Wi-Fi多链路操作：时延与吞吐量的实验研究

Marc Carrascosa、Giovanni Geraci、*IEEE* 高级会员，Edward Knightly、*IEEE* 会士，以及 Boris Bellalta，*IEEE* 高级会员

arXiv:2305.02052v1 [cs.NI] 3 May 2023

摘要——**本文利用一个包含多个信道上 5 GHz频谱占用测量的大型数据集，研究多链路操作（MLO）框架在现实环境中的能力。该框架是 IEEE 802.11be 修订版引入的关键 MAC 层特性之一。结果表明，当两个可用链路都经常繁忙时（例如在超高密度和拥挤场景中），MLO 能够利用多个间歇出现的传输机会，因此相较于单链路操作（SLO）可实现最高的吞吐量增益。至于时延，如果两条链路的占用水平在统计上相同，MLO 的表现可比 SLO 高出一个数量级。相反，在非对称占用链路中，MLO 有时可能适得其反，甚至会增加时延。我们研究了这一略显意外的现象，发现其根源在于数据包在执行退避之前被次优地映射到某一条链路，而退避过程很可能会在较繁忙的链路上被中断。我们还使用云游戏应用生成的实时流量对研究结果进行交叉验证，并量化了 MLO 对时延敏感型应用的益处。**

索引词—**Wi-Fi 7、IEEE 802.11be、极高吞吐量（EHT）、多链路操作（MLO）、非授权频谱、无线局域网。**

I. 引言

在 Wi-Fi网络中实现稳定的低时延是一项挑战，随着对严格时延要求的新型应用不断涌现，这一问题日益受到关注，例如游戏、增强现实与虚拟现实、工业自动化以及远程医疗——其中一些应用要求响应时间低至 1 ms [2]。此外，在网络时延方面，Wi-Fi接入链路可能成为瓶颈，在与国内服务器建立的连接中，其往返时间占比超过 60 % [3]。事实上，在免许可频段运行意味着必须与其他无线网络共存，同时还存在固有的不确定性，即可用传输机会的数量及其出现时间均难以确定。缓解这种不确定性的一种方法是采用多个无线接口进行数据包传输。截至本文撰写时，这种方法被称为多链路操作（MLO），它……

M. Carrascosa-Zamacois、G. Geraci 和 B. Bellalta 任职于西班牙巴塞罗那 08018 的庞培法布拉大学（{marc.carrascosa、giovanni.geraci、boris.bellalta}@upf.edu）。E. Knightly 任职于美国得克萨斯州休斯敦 77005 的莱斯大学（knightly@rice.edu）。M. Carrascosa-Zamacois 和 B. Bellalta 获 WINDMAL PGC2018-099959-B-I00 和 WI-XR PID2021-123995NBI00（MCIU/AEI/FEDER,UE）资助。G. Geraci 获 RTI2018-101040-A-I00、PID2021-123999OB-I00 以及西班牙研究署颁发的“Ram´on y Cajal”研究员奖资助。本文介绍的部分材料曾在 IEEE ICC 2022 [1] 上发表。

IEEE 802.11be [4], [5]，的主要提议和开发功能之一。这项新修订预计将通过 Wi-Fi 7 [6]–[9] 认证。

A. 动机

借助多链路操作，IEEE 802.11be 将致力于在所有可用频段（即 2.4、5 和 6 GHz）实现高效操作，以支持负载均衡、多频段聚合以及同时进行下行/上行传输 [10]。在 802.11be 中，多链路设备被定义为具有多个关联接入点（AP）或站点（STA），并且为上述逻辑链路控制层提供单个 MAC 服务接入点的设备 [6]。因此，多链路设备可以同时发送和接收数据包、分离控制平面和数据平面，或通过多条链路传输对时延敏感的流量，以确保数据及时送达 [2], [11]。最后，尽管多链路操作对上层 TCP/IP 协议完全透明，但这些协议将受益于其所实现的更快速、更可靠的数据通信 [4]。

由于目前尚未就多链路操作的具体实现细节达成共识，近期研究比较了不同变体的性能 [12], [13]，，探讨了同时传输和接收的可行性 [14]，，并对多链路操作中的流量和资源分配进行了优化 [15]–[17]。除了提升吞吐量，降低时延也被视为多链路操作的主要目标之一，其时延性能已成为近期多项研究的对象 [16]–[21]。这些研究以及其他研究表明，在许多情况下，多链路操作能够支持传统单链路操作（SLO）无法可靠支持的新应用。

尽管这些研究提供了诸多见解，但目前文献中仍缺乏实验性证据，尚不清楚多链路操作相较于单链路操作能带来多大的性能提升、在哪些实际场景中能够实现，以及在何种信道接入方法下能够实现这一提升。为填补这一空白，我们首次利用频谱占用测量和真实应用跟踪记录，研究多链路操作的性能。

B. 贡献与结果总结

本文利用我们对整个 5 GHz频段 [22], [23][1] 进行的空中频谱占用测量，研究多链路操作在两个链路上运行时的吞吐量和时延性能。基于这些跟踪记录，其中包括

[1]可在开源 WACA数据集 中免费下载：https://github.com/sergiobarra/WACA_WiFiAnalyzer。

AP 密度高、环境拥挤且持续数小时的场景，我们开发了一种仿真工具，将 Wi-Fi MLO 状态机与高分辨率频谱测量相结合。首先，我们使用泊松流量驱动多链路操作状态机，然后通过云游戏应用生成的实时流量验证部分实验。除了传统的 Wi-Fi SLO，我们还研究了以下两种多链路操作信道接入模式：*(i)* 采用同时发送和接收（MLO-STR）的多链路操作，其中两个接口均可用且独立工作；以及 *(ii)*采用非同时收发（MLO-NSTR）的多链路操作，其中两个接口均可用，但只有在主链路也处于空闲状态时，才能接入次链路。虽然我们的结果证实了先前研究中观察到的多链路操作在时延方面的潜在增益，但使用真实频谱测量和真实流量轨迹，也为多链路操作带来了新的、以往无法获得的见解。

我们的主要研究发现可总结如下：

- 我们表明，配备两个无线接口的 MLO 接入点通过分别采用 MLO-STR 和 MLO-NSTR，在 53% 和 28.5% 的情况下，其吞吐量高于 SLO 的最大吞吐量。当两条链路几乎始终处于忙碌状态时（这可能对应于超密集和拥挤场景），MLO-STR 能够利用多条链路上间歇出现的传输机会，因此可实现最高的吞吐量增益。

- 我们发现，当主链路和次链路的占用率在统计上对称时，即使在占用率和流量不断增加这一具有挑战性的情况下，MLO-STR 的第95百分位时延也比 SLO 低一个数量级。这是因为 MLO-STR 可以利用任一可用链路，即使无法同时利用两条链路，也能减少分组等待时间。

- 相比之下，我们意外发现，当使用两条占用率不对称的链路时，MLO-STR 的第95百分位时延有时会比 SLO 高出 112%。这是因为数据包在执行退避之前被次优地分配到某个接口，而退避过程在更繁忙的链路上更容易被中断。信道占用率的不对称性越大，这一现象就越严重。

- 为克服上述现象，我们定义了第三种 MLO信道接入方式，称为 MLO-STR+。该方式为每个接口采用并行退避实例，并将数据包分配给退避最先结束的接口。虽然 MLO-STR+ 只是对 MLO-STR 的细微变体，但我们仍对其进行研究，以更好地了解多链路操作的设计空间及其最终能力。
- 除了使用真实世界的信道占用测量外，我们还使用云游戏应用生成的实时流量，进一步验证了研究结果。这组最终实验证实了先前的研究发现，并进一步展示了多链路操作支持时延敏感型应用的能力：这类应用的业务负载无法通过单链路操作及时传输。

- 我们通过信道绑定表明，将信道带宽（80 MHz）拆分到两个独立的 MLO 链路（2×40 MHz）比将全部带宽用于单条链路具有更低的时延。此外，我们还表明，使用更宽的链路可让我们在主信道选择上多一个自由度，而正确的选择可使 MLO-STR 的时延降低 89.5%+。

本文其余部分组织如下。第二节详细介绍实验设置，包括所用的数据集和方法。第三节基于链路占用率研究多链路操作可实现的吞吐量。第四节分析对称占用链路和非对称占用链路中的多链路操作时延。第五节介绍 MLO-STR+ ，将其作为改进 MLO-STR 操作中所观察到缺陷的一种方法。第六节使用真实流量轨迹，验证此前利用泊松流量得出的结果。第七节研究信道绑定与多链路操作结合使用的情况。第八节介绍相关工作，最后，第九节总结全文。

II. 多链路操作协议与实验设置

我们考虑这样一种场景：多个基本服务集（BSS）和站点（STA）接入 5 GHz频段上的多个信道。我们使用一个数据集，其中包含来自一座人流密集体育场的真实频谱信息。由于该数据集包含端点接收到的聚合信号强度，我们无法识别单个设备，因此将研究重点放在一对单接入点（AP）和站点（STA）上，它们各自配备两个支持多链路操作的接口，称为多链路基本服务集。我们不添加额外的模型驱动或仿真驱动竞争源，以确保所有研究发现仅依赖于真实跟踪记录。

多链路操作接口在 5 GHz频段上分别使用 20 MHz 宽的信道，即信道36（低 5 GHz）和信道100（高 5 GHz），我们分别将其称为 主链路和 次链路。在两个信道上，多链路基本服务集都会观测环境活动，即正交基本服务集（OBSS）产生的传输。图 1 分别以蓝色和红色展示了所考虑的多链路基本服务集和 OBSS。OBSS 的环境活动由 WACA数据集表征（第二节-B）。对于多链路基本服务集，我们仅考虑下行流量，即从接入点到站点的流量。我们最初假设数据包到达服从泊松过程，且已发送数据包的大小固定为 $L = 12000$ 位。在第六节中，我们改为考虑实时数据流量。由于我们没有客户端与接入点之间的 SNR 跟踪记录，任何 MCS 变化都只能由模型驱动。因此，我们在所有链路中均采用固定的 MCS（256-QAM，5/6）。

接下来，我们详细介绍所考虑的信道接入方案、基于测量的信道占用率模型，以及性能评估方法。

A. 多链路信道接入策略

我们研究了多链路基本服务集的三种信道接入策略，即：

- 传统单链路操作（SLO），此时只有主接口可用。

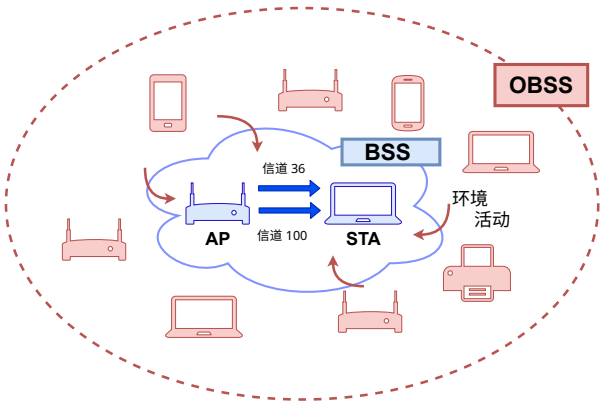


图 1：所考虑的场景。使用 WACA数据集描述目标 BSS（蓝色）在 5 GHz频段的信道 36 和 100 上观测到的环境活动（红色）。

- 采用同时发送和接收（MLO-STR）的多链路操作，此时两个接口均可用且独立工作。
- 采用非同时收发（MLO-NSTR）的多链路操作中，两个接口均可用，但次链路的接入取决于主链路的状态。

具体而言，这两种MLO信道接入方案的工作方式如下：

1) 采用同时发送和接收的多链路操作（*MLO- STR*）：两个无线接口独立且异步运行。缓冲区中第一个等待传输的数据包会被分配给最先可用的无线接口。如果两个无线接口都可用，则随机将数据包分配给其中一个。数据包分配到接口后，便通过初始化一个退避实例来启动信道接入流程。

2) 采用非同时收发的多链路操作（*MLO-NSTR*）：一个无线接口始终作为主接口，另一个始终作为辅接口。当有数据包等待传输时，主接口会竞争信道接入。退避计数器归零后，如果辅接口在退避到期前至少空闲了一个 PIFS（PCF 帧间间隔）间隔，则通过两个接口发送数据包。否则，仅通过主链路传输一个数据包。

图2展示了 SLO、MLO-STR 和 MLO-NSTR 的运行方式。SLO 遵循 Wi-Fi 默认接入方式，数据包依次通过单条链路传输：数据包1在时间线中最先传输，然后开始为数据包2执行退避，以此类推。对于 MLO-STR，到达的数据包会分配给最先空闲的接口。因此，数据包 #1、#2 和 #4 的时延显著降低。对于 MLO-NSTR，次链路对主链路的依赖有时会妨碍两个无线接口的高效利用。因此，与 MLO-STR 不同，数据包 #1 和 #4 的时延无法相较于 SLO 降低。

为了评估上述多链路操作方案，我们扩展了通过在 [23] 中开发的 IEEE 802.11状态机基础上添加功能，以准确再现有限流量负载下的系统时序动态（即非满缓冲区条件）。为隔离接入方案与信道占用率的综合影响，我们假设两个接口均采用固定的调制与编码方案——256-QAM、编码率为 5/6，且使用 2 条空间流——由此得到的传输时间为 0.172 ms（数据+SIFS+确认帧）。由于我们的 FCB-WACA 数据集（下文将介绍）包含以 10 μs 为周期采集的测量数据，因此我们将 IEEE 802.11时序的时长取整为 10 μs 的整数倍，并分别将退避空时隙、SIFS 和 DIFS 的时长设为 10 μs、10 μs 和 30 μs。这种微小的近似不会影响结论的普适性，详见 [23]。所有情况下使用的 CW_{min} 值均为 15。

B. 基于测量的信道占用数据集

为了研究真实世界环境下多链路基本服务集的性能，即考虑重叠基本服务集活动，我们采用了 *WACA*数据集，其中包含我们近期收集并公开提供的 5 GHz频段占用率空中测量数据 [22]，[23]。该数据集通过在不同日期和多个地点开展广泛的测量活动获得，其中包括一座座无虚席的足球场（巴塞罗那足球俱乐部诺坎普球场）。本文仅关注足球场测量结果，因为这些结果涵盖了从完全空闲到完全占用的信道。我们将这部分测量结果称为 *FCB-WACA*数据集。

FCB-WACA 数据集涵盖 5 小时，包含 5 GHz频段中 24 个 20 MHz 信道各自的 2000 个接收信号强度指示（RSSI）样本。[2] 每个样本持续一秒，由 1000 次连续 10 μs 测量组成，包含该区域内所有节点的聚合信号强度。图 3 显示了 FCB-WACA 数据集中的频谱占用，表示为每个一秒样本中的平均忙时隙数；若某个时隙的 RSSI 高于 -83.5 dBm，则视为忙时隙。从图 3 可以看出，在整个测量期间，信道占用率有所变化，表现为：(i) 足球比赛开始前信道大多空闲；(ii) 占用率逐渐上升，直至比赛开始，并在中场休息期间持续上升；(iii) 上半场和下半场的占用率较低；(iv) 从比赛结束起，占用率迅速下降。

尽管从宏观层面看，信道36和100的时间演变在图3中似乎相似，但同时观察两个信道的一秒采样并比较其平均占用率时，情况未必如此。为量化占用率差异，图4展示了两个信道占用率差值绝对值的分布。虽然在75%（分别为57%）的采样中，该差值低于10%（分别为20%），但占用率差异较大的情况也不容忽视。这促使我们评估多链路操作信道接入方案的性能。

[2]巴塞罗那足球俱乐部诺坎普球场的网络仅支持不进行信道绑定的 20 MHz 信道。

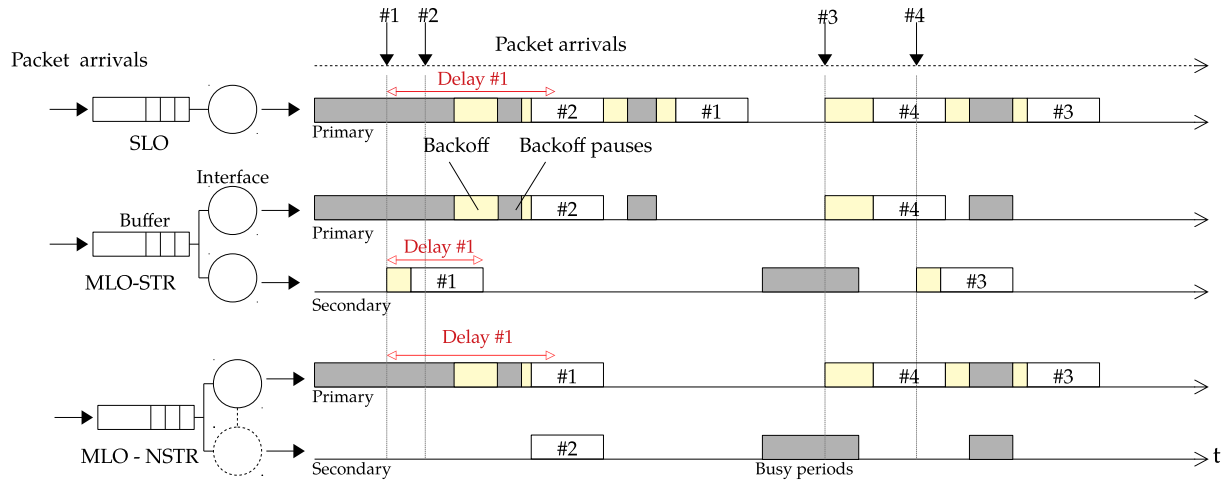


图 2：SLO、MLO-STR 和 MLO-NSTR 操作示意图。灰色、黄色和白色条分别表示占用信道、随机退避和数据包传输。数据包传输包括数据部分及其对应的确认帧（ACK），以及 DIFS 和 SIFS。

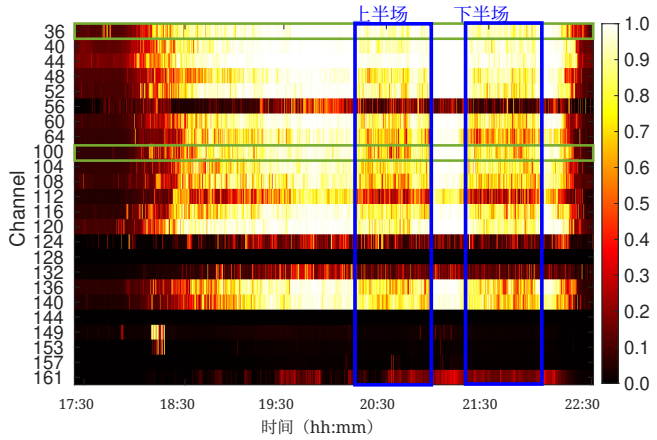


图 3：FCB-WACA 数据集中的平均信道占用率。我们实验中使用的信道36和100以水平方式突出显示。足球比赛上半场和下半场对应的时间区间以垂直方式突出显示。

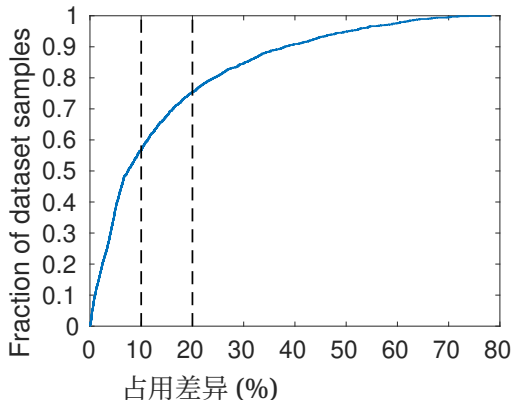


图 4：信道 36 和 100 之间占用率差值的分布。

正如本文其余部分所讨论的，在对称和非对称信道占用情况下。

在下文中，我们采用 FCB-WACA 数据集来研究主链路和辅链路信道占用率的不同组合如何影响多链路基本服务集的性能。具体而言，我们假设多链路基本服务集感知到的频谱活动与 FCB-WACA 数据集中捕获的频谱活动相同，并据此争用信道接入。为处理仿真节点与跟踪记录之间的交互，我们实现了与 [23] 中相同的“阻碍”交互模型。在阻碍模型下，一旦多链路基本服务集开始传输，我们假设重叠基本服务集设备能够感知正在进行的传输并相应地推迟传输，从而使多链路基本服务集的传输成功完成，避免发生碰撞。正如 [23]，所示，阻碍交互模型保持了与载波侦听多路访问相同的隐式信道接入

公平性。

C. 基于轨迹的仿真方法

图 5 展示了 Wi-Fi 状态机如何在其各个接口中使用 WACA 数据集。如前所述，我们严格依据 WACA 数据集中的占用率测量结果，确定 MLO-BSS 的信道接入动态。

为了研究信道占用对时延的影响，我们将两个信道视为相互独立，并将数据集中可用的跟踪记录划分为不同的平均信道占用率区间：{10%、20%、.....、90%}，如图 6 所示。

针对每种信道占用率和业务负载组合，我们进行20次实验，每次实验均使用一对时长为一秒的频谱样本。将信道36的样本分配给主多链路链路，将信道100的样本分配给次链路。

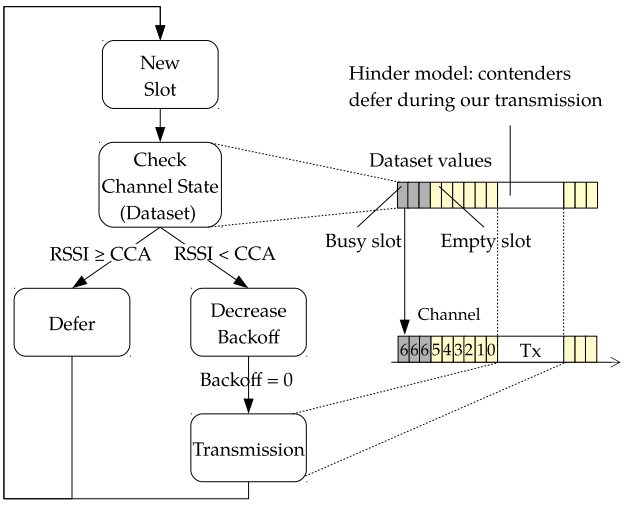


图 5：使用 WACA数据集确定信道状态的 Wi-Fi 状态机（每个接口）。

每次实验按如下步骤进行：*(i)* 我们为主链路和次链路选择感兴趣的占用状态，例如分别为10%和40%。*(ii)* 我们从数据集中为主链路和次链路各随机均匀地选取一个频谱样本。*(iii)* 对于每对频谱样本以及给定的目标业务负载，我们计算数据包到达接入点的时间。*(iv)* 我们针对 SLO、MLO-STR 和 MLO-NSTR 接入策略运行 Wi-Fi 状态机。所有情况下均采用相同的数据包到达时间，以便直接比较。*(v)*我们记录每次实验中各数据包经历的时延。

然后，我们将所有运行中逐数据包的结果（即各个数据包时延）合并，以得出平均时延和第95百分位时延。我们保证所有结果均在稳定条件下获得（即接入点不会出现积压），因此会舍弃接收的数据包少于已发送数据包总数 95% 的任何实验。

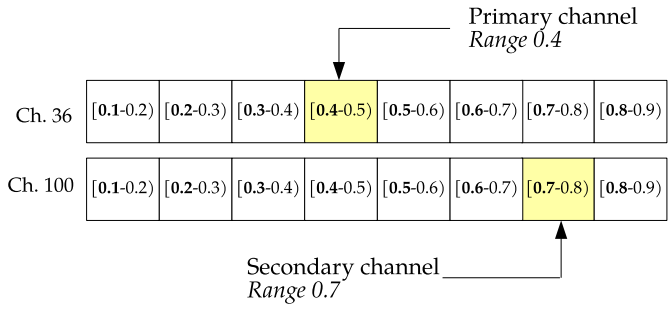
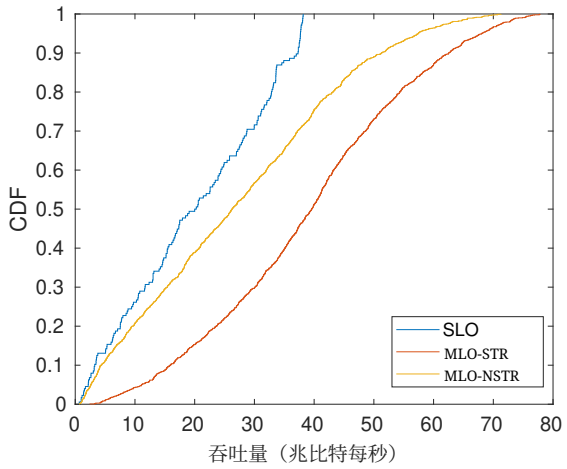


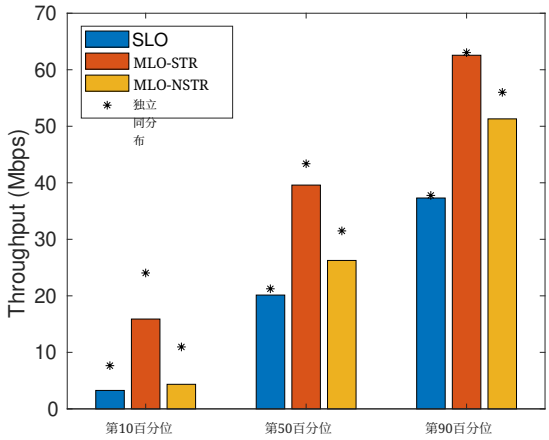
图6：将数据集中的可用跟踪记录划分为不同的平均信道占用率区间。

III. 吞吐量增益的来源

由于接入点配备了额外的无线接口，多链路操作相较于单链路操作能够保证提升 BSS 吞吐量。然而，多链路操作在实际中的有效性，包括诸如以下具有挑战性的场景：



(a) 三种信道接入模式下实现的吞吐量累积分布函数。



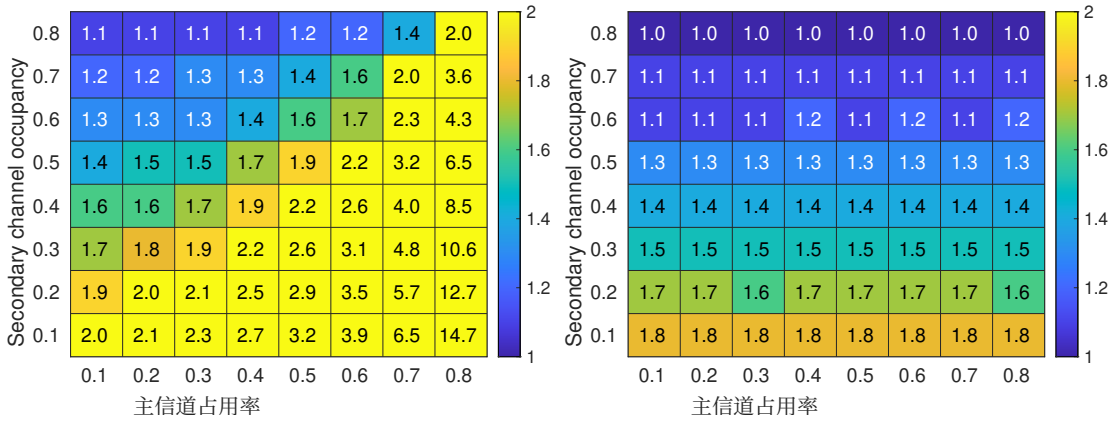
（b）使用基于跟踪记录的模拟器（柱形）测得的各信道接入方法在第10、第50和第90百分位的吞吐量。图中还显示了通过独立同分布模型（星形）进行分析所得的数值，以供比较。

图7：所考虑的三种信道接入模式各自的吞吐量统计数据。

在拥挤且快速变化的环境中，这与所用链路的瞬时占用模式有关。本节将通过分析各多链路操作策略相对于单链路操作基准所能实现的吞吐量增益，研究这一方面。为获得一般性认识，我们考虑两个可用链路在统计占用方面的所有可能组合，并研究后者如何影响可实现的增益。本节假设接入点始终有待发送的数据。

A. 吞吐量分布

MLO-STR 独立运行各接口，因此可以聚合不同链路的可用空中传输时间。然而，MLO-NSTR 会将其辅助接口与主链路同步。因此，可以预期，MLO-NSTR 需要活动模式相似的链路才能实现叠加容量。然而，活动



(a) MLO-STR 的吞吐量增益　　(b) MLO-NSTR 的吞吐量增益

图 8：相对于 SLO 归一化后的平均 MLO 吞吐量。颜色条的上限设为 2，以突出显示介于 1 和 2 之间的比率。

不同链路上的模式很可能完全独立，这取决于竞争者数量、其流量负载以及随机接入机制。

图 7a 展示了基于轨迹的仿真中，在所有信道占用率组合下，各种信道接入模式所实现吞吐量的经验累积分布函数。SLO 吞吐量随可用空中传输时间成比例增加，最低值为 0.672 兆比特每秒，对应最高占用率 0.8；最高值为 38.1 兆比特每秒，对应最低占用率 0.1。由于使用两条链路，MLO-STR 和 MLO-NSTR 的吞吐量分布有所不同，但二者的表现相似。MLO-STR 利用次链路独立于主链路进行传输，因此在整个经验累积分布范围内都比 SLO 吞吐量更高，在 1% 最差吞吐量方面展现出显著的 $5\times$ 增益。MLO-NSTR 在分布的低端表现与 SLO 相似，因为它难以在两条链路上找到同时传输机会；在高端则与 MLO-STR 相似，此时主链路的低占用率使其能够频繁地同时传输。

接下来，我们评估时间活动和信道统计依赖性对两种多链路操作策略所能达到的吞吐量的影响。为此，我们将原始跟踪记录得出的吞吐量值与简单基线模型给出的值进行比较。该基线模型假设各信道的时间活动相互独立同分布（i.i.d.），并根据数据匹配平均占用率ρ 。

在这种基线模型下，三种接入模式的平均吞吐量可近似表示如下：

- 单链路操作（SLO）的吞吐量为 $\text{Th}_{\text{SLO}} = (1-\rho_1)L/T$，其中 ρ_1 为主链路的占用率，L 为数据包大小（12,000 比特），T（0.277 毫秒）为数据包传输时间（0.172 毫秒）加上一个 DIFS，以及假设链路始终被侦测为空闲时的平均退避时长（$\text{DIFS}+\frac{\text{CW}_{\min}}{2}$ 10 μs+数据+SIFS+确认帧）。
- MLO-STR 吞吐量计算为 $\text{Th}_{\text{MLO-STR}} = (2-\rho_1-\rho_2)L/T$，其中 ρ_2 是次要链路的占用率。
- MLO-NSTR 吞吐量计算为 $\text{Th}_{\text{多链路操作-STR}} = (1-\rho_1)(2-\rho_2)L/T$，

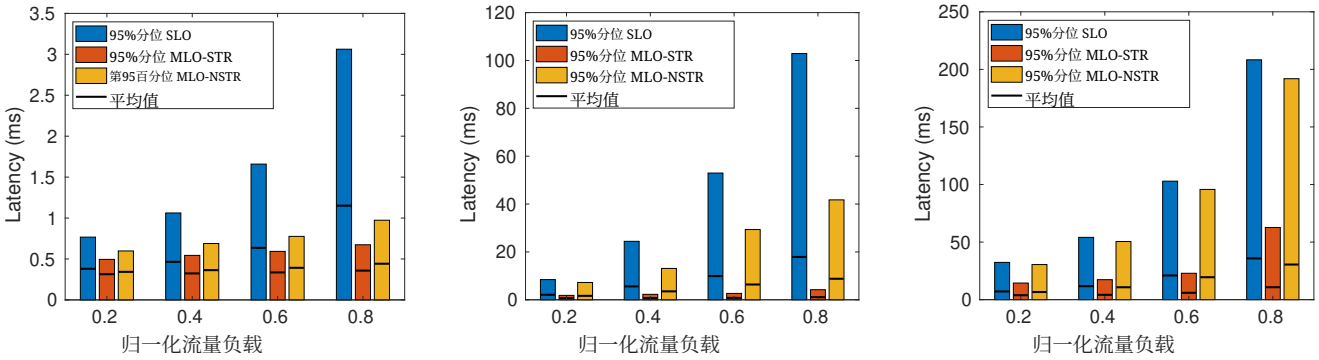
图 7b 展示了基于轨迹的仿真和独立同分布模型所实现的吞吐量，分别以第10百分位、第50百分位和第90百分位表示。对于第90百分位，基线模型与结果非常吻合；而对于第50百分位和第10百分位，模型预测的吞吐量更高。造成第50百分位和第10百分位差异的原因是，随着链路占用率升高，基于轨迹的仿真中频繁出现退避中断，而简单模型并未考虑这一因素。对于 MLO-NSTR，除了上述影响外，观察到的差异还表明，该模型对两条链路同时空闲的概率估计也过于乐观，因为它同样未能捕捉链路之间存在的时间相关性（尽管这种相关性较弱）。

研究发现： 虽然 MLO-STR 能够利用多条链路占用率相互独立这一特点，实现高于叠加容量的容量，但 MLO-NSTR 只有在两条链路几乎完全空闲时才能达到接近叠加容量的水平，因此不太适用于拥挤场景。

B. 吞吐量增益与频谱占用

与单链路操作相比，多链路操作的优势会受到频谱占用率的显著影响。重要的是，主链路和次链路的占用率对多链路操作状态机的影响截然不同，具体如第二节所述。鉴于上述情况，我们根据每个 1 秒样本中观测到的平均每链路占用率开展分组实验（如第二节-C 所述）。

图8以数值和热力图两种形式展示了两种 MLO 模式的吞吐量，并将其归一化为 SLO 所达到的吞吐量。首先，我们来看图8a中的 MLO-STR 机会式异步接入。在对角线上，两条链路的占用率几乎相同，与 SLO 相比，吞吐量增益接近两倍，这符合预期，因为两条链路是独立接入的。相反，当次链路的占用率低于主链路时（图8a右下方），MLO-STR 相较于 SLO 的吞吐量增益最高；当



(a) 两条链路的占用率均为 10% (b) 两条链路的占用率均为 40% (c) 两条链路的占用率均为 70%

图 9：对称占用链路的时延与归一化流量负载之间的关系。

主链路和次链路分别有 80% 和 10% 的时间处于忙碌状态时，增益最大，为 14.7 倍。虽然图中省略了绝对吞吐量数值，但在这一特定情况下，MLO-STR 的吞吐量为 40.5 兆比特每秒，而 SLO 仅为 2.76 兆比特每秒。

图8b展示了针对 MLO-NSTR 获得的结果。与 MLO-STR 相比，其增益大幅降低，最大值仅为 1.8，这是由于要求主链路必须处于空闲状态所致。从绝对吞吐量值来看，当主链路和次链路的占用率分别为 10% 和 80% 时，MLO-NSTR 的平均吞吐量达到 39 兆比特每秒。然而，如果主链路和次链路的占用率互换，该值便会骤降至仅 5 兆比特每秒。也就是说，即使能够利用空闲的次链路，繁忙的主链路仍会阻碍 MLO-NSTR 实现较高的吞吐量。

研究发现： MLO-STR 的独立链路接入能够克服某条链路的高占用率，并利用另一条较为空闲的辅助链路，因此相较于 SLO 可实现超过 $14\times$ 的吞吐量增益。相反，MLO-NSTR 的性能取决于主链路的占用率，因为只有在主链路也可用时，才能接入第二条链路。因此，其相较于 SLO 的吞吐量增益最多为两倍。

IV. 时延实验

多链路操作（MLO）的一个关键性能目标是改善时延性能，包括平均时延和尾部时延性能，例如时延分布的第 95 百分位数。鉴于上述吞吐量实验表明链路占用率至关重要，我们将研究分为两种情况。首先，我们假设所用的两条链路具有相近的占用率，并研究两条链路的占用率对称上升、传输机会减少时，MLO 的两种信道接入模式如何应对。随后，我们考虑次链路的统计占用率高于主链路的情况，并研究每种 MLO 模式如何适应次链路可用性降低。

A. 对称占用的链路

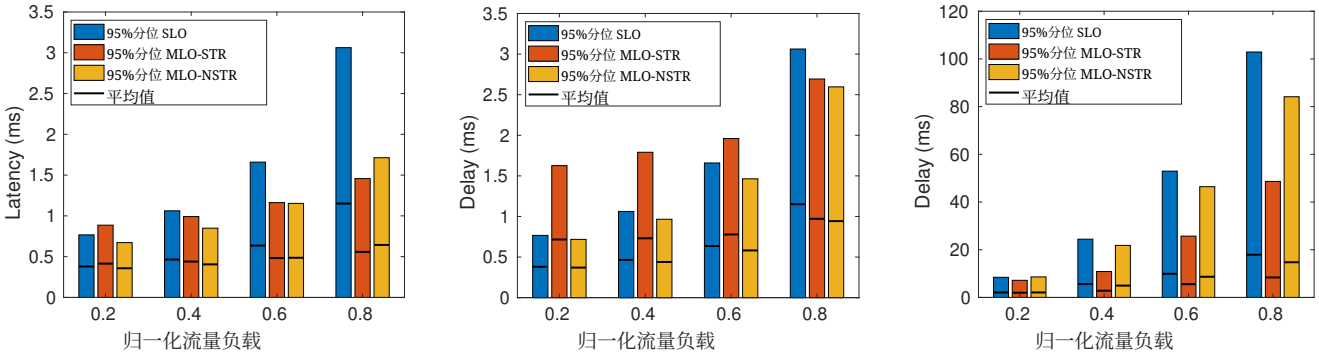
我们首先研究**对称**链路占用率的情况，在这种情况下，两个多链路操作（MLO）链路的信道具有相近的占用率水平。具体而言，我们研究两个链路均处于以下时段的情况。

链路占用率约为 10%、40% 和 70%，我们分别将其称为对称低、中和高占用率。对于单链路操作（SLO），单链路上流量完全积压时的平均吞吐量分别为 37 兆比特每秒、22 兆比特每秒和 6.8 兆比特每秒。对于多链路操作（MLO），我们研究在三种频谱占用情况下，随着业务负载增加时的时延性能。我们考虑四种业务负载：{0.2、0.4、0.6、0.8} 倍的 SLO 吞吐量，使所有接入模式都处于非饱和状态，从而能够在可比条件下研究其时延。

图 9 展示了所有信道接入模式在不同链路占用率下的平均时延和第95百分位时延。首先请注意，当两条链路的占用率均为 10% 时（图 9a），随着业务负载增加，与 SLO 相比，MLO 的时延变化趋势显著改善。例如，在 20% 的业务负载下，MLO-STR 和 MLO-NSTR 的平均时延分别比 SLO 低 17% 和 9%，降幅较为有限。相反，当业务负载为 80% 时，MLO-STR 和 MLO-NSTR 可将平均时延分别降低 69% 和 62%。分析时延的第 95 百分位数时，这种趋势更加明显，MLO 的时延降幅最高可达 78%。因此，无论是平均时延还是第95百分位时延，业务负载越高，MLO 的优势就越显著。事实上，在这种情况下，缓冲区中通常会有多个数据包，因此可以同时使用两个接口。此外，当链路占用率相对较低、为 10% 时，两条链路通常都可用。

接下来，考虑两个链路的介质占用率都对称（40%）的情况（图 9b），并注意纵轴刻度的变化。在这种情况下，随着流量增加，SLO 的平均值 时延增加了近一个数量级（即从 2 毫秒增至 18 毫秒），而第95百分位时延的增长速度则快得多，超过了 100 毫秒。相比之下，与 SLO 相比，MLO-STR 可将第95百分位时延显著降低一个数量级。原因在于，只要能够使用其中一个或两个链路，MLO-STR 就能降低时延，除非两个链路都处于占用状态。

遗憾的是，与 MLO-STR 不同，MLO-NSTR 相较于 SLO 的优势有限，而且主要体现在平均时延随业务负载的变化上。事实上，只有当主链路若主链路



(a) {10%，40%}占用率。 (b) {10%，70%}占用率。 (c) {40%，70%}占用率。

图 10：对 对称占用链路（标示为 {主链路、次链路}）的时延与归一化流量负载 .

也处于空闲状态，这意味着平均时延必定低于单链路操作下的平均时延。然而，第95百分位时延是由主链路长时间被占用引起的，因此次链路在此期间是否可用都无关紧要。因此，随着归一化流量负载增加，MLO-NSTR 下的第95百分位时延会迅速增长。

最后，当两条链路都具有较高（70%）的占用率时（图9c），随着业务负载增加，MLO-STR 的第95百分位时延扩展再次表现最佳，与 SLO 和 MLO-NSTR 相比均实现了显著降低。不过，在如此高的链路占用率下，即使是 MLO-STR 也难以在任一链路上找到传输机会，因此平均值和第95百分位时延都在增加。此外，与 SLO 相比，MLO-NSTR 在平均值和第95百分位时延方面都几乎没有带来任何收益。

研究发现：当两条链路具有对称的中高占用率时，与 SLO 相比，MLO-NSTR 无法显著降低第95百分位时延。其关键原因在于，只有当两条链路同时处于未占用状态时，MLO-NSTR 才能相比 SLO 获得收益，而在此情形下，这种情况发生的可能性会越来越低。幸运的是，即使在占用率和业务负载不断增加这一充满挑战的情况下，MLO-STR 仍能显著降低第95百分位时延（相比 SLO 和 MLO-NSTR 均如此）。这是因为，即使无法同时利用两条可用链路，MLO-STR 仍可减少数据包等待时间。

B. 非对称占用链路

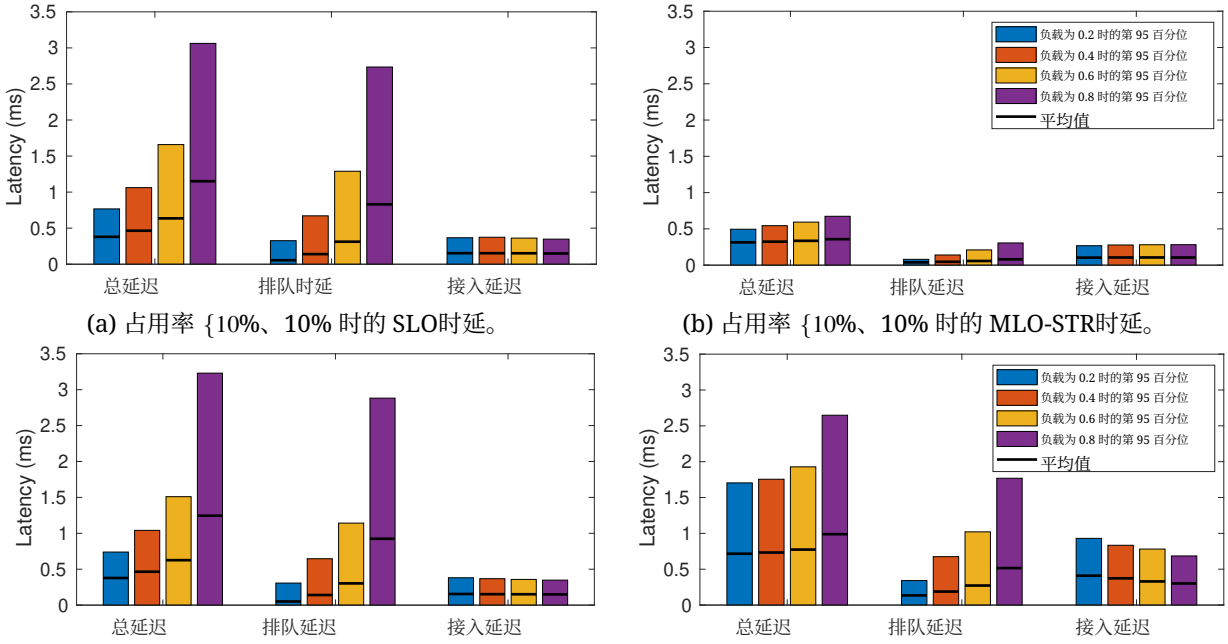
接下来，我们沿用上一节中的相同归一化流量负载，但考察链路占用率不对称的时段。在两条链路中，我们选取主链路占用率较低的情况，并评估各 MLO 模式能在多大程度上利用额外的一条（尽管更繁忙的）链路来降低时延。需要指出的是，相反的情况——即次链路的平均繁忙程度低于主链路——对两种 MLO 模式都有利，因为 SLO 总会产生较高时延，而两种 MLO 模式都能利用更空闲的次链路。

图 10a 展示了主链路占用率较低（10%）、次链路占用率中等（40%）的情况。正如预期，MLO-NSTR 的时延始终低于 SLO，且流量负载越高，优势越明显。然而，令人意外的是，在归一化流量负载为 0.2 时，MLO-STR 的平均时延和第95百分位时延均高于 SLO。事实上，MLO-STR 一旦检测到某条链路空闲，便会初始化退避计数器并开始竞争。不幸的是，退避定时器到期前，该链路可能已被占用，从而导致退避计数器暂停。如果退避频繁暂停（或每次暂停时间较长），数据包产生的时延可能反而高于选择另一条起初处于忙碌状态的链路时的时延。

在图 10b 中，由于次链路的占用率更高，这种影响进一步加剧：选择一条空闲的次链路，会带来退避计数器到期前该链路已被占用的风险。发生这种情况时，第95百分位时延可能达到 SLO 的两倍，不过仍低于 10 ms。尽管如此，随着业务负载增加，MLO-STR 的平均时延和第95百分位时延增长速度仍低于 SLO。事实上，MLO-STR 仍可利用次链路（即使其占用率很高）来减少拥塞、抑制时延；这种时延不仅由链路占用模式造成，也受流量大小影响。

最后，图 10c 展示了主链路和次链路的占用率分别为 40% 和 70% 的情形（注意，由于负载较高，纵轴刻度有所不同）。与图 9b 和图 9c 中的对称情形类似，随着业务负载的增加，MLO-STR 仍能保持良好的扩展性，使平均时延始终低于 SLO，并将第 95 百分位数降低最多一半。与图 10b 相比，由于主链路占用率提高，SLO 的时延随业务负载增加而更加急剧地上升，而 MLO-STR 则出于与对称情形相同的原因，实现了最低时延。

研究发现：主链路与次链路占用率不对称，会彻底改变多链路操作的性能。对于 MLO-STR，尽管它在对称占用链路中的性能始终更优，但如果次链路比主链路繁忙得多，时延甚至可能高于使用单链路操作（SLO）时的时延。这是因为数据包在执行退避之前被分配到接口的方式并非最优，而在更繁忙的链路上，退避过程很可能会被中断。当



(a) 占用率 {10%、10% 时的 SLO时延。

(b) 占用率 {10%、10% 时的 MLO-STR时延。

(c) 占用率为 {10%、70%}时的SLO延迟。

(d) 占用率为 {10%、70%}时的MLO-STR延迟。

图11：SLO和MLO-STR的接入与排队延迟。

链路占用率之间的差异越大，这种影响就越明显。

V. MLO-STR时延分解与降低

鉴于MLO-STR在对称占用链路下具有更优的吞吐性能和时延性能，我们进一步研究其在非对称链路下时延表现意外地差于SLO的原因。此外，我们展示了如何通过修改MLO-STR来克服这一局限。

A. 接入与排队延迟

为研究 MLO-STR 的时延性能，我们将总 MAC 时延分解为*(i)* 排队延迟，即数据包到达 AP 后到被分配至某个接口所经过的时间；以及*(ii)* 接入延迟，即数据包被分配至某个接口到开始传输之间的时间，也就是竞争时间。

图 11a 和 11b 对比了在使用对称占用率 为 10% 的链路时，SLO 和 MLO-STR 下的时延。对于所有流量负载，两种方案的接入延迟基本保持不变。但排队延迟并非如此：随着负载增加，MLO-STR 下的排队延迟仍然较低，而 SLO 下则迅速增长，甚至超过接入延迟。具体而言，SLO 下排队延迟的第 95 百分位数最高可达 9× 接入延迟；MLO-STR 则缩短了等待时间，从而降低了总延迟。

图 11c 和图 11d 将主链路占用率保持在 10%，但现在考虑辅助链路占用率为 70% 的不对称 情况。尽管 MLO-STR 利用两个接口降低了相对于 SLO 的排队延迟，但其接入时延高于 SLO，这是因为部分数据包通过次链路传输，而该链路的平均占用率更高。这一后者效应可能超过前者，从而导致 MLO-STR 下的总延迟高于 SLO。还可以观察到，随着业务负载增加，MLO-STR 的接入延迟会降低。这是数据包分配过程产生的副作用，原因如下：当一个数据包被分配到较繁忙但偶尔处于空闲状态的辅助接口时，后续多个数据包就会被迫通过主接口传输，因为这是唯一的选择。这就产生了一种固有的权衡：每分配一个数据包到较繁忙的接口，就会有多个其他数据包被分配到占用率较低的接口。随着业务负载增加，这种现象会更加明显，导致更多数据包被分配到占用率较低的主链路，从而降低平均接入延迟和第 95 百分位数接入延迟。

研究发现：与 SLO 相比，MLO-STR 显著缩短了数据包在队列中的等待时间，无论链路是对称占用还是非对称占用。然而，当两条链路对称占用时，两种方案的接入延迟相近；若次链路比主链路更繁忙，MLO-STR 的接入延迟可能增加，有时甚至抵消等待时间缩短所带来的收益。接入延迟较高的原因，是数据包在退避开始前就被分配至某个接口。事实上，数据包可能恰好在链路进入长时间占用阶段之前被分配至某个接口，导致退避计数器反复暂停，从而显著延迟数据包传输。

B. 采用延迟决策的*MLO-STR*

我们已经证明，在信道占用情况不同的链路场景下，MLO-STR可能导致比SLO更高的时延，并解释了其中的原因。为了更好地理解

MLO信道接入的设计空间，我们定义了一种细微变体——采用延迟决策的*MLO-STR*（MLO-STR+）——通过将使用哪条链路的决策推迟到退避倒计时结束时，克服了MLO-STR的这一局限。

MLO-STR+ 的主要特点包括*(i)* 在有数据包等待传输时，运行与无线接口数量相同的退避实例；以及*(ii)* 将第一个等待的数据包分配给退避计数器最先归零的接口。这与 MLO-STR 不同，后者在链路空闲时、运行退避之前分配数据包。实现 MLO-STR+ 只需对 Wi-Fi MLO 状态机进行少量修改：使其能够控制接口何时可以启动、暂停和完成退避倒计时，而无需实际为其分配数据包。图12展示了 MLO-STR 与 MLO-STR+ 操作的对比。可以看出，第一个数据包（在 MLO-STR 中时延最差的数据包）所经历的时延在 MLO-STR+中显著降低，但代价是第二个数据包的时延增加。

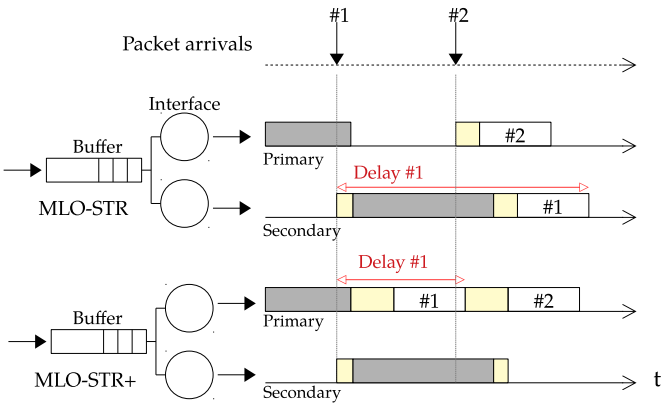


图12：MLO-STR 与 MLO-STR+的对比示意图。MLO-STR+ 降低了数据包 #1 的时延，但代价是数据包 #2 的时延增加。

图13展示了 MLO-STR+、MLO-STR 和 SLO 的平均时延和第 95 百分位时延结果。可以看出，对于所有流量负载和链路占用率组合，MLO-STR+ 在平均时延和第 95 百分位时延方面始终优于 MLO-STR 和 SLO。图14展示了 MLO-STR+的等待时延和接入延迟细分情况，表明 MLO-STR+ 降低了平均和最坏情况下的接入延迟，同时保持了与图11c中相近的排队时延。具体而言，与采用 MLO-STR 相比，采用 MLO-STR+可使接入延迟和总延迟的第 95 百分位数最多降低 60%。

研究发现： MLO-STR+通过延迟分配队首数据包的链路，直到某个退避计数器到期，从而利用最新的链路状态信息，最终改进链路分配决策，提升了MLO-STR。MLO-STR+ 的性能也表明，通过联合控制多个无线接口的运行，可以改进MLO信道接入。

C. 分组抖动

时延方差是下一代网络需要考虑的一项重要指标。我们已证明，多链路操作可用于降低网络时延，并预计它也能降低传输到达目标时的波动性。

我们通过研究时延的标准差，分析图10b和13b所示相同情形下的分组抖动。图15展示了各接入方法的抖动。除MLO-STR外，所有接入方法的抖动都会随着业务负载增加而增大；而MLO-STR的抖动则持续下降。MLO-STR出现这种情况的原因是，一些数据包通过次链路传输时会遭遇较高时延；在低业务负载下，这些时延与通过主链路传输的数据包所经历的低时延存在显著差异。当业务负载为0.8时，SLO的时延仅在这一点上高于MLO-STR（见图13b），但MLO-STR的抖动仍是SLO的两倍。MLO-STR时延的这种高波动性进一步凸显了其在将数据包分配到接口方面的局限，以及将数据包分配到繁忙次链路所带来的负面影响。与时延情况类似，MLO-STR+能够通过将使用哪条链路的决策推迟到退避倒计时结束时，避开这种情况。

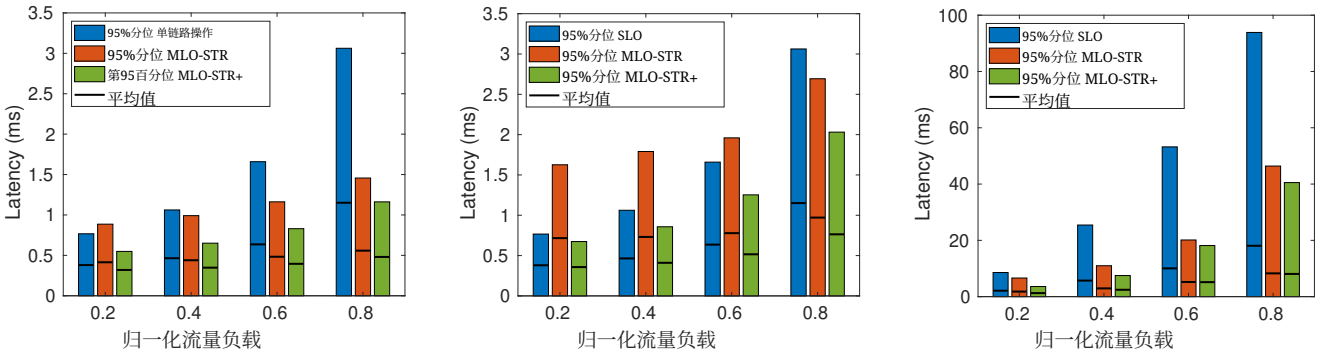
研究发现：由于盲目地将数据包分配到占用率较高的链路上，MLO-STR 的时延波动很大；在最坏情况下，其抖动比其他任何方法都高出一个数量级。MLO-STR+和 MLO-NSTR 的抖动均低于 SLO，因此运行更加稳定。

VI. 使用真实流量进行时延实验

迄今为止所介绍的实验使用了空口信道跟踪记录，并结合由泊松过程生成的人工流量；该流量的数据包大小固定，速率可变。

在此，我们使用实际应用流量跟踪记录，以综合考量真实流量和真实信道。具体而言，我们采用 Google Stadia [24], 这一对时延敏感的云游戏应用。它将电子游戏从 Google 的服务器直接传输到用户的浏览器；我们利用该应用生成数据包大小和到达时间。我们选取一名玩家，并收集对应两种不同屏幕分辨率（即 720p 和 1080p）的跟踪记录，得到的平均流量负载分别为 10.4 兆比特每秒和 22.1 兆比特每秒。我们沿用此前的实验方法，根据从采集到的 Google Stadia 跟踪记录中提取的数值生成流量（数据包到达时间和大小）。泊松流量与 Google Stadia 流量的主要区别在于，后者的数据包按照视频帧率，每 1/60 秒成批到达一次，从而形成短暂的拥塞时段。关于 Stadia 流量特性的更多详情见 [24]–[26]，相关研究也曾像本文一样使用这些特性生成流量。

图 16a 展示了与图 9b 相同场景下的时延性能，即链路占用率对称且为 40% 的场景。为便于比较图 16a 和图 9b，我们指出，图 9b 中 0.6 和 0.8 的归一化流量负载，分别最接近 Stadia 的 720p



(a) 链路占用率为 {10%，40%}。 (b) 链路占用率为 {10%，70%}。 (c) 链路占用率为 {40%，70%}。

图 13：作为的时延 SLO、MLO-STR 和 MLO-STR+ 下对称链路与可变归一化流量负载的对比 .

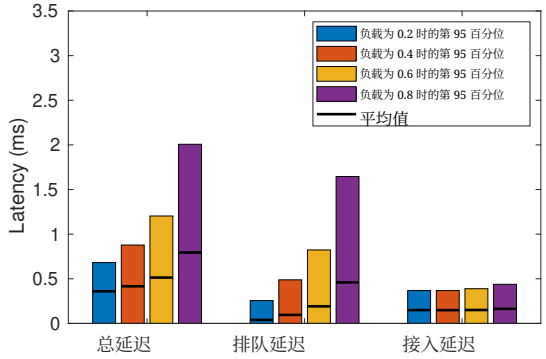


图 14：MLO-STR+在 {10%、70%} 占用率下的时延。

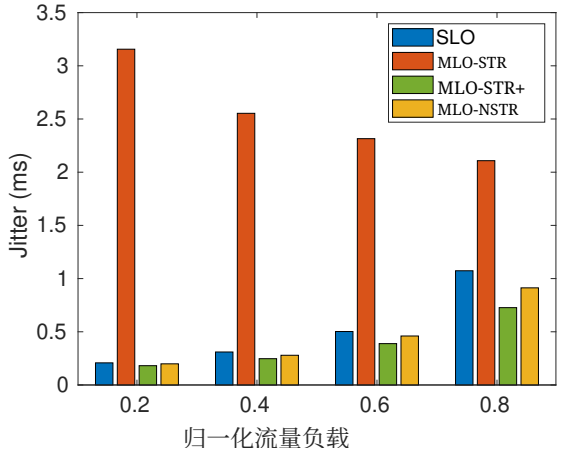


图 15： {10%、70%} 占用率下的分组抖动。

和 1080p 分辨率对应的业务负载。对于 720p 视频，与单链路操作相比，多链路操作-STR 将第95百分位时延降低了惊人的一个数量级，并将其控制在 10 ms 以内。多链路操作-NSTR 的时延也始终低于单链路操作，但性能明显逊于多链路操作-STR。1080p 分辨率只能通过多链路操作支持，而多链路操作-STR 仍能确保时延低于 10 ms。泊松流量下也得到了类似结果，证实了多链路操作-STR 降低时延的能力，尤其是在无论流量特征如何，两个链路均被对称地占用。

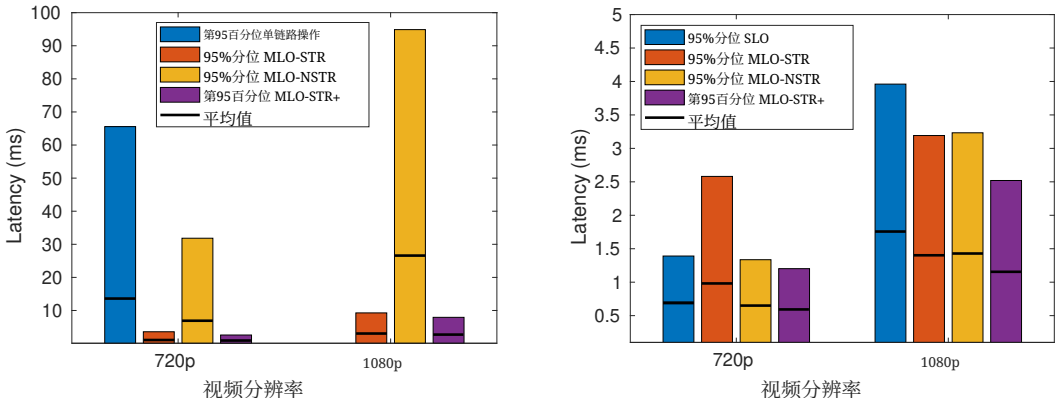
图16b展示了图10b和图13b所研究的非对称场景下的时延性能，即主链路和次链路占用率分别为10%和70%的场景。使用Stadia在720p分辨率下的流量所获得的实验结果，与采用泊松流量时呈现出相似的定性趋势。事实上，与SLO相比，MLO-STR使时延增加了85.5%，其性能下降程度甚至超过了泊松流量场景下观察到的68.6%的时延增幅。

研究发现： 使用真实应用跟踪记录并结合真实信道占用跟踪记录进行的实验，证实了我们最初在泊松流量下得出的主要发现，即：*(i)*多链路操作相比单链路操作可显著降低时延，并可能使一些新应用成为可能，因为这些应用的业务负载无法通过其他方式及时传输；*(ii)* MLO-STR 可能会将数据包次优地分配给比主链路更繁忙的辅助接口，偶尔导致时延甚至高于单链路操作；对于 MLO-STR，由于数据包成批到达，在所考察的真实世界流量条件下，这种影响可能进一步加剧；以及*(iii)* 通过延迟决定将数据包分配到哪个接口，MLO-STR+ 在所有考察场景中都能实现最低时延。

VII. 信道绑定

在前几节中，多链路操作使用的带宽是单链路操作的两倍，这无疑是性能提升的原因之一。本节中，我们使用信道绑定，使单链路操作和多链路操作使用的频谱带宽相同，以便更好地研究多链路操作相较于使用单个宽链路、在多个窄链路上竞争所带来的性能提升。

通过前导码打孔的信道绑定，可以使用多个不连续的 20 MHz 信道。每条链路使用一个 80 MHz 信道，其中包含四个 20 MHz 信道。在这些信道中，一个被指定为主链路，并在该信道上执行退避，其余所有信道均被视为辅信道。在退避计时结束之前，系统会检查所有辅信道，并使用所有可用信道进行传输（例如，如果有三个 20 MHz 信道处于空闲状态，则传输将在 60 MHz 带宽上进行）。相同的信道绑定实现方式与



(a) 主链路 40% 和次链路 40% 占用率　　(b) 主链路 10% 和次要链路 70% 的占用率

图 16：使用 Google Stadia 流量时，时延与视频分辨率的关系：（a）对称链路占用率；（b）非对称链路占用率。

考虑了 [23] 中使用的前导码打孔，并支持根据 IEEE802.11be [7] 的定义为单个用户分配多个资源单元。

我们采用之前使用的相同信道 36 和 100，分别作为每条链路的主信道，并将后续信道作为辅信道。对于 SLO，我们使用 40 MHz 链路（信道 36 和 40）以及 80 MHz 链路（信道 36、40、44 和 48）；对于 MLO，我们分别使用 20 MHz 链路（信道 36 和 100）和 40 MHz 链路（信道 36–40 和 100–104）。我们使用与前面各节相同的业务负载。

A. SLO 与 MLO 使用相同带宽

此前，我们为 MLO 使用了两条 20 MHz 链路，从而使其带宽达到 SLO 链路的两倍。本节研究 SLO 是否仅通过将其信道带宽加倍，就能获得与 MLO 类似的增益；这样，两种方案使用相同的频谱量。

我们仅关注非对称链路场景，所采用的条件与前几节相同。为生成更宽的链路，我们考虑来自同一数据集样本的相邻信道，该样本此前已用于实验，以保持这些信道之间现有的时间相关性。

图 17 展示了不同链路带宽下，随着业务负载增加，平均时延和第 95 百分位数时延的变化情况。正如预期，仅使用 20 MHz 的链路带宽会导致所有方案的时延最高。随后，将链路带宽增加至 40 MHz，可使 SLO 的时延最多降低 25 %，而 MLO-STR+ 的时延最多降低 17.8%。将 40 MHz 下 SLO 的性能与使用两条各为 20 MHz 链路的 MLO-STR+ 进行比较，可以发现 MLO-STR+ 仍然优于 SLO。对于 80 MHz 的 SLO 和使用两条各为 40 MHz 链路的 MLO-STR+，也能观察到相同的现象。此外，从图 17a 和图 17c 可以看出，当使用 20 MHz 链路时，MLO-STR+ 的时延低于使用 80 MHz 信道的 SLO，即当两条链路的占用率差异不太大时，MLO-STR+ 仅使用 SLO 总带宽一半的带宽，就能提升 SLO 的性能。否则，如图 17b 所示，在 10%-70% 的情况下，这一结论并不成立，因为次链路过于繁忙，需要使用相同的带宽，即两条各为 40 MHz 的链路，才能超越 SLO。

研究发现：使用更高带宽的链路可以降低 SLO 和 MLO 的时延。然而，使用两条带宽较低且各自具有独立退避机制的链路，仍然比使用一条带宽较高的链路取得更好的结果。这表明，MLO-STR+ 主要通过运行多个退避计数器而非单个退避计数器来实现其性能优势。

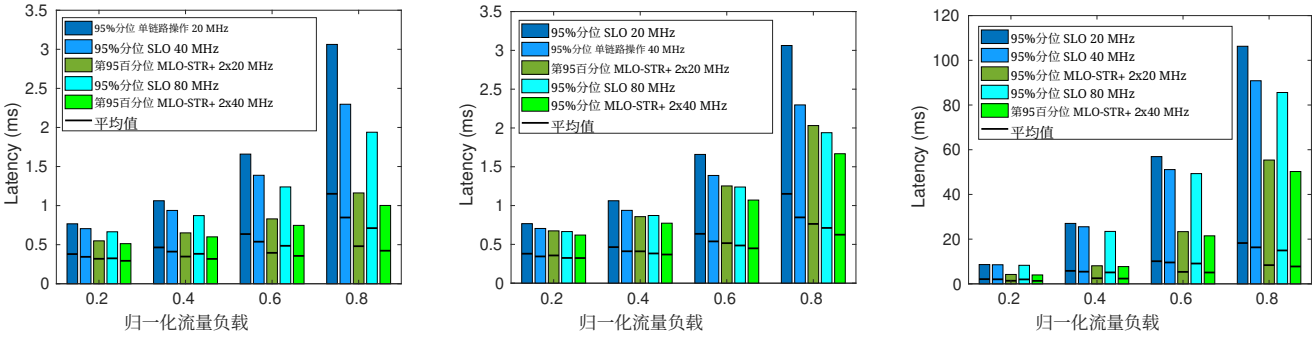
B. 主信道选择

信道绑定性能可能因所使用的主信道而异 [23]。通过允许 SLO 使用比 MLO 更宽的信道来保持相同的总带宽，SLO 有更多机会找到更空闲的主信道，从而实现比 MLO 更低的时延。

我们采用与上一节相同的设置，考虑 40 MHz 和 80 MHz 链路，但现在每条链路都可以在每个频谱样本中自由选择占用程度较低的 20 MHz 信道作为其主信道。

图18显示了在将每条链路占用率较低的信道选为主信道时，不同信道宽度对应的时延。将结果与图17c（其中每条链路的主信道固定）进行比较，可以发现时延显著降低。对于单链路操作，与主信道固定的情况相比，40 MHz 和 80 MHz 下的时延分别降低了3.8倍和6.1倍。类似地，对于多链路操作，40 MHz 链路的时延降低了9.5 倍。总体而言，在图18中，通过允许动态主信道选择，单链路操作和 MLO-STR+ 的时延都显著降低。尤其值得注意的是，单链路操作在40 MHz下的时延低于 MLO-STR2x20 MHz。其原因在于，单链路操作能够利用信道40的存在，而信道40的占用率低于信道36。

研究发现：信道绑定和多链路操作都需要仔细选择所使用的信道。动态选择主信道可使单链路操作（80 MHz）和 MLO-STR+ （2x40 MHz）的时延分别降低最高 6.1× 和 9.5× 。值得注意的是，在某些情况下，当额外提供的主信道选择选项使其能够找到比 MLO-STR+所使用的信道空闲得多的信道时，单链路操作的性能可能优于 MLO- STR+ 。此外，仅考虑 MLO 时，允许动态选择最佳主信道，在



(a) 链路占用率为 {10%，40%}　(b) {10%、70%}负载下的链路占用率　(c) {40%、70%}负载下的链路占用率

图 17：不同信道带宽下，非对称链路在可变归一化流量负载下的时延。

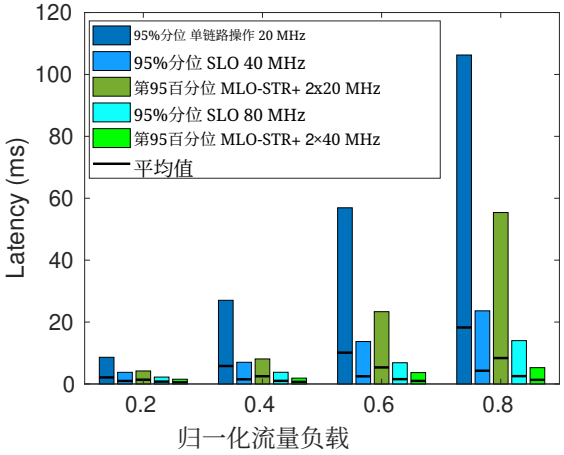


图 18：采用动态主信道选择时，{40%、70%} 占用率下的时延

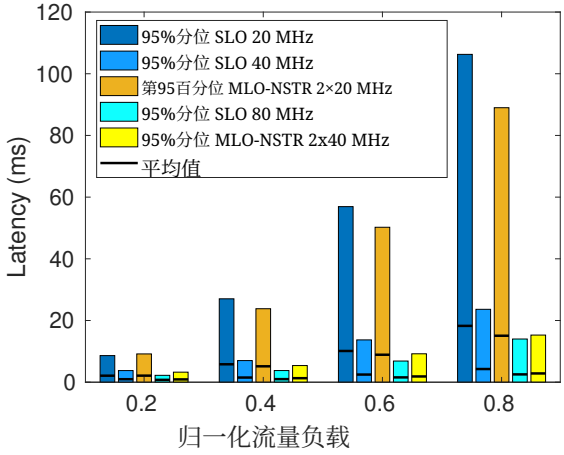


图 19：占用率为 {40%、70%} 时采用动态主信道选择的时延

每条链路都能进一步放大通过在多个独立链路上竞争所获得的时延改善效果，与静态选择相比，时延降低幅度接近一个数量级。

C. 信道绑定与 *MLO-NSTR*

现在我们将重点研究 MLO-NSTR，并在与前一节 MLO-STR+ 相同的条件下，使用带主信道选择的信道绑定研究其性能。由于 MLO-NSTR 的行为与信道绑定非常相似（二者都采用主次层级），因此，如果所使用的带宽相同，我们预计 NSTR 与 SLO 的行为也会相似。

图 19 展示了为每条链路选择占用率最低的主链路 20 MHz 信道时，MLO-NSTR 的时延。与图 18 中的 MLO-STR+ 类似，MLO-NSTR 能从信道绑定中获益良多；从 20 MHz 链路切换到 40 MHz 链路时，其时延最多可降低至原来的五分之一。8×然而，带宽为 80 MHz 的单链路操作（SLO）时延低于 MLO-NSTR 下两条 40 MHz 链路的时延，而 MLO-STR+ 的表现仍优于 SLO。原因在于，带宽为 80 MHz 的 SLO 使用了 4 个占用率为 40% 的信道，而 MLO-NSTR 的次链路使用了占用率为 70% 的信道，这限制了 MLO-NSTR 可同时传输的次数以及所使用的总有效带宽。

研究发现： 主链路采用单个退避计数器，导致 MLO-NSTR 无法利用两条链路上的并行传输，因此在最佳情况下只能达到与单链路操作相似的时延降低效果。

VIII. 相关工作

多无线电：多无线电或链路的使用已针对多种技术和协议开展研究。研究人员探讨了单个设备与 LTE、Wi-Fi 等多种其他技术进行 5G多连接，以提高容量并满足超高可靠性约束 [27]–[29]。 [30], 研究了链路同质性的重要性，结果表明，若链路的时延差异过大，与单链路通信相比便无法获得收益。多路径TCP也被视为一种让 TCP 能够通过 Wi-Fi、3G 和 LTE 的多个连接进行通信的方式 [31]–[34]。 [35],提出了一种支持不同网络间多连接的多路径框架，研究还表明，链路时延存在差异时，比特率会下降。 [36], 介绍了一种适用于 QUIC 的多路径实现，并讨论了

异构链路的影响，以及增加高时延次级路径如何导致性能变差。

仅针对 Wi-Fi 部署研究多无线电的使用，也旨在通过协作链路提升可靠性 [20] 并降低时延 [21] 。将一个无线电专用于数据交换，同时由另一个无线电处理管理帧 [37]–[39]，也可以缩短切换时延。此类研究的成果为当前 Wi-Fi 标准化工作奠定了基础，以支持 IEEE 802.11be 中的多无线电和多链路操作。

多链路操作：多链路操作——作为 IEEE 802.11be 的关键特性——已经受到 Wi-Fi 社区的广泛关注。文献 [14], 研究了同时传输与接收模式在不同跨链路干扰程度下的可行性，评估了链路之间所需的最小频谱间隔，并表明 100 MHz 足以确保正常的数据包接收，从而验证了我们工作中考虑的信道之间 200 MHz 的间隔。文献 [18], 展示了多链路传输对实时应用最坏情况时延的影响，结果表明，仅使用两条链路，在某些情况下就能使第90百分位时延降低一个数量级，这与我们的结果一致。文献 [19], 还研究了工业场景和时延受限场景中的 STR，结果表明，增加一条次链路可使平均时延减半，并使最坏情况时延几乎减半。

共存与流量区分： [40] 和 [41]研究了SLO与MLO设备之间的相互作用及其对时延的影响。 [42], [43]也研究了NSTR与传统设备的共存。 [44] 研究了多个STR节点之间的相互作用。 [12], [13], [45], 研究了多链路操作的不同实现方式，分析了每种方式对无线局域网吞吐量的影响；后者发现，与SLO相比，STR和NSTR的吞吐量分别提升了200%和80%。这一结果与我们的研究发现一致：MLO-STR在对称占用率下，以及主链路占用率为10%时的MLO-NSTR。最后， [15],探讨了使用多条链路的流量分配策略，而 [16]和 [46]则介绍了针对MLO NSTR设备对增强型分布式信道接入的调整。 [17], 也讨论了实时应用流量，并提出了适用于MLO的不同频率资源分配方案。

性能分析：大多数引用文献通过仿真研究了多链路操作的性能，不过也有一些研究推导了新的解析模型来研究多链路操作的性能。除 [26] 着重分析有限负载条件下的时延外，其他所有论文 [12], [13], [45]–[47]均关注饱和（满缓冲区）吞吐量条件下的多链路操作效率。

据我们所知，本文是首项使用真实频谱占用测量研究多链路操作性能的工作。尽管我们的结果证实了当前最先进研究中观察到的多链路操作潜在时延增益，但使用真实频谱测量能够为多链路操作性能提供以往无法获得的全新且独特的洞见。

IX. 结论

据我们所知，本文是首篇针对 MLO 吞吐量和时延的实验研究。我们使用了一个包含 5 GHz 频谱中真实信道占用率测量结果的数据集，研究了两种 MLO 信道接入模式（MLO-STR 和 MLO-NSTR）的吞吐量和时延性能。

我们证明了，MLO 能够支持一些新型的时延敏感型应用，而这些应用的业务负载无法通过 SLO 及时传输。我们展示了，当两条链路的占用程度相近时，两种 MLO 模式均可将第 95 百分位数时延降低近一个数量级。相比之下，当链路呈非对称占用状态时，我们意外地发现，MLO-STR 这种吞吐性能更优的模式，有时反而会产生高于 SLO 的最差时延。为克服这一局限性，我们提出了一种针对 MLO-STR 的 延迟决策增强方案。我们基于一种真实的时延敏感型游戏应用的业务流量研究了性能，从而将真实信道实验与真实应用实验结合起来。最后，我们展示了在采用信道绑定时，MLO 所带来的性能提升还能够进一步扩大。

本工作的一个重要拓展方向，是尝试通过解析方法而非仿真来刻画各种多链路操作模式的行为，从而能够进行更具普适性的比较，并提高结果的可重复性。关于后者的首次尝试，请参阅 [26]；有关 MLO 标准化进程的最新综述，请参阅[44], [45]。随着 Wi-Fi 7 标准确立且多链路操作投入运行，预计超越 802.11be 的技术将在新的频段 [48]运行，和/或通过先进的接入点协调 [6]提升旧频段的空间复用。展望未来，Wi-Fi 8 [49]中引入的任何新功能都应以多链路操作为基础构思，并研究其与后者结合时的性能。

参考文献

[1] M. Carrascosa、G. Geraci、E. Knightly 和 B. Bellalta，《IEEE 802.11 be 多链路操作时延实验研究》，载于*IEEE ICC 2022- IEEE* 国际通信会议。IEEE，2022 年，第 2507–2512 页。[2] T. Adame、M. Carrascosa-Zamacois 和 B. Bellalta，《IEEE 802.11 be 中的时间敏感网络：迈向低时延 WiFi 7》，发表于*Sensors*，第 21 卷，第 15 期，第 4954 页，2021 年。[3] C. Pei、Y. Zhao、G. Chen、R. Tang、Y. Meng、M. Ma、K. Ling 和 D. Pei，《在实际环境中，WiFi 可能是往返网络时延中最薄弱的一环》，载于*IEEE INFOCOM 2016-The 35th Annual IEEE* 国际计算机通信会议。IEEE，2016 年，第 1–9 页。[4]《IEEE P802.11be/D1.0 信息技术标准草案——系统间电信和信息交换：局域网和城域网——具体要求。第 11 部分：无线局域网媒体访问控制（MAC）和物理层（PHY）规范。第 8 号修正案：超高吞吐量（EHT）增强》，2021 年 5 月。[5] A. L´opez-Ravent´os 和 B. Bellalta，《IEEE 802.11 be 无线局域网中的多链路操作》，发表于*IEEE Wireless Communications*，2022 年。[6] A. Garcia-Rodriguez、D. Lopez-Perez、L. Galati-Giordano 和 G. Geraci，《IEEE 802.11 be：Wi-Fi 7 强势回归》，发表于*IEEE Commu- nications Magazine*，第 59 卷，第 4 期，第 102–108 页，2021 年。[7] E. Khorov、I. Levitsky 和 I. F. Akyildiz，《IEEE 802.11 be（未来 Wi-Fi 7）的现状与发展方向》，发表于*IEEE Access*，第 8 卷，第 88 664–88 688 页，2020 年。

[8] R. P. F. Hoefel, 《IEEE 802.11 be：面向下一代 Wi-Fi 网络的吞吐量与可靠性增强》，载于《2020 IEEE 第 31 届个人、室内和移动无线电通信年度国际研讨会》。IEEE，2020 年，第 1–7 页。[9] M. Yang 和 B. Li, 《超高吞吐量（EHT）无线局域网综述与展望——IEEE 802.11 be》，发表于《移动网络与应用》，第 25 卷，第 5 期，第 1765–1780 页，2020 年。[10] D. L´opez-P´erez、A. Garcia-Rodriguez、L. Galati-Giordano、M. Kasslin 和 K. Doppler, 《IEEE 802.11 be 超高吞吐量：超越 802.11 ax 的下一代 Wi-Fi 技术》，发表于《IEEE 通信杂志》，第 57 卷，第 9 期，第 113–119 页，2019 年。[11] C. Deng、X. Fang、X. Han、X. Wang、L. Yan、R. He、Y. Long 和 Y. Guo, 《IEEE 802.11 be Wi-Fi 7：新挑战与新机遇》，发表于《IEEE 通信调查与教程》，第 22 卷，第 4 期，第 2136–2166 页，2020 年。[12] T. Song 和 T. Kim, 《IEEE 802.11 be 超高吞吐量无线局域网中同步多无线电多链路 MAC 协议的性能分析》，发表于《应用科学》，第 11 卷，第 1 期，第 317 页，2021 年。[13] M. Yang、B. Li、Z. Yan 和 Y. Yan, 《面向下一代无线局域网的接入点协调与全双工多频段操作：IEEE 802.11 be（EHT）》，载于《2019 年第 11 届无线通信与信号处理国际会议（WCSP）》。IEEE，2019 年，第 1–7 页。[14] I. Levitsky、Y. Okatev 和 E. Khorov, 《IEEE 802.11 be 网络中多条链路同时发送与接收的研究》，载于《2020 年工程与电信国际会议（En&T）》。IEEE，2020 年，第 1–4 页。[15] ´A. L´opez-Ravent´os 和 B. Bellalta, 《IEEE 802.11 be 多链路操作：最佳方案可能是仅使用单个接口》，载于《2021 年第 19 届地中海通信与计算机网络会议（MedComNet）》。IEEE，2021 年，第 1–7 页。[16] H. Park 和 C. You, 《多链路操作对大规模实时应用的时延影响》，载于《2021 年 IEEE 第 10 区研讨会（TENSYMP）》。IEEE，2021 年，第 1–5 页。[17] D. Bankov、A. Lyakhov、E. Khorov 和 K. Chemrov, 《采用多链路接入方法支持无线网络中的实时应用》，发表于《通信技术与电子学杂志》，第 66 卷，第 12 期，第 1476–1484 页，2021 年。[18] G. Naik、D. Ogbe 和 J.-M. J. Park, 《Wi-Fi 7 能否支持实时应用？多链路聚合对时延的影响》，载于《ICC 2021-IEEE 国际通信会议》。IEEE，2021 年，第 1–6 页。[19] G. Lacalle、I. Val、O. Seijo、M. Mendicute、D. Cavalcanti 和 J. Perez-Ramirez, 《通过 802.11 多链路操作提升时延与可靠性的分析》，载于《2021 年 IEEE 第 19 届工业信息学国际会议（INDIN）》。IEEE，2021 年，第 1–7 页。[20] N. Schwarzenberg、A. Wolf、N. Franchi 和 G. Fettweis, 《量化无线局域网中多连接的增益》，载于《2018 年欧洲网络与通信会议（EuCNC）》。IEEE，2018 年，第 16–20 页。[21] Y. Kondo、Y. Hiroyuki 和 H. Yokoyama, 《面向多链路无线局域网的低时延传输控制》，载于《2020 年第 29 届计算机通信与网络国际会议（ICCCN）》。IEEE，2020 年，第 1–6 页。[22] S. Barrachina-Mu˜noz、B. Bellalta 和 E. Knightly, 《Wi-Fi 全信道分析仪》，载于《第 14 届无线网络测试平台、实验评估与特性分析国际研讨会论文集》，2020 年，第 72–79 页。[23] S. Barrachina-Mu˜noz、B. Bellalta 和 E. W. Knightly, 《Wi-Fi 信道绑定：一种全信道系统及其从城市热点到满座体育场的实验研究》，发表于《IEEE/ACM 网络汇刊》，第 29 卷，第 5 期，第 2101–2114 页，2021 年。[24] M. Carrascosa 和 B. Bellalta, 《云游戏：Google Stadia 流量分析》，发表于《计算机通信》，第 188 卷，第 99–116 页，2022 年。[25] B. Bellalta, 《面向时延敏感型流媒体业务的尽力而为链路低时延区域》，发表于《IEEE 通信快报》，第 25 卷，第 3 期，第 970–974 页，2020 年。[26] B. Bellalta、M. Carrascosa、L. Galati-Giordano 和 G. Geraci, 《有限负载下 IEEE 802.11be 多链路操作的时延分析》，发表于《IEEE无线通信快报》，2023 年。[27] R. Odarchenko、R. Aguiar、B. Altman 和 Y. Sulema, 《面向 5G 网络内容交付的多链路方法》，载于《2018 年信息通信问题：科学与技术国际科学实践会议（PIC S&T）》。IEEE，2018 年，第 140–144 页。[28] S. Chandrashekar、A. Maeder、C. Sartori、T. H¨ohne、B. Vejlgaard 和 D. Chandramouli, 《5G 多 RAT 多连接架构》，载于《2016 年 IEEE 国际通信会议研讨会（ICC）》。IEEE

, 2016, 第 180–186 页。

[29] N. Himayat、S.-p. Yeh、A. Y. Panah、S. Talwar、M. Gerasimenko、S. Andreev 和 Y. Koucheryavy，“多无线电异构网络：架构与性能”，载于2014年国际计算、网络与通信会议（ICNC）。IEEE，2014年，第252–258页。[30] M.-T. Suer、C. Thein、H. Tchouankem 和 L. Wolf，“链路异构性和链路相关性对可靠低时延通信的多连接调度方案的影响”，载于2020年IEEE国际通信会议研讨会（ICC Workshops）。IEEE，2020年，第1–6页。[31] S. Deng、R. Netravali、A. Sivaraman 和 H. Balakrishnan，“Wi-Fi、LTE，还是两者兼用？多宿主无线互联网性能测量”，载于2014年互联网测量会议论文集，2014年，第181–194页。[32] K. Nguyen、Y. Ji 和 S. Yamada，“一种提升Wi-Fi性能的跨层方法”，载于2014年国际无线通信与移动计算会议（IWCMC）。IEEE，2014年，第458–463页。[33] C. Paasch、G. Detal、F. Duchene、C. Raiciu 和 O. Bonaventure，“利用多路径TCP探索移动网络/Wi-Fi切换”，载于2012年ACM SIGCOMM蜂窝网络研讨会：运营、挑战与未来设计论文集，2012年，第31–36页。[34] S. R. Pokhrel 和 M. Mandjes，“提升Wi-Fi和蜂窝网络上的多路径TCP性能：一种分析方法”，IEEE移动计算汇刊，第18卷，第11期，第2562–2576页，2018年。[35] M. Amend、E. Bogenfeld、M. Cvjetkovic、V. Rakocevic、M. Pieska、A. Kassler 和 A. Brunstrom，“一种利用多路径DCCP为不可靠互联网流量提供多接入支持的框架”，载于2019年第44届IEEE局域计算机网络会议（LCN）。IEEE，2019年，第316–323页。[36] T. Viernickel、A. Froemmgen、A. Rizk、B. Koldehofe 和 R. Steinmetz，“多路径QUIC：一种可部署的多路径传输协议”，载于2018年IEEE国际通信会议（ICC）。IEEE，2018年，第1–7页。[37] S. Jin 和 S. Choi，“IEEE 802.11无线局域网中采用多无线电的无缝切换”，IEEE车辆技术汇刊，第63卷，第3期，第1408–1418页，2013年。[38] K. Ramachandran、S. Rangarajan 和 J. C. Lin，“802.11无线网络中的先建后断MAC层切换”，载于2006年IEEE国际通信会议，第10卷。IEEE，2006年，第4818–4823页。[39] V. Brik、A. Mishra 和 S. Banerjee，“利用多无线电消除802.11无线局域网中的切换时延：应用、经验与评估”，载于第5届ACM SIGCOMM互联网测量会议论文集，2005年，第27–27页。[40] M. Carrascosa-Zamacois、L. Galati-Giordano、A. Jonsson、G. Geraci 和 B. Bellalta，“IEEE 802.11be多链路操作的性能与共存评估”，载于2023年IEEE无线通信与网络会议论文集，2023年，第1–6页。[41] S. Adhikari 和 S. Verma，“IEEE 802.11be中的多链路分析”，IEEE通信标准杂志，第6卷，第3期，第52–58页，2022年。[42] W. Murti 和 J.-H. Yun，“IEEE 802.11be无线局域网中的多链路操作：退避溢出问题及其解决方案”，Sensors，第22卷，第9期，第3501页，2022年。[43] N. Korolev、I. Levitsky、I. Startsev、B. Bellalta 和 E. Khorov，“IEEE 802.11be网络中不支持同时发送和接收的多链路信道接入研究”，IEEE Access，2022年。[44] M. Carrascosa-Zamacois、G. Geraci、L. Galati-Giordano、A. Jonsson 和 B. Bellalta，“理解Wi-Fi 7中的多链路操作：性能、异常与解决方案”，arXiv预印本 arXiv:2210 07695，2022年。[45] C. Chen、X. Chen、D. Das、D. Akhmetov 和 C. Cordeiro，“Wi-Fi 7概述与性能评估”，IEEE通信标准杂志，第6卷，第2期，第12–18页，2022年。[46] N. Korolev、I. Levitsky、I. Startsev、B. Bellalta 和 E. Khorov，“IEEE 802.11be网络中不支持同时发送和接收的多链路信道接入研究”，IEEE Access，第1–1页，2022年。[47] N. Korolev、I. Levitsky 和 E. Khorov，“饱和异构Wi-Fi 7网络中多链路操作的分析模型”，IEEE无线通信快报，2022年。[48] E. Reshef 和 C. Cordeiro，“Wi-Fi 8及未来发展方向”，IEEE Communications Magazine，第1–7页，2022年。[49] L. Galati-Giordano、G. Geraci、M. Carrascosa 和 B. Bellalta，“Wi-Fi 8将会是什么？IEEE 802.11bn超高可靠性入门介绍”，arXiv预印本 arXiv:2303.10442，2023年。