# 基于最小校准的高度相关频谱活动模型跨年迁移

Amir Hossein Fahim Raouf, 和 Ismail G¨uvenc

arXiv:2601.03234v1 [eess.SP] 6 Jan 2026

摘要—**本文研究高度相关频谱活动模型及测量结果跨年的可迁移性。我们提出一种受物理规律启发的均值型随机几何模型，用于描述聚合干扰与分高度接收功率之间的关系，并为给定频段和测量活动提供三个可解释参数：1）视距转换斜率；2）转变高度；3）有效活动常数。对2023年至2025年间多个6 GHz以下频段的空中频谱测量进行分析后发现，下行链路（DL）和共享接入频段呈现持久的、由几何结构驱动的高度结构，且这种结构跨年保持稳定。相比之下，上行链路（UL）频段的高度依赖性较弱，且不存在可识别的转变，这表明干扰主要由活动动态而非传播几何结构主导。为量化模型复用的实际限制，我们评估了一种最小校准方法：从参考年份固定转变高度，并仅使用目标年份的两个高度分箱估计其余参数。结果还表明，所提出的方法能够对下行链路和CBRS频段进行准确预测，说明在稳定环境中实现低成本模型迁移是可行的；同时也凸显了均值场模型在上行链路场景中的适用性有限。**

索引词—**无人机、空中频谱测量、随机几何、干扰建模、高度依赖性、迁移校准。**

## I. 引言

准确表征高度依赖的无线电环境，是开展空中共存分析、干扰评估，以及设计涉及地面与空中节点的多层无线系统的先决条件 [1], [2]。尽管可以通过大规模测量活动构建三维（3D）频谱地图，但在多个年份、频段以及不断演进的网络部署中重复开展此类测量活动，成本高昂且往往难以实现 [2]。空中频谱测量平台提供了一种可扩展且灵活的替代方案。然而，如何将这些测量结果转化为紧凑、具有物理可解释性且可迁移的模型，仍是一项根本性挑战。

实测空中测量始终表明，接收功率与海拔之间呈非单调的高度依赖性 [3]–[5]。在较低海拔，随着视距（LoS）概率提高、阴影效应减弱，信号强度通常会增强。然而，超过某一临界海拔后，由于覆盖足迹扩大、路径长度增加，以及来自更多信号源的信号叠加，平均接收功率会衰减。仅均值随机几何模型提供了一种原理性框架，可利用少量具有明确物理意义的参数来刻画这一行为，例如有效路径损耗指数和高度相关活动项，而无需详细了解瞬时网络状态 [5], [6]。

一个关键的悬而未决问题是：根据某次测量活动估计出这些参数后，在现实的传播变化和网络演变下，它们能否跨年份迁移。现有研究大多强调在单个数据集内的样本内拟合精度，并隐含地假设推断出的参数具有时间稳定性 [4],[5], [7]。实际上，基础设施、流量模式和环境条件的长期变化会引入非平稳性，可能从根本上限制参数的复用。

本文研究一种物理信息驱动的平均场随机几何模型的跨年迁移能力。该模型基于空中频谱测量推导，用于描述聚合干扰。我们利用一次测量活动中校准的数据，评估该模型能否在几乎无需重新校准的情况下应用于后续年份。具体而言，我们研究海拔相关传播参数的可辨识性和时间稳定性，并评估仅通过两个海拔点进行校准是否足以维持预测精度。

## II. 仅均值海拔相关干扰模型

令 $\Phi \subset \mathbb{R}^2$ 表示密度为 $\lambda$ [6] 的活动地面发射机的齐次泊松点过程（PPP）。尽管地面部署并非严格服从泊松分布，但齐次 PPP 可有效近似在空间和时间上取平均的聚合干扰，因此足以用于一阶矩分析 [6]。我们考虑一架位于原点上方海拔 $H > 0$ 处的无人机（UAV）接收机。保护半径 $r_0$ 用于排除水平距离无人机投影点小于 $r_0$ 的发射机。

对于位于水平距离 $r$ 处的发射机，三维链路距离为 $R = \sqrt{r^2 + H^2}$。我们不将视距和非视距（NLoS）链路建模为独立的点过程，而是采用仅匹配均值的等效表示，将视距概率、路径损耗指数和阴影方差的影响吸收到随海拔变化的有效参数中。这种建模选择基于先前的空地测量研究，这些研究一致表明，平均接收

A. H. F. Raouf 和 ˙I. G¨uvenc 任职于美国北卡罗来纳州罗利市北卡罗来纳州立大学电气与计算机工程系（电子邮箱：amirh.fraouf@ieee.org；iguvenc@ncsu.edu）。本研究部分由美国国家科学基金会 CNS-2332835 号拨款资助。

功率随海拔呈平滑的非单调变化，而非发生突兀的状态转变 [3], [4]。因此，发射机的接收功率贡献建模为

$$P_{\mathrm{rx}}(r,H) = C_{\mathrm{eff}}\, S(H)\, R^{-\alpha(H)}, \tag{1}$$

其中， $C_{\mathrm{eff}}$ 为有效活动常数， $\alpha(H)$为高度依赖的路径损耗指数， $S(H)$为对数正态阴影效应因子。

$\alpha(H)$的高度依赖性由平滑的视距转变模型决定。根据普遍采用的空地信道模型 [3], ，视距概率表示为海拔的逻辑函数，

$$p_{\mathrm{L}}(H) = \frac{1}{1+\exp[-\beta(H-H_0)]}, \tag{2}$$

其中， $\beta$ 控制转变陡峭度， $H_0$ 表示视距与非视距条件等概率时的海拔。利用该概率，在固定的视距值与非视距值之间对路径损耗指数进行插值，

$$\alpha(H) = \alpha_{\mathrm{N}} - (\alpha_{\mathrm{N}} - \alpha_{\mathrm{L}})\, p_{\mathrm{L}}(H), \tag{3}$$

其中， $\alpha_{\mathrm{L}}$ 和 $\alpha_{\mathrm{N}}$ 分别表示对应于视距和非视距传播条件的路径损耗指数。阴影效应被建模为单位均值对数正态因子 $S(H)$，使得 $\mathbb{E}[S(H)] = 1$。阴影方差仅影响高阶统计量，不会进入均值表达式。因此，任何恒定功率偏移均被吸收到 $C_{\mathrm{eff}}$中。于是，海拔 $H$ 处的总接收功率可表示为

$$I(H) = \sum_{x\in\Phi,\, \|x\|\geq r_0} C_{\mathrm{eff}}\, S(H)\, R(x)^{-\alpha(H)}. \tag{4}$$

对式 (4) 关于点过程 Φ取期望，并应用坎贝尔定理 [6],，可得

$$\mu(H) = 2\pi\lambda C_{\mathrm{eff}} \int_{r_0}^{\infty} (r^2+H^2)^{-\alpha(H)/2}\, r\, \mathrm{d}r. \tag{5}$$

对于 $\alpha(H) > 2$，式 (5) 中的积分收敛为：

$$\mu(H) = 2\pi\lambda C_{\mathrm{eff}} \frac{(H^2+r_0^2)^{1-\alpha(H)/2}}{\alpha(H)-2}. \tag{6}$$

式 (6) 中的闭式表达式定义了仅考虑均值的随机几何模型，我们在全文中均使用该模型。该模型仅通过平滑的、依赖海拔的视距转变来捕捉海拔依赖性，并以具有物理可解释性的方式调节有效路径损耗指数。与依赖显式视距/非视距点过程稀疏化或高阶干扰统计量的方法不同，本文提出的公式将视距效应直接纳入一阶矩分析，从而得到一种简洁且便于解析处理的表示，与先前的无人机干扰均值场模型 [8], [9]相一致。

为便于跨频段比较，我们引入一个频率归一化活动指数，定义如下：

$$\tilde{C} = C_{\mathrm{eff}} \left(\frac{4\pi f_c}{c}\right)^2 \frac{1}{G_t G_r}, \tag{7}$$

其中， $f_c$ 为频段的中心频率， $c$ 为光速， $G_t$ 和 $G_r$ 分别表示发射机和接收机天线增益。该指标补偿了自由空间路径损耗和天线增益，从而得出与频率无关的有效辐射活动度量。这确保了不同频段和测量年份之间的比较一致。对于每次测量活动，我们使用闭式均值模型对按海拔分箱的数据进行最小二乘拟合，以估算˜参数（$\beta, H_0, C$）。

## III. 跨年度迁移校准

对多年份频谱测量的分析表明，尽管部分拟合参数在各次测量活动中大致保持稳定，其他参数则出现了可测量的漂移（见表 I）。为评估此类漂移对模型复用的影响，我们考虑一种双点迁移校准：仅使用目标年份的两个高度分箱来校准转变斜率 $\beta$ 和有效活动因子$C_{\mathrm{eff}}$，同时将转折高度 $H_0$ 固定为其在参考测量活动中得到的值。由于噪声贡献随海拔变化基本保持恒定，依赖海拔的趋势主要由干扰分量决定，因此该模型被视为平均干扰模型。

为使用最少的数据校准模型，我们从目标年份中选取两个高度分箱， $H_1$ 和 $H_2$，以及对应的测量平均功率 $Y_1$ 和$Y_2$ 。预测平均功率 $\mu(H)$ 可分解为幅度项 $C_{\mathrm{eff}}$ 和形状函数 $D$:

$$\mu(H) = C_{\mathrm{eff}}\, D(H;\beta,H_0), \tag{8}$$

其中， $D(H;\beta,\ H_0)$ 综合体现了随海拔变化的几何特性和传播效应。

为分离转变斜率 $\beta$，我们对测量值取对数比，从而消去线性缩放因子$C_{\mathrm{eff}}$：

$$\ln(Y_1) - \ln(Y_2) = \ln\left(D(H_1;\beta,H_0)\right) - \ln\left(D(H_2;\beta,H_0)\right). \tag{9}$$

我们通过最小化测量值与预测值的对数差之间的平方误差来估计 $\beta$：

$$\hat{\beta} = \arg\min_{\beta} \left| \ln\left(\frac{Y_1}{Y_2}\right) - \ln\left(\frac{D(H_1;\beta,H_0)}{D(H_2;\beta,H_0)}\right) \right|^2. \tag{10}$$

^一旦获得 $\beta$，即可通过直接代入求得 $C_{\mathrm{eff}}$：

$$C_{\mathrm{eff}} = \frac{Y_1}{D(H_1;\hat{\beta},H_0)}. \tag{11}$$

该两点程序仅使用两个观测值来辨识两个未知参数，因此代表了跨年迁移所需的最小校准。它并非旨在作为实用的估计策略，而是一项受控压力测试，用于揭示可辨识性极限以及对环境漂移的敏感性。校准海拔的选择应覆盖过渡区域，在该区域内，随高度变化的平均干扰平滑且可靠地变化。本文采用一个低至中海拔分箱和一个较高海拔分箱，以便在对转变斜率的敏感性与对测量噪声和模型失配的稳健性之间取得平衡。

表 I 拟合的高度相关模型参数和拟合优度指标。

| Year | Band | $\beta$ | $H_0$ [米] | $\tilde{C}$ | 均方根误差（分贝） | $R^2_{\mathrm{lin}}$ | $R^2_{\mathrm{dB}}$ |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 2023 | LTE B13 下行 | 0.29 | 22.1 | 1.90 | 2.74 | 0.30 | 0.81 |
| 2023 | LTE B13 上行 | 0.01 | -199.6 | $6.21\times10^{-4}$ | 0.56 | 0.91 | 0.03 |
| 2023 | 5G n5 下行 | 0.08 | 14.0 | 1.23 | 2.77 | 0.87 | 0.85 |
| 2023 | 5G n5 上行 | 0.06 | -31.0 | $2.46\times10^{-3}$ | 0.68 | 0.35 | 0.41 |
| 2023 | CBRS | 0.03 | -49.0 | $1.33\times10^{-3}$ | 0.35 | 1.00 | 0.90 |
| 2024 | LTE B13 下行 | 0.35 | 27.0 | 1.00 | 2.97 | 0.81 | 0.78 |
| 2024 | LTE B13 上行 | 0.02 | -120.8 | $2.61\times10^{-3}$ | 0.25 | 0.68 | 0.22 |
| 2024 | 5G n5 下行 | 0.08 | 14.3 | 1.11 | 2.26 | 0.94 | 0.88 |
| 2024 | 5G n5 上行 | 0.05 | -35.5 | $5.47\times10^{-3}$ | 0.40 | 0.64 | 0.71 |
| 2024 | CBRS | 0.05 | -14.3 | $1.38\times10^{-3}$ | 0.46 | 1.00 | 0.94 |
| 2025 | LTE B13 下行 | 0.16 | 19.3 | 1.25 | 1.98 | 0.67 | 0.89 |
| 2025 | LTE B13 上行 | 0.03 | -101.5 | $2.35\times10^{-3}$ | 0.31 | 0.60 | 0.20 |
| 2025 | 5G n5 下行 | 0.08 | 23.7 | 2.48 | 1.95 | 0.94 | 0.94 |
| 2025 | 5G n5 上行 | 0.05 | -32.5 | $1.20\times10^{-2}$ | 0.71 | 0.40 | 0.48 |
| 2025 | CBRS | 0.05 | -24.3 | $1.81\times10^{-3}$ | 0.44 | 1.00 | 0.90 |

## IV. 数值结果与讨论

所有数值结果均使用固定的视距和非视距路径损耗指数（$\alpha_{\mathrm{L}}$，$\alpha_{\mathrm{N}}$）=（2.2，3.6）评估仅均值随机几何模型；发射机密度为 $\lambda$ =$10^{-3}\,\mathrm{m}^{-2}$，保护半径为 $r_0 = 20\mathrm{m}$，天线增益为单位值，高度分箱范围为 $H \in [10, 160]\,\mathrm{m}$，分辨率为 5 m。

表 I 汇总了各频段和测量活动中拟合的高度相关模型参数及拟合优度指标。本文报告的拟合优度指标从互补角度反映了模型性能。线性域均方根误差（RMSE）量化接收功率的绝对误差，因此主要受高功率样本影响，对少量较大的偏差较为敏感。同样，线性尺度上的决定系数 $R^2_{\mathrm{lin}}$ 衡量线性尺度上方差的解释比例，容易受到罕见高功率事件的显著影响，即便高度依赖趋势的表示效果不佳，也可能得到较高的数值。相比之下，分贝域的决定系数 $R^2_{\mathrm{dB}}$ 评估对数尺度上的一致性，因此对相对（乘性）变化以及随海拔变化的趋势吻合度更敏感，同时较少受离群值影响。鉴于所提出的模型仅描述均值且由传播驱动，其重点在于捕捉高度依赖结构，而非瞬时功率水平，因此在评估参数可辨识性和跨年稳健性时，我们着重关注分贝域指标。

最后，估计得到的频率归一化活动指数$\tilde{C}$ 为理解测量网络的运行层级提供了物理依据。如表 I 所示，LTE 13 频段始终表现出最高的 $\tilde{C}$ ($\approx 10^{-5}$) 值，这与高功率、授权频段及广泛宏蜂窝部署的预期相符。相比之下，5G n5 频段产生中等数值（$\approx 10^{-6}$），反映出部署密度的差异，以及与传统 LTE 服务共享频谱的可能性。值得注意的是，CBRS 频段的参数值小了几个数量级（$\approx10^{-11}$），这与其功率受限的共享接入特性以及在小蜂窝架构中的主要应用相一致。此外，所有频段的上行链路（UL）条目所显示的$\tilde{C}$ 值始终低于相应的下行链路（DL）值，这可归因于较低的用户发射功率和间歇性传输模

˜式。这些明显的分层现象证实，$C$ 能够有效地将固有网络活动与频率相关的传播效应区分开来，使其成为一种稳健的跨频段表征指标。

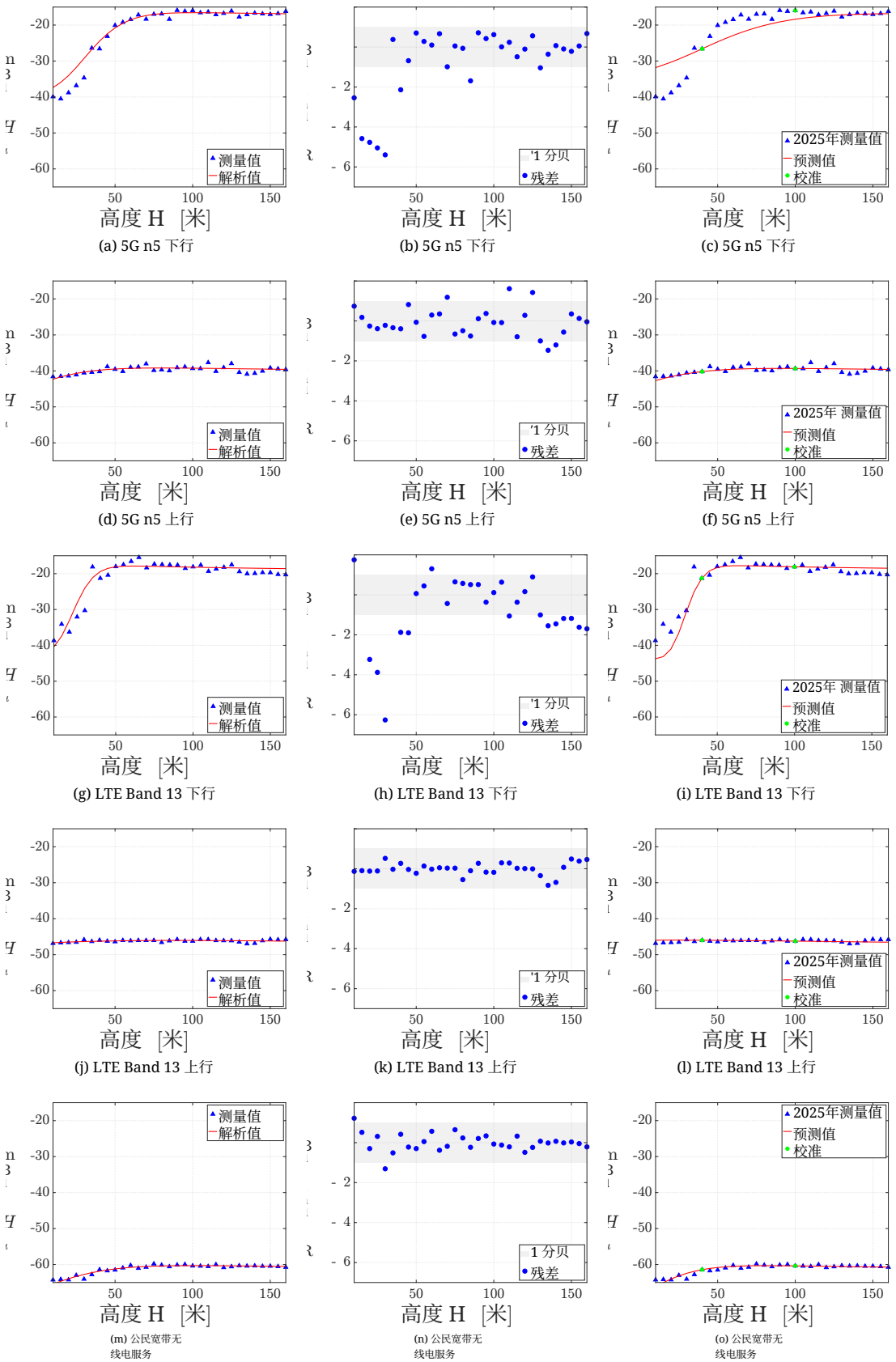
对于下行链路频段（LTE Band 13 下行和 5G n5 下行），拟合参数在不同年份间均保持稳定且具有明确的物理意义。转变高度 $H_0$ 始终位于测量值的海拔范围内（约 15–30 m），转变斜率 $\beta$ 取值适中，表明海拔依赖性存在可分辨但渐进的变化。这些频段在 dB 域中还表现出较高的拟合优度，说明仅均值模型能够准确捕捉主要的海拔趋势。相对较低的 $R^2_{\mathrm{lin}}$值反映了模型对线性尺度下少量高功率样本的敏感性，而非系统性建模误差。总体而言，这些结果表明，对于下行链路频段，海拔相关的几何效应构成了聚合干扰中占主导地位且持续存在的组成部分。

相比之下，上行频段（LTE Band 13 上行和 5G n5 上行）始终得到非常小的转变斜率和较大的负值 $H_0$。这些负的 $H_0$ 值并不具有海拔意义；相反，它们表明在观测到的海拔范围内无法识别出明确的视距转变。在这一状态下，逻辑斯蒂转变实际上退化为近似恒定函数，而 $\beta$ 的可辨识性较弱。上行频段始终较低的 $R^2_{\mathrm{dB}}$ 值支持了这一解释，尽管某些情况下的 $R^2_{\mathrm{lin}}$ 处于中等水平，这表明线性尺度下表面上的一致性是由总体功率水平驱动的，而非源于对高度依赖结构的准确建模。在实际应用中，这意味着仅均值高度依赖模型对于上行干扰的解释能力有限，因为活动变化性超过了几何传播效应的影响。

CBRS 频段呈现出明显的中间态特征。尽管 $H_0$ 随年份变化且取值为负，但拟合的转变斜率仍然较小且稳定，并且在线性域和 dB 域中，拟合优度指标始终较高。这表明，CBRS 干扰的平均值随海拔平缓且仅弱相关，模型能够很好地捕捉这一特征，无需明显的转变。

图 1 左列将 2025年按高度分箱的平均干扰（即 $10\log_{10}\langle I(h)\rangle$）与拟合的仅均值模型进行比较，前者以标记表示，后者以实线表示。中列给出了相应的 dB 残差。图中以 $\pm1$dB 带作为视觉参考。可以看出三种明显不同的行为。首先，两个下行链路频段（5G n5 下行和 LTE Band 13 下行）均表现出低海拔时显著上升，随后在中高海拔处趋于饱和（平均值近乎恒定）。在这两种情况下，模型都捕捉到了整体的 S 形转变和高海拔平台；然而，残差显示，在最低的几个高度分箱处存在系统性偏差。具体而言，在最低海拔处，下行链路残差约为 $-5$至 $-7$ dB，之后在大约过渡区域以外迅速趋近于零。这一模式表明，拟合曲线在极低海拔处始终高于测量值的平均值，而在其余海拔范围内则较为准确。

其次 ，上行频段（5G n5 上行和 LTE 频段




(a) 5G n5 下行 (b) 5G n5 下行 (c) 5G n5 下行

(d) 5G n5 上行 (e) 5G n5 上行 (f) 5G n5 上行

(g) LTE Band 13 下行 (h) LTE Band 13 下行 (i) LTE Band 13 下行

(j) LTE Band 13 上行 (k) LTE Band 13 上行 (l) LTE Band 13 上行

(m) 公民宽带无线电服务 (n) 公民宽带无线电服务 (o) 公民宽带无线电服务

图 1. 2025年多个频段中随海拔变化的平均干扰。左：测量平均干扰（标记）和拟合的仅均值模型（实线）随海拔的变化。中：测量均值与拟合均值之间的分贝域残差。右：迁移平均干扰模型，实线曲线显示将 $H_0$ 固定为 2024年，并使用两个 2025年高度分箱校准 ($\beta$, $C_{\text{eff}}$) 后得到的预测结果。

上行链路）在均值上几乎具有高度不变性，拟合曲线在整个海拔范围内都紧密贴合测量均值。这一结果反映了用户设备高度较低且处于杂波环境中的特点，因此缺乏产生可分辨视距转换所需的几何间隔。因此，平均干扰轮廓实际上不随海拔变化。闭环功率控制和突发式传输活动进一步强化了这种高度不变性；二者引入的变化掩盖了潜在的几何趋势。相应地，其残差紧密聚集在 0 分贝附近，且大多落在 $\pm 1$ 分贝频段内，没有出现下行链路中观察到的明显低海拔偏差。

第三，公民宽带无线电服务呈现平滑的均值轮廓，表现为逐渐上升后趋于饱和，这既反映了其部署特点，也体现了其双工结构。具体而言，在屋顶高度或接近屋顶高度运行的低功率共享接入节点会产生弥散的干扰场，不会像宏蜂窝下行链路频段那样出现明显的几何转换。这种表现还受到时分双工（TDD）的影响，因为上行链路和下行链路传输都会被纳入均值测量。由于高功率下行链路时隙主导总能量，测量均值仍保留了基站干扰特有的轻微海拔依赖趋势，而用户流量在时间上的混合则使不同海拔下的残差结构更加平滑。

图 1 右栏展示了高度依赖的平均干扰模型从 2024年到 2025年 的跨年迁移。将 $H_0$ 固定为其 2024年 的值，并仅使用 2025年 的两个高度分箱校准（$\beta$，$C_{\mathrm{eff}}$），会对模型施加结构约束。对于下行链路频段，拟合的 $H_0$ 始终为正，因此迁移模型能够成功再现校准区域之外的高度趋势。这表明，尽管存在参数漂移，高度剖面的函数形式仍足够稳健，可以支持有限迁移。

相反，上行链路频段表现出显著的跨年变异，且 $H_0$ 经常改变符号，这表明其缺乏稳定的转变结构。因此，将 $H_0$ 固定为前一年的值会导致迁移曲线受到的约束较弱，从而在校准分箱之外拟合优度较差（例如，LTE B13 上行的 $R^2_{\mathrm{dB}}$ 为负值）。在这些情况下，“迁移失败”归因于缺乏持续存在的高度依赖结构，而非校准方法本身。公民宽带无线电服务频段处于中间状态：尽管 $H_0$ 会变化，但平滑单调的干扰轮廓使两点校准能够恢复对 2025年 数据的合理近似。对于动态范围有限（≈ 4–5 分贝）的频段，精确的转变位置难以确定；因此，$H_0$ 的大幅变化对预测准确度影响甚微。

表 II 总结了迁移性能。迁移得分定义为迁移 RMSE 与基于 2025 年数据进行直接拟合所得 RMSE 的比值；接近 1.0 的值表示迁移方法的表现与使用完整数据集拟合相当。下行链路和 CBRS 频段的绝对误差适中（$\mathrm{RMSE}_{\mathrm{dB}} < 4$分贝），且 $R^2_{\mathrm{dB}}$为正。迁移得分介于 1.34 至 1.99 之间，表明尽管迁移会导致

表II 使用 40 m 和 100 m 两点高度校准进行 2024年至2025年跨年迁移的性能。

| Band | $\beta$ | $\tilde{C}$ | 均方根误差$_{\mathrm{dB}}$ | $\mathbf{R^2_{dB}}$ | Δ均方根误差$_{\mathrm{dB}}$ | 得分 |
|---|---|---|---|---|---|---|
| LTE B13 下行 | 0.19 | 1.28 | 2.77 | 0.79 | +0.79 | 1.40 |
| LTE B13 上行 | 0.03 | $2.17\times10^{-3}$ | 0.43 | −0.57 | +0.12 | 1.40 |
| 5G n5 下行 | 0.04 | 2.69 | 3.89 | 0.76 | +1.93 | 1.99 |
| 5G n5 上行 | 0.05 | $1.19\times10^{-2}$ | 0.75 | 0.42 | +0.04 | 1.05 |
| CBRS | 0.06 | $1.72\times10^{-3}$ | 0.59 | 0.81 | +0.15 | 1.34 |

与使用完整 2025 年数据集拟合相比，误差有所增大，但模型仍具有预测能力。上行频段的 $R^2_{\mathrm{dB}}$ 较低或为负，尽管其绝对 RMSE 较低，这反映出当底层响应方差较小时，$R^2$ 不稳定。

迁移得分定义为迁移模型的均方根误差与通过直接拟合获得的 2025 年拟合均方根误差之比；接近 1 的值表示性能相当，高于 1 的值则表示迁移导致性能下降。下行链路和共享接入频段（LTE B13 下行、5G n5 下行、公民宽带无线电服务）在跨年迁移后仍保留明显的高度依赖结构，表现为适中的绝对误差（均方根误差$_{\mathrm{dB}} < 4$ 分贝）、正的 $R^2_{\mathrm{dB}}$，以及接近 1 的迁移得分，表明相较于使用 2025 年数据进行直接拟合，性能下降有限。相比之下，上行频段的高度依赖性较弱或不一致，因此可能出现较低或为负的 $R^2_{\mathrm{dB}}$，尽管均方根误差$_{\mathrm{dB}}$较小；这反映的是高度转变结构的可辨识性有限，而非校准失败。对于此类频段，均方根误差比 $R^2$ 更具参考价值，因为当响应方差较小时，后者会变得不稳定。

## 五、结论

本文利用空中频谱测量研究了高度依赖的平均干扰模型的跨年可迁移性。基于仅均值随机几何框架，我们证明，对于下行链路占主导的频段和共享接入频段（包括公民宽带无线电服务），该模型能够准确且稳定地捕捉高度依赖结构，拟合参数在不同年份间保持稳定，且具有明确的物理意义。相比之下，上行频段始终表现出较弱的高度依赖性，且不存在可识别的转变，因此几何平均场模型的适用性有限。我们通过从2024年迁移至2025年的最简两点迁移校准评估了跨年复用：将转变高度 $H_0$ 固定为参考年份的取值，仅估计转变斜率 $\beta$ 和有效活动因子 $C_{\mathrm{eff}}$ 。结果因频段而异。对于下行链路和共享接入频段，迁移模型成功保留了主要高度趋势，性能仅有所下降，证实几何驱动的传播效应具有持续性且可复用。然而，上行频段的迁移表现主要受系统性偏差影响，这反映出其根本上缺乏稳定的高度结构，而非校准流程存在缺陷。总体而言，这些发现表明，只有在传播效应主导聚合干扰行为时，跨年复用高度依赖的平均模型才可行。实际应用中，这意味着在稳定环境下，下行链路和共享接入频段可能只需少量校准测量。

这项能力可大幅缩短测量活动的持续时间，并使窄带频谱传感器得以应用；这类传感器通常受扫描延迟 [10]限制。另一方面，上行链路干扰建模可能需要更密集的重新校准，或采用能够明确考虑流量变化和功率控制动态的其他建模形式。

## 参考文献

[1] M. Mozaffari、W. Saad、M. Bennis、Y.-H. Nam 和 M. Debbah，《无线网络中的无人机教程：应用、挑战与未解决问题》，*IEEE Commun. Surv. Tutor.*，第 21 卷，第 3 期，第 2334–2360 页，2019 年。[2] A. Fotouhi、H. Qiang、M. Ding、M. Hassan、L. G. Giordano、A. Garcia-Rodriguez 和 J. Yuan，《无人机蜂窝通信综述：实践层面、标准化进展、监管与安全挑战》，*IEEE Commun. Surv. Tutor.*，第 21 卷，3442，2019 4，3417 第 – 页。[3] A. Al-Hourani、S. Kandeepan 和 S. Lardner，《实现最大覆盖范围的最佳低空平台高度》，*IEEE Wirel. Commun.*，第 3 卷，572，2014 6，569第 – 页。[4] S. J. Maeng、A. H. F. Raouf、O. Ozdemir、T. Zajkowski、M. Mushi、M. L. Sichitiu、R. Dutta 和 I. Guvenc，《海拔相关的 6 GHz 以下无线频谱：综述、测量、趋势与建模》，*Authorea Preprints*，2025 年。[5] M. M. Azari、F. Rosas 和 S. Pollin，《无人机的蜂窝连接：网络建模、性能分析与设计指南》，*IEEE Trans. Wirel. Commun.*，第 18 卷，第 7 期，第 3366–3381 页，2019 年。[6] M. Haenggi，《无线网络的随机几何》。剑桥大学出版社，2013 年。[7] D. W. Matolak 和 R. Sun，《无人飞行器系统的空地信道特性分析——第三部分：郊区与近城市环境》，*IEEE Trans. Veh. Technol.*，第 66 卷，第 8 期，第 6607–6618 页，2017 年。[8] E. Chu、J. M. Kim 和 B. C. Jung，《基于随机几何的三维定向无人机网络干扰建模与分析》，*ICT Express*，第 5 卷，第 4 期，第 235–239 页，2019 年。[9] M. M. Selim，《概率性无人机激活下无人机辅助网络的随机几何分析》，*Sci. Rep.*，第 15 卷，37356，2025 1，第 p. 期。[10] A. C. Cullen、B. I. Rubinstein、S. Kandeepan、B. Flower 和 P. H. Leong，《动态频谱分配预测：涵盖仿真、建模与预测的综述》，*Artif. Intell. Rev.*，第 56 卷，第 10 期，第 10 921–10 959 页，2023 年。