

面向3GPP ISAC标准化的低空无人机场景路径损耗测量与建模

莫清媚¹, 张宇翔¹, 刘亚萌¹, 陈文俊¹, 姜涛², 王启星², 张建华¹

(1. 北京邮电大学网络与交换技术全国重点实验室, 北京 100876; 2. 中国移动通信有限公司研究院, 北京 100053)

摘要: 随着低空经济的发展及无人机 (UAV, unmanned aerial vehicle) 的广泛应用, UAV 飞行的监管挑战显著增大, 通信感知一体化 (ISAC, integrated sensing and communication) 技术有望解决上述难题, 因此第三代合作伙伴计划 (3GPP, 3rd Generation Partnership Project) 将低空无人机确定为 ISAC 技术的重要应用场景之一。然而, UAV 速度快、尺寸小及飞行高度高的特点会影响感知信号的接收强度与质量, 因此亟须研究 UAV 感知信道的路径损耗特性与建模方法。针对 15 GHz 和 28 GHz 频段下的 UAV 单站感知信道进行测量, 研究了感知水平距离、垂直高度差和目标雷达散射截面 (RCS, radar cross section) 对路径损耗的影响, 发现了 UAV 目标信道和背景信道的低耦合特性, 建立了 UAV 感知目标信道路径损耗与距离模型, 支撑了 3GPP 标准化研究。

关键词: 无人机; 通信感知一体化; 路径损耗; 3GPP 标准化

中图分类号: TN929.5

文献标志码: A

doi: 10.11959/j.issn.2096-3750.2024.00426

Path loss measurement and modeling for low-altitude UAV scenarios towards 3GPP ISAC standadization

MO Qingmei¹, ZHANG Yuxiang¹, LIU Yameng¹, CHEN Wenjun¹, JIANG Tao²,
WANG Qixing², ZHANG Jianhua¹

1. State Key Laboratory of Networking and Switching Technology, Beijing University of Posts and Telecommunications,
Beijing 100876, China

2. China Mobile Research Institute, Beijing 100053, China

Abstract: With the advancement of the low-altitude economy and the widespread application of unmanned aerial vehicle (UAV), regulatory challenges for UAV flights have significantly increased. Integrated sensing and communication (ISAC) technology is expected to solve the above problems. For this reason, the 3rd Generation Partnership Project (3GPP) had identified low-altitude UAV as one of the important application scenarios of ISAC technology. However, the fast flight speed, small size and high altitude of UAV could adversely affect the strength and quality of the received sensing signals. Consequently, there was an urgent need to investigate the path loss characteristics of the UAV sensing channel and develop effective model. Mono-static sensing channel measurements for UAV at frequencies of 15 GHz and 28 GHz were conducted. The impact of horizontal distance, vertical altitude differences, and the radar cross section (RCS) of the target on path loss were examined. The findings revealed low-coupling characteristics between the target and background channels. Subsequently, the path loss and distance model for the UAV sensing target channel was established, contributing to the ongoing progress of 3GPP standardization.

Key words: unmanned aerial vehicle, integrated sensing and communication, path loss, 3GPP standadization

收稿日期: 2024-08-30; 修回日期: 2024-09-15

通信作者: 张建华, jhzhang@bupt.edu.cn

基金项目: 国家自然科学基金项目 (No. 62341128, No. 62201087, No. 62401084, No. 92167202); 国家杰出青年科学基金项目 (No. 61925102); 北京市自然科学基金项目 (No. L243002)

Foundation Items: The National Natural Science Foundation of China (No. 62341128, No. 62201087, No. 62401084, No. 92167202), The National Science Foundation for Distinguished Young Scholars (No. 61925102), The Beijing Natural Science Foundation (No. L243002)

0 引言

近年来，低空经济的快速崛起使其成为推动各国经济发展的重要力量，带来了显著的经济效益，同时也促进了科技创新和产业升级^[1]。低空飞行器，特别是无人机（UAV, unmanned aerial vehicle），在城市物流、灾害应急、农业监测等领域展现出了巨大的应用潜力。但低空经济的发展与规模扩大必将带来飞行风险以及飞行器监管等一系列问题^[2]。其中，在无人机编组飞行应用中，无人机的碰撞问题时有发生。另外，在信息敏感区域应用中，为避免“黑飞”无人机侵入特定区域，对非法无人机进行高精度感知和追踪的需求较高^[3]。然而，现有的多站雷达组网和摄像监控技术虽可满足基本需求，但却因高昂成本和光照限制而面临商业化的挑战，难以完成大范围空域的监管任务，进一步影响了对违规飞行行为的及时管控和飞行任务的安全性。在此背景下，通信感知一体化（ISAC, integrated sensing and communication）技术的兴起，为低空飞行器的有效监管提供了新的解决方案。ISAC技术是ITU-R定义的IMT-2030（6G）六大关键使用场景之一^[4]。与传统雷达感知和卫星定位技术相比，ISAC技术利用原有的通信设施，在移动网络中引入感知能力，在拓展基站应用场景的同时，降低了规模化的成本^[5]。同时，在感知定位目标时，密集部署的多基站与智能体之间的协同感知可以有效降低感知盲区，提高感知范围和感知精度^[6]。

无线信道是移动通信系统中收发端之间的传播媒介，因此ISAC信道的研究对ISAC系统的技术设计与性能评估等具有重要意义^[7]。现有的标准化信道模型主要面向通信信道，如3GPP TR 38.901标准的5G信道模型^[8]和3GPP TR 36.777中的低空场景信道模型^[9]都仅定义了通信信道，无法全面地表征ISAC信道的回波路径损耗（PL, path loss）、目标信道级联和感知目标（ST, sensing target）的雷达散射截面（RCS, radar cross section）新特性^[10]。2023年12

月，第三代合作伙伴计划（3GPP, 3rd Generation Partnership Project）正式启动了ISAC标准化工作，3GPP SA1 TR 22.837^[11]将低空UAV确定为ISAC技术重要的应用场景之一。3GPP TSG RAN1先后召开了#116、#116bis、#117和#118会议，在部署场景和建模方法上初步达成了一些共识。目前3GPP ISAC标准化工作主要聚焦在感知信道的研究上。实际上，不同感知目标尺寸、移动速度及位置等差异均会影响感知信道的感知精度与质量。同时，由于目标所处的场所不同，背景散射体的密度、高度以及材质均有差别。这些都会对感知信道的感知精度和质量产生一定影响，为此需要针对不同感知目标特性及背景环境特点开展不同维度的研究与讨论。

ISAC技术主要的感知目标包括UAV、车辆、人体、自动导向车（AGV, automated guided vehicle），其场景特点详见表1^[8-9,11]。与其他感知目标不同，UAV具有速度快、尺寸小及飞行高度高的特点，这使其在飞行时产生的感知回波信号较弱^[12]，感知信道路径损耗较大。UAV场景感知路径损耗主要受背景散射体对目标回波信号的作用、UAV目标的回波路径损耗和目标辐射信号的能力3个方面的影响^[13]。背景散射体对感知信道的路径损耗影响很大，例如，在室内场景中，以人体为目标，背景墙壁以及行人会遮挡或反射信号，进而影响回波信号的强度^[14]。与其他目标不同，UAV飞行位置普遍高于感知基站位置且具有移动性，因而其回波信号不易受背景中低矮建筑的影响。感知目标辐射信号的能力同样会影响感知信道的路径损耗，这一特性可以通过目标雷达散射截面来刻画，其与目标辐射信号的等效面积相关^[15-16]。在UAV感知目标信道中，由于UAV尺寸较小且飞行轨迹为三维轨迹，可以将UAV的RCS建模为固定值或三维方向图的形式^[17-19]。在地面目标感知场景下，基站与地面目标之间的高度差较小，地面目标的回波路径损耗主要与水平距离相关，与垂直高度相关性相对较弱。而UAV的飞行轨迹包括水平维度和垂直维度，其中

表1 不同目标下感知场景特点

目标类型	目标高度/m	目标速度/(km·h ⁻¹)	目标最大反射面积/m ²	场景类型	室内/室外	感知模式	基站高度/m
UAV	1.5~300	160	0.81×0.67	UMa-AV、UMi-AV、RMa-AV	室外	单站/双站	15~35
车辆	地面	140	4.8×4	UMa、UMi、RMa	室外	单站/双站	15~35
人体	地面	3	0.3×1.7	InH	室内	单站/双站	3
AGV	地面	30	3×1.5	InF	室内	单站/双站	高于室内散射体

飞行高度范围为 0~300 m^[20-21]。因此, UAV 感知目标的水平距离和垂直高度对回波路径损耗特性均有显著影响。

目前受限于 UAV 速度快、回波功率小、飞行高度高以及测量平台不易部署等问题, 现有研究主要集中于对 ISAC 信道建模方法的探讨以及地面目标(包括人体、车辆、AGV)的感知信道测量建模^[14, 22-24]。针对以 UAV 感知信道特性测量不足、对 UAV 感知信道的路径损耗特性认知匮乏导致其路径损耗特性及建模方法尚未得到有效验证。

为研究 UAV 作为感知目标的 ISAC 感知信道建模方法, 本文在露天楼顶架设测量平台, 开展了以 UAV 为目标 15 GHz 和 28 GHz 的角度、水平距离以及垂直高度 3 个维度下的单站感知信道测量, 主要贡献如下。

1) 研究了 UAV 单站感知目标信道和背景信道的多径特性, 发现了 UAV 场景下目标信道和背景信道的低耦合特性。

2) 揭示了距离以及 RCS 的波动对路径损耗的影响, 建立了适用于 UAV 场景的单站感知目标信道路径损耗与距离模型。

3) 探讨了不同高度差下单站路径损耗模型的鲁棒性, 揭示了基站与目标高度差对路径损耗的影响。

1 ISAC 信道模型

1.1 ISAC 信道模型框架

目前在 3GPP ISAC 信道标准化的讨论进程中, 主要聚焦于对感知信道的建模研究, 因此本文中的 ISAC 感知信道特指感知信道。与传统信道不同, ISAC 感知信道需要精确建模一些新的特性, 包括感知目标的回波路径、ST 的 RCS 以及背景信道与目标信道之间的耦合特性等。其中, ISAC 感知信道模型

的通用框架在 3GPP #116 会议上达成了一致。不同目标下的 ISAC 感知信道模型基本框架一致, 然而各目标及对应场景下的特点不同, 因此感知信道的建模方式和模型参数略有不同。如图 1 所示, ISAC 感知信道模型由目标信道和背景信道组成, 表示为^[13]

$$H_{\text{ISAC}} = H_{\text{target}} + H_{\text{background}} \quad (1)$$

其中, $H_{\text{background}}$ 表示感知背景信道, 包括不受感知目标影响的其余多径分量。 H_{target} 表示感知目标信道, 包括受感知目标影响的所有多径分量。其中感知目标信道的多径可分为直射路径(DP, direct path)和非直射路径(IDP, indirect path)。DP 指的是信号直接从发射端(Tx, transmitter)传播到 ST, 再从 ST 传播到接收端(Rx, receiver)的路径, 即 Tx-ST 链路和 ST-Rx 链路均为视距(LoS, line of sight)径。与 DP 不同, IDP 指信号从 Tx 到 ST 或者 ST 到 Rx 的过程中可能经历多次弹跳传播的路径, 即 Tx-ST 链路或 ST-Rx 链路为非视距(NLoS, non-line of sight)径。

1.2 感知目标信道的级联路径损耗模型

感知信道路径损耗由目标信道和背景信道路径损耗组成。其中, PL_{tar} 为目标信道路径损耗, PL_{bg} 为背景信道路径损耗。 O_{ISAC} 为目标对背景信道路径损耗的影响因子, 主要用于对背景信道路径损耗的修正^[14]。当目标信道和背景信道之间没有相互影响或影响很小时, O_{ISAC} 趋近于 1

$$PL_{\text{ISAC}} = PL_{\text{tar}} + PL_{\text{bg}} = \sum_{i=1}^N PL_{\text{tar}}^i + O_{\text{ISAC}} PL_{\text{bg}}^0 \quad (2)$$

针对感知目标信道的路径损耗建模, 需要考虑 Tx-ST 链路和 ST-Rx 链路的路径损耗, 目标 RCS 以及感知模式。根据 Tx 和 Rx 是否在相同位置, 感知模式可以分为单站感知模式和双站感知模式。当 Tx 和 Rx 分布在不同的位置时为双站感知模式, 且 Tx 和 Rx 到目标的距离不相等。反之, 当 Tx 和 Rx

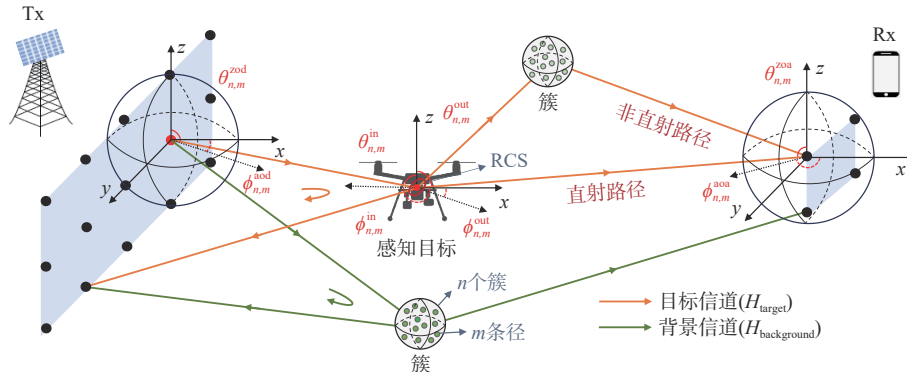


图 1 ISAC 感知信道模型

处于同一位置时为单站感知模式，Tx和Rx到目标的距离相等。单站感知模式可以理解为双站感知模式的一种特殊情况。为了确定感知目标信道在自由空间条件下的路径损耗理论模型，结合雷达方程^[25-26]做出如下推导。

在双站感知模式下，假设Tx处的发射功率为 P_{Tx} ，Tx的天线增益为 G_{Tx} ，Tx与目标之间的距离为 d_1 ，感知目标的RCS为 σ_{RCS} ，则感知目标处接收的功率可以表示为

$$P_{tar} = \frac{P_{Tx} G_{Tx} \sigma_{RCS}}{4\pi d_1^2} \quad (3)$$

然后感知目标将捕获的入射波重新辐射到空中，在Rx处接收回波信号。此时，在Rx处的天线接收到的功率 P_{Rx} 可以表示为

$$P_{Rx} = \frac{P_{tar}}{4\pi d_2^2} A_e \quad (4)$$

其中， $A_e = \frac{\lambda^2 G_{Rx}}{4\pi}$ 表示Rx处天线的有效孔径， d_2 表示目标与Rx之间的距离， G_{Rx} 表示Rx的天线增益， λ 表示波长。当不包括天线增益时，假设天线具有单位增益，即 $G_{Tx}=G_{Rx}=1$ 。为了方便计算，将模型转换为dB值，则感知目标信道的路径损耗可以表示为^[27]

$$PL(d_1, d_2) = 10 \lg \left(\frac{P_{Tx}}{P_{Rx}} \right) = 10 \lg \left(\frac{(4\pi)^3 d_1^2 d_2^2}{\sigma_{RCS} \lambda^2} \right) \quad (5)$$

在感知目标信道的Tx-ST和ST-Rx两段链路中，信号分别经过反射、散射和绕射被ST和Rx接收，与通信信道的传播机制类似。为此，Tx-ST和ST-Rx两段链路的路径损耗可以参考通信信道的路径损耗公式，通信信道的路径损耗公式推导详见文献[28]。因此，信号在Tx-ST和ST-Rx信道的路径损耗 $PL(d_1)$ 和 $PL(d_2)$ 分别表示为

$$PL(d_1) = 10 \lg \left(\frac{(4\pi)^2 d_1^2}{\lambda^2} \right) \quad (6)$$

$$PL(d_2) = 10 \lg \left(\frac{(4\pi)^2 d_2^2}{\lambda^2} \right) \quad (7)$$

将式(6)和式(7)代入式(5)，化简为

$$PL_{bi}(d_1, d_2) = PL(d_1) + PL(d_2) + 10 \lg \left(\frac{\lambda^2}{4\pi} \right) - 10 \lg \sigma_{RCS} \quad (8)$$

其中， PL_{bi} 表示双站感知信道的路径损耗。 $PL(d_1)$ 和 $PL(d_2)$ 分别表示Tx-ST链路和ST-Rx链路的路径损耗。

在单站感知模式下， $d=d_1=d_2$ ，因此路径损耗模型可以进一步简化。简化后的单站感知信道的路

径损耗模型表示为

$$PL_{mono}(d) = 2PL(d) + 10 \lg \left(\frac{\lambda^2}{4\pi} \right) - 10 \lg \sigma_{RCS} \quad (9)$$

其中， PL_{mono} 为单站感知信道的路径损耗， PL 为Tx和Rx与ST之间的路径损耗， d 为目标到Tx和Rx的距离，单位为m。

1.3 感知目标信道的CI路径损耗模型

在通信信道中，路径损耗通常使用自由空间参考距离路径损耗模型（CI, close-in free space reference distance path loss model）^[29-31]

$$FSPL(f_c, d_0) = 20 \lg \left(\frac{4\pi f_c d_0}{c} \right) \quad (10)$$

$$PL_{ci}(d) = FSPL(f_c, d_0) + 10n \lg \left(\frac{d}{d_0} \right) + X_\sigma^{ci} \quad (11)$$

其中， f_c 为中心频点，单位为GHz。 c 表示光速，大小为 3×10^8 m/s。 n 为路径损耗因子，反映了路径损耗与距离的依赖性， X_σ^{ci} 为信道的阴影衰落，服从标准差为 σ 的零均值正态分布。 $FSPL(f_c, d_0)$ 为CI路径损耗模型的截距，其代表了中心频点为 f_c 的信号在自由空间下传播 d_0 距离下的路径损耗。

结合简化后的单站感知信道的路径损耗模型见式(9)，采用CI模型拟合Tx-ST链路和ST-Rx链路的路径损耗模型 $PL(d)$ 。将式(10)和式(11)代入式(9)得到目标信道单站CI路径损耗模型

$$PL_{mono}(d) = 40 \lg \left(\frac{4\pi f_c d_0}{c} \right) + 20n \lg \left(\frac{d}{d_0} \right) + 10 \lg \left(\frac{\lambda^2}{4\pi} \right) - 10 \lg \sigma_{RCS} + X_\sigma^{ci} \quad (12)$$

其中， X_σ^{ci} 是服从标准差为 σ 的零均值正态分布，反映的是实测路径损耗数据与路径损耗模型的标准差。在目标信道中，阴影衰落和目标RCS的波动均会导致路径损耗的波动。因此，在目标信道的路径损耗模型中， X_σ^{ci} 由通信链路中的阴影衰落现象与目标RCS的波动现象共同导致。

2 测量场景和配置

为研究UAV作为感知目标的ISAC感知信道建模方法，在28 GHz和15 GHz频段下开展了单站感知模式的信道测量工作。测量过程中，Tx和Rx被安置于高度为17.14 m的楼顶且处于同一位置，UAV悬停在Tx和Rx附近，模拟单站条件下UAV感知场景。与地面目标感知测量场景不同，由于基站和目标高度较高，因此测量场景周围较为干净，仅仅在

距离Tx和Rx约40 m处有与其高度相近的建筑物。

本次测量平台主要由矢量网络分析仪、低噪声放大器、功率放大器和一对定向天线构成。采用扫频测量法，通过矢量网络分析仪在不同频点上对信号进行扫频得到相应的频率响应。UAV采用了大疆M350型号，展开后的尺寸为0.81 m×0.67 m×0.43 m。此外，为模拟无人机送餐情况，在其正下方挂载了一个尺寸为0.3 m×0.2 m×0.15 m的纸箱，使测量结果更加贴合真实场景。更多测量配置细节详见表2和图2。

在方案1中，测量感知信道在不同角度的多径特性。如图3(a)所示，Tx和Rx位于同一楼顶，UAV依次悬停于3个不同位置，分别位于Tx和Rx的上方、同高度及下方，对应的天线垂直角度为-15°、0°和15°，UAV与Tx和Rx 3个不同位置的距离分别为7.55 m、8.95 m和8.7 m。在每个悬停位置，Tx和Rx天线的水平角从0°旋转至180°，步进

为5°，以全面采集0°至180°范围内的感知信道特性数据。最后，为了对上述测量开展相应的对照试验，依次改变Tx和Rx的俯仰角，在无UAV情况下，采集0°至180°范围内背景信道的多径特性，以便于后续数据分析能进一步对比区分背景信道和目标信道。

在方案2中，测量感知信道路径损耗特性与距离的关系。其中，UAV悬停测量点位沿水平方向分布，与Tx和Rx处于同一高度。如图3(b)所示，起始位置距离为6 m。在6 m至16 m范围内，每隔1 m采集一次信道特性数据。

方案3则集中于垂直方向，测量感知目标信道在不同高度下的路径损耗特性。如图3(c)所示，UAV与Tx和Rx的水平距离保持为6 m。在垂直方向上每隔1 m采集一次信道特性数据。在整个信道特性数据采集过程中，UAV一直保持悬停状态，Tx和Rx始终对准UAV进行测量。

表2 测量配置

方案	频率/GHz	感知模式	带宽/GHz	Tx/Rx 天线类型	天线高度/m	UAV 的位置
方案1	28					H/E/L
方案2	15、28	单站	3	喇叭/喇叭天线	17.14	水平方向6:1:16 m
方案3	28					垂直方向-5:1:5 m

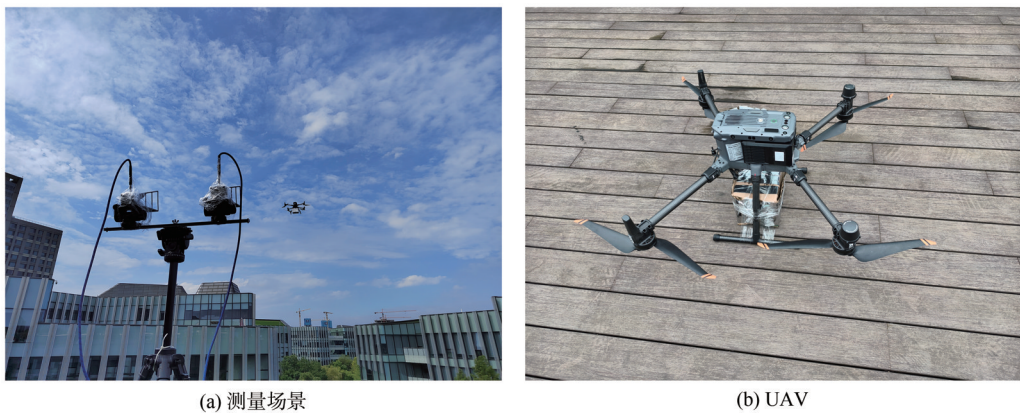


图2 单站感知信道测量场景与UAV

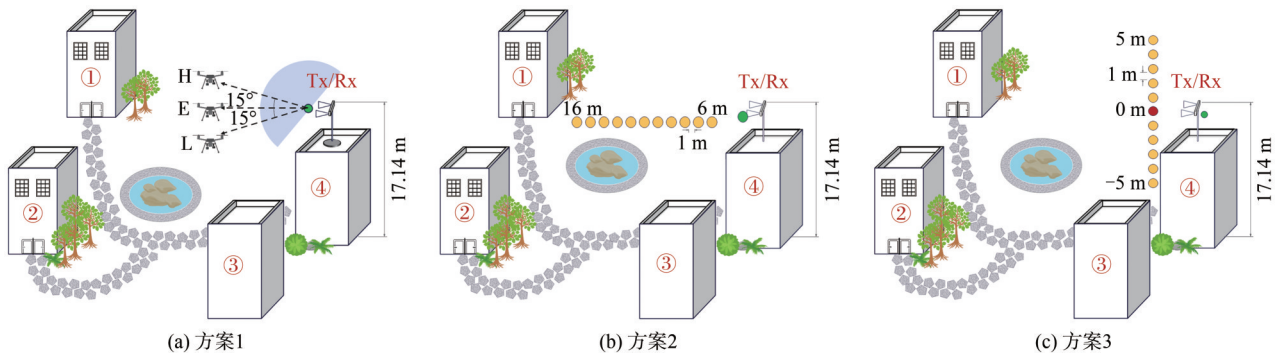


图3 UAV单站感知信道测量布局

3 测量结果分析

3.1 感知目标信道的多径特性

本节将结合测量方案1的实测数据结果，对无人机感知信道的多径特性进行分析。对比分析有无UAV情况下的感知信道特性，探讨目标信道与背景信道之间的关系，讨论目标信道中DP和IDP的实际分布情况。

图4为有无UAV情况下0°至180°范围内感知信道的功率角度时延谱（PADP, power angle delay profile）。其中，图4(a)和图4(b)展示了UAV平行于Tx和Rx情况下的回波信号分布，为了更加直观地观测到回波信号的具体方位，进一步将回波信号的多径时延 τ 转换成距离 d ，即背景散射体或目标与Tx和Rx的距离

$$d = \frac{c\tau}{2} \quad (13)$$

通过对比有无UAV情况下的PADP可以划分背景信道和目标信道的多径。如图4(b)所示，结合回

波信号的距离和角度信息可以推断，多径1、2和3分别对应于背景环境中距离为20~30 m，角度为100°、50°和15°的大型散射体（即1、2、3号楼）的回波信号。这些多径属于背景信道。排除背景信道的多径1、2和3，可分辨目标信道的多径。

如图4(a)所示，首先已知目标UAV悬停距离为8.95 m和悬停角度为90°，其距离和角度与PADP中的多径4相对应。该多径在Tx-ST链路和ST-Rx链路中均为LoS径，没有受到其他散射体影响，是目标信道的DP。与此同时天线的半波束宽度为10.31°，因此在85°~95°范围内均能观测到目标信道的DP回波。由于IDP是Tx-ST链路或ST-Rx链路经过多次反射或散射形成的，因此IDP的时延和角度与DP不同。然而，排除掉背景信道和DP后，在其他方位上并未观测到额外的多径，即目标和背景环境相互影响产生的IDP不明显。这表明在UAV平行于Tx和Rx情况下，目标信道与背景信道的相互影响较小。

图4(d)和图4(f)为无UAV情况下的PADP，Tx

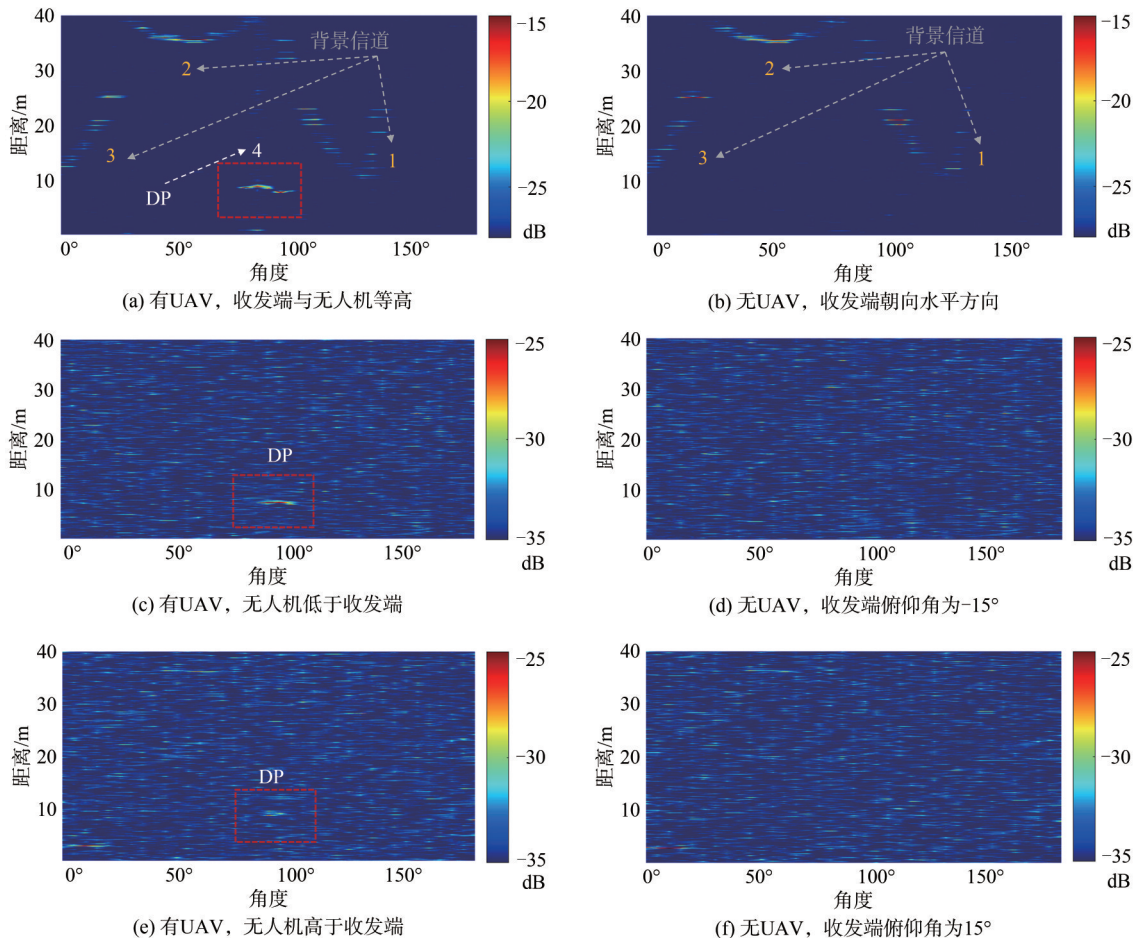


图4 有无UAV情况下感知信道的PADP

和 Rx 分别朝向天空和地面，俯仰角为 -15° 和 15° 。如图 4(d)所示，当天线朝向天空时，背景相对空旷，基本观测不到散射体的回波信号。如图 4(f)所示，当天线朝向地面时，由于角度以及地面材质的原因，地面的回波信号较弱，背景信道的多径不明显。图 4(c)和图 4(e)分别为 UAV 低于和高于 Tx 和 Rx 的 PADP。目标信道中能看到较为明显的 DP，但是在其他方位并没有看到明显的 IDP。同时，由于天线的俯仰角分别为 15° 和 -15° ，随着天线俯仰角的改变，辐射目标的入射波的垂入射角与出射角相应也会发生改变，进而影响 UAV 的目标 RCS。因此，UAV 的回波信号功率较小。总的来说，通过对比有无 UAV 情况下的 PADP，可以看出在 UAV 场景下，IDP 并不明显，这主要是因为 UAV 目标较小，所捕获的入射波能量有限，并且其重新辐射到空中的能量也较弱。此外，空中环境较为空旷，目标与环境中的散射体之间难以形成多次反射和散射，导致不易产生 IDP。

在 UAV 场景中，目标信道与背景信道的解耦，两者可以视为完全加性关系。对于目标信道而言，其本身存在 DP，而 IDP 并不明显，为此目标信道的路径损耗可以简化为 DP 的路径损耗。为此在 UAV 场景下，感知信道的路径损耗可以建模为

$$PL_{ISAC} = PL_{tar}^{DP} + PL_{bg}^0 \quad (14)$$

其中， PL_{tar}^{DP} 为目标信道中 DP 的路径损耗， PL_{bg}^0 为背景信道的路径损耗。由于背景信道和目标信道之间几乎没有相互影响，因此在仿真 UAV 场景下的 ISAC 感知信道时，可以参考 TR 38.901 标准中通信信道的路径损耗模型生成背景信道。

3.2 单站目标信道的路径损耗建模

针对 UAV 目标信道仅存在 DP 链路所表现出的强视距特性，本节结合测量方案 2 的实测数据对 UAV 目标信道的路径损耗特性进行深入研究。目标信道的路径损耗受到目标 RCS 的影响，为此本文基于前期 RCS 测量，得到 UAV 目标不同频段和距离下的 RCS 分布情况^[17]。进一步建立了单站感知目标信道的 CI，该模型在一定程度上反映了不同距离下 UAV 目标信道的路径损耗特性。

图 5 展示了实测 UAV 目标 RCS 在 15 GHz 和 28 GHz 频段下随距离变化的分布情况。 μ_{RCS} 为 RCS 的均值，单位是 dBsm， σ_0 为 RCS 的标准差。在测量过程中，天线被精确对准目标 UAV 及其挂载的小箱

子的正面，因此所获得的 RCS 的均值相对较大。在 28 GHz 频段下，目标 RCS 的均值 μ_{RCS} 为 5.67 dBsm，标准差 σ_0 为 2.19；而在 15 GHz 频段下，RCS 的均值 μ_{RCS} 为 2.70 dBsm，标准差 σ_0 为 1.46。这些数据表明，不同频段对目标的散射能力存在显著影响，其中在 28 GHz 频段下，目标的散射能力明显强于 15 GHz。对比不同距离下的目标 RCS。在距离 6 m 至 16 m 范围内，目标 RCS 围绕其均值 μ_{RCS} 上下波动，且未表现出明显的距离依赖性。这一现象表明，在该距离区间内，目标的散射能力相对稳定。因此，在拟合路径损耗模型时，采用目标 RCS 的固定均值 μ_{RCS} 作为拟合参数。在简化路径损耗模型的同时，能更好地反映实际情况。

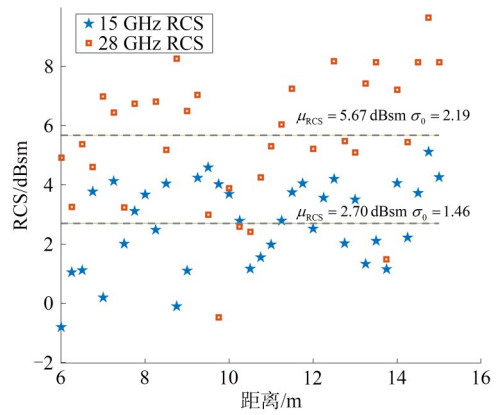


图 5 15 GHz 和 28 GHz 频段下 UAV 的目标 RCS

在对目标 RCS 的稳定性进行分析后，可以进一步探讨路径损耗模型的构建。UAV 场景下感知目标信道的路径损耗等价于目标信道中 DP 的路径损耗。采用 CI 路径损耗模型拟合，见式(12)，将目标 RCS 项—— $10 \lg \sigma_{RCS}$ 固定为 RCS 的均值 μ_{RCS} ，得到 28 GHz 和 15 GHz 单站感知目标信道的 CI 路径损耗模型见式(15)和式(16)以及拟合曲线，如图 6 所示。

28 GHz:

$$PL_{mono}(d) = 72.37 + 38.2 \lg(d) - 10 \lg \sigma_{RCS} + X_{\sigma}^{CI} \quad (15)$$

$$10 \lg \sigma_{RCS} = 5.67 \text{ dBsm}$$

15 GHz:

$$PL_{mono}(d) = 66.95 + 36.8 \lg(d) - 10 \lg \sigma_{RCS} + X_{\sigma}^{CI} \quad (16)$$

$$10 \lg \sigma_{RCS} = 2.70 \text{ dBsm}$$

图 6 展示了 28 GHz 和 15 GHz 单站感知 CI 路径损耗模型的拟合曲线，即式(15)和式(16)，其中所选定的参考距离为 $d_0=1 \text{ m}$ 。实测的路径损耗覆盖了 6 m 至 16 m 的距离范围。在此范围内，28 GHz 和

15 GHz频段的路径损耗因子分别为 $n=1.91$ 和 $n=1.84$ ，略低于自由空间损耗因子 $n=2$ 。两个频段的路径损耗特性与自由空间条件下的理论值接近，表明在UAV感知场景中，Tx-ST和ST-Rx的传播特性与在自由空间下的传播特性接近。因此，在进行单站感知信道的路径损耗仿真时，建议选择接近于自由空间的路径损耗因子，以便更准确地模拟UAV的感知信道特性，并确保仿真结果的可靠性和实用性。

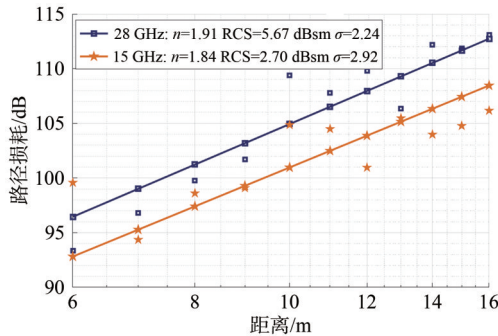


图6 路径损耗模型拟合曲线

与此同时，28 GHz和15 GHz频段的路径损耗测量数据的标准差 σ_0 分别为2.19 dB和1.46 dB，略小于CI路径损耗模型拟合的标准差 σ ，即2.24 dB和2.92 dB。这一现象表明，RCS测量数据和路径损耗拟合结果之间的标准差较为接近，反映出二者在波动特征上的相似性。这是由于UAV场景下单站感知模式仅存在DP链路，几乎不存在遮挡带来的阴影衰落。在这种情况下，目标信道的路径损耗波动主要由RCS自身的波动引起，而非受外部环境的影响。此外，RCS的波动特性会受到多种因素的影响，包括测量频段、目标形状、材质以及角度等。因此，在实际信道仿真中，需考虑RCS波动对感知信道路径损耗的影响。

3.3 不同高度下的路径损耗建模

在不同高度下，目标接收与辐射信号的入射和出射角不同，目标RCS也会存在相应的变化，进而导致CI路径损耗模型与实际路径损耗存在偏差。为此在测量方案3中进一步测量不同垂直高度下的目标信道路径损耗，以验证单站CI路径损耗模型在不同高度条件下的适用情况。

统计不同高度差范围内的实测路径损耗与CI路径损耗模型的拟合标准差可以发现，随着目标与Tx和Rx之间高度差范围的增大，CI路径损耗模型与实测路径损耗数据的拟合标准差呈现出逐渐增加

的趋势，见表3。此现象的原因在于CI路径损耗模型在拟合过程中RCS参数被设置为固定均值。但是当目标处于不同高度时，目标与入射波和出射波之间的夹角发生变化会导致目标RCS剧烈变化。

表3 拟合标准差与高度差范围的关系

高度差范围/m	拟合标准差 σ /dB
-1~1	8.35
-2~2	9.11
-3~3	9.86
-4~4	10.49
-5~5	10.32

基于这一观察可以推测，在目标与Tx和Rx高度不一致的情况下，CI路径损耗模型适用性会受到限制。具体而言，模型的适用性依赖于RCS的相对稳定性。然而，当高度差范围较大或夹角变化导致RCS波动加剧时，CI路径损耗模型的适用性可能会下降。因此，未来的研究需要进一步优化或调整该模型，考虑在不同俯仰角下Tx和Rx与目标之间的RCS变化特性，以更好地适应实际感知目标信道的特性。

4 结束语

为研究UAV场景下ISAC信道的路径损耗特性，解决低空经济发展和UAV数量激增带来的监管难题。本文以UAV为感知目标，在15 GHz和28 GHz频段的单站感知场景下开展了角度、水平距离和垂直高度3个维度的信道测量与分析。基于实测信道数据的PADP可知，由于UAV尺寸小且背景环境相对空旷，因此UAV感知目标信道的非直射路径并不明显，而直射路径则较为明显。这说明在UAV单站的ISAC感知信道中，目标信道对背景信道的影响较小，二者在很大程度上是解耦的。基于这一发现，本文进一步建立了UAV目标信道的距离与路径损耗模型，研究表明该模型的路径损耗因子与自由空间损耗因子相近，同时路径损耗的波动主要与目标RCS变化有关，不存在显著的阴影衰落效应，为3GPP ISAC标准化研究提供了支撑。此外，实测数据验证了在不同飞行高度下，本文所提路径损耗模型并不完全适用，且随着高度差的增加，该模型偏差逐渐扩大。为此，未来的研究需进一步探讨并完善目标在不同高度下的信道路径损耗建模方法。

参考文献:

- [1] 中国电子信息产业发展研究院. 中国低空经济发展研究报告[R]. 2024.
China Center for Information Industry Development. Research report on the development of China's low-altitude economy[R]. 2024.
- [2] 卢倩, 陆小雅, 潘玉婷, 等. 无人机在低空空域的监管问题[J]. 中国民航飞行学院学报, 2017, 28(2): 30-34.
LU Q, LU X Y, PAN Y T, et al. Regulatory of UAV in low-altitude airspace [J]. Journal of Civil Aviation Flight University of China, 2017, 28(2): 30-34.
- [3] 中国移动通信集团有限公司. 低空智联技术体系白皮书[R]. 2024.
China Mobile Communications Group. Low altitude intelligent network technology system white paper[R]. 2024.
- [4] ZHANG J H, WANG J L, ZHANG Y X, et al. Integrated sensing and communication channel: measurements, characteristics, and modeling[J]. IEEE Communications Magazine, 2024, 62(6): 98-104.
- [5] MENG K T, WU Q Q, XU J, et al. UAV-enabled integrated sensing and communication: opportunities and challenges[J]. IEEE Wireless Communications, 2024, 31(2): 97-104.
- [6] 刘晨熙, 马睿, 彭木根. 无人机通信感知一体化: 架构、技术与展望[J]. 电信科学, 2023, 39(2): 1-9.
LIU C X, MA R, PENG M G. UAV-enabled integrated sensing and communication: architecture, techniques, and future vision[J]. Telecommunications Science, 2023, 39(2): 1-9.
- [7] ZHANG J H, LIN J X, TANG P, et al. Channel measurement, modeling, and simulation for 6G: a survey and tutorial[J]. arXiv preprint, 2023: 2305.16616.
- [8] 3GPP. Study on channel model for frequencies from 0.5 to 100 GHz, v17.0.0: TR 38.901[S]. 2022.
- [9] 3GPP. Study on enhanced LTE support for aerial vehicles, v15.0.0: TR 36.777[S]. 2017.
- [10] LIU Y M, ZHANG J H, ZHANG Y X, et al. A shared cluster-based stochastic channel model for integrated sensing and communication systems[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2024, 73(5): 6032-6044.
- [11] 3GPP. Feasibility study on integrated sensing and communication, v19.0.0: TR 22.837[S]. 2023.
- [12] 李晖晖. 通信感知一体化在 5G-A/6G 环境下的无人机应用探究[J]. 广东通信技术, 2024, 44(1): 29-32.
LI H H. Research on UAV application of communication perception integration in 5G-A/6G environment[J]. Guangdong Communication Technology, 2024, 44(1): 29-32.
- [13] ZHANG Y X, ZHANG J H, PEI Y P, et al. Latest progress for 3GPP ISAC channel modelling standardization[J]. SCIENCE CHINA Information Sciences, 2024, 67(11): 217301.
- [14] CHEN W J, ZHANG Y X, LIU Y M, et al. An empirical study of ISAC channel characteristics with human target impact at 105 GHz [J]. Electronics Letters, 2024, 60(17): 04897716.
- [15] 方聪. 旋翼无人机的反射特性分析及检测算法研究[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2021.
FANG C. Research on reflection characteristics and detection algorithm of rotary-wing UAVs [D]. Xi'an: Xidian University, 2021.
- [16] 王东. 低空小目标雷达检测方法研究[D]. 长沙: 国防科技大学, 2017.
WANG D. Research on radar detection methods of low-altitude micro targets [D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2017.
- [17] BUPT, CMCC, VIVO. ISAC channel measurements and modeling: R1-2406107[S]. 2024.
- [18] 3GPP. Discussion on channel modelling for ISAC: R1-2406960[S]. 2024.
- [19] 3GPP. Channel modelling for ISAC: R1-2406975[S]. 2024.
- [20] 崔壮壮. 面向空地通信的无线信道特性和建模研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2022.
CUI Z Z. Research on characteristics and modeling of wireless channel for air-to-ground communication[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2022.
- [21] 朱秋明, 倪浩然, 华博宇, 等. 无人机毫米波信道测量与建模研究综述[J]. 移动通信, 2022, 46(12): 2-11.
ZHU Q M, NI H R, HUA B Y, et al. A survey of UAV millimeter-wave channel measurement and modeling[J]. Mobile Communications, 2022, 46(12): 2-11.
- [22] CHAI Z Y, ZHANG Y X, LIU G Y, et al. Empirical path loss channel modeling at 28 GHz for integrated sensing and communication system[C]//Proceedings of the 2023 International Conference on Wireless Communications and Signal Processing (WCSP). Piscataway: IEEE Press, 2023: 366-370.
- [23] 李怡然. 5G/B5G 车联网信道建模与仿真研究[D]. 北京: 北京大学, 2020.
LI Y R. Research on channel modeling and simulation of 5G/B5G-based vehicular communication [D]. Beijing: Peking University, 2020.
- [24] 张建华, 王玉洁, 唐盼, 等. 工业互联网信道特性与建模研究综述[J]. 电波科学学报, 2023, 38(1): 3-14.
ZHANG J H, WANG Y J, TANG P, et al. Overview of research on channel characteristics and modeling in the IIoT scenarios[J]. Chinese Journal of Radio Science, 2023, 38(1): 3-14.
- [25] SKOLNIK M I. Radar handbook[M]. New York: McGraw-Hill Inc., US, 2008.
- [26] MOORE E G. Radar detection, tracking and identification for UAV sense and avoid applications[D]. American: University of Denver, 2019.
- [27] 3GPP. Discussion on channel modelling for ISAC: R1-2401064[S]. 2024.
- [28] RAPPAPORT T S. Wireless communications[M]. Cambridge, UK: Cambridge University Press, 2024.
- [29] MIAO H, ZHANG J, TANG P, et al. Sub-6 GHz to mmWave for 5G-advanced and beyond: channel measurements, characteristics and impact on system performance[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2023, 41(6): 1945-1960.

[30] JIANG T, ZHANG J, TANG P, et al. 3GPP standardized 5G channel model for IIoT scenarios: a survey[J]. IEEE Internet of Things Journal, 2021, 8(11): 8799-8815.

[31] WANG Y, JIANG T, TANG P, et al. Measurement-based analysis and modeling of channel characteristics in an industrial scenario at 28 GHz[C]//2021 IEEE 94th Vehicular Technology Conference (VTC2021-Fall). Piscataway: IEEE Press, 2021: 1-5.

[作者简介]



莫清媚(2001-), 女, 北京邮电大学网络与交换技术全国重点实验室硕士生, 主要研究方向为工业互联网、通信感知一体化、信道建模等。



张宇翔(1992-), 男, 博士, 北京邮电大学网络与交换技术全国重点实验室特聘副研究员, 主要研究方向为通感一体化和AI赋能的数字孪生信道技术、6G信道建模理论、OTA测试等。



刘亚萌(1999-), 女, 北京邮电大学网络与交换技术全国重点实验室博士生, 主要研究方向为信道测量与建模、通信感知一体化、毫米波。



陈文俊(2000-), 男, 北京邮电大学网络与交换技术全国重点实验室硕士生, 主要研究方向为面向6G通信感知一体化的信道测量与建模。



姜涛(1992-), 男, 博士, 中国移动通信有限公司研究院研究员, 主要研究方向为毫米波信道建模、通信感知一体化信道建模与标准化、无线通信系统设计等。



王启星(1980-), 男, 博士, 中国移动通信有限公司研究院高级工程师, 主要研究方向为5G与6G通信系统设计、通信感知一体化、虚拟MIMO、全息MIMO等。



张建华(1976-), 女, 博士, 北京邮电大学教授, 网络与交换技术全国重点实验室副主任、博士生导师, 北邮-中国移动联合创新中心主任, 主要研究方向为5G-A和6G信道建模和传输新技术, 包括通信感知一体化、新中频、超大规模MIMO(XL-MIMO)、智能超表面、AI使能的信道预测与数字孪生, 无线信道测量与OTA测试等方面。