利用数字孪生在高密度城市中进行几何感知型 LoRaWAN 网关部署

*注意：未捕获副标题 https://ieeexplore.ieee.org 的副标题未被捕获，不应 使用

1st Abdikarim Mohamed Ibrahim双威大学工程与技术学院马来西亚八打灵再也
abdikarimi@sunway.edu.my

2nd Rosdiadee Nordin双威大学*FutureCities* 研究院马来西亚八打灵再也
rosdiadeen
@sunway.edu.my

arXiv:2601.07133v1 [eess.SY] 12 Jan 2026

摘要——**LoRaWAN 部署通常依赖粗略的覆盖范围估算或简化的传播模型来决定网关的安装位置。因此，运营商难以了解屋顶选择、街道和建筑物遮挡如何共同影响覆盖和可靠性。本文通过将几何精确的数字孪生（DT）与图形处理器加速的射线追踪引擎相结合，研究密集城市环境中的网关部署问题。现有研究通常在抽象网格上优化选址，或利用稀疏测量数据调整模型；鲜有研究使用真实的链路预算，在完整的三维城市模型上评估 LoRaWAN 网关。本文构建了采用 ITU 无线电材料的数字孪生，并依据数据表推导亚千兆赫链路预算，对 RAK7289 WisGate Edge Pro 网关的八个候选屋顶进行评估。对于每个屋顶，我们在 5 米网格上获取信噪比（SNR），得出稳健覆盖和边缘覆盖指标，并应用贪心最大覆盖算法对站点排序，量化渐进式密集部署带来的收益。结果表明，在稳健信噪比阈值下，单个屋顶网关可覆盖 Sunway 数字孪生（即该 DT）整体区域的五分之一；即使部署六个站点，周边住宅街道仍有大片区域仅受单个网关覆盖或处于覆盖盲区。本文的研究结果表明，数字孪生和射线追踪工具能够帮助网络运营商弥合昂贵的真实场景测试与规划之间的差距，判断计划部署的 LoRaWAN 网关是否足够，或是否需要增设站点。**

索引词—**LoRaWAN、网关部署、数字孪生、城市射线追踪、智慧城市**

I. 引言

低功耗广域网（LPWAN）一直是智慧城市和农村地区的关键基础设施之一，能够支持环境监测 [1], [2],自动化 [3], 医疗保健[4], 以及农村地区的连接等物联网（IoT）应用 [5], [6]。其受欢迎的原因在于功耗低、覆盖范围可达数公里，且电池续航时间长达数年 [7], [8]。在各种低功耗广域网方案中，LoRaWAN 凭借其开放的生态系统和可靠的啁啾扩频调制而成为使用最广泛的方案，并已证明其在高密度城市区域表现良好 [9]。在这些区域，网络运营商希望通过少量网关支持数千个低成本传感器。因此，网关在可用屋顶和塔上的部署方式会直接影响覆盖范围、可靠性以及最终网络的成本。

请在此处填写适用的资助机构。若无，请删除此句。

已有多项研究探讨了 LoRaWAN 的性能，采用了链路预算分析、真实环境测量活动和高层级系统仿真 [9]–[12]。然而，城市中的实地测试结果不尽相同：实际覆盖距离可能远低于宣称的数公里，并且会因高层建筑、街道布局等因素而在不同区域迅速缩短；城市形态的差异也使确切的覆盖区域呈不规则分布。为解决这一问题，研究人员开发了分析型或经验型路径损耗模型，并将其应用于模拟实际部署区域的简化网格，以估算潜在覆盖区域和最佳网关部署 [13]。这些模型的主要问题在于缺乏对部署环境的准确细节。研究人员也从网络优化的角度研究了网关部署和 LoRaWAN 性能，并提出整数规划、理论启发式方法和元启发式方法，以最大化覆盖范围或尽量减少网关数量 [14]。然而，这些研究大多采用结合随机阴影衰落的对数距离路径损耗模型。因此，这些模型本质上难以捕捉密集城市的城市形态如何影响 LoRaWAN 覆盖。近期关于数字孪生和 GPU 加速射线追踪的研究表明，在城市尺度上实现基于精确几何信息的传播预测是可行的 [15]，但迄今为止，这些工具主要应用于更高频段的第五代移动通信和第六代移动通信场景，而非亚千兆赫低功耗广域网规划。

本文通过结合马来西亚双威城的几何精确数字孪生与针对商用室外网关（即 RAK7289V2 WisGate Edge Pro）校准的 LoRaWAN 链路预算，弥补了这一研究空白。图 1 展示了双威城数字孪生。该数字孪生使用 Blender 和 OpenStreetMap 构建，涵盖数平方公里范围内的建筑物轮廓及高度、道路、水域和开放空间，并导入采用基于国际电信联盟标准的无线电材料的 Sionna 射线追踪引擎中 [16]。此外，根据由 Sionna 得到的路径

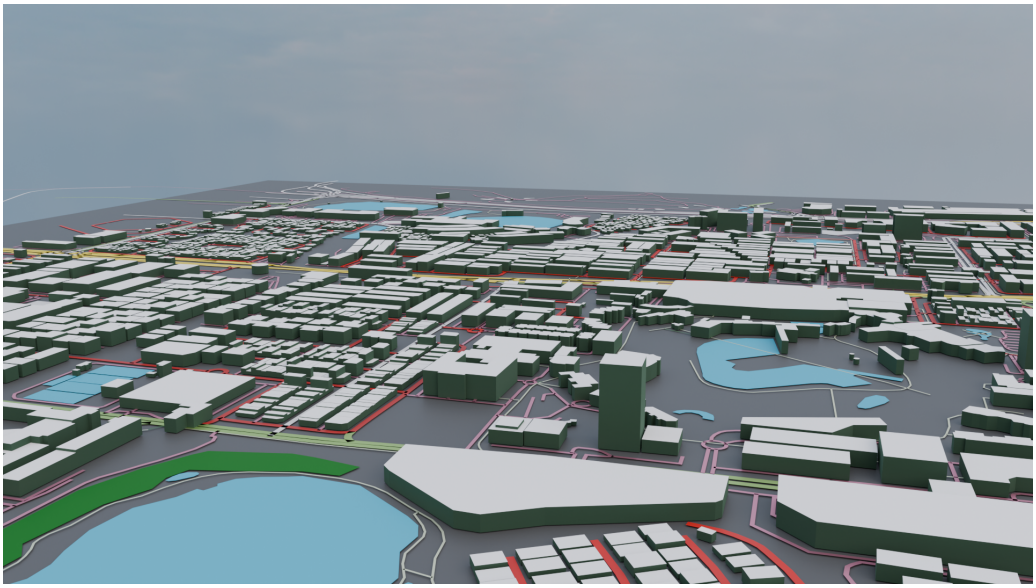


图1. 双威城数字孪生概览。

增益图，我们构建了一个预算化最大覆盖问题：从一组真实的候选位置中，最多选择 K 个屋顶，以最大化达到指定 LoRa 信噪比 (SNR) 阈值的区域比例。具体而言，本文的主要贡献如下：

- 我们开发了一种 LoRaWAN 规划框架，该框架基于结合射线追踪的数字孪生，并采用基于商用室外网关的明确链路预算。
- 我们将网关部署建模为数字孪生上的预算化最大覆盖问题，并应用贪心优化算法对屋顶进行排序，同时量化覆盖随所部署网关数量变化的情况。
- 我们分析了覆盖、冗余（即超过给定阈值的每个小区对应的网关数量）以及数字孪生上的最佳网关关联区域，展示了单个网关部署足够或不足的区域。

本文其余部分的组织如下。第二节回顾 LoRa WAN 覆盖建模、网关部署和无线数字孪生方面的相关工作。第三节介绍双威城数字孪生、LoRaWAN 链路预算参数以及信噪比和覆盖建模。第四节展示不同网关预算下覆盖、冗余和关联模式的数值结果。第五节总结全文，并概述将该框架扩展到其他低功耗广域网技术和部署场景的方向。

II. 相关工作

近期研究探讨了低功耗广域网的多个方面，以实现大规模连接，包括对 LoRaWAN 覆盖范围的实证分析、网关部署模型，以及用于无线规划的应用型智能算法。早期研究重点在于了解其基本传播特性和 LoRaWAN 的容量上限。例如，Centenaro 等人，[8]回顾了低功耗广域网技术，以探究部署形态如何影响 LoRa 覆盖范围。作者发现，LoRa 是未来城市应用的主要推动技术之一。同样，Bor 等人，[10] 研究了 LoRa 的容量上限和可扩展性。作者通过实验建立 LoRa 链路行为模型（即通信范围和捕获效应），并将该模型纳入定制仿真器。研究表明，在静态设置下采用单个汇聚节点时，LoRa 网络的扩展性较差；而采用动态通信参数或增加汇聚节点数量，则能提升其扩展性。Adelantado 等人，[11] 从功能和局限性方面概述了 LoRaWAN 技术。作者基于各类用例考察了这些方面，并发现 LoRaWAN 并非满足所有物联网需求的通用解决方案，其实际容量受占空比规定限制。研究建议，网络运营商应根据设备数量和信道参数仔细规划网络规模，以适应具体用例。

此外，研究人员还将网关部署作为一个独立的优化问题进行研究，使用真实世界轨迹或传播模型。Loh 和 Karl 将面向可扩展 LoRaWAN 的鲁棒网关部署表述为几何集合覆盖问题，并采用贪心算法和局部搜索启发式算法，以尽可能少的网关最大化覆盖的设备数量 [12]。Khan 等人提出了 DPLACE，这是一种先对终端设备进行聚类，再部署网关为这些集群提供服务的框架，同时在资本支出和运营支出与覆盖及服务质量（QoS）约束之间进行权衡 [17]。其他研究也遵循类似模式，使用带有简单阴影衰落项的对数距离或对数正态路径损耗模型来近似城市传播。这些研究已被证明能够刻画

选址问题中受预算约束的覆盖特性，并利用其次模结构；然而，它们基于抽象图或规则网格运行，因此无法解析城市布局对 LoRaWAN 覆盖的影响。

近年来，数字孪生（DT）和 GPU 加速射线追踪引擎已被引入，作为在三维城市复刻模型中进行无线规划的研究工具。经典确定性射线追踪已广泛用于微波和毫米波频率下的宏蜂窝与微蜂窝规划 [13]。Sionna 等现代框架及其射线追踪扩展提供了可微分、由 GPU 加速的传播引擎，可嵌入物理层仿真中 [16]。已有多项研究使用这类工具探究第五代移动通信和第六代移动通信场景，包括高密度城市网格中的波束成形、感知阻塞的蜂窝规划和车联网连接 [16]。然而，这些研究面向厘米波或毫米波频段及蜂窝基站，而非亚吉赫兹低功耗广域网网关。此外，这些研究侧重于链路级指标或波束成形策略，不同于在成本等多项约束条件下对少量网关进行组合选址。因此，本文通过将高密度城市的几何精确数字孪生与基于商用室外网关的 LoRa链路预算相结合，并采用次模贪心选址策略，为多个候选屋顶网关生成准确的覆盖、冗余和关联图，从而弥补这一研究空白。

III. 系统模型与 LoRaWAN 配置

系统模型由双威城的三维模型构成，该模型使用 OpenStreetMap 的地理参考数据在 Blender 中创建，并导出至 Sionna RT。数字孪生经过设计，与城市布局精确匹配，并在 Blender 软件中采用统一的笛卡尔坐标系进行定位。每个网格都定义了一个无线电材料标签，与 Sionna RT 中基于国际电信联盟标准的材料库兼容，因此反射、绕射和穿透损耗均遵循射线追踪引擎实现的亚千兆赫传播模型。

下一步是将场景加载为集成环境。在水平面上定义规则的无线电地图网格，网格单元尺寸为 $(\Delta x,\ \Delta y)$ =(5 米，5 米)。对于每个发射机，Sionna 会计算复基带信道响应以及通向每个网格单元的相应大尺度路径增益。随后，将射线追踪配置为每条射线最多发生三次交互 ($max\ \ depth = 3$)，并为每个发射机发射 2×10^6 条射线。这足以稳定覆盖统计结果，同时将计算负载控制在可管理范围内。

其次，在场景中心（即大学校园）各处的屋顶位置布设了八个候选 LoRaWAN网关。它们的 (x, y, z) 坐标和高度取自数字孪生，对应于可安装室外网关的建筑物。这些位置按以下方式选定：a) 首先，我们在数字孪生中手动识别大学校园附近的建筑物；b) 仅保留高度足以提供视距或浅

表 I 仿真中使用的 LoRaWAN 链路预算参数。

参数	符号	数值
载波频率	f_c	1.0 吉赫[1]
系统带宽	B	125 千赫兹
网关发射功率	P_{tx}	20 dBm
接收机噪声系数	F_{NF}	6 dB
环境温度	T_{amb}	290 K
实现裕量	M	10 分贝
稳健信噪比阈值	γ_{rob}	−10 分贝
边缘信噪比阈值	γ_{edge}	−22 分贝

非视距路径通往校园区域、便于接入电力和回程链路，且不受相邻的、位置相近且高度相仿的屋顶影响或主导的建筑物。根据这些筛选标准，最终选出了八处不同的屋顶位置，覆盖校园主要区域以及邻近居民区。

每个候选站点均建模为一个单天线单元的各向同性发射机，并在 Sionna 中采用交叉极化方向图 ISO，该模型代表了亚吉赫频段的全向 LoRaWAN天线。令 $G_g(n)$ 表示从网关 $g \in \{1, \ldots, G\}$ 到网格单元 $n \in \{1, \ldots, N\}$ 的路径增益（以分贝计）。该项反映了传播路径上的自由空间损耗、建筑物相互作用以及材料相关衰减。LoRaWAN 配置采用 RAKwireless 的 RAK7289 WisGate Edge Pro 室外网关和典型的 A类终端设备。仿真中使用的主要参数总结于表 I。包含接收机噪声系数的热噪声功率为

$$N_{\text{dBm}} = 10 \log_{10}\left(\frac{kT_{\text{amb}}B}{1\ \text{mW}}\right) + F_{\text{NF}}, \tag{1}$$

其中，k 为玻尔兹曼常数。网格单元 n处每个网关的信噪比随后定义为:

$$\text{SNR}_g(n) = P_{\text{tx}} + G_g(n) - N_{\text{dBm}} - M \quad [\text{dB}], \tag{2}$$

其中，M 表示射线追踪引擎中未明确建模的实现裕量。

覆盖范围根据单一稳健信噪比阈值 $\gamma_{\text{thr}} = -10$ 分贝定义，该阈值对应于中等扩频因子下可解码的上行链路。对于每个网关 g 和网格单元 n，我们构造一个二值覆盖指示变量

$$c_g(n) = \mathbb{I}\{\text{SNR}_g(n) \geq \gamma_{\text{thr}}\}. \tag{3}$$

接下来，对于网关选择指标，令 $\mathcal{G}$ ={$1, \ldots, G$} 表示网关集合，$\mathcal{C} = \{1, \ldots, N\}$表示网格单元集合。对于阈值 γ，网关 g 的覆盖集合为

$$\mathcal{C}_g = \{n \in \mathcal{C} : \text{SNR}_g(n) \geq \gamma_{\text{thr}}\}. \tag{4}$$

[1]Sionna 中的国际电信联盟材料模型定义于 1 吉赫以上。因此，使用 1.0 吉赫的载波作为 915 兆赫至 923 兆赫 LoRa 频段的近似；在所考虑的距离范围内，由此产生的自由空间损耗差异低于 1 分贝。

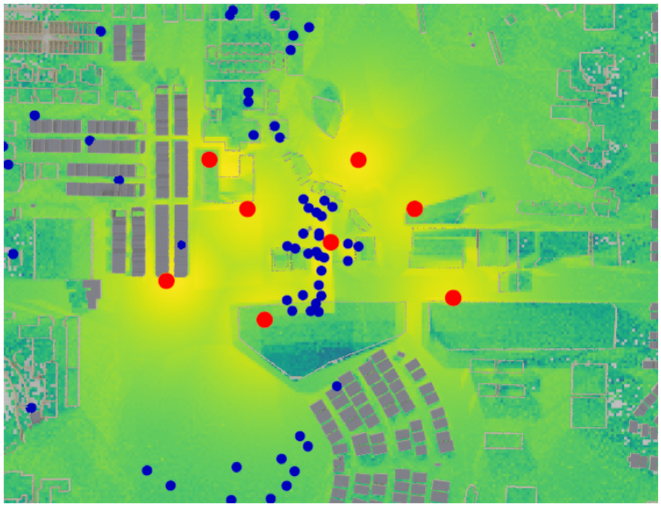


图 2. DT 上的 LoRaWAN 路径增益图。红色标记表示候选屋顶网关，蓝色标记表示传感器位置。

对于网关 $\mathcal{S} \subseteq \mathcal{G}$ 的任意子集，其并集覆盖及相应的面积占比为

$$\mathcal{C}(\mathcal{S}) = \bigcup_{g \in \mathcal{S}} \mathcal{C}_g, \tag{5}$$

$$f(\mathcal{S}) = \frac{|\mathcal{C}(\mathcal{S})|}{|\mathcal{C}|}. \tag{6}$$

目标是在预算$|\mathcal{S}| \leq K$约束下最大化 $f(\mathcal{S},\ \gamma)$。这是标准的预算化最大覆盖问题，其中覆盖函数是次模的，因此，迭代添加能够使 $|\mathcal{C}(\mathcal{S},\ \gamma)|$ 增幅最大的网关的贪心算法，可提供更优的（$1 - 1/e$）近似，并对候选屋顶进行明确排序。

IV. 结果与讨论

图 2 展示了 DT（即双威城的复刻模型）。图中以红色标记显示了八个网关的位置。我们随机添加了 100 个传感器，以呈现物联网设备的密集部署。结果地图显示，开阔街道沿线和水域附近的信号良好；最高建筑附近以及校园内部庭院则存在信号阴影区域。这种分布表明，射线追踪引擎能够捕捉亚千兆赫屋顶部署预期的传播行为，并突显了高灵敏度 LoRa链路面临挑战的位置。

图 3 和表 II 总结了根据贪心选择增加网关时，数字孪生中的覆盖情况如何变化。对于 -10 分贝的稳健信噪比阈值，单个网关可覆盖 20.35% 的网格单元（$K = 1$）。使用两个和三个网关时，覆盖率分别增至 29.03% 和 34.96%；选定六个网关后，覆盖率达到 44.07%。覆盖率的增长呈次线性趋势：第三个网关额外增加了 5.93 个百分点的覆盖面积，而第六个网关仅增加 2.15 个百分点。

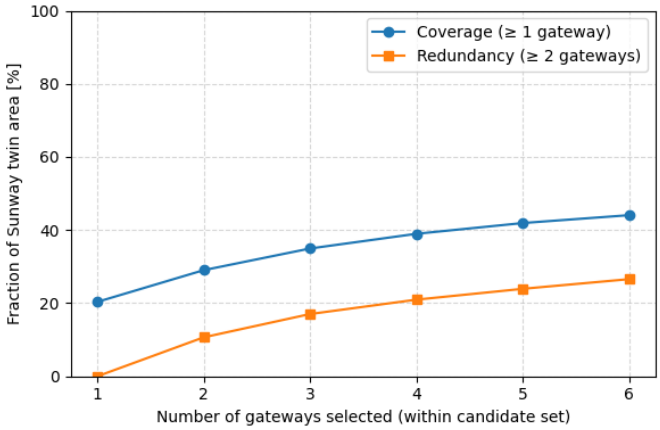


图 3. 随着从候选屋顶中选出的已部署网关数量增加，至少一个网关（即蓝色）和至少两个网关（即橙色）覆盖的数字孪生区域占比。覆盖情况以 -10 分贝的稳健信噪比阈值为准。

表 II 数字孪生区域的覆盖与冗余。

K	覆盖 ≥ 1 个网关 [%]	覆盖 ≥ 2 个网关 [%]
1	20.35	0.00
2	29.03	10.66
3	34.96	17.03
4	38.98	20.97
5	41.92	23.93
6	44.07	26.58

这种表现符合该问题的集合覆盖结构；也就是说，一旦主要街区和开放空间得到覆盖，额外的屋顶便会填补较小的阴影区域。

图 3 还展示了具有冗余连接的区域占比，其定义为超过稳健信噪比阈值且由至少两个不同网关覆盖的区域。对于 $K = 1$，该占比为零，因为单个网关无法提供分集。当我们增加第二个网关时，城市中有 10.66% 的区域拥有两条同时连接。该占比在 $K = 3$ 时增至 17.03%，在 $K = 6$ 时增至 26.58%。换言之，部署六个网关后，数字孪生区域中有 44.07% 至少由一个网关覆盖，26.58% 由两个或更多网关覆盖。图 3 中两条曲线之间的差值量化了由单条稳健链路服务的区域。然而，这种情况缺乏宏分集，因此更容易受到网关故障或阴影衰落的影响。

覆盖冗余情况如图4所示，该图绘出了每个网格单元中满足稳健信噪比阈值的网关数量。中央校园区域有三个至六个网关覆盖重叠，这表明在该区域采用分集合并或简单的网关选择，均可显著提高可靠性。相比之下，数字孪生边缘的其他区域（如住宅区）仅有零个或一个网关覆盖。这些区域容易受到植被、车辆或室内布置造成的额外衰减影响。从网络规划的角度来看，该地图显示了哪些区域

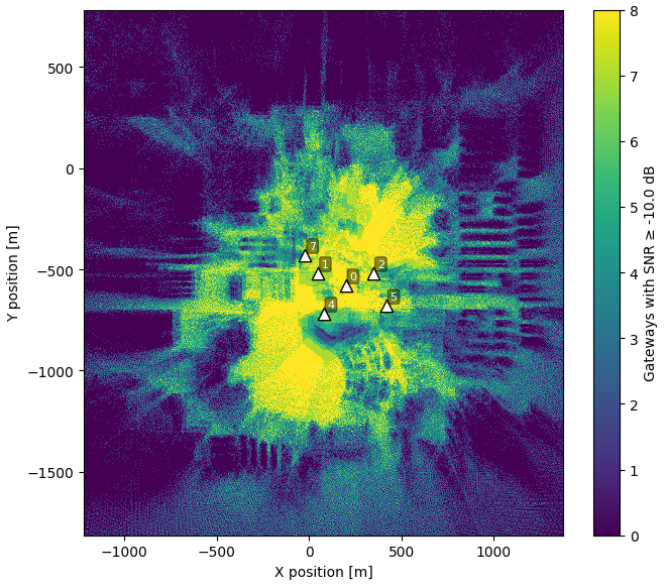


图 4. 在稳健信噪比阈值下覆盖每个网格单元的网关数量。白色三角形表示候选屋顶位置。

最能从增设网关或提高安装位置中受益，前提是部署需要支持该特定区域（即本例中的大学校园）以外的城市传感器。

图 5 展示了将每个候选屋顶单独用作 LoRaWAN 网关时的独立稳健覆盖情况。横轴按独立覆盖范围从大到小对屋顶进行排序；每个柱形上方的数字表示其在候选集合中的原始网关索引。网关 2 覆盖的网格单元最多。网关 3 和 6 分别覆盖 14.8% 和 15.5% 的区域，表明单独部署时这两个屋顶是较弱的候选位置。

对于预算 $K = 1, \ldots, 6$，最大化并集覆盖（即组合网关后所覆盖的不同网格单元总数）的贪心选择按以下顺序选择网关：$[2, 1, 5, 0, 7, 4]$。这一顺序与独立覆盖结果一致：前三个贪心选择是独立覆盖面积最大的三个屋顶，其余入选屋顶（网关 0、7、4）在独立覆盖分布中处于中游。图 5 中覆盖能力最弱的两个屋顶（网关 6 和 3）从未在所考虑的预算范围内被贪心算法选中，因为与覆盖能力较强的站点已覆盖区域相比，它们贡献的独有覆盖区域很少。独立统计结果与贪心算法结果相吻合，这支持了高度和中心性主导部署决策的解释。

图 6 中的最佳网关关联图将每个网格单元分配给能够提供最高稳健信噪比的网关，灰色网格单元表示低于 γ_{thr} 的位置。由此形成的服务区域形状不规则，并非简单的圆形或类似 Voronoi 的形状，而是沿着

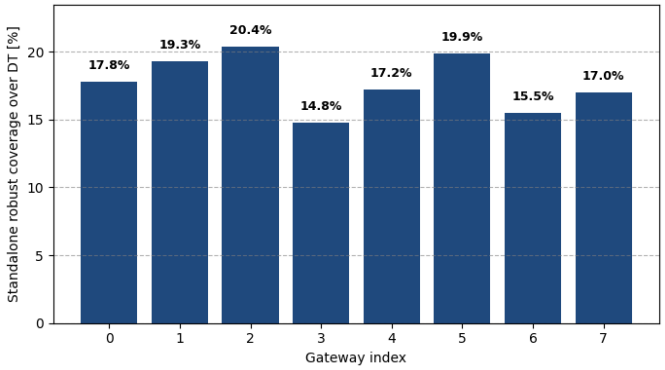


图 5. 将每个候选屋顶单独用作 LoRaWAN 网关时的独立稳健覆盖率。

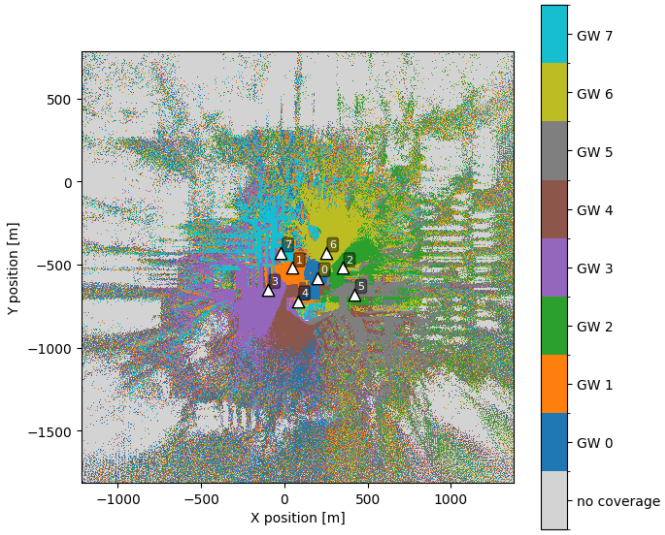


图 6. 稳健信噪比阈值下的最佳网关关联图。每种颜色代表提供最高信噪比的网关；灰色单元格表示低于阈值。白色三角形表示网关位置。

街道走向、开放空间以及建筑物之间的空隙延伸。某些网关拥有彼此分离、但由传播走廊连接的关联区域，而这在传统的基于距离的模型中无法体现。对于网络规划而言，这一发现有助于确定每个网关的回传容量，并预测网关切换或运营商之间漫游可能发生的位置。

V. 结论

本文结合双威城的几何精确数字孪生与 Sionna 射线追踪引擎，在商用网关链路预算条件下研究了 Lo-RaWAN 网关部署。研究通过在数字孪生上以 5 米网格计算路径增益，并将其转换为基于信噪比的覆盖指标，量化了按照贪心最大覆盖准则逐步增加网关时，覆盖与冗余的变化情况。结果表明，在所选密集区域（即大学

校园）部署单个屋顶网关并不足够。即使精心选择六个站点，稳健信噪比阈值也仅在数字孪生区域的 44.07% 内得到满足，而至少两个网关可实现宏分集的区域占 26.58%。冗余地图显示，分集能力集中在校园范围内。独立覆盖结果和最佳网关关联图进一步表明，某些屋顶位置处于劣势，而少数中心屋顶则支持延伸的传播走廊，这些情况无法通过基于距离的规划预先判断。未来研究可通过加入基于实测的扩频因子和业务分布来拓展这项工作。未来研究还可探讨不同天线高度或桅杆结构的影响，并制定权衡覆盖、冗余和回程约束的多目标部署准则。数字孪生提供了一种通用方法，基于该数字孪生开发的框架或模型可应用于其他类似的密集城市。

致谢

作者谨此感谢双威大学通过研究加速器种子基金（编号：GRTIN-RAG(02)-DEN-03- 2024）资助本项工作。

参考文献

[1] G. Xu、Y. Shi、X. Sun 和 W. Shen，“海洋环境监测中的物联网：综述”，《传感器》，第 19 卷，1711，2019 年第 7 期，第 p.。[2] M. Tajudin、M. Sarijari、A. Ibrahim 和 R. Rashid，“基于区块链的智能河流监测系统物联网”，载于 *IOP*会议系列：材料科学与工程，第 884 卷，第 012082 页，IOP Publishing，2020 年。[3] A. L. Duguma 和 X. Bai，“物联网技术如何提升农业效率”，人工智能评论，第 58 卷，第 2 期，第 63 页，2024 年。[4] Z. Amiri、A. Heidari、M. Zavvar、N. J. Navimipour 和 M. Esmaeilpour，“仿生算法在基于物联网的医疗保健服务中的应用：系统性文献综述”，新兴电信技术汇刊，第 35 卷，4969，2024 年第 6 期，第 e 页。[5] H. A. Alobaidy、N. F. Abdullah、R. Nordin、M. Behjati、A. Abu-Samah、H. Maizan 和 J. Mandeep，“赋能极端通信：利用混合机器学习表征基于LoRa的物联网网络的传播特性”，*IEEE*《通信学会开放期刊》，第 5 卷，第 3997–4023 页，2024 年。[6] N. F. Abdullah、A. Z. Norabid、H. A. Alobaidy、A. Abu-Samah、N. H. N. Maizan 和 R. Nordin，“原住民社区连接：通过机器学习提升棕榈油种植园中的LoRaWAN性能”，载于 *2024*年第*15*届信息与通信技术融合国际会议（*ICTC*），第 597–601 页，IEEE，2024 年。[7]N. Matni、J. Moraes、H. Oliveira、D. Ros´ario 和 E. Cerqueira，“动态物联网场景的LoRaWAN网关部署模型”，《传感器》，第 20 卷，第 15 期，第 4336 页，2020 年。[8] M. Centenaro、L. Vangelista、A. Zanella 和 M. Zorzi，“免许可频段中的远距离通信：物联网和智慧城市场景中的新星”，*IEEE*无线通信，第 23 卷，第 5 期，第 60–67 页，2016 年。[9] M. R. Villarim、J. V. H. de Luna、D. de Farias Medeiros、R. I. S. Pereira 和 C. P. de Souza，“LoRa在密集城区和森林区域环境监测中的性能评估”，载于 *2019*年第*4*届国际仪器系统、电路与传感器研讨会（*IN-SCIT*），第 1–5 页，IEEE，2019 年。[10] M. C. Bor、U. Roedig、T. Voigt 和 J. M. Alonso，“LoRa低功耗广域网能否扩展？”，载于 第*19*届*ACM*无线与移动系统建模、分析和仿真国际会议论文集，第 59–67 页，2016 年。[11] F. Adelantado、X. Vilajosana、P. Tuset-Peiro、B. Martinez、J. Melia-Segui 和 T. Watteyne，“了解LoRaWAN的局限性”，*IEEE*《通信杂志》，第 55 卷，第 9 期，第 34–40 页，2017 年。[12] F. Loh、D. Bau、J. Zink、A. Wolff 和 T. Hoßfeld，“面向可扩展LoRaWAN的鲁棒网关部署”，载于 *2021*年第*13*届*IFIP*无线与移动网络会议（*WMNC*），第 71–78 页，IEEE，2021 年。[13] S. Jaeckel、L. Raschkowski、K. B¨orner 和 L. Thiele，“Quadriga：支持虚拟现场试验的时间演化三维多小区信道模型”，*IEEE*《天线与传播汇刊》，第 62 卷，第 6 期，第 3242–3256 页，2014 年。[14] N. F. Abdullah、A. Z. Norabid、H. A. Alobaidy、A. Abu-Samah、N. H. N. Maizan 和 R. Nordin，“原住民社区连接：通过机器学习提升棕榈油种植园中的LoRaWAN性能”，载于 *2024*年第*15*届信息与通信技术融合国际会议（*ICTC*），第 597–601 页，IEEE，2024 年。[15] R. Pegurri、D. Gasco、F. Linsalata、M. Rapelli、E. Moro、F. Raviglione 和 C. Casetti，“Van3Twin：将射线追踪融入其中的多技术V2X数字孪生”，*arXiv*预印本 *arXiv:2505.14184*，2025 年。[16] J. Hoydis、F. A¨ıt Aoudia、S. Cammerer、M. Nimier-David、N. Binder、G. Marcus 和 A. Keller，“Sionna RT：用于无线电传播建模的可微射线追踪”，载于 *2023*年 *IEEE Globecom*研讨会（*GC Wkshps*），第 317–321 页，IEEE，2023 年。[17] N. Matni、J. Moraes、H. Oliveira、D. Ros´ario 和 E. Cerqueira，“动态物联网场景的LoRaWAN网关部署模型”，《传感器》，第 20 卷，第 15 期，第 4336 页，2020 年。