



工业互联网产业联盟
Alliance of Industrial Internet

5G+TSN 联合测试床：

5G Over TSN 前传网络发展及验证报告

(2022 年版)

工业互联网产业联盟
Alliance of Industrial Internet

工业互联网产业联盟

2023年9月

声 明

本报告所载的材料和信息，包括但不限于文本、图片、数据、观点、建议，不构成法律建议，也不应替代律师意见。本报告所有材料或内容的知识产权归工业互联网产业联盟所有（注明是引自其他方的内容除外），并受法律保护。如需转载，需联系本联盟并获得授权许可。未经授权许可，任何人不得将报告的全部或部分内容以发布、转载、汇编、转让、出售等方式使用，不得将报告的全部或部分内容通过网络方式传播，不得在任何公开场合使用报告内相关描述及相关数据图表。违反上述声明者，本联盟将追究其相关法律责任。

工业互联网产业联盟
Alliance of Industrial Internet

工业互联网产业联盟

联系电话：010-62305887

邮箱：aia@caict.ac.cn

编写说明

随着 5G 在千行百业的广泛应用，工业互联网逐渐成为 5G 应用的蓝海市场。相较于消费互联网，终端之间交互需求增长，需要更为灵活开放的架构，低时延高可靠的性能要求，因此确定性前传网络也将越来越受到关注，时间敏感网络（TSN）、FlexE、SDN 技术在前传网络的融合应用将为其在新的场景下适应新的需求提供有力支撑。为了更好地建立工业互联网时间敏感网络产业生态，了解 TSN 应用于移动前传网络当前技术落地现状水平，2020 年起工业互联网联盟（AII）启动了 5G TSN 融合部署的技术及产业研究工作，积极开展时间敏感网络与 5G 在工业领域融合部署的可行性调研及评估，并于 2021 年 10 月正式启动“5G+TSN 联合测试床项目”，该项目于 2022 年 9 月完成了国内首次 5G over TSN 前传网络技术及方案验证工作。

本次验证工作旨在针对基于分组传送的时间敏感网络用于部署 5G 前传网络的技术发展及相关技术指标进行验证，验证这一技术方向在工业 5G 专网承载网部署及作为工业园区网络综合承载方案中落地的可行性，为工业园区网络设计、规划及建设提供新的建设思路，推动工业网络创新发展。

组织单位：工业互联网产业联盟

牵头单位：中国信息通信研究院

参与单位（排名不分先后）：上海诺基亚贝尔、思博伦通信公司、是德科技

目 录

第一部分：背景说明	1
1. 发展现状.....	1
2. 场景说明.....	2
3. 关键技术.....	5
第二部分：技术方案验证	9
1. 5G 业务质量对比测试.....	9
2. 前传网络能力测试.....	26
3. 综合承载方案验证.....	33
附录 测试设备介绍	37
1. 5G 系统.....	37
2. 前传设备.....	39
3. 仪表.....	40



工业互联网产业联盟
Alliance of Industrial Internet

第一部分：背景说明

5G 作为新一代移动互联网技术，除了将为消费互联网带来更好的业务体验，还将为产业互联网（工业互联网、车联网等）提供技术支撑。相比消费互联网上的应用，工业互联网业务的传输对于网络安全性、可靠性、确定性有更严格的要求，这将对 5G 的网络架构及技术实现提出新的挑战。

TSN 技术在现有的以太网基础上增加或者增强了时间同步，流量调度等能力，可以差异化对不同业务流量实现高质量确定性传输。近年来，关于将 5G 与 TSN 技术结合应用于垂直行业专网逐步成为业内热点，包括 3GPP、IEEE 在内的多个国际标准组织及各类研究机构都正在进行相关技术研究。

5G 与 TSN 的融合部署及应用为进一步满足工业互联网新型应用需求提供了可选方案。

1. 发展现状

概括来讲，5G 与 TSN 技术有两个大的方向，一是 3GPP R16 正式提出的，将 5G 系统实体化为一个 TSN 域内部的网桥，来实现 TSN 网络部署规模和范围的扩展，该方向在 R17 阶段进行了技术细化，针对 TSN 与 5G 对接网关及 AF 如何实现 5G 与 TSN 系统的同步及 QoS 协同进行了细化，为 5G TSN 端到端落地应用向前推动迈进了一大步。二是利用 TSN 技术提升承载网确定性，对 5G uRLLC 进行增强。IEEE802.1CM 被率先提出将 TSN 技术应用于移动前传网络作为 5G 与 TSN 融合部署的主要场景，并逐步引起业内关注。相较于消费互联网，工业互联网终端之间交互需求增长，网络部署需要更为灵活开

放的架构，低时延高可靠的性能要求，因此确定性前传网络也将越来越受到关注，TSN、FlexE、SDN 技术在前传网络的融合应用将为其在新的场景下适应新的需求提供有力支撑。在工业互联网园区网络和 5G 工业专网的部署过程中，支持 TSN 的前传网络也有望成为新的部署方案。

在 2021 年 9 月 28 日举办的“2021 工业互联网网络创新大会”上中国信通院发起“5G+TSN 联合测试床”共同建设项目，由中国移动、华为、上海诺基亚贝尔、新华三、英特尔、高通及艾灵网络共同参与。该项目依据当前 5G TSN 技术现状及产业进展，结合工业互联网网络建设需求，从端到端系统、承载网及核心网多个维度开展 5G TSN 融合部署技术及方案研究及验证工作，2022 年度重点对 TSN 与 5G 前传网络的融合部署于工业园区进行技术可行性及场景适应性开展验证工作。

2. 场景说明

工业园区是 5G 工业专网部署的重要载体。工业园区通常包括生产网、企业信息网、公共服务网、随着社会信息化的发展，信息化对生产效益的促进作用日渐明显，工业互联网园区网络建设成为焦点。工业互联网园区网络建设的目标是构建低延时、高可靠、广覆盖的网络基础设施，支持全区内各类信息和数据的交互和无缝传递，最终形成自动、智能、高效、安全的生产和服务体系。工业园区网络建设引入 5G 专网的建设，可以在一定程度上满足灵活接入、高性能承载、OT&IT 融合及异构系统协同互通等需求。

工业园区 5G 专网的建设，会根据业务需求 UPF 下沉至园区甚至产线的需求，同时要考虑园区网络的融合部署，如下图所示：

场景一：车间内部终端与综合接入点的 MEC 之间的业务通信，多为高确定性、高可靠性的生产控制类业务，此时前传为主要承载网络，传输范围为车间/楼宇内。

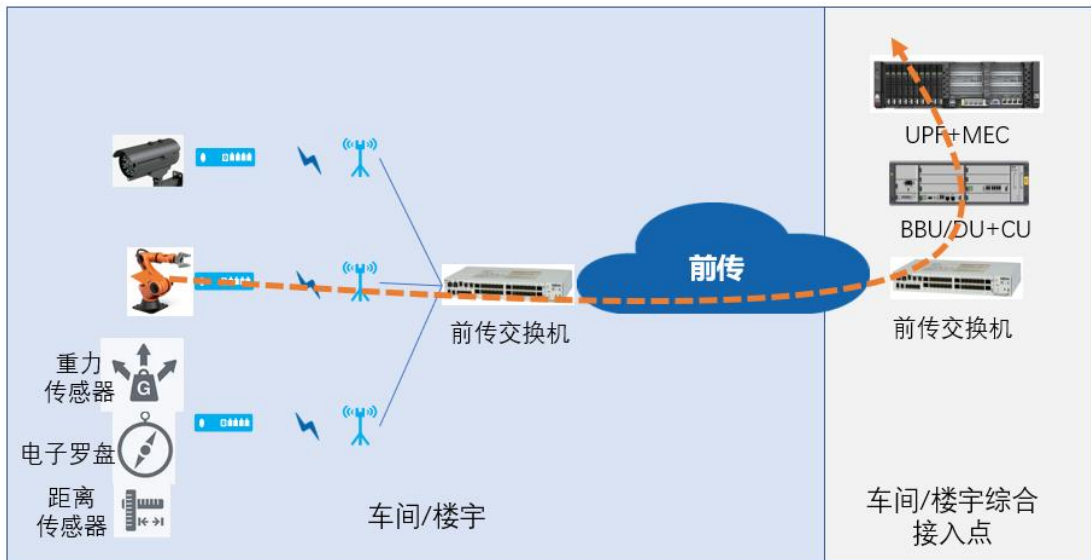


图 1 5G 用户面及基带模块部署在综合接入点场景

场景二：不同车间内终端之间的业务通信，如确定性、同步性要求高的生产协同类业务，此时前传为主要承载网络，传输范围为跨车间/楼宇。

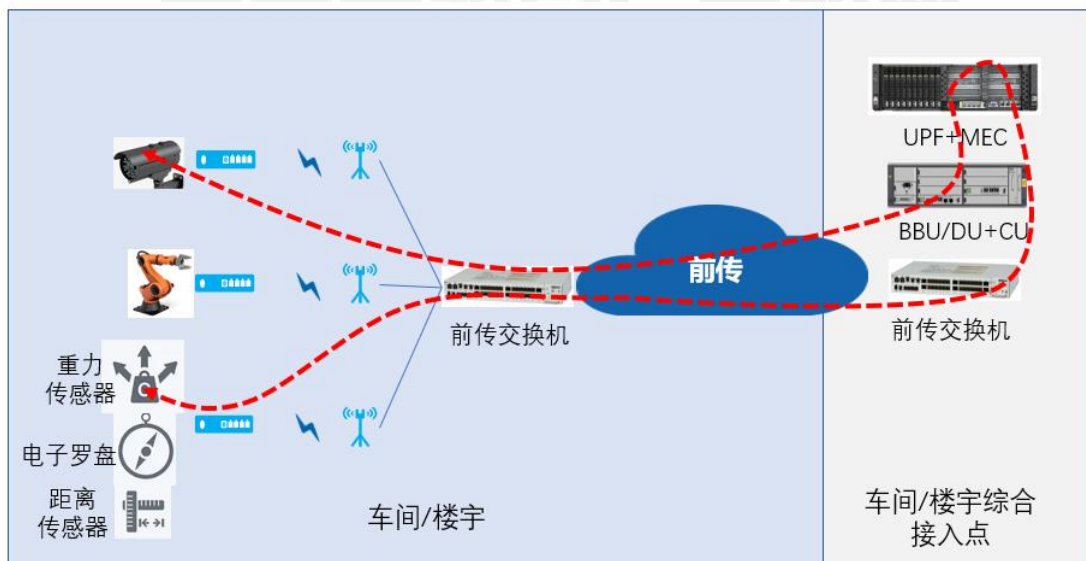


图 2 5G 用户面及基带模块部署在综合接入机房场景

场景三：园区内公共服务设施或车间内设备与园区综合接入机房MEC之间的业务通信，多为实时性监控业务，此时前传为主要承载网络，传输范围为园区内。

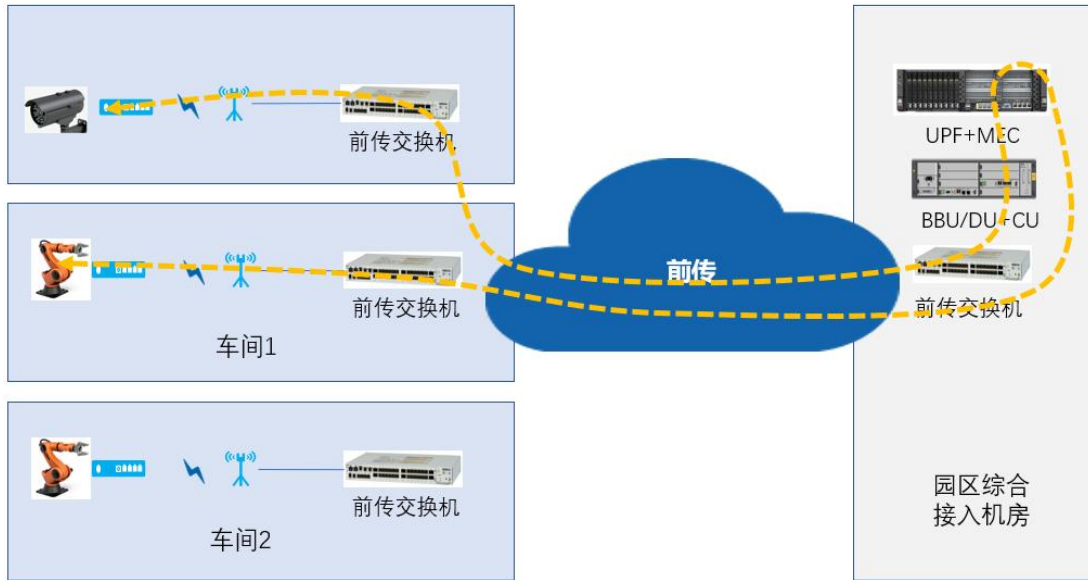


图 3 5G 用户面及基带模块部署于园区综合机房场景

场景四：园区内个人终端或者园区物联网终端经园区核心机房5GC与园区云平台通信，多为非实时性数据业务，此时涉及前传和回传网络，传输范围为园区内。

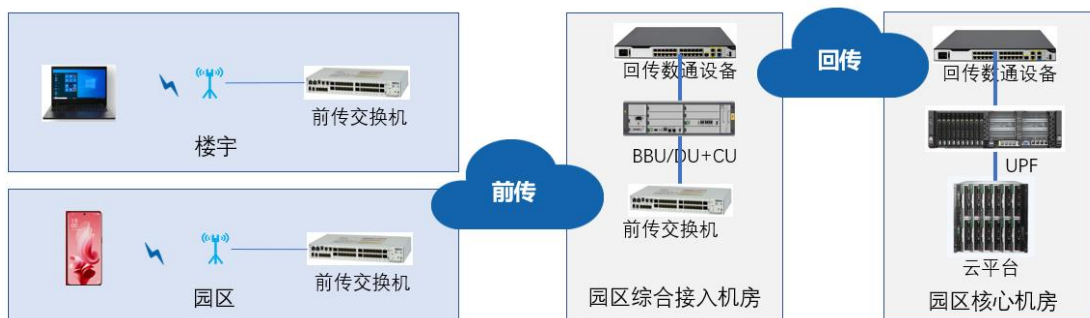


图 4 5G 基带模块与用户面设备分设场景

综上所述，场景一到场景三中前传网络都作为5G承载工业园区应用的主要承载网络，利用基于分组的以太网作为前传网络的承载

方式可以极大增加网络部署的灵活性，并可以作为数通网络与原有园区网络融合部署，叠加以TSN为代表的确定性网络技术，可以实现降低网络部署复杂度且满足工业园区网络高质量承载需求的综合达成。

3. 关键技术

3.1 开放前传接口

移动前传网络是指基带单元和无线单元间的网络，4G 时期及 5G 建设初期，前传网络的部署主要以光纤直驱和无源 WDM 方式为主。随着 5G 时代以 C-RAN 的建站方式成为主流，对前传网络在灵活组网能力、低时延高可靠提出了更高要求，典型的可选前传方案包括光纤直驱（单纤单向、单纤双向）、WDM（无源、有源、半有源）、微波、以太组网等方式。表格 1 汇总了各类典型的部署方案在组网形态，纤芯资源，接口类型，可靠性和传输距离方面的区别。

表格 1 主流前传方案对比表

类别	光纤直驱	无源 WDM	半有源 WDM	有源 WDM	以太网
组网形态	点到点	点到点	链/环/点到点	链/环/点到点	网/链/环/点到点
纤芯资源	6~12	1	1	1	2/1
接口类型	25G 白光	25G 彩光	25G 彩光	25G 彩光	以太接口
可靠性	无保护	无保护	1+1 保护	1+1 保护	手段丰富
传输距离	-	<10km	>10km	>10km	>10km

3GPP 定义了 AAU-DU 底层分离（LLS）不同方式的协议栈功能划分，与前传接口有关的划分选项包括 Option 6、Option 7 和

Option 8。其中的 Option 7 是物理层内切分，又可细分为 Option 7-1, Option 7-2 和 Option 7-3 等。不同的物理层切分方式对前传接口带宽有不同的要求，物理层切分越靠近 MAC 层对前传接口带宽的要求越低，物理层越靠近 RU 对前传接口带宽的要求越高。

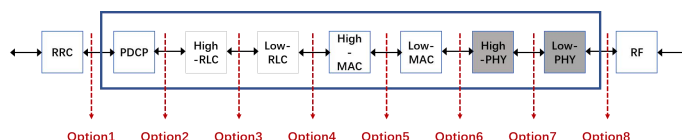


图 5 AAU-DU 底层分离的切分选择示意

由于 5G 业务所需频谱带宽显著增加且基站功能架构重新划分处理功能重新分割等因素，前传典型接口由 4G 基站基带处理单元 BBU 和远端射频单元 RRU 之间的 10Gbit/s 速率 CPRI（通用公共无线接口）向 25Gbit/s 的 eCPRI（演进型 CPRI）接口演进，如图 6 所示。CPRI 协议基于 Option 8 方式划分，物理层功能全部位于 DU，前传接口带宽要求高；eCPRI 协议中在物理层内部进行划分（Option 7-2），PHY-high 和 PHY-low 分别位于 DU 和 AAU，降低了前传接口，逐步成为主流技术。

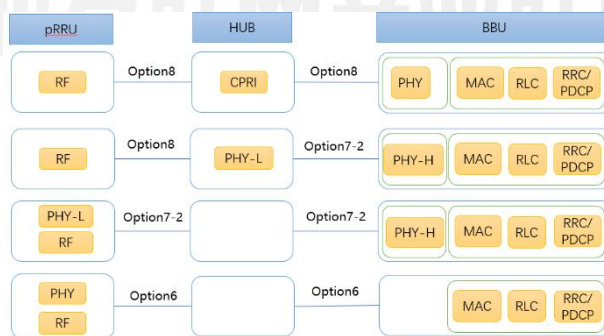


图 6 CPRI 和 eCPRI 切分方式的演进趋势

3.2 高精度时间同步

时间同步是基站之间业务协同的基础，也是时间敏感网络实现精准流量调度的前提。因此在TSN应用于5G前传网络中时，首先对二者的时间同步方案进行协同整合。

基站之间的时间同步技术主要采用直接外接时钟的同步技术和基于网络传递的同步技术两大类，2G~4G阶段主要以直接外接时钟的同步技术实现，但其存在失效率高、可维护性及安全性差的问题。以IEEE1588v2技术为代表的基于网络的同步传递技术逐步发展起来，但是由于需要逐跳支持、双向光纤等长等部署限制，也未在4G时代大规模应用起来。

由于5G NR基本业务普遍采用TDD制式，即同频点分时区分不同时隙报文收发，若基站之间时间不同步，则严重影响业务的移动性。而时间敏感网络由于需要对流量按照时隙进行精准调度，网元之间也需要精准的时间同步。因此在考虑TSN与移动承载网络融合部署的时候要首先考虑时间同步的协同。

前传网络以射频单元AAU及基带单元DU为边缘节点，由于承载在5G网络之上的TSN业务本身就要支持逐跳的高精度时间同步，因此可以考虑利用TSN的前传系统为5G网络提供时钟同步传递能力。前传组网的时间同步方案考虑时钟源接入点及信号传递方向，主要有如下三钟方案，

- 1) 时钟信号从基站基带模块（BBU/DU）处接入，可直接从外接或内置的时钟源处获取同步信息，也可以从中传或者

回传网络中获取，通过前传网络向射频模块（AAU/RRU）传递同步信号；

- 2) 时钟信号从前传网络桥设备接入产生，通过时间敏感网络同时向 RRU 和 DU 传递同步信息；
- 3) 时钟信号从射频模块（RRU/AAU）处接入，即射频模块内置或外接相应的时钟源，通过前传网络向基带模块输出同步信息。

本次测试采用方案（1），具体而言，可以一个TSN域作为时钟域，以DU直连BITS或者承接上游的IEEE1588v2时钟信号（取决于上游网络是否支持PTP），利用TSN网络逐跳向下传递同步时钟信号，从而实现高精度的时间同步。

3.3 帧抢占技术

相对于传统前传网络的点对点连接，基于包转发的前传网络可以提供多点对多点连接，同时前传网络对于数据传输的延时和丢包率有严格要求，AAU到DU之间的IQ数据端到端单向时延不能高于 $100\mu\text{s}$ ，丢包率应低于 10^{-7} ；控制管理数据（C&M），丢包率应低于 10^{-6} 。在基于桥接技术的前传网络中，可将不同种类流量规划到不同VLAN中或者相同VLAN的不同优先级中，来实现业务的差异化质量保证。在桥接网络的承载方式下可以通过引入TSN的抢占（preemption）满足高优先级流量的时延和丢包要求。

帧抢占是指在恢复可抢占帧的传输之前暂停可抢占帧的传输，以允许传输一个或多个快速帧。将数据流按照其实时性要求标记为快速流量和可抢占流量，高优先级实时流量可以打断正在传输的低优先级流量，而低优先级流量则分片，待实时流量传输完成后进行

重组。这样既保证了高优先队列的实时性传输，也兼顾了低优先队列数据的有效传输。如下图所示：

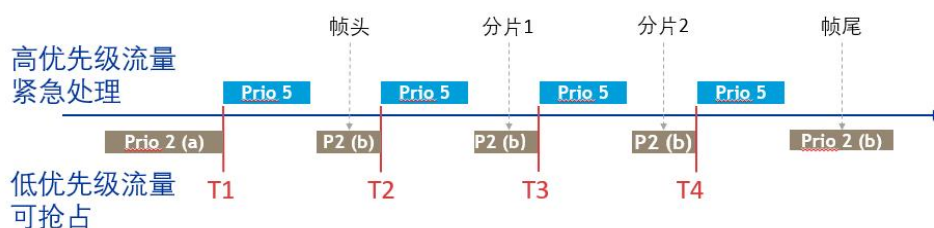


图 7 帧抢占机制原理示意图

第二部分：技术方案验证

5G 专网在工业园区的部署日益成为热点，部署方案要兼顾工业应用的对于确定性的要求以及网络综合承载的需要。目前 IEEE802.1CM 标准已经对时间敏感网络应用于前传网络进行标准化规定，基础理论基本成熟。鉴于上述前提，本次测试验证从基于以太网方案应用于前传网络对于 5G 系统的业务质量影响，验证该方案自身可提供的功能和性能能力，以及其部署于工业互联网园区时，承担综合承载业务的可行性三个方面进行试验。

1. 5G 业务质量对比测试

1.1 测试目的

5G 业务质量对比测试主要通过黑盒方式验证基于以太网传输的开放前传接口对 5G 系统业务质量的影响，通过与光纤直连前传网络的对比测试，验证基于以太网的开放前传接口在中短距离传输链路上的有效性，端到端稳定性，论证该项技术应用于园区内 5G 专网部署前传网络的可行性。

测试内容如表 2 所示，将从单用户数据通信性能、多用户数据通信性能和语音业务质量三个方面对前传网络用以太网替换光纤直连的 5G 系统进行端到端性能评估，来验证方案替换后对于原有 5G 系统是否有负面影响。

表格 2 5G 业务质量对比测试内容

序号	测试内容	测试目的
1.2	单用户端到端性能测试	5G 系统基础组网能力验证。
1.3	多用户端到端性能测试	5G 系统基础功能验证
1.4	用户 ViNR 业务测试	5G 系统业务功能验证

测试拓扑如图 9 所示，前传网络由两台前传交换机组成的以太网实现，用户侧接口分别对接基站设备的射频模块和基带模块，BBU 连接 5G 核心网，用户流量由仪表从空口输入射频模块，从核心网用户面回到仪表进行指标分析。

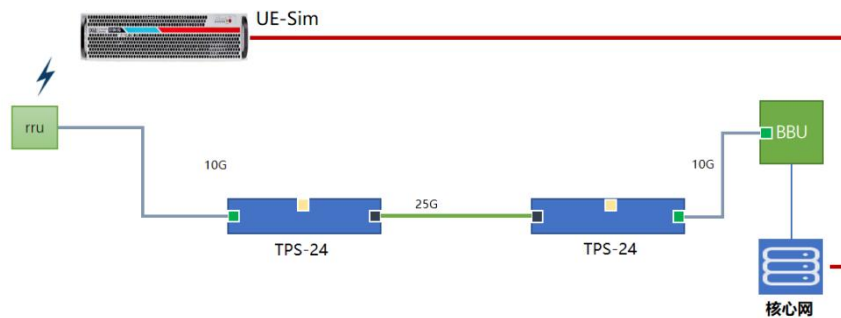


图 8 5G 业务质量对比测试拓扑

1.2 单用户端到端性能测试

在 5G 系统的前传网络中，分别部署基于以太网的 TSN 前传交换设备及光纤直连，单用户流量配置如表 3 所示，单用户业务测试分四种配置模型：上行 112Mbit/s、上行 80Mbit/s、下行 760Mbit/s

和 504Mbit/s，对于光纤直连和用以太网交换机连接的前传网络进行网络性能对比测试，用以验证利用以太网交换机连接方式用作前传网络的可行性。每个配置模型分别对于光纤直连、以太网连接场景以 10s、1min 及 10min 为采集样本空间进行网络性能测试（时延、吞吐量、业务质量），每个样本空间测量获得 20 个数据，共 40 个样本数据，并对样本进行统计学处理，以保证测试数据的有效性，确保验证可以真实反映对比效果。

表格 3 单用户端到端性能测试流量配置说明

流量配置	UE-SIM 模拟用户发包， 上行发包速率分别为 112Mbit/s 和 80Mbit/s 下行模拟发包速率分别为 760Mbit/s 和 504Mbit/s 开放前传接口场景与光纤直连流量配置相同
包长	128 Byte

5G 系统单用户端到端上行时延测试结果如表格 4 所示，光纤与交换机两种模式的最大和最小时延相同，使用 TSN 交换机连接的平均时延略大于光纤直连，如图 11 所示，光纤直连场景与交换机连接场景时延分布分别集中在 13100 μ s 和 13400 μ s，仅有 300 μ s 的差距。

表格 4 单用户端到端上行时延测试结果(单位： μ s)

	光纤直连时延			TSN 交换机连接时延		
	最小时延	平均时延	最大时延	最小时延	平均时延	最大时延
上行 80Mbit/s	13000	13100	14000	13000	13400	14000

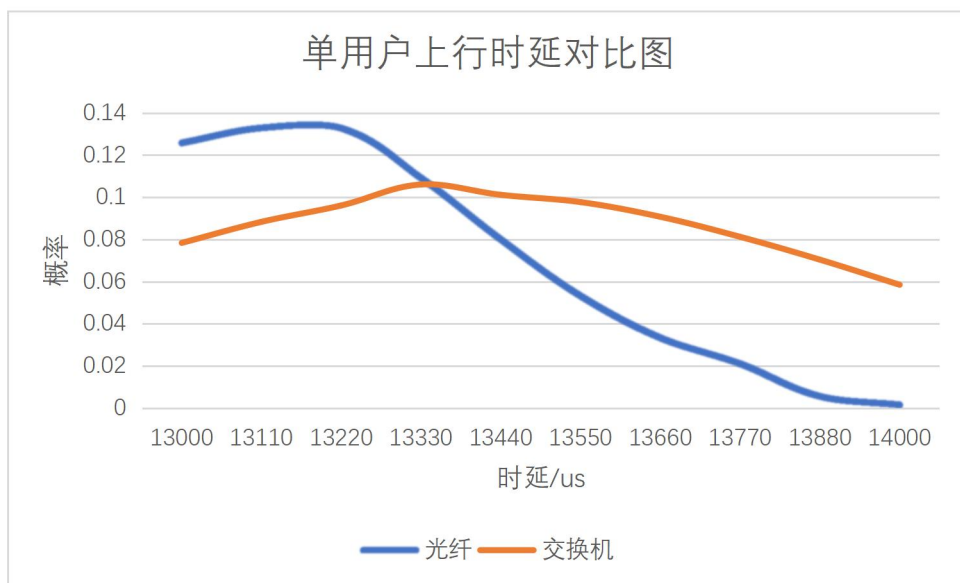


图 9 单用户端到端上行时延测试对比统计结果

单用户端到端下行时延测试结果如表格 5 所示，光纤直连场景在最大时延、最小时延以及平均时延方面皆略小于交换机连接场景，如图 11 所示，光纤直连场景与交换机连接场景时延分布分别集中在 $4390 \mu s$ 和 $4395 \mu s$ ，差距较小。

表格 5 单用户端到端下行时延测试结果(单位： μs)

	光纤直连时延			TSN 交换机连接时延		
	最小时延	平均时延	最大时延	最小时延	平均时延	最大时延
下行 504Mbit/s	4371	4390	4401	4378	4395	4561

Alliance of Industrial Internet

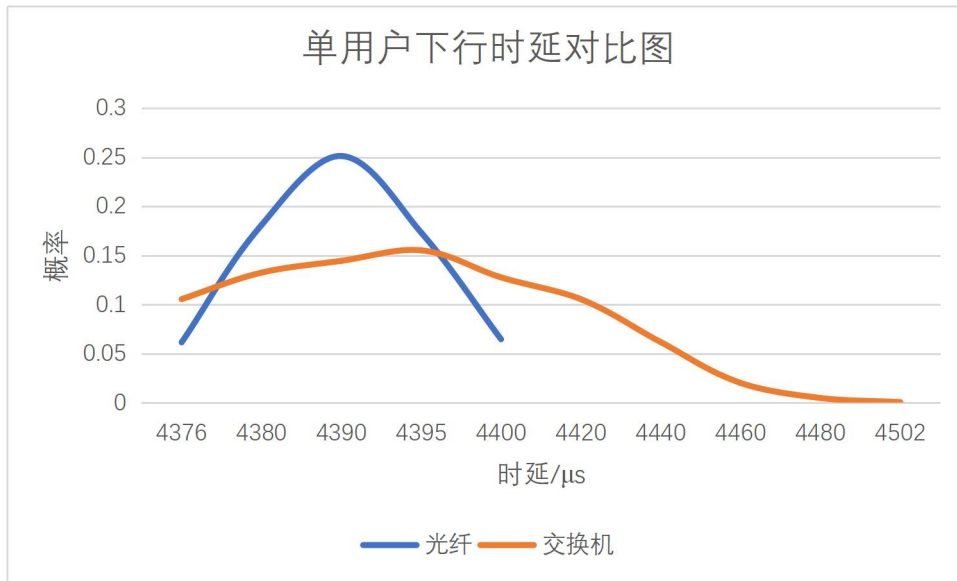


图 10 单用户端到端下行时延对比测试统计结果

单用户端到端上行吞吐量测试结果如表格 6 所示，本次测试两个场景吞吐量皆接近于满带宽，无明显差异，如图 12 所示，图中横轴为测试次数，纵轴为每次测试取得的吞吐量数据，由统计结果可知，光纤直连场景与交换机连接场景在吞吐量测试结果上趋于相等。

表格 6 单用户端到端上行吞吐量测试统计结果 (单位: Mbit/s)

光纤直连吞吐量			TSN 交换机连接吞吐量		
最小吞吐量	平均吞吐量	最大吞吐量	最小吞吐量	平均吞吐量	最大吞吐量
79.98	79.985	79.99	79.907	79.979	79.996

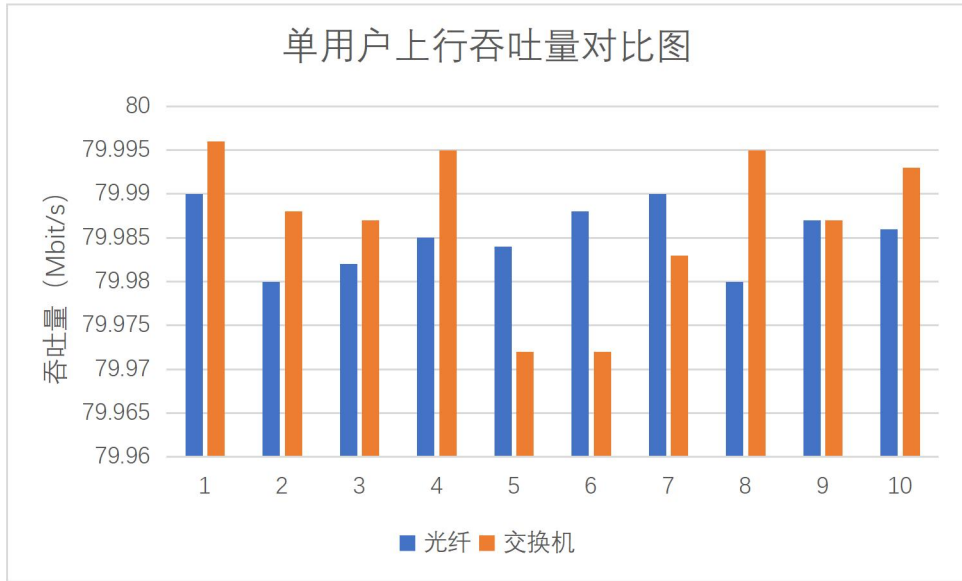


图 11 单用户端到端上行吞吐量测试对比统计结果

单用户端到端下行吞吐量测试结果如表格 7 所示，光纤直连、以太网连接场景最大吞吐量相同，都是满带宽，如图 13 所示，图中横轴为测试次数，纵轴为每次测试取得的吞吐量数据，由统计结果可知，两个场景吞吐量皆接近满带宽，光纤直连场景与交换机连接场景在吞吐量差距很小。

表格 7 单用户端到端下行吞吐量测试统计结果（单位：Mbit/s）

光纤直连吞吐量			TSN 交换机连接吞吐量		
最小吞吐量	平均吞吐量	最大吞吐量	最小吞吐量	平均吞吐量	最大吞吐量
503.986	503.9964	504	503.973	503.9802	504

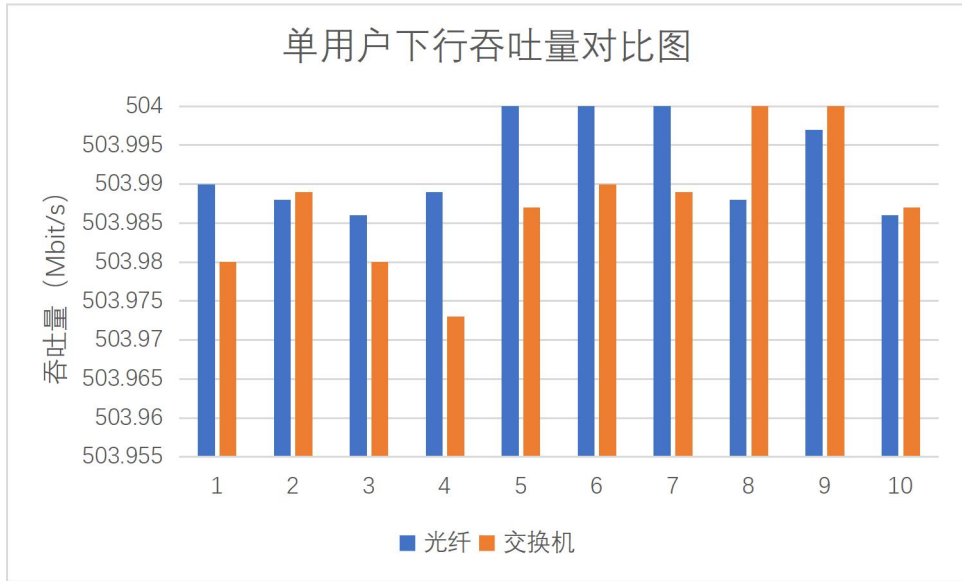


图 12 单用户端到端下行吞吐量测试统计结果

上下行信号质量测试结果如表格 8、表格 9 所示，其中 SNR 为信噪比，是度量通信系统通信质量可靠性的一个主要技术指标，信噪比越高表示信道质量越好，RSRP (参考信号接收功率) 是 LTE 网络中代表无线信号强度的参数，RSRQ 表示 LTE 参考信号接收质量，用作切换和小区重选决定的输入。由统计表可以看出，随着时间推移，光纤直连、以太网连接场景的 SNR、RSRP、RSRQ 值稳定趋于不变，两个场景在 SNR、RSRP、RSRQ 三个参数的对比方面也没有明显差异。

表格 8 单用户上行信号质量测试统计结果

测试时长	光纤直连			TSN 交换机连接		
	SNR/dB	RSRP/dBm	RSRQ/dB	SNR/dB	RSRP/dBm	RSRQ/dB
10s	32	-65.5	11.4	31	-65.5	11.4
1min	32	-65.5	11.4	31.4	-65.5	11.4
10min	32	-65.5	11.4	31.8	-65.5	11.4

表格 9 单用户下行信号质量测试统计结果

测试时长	光纤直连			TSN 交换机连接		
	SNR/dB	RSRP/dBm	RSRQ/dB	SNR/dB	RSRP/dBm	RSRQ/dB
10s	41	-65.5	11.5	41	-65.5	11.5
1min	42	-65.5	11.5	42	-65.5	11.5
10min	42	-65.5	11.5	42	-65.5	11.5

1.3 多用户端到端性能测试

在 5G 系统的前传网络中，分别部署基于以太网的 TSN 前传交换设备及光纤直连，多用户流量配置如表所示：

表格 10 多用户测试流量配置说明

流量配置	UE-SIM 模拟三用户同时发包，三用户上行发包速率分别为 100Mbit/s 和 30Mbit/s, 包长为 128Byte, 下行模拟发包速率分别为 330Mbit/s 和 200Mbit/s, 包长也为 128Byte, 开放前传接口场景与光纤直连流量配置相同，取优先级最高用户数据进行统计
包长	128 Byte
速率	上行 100Mbit/s、30Mbit/s 下行 330Mbit/s、200Mbit/s
用户数	3

每个配置模型分别对于光纤直连、以太网连接场景以 10s、1min 及 10min 为采集样本空间进行网络性能测试（时延、吞吐量、业务质量），光纤直连、以太网连接场景分别采集数据 20 个，共 40 个样本数据，并对样本进行统计学处理，以保证测试数据的有效性，确保验证可以真实反映对比效果。

如表格 11 所示，本次测试采用三用户发包模型，上行发包速率都为 30Mbit/s，选取优先级最高的用户进行结果统计，并对样本进行统计学处理得出图 14，由统计结果可知，两个场景最大以及最小时延相同，光纤直连场景与交换机连接场景时延分布分别集中在 14100 μ s 和 14400 μ s, 相差仅为 300 μ s。

表格 11 多用户端到端上时延测试统计结果（单位： μ s）

光纤直连时延			TSN 交换机连接时延		
最小时延	平均时延	最大时延	最小时延	平均时延	最大时延
14000	14100	15000	14000	14400	15000

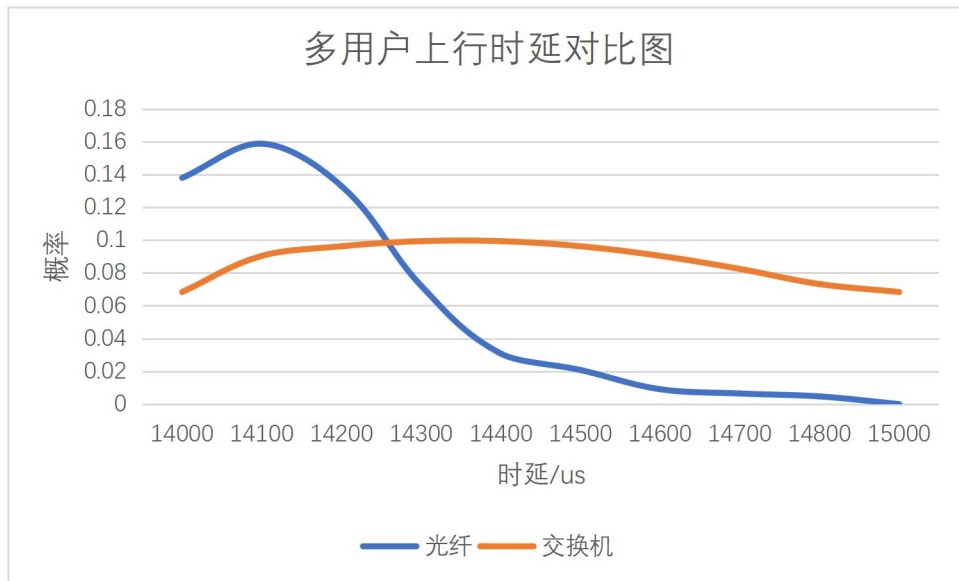


图 13 多用户端到端上行时延对比测试统计结果

如表格 12 所示，本次测试采用三用户发包模型，下行发包速率都为 200Mbit/s，选取优先级最高的用户进行结果统计，并对样本进行统计学处理得出图 15，由统计结果可知，两个场景最大以及最小时延虽不同，但差距不大，光纤直连场景与交换机连接场景时延分布分别集中在 4850 μ s 和 5050 μ s，差距较小。

表格 12 多用户端到端下行时延测试统计结果(单位： μ s)

光纤直连时延			TSN 交换机连接时延		
最小时延	平均时延	最大时延	最小时延	平均时延	最大时延
4775	4850	5100	4800	5050	5867

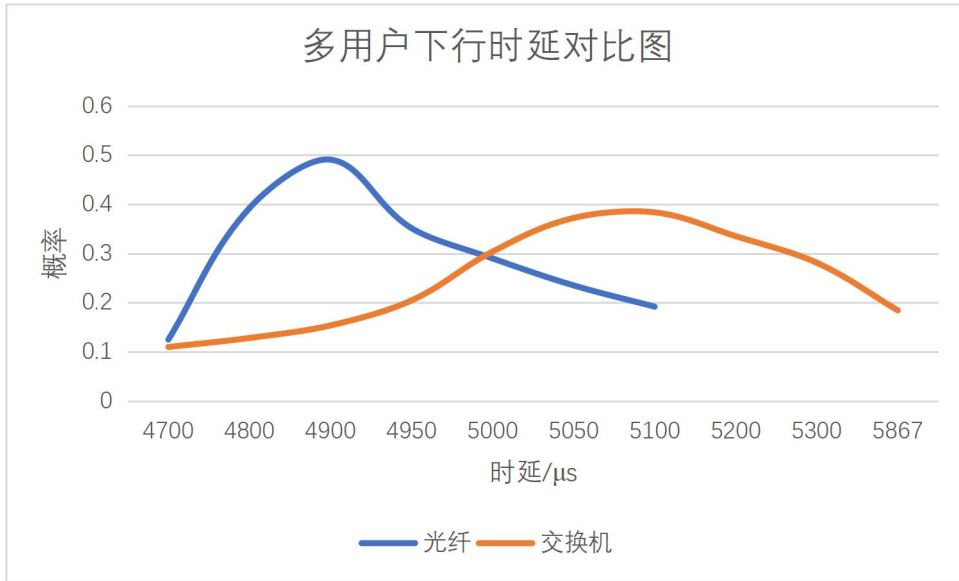


图 14 多用户端到端下行时延对比测试统计结果

如表格 13 所示，本次测试采用三用户发包模型，上行发包速率都为 30Mbit/s，选取优先级最高的用户进行结果统计，对样本进行统计学处理得出图 16，横轴为测试次数，纵轴为每次测试取得的吞吐量数据，由统计结果可知，两个场景最大以及最小吞吐量皆接近满带宽，光纤直连场景与交换机连接场景在吞吐量数据方面没有统计学上的差异。

表格 13 多用户端到端上行吞吐量测试统计结果(单位：Mbit/s)

光纤直连吞吐量			TSN 交换机连接吞吐量		
最小吞吐量	平均吞吐量	最大吞吐量	最小吞吐量	平均吞吐量	最大吞吐量
29.992	29.9994	30.334	29.569	29.9864	30.298

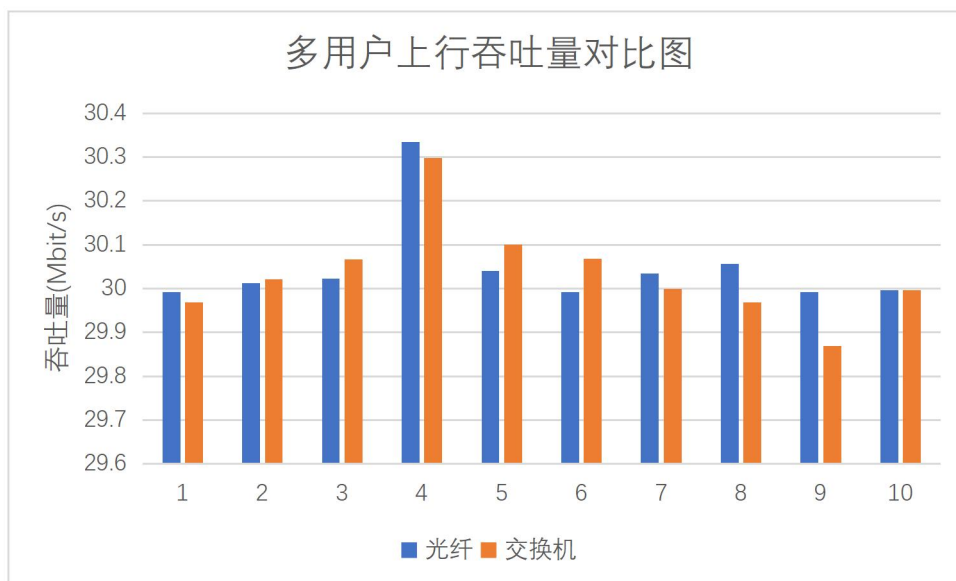


图 15 多用户端到端上行吞吐量对比测试统计结果

如表格 14 所示，本次测试采用三用户发包模型，下行发包速率都为 200Mbit/s，并对样本进行统计学处理得出图 17，横轴为测试次数，纵轴为每次测试取得的吞吐量数据，图中由于测试数据一致，在图片显示中光纤曲线被交换机曲线覆盖，由统计结果可知，两个场景最大以及最小吞吐量皆接近满带宽，光纤直连场景与交换机连接场景在吞吐量方面没有统计学上的差异。

表格 14 多用户端到端下行吞吐量测试统计结果(单位：Mbit/s)

光纤直连吞吐量			TSN 交换机连接		
最小吞吐量	平均吞吐量	最大吞吐量	最小吞吐量	平均吞吐量	最大吞吐量
199.992	199.9944	200	199.992	199.9992	200

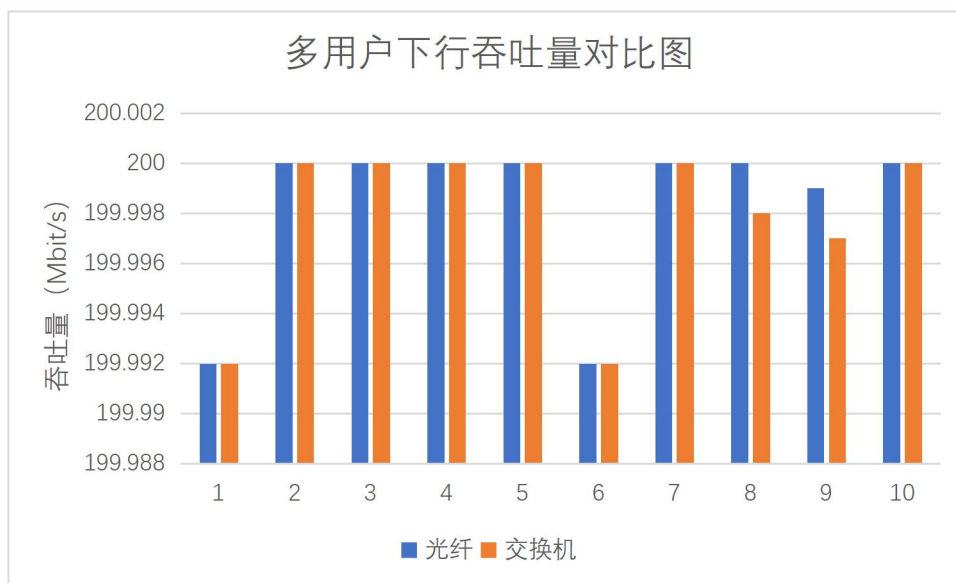


图 16 多用户端到端下行吞吐量对比测试统计结果

如表格 15、表格 16 所示，两个表格分别为上下行信号质量测试结果，由统计表可以看出，随着时间推移，光纤直连、以太网连接场景的 SNR、RSRP、RSRQ 值一直稳定趋于不变，两个场景在 SNR、RSRP、RSRQ 三个参数的对比方面也没有明显差异。

表格 15 多用户上行信号质量测试统计结果

测试时长	光纤直连			TSN 交换机连接		
	SNR/dB	RSRP/dBm	RSRQ/dB	SNR/dB	RSRP/dBm	RSRQ/dB
10s	31	-65.5	11.4	30	-65.5	11.4
1min	31	-65.5	11.4	31.2	-65.5	11.4
10min	32	-65.5	11.4	32	-65.5	11.4

表格 16 多用户下行信号质量测试统计结果

测试时长	光纤直连			TSN 交换机连接		
	SNR/dB	RSRP/dBm	RSRQ/dB	SNR/dB	RSRP/dBm	RSRQ/dB
10s	42	-65.5	11.5	42	-65.5	11.5
1min	42	-65.5	11.5	42	-65.5	11.5
10min	43	-65.5	11.5	43	-65.5	11.5

1.4 用户 ViNR 业务质量测试

在 5G 系统的前传网络中，分别部署基于以太网的 TSN 前传交换设备及光纤直连，ViNR 业务配置如表格 17 所示，本次测试采用模拟两个用户进行真实通话进行测试，由于两用户类型相同，故本次测试采用主叫 UE 的测试数据进行数据统计，由于基站对于通话存在限制，故本次测试对于光纤直连、以太网连接场景均以 2min 为样本采集空间进行网络性能测试。

表格 17 用户 ViNR 业务质量测试流量配置说明

流量配置	UE-SIM 模拟两用户进行通信，两用户上行发包速率为 600Mbit/s, 包长为不固定包, 为 UDP 包，下行模拟发包速率为 600Mbit/s, 包长为不固定包, 为 UDP 包开放前传接口场景与光纤直连流量配置相同，取主叫用户数据进行统计
包长	不固定
速率	600Mbit/s

如表格 18 所示，光纤直连、以太网连接场景分别采集数据 4 个，共 8 个样本数据，并对样本进行统计学处理得出图 18，由统计结果可知，两个场景最大以及最小时延虽不同，但差距不大，两个场景时延相差 $10\ \mu\text{s}$ 左右。

表格 18 ViNR 业务端到端时延测试统计结果（单位： μs ）

测试时长	光纤直连			TSN 交换机连接		
	最小时延	平均时延	最大时延	最小时延	平均时延	最大时延
2min	28.48	29.67	30.69	39.64	39.75	40.94

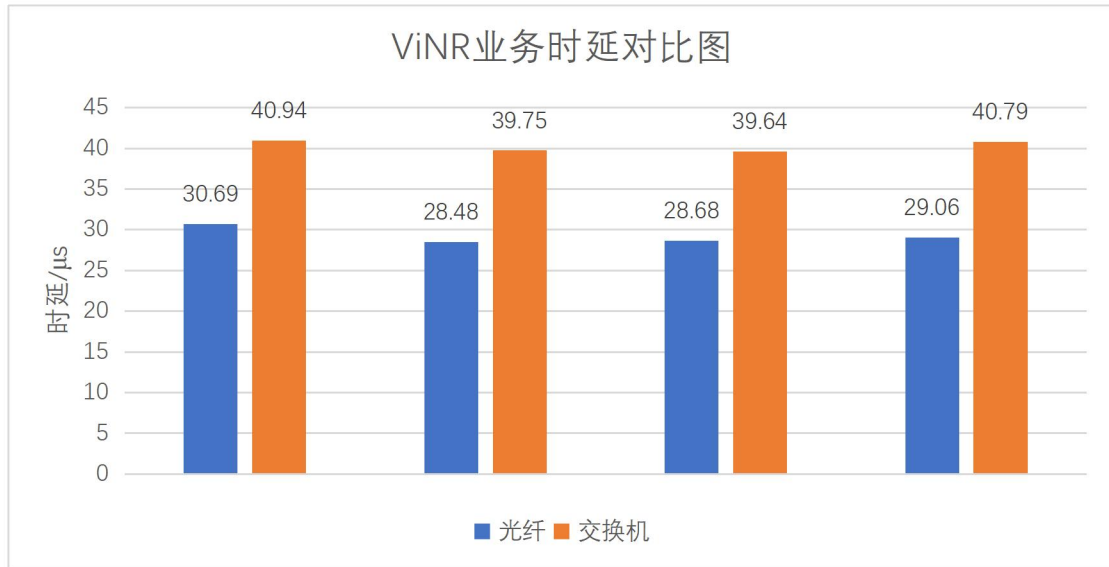


图 17 ViNR 业务端到端时延对比测试统计结果

如表格 19 及图 19 所示，由统计结果可知，交换机接入场景在最大最小以及平均抖动方面均略大于光纤接入场景，差值在 50ns-100ns。

表格 19 ViNR 业务端到端抖动测试统计结果(单位：ns)

测试时长	光纤直连			TSN 交换机连接		
	最小抖动	平均抖动	最大抖动	最小抖动	平均抖动	最大抖动
2min	4862.196	4889.84	4918.358	4931.698	4983.5	5031.288

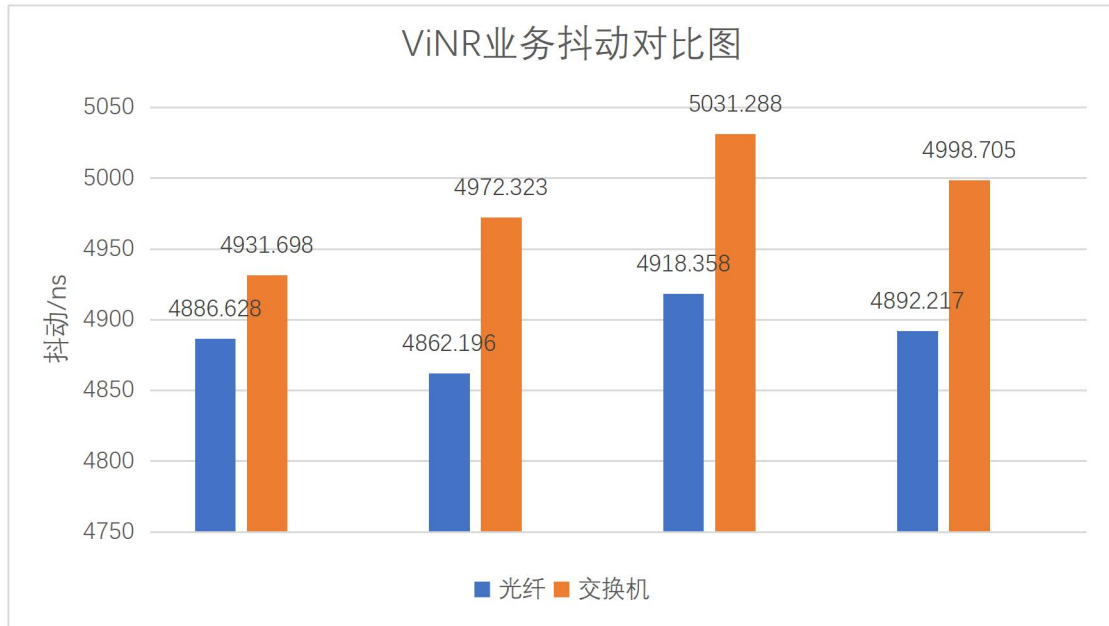


图 18 ViNR 业务端到端抖动对比测试统计结果

如表格 20 及图 20 所示，由统计结果可知，交换机接入场景在最大最小以及上行吞吐量方面均略大于光纤接入场景，两个场景在上行吞吐量方面没有明显差异。

表格 20 ViNR 业务端到端上行吞吐量测试统计结果(单位：Mbit/s)

测试时长	光纤直连			TSN 交换机连接		
	最小	平均	最大	最小	平均	最大
2min	584.604	587.513	588.425	587.513	591.4	595.485

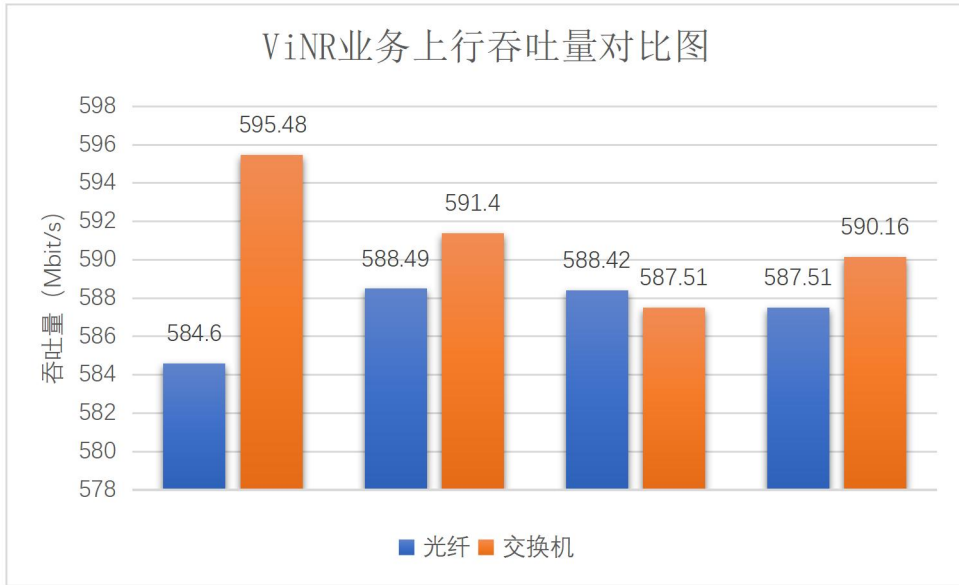


图 19 ViNR 业务端到端上行吞吐量对比测试统计结果

如表格 21 及图 21 所示，由统计结果可知，交换机接入场景在最大最小以及下行吞吐量方面均略大于光纤接入场景，两个场景在吞吐量数据对比方面没有明显差异。

表格 21 ViNR 业务端到端下行吞吐量测试统计结果(单位：Mbit/s)

测试时长	光纤直连			TSN 交换机连接		
	最小	平均	最大	最小	平均	最大
2min	571.785	572.609	578.169	580.546	582.075	584.655

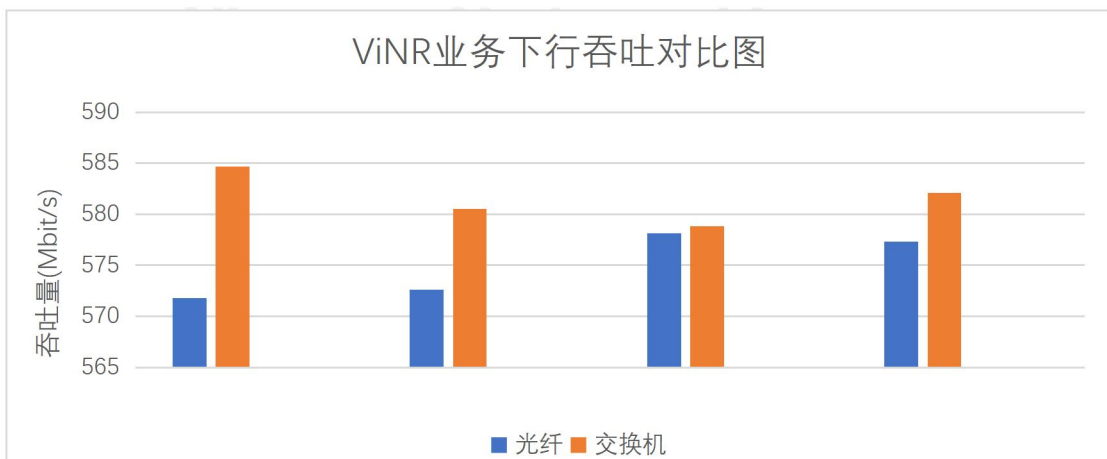


图 20 ViNR 业务下行吞吐量对比测试统计结果

如表格 22 及图 22 所示，表格中 P-MOS (通信系统语音质量的重要指标，0 分代表最差的质量，5 分为最高分): 交换机接入场景 P-MOS 值与光纤接入场景无区别，稳定在 4.448，由统计结果可知，交换机接入场景和光纤接入场景的 P-MOS 值皆稳定在 4.448 分。

表格 22 ViNR 业务质量 P-MOS 测试统计结果

时长	光纤直连				开放前传接口			
	第一次	第二次	第三次	第四次	第一次	第二次	第三次	第四次
2min	4.448	4.448	4.448	4.448	4.448	4.448	4.448	4.448

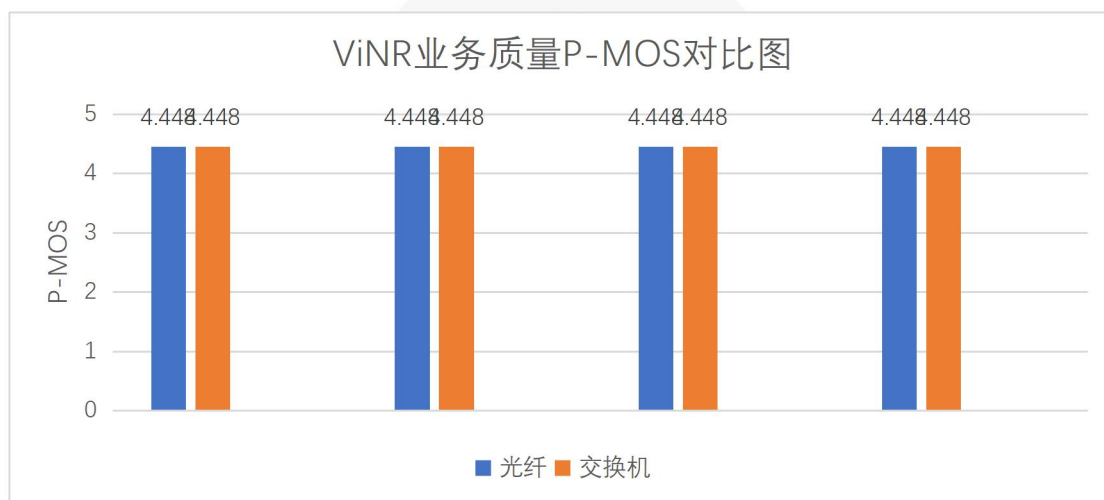


图 21 ViNR 业务端到端 P-MOS 对比测试统计结果

1.5 小结

本部分测试主要以 5G 系统端到端业务性能作为测试对象，分别对前传通过光纤直连和以太交换机的方式进行承载，通过测量时延、抖动、吞吐量、信号质量以及特定业务质量，可以看出，将采用以太网组网方式作为前传网络承载方式，在实验室环境与光纤直连的方案相比 5G 系统的端到端网络性能指标并没有明显的出现劣化，这也

为以太网方式作为前传组网的一种技术选型方案提供了一定的数据支撑。

2. 前传网络能力测试

2.1 测试目的

本部分测试重点针对前传网络本身的功能性能进行测试，关注基于以太网的前传网络的转发及同步性能是否可以满足 5G 系统前传网络的承载要求。

测试内容如表格 23 所示，一方面利用基站仿真仪表模拟基站射频模块和基带模块相互发送流量模拟 5G 上下行业务通过前传网络，对前传网络进行包围测试，以获得前传组网的性能测试数据，验证端到端转发性能指标。另一方面利用同步性能测试仪表对前传网络同步性能进行验证，证明其可以满足 5G 系统的时间同步要求。

表格 23 前传网络能力测试内容

序号	测试内容	测试目的
2.2	前传仿真组网测试	5G 系统基础组网能力验证。
2.3	前传时钟同步性能测试	5G 系统基础功能验证

2.2 前传仿真组网性能测试

前传仿真组网性能测试拓扑如图 23 所示，前传网络由两台支持 TSN 的前传交换机组成，用户侧通过连接测试仪表，仪表两个端口

分别模拟射频模块和基带模块，仿真 eCPRI 接口的用户面、C&M 面及时间同步数据，同时采集相关性能数据。拓扑如图 23：

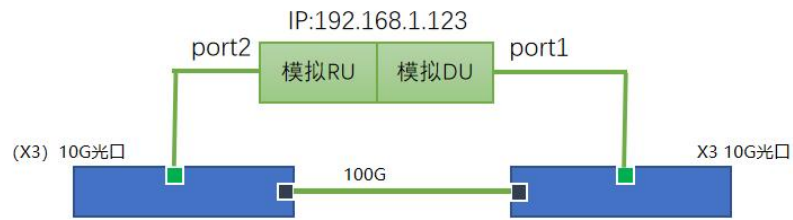


图 22 前传仿真组网性能测试拓扑

流量配置如表 24 所示，前传仿真组网性能测试分两种配置模型：64Byte 或 1500Byte，对于以太网交换机连接的模拟前传网络进行网络性能测试，每个配置模型对于光纤直连、以太网连接场景以 10s、1min 及 10min 为采集样本空间进行网络性能测试（时延、吞吐量、业务质量），每个样本空间测量获得 10 个数据，共 20 个样本数据（以下统计结果图中，横坐标表示测试时间，纵坐标为每次测试时间中取得的对应数据）并对样本进行统计学处理，以保证测试数据的有效性，确保验证可以真实反映对比效果。

表格 24 前传仿真组网性能测试流量配置说明

流量配置	仪表两个端口分别模拟 RU、DU 进行通信，前传交换机分别接入仪表的两个端口，仪表模拟用户进行发包， 分别使用 64Byte 以及 1500Byte 进行流量测试，发包速率统一为 100Mbit/s
包长	64Byte 或 1500Byte

前传仿真组网性能测试上行时延的测试数据如表格 25 所示，在报文为 64Byte 时，前传网络的上行最大时延为 1759ns，随着报文

字节变大，当报文字节为 1500Byte 时，最大时延为 1935ns，如图 24 所示，随着时间增加，两个字节的流量传输的前传网络的时延变化不大。

表格 25 前传网络上行时延测试统计结果（单位：ns）

包长 (Byte)	最小	平均	最大
64	1659	1715	1759
1500	1891	1915	1935

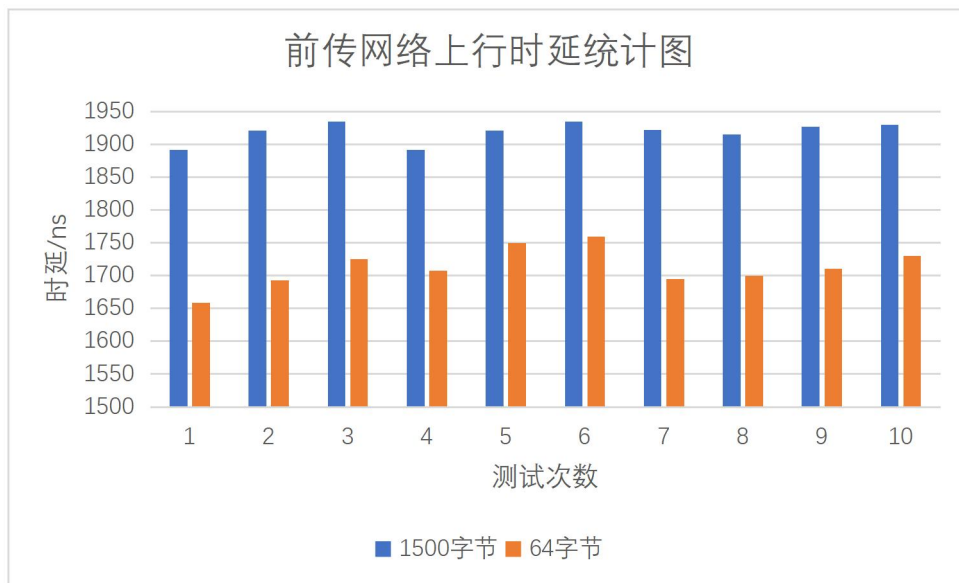


图 23 前传网络上行时延测试统计结果图

前传仿真组网测试上行抖动的测试数据如表格 26 所示，在报文为 64Byte 时，前传网络的上行最大抖动为 420ns，随着报文字节变大，当报文字节为 1500Byte 时，最大抖动为 355ns，在报文传输过程中，1500Byte 报文传输较稳定。如图 25 所示，随着时间增加，前传网络的时抖动变化不大。

表格 26 前传网络上行抖动测试统计结果（单位:ns）

包长 (Byte)	最小	平均	最大
64	327	371.5	420
1500	237	297	355

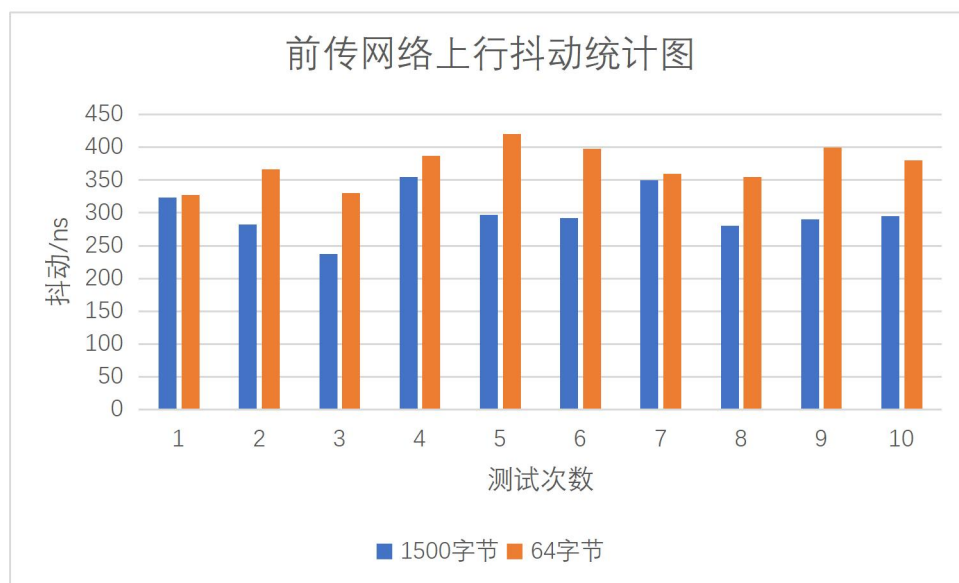


图 24 前传网络上行抖动测试统计结果图

如表格 27 所示，在报文为 64Byte 时，前传网络的下行最大时延为 1719ns，随着报文字节变大，当报文字节为 1500Byte 时，最大时延为 1889ns，如图 26 所示，随着时间增加，前传网络的时延变化不大。

表格 27 前传网络下行时延测试统计结果(单位：ns)

包长 (Byte)	最小时延	平均时延	最大时延
64	1612	1679	1719
1500	1845	1869	1889

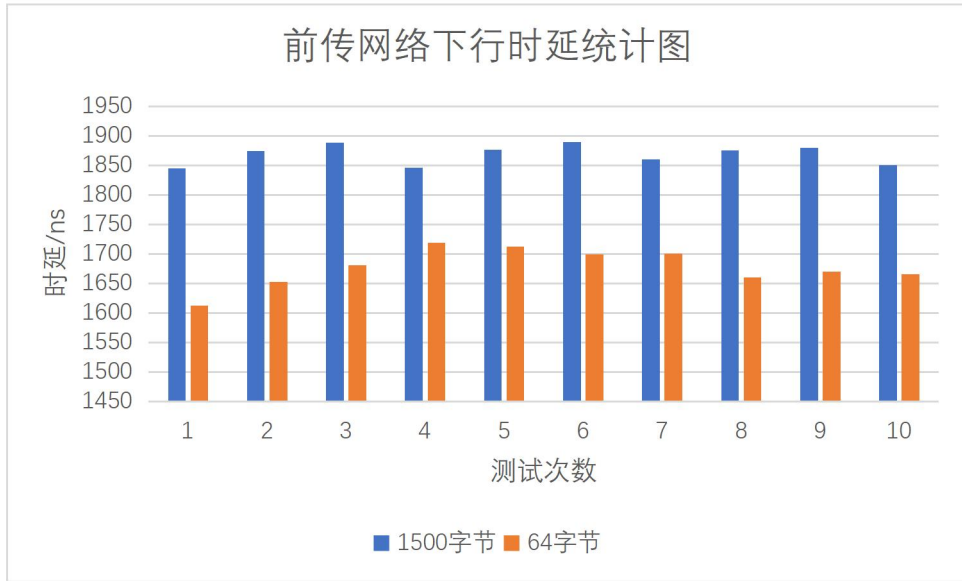


图 25 前传网络下行时延测试统计结果图

如表格 28 所示，在报文为 64Byte 时，前传网络的下行最大抖动为 475ns，随着报文字节变大，当报文字节为 1500Byte 时，最大抖动为 335ns，在报文传输过程中，1500Byte 报文传输较稳定。如图 27 所示，随着时间增加，前传网络的抖动变化不大。

表格 28 前传网络下行抖动测试统计结果(单位：ns)

包长 (Byte)	最小抖动	平均抖动	最大抖动
64	310	374	475
1500	240	297	335

Alliance of Industrial Internet

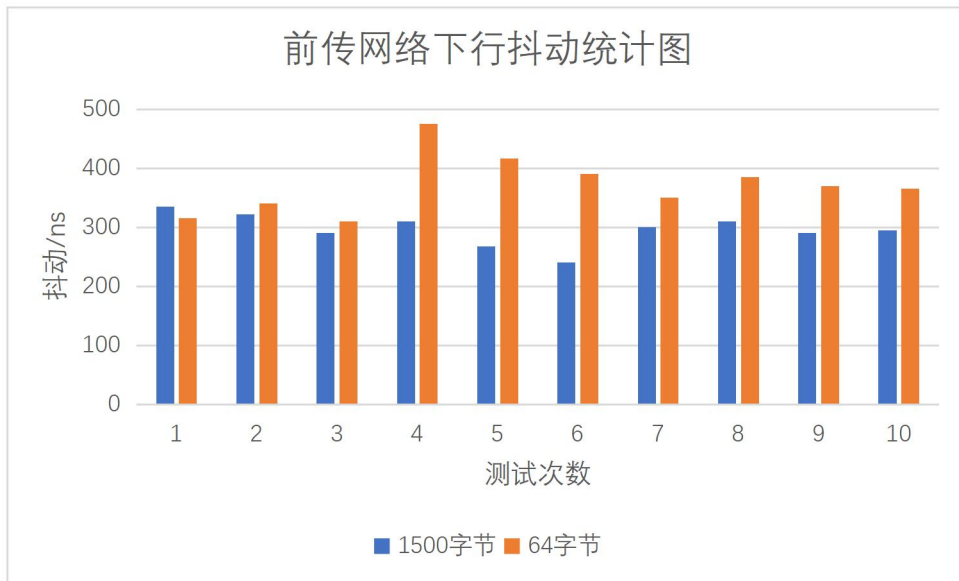


图 26 前传网络下行抖动测试统计结果图

2.3 前传时间同步性能测试

移动承载的前传网络需要精准时间同步以支撑 5G 系统业务的承载，时间敏感网络自身也需要时间同步来保证精确流量调度。因此时间同步的方案至关重要，其性能测试也是本次验证的一个重点内容，验证具备 TSN 特性的基于以太网的前传网络时间同步误差精度。

本部分测试通过专业时间同步测试仪表对于两台 TSN 交换机组网的前传承载网进行时间同步精度测量，TSN 前传时间同步性能测试拓扑如图 28，同步性能测试仪表主时钟端可获取被测设备发送的 PTP 协议报文，报文交互正常，符合预期组网的时间误差指标，需要注意的是，除了实际的时间误差测试指标，0.1Hz 滤波以后的时间误差指标也十分重要。这是因为根据 ITU-T G.8273.2 规定边界时钟从前一个时钟接收时间，并消除输入的高频噪声（即充当低通滤波器），并向下游继续发出时间信号。因此，就沿时钟链传递的噪

声量而言，低频噪声会沿时钟链累积。高频噪声被链中的每个时钟过滤掉。ITU-T G. 8273.2 时钟中的滤波器带宽定义为 0.05-0.1Hz。因此这里系统设定一个 0.1Hz 的一阶低通滤波器，以用来滤掉最后一次时钟信号发送时产生的高频噪声，来更精确的显示时钟在链路上传播积累的噪声量。

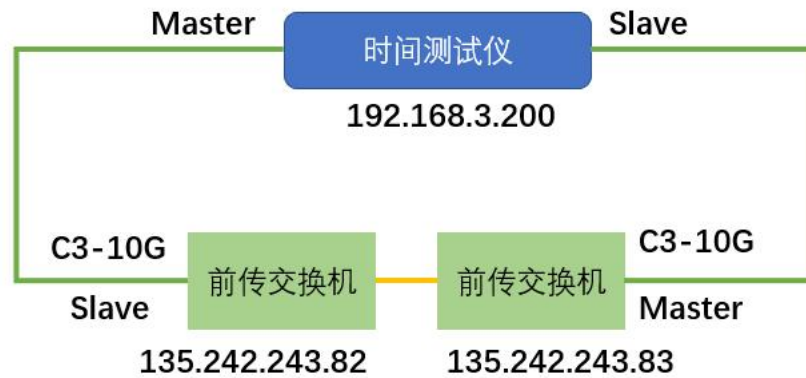


图 27 前传时钟同步性能测试拓扑

测试指标：2Way Time Error ($(t_1+t_4) / 2$ 时间误差)；T1 Time Error (t_1-t_2 时间误差)；T4 Time Error (t_4-t_3 时间误差)。

如表格 29 所示，本次测试使用 Paragon-X 仪表进行测试，仪表两端口与前传交换机相连，仪表一端口作为 Master，另一端口作为 Slave，与 Master 端口相连的前传交换机端口为 Slave，另一端口为 Master 传递时钟到 Slave 进行同步，仪表采用协议标准为 ITU-T G. 8275.1，测试模式为边界时钟，测试时长 6h，分别在 30min, 1h 以及 6h 采集数据，由统计表可以看出，前传交换机的时钟误差较稳定并且很低，只有 0.527ns，经过 0.1Hz 低通滤波后，时钟误差得到改善，为 0.193ns (通常时钟误差参考值取最大值) 经过时间推移，时钟误差变化不大，为 0.528ns，经过 0.1Hz 滤波后，时钟误差得到改善，为 0.192ns

表格 29 网络时钟误差性能测试结果（单位：ns）

测试时长	2Way Time Error			2Way Time Error (0.1Hz 低通滤波)		
	最大值	最小值	平均值	最大值	最小值	平均值
30min	0.527	0.508	0.519	0.2	0.051	0.15
60min	0.528	0.506	0.518	0.193	0.051	0.145
6h	0.528	0.506	0.518	0.192	0.051	0.145

2.4 小结

本部分测试主要以 TSN 交换机组网的前传网络能力作为测试对象，分别测试时网络性能数据（时延、抖动、吞吐量）及时间同步性能。通过对测试数据的分析可以看出两跳交换机组成的前传网络端到端单向时延小于 $2\ \mu\text{s}$ ，抖动低于 500ns ，时间同步精度可达 ns 级别，在实验室场景下可以证明，利用 TSN 交换机组网的前传网络关键性能不会成为 5G 系统的性能瓶颈。

3. 综合承载方案验证

3.1 测试目的

工业园区作为推进我国改革开放和经济发展的重要载体，一直被视为经济建设的主战场。工业企业数字化正在从园区的办公延伸到生产和运营，各类工业互联网新业态不断涌现。工业园区网络作为连接数字终端和远端的重要基础设施，在业务和技术的双轮驱动下，正在承担 OT 网络及 IT 网络融合，云网一体等多业务综合承载的重要角色。园区内 5G 前传网络的综合承载将以固移融合的方式兼顾 5G 接入业务承载的同时，实现视频监控，机器控制网络等原有工业园区有线业务的共网传输。而 TSN 技术应用于综合承载网络可以更

好地实现不同业务之间的差异化质量保证。因此我们设计了综合承载验证方案，对上述场景进行验证，为后续进一步部署提供数据支撑。

综合承载方案验证主要验证基于TSN的前传方案在部署于园区网络过程中，是否可以同时兼顾5G专网前传承载与园区网络承载。

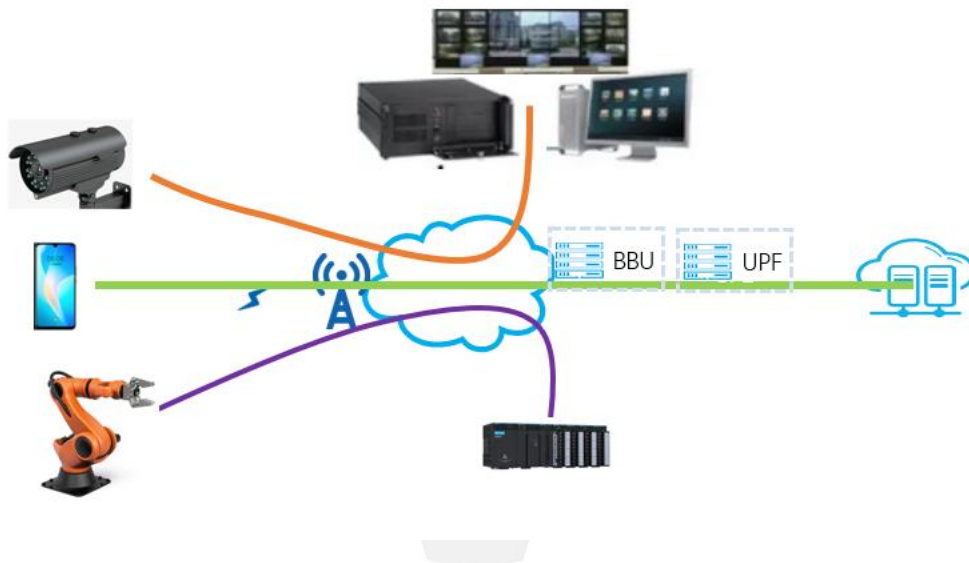


图 28 综合承载方案验证连接图

测试内容如表30所示，验证视频监控业务、工业控制业务两种典型工业园区业务的承载质量，分别代表大带宽实时上行流量以及高实时控制类下行流量，并同时测试多业务综合承载时的网络质量，以验证以太网用于园区网络及5G前传网络进行综合承载的可行性。

表格 30 综合承载方案验证测试内容

序号	测试内容	测试目的
3.1	视频监控业务承载测试	测试本方案视频监控业务承载质量
3.2	工业控制业务承载测试	测试本方案工业控制业务承载质量
3.3	多业务混合承载测试	测试本方案 5G 前传、视频监控、工业控制业务承载质量

3.2 视频监控业务承载测试

以视频监控为代表的辅助生产类业务，主要性能指标受带宽（高清8M/路）及时延影响（20-100ms）。本次测试选取实验室视频监控监控系统作为应用系统，摄像头与监控平台之间通过前传交换机设备承载，通过验证可以证实通过前传网络承载的高清视频监控业务流畅，画面清晰，与网线直连相比业务质量基本一致。



图 29 视频监控画面

3.3 工业控制业务承载测试

控制系统的同步信号通常用于电机的协同，往往对时间同步精度（亚 μs 级）、时延（百 μs 级）及抖动（ μs 级）有极高要求。本次测试将两台控制器中间的同步信号通过前传网络承载，通过观察控制对于灯带控制的同步性来验证传输质量，实验证明具备 TSN 能力的前传网络承载工业控制业务具备一定的可行性。



图 30 灯带控制展示图

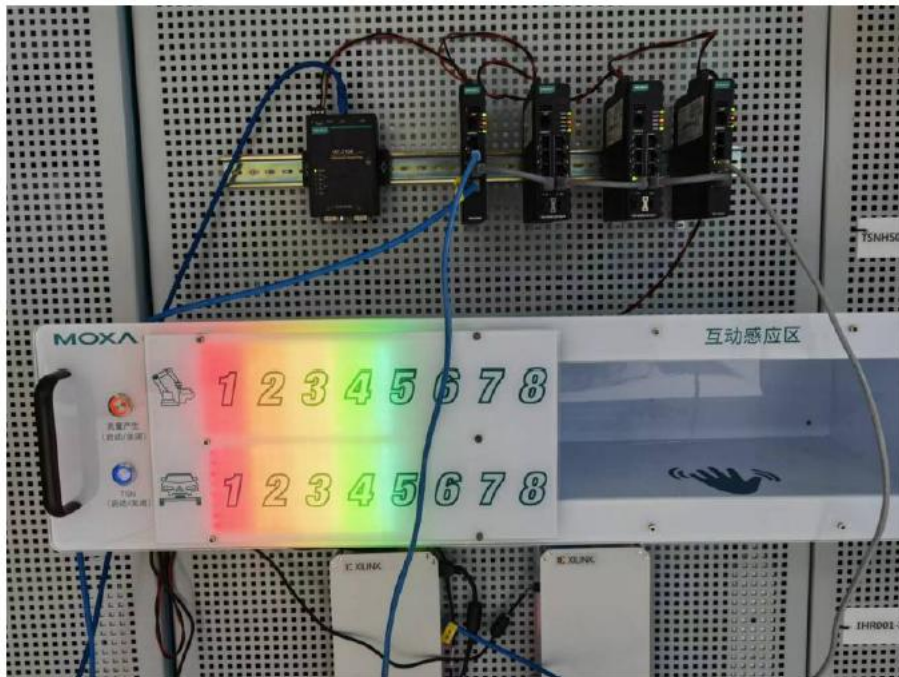


图 31 灯带控制系统实体图

3.4 多业务混合承载测试

在上述两个验证的基础上，我们还进行了多业务混合承载验证，即同时将视频监控、工业控制承载在具备TSN能力以太网

交换机组成的前传网络上，同时叠加5G语音业务，并通过测试仪表灌注背景流量，三个业务（视频监控、工业控制、5G语音业务）分别给予不同的优先级，但最低业务的优先级仍高于背景流量，不同业务在前传网络通过LAN配置不同的优先级，并启用相应的时间敏感网络特性，背景流量制造拥塞，验证在拥塞情况下，交换机采取丢弃背景流量的方式来保证主要优先级业务的进行。通过验证，在负载正常的情况下，视频监控、工业控制及5G语音业务均可以正常运转，逐步加大负载，则背景流量开始丢包，其他业务按照工业控制、5G语音及视频监控的优先级保证承载质量。

3.5 小结

本部分测试定性测量以TSN交换机组网的前传网络综合承载典型工业互联网业务的能力，分别对承载视频监控、工业控制的业务质量进行检测，并将上述两种业务与5G业务流量综合承载，并叠加背景流量冲击，在实验室环境验证TSN交换机组网的前传网络与园区固网业务综合承载的可行性。

附录 测试设备介绍

1. 5G 系统

本次测试5G业务质量对比测试中的5G系统中，核心网采用诺基亚云原生5GC部署（符合3GPP R16），将NFV化的5G核心网

网元AMF、SMF、UPF以及数据库UDM和UDR集成于诺基亚CBIS软件系统部署于通用服务器上；基站采用诺基亚AirScale系列3.5GHz基站，基带设备采用诺基亚贝尔ASIB+ABIO，射频设备为3.5G AEQB。诺基亚5G系统核心网与基站实体图片如下图所示：



图 32 核心网（NOKIA 云平台 5GC）

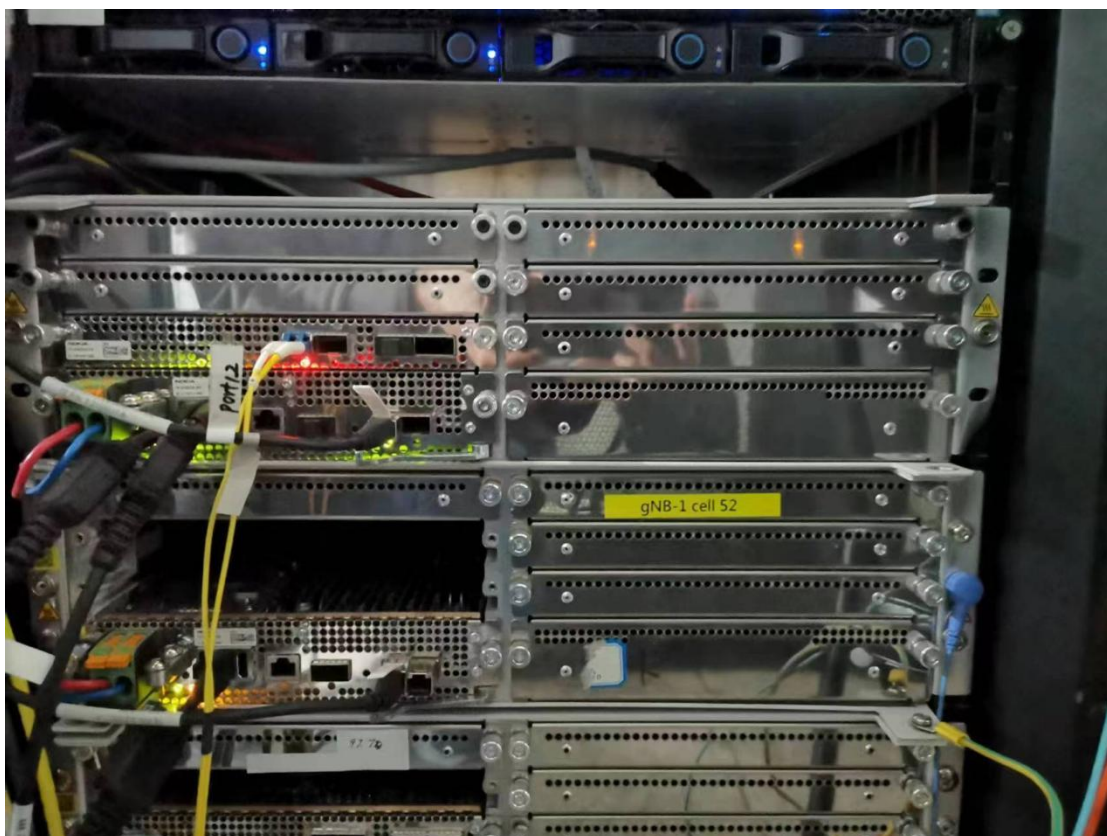


图 33 基站 (ASIB+ABIO)

2. 前传设备

本次测试前传以太网设备均采用诺基亚前传交换机1830 TPS-24，诺基亚1830 TPS系列平台可以支持各种现有和新的射频接口协议，同时支持4G和5G网络，其严格的流量优化可以满足5G云RAN所需要的各种连接性能需求。同时，高精度的时间同步功能提供了与5G射频精确的同步能力。利用时间敏感网络，移动运营商可以更好引入新的实时业务，更好面向云计算应用。1830 TPS的推出大大改善了用户部署5G中心化和云RAN的经济性。



图 34 NOKIA 1830 TPS-24 前传交换机

该款交换机具有二十四个 1/10/25GbE SFP/SFP+/SFP28 客户端口和六个 100GbE QSFP28 线路端口。在提供基站前传网络的同时，在同一个平台上支持多种业务流量类型（CPRI、OBSAI、eCPRI、RoE、以太网）的融合传输。

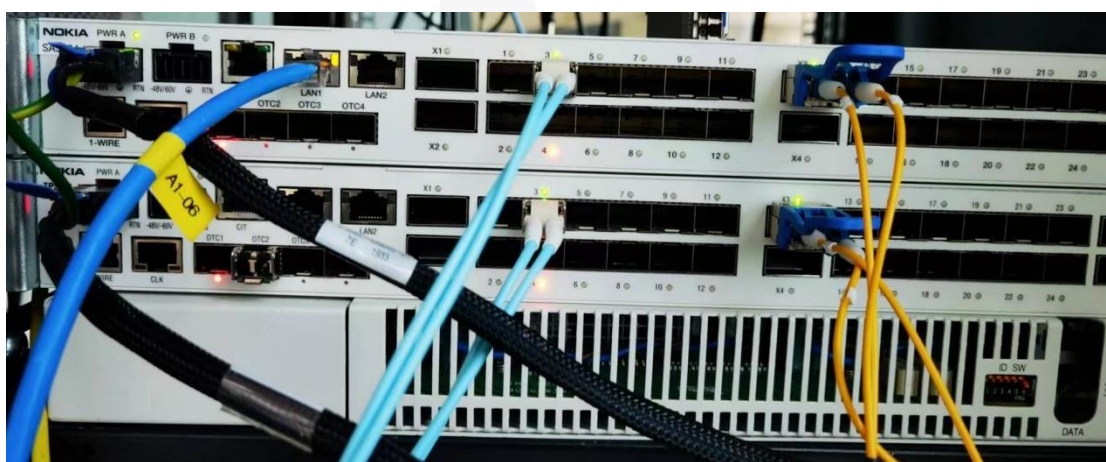


图 35 前传交换机 1830 TPS-24 的光纤连接

3. 仪表

3.1 业务 UE 仿真测试仪表

本次5G业务质量对比测试采用是德科技仪表UESIM：由协议处理服务器eLSU Mod. SL41 和 射频单元模块 SDRv4 组成，仪表UE-SIM的实体图片以及具体参数如下：



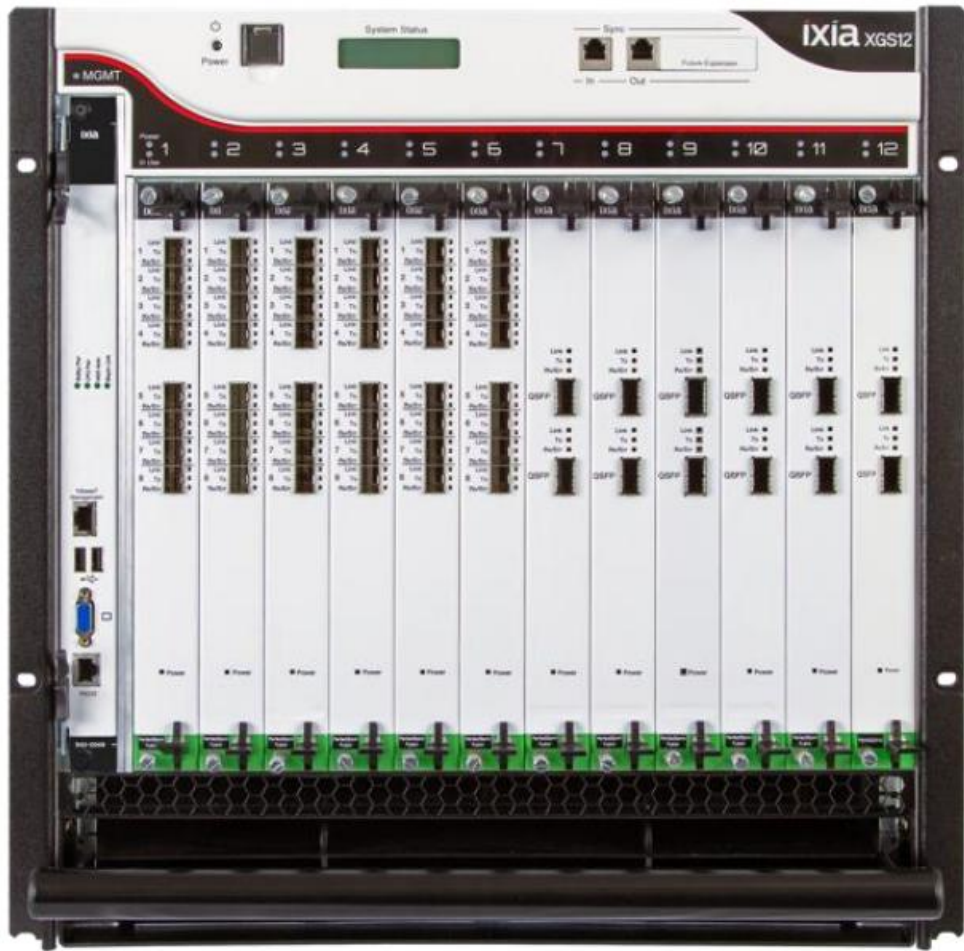
图 36 UE-SIM

Specifications	
3GPP release	Rel. 16
Technology Standards	LTE / 5G NR
5G topologies	Stand-Alone (SA) / Non-Stand-Alone (NSA)
Radio configurations	OTA / conducted
5G Radio access	
5G NR FR1	all sub 6GHz
5G NR FR2 bands	24 GHz / 26 GHz / 28 GHz / 39 GHz
5G NR operating BW	Up to 200 MHz (400MHz in roadmap)
Subcarrier Spacing (SCS)	15 / 30 / 60 / 120 / 240 KHz
NR transmission modes	TDD / FDD
SU-MIMO / MU-MIMO	Up to 4x4
Dual Connectivity Support	EN-DC / NR-DC (NE-DC in roadmap)
Mobility	NR Mobility / NR-LTE Mobility
Carrier Aggregation	Up to 8CC CA (3GPP Rel.16 configurations)
DL/UL Modulation	QPSK/16QAM/64QAM/256QAM
LTE Radio access	
Supported bands	all sub 6GHz
LTE transmission modes	TDD / FDD
MTC/IoT	Cat-M / NB-IoT
LTE operating BW	1.4MHz, 3MHz, 5MHz, 10MHz, 15MHz, 20MHz
MIMO	Up to 4x4
LTE UE categories supported	Up to cat19 (DL) and cat 20 (UL)
Carrier Aggregation	Up to 8CC CA (3GPP Rel.16 configurations)
DL/UL Modulation	QPSK/16QAM/64QAM/256QAM
Performances	
Max number of UE/cell	up to 3000 (5G NR) / 1500 (LTE)
Number of carriers	Scalable with the number of layers
Max total cell/sector throughput	Aligned with 3GPP R16 specifications
CAPS	Up to 400

图 37 UE-SIM 设备参数

3.2 前传网络仿真测试仪表

本次TSN前传仿真组网测试采用是德科技仪表：板卡型号为Novus QSFP28，机框型号为XGS12，仪表实体图片及具体参数如下：



工业互联网产业联盟
Alliance of Industrial Internet

图 38 是德仪表 XGS12

Slot / Number of Ports	<p>A 1-slot load module with:</p> <ul style="list-style-type: none"> • 8x100GE native QSFP28 ports • 16x50GE ports via fan-out media; requires 50GE speed option • 8x40GE ports via fan-out media; requires 40/10GE speed option • 32x25GE ports via fan-out media; requires 25GE speed option • 32x10GE ports via fan-out media; requires 40/10GE speed option <p>Note: NOVUS 100GE4Q28+FAN is an 8-port hardware load module with 4-ports enabled and all other specifications apply.</p>
Physical Interfaces	<p>8-ports of native QSFP28</p> <p>Note: NOVUS 100GE4Q28+FAN is an 8-port hardware load module with 4-ports enabled.</p>
Supported Port Speeds	<ul style="list-style-type: none"> • 100GE/port: 100GE-capable fiber and passive copper cable media • 2x50GE/port: 50GE-capable passive copper (DAC) for point-point and fan-out cables, and multimode fiber point-to-point AOC media • 40GE/port: 40GE-capable passive copper (DAC) for point-point and fan-out cables, and multimode fiber point-to-point AOC media, and PLR4 optical transceiver • 4x25GE/port: 25GE-capable fiber and passive copper point-point and fan-out cable media • 4x10GE/port: 10GE-capable fiber and passive copper point-point and fan-out cable media
Number of Users	Up to 8-users per load module
CPU and Memory	Multicore processor with 2GB of CPU memory per port for 100GE and 40GE, 1GB of RAM for each of the 2x50GE fan-outs, and shared across the 4x25GE and 4x10GE fan-outs

图 39 仪表具体参数

3.3 同步性能测试仪表

本次TSN前传同步性能测试采用Calnex旗下TSN时间测试仪：

Paragon-NE0, 实体图片以及具体参数如下：



图 40 Paragon-NEO

光接口（全部可选）	100M: SFP 1GbE: SFP 10GbE: SFP+ 1GbE: SFP 25GbE: SFP28 40GbE: QSFP+ 50GbE: QSFP28 100GbE: QSFP28 50GbE (PAM-4): SFP56 100GbE (PAM-4): SFP-DD 100GbE (DCO): CFP2 or QSFP-DD 200GbE (PAM-4): QSFP-56 400GbE (DCO): QSFP-DD 400GbE (PAM-4): QSFP-DD
电接口	1000/100 BASE-T: RJ45 2.5G/5G/10G: RJ45
外部参考时钟	将内部时序参考锁定到外部参考
内部参考时钟	外部参考输入：64 kHz、2.048 MHz、10 MHz、T1 BITS (1.544 Mb/s)、E1 (2.048 Mb/s) 温度范围内的频率稳定性——优于 $\pm 1 \times 10^{-9}$ 短期相位稳定性——优于 500ps Rb 选项 – 可配置（可选）
时钟参考输出接口	2个10 MHz/2.048 MHz 参考输出 (BNC)
相位测量	1pps – BNC
1pps+ToD 参考输入	1pps 输入 (BNC), 1pps+ToD 输入(RJ48)
1pps+ToD 参考输出	ToD 格式: CCSA, ITU-T, NMEA 1pps 输出 (BNC), 1pps+ToD 输出(RJ48) ToD 格式: CCSA, ITU-T, NMEA

Alliance of Industrial Internet

图 41 仪表具体参数

3.4 网络性能测试仪表

本次综合承载方案验证采用思博伦端到端性能测试仪表 SPT-C50用于背景流量的产生及端到端数据通信网络性能的测试，实体图片以及具体参数如下图所示：



图 42 SPT-C50

C50规格	
介质支持	依据模块速度模式的差别而提供不同的支持： <ul style="list-style-type: none"> • 100G: 100GBASE-SR4、100GBASE-CR4、100GBASE-LR4，以及更多的MSA PMD。 • 50G: 25/50G Consortium 50GBASE-CR2 • 40G: 40GBASE-SR4、40GBASE-CR4、40GBASE-LR4 • 25G: 802.3by 25GBASE-CR、25GBASE-CRS、25GBASE-SR • 10G: 10GBASE-SR、10G铜线DAC • QSFP28至SFP28分支电缆选项
网卡 (NIC) 间和系统间时间同步	同一机箱内的端口与内部时间源相位锁定。针对独立系统时可使用： <ul style="list-style-type: none"> • 授时链接同步，范围+/- 20纳秒。 • 通过GPS或CDMA网络实现同步。 • 使用NTP或PTP基于数据包的方法。
用户保留	按QSFP28端口
每个端口的发送/接收流数	<ul style="list-style-type: none"> • 统计数/流@100G; Tx=8K Rx=16K/4K (基本统计数/时延统计数) • 统计数/流@50G; Tx=8K Rx=8K/2K (基本统计数/时延统计数) • 统计数/流@40G; Tx=8K Rx=8K/2K (基本统计数/时延统计数) • 统计数/流@25G; Tx=8K Rx=4K/1K (基本统计数/时延统计数) • 统计数/流@10G; Tx=8K Rx=4K/1K (基本统计数/时延统计数)
每个流的RIT或列表VFD条目	每个流8个RIT插入和每个流4个VFD插入。
帧长度范围和控制	100%线速率时为58-16383字节，采用固定、递增、递减、随机、IMIX模式控制。
实时分析的单个流统计数据 — 发送和接收帧计数及速率	<ul style="list-style-type: none"> • 发送和接收第1层字节计数及速率 • FCS错误和速率 • 实时丢帧计数 • 纯100/50/40G下完整的高级序列统计数据 • 乱序错误 • 最小、最大和平均时延 (16383个流) • 先前、最大、总抖动
实时分析的单个端口统计数据 — 发送和接收帧计数及速率	<ul style="list-style-type: none"> • 发送和接收第1层字节计数及速率 • PRBS错误 • 乱序错误 • FCS错误和速率
线路时钟和包时间戳记 — 从内建硬件授时接口获得的发送线路时钟和包时间戳记	<ul style="list-style-type: none"> • Stratum-3差率震荡器是默认的时间源：可调范围为+/- 102PPM • 帧时戳分辨率为2.5纳秒。 • NTP和PTP支持。
捕获	每个端口8 MB
物理规格	3U (高) x 16.53英寸 (宽) x 19.75英寸 (深)，重量：32磅 (14千克)
环境要求	运行温度：5°至35°C，10%–90%相对湿度 (无结露)
电源	115-230伏，50/60 Hz，850瓦。
支持的应用	Spirent TestCenter图形用户界面和支持的API。

图 43 SPT-C50 具体参数