面向高密度城市超可靠低时延 6G 无线通信的数字孪生

*注：副标题　　未被 https://ieeexplore.ieee.org 抓取，因此不应　　使用

1st Abdikarim Mohamed Ibrahim工程与技术学院 双威大学 八打灵再也，马来西亚 abdikarimi@sunway.edu.my

2nd Rosdiadee Nordin*FutureCities*研究院 双威大学八打灵再也，马来西亚 rosdiadeen @sunway.edu.my

arXiv:2601.07132v1 [eess.SY] 12 Jan 2026

摘要——**由于覆盖、干扰和服务可靠性对局部形态极为敏感，在密集城市中规划高频部署十分困难。本文构建了双威城的几何数字孪生（DT），并利用它研究多站点毫米波部署对服务的影响。该数字孪生由建筑物、道路和开放区域的地理配准三维网格构建而成，这些网格在 Blender 中组装后导出为网格场景。随后，将一个采用 10 GHz 的七发射机下行链路嵌入该几何结构中，并使用图形处理器加速的射线追踪引擎进行评估，得到密集用户位置网格上的路径增益和信号与干扰加噪声比（SINR）场。再将这些场映射为可实现吞吐量，并与沉浸式扩展现实（XR）、车联网（V2X）服务和超可靠低时延通信（URLLC）的代表性目标速率进行比较。结果地图显示，即使在密集区域内，条件良好的街道和庭院也会形成狭窄的高速率走廊，周围则是深度阴影区域。在基准部署中，模拟区域的五分之一能够维持 100 Mbps 的超可靠低时延通信速率，而能够达到 1.7 Gbps 扩展现实速率的小区不足 10%，尽管部署中设有多个屋顶站点。借助数字孪生，我们进一步量化了最佳与次佳服务站点之间的宏分集裕量，并发现大多数满足超可靠低时延通信条件的小区都具有数分贝的信干噪比余量，可通过双连接加以利用。本研究展示了城市数字孪生如何将射线追踪结果转化为以服务为中心的指标和规划见解，为解析模型和成本高昂的测量活动提供补充。**

索引词—**数字孪生、射线追踪、超可靠低时延通信、5G、城市部署。**

一、引言

目前，全球城市人口已超过40亿，世界上一半以上的居民如今仅居住在地球陆地面积的3%上 [1]。这种人口集中导致城市极度密集，纽约等特大城市的平均人口密度达到每平方英里29,303人。根据联合国《2025年世界城市化展望》，到2050年，地球上每十个人中将有近七人生活在城市，全球城市人口预计将达到68%，较 2020 [1]增长56%。此外，世界银行估计，有18亿人生活在面临城市洪水风险的地区，这表明建设高韧性基础设施的必要性 [2]。在这些人口密集的城市中，全球移动数据中有83%仅产生于地球陆地表面的5%上 [3]。在建筑物更高、更紧凑的特大城市中，与农村地区相比，网络负载可能进一步增加 [4]。因此，现有通信网络承受的负载日益加重，需要满足对低时延、大容量连接和全面覆盖的高需求。

为支持沉浸式扩展现实（XR）体验、协同车联网（V2X）协调以及超可靠低时延通信（URLLC）等未来城市应用，数字孪生（DT）正得到广泛应用。数字孪生可提供精确的测试平台，其中包含建筑布局、街道和开放区域，能够准确刻画覆盖范围和整体无线网络行为。人们提出数字孪生，旨在解决抽象通用模型的不足，例如适应性欠缺，以及采用僵化、简化的方法（如街区级街道布局、笔直路径或理想化材料属性）。

在数字孪生中，环境以集成无线电引擎的综合三维模型来呈现。由于数字孪生是对真实世界（此处即城市）的实际数字化表示，这种组合使人们能够在逼真的场景中开展分析。这有助于分析和预测路径损耗、干扰和容量等关键因素。同样，服务提供商和研究人员可以在投入昂贵的基础设施升级之前进行研究。这种方法也为其他行业带来了宝贵的洞见：制造工厂通常会为生产线创建数字孪生，以测试自动化策略、优化工作流程，并预测设备故障，而不会干扰实际运营。同样，在城市无线网络规划中，数字孪生能够为设计和验证下一代网络提供一种逼真、低风险的方法，确保高密度城市能够支持沉浸式扩展现实、协同车联网和超可靠低时延通信等高级应用。

请在此处注明适用的资助机构。如无，请删除此内容。

本文开发并分析了一个马来西亚双威城的数字孪生

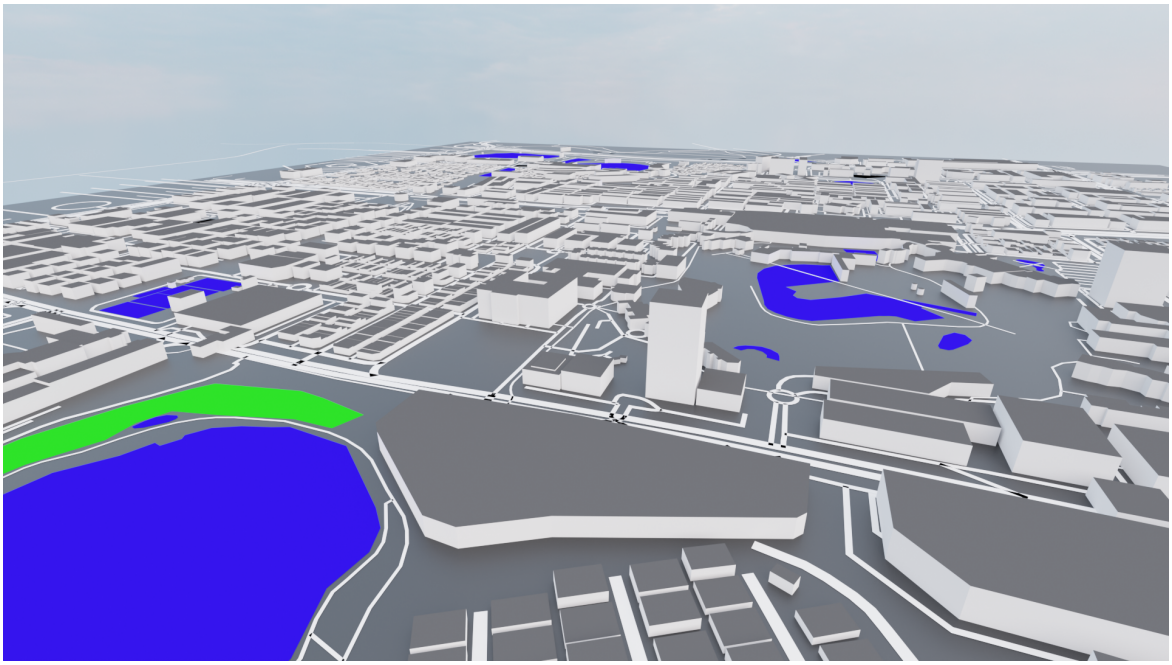


图 1. Sunway City DT 概览。

。该区域是一个密集的混合住宅区，包含一所大学校园、若干购物中心、湖泊、主要道路和紧凑的住宅楼群。该数字孪生由从 OpenStreetMap 提取的地理配准三维数据构建，并通过 Blosm 插件 [5]导入 Blender。图 1 展示了生成的双威城数字孪生。从图 1 中可以看到城市的整体布局；在 Blender 中，我们为场景中的各个元素指定无线电材料。借助 Sionna [6], 可以完成这一步骤；Sionna 是一个面向通信系统研究的开源硬件加速库。我们根据 ITU-R P.2040-3 建议书 [7] 和 Sionna 的材料命名规范，将数字孪生中的每个对象映射到一种无线电材料。例如，将混凝土材料指定给建筑物，对应的相对介电常数由参数 $a = 5.24$ 和 $b = 0$ 表示，电导率则分别由参数 $c = 0.0462$ 和 $d = 0.7822$表示。在分析中，我们使用 Sionna RT 分析数字孪生，并依据射线追踪引擎获得的结果进行定量评估。

本文受 Testolina等人 [8]的研究启发，采用类似的分析方法，为马来西亚双威城开发数字孪生。我们的贡献如下：

1) 我们提出了一个双威城的数字孪生，旨在用于5G及后续技术分析，其中包括对几何结构、无线电材料以及覆盖网格构建的说明。2) 其次，我们分析了扩展现实、车联网和超可靠低时延通信类业务流量的服务级别统计数据。在此分析中，我们量化了在所考虑的部署方案下，能够维持至少 100 兆比特每秒、700 兆比特每秒或 1.7 吉比特每秒的区域比例。这展示了数字孪生如何用于将物理层性能与应用层需求联系起来。

3）我们通过计算每个网格单元中最佳与次佳发射机之间的信干噪比余量，研究宏分集的潜力，并将分析范围限定在已满足超可靠低时延通信吞吐量阈值的位置。这可以确定双连接或协同多点方案还能获得多少额外信干噪比。

本文其余部分安排如下。第二节介绍 Sunway City DT，包括三维几何结构、发射机布置和网格生成。第二节还介绍传播和吞吐量评估方法。第三节展示覆盖、服务等级和宏分集结果。第四节总结面向 6G 城市部署的主要见解，并说明如何将 Sunway DT 复用为测试平台，以开发无线资源管理和优化算法。

II. 双威城数字孪生与部署场景

本研究基于双威城的几何数字孪生，重现了塑造这座城市中无线电传播特性的主要结构。模型包含多层住宅楼、大学校园、购物中心和办公综合体、中央湖泊以及周边道路。研究人员根据地理参考建筑轮廓和高度数据，使用 Blender 构建三维网格，并将所有对象置于同一局部坐标系中。这确保数字孪生中的距离（包括街道宽度）和视距（LoS）路径均能达到米级精度，符合实际情况。最终布局的俯视图

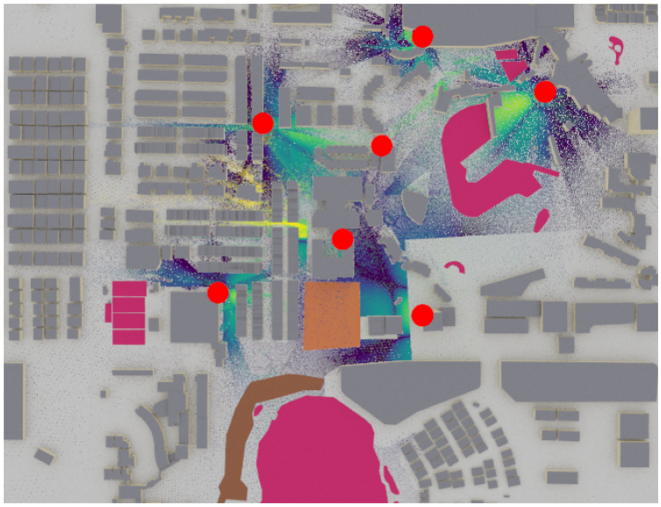


图 2. SunwayCity 数字孪生及所考虑的毫米波部署。红色标记表示七个发射机位置，彩色波束展示了用于生成校园覆盖网格的射线采样。

如图 2 所示，其中标出了所考虑的发射机站点。

基于该几何结构，我们在较高厘米波频段部署了具有代表性的宽带下行链路。七个基站（BS）布设在大学区域周围的屋顶上。数字孪生允许我们根据实际城市形态的约束布设发射机，而不是采用简化的网格。发射机的位置是随机的。由于大学区域大多人口密集、用户数量众多，因此我们随机布设了发射机。我们的目标是以最少的修改对数字孪生进行总体测试，以确保其有效性。尽管如此，每个站点都配备了平面阵列，遵循 3GPP 辐射方向图，采用垂直极化，并选取合适的下倾角，以覆盖附近区域和街道 [9]。所有发射机均工作在较高厘米波频段的同一载波频率上，这与面向高吞吐量服务的新兴宽带频谱分配相符。七站点布局旨在模拟未来城市中的密集 6G 热点部署；运营商将通过加密基础设施，满足未来应用对带宽和时延的需求。在周边多个屋顶上布设七个基站，还能从不同方位覆盖同一高需求区域，并形成真实的多站点干扰环境，同时将计算复杂度控制在模拟应用层目标可承受的范围内。具体而言，我们聚焦于三类主要应用：扩展现实（XR）、车联网（V2X）和超可靠低时延通信（URLLC），因为它们代表了推动未来城市转型的三大主要因素。例如：a）XR 能够实现沉浸式远程呈现和现场数字化指导，从而改变教育、旅游、远程维护和医疗服务；b）V2X 可实现更好的互联与自动化出行，并对道路安全产生影响；c）URLLC 支持闭环工业控制，包括工厂自动化、机器人巡检以及关键基础设施的安全监测。

这些应用体现了社会和工业需求，同时具有不同的服务质量（QoS）约束，因此可作为评估密集 6G 热点运行的代表性应用集合。发射功率、天线增益和噪声系数的选取，参考了典型的 5G 新空口毫米波部署以及 Sionna 库提供的默认配置 [6]。我们将地平面划分为规则网格，以一米为分辨率，在长宽各三公里的正方形区域内评估覆盖情况。这个 3km ×3 区域涵盖了双威城的主要地标，包括大学校园、购物中心和湖泊。网格中的每个小区代表一个用户位置，其接收机高度固定在地面以上，符合行人手持设备的高度。对于每个网格点，射线追踪引擎会根据网格几何结构和无线电材料定义，计算每个发射机与该位置之间所有路径的贡献，包括反射和绕射 [6]。根据这些路径，我们按照 3GPP 建模假设推导出发射功率、接收功率、干扰和噪声，这些因素会影响链路质量 [9]。Sionna RT 中的无线电地图求解器被用作处理所构建的 Sunway DT 的实现引擎。

对于每个网格单元（i, j），我们首先计算每个发射机可提供的信号质量，并据此选择服务节点：

$$t^{\star}(i,j) = \arg\max_{t} \ \mathrm{SINR}_{t}(i,j).$$

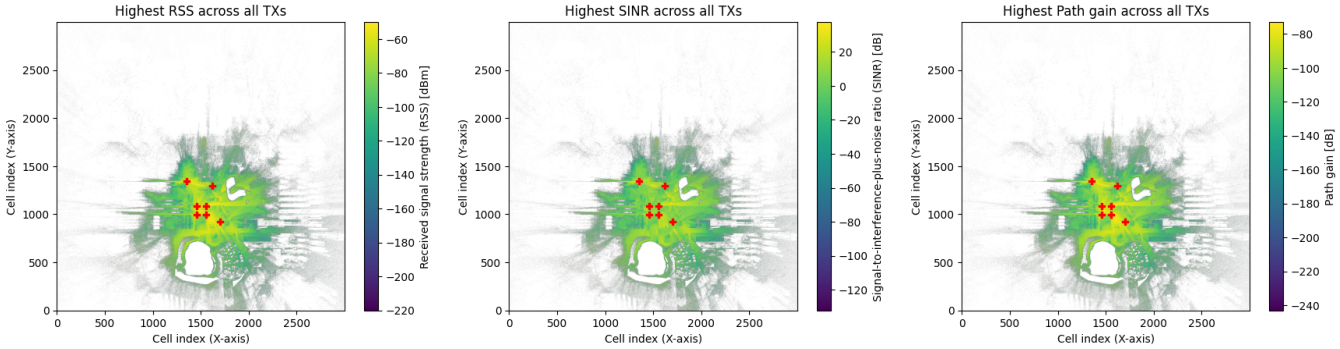
根据这一关联关系，我们利用 Sionna RT 获取 Sunway DT 上的三个空间场：a) 服务链路的接收信号强度（RSS）；b) 相应的信号与干扰加噪声比（SINR）；以及 c) 服务链路的路径增益。这些空间场将作为后续所有覆盖和服务等级分析的基础。为将物理层性能与应用服务目标联系起来，我们将每个小区的 SINR 转换为可实现吞吐量指标。假设采用高斯信号传输的单用户运行模式且链路条件理想，则网格单元（i, j）的频谱效率建模如下：

$$C(i,j) = \log_2\!\big(1 + \mathrm{SINR}(i,j)\big) \quad \text{[bit/s/Hz]}, \tag{1}$$

相应的吞吐量为

$$R(i,j) = B\,C(i,j), \tag{2}$$

其中 B 为系统带宽，单位为赫兹。此映射在 Sionna RT 输出的处理步骤之后应用，用于根据扩展现实、车联网和超可靠低时延通信等高要求应用的目标速率，为每个网格单元标记。量 $R(i,\ j)$ 表示理想链路条件下采用高斯信号传输时的物理层吞吐量。在运营网络中，编码差距、调度器决策和协议开销都会影响用户可见数据速率。因此，本文将 $R(i,\ j)$ 用作内部指标，以根据扩展现实、车联网和超可靠低时延通信的速率阈值对位置进行分类，并在所假设的部署条件下比较双威城布局的不同区域。表I总结了本文所用的主要参数

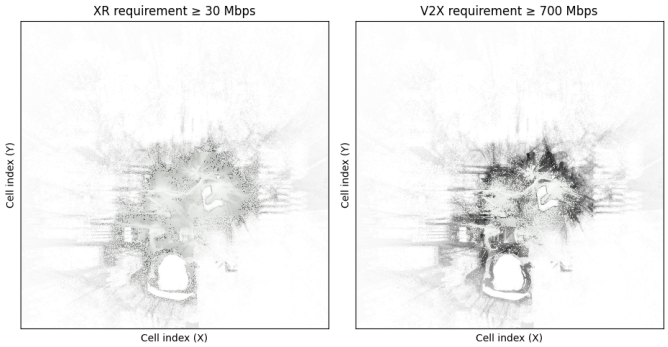


(a) 最大接收信号强度 (b) 最大信干噪比 (c) 最大路径增益

图3. Sunway网格上的大尺度下行链路场。对于每个小区，选取最佳服务发射机，并绘制相应的 (a) 接收信号强度、(b) 信号与干扰加噪声比，以及 (c) 路径增益。红色标记表示发射机站点。

表I 部署和仿真参数。

参数	值
研究区域	3 千米 × 3千米
基站数量	7 个屋顶站点
载波频率 f_c	10 吉赫兹
带宽 B	400 兆赫兹
发射功率 P_{tx}	30 dBm
天线方向图模型	3GPP TR 38.901 [9]
极化	垂直
用户设备高度 h_{UE}	1.5 米
网格间距 Δ	2 m
最大反射次数（即阶数）	3
衍射	已启用
XR 速率阈值	30 兆比特每秒 [8]
V2X 速率阈值	700 兆比特每秒 [8]
URLLC 速率阈值	100 兆比特每秒 [?]



（a）扩展现实要求 ≥ 30 兆比特每秒。 （b）车联网要求 ≥ 700 兆比特每秒。

图4. 双威城关注区域的服务等级视图。黑点表示可实现吞吐量达到指定最低速率阈值的网格单元，具体为：（a）扩展现实要求 $\geq$ 30 兆比特每秒；（b）车联网要求 ≥ 700 兆比特每秒。图中显示，较高速率的服务集中在得到良好服务的街道和开放区域周围的局部区域，而在假设部署七个站点热点的情况下，该区域的大部分范围仍低于这些最低要求。

分析。为了将物理层指标 $R(i,\ j)$ 与服务等级目标联系起来，我们采用扩展现实和车联网的代表性速率阈值，这些阈值与 [8] 中使用的速率类似；此外，还采用了超可靠低时延通信中常用的速率 [10]。

III. 覆盖与服务等级分析

我们使用数字孪生来研究覆盖和服务等级指标。目标是通过射线追踪引擎验证数字孪生，并通过应用层分析对其进行测试。具体而言，我们考察图 2 所示部署下，可视化区域（即大学校园附近）有多大范围能够支持扩展现实、车联网和超可靠低时延通信类型业务流量的目标比特率。图 3 展示了双威城内 3 km $\times$ 3km 网格范围内的大尺度场分布。每个像素对应用户设备高度处的一个网格单元，红色叉号标出了七个发射机位置。图 3 (a) 展示了所有发射机的接收信号强度。大学走廊、中央大道以及面向湖泊的开放区域等明亮区域，表明视距路径较强。另一方面，高层住宅区块后方或侧街沿线的较暗区域则处于深度阴影中，接收信号强度低于 -140dBm。图 3 (b) 展示了相应的最大信干噪比，其中包含来自所有非服务站点的干扰。与接收信号强度指标相比，信号与干扰加噪声比的变化更不规则，其中一些接收信号强度较高的位置会出现由于它们受到多个站点以几乎相同强度照射，因此出现信号与干扰加噪声比劣化。图3（c）显示了最大路径增益，其分布与接收信号强度场一致，但突出了高层建筑周围的阻挡情况，使其更易观察。

图4给出了服务等级视图。右侧面板（图4）在同一区域上叠加了黑点，用于标记吞吐量超过扩展现实和车联网阈值的小区。图4左侧子图采用适中的扩展现实目标速率30兆比特每秒，显示中央校园的大部分区域都能够维持这样的速率，空洞主要出现在狭窄的小巷和高大建筑群后方。右侧子图采用要求更高的车联网目标速率700兆比特每秒；此时黑点集中在靠近站点的最强波瓣周围以及少数有利的街道走向上，说明随着速率要求提高，覆盖范围会迅速缩小。

图 4 总结了大学校园附近扩展现实和车联网的服务可行性。在两幅图中，灰度背

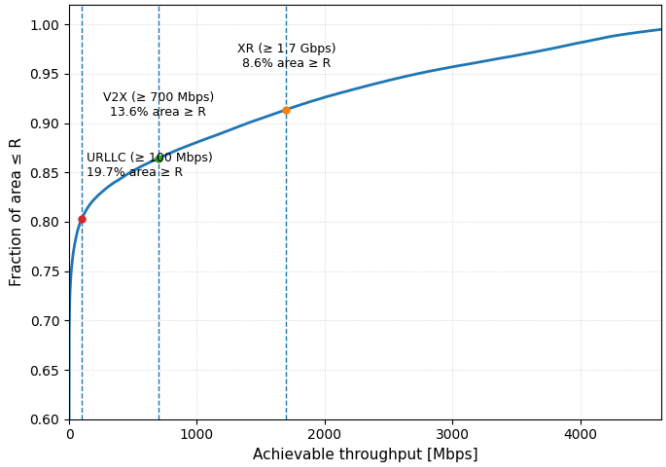


图 5. Sunway布局上单个小区可实现吞吐量的经验累积分布函数。垂直虚线标示了扩展现实、车联网和超可靠低时延通信的工作点，以及满足各目标的区域比例。

景表示底层传播环境。黑点标出了满足相应吞吐量阈值的网格单元。将扩展现实的需求设为 30 兆比特每秒时，中央校园的大部分区域都属于可行区域，缺口主要出现在狭窄的小巷中。当车联网应用的阈值提高到 700 兆比特每秒时，可行区域急剧收缩，集中在靠近这些区域及沿着最佳街道走向的少数几个强波瓣周围，体现了在现实城市布局中提供高速率业务的难度。

为全面了解用户体验，我们接着考察整个网格上单个小区吞吐量的经验累积分布函数。如图 5 所示，曲线在低速率区域较为陡峭。大多数小区的运行吞吐量接近吞吐量范围的低端，只有较小一部分小区在最佳位置达到多千兆比特速率。根据最低业务阈值评估累积分布函数后，我们发现，约有 9.8% 的区域可提供至少 1.7 Gbps（扩展现实目标），约有 13.9% 的区域支持至少 700 兆比特每秒（车联网目标），而网格中有 19.0% 的区域可支持至少 100 兆比特每秒（即超可靠低时延通信目标）。这些百分比不可相加，因为各阈值是逐级嵌套的。因此，结果还表明，在假设的部署方案下，约有 81.0% 的区域低于 100 兆比特每秒，未达到超可靠低时延通信的最低目标。在达到超可靠低时延通信阈值的位置中，约有 5.1% 的区域处于 100 至 700 兆比特每秒之间，约有 4.1% 处于 700 兆比特每秒至 1.7 Gbps 之间，另有 9.8% 超过 1.7 Gbps。这些趋势与密集城区宽带试验的报告一致；即使采用密集部署，服务良好区域与服务欠佳区域之间仍可观察到明显的突变 [11], [12]。从规划视角看，这些统计数据量化了在所考虑的站点部署方案下，双威城数字孪生中有多大区域可用于不同业务类别，并指出了增设站点、进行波束优化或采用多连接最能发挥作用的区域。

除了单链路可行性之外，数字孪生还可用于评估宏分集和双连接的潜力。

对于每个已达到超可靠低时延通信速率目标的网格单元，我们计算最佳发射机与次佳发射机之间的信号与干扰加噪声比差值，并将该差值视为宏分集余量。图 6 中的空间分布图显示，有大片区域内两个（或更多）站点提供的信号质量相近。校园区域内的典型值远高于 6 dB，而且在许多位置，次佳链路与主链路之间仅相差几分贝。针对具备超可靠低时延通信能力的小区绘制的相应累积分布函数显示，几乎所有这类位置的余量至少为 3 dB，且间隔中位数超过数十分贝。这表明，在大多数能够实现目标速率的位置，都有充足的余量来启用第二条链路，而不影响主链路。从运营商视角来看，这说明 Sunway部署提供了良好的宏分集选项结构，可供多连接协议和调度器利用。

分析表明，数字孪生不仅可用于视觉呈现，还可支持定量规划工具等实际分析。从特定的屋顶部署出发，双威数字孪生可得出扩展现实、车联网和超可靠低时延通信的覆盖率，以及宏分集裕量；这些数据可叠加显示在大学校园、主干道、公园和周边住宅楼群等区域上。这弥合了抽象、通用的信道统计数据与运营商在决定新增站点、波束优化或多连接应优先部署于何处时所面临的问题之间的差距。本研究补充了 BostonTwin [8] 等近期城市级数字孪生项目，通过以真实的混合用途城区为基础开展分析，并报告与新兴 6G规划实践相契合的面向服务的指标 [?], [13]。

IV. 结论

我们构建并分析了双威城的数字孪生，以了解密集高频部署在现实中能够为要求严苛的 6G服务提供怎样的性能。我们以地理配准的建筑物、道路和开放空间三维网格为基础，随后使用 Blender 构建城市规模的模型，并在其中部署了七个站点，采用 10 GHz 下行链路和 400 MHz 带宽。我们使用射线追踪引擎，针对用户位置网格生成路径增益和信号与干扰加噪声比场，再将这些场映射为可达速率，以表征扩展现实、车联网和超可靠低时延通信应用的目标。结果表明，在城市枢纽区域密集部署七个站点后，仍只有少数覆盖范围能够维持数百兆比特每秒或吉比特每秒的速率。扩展现实和车联网的阈值在有利的走廊区域和开放式庭院内得以满足。许多背街小巷和遮挡区域的吞吐量则降至低得多的水平。超可靠低时延通信在 100 Mbps 下的覆盖大多达标，但仍不均匀，住宅区块的大片区域低于期望速率。这些分布特征受双威数字孪生中的实际街道布局、屋顶高度和庭院影响，难以通过抽象的网格模型预测或预判。数字孪生还使我们能够研究宏分集，从而获得更多见解。在已经达到超可靠低时延通信目标的小区中，最佳发射机与次佳发射机之间的差距达到数分贝。

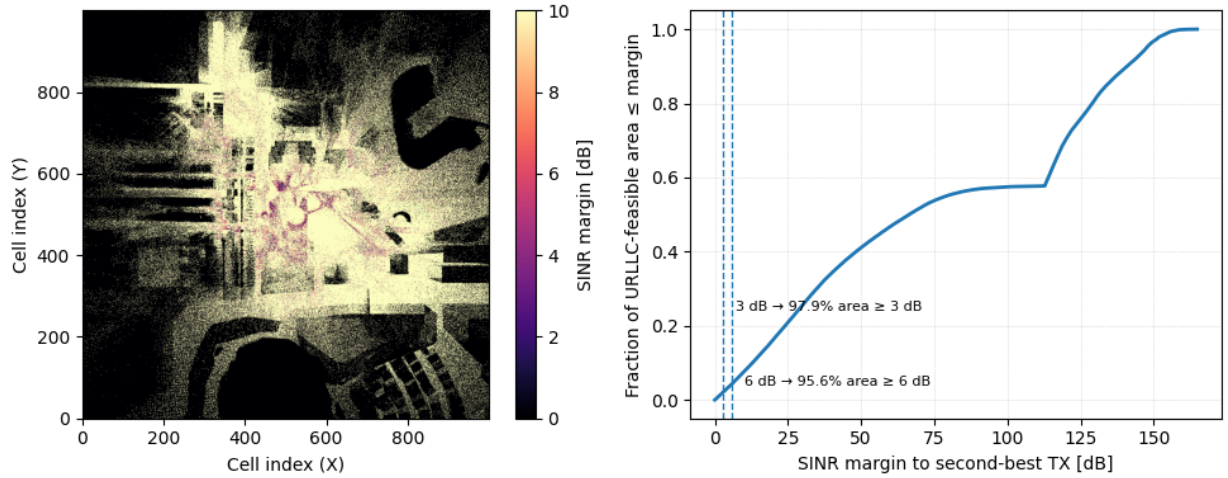


图 6. 部署的宏分集潜力。裕量定义为最佳发射机与次佳发射机之间的信号与干扰加噪声比差值。图 (a) 展示了该裕量的空间分布。图 (b) 绘制了仅针对已满足 URLLC吞吐量要求的小区的经验累积分布函数，突显了双连接可利用的额外信号与干扰加噪声比。

如果对网络进行相应设计以充分利用这一点，那么双连接或协同传输便可在不增加站点数量的情况下显著提升可靠性。

未来的研究可以扩展这一数字孪生，进一步测试高密度城市中的下一代网络部署。未来，我们计划将当前的数字孪生与测量活动和动态流量模型相结合，使其成为评估6G服务规划策略的动态测试平台。具体而言，我们已收集双威城周边基站的真实世界数据，计划将基站部署在其实际位置并进行比较，同时加入能够预测数字孪生中切换行为的智能模型。未来的研究可以扩展这一数字孪生，在高密度城市环境中测试下一代网络部署。在下一阶段，我们计划将当前的数字孪生与测量活动和动态流量模型相结合，使其发展为用于6G服务规划和优化的动态测试平台。

致谢

作者感谢马来西亚高等教育部通过基础研究基金计划（编号：FRGS/1/2022/ICT09/SYUC/03/1）资助本研究。作者衷心感谢使本研究得以开展的资金支持。

参考文献

[1] 联合国经济和社会事务部人口司，《2025年世界城市化展望：成果摘要》。https://population.un.org/wup/，2025年。[2] J. Rentschler、M. Salhab 和 B. A. Jafino，《洪水风险已影响18.1亿人。气候变化和无序城市化可能加剧其暴露风险》，世界银行博客。*https://blogs. worldbank. org/climatechange/flood-risk-already-affects-181-billionpeople-climate- change-and-unplanned*，2022年。[3]GSMA，《GSMA 2040愿景：移动通信行业在可持续未来中的作用》。https://www.gsma.com/newsroom/press-release/6g-mobile-networks-will-need-up-to-three-times-todays-spectrum-to-meet-surging-data-demands-new-gsma-report-shows/，2025年。

[4] C. Drubin，《爱立信移动市场报告：先行者探索以性能为导向的商业模式》，《微波杂志》，第68卷，第1期，2025年。[5] vvoovv，《Blender 的 Blosm 插件：OpenStreetMap、Google三维城市和地形》。GitHub 仓库，2021年。版本v2.4.21（提交 565e5de）。[6] F. A. Aoudia、J. Hoydis、M. Nimier-David、S. Cammerer 和 A. Keller，《Sionna RT：技术报告》，*arXiv* 预印本 *arXiv:2504.21719*，2025年。[7] V. A. Mikhnev、D. B. But、T. Zugnoc、M. Boban、J. Eichinger 和 W. Knap，《太赫兹频域光谱对建筑材料的表征，以及面向亚太赫兹频段的 ITU-R P.2040 模型扩展》，《*IEEE*太赫兹科学与技术汇刊》，2025年。[8] P. Testolina、M. Polese、P. Johari 和 T. Melodia，《波士顿数字孪生：用于6G网络射线追踪的波士顿数字孪生》，载于第*15*届*ACM*多媒体系统会议论文集，第441–447页，2024年。[9] Q. Zhu、C.-X. Wang、B. Hua、K. Mao、S. Jiang 和 M. Yao，《3GPP TR 38.901信道模型》，载于*Wiley 5G*参考资料：在线*5G*必备参考，第1–35页，Wiley出版社，2021年。[10] S. R. Pokhrel、J. Ding、J. Park、O.-S. Park 和 J. Choi，《迈向关键机器类通信：大规模机器类通信中的超可靠低时延通信综述》，《*IEEE Access*》，第8卷，第131796–131813页，2020年。[11] T. S. Rappaport、G. R. MacCartney、M. K. Samimi 和 S. Sun，《面向未来无线通信系统设计的宽带毫米波传播测量与信道模型》，《*IEEE*通信汇刊》，第63卷，第9期，第3029–3056页，2015年。[12] B. Halvarsson、K. Larsson、M. Thurfjell、K. Hiltunen、K. Tran、P. Machado、D. Juchnevicius 和 H. Asplund，《在28吉赫室外城市环境中演示5G NR覆盖、性能和波束管理》，载于*2018*年 *IEEE 5G*世界论坛（*5GWF*），第416–421页，IEEE，2018年。[13] L. Yu、Y. Miao、J. Zhang、S. Liu、Y. Zhang 和 G. Liu，《迈向6G数字孪生网络：多任务自适应射线追踪是关键赋能技术》，*arXiv* 预印本 *arXiv:2502.14290*，2025年。