

无人机姿态抖动对低空空地信道非平稳性影响的测量与分析

林泽泓 梁梦宇 赖嘉杰 利健林 张 睿* 顾一帆 毕宿志 全 智

(深圳大学电子与信息工程学院, 广东深圳 518060)

摘 要: 无人机已成为低空通信网络的关键组成部分,但其空地(Air-to-Ground, A2G)信道的非平稳性仍是重大挑战。现有研究主要集中于表征高速移动所引发的非平稳性,而无人机在低速或悬停状态下的信道特性常被忽视。本文通过实测表征了一种在悬停状态下占主导地位的非平稳机制。我们发现,由风力等环境因素引发的姿态不稳定性,会与机载天线的非全向辐射特性产生耦合。具体而言,姿态的波动会改变天线的空间指向,该姿态波动进而调制了接收端感知的方向性增益。该耦合效应最终会导致视距(Line-of-Sight, LoS)路径的接收功率产生剧烈起伏。为实证检验该机制,我们开发了一套高精度 A2G 信道探测平台,该平台集成了自研的无线通信收发机、高精度惯性测量单元和全球定位系统,能够实现宽带信道冲激响应快照、高频无人机姿态数据(俯仰、滚转、航向)和精确定位数据的同步采集。基于该平台,我们开展了无人机在 40 m 高度悬停的信道测量实验,对比了平静(姿态稳定)与有风(姿态扰动)两种实验条件下的信道特性。测量结果验证了我们的假设:1)在平静实验条件下,姿态变化极小, A2G 信道表现出高度平稳性;2)在有风实验条件下,无人机为保持位置而执行剧烈的姿态调整,这种姿态抖动导致 LoS 路径在天线增益零点和增益斜率区域快速扫过,引发了明显且快速的信号衰落。因此,通过平均功率延迟分布相关法量化的信道平稳间隔,从超过 40 ms 急剧下降至低至 1 ms。本研究证实,姿态-天线耦合效应是无人机悬停状态下信道非平稳性的主导机制。这一发现对于高可靠 A2G 通信系统的设计与优化,特别是在天线选型和信道跟踪算法方面,具有关键指导意义。

关键词: 空地信道; 信道非平稳性; 姿态抖动; 信道测量

中图分类号: TN92 **文献标识码:** A **DOI:** 10.12466/xhcl.2026.01.009

引用格式: 林泽泓, 梁梦宇, 赖嘉杰, 等. 无人机姿态抖动对低空空地信道非平稳性影响的测量与分析[J]. 信号处理, 2026, 42(1): 95-108. DOI: 10.12466/xhcl.2026.01.009.

Reference format: LIN Zehong, LIANG Mengyu, LAI Jiajie, et al. Measurement and analysis of the impact of UAV attitude jitter on low-altitude A2G channel non-stationarity[J]. Journal of Signal Processing, 2026, 42(1): 95-108. DOI: 10.12466/xhcl.2026.01.009.

Measurement and Analysis of the Impact of UAV Attitude Jitter on Low-Altitude A2G Channel Non-Stationarity

LIN Zehong LIANG Mengyu LAI Jiajie LI Jianlin ZHANG Rui*

GU Yifan BI Suzhi QUAN Zhi

(College of Electronics and Information Engineering, Shenzhen University, Shenzhen, Guangdong 518060, China)

Abstract: Although unmanned aerial vehicles (UAVs) have become a critical component of low-altitude communication networks, the non-stationarity of their air-to-ground (A2G) channels remains a significant challenge. Existing research has primarily focused on characterizing non-stationarity induced by high-speed mobility, whereas channel properties

收稿日期: 2025-11-12; 修回日期: 2026-01-19

*通信作者: 张睿 zhrrygh@szu.edu.cn *Corresponding Author: ZHANG Rui, zhrrygh@szu.edu.cn

during low-speed or hovering states are often overlooked. In this study, we characterized a non-stationarity mechanism that is dominant during the hovering state through field measurements. We found that attitude instability induced by environmental factors such as wind couples with the non-isotropic radiation characteristics of the airborne antenna. Specifically, attitude fluctuations alter the antenna's spatial orientation, which in turn modulates the directional gain perceived at the receiver. This coupling effect ultimately leads to severe fluctuations in the received power of the line-of-sight (LoS) path. To empirically validate this mechanism, we developed a high-precision A2G channel sounding platform. This platform integrates a self-developed wireless transceiver, a high-precision inertial measurement unit (IMU), and GPS to enable the synchronous acquisition of wideband channel impulse response (CIR) snapshots, high-frequency UAV attitude data (pitch, roll, yaw), and precise positioning data. Leveraging this platform, we conducted channel measurement experiments for a UAV hovering at an altitude of 40 m and compared the channel characteristics under two conditions, including calm (stable attitude) and windy (disturbed attitude) atmospheres. The measurement results validate our hypothesis. 1) Attitude variations are minimal in calm conditions, and the A2G channel exhibited high stationarity. 2) In windy conditions, the UAV executed drastic attitude adjustments to maintain its position. This attitude jitter causes the LoS path to rapidly sweep across the antenna's gain null and steep-gain-slope regions, which induced significant and rapid signal fading. Consequently, the channel stationary time as quantified using the average power delay profile (APDP) correlation method decreased sharply from over 40 ms to as low as 1 ms. Thus, our results confirm that the attitude-antenna coupling effect is the dominant mechanism for channel non-stationarity during UAV hovering. This finding provides critical guidance for the design and optimization of high-reliability A2G communication systems, particularly regarding antenna selection and channel tracking algorithms.

Key words: air-to-ground channel; channel non-stationarity; attitude jitter; channel measurement

1 引言

随着低空经济的蓬勃发展,无人机(Unmanned Aerial Vehicle, UAV)在物流、应急通信、环境监测等领域的应用日益广泛^[1-2]。作为未来空天地一体化网络的重要组成部分^[3],并面向第六代移动通信(Sixth Generation Mobile Communication System, 6G)愿景^[4],这些应用迫切需要高可靠、高效率的空地(Air-to-Ground, A2G)无线通信系统支持^[5]。

与传统的地面通信相比,A2G信道呈现出三维(Three-Dimensional, 3D)强动态、传播环境时变等独特特性^[6]。其中,信道的非平稳性是影响系统设计和性能评估的关键挑战^[7]。这种非平稳性,即信道统计特性随时间或空间快速变化的现象,使得传统的广义平稳非相关散射(Wide-Sense Stationary Uncorrelated Scattering, WSSUS)假设在A2G场景中不再完全适用^[8],这对信道建模与系统性能评估提出了新的要求。

为了准确描述A2G信道的动态特性,学术界已开展了大量研究,特别是基于几何的随机模型(Geometry-based Stochastic Models, GBSM)^[9-10]。现有的非平稳信道建模工作,已从简化的线性轨迹演进到能够支持任意三维飞行轨迹^[11]、乃至基于航空器随机移动模型的复杂轨迹^[12]。研究范围也已扩展到多UAV协同通信^[13]和空空链路^[14-15]。特别

地,一些先进的理论模型已经开始明确考虑无人机旋转^[16]、姿态变化与抖动^[17-18]对信道非平稳性的影响。与此同时,为了在实验室环境中复现这些快速时变的信道特性,研究人员也开发了相应的信道硬件模拟方法^[19-20]。

然而,当前研究存在一个值得注意的空白:现有成果大多聚焦于无人机在高速机动飞行状态下的信道非平稳性,其成因主要被归结为平台的高速运动或地面散射簇的动态生灭过程^[21-22]。相比之下,无人机在悬停或低速飞行状态下的信道特性则常被忽视。在此类场景中,由于UAV与地面站(Ground Station, GS)的相对位置近乎恒定,由环境散射体变化引起的非平稳性十分有限。此时,外部因素(如风力扰动)所引发的无人机自身姿态不稳定性(包括抖动、倾斜与摇摆),成为影响信道特性的关键因素。

值得注意的是,现有关于无人机旋转或抖动影响的研究多局限于毫米波频段^[23-25],本文则聚焦于Sub-6 GHz频段,揭示了不同于微多普勒效应的幅度调制机制。在毫米波场景下,由于载波波长极短,风力或机械振动引起的毫米级位移偏移已足以引发显著的微多普勒效应或相位噪声,此类研究主要从频域或相位演进的角度分析信道的非平稳性。然而,在Sub-6 GHz等较低频段,载波波长通常在分米量级,此时无人机的位移远小于波长,其引发的

微多普勒效应不足以对信道的平稳性构成实质性影响。因此,不同于以往的研究路径,本文旨在深入揭示无人机的姿态波动如何通过调制天线增益,进而对LoS功率产生剧烈的时间选择性影响,从而系统性地阐释这一独立于传统运动与环境因素的非平稳性机制。

深入研究该现象需要具备能够精确捕捉信道特性与无人机姿态瞬时变化的测量手段。尽管现有文献已对A2G信道测量技术及相关测量活动进行了系统综述^[26],但在实际应用中,实现高精度的A2G信道测量,尤其是针对姿态影响的同步测量,仍然面临较大的工程挑战。因此,本文搭建了一套用于A2G场景的高精度信道测量平台。该平台集成了自研的无线通信收发机、高精度惯性测量单元(Inertial Measurement Unit, IMU)以及全球定位系统(Global Positioning System, GPS),能够实现宽带信道冲激响应(Channel Impulse Response, CIR)、无人机高频姿态数据(俯仰、滚转、航向)与位置信息的同步采集。此外,该平台在系统架构上支持空地双向链路的测量,为后续开展信道互易性分析提供了实验基础^[27]。

利用该平台,本文开展了针对无人机悬停状态的A2G信道测量实验,重点分析了环境风力扰动对信道平稳性的影响。我们采用功率时延谱(Power Delay Profile, PDP)的相关性^[28]等方法来量化信道的平稳区间。测量结果验证了我们的核心假设:1)在平静环境中,无人机姿态稳定,A2G信道在悬停时呈现出较强的平稳性;2)在有风环境中,无人机为保持位置稳定而进行的姿态剧烈调整(俯仰、滚转)所引起的LoS路径功率波动,是导致信道呈现非平稳特性的关键原因^[29]。本文的研究结果对于理解无人机信道的复杂机理,以及指导高可靠A2G通信系统的设计具有重要意义。

2 姿态-方向图耦合信道模型

为了从理论上刻画无人机机械抖动与天线增益分布之间的相互作用,本文提出了一种新型的姿态-方向图耦合(Posture-Pattern Coupling, PPC)信道模型。该框架明确将天线的增益变化特性与无人机的动态姿态参数相结合,为分析天底附近区域的信道行为提供了物理基础。

2.1 通用信道框架

考虑一个A2G通信链路,其中无人机作为发送端(TX)向GS传输信号。CIR可建模为确定性LoS

分量与随机非直射径(Non-Line-of-Sight, NLoS)多径分量的叠加。在典型的A2G通信场景中,受无人机移动、姿态变化、动态遮挡以及飞行区域散射环境差异的影响,LoS与NLoS之间的相对功率比(即Rician K因子)会随时间显著变化^[30]。因此,信道幅度服从具有时变K因子 $K(t)$ 的莱斯(Rician)分布。CIR可表示为:

$$h(t, \tau) = \sqrt{\frac{\Omega(t)K(t)}{K(t)+1}} h_{\text{LoS}}(t, \tau) + \sqrt{\frac{\Omega(t)}{K(t)+1}} h_{\text{NLoS}}(t, \tau) \quad (1)$$

其中, t 为观测时刻, τ 表示传播时延。参数 $\Omega(t)$ 定义为时变平均信道增益,由传播环境决定,未包含收发天线带来的方向性增益。鉴于在典型的场景中LoS路径占据了绝大部分能量,本文的建模重点在于刻画 $h_{\text{LoS}}(t, \tau)$ 的动态特性。

2.2 解析天线增益建模

为了定量表征天线特性对信号传输的影响,我们将辐射方向图模型构建为相对于天底方向的离轴角 θ 的函数。考虑到无人机在高空悬停且天线向下安装,有效的信号传播物理上被限制在下半球区域(即角度跨度为 $270^\circ \rightarrow 0^\circ \rightarrow 90^\circ$ 的扇形区)。

我们采用修正后的第一类一阶贝塞尔函数 $J_1(\cdot)$ 来建模归一化幅度辐射方向图 $\mathcal{A}(\theta)$,以补偿实际硬件的非理想特性^[31]:

$$\mathcal{A}(\theta) = \frac{|J_1(\beta \sin \theta)| + \epsilon}{J_{1,\text{peak}} + \epsilon}, \quad \theta \in [0, 2\pi) \quad (2)$$

在该模型中, ϵ 表示有限零点深度因子,用于模拟由于机身遮挡和交叉极化效应而在理论零点处观察到的残留增益。 $J_{1,\text{peak}} \approx 0.5819$ 对应贝塞尔函数的全局最大值,使得 $J_{1,\text{peak}} + \epsilon$ 成为归一化常数,从而确保 $\max(\mathcal{A}(\theta)) = 1$ 。波束宽度参数 β 通过将理论峰值自变量($u \approx 1.841$)与测得的最大增益角(本文中 $\theta_{\text{max}} = 38^\circ$)对齐来进行标定,即需满足 $\beta \sin(\theta_{\text{max}}) = 1.841$ 。

2.3 姿态-方向图耦合的LoS分量

LoS分量的建模是PPC模型的核心贡献。我们定义了几何轨迹与随机姿态动力学之间的耦合机制。令 $p_{\text{GS}} = [0, 0, 0]^T$ 和 $p_{\text{UAV}}(t) = [x(t), y(t), z(t)]^T$ 分别表示GS和UAV的笛卡尔坐标,几何仰角为:

$$\theta_g(t) = \arctan\left(\frac{z(t)}{\sqrt{x(t)^2 + y(t)^2}}\right) \quad (3)$$

LOS与无人机天线间的离轴角 $\theta_a(t)$ 与几何仰角 $\theta_g(t)$ 之间的关系由下式给出:

$$\theta_a(t) = \left[\frac{\pi}{2} - \theta_g(t)\right] \pmod{2\pi} \quad (4)$$

其中,算子 $[\cdot](\bmod 2\pi)$ 表示取模运算,将参数映射到区间 $[0, 2\pi)$ 内。在实际飞行条件下,无人机会经历不可避免的机械抖动。我们将瞬时姿态偏差(摆动角) $\Psi(t)$ 建模为一个周期过程^[24],以反映机械共振的节律性特征:

$$\Psi(t) = \Psi_{\max} \sin(2\pi f_w t + \phi_0) \quad (5)$$

其中, Ψ_{\max} 表示抖动的最大幅度, f_w 表示无人机的抖动频率, ϕ_0 表示初始相位,用于描述抖动起始时刻的角位置。因此,无人机天线的瞬时发射角 $\theta_{\text{UAV}}(t)$ 是静态离轴角 $\theta_a(t)$ 与动态抖动角 $\Psi(t)$ 的叠加。综合以上因素,LoS信道系数被建模为:

$$h_{\text{LoS}}(t, \tau) = \mathcal{A}_{\text{GS}}(\theta_a(t)) \cdot \mathcal{A}_{\text{UAV}}(\theta_a(t) + \Psi(t)) \cdot e^{-j2\pi f_c \tau_0(t)} \cdot \delta(\tau - \tau_0(t)) \quad (6)$$

其中, f_c 表示载波频率, $\tau_0(t)$ 表示LoS路径的瞬时传播延迟。需要注意的是,由于天线采用垂直安装且彼此相对(GS面向天顶,UAV面向天底),它们的辐射方向图均由离轴角表征。

为了进一步揭示姿态抖动与LoS功率波动之间的关系,对无人机天线增益项在静态离轴角 $\theta_a(t)$ 处进行一阶泰勒展开:

$$\mathcal{A}_{\text{UAV}}(\theta_a(t) + \Psi(t)) \approx \mathcal{A}_{\text{UAV}}(\theta_a(t)) + \mathcal{A}'_{\text{UAV}}(\theta_a(t)) \cdot \Psi(t) \quad (7)$$

考虑到天线方向图的轴对称性,我们推导了正角度定义域($\theta \in [0, \pi/2]$)内的灵敏度因子 $\mathcal{A}'_{\text{UAV}}(\theta)$ 。通过对公式(2)应用链式法则,其梯度为:

$$\mathcal{A}'_{\text{UAV}}(\theta) = \frac{\beta \cos \theta}{J_{1,\text{peak}} + \epsilon} \left[J_0(\beta \sin \theta) - \frac{J_1(\beta \sin \theta)}{\beta \sin \theta} \right] \quad (8)$$

当无人机处于高仰角($\theta_g(t) \approx \pi/2$)时,系统进入了天线感应衰减区,此时离轴角 $\theta_a(t) \approx 0$ 。在此区域内,梯度项 $\mathcal{A}'_{\text{UAV}}$ 达到最大值。因此,即使姿态 $\Psi(t)$ 发生微小的变化,也会被放大为LoS功率的剧烈波动。相反,在离轴角对应于主瓣的低仰角区域,增益曲线较为平坦($\mathcal{A}'_{\text{UAV}} \approx 0$),从而使得姿态抖动 $\Psi(t)$ 的影响可以忽略不计。

2.4 NLOS分量

与LoS路径不同,NLoS分量通常源自周围建筑等主要散射体,位于较宽的离轴角区域。这些分量一般处于天线增益的主瓣平坦区,其增益梯度极小($\mathcal{A}'_{\text{UAV}} \approx 0$),因此对微小的姿态抖动不敏感。因此,我们假设NLOS分量在短时间内保持宽平稳性(Wide-Sense Stationary, WSS),并采用经典的弦向求和法建模:

$$h_{\text{NLoS}}(t, \tau) = \sum_{n=1}^{N_{\text{cl}}} \eta_n \mathcal{A}_n e^{j(\phi_n - 2\pi f_c \tau_n(t))} \delta(\tau - \tau_n(t)) \quad (9)$$

其中, N_{cl} 表示多径分量的总数。 η_n 为第 n 个分量的功率分配因子,且满足 $\sum \eta_n = 1$ 。 \mathcal{A}_n 代表第 n 条NLOS路径对应的有效天线增益。由于多径分量具有显著的空间弥散性,其NLOS路径通常经过天线方向图的平稳区域(如主瓣或侧瓣中增益变化较小的区域),因此由姿态扰动引起的增益波动极其微小,在建模时将 \mathcal{A}_n 设为常数。 ϕ_n 表示第 n 条NLOS路径因反射交互作用产生的随机相位偏移,设其在 $[0, 2\pi)$ 范围内服从均匀分布。 $\tau_n(t)$ 则表示该路径在时刻 t 的瞬时传播延迟。这种LoS与NLOS动力学的解耦,使我们能够准确分离并分析姿态-天线交互作用对主导路径的具体影响。

3 无人机辅助的空对地信道探测系统

3.1 测量系统硬件平台

为准确表征空地无线信道,特别是分析无人机悬停抖动对信道非平稳性的影响,本文搭建了一套高精度的宽带信道测量系统。该系统基于自主研发的无线通信收发机,具备在移动场景下捕获宽带信道特性所需的灵活性与高分辨率。系统主要由空中发射机(TX)和地面接收机(RX)两部分组成。

空中发射机:

空中发射系统如图1所示,搭载于一款商用多旋翼无人机。该无人机平台具备6 kg的有效载荷能力与长达59 min的续航时间,为搭载复杂的测量设备提供了可靠的空中载体。

TX系统的核心是一块自主研制的无线通信收发机,集成了高性能的计算与射频单元。其基带处理核心为一块FPGA,负责探测信号的实时生成与



图1 安装在无人机上的空中发射器平台

Fig. 1 Aerial transmitter platform mounted on a UAV

高速回放;系统控制与数据记录由一个嵌入式 ARM 处理器负责。射频收发前端采用了一款高度集成的宽带收发器,支持 2 GHz 至 5 GHz 的连续频率覆盖,满足了本实验在 3.0 GHz 频段进行测量的需求。

为了实现高精度的时空同步与姿态感知,TX 系统集成了两个关键传感器:

1)时空同步:系统配备了 GPS 模块。该模块不仅用于提供 1 Hz 更新速率的无人机三维位置信息,更重要的是,它能产生高精度(<10 ns)的秒脉冲(1-PPS)信号。此 PPS 信号作为硬件触发源,用于启动探测信号的发送,从而为收发两端的粗同步提供了统一的时间基准。

2)姿态感知:为捕捉由风力扰动等因素引起的无人机机体抖动,系统外接了一台 10 轴 IMU,以 60 Hz 的高更新速率,同步记录无人机详细的俯仰、滚转和航向数据。IMU 的数据采集同样由 PPS 信号触发,确保了姿态数据与信道测量快照在时间上的严格对齐。

发射天线采用定制设计的薄型贴片天线,具有锥形辐射方向图,被安装于装载收发机的塑料外壳底部,并固定在无人机起落架下方,实现向下方向辐射。该天线在方位角平面上呈现全向辐射特性,其垂直切面方向图如图 2 所示。天线最大增益为 3.58 dBi,出现在相对于天线视轴 38° 的俯仰角方向。

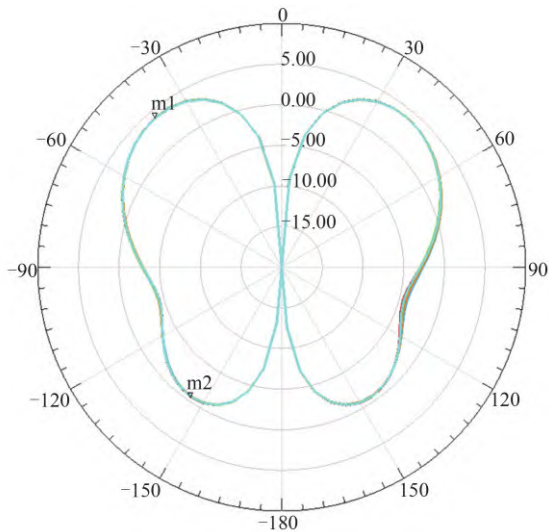


图2 天线方向图
Fig. 2 Antenna radiation pattern

地面接收机:

接收机系统采用了与发射机相对称的硬件架构,使用相同的收发器与 GPS 模块建立地面基准。

系统关键参数:

本测量系统的核心技术参数如表 1 所列。系统工作在 3.0~3.1 GHz 频段,自研的无线通信收发机的基带采样率设置为 100 Msps,提供 10 ns 的理论时延分辨率。这种高时延分辨率对于在复杂城市场景中准确分辨密集的多径分量至关重要,也是后续进行精细化非平稳特性分析的基础。

表 1 实验平台硬件配置	
Tab. 1 Experimental platform hardware configuration	
组件	主要特性
无人机	最大载荷:6 kg
无线通信收发机	工作频段:2 GHz~6 GHz 带宽:最高 100 MHz
GPS 模块	数据更新率:1 Hz
惯性测量单元	数据更新率:60 Hz
低噪声放大器	增益:约 23 dB
天线	最大增益俯仰角:38° 峰值增益:3.58 dBi

3.2 探测信号

探测信号的设计旨在提供高延迟分辨率,并有助于在移动环境中进行稳健的信道估计。该信号结构基于 Zadoff-Chu(ZC)序列,由于其理想的周期自相关特性和恒定幅度零自相关特性,它被广泛用于信道探测^[27]。具体而言,一个长度为 N_{zc} 、根参数 $u=1$ 的基础 ZC 序列 $x_u[n]$ 以 100 Msps 的基带采样率生成。该序列的定义为:

$$x_u[n]=e^{j\frac{\pi un(n+1)}{N_{zc}}}, \quad n=0,1,\cdots,N_{zc}-1 \quad (10)$$

发射信号被构建为周期性的帧结构。每个帧包含两个主要部分:一个有效信号部分和一个保护间隔(Guard Interval, GI)。有效信号部分由两个相同的 ZC 序列串联而成,产生的有效信号持续时间为 20.46 μs。ZC 序列的这种重复是一个关键的设计选择,它通过对接收到的两个相同片段进行相关,有助于在后处理中实现稳定的载波频率偏移(Carrier Frequency Offset, CFO)估计和补偿。这个有效信号部分之后是一个零补的 GI。单个帧的总持续时间约为 50 μs。这提供了约 30 μs 的保护时间,该时间足够长,可以防止在 A2G 延迟扩展内的多径分量引起的干扰。

每当 1-PPS 触发后,发射器会发送一个由 800 个这样的连续周期组成的连续突发,总持续时间约 40 ms/s。该设计使得在每个测量窗口内可捕获

800个CIR快照,从而提供较高的时间分辨率(约每50 μs 一个快照),适用于分析信道的非平稳特性。

4 数据预处理流程

由于A2G信道测量采用收发端物理分离的非同步架构,从接收机采集的原始基带数据 $r[k]$ 包含了由硬件非理想性引入的失真。特别是,收发端独立晶振导致的CFO和采样时钟偏移(Sampling Timing Offset, STO)及其漂移(Sampling Frequency Offset, SFO),会严重扭曲CIR的测量结果^[26-27]。为提取真实的信道特性,本文设计并实现了一套严谨的多级数据预处理流程。

4.1 信号同步

预处理流程:首先,利用第2节所述的GPS 1-PPS信号实现收发两端的粗同步,将定时不确定性缩小至数个采样点(约40 ns)范围内;随后,进行符号级精同步。该步骤利用探测信号优异的自相关特性,通过 $r[k]$ 与本地序列副本 $x_u[n]$ 进行互相关运算:

$$R_{rx}[l] = \sum_{n=0}^{N_{zc}-1} r[l+n] \cdot x_u^*[n] \quad (11)$$

最后,通过检测相关峰值 $R_{rx}[l]$ 的位置,可精确定位每个探测序列的起始时刻 l 。

4.2 CIR估计与系统响应校准

完成同步后,为消除天线、放大器及滤波器等硬件引入的系统响应 $H_{sys}[v]$,我们采用频域去卷积的方法。通过“背靠背”电缆直连测试预先测得系统响应 $H_{sys}[v]$,将CFO补偿后的接收信号变换至频域,通过下式计算得到校准后的信道频率响应(Channel Frequency Response, CFR):

$$\hat{H}_i[v] = \frac{\text{FFT}\{r_{\text{corr},i}[k]\}}{H_{sys}[v]} \quad (12)$$

其中, $r_{\text{corr},i}[k]$ 表示接收信号与本地原始ZC序列进行互相关运算后的输出结果。再将 $\hat{H}_i[v]$ 进行IFFT变换,即可得到校准后的时域CIR快照 $h_i[l]$ 。

4.3 亚采样STO/SFO补偿

为解决由SFO引起的亚采样(Sub-symbol)定时漂移问题——该问题会导致CIR峰值展宽、功率下降并引入虚假的非平稳性——本文采用了基于Sinc插值的补偿算法^[32]。该算法通过Whittaker-Shannon插值重构连续时间CIR:

$$h_{\text{recon},i}(\tau) = \sum_l h_i[l] \cdot \text{sinc}\left(\frac{\tau}{T_s} - l\right) \quad (13)$$

随后,通过寻找 $|h_{\text{recon},i}(\tau)|$ 的峰值,可获得具有亚采样精度的瞬时分数阶STO(FSTO)估计值 $\hat{\tau}_{\text{peak},i}$ 。由于

SFO使 $\hat{\tau}_{\text{peak},i}$ 随时间 t_i 线性漂移,我们对其解缠绕后的序列 d_i 建立线性模型:

$$\delta_{\text{fit}}(t_i) = \hat{a} \cdot t_i + \hat{b} \quad (14)$$

通过约束线性最小二乘法稳健地估计出SFO(即斜率 \hat{a})。最后,根据拟合的漂移模型 $\delta_{\text{fit}}(t_i)$,通过频域相位旋转对每个CFR快照 $\hat{H}_i[v]$ 进行分数阶时延校正。

经过上述流程,系统最终输出一组校准、同步且在亚采样级别对齐的时变CIR快照 $h_i[l]$,为后续章节的信道特性分析提供了可靠的数据基础。

5 信道平稳性表征

根据上一节所述的数据预处理流程,我们获得了一组经过校准、同步且在亚采样级别对齐的CIR快照 $h_i[l]$ 。本章节将基于这组数据,建立一套完整的信道特性表征框架,从大尺度和小尺度两个维度对信道进行分析。

5.1 大尺度信道特性:路径损耗

大尺度特性反映了信号功率随距离和环境变化的宏观趋势。首先,通过累加每个CIR快照 $h_i[l]$ 中所有可分辨多径抽头 l 的功率,计算得到瞬时功率增益

$$G_p[i] = \sum_l |h_i[l]|^2 \quad (15)$$

该瞬时功率同时包含了大尺度路径损耗与小尺度衰落的影响。

随后,为提取大尺度衰落分量,需对小尺度波动进行平滑处理。本文中,大尺度功率增益 $\overline{G_p}[j]$ 通过对每个测量突发(burst,索引为 j)内的全部 M 个瞬时功率增益快照取平均得到:

$$\overline{G_p}[j] = \frac{1}{M} \sum_{i=1}^M G_p[i] \quad (16)$$

最后,该测量突发对应的大尺度路径损耗 $\overline{\text{PL}}[j]$ (单位:dB)可由上述平均增益计算得出:

$$\overline{\text{PL}}[j] = -10 \log_{10}(\overline{G_p}[j]) \quad (17)$$

5.2 小尺度信道特性:时频非平稳表征

小尺度特性描述了信号在短时间或小频率间隔内的快速波动。由于无人机的高机动性,A2G信道的小尺度特性呈现显著的非平稳性,必须在时间和频率两个维度上进行联合表征。

1) 时间平稳性分析

A2G信道的非平稳性,即信道统计特性随时间快速变化,使得传统的WSS假设在长观测时间内失效。因此,量化信道统计特性保持不变的时间尺

度,即平稳间隔 T_s 或准平稳区间,变得至关重要。

本文采用一种基于平均功率延迟分布(Average Power Delay Profile, APDP)相关性的方法来评估信道的时延平稳性。该方法通过考察信道时延结构(而非瞬时幅值)的变化来量化平稳性,从而有效平滑了小尺度快衰落的随机影响。

该分析流程如下:

计算APDP:通过在 $h_i[l]$ 的瞬时功率上施加一个长度为 N_w 个快拍的滑动窗口进行平均,计算第 i 个时间快拍的APDP:

$$\bar{P}_h(i, l) = \frac{1}{N_w} \sum_{k=i}^{i+N_w-1} |h_k[l]|^2 \quad (18)$$

构建相关矩阵:采用归一化相关系数 $\rho(i, j)$ 来量化时刻 i 与 j 之间信道时延结构的相似性,从而构建相关矩阵 $\mathbf{R}[i, j]$:

$$\rho(i, j) = \frac{\sum_l \bar{P}_h(i, l) \cdot \bar{P}_h(j, l)}{\max \left\{ \sum_l \bar{P}_h(i, l)^2, \sum_l \bar{P}_h(j, l)^2 \right\}} \quad (19)$$

计算平均相关曲线:将相关矩阵 \mathbf{R} 沿其对角线进行平均,得到一个随时间滞后量 m 变化的平均相关曲线 $\mu[m]$:

$$\mu[m] = \text{mean} \{ \mathbf{R}[i, i+m] | 1 \leq i \leq M' - m \} \quad (20)$$

其中, $M' = M - N_w + 1$ 是APDP快拍的总数。

确定平稳间隔:最后,平稳间隔 T_s 被定义为平均相关曲线 $\mu[m]$ 保持在预设阈值 γ 之上的最大时间滞后

$$T_s(\gamma) = m_{\max} \cdot S \cdot \Delta t \quad (21)$$

其中, m_{\max} 是使得 $\mu[m'] \geq \gamma$ 对所有 $0 \leq m' \leq m_{\max}$ 成立的最大索引, S 是滑动窗口步长(以快照为单位), Δt 是CIR快照之间的时间间隔。

2) 频率选择性分析

频率选择性分析用于表征信道在频域上的平稳特性,即信道对不同频率分量的响应差异。这通常通过一对互为倒数关系的参数来描述:均方根时延扩展(RMS Delay Spread, S_τ)和相干带宽(Coherence Bandwidth, B_{coh})。

其中, S_τ 是PDP的归一化二阶中心矩,用于量化多径分量在时延域上的弥散程度。对于第 i 个快照,计算其平均时延 $\mu_\tau(i)$:

$$\mu_\tau(i) = \frac{\sum_l \tau_l |h_i[l]|^2}{\sum_l |h_i[l]|^2} \quad (22)$$

其中, $\tau_l = l \cdot T_s$ 是离散时延抽头 l 对应的时延, T_s 为

10 ns采样间隔, $S_\tau(i)$ 则由下式给出:

$$S_\tau(i) = \sqrt{\frac{\sum_l (\tau_l - \mu_\tau(i))^2 |h_i[l]|^2}{\sum_l |h_i[l]|^2}} \quad (23)$$

B_{coh} 则从频域角度定义了信道频率响应保持强相关的频率区间。首先,通过 $h_i[l]$ 的离散傅里叶变换得到信道频率响应 $H_i[v]$:

$$H_i[v] = \sum_{l=0}^{N-1} h_i[l] e^{-j2\pi vl/N} \quad (24)$$

其中, N 是时延抽头总数, v 是离散频率索引。随后,定义频率相关函数 $R_H(\Delta v)$ 以衡量同一时刻不同频率点 v 与 $v + \Delta v$ 之间CFR的相关性:

$$R_H[\Delta v] = \mathbb{E} [H^*(k, v) H(k, v + \Delta v)] \quad (25)$$

最后,为量化信道在频率上的平稳性范围,引入相干带宽 B_{coh} 作为关键参数。它定义了信道频率响应保持强相关的频率区间。相干带宽 B_{coh} 通常通过归一化频率相关函数幅度 $|R_H(\Delta f)|/|R_H(0)|$ 下降至某一预设阈值时所对应的频率间隔来确定。基于0.5阈值的相干带宽计算公式如下:

$$B_{\text{coh}} = \frac{1}{2} \left[\arg \max_{\Delta f > 0} \left(\frac{|R_H(\Delta f)|}{|R_H(0)|} = 0.5 \right) - \arg \min_{\Delta f < 0} \left(\frac{|R_H(\Delta f)|}{|R_H(0)|} = 0.5 \right) \right] \quad (26)$$

且 S_τ 与 B_{coh} 之间满足如下“不确定性关系”:

$$B_{\text{coh}} \geq \frac{1}{2\pi S_\tau} \quad (27)$$

综上所述,本为后续的信道特性分析建立了一套完整的统计表征框架。该框架涵盖了从功率域的大尺度路径损耗,到时域的平稳间隔,再到频域的均方根时延扩展与相干带宽等关键评估指标。下一节,我们将应用这套指标体系,对不同场景下采集的实测数据进行深入剖析。

6 结果与分析

基于实测数据,本章将进行全面的分析和深入的讨论。为了系统性地揭示无人机通信信道的特性,本分析将遵循以下结构:首先,详细阐述测量场景与环境;随后,检验PDP和路径损耗等核心信道特性。在此基础上,进一步探究信道的非平稳特性及非平稳区域的分布,同时评估相干带宽与频率选择性;最后,分析将具体展示无人机姿态变化对非平稳区域的影响。

6.1 实验场景

实验在大学校内场地进行,具体场景如图3所示。测试区域中心为一片开阔草坪,两侧毗邻数栋约40 m高的多层教学楼。地面接收机固定放置于地面指定位置,无人机搭载的发射机在120 m以下的空中飞行/悬停。该实验设计确保了在所有测量中均存在一条稳定的主导视距路径,而主要多径分量来源于地面反射与周边建筑散射。



图3 无人机信道测量实验场景

Fig. 3 Experimental scenario for UAV channel measurement

6.2 功率延迟分布与接收功率

图4展示了无人机自地面垂直起飞上升至100 m高度后以相同速度下降过程中测得的功率时延分布。图中横轴为传播时延,分辨率为10 ns;纵轴为飞行时间,对应每秒采样的一个CIR快照。图中亮色区域表示经归一化后的多径分量功率。从图中可观察到以下现象:随着无人机高度上升,多径分量整体向右(时延增大方向)偏移;在约160 s上升至预设高度后,无人机开始下降,此时多径分布逐渐向左(时延减小方向)回移,并于320 s时基本回归初始时延位置。多径功率随高度增加而减弱,随

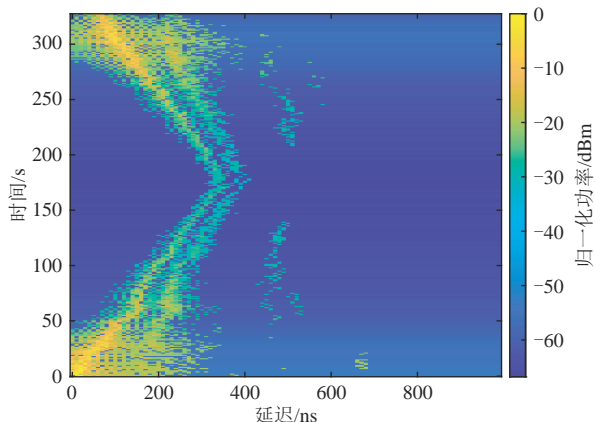


图4 无人机垂直移动100 m的PDP

Fig. 4 PDP for UAV vertical movement of 100 m

高度降低而增强,整体呈现“高-低-高”的U形变化趋势。从直射路径的时延变化来看,在最高点(约160 s)处对应时延约为320 ns。根据电磁波传播模型计算可得此时收发距离约为96 m,与实验场景中设定的高度及轨迹长度基本吻合。

6.3 时间平稳性

本节重点研究无人机在悬停状态下的信道时间平稳性。如引言所述,传统上认为悬停(即零速)状态的信道是平稳的。然而,本节将通过实测数据论证,由风力等环境因素引起的无人机姿态抖动,是导致悬停信道呈现非平稳特性的关键机制。

为验证该假设,我们对比了在同一地点(40 m高度)悬停时采集的两组典型数据:一组为“姿态稳定”实验条件(环境平静);另一组为“姿态扰动”实验条件(有明显阵风)。

图5展示了两种实验条件下,在一个40 ms测量窗口(包含800个CIR快照)内的不同时刻的瞬时PDP瀑布图。在图5(a)的姿态稳定实验条件下,信道结构清晰且稳定。LoS路径(对应0 ns时延的抽头)在整个40 ms观测窗内保持着恒定的高功率,主导着信道能量。相比之下,图5(b)的姿态扰动实验条件呈现出截然不同的特性。最显著的现象是,LoS路径的功率在极短的时间内经历了超过10 dB的剧烈衰减。这种在毫秒量级上的主导路径功率剧变,是信道时延结构发生快速变化的直接体现。

为探究导致图5(b)中LoS功率剧烈变化的物理机制,我们调取了测量系统同步记录的IMU数据。图6(a)与(b)分别对应图5(a)与(b)所示实验条件下的无人机姿态角(俯仰角和滚转角)变化。如图6(a)所示,在“姿态稳定”实验条件下,无人机的俯仰角和滚转角变化范围极小,均在 $\pm 1^\circ$ 以内,姿态非常稳定。与此形成鲜明对比的是,在图6(b)的“姿态扰动”实验条件下,无人机为抵抗风力扰动以维持悬停,其姿态角(特别是俯仰角)出现了高达数十度的剧烈、快速波动。

这种姿态的剧烈抖动是导致LoS功率非平稳性的直接原因。其物理机理在于无人机姿态角与机载天线各向异性辐射方向图之间的耦合效应。如图2所示,本文所用的定制化贴片天线具有一个特殊的锥形方向图,其在天底方向存在一个显著的增益零点,而在 38° 俯仰角时达到最大增益。类似的现象也存在与其他相关的工作中^[29]。

在本次悬停测量中,RX始终位于TX的天底方向附近,即天线增益零点区域。在姿态稳定时(图6(a)),

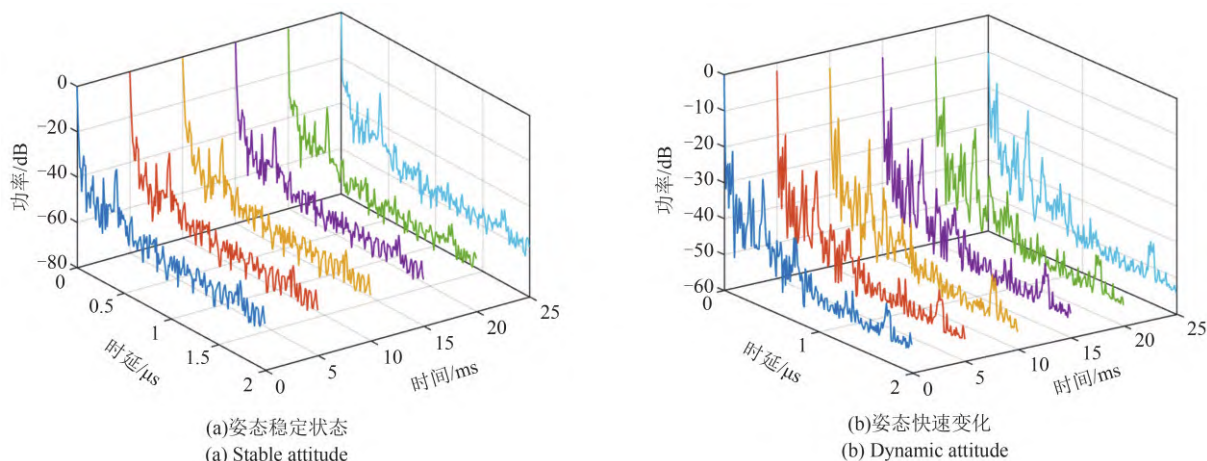


图5 无人机在40 m高度悬停时的PDP

Fig. 5 PDPs at a UAV altitude of 40 m

无人机姿态角变化微小, LoS链路始终处于天线增益零点(或附近)区域, 因此接收功率(图5(a))保持稳定(尽管由于处于零点附近, 信号整体偏弱)。在姿态扰动时(图6(b)), 无人机的俯仰角/滚转角发生剧烈变化。这导致LoS链路的辐射方向在天线方向图的增益零点(0°)与高增益区域(例如 20° 到 30°)之间快速扫过。由于该区域是天线方向图增益斜率最陡峭的区域, 因此, 微小的姿态角度变化被放大为接收功率的巨大波动, 从而导致了图5(b)中观测到的LoS功率剧烈衰减现象。

信道时延结构的演变速度直接决定了平稳间隔 T_{st} 的量化结果, 而该参数的具体数值高度依赖于预设的相关性阈值 γ 。为验证前文提出的PPC物理机制, 本文在图7中基于式(19)构建了理论平稳性演变基准, 并将其与实测数据的分布特征进行了对比分析。

如图7(a)所示, 在“姿态稳定”实验条件下, 仿真基准与实测数据在演变趋势上表现出高度的一致性。当相关性阈值 $\gamma \leq 0.8$ 时, T_{st} 的分布均高度集中于40 ms, 表明信道在较宽的判定范围内均呈现准平稳状态。这种高度吻合不仅从物理层面验证了本文建模方法在稳态条件下的准确性, 同时也说明在无显著姿态扰动时, 信道特征具有极强的内在稳定性, 为后续对比实验提供了可靠的基准参考。

与之形成对比的是图7(b)所示的“姿态扰动”实验条件。在此实验条件下, T_{st} 随 γ 的增大而表现出明显的衰减趋势。值得注意的是, 基于PPC效应构建的理论仿真模型准确捕获了实测数据中平稳间隔随判定标准趋严而快速下降的演变规律: 两者

的中位数均呈现出一致的阶梯式下降特征。尽管受实际复杂多径环境的影响, 实测结果表现出的相关性略低于仿真值, 但两者在衰减斜率及分布区间上的高度趋同, 有力地证明了姿态周期性抖动通过调制天线增益是驱动信道统计特性非平稳演变的核心物理诱因。通过将已知物理激励映射为信道统计特征的演变过程, 本文实现了从底层物理量到宏观统计特性的闭合验证。

基于上述敏感性对比与一致性分析可知, 过高的阈值(如0.9)易使判定结果对微小波动过度敏感, 导致平稳性估计过于保守; 而过低的阈值(如 <0.7)则可能掩盖姿态动态变化引起的实际非平稳演变过程。综合考量物理验证的一致性、实验条件区分度与统计稳健性, 本文采用 $\gamma=0.8$ 作为判定信道平稳性的标准准则。该值在判定严苛度与统计稳健性之间取得了良好平衡, 能够清晰地刻画PPC效应引发的物理特征变化。

综上所述, 测量结果清晰地表明, 在无人机悬停或低速飞行的A2G场景中, 信道是否平稳的关键因素不再是收发端的相对位移。由风力等外部因素引起的无人机姿态不稳定性, 与机载天线的各向异性方向图(特别是增益零点)相耦合, 是导致LoS路径功率快速时变、进而破坏信道平稳性的主导机制。

6.4 频率平稳性

为进一步从频率域验证PPC机制对信道特性的影响, 本节分析了信道在频率维度上的平稳性, 即频率选择性。我们重点考察了均方根时延扩展和相干带宽这两个互补的关键参数。

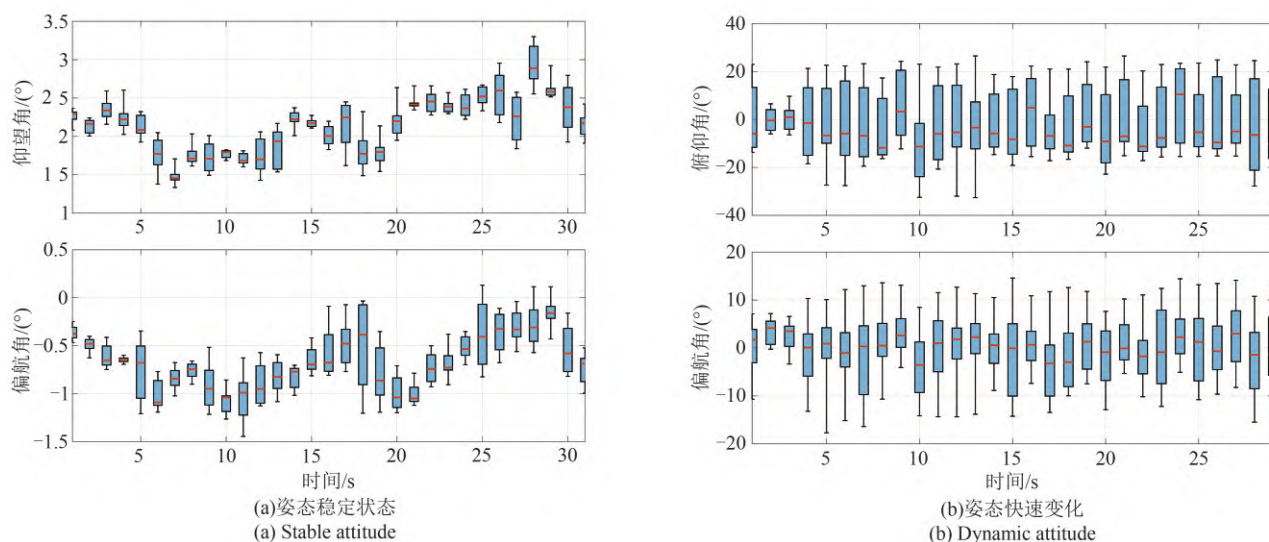


图6 无人机在40 m高度悬停时的姿态角变化

Fig. 6 Attitude angle variations at a UAV altitude of 40 m

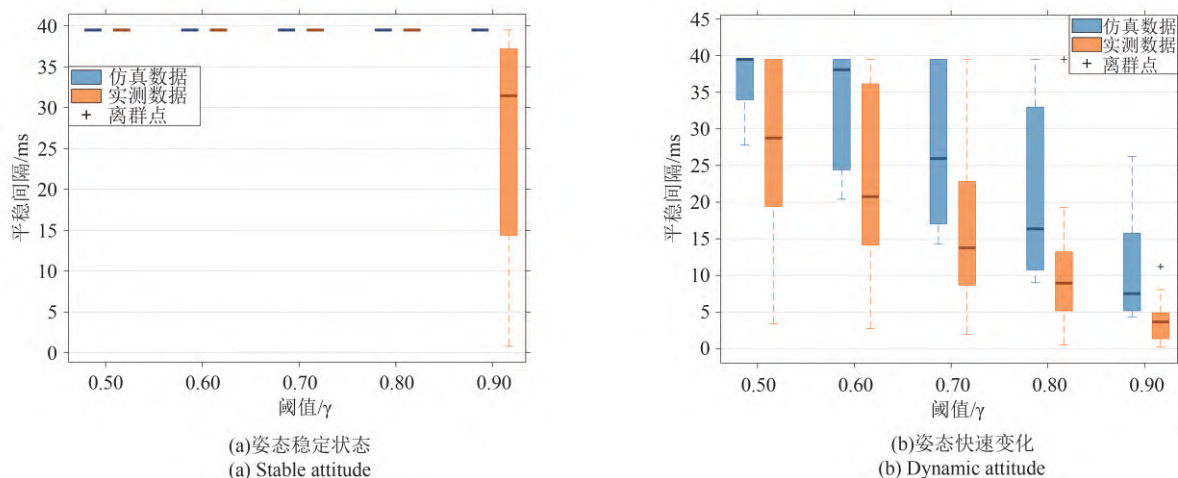


图7 无人机在40 m高度悬停时的平稳间隔

Fig. 7 Stationary intervals at a UAV altitude of 40 m

图8展示了当发射端在距离地面40 m处的四个不同的悬停位置,图9则展示了在这4个位置获得的空地信道的瞬时PDP瀑布图。这四个位置模拟了无人机从机载天线的天底增益零点(位置1)向高增益主瓣区域(位置4)的移动过程。如图9所示,随着无人机进入高增益区域,信道的功率时延结构发生显著变化:视距(LoS)路径的功率在总接收功率中的占比大幅提升,从位置1的微弱状态(被多径分量淹没)转变为位置4的绝对主导分量。

LoS路径主导地位的改变,直接重塑了信道的

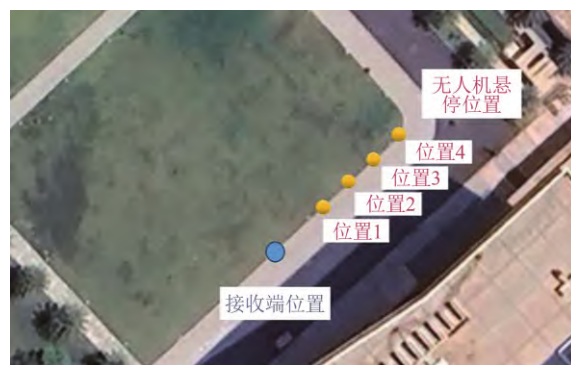


图8 测量场景示意图

Fig. 8 Illustration of the measurement scenario

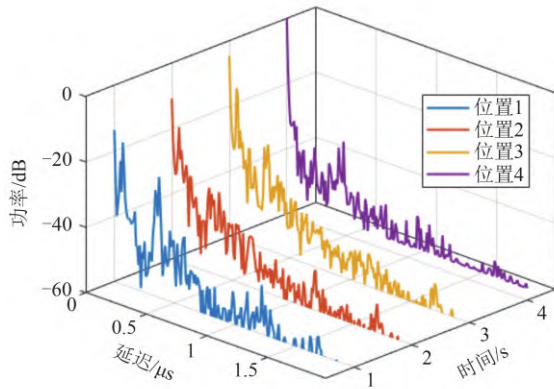


图9 不同空间悬停位置的PDP

Fig. 9 PDPs at different spatial hovering positions

时延弥散特性。图10展示了这四个位置下 S_r 的累积分布函数(Cumulative Distribution Function, CDF)。根据式(17), S_r 量化了多径分量在时延域的弥散程度。当信道能量(如位置1)分散在多个时延分量上时,时延扩展较大;而当能量(如位置4)高度集中在LoS主路径上时,时延弥散程度显著降低。实测数据清晰地印证了这一物理过程:在位置1处, S_r 的中位数值约为140 ns;随着测试位置变化至位置4, S_r 稳步下降至约40 ns左右。

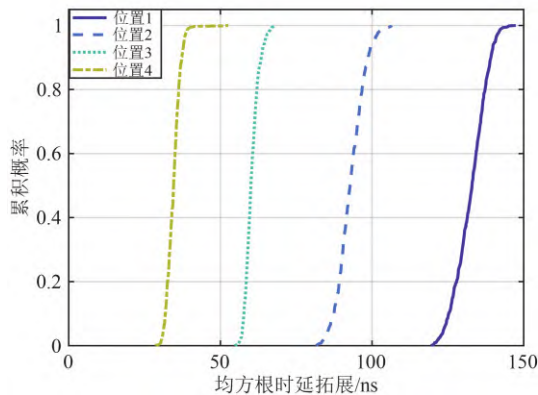


图10 不同空间悬停位置的均方根时延扩展CDF

Fig. 10 CDFs of RMS delay spread at different spatial hovering positions

根据信道理论的“不确定性原理”,时延扩展的减小必然导致相干带宽的增大。图11所示的 B_{coh} 的CDF完美验证了这一近似反比关系。在时延扩展最大的位置1,信道呈现强频率选择性,测得的 B_{coh} 中位数值约为4 MHz。随着 S_r 的减小,信道响应在频域上趋于平坦,频率选择性随之减弱。在LoS主导的位置3和位置4,由于 S_r 已足够

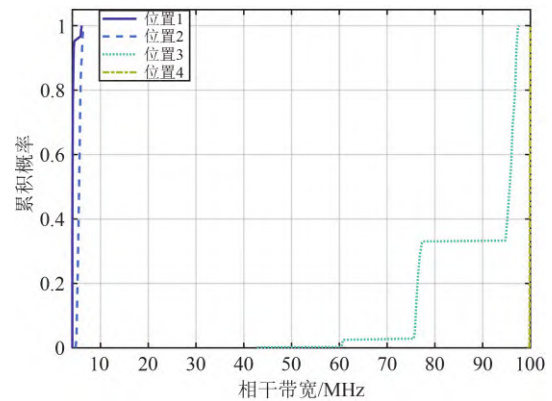


图11 不同空间悬停位置的相干带宽CDF

Fig. 11 CDFs of coherence bandwidth at different spatial hovering positions

小,测得的 B_{coh} 中位数均接近100 MHz,即本次测量的系统带宽上限。位置3和位置4的信道以LoS为主导,NLoS数量少且能量微弱,其功率时延谱呈“单峰”结构。此时,均方根时延扩展主要受微弱多径拖尾的影响,数值较小,因而相干带宽较大。相比之下,在位置1和位置2中,功率时延谱结构发生了根本性变化:LoS与强NLoS的强度接近,使得功率时延谱由单峰转变为双峰形态。因此,相干带宽的急剧下降,主要驱动力并非均方根时延扩展绝对值的微小增加,而是功率时延谱主导模式从“单主径”到“双强径”的根本性转变。当信道中存在两个强度相近、时延差显著的主导分量时,会在频域上引发剧烈的建设性与破坏性干涉,导致信道响应随频率快速波动,从而显著缩小了信道响应保持相关的频率范围,即相干带宽。

综上所述,无人机空间位置的变化通过天线方向图改变了LoS路径的主导地位,进而系统性地重塑了信道的频率选择性。实测的 S_r 与 B_{coh} 之间清晰的近似反比关系,不仅与经典信道理论高度吻合,也从频率平稳性的角度再次证实了天线辐射特性是A2G信道特性(包括时间平稳性与频率平稳性)的关键物理机制。

7 结论

本文基于自主研发的高精度A2G信道测量平台,对无人机悬停状态下的非平稳性进行了建模与实测分析,揭示并验证了一种由姿态抖动主导的非平稳机制。具体而言,信道的非平稳性不仅仅源于宏观位移,也来自无人机的姿态抖动。这种抖动导

致 LoS 在具有天底增益零点的天线上快速扫过,将微小角度变化放大为毫秒级上超过 10 dB 的功率衰减。最后,我们采用 APDP 相关性分析量化了这一影响:信道平稳间隔从姿态稳定时的超过 40 ms 急剧下降至扰动时的 1 ms 左右。

本文提出的空地信道非平稳特性建模和分析,对未来空地通信系统的天线选型提供了有效指导。具体而言,空地通信系统应采用零点凹陷更为平缓的天线,例如全向天线或经方向图整形优化的下视天线,从而可削弱姿态抖动对 LoS 增益的影响和对空地信道的非平稳性。然而,此类解决方案并非完美,全向天线因能量辐射弥散导致链路预算显著下降,进而影响无人机续航能力;而特定优化的下视天线在应对多机协同或大范围动态组网场景时,则面临增益受限与覆盖范围收缩的矛盾。因此,如何有效权衡天线增益、信号覆盖广度与抗扰动稳健性,并进一步探讨该非平稳机制在不同飞行高度、环境(如开阔区与密集城区)及风速等级下的普适性与演变趋势,是我们未来需要着重研究的课题。

此外,本文揭示的“姿态-方向图耦合”机理为信道自适应技术提供了可能的优化方向,即通过融合无人机实时位姿信息,构建具备预见性的“无人机位姿-信道非平稳特性”映射模型,从而支持对天线辐射变化特性的实时预测与提前补偿。

参考文献

- [1] KHUWAJA A A, CHEN Yunfei, ZHAO Nan, et al. A survey of channel modeling for UAV communications [J]. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2018, 20(4): 2804-2821.
- [2] ZENG Yong, ZHANG Rui, LIM T J. Wireless communications with unmanned aerial vehicles: Opportunities and challenges [J]. IEEE Communications Magazine, 2016, 54(5): 36-42.
- [3] LIU Jiajia, SHI Yongpeng, FADLULLAH Z M, et al. Space-air-ground integrated network: A survey [J]. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2018, 20(4): 2714-2741.
- [4] YOU Xiaohu, WANG Chengxiang, HUANG Jie, et al. Towards 6G wireless communication networks: Vision, enabling technologies, and new paradigm shifts [J]. Science China Information Sciences, 2020, 64(1): 110301.
- [5] 毕宿志. 空地协同通信定位一体化无人机应急部署优化 [J]. 物联网学报, 2024, 8(3): 1-15.
- [6] 程乐乐, 朱秋明, 陆智俊, 等. 无人机毫米波信道建模及统计特性研究 [J]. 信号处理, 2019, 35(8): 1385-1391.
- [7] CHENG Lele, ZHU Qiuming, LU Zhijun, et al. On the modeling and characteristics analyze for UAV-based millimeter wave channels [J]. Journal of Signal Processing, 2019, 35(8): 1385-1391. (in Chinese)
- [8] MATZ G. On non-WSSUS wireless fading channels [J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2005, 4(5): 2465-2478.
- [9] 毛开, 杨志强, 陆智俊, 等. 基于几何统计的无人机信道模型及硬件模拟 [J]. 系统工程与电子技术, 2019, 41(12): 2872-2878.
- [10] CHANG Hengtai, BIAN Ji, WANG Chengxiang, et al. A 3D non-stationary wideband GBSM for low-altitude UAV-to-ground V2V MIMO channels [J]. IEEE Access, 2019, 7: 70719-70732.
- [11] CHANG Hengtai, WANG Chengxiang, LIU Yu, et al. A novel nonstationary 6G UAV-to-ground wireless channel model with 3-D arbitrary trajectory changes [J]. IEEE Internet of Things Journal, 2021, 8(12): 9865-9877.
- [12] BIAN Ji, WANG Chengxiang, LIU Yu, et al. 3D non-stationary wideband UAV-to-ground MIMO channel models based on aeronautic random mobility model [J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2021, 70(11): 11154-11168.
- [13] BAI Lu, HUANG Ziwei, FENG Tao, et al. A non-stationary channel model for 6G multi-UAV cooperative communication [J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2024, 23(2): 949-961.
- [14] MA Zhangfeng, AI Bo, HE Ruisi, et al. A wideband non-stationary air-to-air channel model for UAV communications [J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2020, 69(2): 1214-1226.
- [15] HUA Boyu, HAN Liwei, DENG Qingzhe, et al. AAV

- air-to-air channel: Statistical properties and experimental verification [J]. IEEE Internet of Things Journal, 2025, 12(13): 25790-25803.
- [16] MA Zhangfeng, AI Bo, HE Ruisi, et al. Impact of UAV rotation on MIMO channel characterization for air-to-ground communication systems [J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2020, 69(11): 12418-12431.
- [17] BANAGAR M, DHILLON H S, MOLISCH A F. Impact of UAV wobbling on the air-to-ground wireless channel [J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2020, 69(11): 14025-14030.
- [18] YANG Xiaobo, ZHAI Daosen, ZHANG Ruonan, et al. Temporal correlation characteristics of air-to-ground wireless channel with UAV wobble [J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2023, 24(10): 10702-10715.
- [19] 房胜, 毛开, 王满喜, 等. 基于FPGA的无人机非平稳信道动态模拟研究 [J]. 航空兵器, 2024, 31(1): 89-96.
FANG Sheng, MAO Kai, WANG Manxi, et al. Research on dynamic emulation of non-stationary channel of unmanned aerial vehicles based on FPGA [J]. Aero Weaponry, 2024, 31(1): 89-96. (in Chinese)
- [20] 李浩, 朱秋明, 陈应兵, 等. 非平稳信道衰落FPGA实时模拟方法 [J]. 信号处理, 2018, 34(3): 368-375.
LI Hao, ZHU Qiuming, CHEN Yingbing, et al. A real-time FPGA-based emulation method for Non-stationary channel fading [J]. Journal of Signal Processing, 2018, 34(3): 368-375. (in Chinese)
- [21] MATOLAK D W, SUN Ruoyu. Air-ground channel characterization for unmanned aircraft systems; Part I: Methods, measurements, and models for over-water settings [J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2017, 66(1): 26-44.
- [22] RODRÍGUEZ-PIÑEIRO J, DOMÍNGUEZ-BOLAÑO T, CAI Xuesong, et al. Air-to-ground channel characterization for low-height UAVs in realistic network deployments [J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2021, 69(2): 992-1006.
- [23] BANAGAR M, DHILLON H S. Fundamentals of wobbling and hardware impairments-aware air-to-ground channel model [J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2024, 73(12): 17946-17962.
- [24] YANG Songjiang, ZHANG Zitian, ZHANG Jiliang, et al. Impact of rotary-wing UAV wobbling on millimeter-wave air-to-ground wireless channel [J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2022, 71(9): 9174-9185.
- [25] WANG Wei, ZHANG Wei. Jittering effects analysis and beam training design for UAV millimeter wave communications [J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2022, 21(5): 3131-3146.
- [26] MAO Kai, ZHU Qiuming, WANG Chengxiang, et al. A survey on channel sounding technologies and measurements for UAV-assisted communications [J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2024, 73: 1-24.
- [27] 杨羽欣, 雷泰雅, 华博宇, 等. 空地双向链路信道测量及统计特性研究 [J]. 航空兵器, 2025, 32(2): 67-73.
YANG Yuxin, LEI Taiya, HUA Boyu, et al. Research on measurement and statistical characteristics of air-to-ground bidirectional links channels [J]. Aero Weaponry, 2025, 32(2): 67-73. (in Chinese)
- [28] RODRÍGUEZ-CORBO F A, AZPILICUETA L, CELAYA-ECHARRI M, et al. mmWave channel stationarity analysis of V2X communications in an urban environment [J]. IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, 2023, 22(6): 1406-1410.
- [29] MAO Kai, ZHU Qiuming, QIU Yanheng, et al. A UAV-aided real-time channel sounder for highly dynamic non-stationary A2G scenarios [J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2023, 72: 6504515.
- [30] AOKI K, HONDA K. Measurement and analysis of the rician K-factor for low-altitude UAV air-to-ground communications at 2.5 GHz [J]. Drones, 2025, 9(2): 86.
- [31] BORISKIN A, SAULEAU R. Aperture Antennas for Millimeter and Sub-Millimeter Wave Applications [M]. Cham: Springer International Publishing, 2018.
- [32] BURMEISTER F, JACOB R, TRABL A, et al. Dealing with fractional sampling time offsets for unsynchronized mobile channel measurements [J]. IEEE Wireless Communications Letters, 2021, 10(12): 2781-2785.

作者简介



林泽泓 男, 2001年生, 广东揭阳人。深圳大学电子与信息工程学院在读硕士研究生。研究方向为无人机通信与信道建模。

E-mail: 2410044084@mails.szu.edu.cn



梁梦宇 男, 2001年生, 安徽亳州人。深圳大学电子与信息工程学院在读硕士研究生。研究方向为无线通信理论与系统设计。

E-mail: szu_lmy@163.com



赖嘉杰 男,2000年生,广东肇庆人。深圳大学电子与信息工程学院在读硕士研究生。研究方向为通信系统的硬件设计。

E-mail: 2310434018@email.szu.edu.cn



顾一帆 男,1990年生,新疆维吾尔自治区乌鲁木齐人。深圳大学电子与信息工程学院助理教授,博士。主要研究方向为无线通信系统、射频系统校准与测量、信息年龄及图神经网络。

E-mail: yifan.gu@szu.edu.cn



利健林 男,2002年生,广东河源人。深圳大学电子与信息工程学院在读硕士研究生。研究方向为无线通信及信号处理。

E-mail: 2400042056@mails.szu.edu.cn



毕宿志 男,1987年生,湖北黄冈人。深圳大学电子与信息工程学院教授,博士。主要研究方向为智能无线通信、智能边缘计算、低空通信与定位网络。

E-mail: bsz@szu.edu.cn



张 睿 男,1994年生,江苏南通人。深圳大学电子与信息工程学院助理教授,博士。主要研究方向为信号处理、低空通信、无限感知、机器学习等。

E-mail: zhrrygh@szu.edu.cn



全 智 男,1978年生,广西柳州人。深圳大学电子与信息工程学院特聘教授,博士生导师,博士。主要研究方向为6G与低空通信、通信网络科学仪器、人工智能与信号处理等。

E-mail: zquan@szu.edu.cn

(责任编辑:边熙淳)