

元宇宙和扩展现实

简介、从5G到6G、使用场景测试

白皮书 | 01.00版 | Jarrell Pair, Andreas Rößler

ROHDE & SCHWARZ

Make ideas real



目录

- 1 元宇宙 4
 - 1.1 元宇宙定义和概念起源 4
 - 1.2 元宇宙是只有一个，还是有多多个? 4
 - 1.2.1 消费者元宇宙 4
 - 1.2.2 企业元宇宙 4
 - 1.2.3 工业元宇宙 4
 - 1.3 元宇宙和Web 3.0 5
 - 1.4 元宇宙使用场景示例 6
 - 1.4.1 培训、教育和医疗 6
 - 1.4.2 数字孪生 6
 - 1.4.3 协作 6
 - 1.4.4 消费者：游戏和社交媒体 6
 - 1.5 元宇宙生态系统的七层模型 6
 - 1.5.1 体验层 7
 - 1.5.2 发现层 7
 - 1.5.3 创作者经济层 7
 - 1.5.4 空间计算层 7
 - 1.5.5 去中心化层 7
 - 1.5.6 人机交互层 7
 - 1.5.7 基础设施层 7
- 2 什么是扩展现实? 8
 - 2.1 XR设备能力 9
 - 2.1.1 视场角 9
 - 2.1.2 跟踪 9
 - 2.1.3 交互性 9
 - 2.1.4 3D音频 9
 - 2.1.5 触觉反馈 9
 - 2.1.6 网络连接 10
 - 2.2 XR技术发展：从19世纪至今 10
 - 2.2.1 XR历史：19世纪 10
 - 2.2.2 早期研发与第一个头显：20世纪50年代和60年代 10
 - 2.2.3 持续研发，首批VR公司诞生：20世纪70年代和80年代 11
 - 2.2.4 新的使用场景与消费者市场兴衰：20世纪90年代 11
 - 2.2.5 持续发展和XR复兴：2000年代和2010年代 11
 - 2.3 XR行业现状——打造下一个主流计算平台 12
- 3 5G Advanced和6G的作用 13
 - 3.1 高数据速率和低延迟 13
 - 3.2 XR和元宇宙频谱注意事项 14
 - 3.3 支持XR的3GPP功能 14
 - 3.3.1 系统和核心网络 14
 - 3.3.2 URLLC、功耗和调度 15
 - 3.4 L4S和供应商API 15
 - 3.5 6G展望 16
 - 3.5.1 R19中的元宇宙和XR：奠定6G基础 16
 - 3.5.2 XR相关的6G研究：延迟感知调度器和POLITE范式 16

4 XR使用场景测试	17
4.1 什么是XR使用场景?	17
4.2 应用到特定的使用场景	18
4.3 测试平台与XR使用场景的配置和自动化	19
5 总结	20
6 参考	21

序言

元宇宙和扩展现实(XR)技术以前所未有的方式融合我们生活的物理世界和数字世界,重新定义我们如何在沉浸式体验的新时代互动、工作和娱乐。

本白皮书将介绍元宇宙和XR的基础知识,解释它们与当前和未来无线网络的相互关系,并提供有关XR设备和应用程序无线测试方法的实用说明。

第1章介绍了元宇宙的概念,这个数字宇宙超越了传统互联网,是一个沉浸式的三维(3D)交互空间。本章详细描述了元宇宙的方方面面,包括元宇宙如何为从消费者应用到工业应用的诸多使用场景提供支持,还提供了一个框架来了解元宇宙的众多支持要素。

第2章定义了扩展现实(XR),并追溯这项技术的起源和发展。本章讨论了XR头显的基本功能,这些功能为使用这些设备开发的许多应用程序和体验类型提供重要支持。本章还探讨了XR行业的现状和未来发展愿景。

第3章讨论了5G Advanced和未来6G网络在支持XR设备和元宇宙应用需求方面发挥的关键作用。本章详细介绍了频谱注意事项和移动网络功能增强,讨论了随着这些设备和应用程序的使用规模持续扩大,无线网络技术将如何发展来满足不断增长的需求。

第4章通过示例介绍了如何测试和评估XR设备与使用场景。本章描述了一个基于实验室的XR测试平台,可以在受控环境中在各种网络拥塞和射频(RF)条件下严格测试吞吐量、延迟和其他参数。

Bluetooth®字标和徽标是Bluetooth SIG, Inc.所有的注册商标,罗德与施瓦茨对此类商标的任何使用均已获得许可。

“HDMI”、“HDMI High-Definition Multimedia Interface”、HDMI商业外观和HDMI徽标是HDMI Licensing Administrator, Inc的商标或注册商标。

Wi-Fi是Wi-Fi Alliance的注册商标。

1 元宇宙

1.1 元宇宙定义和概念起源

目前的5G和未来的6G会有哪些关键应用场景仍然有待商榷。尽管这些关键应用场景尚未全面实现,也没有明确定义,但有一些潜在的新兴领域可能会改变我们如何使用和理解这项无线技术。许多行业专家都认为元宇宙将处于前沿地位。

元宇宙是一个沉浸式的、持久的、无处不在的、相互连接的虚拟3D世界,以扩展现实技术为支撑,人们在这个空间里一起工作、购物、娱乐和社交。XR设备可以带来理想的元宇宙体验,让人们完全沉浸其中,与这些虚拟世界深度互动。元宇宙不仅仅是一个3D互联网,它代表着物理世界和数字世界的融合,以VR、AR与MR设备、应用程序和平台为支撑,构成整个XR技术生态系统。

“元宇宙”一词最早起源于Neal Stephenson在1992年出版的小说《雪崩》,书中描述了一个基于虚拟现实的后互联网世界。故事的主人公Hiro Protagonist是一名黑客,靠为黑手党送披萨谋生。另一名主角Y.T.是一位送快递的滑板女孩,小说讲述了他们在数字世界中的冒险故事。更近一些的是Ernest Cline在2011年出版的小说《头号玩家》和2018年上映的同名电影,其中描绘的OASIS虚拟宇宙也为元宇宙提供了概念愿景。书中人物在参加一场紧张、刺激、危险的比赛,获胜者将获得OASIS的所有权和控制权。

1.2 元宇宙是只有一个,还是多个?

元宇宙这个概念引出了一个问题:元宇宙是只有一个,还是多个?实际上,按照目前的理解和发展情况来看,元宇宙并不是一个统一的数字宇宙,而是集合了多个互连的虚拟空间和环境。这些空间和环境可以分为不同的元宇宙类型,每种元宇宙都有自己的一套规则、技术和使用场景,以此满足特定受众的需求[1]。

1.2.1 消费者元宇宙

消费者元宇宙主要为个人用户提供数字体验,人们在这个虚拟世界中社交、玩游戏、参加活动,体验丰富的娱乐项目。人们最熟悉的就是这种元宇宙,一个能够满足日常活动和娱乐需求的数字空间。

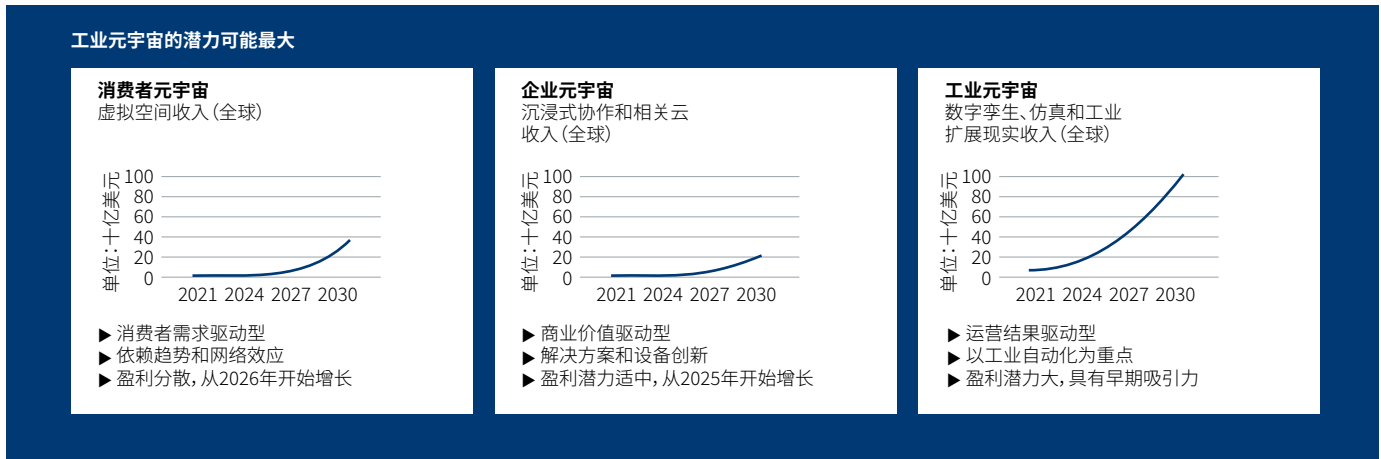
1.2.2 企业元宇宙

企业元宇宙专为企业和职场人士服务,提供虚拟环境,支持远程办公、协作和开会。扩展现实(XR)技术有助于提高工作中的生产力和沟通效率。这种元宇宙会随着远程办公和混合工作模式的日益普及发挥出重要作用。

1.2.3 工业元宇宙

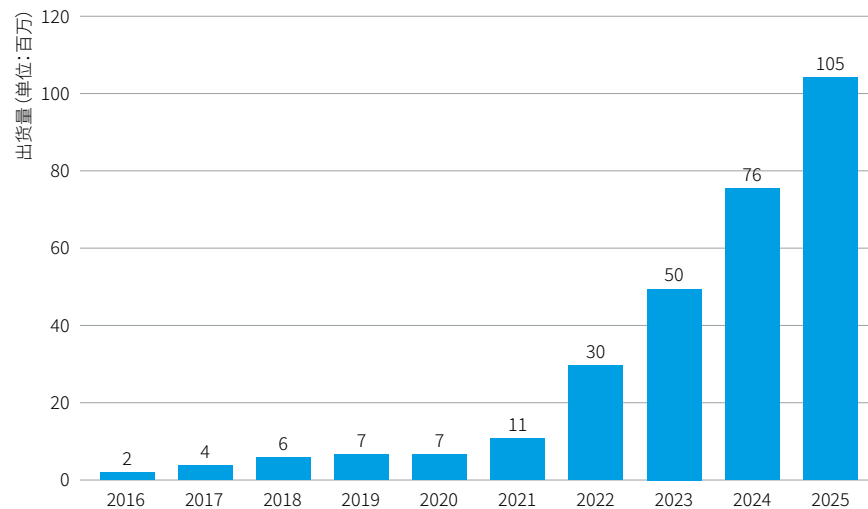
工业元宇宙可以创建物理环境和流程的数字孪生体,方便进行监控、模拟和培训等活动。这种元宇宙有助于更高效地管理工业作业。工业元宇宙的市场早已出现,西门子和宝马等大公司正在使用这项技术[2、3]。企业元宇宙和消费者元宇宙预计将在未来几年内兴起(图1),具体取决于XR设备市场(图2)和其他因素。

图1: 工业元宇宙在发展预测中领先



图片来源: 诺基亚, “为工业元宇宙提供助力”[4]; ABI Research, “2022年第三季度企业元宇宙机遇评估”[5]

图2: 全球XR头显出货量预测



图片来源: Statista, “2016-2025年XR头显出货量”[6]

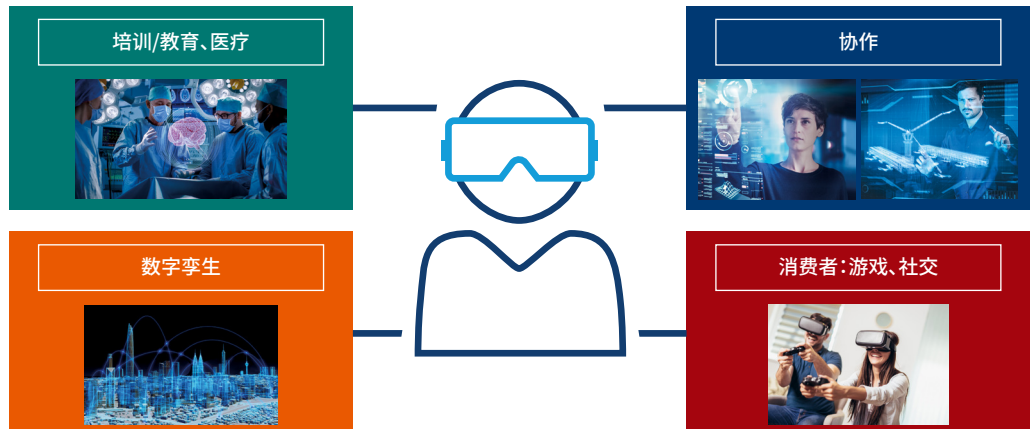
1.3 元宇宙和Web 3.0

讨论元宇宙时经常会涉及到Web 3.0, 并会探究这两个概念究竟是如何关联的。答案很微妙。Web 3.0主要是利用区块链技术创建去中心化网络, 而元宇宙更注重创造沉浸式、体验式的环境。Web 3.0侧重于互联网的基础建设来保障数据所有权和安全性, 而元宇宙关注的是在这些数字空间里的体验和互动。这两个概念是有交集的: 元宇宙遵循Web 3.0的去中心化、以用户为中心的宗旨来创建沉浸式环境, 让用户更好地掌控和拥有自己的数字资产和身份。

1.4 元宇宙使用场景示例

元宇宙概念支持多种使用场景，大体上可以分为四个关键领域（图3）。

图3: 元宇宙应用领域



1.4.1 培训、教育和医疗

在课堂上，现实和虚拟学习环境将融合在一起，让土木工程专业的学生能够勘察虚拟工地。元宇宙有望通过提供这种沉浸式体验，彻底改变教育方式。在医疗领域，XR技术借助沉浸式体验和先进的表面触觉技术提升了患者护理水平，也促进了医患沟通和远程护理。

1.4.2 数字孪生

元宇宙在颠覆制造、物流和仓储行业。它支持远程操作机械设备和进行虚拟培训，帮助人们获取先进的知识和技能，从而建立竞争优势。

1.4.3 协作

元宇宙将传统的工作场所变成了混合环境。它利用扩展现实技术改进了视频会议体验，将会议室打造成3D沉浸式协作空间，还可能进行全息通信。

1.4.4 消费者: 游戏和社交媒体

元宇宙通过沉浸式游戏和虚拟体验丰富了家庭娱乐活动，利用Wi-Fi和5G技术改善了延迟和图形质量。元宇宙重新定义了家居空间，让人们在家里就能健身、娱乐和办公。元宇宙还扩展到了购物中心、体育场、电影院、主题公园和现场音乐活动等领域，创造沉浸式的扩展现实体验。

1.5 元宇宙生态系统的七层模型

元宇宙不是某一家公司的功劳，而是由大量硬件、软件和服务提供商发挥各自的作用，共同创造出来的。为了描述元宇宙这个复杂的生态系统，Jon Radoff提出了一个七层框架[7]，他是一位游戏设计师和作家，写了许多关于元宇宙的文章。这个概念框架在他提出后获得了广泛关注，在其他文章和出版物中被大量引用。从结构上看，这个框架与用来描述网络通信功能的OSI七层模型类似。每一层都描述了元宇宙生态系统的组成部分，每个组成部分的全部或部分贡献者包括各种软件公司、设备制造商、平台提供商和其他公司（从小型初创公司到大型企业）（图4）。

图4: 元宇宙的七层结构

第1层: 体验层	虚拟现实活动、游戏、购物、社交互动
第2层: 发现层	搜索引擎、社交媒体、策展、评论、广告
第3层: 创作者经济层	内容创作和设计工具、2D/3D资产商店
第4层: 空间计算层	地理空间映射、3D引擎、手势识别
第5层: 去中心化层	Web 3.0、区块链、NFT、微服务、边缘计算
第6层: 人机交互层	硬件, 包括头戴设备、可穿戴设备、输入设备
第7层: 基础设施层	5G、6G、MEMS传感器、GPU、云计算

1.5.1 体验层

这一层超越了物理世界, 提供沉浸式的数字体验, 包括3D游戏、大型多人3D互动现场活动、与AI助手的语音互动以及突破物理限制的其他体验。

1.5.2 发现层

元宇宙中的发现层涉及输入型的用户活动, 例如搜索、评级、评论和内容共享, 还包括营销人员驱动的输出型信息共享, 包括展示广告和社交媒体推广。社区驱动型内容共享从NFT的兴起可见一斑, 这类输出型活动可能会成为最有效的元宇宙发现层机制之一。

1.5.3 创作者经济层

这一层侧重于让人们能更轻松地创作内容, 用户可以利用各种工具和平台成为创作者。元宇宙体验将更加生动鲜活, 还需要不断更新。内容更新节奏将需要以创作者为中心的快速创作工具, 许多工具将通过生成式AI功能得到增强。

1.5.4 空间计算层

这一层是融合虚拟和现实世界所需的软件应用程序和平台。这包括3D引擎、地理空间数据库、手势检测软件、设备SDK和其他软件系统, 将数字内容与物理世界融为一体。

1.5.5 去中心化层

去中心化层非常关键, 将利用区块链、智能合约和开源平台创造开放、分布式的元宇宙。

1.5.6 人机交互层

人机交互层侧重于将硬件集成技术与我们的身体结合起来, 利用智能眼镜、智能手表和其他可穿戴技术等设备让人成为类似赛博格的存在。

1.5.7 基础设施层

基础设施层发挥基础作用, 利用5G、6G、GPU、MEMS传感器和云计算等技术为元宇宙的复杂系统提供支持。

2 什么是扩展现实？

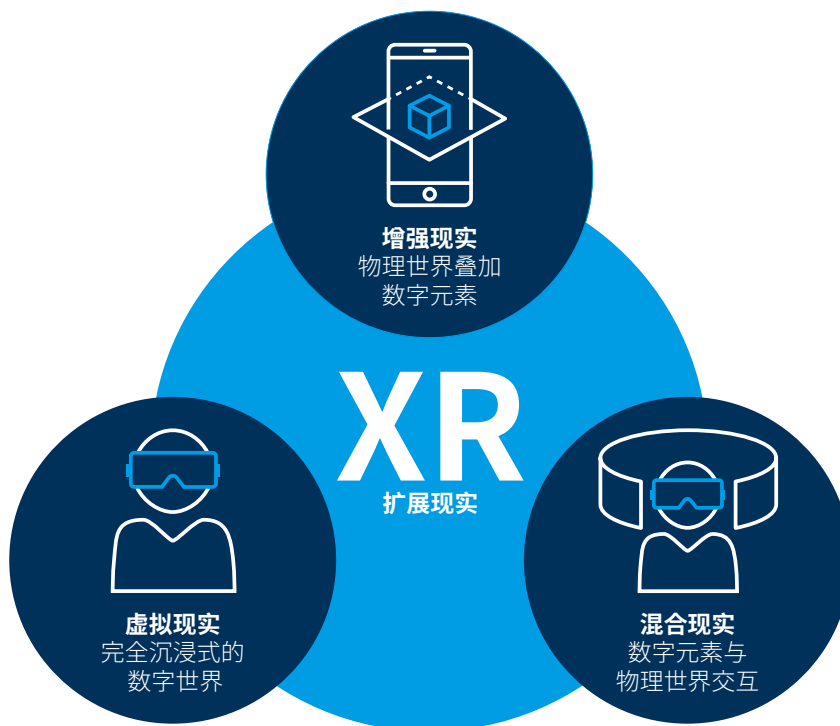
扩展现实(XR)是一个总称,包括虚拟现实(VR)、增强现实(AR)和混合现实(MR) [8] (图5)。这个术语涵盖设备和支持的应用程序体验,将数字世界和物理世界的各个方面融为一体。

用户可以通过VR完全沉浸在数字环境或现实世界的数字化复制世界中。制造技术人员可以使用VR头显在完全数字化的复制工厂中培训员工使用新机器。历史专业的学生可以戴上VR头显在雅典卫城漫步或进入帕台农神庙,像一个古希腊人一样欣赏这些建筑。

AR设备和应用程序将现实世界与数字信息相融合。维护人员在维修时可以佩戴AR头显,读取在现实世界画面上显示出的技术说明信息。坐在体育场内的体育迷佩戴AR眼镜,可以在赛场画面中查看实时统计数据和其他现场比赛数据。

MR中的物理世界元素与数字元素交互。家居室内设计师可以佩戴MR头显在空房子里走动,将数字3D家具摆放在地上,将虚拟油漆涂到墙上。建筑师和客户可以在动工之前佩戴MR头显来查看和探索在空地上设计的建筑物的数字3D模型。

图5: 扩展现实包括VR、AR和MR



2.1 XR设备能力

全球多家厂商的XR设备通过多种方式支持AR、VR和MR应用程序。这些功能决定了用户体验以及设备对特定使用场景的适用性。这些设备的主要区别在于它们的显示视场角、跟踪、交互性、3D音频、触觉反馈和连接功能。

2.1.1 视场角

VR头显一般可以提供90°到110°的宽视场角(FoV)，为用户提供身临其境的体验[9]。MR和AR头显的FoV可能相差很大，这主要取决于将计算机生成的图像与现实世界视图相结合所使用的显示技术。视频透视头显[10]的摄像头捕捉现实世界后将其显示在头显中，并将数字内容集成到这个视频源中。如今的视频透视头显与许多VR头显相当，FoV接近90°到110°。光学透视头显确保摄像头不会影响到用户的视野。这些显示器使用波导合路器[11]或其他透明光学技术，让用户能够直接看到结合了计算机生成的视觉内容的现实世界。目前，光学透视XR头显的视场角一般相对较窄，只有30°到50°。但是，这些头显比其他XR头显更轻、更小、更时尚。

2.1.2 跟踪

空间跟踪：现在的XR设备使用集成式摄像头和传感器来跟踪用户在空间里的位置以及头部和手部动作，不必像早期XR头显一样使用外部传感器。

根据具体设计不同，头显可能只跟踪围绕三个垂直轴(X、Y、Z)的旋转运动，其运动跟踪具有三个自由度(3DoF)。有的头显还可以跟踪沿这些轴的平移运动，实现具有六个自由度(6DoF)的运动跟踪。3DoF头显可以检测到用户注视的目标位置，但无法检测到用户在物理空间中的位置。这些头显最适合那些需要用户在物理空间中移动才能与数字内容交互的使用场景。

环境理解：除了用户方向和位置跟踪之外，目前的XR头显还可以使用深度传感器来生成用户物理环境的3D地图。这个地图可以将数字内容准确定位到用户的现实世界视野中。设备还可以使用AI来识别门窗、家具和环境中的其他物体。XR游戏可以使用这个3D地图以及用AI标记的特征和对象，让虚拟角色与房间的墙壁、门、桌椅互动。

2.1.3 交互性

手持控制器：VR头显通常包括跟踪手持控制器，这些控制器配备触发器和按钮，可用于与虚拟环境交互。

手势交互：XR头显可以检测手势，例如用手指指东西、竖起拇指，甚至可以完全跟踪手掌和所有手指的3D运动。这个功能让用户能够自然直观地与XR环境中的虚拟对象和元素交互。

眼动跟踪：XR应用程序可以跟踪用户的眼睛运动，让用户只需看着一个对象、按钮或其他界面元素就可以与菜单和虚拟环境交互。在游戏或训练模拟中，虚拟角色可以对用户的注视做出反应和回应，从而创造出更沉浸式的互动体验。眼动跟踪还可用于支持注视点渲染，这种渲染技术仅对用户注视的位置渲染高分辨率图像，以此减少计算负荷。

语音识别和自然语言理解：头显一般都支持语音识别和自然语言理解(NLU)技术，从而创造出直观的免提交互体验。用户可以使用基础的语音命令和快捷方式来启动应用程序和菜单导航。NLU可以实现更高级的语音交互，让用户可以与虚拟角色交谈，就像跟真人说话一样。实时翻译可以缓解社交、娱乐或商业XR环境中的语言障碍。

2.1.4 3D音频

头显支持3D音频，能够在3D空间中定位声音，让用户可以像在物理世界中一样感知自己的位置。这个功能可以提供逼真的音频提示，有助于虚拟环境中的导航和态势感知，同时增强整体存在感或“身临其境”之感[12]。3D音频还可用于增强与定向音频反馈的交互。用户可以选择3D房间最右侧角落的虚拟按钮，接着会感受到从按钮位置传来的点击声音。

2.1.5 触觉反馈

触觉反馈技术可以模拟用户与真实物体互动时所感受到的物理感觉。通过多种技术可以生成这些物理感觉，比如触发手持控制器的振动或使用手套中的集成式执行器，将这些感觉施加到用户的皮肤上[13]。

在XR应用程序中,触觉反馈是一种强大的工具,可以增强虚拟物体的真实感和虚拟环境的沉浸式体验。触觉反馈技术可以模拟物体的表面纹理,例如粗糙的岩石或光滑的玻璃。也可以模拟地震震动、轰隆隆的雷雨声和其他环境效果。用户按下虚拟按钮或者图形用户界面中的其他元素时,触觉反馈还可以通过物理触摸反馈帮助改善整体的交互体验。

2.1.6 网络连接

各种XR头显型号采用不同的网络连接方法。这些连接方法会显著影响设备的移动性和性能以及可用的使用场景类型。

基于电脑的有线头显可以通过HDMI和USB线直接连接到计算机。头显使用配套电脑中的Wi-Fi或以太网硬件连接到网络。独立式头显使用板载计算硬件,无需连接到外部电脑。此类设备使用Wi-Fi,比连接到电脑的XR头显具有更灵活的移动性。基于电脑的有线头显和独立式头显主要设计用于室内XR使用场景。

现在,越来越多的XR头显型号可以连接到配套的智能手机以增强处理能力和网络连接。与连接到电脑的头显和独立式头显相比,这种头显相对更为轻巧。此类头显能够通过USB线或者通过Wi-Fi或Bluetooth®无线连接到配套的智能手机,具体视型号而定。配套的智能手机可以为头显提供蜂窝网络连接,支持户外的高移动性XR使用场景。未来,移动XR头显将集成蜂窝芯片组,从而无需使用配套的智能手机。这些设备可以将部分处理任务分流到云端,以此降低对板载计算和电力硬件的要求[14]。

2.2 XR技术发展:从19世纪至今

XR的历史悠久而有趣,既可以追溯这项技术的动机与背景,也可以憧憬未来的发展愿景。

2.2.1 XR历史:19世纪

XR技术的概念可以追溯到19世纪初,彼时天幕剧院的形式刚刚得到发展和普及。这些剧院也被称为“19世纪的虚拟现实”[15]。天幕是一种大型全景画作,以身临其境的方式描绘历史事件和名胜景点,占据观众的全部视野。这些画作搭配前景道具、灯光和音效一起展示在观众面前。它们是当今180°和360°XR沉浸式媒体体验的先驱。在19世纪,随着手持式观片器(立体镜)的出现,立体媒体也逐渐流行,人们可以使用立体镜观看静态照片和绘画,轻松体验到3D深度和沉浸感。这些观片器中的立体光学系统与当今XR头显的显示器采用相同的深度感知原理。

2.2.2 早期研发与第一个头显:20世纪50年代和60年代

20世纪50年代,电影制片人Morton Heilig发明了Sensorama模拟器,这是一个柜子大小的模拟系统,用户可以坐在上面将头放在固定的观看设备中,从而体验与立体声同步的立体电影,还能感受到风扇模拟出的风、气味和座椅的振动[16]。尽管这种体验缺乏互动,也没有跟踪用户运动,但是Sensorama开创了使用多感官效果和立体视觉来增强临场感和沉浸感的先河。

1961年,Philco工程师发明了Headsight设备,被认为是第一个运动跟踪头显[17]。这个头盔式头显在用户的眼睛前方配备了视频显示器和一个磁性跟踪器。视频显示器连接到远程摄像机,打造出早期的沉浸式远程呈现体验。

1965年,计算机科学家Ivan Sutherland发表了一篇名为《终极显示》的论文[18]。他在文中描述了一种头显愿景,该头显产生的计算机模拟效果与现实难分真假。

“当然,终极的显示方式将会是一个房间,一个由电脑来控制其内部物品存在与否的房间。显示在其中的椅子将真实得让人能够直接坐上去,显示在其中的手铐将真的能把人铐起来,而显示在其中的子弹无疑也会是致命的。通过适当的编程,这样的显示实际上可以成为爱丽丝走进的仙境。”

这篇论文的大胆设想为扩展现实奠定了概念基础和路线图,并在持续影响和激励当今从事XR工作的人们。

在三年后的1968年，Sutherland和他的研究团队发明了第一个可以显示计算机生成的视觉效果的头显[19]。这种立体显示器被视为XR发展史上的里程碑和转折点，让用户可以使用透明显示器查看现实世界视图上叠加的简单几何形状。这个头显可以跟踪动作，并更新计算机生成图像的视角，使其呼应用户的动作。

2.2.3 持续研发，首批VR公司诞生：20世纪70年代和80年代

20世纪70年代和80年代，学术界、政府和企业实验室的XR研发工作取得了一定的进展。一些重大研发工作包括美国空军的“超级驾驶舱”项目，这个项目由Tom Furness领导，让飞行员使用带有交互式计算机图像的跟踪式头显进行训练[20]。此外，从20世纪80年代开始，在位于加利福尼亚山景城的美国宇航局艾姆斯研究中心，Scott Fisher团队开发出了虚拟接口环境工作站(VIEW) [21、22]。VIEW系统使用手套输入和语音识别来控制通过立体头显观看的交互式3D计算机图像。它用于研究VR在遥控机器人应用和人因工程研究中的使用情况。当时小型手持电视开始进入市场，VIEW头显就采用它的LCD显示器。这些显示器让VR头显比以前更小、更轻，视觉分辨率还更高。

20世纪80年代末诞生了首批商业VR公司，包括Jaron Lanier和Thomas Zimmerman创立的VPL以及Mark Bolas、Ian McDowall和Eric Lorimer创立的Fakespace[16]。他们开发的产品将XR从相对较小的研究团体推广到更多的受众面前。

2.2.4 新的使用场景与消费者市场兴衰：20世纪90年代

20世纪90年代是扩展现实研究和商业发展的繁荣时期。医疗程序、心理治疗和飞机制造领域出现了新的XR使用场景。北卡罗来纳大学教堂山分校的研究人员演示了医生如何在患者治疗过程中结合使用AR叠加技术与超声波传感器数据[23]。佐治亚理工学院和埃默里大学的研究人员合作开发了VR系统，用来治疗恐高症患者[24]和患有创伤后应激障碍(PTSD)的退伍军人[25]。波音公司在工业作业方面采用AR技术，为飞机制造厂的工人配备头显，让他们在组装线束的时候可以查看AR技术叠加的技术图表[26]。

哥伦比亚大学开发的“旅行机器”项目也是一项开创性的AR研究成果[27]。AR头显和GPS设备一起连接到背包电脑。用户在大学里走动时，可以看到现实世界视图上叠加的校园信息指南。这是已知最早的户外AR系统之一。

虽然价格昂贵，但专业级VR头显、运动跟踪设备和高性能计算机图形硬件变得越来越普及。VR在培训、模拟和工程应用领域的应用显著增长。

从20世纪90年代初开始，消费者可以在游戏厅、商场和其他地方通过沉浸式视频游戏体验VR系统。这十年中还发布了许多面向消费者的头显型号，包括任天堂、飞利浦和索尼的设备[28]。但是，这些头显设备在市场上并未取得成功，人们对XR的浓厚兴趣在90年代末逐渐消退。

2.2.5 持续发展和XR复兴：2000年代和2010年代

从消费者角度来看，21世纪的前十年相对平静。在这段时期，随着消费者游戏市场的发展，电脑GPU的性能不断增强，并大幅降低了VR系统的成本。VR在模拟、训练和心理治疗领域中的应用变得更加成熟和普及[29]。得益于适合XR使用场景的3D游戏引擎，开发XR体验变得更加容易。除此之外，在2000年代，提供强大的基于电脑的AR标记空间跟踪解决方案的ARToolKit软件库变得日益普及，大大降低了探索AR使用场景和开发应用程序的入门门槛[30、31]。

2010年代初期，研究人员和爱好者意识到配备高质量显示器和运动跟踪器的智能手机可以生成交互式VR显示内容，而且成本较低。2012年，南加州大学创意技术研究所混合现实实验室的研究人员发布了FOV2GO开源智能手机VR查看器设计[32、33]。这个设计在VR界影响巨大，促进了三星Gear VR和谷歌Cardboard基于智能手机的VR头显的开发。

2012年8月，新公司Oculus VR发起了一项众筹活动，为生产Oculus Rift VR头显的开发套件筹措资金。这场活动非常成功，筹集到的资金超过240万美元[34]。Oculus Rift开发套件1 (DK1)于2013年3月发布。一年后，Facebook (现为Meta) 宣布以约20亿美元的价格收购Oculus VR [35]。

2014年Facebook收购Oculus VR后,全世界对XR的兴趣激增。除了Facebook以外,微软、索尼、三星、HTC和Magic Leap在接下来的四年里也陆续发布了各种XR头显型号,功能涵盖了整个VR、AR和MR。

XR正在恢复昔日荣光,吸引了人们的浓厚兴趣,各种投资和发展也在顺利进行,繁荣景象远超20世纪90年代。

2.3 XR行业现状——打造下一个主流计算平台

自2010年代中期以来, XR行业不断发展,推出了多代头显设备。2024年全球扩展现实市场的价值估计为1056亿美元, 2024年至2029年的复合年增长率预计将达到34.9% [36]。企业持续扩大对XR的采用, 到2030年预计仅工业XR市场的收入就将达到600亿美元[37]。但是, XR尚未成为主流[38]。

XR行业的共同目标是打造下一个可以与智能手机相媲美的主流计算平台[39、40]。为了实现这一宏伟目标, 让XR成为主流, XR设备必须不断发展, 可以像太阳镜一样让用户舒适地长时间使用。XR设备还必须能够全天使用, 这样才有可能取代智能手机, 同时还要能够提供移动元宇宙所设想的引人入胜的体验。

生产日常使用的XR眼镜需要平衡好显示、计算、电源和连接资源。这个过程主要需要将计算任务从设备分流到远程云或边缘网络资源。这种分布式计算架构将需要新功能来优化XR头显的无线和应用程序性能。

3 5G ADVANCED和6G的作用

第三代合作伙伴计划(3GPP)将开发由持续演进的5G Advanced和6G技术支持的特定网络功能,从而在释放元宇宙和XR的全部潜力方面发挥主导作用。这些技术不仅需要为数百万用户提供规模化的元宇宙体验,还需要满足未来轻量级移动XR设备的要求。

3.1 高数据速率和低延迟

XR服务依赖于网络资源,需要可靠的高速数据传输和极低的延迟,这样才能实现无缝的实时交互,同时避免晕动症和其他问题给用户带来的不适感。

5G有三大应用场景,分别是增强型移动宽带(eMBB)、超可靠低延迟通信(URLLC)和海量机器类通信(mMTC)。XR应用介于eMBB和URLLC之间,这意味着高数据速率和低延迟缺一不可。具体细节取决于使用场景、设备的外形尺寸、计算能力和其他许多因素。

虚拟现实产业论坛(VRIF)根据不同级别的视觉保真度,分析并评估了将沉浸式视频内容传输到VR头显对应的数据速率和延迟要求[41]。表1总结了从分析中得出的数据速率和延迟要求示例。

桌子1: VR内容流传输的数据速率和延迟要求示例

视频分辨率	视场角	帧率	数据速率要求	延迟要求
8K 2D视频 (7680像素 × 3840像素)	90°	30 fps	100 Mbps	30 ms
12K 2D视频 (11520像素 × 5760像素)	120°	60 fps	398 Mbps	20 ms
24K 3D视频 (23040像素 × 11520像素)	120°	120 fps	3.28 Gbps	10 ms

8K 2D视频的要求最低,数据速率要求是100 Mbps,延迟要求是30 ms。但是即使在蜂窝网络中可靠传输这类视频也很困难,因为各种蜂窝网络、移动性和小区边缘条件都可能影响当前频谱分配中的数据速率。

爱立信研究人员给出了另一个例子。他们研究并分析了云端AR应用的网络要求[42]。对于这些应用,一部分处理任务被分流到远程服务器,其余任务在AR设备上运行。表2显示了在网络边缘的设备和远程服务器上运行的进程对延迟的贡献。

云端分流的AR应用中各要素的延迟贡献

应用要素	延迟	处理位置
SLAM	50 ms至70 ms	AR设备
目标跟踪器	2 ms至5 ms	AR设备
游戏模拟	2 ms至5 ms	远程服务器
渲染	2 ms至16 ms	AR设备
AR设备	7 ms至8 ms	AR设备
视频解码	12 ms	远程服务器
目标检测	250 ms	远程服务器

在这个AR应用中,SLAM、目标检测、渲染和视频解码对延迟的影响最大,从而减少了网络延迟的可用预算。各个要素的延迟速率不同,这取决于每个要素的处理复杂性和可用的硬件能力。

这两个例子说明了在提供XR和元宇宙所需的数据速率,解决复杂的延迟问题及其影响因素(因使用场景而异)时所面临的重大挑战。

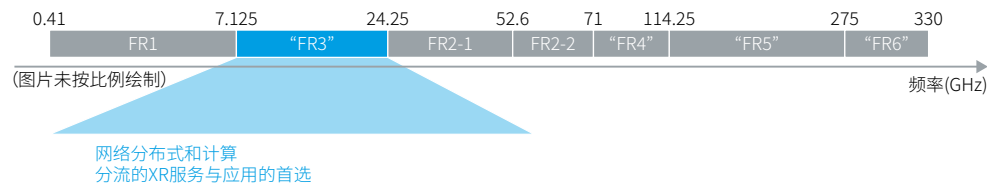
3.2 XR和元宇宙频谱注意事项

为了提高数据速率,关键参数不断优化,推动了无线通信系统的发展。这种优化源于克劳德·香农提出的定理,它根据一系列因素定义了信道容量,例如天线数量(MIMO模式)、可用带宽和信干噪比(SINR) [43]。一开始侧重于信道编码技术,然后是改进调制编码方式和链路自适应技术。多天线传输(MIMO)技术的推出和可用带宽的扩展是两个重要里程碑。

带宽与频率范围密切相关,随着每一代无线技术的发展而不断演变。5G引入了毫米波频段,而为了拥抱6G时代,行业正在探索7.125 GHz到24.25 GHz的频率范围3 (FR3频段) 以及100 GHz到300 GHz的亚太赫兹频段。

分析XR服务和应用对数据速率的要求时,尤其会考虑FR3频段(图6)。诺基亚分析了3D全息通信场景中的16k分辨率、60 Hz帧率和12位像素的内容,发现需要450 Mbps的数据速率,相当于0.45比特/秒/赫兹的频谱效率[44]。

图6: XR数据速率的相关频谱



为了获得更高的数据速率,5G网络使用了3.5 GHz频段,在100 MHz信道、256QAM和4x4 MIMO技术的加持下,理论上可以达到2 Gbps的速率。但由于当前的技术限制,要保持这样的速率(尤其是在小区边缘处),仍然比较困难。要解决这个问题,关键是要提高带宽,特别是在FR3频谱的低频段,也就是7 GHz到16 GHz的范围。这段频谱的信道带宽潜力是现有FR1频段的5倍以上,行业领军企业进行了初步模拟,认为容量有望扩大最多10倍。美国联邦通信委员会(FCC)研究了12.7 GHz到13.25 GHz频段,发现带宽达到550 MHz是实现这一目标的关键。然而,行业必须探索干扰和共存场景,并解决已经发现的问题,不影响现有的频谱资源分配。

3.3 支持XR的3GPP功能

3.3.1 系统和核心网络

在R17标准中,业务与系统(SA)技术规范组批准了几个XR工作和研究项目。表3概述了这些研究项目及其目的。

桌子2: R17标准中的特定XR研究和项目

3GPP工作组	XR研究项目/工作项目描述
SA1	SA1研究项目“网络控制的交互式服务(NCIS)”(TR22.842)概述了XR(和云游戏)使用场景
SA2	“面向高级交互式服务的5G系统增强”工作项目(SP-190564)引入了新的5QI,用于确定SA1 NCIS的流量要求
SA4	“5G系统中媒体和XR服务流量模型和质量评估方法的可行性研究”(TR26.926)
SA6	“支持边缘应用的应用架构研究”(TR23.758)
RAN1	“NR场景下XR(扩展现实)评估研究”(TR38.838)

RAN1的“NR场景下XR(扩展现实)评估研究”尤为重要,被记录在技术报告TR38.838中[45]。在SA4工作组的密切配合下,这项研究深入探索了下行链路(DL)和上行链路(UL)流量模型,这些模型专为云游戏、虚拟现实和增强现实设计。下行链路流量被建模为一个视频帧序列,这些帧根据视频帧率到达gNB,还会加上一些遵循具有确定参数的高斯分布的随机抖动。上行链路方向上的模型基于一个假设,即频繁传输的小数据包携带了关于XR头显姿态/控制的信息。这种数据流对于延迟有非常严格的限制,要求不得超过10毫秒。该研究采用这些模型进行了性能评估,其研究方法明确定义了部署场景、用户设备配置、基站配置以及TDD UL-DL时隙格式的模式,并据此分析了小区容量、功耗、覆盖范围和移动性等方面。

3.3.2 URLLC、功耗和调度

许多XR业务介于增强型移动宽带(eMBB)和超可靠低延迟通信(URLLC)这两种主要的5G应用场景之间,需要持续的高数据速率和低延迟,而这给调制解调器带来了压力,功耗问题也随之出现.XR需要平衡好可靠性、延迟、功率效率和容量。3GPP在R15和后续标准中引入了新功能,可以解决这个问题(表4)。

桌子3: R15到R18的XR相关功能汇总

R15	R16	R17	R18
► BWP切换 ► 下行链路抢占 ► 上行链路跳过 ► Mini-Slot传输	► SCell休眠 ► 跨时隙调度 ► PDCCH唤醒信号 ► 上行链路配置授权 ► 时隙聚合 ► 上行链路抢占	► PDCCH跳过	► 增强型cDRX ► 无重传配置授权 ► 低延迟移动性 ► 基于多媒体有效载荷的QoS ► XR感知

3GPP在R15中引入了5G新空口(NR),主要是为了满足eMBB的需求,并为URLLC提供一定的支持。然而,R16的重点转向了增强URLLC和解决功耗问题,为XR应用创造了一个更有利的环境。这个版本不仅大幅优化了功耗,还引入了新的下行链路控制信息(DCI)格式,从而支持取消上行链路传输。此外,对现有格式增加了1比特优先级指示,这个增强允许根据优先级的高低进行信令传输,并通过用户设备内优先级来有效管理流量冲突。这些改进为XR应用带来了很大帮助,考虑到这项技术对低延迟的严格要求,必须按照延迟预算来优先处理低延迟XR流量。

3GPP批准了一个R18专项工作项目,引入了DL和UL方向上的XR感知能力,目标是优化gNB在PDU集合和数据突发方面的无线资源调度。3GPP还进一步研究了其他节能增强和改进特性,包括连接态下的非连续接收(cDRX)。

3.4 L4S和供应商API

除了5G特定能力之外,基础设施供应商和服务提供商还可以使用其他工具,这些工具可以与5G RAN特性相结合,从而优化整个端到端(E2E)链路,为XR业务和应用提供支持。

L4S协议就是其中的一种工具。L4S表示低延迟、低丢包和可扩展吞吐量[46]。L4S是一种现代的网络流量管理方法,可以大幅降低延迟,同时又不影响吞吐量。这个协议属于一项更广泛的计划,旨在提高IP网络的响应速度,特别有益于那些需要低延迟的应用,比如在线游戏、虚拟现实和实时通信。

另一种机制不属于3GPP,而是调制解调器供应商特定的API,允许并支持5G调制解调器和应用层上运行的XR业务进行直接信息交互[47]。这些信息可能指示射频条件违反了某些阈值,导致无法分流到云端,需要XR应用程序在本地呈现内容。

3.5 6G展望

根据目前估计的3GPP标准时间表, 6G网络和设备预计将在2030年代初上市。预计在2020年代后期, 3GPP R21标准将率先涵盖6G规范, 而在此之前的R20标准将探索6G主题。

3.5.1 R19中的元宇宙和XR:奠定6G基础

刚刚完成的R18引入了5G Advanced, 3GPP R19将继续推动这项技术的发展。R19将继续以R18中详细介绍的XR增强特性为基础, 支持更好的同步多模态媒体和传感器数据流, 以便满足QoS需求, 并进一步改进调度机制。

桌子4: R19工作项目“NR第3阶段的XR(扩展现实)”中的XR特性

XR特性	摘要/描述
多模态支持	RAN感知多模态(视频、音频、传感器和其他数据流)、流量映射(数据流之间的同步、数据流之间的不同QoS)
RRM测量间隙限制的相关增强	在RRM测量引起的间隙/限制中启用TX/RX
调度增强	LCP增强(延迟感知、LCP优先级)、DSR增强(报告多对时间和缓冲区)
RLC增强	改进确认模式(AM)下的RLC传输, 避免不必要的重传, 支持自主重传

R19还纳入了关于移动元宇宙业务的研究项目, 涉及的主题包括空间数据捕获与感知、虚拟形象功能、隐私和安全[48]。这些研究的成果可能会为后续3GPP标准中的6G元宇宙与XR研究主题和工作项目提供参考。

3.5.2 XR相关的6G研究:延迟感知调度器和POLITE范式

有关6G通信的最新文章提出使用延迟感知调度器, 这个调度器可以区分URLLC和非URLLC流量, 以进一步改善延迟[49]。这些新型调度器采用了诸如突发限制整形器(BLS)机制之类的概念, 这种机制提供定制的服务质量(QoS)保证, 确保对延迟敏感的使用场景(例如元宇宙和XR应用)优先于其他场景。另一个正在研究的6G概念是低干扰和吞吐量增强的功率优化(POLITE)范式, 也有益于XR[50]。这种方法侧重于通用延迟要求的算法实现和性能评估, 与当前的基线链路自适应方案相比, 提高了吞吐量和延迟满意度, 并降低了传输功率。但是, 虽然这些先进的调度机制具有诸多优势, 在实施过程中也存在挑战。在使用基于机器学习的算法实现这些概念时, 必须考虑实时自适应方案的复杂性和对复杂计算资源的需求。

4 XR使用场景测试

4.1 什么是XR使用场景？

如今，XR的应用范围非常广泛，而随着5G的发展，再加上我们开始为6G打基础，未来会出现更多的应用场景。从测试与测量的角度着手探讨XR有哪些使用场景，是一个很好的切入点。

3GPP已经在3GPP TR 26.928中概述了这些场景[51] (表6)。罗德与施瓦茨从仿真、自动化和实现的角度对这些使用场景的市场相关性和复杂性进行了广泛的内部分析。在评估应用场景以及这些场景中适用的设备时，这样的分析能为我们打好基础。3GPP概述了23个使用场景，并将其分为7个类别。每个类别都有不同的要求，因此需要不同的测试策略。

桌子5: 3GPP TR26.928 V18.0.0 (2023-03)中规定的3GPP XR使用场景

核心使用场景和用例	条款	附录A中的用例
3D对象的离线共享	5.2	► 用例1: 3D图像传递 ► 用例2: AR共享 ► 用例10: 通过产品目录在线购物——下载
实时XR共享	5.3	► 用例7: 实时3D通信 ► 用例8: 远程位置的AR引导助手（工业服务） ► 用例11: 与店员实时沟通 ► 用例17: AR动画虚拟形象通话 ► 用例23: 5G共享空间数据
XR多媒体流	5.4	► 用例3: 沉浸式6DoF流媒体 ► 用例4: 情感流媒体 ► 用例20: 带本地化注册表的AR流媒体 ► 用例21: 具有社交互动的沉浸式6DoF流媒体
在线XR游戏	5.5	► 用例5: 无限制的沉浸式在线游戏 ► 用例6: 沉浸式游戏观众模式 ► 用例22: 5G在线游戏聚会
XR关键任务	5.6	► 用例9: AR警务
XR会议	5.7	► 用例12: 360度会议 ► 用例13: 3D共享体验 ► 用例14: 6DOF VR会议 ► 用例15: XR会议 ► 用例16: 会议/海报展示
空间音频多方通话	5.8	► 用例18: AR虚拟形象多方通话 ► 用例19: 前置摄像头视频多方通话

基于实验室的XR测试平台

在考虑如何测试这些XR使用场景时，不能只支持跨不同版本的3GPP XR相关功能的仿真，接着在5G调制解调器上验证其功能和性能，然后就认为XR一切正常。我们已经了解到，还可以使用更多的工具来优化整个系统，以实现基于XR的服务。具体情况要根据使用场景而定。

最终还是要从端到端(E2E)的角度来进行XR测试。我们提供一个基于实验室的测试平台原型，可用于验证XR应用在5G或Wi-Fi链路上的性能，以此来演示这种E2E方法。CMX500无线电通信综测仪是这个测试平台的核心。它采用灵活的硬件和软件设计，能够将仪器连接到服务器，由此为XR应用提供服务或内容。R&S®ATS1800C屏蔽箱可以实现与5G可穿戴设备或智能手机的空口(OTA)连接，并将这些设备连接到VR头显或AR眼镜。

从图7的放大图可以看出，屏蔽箱有一个3D定位系统，可配备一个仿真人头来模拟头部运动，并根据模拟姿态和控制信息触发云端场景的渲染操作。

图7: 基于实验室的XR测试平台



4.2 应用到特定的使用场景

测试平台的一个重要功能是可以应用到特定的XR使用场景(图8)。以一个简单的使用场景为例:在CMX500内部的数据应用单元上加载360度的4k视频,再通过5G连接将视频流传输到头戴式显示器。测试平台可以模拟苛刻的射频条件,同时对信号进行衰落处理,并使用内置功能添加IP损伤。凭借这些功能,用户在传输沉浸式内容时可以应用真实的网络负载和射频条件。

在实际测试场景中检查应用的性能时,可以应用IP设置来模拟拥塞或轻度负载的网络条件,同时结合中度甚至小区边缘的射频条件。

图8: 测试360°视频XR使用场景

4k, 360°, 存储在内部服务器上,
通过HTTP传输到客户端(XR头显)



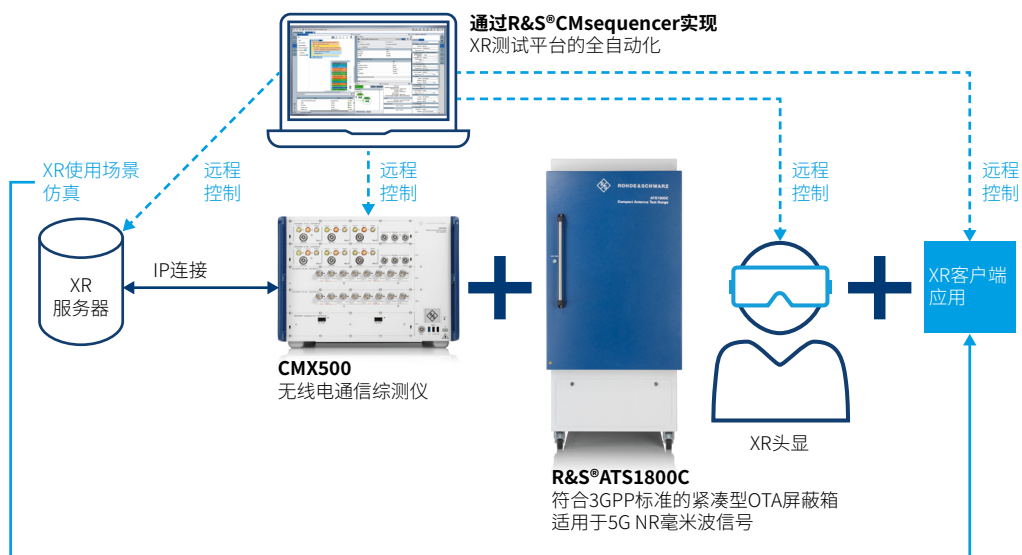
4.3 测试平台与XR使用场景的配置和自动化

我们目前还处于通过5G和Wi-Fi测试XR应用的初期阶段。归根结底，关键是要分析目标使用场景，确定可以模拟的场景，明确如何根据公认的关键性能指标（比如吞吐量和延迟）来测试这些场景的性能。除此之外，还要与客户和行业合作伙伴一起确定有助于评估应用性能的新关键性能指标。

考虑到5G标准的灵活性、不同的配置和功能组合,再加上供应商工具和其他工具,自动化测试非常关键,包括5G网络仿真的配置、云设置、使用场景选项、设备控制和KPI收集。

为了提高XR测试平台的自动化程度,可以使用R&S®CMsequencer图形脚本界面在CMX500上编写、配置和执行测试脚本(图9)。

图9: 自动化设置



5 总结

本白皮书概述了元宇宙、XR、不断发展的5G Advanced和即将到来的6G无线技术,有助于了解这些概念未来将如何相互关联。元宇宙是一个由互联的沉浸式虚拟环境构成的生态系统,能够彻底变革消费者体验、工作场所协作和工业流程。XR技术(例如AR、VR和MR设备与应用程序)非常重要,帮助用户在全球性、大规模的元宇宙中充分体验融为一体的沉浸式数字世界和物理世界。

移动网络技术的发展对于充分发挥元宇宙和XR的潜力至关重要。5G Advanced和未来6G网络中的XR支持功能将满足XR设备与应用所需的高数据速率、低延迟、可靠连接和高功率效率。这些功能将为分布式计算架构提供支持,有益于开发轻量、多功能的XR眼镜。XR行业的许多人认为,XR将成为下一个主流计算平台,可以和目前的智能手机一样得到广泛普及并提供诸多功能。

为多种类型的XR设备及其丰富的使用场景开发测试方法,是一个非常复杂的任务。罗德与施瓦茨开发出基于实验室的XR测试平台,为测试XR应用和优化其整体体验质量提供了一个端到端解决方案。

元宇宙和XR是一个高度动态的技术领域。罗德与施瓦茨密切关注XR行业的发展、研究进展和相关行业组织的活动,不断努力增强自己的XR测试与测量解决方案。

6 参考

- [1] 诺基亚,“元宇宙解析”,<https://www.nokia.com/about-us/newsroom/articles/metaverse-explained/>
- [2] 英伟达,“西门子和英伟达共同打造工业元宇宙”,2022年6月29日,
<https://resources.nvidia.com/en-us-omniverse-industrial-digital-twins/siemens-and-nvidia-technology>
- [3] Danielle Miles,“宝马树立工业元宇宙标杆”,2023年4月6日,FDI Intelligence,
<https://www.fdiintelligence.com/content/news/bmw-sets-industrial-metaverse-benchmark-82358>
- [4] 诺基亚,“为工业元宇宙提供助力”,<https://www.nokia.com/metaverse/industrial-metaverse>
- [5] ABI Research,“企业元宇宙机遇评估”,2022年9月20日
- [6] Thomas Alsop,“2016-2025年XR头显出货量”,2024年5月24日,Statista,
<https://www.statista.com/statistics/1285467/vr-ar-headset-shipments>
- [7] Jon Radoff,“元宇宙价值链”,2021年4月7日,Metavert Meditations,
<https://meditations.metavert.io/p/the-metaverse-value-chain-afcf9e09e3a7>
- [8] Interaction Design Foundation – IxDF,“什么是扩展现实(XR)?”,2024年1月24日,
<https://www.interaction-design.org/literature/topics/extended-reality-xr>
- [9] Interaction Design Foundation – IxDF,“什么是扩展现实的视场角(FOV)?”,2023年12月15日,
<https://www.interaction-design.org/literature/topics/field-of-view-fov-in-extended-reality>
- [10] Ronald T. Azuma,“增强现实调查”,《存在:远程操作器和虚拟环境》,1997年,第6卷,第4期,第355-385页,doi:
<https://doi.org/10.1162/pres.1997.6.4.355>
- [11] B. C. Kress、I. Chatterjee,“用于混合现实头显的波导合路器:纳米光子学设计角度”,《纳米光子学》,第10卷,第1期,2021年,第41-74页,<https://doi.org/10.1515/nanoph-2020-0410>
- [12] S. Poeschl、K. Wall、N. Doering,“沉浸式虚拟环境中的空间声音集成:关于空间声音对存在感影响的实验性研究”,2013年IEEE虚拟现实(VR),美国佛罗里达州布纳维斯塔湖,2013年,第129-130页,
<https://doi.org/10.1109/VR.2013.6549396>
- [13] C. Bermejo、P. Hui,“移动增强现实的触觉反馈技术调查”,《ACM计算调查》,第54卷,第9期,
<https://doi.org/10.1145/3465396>, <https://doi.org/10.48550/arXiv.1709.00698>
- [14] Eduardo Esteves,“分布式计算新时代的无界XR”,2018年9月17日,Qualcomm OnQ Blog,
<https://www.qualcomm.com/news/onq/2018/09/boundless-xr-new-era-distributed-computing>
- [15] Allison C. Meier,“天幕:19世纪的虚拟现实”,2018年12月16日,JSTOR Daily,
<https://daily.jstor.org/cycloramas-the-virtual-reality-of-the-19th-century/>
- [16] H. Rheingold,“虚拟现实”,Simon & Schuster, Inc., 1991年
- [17] C. Comeau和J. Bryan,“Headsight电视系统提供远程监控”,《电子学》,1961年,第34卷,第86-90页
- [18] I. E. Sutherland,“终极显示”,国际信息处理联合会(IFIP)会议论文集,第2卷,1965年,第506-508页
- [19] I. E. Sutherland,“一种头戴式三维显示器”,秋季联合计算机会议1968年12月9日至11日论文集,第一部分,第758-760页,计算机协会,纽约,1968年,<https://doi.org/10.1145/1476589.1476686>

- [20] T. Furness, “超级驾驶舱及其对人类的挑战”, 人因工程学会第30届年会论文集, 1986年, 第48-52页, 加利福尼亚州圣莫尼卡, 人因工程学会
- [21] S. Fisher、M. McGreevy、J. Humphries和W. Robinett, “虚拟环境显示系统”, 交互式3D图像研讨会论文集, 第1卷, 1987年, 第77-87页, <https://doi.org/10.1145/319120.319127>
- [22] S. Fisher、E. Wenzel、C. Coler、M. McGreevy, “虚拟接口环境工作站”, 人因工程学会年会论文集, 第32卷, 1988年, <https://doi.org/10.1177/154193128803200219>
- [23] M. Bajura、H. Fuchs、R. Ohbuchi, “将虚拟物体与现实世界融合: 查看患者体内的超声图像”, 《SIGGRAPH计算机图形学》, 第26卷, 第2期, 1992年7月, 第203-210页, <https://doi.org/10.1145/142920.134061>
- [24] B. O. Rothbaum、L. F. Hodges、R. Kooper、D. Opdyke、J.S. Williford、M. North, “计算机生成(虚拟现实)分级暴露在高症治疗中的有效性”, 《美国精神病学杂志》, 第152卷, 第4期, 第626-628页, <https://doi.org/10.1176/ajp.152.4.626>
- [25] B. O. Rothbaum、L.F. Hodges、R. Alarcon、D. Ready、F. Shahar、K. Graap、J. Pair、P. Hebert、D. Gotz、B. Wills、D. Baltzell, “PTSD越战退伍军人的虚拟现实暴露疗法: 案例研究”, 《创伤应激杂志》, 第12卷, 第2期, 1999年, 第263-271页, <https://doi.org/10.1023/A:1024772308758>
- [26] T. P. Caudell、D. W. Mizell, “增强现实: 头显技术在手动制造过程中的应用”, 第25届夏威夷国际系统科学会议论文集, 美国夏威夷州考艾岛, 第2卷, 1992年, 第659-669页, <https://doi.org/10.1109/HICSS.1992.183317>
- [27] S. Feiner、B. MacIntyre、T. Hollerer、A. Webster, “旅游机器: 探索城市环境的3D移动增强现实系统原型”, 论文摘要, 第一届国际可穿戴计算机研讨会, 美国马萨诸塞州剑桥, 1997年, 第74-81页, <https://doi.org/10.1109/ISWC.1997.629922>
- [28] C. Zeagler、T. Starner、T. Hall、M. Wong, “迎接挑战: 迈向消费者可穿戴计算机之路”, 佐治亚理工学院, 2015年
- [29] J. Pair、B. Allen、M. Dautricourt、A. Treskunov、M. Liewer、K. Graap、G. Reger, “虚拟现实暴露疗法在伊拉克战争创伤后应激障碍中的应用”, 虚拟现实会议, IEEE, 2006年, 第67-72页, IEEE虚拟现实会议(VR 2006), <https://doi.ieeecomputersociety.org/10.1109/VR.2006.23>
- [30] H. Kato和M. Billinghurst, “基于视频的增强现实会议系统的标记跟踪和HMD校准”, 第二届IEEE和ACM国际增强现实研讨会(IWAR'99)论文集, 美国加利福尼亚州旧金山, 1999年, 第85-94页, <https://doi.org/10.1109/IWAR.1999.803809>
- [31] H. Kato、M. Billinghurst、I. Poupyrev、K. Imamoto、K. Tachibana, “桌面AR环境中的虚拟目标操作”, IEEE和ACM国际增强现实研讨会(ISAR 2000)论文集, 德国慕尼黑, 2000年, 第111-119页, <https://doi.org/10.1109/ISAR.2000.880934>
- [32] J. L. Olson、D. M. Krum、E. A. Suma、M. Bolas, “基于智能手机的头显设计”, 2011年, IEEE虚拟现实会议, 新加坡, 2011年, 第233-234页, <https://doi.org/10.1109/VR.2011.5759484>
- [33] M. Bolas、J. Iliff、P. Hoberman、N. Burba、T. Phan、I. MacDowall、P. Luckey、D. Krum, “开放虚拟现实”, IEEE虚拟现实(VR), 美国佛罗里达州布纳维斯塔湖, 2013年, 第183-184页, <https://doi.org/10.1109/VR.2013.6549423>
- [34] Oculus, “Oculus Rift: 走进游戏”, <https://www.kickstarter.com/projects/1523379957/oculus-rift-step-into-the-game>
- [35] Meta, “Facebook将收购Oculus”, 2014年3月25日, <https://about.fb.com/news/2014/03/facebook-to-acquire-oculus/>
- [36] Mordor Intelligence, “扩展现实(XR)市场规模(2024年至2029年)”, <https://www.mordorintelligence.com/industry-reports/extended-reality-xr-market/market-size>
- [37] ABI Research, “2027年工业XR设备出货量将超过1600万台, 彰显出企业培训的价值, 尤其是在工业市场”, 2023年6月7日, <https://www.prnewswire.com/news-releases/over-16-million-industrial-xr-devices-set-to-ship-in-2027-showcasing-enterprise-trainings-value-especially-in-industrial-markets-301844411.html>

- [38] Felix Richter, “AR和VR的应用仍处于起步阶段”, 2023年6月2日, <https://www.statista.com/chart/28467/virtual-and-augmented-reality-adoption-forecast/>
- [39] F. Alriksson、O. Drugge、A. Furuskär、D. H. Kang、J. Kronander、J. L. Pradas、Y. Sun, “扩展现实应用的未来网络要求”, 《爱立信技术评论》, 2023年4月4日, <https://www.ericsson.com/en/reports-and-papers/ericsson-technology-review/articles/future-network-requirements-for-xr-apps>
- [40] Meta, “迈向下一个计算平台的十年之路”, 2024年4月3日, Meta Quest Blog, <https://www.meta.com/blog/quest/reality-labs-10-year-anniversary-next-computing-platform-vr-mr-ar-xr>
- [41] P. Higgs, “VR超越360度”, 3GPP/VRIF/AIS第二届VR生态系统和标准研讨会, “沉浸式媒体与5G相结合”, 美国卡尔弗城, 2019年4月15日至16日, <http://www.vr-if.org/immersive-media-meets-5g/>
- [42] D. H. Kang, “网络性能和元宇宙:5G能否满足需求?”, The Ericsson Blog, <https://www.ericsson.com/en/blog/2022/11/network-performance-metaverse-5g>
- [43] C. E. Shannon, “通信的数学理论”, 《贝尔系统技术期刊》, 第27卷, 1948年, 第379-423、623-656页
- [44] 诺基亚, “6G频谱解析”, 2023年6月27日, <https://www.nokia.com/about-us/newsroom/articles/spectrum-for-6G-explained/>
- [45] 3GPP, TR38.838, “NR场景下XR (扩展现实) 评估研究”, <https://portal.3gpp.org/desktopmodules/Specifications/SpecificationDetails.aspx?specificationId=3736>
- [46] 诺基亚贝尔实验室, “什么是L4S?”, <https://www.bell-labs.com/research-innovation/projects-and-initiatives/l4s/>
- [47] Hemanth Sampath, “利用5G实现元宇宙”, 2022年11月8日, Qualcomm OnQ Blog, <https://www.qualcomm.com/news/onq/2022/11/enabling-the-metaverse-with-5g>
- [48] Z. Mao、H. Li、C. Sun、X. Wang、S. Wang, “本地化移动元宇宙:3GPP标准化进展”, 2023年IEEE/CIC中国国际通信大会 (ICCC研讨会), 中国大连, 2023年, 第1-6页, <https://doi.org/10.1109/ICCCWorkshops57813.2023.10233752>
- [49] M. E. Haque、F. Tariq、M. R. A. Khandaker、K. Wong、Y. Zhang, “5G URLLC中的调度调查和对新兴6G系统的展望”, IEEE Access, 第11卷, 2023年, 第34372-34396页, <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2023.3264592>
- [50] S. Mandelli、A. Lieto、A. Weber、T. Wild, “通过延迟感知资源利用实现6G网络中的功率优化和吞吐量增强”, 2021年欧洲网络与通信联合会议暨6G峰会 (EuCNC/6G峰会), 葡萄牙波尔图, 2021年, 第176-181页, <https://doi.org/10.1109/EuCNC/6GSummit51104.2021.9482470>
- [51] 3GPP, TR26.928, “5G中的扩展现实(XR)”, V18.0.0, <https://portal.3gpp.org/desktopmodules/Specifications/SpecificationDetails.aspx?specificationId=3534>

请注意:所有链接已在本文档编纂时经过检查且运行正常。但是,我们不保证参考列表中的链接未经后续更改。

关于罗德与施瓦茨公司

作为测试测量、技术系统以及网络安全方面的行业先驱, Rohde & Schwarz 科技集团通过先进方案为世界安全联网保驾护航。集团成立于90年前, 致力于为全球工业企业和政府部门的客户提供可靠服务。集团总部位于德国慕尼黑, 在全球70多个国家和地区设有分支机构, 拥有广阔的销售和服务网络。

罗德与施瓦茨(中国)科技有限公司

www.rohde-schwarz.com.cn

罗德与施瓦茨公司官方微信

罗德与施瓦茨客户支持

www.rohde-schwarz.com/support



R&S® 是罗德与施瓦茨公司注册商标

商品名是所有者的商标 | 中国印制

PD 3673.0792.55 | 01.00版 | 2024年11月 (st)

元宇宙和扩展现实

文件中没有容限值的数据没有约束力 | 随时更改

© 2024 Rohde & Schwarz | 81671 Munich, Germany