. 车辆感知.....	20
3.1.3. 室内人感知.....	25
3.1.4. 室外人感知.....	29
3.2. 链路仿真配置.....	32
4. 5G-A 通感评估方法.....	34
4.1. 感知性能指标的度量值定义.....	34
4.1.1. 分辨率.....	34
4.1.2. 精确度.....	35
4.1.3. 检测概率.....	37
4.1.4. 感知更新频率.....	38
4.2. 系统仿真评估方法.....	38
4.3. 链路仿真评估方法.....	40
5. 5G-A 通感评估结果.....	41

5.1. 无人机感知评估结果	41
5.1.1. 仿真配置与结果一	41
5.1.2. 仿真配置与结果二	43
5.1.3. 仿真配置与结果三	48
5.1.4. 仿真配置与结果四	51
5.2. 车辆场景仿真	53
5.2.1. 仿真配置与结果一	53
5.2.2. 仿真配置与结果二	55
5.3. 室内人感知结果	58
5.3.1. 仿真配置与结果一	58
5.3.2. 仿真配置与结果二	60
5.3.3. 仿真配置与结果三	62
5.3.4. 仿真配置与结果四	64
6. 总结和展望	66
7. 参考文献	66
8. 附录	67
8.1. RCS 实测结果	67
8.2. 环境物体外场实测结果	73
8.3. 干扰建模	74
8.4. 链路预算	76
8.5. 术语和定义	77
8.6. 缩略词表	77
9. 贡献单位	79

1. 概述

1.1. 通感业界进展

从第一代模拟通信到万物互联的第五代移动通信系统，移动通信不仅深刻地变革了人们的生活方式，更成为社会数字化和信息化水平加速提升的新引擎。当前，中国的 5G 建设已经从网络建设步入应用创新的新阶段。5G 技术将进一步的和各种新技术深度融合，推动整个社会的数字化和智能化转型。

随着不断涌现的新业务、新需求，移动通信网络在提供越来越强大的通信能力的同时，也将扩展更多的基础能力来支持这些新业务、新需求。其中，感知能力就是其中一个重要的潜在方向。将通信和感知进行一体化设计，相比两个独立系统可带来降低成本、功耗，优化资源利用等优势。

通信感知融合通过信号联合设计和/或硬件共享等手段，实现通信、感知功能统一设计。其中通信感知融合中的感知可理解为一种基于移动通信系统的无线感知技术。移动通信系统通过对目标区域或物体发射无线信号，并对接收的无线信号进行分析得到相应的感知测量数据。此外，移动通信系统还可对其他感知技术（比如摄像头、雷达等）的感知测量数据进行汇聚和分析，联合提供感知服务。

在 5G 系统中，随着大带宽、毫米波、大规模 MIMO 技术的引入，5G 系统已经拥有了感知潜力。但在目前的移动通信领域，通信感知融合还处于初期阶段。在 5G-Advanced（以下简称 5G-A）中探索增强感知功能，特别是对空口改动较小，网络能力适当增强的方案，有助于感知在 5G 网络进行应用。

2021 年 7 月国内厂商在 IMT-2020（5G）推进组联合成立通信感知融合任务组，致力于推动基于 5G 技术的通感应用场景及需求、网络架构、仿真评估方法、空口技术方案研究以及原型验证等工作。2022 年 7 月底，IMT-2020（5G）推进组发布了《5G-Advanced 通感融合场景需求研究报告》[1]，有助于增强业界对感知场景和需求的了解。首份包含 5G 通感网络架构设计的《5G-Advanced 通感融合网络架构研究报告》在 2022 年 11 月深圳举办的 5G 大会发布[2]。2023 年 6 月发布《5G-Advanced 通感融合仿真评估方法研究报告》，汇聚了业界最新 5G 通感信道模型建模方法和仿真评估结果[3]。2024 年 4 月发布《5G-Advanced 通感融合空口技术方案研究报告》，讨论包括波形设计、资源分配、RAN 通感过程等通感

空口关键技术。同时，通感融合任务组也在积极推进 5G-A 通感技术试验验证工作，验证以基站感知为主在实际应用场景下的通感性能。

2022 年 2 月，国际标准组织 3GPP 的 SA1 立项研究课题《Study on Integrated Sensing and Communication》，标志着通感融合正式进入标准化阶段[4]。该课题已在 2023 年 8 月结项，对应的 TS 已于 2023 年 12 月完成。该研究课题会牵引 3GPP RAN 和 SA2 通感立项工作。目前，3GPP RAN R19 即将完成针对检测、跟踪类场景的通感信道建模研究工作，为后续技术方案评估和标准化提供研究基础。SA2 R20 也相应立项开展以基站感知为主的网络架构研究，为 5G-A 通感融合技术落地提供标准参考。2022 年 6 月，CCSA TC5 WG9 立项研究课题《5G 通信感知融合系统研究》，基于 3GPP SA1 R19 的应用场景，展开架构和空口技术的研究，并于 2023 年 11 月底结项。

当前国内运营商在多地开展规模性 5G-A 通感融合试验，验证场景包括航运、海域、低空物流等，推动 5G-A 通感从理论走向实际应用。

1.2. 本报告研究目标

本报告聚焦 5G-A 通感融合技术，在《5G-Advanced 通感融合仿真评估方法研究报告》中感知信道建模研究基础上，结合 3GPP 感知信道模型建模进展，与业界研讨共识用于方案评估的一套建模方法和指标评价体系，为后续通感技术方案评估提供重要参考。研究报告中明确了通感仿真评估配置，包含系统仿真与链路仿真。系统仿真针对无人机、车辆、室内外人员等场景，设定网络拓扑、载频、带宽等参数；链路仿真采用 CDL 信道建模方法，明确感知模式、信道模型等参数。报告进一步提出通感指标评估方法，定义分辨率、精确度、检测概率、感知更新频率等指标的度量值，规范系统与链路仿真的评估流程，为性能验证提供标准。最后，提供业界最新无人机、车辆、人员等场景的感知性能仿真评估结果，为 5G-A 通感融合技术方案的性能评估和标准化提供重要数据参考。

2. 5G-A 通感信道模型假设

在 2023 年的第一版《5G-Advanced 通感融合仿真评估方法研究报告》中初步研究了通感信道的生成方法，随着业界逐步的研究以及 3GPP 通感信道的研究，逐步形成了一套稳定的通感信道的生成方法。

本章节主要介绍通感信道生成的一些业界共识，为通感一体化的系统级仿真提供输入。现有通信系统中仅建模信道发射端与接收端间的单向多径信道，用于描述信号发射端与信号接收端之间的信道环境特性，例如[6]中基于簇生成的快衰信道等。然而在感知场景中，需要根据信道特征，对环境以及目标进行识别与检测，因此需要构建部分确定性的径以及双向的多径信道。

当前将感知信道分为目标信道以及背景信道，其中，目标信道包括所有经过目标的径的信道，背景信道则是包含其余径的信道。

2.1. 无线感知模式分类

根据《5G-Advanced 通感融合场景需求研究报告》梳理[1]以及 3GPP RAN1 的讨论[5]，根据参加感知的设备和感知收发是否是同一设备（基站 BS 或终端 UE），无线空口涉及的基本感知模式存在 6 种形式，如图 1-1 所示。



图 1-1 无线感知模式示意图

- TRP-TRP 单基地感知（或基站自发自收）：感知发送端和接收端部署在同一个 TRP（或基站）。
- TRP-TRP 双基地感知（或基站 A 发 B 收）：感知发送端和接收端部署在不同 TRP（或基站）。
- UE-TRP 双基地感知（或终端发基站收）：感知发送端部署在 UE（或终端），感知接收端部署在 TRP（或基站）。

- TRP-UE 双基地感知（或基站发终端收）：感知发送端部署在 TRP（或基站），感知接收端部署在 UE（或终端）。
- UE-UE 单基地感知（或终端自发自收）：感知发送端和接收端部署在同一个 UE（或终端）。
- UE-UE 双基地感知（或终端 A 发 B 收）：感知发送端和接收端部署在不同 UE（或终端）。

感知接收端接收反射/散射波信号，并从反射/散射波中提取被测物体或环境特征，以获取针对感知目标或环境的测量数据。本研究报告梳理多种场景基于上述 6 种基本感知模式下的通感评估结果。

2.2. 目标信道

2.2.1. 目标 RCS 建模

目标 RCS 特性受目标尺寸、材质以及形状的影响，同时还和频点、电磁波的极化方向等相关。本节将介绍一种通用的 RCS 的建模方法。

将目标的 RCS 分解为大尺度参数以及小尺度参数。大尺度参数记为 σ_M ，而小尺度参数由两个参数共同确定，分别记为 σ_D 和 σ_S ，最终的 RCS 计算可以如下式所示，

$$\sigma_{RCS} = \sigma_M \sigma_D \sigma_S$$

其中，对每个散射点来说， σ_M 是一个确定性的值， σ_D 可以是固定值， σ_S 则服从对数正态分布，即 σ_S 的均值 $\mu_{\sigma_{SdB}}$ 与标准差 $\sigma_{\sigma_{SdB}}$ 满足约束 $\mu_{\sigma_{SdB}} = \frac{-\ln(10)}{20} \sigma_{\sigma_{SdB}}^2$ 。

对于将目标建模成单个散射点的场景，例如小尺寸无人机以及人， σ_D 固定为 1， σ_M 是线性 RCS 值的平均值，对应的其余参数的对数值可参考表 2-1。

表 2-1 感知目标 RCS 参数

感知目标 RCS 参数	$10\lg(\sigma_M)$ (dBsm)	$10\lg(\sigma_D)$ (dB)	$\sigma_{\sigma_{SdB}}$ (dB)
小尺寸无人机 (0.3m x 0.4m x 0.2m)	-12.81	0	3.74
人	-1.37	0	3.94

对于将目标建模为多个散射点的场景，每个散射点的 σ_D 是和角度相关的，例如对车辆的建模。它可以建模成由 5 个散射点组成，分别位于车辆的前后左右侧面以及车顶，如图

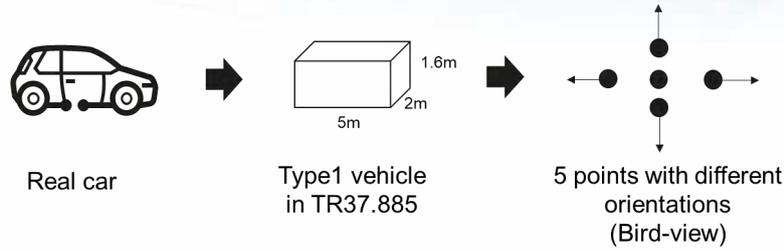


图 2-1 车辆 RCS 五点建模示意图

当前，对于大尺寸的无人机，车辆以及自动导引车的目标，不论是单个散射点还是多个散射点，参数 $\sigma_M\sigma_D$ 在自发自收的场景下，都是建模为和入射角以及反射角相关，记为 $\sigma_{MD_dB}(\theta, \phi)$ ，具体可以由以下公式进行计算

$$\sigma_{MD_dB}(\theta, \phi) = G_{max} - \min \{ -(\sigma_{dB}^V(\theta) + \sigma_{dB}^H(\phi)), \sigma_{max} \}$$

其中，

$$\sigma_{dB}^V(\theta) = -\min \left\{ 12 \left(\frac{\theta - \theta_{center}}{\theta_{3dB}} \right)^2, \sigma_{max} \right\}$$

$$\sigma_{dB}^H(\phi) = -\min \left\{ 12 \left(\frac{\phi - \phi_{center}}{\phi_{3dB}} \right)^2, \sigma_{max} \right\}$$

在计算第*i*对入射与反射角的小尺度信道中的交叉极化矩阵 $CPM_{sp,i}$ 时，可以表示为多个幅度参数 $\alpha_{i,1}, \alpha_{i,2}, \beta_{i,1}, \beta_{i,2}$ ，以及初始的相位参数 $\{\Phi_{sp,i}^{\theta\theta}, \Phi_{sp,i}^{\theta\phi}, \Phi_{sp,i}^{\phi\theta}, \Phi_{sp,i}^{\phi\phi}\}$ 表示，

$$CPM_{sp,i} = \begin{bmatrix} \alpha_{i,1} \exp(j\Phi_{sp,i}^{\theta\theta}) & \beta_{i,1} \exp(j\Phi_{sp,i}^{\theta\phi}) \\ \beta_{i,2} \exp(j\Phi_{sp,i}^{\phi\theta}) & \alpha_{i,2} \exp(j\Phi_{sp,i}^{\phi\phi}) \end{bmatrix}$$

对于无人机，人，车以及自动导引车来说， $\alpha_{i,1} = \alpha_{i,2} = 1$ ， $\beta_{i,1} = \beta_{i,2} = \sqrt{\kappa_{sp,i}^{-1}}$ ，则交叉极化矩阵等于，

$$CPM_{sp,i} = \begin{bmatrix} \exp(j\Phi_{sp,i}^{\theta\theta}) & \sqrt{\kappa_{sp,i}^{-1}} \exp(j\Phi_{sp,i}^{\theta\phi}) \\ \sqrt{\kappa_{sp,i}^{-1}} \exp(j\Phi_{sp,i}^{\phi\theta}) & \exp(j\Phi_{sp,i}^{\phi\phi}) \end{bmatrix}$$

其中， $\kappa_{sp,i}$ 服从对数正态分布的变量， $\{\Phi_{sp,i}^{\theta\theta}, \Phi_{sp,i}^{\theta\phi}, \Phi_{sp,i}^{\phi\theta}, \Phi_{sp,i}^{\phi\phi}\}$ 是在 $(-\pi, \pi)$ 内的均匀分布。

目前基于实测结果，可以按照以上公式进行多种拟合，并给出参考值，具体见附录 8.1

2.2.2. 环境物体 (EO) 建模

目前的环境物体可以分为两类，Type-1 以及 Type-2。Type-1 类型环境物体指的是和感

知目标尺寸接近的目标，通常可以采用和目标信道相同的建模方法；Type-2 类型环境物体指的是环境中尺寸非常大的物体，通常和目标的散射特性具有较大的区别。

Type-2 类型环境物体可以是地面，墙体，屋顶等，通常被建模为一个有限尺寸的平面。当一条径可以在该表面上寻找到反射的点，对应则需要感知发射机与散射点以及散射点与感知接收机之间建模对应的反射的径。注意，这里只建模反射径，同时它的极化矩阵为目标到接收链路、目标以及发送端到目标的三个极化矩阵的乘积。

具体的，可以参考 TR 38.901 中的地面反射，通过以下两个主要步骤对墙的 type-2 EO 进行建模：

步骤 1：按照地面反射法计算反射点，如图 2-2 所示；

步骤 2：反射损耗计算参考 TR 38.901 的 7.6.8 节，也可参考 TR 38.901 的表 7.6.8-1 中 EO 的材料性质。

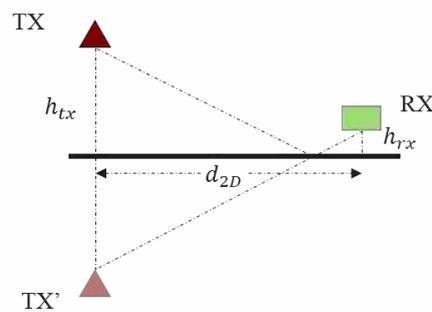


图 2-2 环境物体散射点的计算

附录 8.2 中展示了在外场对于环境目标的实测的结果。

2.2.3. 大尺度衰落建模

在通感信道中，大尺度衰落主要描述距感知发送端一定距离的感知接收端的功率变化。本小节将介绍通感信道中的 LOS/NLOS 建模，路径损耗模型以及绝对时延建模。

2.2.3.1. LOS/NLOS 建模

当 EO 建模时，LOS/NLOS 条件需利用 T_x, R_x, S_T 和 EO 的几何位置关系决定。当 EO 遮挡直射径时，则该条链路判别为 NLOS 状态。当 EO 没有遮挡直射径时，通过 LOS 概率判

断该条链路 LOS/NLOS 状态。

对于双基地感知场景，从感知发射机到目标和从目标到感知接收机的 LOS 条件需要分别计算，而单基地感知场景，两段的 LOS 条件是相通的，只需要判断一次。

在进行 LOS 和 NLOS 判断时，可以参考已有的 3GPP 标准中的方案，例无人机可参考下表[7]。

表 2-2 无人机 LOS 概率计算

场景	LOS 概率 (distance is in meters)	适用的 UT 高度范围
RMa-AV	基于[6]中表 7.4.2-1 的 RMa 概率公式	$1.5\text{m} \leq h_{UT} \leq 10\text{m}$
	$P_{LOS} = \begin{cases} 1, & d_{2D} \leq d_1 \\ \frac{d_1}{d_{2D}} + \exp\left(\frac{-d_{2D}}{p_1}\right)\left(1 - \frac{d_1}{d_{2D}}\right), & d_{2D} > d_1 \end{cases}$ $p_1 = \max(15021 \log_{10}(h_{UT}) - 16053, 1000)$ $d_1 = \max(1350.8 \log_{10}(h_{UT}) - 1602, 18), \text{ 见注 2.}$	$10\text{m} < h_{UT} \leq 40\text{m}$
	100%	$40\text{m} < h_{UT} \leq 300\text{m}$
UMa-AV	基于[6]中表 7.4.2-1 的 UMa 概率公式	$1.5\text{m} \leq h_{UT} \leq 22.5\text{m}$
	$P_{LOS} = \begin{cases} 1, & d_{2D} \leq d_1 \\ \frac{d_1}{d_{2D}} + \exp\left(\frac{-d_{2D}}{p_1}\right)\left(1 - \frac{d_1}{d_{2D}}\right), & d_{2D} > d_1 \end{cases}$ $p_1 = 4300 \log_{10}(h_{UT}) - 3800$ $d_1 = \max(460 \log_{10}(h_{UT}) - 700, 18), \text{ 见注 2.}$	$22.5\text{m} < h_{UT} \leq 100\text{m}$
	100%	$100\text{m} < h_{UT} \leq 300\text{m}$
UMi-AV	基于[6]中表 7.4.2-1 的 UMi 概率公式	$1.5\text{m} \leq h_{UT} \leq 22.5\text{m}$
	$P_{LOS} = \begin{cases} 1, & d_{2D} \leq d_1 \\ \frac{d_1}{d_{2D}} + \exp\left(\frac{-d_{2D}}{p_1}\right)\left(1 - \frac{d_1}{d_{2D}}\right), & d_{2D} > d_1 \end{cases}$ $p_1 = 233.98 \log_{10}(h_{UT}) - 0.95$ $d_1 = \max(294.05 \log_{10}(h_{UT}) - 432.94, 18), \text{ 见注 2.}$	$22.5\text{m} < h_{UT} \leq 300\text{m}$
注 1: LOS 概率基于天线高度分别是 35m(RMa-AV), 25m UMa-AV 以及 10m UMi-AV 进行计算。		
注 2: d_1 的单位是米。		

2.2.3.2. 路径损耗

对于现有几种感知场景的路径损耗计算，同样可以基于已有的协议为参考。对于无人机，可以参考[7]中附录 B 的表 B-2

表 2-3 无人机路径损耗计算

场景及 LOS/NLOS 条件	路损 [dB] (f_c 单位 GHz , 距离单位 m)	适用的 UT 高度范围

RMa-AV LOS	基于[6]中表 7.4.1-1 的 RMa-LOS 路损公式	$1.5\text{m} \leq h_{UT} \leq 10\text{m}$
	$PL_{RMa-AV-LOS} = \max(23.9 - 1.8\log_{10}(h_{UT}), 20)\log_{10}(d_{3D}) + 20\log_{10}\left(\frac{40\pi f_c}{3}\right)$	$10\text{m} < h_{UT} \leq 300\text{m}$ $d_{2D} \leq 10\text{km}$
RMa-AV NLOS	基于[6]中表 7.4.1-1 的 RMa-NLOS 路损公式	$1.5\text{m} \leq h_{UT} \leq 10\text{m}$
	$PL_{RMa-AV-NLOS} = \max(PL_{RMa-AV-LOS}, -12 + (35 - 5.3\log_{10}(h_{UT}))\log_{10}(d_{3D}) + 20\log_{10}\left(\frac{40\pi f_c}{3}\right))$	$10\text{m} < h_{UT} \leq 300\text{m}$ $d_{2D} \leq 10\text{km}$
UMa-AV LOS	基于[6]中表 7.4.1-1 的 UMa-LOS 路损公式	$1.5\text{m} \leq h_{UT} \leq 22.5\text{m}$
	$PL_{UMa-AV-LOS} = 28.0 + 22\log_{10}(d_{3D}) + 20\log_{10}(f_c)$	$22.5\text{m} < h_{UT} \leq 300\text{m}$ $d_{2D} \leq 4\text{km}$
UMa-AV NLOS	基于[6]中表 7.4.1-1 的 UMa-NLOS 路损公式	$1.5\text{m} \leq h_{UT} \leq 22.5\text{m}$
	$PL_{UMa-AV-NLOS} = -17.5 + (46 - 7\log_{10}(h_{UT}))\log_{10}(d_{3D}) + 20\log_{10}\left(\frac{40\pi f_c}{3}\right)$	$10\text{m} < h_{UT} \leq 100\text{m}$ $d_{2D} \leq 4\text{km}$
UMi-AV LOS	基于[6]中表 7.4.1-1 的 UMi-LOS 路损公式	$1.5\text{m} \leq h_{UT} \leq 22.5\text{m}$
	$PL_{UMi-AV-LOS} = \max\{PL', 30.9 + (22.25 - 0.5\log_{10}(h_{UT}))\log_{10}(d_{3D}) + 20\log_{10}(f_c)\}$, 见注 1.	$22.5\text{m} < h_{UT} \leq 300\text{m}$ $d_{2D} \leq 4\text{km}$
UMi-AV NLOS	基于[6]中表 7.4.1-1 的 UMi-NLOS 路损公式	$1.5\text{m} \leq h_{UT} \leq 22.5\text{m}$
	$PL_{UMi-AV-NLOS} = \max\{PL_{UMi-AV-LOS}, 32.4 + (43.2 - 7.6\log_{10}(h_{UT}))\log_{10}(d_{3D}) + 20\log_{10}(f_c)\}$	$22.5\text{m} < h_{UT} \leq 300\text{m}$ $d_{2D} \leq 4\text{km}$
注 1: 式中 PL' 表示自由空间路径损耗		

对于车辆，可以参考 TR37.885 中的路损计算表格，V2V（Vehicle to vehicle）链路参考下表

表 2-4 V2V 链路 LOS 概率计算

LOS/NLOS/NLOSv	路损 [dB]	阴影衰落方差 [dB]2
LOS, NLOSv	Urban, $PL = 32.4 + 20\log_{10}(d_{3D}) + 20\log_{10}(f_c)$	$\sigma_{SF} = 3$
	Highway, $PL = 38.77 + 16.7\log_{10}(d_{3D}) + 18.2\log_{10}(f_c)$	
NLOS	$PL = 36.85 + 30\log_{10}(d_{3D}) + 18.9\log_{10}(f_c)$	$\sigma_{SF} = 4$
注 1: f_c 单位是 GHz, d_{3D} 表示收发端的 3D 距离		

V2B（Vehicle to base station），P2B（Pedestrian to base station），B2R（Base station to road side unit）链路参考下表

表 2-5 V2B, P2B, B2R 链路 LOS 概率计算

	Below 6 GHz		Above 6 GHz	
	LOS	NLOS	LOS	NLOS
V2B	Urban:	Urban:	Urban:	Urban:
P2B	TR 38.901 UMa	TR 38.901 UMa	TR 38.901 UMa LOS	TR 38.901 UMa
B2R	LOS	NLOS		NLOS

	Highway: TR 38.901 RMa LOS	Highway: N/A	Highway: TR 38.901 UMa LOS	Highway: N/A
--	----------------------------------	-----------------	-------------------------------	-----------------

2.2.3.3. 绝对时延建模

绝对时延建模可以复用 TR38.901 7.6.9 章节建模方法，各场景参数值建模如下表所示：

表 2-6 绝对时延参数化模型

Scenarios		InF-SL, InF-DL	InF-SH, InF-DH	InH	UMi	UMa
$lg\Delta\tau$ $= \log_{10}(\Delta\tau/1)$	$\mu_{lg\Delta\tau}$	-7.5	-7.5	-7.9	-7.5	-7.4
	$\sigma_{lg\Delta\tau}$	0.4	0.4	0.3	0.5	0.2
水平相关距离 [m]		6	11	10	15	50

2.2.4. 小尺度衰落建模

一般化的，目标信道冲击响应建模为 Tx-STSP 链路和 STSP-Rx 链路级联信道。

针对直射径，信道冲击响应可表达为：

$$\begin{aligned}
 & H_{u,s,RX-ST_{k,l}-TX}^{direct}(t, \tau) \\
 &= \begin{bmatrix} F_{rx,u,\theta}(\theta_{ST_{k,l}-RX}^{direct}, \phi_{ST_{k,l}-RX}^{direct}) \\ F_{rx,u,\phi}(\theta_{ST_{k,l}-RX}^{direct}, \phi_{ST_{k,l}-RX}^{direct}) \end{bmatrix}^T \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & -1 \end{bmatrix} \cdot \sigma_{ST_{k,l}}(\hat{r}_{RX-ST_{k,l}}, \hat{r}_{TX-ST_{k,l}}) \cdot CPM_{tx,sp,rx} \cdot \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & -1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} F_{tx,s,\theta}(\theta_{ST_{k,l}-TX}^{direct}, \phi_{ST_{k,l}-TX}^{direct}) \\ F_{tx,s,\phi}(\theta_{ST_{k,l}-TX}^{direct}, \phi_{ST_{k,l}-TX}^{direct}) \end{bmatrix} \\
 & \cdot \exp\left(j \frac{2\pi \hat{r}_{ST_{k,l}-RX} \bar{d}_{rx,u}}{\lambda}\right) \cdot \exp\left(j \frac{2\pi \hat{r}_{ST_{k,l}-TX} \bar{d}_{tx,s}}{\lambda}\right) \cdot \exp\left(j 2\pi \frac{\hat{r}_{ST_{k,l}-RX}(\bar{v}_{rx} - \bar{v}_{ST_k}) + \hat{r}_{TX-ST_{k,l}} \bar{v}_{ST_k}}{\lambda} t\right) \\
 & \cdot \delta\left(\tau - \tau_{RX-ST_{k,l}}^{direct} - \tau_{ST_{k,l}-TX}^{direct}\right)
 \end{aligned}$$

The $\sigma_{ST_{k,l}}(\hat{r}_{RX-ST_{k,l}}, \hat{r}_{TX-ST_{k,l}})$ 表示 RCS pattern。 $\hat{r}_{RX-ST_{k,l}}, \hat{r}_{TX-ST_{k,l}}$ 表示每个散射点的入射和出射矢量。 k 代表 k^{th} 目标, l 代表 l^{th} 个散射点. 对于一个多点目标, 共有 l 条直射径。其中，

$$\tau_{RX-ST_{k,l}}^{direct} = \frac{d_{RX-ST_{k,l}}}{c}, \tau_{ST_{k,l}-TX}^{direct} = \frac{d_{ST_{k,l}-TX}}{c}$$

针对 EO-type2 的路径，Tx-EO-STSP-Rx 和 Tx-STSP-EO-Rx 链路可表达为：

$$\begin{aligned}
 & H_{u,s,RX-ST_{k,l}-EO_i-TX}^{indirect}(t, \tau) \\
 &= \begin{bmatrix} F_{rx,u,\theta}(\theta_{ST_{k,l}-RX}^{direct}, \phi_{ST_{k,l}-RX}^{direct}) \\ F_{rx,u,\phi}(\theta_{ST_{k,l}-RX}^{direct}, \phi_{ST_{k,l}-RX}^{direct}) \end{bmatrix}^T \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & -1 \end{bmatrix} \cdot \sigma_{ST_{k,l}}(\hat{r}_{RX-ST_{k,l}}, \hat{r}_{EO_i-ST_{k,l}}) \cdot CPM_{tx,sp,rx} \cdot \begin{bmatrix} \cos \gamma_2 & \sin \gamma_2 \\ -\sin \gamma_2 & \cos \gamma_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} R_{\parallel} & 0 \\ 0 & -R_{\perp} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos \gamma_1 & -\sin \gamma_1 \\ \sin \gamma_1 & \cos \gamma_1 \end{bmatrix}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} & \begin{bmatrix} F_{tx,s,\theta}(\theta_{EO_i-TX}^{indirect}, \phi_{EO_i-TX}^{indirect}) \\ F_{tx,s,\phi}(\theta_{EO_i-TX}^{indirect}, \phi_{EO_i-TX}^{indirect}) \end{bmatrix} \cdot \exp\left(j \frac{2\pi \hat{\tau}_{ST_{k,l}-RX} \bar{d}_{rx,u}}{\lambda}\right) \cdot \exp\left(j \frac{2\pi \hat{\tau}_{EO_i-TX} \bar{d}_{tx,s}}{\lambda}\right) \\ & \cdot \exp\left(j 2\pi \frac{\hat{\tau}_{ST_{k,l}-RX}(\bar{v}_{rx} - \bar{v}_{ST_k}) + \hat{\tau}_{TX-EO_i}(\bar{v}_{tx})}{\lambda} t\right) \cdot \delta\left(\tau - \tau_{RX-ST_{k,l}}^{direct} - \tau_{ST_{k,l}-EO_i-TX}^{indirect}\right) \end{aligned}$$

$H_{u,s,RX-EO_i-ST_{k,l}-TX}^{indirect}(t, \tau)$ 表达相似已省略。

针对 stochastic cluster 路径，信道冲击响应可表达为：

$$\begin{aligned} H_{u,s,RX-ST_{k,l}-c_n-TX}^{indirect}(t, \tau) &= \sqrt{\frac{P_n}{M}} \begin{bmatrix} F_{rx,u,\theta}(\theta_{n,m-RX}^{indirect}, \phi_{n,m-RX}^{indirect}) \\ F_{rx,u,\phi}(\theta_{n,m-RX}^{indirect}, \phi_{n,m-RX}^{indirect}) \end{bmatrix}^T \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & -1 \end{bmatrix} \cdot \sigma_{ST_{k,l}}(\hat{\tau}_{n,m-ST_k}, \hat{\tau}_{n,m-ST_k}) \cdot CPM_{tx,sp,rx} \\ & \begin{bmatrix} \exp(j\Phi_{n,m}^{\theta\theta}) & \sqrt{\kappa_{n,m}^{-1}} \exp(j\Phi_{n,m}^{\theta\phi}) \\ \sqrt{\kappa_{n,m}^{-1}} \exp(j\Phi_{n,m}^{\phi\theta}) & \exp(j\Phi_{n,m}^{\phi\phi}) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} F_{tx,s,\theta}(\theta_{n,m-TX}^{indirect}, \phi_{n,m-TX}^{indirect}) \\ F_{tx,s,\phi}(\theta_{n,m-TX}^{indirect}, \phi_{n,m-TX}^{indirect}) \end{bmatrix} \cdot \exp\left(j \frac{2\pi \hat{\tau}_{ST_{k,l}-RX} \bar{d}_{rx,u}}{\lambda}\right) \\ & \cdot \exp\left(j \frac{2\pi \hat{\tau}_{n,m-TX} \bar{d}_{tx,s}}{\lambda}\right) \cdot \exp\left(j 2\pi \frac{2\pi \hat{\tau}_{ST_{k,l}-RX} \bar{d}_{rx,u}(\bar{v}_{rx} - \bar{v}_{ST_k}) + \hat{\tau}_{TX-n,m}(\bar{v}_{tx})}{\lambda} t\right) \\ & \cdot \delta\left(\tau - \tau_{RX-ST_k}^{direct} - \tau_n - \Delta\tau\right) \end{aligned}$$

$H_{u,s,RX-c_n-ST_{k,l}-TX}^{indirect}(t, \tau)$ 表达相似已省略。

针对 stochastic cluster 路径级联 stochastic cluster 路径，信道冲击响应可表达为：

$$\begin{aligned} & H_{u,s,RX-c_n^2-ST_{k,l}-c_n^1-TX}^{indirect}(t, \tau) \\ &= \sqrt{\frac{P_n^1}{M}} \sqrt{\frac{P_n^2}{M}} \begin{bmatrix} F_{rx,u,\theta}(\theta_{n,m-RX}^{indirect}, \phi_{n,m-RX}^{indirect}) \\ F_{rx,u,\phi}(\theta_{n,m-RX}^{indirect}, \phi_{n,m-RX}^{indirect}) \end{bmatrix}^T \begin{bmatrix} \exp(j\Phi_{n,m}^{\theta\theta}) & \sqrt{\kappa_{n,m}^{-1}} \exp(j\Phi_{n,m}^{\theta\phi}) \\ \sqrt{\kappa_{n,m}^{-1}} \exp(j\Phi_{n,m}^{\phi\theta}) & \exp(j\Phi_{n,m}^{\phi\phi}) \end{bmatrix} \cdot \sigma_{ST_{k,l}}(\hat{\tau}_{n,m-ST_{k,l}}, \hat{\tau}_{n,m-ST_{k,l}}) \cdot CPM_{tx,sp,rx} \\ & \begin{bmatrix} \exp(j\Phi_{n,m}^{\theta\theta}) & \sqrt{\kappa_{n,m}^{-1}} \exp(j\Phi_{n,m}^{\theta\phi}) \\ \sqrt{\kappa_{n,m}^{-1}} \exp(j\Phi_{n,m}^{\phi\theta}) & \exp(j\Phi_{n,m}^{\phi\phi}) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} F_{tx,s,\theta}(\theta_{n,m-TX}^{indirect}, \phi_{n,m-TX}^{indirect}) \\ F_{tx,s,\phi}(\theta_{n,m-TX}^{indirect}, \phi_{n,m-TX}^{indirect}) \end{bmatrix} \cdot \exp\left(j \frac{2\pi \hat{\tau}_{n,m-RX} \bar{d}_{rx,u}}{\lambda}\right) \\ & \cdot \exp\left(j \frac{2\pi \hat{\tau}_{n,m-TX} \bar{d}_{tx,s}}{\lambda}\right) \cdot \exp\left(j 2\pi \frac{\hat{\tau}_{n,m-RX}(\bar{v}_{rx}) + \hat{\tau}_{TX-n,m}(\bar{v}_{tx})}{\lambda} t\right) \\ & \cdot \delta\left(\tau - \tau_n^1 - \tau_n^2 - 2\Delta\tau\right) \end{aligned}$$

综上所述，目标信道可表达为：

$$H_{u,s,RX-ST-TX}(t, \tau) = \sum_{k,l}^{K,L} H_{u,s,RX-ST_{k,l}-TX}(t, \tau), \text{ 其中}$$

$$\begin{aligned}
 & H_{u,s,RX-ST_{k,l}-TX}(t, \tau) \\
 &= PL_{RX-ST_{k,l}-TX} \sqrt{\frac{K_{R1}}{1+K_{R1}}} \sqrt{\frac{K_{R2}}{1+K_{R2}}} H_{u,s,RX-ST_{k,l}-TX}^{direct}(t, \tau) \\
 &+ PL_{RX-C_n-ST_{k,l}-TX} \sqrt{\frac{K_{R1}}{1+K_{R1}}} \sqrt{\frac{1}{1+K_{R2}}} \sum_n H_{u,s,RX-C_n-ST_{k,l}-TX}^{indirect}(t, \tau) \\
 &+ PL_{RX-ST_{k,l}-C_n-TX} \sqrt{\frac{K_{R2}}{1+K_{R2}}} \sqrt{\frac{1}{1+K_{R1}}} \sum_n H_{u,s,RX-ST_{k,l}-C_n-TX}^{indirect}(t, \tau) \\
 &+ PL_{RX-EO_i-ST_{k,l}-TX} \sqrt{\frac{K_{R1}}{1+K_{R1}}} \sum_i H_{u,s,RX-EO_i-ST_{k,l}-TX}^{indirect}(t, \tau) \\
 &+ PL_{RX-ST_{k,l}-EO_i-TX} \sqrt{\frac{K_{R2}}{1+K_{R2}}} \sum_i H_{u,s,RX-ST_{k,l}-EO_i-TX}^{indirect}(t, \tau) \\
 &+ PL_{RX-C_n^2-ST_{k,l}-C_n^1-TX} \sqrt{\frac{1}{1+K_{R1}}} \sqrt{\frac{1}{1+K_{R2}}} \sum_n H_{u,s,RX-C_n^2-ST_{k,l}-C_n^1-TX}^{indirect}(t, \tau)
 \end{aligned}$$

其中 $PL_{RX-ST_{k,l}-TX}$, $PL_{RX-C_n-ST_{k,l}-TX}$, $PL_{RX-ST_{k,l}-C_n-TX}$, $PL_{RX-EO_i-ST_{k,l}-TX}$, $PL_{RX-ST_{k,l}-EO_i-TX}$, $PL_{RX-C_n^2-ST_{k,l}-C_n^1-TX}$ 代表每条链路的路径损耗。这里的路损值实际包含在信道的大尺度参数中, 即对于所有的小尺度信道来说, 所乘以的路损是同一个值。

当目标建模为多点时, K 因子和统计簇只针对目标建模, 即多个散射点共享相同的 K 因子和统计簇。

在生成好小尺度信道后, 需要再乘以由路损, 阴影衰落等组成的功率因子, 如下式所示

$$L_{TX-SPST-RX} = PL_{dB}(d_1) + PL_{dB}(d_2) + 10 \lg \left(\frac{c^2}{4\pi f^2} \right) - 10 \lg(\sigma_{RCS,A}) + SF_{dB,1} + SF_{dB,2}$$

2.2.5. 空间一致性建模

当前目标信道中 TRP 到目标之间的信道空间一致性可以继续沿用 TR38.901 中定义的方法, 而为了解决目标信道中不同感知目标到不同 UT 之间的信道空间一致性问题, 可以采用基于感知目标或者 UT 生成网格建模空间一致性。这种方法下, 既可以支持水平维度的空间一致性, 例如室内感知场景; 也可以支持垂直维度的空间一致性, 例如 UAV 场景。

可以将感知目标与 UT 间的信道空间一致性场景分为三类:

场景 1：多个感知目标与相同 UT 之间的信道链路空间一致性，如图 2.3 所示。

场景 2：多个 UT 与相同感知目标之间的信道链路空间一致性，如图 2.4 所示。

场景 3：多个感知目标与多个 UT 之间的信道链路空间一致性，如图 2.5 所示。

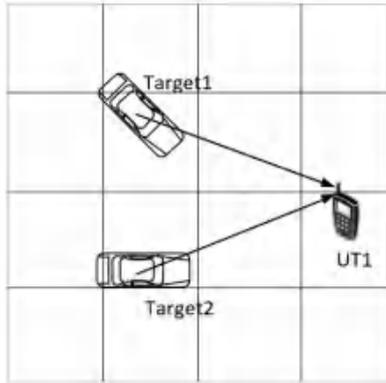


图 2-3 多目标与相同 UT 之间的场景

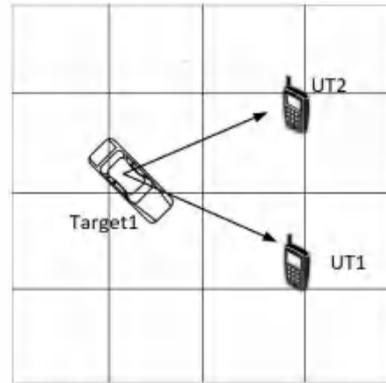


图 2-4 多 UT 与相同目标之间的场景

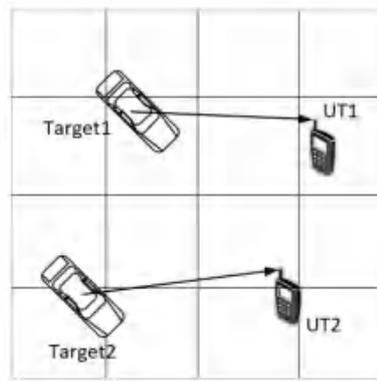


图 2-5 多个目标与多个 UT 之间的场景

针对场景 1，可以基于 UT 生成网格建模不同目标与相同 UT 之间的信道空间一致性；对于场景 2，可以基于感知目标生成网格建模不同 UT 与感知目标之间的信道空间一致性；对于场景 3，可以基于不同感知目标或者不同 UT 生成网格建模空间一致性，而不同感知目标或者不同 UT 生成的网格之间也需要建模相关性，可以根据 Cholesky 分解来建模实现。

而对于相同的感知目标多点模型，也可以通过空间一致性来建模相同感知目标上不同点位对应的目标信道之间的相关性。

2.3. 背景信道

对于双基地感知的背景信道，可以参考当前 TR38.901 中的 7.5 章节的信道生成方法，对第一步中的环境，拓扑以及天线参数相对应调整到感知场景下。其余步骤不变。而对于自

发自收的单基感知场景，发射端与接收端位于同一个位置，现有的统计信道生成方法不在适用，因此需要一种新的背景信道生成方法。

这里介绍采用参考点的背景信道生成方法，首先基于一个收发链路生成 N_{rp} 个参考点。参考点与发射端的距离以及高度分别服从 gamma 分布，可以表示为 $\Gamma(\alpha_d, \beta_d) + c_d$ 以及 $\Gamma(\alpha_h, \beta_h) + c_h$ 。值得注意的是，对于参考点的信道条件，全部依据 NLOS 信道，同时根据参考点的位置，在信道中加入绝对的时延参数，最终的背景信道可以表示为

$$H_{u,s}^{bk}(\tau, t) = \frac{1}{\sqrt{N_{rp}}} \sum_{r=0}^{N_{rp}-1} H_{u,s}^{bk,r}(\tau, t)$$

其中，k 为散射点的索引。

最终将目标信道与背景信道叠加后，便可以生成最终的通感信道。

3. 5G-A 通感评估配置

评估配置需要结合感知场景和感知模式来确定。当前 3GPP 研究的感知目标类型与感知场景的对应关系如表 1 所示，感知模式包括第 1.2 节定义的 6 种模式。

表 3-1 感知场景分类

感知目标	场景
UAVs	RMa-AV, UMa-AV, UMi-AV (TR 36.777)
Humans indoors	InF, Indoor Office, Indoor Room (TR 38.808)
Humans outdoors	UMi, UMa, RMa
Automotive vehicles (at least outdoors)	Highway, Urban grid, UMa, UMi, RMa
Automated guided vehicles (e.g. in indoor factories)	InF
Objects creating hazards on roads/railways (examples defined in TR 22.837)	Highway, Urban grid, HST

3.1. 系统仿真配置

本章节提供不同场景下的系统仿真配置参数。针对 UAV 感知，参考 TR 36.777 中 RMa-AV、UMa-AV、UMi-AV 场景的评估假设，并在此基础上进行修改。针对 Automotive vehicles 感知，参考 TR 37.885 中的评估假设，并在此基础上进行修改。针对 Humans indoors 感知，给出了 Indoor Office, Indoor Factory 以及 Indoor Room 场景的评估假设。针对 Humans outdoors 感知，给出了 UMa 和 UMi 场景的评估假设。

3.1.1. 无人机感知

UAV 场景用于低空无人机感知场景，感知节点通过发送、接收感知信号来估计无人机的速度、位置、轨迹等信息。基站的网络拓扑采用传统的六边形蜂窝拓扑，本节给出 UAV 感知的拓扑并给出仿真参数的参考。

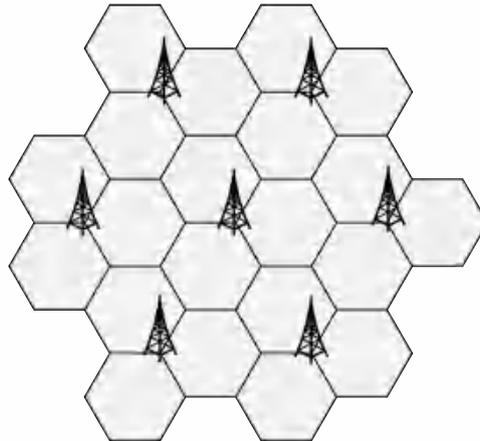


图 3-1 UAV 感知拓扑

表 3-2 UAV 感知配置场景参数

参数	数值		
网络拓扑	UMa-AV	UMi-AV	RMa-AV
感知发射器和接收器属性	<p>TRP 天线配置:</p> <p>FR1: 基线: - (M, N, P, Mg, Ng; Mp, Np) = (12, 8, 2, 1, 1; 4, 8)</p> <p>可选: - (M, N, P, Mg, Ng; Mp, Np) = (8, 8, 2, 1, 1; 2, 8) - (M,N,P,Mp,Np) = (4,16,2,1,1) - (M,N,P,Mp,Np) = (16,16,2,1,1)</p> <p>- (dH, dV) = (0.5, 0.8)λ - $\pm 45^\circ$ polarization</p> <p>FR2: 基线: - (M,N,P,Mg,Ng; Mp,Np) = (4,8,2,2,2; 1,1)</p> <p>可选: - (M,N,P,Mg,Ng;Mp,</p>	<p>TRP 天线配置:</p> <p>FR1: 基线: - (M, N, P, Mg, Ng; Mp, Np) = (12, 8, 2, 1, 1; 4, 8)</p> <p>可选: - (M, N, P, Mg, Ng; Mp, Np) = (8, 8, 2, 1, 1; 2, 8) - (M,N,P,Mp,Np) = (4,16,2,1,1) - (M,N,P,Mp,Np) = (16,16,2,1,1)</p> <p>- (dH, dV) = (0.5, 0.8)λ - $\pm 45^\circ$ polarization</p> <p>FR2: 基线: - (M,N,P,Mg,Ng; Mp,Np) = (4,8,2,2,2; 1,1)</p> <p>可选: - (M,N,P,Mg,Ng;Mp,</p>	<p>TRP 天线配置:</p> <p>FR1: 基线: - (M, N, P, Mg, Ng; Mp, Np) = (12, 8, 2, 1, 1; 4, 8)</p> <p>可选: - (M, N, P, Mg, Ng; Mp, Np) = (8, 8, 2, 1, 1; 2, 8) - (M,N,P,Mp,Np) = (4,16,2,1,1) - (M,N,P,Mp,Np) = (16,16,2,1,1)</p> <p>- (dH, dV) = (0.5, 0.8)λ - $\pm 45^\circ$ polarization</p> <p>FR2: 基线: - (M,N,P,Mg,Ng; Mp,Np) = (4,8,2,2,2; 1,1)</p> <p>可选: - (M,N,P,Mg,Ng;Mp,</p>

		<p>Np) =(4,16,2,2,2; 1,1)</p> <p>- (M,N,P,Mp,Np) =(16,16,2,1,1)</p> <p>- (dH, dV)=(0.5, 0.5)λ</p> <p>- (dg,H,dg,V) = (4.0, 2.0)λ</p> <p>- $\pm 45^\circ$ polarization</p> <p>若考虑 UE 感知 UE 天线配置:</p> <p>FR1:</p> <p>- (M,N,P,Mg,Ng; Mp,Np) = (1,2,2,1,1;1,2),</p> <p>- (dH,dV) = (0.5,N/A)λ,</p> <p>- $0^\circ, 90^\circ$ polarization</p> <p>FR2:</p> <p>- (M,N,P,Mg,Ng;Mp, Np)=(2,4,2,1,2;1,1)</p> <p>- (dH,dV)=(0.5,0.5)λ, (dg,V,dg,H) = (0, 0)λ,</p> <p>- $0^\circ/90^\circ$ polarization</p> <p>- $\Theta_{mg,ng}=90^\circ$; $\Omega_0,1=\Omega_0,0+180^\circ$</p>	<p>Np) =(4,16,2,2,2; 1,1)</p> <p>- (M,N,P,Mp,Np) =(16,16,2,1,1)</p> <p>- (dH, dV)=(0.5, 0.5)λ</p> <p>- (dg,H,dg,V) = (4.0, 2.0)λ</p> <p>- $\pm 45^\circ$ polarization</p> <p>若考虑 UE 感知 UE 天线配置:</p> <p>FR1:</p> <p>- (M,N,P,Mg,Ng; Mp,Np) = (1,2,2,1,1;1,2),</p> <p>- (dH,dV) = (0.5,N/A)λ,</p> <p>- $0^\circ, 90^\circ$ polarization</p> <p>FR2:</p> <p>- (M,N,P,Mg,Ng;Mp, Np)=(2,4,2,1,2;1,1)</p> <p>- (dH,dV)=(0.5,0.5)λ, (dg,V,dg,H) = (0, 0)λ,</p> <p>- $0^\circ/90^\circ$ polarization;</p> <p>- $\Theta_{mg,ng}=90^\circ$; $\Omega_0,1=\Omega_0,0+180^\circ$</p>	<p>Np) =(4,16,2,2,2; 1,1)</p> <p>- (M,N,P,Mp,Np) =(16,16,2,1,1)</p> <p>- (dH, dV)=(0.5, 0.5)λ</p> <p>- (dg,H,dg,V) = (4.0, 2.0)λ</p> <p>- $\pm 45^\circ$ polarization</p> <p>若考虑 UE 感知 UE 天线配置:</p> <p>FR1:</p> <p>- (M,N,P,Mg,Ng; Mp,Np) = (1,2,2,1,1;1,2),</p> <p>- (dH,dV) = (0.5,N/A)λ,</p> <p>- $0^\circ, 90^\circ$ polarization</p> <p>FR2:</p> <p>- (M,N,P,Mg,Ng;Mp, Np)=(2,4,2,1,2;1,1)</p> <p>- (dH,dV)=(0.5,0.5)λ, (dg,V,dg,H) = (0, 0)λ,</p> <p>- $0^\circ/90^\circ$ polarization;</p> <p>- $\Theta_{mg,ng}=90^\circ$; $\Omega_0,1=\Omega_0,0+180^\circ$</p>
	支持的感知模式	基线: TRP 单基地、 TRP-TRP 双基地 可选: TRP-UE 双基地	基线: TRP 单基地、 TRP-TRP 双基地 可选: TRP-UE 双基地	基线: TRP 单基地、 TRP-TRP 双基地 可选: TRP-UE 双基地
感知目标	室外/室内	室外	室外	室外
	3D 移动	水平速度: {0~180} km/h 垂直速度: 0 km/h	水平速度: {0~180} km/h 垂直速度: 0 km/h	水平速度: {0~180} km/h 垂直速度: 0 km/h
	3D 分布	均匀分布: 基线: 1/5 个/感知区域 可选:10 个/感知区域 高度: {25,50,100,200,300} m	均匀分布: 基线: 1/5 个/感知区域 可选:10 个/感知区域 高度: {25,50,100,200,300} m	均匀分布: 基线: 1/5 个/感知区域 可选:10 个/感知区域 高度: {25,50,100,200,300} m
	方向	水平维 random	水平维 random	水平维 random
	物理特性	基线: 0.3x0.4x0.2m 可选:	基线: 0.3x0.4x0.2m 可选:	基线: 0.3x0.4x0.2m 可选:

		1.6x1.5x0.7 m	1.6x1.5x0.7 m	1.6x1.5x0.7 m
环境物体	Types	NA	NA	NA
	3D 移动	NA	NA	NA
	3D 分布	NA	NA	NA
	方向	NA	NA	NA
	物理特性	NA	NA	NA
感知区域	基线：网络拓扑中的每小区 可选：中心每小区	基线：网络拓扑中的每小区 可选：中心每小区	基线：网络拓扑中的每小区 可选：中心每小区	
Tx/Rx 和感知目标/环境物体的最小 3D 距离	10 m 可选：如果 UE 参与感知，基站和 UE 的最小 2D 距离为 35m	10 m 可选：如果 UE 参与感知，基站和 UE 的最小 2D 距离为 10m	10 m 可选：如果 UE 参与感知，基站和 UE 的最小 2D 距离为 35m	
感知目标之间的最小 3D 距离	10 m	10 m	10 m	

表 3-3 UAV 场景其他参数

参数	UMa-AV	UMi-AV	RMa-AV
网络拓扑	六边形蜂窝拓扑， 基线：19x3 小区 可选：7x3 小区	六边形蜂窝拓扑， 基线：19x3 小区 可选：7x3 小区	六边形蜂窝拓扑， 基线：19x3 小区 可选：7x3 小区
载频	FR1: 4 GHz FR2: 30 GHz	FR1: 4 GHz FR2: 30 GHz	FR1: 4 GHz FR2: 30 GHz
子载波间隔	FR1: 30 kHz FR2: 120 kHz	FR1: 30 kHz FR2: 120 kHz	FR1: 30 kHz FR2: 120 kHz
仿真带宽	FR1: 100 MHz FR2: 200 MHz	FR1: 100 MHz FR2: 200 MHz	FR1: 100 MHz FR2: 200 MHz
站间距	FR1: 500 m FR2: 200 m	FR1: 200 m FR2: 200 m	1732 m
基站天线高度	25 m	10 m	35 m
基站发射功率	FR1: 基线：53 dBm 可选：49 dBm FR2:	FR1: 基线：44 dBm 可选：38 dBm FR2:	FR1: 基线：53 dBm 可选：49 dBm FR2:

	基线: 30 dBm 可选: 40 dBm	基线: 30 dBm 可选: 40 dBm	基线: 30 dBm 可选: 40 dBm
基站阵子天线增益	8 dBi	8 dBi	8 dBi
基站天线 pattern	参考 TR 36.873	参考 TR 36.873	参考 TR 36.873
噪声功率谱密度	-174 dBm/Hz	-174 dBm/Hz	-174 dBm/Hz
基站噪声系数	FR1: 5 dB FR2: 10 dB	FR1: 5 dB FR2: 10 dB	FR1: 5 dB FR2: 10 dB
UE 发射功率	FR1: 23dBm FR2: 23dBm, EIRP 不超 43dBm	FR1: 23dBm FR2: 23dBm, EIRP 不超 43dBm	FR1: 23dBm FR2: 23dBm, EIRP 不超 43dBm
UE 天线 pattern	FR1: 全向 0dBi FR2: 参考 ITU-R M.2412	FR1: 全向 0dBi FR2: 参考 ITU-R M.2412	FR1: 全向 0dBi FR2: 参考 ITU-R M.2412
UE 噪声系数	FR1: 9 dB FR2: 10 dB	FR1: 9 dB FR2: 10 dB	FR1: 9 dB FR2: 10 dB

3.1.2. 车辆感知

Automotive vehicles 场景包括高速公路和城区车辆感知这 2 种场景，下面分别介绍这 2 种场景的网络拓扑和仿真参数。

◇ 城区场景拓扑:

城区车辆感知场景沿用 3GPP TR 37.885 采用网格拓扑，每个网格长为 433 米、宽为 250 米，考虑双车道（双向总共 4 车道），每个车道的宽为 3.5 米。为了正确建模环境对象，建筑物可以扩展到 413m x 230m x 20m 的 3D 尺寸，即下图中的绿色建筑，同时可以挪动外层 9 宫格位置，使得在路口的每个角落都撒放基站，以模拟城市场景下实际站点的部署。网络拓扑如下图所示。

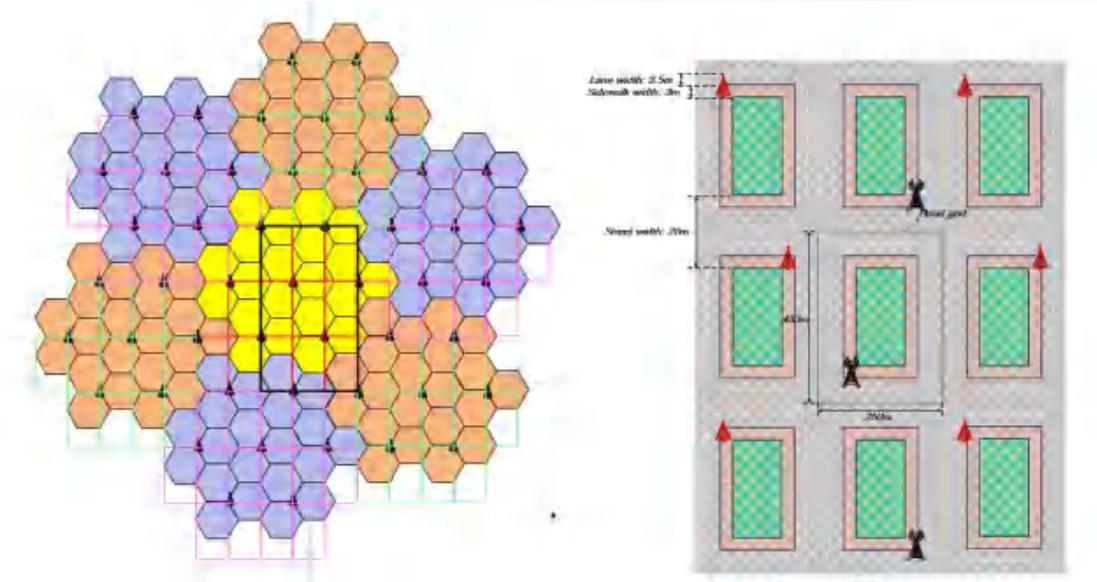


图 3-2 城市网络场景拓扑

在高速公路车辆感知场景中，感知设备可以是基站、CPE，感知目标为车辆，行人，障碍物等。车与车之间的感知不在本章节讨论。感知设备通过估计感知目标的距离、速度、角度等信息可对车辆违规（包括超速、占用应急车道、车道压线等）、车流量、障碍物、行人等进行监测。根据感知设备的部署的位置的不同，可以包括以下 2 种网络拓扑。

◇ 高速公路场景拓扑：

在高速公路场景中，根据 3GPP TR 37.885，高速公路为双向 6 车道，每个方向 3 车道，如图 3-3 所示，每个车道宽度为 4 米，总长大于 2000 米。

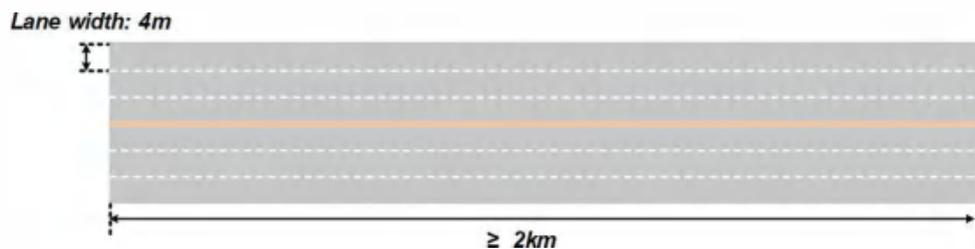


图 3-3 高速公路示意图

根据公路与基站之间相对位置的不同，可以包括以下 2 种网络拓扑：

➤ 网络拓扑1：

该拓扑下高速公路与基站之间的相对位置可以参考 TR 37.885 的分布，每个站有 3 个扇区。

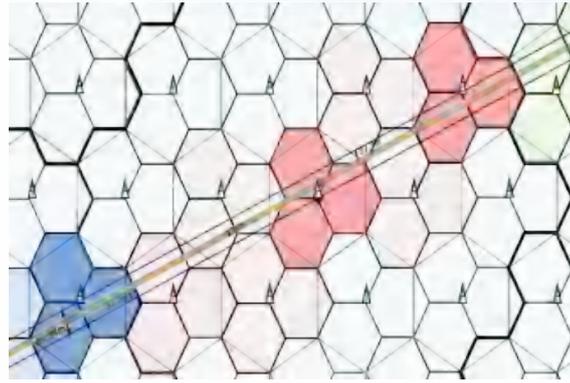


图 3-4 高速公路场景拓扑 1

➤ 网络拓扑2:

感知设备部署在路边的杆站上，采用线状部署网络拓扑，如图 3-5 所示。图中给出了 TRP-TRP 单基地感知模式的示意图，该拓扑同样适用于 TRP-基 TRP 双基地感知模式，且能最大概率保证基站与车辆之间存在 LOS 径。

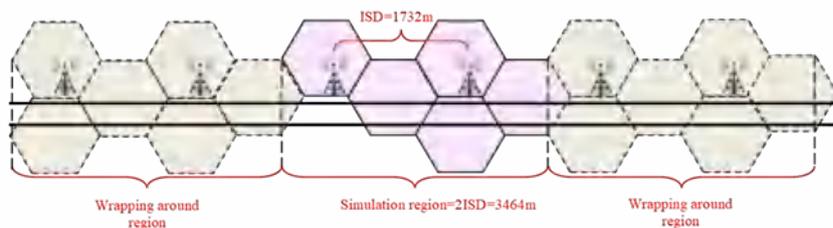


图 3-5 高速公路场景拓扑 2

表 3-4 Automotive vehicles 感知场景参数

参数	数值	
适用通信场景	Highway	Urban grid
感知发射器和接收器属性	TRP 天线配置:	TRP 天线配置:
	FR1:	FR1:
	基线:	基线:
	可选:	可选:
	- (M, N, P, Mg, Ng; Mp, Np) = (8, 8, 2, 1, 1; 2, 8) - (M, N, P, Mp, Np) = (4, 16, 2, 1, 1) - (M, N, P, Mp, Np) = (16, 16, 2, 1, 1) - (dH, dV) = (0.5, 0.8) λ - $\pm 45^\circ$ polarization	- (M, N, P, Mg, Ng; Mp, Np) = (8, 8, 2, 1, 1; 2, 8) - (M, N, P, Mp, Np) = (4, 16, 2, 1, 1) - (M, N, P, Mp, Np) = (16, 16, 2, 1, 1) - (dH, dV) = (0.5, 0.8) λ - $\pm 45^\circ$ polarization
	FR2:	FR2:
	基线:	基线:
	- (M,N,P,Mg,Ng; Mp,Np) =	- (M,N,P,Mg,Ng; Mp,Np) =

		<p>(4,8,2,2,2; 1,1)</p> <p>可选:</p> <ul style="list-style-type: none"> - (M,N,P, Mp,Np) = (16,16,2 1,1) - (M,N,P,Mg,Ng; Mp,Np) = (4,16,2,2,2; 1,1) - (dH, dV)=(0.5, 0.5)λ - (dg,H,dg,V) = (4.0, 2.0)λ - $\pm 45^\circ$ polarization <p>若考虑 UE 感知:</p> <p>车辆 UE 天线配置</p> <p>FR1:</p> <ul style="list-style-type: none"> - (M, N, P, Mg, Ng; Mp,Np) = (1, 4, 2, 1, 1; 1, 4), - (dH,dV) = (0.5, 0.5)λ, - $+45^\circ/-45^\circ$polarization <p>FR2:</p> <ul style="list-style-type: none"> - (M,N,P,Mg,Ng;Mp,Np) = (1,4,2,1,4; [1,1]) - (dH,dV) = (0.5, 0.5)λ, - (dH,g, dV,g) = (4.0, 2.0)λ - $+45^\circ/-45^\circ$polarization - Panel bearing angle: $\Omega_{0,1}=\Omega_{0,0}+90^\circ$; $\Omega_{0,2}=\Omega_{0,0}+180^\circ$; $\Omega_{0,3}=\Omega_{0,0}+270^\circ$ array downtilt angle $\Theta_{mg,ng}$ is 90° 	<p>(4,8,2,2,2; 1,1)</p> <p>可选:</p> <ul style="list-style-type: none"> - (M,N,P, Mp,Np) = (16,16,2 1,1) - (M,N,P,Mg,Ng; Mp,Np) = (4,16,2,2,2; 1,1) - (dH, dV)=(0.5, 0.5)λ - (dg,H,dg,V) = (4.0, 2.0)λ - $\pm 45^\circ$ polarization <p>车辆 UE 天线配置:</p> <p>FR1:</p> <p>基线:</p> <ul style="list-style-type: none"> - (M, N, P, Mg, Ng) = (1, 2, 2, 1, 1) - (dH, dV) = (0.5, 0.5)λ. - $0^\circ, 90^\circ$ polarization <p>可选:</p> <ul style="list-style-type: none"> - (M, N, P, Mg, Ng; Mp,Np) = (1, 4, 2, 1, 1; 1, 4) - (dH,dV) = (0.5, 0.5)λ, - $+45^\circ/-45^\circ$polarization <p>FR2:</p> <p>基线:</p> <ul style="list-style-type: none"> - (M, N, P, Mg, Ng) = (2, 4, 2, 1, 2) - Panel bearing angle: $\Omega_{0,1}=\Omega_{0,0}+180^\circ$ - (dH, dV) = (0.5, 0.5)λ. - (dg,H,dg,V) = (0, 0)λ - $0^\circ, 90^\circ$ polarization <p>可选:</p> <ul style="list-style-type: none"> - (M,N,P,Mg,Ng;Mp,Np) = (1,4,2,1,4; [1,1]) - (dH,dV) = (0.5, 0.5)λ, - (dH,g, dV,g) = (4.0, 2.0)λ - $+45^\circ/-45^\circ$polarization - Panel bearing angle: $\Omega_{0,1}=\Omega_{0,0}+90^\circ$; $\Omega_{0,2}=\Omega_{0,0}+180^\circ$; $\Omega_{0,3}=\Omega_{0,0}+270^\circ$ array downtilt angle $\Theta_{mg,ng}$ is 90°
	支持的感知模式	<p>基线: TRP 单基地、TRP-TRP 双基地</p> <p>可选: TRP-UE 双基地</p>	<p>基线: TRP-UE 双基地、TRP 单基地、TRP-TRP 双基地</p>
感知目标	室外/室内	室外	室外
	3D 移动	<p>基线:</p> <p>140 km/h</p> <p>各车道速度一致</p>	<p>基线:</p> <p>60 km/h</p> <p>各车道速度一致</p>

	3D 分布	基线：100% 类型 2 车辆	基线：100% 类型 2 车辆
	方向	与车道方向对齐	与车道方向对齐
	物理特性	基线： 5x2x1.6 m 可选： 13x2.6x3 m	基线： 5x2x1.6 m 可选： 13x2.6x3 m
环境物体	Types	Type-2 EO: 地面（可选）	Type-2 EO: 墙，地面（可选）
	3D 移动	0	0
	3D 分布	与道路配置一样	绿色块
	方向	垂直	Type2 EO: 地面：垂直 墙：水平
	物理特性	24m*2km, 如 TR 37.885 所示的道路设置	Type2 EO: 墙：413m x 230m x 20m 地面：与道路的配置一样
感知区域	基线：网络拓扑中的每小区 可选：中心每小区 水平：在高速公路内 垂直：在地面上	基线：网络拓扑中的每小区 可选：中心每小区 水平：在高速公路内 垂直：在地面上	
Tx/Rx 和感知目标/环境物体的最小 3D 距离	基站-目标：35 m (2D) 车辆UE-目标：10 m 行人UE-目标：3.5 m	基站-终端：25m 基站-目标：25m 基站-物体：3m 目标-终端：0.5m 目标-物体：3m 物体-终端：0.5m	
感知目标间的最小距离	10m	3.5m	

表 3-5 Automotive vehicles 感知其他参数

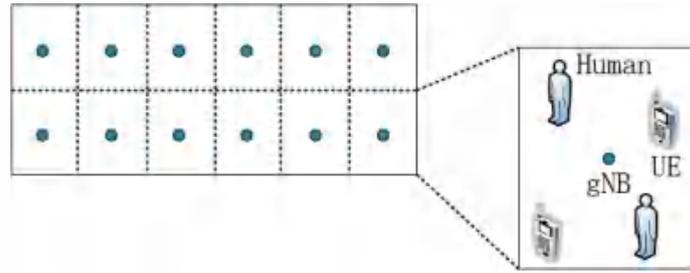
场景	Highway	Urban grid
网络拓扑	参见图 3.1-3、3.1-4 和 3.1-5	城市网格 ISD=250m
载频	FR1: 4 GHz FR2: 30 GHz	FR1: 4 GHz FR2: 30 GHz
子载波间隔	FR1: 30 KHz	FR1: 30 KHz

	FR2: 120 KHz	FR2: 120 KHz
仿真带宽	FR1: 100 MHz FR2: 200 MHz	FR1: 100 MHz FR2: 200 MHz
站间距	FR1: 基线: 1732 m 可选: 500 m FR2: 500 m	距离 :244m(东 西 方 向)/427m (南 北 方 向)
基站天线高度	FR1: 基线: 35 m 可选: 25 m FR2: 25 m	25 m
基站发射功率	FR1: 基线: 49 dBm 可选: 53 dBm FR2: 基线: 43 dBm 可选: 30/40 dBm	FR1: 基线: 49 dBm 可选: 53 dBm
基站阵子天线增益	8 dBi	8 dBi
噪声功率谱密度	-174 dBm/Hz	-174 dBm/Hz
基站噪声系数	FR1: 5 dB FR2: 7 dB	FR1: 5 dB FR2: 7dB
UE 天线高度	车辆 UE: 1.6m	车辆 UE: 1.6m
UE 发射功率	车辆 UE: 23dBm	车辆 UE: 23dBm
UE 天线 pattern	FR1: 全向 0dBi FR2: 参考 ITU-R M.2412	FR1: 全向 0dBi FR2: 参考 ITU-R M.2412
UE 噪声系数	车辆 UE: FR1: 5 dB FR2: 7 dB	车辆 UE: FR1: 5 dB FR2: 7 dB

3.1.3. 室内人感知

本节给出的是Human 通感仿真室内场景，对于室内场景，通常可以分为室内热点区域（InH, Indoor Hotspot）和室内工厂（InF, Indoor Factory）。其中，对于InH场景，主要是以办公室为主，以 120m×50m 的 12 小区为例，每个小区均匀撒放若干个 human 和若干个终端，如图 3-6所示。对于InF场景，以120mx60m矩形区域为例，站

间距为20m, 共有18个小区, 如图 3-7所示。对于IndoorRoom场景, 区域范围是20x20m,



如图 3-8所示。

图 3-6 Indoor office 感知拓扑

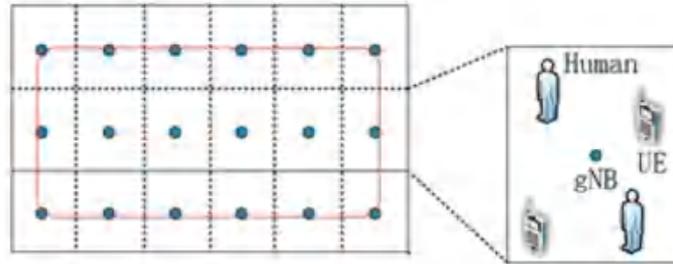


图 3-7 Indoor Factory 感知拓扑

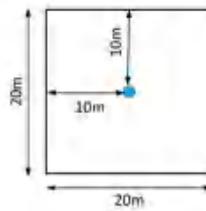


图 3-8 Indoor room 感知拓扑

表 3-6 Humans indoors 感知场景配置

参数	值		
网络拓扑	InH	InF	Indoor room
感知发射器和接收器属性	TRP 天线配置: FR1: - (M,N,P,Mg,Ng;Mp,Np) = (4,4,2,1,1; 4,4) - (dH, dV) = (0.5, 0.5) λ - $\pm 45^\circ$ polarization FR2: 基线: - (M, N, P, Mg, Ng) = (16, 8, 2, 1, 1), 可选: - (M, N, P, Mg, Ng) = (8, 8, 2, 1, 1), - (dH, dV) = (0.5, 0.5) λ - $\pm 45^\circ$ polarization	TRP天线配置: FR1: - (M, N, P, Mg, Ng) = (4, 4, 2, 1, 1), - (dH, dV) = (0.5, 0.5) λ - $\pm 45^\circ$ polarization FR2: 基线: - (M, N, P, Mg, Ng) = (16, 8, 2, 1, 1), 可选: - (M, N, P, Mg, Ng) = (8, 8, 2, 1, 1), - (dH, dV) = (0.5, 0.5) λ - $\pm 45^\circ$ polarization	TRP天线配置: FR1: - (M, N, P, Mg, Ng) = (4, 4, 2, 1, 1), - (dH, dV) = (0.5, 0.5) λ - $\pm 45^\circ$ polarization FR2: 基线: - (M, N, P, Mg, Ng) = (16, 8, 2, 1, 1), 可选: - (M, N, P, Mg, Ng) = (8, 8, 2, 1, 1), - (dH, dV) = (0.5, 0.5) λ - $\pm 45^\circ$ polarization

		<p>UE 天线配置:</p> <p>FR1:</p> <p>基线:</p> <ul style="list-style-type: none"> (M,N,P,Mg,Ng;Mp,Np)=(1,2,2,1,1;1,2), (dH,dV) = (0.5, N/A)λ, 0°,90°polarization <p>可选:</p> <ul style="list-style-type: none"> (M,N,P,Mg,Ng;Mp,Np)=(2,2,1,1,1;2,2), (dH,dV) = (0.5, 0.5)λ, 0°,90°polarization <ul style="list-style-type: none"> (M,N,P,Mg,Ng;Mp,Np)=(1,1,2,1,1;1,1), (dH,dV) = (N/A, N/A)λ, 0°,90°polarization <p>FR2:</p> <ul style="list-style-type: none"> (M,N,P,Mg,Ng;Mp,Np)=(2,4,2,1,2;1,1); (dH,dV) = (0.5,0.5)λ,(dg,V,dg,H) = (0,0)λ, 0°/90° polarization; Θmg,ng=90°; Ω0,1=Ω0,0+180° 	<p>UE 天线配置:</p> <p>FR1:</p> <p>基线:</p> <ul style="list-style-type: none"> (M,N,P,Mg,Ng;Mp,Np)=(1,2,2,1,1;1,2), (dH,dV) = (0.5, N/A)λ, 0°,90°polarization <p>可选:</p> <ul style="list-style-type: none"> (M,N,P,Mg,Ng;Mp,Np)=(2,2,1,1,1;2,2), (dH,dV) = (0.5, 0.5)λ, 0°,90°polarization <ul style="list-style-type: none"> (M,N,P,Mg,Ng;Mp,Np)=(1,1,2,1,1;1,1), (dH,dV) = (N/A, N/A)λ, 0°,90°polarization <p>FR2:</p> <ul style="list-style-type: none"> (M,N,P,Mg,Ng;Mp,Np)=(2,4,2,1,2;1,1); (dH,dV) = (0.5,0.5)λ,(dg,V,dg,H) = (0,0)λ, 0°/90° polarization; Θmg,ng=90°; Ω0,1=Ω0,0+180° 	
	支持的感知模式	TRP-UE 双基地、UE-TRP 双基地、TRP 单基地、TRP-TRP 双基地、UE 单基地、UE-UE 双基地	TRP-UE 双基地、UE-TRP 双基地、TRP 单基地、TRP-TRP 双基地、UE 单基地、UE-UE 双基地	TRP-UE 双基地、UE-TRP 双基地、TRP 单基地、UE 单基地、UE-UE 双基地
感知目标	室外/室内	室内	室内	室内
	3D 移动	基线: 3 km/h 可选: {3,10}km/h	基线: 3 km/h 可选: {3,10}km/h	基线: 3 km/h 可选: {3,10}km/h
	3D 分布	基线: 整个感知区域 1/5 个人 可选: 整个感知区域 10 个人 高度: 1.5m	基线: 整个感知区域 1/5 个人 可选: 整个感知区域 10 个人 高度: 1.5m	基线: 整个感知区域 1/5 个人 可选: 整个感知区域 10 个人 高度: 1.5m
	方向	随机	随机	随机
	物理特性	基线: 0.5x0.5x1.75 m 可选: 0.3x0.3x1 m	基线: 0.5x0.5x1.75 m 可选: 0.3x0.3x1 m	基线: 0.5x0.5x1.75 m 可选: 0.3x0.3x1 m

环境物体	Types	FFS	FFS	FFS
	3D 移动	FFS	FFS	FFS
	3D 分布	FFS	FFS	FFS
	方向	FFS	FFS	FFS
	物理特性	FFS	FFS	FFS
感知区域	整个区域	水平方向： 基线：整个区域 可选：每个水平 BS 部署的凸包/一个选定 BS 的凸包。	整个区域	
Tx/Rx 和感知目标/环境物体的最小 3D 距离	基站和 UE、感知目标： 3m UE 和感知目标：3m	基站和 UE、感知目标： 3m UE 和感知目标：3m	基站和 UE、感知目标： 3m UE 和感知目标：3m	
感知目标之间的最小 3D 距离	3m	3m	1m	

表 3-7 Humans indoors 感知其他参数

场景	InH	InF	Indoor room
网络拓扑	120*50m 的 12 小区	基线：300x150m 的 18 小区 可选：120x60m 的 18 个小区	矩形区域：20m x 20m
载频	FR1: 4 GHz FR2: 30 GHz	FR1: 4 GHz FR2: 30GHz	FR1: 4 GHz FR2: 30GHz
子载波间隔	FR1:30KHz FR2:120KHz	FR1: 30KHz FR2: 120KHz	FR1: 30KHz FR2: 120KHz
仿真带宽	FR1:100MHz FR2: 基线：400MHz 可选：200MHz	FR1: 100MHz FR2: 基线：400MHz 可选：200MHz	FR1: 100MHz FR2: 基线：400MHz 可选：200MHz
站间距	20m	基线：50m 可选：20m	NA
基站天线高度	3m	基线：8m 可选：1.5m	3m
基站发射功率	FR1: 24dBm	FR1: 24dBm	FR1: 24dBm

	FR2: 23dBm	FR2: 23dBm	FR2: 23dBm
基站阵子天线增益	基线: 8dBi 可选: 5dBi	基线: 8dBi 可选: 5dBi	基线: 8dBi 可选: 5dBi
基站天线 pattern	参考 TR38.802	参考 TR38.802	参考 TR 38.802
噪声功率谱密度	-174 dBm/Hz	-174 dBm/Hz	-174 dBm/Hz
基站噪声系数	FR1: 5 dB FR2: 7dB	FR1: 5 dB FR2: 7dB	FR1: 5 dB FR2: 7dB
终端天线增益	0dBi	0dBi	0dBi
终端天线 pattern	全向天线	全向天线	全向天线
感知目标类型	Human	Human	Human
UE 分布	随机均匀 1,5,10 UE/感知区域	随机均匀 1,5,10 UE/感知区域	随机均匀 1,2,5 UE/感知区域
UE 移动速度	0km/h	0km/h	0km/h
UE 天线高度	0.8m, 1.5m	0.8m, 1.5m	0.8m, 1.5m
UE 发射功率	23dBm	23dBm	23dBm
UE 阵子天线增益	FR1: 0dBi FR2: 5dBi	FR1: 0dBi FR2: 5dBi	FR1: 0dBi FR2: 5dBi
UE 噪声系数	FR1: 9dB FR2: 基线: 13dB 可选: 10dB	FR1: 9dB FR2: 基线: 13dB 可选: 10dB	FR1: 9dB FR2: 基线: 13dB 可选: 10dB

3.1.4. 室外人感知

本节给出的是 Human 通感仿真室外场景，包括蜂窝小区以及道路两种场景。对于蜂窝小区，以 7 小区 21 扇区为例，每个扇区均匀撒放若干个 human 和若干个终端。基站、终端和 human 的拓扑如图 3-9 所示。对于道路场景，可以参考图 3-2，图 3-3，图 3-4

以及图 3-5。

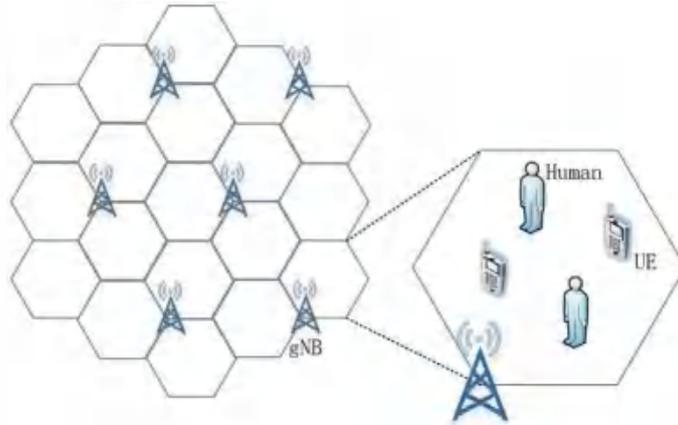


图 3-9 Human 通感仿真室外场景

表 3-8 Human outdoors 感知仿真配置

参数		值		
网络拓扑		UMa	UMi	RMa
感知发射器和接收器属性		参考表 3-2	参考表 3-2	参考表 3-2
支持的感知模式		TRP-UE 双基地、TRP 单基地、TRP-TRP 双基地	TRP-UE 双基地、TRP 单基地、TRP-TRP 双基地	TRP-UE 双基地、TRP 单基地、TRP-TRP 双基地
感知目标	室外/室内	室外	室外	室外
	3D 移动	基线: {3,10,20}km/h 可选: 5~10km/h	基线: {3,10,20}km/h 可选: 5~10km/h	基线: {3,10,20}km/h 可选: 5~10km/h
	3D 分布	基线: 每个扇区随机均匀撒放 1/5 人 可选: 每个扇区随机均匀撒放 10 人	基线: 每个扇区随机均匀撒放 1/5 人 可选: 每个扇区随机均匀撒放 10 人	基线: 每个扇区随机均匀撒放 1/5 人 可选: 每个扇区随机均匀撒放 10 人
	方向	随机	随机	随机
	物理特性	基线: 0.5x0.5x1.75 m 可选: 0.3x0.3x1 m	基线: 0.5x0.5x1.75 m 可选: 0.3x0.3x1 m	基线: 0.5x0.5x1.75 m 可选: 0.3x0.3x1 m
环境物体	类型	FFS	FFS	FFS
	3D 移动	FFS	FFS	FFS
	3D 分布	FFS	FFS	FFS

	方向	FFS	FFS	FFS
	物理特性	FFS	FFS	FFS
感知区域		基线:网络拓扑中的每小区 可选: 中心每小区	基线:网络拓扑中的每小区 可选: 中心每小区	基线:网络拓扑中的每小区 可选: 中心每小区
Tx/Rx 和感知目标/环境物体的最小 3D 距离		35m	35m	35m
感知目标之间的最小 3D 距离		3m	3m	3m

在 human 室外检测的拓扑 Highway 以及 UrbanGrid 下，仿真配置可以参考表 3-9。

表 3-9 Human outdoors 感知仿真配置

参数		值	
网络拓扑		Highway	Urban grid
感知发射器和接收器属性		参考表 3-4	参考表 3-4
支持的感知模式		基线：TRP 单基地、 TRP-TRP 双基地 可选：TRP-UE 双基地	基线：TRP-UE 双基地、 TRP 单基地、TRP-TRP 双基地
感知目标	室外/室内	室外	室外
	3D 移动	{3,10,20} km/h	{3,10,20} km/h
	3D 分布	均匀分布：1/5 10个/感知区域 高度：1.5m	均匀分布：1/5 10个/感知区域 高度：1.5m
	方向	随机	随机
	物理特性	基线：0.5x0.5x1.75 m 可选：0.3x0.3x1 m	基线：0.5x0.5x1.75 m 可选：0.3x0.3x1 m
环境物体	类型	FFS	FFS
	3D 移动	FFS	FFS
	3D 分布	FFS	FFS

	方向	FFS	FFS
	物理特性	FFS	FFS
感知区域		基线:网络拓扑中的每小区 可选: 中心每小区	基线:网络拓扑中的每小区 可选: 中心每小区
Tx/Rx 和感知目标/环境物体的最小 3D 距离		10m	基站-终端: 25m 基站-目标: 25m 基站-物体: 3m 目标-终端: 0.5m 目标-物体: 3m 物体-终端: 0.5m
感知目标之间的之间的最小 3D 距离		10m	3.5m

3.2. 链路仿真配置

本章节基于不分段的链路级 CDL 信道建模方法, 给出典型的仿真配置和部分参数说明。不分段的链路级 CDL 信道建模方法中, 将感知目标建模为单个或多个感知簇, 感知簇的时延、角度参数根据感知目标的位置生成, 或者不建模感知目标具体位置, 直接生成感知簇的时延、角度参数, 感知簇的多普勒参数根据感知目标的运动速度生成。

表 3-10 链路仿真参数设置

参数	参考值
感知模式	单基地感知/双基地感知
信道模型	CDL-A/B/C/D/E/其他
载频	4 GHz
带宽	100 MHz
子载波间隔	30 kHz
Tx 天线配置	$(M, N, P, M_g, N_g) = (4, 4, 2, 1, 1)$, $dH = dV = 0.5$ λ
Rx 天线配置	$(M, N, P, M_g, N_g) = (4, 4, 2, 1, 1)$, $dH = dV = 0.5$ λ
感知目标个数	≥ 1

感知目标距离（时延）范围	[0 m, 300 m]
感知目标角度范围（方位角、俯仰角）	$[-\pi/3, +\pi/3]$, $[-\pi/2, +\pi/2]$

参数说明：

感知模式：包括单基地感知（自发自收）和双基地感知（A 发 B 收）。

信道模型：不同信道模型对应不同的感知场景（以及感知模式），链路级 CDL 通感信道建模可根据典型的感知场景（以及感知模式）预生成非感知簇参数集以及感知簇参数集。

- 感知目标距离范围：感知目标分布的距离范围，指的是定义在某个参考坐标系下感知目标相对于参考点的距离范围，例如感知目标在全局坐标系中相对于发送设备或接收设备的距离范围。
- 感知目标角度范围：感知目标分布的角度范围，指的是定义在某个参考坐标系下的感知目标角度范围，例如感知目标在全局坐标系中的到达角范围和离开角范围。
- 对于建模感知目标空间位置的场景，根据感知目标距离范围和角度范围可以确定感知目标分布的区域，即感知目标位置坐标；或者，直接给出感知目标位置坐标范围。

对于不建模感知目标空间位置的场景，无需确定感知目标位置坐标，根据感知目标距离范围和角度范围确定感知目标关联 Cluster 的时延和角度参数，或者直接给出感知目标关联 Cluster 的时延范围和角度范围。

- 感知目标运动模型：包括匀速直线运动（每个感知信息计算周期内目标速度为恒定的常量）、匀加速\减速直线运动、圆周运动（例如无人机旋翼旋转、风扇旋转等）、周期往复运动（例如呼吸、心跳、重复动作）。
- 感知目标速度范围：与感知目标运动模型关联的速度，根据运动速度大小和方向以及感知目标的角度信息确定感知目标关联 Cluster 的多普勒，也可以是直接给出感知目标关联 Cluster 的多普勒范围。
- 感知目标关联 Cluster 功率\信号杂波比：链路级 CDL 信道建模不考虑路损等大尺度参数计算，直接给出各个 Cluster 功率，可以不通过 RCS 路损计算公式[1]计算感知目标关联 Cluster 功率，而是根据典型的感知场景下目标特征以及背景环境特征确定感知目标关联 Cluster 功率（范围），或者信号杂波比，即感知目

标关联 Cluster 功率与其他 Cluster 功率的比值。

- 相干处理时间 (CPI)\感知信息计算周期：每个相干处理周期计算一次感知信息，包括距离、速度、角度等，N 个相干处理周期后计算感知性能指标。
- 感知算法：计算感知信息采用的基本算法，包括 2D/3D FFT、MUSIC、ESPRIT 等。

4. 5G-A 通感评估方法

本章节主要介绍面向感知性能评估的性能指标定义以及系统仿真评估方法。

4.1. 感知性能指标的度量值定义

面向不同场景，感知指标可分为多类，各场景需评估的指标侧重点有所不同。感知指标大体上可分为如下四类：

- (1) 通用指标：分辨率、精确度、检测概率、感知更新频率、感知开销等
- (2) 定位类相关指标：距离/速度/角度的精度
- (3) 成像类相关指标：径向/横向分辨率，峰值旁瓣比，积分旁瓣比等
- (4) 目标识别类相关指标：目标检测概率，目标分辨率，多目标识别数等。

本章节重点介绍感知目标的定义，参考[3]和[8]。通信指标定义包括吞吐量，频谱效率，识码率，通信开销，通信空口时延等，详细定义见[3]。

4.1.1. 分辨率

感知分辨率是指系统能够区分的两个邻近目标之间的最接近程度，主要从距离、速度和角度三个方面进行评价。

距离分辨率是指点目标之间的最小可区分距离。一般而言，决定距离分辨率的是感知信号的有效带宽 B ，有效带宽越宽，距离分辨率越好。

单基地距离分辨率 ΔR 可表示为：

$$\Delta R = \frac{c}{2B}$$

其中， c 表示光速。

双基地距离分辨率 ΔR 可表示为:

$$\Delta R = \frac{c}{2B \cos\left(\frac{\beta}{2}\right)}$$

其中, β 表示双基地角。

角度分辨率是指两个目标处于相同距离上, 最小能够区分的角度, 约等于半功率/3dB波束宽度。它与波束宽度有关, 波束越窄, 角分辨率越高。 λ 为信号波长, D 为阵列的孔径。角度分辨率可表示为:

$$\theta_{3dB} \approx 0.886 \times \frac{\lambda}{D}$$

多普勒分辨率是指两个目标可以被准确感知区分的最小多普勒频移差距, 与符号累积时间 τ_c 成反比。多普勒分辨率 Δf_d 可表示为

$$\Delta f_d = \frac{f_{d,max}}{N_f/2} = \frac{1}{N_f T_r} = \frac{1}{\tau_c}$$

其中, $f_{d,max}$ 表示 OFDM 系统可处理的最大多普勒频移, 与 OFDM 符号周期 T_r 成反比; τ_c 表示符号累积时间, 为估计累积符号数 N_f 与 OFDM 符号周期的乘积, 即 $\tau_c = N_f * T_r$ 。

速度分辨率是指两个目标处于相同距离、相同回波信号强度上, 最小可区分的多普勒频移差值, 与载波频率 f_c 和符号累积时间 τ_c 成反比。

单基地感知速度分辨率 Δv 可表示为:

$$\Delta v = \frac{\lambda}{2} \Delta f_d = \frac{\lambda}{2N_f T_r} = \frac{c}{2f_c \tau_c}$$

双基地感知速度分辨率 Δv 可表示为:

$$\Delta v = \frac{\lambda}{2N_f T_r \cos\left(\frac{\beta}{2}\right)} = \frac{c}{2f_c \tau_c \cos\left(\frac{\beta}{2}\right)}$$

其中, β 表示双基地角。

4.1.2. 精确度

精确度(通常也称精度), 指被测目标距离、速度和角度与其真实值之间的接近程度, 通常采用均方根误差(RMSE)以及置信度误差等指标来描述。置信度误差是误差累计分布的置信分位数, 表征了在该置信水平下的感知性能, 可排除偶发强干扰导致的大误差, 确保多数情况下的误差可控, 在工程应用较多; 而 RMSE 可用于描述多次观测下的平均误差性

能，对大误差敏感，反映整体误差的“平均波动幅度”，可以快速反应整体精度，属于基础评估。由此，精确度的统计方法可以结合感知系统特性与应用场景，采用多种指标和统计手段进行综合评估。同时，精确度和接收信号的信干噪比、感知发送功率、感知距离强相关，由此在统计精确度时，可以针对不同感知距离、不同发送功率配置进行分段统计。

- 距离精度：表示目标物体的距离估计结果与其真实距离的偏差水平。

对于单基地感知，目标物体的距离可以是指目标物体与信号接收设备之间的距离；对于双基地感知，目标物体的距离可以是指目标物体与信号接收设备之间的距离，或者目标物体与信号接收设备以及发送设备之间的距离和，或者目标物体与信号接收设备以及发送设备之间的距离和减去收发设备间的距离，或者目标物体与信号接收设备以及发送设备之间的距离和在双基地角平分线上的投影。

置信距离误差：根据多次独立试验估计的距离误差 $\Delta R = |\hat{R}_{ij} - R_{ij}|$ 的累积分布函数（CDF）的第 X 分位点。X 称为置信度，可以取 95%。

距离均方根误差：根据多次独立试验估计的距离误差计算 $\hat{\sigma}_R = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^M (\hat{R}_{ij} - R_{ij})^2}{NM}}$

其中， \hat{R}_{ij} 为第 i 次试验中第 j 个目标的距离估计值， R_{ij} 为第 i 次试验中第 j 个目标的真实距离。 N 表示试验次数， M 表示每次试验中的目标个数，对于单目标仿真场景， $M = 1$ 。

- 速度精度：描述了目标物体的速度测量结果与其真实速度的偏差水平。

对于单基地感知，目标物体的速度可以是指目标物体运动速度在目标与信号接收设备连线上的投影；对于双基地感知，目标物体的速度可以是指目标物体运动速度在双基地角平分线上的投影，或者目标物体运动速度在目标与信号接收设备连线上的投影以及目标物体运动速度在目标与信号发送设备连线上的投影之和。除此之外，还可以是指目标物体旋转速度、动作重复速率（例如呼吸/心跳速率）等。

置信速度误差：根据多次独立试验估计的速度误差 $\Delta v = |\hat{v}_{ij} - v_{ij}|$ 的累积分布函数（CDF）的第 X 个百分位点。X 称为置信度，可以取 95%。

速度均方根误差：根据多次独立试验估计的速度误差计算 $\hat{\sigma}_v = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^M (\hat{v}_{ij} - v_{ij})^2}{NM}}$

其中， \hat{v}_{ij} 为第 i 次试验中第 j 个目标的速度估计值， v_{ij} 为第 i 次试验中第 j 个目标的真实速度。 N 表示试验次数， M 表示每次试验中的目标个数，对于单目标仿真场景， $M = 1$ 。

- 角度精度：描述了目标物体的角度测量结果与其真实角度的偏差水平，包括方位角

精度和俯仰角精度。

对于单基地感知，目标物体的角度可以是指目标物体相对于信号接收设备的到达角度；对于双基地感知，目标物体的角度可以是指目标物体相对于信号接收设备的到达角度，或者目标物体相对于信号发送设备的离开角度。

置信角度误差：根据多次独立试验估计的角度误差 $\Delta\theta = |\hat{\theta}_{ij} - \theta_{ij}|$ 的累积分布函数(CDF)的第 X 个百分位点。 X 称为置信度，可以取 95%。

角度均方根误差：根据多次独立试验估计的角度误差计算 $\hat{\sigma}_\theta = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^M (\hat{\theta}_{ij} - \theta_{ij})^2}{NM}}$

其中， $\hat{\theta}_{ij}$ 为第 i 次试验中第 j 个目标的角度估计值， θ_{ij} 为第 i 次试验中第 j 个目标的真实角度。 N 表示试验次数， M 表示每次试验中的目标个数，对于单目标仿真场景， $M = 1$ 。

- 定位精度：描述了目标物体的位置测量结果与其真实位置的偏差水平。

目标物体的位置坐标可以由其距离和角度中的至少一项进一步计算得到。进一步可以区分为等水平位置精度以及垂直位置精度。

置信定位误差：根据多次独立试验估计的位置误差 $E_{position} = \sqrt{(\hat{x}_{ij} - x_{ij})^2 + (\hat{y}_{ij} - y_{ij})^2 + (\hat{z}_{ij} - z_{ij})^2}$ 的累积分布函数(CDF)的第 x 个百分位点。

定位均方根误差：根据多次独立试验估计的位置误差计算 $\hat{\sigma}_{position} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^M (\hat{x}_{ij} - x_{ij})^2 + (\hat{y}_{ij} - y_{ij})^2 + (\hat{z}_{ij} - z_{ij})^2}{NM}}$ ，其中， $(\hat{x}_{ij}, \hat{y}_{ij}, \hat{z}_{ij})$ 为第 i 次试验中第 j 个目标的位置坐标估计值， (x_{ij}, y_{ij}, z_{ij}) 为第 i 次试验中第 j 个目标的真实位置坐标。 N 表示试验次数， M 表示每次试验中的目标个数，对于单目标仿真场景， $M = 1$ 。对于定位精度指标，由于目标位置坐标可以通过目标距离和角度中的一项或两项计算得到，因此可考虑通过评估距离精度和角度精度替代评估定位精度。

4.1.3. 检测概率

感知目标检测是指对接收机输出的由目标回波信号、噪声和其它干扰组成的混合信号进行特定的信号处理和门限判决，以规定的检测概率（通常比较高）发现未知目标的回波信号，而噪声和其它干扰则以低概率产生随机虚警（通常以一定的虚警概率为条件）。针对目标检测，检测概率是衡量目标检测性能的常用指标：

$$P_d = \frac{N_{11}}{N_1} * 100\%$$

其中，检测概率 P_d 是指在感知接收机输出混合信号中存在目标回波且目标回波信号强度高于预设门限，系统判为目标存在的正确概率。 N_1 为存在感知目标情况下判定总次数， N_{11} 为存在感知目标且判定发现感知目标总次数。虚警概率指的是感知接收机输出混合信号中没有目标回波但根据预设门限判决为有目标回波的错误概率。在感知目标检测中，通常采用确保虚警概率恒定的恒虚警检测方法，此时，目标检测概率取决于目标回波信号、噪声和干扰信号的幅度分布（概率密度函数）以及所选定的虚警概率（与判决是否有目标的预设门限相关）。

针对目标检测，虚警概率是检测到的虚假目标总次数 N_{21} 与检测目标的判定总次数 N_2 的比值：

$$P_f = \frac{N_{21}}{N_2} * 100\%$$

通常情况下，统计检测概率、虚警率中判定事件总次数需要考虑置信度和误差范围。设定的总次数 N_1 、 N_2 最小值需满足一定置信度和误差范围需求。

4.1.4. 感知更新频率

感知更新频率一般定义为感知结果更新的频率或频次，更快的感知频率必然需要更多的感知资源。特别的，在扫描感知模式中，感知更新频率一般定义为在感知范围内扫描一周所需的时间。

4.2. 系统仿真评估方法

系统级仿真可较准确的建模多链路（多小区、多 UE、多感知目标）场景下的信号和干扰分布，适用于复杂网络拓扑下的感知精确度和检测概率仿真。对于是否需要同时仿真通信性能和感知性能，取决于感知的空口技术方案。如果通信和感知采用静态资源分配方案（如时分和频分），则通信性能和感知性能可以独立仿真。如果通信和感知采用动态的资源分配方案或者进行通感互助时，则应同时仿真通信和感知性能。例如通感信号空分时，通信多用户配对的流数受感知信号的发射功率、预编码影响。

系统级仿真评估方法如下所示。

- 1) 配置评估场景和仿真参数。评估场景包括 UAV, Human, Automotive vehicle, AGV, Objects on roads/railways 等，生成网络拓扑以及场景化的仿真参数。除了配置传统通信系统仿真的参数（如仿真时间，频点、带宽、天线、发射功率）外，还需配置感知目标数量，感知模式，感知目标移动模型等。
- 2) 感知信道生成。基于感知模式，生成感知发送机/接收机和感知目标间的信道。
- 3) 感知信号发送、接收及处理。不同于传统通信系统仿真，感知系统仿真需要建模感知信号序列生成、资源映射、预编码、时频转换与信道卷积。此外，在感知信号处理流程中还包括杂波消除，自干扰消除以及其它非理想因素消除算法等。
- 4) 感知参数估计。利用感知参数估计算法（如 DFT/IDFT 算法）对杂波消除后的估计信道进行感知目标的检测和估计。
- 5) 感知度量值的统计。统计所有感知目标的感知精确度和检测概率得到 CDF 曲线。根据 CDF 曲线可得到 $X\%$ 感知目标比例下的估计误差/检测成功次数，比如 X 取值为 90。

一种可实现的方法如下图所示。



图 4-1 感知系统级仿真流程示例

在单链路感知场景下，针对检测定位算法，具体地：在仿真接收端，首先需要对接收到的回波信号进行检测以确定感知目标的存在与否，之后再对感知目标的位置和速度进行估计。具体而言，首先需要对估计得到的频域信道在子载波维进行 IFFT 变换、在慢变时间维进行 FFT 变换以得到包含感知目标的距离-多普勒（Range-Doppler, RD）图，之后利用检测算

法（峰值搜索、恒虚警检测等）确定感知区域内感知目标的数目、每个感知目标的距离以及多普勒频移，最后通过联合“距离-角度”信息解算感知目标的位置，通过多普勒效应公式解算感知目标的速度，具体如下：

Step 1: 利用时间维度差分的方法，消除杂波；

Step 2: 基于去杂波后的多目标信道，利用频域 IFFT+多普勒域 FFT 获得包含感知目标的 RD 图，基于 RD 图估计多个目标相对于收发扇区的距离和与速度；

Step 3: 在时域维度，利用多个接收天线相位差的原理估计 AOA/ZOA；

Step 4: 基于估计得到的多个目标的 {距离、AOA/ZOA} 计算多个目标的绝对位置信息 (x,y,z) ，

计算方法如下：

$$\left\{ \begin{array}{l} d_1 + d_2 = \sqrt{(x_T - x)^2 + (y_T - y)^2 + (z_T - z)^2} + \sqrt{(x_R - x)^2 + (y_R - y)^2 + (z_R - z)^2} \\ \tan AOA = \frac{y - y_R}{x - x_R} \\ \tan ZOA = \frac{z - z_R}{\sqrt{(x_R - x)^2 + (y_R - y)^2}} \end{array} \right.$$

在网络存在多个节点，不论自发自收或者 A 发 B 收情况下，对于一个感知区域都存在多个感知链路进行感知，这些感知链路的数据就需要融合。在多链路融合感知场景下，相较于单链路感知，多链路感知会有多个发射节点和接收节点参与，因而在信道建模时需要建模和目标相连的多个收发链路。具体而言，针对某个感知目标，首先建模所有收发扇区和感知目标的大尺度信道，之后挑选大尺度 RSRP 最大的 M 个收发扇区作为协同感知的收发 Pair 或者挑选大尺度 RSRP 大于预设 RSRP 门限的收发扇区作为协同感知的收发 Pair，最后建模用于协同感知的多收发扇区 pair 和感知目标之间的小尺度信道，产生信道系数。

4.3. 链路仿真评估方法

链路级仿真评估方法如下所示。

- 1) 配置仿真参数。除了配置传统通信链路仿真的参数（如仿真时间，SNR，频点、带宽、天线、发射功率）外，还需配置感知目标数量，感知模式，感知目标移动模型等。
- 2) 感知信道生成。基于感知模式，生成感知发送机/接收机和感知目标间的信道。
- 3) 感知信号发送、接收及处理。不同于传统通信系统仿真，感知系统仿真需要建模感知信

号序列生成、资源映射、预编码、时频转换与信道卷积。此外，在感知信号处理流程中还包括杂波消除，自干扰消除以及其它非理想因素消除算法等。

- 4) 感知参数估计。利用感知参数估计算法（如 DFT/IDFT 算法）对杂波消除后的估计信道进行感知目标的检测和估计。
- 5) 感知度量值的统计。统计感知目标不同 SNR 的感知精确度和检测概率。



图 4-2 链路仿真评估流程

5. 5G-A 通感评估结果

本章节展示了基于上述章节信道模型，仿真参数等的仿真结果，包括无人机，车辆以及人的场景。

5.1. 无人机感知评估结果

5.1.1. 仿真配置与结果一

在本仿真场景中，基站通过发送和接收感知信号来估计无人机的速度、位置等信息。网络拓扑采用传统的六边形蜂窝网络拓扑。小区配置为 19*3，包含 19 个站点，每个站点 3 个扇区。无人机随机固定分布在每个小区的某些低空区域，即 25,50,100,200,300 米的高度。感知模式采用基站自发自收感知。我们分别对 FR1 以及 FR2 的频点进行了仿真，评估了无人机检测中的位置和速度测量精度以及检测率。仿真参数如下表所示。

表 5-1 UAV 系统仿真评估参数一

参数	UMa	UMa
网络拓扑	19*3扇区	
站间距	500m	200m

载频	4GHz	30GHz
带宽	100MHz	200MHz
子载波间隔	30kHz	120kHz
基站高度	25m	
基站发送功率	53 dBm	30 dBm
基站天线配置	(M, N, P, Mg, Ng; Mp, Np) = (12,8,2,1,1;4,8) (dH, dV)=(0.5, 0.8) λ	(M, N, P, Mg, Ng; Mp, Np) = (4,16,2,2,2;1,1) (dH, dV)=(0.5, 0.5) λ (dg,H,dg,V) = (4.0, 2.0) λ
天线极化	$\pm 45^\circ$ polarization	
发射天线增益	8dBi	
基站噪声系数	5dB	8dB
感知资源	频域comb2 1符号/7个符号	
相干处理时间	40 OFDM符号	160 OFDM符号
感知模式	单基自发自收感知	
无人机高度	{25, 50, 100, 200, 300}	
无人机速度	水平: (0, 180) km/h 垂直: 0	
无人机数量	1个/小区	
无人机分布	小区内均匀分布, 水平方向随机	
RCS模型	-20dBsm	
目标信道类型	LOS+LOS	

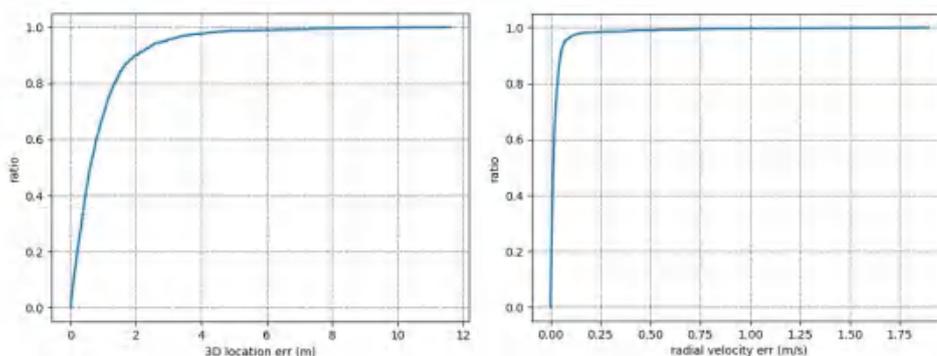


图 5-1 4GHz 下无人机检测位置精度与速度精度

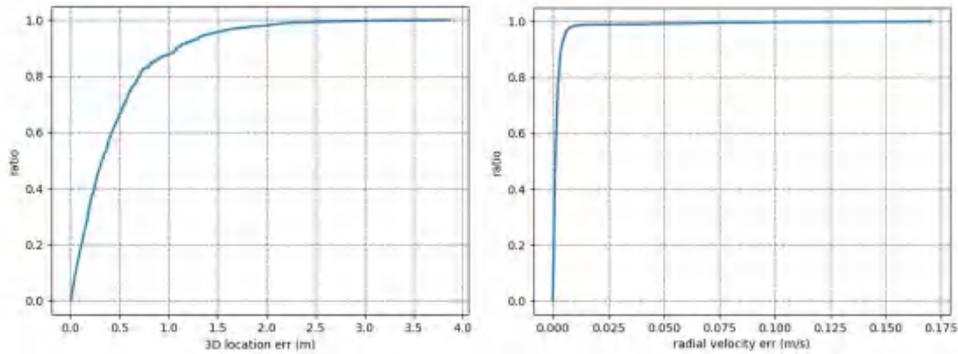


图 5-2 30GHz 下无人机检测位置精度与速度精度

图 5-1 所示为 4GHz 下对无人机感知场景 TRP 单基感知下的位置误差估计与速度误差估计。从图中可以看出 95%的感知目标的位置误差小于 2.89 米，95%的感知目标的径向速度误差小于 0.08m/s (0.28km/h)。同时，统计得到位置误差 RMSE 为 1.47 米，速度误差 RMSE 为 0.7m/s (2.52km/h)。该种场景下，检测率为 97.8%。

图 5-2 所示为 30GHz 下对无人机感知场景 TRP 单基感知下的位置误差估计与速度误差估计。从图中可以看出 95%的感知目标的位置误差小于 1.43 米，95%的感知目标的径向速度误差小于 0.005m/s (0.18km/h)。同时，统计得到位置误差 RMSE 为 0.67 米，速度误差 RMSE 为 0.01m/s (0.036km/h)。该种场景下，检测率为 96.5%。

5.1.2. 仿真配置与结果二

本仿真参考 3GPP 相关结论和 IMT2020 提出的仿真参数配置，设定 UAV 感知场景下的仿真参数如下表所示

表 5-2 UAV 系统评估仿真参数二

参数	基站A发A收/基站A发B收
网络拓扑	六边形蜂窝拓扑，7*3扇区
站间距	1732m
载频	6GHz
带宽	100MHz
子载波间隔	30kHz
基站发射功率	49dBm
发送天线配置	(M,N,P,Mg,Ng) = (1,1,2,1,1)
接收天线配置	(M,N,P,Mg,Ng) = (16,16,2,1,1), (dH,dV) = (0.5, 0.5) λ

发送端是否进行波束赋形	否
发射天线增益	8dBi
接收天线增益	8dBi
基站天线高度	35m
基站噪声系数	5dBi
热噪声	-174dBm/Hz
K因子	15
无人机高度	200m
无人机速度	3-40 km/h 均匀分布
一个目标选择的收发扇区 pair数目	1或2
UAV撒点方式	中心基站1号扇区内均匀撒点
目标间最小距离	10m
一个扇区内目标个数	5
Drop次数	20

UAV 感知场景下的网络拓扑和目标分布如图 5-1 所示，其中，红色星号代表基站，红色圆点代表当前 Drop 撒点产生的 UAV，蓝线代表扇区边界，红线指示的是扇区的法线方向。仿真中采用基站 A 发 A 收单 Pair、基站 A 发 A 收多 Pair、基站 A 发 B 收单 Pair 以及基站 A 发 B 收多 Pair 对 UAV 目标进行了感知。其中，单 Pair 是采用一对（One Pair）发射机和接收机去感知目标，在基站 A 发 A 收场景下，这一对发射机和接收机位于同一基站的同一扇区；在基站 A 发 B 收场景下，这一对发射机和接收机可以分别位于不同基站的不同扇区。

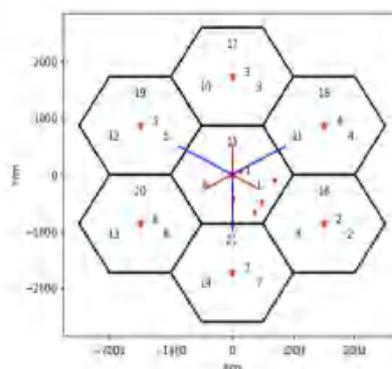


图 5-3 网络拓扑和 UAV 撒点

◇ A发A收单 Pair 结果

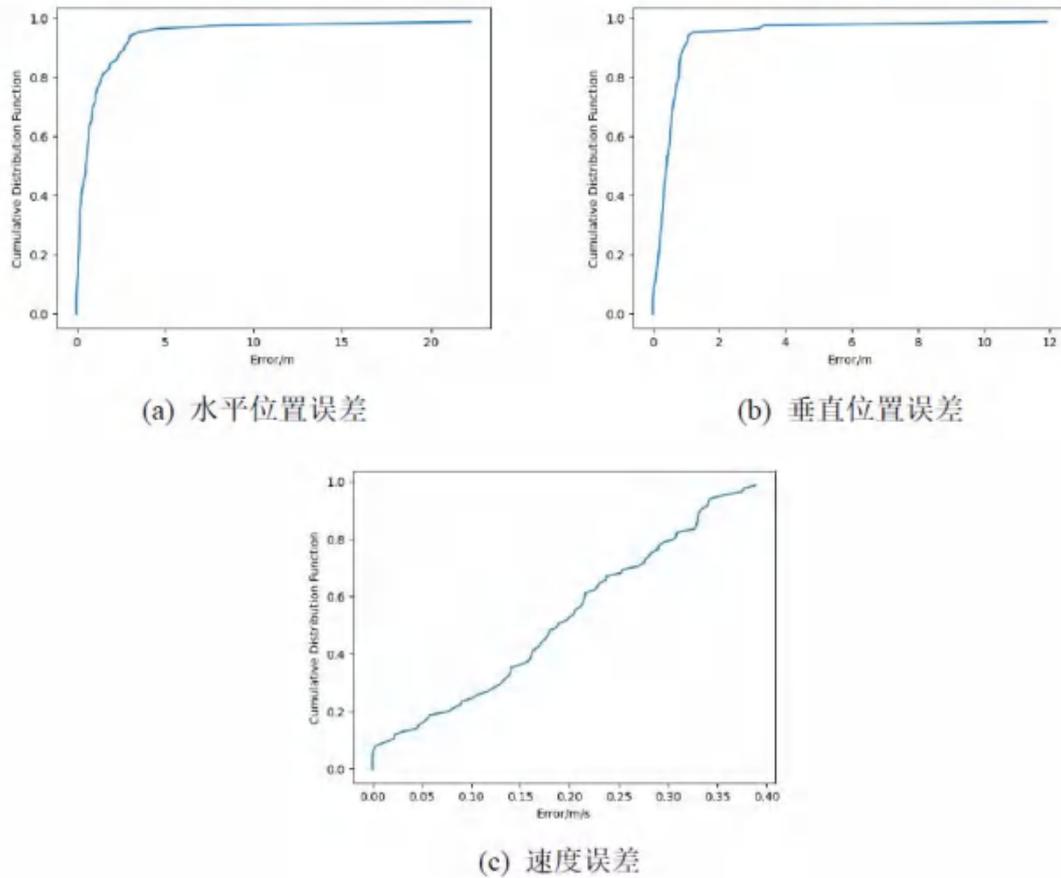


图 5-4 A 发 A 收单 pair 感知误差 CDF 曲线

表 5-3 基站 A 发 A 收单 pair 感知性能

水平位置误差	垂直位置误差	速度误差	检测目标数/真实目标数
2.442m	0.875m	0.33m/s	81%

◇ A发B收单 Pair 结果

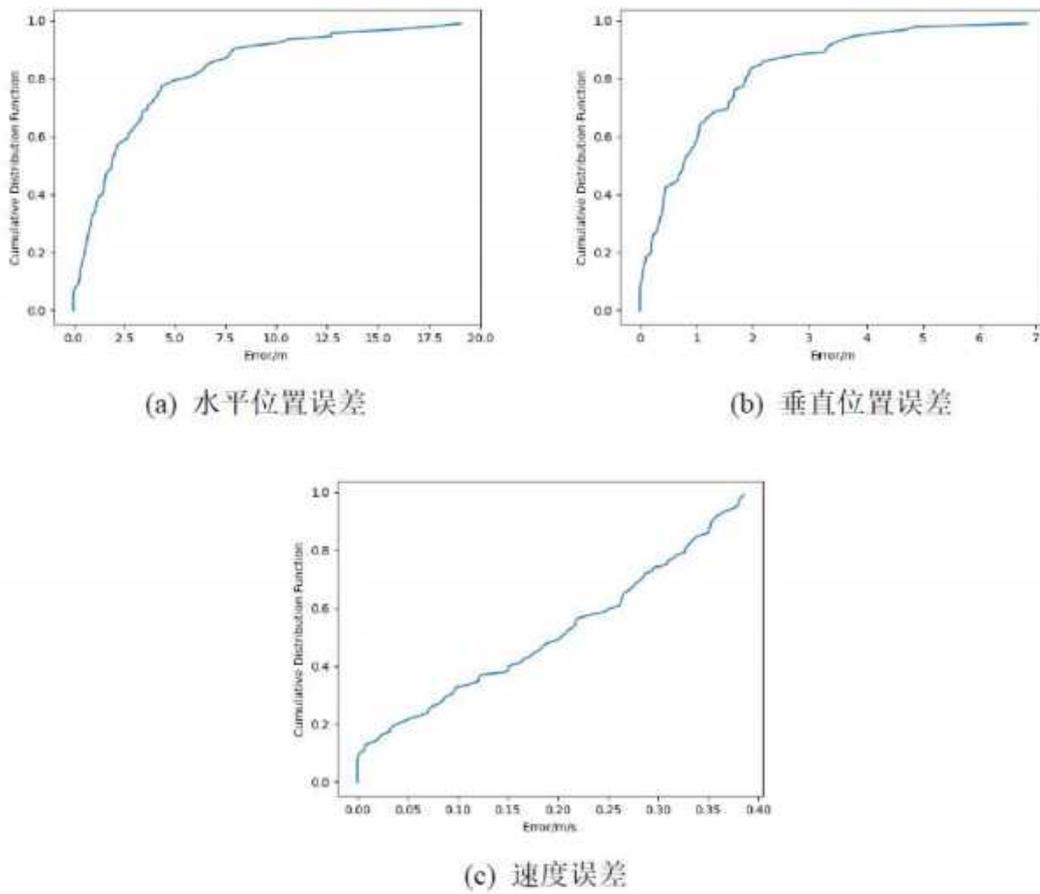
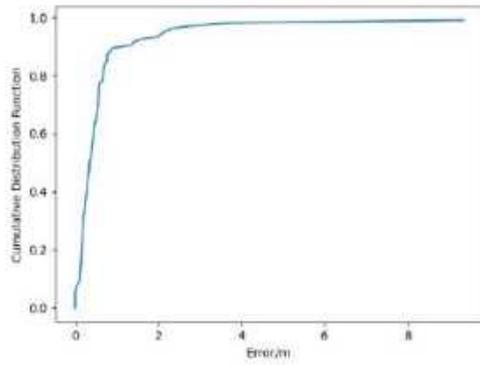


图 5-5 A 发 B 收单 pair 感知误差 CDF 曲线

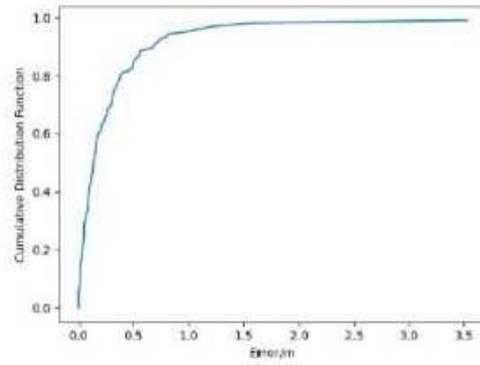
表 5-4 基站 A 发 B 收单 pair 感知性能

水平位置误差	垂直位置误差	速度误差	检测目标数/真实目标数
7.785	3.246m	0.352m/s	98%

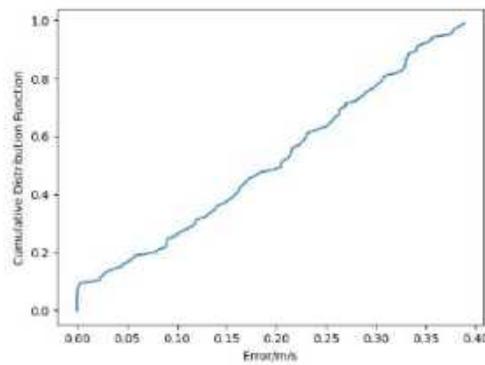
◇ A 发 B 收多 Pair 结果 (2pair)



(a) 多站融合后水平位置误差



(b) 多站融合后垂直位置误差



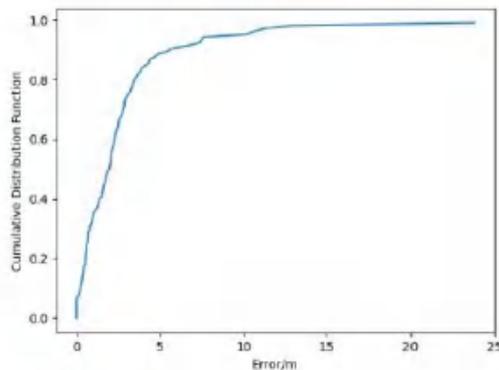
(c) 多站融合后速度误差

图 5-6 A 发 A 收多 pair 感知误差 CDF 曲线

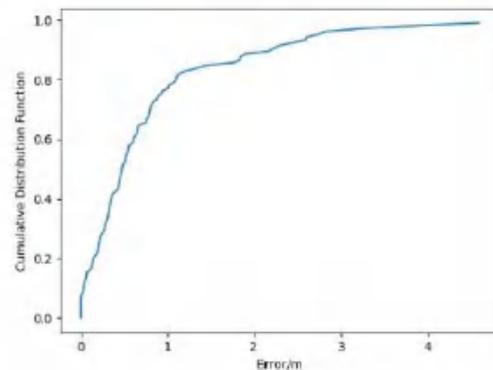
表 5-5 基站 A 发 A 收多 pair 感知性能

水平位置误差	垂直位置误差	速度误差	检测目标数/真实目标数
0.85m	0.565m	0.332m/s	98%

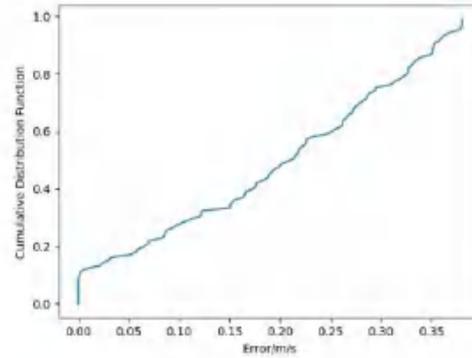
◇ A 发 B 收多 Pair 结果 (2pair)



(a) 多站融合后水平位置误差



(b) 多站融合后垂直位置误差



(c) 多站融合后速度误差

图 5-7 A 发 B 收多 pair 感知误差 CDF 曲线

表 5-6 基站 A 发 B 收多 pair 感知性能

水平位置误差	垂直位置误差	速度误差	检测目标数/真实目标数
4.886m	1.895m	0.352m/s	97%

在单链路感知情况下，A 发 A 收相较于 A 发 B 收可以取得更高的距离、角度和速度估计精度，但在目标检测概率上弱于 A 发 B 收。这是由于在单链路感知仿真中，接收到目标回波最强的一对收发节点被选择为进行目标检测定位的收发 pair。当目标全部位于中心扇区时，则自发自收模式下的收发 pair 为中心扇区，即中心扇区可以接收到所有目标的反射回波，而多个目标之间很容易出现“遮蔽效应”，导致检测概率降低；而在 A 发 B 收模式下，由于目标位置的不同，不同目标的收发 pair 可能不同，即一个接收扇区可能只能收到来自部分目标的反射回波，其接收到的目标之间的“遮蔽效应”相较于自发自收模式下的中心扇区会大大减轻。因此，在当前仿真场景设置下，在单链路感知情况下，自发自收的目标检测概率低于 A 发 B 收。

另外，由以上仿真结果可以看出，相较于单链路感知，多链路协作感知可以带来明显的性能增益。这是由于利用多站协作感知可以在一定程度上避免强目标对弱目标的“遮蔽效应”，提高检测概率。进一步，对多收发 pair 的定位结果进行融合，也可以提高目标的定位精度。

5.1.3. 仿真配置与结果三

本节提供 UMi-AV 和 UMa-AV 场景中的 UAV 感知结果，具体的仿真假设如下表所示，

表 5-7 UAV 系统评估仿真参数三

参数	UMa	UMi
网络拓扑	19*3扇区	
站间距	500m	200m
载频	4GHz	
带宽	100MHz	
子载波间隔	30kHz	
基站高度	25m	10m
基站发送功率	18 dB	18 dB
基站天线配置	(M, N, P, Mg, Ng; Mp, Np) = (8, 8, 2, 1, 1; 2, 8) (dH, dV) = (0.5, 0.8) λ	
天线极化	$\pm 45^\circ$ polarization	
发射天线增益	8dBi	
基站噪声系数	5dBi	
感知资源	频域comb2 1符号/7个符号	
相干处理时间	40 OFDM符号	
感知模式	基站自发自收单基感知	
无人机高度	100m	
无人机速度	30 km/h	
目标数量	1个/小区	
目标分布	水平随机, 垂直100m	
RCS模型	A: -12.4 dBsm B1: 0 dBsm B2: $\mu = 0$ dBsm $\sigma = 3.1$ dBsm	
目标信道类型	LOS+LOS	

◇ UMi-AV 场景

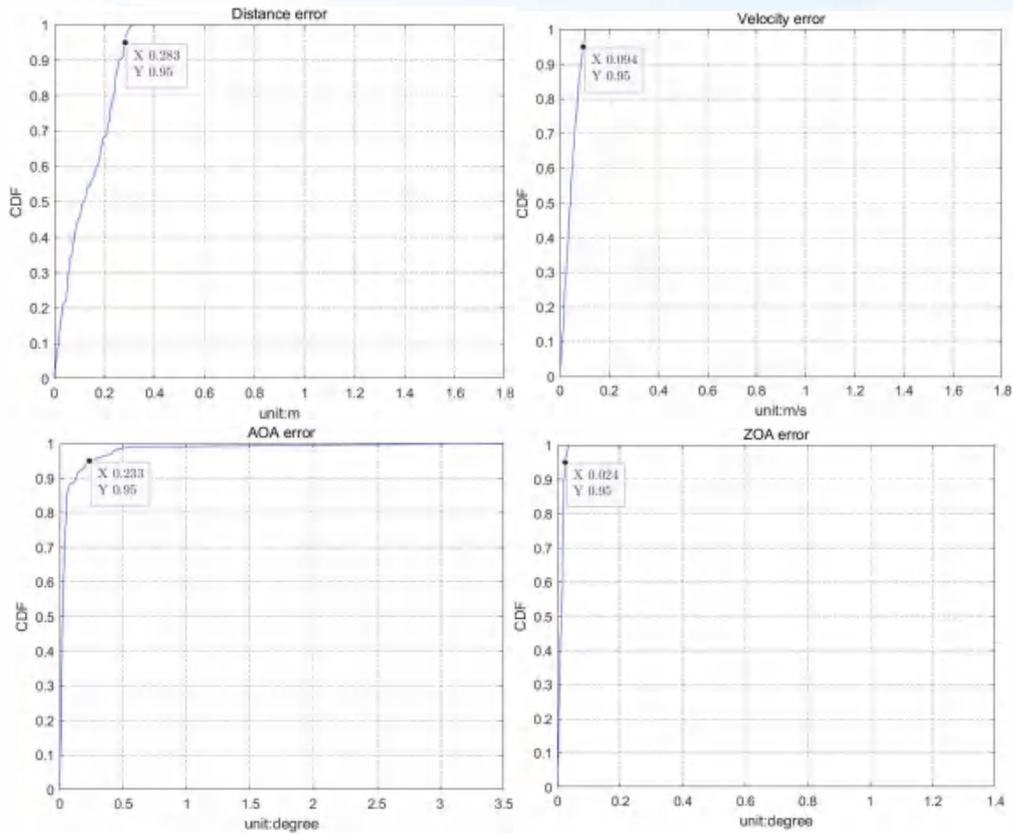


图 5-8 UMi 场景距离速度以及角度测量误差曲线

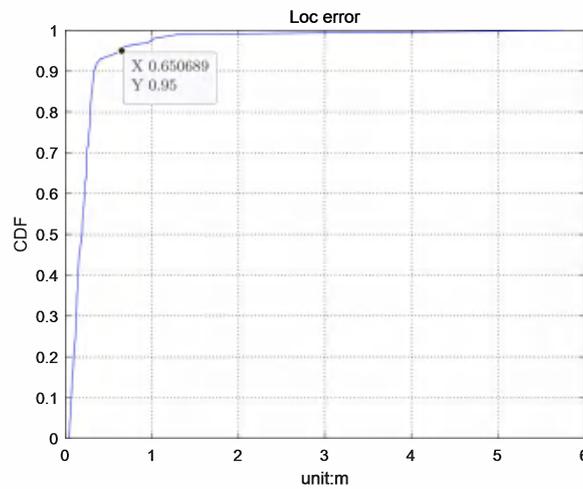


图 5-9 UMi 场景位置测量误差曲线

其中 95% 的距离测量误差为 0.283m，径向速度测量误差为 0.094m/s，AOA 角度测量误差为 0.233 度，ZOA 角度测量误差为 0.024 度，对应的定位结算误差为 0.651m。

✧ UMa-AV 场景

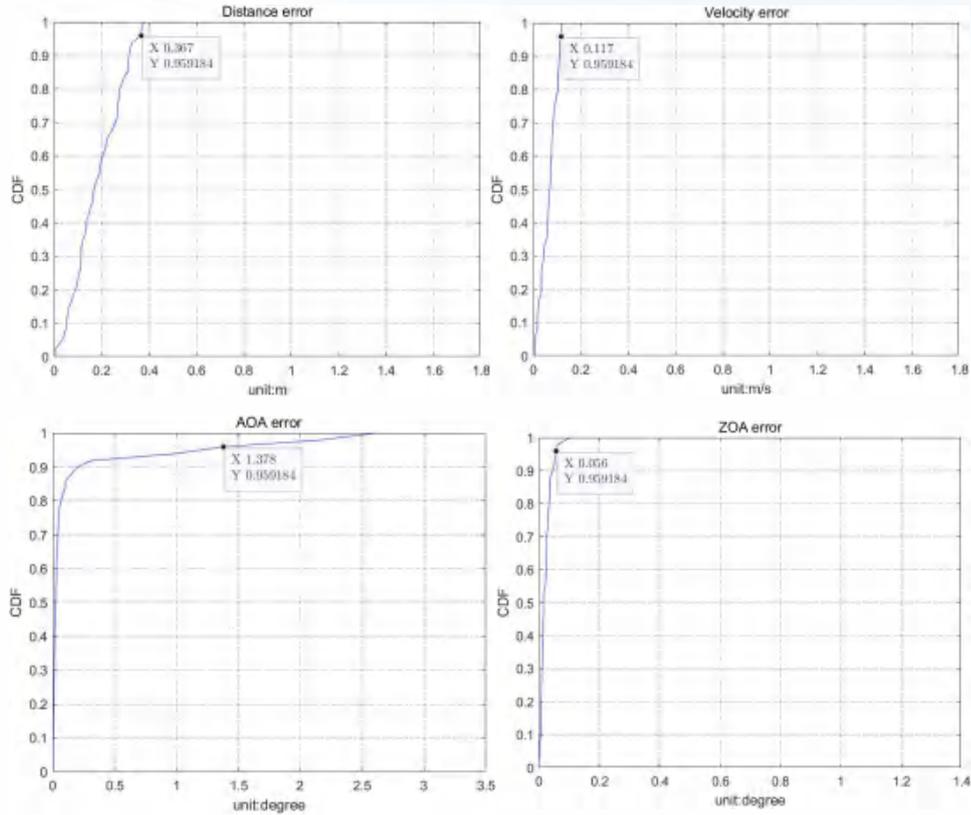


图 5-10 UMa 场景距离速度以及角度测量误差曲

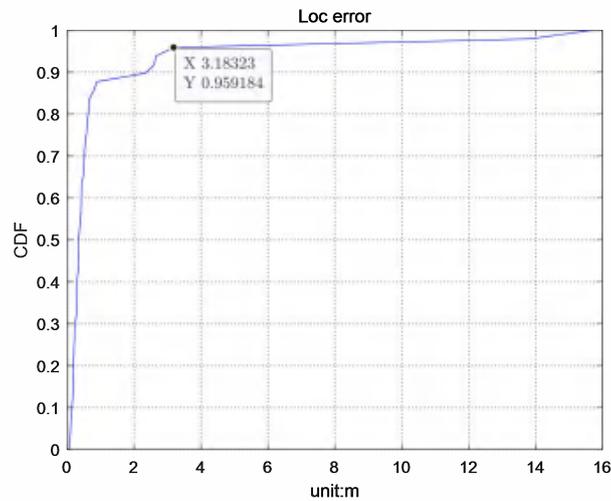


图 5-11 UMa 场景位置测量误差曲线

其中 95% 的距离测量误差为 0.367m，径向速度测量误差为 0.117m/s，AOA 角度测量误差为 1.378 度，ZOA 角度测量误差为 0.056 度，对应的定位结算误差为 3.183m。

5.1.4. 仿真配置与结果四

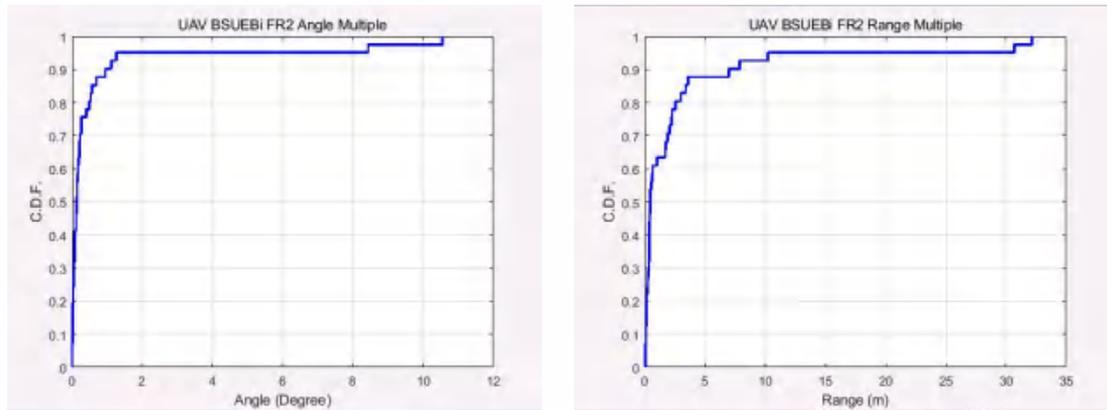
本节提供 UMa-AV 场景中的 UAV 感知结果，仿真参数配置参考下表所示。

表 5-8 UAV 系统评估仿真参数四

参数	UMa
网络拓扑	19*3扇区
站间距	200m
载频	30GHz
带宽	200MHz
子载波间隔	120kHz
基站高度	25m
基站发送功率	44 dBm
基站天线配置	$(M,N,P,M_g,N_g;M_p,N_p) = (4,16,2,2,2; 1,1)$, $(d_H,d_V) = (0.5, 0.5)\lambda$, $(dH,g, dV,g) = (4.0, 2.0)\lambda$, +45°/-45° polarization
基站波束	Azimuth angle $\phi_i = \{-5*\pi/16, -3*\pi/16, -\pi/16,$ $\pi/16, 3*\pi/16, 5*\pi/16\}$ Zenith angle $\theta_j = \{\pi/8, 3*\pi/8\}, 5*\pi/8, 7*\pi/8\}$
UE发送功率	23 dBm
UE天线配置	$(M,N,P,M_g,N_g;M_p,N_p) = (2,4,2,1,2; 1,1)$; $(dH,dV) = (0.5,0.5)\lambda$, $(d_g,V,d_g,H) = (0, 0)\lambda$, 0°/90° polarization; ⊙ $m_g,n_g=90^\circ$; $\Omega_0,1=\Omega_0,0+180^\circ$
UE波束	Azimuth angle $\phi_i = \{-3*\pi/8, -\pi/8, \pi/8, 3*\pi/8\}$; Zenith angle $\theta_j = \{\pi/4, 3\pi/4\}$;
发射天线增益	8dBi
基站噪声系数	10dBi
UE噪声系数	10dBi
感知资源	14 OFDM symbol, 132 RB
相干处理时间	14 OFDM符号
感知模式	基站发UE收感知
无人机高度	(1.5-300) 均匀分布
无人机速度	160 km/h
无人机数量	5个/小区
无人机分布	水平随机
无人机距离约束	无人机-基站最小距离 (2d) : 10m UE-无人机最小距离 (2d) : 1m

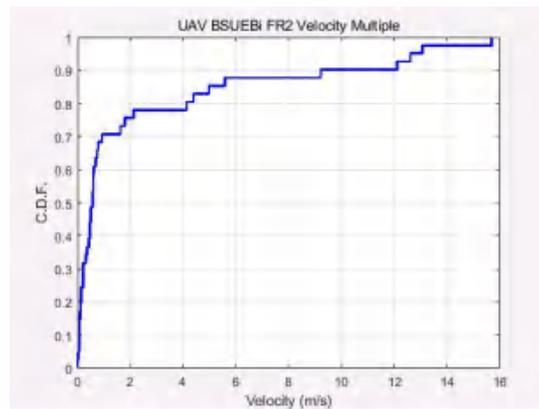
	无人机-无人机最小距离 (2d) : 1m
RCS模型	均值-17dBsm
感知算法	3D ESPRIT & 3D MUSIC

在这个场景下，BS 发 UE 收感知模式对于一个目标，选择了 1 组目标信道 RSRP 最大的一条链路，对应的距离角度和速度估计曲线如下图所示



(a) FR2-1, UMa-AV 场景角度估计

(b) FR2-1, UMa-AV 场景距离估计



(c) FR2-1, UMa-AV 场景速度估计

图 5-12 UMa-AV 场景下 BS 发 UE 收估计误差 CDF

5.2. 车辆场景仿真

5.2.1. 仿真配置与结果一

参考城区网格部署，即每个街区中心建筑尺寸为 200*100*20m。基站部署位于每个街区临街的中央，整个区域部署 18 个站点，站间距为 250m，每个站点三个扇区，站高 25m，小区覆盖如下图所示。

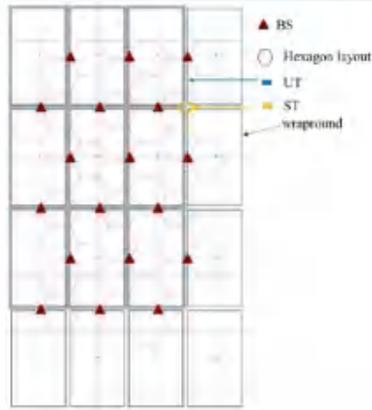


图 5-13 车辆定位评估网络部署配置

仿真参数配置如下表所示

表 5-9 车辆场景仿真参数一

参数	Urban Grid
网络拓扑	18站54小区
站间距	250m
载频	4GHz
带宽	100MHz
子载波间隔	30kHz
基站高度	25m
基站发送功率	56 dBm
基站天线配置	$(M, N, P, M_g, N_g; M_p, N_p) = (8, 8, 2, 1, 1; 2, 8)$ $(d_H, d_V) = (0.5, 0.8)\lambda$
天线极化	$\pm 45^\circ$ polarization
发射天线增益	8dBi
基站噪声系数	5dBi
感知资源	频域comb2 1符号/7个符号
相干处理时间	20 OFDM符号
感知模式	基站自发自收单基感知
车辆高度	1.6m
车辆速度	60 km/h
车辆数量	建筑物周边四条路上至少每条路一个目标
车辆分布	沿道路方向

RCS模型	参考表 2-2
RCS建模	五点建模
目标信道类型	LOS+LOS

仿真结果如下图所示，分别是位置误差以及径向速度误差 CDF 曲线

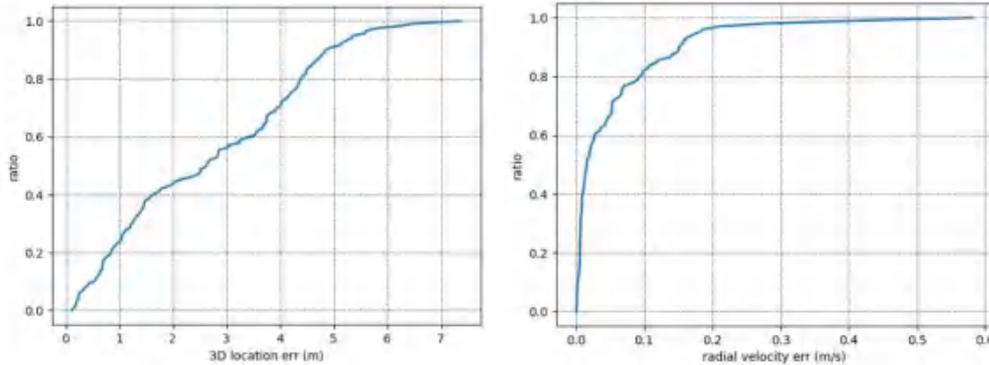


图 5-14 室外车辆定位的位置精度与速度精度

上图所示为4Ghz下对室外车辆定位的感知场景 TRP 单基感知下的位置误差估计与速度误差估计。从图中可以看出 95%的感知目标的位置误差小于 5.35 米，95%的感知目标的径向速度误差小于 0.18m/s (0.65km/h)。同时，统计得到位置误差 RMSE 为 3.2 米，速度误差 RMSE 为 0.1m/s (0.36km/h)，对于这部分目标，检测率达到 99%。

5.2.2. 仿真配置与结果二

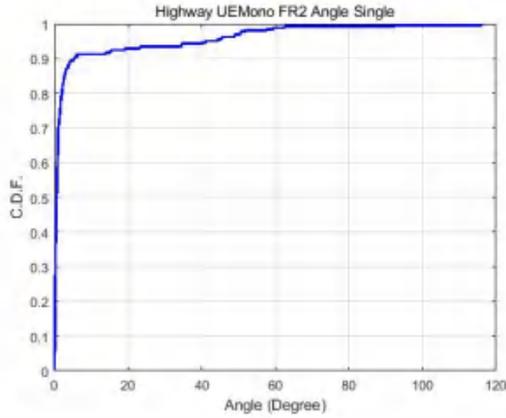
本节对 Highway 仿真下的车辆目标进行仿真，仿真参数如下表所示。

表 5-10 车辆场景仿真参数二

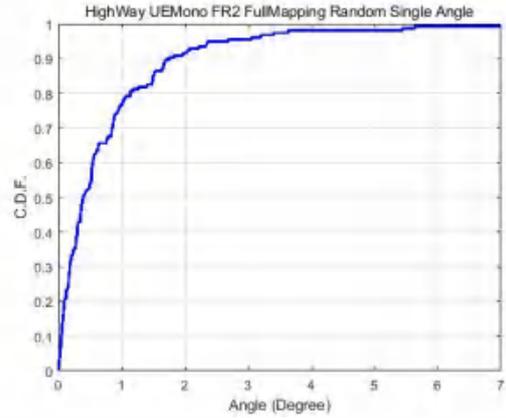
参数	Highway
网络拓扑	Figure A.1.3-3 in 36.885
站间距	500m
载频	30GHz
带宽	200MHz
子载波间隔	120kHz
基站高度	25m
基站发送功率	40 dBm
基站天线配置	$(M,N,P,M_g,N_g;M_p,N_p)=(4,16,2,2,2; 1,1)$, $(d_H,d_V)=(0.5, 0.5)\lambda$, $(dH,g, dV,g)=(4.0, 2.0)\lambda$,

	+45°/-45° polarization
基站波束	Azimuth angle $\varphi_i = \{-5\pi/16, -3\pi/16, -\pi/16, \pi/16, 3\pi/16, 5\pi/16\}$ Zenith angle $\theta_j = \{\pi/8, 3\pi/8, 5\pi/8, 7\pi/8\}$
UE发送功率	23 dBm
UE天线配置	$(M,N,P,M_g,N_g;M_p,N_p) = (1,4,2,1,4; 1,1)$, $(dH,dV) = (0.5, 0.5)\lambda, (dH,g, dV,g) = (4.0, 2.0)\lambda$, 0°,90° polarization Panel bearing angle: $\Omega_{0,1}=\Omega_{0,0}+90^\circ; \Omega_{0,2}=\Omega_{0,0}+180^\circ;$ $\Omega_{0,3}=\Omega_{0,0}+270^\circ$ array downtilt angle Θ_{m_g,n_g} is 90° Note: $(\Omega_{m_g,n_g}, \Theta_{m_g,n_g})$ is orientation of the panel (mg, ng) the orientation of the first panel $(\Omega_{0,0}, \Theta_{0,0})$, Ω_{m_g,n_g} is the array bearing angle and Θ_{m_g,n_g} is the array downtilt angle defined in TR 36.873
UE波束	Azimuth angle $\varphi_i = \{-3\pi/8, -\pi/8, \pi/8, 3\pi/8\};$ Zenith angle $\theta_j = \{\pi/4, 3\pi/4\};$
发射天线增益	8dBi
基站噪声系数	10dBi
UE噪声系数	10dBi
感知资源	14 OFDM symbol, 132 RB
相干处理时间	14 OFDM符号
感知模式	UE自发自收
车辆速度	140 km/h
车辆数量	5个/小区
车辆分布	Dropping option A in 37.885
RCS模型	均值20dBsm
感知算法	3D ESPRIT & 3D MUSIC

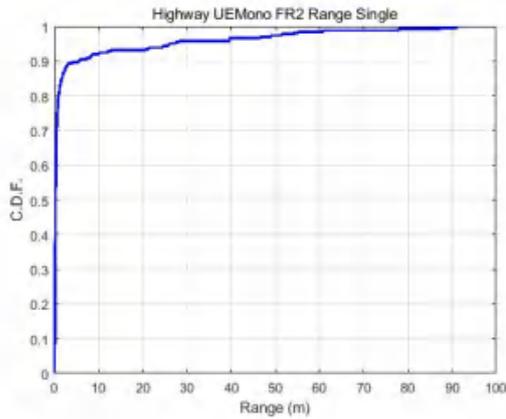
下面几张图展示了感知不同误差的 CDF 曲线。



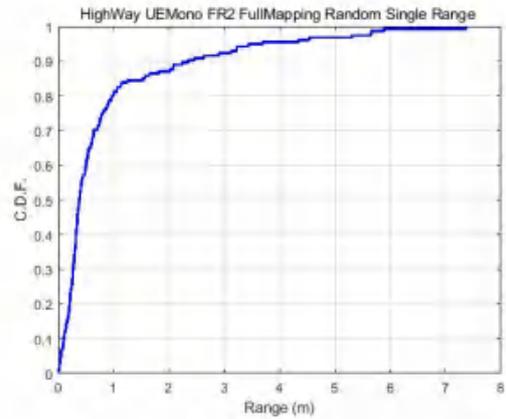
(a) 不限制(Sensing Tx, Sensing Rx)组选择, 角度估计误差



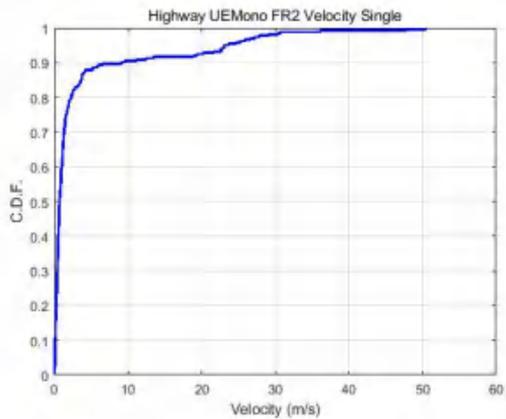
(b) 限制(Sensing Tx, Sensing Rx)组选择, 角度估计误差



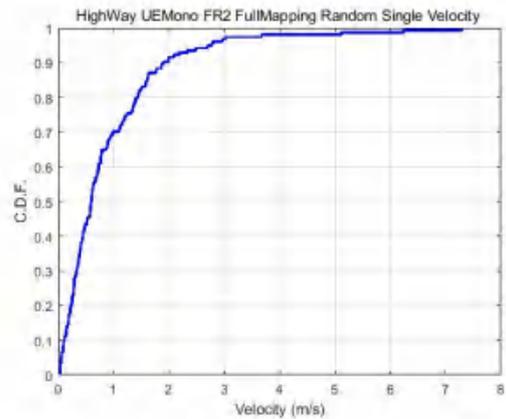
(c) 不限制(Sensing Tx, Sensing Rx)组选择, 距离估计误差



(d) 限制(Sensing Tx, Sensing Rx)组选择, 距离误差



(e) 不限制(Sensing Tx, Sensing Rx)组选择, 速度估计误差



(f) 限制(Sensing Tx, Sensing Rx)组选择, 速度估计误差

图 5-15 高速公路场景下 UE 自发自收估计误差 CDF

对于目标 k, 不限制(Sensing Tx, Sensing Rx)组选择时, 目标 k 的目标信道 RSRP 可能较低, 背景信道、噪声等对于估计性能影响较大; 按照 RSRP 选择(Sensing Tx, Sensing Rx)组

后，目标 k 的 SINR 较好，估计性能显著提升。

5.3. 室内人感知结果

5.3.1. 仿真配置与结果一

本章节以 Indoor office 场景为例，给出终端参与感知的评估结果。仿真过程中在网络拓扑内随机撒放 5 个 UE 并选择其中 1 个 TRP 作为感知信号发射器或接收器，感知模式包括 TRP 发 UE 收下行感知和 UE 发 TRP 收上行感知，暂不考虑来自其他设备的干扰。

表 5- 11 室内仿真场景配置参数一

参数	取值	
场景	Indoor Office	
感知发射器和接收器属性	TRP天线配置： $(M,N,P,Mg,Ng) = (4,4,2,1,1)$, $(dH,dV) = (0.5, 0.5)\lambda$ +45°, -45° polarization UE天线配置（下行）： $(M,N,P,Mg,Ng) = (2,2,1,1,1)$, $(dH,dV) = (0.5, 0.5)\lambda$ UE天线配置（上行）： $(M,N,P,Mg,Ng) = (1,1,2,1,1)$, $(dH,dV) = (N/A,N/A)\lambda$	
感知模式	TRP发UE收下行感知、UE发TRP收上行感知	
感知目标	RCS	1 m ²
	3D移动	水平速度：10 km/h
	3D分布	水平均匀分布，高度1.5m，1个/感知区域
	运动方向	随机
感知区域	整个网络拓扑区域	
载频	4 GHz	
子载波间隔	30KHz	
仿真带宽	100MHz	
基站天线高度	3m	
基站发射功率	24dBm	
基站阵子天线增益	5dBi	

基站噪声系数	5dB
UE天线高度	0.8m
UE发射功率	23dBm
UE噪声系数	9dB
噪声功率谱密度	-174 dBm/Hz
感知资源	1 OFDM symbol/slot, 273 RB, 频域连续映射
相干处理时间	80个 OFDM符号

图 5-17 和图 5-16 和分别为下行感知和上行感知性能评估结果，包括定位精度和径向速度估计精度。可以看出，由于 UE 位置不同，经过感知目标反射的传播路径损耗不同，因此不同 UE 的感知性能存在差异，对于下行感知，除了接收功率的差异，目标相对于 UE 天线面板的方向不同，进而影响了测角性能，因此下行感知中 UE 定位性能差异更加明显。对于室内 TRP-UE 双基地感知场景中感知节点的选择，考虑选择室内网络拓扑中部分 TRP/UE 或全部 TRP/UE 参与感知，对于感知评估结果的呈现，统计全部感知链路的性能评估结果作为最终感知性能评估结果，或者选择最佳感知链路的性能评估结果作为最终感知性能评估结果。

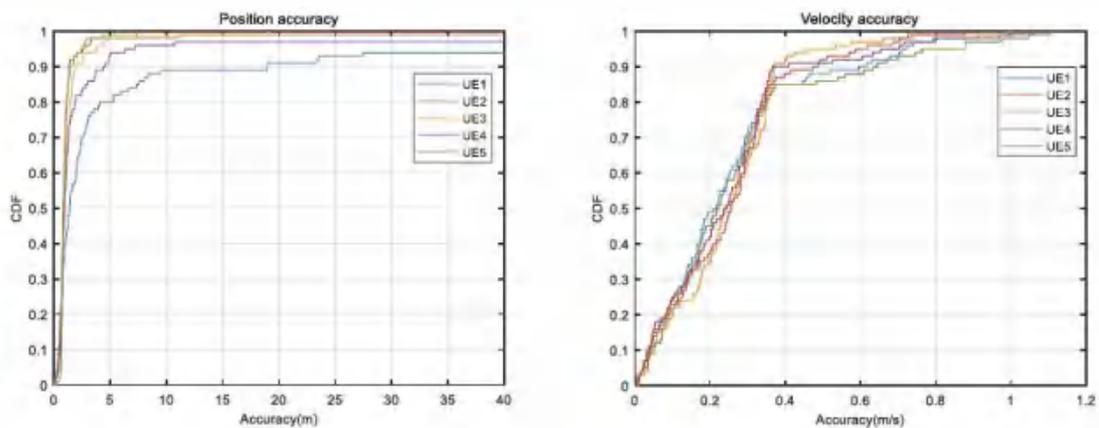


图 5-16 下行感知性能评估结果：定位（左），测速（右）

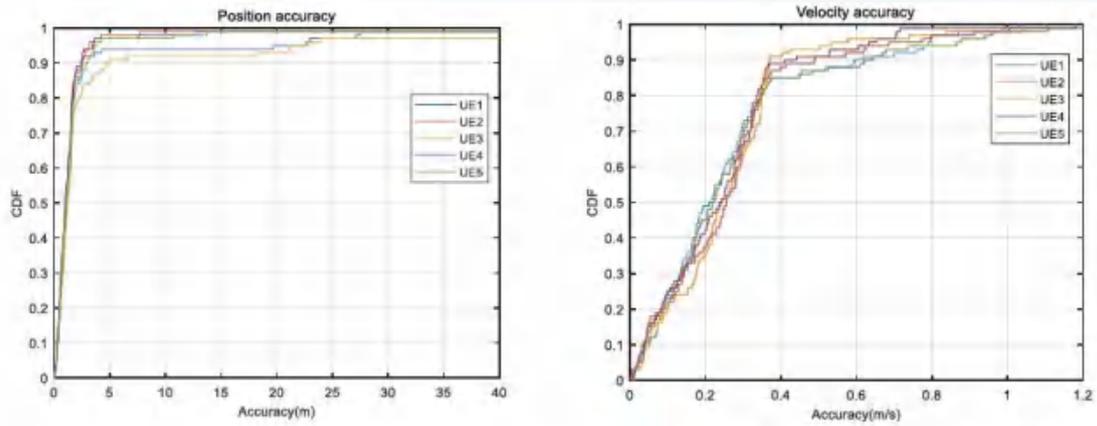


图 5-17 上行感知性能评估结果：定位（左），测速（右）

5.3.2. 仿真配置与结果二

本节对室内工厂场景进行了评估，拓扑按照图 3-7 所示，其中在每个小区撒放一个目标，具体的仿真假设如下表所示。

表 5-12 室内仿真场景配置参数二

参数	Indoor Factory
网络拓扑	18小区
站间距	20m
载频	4GHz
带宽	100MHz
子载波间隔	30kHz
基站高度	8m
基站发送功率	12 dB
基站天线配置	(M, N, P, Mg, Ng) = (4, 4, 2, 1, 1) (dH, dV) = (0.5, 0.5) λ
天线极化	$\pm 45^\circ$ polarization
发射天线增益	8dBi
基站噪声系数	5dBi
感知资源	频域comb2 1符号/时隙
相干处理时间	20 OFDM符号

感知模式	基站自发自收单基感知
目标速度	3 km/h
目标数量	1个/小区
目标分布	水平随机
RCS模型	A:3.6 dBsm B1: 0 dBsm B2: $\mu = 0$ dBsm $\sigma = 2.4$ dBsm
目标信道类型	LOS+LOS

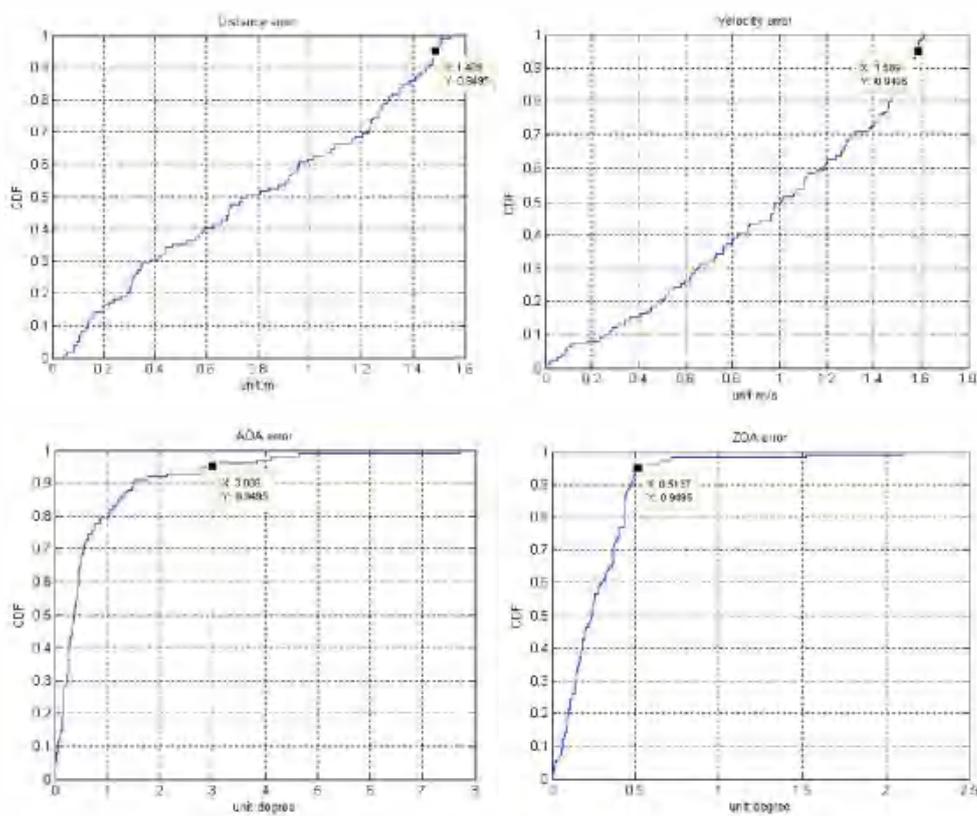


图 5-18 室内仿真场景结果

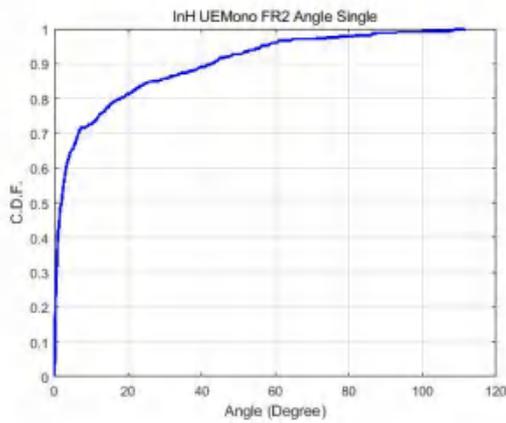
由上图可以看出，其中 95% 的距离测量误差为 1.5m，速度测量误差为 1.59m/s，AOA 角度测量误差为 3 度，ZOA 角度测量误差为 0.51 度。

5.3.3. 仿真配置与结果三

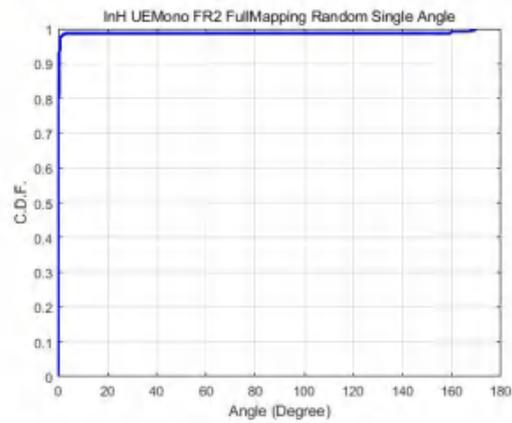
本节对室内热点区域场景进行了评估，拓扑按照图 3-6 所示，其中在每个小区撒放 2 个目标，具体的仿真假设如下表所示。

参数	InH
网络拓扑	Indoor floor: (12BSs per 120m x 50m)
站间距	20m
载频	30GHz
带宽	200MHz
子载波间隔	120kHz
基站高度	25m
基站发送功率	23 dBm
基站天线配置	$(M,N,P,Mg,Ng;Mp,Np) = (16,8,2,1,1; 1,1)$, $(dH,dV) = (0.5, 0.5)\lambda$, $+45^\circ/-45^\circ$ polarization
基站波束	Azimuth angle $\phi_i = \{-5*\pi/16, -3*\pi/16,$ $-\pi/16, \pi/16, 3*\pi/16, 5*\pi/16\}$ Zenith angle $\theta_j = \{\pi/8, 3*\pi/8, 5*\pi/8,$ $7*\pi/8\}$
UE发送功率	23 dBm
UE天线配置	$(M,N,P,Mg,Ng;Mp,Np) = (2,4,2,1,2;1,1)$; $(dH,dV) = (0.5,0.5)\lambda, (dg,V,dg,H) = (0, 0)\lambda$, $0^\circ/90^\circ$ polarization; $\ominus mg,ng=90^\circ; \Omega 0,1=\Omega 0,0+180^\circ$
UE波束	Azimuth angle $\phi_i = \{-3*\pi/8, -\pi/8, \pi/8,$ $3*\pi/8\}$; Zenith angle $\theta_j = \{\pi/4, 3\pi/4\}$;
发射天线增益	8dBi
基站噪声系数	10dBi
UE噪声系数	10dBi
感知资源	14 OFDM symbol, 132 RB
相干处理时间	14 OFDM符号
感知模式	UE自发自收

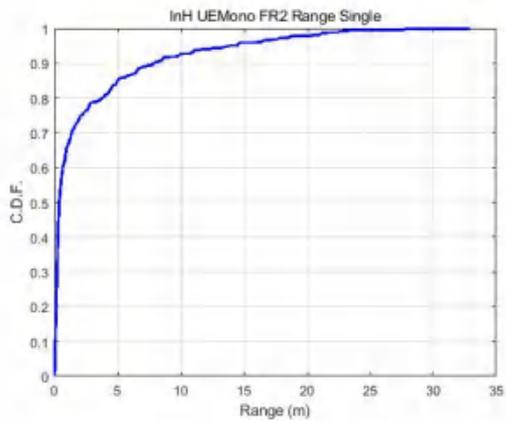
人高度	1m
人速度	3 km/h
人数量	2个/小区
人分布	小区内均匀分布
RCS模型	均值0dBsm
感知算法	3D ESPRIT & 3D MUSIC



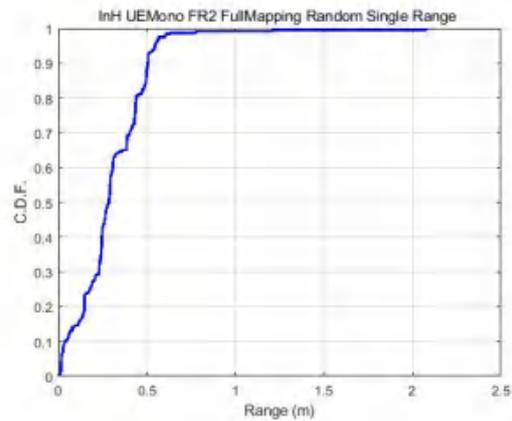
(a) 不限制(Sensing Tx, Sensing Rx)组选择, 角度估计误差



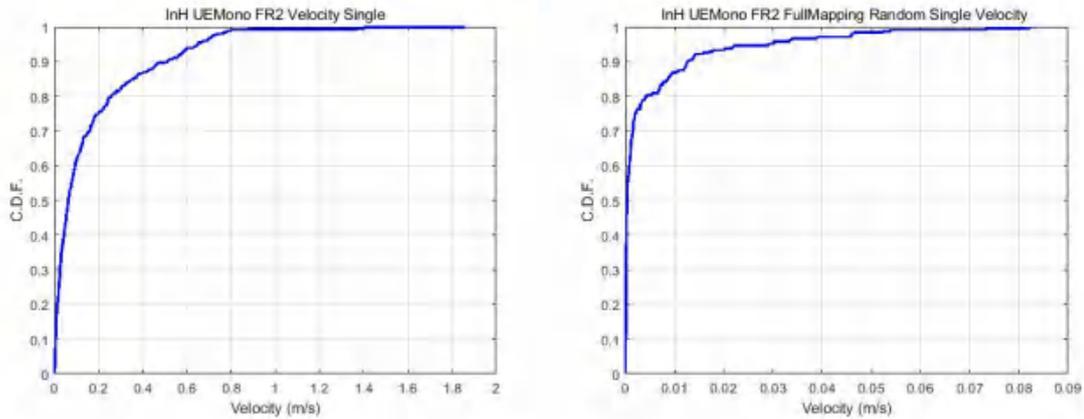
(b) 限制(Sensing Tx, Sensing Rx)组选择, 角度估计误差



(c) 不限制(Sensing Tx, Sensing Rx)组选择, 距离估计误差



(d) 限制(Sensing Tx, Sensing Rx)组选择, 距离误差



(e) 不限制(Sensing Tx, Sensing Rx)组选择, 速度估计误差 (f) 限制(Sensing Tx, Sensing Rx)组选择, 速度估计误差

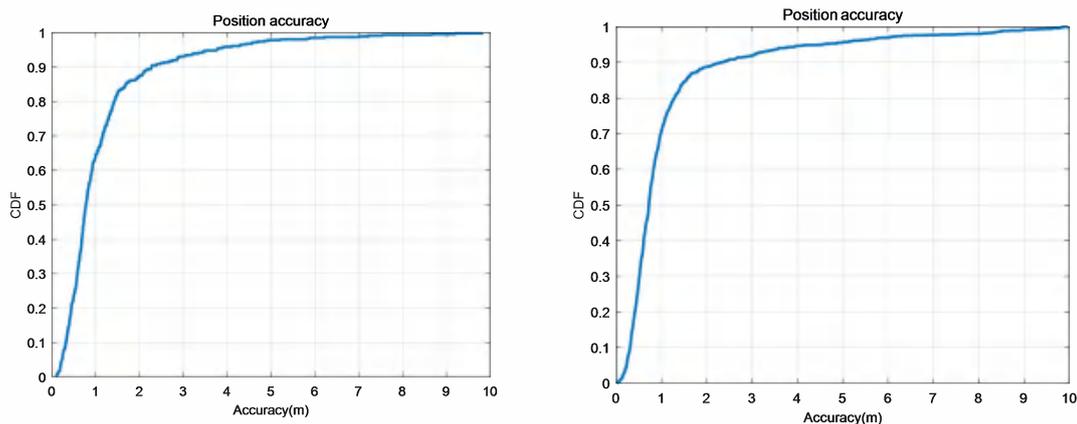
图 5-19 InH 场景下 UE 自发自收估计误差 CDF

5.3.4. 仿真配置与结果四

本节对室内 Indoor Room 场景进行了评估，拓扑按照图 3-8 所示，仿真过程中在网络拓扑内随机撒放 3 个 UE 或 10 个 UE 作为感知节点，具体的仿真假设如下表所示。

参数	取值	
场景	Indoor Room	
感知发射器和接收器属性	TRP天线配置： (M,N,P,Mg,Ng) = (4,4,2,1,1), (dH,dV) = (0.5, 0.5) λ +45°, -45° polarization UE天线配置： (M,N,P,Mg,Ng) = (2,2,1,1,1), (dH,dV) = (0.5, 0.5) λ	
感知模式	TRP发UE收下行感知	
感知目标	RCS	均值-5.68dBsm
	3D移动	水平速度：10 km/h
	3D分布	水平均匀分布，高度1.5m，1个或3个/感知区域
	运动方向	随机
感知区域	整个网络拓扑区域	
载频	4 GHz	
子载波间隔	30KHz	
仿真带宽	100MHz	

基站天线高度	3m
基站发射功率	24dBm
基站阵子天线增益	5dBi
基站噪声系数	5dB
UE天线高度	0.8m
UE发射功率	23dBm
UE噪声系数	9dB
UE 个数	3个或10个/感知区域
噪声功率谱密度	-174 dBm/Hz
感知资源	1 OFDM symbol/slot, 273 RB, 频域连续映射
相干处理时间	80个 OFDM符号
目标信道类型	LOS+LOS, LOS+NLOS, NLOS+LOS, NLOS+NLOS



(a) 1 个感知目标，3 个 UE，目标位置估计误差 CDF
 (b) 3 个感知目标，10 个 UE，目标位置估计误差 CDF

图 5-20 Indoor Room 场景下 TRP 发 UE 收估计误差 CDF

上图所示为室内人定位的感知场景仿真结果，包括：（a）撒放 1 个感知目标，采用 1 个 TRP 发 3 个 UE 收的感知模式，以及（b）撒放 3 个感知目标，采用 1 个 TRP 发 10 个 UE 收的感知模式。仿真中对多个 UE 的检测结果进行合并统计，对于（a），目标定位 RMSE 为 1.1655 米，检测概率为 92.2%，虚警概率为 14.8%，对于（b），目标定位 RMSE 为 1.1732 米，检测概率为 80.6%，虚警概率为 17.7%。

6. 总结和展望

在 5G 系统中，随着大带宽、毫米波、大规模 MIMO 技术的引入，5G 系统已经拥有了感知潜力，可对区域内的物体进行包括检测、测距、测角、测速、识别、定位、追踪、动作识别等功能，从而实现对物理世界的感知探索。作为 5G-A 的一个重要的演进方向，通信感知融合是可为智慧低空、智慧交通、智慧生活、智能工厂等典型应用构建基础通信能力并为第三方提供感知服务，助力垂直行业和终端用户应用。

本研究报告首先分析了 5G-A 通感信道模型，并关注通感评估配置以及通感评估方法，同时给出了在无人机，车辆以及人的感知场景仿真结果。具体内容以及后续建议包括但不限于：

- (1) 通感信道模型：针对目标信道以及背景信道，本报告给出了目标 RCS、环境物体建模、路径损失计算、LOS 概率条件、绝对时延建模、小尺度信道生成以及背景信道建模的具体方案，为后续的仿真评估打下夯实的基础。
- (2) 通感仿真参数：针对无人机、车辆以及人的场景，本报告参考 TR36.777、TR37.885 等 3GPP 标准，类比通信仿真，给出了在不同场景下的目标分布以及感知仿真参数，为系统仿真以及链路仿真参数设置提供参考。
- (3) 通感评估方法：针对感知中关注的检测概率、检测精度、分辨率等参数，给出了具体的评估方法，对应到系统仿真与链路仿真中具体的参数计算，实现感知指标的仿真统计方法的定义。后续可基于感知理论与仿真方法论，对感知虚警率的评估方法进行进一步的研究。

通过对以上三个维度的分析，最后给出了各个场景下的仿真结果，作为后续标准组织开展性能评估重要数据参考。

面向未来，通感仿真评估场景配置扩展适配更多应用场景、通感基站和终端设备的增强演进以及新的应用频段，场景性能指标要求和技术方案性能评估也将相应增强研究，推进通感技术面向多样化场景需求的标准研究及应用落地。

7. 参考文献

- [1] 5G-Advanced通感融合场景需求研究报告[R]，IMT2020(5G)推进组， 2022。

- [2] 5G-Advanced通感融合网络架构研究报告[R], IMT2020(5G)推进组, 2022.
- [3] 5G-Advanced通感融合仿真评估方法研究报告[R], IMT-2020(5G)推进组, 2023.
- [4] Feasibility Study on Integrated Sensing and Communication[R], 3GPP TR22.837.
- [5] Chairman Notes, 3GPP RAN1#116, Feb. 26-Mar. 1, 2024.
- [6] Study on channel model for frequencies from 0.5 to 100 GHz, 3GPP TR 38.901.
- [7] Study on Enhanced LTE Support for Aerial Vehicles, 3GPP TR 36.777.
- [8] Service requirements for Integrated Sensing and Communication, 3GPP TS22.137.
- [9] 5G-A通感一体测评方法白皮书(2025年), 中移智库, 2025.

8. 附录

8.1. RCS 实测结果

- 无人机 RCS 实测结果

RCS 的传统概念源于雷达探测领域,是对雷达探测物体回波能量的度量。与传统的 RCS 概念相比,在无线通感一体化场景中,RCS 概念被扩展到更普遍的含义。无线感知中 RCS 表示目标物体散射损耗对无线信道的影响,它与入射角、出射角、极化和频带等因素有关。因此,我们可以借助无线通信中天线方向图的概念来描述感知目标的 RCS。

在对感知目标 RCS 建模之前,可以参考对于商用无人机和车辆的散射特性的实际测量。商用无人机尺寸约为 350*285*110 毫米,将无人机放置在暗室内的旋转器中心,通过旋转无人机来测量不同角度的回波功率。角度步长为 5 度,测量频率为 4.9GHz。发射机和接收机中测量天线的极化均为垂直极化。从图 8-1 所示的测量结果中提取出无人机的 RCS 值。可以观察到,无人机的 RCS 值类似于全向散射特性,并且随入射角和散射角变化微弱。因此对于小尺寸无人机(0.3*0.4*0.2 m)可以建模为单个散射点,具体参数可以参考表 8-1,RCS 表示为 $A*B1*B2$

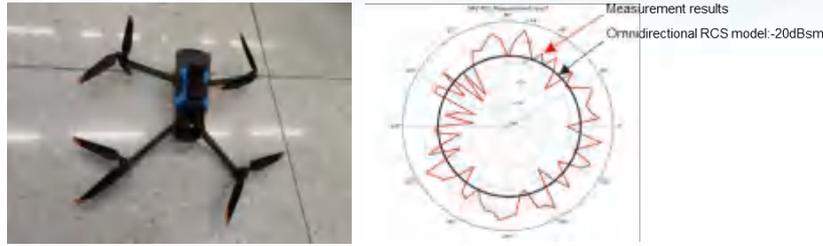


图 8-1 UAV 场景的 RCS 测量示意

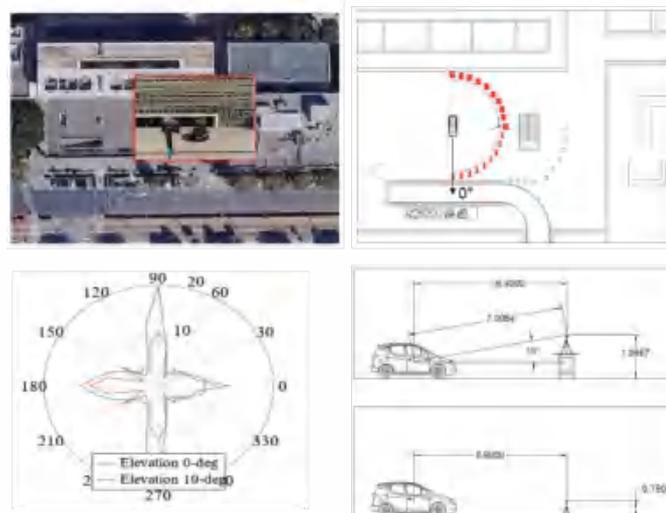
表 8-1 无人机自发自收单点建模下的 RCS

RCS	小尺寸无人机 (0.3m x 0.4m x 0.2m)
A	均值。例如-20dBsm
B1	0dB
B2	方差。例如 4dB.

● 车辆 RCS 实测结果

我们利用频域矢量网络分析仪在 12 GHz 下对车辆进行了自发自收以及双基的回波探测。如图 2 所示，在室外环境中，对一辆真实尺寸的汽车进行了不同方位角和仰角的测量，被测车辆尺寸为 3.99 x 1.73 x 1.45 m 的 2018 款黑色 Nissan Micra。方位角 0° 代表汽车前方，仰角 0° 代表天线指向水平方向，仰角 10° 代表天线下倾 10 度。根据汽车的左右对称性，我们在半圆内测量了汽车 RCS。对于自发自收测量，测量范围为 0° 至 180°，共设置 19 个收发机位置。对于双静态 (bi-static) 测量，Tx 和 Rx 都从 0° 移动到 180°，共测量 19 x 19 个位置。测量的详细配置如图 8-2 所示。

结果表明，车辆 RCS 值随入射角和散射角的变化而变化。左侧面和右侧面提供主要动力，前后表面提供辅助动力。换句话说，左右侧面和前后侧面具有不同的散射特性。



(a) 自发自收测量



(b) 双基测量

图 8-2 车辆场景的 RCS 测量示意

根据以上的测量结果，车辆可以建模为 5 个散射点，对于典型尺寸为 5m x 2m x 1.6m (L*W*H) 的车辆建模为 5 个散射点，分别为前，后，左，右和顶部如图 8-3 所示

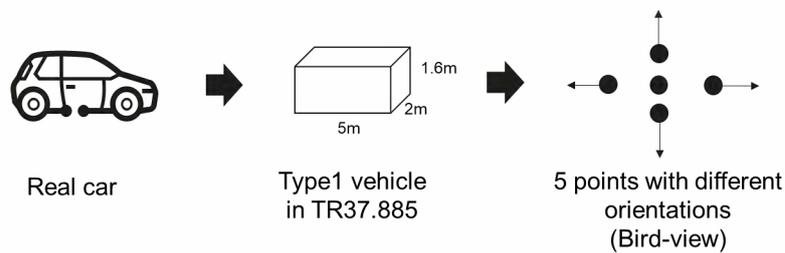


图 8-3 根据四面将车辆划分为多个点

进一步，可以拟合每个散射点的测量结果。根据对称性，左右散射点具有相同的散射图案。利用多项式方法对数据进行拟合，并采用最小化 RMSE 指标来判断拟合精度。拟合结果如下：

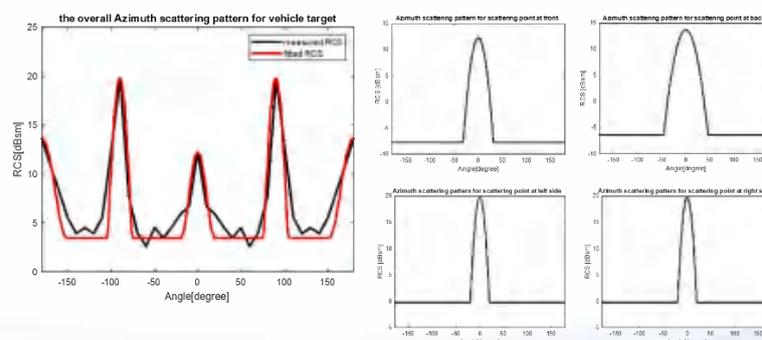


图 8-4 车辆目标的多散射点 RCS

具体公式参考下表：

表 8-2 不同散射点 RCS 计算模型

参数	取值																																										
垂直面下每个散射点的散射功率 (dB)	$\sigma''_{dB}(\theta'', \varphi'' = 0^\circ) = -\min\left\{12\left(\frac{\theta'' - \theta_0}{\theta_{3dB,n}}\right)^2, \sigma_{max}\right\}$, where $\sigma_{max} = 21\text{dB}$ and $\theta'' \in [0^\circ, 180^\circ]$																																										
水平面下每个散射点的散射功率 (dB)	$\sigma''_{dB}(\theta'' = 90^\circ, \varphi'') = -\min\left\{12\left(\frac{\varphi'' - \varphi_n}{\varphi_{3dB,n}}\right)^2, \sigma_{max}\right\}$, where $\sigma_{max} = 21\text{dB}$ and $\varphi'' - \varphi_n \in [-180^\circ, 180^\circ]$																																										
每个散射点的 3D 散射功率 (dB)	$\sigma''_{dB}(\theta'', \varphi'') = \sigma_n * \cos\frac{\beta}{2} - \min\left\{-\left(\sigma''_{dB}(\theta'', \varphi'' = 0^\circ) + \sigma''_{dB}(\theta'' = 90^\circ, \varphi'')\right), \sigma_{max}\right\}$ $\beta = \text{scattering angle} - \text{incident angle}$																																										
每个散射点的参数	<table border="1"> <thead> <tr> <th>Scattering points for vehicle</th> <th>n</th> <th>φ_n</th> <th>$\varphi_{3dB,n}$</th> <th>θ_0</th> <th>$\theta_{3dB,n}$</th> <th>σ_n [dB]</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Front</td> <td>1</td> <td>0°</td> <td>24.4°</td> <td>90°</td> <td>28.1°</td> <td>11.42</td> </tr> <tr> <td>Left</td> <td>2</td> <td>90°</td> <td>15.6°</td> <td>90°</td> <td>16°</td> <td>19.65</td> </tr> <tr> <td>Back</td> <td>3</td> <td>180°</td> <td>35.7°</td> <td>90°</td> <td>45.6°</td> <td>13.09</td> </tr> <tr> <td>Right</td> <td>4</td> <td>-90°</td> <td>15.6°</td> <td>90°</td> <td>16°</td> <td>19.65</td> </tr> <tr> <td>top</td> <td>5</td> <td>/</td> <td>/</td> <td>0°</td> <td>11.5°</td> <td>21.88</td> </tr> </tbody> </table>	Scattering points for vehicle	n	φ_n	$\varphi_{3dB,n}$	θ_0	$\theta_{3dB,n}$	σ_n [dB]	Front	1	0°	24.4°	90°	28.1°	11.42	Left	2	90°	15.6°	90°	16°	19.65	Back	3	180°	35.7°	90°	45.6°	13.09	Right	4	-90°	15.6°	90°	16°	19.65	top	5	/	/	0°	11.5°	21.88
Scattering points for vehicle	n	φ_n	$\varphi_{3dB,n}$	θ_0	$\theta_{3dB,n}$	σ_n [dB]																																					
Front	1	0°	24.4°	90°	28.1°	11.42																																					
Left	2	90°	15.6°	90°	16°	19.65																																					
Back	3	180°	35.7°	90°	45.6°	13.09																																					
Right	4	-90°	15.6°	90°	16°	19.65																																					
top	5	/	/	0°	11.5°	21.88																																					
说明:	<p>θ'' 分别表示每个散射点的入射角和散射角（俯仰）。</p> <p>φ'' 分别表示每个散射点的入射角和散射角（水平）。</p> <p>σ_n 表示散射点的最大功率。</p> <p>对于双基链路, (θ'', φ'') 表示双击链路角平分线对应的角度。</p>																																										

由于入射角和散射角都会影响 RCS 的功率方向图，因此双基 RCS 图案比自发自收 RCS 图案复杂。基于汽车金属表面的镜面反射理论，双基模式的 RCS 可以从自发自收感知模式的 RCS 推导出来。在此假设下，我们通过测量数据集进一步研究了从单站 RCS 到双站 RCS 的等效变换的有效性，如公式所示，从而可以方便地使用统一的模式建模自发自收和双基 RCS 功率方向图。

$$RCS_{Bi}(\theta_{incident}, \theta_{scattered}) \approx RCS_{Mono}(\theta_{bisector})$$

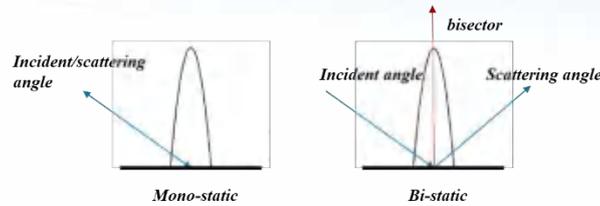


图 8-5 双基平分示意图

- 人的 RCS 实测结果

人体由头部、手臂、躯干和双腿等多个不同的组织组成，不同部位对电磁波的反射能力存在差异。当不关心人不同部位反射电磁波的能力特征，仅关心人整体反射电磁波的能量时，可以将多散射中心模型退化为单散射中心模型，将人整体建模成单个散射点。其中单散射中心模型的 RCS 可以根据多散射中心模型的 RCS 计算获得。



图 8-6 暗室人体 RCS 测量环境

当把人建模成单个散射点时，在暗室环境中，分别在 4.9GHz, 10GHz, 20GHz, 28GHz 和 36GHz 下采用自发自收感知模式，对不同角度时人体的回波进行了探测，以测量 Human 目标的 RCS。其中测试采用的天线模型为定向天线，天线高度为 2m，收发端到人体的距离为 12m，人位于中心的转台上，以 5°为间隔旋转转台以测量不同角度下目标的 RCS。具体的测量结果如图 8-7 所示。

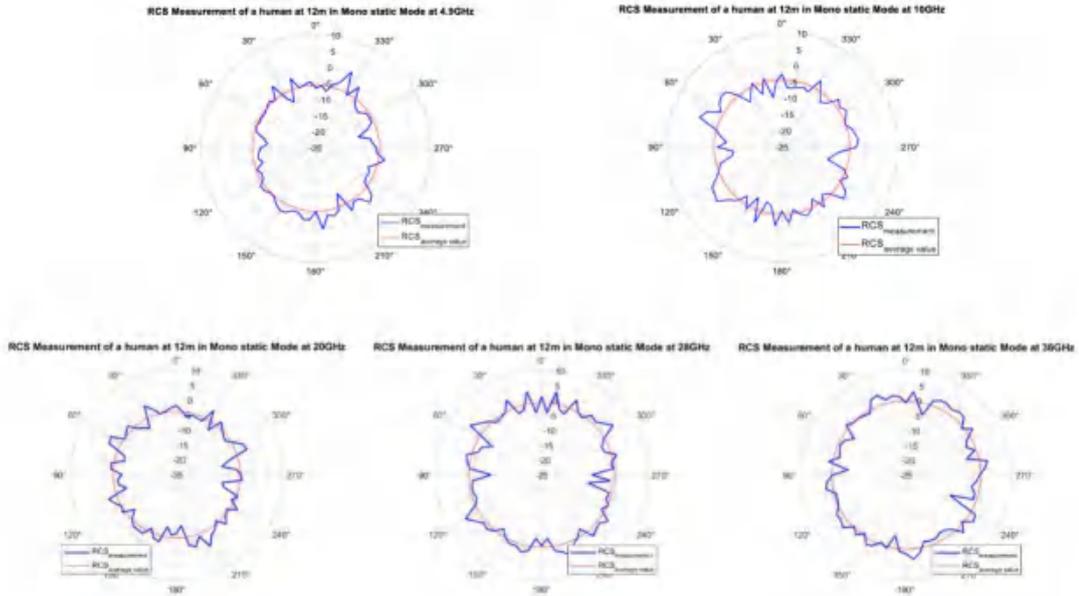


图 8-7 不同频点下的人体单点 RCS 测量

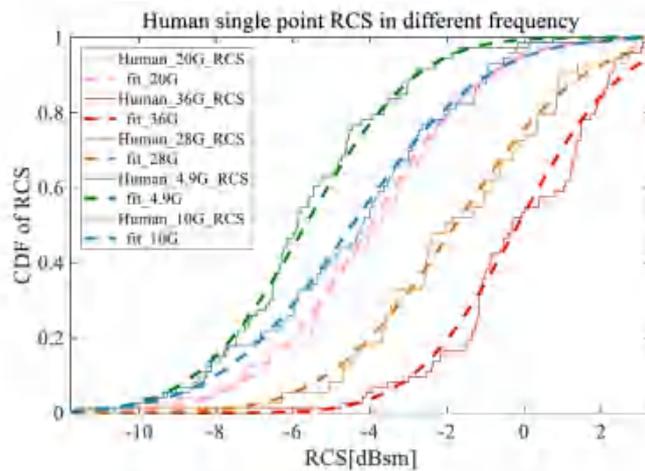


图 8-8 不同频点下的人体单点 RCS 分布

从测量结果可以观察到，人体的 RCS 值围绕平均值有一定的随机变化，且随入射角和散射角变化微弱。因此人体的 RCS 可以用一个有均值和标准差的对数正态分布来建模。通过分析不同频率下 Human 目标 RCS 对应的对数正态分布参数，可以观察到其平均值随载波频率的变化几乎是线性的，而标准差则是随机的。表 8-3 中同时也基于以上结果，拟合出了五个频点上单点人体 RCS 的均值和标准差。

表 8-3 人体单点 RCS 的测量拟合数据

Frequency	Mean	Standard deviation
4.9GHz	-5.6785	2.2575
10GHz	-4.4679	2.7437
20GHz	-3.9933	2.4178

28GHz	-1.7976	2.6104
36GHz	-0.1655	2.1442

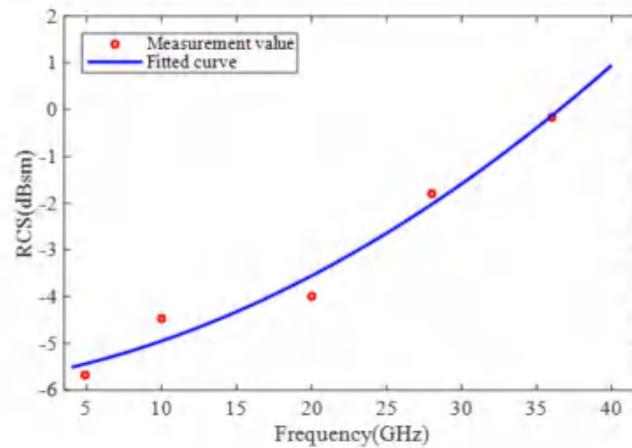


图 8-9 不同频点下的人体单点 RCS 拟合曲线

因此，进一步的，人体单点 RCS 可以采用对数正态分布建模，其均值可以建模成频率相关的函数，拟合结果如图 8-9 所示，数学模型为： $\mu_{\text{human}} = 0.0029f^2 + 0.0538f - 5.7748$ ，标准偏差可以采用测量结果的平均值， $\sigma_{\text{human}} = 2.44$ 。

8.2. 环境物体外场实测结果

首先，在图 8-10 左侧所示的室内进行的测量是为了研究自发自收感知的信道上 type-2 EO 产生的效应。特定材料的板（例如，干墙、金属、石膏板、木材、瓷砖等）位于室的中心，为了确保所有的波束功率都能作用在板上，板的尺寸大于板上波束能覆盖的面积。Tx 和 Rx 一起安装在一个与板的质心高度相同的小车上，Tx 沿圆形轨道运动。场景中典型的材料包括金属、木材、瓷砖等代表了真实场景中各种材料的粗糙组。TRx 与材料之间的距离为 4.31m。

自发自收检测的测量结果如图 8-10 右图所示，其中横轴表示入射角或散射角，例如，零度入射角表示垂直入射。纵轴表示材料的 RCS 值。根据结果，可以观察到金属具有最强的反射，并且接收功率随着入射角的增大（大于 20 度）而显著下降（50dB）。这是因为金属的光滑表面会导致镜面反射。同样的现象也在木材，干墙，石膏板材料中出现。对于表面粗糙度高的瓦片，可以接收到背向的散射信号，例如，在 20 度入射角下，一号瓦片的 RCS 比金属的 RCS 高 20dB。对于入射/散射角大于 20 度的接收功率，其主要来自散射。进一步

可以发现，反射和散射是真实场景信道传播特性的重要影响因素，反射在传播信道中占主导地位。

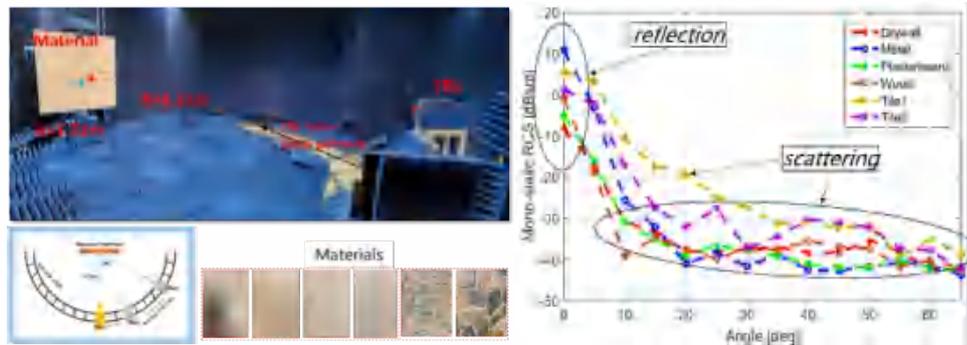


图 8-10 暗室 type-2 EO 测量

其次，我们在典型的 UMi 场景中开展了另一个测量活动，以此研究双基感知功率方向图下传播信道中的 type-2 环境的功率贡献。图 8-11 展示了测量活动中 15 米高度的 Tx 视角，我们在 LOS 情况下测量了 16 个沿道路的不同 1.5m Rx 的位置。进一步，我们进行了聚簇并获取其功率，同时计算了墙壁反射和其他反射之间的间接路径功率比，平均比值为 15dB，这说明在间接路径中，墙壁面反射贡献了主要功率。

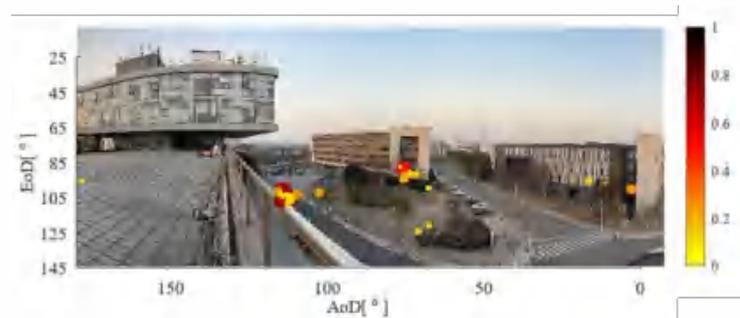


图 8-11 UMi 双基感知测量

8.3. 干扰建模

在不同的感知模式下，受到的干扰源不同。下面分感知模式介绍干扰类型和建模方法。

表 8-4 不同感知模式下干扰类型及建模方法

感知模式	干扰类型	干扰定义及信道模型假设
所有模式	小区内其它目标干扰	<ul style="list-style-type: none"> 定义：同一个小区内，其它感知目标的回波信号对当前感知目标产生的干扰。 信道模型假设：采用第2章节信道模型。

	小区内环境物体干扰	<ul style="list-style-type: none"> · 同一个小区内，环境物体对当前感知目标产生的干扰。 · 信道模型假设：采用第2章节信道模型。
TRP-TRP、TRP-UE双基地感知模式	其它基站干扰	<ul style="list-style-type: none"> · 定义：其它小区的基站发射的信号对当前感知目标所产生的干扰。 · 信道模型假设：基站-UE信道模型参考TR 38.901，基站-基站信道模型TR 38.858。
UE-TRP、UE-UE双基地感知模式	小区间其它UE干扰	<ul style="list-style-type: none"> · 定义：其它小区的UE发射上行信号时对目标小区中的感知目标产生的干扰。 · 信道模型假设：基站-UE信道模型参考TR 38.901，基站-基站信道模型参考TR 38.858。
TRP-TRP、UE-UE单基地感知模式	全双工自干扰	<ul style="list-style-type: none"> · 定义：感知发送端和接收端位于同一个站点（BS或UE），并且工作在全双工模式（同时、同频收发）时，感知发送端的信号对感知接收端产生的干扰。 · 信道模型假设：基站-基站自干扰信道模型可参考TR38.858。

除了以上的建模方法，还有一种可选的方法：

仿真中具体干扰建模方式的选择需要综合考虑评估准确性和仿真平台运行效率。若按照真实场景对全部干扰设备与感知接收设备之间的信道进行完整建模，以及进行信号发送和接收，带来的运算量十分巨大，导致系统仿真运行效率降低，因此还可以考虑简化的建模方式，候选的干扰建模方式包括：

- 从全部的信号收发链路中选取 N 个链路进行干扰信道建模，以及执行信号发送和接收流程：可以是根据干扰设备与感知接收设备之间的大尺度衰落计算结果，对受到大尺度衰落影响的信号接收功率进行排序，选择接收功率较大的 N 个链路，或从全部的信号收发链路中随机选取 N 个链路进行干扰信道建模；其余链路仅考虑大尺度衰落对目标小区或 UE 信号发送功率的衰减，即将干扰建模白噪声，或不对其余链路的干扰进行建模。
- 对全部的信号收发链路进行干扰信道建模，以及执行信号发送和接收流程。
- 不对来自其他设备的干扰进行建模，此时其他设备发送的信号与目标小区或 UE 发送

的信号资源正交，不存在干扰。

8.4. 链路预算

感知链路预算与通信链路预算相似，只是额外增加了回波信号的路损计算以及感知信号处理增益。感知链路预算模板如表 5 所示。

表 8-5 链路预算表格

系统配置	
(1) 载波频率(GHz)	
(2) 感知发送端到感知目标的距离 (m)	
(2a) 感知发送端到感知目标的路径损耗 (UMa LOS pathloss equation in TR38.901) = $28 + 22 \log((2)) + 20 \log((1))$ dB	
(3)感知目标到感知接收端的距离 (m)	
(3a)感知目标到感知接收端的距离(UMa LOS pathloss equation in TR38.901) = $28 + 22 \log((3)) + 20 \log((1))$ dB	
(4)与路径损耗模型相关的附加系数 = $10 \log((4 * \pi) / (0.3 / (1)) ^ 2)$ dB	
发射端	
(5) 总传输功率(dBm)	
(6) 总天线增益(dB)	
(7) 下行系统带宽或上行占用带宽(Hz)	
(7a) 资源块个数	
(7b) Comb 数	
(8) 相干时间内的符号数	
(9) 子载波间隔(Hz)	
感知目标	
(10) 雷达散射截面(dBsm)	
接收端	
(11) 总天线增益(dB)	
(12) 接收机噪声系数 (dB)	
(13) 热噪声密度(dBm/Hz)	
(14) 总噪声= (13) + $10 \log((7))$ (dBm)	
(15) 感知处理增益(dB)= $10 \log((7a) * 12 / (7b)) + 10$	

log(8)	
检测到的感知目标的 SNR 计算	
(16) SNR = (5) + (6) - (2a) - (3a) + (4) + (10) + (11) -(12) - (14) + (15)	

8.5. 术语和定义

术语	定义
感知	基站或终端，通过发送和/或接收无线信号，获取信号强度、时间差、相位差、多普勒频移等信息，经计算处理后输出目标的距离、角度、速度、尺寸、形状等信息。
感知目标	需要被感知的特定物体。
感知功能	无线网络使能感知能力所需要实现的功能，可包括基站感知功能，核心网感知功能。核心网感知功能主要由感知网元 SF 实现，包括感知控制功能和感知计算功能。
感知设备	发送感知信号和/或接收感知信号并做相应信号处理的设备，包括基站和终端设备。
感知测量数据	感知设备接收感知信号并做相应信号处理所得到的数据。
感知结果	基于感知测量数据和感知应用信息进一步处理得到的数据。

8.6. 缩略词表

英文缩写	英文全称	中文释义
3GPP	3 rd Generation Partnership Project	第三代合作伙伴计划
5GC	5G Core Network	5G 核心网
ADAS	Advanced Driving Assistance System	高级驾驶辅助系统
BS	Base Station	基站
CCSA	China Communication Standards Association	中国通信标准化协会
CDM	Code Division Multiplexing	码分复用
CDRX	Connected Discontinuous reception	连接态下非连续接收
CP ¹	Control Plane	控制面
CP ²	Cyclic Prefix	循环前缀

CPI	Coherent Processing Interval	相干处理时间
CSI	Channel State Information	信道状态信息
CSI-RS	Channel State Information-Reference Signal	信道状态信息参考信号
CU	Centralized Unit	集中单元
DCI	Downlink Control Information	下行链路控制信息
DDM	Doppler Division Multiplexing	多普勒频分复用
DFT	Discrete Fourier Transform	离散傅里叶变换
DMRS	Demodulation Reference Signal	解调参考信号
DU	Distributed Unit	分布单元
ECP	Extended Cyclic Prefix	扩展循环前缀
EPRE	Energy per Resource Element	每资源单元发送能量
ESPRIT	Estimating Signal Parameters Variational Invariance Techniques	旋转不变性子空间技术
FDM	Frequency Division Multiplexing	频分复用
FFT	Fast Fourier Transformation	快速傅里叶变换
GPS	Global Positioning System	全球定位系统
IFFT	Inverse Fast Fourier Transformation	逆快速傅里叶变换
ISAC	Integrated sensing and communication	通感一体化
LFM	Linear Frequency Modulation	线性调频
LMF	Location Management Function	定位管理功能
LOS	Line of Sight	视距
LS	Least Square	最小二乘估计
LTE	Long Term Evolution	长期演进
MAC	Media access control	媒体接入控制层
MAP	Maximum A Posterior	最大后验概率估计
MIMO	Multiple-Input Multiple-Output	多输入多输出
ML	Max Likelihood	最大似然估计
MMSE	Minimum Mean Square Error	最小均方误差估计
MUSIC	Multiple Signal Classification	多重信号分类算法
NCP	Normal Cyclic Prefix	常规循环前缀
OFDM	Orthogonal Frequency Division Multiplexing	正交频分复用
OTFS	Orthogonal Time Frequency Space	正交时频空间
PCB	Printed Circuit Board	印刷电路板
PDCCH	Physical Downlink Control Channel	物理下行控制信道
PDSCH	Physical Downlink Shared Channel	物理下行共享信道
PMI	Purchasing Managers' Index	采购经理指数
PRS	Positioning Reference Signal	定位参考信号
RAN	Radio Access Networks	接入网
RE	Resource Element	资源单元
RIS	Reconfigurable Intelligent Surface	智能超表面
RRC	Radio Resource Control	无线资源控制

RS	Reference Signal	参考信号
RSRP	Reference Signal Receiving Power	参考信号接收功率
RSRQ	Reference Signal Received Quality,	参考信号接收质量
RSSI	Reference Signal Strength Indicator	参考信号强度指示
RTT	Round-Trip Time	往返时间
SA	Services & Systems Aspects	服务和系统方面
SF	Sensing Function	感知网元
SNR	Signal Noise Ratio	信噪比
SRS	Sounding Reference Signal	探测参考信号
SSB	Synchronization Signal/PBCH Block	同步信号块
TC	Technical Committee	技术委员会
TDM	Time Division Multiplexing	时分复用
TRP	Transmission Reference Point	参数参考点
UAV	Unmanned Aerial Vehicle	无人机
UP	User Plane	用户平面
V2X	Vehicle to Everything	车联网
WG	Working Group	工作组

9. 贡献单位

序号	单位名称
1	华为技术有限公司
2	维沃移动通信有限公司
3	中国信息通信研究院
4	中兴通讯股份有限公司
5	中信科移动通信技术股份有限公司
6	北京小米移动软件有限公司
7	中国移动通信有限公司
8	中国联合网络通信集团有限公司
9	中国电信股份有限公司

IMT-2020（5G）推进组

地址：北京市海淀区花园北路 52 号 中国信息通信研究院

邮编：100191

邮箱：imt2020@caict.ac.cn

网址：<https://www.imt2020.org.cn/>