

5G/B5G 毫米波网络 TCP 传输性能分析^①



陈欢^{1,2}, 任勇毛¹, 周旭¹, 杨望泓^{1,2}, 范鹏飞¹

¹(中国科学院 计算机网络信息中心, 北京 100190)

²(中国科学院大学, 北京 100049)

通讯作者: 周旭, E-mail: zhouxu@cnic.cn

摘要: 5G / B5G 移动通信系统的高带宽、高可靠性和低延迟的通信需求需要更多新技术的支持。毫米波由于其丰富的频谱资源和极高的带宽容量而成为 5G/B5G 移动通信系统的研究热点之一。不同于以往由有线网络主导的互联网架构, 如今的移动互联网已经成为无线接入网和高速核心网的融合。但是目前对毫米波端到端通信传输性能的研究工作还相对较少, 而且多采用仿真实验。本文利用真实网络设备, 通过开展真实网络环境下的实验, 对毫米波链路基本传输性能和 5G/B5G 毫米波网络端到端通信系统中 TCP 传输性能进行测量分析, 研究 5G/B5G 毫米波网络传输过程中的链路瓶颈, 为设计毫米波端到端网络传输协议, 提高网络传输吞吐率奠定基础。

关键词: 5G/B5G; 毫米波; TCP; 传输性能

引用格式: 陈欢, 任勇毛, 周旭, 杨望泓, 范鹏飞. 5G/B5G 毫米波网络 TCP 传输性能分析. 计算机系统应用, 2020, 29(8): 9-15. <http://www.c-s-a.org.cn/1003-3254/7610.html>

Transfer Performance Analysis of TCP over 5G/B5G mmWave Networks

CHEN Huan^{1,2}, REN Yong-Mao¹, ZHOU Xu¹, YANG Wang-Hong^{1,2}, FAN Peng-Fei¹

¹(Computer Network Information Center, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

²(University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: The high bandwidth capacity, high reliability, and low latency communication requirements of 5G/B5G mobile communication systems require more novel technology support. Millimeter wave (mmWave) has become one of the research hotspots of 5G/B5G mobile communication systems due to its rich spectrum resources and extremely high bandwidth capacity. Different from the past Internet architecture dominated by wired networks, the mobile Internet has become a fusion of wireless access networks and high-speed core networks, so the network transfer performance is facing huge challenges. However, the research work on the transfer performance of mmWave end-to-end communication is still relatively small and simulation experiments are basically used. In this study, we use the actual network devices to carry out experiments under real network environment to analyze the link bottleneck in the transfer process of 5G/B5G mmWave mobile network by measuring the basic transfer performance of 5G/B5G mmWave link and the end-to-end TCP transfer performance in the 5G/B5G mmWave mobile network. The results lay the foundation for designing mmWave end-to-end network transmission protocols and improving network transmission throughput.

Key words: 5G/B5G; mmWave; TCP; transfer performance

1 引言

互联网从上个世纪出现到现在, 已经发展了几十

年, 移动通信网络从第 1 代到现在的第 5 代, 不仅提升了各个行业的运行效率, 也给人们的工作学习和生活

① 基金项目: 北京市自然科学基金 (4202082); 国家科技重大专项 (2018ZX03001021-003)

Foundation item: Natural Science Foundation of Beijing Municipality (4202082); National Science and Technology Major Program (2018ZX03001021-003)

收稿时间: 2020-02-02; 修改时间: 2020-03-03; 采用时间: 2020-04-03; csa 在线出版时间: 2020-07-29

方式带来了巨大转变^[1]。随着 5G 商用的到来, 国际标准化组织 3GPP 已经为 5G 定义了 3 大应用场景: eMBB (大流量移动宽带业务), mMTC (大规模物联网业务) 和 URLLC (无人驾驶、工业自动化等业务), 这 3 大应用场景分别指向不同的领域, 涵盖了我们工作和生活的方方面面。当前, 5G 主要解决了我们熟悉的高清视频、传输速率等问题。而 5G 将解决一些应用场景与技术的完善过程。虚拟现实 (VR)/增强现实 (AR)、自动驾驶、工业互联以及 8K 超高清视频等业务将成为热点, 这些业务对计算速度、传输速率、网络延迟和安全可靠等方面有更高的需求。

对移动数据流量的需求一直在以惊人的速度增长, 保守估计的流量同比增长 40% 至 70%^[2,3]。这种飞速的增长意味着在未来几十年内, 移动网络可能需要提供相对于当前水平高达千倍的容量。同时, 无线连接作为智能手机和平板电脑的优势, 许多新设备将需要无线服务, 在以往研究预估中, 到 5G/5G 商用时, 全球移动网络将连接多达 500 亿台设备^[4]。因此, 满足这一需求将是一项艰巨的任务。所以, 客观现实要求 5G/5G 将具有超高的频谱利用率和能效, 在传输速率和资源利用率等方面较 4G 移动通信提高一个量级或更高, 其无线覆盖性能、传输时延、系统安全和用户体验也将得到显著的提高。为最终建成一个网络化的社会, 5G/5G 移动通信网络需要使用位于不同物理频段的无线频谱资源, 采用比现有移动通信无线接入网络物理带宽大得多的射频信道以支撑各类应用场景, 满足提高业务服务质量的需求。5G/5G 移动通信将与其他无线移动通信技术密切结合, 构成新一代移动通信网络, 满足未来 10 年移动互联网流量增加千倍的发展需求^[5]。

随着 5G/5G 商用的推进, 毫米波通信的传输性能已成为研究热点。最近的研究表明, 毫米波网络中可实现的下行链路容量大约为每秒千兆比特 (Gbps)^[6]。然而, 尽管大多数终端用户服务基于 TCP, 例如视频流, 文件传输和 Web 浏览, 但是对毫米波网络上的传输控制协议 (Transmission Control Protocol, TCP) 性能的关注还很有限。与此同时, 针对 5G/5G 端到端传输系统的某些性能问题, 也缺乏相应的研究和解决方案。此外, 现有的研究工作基本都是在局域网环境下做的一些模拟实验, 缺乏真实网络场景中针对 5G/5G 毫米波网络端到端传输系统的测试评价, 而这是实际应用和传输性能研究中必不可少的环节。

本文采用真实网络设备搭建 5G/5G 毫米波网络场景, 首先测试局域网环境下毫米波链路在理想状况和受干扰状况下的实时吞吐率, 然后针对不同接入网和广域网网络状态对 5G/5G 毫米波网络端到端系统进行分段测量, 对比分析端到端系统的传输性能瓶颈。

2 背景及相关工作

毫米波通信代表了无线网络的最前沿^[7]。由于大量未开发的频谱资源的可用性, 毫米波通信已成为应对高速流量增长的最热门的研究课题^[8]。毫米波是指频率在 30 GHz 到 300 GHz 之间、波长在 1 mm 至 10 mm 之间的电磁波^[9], 其属性与光属性基本相同, 即频率高、波长短, 以直射方式传播, 同时波束窄, 具有良好的方向性, 是实现超高吞吐量信道的重要技术^[10]。

在 5G/5G 移动通信系统中, 毫米波通信技术提供了巨大的潜力的同时也带来了许多挑战, 这与其严苛的链路传播条件有关, 毫米波链路的特点是视线 (Line Of Sight, LOS) 条件下的吞吐量非常高, 但由于一些因素, 身体或其他障碍物 (例如: 建筑物、汽车、雨雪等) 的遮挡, 在非视线 (Non Line Of Sight, NLOS) 状态下信号与干扰加噪声比 (SINR) 可降低至 30 dB, 丢包率急剧上升, 对链路吞吐影响特别大^[11,12]。

同时, 移动互联网进入 5G/5G 时代, 无线接入网和高速核心网的融合已经是大势所趋, 但是由于不同的网络体系结构的物理层、链路层特征使得 TCP 协议运行在不同的底层网络上而出现了各种各样的问题^[13], 例如无线侧的丢包需要经历整条链路的长时延重传, 端到端的拥塞控制难以感知核心网络中的拥塞状况等, 这对 5G/5G 网络的传输造成了极大干扰, 使 5G/5G 网络在高带宽低时延的高质量链路中只表现出了次优的传输效率。

目前的研究已有一些针对毫米波传输性能的评价工作, 主要分为两类, 一类是针对毫米波链路特性的测量分析, 一类是对毫米波链路传输性能的测量分析。

毫米波链路特性方面, 主要针对链路传输过程毫米波面临的一些新问题, 比如文献 [14] 中介绍了毫米波在不同频率下户外传播的测量分析, 包括基站到移动端的接入网, 基站到基站的回程网络和车联网等。测量结果包括了一些毫米波的信道特性, 例如每个频率的路径损耗模型, 链路的损耗跟信号的密度、方向和距离有一定的关系, LOS 和 NLOS 场景切换对信号损

耗影响最大, 因为其带来巨大的链路时延和丢包甚至中断, 但文中的分析侧重于对链路损耗模型的建立, 并没有过多关注链路传输性能. 同样文献 [15] 中, 通过无人机集群做了毫米波网络上行链路和下行链路的传输测试, 根据链路特点建立了 LOS 和 NLOS 链路的的不同路径损耗模型, 并通过模拟实验验证了不同链路条件下的系统传输性能, 认为小集群, 即链路串扰程度小且 LOS 程度高的情况下性能得到改善, 并分析出最佳参数. 文献 [16] 利用接入和回程集成 (IAB) 技术配置了毫米波异构蜂窝网络 (HetNets) 进行了实验测量分析. 他们的实验展示了典型多层 IAB 场景对链路传输速率的影响. 但是他们对传输速率的计算采用公式做近似估计, 缺乏实际设备的测量结果验证.

在毫米波链路传输性能方面, 主要是 TCP 等传输层在毫米波链路上行为的分析. 文献 [17] 中, 从带宽、干扰遮挡和物理速度等方面进行测试, 根据评估结果初步揭示了毫米波链路传输层特性的几个可能问题. 首先, 由于毫米波信道的数据传输速率非常高, 当前的慢启动机制可能需要几秒钟才能达到毫米波物理层提供的全部吞吐率. 这在依赖于短 TCP 连接的应用程序中可能存在问题. 此外, 在 LOS-NLOS 转换经常会导致速率大幅下降, 从而产生严重的排队和缓冲, 大大增加延迟. 在某些情况下, 信号完全阻塞甚至中断会产生数据包丢失并触发 TCP 重传超时 (RTO), 在重传超时之后, 就算是如 CUBIC 一类的积极 TCP 协议也可能需要非常长的时间来恢复到全速率. 尽管 RLC (无线链路控制) 层和 MAC 层重传可以保护上层免受数据包丢失, 但在实际情况下仍会发生 RTO. RLC 层负责与 MAC 层进行数据交互, 主要任务是对数据分段/重组、ARQ 纠错和重复检测. 文献 [18] 中, 也对毫米波网络中 TCP 的行为做了测量分析, 并研究了它对系统级性能的影响. 通过仿真实验, 分析了各种 NLOS 环境对吞吐量和延迟的影响, 体现在基于丢包、延迟和混合拥塞控制协议的各个方面. 文献 [19] 也做了相关工作, 实验认为毫米波链路上 TCP 性能取决于不同类型 NLOS 的频率和持续时间, 也对不同的链路 RTT 做了对比测试. 此外, 也有一些针对毫米波端到端链路的测量分析, 文献 [20] 中, 文中基于详细测量的研究, 研究了链路阻塞对毫米波端到端链路上性能的影响, 提出由于波束搜索延迟和与 TCP 的交互作用, 阻塞确实会严重损害端到端性能, 认为传输架构可能是重要原因之一, 但该

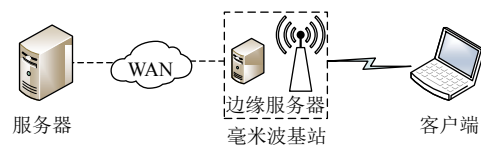
实验并不能确定真正影响毫米波链路端到端功能的瓶颈所在.

以上工作对毫米波链路特性和毫米波链路传输性能做了初步的测量分析, 但是仍然面临一些问题. 首先这些工作大部分都是针对毫米波链路的测量, 很少涉及端到端链路, 但是在 5G 应用中端到端链路是最普遍的场景; 其次, 所有现有的工作都是在 NS3 等仿真实验软件下进行的, 缺乏真实网络场景的实验支撑而这是网络测量以及后续相关优化工作的基础.

因此, 本文的实验在真实网络环境下对端到端链路、无线侧和有선侧进行分段测量, 对毫米波链路 TCP 传输性能全面的实验评价, 对链路的传输问题做全面分析.

3 实验设计

为进行 5G/B5G 毫米波网络的相关测试, 本文搭建了一个基本的 5G/B5G 毫米波网络传输系统, 如图 1.



实验采用真实网络设备进行测量, 实验场景设置包括一台服务器、一台移动设备 (客户端)、一台 60 GHz 的毫米波无线路由器 (基站) 和一台边缘服务器. 有线网络的网络接口为万兆网卡, 有线侧链路带宽为 10 Gbps, 无线网络部分为毫米波链路. 实验中设备负载正常, 所以设备的性能对传输性能造成影响可以忽略. 实验中服务器或毫米波基站作为数据发送端通过 Iperf 以 TCP 流的方式向客户端发送数据, 测量链路的吞吐率, Iperf 是一个网络带宽测量工具; 通过 Linux 操作系统中的 TC (Traffic Control) 模块设置传输时延和丢包参数以仿真真实核心网中多种网络状况.

5G/B5G 毫米波端到端传输架构分为核心网 (有线侧) 和接入网 (无线侧) 两部分, 通过在有线侧和无线侧设置传输时延、丢包率等影响因素模拟真实场景中复杂核心网和毫米波网络的网络状况.

在本文的工作中, 首先进行毫米波基本传输性能测试, 测量毫米波链路的吞吐率. 然后通过对 5G/B5G 毫米波端到端链路进行分段测量, 对实验数据结合理

论分析,得出实验结论.

4 实验结果与分析

在之前的部分,我们介绍了 5G/B5G 毫米波和 TCP 的背景,以及当前使用中面临的前景和问题.针对这些焦点问题,我们设计了以下实验.第 1 部分是 5G/B5G 毫米波基本传输性能测试,验证了毫米波网络的一些特征;第 2 部分是 5G/B5G 毫米波网络端到端场景下的传输性能及其影响因素的测试.通过这些实验,我们希望找到一些有价值的内容,以帮助将来研究 5G/B5G 毫米波端到端链路传输性能的优化.

4.1 毫米波基本传输性能测试

毫米波由于其高带宽低时延等优越特性被用于 5G/B5G 通信系统,本次实验测试理想情况下 5G/B5G 毫米波链路的吞吐效率.

按照图 1 中的拓扑,本次实验只测试毫米波基站到客户端这一段局域网链路,实验中设备保持静止状态,链路中隔绝了遮挡等干扰因素,从客户端通过 Iperf 向毫米波基站发送 TCP 流量,记录毫米波链路的吞吐率如图 2 所示,在相对理想的状态下,毫米波链路的吞吐率可以保持在 2500 Mbps 以上,远大于当前主流 WiFi (IEEE802.11) 的吞吐率.

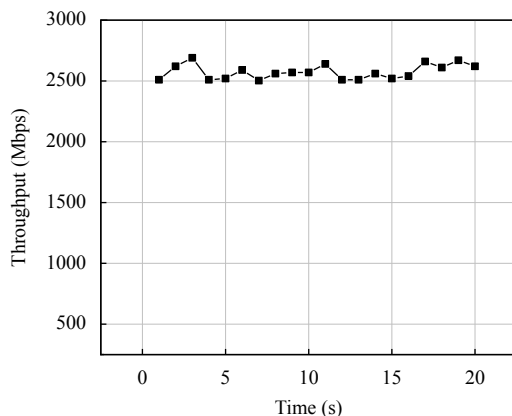


图 2 毫米波链路吞吐率

虽然毫米波技术提供了高带宽的链路,但是其对链路状况却有严苛的需求,由于人为或自然因素的干扰对链路吞吐率的影响非常严重.因此我们设计了下一个实验如图 3 所示,保持不变的实验场景,在链路传输过程中,使用了不同的遮挡介质对毫米波信号分别在 7 s 和 15 s 进行了两次短暂的人为遮挡,这里选用了日常生活中常见的干扰因素对毫米波信号进行人为遮

挡,分别为 3 mm 厚铁板、5 mm 厚纸板和人体,铁板和纸板面积为 40 cm×40 cm.

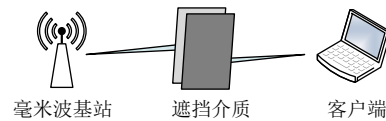


图 3 毫米波链路遮挡实验场景

如图 4,实验结果十分明显,毫米波信号受到不同介质的干扰,链路传输吞吐率发生不同程度的下降,其中铁板干扰最为明显,急剧下降约 80%,丢包率急剧上升,当遮挡消失时毫米波链路传输吞吐率迅速恢复正常,因为毫米波有容量的拥塞窗口,所以对于链路吞吐的恢复可以很好应对.

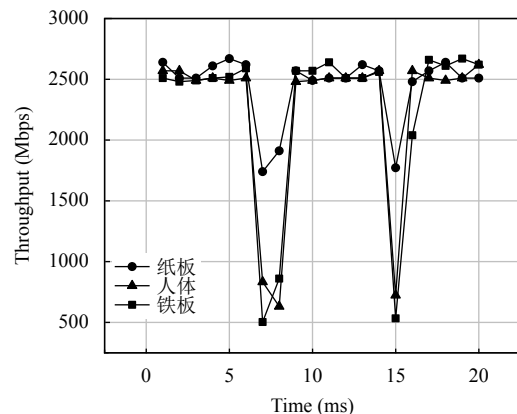


图 4 不同遮挡介质对毫米波链路吞吐率影响

以上实验表明,毫米波链路在视距 (LOS) 条件下的吞吐率具有很高的峰值,但是由于毫米波严苛的链路传播条件,信号易受干扰,非视距 (NLOS) 条件下吞吐率的下降非常剧烈.所以这种高吞吐又敏感的链路对端到端链路的传输带来很大的挑战,大规模的网络抖动难以满足这些应用场景.

4.2 端到端场景下传输性能测试

以上实验在模拟的实际场景中测试了毫米波链路的性能,后面的实验我们将关注 5G/B5G 毫米波端到端传输链路的性能问题.

针对典型的 5G/B5G 毫米波网络场景,无线接入网为频率为 60 GHz 的毫米波,有线广域网为 10 Gb 带宽的光纤链路.参考在中国科技网 CSTNET 中的实际测量结果,实际网络中典型的 RTT 值范围一般为 1 ms (LAN), 10 ms (城域), 50 ms (跨省), 100 ms (国际), 300 ms (洲际)^[21],因此实验中把有线网络的传输时延设置为

80 ms, 丢包率设置为 0.01%, 无线局域网络传输时延设置为 1 ms、丢包率设置为 1%。

使用 Iperf 由服务器到客户端发送 TCP 流量, 记录链路吞吐率随时间的变化如图 5 所示, 端到端吞吐率却只能维持在 30 Mbps 左右, 虽然链路加入了一些干扰因素, 但这与 4.1 实验中高吞吐量的毫米波链路的吞吐率差异太大。

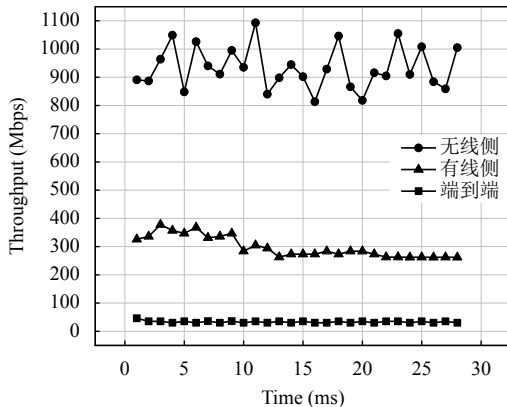


图 5 端到端典型场景下链路吞吐率

为研究端到端链路低吞吐的原因, 实验又分别测试了有线侧和无线侧的链路吞吐率, 使用 Iperf 分别由服务器到毫米波基站、毫米波基站发送 TCP 流量, 记录链路吞吐率。

图 5 可以明显看到, 相同条件下有线侧和无线侧的链路吞吐率虽然也不是最优状态, 但都比端到端链路要高很多。有线侧链路吞吐率持续处于 300 Mbps 以上, 没有较大抖动但处于下降趋势, 这是由于链路的高时延引起拥塞窗口的收缩, 导致链路吞吐处在较低水平并一直下降。相比之下, 无线侧吞吐率维持在 800 Mbps 以上, 并存在较大抖动, 这是因为有线侧链路低吞吐导致无线侧 RLC 层缓冲区等待的数据包太多, 导致无线链路拥塞, 大量数据包重传如图 6 所示。因此拥塞窗口一直在拥塞避免和快恢复之间切换, 所以吞吐率一直处于次优状态, 但相比较有线侧和端到端吞吐率还是处在较高水平。

以往的研究证明, 有线链路对传输时延比较敏感, 本次实验控制无线网络传输时延设置为 1 ms、丢包率设置为 1% 不变, 有线网络链路丢包还保持在 0.01%, 传输时延从 10 ms 到 300 ms 变化, 观察有线侧和端到端的吞吐率随有线侧传输时延的变化如图 7 和图 8 所示。

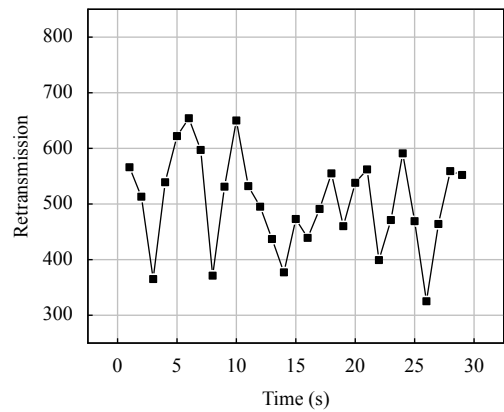


图 6 无线侧数据包重传

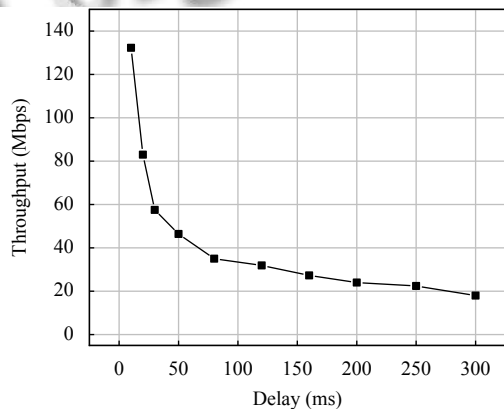


图 7 端到端传输吞吐率随有线侧时延变化

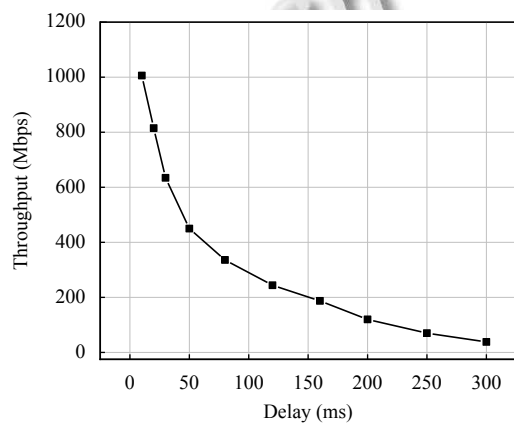


图 8 有线侧传输吞吐率随有线侧时延变化

图 7、图 8 中可以看出有线侧吞吐率和端到端的吞吐率有着相似的趋势, 传输时延从 10 ms 到 50 ms 是吞吐率剧烈下降的一个阶段, 之后吞吐率下降趋于平缓; 同时在相同链路状况下, 比较有线侧传输吞吐率和端到端的传输吞吐率也发现, 前者基本在后者 10 倍以上, 所以可以推断有线侧的链路时延是影响端到端

传输的主要因素。

在 5G/B5G 网络中, 由于毫米波对环境的敏感性, 不可避免地会有大量的丢包重传。但是, 每个数据包的重传都会经历核心网络的长时延, 这将不可避免地导致端到端链路吞吐量的下降。因此, 我们可以研究改进机制来修改端到端链路的重传机制, 并尽可能减少重传时间。

无线网络特别是毫米波网络由于存在无法避免的随即丢包而导致高误码率、连接中断和低吞吐等问题, 下面实验验证无线网络链路丢包率对端到端传输效率的影响。本次实验控制有线网络传输时延设置为 80 ms、丢包率设置为 0.01% 不变, 无线网络链路传输时延保持在 1 ms, 链路丢包率从 0.1% 到 10% 变化, 观察无线侧和端到端的吞吐量随无线侧链路丢包率的变化如图 9 和图 10 所示。

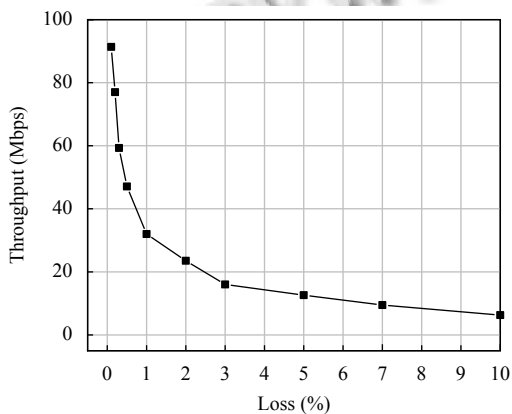


图 9 端到端传输吞吐量随无线侧丢包率变化

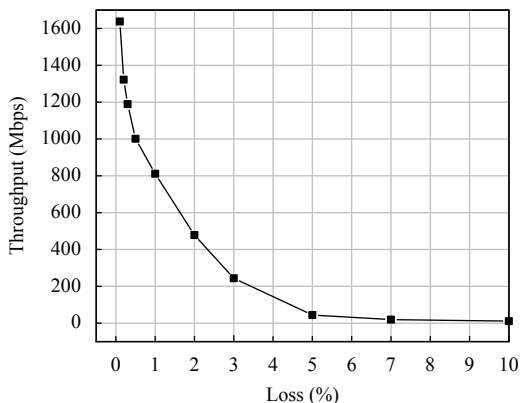


图 10 无线侧传输吞吐量随无线侧丢包率变化

5G/B5G 毫米波端到端网络中较差的传输性能是由于不可靠信道上的数据包丢失, 不过一般链路的丢包可以由重传来弥补^[22], 但是图 9 中所示无线侧的丢

包率对端到端的传输效率影响是非常的严重, 随着丢包率的增大, TCP 进入快速重传阶段, 所以也导致链路吞吐量剧烈的下降。

但是, 通过比较相同链路条件下的无线侧和端到端链路传输吞吐量, 我们可以发现, 尽管较低的无线侧的吞吐量随着丢包率的增加而降低, 但它远大于端到端吞吐量, 如图 11 所示。因此, 在正常的丢包率水平下, 毫米波无线侧丢包对整个端到端链路传输有巨大影响, 端到端链接没能完全利用毫米波的高吞吐量优势。

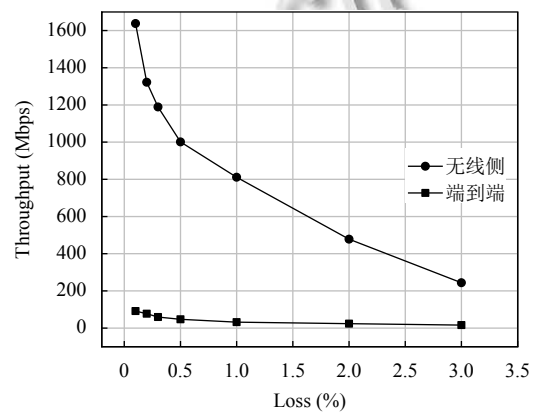


图 11 无线侧和端到端传输吞吐量对比

因此, 为了充分利用毫米波的优势, 我们可以优化无线侧上的传输控制机制。如前文所述, 因为现有的 TCP 是为传统的有线网络设计的, 当将其应用于毫米波无线网络时, 该链路状态将不可避免地误判导致出现性能问题。

5 总结

毫米波由于其丰富的频谱资源和峰值极高的带宽容量, 非常适合 5G/B5G 移动通信系统对的未来大规模连接、高可靠、低时延通信需求, 从而成为 5G/B5G 移动通信系统不可或缺的重要工具。同时, 与传统的网络链路相比, 毫米波链路也具有其独特的特性, 包括高可用带宽, 信道质量的高可变性以及由于传播损耗和不利的大气吸收而导致的阻塞敏感性, 这对网络性能的稳定性的提出了一些挑战。

本文研究的基本问题就是基于毫米波的 5G/B5G 网络端到端系统 TCP 传输性能问题, 实验证明, 在 5G/B5G 毫米波网络中, 毫米波链路具有很大的带宽容量, 但是在端到端网络传输中却不能发挥最优化的吞吐量。主要由于有线侧的链路传输时延和无线侧的链路丢包都能引起了本侧和端到端传输效率的下降。在

端到端的传输链路中,通常可能只是由于一侧的链路状况较差从而导致端到端的吞吐率下降;而且相同链路条件下,有线侧和无线侧单独传输时传输效率很高,但连通起来的端到端链路的传输效率却很差.因此,对于长时延重传和无线链路丢包,应该提出针对性的改进机制.

在未来的工作里,我们将着手优化 5G/B5G 毫米波网络端到端传输架构和传输策略,提升传输的高效性和稳定性.

参考文献

- 张虹琼. 5G 移动通信技术现状与发展趋势. 科学技术创新, 2018, (35): 98–99. [doi: 10.3969/j.issn.1673-1328.2018.35.060]
- Cisco. Cisco visual networking index: Global mobile data traffic forecast update, 2013–2018. 2014. <https://www.cisco.com/c/en/us/solutions/collateral/executive-perspectives/annual-internet-report/white-paper-c11-741490.html>
- UMTS Forum. Mobile traffic forecasts 2010–2020: A report by the UMTS Forum. UMTS, 2011. <https://www.mendeley.com/catalogue/462c81ae-890d-3e2c-85be-e82851baa246/>
- Ericsson. More than 50 billion connected devices. https://www.ciosummits.com/Ericsson_Connected_Devices.pdf.
- 尤肖虎, 潘志文, 高西奇, 等. 5G 移动通信发展趋势与若干关键技术. 中国科学: 信息科学, 2014, 44(5): 551–563.
- Wu D, Wang JL, Cai YM, *et al.* Millimeter-wave multimedia communications: Challenges, methodology, and applications. *IEEE Communications Magazine*, 2015, 53(1): 232–238. [doi: 10.1109/MCOM.2015.7010539]
- 3GPP. Study on New Radio (NR) Access Technology—Physical Layer Aspects—Release 14. 3GPP TR 38.802 v14.0.0. [Technical Report]. 2017.
- Park J, Kim SL, Zander J. Tractable resource management with uplink decoupled millimeter-wave overlay in ultra-dense cellular networks. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2016, 15(6): 4362–4379. [doi: 10.1109/TWC.2016.2540626]
- Rangan S, Rappaport TS, Erkip E. Millimeter-wave cellular wireless networks: Potentials and challenges. *Proceedings of the IEEE*, 2014, 102(3): 366–385. [doi: 10.1109/JPROC.2014.2299397]
- Rappaport TS, Sun S, Mayzus R, *et al.* Millimeter wave mobile communications for 5G cellular: It will work! *IEEE Access*, 2013, 1: 335–349.
- Akdeniz MR, Liu YP, Samimi MK, *et al.* Millimeter wave channel modeling and cellular capacity evaluation. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 2014, 32(6): 1164–1179. [doi: 10.1109/JSAC.2014.2328154]
- Lu JS, Steinbach D, Cabrol P, *et al.* Modeling human blockers in millimeter wave radio links. *ZTE Communications*, 2012, 10(4): 23–28.
- 任勇毛, 秦刚, 唐海娜, 等. 高速长距离光网络传输协议性能分析. *计算机学报*, 2008, 31(10): 1679–1686. [doi: 10.3321/j.issn:0254-4164.2008.10.002]
- Rappaport TS, MacCartney GR, Samimi MK, *et al.* Wideband millimeter-wave propagation measurements and channel models for future wireless communication system design. *IEEE Transactions on Communications*, 2015, 63(9): 3029–3056. [doi: 10.1109/TCOMM.2015.2434384]
- Wang XY, GURSOY MC. Coverage analysis for energy-harvesting UAV-assisted mmWave cellular networks. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 2019, 37(12): 2832–2850. [doi: 10.1109/JSAC.2019.2947929]
- Saha C, Dhillon HS. Millimeter wave integrated access and backhaul in 5G: Performance analysis and design insights. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 2019, 37(12): 2669–2684. [doi: 10.1109/JSAC.2019.2947997]
- Zhang ML, Mezzavilla M, Ford R, *et al.* Transport layer performance in 5G mmWave cellular. *Proceedings of 2016 IEEE Conference on Computer Communications Workshops*. San Francisco, CA, USA. 2016. 730–735.
- Mateo PJ, Fiandrino C, Widmer J. Analysis of TCP performance in 5G mm-wave mobile networks. *Proceedings of 2019 IEEE International Conference on Communications (ICC)*. Shanghai, China. 2019. 1–7.
- Pieska M, Kassler A. TCP performance over 5G mmWave links—tradeoff between capacity and latency. *13th IEEE International Conference on Wireless and Mobile Computing, Networking and Communications, WiMob 2017*. Rome, Italy. 2017. 385–394.
- Slezak C, Zhang ML, Mezzavilla M, *et al.* Understanding end-to-end effects of channel dynamics in millimeter wave 5G new radio. *Proceedings of the 19th IEEE International Workshop on Signal Processing Advances in Wireless Communications (SPAWC)*. Kalamata, Greece. 2018. 1–5.
- 任勇毛, 唐海娜, 李俊, 等. 高速网络 TCP 改进协议 NS2 仿真性能比较. *计算机工程*, 2009, 35(2): 6–9. [doi: 10.3969/j.issn.1000-3428.2009.02.003]
- Polese M, Jana R, Zorzi M. TCP in 5G mmWave networks: Link level retransmissions and MP-TCP. *Proceedings of 2017 IEEE Conference on Computer Communications Workshops (INFOCOM WKSHPS)*. Atlanta, GA, USA. 2017. 343–348.