

# 增强现实 (AR) 应用下5G上行链路容量需求与优化

高 宇

河北广电网络集团秦皇岛有限公司 河北 秦皇岛 066000

**摘 要:** 本文聚焦于增强现实 (AR) 应用在5G网络环境下的上行链路容量需求与优化问题。首先深入剖析了AR应用的特点及其对5G上行链路的关键性能指标要求, 包括低延迟、高数据速率和可靠性等。通过建立数学模型和实际场景分析, 详细阐述了AR应用产生的上行链路容量需求规模。接着, 针对这些需求, 从网络架构优化、资源分配策略、编码调制技术改进等多个维度提出了切实可行的优化方案。并通过仿真实验验证了优化方案的有效性, 结果表明所提方案能够显著提升5G上行链路在AR应用场景下的性能, 满足其严格的容量需求。

**关键词:** 增强现实 (AR); 5G上行链路; 容量需求; 优化策略

## 1 引言

随着信息技术的飞速发展, 增强现实 (AR) 技术作为一种将虚拟信息与真实世界融合的创新技术, 正逐渐渗透到各个领域, 如教育、医疗、娱乐、工业等。AR应用通过实时获取真实场景信息, 并将虚拟对象准确叠加其中, 为用户提供沉浸式的交互体验。然而, 要实现高质量的AR服务, 对网络通信能力提出了极高的要求, 尤其是5G上行链路。

5G网络以其高速率、低延迟和大连接数等特性, 为AR应用的广泛部署提供了可能。但AR应用中大量传感器数据的实时上传、高分辨率视频流的传输等, 使得上行链路面临着巨大的容量压力。因此, 深入研究AR应用下5G上行链路容量需求, 并探索有效的优化策略, 对于推动AR技术的进一步发展和5G网络的深度应用具有重要的理论和实践意义。

## 2 AR 应用特点及对 5G 上行链路性能要求

### 2.1 AR应用特点

(1) 实时交互性: AR应用强调用户与虚拟和真实环境的实时互动。用户的每一个动作, 如头部转动、手势操作等, 都需要及时反馈到系统中, 系统根据这些输入快速更新虚拟对象的位置、形态等信息, 并重新渲染后呈现给用户。这就要求数据传输具有极低的延迟, 以确保交互的流畅性和自然性。(2) 多源数据融合: 为了实现逼真的增强现实效果, AR系统需要融合来自多种传感器的数据, 包括摄像头、加速度计、陀螺仪、GPS等。这些传感器产生的数据具有不同的格式和特点, 且数据量庞大。例如, 高清摄像头采集的图像数据每秒可达数兆字节甚至数十兆字节, 所有这些数据都需要实时上传到服务器进行处理和分析。(3) 高分辨率内容呈现: 随着显示技术的不断进步, AR设备对虚拟内容的分辨率要求

越来越高。高分辨率的虚拟图像和视频需要更高的数据传输速率来保证在用户端能够实时、清晰地显示, 避免出现卡顿或模糊现象。

### 2.2 对5G上行链路性能要求

(1) 低延迟: AR应用中的交互延迟直接影响用户体验。一般来说, 人眼能够感知的延迟上限约为100ms, 为了提供流畅的交互体验, 5G上行链路的端到端延迟应控制在20ms以内, 甚至更低。这要求网络在数据传输、处理和转发等各个环节都要具备高效的性能。(2) 高数据速率: 考虑到AR应用中多源高分辨率数据的上传需求, 上行链路需要提供足够高的数据速率。根据不同的应用场景和设备性能, 上行数据速率可能需要达到数十Mbps甚至上百Mbps<sup>[1]</sup>。例如, 在工业维修AR应用中, 维修人员通过AR设备实时上传高清视频和设备状态数据到远程专家系统, 以便获得及时的指导和建议, 这就对上行数据速率提出了严格要求。(3) 高可靠性: AR应用在一些关键领域, 如医疗手术导航、危险环境作业等, 对数据的可靠传输要求极高。任何数据丢失或错误都可能导致严重的后果。因此, 5G上行链路需要具备高可靠性的传输机制, 确保数据能够准确无误地到达目的地。

## 3 AR 应用下 5G 上行链路容量需求分析

### 3.1 数学模型建立

为了准确分析AR应用下5G上行链路的容量需求, 我们建立一个基于业务流量模型的数学分析框架。假设在一个AR应用场景中, 存在N个用户设备同时进行数据上传。每个用户设备产生的上行数据流量可以表示为多个数据流的叠加, 包括传感器数据流 $S_i$ 、视频数据流 $V_i$ 等, 即 $U_i = S_i + V_i$ , 其中 $i = 1, 2, \dots, N$ 。

传感器数据流 $S_i$ 通常具有一定的周期性和固定格式, 其数据速率 $R_{s_i}$ 可以根据传感器的采样频率和数据精度

进行计算。例如，一个加速度计以100Hz的频率采样，每个采样数据占用2字节，则其产生的数据速率为 $R_{S_i} = 100 \times 2 \times 8 = 1600\text{bps}$ 。

视频数据流 $V_i$ 的数据速率 $R_{V_i}$ 则与视频的分辨率、帧率和编码方式等因素有关。以高清视频（1920×1080分辨率，30帧/秒）为例，采用H.264编码方式，其数据速率大约在4—8Mbps之间。

因此，单个用户设备的上行数据速率 $R_{U_i}$ 为传感器数据速率和视频数据速率之和，即 $R_{U_i} = R_{S_i} + R_{V_i}$ 。整个系统的上行链路总容量需求 $R_{\text{total}}$ 为所有用户设备上行数据速率之和，即 $R_{\text{total}} = \sum_{i=1}^N R_{U_i}$ 。

### 3.2 实际场景分析

以一个大型商场的AR导航应用为例，假设商场内有1000名用户同时使用AR导航设备。每个用户的AR设备配备了高清摄像头、加速度计、陀螺仪等传感器。高清摄像头采集的视频分辨率为1280×720，帧率为30帧/秒，采用H.265编码方式，经估算视频数据速率约为2Mbps。加速度计和陀螺仪等传感器产生的数据速率约为10kbps。

则单个用户设备的上行数据速率 $R_{U_i} = 2 \times 1024 \times 1024 / 8 + 10 \times 1024 / 8 \approx 262144 + 1280 = 263424\text{bps} \approx 0.26\text{Mbps}$ 。

整个商场内1000名用户的上行链路总容量需求 $R_{\text{total}} = 1000 \times 0.26 = 260\text{Mbps}$ 。这只是一个初步的估算，实际应用中还需要考虑数据传输的开销、网络拥塞等因素，实际的容量需求可能会更高。

## 4 5G 上行链路容量优化策略

### 4.1 网络架构优化

（1）边缘计算部署：传统的云计算模式将所有数据处理任务都集中在远程数据中心，这导致AR应用中大量数据需要在用户设备和数据中心之间长距离传输，增加了延迟和网络负担。通过在网络边缘部署边缘计算节点，将部分数据处理和存储功能下沉到网络边缘，靠近用户设备。这样，AR设备可以将传感器数据和视频数据首先上传到边缘计算节点进行初步处理和分析，只将关键结果或必要信息上传到云端数据中心，大大减少了上行链路的数据传输量，降低了延迟<sup>[2]</sup>。例如，在AR游戏中，边缘计算节点可以实时处理玩家的位置信息和游戏场景数据，快速生成虚拟对象的渲染指令并返回给玩家设备，避免了将大量游戏场景数据上传到云端进行处理，有效提升了上行链路的性能。

（2）多接入边缘网络（MANO）优化：MANO负责对网络中的边缘计算资源进行管理和调度。通过优化MANO的算法和策略，实现边缘计算节点之间的资源协同和负载

均衡。当某个边缘计算节点负载过高时，MANO可以将部分任务动态迁移到其他负载较低的节点进行处理，确保整个网络的性能稳定。同时，MANO还可以根据AR应用的实时需求，灵活分配计算、存储和网络资源，提高资源利用率，从而间接提升上行链路的容量。

### 4.2 资源分配策略

（1）动态频谱分配：5G网络中频谱资源有限，为了满足AR应用对上行链路容量的需求，需要采用动态频谱分配技术。根据不同用户设备的业务需求、信道质量等因素，实时调整分配给每个用户的频谱资源。例如，对于正在进行高清视频上传的AR设备，由于其数据速率要求较高，可以分配更多的频谱带宽；而对于只上传简单传感器数据的设备，则分配较少的频谱资源<sup>[3]</sup>。通过动态频谱分配，实现频谱资源的高效利用，提高上行链路的整体容量。

（2）上行链路功率控制：合理的功率控制可以减少用户设备之间的干扰，提高上行链路的信号质量，从而增加系统的容量。在AR应用场景中，由于用户设备分布密集，上行链路干扰问题较为突出。通过采用闭环功率控制算法，根据基站接收到的信号强度和质量，实时调整用户设备的发射功率。当用户设备距离基站较近时，适当降低发射功率，减少对其他用户的干扰；当距离较远时，则增加发射功率，保证信号能够准确到达基站。这样可以在保证通信质量的前提下，提高上行链路的频谱效率，增加系统容量。

### 4.3 编码调制技术改进

（1）高效视频编码技术：针对AR应用中大量的视频数据上传需求，采用更高效的视频编码技术可以显著降低视频数据的大小，从而减少上行链路的数据传输量。例如，新一代的视频编码标准H.266/VVC相比H.265/HEVC，在相同的视频质量下，能够进一步将视频数据压缩率提高50%左右<sup>[4]</sup>。这意味着在相同的上行链路带宽条件下，采用H.266/VVC编码可以传输更高分辨率或更多帧率的视频数据，满足AR应用对高分辨率内容呈现的需求。

（2）自适应调制编码（AMC）：AMC技术根据信道质量的变化，动态调整调制方式和编码速率。在AR应用中，由于用户设备的移动性和信道环境的动态变化，上行链路的信道质量也会不断波动。通过实时监测信道质量指标，如信噪比（SNR）、误码率（BER）等，AMC技术可以自动选择最适合当前信道条件的调制编码方案。当信道质量较好时，采用高阶调制方式（如64QAM、256QAM）和较高的编码速率，以提高数据传输速率；当信道质量较差时，则采用低阶调制方式（如

QPSK) 和较低的编码速率, 保证数据传输的可靠性。通过AMC技术的应用, 可以在不同的信道条件下实现上行链路容量的最大化。

## 5 仿真实验与结果分析

### 5.1 仿真环境搭建

搭建基于MATLAB和NS-3的联合仿真平台, 模拟含多个AR用户设备的5G网络场景, 设备均匀分布在圆形区域, 基站位于中心。

#### 5.1.1 网络拓扑设置

圆形区域半径1000米, 基站居圆心。用户设备数量设100、200、300、400、500以模拟不同规模网络。

#### 5.1.2 信道模型选择

采用3GPP标准UMi信道模型, 路径损耗公式为:  $PL = 32.4 + 21\log_{10}(d) + 20\log_{10}(f_a)$  (d单位: km,  $f_a$ 载波频率, 设为3.5GHz)。

#### 5.1.3 业务模型设定

用户设备同时上传传感器(速率10kbps)和视频数据(分辨率1280×720, 帧率30帧/秒), 用H.265和H.266编码对比对上行链路容量的影响。

#### 5.1.4 优化策略参数配置

边缘计算部署: 设边缘计算节点处理部分视频初步分析, 处理后数据量减50%再上传云端。

动态频谱分配: 依业务需求和信道质量调整频谱带宽, 范围10MHz-100MHz, 初始均匀分配, 后动态调整。

上行链路功率控制: 用闭环算法, 基站依信号调整发射功率, 最大23dBm, 最小-40dBm。

自适应调制编码(AMC): 依SNR选方案, SNR > 20dB用256QAM和3/4编码; 10dB-20dB用64QAM和2/3编码; < 10dB用QPSK和1/2编码。

### 5.2 实验结果分析

容量提升效果: 通过对比未优化和采用优化策略

后的上行链路总容量, 实验结果表明, 在网络架构优化、资源分配策略和编码调制技术改进等综合优化措施的作用下, 上行链路总容量得到了显著提升。当用户设备数量为500时, 未优化系统的上行链路总容量约为300Mbps, 而采用优化策略后的系统上行链路总容量达到了600Mbps以上, 容量提升了一倍以上。

延迟和可靠性改善: 在延迟方面, 优化后的系统端到端延迟明显降低。未优化系统的平均延迟约为50ms, 而优化后系统的平均延迟降低到了20ms以内, 满足了AR应用对低延迟的要求。在可靠性方面, 通过优化资源分配和采用高效的编码调制技术, 数据传输的误码率显著降低, 数据传输的可靠性得到了有效保障。

## 结语

本文聚焦增强现实(AR)应用下5G上行链路容量需求与优化。分析AR应用特点, 明确其对5G上行链路低延迟、高数据速率和高可靠性的严苛要求, 阐述了其上行链路容量需求规模。从网络架构、资源分配、编码调制等方面提出优化方案, 仿真显示方案可提升性能、满足需求, 为AR在5G应用提供技术支持。未来, 随着技术发展, 需研究更高效智能的优化技术, 如结合人工智能, 实现资源自适应优化。

## 参考文献

- [1]张睿.5G上行链路关键技术的研究[D].西安电子科技大学,2020.
- [2]李明春,钟章队,陈为,等.5G-R增强现实通信系统方案研究[J].中国铁路,2021,(08):26-32.
- [3]雷鑫.基于系统级设计的5GDRU上行链路关键技术研究[实现][D].西安电子科技大学,2024.
- [4]曹磊,赵晔,熊尚坤,等.一种5G上行链路增强技术解决方案[J].移动通信,2019,43(09):24-27.