

# 无连接区域覆盖的绿色网格网与数字孪生验证

陈文清<sup>1</sup>, 孟庆民<sup>1</sup>, 杜鹏<sup>1,2</sup>, 罗越<sup>1</sup>

(1. 南京邮电大学 通信与信息工程学院和自动化学院, 江苏 南京 210003;

2. 东南大学 移动通信国家重点实验室, 江苏 南京 210096)

**摘要:** 尽管“连接未连接”的挑战一直是研究热点,但最近发布的全球6G愿景中,泛在连接场景尚未直接包含仍处于实验阶段的5G非地面网络。该文认为,5G非地面网络架构上一个潜在的发展趋势是绿色和灵活性,它很有可能在后期的6G阶段发挥更大作用。为了增强空天地一体化系统的绿色和灵活性,该文特别考虑了一种地面上的绿色网格架构,采用数字孪生建模方法进行了概念验证,对微基站处的可再生能源、物联网设备运行和无线资源分配策略等进行了建模,并开发和评估了基于Transformer的精确数据驱动的能效预测方案。这一初步的网络架构和无线接入概念验证,将有益于推动早期阶段数字孪生卫星的可行性研究,为未来6G空天地一体化网络的发展提供参考。5G非地面网络目前尚处于前期探索阶段,但其在绿色、灵活、可持续等方面的创新理念,非常契合6G网络的发展方向。该文通过数字孪生建模的方法,验证了非地面网络在6G时代具有广阔的应用前景。

**关键词:** 连接未连接;绿色网络;数字孪生;Informer;无线资源分配

中图分类号: TP399; TN92

文献标识码: A

文章编号: 1673-629X(2024)04-0109-07

doi: 10.20165/j.cnki.ISSN1673-629X.2024.0017

## Green Mesh Networks for Unconnected Area Coverage and Proof of Digital Twins

CHEN Wen-qing<sup>1</sup>, MENG Qing-min<sup>1</sup>, DU Peng<sup>1,2</sup>, LUO Yue<sup>1</sup>

(1. School of Telecommunications & Information Engineering and School of Automation,

Nanjing University of Posts and Telecommunications, Nanjing 210003, China;

2. National Mobile Communications Research Laboratory, Southeast University, Nanjing 210096, China)

**Abstract:** The recently released ubiquitous connectivity scenario in the global 6G vision does not directly include 5G non terrestrial networks that are still in the experimental stage, although the challenge of "Connecting the Unconnected" has always been a research hotspot. We believe that a potential trend in 5G non ground network architecture is green and flexible, which has the potential to appear in the later 6G stage. In order to enhance the green and flexibility of integrated ground-air-space systems, a green mesh architecture on the ground is specially considered here. A digital twin modeling method and proof of concept within its capabilities are designed, the renewable energy at the micro base station, the operation of Internet of Things (IoT) equipment and the wireless resource allocation strategy are modeled, and an accurate data-driven energy efficiency prediction scheme based on Transformer is developed and evaluated. The preliminary network architecture and proof of concept of wireless access will benefit the early feasibility study of digital twin satellites and provide reference for the future development of 6G space-air-ground integrated network. 5G non-terrestrial networks are still in the early exploration stage, but its innovative concepts in green, flexibility and sustainability are highly matched with the development direction of 6G networks. It is verified that non-terrestrial networks have broad application prospects in the 6G era through digital twin modeling method.

**Key words:** connecting the unconnected; green mesh networks; digital twin; Informer; wireless resource allocation

## 0 引言

近年来,5G和6G技术已成为引人注目的研究热

点,各界积极投入这一领域,以期能开发出性能更优异的下一代无线通信技术。芬兰奥卢大学发布的全球首

收稿日期: 2023-07-18

修回日期: 2023-11-21

基金项目: 东南大学移动通信国家重点实验室开放研究基金资助课题(2021D10)

作者简介: 陈文清(2000-),女,硕士研究生,研究方向为绿色通信、时间序列预测等;通信作者: 孟庆民(1965-),男,博士,副教授,研究方向为无线通信、网络智能等。

个 6G 白皮书预计,6G 在峰值传输速度、定位精度、连接密度等多个指标将较 5G 技术显著提升 10 ~ 100 倍<sup>[1]</sup>。该白皮书的发布引发了广泛的关注,它在一定程度上加速了无线通信技术发展。文献[2]指出,6G “万物智联”的通信范式将把传统通信领域边界从物理世界拓宽到数字世界,实现高效、智能与大规模的网络传输。当前无线通信行业已经初步达成共识:6G 作为 5G 基础上质变的产物,将实现从万物互联,到智能互联的飞跃。

自 2020 年起,IEEE 未来网络计划持续推动更可持续与可商用的无线网络演进,旨在为未联网的人群提供便捷的互联网接入与使用,以及促进农村地区多个产业的数字化转型<sup>[3]</sup>。文献[4]对 6G 愿景、需求、关键技术及实验平台进行了综述,并探讨了理论突破和挑战。截至 2023 年 6 月,6G 发展进程中的一个重要里程碑是国际电信联盟无线通信部门发布的 IMT-2030(全球 6G 愿景)框架和建议书,它标志着业内就在 2030 年左右实现全球范围 6G 商用达成共识,以及 6G 标准化进程的正式启动<sup>[5]</sup>。该建议书定义了六大应用场景,即沉浸式通信、超大规模连接、极高可靠低时延、人工智能与通信的融合、感知与通信的融合、泛在连接。同时,该建议书提出了四大设计原则:可持续性、泛在智能、安全/隐私/弹性、连接未连接的用户。

虽然上述泛在连接场景属于通信增强,但在覆盖范围和移动性方面与其他场景有所不同。地面无线网络尚需在网络架构上进一步革新,以支持地面网络和非地面网络(non-terrestrial network,NTN)互连和空天地网络融合<sup>[6]</sup>。5G NTN 是卫星互联网子类,是 5G 通信系统面向卫星通信和低空通信等新应用场景的重要技术。卫星互联网一般由空间段、地面段和用户段组成。空间段指提供信息中继服务的卫星星座;地面段指提供实时控制的网络管理中心等;用户段指多种空天通信终端<sup>[7]</sup>。目前,卫星通信与 5G 网络仍是两个独立的系统,5G NTN 仍处于讨论和实验阶段,并且在 6G 阶段这两个系统的融合面临特有的安全和技术挑战。

尽管面临上述挑战,基于 6G 的空天地集成网络、低轨卫星物联网和数字孪生卫星网等,正在成为非地面网络领域的热点研究方向,因为这些技术有望提供 6G 覆盖范围的扩展和优化等。文献[8]针对自动驾驶和车联网应用提出了一种天空地一体化车辆网络,将卫星、高空平台站(HAP)、低空无人机(UAV)、地面蜂窝通信系统的多维、多尺度上下文信息和网络资源有机融合。文献[9]从系统架构和组网设计、人工智能使能技术、建模与性能分析等多个角度概述了航空航天集成网络(AINs)赋能 6G 时代的模型和方法。卫

星物联网由于便于实现传统地面方式难以实现的物联网通信一直备受关注。如文献[10]针对地面网络无法覆盖的偏远地区,提出了低轨道卫星远程支持的有效解决办法。考虑到卫星的有限信道资源及物联网的大规模终端和业务特点,文献[11]提出基于终端位置和业务优先级进行混合接入的动态资源分配方法。

数字孪生(Digital Twin)最初定义为与智能制造和数字工厂领域有关的物理实体的数字化描述。随着数字孪生应用的拓展,其概念也在不断更新。以该文讨论的空天地系统为例,包含非地面网络的空天地系统是包含多个异构组件的复杂网络,其中卫星星座中轨道、星间链路和多维信道资源具有高的时空动态性。数字孪生仿真可以对整个无线系统进行高保真仿真,从而用于设计、测试、优化、部署、维护和运营。文献[12]针对传统方法难以满足系统优化的需求,提出了一种数字孪生卫星互联网系统架构。文献[13]认为数字孪生网络(Digital Twin Network,DTN)将成为增强未来 6G 安全的一种关键技术。由于传统地面无线通信理论模型难以满足应对复杂动态场景的要求,文献[14]认为未来应将数字孪生和人工智能引入海洋无线网络研究。从数字孪生体的模拟角度出发,在虚拟空间对动态海洋物联网系统进行仿真可以改善无线资源分配的设计。

近年来,数字孪生技术在通信网络领域受到广泛关注,当前主流期刊上报道了许多高质量的相关研究成果。文献[15]提出了面向 6G 的整体网络虚拟化和渗透式网络智能概念,为支持 6G 的多样化服务需求提供了灵活的网络架构和智能管理手段。综上可见,数字孪生技术已成为支持 6G 网络系统设计中的性能预测、问题诊断、网络优化的重要手段之一。

如上所述,处于试验阶段的 5G NTN 是一种以较低的成本解决连接未连接问题的方案。对于偏远地区大量存在的物联网用户或带有无线通信功能的终端,因为缺少市电,无法直接在地面部署传统的无线接入网(Radio Access networks)基站(Base station,BS)和网络控制器。该文认为集成可持续能源的 RAN 实现可持续空天地一体化覆盖将是一种解决方法。与传统能源不同,这里的绿色能源主要来源于太阳能、风能和生物质能等可再生资源,高度依赖于太阳能设备与储能设备的容量。在缺少市电的特定无线覆盖场景中,小型蜂窝基站将使用可再生能源来保持可持续性和绿色环保。

该文认为实现空天地一体化覆盖的关键技术之一是地面 mesh 组网和数字孪生到分布式网络结构的集成。数字孪生的主要技术可以分为三大类:物理世界的增强及感知、通信及交互、数字空间可用技术<sup>[16]</sup>。

这里的分布式 mesh 网络具有灵活性和弹性,因为绿色基站进行了预先的优化计算<sup>[17]</sup>,其部署采用网格状且非蜂窝状节点按需放置。组网中绿色基站也是分布式能源供应节点,能源供应的变化增加了无线资源管理的时间和空间动态性。针对该问题,人工智能作为建模的核心内容,可以在地面 mesh 组网和运营中完成自主的决策和动作,从而在满足通信需求的同时降低能耗<sup>[18]</sup>。

## 1 方法

尽管空天地一体化覆盖包含空间段,但由于该文的目的是面向物联网业务的绿色地面 mesh 组网设计及其智能资源分配概念验证,下述内容不直接讨论空间段,以聚焦主题。图1描述了针对无连接区域覆盖的绿色网格地面网络结构,其中卫星标志表示空天地覆盖中的空间段与地面网络的互连。空间段的卫星通常直接与地面控制器连接,以完成上行和下行数据流的传输。在地面段结构设计中,传统地面控制器的部分功能将以虚拟化方式构建在冗余基站上,以便于实现快速组网和增强 RAN 的灵活性。这里需要提及灵活无线终端的特点,即本地面段结构便于支持空间段与地面移动用户的非直连。地面段先直连特定基站(下文中称之为冗余微基站),接着冗余微基站与相邻微基站建立无线连接。这使得不具有卫星接口的地面移动用户也可以与空间段进行通信。

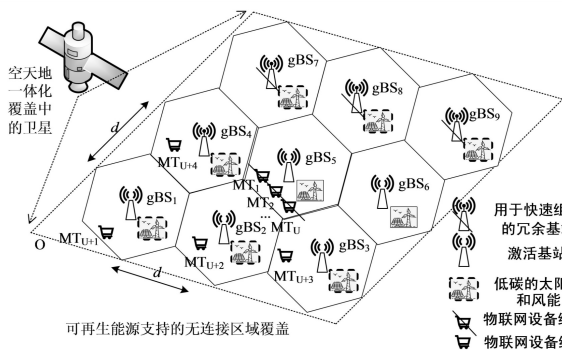


图1 位于地面、针对无连接区域覆盖的绿色网格网

以 gBS 为标志的各微基站都采用可再生能源供电,且配备有限容量的储能设备。冗余基站指属于地面低碳无线接入网络(RAN)的覆盖区域但地面移动用户以一定概率未靠近该微基站的临近区域。绿色网格网中微基站数  $B$  可以按需配置。一个或若干冗余(微)基站还具有软件定义的多种功能。任一个(微)基站都可以被定义为网络控制器与轻量级边缘计算实体,其中的边缘计算实体可以运行数字孪生的仿真工作。若某个(微)基站的信道数或者能源供应不满足要求,冗余(微)基站将资源借用给该基站,以满足特定的 QoS 要求;若某个物联网设备(以 MT 为标志)供

电不足,储能高的冗余(微)基站可通过有线或者无线传能等方式给它充电。物联网设备可按照运动模型被分为多组,如图1中设备组1的运动模型趋于确定性,设备组2按照随机游走模型移动。简言之,所提出的地面段是针对数字工厂应用的灵活和弹性的无线覆盖设计。

图2展示了可再生能源支持的低碳无线接入网络的时空动态性,它包含时间、功率和信道三个维度,并进行了离散化处理。除非另有说明,假定基站都采用单天线配置。若考虑微基站处的多天线配置并且对多个微基站采用集中式控制,则还需引入和利用空间维度,采用 cell-free mMIMO 技术以减少不同小区之间干扰和获得宏分集收益<sup>[19-20]</sup>。低碳无线接入网络旨在应对空天地一体化覆盖中多维资源的时间和空间动态性挑战。其一般目标是在能效、覆盖和成本之间达到权衡,具体目标是在绿色网格网络结构下实现轻量级接入设计。

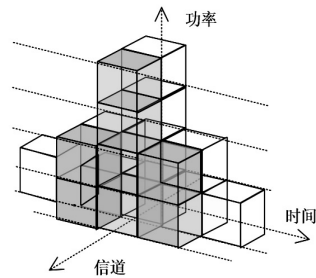


图2 可再生能源支持的低碳无线接入网络(RAN)的时空动态性

### 1.1 绿色网格网媒介访问控制中的尽力而为策略

先简述用于无线资源管理的媒介访问控制(Media Access Control, MAC)层协议。AIN 的接入协议通常分为随机接入、固定接入和混合接入。由于未来 6G AIN 的特殊场景,现有蜂窝网络集中式组网并不适用,且效率较低。对于固定接入协议,频分多址(FDMA)划分频率资源以提供用户接入。随着同时接入用户数量的增加,FDMA 使大多数设备无法访问。考虑到卫星网络的长时延、长距离特点,大多数研究选择时分多址(TDMA)或 TDMA 混合协议作为卫星网络的 MAC 协议。混合 MAC 接入方式也可应用于接入 6G AIN 的空中组件的用户,其取决于无人机和 HAP 的天线类型<sup>[21]</sup>。

针对所提出的位于地面的、针对无连接区域覆盖的绿色网格网,该文设计了一种尽力而为策略的混合 MAC 协议,以兼顾能效与频谱效率。先定义每个绿色基站的信道数,假定一个信道可支持一个下行连接。若该基站选择的物联网设备数  $K_i$  小于或等于最大信道数  $M$ ,则该基站首先按 FDMA 固定接入协议支



持这些设备的通信请求;反之,余下设备的连接将转移至冗余基站,仅支持较低 QoS 要求的通信服务。

### 1.2 分布式资源分配模型

无线资源分配指标是能量效率值,定义为速率与发射功率之比。如果资源分配目标是整个地面 RAN 的能量效率最大化,则采用式 1 定义问题 1:

$$\max \sum_{b=1}^B \sum_{k=1}^{K_b} \frac{X_{b,k}^t R_{b,k}^t}{P_b^t} \quad (1)$$

约束条件如下:

$$P_S^t \leq P_{SO}^t$$

$$P_b^t < P_S^t + P_W$$

$$R_{b,k}^t = W_c \log_2(1 + \gamma_{b,k}^t) \geq R_0$$

$$X_{b,k}^t \in \{0, 1\}$$

这里,地面 RAN 含有  $B$  个基站,每个基站含有  $C_b$  个信道,每个信道带宽为  $W_c$ ,每个发射机总信道数  $K_b$  和每个基站激活的发射机数  $N_{\text{TRX}}$ 。 $P_S^t$  和  $P_W$  分别表示太阳能输出和风能输出。 $P_b^t = P_{\text{static}} + P_{\text{dynamic}}$ ,  $P_{\text{dynamic}} = \alpha_1 \alpha_2 P_{\text{TX}} N_{\text{TRX}}$ ,  $\alpha_1$  和  $\alpha_2$  分别表示功率放大器效率的倒数和业务负荷,  $N_{\text{TRX}}$  是下行的发射机数,  $P_{\text{TX}}$  是发射功率。定义基站  $b$ 、信道  $k$  的信噪比为  $\gamma_{b,k}^t$ ,根据香农公式,信道  $k$  的下行速率被定义为  $R_{b,k}^t = W_c \log_2(1 + \gamma_{b,k}^t)$ 。 $X_{b,k}^t$  表示时刻  $t$ 、基站  $b$ 、信道  $k$  的激活因子。当不考虑随机接入时,各个无线链路之间的干扰被忽略。

考虑上述分布式网络面临缺少集中式控制、时间和空间动态性,以总效率最优为目标的问题 1 被简化为以每个(基站)子覆盖区域效率最优为目标的问题 2:

$$\left\{ \max \left( \sum_{k=1}^{K_b} \frac{X_{1,k}^t R_{1,k}^t}{P_b^t} \right), \dots, \max \left( \sum_{k=1}^{K_b} \frac{X_{B,k}^t R_{B,k}^t}{P_b^t} \right) \right\} = \{ \tilde{R}_1^t, \dots, \tilde{R}_B^t \} \quad (2)$$

在下文中,每个基站太阳能输出的量化值也被补充到问题 2 的特征矩阵中。

### 1.3 Transformer 及其在无线流量预测中的应用

自从 4G 之后,机器学习和深度学习一直是无线网络的潜在关键技术,它作为数字孪生建模的引擎,将带来高度智能的网络设计和优化方案。该文关注的绿色无线资源管理,采用人工智能的无线流量预测将成为网络设计和优化可选范式<sup>[22]</sup>。Transformer 是 Google 团队于 2017 年提出的一种 NLP 经典模型。该类模型的自注意力机制和强大的表示能力,使其非常适合应对无线网络设计中的各种挑战。它已经被用于针对各种大规模多输入多输出和语义通信问题,并展示了与其他架构相比的优越性<sup>[23]</sup>。在后续章节中,数字孪生仿真将详细探讨基于 Transformer 的无线能效时间序列预测。

时间序列预测任务在工业界有许多应用场景。提前预测未来访问量或用电量,可提前资源部署,避免因访问量过大耗尽计算资源并阻塞服务。Transformer 虽仅使用自注意力机制进行网络结构建模,但它拥有更强的捕捉序列数据依赖关系的能力,在并行性和训练速度方面也比传统序列转换模型更快。该模型本身的内存开销和计算效率瓶颈,也催生了大量改进以降低开销和提升效果的研究,如 Informer 将自注意力机制的内存和计算开销从  $O(n^2)$  变换为  $O(n \log(n))$ <sup>[24]</sup>。与此同时,Transformer 模型也不再仅限于自然语言处理领域的应用,很多研究者将 Transformer 引入到推荐系统、时间序列预测、图神经网络以及多模态等领域。

## 2 数字孪生体设计与仿真

### 2.1 数字孪生体流程设计

人工智能和通信的融合场景需要大量历史数据、实时交互数据,以便于边缘计算实体通过复杂计算来获取决策并达到多个指标的权衡。大量历史数据通常难以获取,这可以利用数字孪生的仿真与模拟来满足数据的需求。该文考虑的数字孪生设计的一般流程参见图 3,包含 4 类模块。与传统无线网络设计中的仿真相比,数字孪生的模拟更具灵活性。

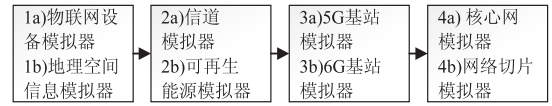


图 3 数字孪生设计的一般流程

数字孪生仿真是一种模型与数据驱动的任务。图 3 中物联网设备模拟器产生下行的通信连接请求,地理空间信息模拟器产生设备的多种运动轨迹,信道模拟器产生随机信道和对应的链路增益,光伏发电和风力发电产生随时间变化能源值。5G 基站模拟器产生位置信息上下文感知和用户与基站关联,其采用上述尽力而为策略并且能效指标采用分布式资源分配模型。为了简化调度方案,当某个子覆盖区域内物联网设备数大于最大信道数时,冗余节点也不借用信道给该子覆盖区域的下行连接。核心网模拟器和网络切片模拟器产生上层的路由和应用层业务。通常数据产生、数据采集和数据分析需要跨域一个无线设计的生命周期,以模拟无线网络的长期,中长期和短期的网络状态。按照不同时间颗粒度,长期,中长期和短期可能对应年,月,日或者小时,分钟和秒。为了兼顾无线资源分配的即时性、有限的计算机算力与存储容量和有限的仿真时间,如下概念验证没有包含模块 2a) 中毫米波与太赫兹,3a) 和模块 4) 的仿真,并且数据采集的时间窗长度不足 1 天。在这样设置下,时间序列将不展示趋势与季节性,而更多地体现随机性。面对挖掘

长时间序列背后模式的任务,如下的验证选择了Transformer算法。下面详细介绍位置信息和绿色能源数据的生成。

定义位置符号  $y_t \in R^{2 \times 1}$ 、背景噪声  $u$  和常数  $\mu$  并且  $\text{IID}(0, \sigma^2)$  表示均值 0 方差  $\sigma^2$  的高斯随机变量,则随机游走模型和随机趋势非平稳过程模型为:

$$y_t = y_{t-1} + u_t, u_t \in \text{IID}(0, \sigma^2) \quad (3)$$

$$y_t = y_{t-1} + \mu + u_t, u_t \in \text{IID}(0, \sigma^2) \quad (4)$$

具有非实时数据传输请求的物联网设备被分为两组,它们分别使用如上两组运动模型,设备组 1 中的各个设备运动轨迹具有一定确定性并且成簇运动。尽管实际物联设备可能有若干运动轨迹模式,这里仅举例其中的一种运动轨迹模式 (Pattern 1),以简化描述。参见图 1, Pattern 1 中的设备组 1 从原点 O 开始,先向 gBS<sub>5</sub> 移动;接近 gBS<sub>5</sub> 时,调整为水平方向运动。通过改变随机趋势模型中的各个参数,可以改变设备组 1 的运行方向。当设备组 1 位置靠近某个微基站时,该微基站可能出现无线信道数不足问题。利用数字孪生的模拟和深度学习算法的预测,可预先评估该类无线网络的无线资源分配方案,并实现参数优化。

接着介绍绿色能源生成模型,包含太阳能模型和风能模型。在所研究系统中,太阳能电池板从早上 8 点左右开始产生某个特定数值的能量,然后太阳能不断增加,并在 12 点左右达到峰值,之后在 16 点左右产生某个特定数值的能量。为简化计算,假设风能模型输出是一个不随时间变化的恒定值  $P_w$ 。时变的太阳能生成模型为:

$$r_t = \frac{r_i^{\max}}{\delta_i^2} e^{-(n-\beta_i)^2} \quad (5)$$

式中,  $\beta_i$  表示第  $i$  个微基站的可再生能源峰值生成的时间,设为中午 12 点,  $n$  表示采样时刻,  $\delta_i$  表示峰值最大值一半处的形状宽度,选择为 3 小时。图 2 中可再生能源输出值被划分 4 个等级。微基站的功率消耗分为两种:静态和动态。如果下行仅仅激活一个发射机 (TX),则与表 1 中负荷对应的、单 TX 时功率消耗阈值为 [223, 247, 270, 294] (W),多 TX 时功率消耗阈值需要在此阈值上进行修正。此外,风能输出  $P_w$  为取 50 (W)。

Pattern 1 覆盖范围 (单位为平方千米) 是参数为  $1.200 \times 0.6$  的矩形区域,其中物联设备的垂直位置  $y$  被限定为小于 600 m,每个 gBS 支持的下行连接数为  $M$ ,单个 mesh 网络的物联网设备总数为  $M \times B$ 。每个微基站的能效单位为兆比特/焦耳 (M bit/J)。表 1 为地面无线网络参数,且 TX 天线高度 25 m。此外,更大区域绿色覆盖通常需要大规模组网技术,它涉及多个 mesh 子网及其相互干扰避免技术、基于 6G 感知与通

信一体化的高精度感知功能。因此,在未来工作中,图 3 需要补充感知与通信一体化模块,以完善数字孪生的交互功能。

表 1 地面无线网络参数

参数	值
微基站数 $B$ , 每微基站信道数 $M$	9, 20
物联网设备总数	180
每信道带宽/MHz	0.5
微基站最大发射功率/W	20
噪声功率/dBm	-100
路径损耗指数和阴影方差	3, 10 dB
功率放大器参数和负荷 $\alpha_1$ 和 $\alpha_2$	4.7, [0.25, 0.5, 0.75, 1.0]
微基站间距 d/m	400

## 2.2 Transformer 无线能效时间序列预测

Transformer 网络参数包括 Embedding 参数、Positional Encoding 参数、Encoder 参数和 Decoder 参数。其中, Embedding 参数将输入的词语或字符转换为向量表示; Positional Encoding 参数用于表示输入序列中每个位置的信息; Encoder 参数用于计算输入序列中每个位置与其他位置的关系; Decoder 参数用于生成目标序列的部分。本概念验证中,主要尝试基于 Transformer 的时间序列预测 (Time Series Forecasting), 一种 Transformer 框架如图 4 所示, 后续实验具体使用了其改进模型 Informer<sup>[24]</sup>。

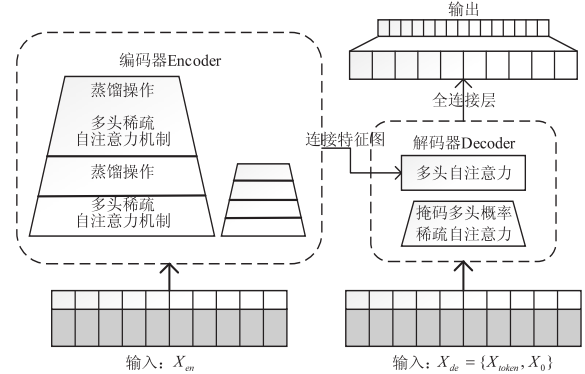


图 4 一种 Transformer 框架

基于 Informer 算法实现了无线能效预测,并采用问题 2 所定义的二维时间序列数据集,时间步长为准秒级。概念验证可以采用单计算机或者单 GPU 配置,后者参见表 2 所示的 www. autodl. com 云平台环境。

利用该数字孪生框架,获取了绿色无线网络网的能效时间序列,且单网格网络的最大能效值为 3.3 (Mbit/J),覆盖区域最大能效为 4.5 (Mbit/J/km<sup>2</sup>)。由于能效值计算没有考虑多个网格网络之间的同信道干扰,也没有考虑小尺度衰落影响,因此计算结果仅仅是地面无线接入网的能效值上界。注意到,在数字孪生框架下表 2 和上述可再生能源配置参数都是可以调

整的,甚至可能利用现场实测的信道质量数据进行预测。这类预测可以无线网络部署和运维提供依据。

表 2 实验环境

软/硬件	版本
操作系统	ubuntu18.04
内存	80 GB
CPU	15 vCPU Intel(R) Xeon(R) Platinum 8338C CPU @ 2.60 GHz
显卡	NVIDIA GeForce RTX 3090
python	3.8
PyTorch	1.7.0+cu110

其次,评估基于 LSTM 算法和 Informer 算法的能效预测性能,表 3 是 Informer 算法部分超参数,它们的调优影响预测的性能。两者的平均绝对误差 (Mean Absolute Error, MAE) 分别为 0.08 和 0.26,而 LSTM 为单变量预测,Informer 为多变量预测,且仿真训练轮次 epochs 为 100。注意到,针对多变量输入多变量输出的单步预测时,即利用前 10 行数据行(序列长度为 10)预测第 11 行的各特征,输出的序列比较是更加合理的性能比较。

表 3 Informer 算法部分超参数

算法	参数	取值
Informer	批处理大小	32
	编码器层数	2
	解码器层数	1
	注意力头数	8
	编码器输入长度	7
	解码器输入长度	7
	模型维度	512
	优化器	Adam

图 5 和图 6 展示了基于 Informer 的 gBS<sub>5</sub> 两个不同时段的能效 (efficient) 特征的预测值 (y\_pred) 与真实值 (y\_true),其中的预测值用虚线标注,实际能效需要乘以尺度系数 0.1。可见该数据驱动算法拟合出了短期能效(流量)的起伏,但还有改进空间。

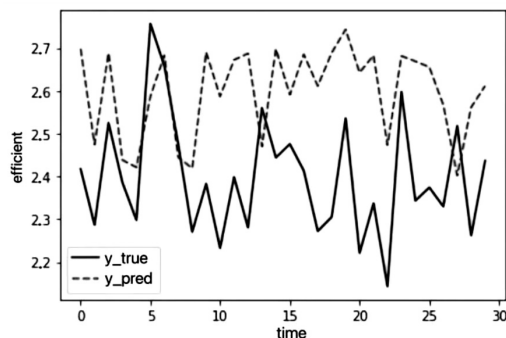


图 5 第一时段能效特征的预测值与真实值

图 7 表示“Pattern 1”时基站 5 的连续 2 天能效值比较。图中纵轴为能效值 (eff.), 其中 “first” 和

“second” 分别表示第 1 天和第 2 天。尽管用户组 1 中运动轨迹类似,但是因为位置和无线信道的时空动态性,两天能效值具有相同的趋势但是短期随机性不同。

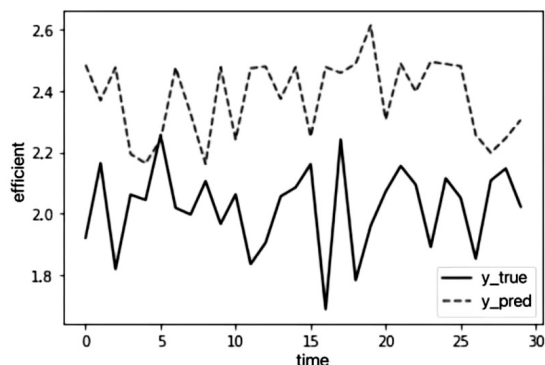


图 6 第二时段能效特征的预测值与真实值

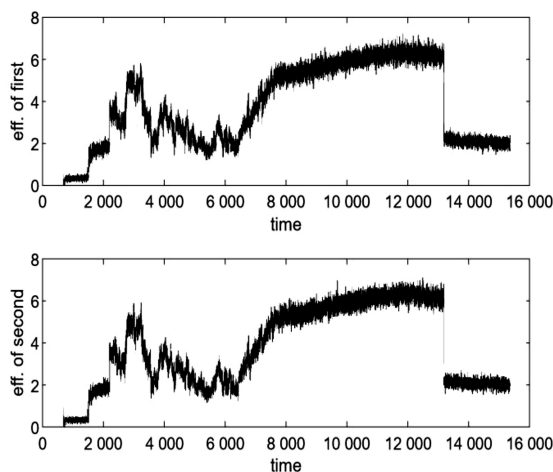


图 7 基站 5 的 2 天能效值比较

### 3 结束语

首先,概述了空地一体化的最新技术进展和 6G 泛在网络场景中存在的开放性问题。随后,提出了面向未联网人群接入的解决方案,并采用数字孪生进行概念验证。该文设计了天地覆系统中的一种地面组成—绿色网络结构。该结构具有绿色、支持灵活地面终端等优点。此外,针对现有无线资源方案灵活性不足的问题,提出了用于基站能效(流量)优化的数字孪生系统和尽力而为无线资源分配策略,以适应无线资源分配时间与空间动态性。

长度 8 小时的物联网业务数据集上的仿真评估结果表明,基于 Informer 算法的能效时间序列可以在一定程度上实现短期预测,但仍有改进空间。该文的工作可为未来绿色无线接入网在网络与链路部署,运营、管理和维护自动化方面提供一定借鉴。只有在云原生架构下实现三维位置信息感知与核心网的模拟,才能构建出一套完整数字孪生无线网络平台以实现无线网络全生命周期评估,这将是未来一个值得探索的方向。



## 参考文献:

- [1] AAZHANG B, AHOKANGAS P, ALVES H, et al. Key drivers and research challenges for 6G ubiquitous wireless intelligence (white paper) [R]. Oulu; University of Oulu, 2019.
- [2] 施雨轩, 吴泳澎, 张文军. 基于信息论的语义通信: 理论与挑战[J]. 中兴通讯技术, 2023, 29(2): 13-18.
- [3] DUTTA A, IEEE future networks: connecting the unconnected challenge [EB/OL]. [2021-06-17]. <https://r1.ieee.org/2021/06/17/ieee-future-networks-connecting-the-unconnected-challenge/>.
- [4] WANG Chengxiang, YOU Xiaohu, GAO Xiqi, et al. On the road to 6G: visions, requirements, key technologies and test-beds[J]. IEEE Communications Surveys and Tutorials, 2023, 25(2): 905-974.
- [5] ITU-R: framework and overall objectives of the future development of IMT for 2030 and beyond [EB/OL]. [2023-06]. <https://www.itu.int/md/R19-WP5D-230612-TD-0905/en>.
- [6] CHEN Shanzhi, SUN Shaohui, KANG Shaoli. System integration of terrestrial mobile communication and satellite communication—the trends, challenges and key technologies in B5G and 6G [J]. IEEE China Communications, 2020, 17(12): 156-171.
- [7] 张更新, 王运峰, 丁晓进, 等. 卫星互联网若干关键技术研究[J]. 通信学报, 2021, 42(8): 1-14.
- [8] NIU Zhisheng, SHEN Xuemin, ZHANG Qinyu, et al. Space-air-ground integrated vehicular network for connected and automated vehicles: challenges and solutions [J]. Intelligent and Converged Networks, 2020, 1(2): 142-169.
- [9] ZHOU Di, SHENG Min, LI Jiandong, et al. Aerospace integrated networks innovation for empower 6G: a survey and future challenges [J]. IEEE Communications Survey and Tutorials, 2023, 25(2): 975-1019.
- [10] CENTENARO M, COSTA C E, GRANELLI F, et al. A survey on technologies standards and open challenges in satellite IoT [J]. IEEE Communications Survey and Tutorials, 2021, 23(3): 1693-1720.
- [11] 王力权, 张开禾. 基于终端位置及业务优先级的卫星物联网资源分配方法 [J]. 无线电通信技术, 2021, 47(6): 753-757.
- [12] 刘垚圻, 李红光, 周一青, 等. 数字孪生卫星互联网: 架构与关键技术 [J]. 天地一体化信息网络, 2022, 3(1): 62-71.
- [13] CHEN Meiling, SHAO Jing, GUO Sixu, et al. Convoy\_DTN: a security interaction engine design for digital twin network [C]//2021 IEEE Globecom workshops (GC Wkshps). Madrid; IEEE, 2021: 1-5.
- [14] CAO Xueyan, ZHANG Hongming, PENG Mugen. Collaborative multiple access and energy-efficient resource allocation in distributed maritime wireless networks [J]. China Communications, 2022, 19(4): 137-153.
- [15] SHEN X, GAO J, WU W, et al. Holistic network virtualization and pervasive network intelligence for 6G [J]. IEEE Communications Survey and Tutorials, 2022, 24(1): 1-30.
- [16] KHAN L U, SAAD W, NIYATO D, et al. Digital-twin-enabled 6G: vision, architectural trends, and future directions [J]. IEEE Communications Magazine, 2022, 60(1): 74-80.
- [17] ZHENG Zhongming, CAI Lin X, ZHANG Ran, et al. RNP-SA: joint relay placement and sub-carrier allocation in wireless communication networks with sustainable energy [J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2012, 11(10): 3818-3828.
- [18] MEI Jie, WANG Xianbin, ZHENG Kan. An intelligent self-sustained RAN slicing framework for diverse service provisioning in 5G-beyond and 6G networks [J]. Intell. Conver. Netw., 2020, 1(3): 281-294.
- [19] SHAIK Z H, BJRNSEN E, LARSSON E G. Cell-free massive MIMO with radio stripes and sequential uplink processing [C]//2020 IEEE international conference on communications workshops (ICC Workshops). Dublin; IEEE, 2020: 1-6.
- [20] WANG Dongming, WANG Menghan, ZHU Pengcheng, et al. Performance of network-assisted full-duplex for cell-free massive MIMO [J]. IEEE Transactions on Communications, 2020, 68(3): 1464-1478.
- [21] VASHISHT S, JAIN S, AUJLA G S. MAC protocols for unmanned aerial vehicle ecosystems: review and challenges [J]. Comput. Commun., 2020, 160: 443-463.
- [22] SALAM N, ABBAS M K, MAHESHWARI M K, et al. Future mobile technology: channel access mechanism for LTE-LAA using deep learning [C]//2021 IEEE 18th annual consumer communications & networking conference (CCNC). Las Vegas; IEEE, 2021: 1-5.
- [23] WANG Yang, ZHEN Gao, ZHENG Dezhi, et al. Transformer-empowered 6G intelligent networks: from massive MIMO processing to semantic communication [J]. IEEE Wireless Communications, 2022, 29(2): 84-91.
- [24] ZHOU Haoyi, ZHANG Shanghang, PENG Jieqi, et al. Informer: beyond efficient transformer for long sequence time-series forecasting [C]//Proceedings of the AAAI conference on artificial intelligence (AAAI). San Jose; AAAI, 2021: 11106-11115.