



世界无线局域网应用发展联盟
WLAN Application Alliance

WLAN先进体验 技术白皮书

WLAN Advanced User
Experience Technologies
Whitepaper



媒体合作 contact@waa-alliance.com
工作机会 contact@waa-alliance.com
业务合作: contact@waa-alliance.com
官方网站: www.waa-alliance.com

2024年11月28日 November 28, 2024
版权所有 侵权必究 All rights reserved

版权声明

本白皮书版权属于世界无线局域网应用发展联盟（WAA WLAN Application Alliance），并受法律保护。转载、摘编或利用其它方式使用本白皮书文字或者观点的，应完全引用其中段落描述，并注明“来源自世界无线局域网应用发展联盟（WAA WLAN Application Alliance）”。违反上述声明者，世界无线局域网应用发展联盟将追究其相关法律责任。

免责声明

本文档可能含有预测信息，包括但不限于有关未来的新技术、新业务、新产品等信息。由于实践中存在很多不确定因素，可能导致实际结果与预测信息有很大的差别。因此，本白皮书信息仅供参考，不构成任何要约或承诺，WAA及参与编写单位不对您在本文档基础上做出的任何行为承担责任，也可能不经通知修改上述信息，恕不另行通知。

参与编写单位

主要编写单位有：中国移动通信集团有限公司、中国电信集团有限公司、中国联合网络通信集团有限公司、华为技术有限公司、中兴通讯股份有限公司、新华三技术有限公司、烽火通信科技股份有限公司、锐捷网络技术有限公司、上海海思技术有限公司、杭州永谐科技有限公司、思博伦通信科技（北京）有限公司、深圳市信锐网科技术有限公司。

主要撰稿人

主要撰写人员名单：李峰、赵航斌、苏畅、邵岩、孙莉、王丽阳、江凡、李彦淳、廖倩、邓海洋、李云、王子晟、张耀东、程永椿、王汉涛、吴清根、陈金花、杜波、江韦、李巍、张志本、李炳泉、朱丽花、韩晓亮、王洪飞、马頔、李弋飞、赵望生、郑建宇。

（排名不分先后）

前言

本书内容

802.11be作为最新一代WLAN商用技术为用户带来了多链路、多资源单元等系列新特性，当前日益成熟的智能化技术将为充分释放这些空口的潜能带来机会。于此同时，云交互操作、直播和沉浸现实等创新场景及业务应用正在加速渗透到人类社会生产及生活的各个方面。区别于传统WLAN业务，新兴业务场景中频繁的人-机实时交互机制对WLAN网络的业务承载和体验保障能力提出了更为苛刻的技术诉求。

确保技术能力与用户体验诉求即时匹配，是WLAN生态未来能否继续持续繁荣的关键。因此，在用户体验升级的关键节点，围绕新兴业务场景，对WLAN当前技术能力进行针对性的分析和审视，从而明确关键挑战、提出解决思路、细化具体技术及标准建议，是驱动产业协同、实现生态正循环的关键举措。

本白皮书结合WLAN发展的趋势性技术，基于AI使能设备间协同的解题思路，探讨了切实可行的增强体验的关键措施、标准建议及行动计划。在此基础之上，WLAN全产业生态需通力配合，全面打造WLAN体验增强技术方案，赋能当下及未来的业务场景应用，以促进全产业链的持续共同繁荣。



目录

第 1 章 WLAN先进体验的背景和动机	1
1.1 新兴业务体验保障的技术诉求	1
1.2 体验诉求到技术诉求的映射分析	2
1.3 WLAN网络能力现状及改善目标	3
第 2 章 关键挑战及总体思路	4
2.1 技术挑战	4
2.2 总体思路	4
2.3 设计原则	5
第 3 章 WLAN体验增强关键技术方向及建议	6
3.1 先进业务体验六边形定义及解读	6
3.2 体验问题根因分析及可行路径	7
3.2.1 针对问题1：覆盖盲区	8
3.2.2 针对问题2：外部干扰	9
3.2.3 针对问题3：上行竞争	9
3.2.4 针对问题4：网内拥塞	10
3.2.5 针对问题5：网内干扰	11
3.2.6 针对问题6：用户漫游	13
3.3 标准协议建议	14
第 4 章 总结和展望	15
A 术语	17



第1章 WLAN先进体验的背景和动机

1.1 新兴业务体验保障的技术诉求

WLAN从2000年的802.11a到今天的802.11be，已经发展了七代，平均代际间隔约4年。代际技术的迭代创新，为人们的便捷生活和高效工作持续赋能的同时，也有效的刺激了WLAN产业生态的快速蓬勃发展。在AI大时代背景下，各类ICT相关的创新场景及新兴业务已经进入到了爆发的临界点。这些新生业务场景对WLAN的体验保障能力要求也更为苛刻。确保技术能力与用户体验诉求即时匹配，是WLAN生态未来能否继续持续繁荣的关键。因此，本章将重点对云交互操作、直播和沉浸现实应用等新兴业务及其对网络的技术诉求进行阐述和分析，重新审视业务体验保障对网络技术诉求的映射关系。

云交互应用及其体验诉求

随着数字孪生、高精细的物理引擎、高性能虚拟化技术的发展，云游戏、云桌面逐渐成为家庭和中小企业高性价比的享受游戏和办公设计的趋势性选择。例如，近期爆火出圈的《黑神话：悟空》，其精细的画面表现和逼真的物理感受将玩家置身于西游记故事世界的同时，也让玩家们对电脑硬件性能的需求急速攀升。而高昂的硬件成本（包括GPU）让众多玩家选择通过云电脑方式来体验该游戏。用户节省购机成本的同时，也变相的拉高了其对网络稳定时延及吞吐保障的期望。

云桌面、云游戏类应用需要用户的指令或游戏操作能即时反馈到云端，且云端渲染的画面能够实时传输到用户面前。这一过程不仅依赖极速保真的编码技术进行浅压缩，更需要网络实现传输的延迟和可靠性的保障。研究表明，在4K@60fps的显示码率下，传输速率的要求约300Mbps，对WLAN侧的延迟的理想要求为10ms，丢包率需要<0.1% [1, 2]。

图1：新兴的多样化业务及应用场景



直播业务及其体验诉求

近几年，网络直播业务已从单主播向多人直播互动的形式逐步转变，诸如主播和连麦观众互动，虚拟多人演唱会等新形式、新花样层出不穷。这些新兴的业务模式使得直播观众的参与度进一步提升，也反向促进了直播市场的持续繁荣。从技术视角来审视，上述的业务变化本质上是观众和主播之间的视频及语音信息的流转方式从传统的一对多单项广播向多人、多地即时交互的方向转变。直播业务的这一发展趋势对网络的多方同步和端对端延迟控制提出更为严苛的指标要求。评估表明，强、中、弱网络直播体验需求所对应的端对端延迟要求分别为22ms、28ms、55ms [3]，这意味着优质体验下的WLAN延迟需要保持在20ms及以下水平。

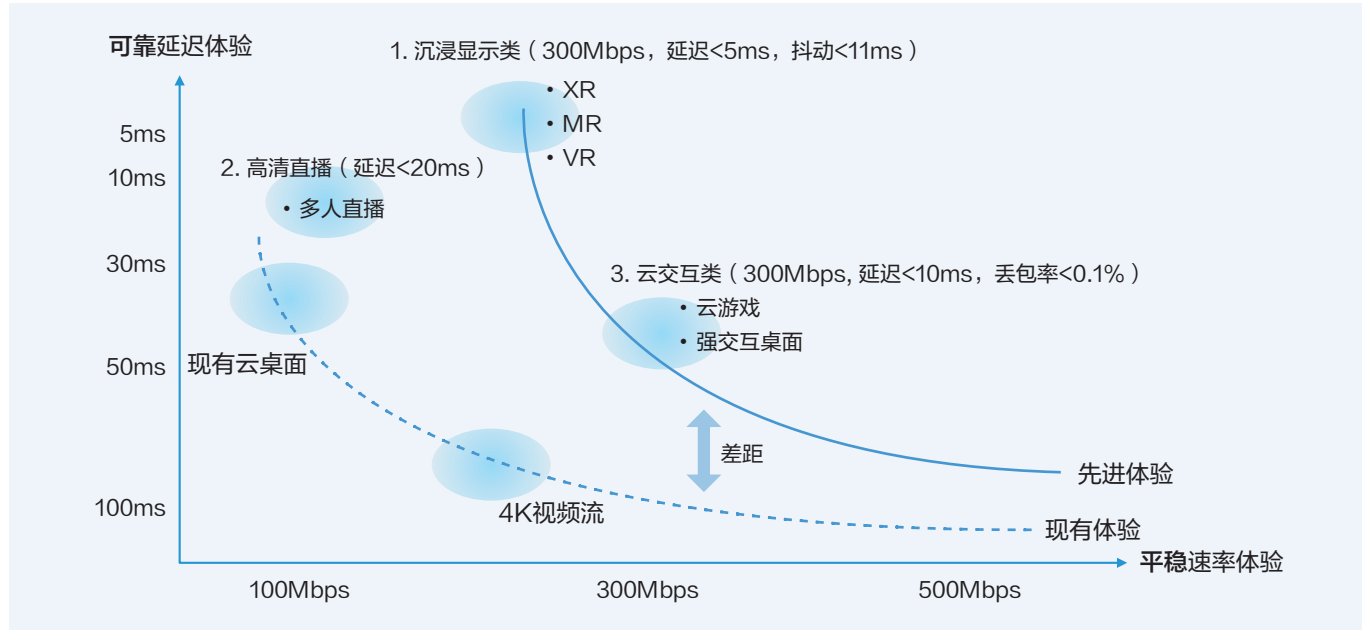
沉浸现实应用及其体验诉求

视觉是人类获取海量信息最为直接的方式，因此，网络对视觉业务体验的支撑能力是决定用户对其性能优劣主观评价的关键维度。从AR/VR领域的先驱级产品中，可以窥见头戴式沉浸现实设备对网络体验增强的需求。Apple Vision Pro即是该趋势方向的一款代表性产品，其双目视频输出达到了4K+的像素级别，且拥有一块渲染能力与GTX 1660相当的GPU执行本地视觉渲染处理。根据其信息处理参数规格推演，按4K 3D@90fps的视频流进行估算，可得到约300Mbps传输速率要求。与此同时，动作到视觉感知的延迟，要达到无眩晕效果，理想的延迟及抖动也要控制在5ms及11ms以下 [4,5]。

1.2 体验诉求到技术诉求的映射分析

对于云游戏，在分秒必争的对抗性游戏中，玩家的关键击杀操作数据包延后或丢失，甚至会导致胜负逆转，卡顿和花屏也严重影响用户的游戏体验。而在云交互应用中，数据包的丢失不仅仅将导致视频分辨率退化或丢帧，更会增加用户的厌烦情绪，影响办公及生产效率。对于VR视觉类业务而言，数据包的延后，将导致视觉画面显示随机性滞后，所做的动作与所感受到的视觉间产生严重的失调，进而致使视觉头盔佩戴者眩晕，严重影响用户体验。图2是传统和新兴业务对可靠时延及平稳速率保障需求的对比呈现。可见，各类新生应用场景存在大量的人-机实时交互行为，用户意图或指令需要通过上行通道及时传递并获得响应，这是传统业务所不具有的关键特征，而对可靠延迟及平稳速率的双重保障能力则是支撑该类新生业务获得极致体验的关键。

图2: WLAN先进体验技术需求



1.3 WLAN网络能力现状及改善目标

从历史上看，单体设备（AP及STA）在参数规格层面的持续升级是WLAN代际演进的主要体现。从802.11g到802.11be的WLAN单体设备，其信道带宽由20MHz逐步提升到了320MHz；QAM阶数也从原来的64逐步提升到了4096；802.11n为WLAN带来了从单天线到多天线的划时代变革之后，MIMO的标准规格也从4流一路提升到了8流。在信道带宽、MIMO数、调制阶数持续进阶的同时，OFDMA，MU-MIMO，Trigger机制的引入也使得单体设备在接入及调度层面增添了更多的灵活性。在802.11ax重点优化了MAC效率机制后，802.11be将设备从单链路引向了多链路机制，在提高吞吐的同时也提升了链路的鲁棒性。然而，这一技术上的关键创新，在当前市场应用中面临AP-STA兼容适配协同方面的系列挑战。可见，如今WLAN单一设备的硬件升级已逐步进入到了体验收益的饱和区，用户越来越难以通过单一层面的规格升级获得切实可感的体验提升。

与之相映的是，上述章节所介绍的各类新兴业务场景及应用，对WLAN整体网络性能有着明确的技术诉求。与传统业务不同的是，正是因为新生应用场景都存在着大量的人-机实时交互业务，单纯的依赖数据压缩或提前缓存的机制，来应对无线信道所带来的不确定性的技术思路将不再奏效。

针对上述业务需求特征的转变，WLAN必须修正其演进的牵引目标：从单纯的单体规格演进，向整网综合的体验保障演进转变是必由之选。在此背景之下，本白皮书针对新兴的业务场景，对WLAN业务体验保障目标进行了技术诉求映射化的定义，即：对特定用户或用户群、针对特定场景业务需求，同时对吞吐和时延，进行长时稳定且合理节制的WLAN空口指标保障。以此定义作为WLAN技术代际演进的合理牵引和问题分析的初始点，下文将分析达成保障目标时面临的技术挑战，以及对应的解题思路。

第2章 关键挑战及总体思路

2.1 技术挑战

无线空口与物理空间及电磁环境深度耦合，导致了传输条件的高度不确定性，是无线网络难以对高质量人-机交互体验进行有效保障的根本原因。更具体的来说，无线信道的随机变化将导致信道容量波动及最匹配的传输模式变化，而缺失充足的即时反馈信息和合理的自适应机制，将导致所选取传输模式下数据包的速率高于信道容量，在噪声和干扰下导致数据包丢失，进而造成整个通信链路的吞吐和时延的波动和震荡。正如上文所提，在应对传统的视频或其他数据类业务时，数据的压缩与缓冲机制，以牺牲保真度和实时性为代价，基本屏蔽了空口信道的随机性对用户体验的影响，然而，对于要求沉浸式及实时交互的新兴场景业务而言，上述思路将不在行之有效。

需要进一步指出的是，分布式的通信机制、多代际兼容共存的生态状况、及非授权频谱的接入特点，让WLAN的空口信道相比蜂窝网络所面临的局面更为复杂，问题更为多样。比如，在WLAN非授权频谱中，大量非协调的AP通常相互竞争信道，几乎所有AP都有面临信道已被其他节点占用，自身数据无法传输的风险，因此，用户亟需的数据包常常面临不可预期等待时间。

WLAN网络的体验保障所遭遇的技术挑战，需要通过技术-标准-生态体系的高效协同来进行针对性的克服或消解。

2.2 总体思路

技术理念：

WLAN通信网关向WLAN通信智能体升级。

具体阐述：

从2.1节的技术挑战描述来看，WLAN通信体验难保障的问题可进一步抽象为多个协同机器群体（AP及STA）对外部随机环境无法充分感知，并及时进行大规模参数寻优及自适应决策的数学问题。更具体的讲，当前无线通信系统中所采用的传统优化方法，依赖于长时间统计的局部信息，其决策周期长，寻优路径有限，无法适应非授权频谱内流量负载和干扰环境快速变化的现实条件。不同于传统机制，AI/ML可利用更多维度的信息和先验知识进行即时预测及

推理。因此，WLAN AP及STA等边缘设备从传统通信网元向WLAN通信智能体的升级，以自适应多变环境，支持EDCA、MCS、GI、CCA等各类参数的动态闭环调整，是实现长时稳定且合理节制体验保障目标的关键路径。

更进一步来说，WLAN通信智能体的升级，有赖于对环境-信道-业务三个层次的信息进行充分识别、提取及共享，并通过AI使能设备间（AP-STA，AP-AP）协同调度（时频空多维调度及跨设备联动），实现有限频谱的充分利用，大幅度减缓信道随机性，进而实现长时稳定且合理节制的WLAN指标保障。基于上述设想，在同一WLAN网内，各设备单元所掌握的信道、负载状态、业务信息需要及时的在全网共享和拼接，以支撑智能体进行全局最优的协同决策和指令执行，这就需要一套支持信息共享的补充协议，和对已有特定协议更严格的遵从认证。

2.3 设计原则

在上述解题思路的指引下，WLAN体验增强还必须充分依赖产业生态，以最小成本代价获取体验提升的最大化，并保证代际接续的平稳顺滑。因此，它的机制设计和协议制定需遵循如下原则：

以802.11be为基础：在最新商用的WLAN关键新特性的基础上，识别对AP、STA的功能要求及对AP-AP、AP-STA的协同要求，充分发挥包括4K-QAM、打孔传输及多RU传输、多链路运行等**802.11be**新特性的技术潜力。

以802.11bn为牵引：当前802.11bn正在在围绕高可靠网络进行标准设计，并主要以802.11bn新的物理层为基础，配合MAC层来实现RvR、丢包、节能等方面的增强。其标准稿将在2027年后趋于稳定，并预计在2028年发布[6]。在设计思想和具体方案上尽可能的借鉴802.11bn当前讨论的候选技术是极其重要的执行思路。

支持AI智能化决策：当前AI已成为无线技术领域的一项趋势性技术，AI可为体验提升提供关键的使能和优化。从传统技术领域观点看，业务具有多样性且现实流量特征也具备不可预测性，这些给体验保障带来巨大挑战。WLAN 协议经历7代的演进，所包含的协议工具也非常丰富，这意味着巨大的调参寻优空间，需要匹配足够的信息输入以供AI优化调度、漫游、节能决策。

第3章 WLAN体验增强关键技术方向及建议

正如1.3节中，WLAN业务体验保障目标定义所指出的，先进业务体验的保障需要从长时稳定和合理节制两个策略性方向进行。其本质是，WLAN在共享信道中接入是一个多目标优化问题，不仅需要考虑本地用户的体验，还需兼顾对信道的共同利用效率、对其他用户体验的影响。传统WLAN基于CSMA碰撞事件，进行基础的EDCA退避，是对上述设计原则的初步实践。今天的WLAN信道接入决策，已从单纯的单站时域行为，扩展到了多站点的频域和空域行为，触发上行机制、Multi-link、Multi-RU、SR等都意味着决策空间更为复杂化。在网络智能化的今天，有必要改进实践、为提升业务体验进行新的尝试。

3.1 先进业务体验六边形定义及解读

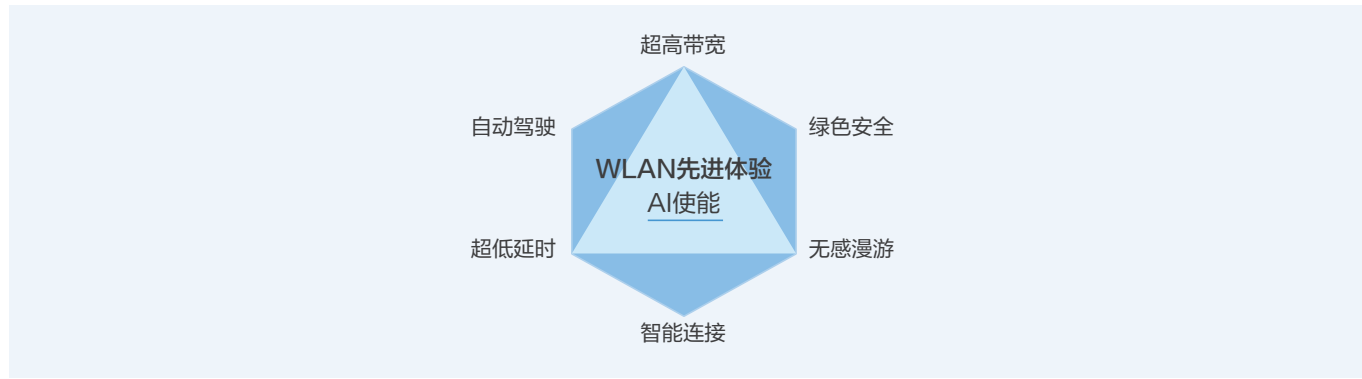
为了更好的指导技术问题的拆解和分析，进而获得具备可操作性的技术建议，首先需要对长时稳定和合理节制与实际的业务体验进行综合性的维度匹配和思路对齐。在宽带发展联盟发布的《家庭业务体验分级白皮书》中，业务体验被分为6个维度：“超高带宽”、“超低时延”、“无感漫游”“智能连接”、“绿色安全”、“自动驾驶”[7]。基于此6个维度，本白皮书确定了WLAN先进体验六边形（见图3），下面是对该图进行的具体解读。

长时稳定策略的指向是提升个人体验，具体是指充分保证用户在任何时间、网络覆盖下的任何地点，都能获得良好的业务体验，避免体验“掉坑”。在无线网络中，组网覆盖是流畅体验保证的基本前提。在此基础上，我们需要重点关注漫游体验问题。具体而言，多AP实现连续覆盖体验后，多AP间平滑切换，确保用户无缝漫游，就需要更具预见性的决策意见。另一方面，对于实时交互业务，还需额外保障带宽-时延的综合指标。在信道时变的多径、干扰、拥塞条件下，同时面临多代际设备共存于同一网络中，带宽-时延的高可靠保障极其重要也极具挑战。因此，长时稳定是与“超高带宽”、“超低时延”、“无感漫游”三个体验维度绑定和匹配的。这意味着，针对特定用户（群），WLAN必须结合对特定场景条件和特定业务需求的量化评估，实时保障上述三个维度综合指标的达成。

合理节制策略的指向是使能环境友好，具体是指通过控制网络和节点的竞争程度，实现合理的并发-能效权衡。过渡的并发将导致严重的相互干扰，进而致使速率退化和丢包。过渡的发射功率提升也将造成类似地后果，还将导致WLAN移动设备电池消耗过快。组网下的智能连接及调度是能效提升的关键抓手。例如，利用802.11be的多链路能力，通过5G高低频段的MLO，可结合智能调度，协调不同信道上的高效传输，这就避免了在2.4G高干扰频段进行

低能效并发竞争的情况。进一步地，MRU也可绕开干扰信道，提供无冲突的传输保障。另外，对“环境”的充分感知和理解，也是WLAN运维走向自动驾驶的“自动，自优，自愈”的基本路径。因此，合理节制是与“智能连接”、“绿色安全”、“自动驾驶”三个体验维度绑定和匹配的。事实上，从智能体的定义及工作原理角度讲，提升个人体验和使能环境友好两个优化方向是一体两面的，对外部环境理解的越及时且充分，就能越接近多维目标权衡的最优解。个人体验与环境友好同时保证，就是在人-机-环境间寻找最佳权衡点。其中，智能连接，是长时稳定（个人体验）与合理节制（环境友好）的衔接点，即：合理保障个人体验的前提下，实现全网在线高效运维（自动驾驶）和环境自适应节能及安全风险抑制（绿色安全）。

图3：WLAN先进体验六边形定义

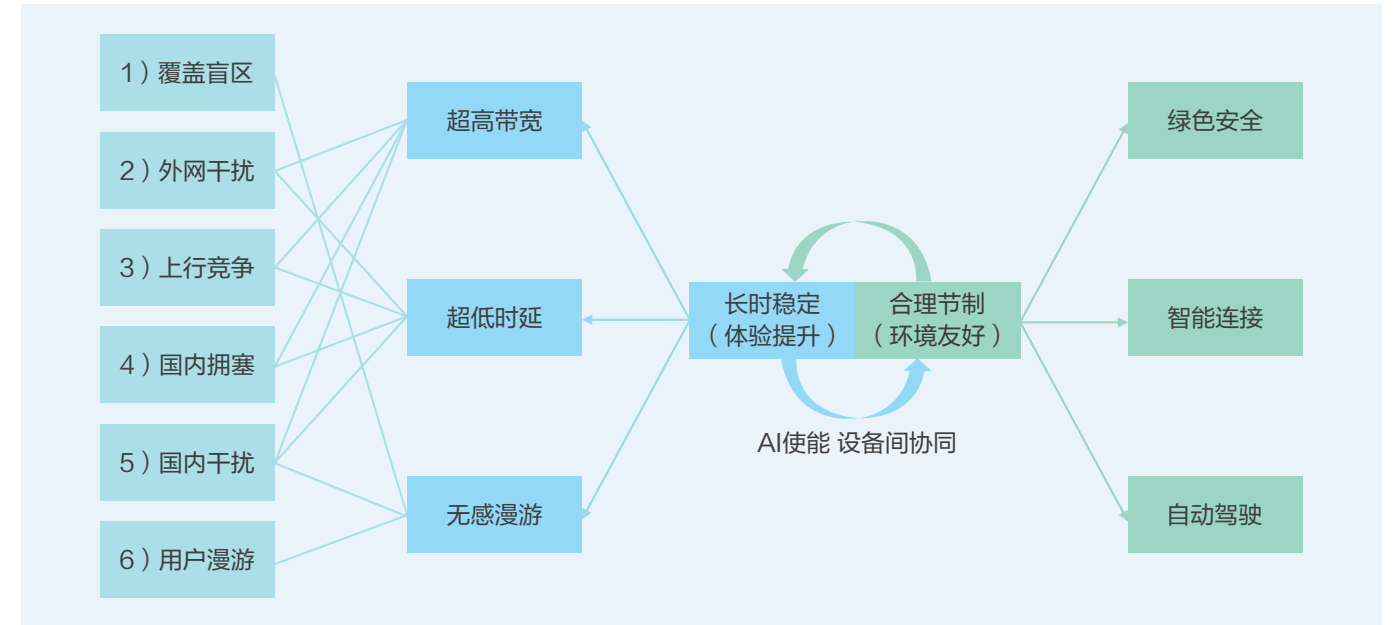


3.2 体验问题根因分析及可行路径

正如2.1节所述，无线空口与物理空间及电磁环境深度耦合，导致了传输条件的高度不确定性，是无线网络难以对人-机高质量交互体验进行有效保障的根本原因。结合WLAN网络的技术特征，可以将上述的技术根因详细拆分成以下6个问题：1）覆盖盲区；2）外部干扰；3）上行竞争；4）网内拥塞；5）网内干扰；6）用户漫游。图4是此6个问题与上文定义的体验六边形定义的映射关系。简单地说，6个技术问题的全部或部分共同作用导致了提升个人体验的三个维度难以达成，也同时对使能环境友好的三个体验维度产生负面作用。

下文将针对此6个技术问题分别进行阐述，并本着2.2节提炼的AI使能设备间协同的解题思路，提出更为具体技术措施和标准建议。

图4：WLAN先进体验目标和技术挑战问题间的映射关系



3.2.1 针对问题1：覆盖盲区

问题描述

当前用户反馈信号差、业务的卡顿的现象，很大一部分致因是来自于覆盖不足的问题。具体而言，其可被进一步划分为下行覆盖的不足和上行覆盖不足两方面问题。由于WLAN AP相比于STA具备更多天线、更高规格的功率放大器，AP的下行覆盖范围通常大于STA的上行覆盖范围，因此上行覆盖不足问题更为显著。一旦用户发送的上行数据丢失，或AP无法接收来自STA的确认或其他响应，都将导致队列传输停滞。

在标准协议层面，这一问题一直受到WLAN标准制定者们的关注，并在802.11ax/be/bn代际中持续改善，分别包括了HE ER SU PPDU格式、EHT DUP传输模式、ELR增强长距离模式等技术方案。EHT DUP方式的频谱效率较低，且仅为6GHz频段中的可选模式。而在硬件设计层面，AP或STA单体提升发射功率是扩大覆盖的简单方法，除了功耗及难以进一步突破的物理极限外，它还会导致干扰问题的加剧，致使频谱资源利用率的进一步降低。

措施建议

利用多AP组网部署实现室内目标区域的覆盖，可减小STA到其关联AP的距离，从而降低链路损耗，使得目标覆盖区域的SINR获得整体提升。这为802.11be关键技术，例如4K-QAM，MLO的潜力充分释放和频谱资源效用的提升提供了基础。进一步地，各AP及STA间对网络及业务状态信息进行最大程度的共享，可支撑智能化的动态组网调度，有效缓解随机信道接入冲突问题，为通信体验提升打开局面。

3.2.2 针对问题2：外部干扰

问题描述

由于WLAN的基础通信机制采用的是共享频谱资源且自由竞争发送时间的方式，在实际的业务场景下，通常会存在多个WLAN设备共存的情况，这必然会导致不同程度的相互干扰。这些干扰的特征可通过频域维度、功率域维度、时域维度、干扰数量以及信道波动维度来刻画，常见的干扰通常是这几个维度的随机叠加。

频域维度：主要是指干扰信号与测试信号的频率在频谱上的相对关系，通常分为WLAN干扰与非WLAN干扰，其中WLAN干扰又会分为：同频干扰、叠频干扰、邻频干扰。

功率域维度：主要是指接收机收到的干扰信号的能量强度（RSSI强度），通常干扰能量越大，影响越大。

时域维度：主要是指干扰信号在时间维度占用空口的总比例（干扰时隙占比 1% -> 100%）以及单次干扰发包占用的时长等，通常干扰时隙占比越大，对性能的影响越大。

干扰数量：主要指在同一个工作AP范围附近，同时存在的WLAN设备的总数（0 -> 2 -> 20 -> 128）等，通常设备越多，对性能的影响越大。

信道波动：主要是指工作环境内部“障碍物”动态变化引起的信号传输路径的波动现象，如AP与STA之间出现“人穿过”的动作，通常信道变化越大且越快，对性能的影响越大。

措施建议

AP与STA之间的协同：正如上文提及，常见的家居干扰，通常是多维度的多个干扰的组合，单独依靠单个AP无法准确的识别出干扰特征，导致相应的最优规避策略难以准确和即时获得。在AP与STA之间的端管协同条件下，STA反馈本地识别到的干扰特征信息，将有助于AP精准识别干扰特征，可有效提升抗干扰体验。特别是让STA告知AP其受到BSS外干扰的情况，进而使能AI进行场景识别及推理，并给出具体执行指令，例如通过Multi-RU传输可绕开存在干扰的信道，或在Multi-vendor部署场景，通过工作信道和发射功率的调整减小网络边缘的干扰等。

多频段资源特点的合理利用：充分利用多信道或多频段上干扰环境的差异性，规避强干扰信道，释放802.11be 关键技术MLO潜力。例如引入5G高低双频段，规避2.4G干扰等。需要注意的事，这一思路的有效执行和收益获取，是以AP与STA之间的端管协同方案的落地为基本前提的。

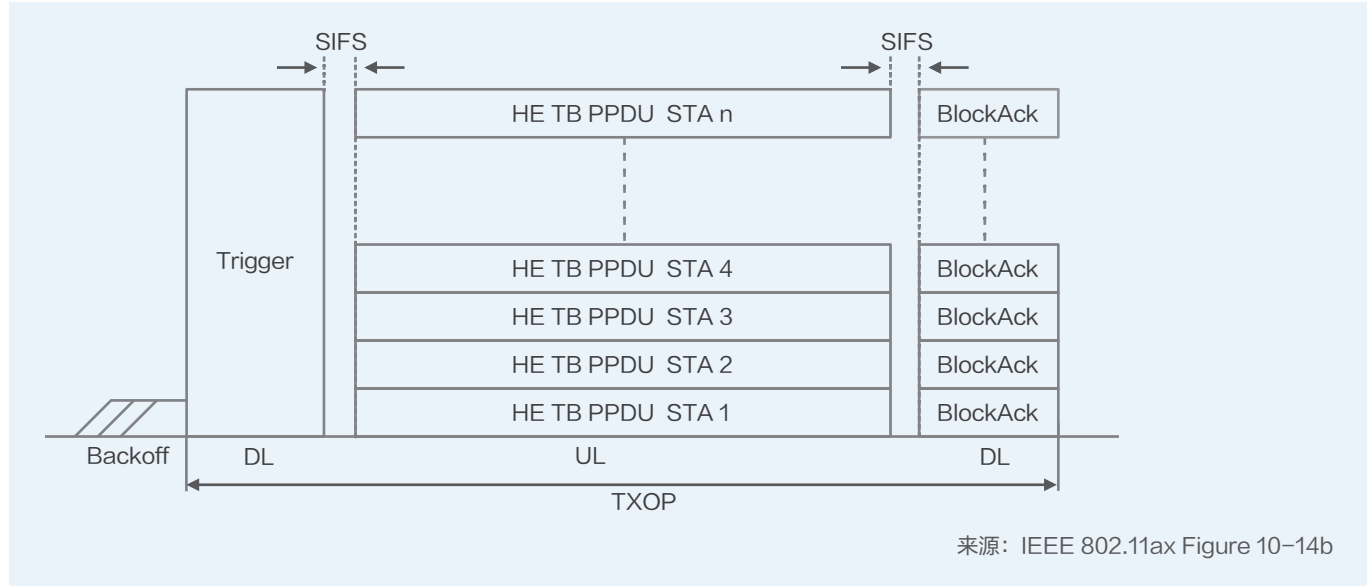
3.2.3 针对问题3：上行竞争

问题描述

WLAN网络中的多个终端通过CSMA/CA机制随机竞争发送业务数据，发送行为随机且不可控性，这可能会带来如下影响：1）对于实时性要求高的业务，上行业务被滞后，进而影响业务的体验，如在实时类游戏中出现操作迟滞

感、卡顿等；2）TCP类高带宽业务，由于RTT时延波动大，触发服务器端TCP流控，影响整体TCP业务性能。

图5：802.11ax代际引入的UL Trigger机制



如上图5所示，IEEE 802.11ax中引入的UL Trigger机制让网关可以主动调度STA发送上行数据，进而有效缓解上述上行自由竞争引发的难题，但依旧存在如下的挑战：

- UL Trigger机制AP何时使用的问题。具体地讲，AP发送的Trigger帧是有开销的，如果AP一直Trigger没有待发送的数据STA，就会造成网络资源的浪费，降低整网的效率。使用BSR机制，用户可以将缓存信息上报给AP，让AP可以有的放矢的使用UL Trigger，遗憾的是BSR是可选项，并非所有终端都支持；
- 与UL Trigger搭配使用的MU-EDCA parameter机制可以管理多用户的上行，在IEEE 802.11ax中可选项，部分终端并未支持，限制了UL Trigger的使用。

措施建议

IEEE 802.11ax中引入的MU-EDCA parameter参数管理多用户上行、BSR上报终端缓存状态，IEEE802.11be中引入的R-TWT机制，为在上行信道竞争中实施合理节制提供工具。在上行接入方面，建议通过认证加强的方式，提升设备上行协同相关协议的遵从性。

3.2.4 针对问题4：网内拥塞

问题描述

WLAN网络中，同时开展多个用户多业务的支持是常见的应用场景。BSS内的多业务共存时，不限速的背景业务对带宽的挤占，将影响对低延迟业务的保障。STA若能准确地将承载业务的网络需求通知到AP，AP调度算法就能根据业务需求，有的放矢的进行传输资源的分配。当AP的某个链路负载过重，无法保障用户需求时，可通过AP上多链路间、多AP间及AP与STA间的协同交互，将用户引导到AP不同的链路上或不同AP上接入，实现进一步的业务保

障。特别地，通过AI迭代学习终端的业务特征及趋势，提升终端分类接入不同射频的准确度，以提升两类终端的上网体验。

措施建议

STA将业务的体验反馈给AP，将使能智能调度算法，确保资源按需即时匹配。通过补齐上述传输过程中的反馈环，AI才能不断迭代学习和优化，进而改善业务拥塞条件下的用户体验。

3.2.5 针对问题5：网内干扰

问题描述

网内干扰是指ESS内多个BSS的干扰并发问题。在组网解决覆盖的前提下，网内干扰是需要重点关注和解决的技术问题。为了满足第一章所述的各类新兴业务应用的吞吐及时延需求，在空口频谱使用80MHz及以上的频谱资源几乎成为必选项，这让网内干扰这一问题显得更为突出。以家庭场景为例（见图6），多个房间的高吞吐或强交互类业务并发，会产生很强的网内干扰，进而引起碰撞冲突，特别是终端处于多个热点中间的临界区域时，吞吐和时延的劣化会极其严重。理论上，更多的频谱资源能够将该问题有效缓解，但现实的情况是：无线频谱的资源是有限的，且依赖于各国对频谱的管制政策，同时，各类STA所支持的频段范围也并不归一。

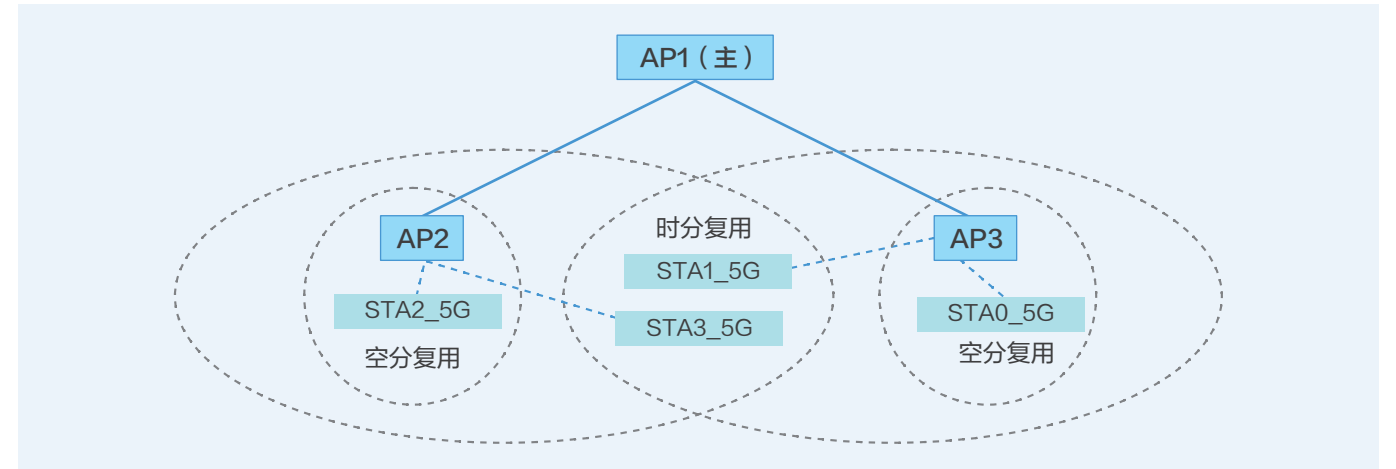
图6：典型家居场景临界区域网内干扰示意



措施建议

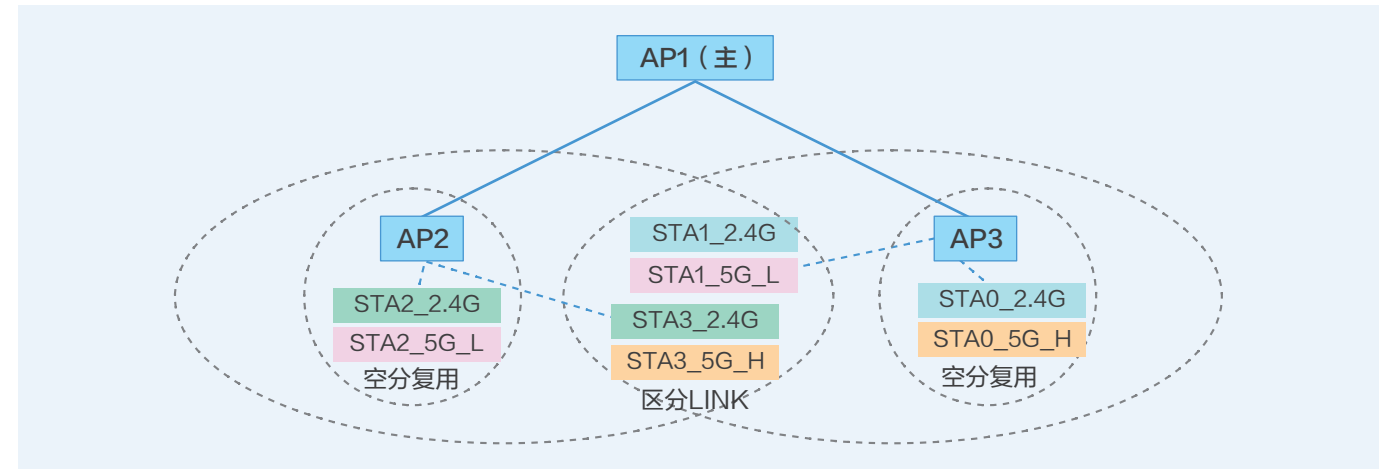
协调空分复用技术（C-SR）：业界很早就开始研究组网场景下的吞吐并发和业务保障方法，从802.11ax时代的SR，到802.11bn标准提案中C-SR，都是通过控制器协同多个热点AP的发射功率，允许在相同的时间和频率资源上并行传输，从而有可能实现更高的吞吐量并减少排队延迟，但是在干扰区域由于SINR较低，必须使用时分复用的方式（见图7），而且由于STA的上行竞争问题，空口仍然会干扰碰撞。

图7：在网内干扰场景中采用空分及时分多维手段



MLO协同技术（C-MLO）：802.11be技术支持控制器协同不同房间的AP，通过动态使用不同的Link通道，可以使临界区域的STA做到完全无干扰的发送和接收。由于2.4G频谱资源只有40M，且干扰严重，无法承载高带宽业务，因此，在临界区域不同终端，如图8所示，使用5G高低频段组合，更有利于发挥802.11be多链路技术优势，这与3.2.2小节针对网外干扰问题的解决思路是一致的。

图8：在网内干扰场景中采用空分及多链路区分手段



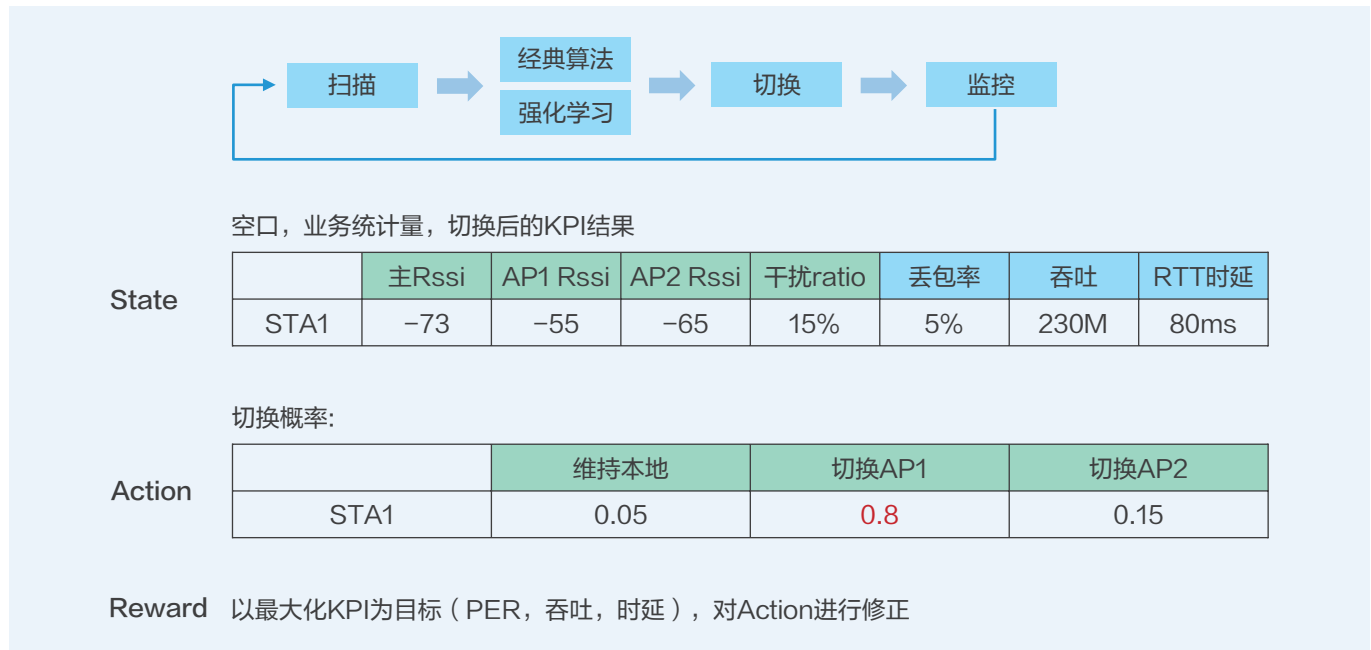
MRU协同技术（C-MRU）：通过控制器对多个AP的MRU资源进行动态分配决策。1）当某个STA对带宽需求较大（如多个用户同时观看高清视频）时，AP们会协同选择合适的信道进行捆绑，并根据信道质量确定打孔策略。例如，如果AP1和AP2覆盖的区域有多个高带宽需求的STA，它们会分析各自覆盖区域内的信道情况，选择干扰较小且连续的信道进行捆绑，形成更大带宽的MRU。同时，根据实时干扰情况，决定在哪些信道上进行打孔操作，以提高编码速率，满足业务需求。2）在面对干扰时，AP之间相互协作调整MRU资源分配。AP会不断监测信道质量的变化，如干扰源的移动或消失、信号强度的变化等，根据这些变化实时优化MRU资源分配。如果某个干扰源消失，之前受其影响而调整的MRU资源分配会被重新评估，可能会恢复到更优的配置状态，以提高频谱效率。

3.2.6 针对问题6：用户漫游

问题描述

当STA在WLAN网络中移动到AP信号弱的区域时，STA与AP之间的网络将会断开，这就是常说的漫游体验不佳的一种常见表现。对于语音、视频等业务，网络断开将严重影响用户的使用体验。漫游场景中往往涉及到用户移动至网络边缘的情形，面临信号不足和切换协议兼容的双重挑战。在802.11be中，除了涉及切换到哪个新AP，还需决策连接到新AP的哪些链路。从原理上看，STA的SINR变差（走远，干扰等），STA能够获取的空口资源不足（其他STA或AP抢占空口资源，信道利用率提升），都会导致业务无法满足要求，此时需要进行切换（切换到更近的服务AP，或切换到新的频段，或者二者兼有）。

图9，经典算法与AI算法结合的漫游体验提升方案示意



措施建议

为了改善该问题，有两个措施：

- 1) 借助于802.11be MLO特性，在移动过程中，自适应的选择最佳的link进行传输，保障漫游过程中的体验；
- 2) 如图9所描绘，通过增加AI强化学习算法，将漫游过程中的KPI（丢包、吞吐和时延）作为反馈，为每个STA和每个场地训练最佳的漫游扫描频度和切换策略。

其中，漫游效果反馈对构成闭环机制尤为重要，可在新旧AP的信号强度、干扰水平、负载程度、协议版本能力等方面进行综合评估，基于经典算法或深度学习算法来实现对目标漫游对象连接效果的准确的预测，从而保障漫游决策满足预期要求。

3.3 标准协议建议

针对上述系列问题，在设备交互协议方面，初步总结建议如下：

- 1) 针对上行竞争问题：上行调度机制需进一步完善，对MU-EDCA、BSR等机制遵从性加强认证，让WLAN从无序竞争走向有序的受控收发；
- 2) 针对网络拥塞问题：网关与手机更多协同、WLAN与上层业务更多协同，才可使能网关根据业务体验来更为合理的分配网络资源；
- 3) 针对网内及网外干扰问题：建议加强802.11k的各种测量帧的互通认证，包括beacon request测量，frame测量等，并优化测量和上报内容，做到更加准确和高效的干扰测量；
- 4) 通过结合其他网端协同的技术措施，包括网端服务质量协同及漫游协同 [8,9]，以及与接入电信大网的信息共享和反馈闭环，完成业务类型的识别与质差监控，可更加显著的改善WLAN业务保障用户体验。

第4章

总结和展望

日益增长的新兴业务，例如云交互操作、直播和沉浸现实应用等，存在大量的人-机实时交互行为，用户意图或指令需要通过上行通道及时传递并获得响应，这就需要WLAN先进体验技术提供更为可靠的业务质量保障。针对影响体验的6大关键问题，使能AI在WLAN中的应用，从而增强上行接入的有序性和效率、提升大带宽传输的并发度、以及实现有效的干扰抑制，是提升多业务、多用户、多AP系统下的服务体验和质量的关键路径。

WLAN生态全产业需通力配合，充分发挥现有协议提供的灵活工具及可扩展能力，定义匹配应用的最佳接口标准，将构建WLAN先进体验网络的技术愿景落实为具体行动，以推进WLAN产业的平滑升级和持续繁荣。

参考文献

[1] Casas, Pedro, Michael Seufert, Sebastian Egger, and Raimund Schatz. "Quality of experience in remote virtual desktop services." In 2013 IFIP/IEEE International Symposium on Integrated Network Management (IM 2013), pp. 1352–1357. IEEE, 2013.

[2] Lange, John R. Peter A. Dinda, and Samuel Rossoff. "Experiences with client-based speculative remote display." In 2008 USENIX Annual Technical Conference (USENIX ATC 08). 2008.

[3] Wang, Ziyi, Yong Cui, Xiaoyu Hu, Xin Wang, Wei Tsang Ooi, Zhen Cao, and Yi Li. "Multilive: Adaptive bitrate control for low-delay multi-party interactive live streaming." IEEE/ACM Transactions on Networking 30, no. 2 (2021): 923–938.

[4] Caserman, Polona, Michelle Martinussen, and Stefan Göbel. "Effects of end-to-end latency on user experience and performance in immersive virtual reality applications." In Entertainment Computing and Serious Games: First IFIP TC 14 Joint International Conference, ICEC-JCSG 2019, Arequipa, Peru, November 11 - 15, 2019, Proceedings 1, pp. 57–69. Springer International Publishing, 2019.

[5] Brunnström, Kjell, Elijs Dima, Tahir Qureshi, Mathias Johanson, Mattias Andersson, and Mårten Sjöström. "Latency impact on quality of experience in a virtual reality simulator for remote control of machines." Signal Processing: Image Communication 89 (2020): 116005.

[6] https://www.ieee802.org/11/Reports/tgbn_update.htm

[7] <http://www.chinabda.cn/article/252770>

[8] T/WAA-002-2023：无线局域网网端服务质量协同技术要求

[9] T/WAA-001-2023：无线局域网网端漫游协同技术要求

A 术语

英文缩写	英文全称	中文全称
AI/ML	Artificial Intelligence/ Machine Learning	人工智能/机器学习
AP	Access Point	接入点
AR/VR	Augmented Reality / Virtual Reality	增强现实/虚拟现实
BSS	Basic Service Set	基础服务集
CCA	Clear Channel Assessment	空闲信道评估
CSMA/CA	Carrier-Sense Multiple Access with Collision Avoidance	带有冲突避免的载波侦听多路访问
C-SR	Coordinated Spatial Reuse	协调空分复用
C-MLO	Coordinated Multi-Link Operation	多链路协同运行
ELR	Extended Long Range	增强长距离
EHT DUP	Extremely High Throughput Duplicated	极高速重复（模式）
EDCA	Enhanced Distributed Channel Access	增强的分布式信道访问
GPU	Graphic Processing Unit	图形处理单元
GI	Guard Interval	保护间隔
HE ER SU PPDU	High-Efficient Extended Range Single User PPDU	高效扩展距离单用户PPDU

ICT	Information and Communications Technology	信息与通信技术
MIMO	Multiple-Input and Multiple-Output	多输入多输出
MU-MIMO	Multi-User Multiple-Input Multiple-Output	多用户多输入多输出
Multi-RU	Multiple Resource Unit	多资源块
MCS	Modulation and Coding Scheme	调制与编码制式
MAC	Medium Access Control	媒体接入控制层
MU-EDCA	Multi-User Enhanced Distributed Channel Access	多用户增强分布式信道接入
MLO	Multi-Link Operation	多链路运行
OFDMA	Orthogonal Frequency-Division Multiple Access	正交频域多址
PPDU	Physical layer convergence procedure Protocol Data Unit	物理层汇聚过程协议数据单元
QAM	Quadrature Amplitude Modulation	正交幅度调制
RU	Resource Unit	资源块
RvR	Rate verses Range	速率与距离对照
RSSI	Received Signal Strength Indication	接收信号强度指示
STA	Station	站点（特指接入终端）
SR	Spatial Reuse	空分复用
SCS	Stream Classification Service	流分类服务
SINR	Signal to Interference plus Noise Ratio	信号干扰噪声比
UL Trigger	Up-Link Trigger	上行触发
WLAN	Wireless Local Area Network	无线局域网