



5G

# 5G 赋能智慧旅游：网络优化、边缘计算与切片技术的创新应用

陈德来<sup>1,2,3</sup>, 余毅<sup>2</sup>

- 中国电信股份有限公司上海分公司, 上海 200120;
- 上海通创信息技术股份有限公司, 上海 201203;
- 上海市网络制造与企业信息化重点实验室, 上海 200030)

**摘要:** 介绍了5G技术在大型景区智慧旅游中的创新应用, 尤其是5G网络优化、边缘计算加速VR渲染以及网络切片技术对提高游客体验的影响。结合国外5G技术的应用案例, 阐述了智慧景区的未来发展趋势。通过分析实际部署案例, 探索了5G技术在改善网络稳定性、增强游客互动体验和提高景区运营效率方面的潜力, 旨在为智慧旅游领域提供新的技术解决方案和理论支持。

**关键词:** 5G; 智慧旅游; 网络切片; 边缘计算; VR

**中图分类号:** TP393

**文献标志码:** A

**doi:** 10.11959/j.issn.1000-0801.2025065

## 0 引言

随着5G技术的快速发展, 旅游行业逐渐向智慧化、数字化转型。美国、日本和韩国等已在5G智慧旅游领域取得了显著进展。例如, 美国的迪士尼乐园使用5G+AR技术, 提升游客的沉浸式体验; 韩国则在济州岛通过5G+AI实现智能导览和无人驾驶服务。相比之下, 我国的5G智慧旅游应用起步较晚, 但在部分核心技术上正在快速追赶。

## 1 5G技术在智慧旅游中的应用

### 1.1 5G网络的优化与应用

在智慧旅游的应用中, 5G网络优化是关键, 尤其是在大规模游客聚集场景下, 如何保持网络稳定、高速、低时延的运行环境尤其重要。为了

满足这些要求, 5G网络优化方案涉及多项技术创新, 主要包括网络智能呼吸技术、多用户MIMO技术、小基站部署方案等。以下是详细的技术方案描述。

#### 1.1.1 5G网络智能呼吸技术

智慧旅游场景的特点之一是游客流量在不同时间段和区域内波动较大, 尤其是在节假日、特殊活动期间, 网络负载激增, 导致网络拥堵和用户体验下降。为了解决这一问题, 本文采用了5G网络智能呼吸技术, 通过动态调整信道资源和网络调度方案, 智能适应实时的网络流量变化。其基本原理介绍如下。

智能呼吸技术通过监测网络的实时流量情况, 动态调整基站的资源分配和调度策略。当用户流量激增时, 系统会自动增加分配给热点区域的无线资源, 反之, 当用户流量较少时, 减少资

收稿日期: 2024-10-08; 修回日期: 2025-02-21

基金项目: 上海市信息化发展专项



源分配，从而达到节约资源的目的。

具体的优化过程包括以下步骤。

(1) 流量预测：基于历史数据和实时监测，采用机器学习模型预测用户流量高峰和热点区域，提前优化资源分配策略。

(2) 信道资源自适应调度：根据用户的分布和需求，智能调整信道带宽，优先保障高负荷区域的网络质量。

(3) 负荷均衡：通过核心网的负荷均衡模块，将不同基站的负荷均衡分配，避免部分基站过载，保障整体网络的稳定性。

(4) 动态缩放：当用户需求较高时，扩大基站的服务范围，增加服务的频率；当需求降低时，缩小覆盖范围，以节省电能和网络资源。

通过上述智能呼吸策略，5G网络可以有效应对大规模用户流量的波动，确保网络的稳定性和用户体验的连续性。

网络智能呼吸的数学模型如下。

设定信道资源的分配由系统负载量决定，表示为：

$$\text{Ralloc}(t) = \frac{C_{\max} \times U(t)}{U_{\text{total}}} \quad (1)$$

其中， $\text{Ralloc}(t)$ 表示在时间 $t$ 分配给特定区域的资源比例， $C_{\max}$ 表示基站的最大可用资源， $U(t)$ 表示该时间段的用户数， $U_{\text{total}}$ 表示该基站覆盖区域内的总用户数。通过这一表达式，系统可以动态计算每个时段应分配的资源，确保资源的灵活调度和分配。

### 1.1.2 多用户 MIMO (MU-MIMO) 技术

在5G网络中，MU-MIMO是一项重要的技术，其通过多个天线阵列同时为多个用户传输数据，提升了系统的容量和频谱利用率。在智慧景区中，MU-MIMO技术通过合理的用户调度和信道预编码，能够有效提高高密度人群中的数据传输效率。技术原理如下。

MU-MIMO的核心思想是通过多个用户的

信道进行空间分离，使基站可以在同一时间、同一频率上为多个用户传输数据，避免信道间的干扰。这可以通过信道预编码和信道反馈技术实现。

(1) 信道预编码：基站根据接收到的信道状态信息 (CSI) 计算预编码矩阵，优化每个用户的信号路径，使发射信号在空间上互不干扰。

(2) 用户分组调度：根据用户的信道质量和需求，系统将用户进行分组，分配到不同的MIMO流中，以提高系统的频谱效率。

MU-MIMO调度模型如下。

多用户MIMO的调度优化可以通过最大化系统的吞吐量来实现，其目标函数为：

$$\max_{W_k} \sum_{k=1}^K \text{lb} \left( 1 + \frac{|h_k W_k|^2}{\sigma^2 + \sum_{j \neq k} |h_j W_j|^2} \right) \quad (2)$$

其中， $W_k$ 是第 $k$ 个用户的预编码矩阵， $h_k$ 是第 $k$ 个用户的信道向量， $\sigma^2$ 是噪声功率， $K$ 为用户数。通过优化预编码矩阵，可以最大化每个用户的信号质量并减少用户之间的干扰。

### 1.1.3 小基站部署方案

大型景区的覆盖往往面临基站选址困难、地形复杂等挑战，为了解决这些问题，本文采用了小基站部署方案。小基站体积小、安装灵活，可以在多个关键区域进行部署，以增强5G信号的覆盖范围和深度。

部署策略如下。

(1) 热点区域密集部署：在游客集中的区域（如演出场地、餐饮区等），通过密集部署小基站，提升该区域的网络容量。

(2) 分布式天线系统 (DAS)：利用DAS将基站信号分布到多个小区域，减少信号盲点，提升整体网络覆盖质量。

(3) 基站共享与共建：采用5G魔方塔等一体化设计，将多个运营商的设备集成在一根塔杆上，既解决基站选址难题，又减少基础设施的重

复建设。

部署方案的数学分析如下。

小基站的覆盖半径  $r$  与基站的发射功率  $P$  和路径损耗系数  $\alpha$  相关，其表达式为：

$$r = \left( \frac{P}{\alpha} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (3)$$

通过适当调整基站的发射功率，可以优化小基站的覆盖范围，以达到最佳的网络覆盖效果。本文设计了 5G 魔方塔，如图 1 所示。该魔方塔集成了 5G 小基站、监控摄像机、LCD 显示屏、城市时钟与指路明灯等多项基础设施，具有杆箱一体化设计，解决了度假区 5G 覆盖密度和容量问题。同时，魔方塔整体风格时尚，与旅游景区融合性强，提升了景区的整体美观度。



图1 5G 魔方塔

根据景区的分布和建设管理要求，建议在景区选择特色街部署若干个 5G 小站，以实现 5G 信号全覆盖，5G 小站除了放置运营商的 5G AAU 以及 Wi-Fi AP，还将智慧灯杆、智能终端设备集成于一身，以全新的面貌展现 5G 智慧旅游新基建特色。

### 1.1.4 小结

通过智能呼吸技术、多用户 MIMO 调度和小基站部署的综合应用，智慧景区的 5G 网络得以在高负荷状态下维持稳定性，并显著提升了网络

的容量和覆盖范围。这些技术共同作用，优化了用户的网络体验，确保游客在高密度场景中的低时延、高带宽使用需求得以满足。

## 1.2 边缘计算加速 VR 渲染

在 5G 智慧旅游中，虚拟现实 (VR) 技术通过提供沉浸式体验，极大提升了游客的参与感。然而，传统 VR 系统对硬件的高要求 (如高性能计算和图形处理能力) 限制了大规模应用的可行性。通过结合 5G 网络的高带宽和低时延特性，以及边缘计算的分布式计算能力，本文提出了一种基于 5G 的边缘计算加速 VR 渲染的解决方案，从而大幅提升 VR 系统的性能、降低设备成本并改善用户体验。

### 1.2.1 边缘计算在 5G 中的角色

边缘计算是指将计算任务从云数据中心转移到网络边缘的分布式计算架构，它可以显著降低数据处理的时延，提高处理速度。在 VR 渲染中，边缘计算的作用是将繁重的图形渲染任务从终端设备 (如 VR 头戴设备) 转移到靠近用户的边缘服务器，由此减少设备对计算资源的需求，并降低数据往返的时延。

5G 网络的低时延特性为边缘计算提供了理想的网络基础，支持实时交互和高速数据传输，使复杂的 VR 场景可以在边缘服务器上完成渲染，再将渲染结果实时传输给用户。

### 1.2.2 方案架构

5G 边缘计算加速架构如图 2 所示。

(1) VR 用户设备。游客佩戴的终端设备。由于计算任务被转移到边缘服务器，设备只需要具备基本的传感与显示功能，而不再需要高性能计算能力，从而降低了成本。

(2) 5G 网络。通过 5G 的高带宽和低时延网络，用户设备和边缘服务器之间能够快速传输数据和渲染结果，确保实时的 VR 交互。

(3) 边缘服务器。位于网络边缘的计算节点，负责处理 VR 渲染任务。边缘服务器拥有强

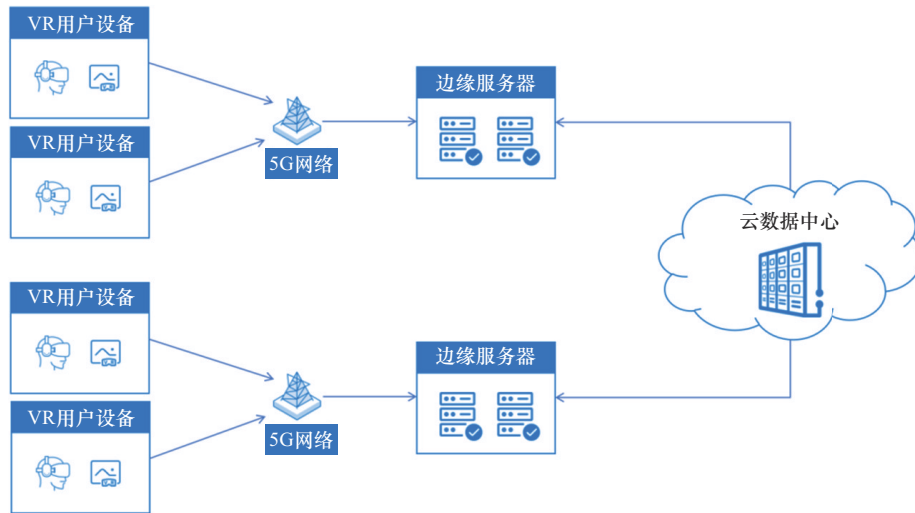


图2 5G边缘计算加速架构

大的图形处理单元（GPU）资源，可以高效处理图形渲染，并将渲染结果实时发送给用户设备。

（4）云数据中心。存储庞大的VR内容和数据，通过边缘服务器进行分发和管理。数据中心负责非实时的存储和后台处理，边缘服务器则处理实时渲染任务。

### 1.2.3 渲染加速技术

VR渲染主要依赖GPU进行高效的3D场景渲染和计算。在传统VR系统中，所有渲染任务都由用户的终端设备完成，这对设备的性能要求非常高。通过将这些任务转移到边缘服务器，系统可以充分利用强大的边缘GPU资源，同时通过5G网络快速将渲染结果返回到用户设备，确保用户的沉浸式体验。技术原理如下。

（1）分布式渲染。VR场景中的渲染任务可以按帧分配到边缘服务器进行并行计算。这种并行渲染方式大大减轻了单个设备的计算负担。

（2）低时延传输。5G网络提供的低时延（典型值<20 ms）和高带宽（理论值可达1 Gbit/s）使渲染结果的传输几乎是实时的，确保用户在交互过程中的流畅体验。渲染后的数据以压缩格式通过5G网络传输到用户设备进行解码显示。

（3）预测渲染。边缘服务器通过传感器数据

（如头部追踪、眼球追踪）预测用户的下一步动作和视角，从而提前渲染相关场景，进一步减少渲染时延。预测渲染的数学模型如下。

$$\hat{F}(t+\Delta t) = \alpha \times F(t) + (1-\alpha) \times F(t-\Delta t) \quad (4)$$

其中， $\hat{F}(t+\Delta t)$ 为预测的下一帧画面， $F(t)$ 和 $F(t-\Delta t)$ 分别为当前帧和前一帧， $\alpha$ 为平滑系数，通过历史数据预测下一帧画面，减少实时渲染的负荷。

边缘计算优化表达式如下。

边缘计算通过减少中央服务器到终端的往返时延来优化VR渲染。假设从终端到云数据中心的时延为 $t_{dc}$ ，边缘服务器的时延为 $t_{edge}$ ，则整体时延可表示为：

$$t_{total} = t_{trans} + t_{render} + t_{edge} \quad (5)$$

其中， $t_{trans}$ 是数据传输时延， $t_{render}$ 为边缘服务器的渲染时间。通过在边缘服务器处理渲染任务， $t_{render}$ 显著减少。

### 1.2.4 实现步骤

（1）边缘节点部署。首先在景区的不同区域部署多个边缘服务器，确保游客随时连接到最近的边缘节点，降低网络传输时延。每个边缘节点都配备高性能GPU，能够实时处理多个用户的渲染任务。

(2) VR内容传输与缓存。在云数据中心存储完整的VR内容。边缘服务器在接收到用户请求后,通过5G网络从云数据中心获取所需的VR内容,并缓存至本地,减少重复传输。

(3) 实时渲染与返回。当用户进入VR场景后,所有交互操作(如视角切换、场景改变)都由边缘服务器实时进行渲染。渲染后的数据通过5G网络传输给用户设备,确保交互的实时性和流畅性。

(4) 预测与提前渲染。利用用户设备的传感器数据(如头部姿态、眼球移动)预测用户下一步的视角和操作,提前渲染相关画面,将渲染结果缓存至边缘服务器,避免用户等待渲染完成。

(5) 数据传输优化。边缘服务器和用户设备之间采用压缩编码技术,减少传输数据量。通过H.265/HEVC等高效编码技术减少带宽占用,同时保持画面质量。

### 1.2.5 系统性能评估

该方案能够有效减少用户端的渲染负荷,改善用户体验。与传统集中式渲染方案相比,基于边缘计算的VR渲染方案具有以下优势。

(1) 渲染时延降低:通过边缘计算,渲染时延减少了30%~50%,尤其适合大规模实时互动场景。

(2) 网络带宽优化:由于大部分渲染任务在边缘完成,网络传输的数据量显著减少,用户端所需带宽降低,5G网络的利用效率提高。

(3) 终端设备成本降低:用户设备的硬件负担减少,使普通消费级设备也能实现高质量的VR体验,推动了VR技术的普及。

### 1.2.6 数学模型与优化表达式

系统的端到端的时延可以表示为:

$$t_{\text{total}} = t_{\text{edge}} + t_{\text{trans}} + t_{\text{decode}} \quad (6)$$

其中,  $t_{\text{edge}}$  为边缘服务器渲染时延,  $t_{\text{trans}}$  为5G网络的传输时延,  $t_{\text{decode}}$  为用户设备上的解码时延。通过将渲染任务转移到边缘,  $t_{\text{total}}$  可以显著降低。

### 1.2.7 实施中的挑战与优化

(1) 网络时延的管理。尽管5G提供了低时延网络,但在游客流量激增时,网络传输的拥塞仍可能导致时延上升。为此,可以通过智能负载均衡和动态带宽分配来减少时延波动。

(2) 边缘服务器的资源分配。边缘服务器的计算资源是有限的,多个用户同时访问时,可能出现计算瓶颈。因此,采用动态资源分配算法,根据用户的请求和计算任务的复杂度,动态分配GPU计算资源,以保证每个用户的流畅体验。

### 1.2.8 小结

边缘计算加速VR渲染的方案通过将大量计算任务转移到边缘节点,有效降低了终端设备的计算负担,并依赖5G网络实现了低时延的高质量传输。该方案不仅提升了VR体验的流畅性,还降低了设备成本,为5G+VR在智慧旅游中的大规模应用提供了技术支持。

## 1.3 网络切片技术

网络切片是5G技术的核心创新之一,它允许运营商在同一物理网络基础设施上划分出多个虚拟网络,每个网络“切片”根据业务的不同需求,提供个性化、按需的网络服务。在5G智慧旅游应用中,网络切片技术可以根据景区内不同场景的需求,灵活配置资源,提供差异化的服务,如游客的VR/AR体验、安保系统、无人机管理等。

### 1.3.1 网络切片概述

网络切片是在物理网络基础上构建逻辑隔离的虚拟网络,使运营商可以根据不同业务需求,灵活调度资源。每个网络切片是一个端到端的逻辑网络,涵盖了从无线接入网(RAN)到核心网以及传输网的完整路径。

- 服务质量保证。通过网络切片,可以为不同的应用场景提供专门优化的网络服务。例如,VR体验需要低时延和高带宽,而安防监控则需要高可靠性和稳



定性。

- 资源隔离。网络切片提供了相互隔离的逻辑网络，使不同类型的业务不会互相干扰，确保了每个业务的质量和安全性。

### 1.3.2 网络切片的架构

网络切片的架构一般分为3层：通信服务管理功能（communication service management function, CSMF）、网络切片管理功能（network slice management function, NSMF）和网络切片子网管理功能（network slice subnet management function, NSSMF），具体介绍如下。

CSMF负责将业务需求转化为切片需求。比如，为一个5G智慧景区的VR服务，系统会通过CSMF将需求翻译为具体的网络切片资源需求，如高带宽、低时延。

NSMF管理网络切片的创建、配置和管理。NSMF会根据CSMF传递的需求，设计出网络切片的结构，包括RAN、核心网和传输网的部分。

NSSMF管理网络子切片（如RAN、核心网子切片）的创建与资源分配。NSSMF负责在各个子网中动态调整资源，以满足NSMF的需求。

### 1.3.3 切片类型和应用场景

根据不同应用场景的需求，5G网络切片主要有以下3种类型。

#### （1）增强型移动宽带（eMBB）切片

针对需要大带宽的业务，如VR/AR和4K/8K视频直播等。eMBB切片的主要特点是提供高带宽和中低时延服务。

#### （2）超可靠低时延通信（URLLC）切片

用于对可靠性和时延要求极高的应用，如安防系统、无人机监控等。URLLC切片能够提供极低的时延（<1 ms）和高可靠性（99.999%的可用性）。

#### （3）大规模机器类型通信（mMTC）切片

用于连接大量低功耗物联网设备，如景区的

环境监测传感器、智慧照明系统等。mMTC切片的特点是能够支持大量设备同时接入，但对带宽和时延要求较低。

切片类型与场景的对应关系见表1。

表1 切片类型与场景的对应关系

切片类型	应用场景	特点
eMBB	VR/AR体验、4K直播	高带宽、中低时延
URLLC	安防监控、无人机	超高可靠性、低时延
mMTC	物联网传感器	大规模设备接入、低功耗

### 1.3.4 切片管理的技术方案

网络片的核心在于如何根据不同应用场景的需求，灵活管理和分配网络资源，具体的技术实现包括以下几个步骤。

#### （1）切片的创建与生命周期管理

根据业务需求，运营商可以通过NSMF创建新的网络切片，并定义其生命周期。在智慧景区中，每个切片的生命周期可以按天、小时，甚至分钟级别进行动态调整。例如，在高峰期为玩家提供VR切片，而在低峰期减少带宽分配。

切片的生命周期可以用函数 $L(t)$ 表示，定义如下。

$$L(t) = f(R(t), B(t)) \quad (7)$$

其中， $R(t)$ 是实时资源需求， $B(t)$ 是带宽需求。通过实时监测景区流量和业务需求，动态调整切片的带宽和资源分配。

#### （2）切片的资源调度

在同一个物理网络中，网络切片技术可以按需灵活调度带宽、时延、计算资源。不同切片具有不同的服务水平协议（SLA），例如，eMBB切片分配较高带宽，URLLC切片优先保证低时延。

资源调度可以通过优化目标函数来实现：

$$\max \sum_{i=1}^N U_i(C_i) \quad (8)$$

其中， $U_i$ 是第 $i$ 个切片的效用函数， $C_i$ 为该切片

的资源分配量。通过最大化切片效用函数，确保资源分配的公平性和效率。

### (3) 切片的隔离与安全

各个切片之间的隔离性是确保服务质量和安全的关键。在5G网络中，每个切片的物理资源和虚拟资源是严格隔离的，不同切片之间不会互相影响，这对安全性和隐私保护尤其重要，特别是涉及安防和支付业务的场景。

### (4) 切片的动态调整

运营商可以根据流量的变化动态调整切片的规模和资源分配。例如，在游客流量高峰时，可以临时增加eMBB切片的带宽；在无人机安防巡检任务时，自动启用URLLC切片，确保低时延通信。

资源的动态调整可以通过带宽分配函数 $B(t)$ 来控制：

$$B(t) = B_0 + \sum_{i=1}^N \Delta B_i(t) \quad (9)$$

其中， $B_0$ 是基础带宽， $\Delta B_i(t)$ 是动态增加的带宽，依据流量需求在时间 $t$ 内进行调整。

## 1.3.5 关键技术实现

### (1) 虚拟化技术 (NFV)

网络切片通过NFV技术将传统的硬件网络功能虚拟化成软件模块，使其可以在共享的硬件平台上运行。NFV的灵活性使网络功能可以按需动态部署，形成不同的切片。

### (2) 软件定义网络 (SDN)

SDN技术通过集中控制的方式，使网络资源的调度更加灵活。SDN控制器可以根据不同切片的需求，动态调整数据流路由，实现网络资源的按需分配。

### (3) 边缘计算的协同

在边缘计算场景中，网络切片能够为不同的边缘节点提供定制化服务。例如，为VR/AR用户分配低时延的边缘计算资源，同时为物联网设备提供基本的网络接入服务。边缘计算与

网络切片的协同优化可提高资源的利用率。

## 1.3.6 网络切片应用案例

在某大型景区的5G智慧旅游项目中，网络切片技术被广泛应用于如下场景。

### (1) VR/AR 互动体验

为游客提供沉浸式的VR互动内容，采用eMBB切片提供高带宽、低时延的网络服务，确保流畅的VR体验。

### (2) 无人机安防监控

景区部署了无人机实时监控系统，通过URLLC切片保证低时延和高可靠性的通信，确保无人机在安全巡逻中及时响应。

### (3) 物联网环境监测

景区内部署了大量物联网传感器（如空气质量监测、温湿度传感器等），通过mMTC切片，支持大规模设备接入，实现实时监控和数据收集。

## 1.3.7 实施中的挑战

(1) 复杂的切片管理。由于不同业务对网络需求差异巨大，切片管理的复杂性大大增加。运营商需要根据业务需求进行实时资源调度和优化。

(2) 安全性和隔离性。切片之间的隔离性和安全性要求严格，需要通过多重隔离机制确保不同业务之间互不干扰。

(3) 资源过度分配。为避免切片间资源冲突，需要动态调度算法的支持，避免过度分配资源给某个业务场景。

## 1.3.8 小结

网络切片技术使5G网络能够满足不同业务场景的需求，并提供差异化、定制化的服务。在智慧旅游中，网络切片为VR/AR体验、无人机监控、物联网等场景提供了稳定、高效的网络支持，极大提升了游客的体验和景区的运营效率。



## 2 5G技术应用成果

通过对上海某著名国际度假区进行5G技术的应用和具体技术方案的实施，解决了多个度假区运营和管理中的关键问题。以下是技术方案的实际应用成果及解决的问题总结。

### (1) 网络优化与稳定性提升

实际成果如下。

- 网络稳定性提升。根据部署后的监测数据，景区内无线接通率提升至99.7%，掉线率减少至0.02%，上行用户业务感知速率和业务体验速率分别提升了17.56%和47 Mbit/s，极大地改善了游客的网络使用体验。
- 负荷均衡优化。高峰期网络拥堵问题得到显著缓解，网络连接质量更加稳定，满足了大量游客同时访问网络的需求。

部署前后详细指标增益见表2。

### (2) 基站选址难题解决与建设效率提升

实际成果如下。

- 覆盖面扩大。通过魔方塔的集成设计，景区内实现了更加全面的5G信号覆盖，特别是在基站选址困难的区域，基站密度得到了有效提升。
- 建设成本降低。与传统基站相比，5G魔方塔的集成化设计大幅减少了施工和设备安装成本，同时缩短了建设周期，使网络基础设施能够快速部署。

### (3) VR/XR 体验提升

实际效果如下。

- 渲染效率提升。通过边缘计算，VR渲染时延大幅减少，游客可以获得更流畅、低时延的沉浸式互动体验。例如，VR互动场景加载速度提高了30%以上，游客的视觉与交互体验更加流畅。
- 终端设备负荷降低。由于渲染任务被转移到边缘计算节点，游客所使用的终端设备无须承载过高的计算任务，降低了硬件成本，使更多游客能够轻松体验高质量的VR/XR内容。

## 3 结束语

在上海某度假区内部署5G魔方小站、智能呼吸等场景，显著优化了度假区的网络覆盖能力，对比部署前后指标，业务体验速率提升47 Mbit/s，上行用户业务感知速率提升17.56%，上行频谱效率提升6.91%。5G技术自投运以来有效支撑了度假区的旅客服务提升工作，相关场景功能和体验服务取得了游客的一致好评，度假区和员工对当前景区建设及运行情况持有极高的满意度。

总之，5G技术在智慧旅游领域的应用，不仅提升了游客体验，还为景区管理提供了新的思路 and 工具，推动了旅游行业的可持续发展。未来，随着技术的进一步发展与应用，5G智慧旅游将迎来更广阔的前景。

表2 部署前后详细指标增益

开始时间	无线接通率	无线掉线率	系统内切换成功率	上行共享信道PRB利用率	下行共享信道PRB利用率	RRC连接平均连接用户数	上行IP Throughput/(Mbit·s <sup>-1</sup> )	下行IP Throughput/(Mbit·s <sup>-1</sup> )
部署前	99.55%	0.04%	99.89%	13.65%	14.73%	307.33	19.39	110.59
部署后	99.67%	0.02%	99.89%	11.13%	15.53%	309.53	17.56	157.81
趋势	↑	↓	-	↓	↑	-	↓	↑

## 参考文献:

- [1] 龚万炜. 面向 5G 网络的多用户 MIMO 调度方法[J]. 数字通信世界, 2023(6): 26-28.
- [2] 张英辉, 乔国繁, 杨春亮, 等. 5G 小基站应用场景综述[J]. 通信技术, 2021, 54(8): 1815-1819.
- [3] 王文兵, 张志民. 5G 小基站自动配置与自动部署技术方案的研究[J]. 通信技术, 2020, 53(12): 2961-2965.
- [4] 项弘禹, 肖扬文, 张贤, 等. 5G 边缘计算和网络切片技术[J]. 电信科学, 2017, 33(6): 54-63.
- [5] ROST P, MANNWEILER C, MICHALOPOULOS D S, et al. Network slicing to enable scalability and flexibility in 5G mobile networks[J]. IEEE Communications Magazine, 2017, 55(5): 72-79.
- [6] EROL-KANTARCI M, SUKHMANI S. Caching and computing at the edge for mobile augmented reality and virtual reality (AR/VR) in 5G[C]//Ad Hoc Networks. Cham: Springer International Publishing, 2018: 169-177.
- [7] JOUNG J, KIM E Y, LIM S H, et al. Capacity evaluation of various multiuser MIMO schemes in downlink cellular environments[C]//Proceedings of the 2006 IEEE 17th International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications. Piscataway: IEEE Press, 2006: 1-5.

## [作者简介]

陈德来 (1965-), 男, 博士, 中国电信股份有限公司上海分公司研究员, 上海通创信息技术股份有限公司总经理, 上海市网络制造与企业信息化重点实验室副主任, 主要研究方向为数据通信、云网融合、大数据和人工智能等。

余毅 (1980-), 男, 上海通创信息技术股份有限公司副总经理、高级工程师, 主要研究方向为数字化、大数据技术。