

华中科技大学  
文献综述

外文文献翻译

---

ns-3 中 3GPP LTE-WLAN 互通协议的实现

---

原文作者:M. Shahwaiz Afaquia and Cristina  
Cano and Vincent Kotzsch and  
Clemens Felber and Walter Nitzold

翻译作者:易子閔

指导教师:钟国辉

2019 年 12 月 27 日

## 摘要

LTE 和 Wi-Fi 链路聚合 (简称 LWA) 和 IPSec 隧道与 LTE WLAN 无线电级别集成 (LWIP) 是 3GPP 提出的两种方法, 以实现 5G 背景下灵活, 通用且可规模化的 LTE-WLAN 互通性。这些技术可让使用者利用许可和非许可频谱, 并允许运营商的公开透明访问核心数据。本文介绍了 LWA 和 LWIP 协议的设计细节, 并介绍 ns-3 中的第一个 ns-3 LWA 和 LWIP 实现。特别是, 这项工作着重于不同 ns-3 模块和不同技术协议的适配和并发使用, 以支持这些互通方案。

关键词: IEEE 802.11, LTE, 无执照 LTE, 卸载, LWA, LWIP。

# 1 介绍

由于智能手机,平板电脑,可穿戴设备和其他智能移动设备的数量急剧增加,导致对当前和未来无线网络的流量需求有了巨大的增长。根据思科视觉网络指数(VNI)<sup>[1]</sup>,可以知道全球移动到2021年,移动设备产生的数据流量将达到每月48.3 EB,在2016年至2021年之间增长46%。

旨在实现所需的未来容量增长标准化的动机正在3GPP上进行,以使蜂窝移动网络能够在未经许可的2.4和5GHz频谱上运行,这个是Wi-Fi和其他通信系统目前正在使用的频段。迄今为止,有五种不同的方法可将数据从LTE转移到非许可频段:1)LWA<sup>[2]</sup>, 2)LWIP<sup>[2]</sup>, 3)许可辅助访问(LAA)<sup>[3]</sup>, 4)LTE-未经许可(LTEU)<sup>[4]</sup>, 5)MuLTEFire<sup>[5]</sup>。这些替代方法中的每一种旨在尽可能地满足蜂窝通信的未来增长。然而,在文献中没有根据其实施和性能的可行性对这些进行比较和分析。在这项工作中,我们在ns-3<sup>[6]</sup>中介绍了LWA和LWIP协议的实现细节,以满足上述要求。

ns-3是用于Internet系统的离散事件网络模拟器。它提供了逼真的模型模拟分组数据网络的行为。ns-3通过将运行实际应用程序和网络协议代码的能力与“灵活性”以及在受控网络环境中进行仿真的能力相结合,从而避免重复的工作。ns-3还支持多种模型和协议,例如Wi-Fi, WiMAX, LTE和点对点。提供了使用和修改以实现上述技术的不同ns-3模块的详细信息。LWA和LWIP都已在ns-3.27中实现。

本文的其余部分安排如下。在第2节中,将详细介绍LWA和LWIP机制。第3节和第4节分别描述了LWA和LWIP的实现细节。这两种技术的验证结果在第5节中给出。最后,第6节总结这篇文章。

## 2 无线局域网互通协议

### 2.1 LTE-WLAN 无线电聚合

LWA 最早是在 3GPP 版本 13 中引入的,它利用 Wi-Fi 网络在室内的高可用性,将 Wi-Fi 非许可带宽与许可 LTE 带宽结合在一起。它在 LTE 的分组数据融合协议(PDCP)层上有效地集成了 LTE 和 WLAN。LWA 旨在实现最佳运行,通过允许 LTE 和 WLAN 都承载下行链路流量来确定许可或非许可频段。为了避免 Wi-Fi 的非对称竞争问题,仅通过 LTE 承载上行链路。充当用户数据来辅助访问的 Wi-Fi AP 会连接到 LWA 基站,因此无需专用网关即可利用 LTE 核心网络功能。

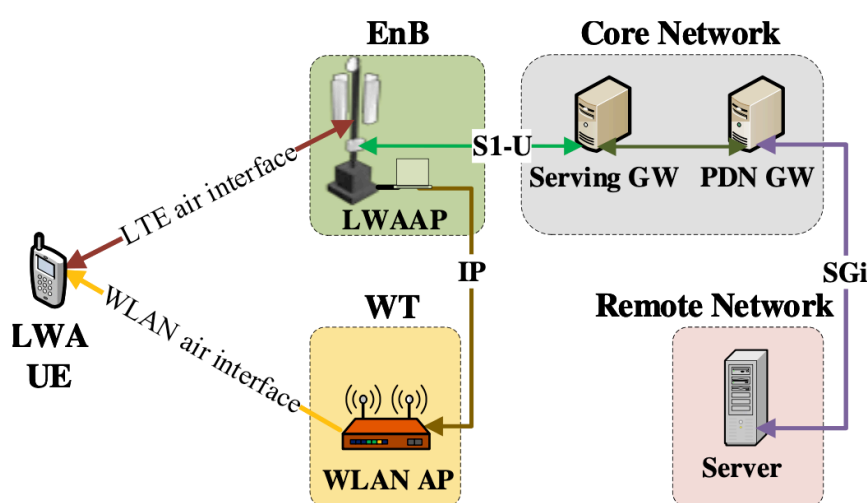


图 1:LWA 的网络架构

LWA 的架构包括相关节点 B(eNB),支持 LWA 的 Wi-Fi 接入点(AP),支持 LWA 的 Wi-Fi 站和用户设备(UE)。3GPP LTE 的版本 13 定义了 LWA 的两个开发场景,即并置和非并置,通过它们,eNB 和 WLAN 实体可以实现连接。在并置的情况下,Wi-Fi 的 AP 被并置并通过内部回程连接连接到 eNB。此部署选项更适合小型小区。对于图 1 所示的非并置部署,一个称为 Xw 的可选标准化接口用于通过 WLAN 终端(WT)逻辑节点(可以是 Wi-Fi AP,也可以是 WLAN)将 WLAN AP 连接到 eNB。Wi-Fi 控制器)。该接口支持控制(称为 Xw-C)和用户(数据)平面(称为 Xw-U)。除 PDCP 服务数据单元(SDU)外,Xw 接口还用于“流控制反馈”。的 Xw-U 接口用于将 LWA PDU 从 eNB 传递到 WT。的 LWA 的 eNB-WT 控制平面信令是通过 Xw-C 接口信令执行的。它支持以下功能:i)从 WT 到 eNB 的 WLAN 度量的传输,ii)支持 UE 的 LWA(用户平面的建立,管理和控制);iii)Xw 管理和错误处理功能。

定义了一个称为 LWA 自适应协议 (LWAAP) 的新子层, 该子层将数据无线电承载 (DRB) ID 添加到 PDCP 帧并将其传输到 Wi-Fi 接口。这允许将多个承载卸载到 Wi-Fi 网络。在控制平面中, eNB 负责选择要卸载到 WLAN 的承载, 并负责 LWA 的激活/去激活。但是, 版本 13 没有为接口选择指定任何算法。不管部署方案如何, PDCP 帧都是由 eNB 调度的, 其中一些帧用 Wi-Fi 协议封装并通过 Wi-Fi 接口传输。LWA 还可以配置网络以允许同时使用 Wi-Fi 和 LTE。此过程称为拆分承载, 同时使用 eNB 和 Wi-Fi 无线电资源。相反, LWA 还允许交换承载, 它仅利用 WLAN 无线电资源进行传输。

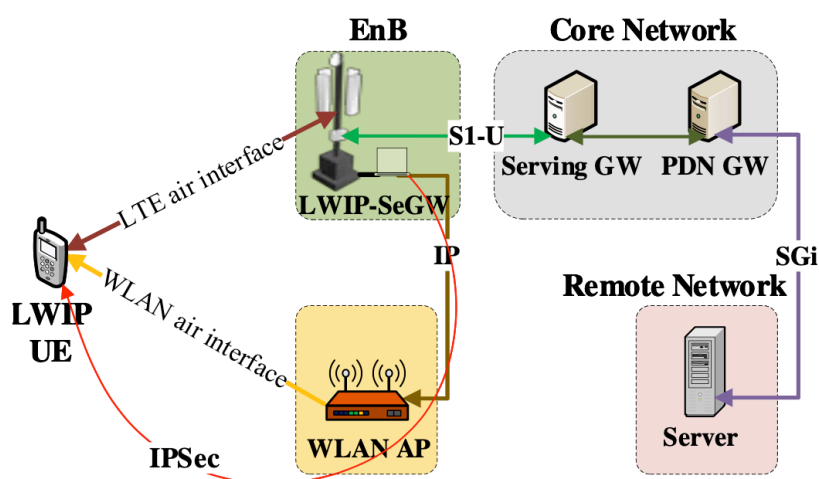


图 2:LWA 的网络架构

在使用拆分承载操作时, UE 支持基于 3GPP 版本 12 中引入的用于双连接的重新排序过程, 按顺序传送帧。这是通过使用在 Windows 上运行的重新排序计时器控制的重新排序窗口来完成的, 从 LTE 和 Wi-Fi 接收的帧通过 LWA UE 的前述附加 PDCP 功能被重新排序。在上行链路中, PDCP 的 PDU 只能通过 LTE 发送。

## 2.2 LTE-WLAN 无线级别集成

3GPP LWIP 版本 13 的基础是由 Wi-Fi Boost 设置的, 它实现了 Internet 协议 (IP) 层连接的下行链路交换的第一个实现。LWIP 的基本目标是在不做任何重大改动的情况下轻松采用和补充 LTE 更改 WLAN 基础架构。图 2 显示了 LWIP 方案的网络体系结构。

LWIP 中的 Tra'c 拆分在 PDCP 层之上执行, 并且数据路径绕过所有 LTE 协议。LWIP 聚合方案涉及 Internet 协议安全性 (IPSec) 的使用, 隧道以通过 WLAN 基础结构将 PDCP SDU 数据包从 eNB 传输到 UE。IPSec 是一种端到端安全框架 (包括用于相互认证的一组协议和算法), 它通过扩展帧的 IP 标头在网络层运行。也就是说, 在 IPSec 隧道模式下, 整个 IP 数据包均受内部和外部 IP 数据报的保护。内部标头指定通信终结点, 而外部

IP 标头定义加密端点。由于 IPSec 连接是无需担心 WLAN 部署, LWIP 解决方案支持与 LWA(既需要软件又需要添加硬件)相比,传统 WLAN 部署更容易。

当使用 LWIP 方案时,在 eNB 和 UE 之间交换的无线电资源控制(RRC)和信令消息通过 LTE 接口承载。为此,指定了一个称为 LWIP 封装协议(LWIPeP)新协议作为用户平面数据的传输。LWIPeP 也用于识别 LWIPeP SDU 所属的数据承载标识。在 PDCP 层上方执行流量拆分,并且通向 WLAN 的数据路径仅通过 LWIPeP 层(并被 PDCP 层下方的 LTE 协议绕过)。LWIPeP 协议允许使用为 UE 配置的 IPSec 隧道转发不同 DRB 的帧。重要的是在这里要注意的是,UE 不使用任何重排序过程(因为聚合的操作是在 PDCP 层之上完成的),并且所有 LWIP 承载数据都被转发了。

由于 LWIP 对 WLAN 透明,因此 LWA 中使用的“ow 控制机制是不适用的。另外,不需要 Xw 接口和 WT 节点。但是,由于安全问题,IPSec 隧道终止于专用网关,称为安全性网关(SeGW),可以在 eNB 上部署。

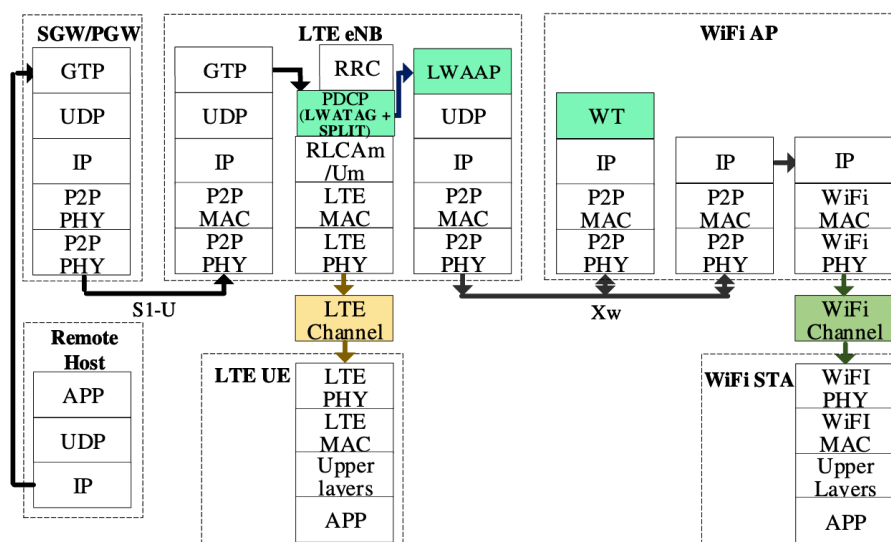


图 3:LWA ns-3 实现

eNB 负责基于 UE 测量报告来激活和去激活 LWIP 操作。该方案的主要缺点是 IPSec 隧道协议将 IPSec 标头附加到通过 WLAN 网络从 eNB 传输到 UE 的下行 IP 数据包。

## 3 ns-3 中 LWA 的实现

如第 2 节强调的, LWA 的关键概念是它通过使用 eNB 中的 PDCP 层作为汇聚层来启用路由包(即 eNB 配置处于 RRC 连接模式的 UE 使用 LTE 和 WLAN 的无线电资源)。控制平面 LTE 保持连接, 同时数据可以通过 eNB 和 WLAN 路由。为了说明该架构是如何在 ns-3 中进行仿真的, 我们参考了图 3, 该图显示了不同网络设备之间的互连。在这项工作中, 我们将研究重点放在版本 13 中定义的 LWA 的实现, 该版本仅考虑下行链路。

在启动仿真之前, 可以命令 LTE eNB 的 PDCP 层激活/停用数据卸载。如果 LWA 被完全激活, 则从 eNB 到 UE 的数据“停止”, 并且该数据被转移到 Wi-Fi AP。该过程通过以下方式完成, 并通过使用回调函数的事件触发。

### 3.1 假设

在我们的实现中, 我们做出以下假设:

- (1) 假设存在非并置的 LWA 场景, 其中 LTE 网络通过 WT 连接到已经存在的 Wi-Fi 网络。
- (2) 我们假设一个理想的 Xw-C 接口, 其中在沟通和设置上没有错误。
- (3) 没有考虑流动性模型。
- (4) Wi-Fi AP 可以容纳普通 Wi-Fi 站点以及 LWA 使用的站点。
- (5) Wi-Fi 站已配置并与 AP 关联。

### 3.2 实施细节

在本节中, 我们描述了在 ns-3 中模拟我们的 LWA 协议实现过程中发生的动作序列。在本节中, 我们将描述发生的操作序列在模拟我们的 LWA 协议在 ns-3 中的实现过程中。如图 3 所示, 使用与不同技术 (LTE、PointToPoint、Wi-Fi) 对应的多个网络组件一起。首先, 在远程主机和 EPC 模型中的 UE 会尝试遵循直接路径。但是, 可以基于部分或全部激活 LWA 来管理下行链路流量。如果使用完整的 LWA, 则所有流量都会转发到 Wi-Fi 网络。而对于部分 LWA, 某些数据包被允许通过 LTE, 而其他数据包则被转移到 Wi-Fi 网络。如图 3 所示, 代表 PDCP 层上 LWA 实现的两个主要机制是: LWA Tag 和 Split。如果激活了部分或全部 LWA, 则将要传递到 Wi-Fi 网络的所有数据包都标记为保持自己的身份。在拆分部分中, 所有带有 LWA 标签的帧都将传递到 P2P 链接以转发到 Wi-Fi。所有其他未标记 LWA 的帧都转发到 RLC 层。PDCP 类中的修改以及 LWA 中的设计细节 ns-3 主文件如图 4 所示。此“owgraph”提供了详细描述以及随后的“ns-3 中连接 LTE 和 Wi-Fi 网络的新添加数据包的数据流”(图 3 中绿色突出显示的部分与代码添加相对应)。接下来说明如何实现 LWA 体系结构。

### 3.2.1

在远程主机上生成数据包,并传输到 PDCP 层。ns-3 中的 EPC 模型的远程主机为单个 UE 提供基于 IP 的服务。OnOff / PacketSink 应用程序(模拟 IP 语音流量)用于通过客户端或服务器配置将 UDP 数据包突发从远程主机传输到 UE。Ipv4StaticRoutingHelper 类用于创建静态路由表,以启用远程主机和 UE 之间通过 eNB 的连接。生成的数据包的序号作为标题附加到数据包(称为 SeqTsHeader)。

### 3.2.2

LWA 数据流区分。在 ns-3 中,属性用于组织,记录和修改模型的各个组件使用的默认值。为了向 eNB 的 PDCP 层通知 LWA 的激活或去激活,因而添加了新的属性。此属性称为 lwaactivate。Add 属性将成员变量绑定到公共字符串 PDCPDecLwa。在这里重要的是要在属性名称空间中访问变量的值,该名称空间基于字符串“PDCPDecLwa”和 TypeId 名称 ns3::LtePdcP。该变量用于在仿真开始时激活和禁用 LWA 连接。如第 2.1 节所述,LWA 技术还允许部分使用 LTE 和 Wi-Fi 技术,以便在 UE 处按顺序组合数据包。变量可以采用以下值:i) 0-禁用 LWA, ii) 1-部分 LWA (LTE+Wi-Fi) 和 iii) 2-LWA 已激活(仅 Wi-Fi)。

这些状态还用于模拟 LWA 的拆分和交换承载操作(1 指示拆分承载,而 2 指示交换承载选项)。

如图 4 所示,“owgraph”的第一阶段解决了 LWA 的激活问题。如果未通过设置激活 LWA,则将接收到的数据包传递到 TransmitPdcPdu 函数,以转发到 RLC 层。

### 3.2.3

RBID 和 LWA 激活状态标签。当使用激活部分或全部 LWA 时,所有数据包在被排队以从 LWAAP 节点传输之前都被标记有相应的 RBID 和 LWA 状态信息。通过从抽象基类 ns3::Tag 进行子类化来创建两个新标签(即 LWATag 和 LCIDtag)。LWATag 包含 LWA 激活状态,而 LCIDtag 包含承载的逻辑 ID(RBID 从 LCIDtag 派生)。此过程由图 4 中的“添加 LWATag 和 RBIDTag”实体表示。

### 3.2.4

LTE PDCP 层中的流控制。到达 PDCP 层的数据包带有变量,该变量被分配了一个值,该值对应于完整的 LWA 激活,将被标记并排队以通过 Wi-Fi 基础设施进行传输。另一方面,如果为变量分配了与部分 LWA 激活相对应的值,则模运算符用于确定要发送到 Wi-Fi AP 和 eNB 的数据包的百分比。在图中,这由“剩余 =PDCPcounter%N“表示 4. 变



量  $N$  可以决定拆分百分比,并将其设置为固定值 2。因此,当部分 LWA 被激活时,流量在 LTE 和 Wi-Fi 网络之间平均分配。为了允许在 LWA UE 上层按顺序传送帧,已经为到达 eNB 的 PDCP 层的每个数据包分配了序列号。此数字嵌入在称为 SeqTsHeader 的 12 个字节的标头中。序列号和 RBID 信息可用于在 UE 处聚合数据。

为了在 PDCP 层访问数据包,我们利用了依赖于回调和属性系统的 ns-3 跟踪系统。在 PDCP 层中添加了一个称为 TxPDUtrace 的新跟踪源,该跟踪源可以访问 LWA 数据包,并用于收集实际传输。为了从 eNB 的 PDCP 层提取帧,跟踪接收器功能用于直接对应于回调函数。即,每当用 LWAtag 和 LCIDtag 标记数据包时,PDCP 层上的跟踪回调 xPDU 函数。此数据包(包含标头和数据内容)被复制并放入缓冲区以进行传输通过 Xw (P2P)链接连接到 Wi-Fi 网络。这个程序是由图 4 中的“Callback LtePDCPTX”框表示。在这里重要的是提到上述回调函数仅用于标记 LWA 的帧,并且这些帧不会传递到 LTE 的 eNB 的 RLC 层。

### 3.2.5

到 LWAAP 的数据包生成。在 3GPP LTE 中,典型的传输时间间隔 (TTI) 设置为 1 ms<sup>[7]</sup>,该时间间隔是指通过无线电链路进行传输的持续时间。为了及时准确进行从 LTE eNB 到 Wi-Fi AP 的帧传输,每隔“X”个间隔后便会持续观察到缓冲区。该间隔的值保持在上述 TTI 以下(即, $X = 0.1\text{ms}$ )。因此,无论何时将数据包放入缓冲区中,都会立即将其传输到 LWAAPnode 上的 UDP 套接字的源。这些过程由图 4 中的“入队数据包”,“队列为空”和“等待 X 时间”实体表示。

### 3.2.6

通过 LWAAP 制定数据包并传输到 Xw 链路。如上所述,分组的 RBID 和序列号是重要的参数,其能够在 UE 处聚合“ow”。当将数据包与 SeqTsHeader 一起复制时,会传递有关序列号的信息。RBID 首先从标签中提取 lwaactivate 信息,然后将其添加为标头以通过 Xw 接口传输。

如 LTE 版本 13 标准中所述,LWAAP 实体生成包含 RBID 身份的 LWAAP PDU。为了转发 RBID 和 LWA 状态信息,定义了一个名为 LwaHeader 的新的 2 字节标头。在下一阶段,数据包被发送到在 LWAAPnode 上安装的 UDP 套接字的源。以上图 4 的 LWAAP 实体中显示了突出显示的步骤。

### 3.2.7

数据通过 Wi-Fi AP 从 LWAAPnode 转发到 Wi-Fi 站。从 LWAAPnode 到 Wi-Fi 站的数据包的下行链路是通过创建源目标套接字来实现的。假定模拟中的 Xw 接口是在

LWAAPnode 和 WTnode 之间创建的 P2P 链接。Wi-fi AP 也通过 P2P 链路连接到 WT。

LWAAPnode 设置为源套接字，Wi-Fi 站设置为目标接收器。两个套接字均使用 IPv4 地址标识。对于套接字之间的同步，两个端口的端口号保持相等。要创建路由数据库并初始化在 P2P 节点，Wi-Fi AP 和 Wi-Fi 站点之间进行连接的路由表中，使用了 Ipv4GlobalRoutingHelper 类。

### 3.2.8

Wi-Fi 站的数据包接收。在 Wi-Fi 站的目标套接字处接收到的数据包包括 SeqTsHeader 和 LwaHeader 标头。该信息可以用于在 UE 的应用层处聚合分组。

借助于表 1, 我们提供了在 ns-3 中使用 3GPP 的 LWA 标准的 LWA 实现功能之间的比较。如表中突出显示的那样, 3GPP 的版本 13 提供的大多数 LWA 规范都是在 ns-3 中实现的。LWA 原为在 eNB 处进行控制, 并在 PDCP 层执行帧拆分。变量启用了 ns-3 实现, 以支持拆分和交换承载功能。由于在 PDCP 层聚合数据的方法的实现工作留作未来的工作, 因此在 ns-3 LTE UE 上未进行任何更改。2 如第 3.1 节所述, 假 eNB 和 WT 之间存在理想的控制平面(Xw-C)。因此, 未考虑 WLAN 测量, 建立, 修改和错误处理机制的支持。

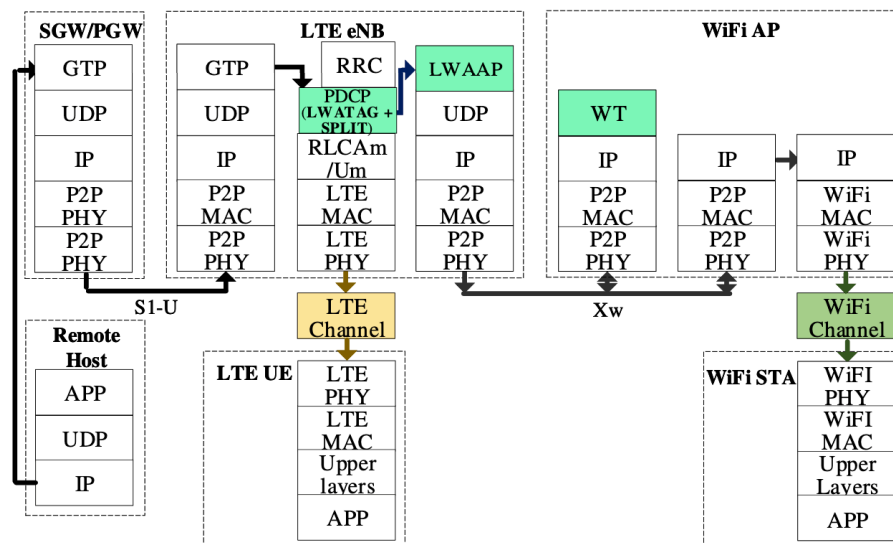


图 4:LWA 实施的流程图

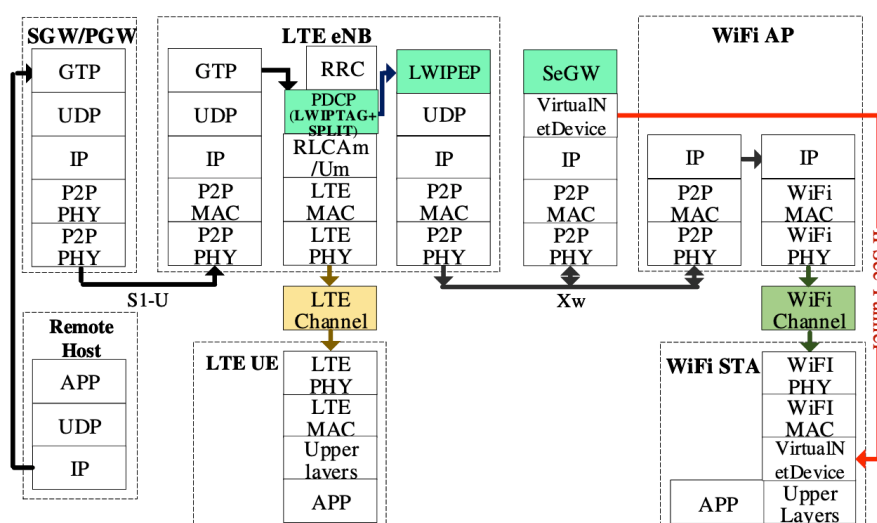


图 0-1 图 5:LWIP 实施的流程图

## 4 ns-3 中 lwip 的实现

在 LWIP 中, IPsec 隧道用于通过 Wi-Fi AP 从 eNB 向 UE 发送下行链路通信。与 LWA 相似, LWIP 中的 UE 具有到 eNB 的 RRC 连接。与 LWA 不同, LWIP 中的数据包不能同时传输到 LTE 或 WLAN 链接。在 ns-3 中, 用于最终用户(包含 UE, SGW / PGW 和远程主机)的端到端连接的 IP 网络在 EPC 模型中不涉及在 eNB 处使用 IP 堆栈。为了解决上述问题并获得对 PDCP SDU (IP 数据包) 的访问权限, LWIP 协议被设计为遵循 3.2 节中使用的相同方法, 以使 LWA 在 PDCP 层提取帧。类似于 LWA 实现, 可以命令 LTE eNB 的 PDCP 层激活/去激活数据的卸载。如果激活了 LWIP, 则完整到 UE 的 LTE 停止, 数据被转移到 Wi-Fi AP。前述过程通过事件驱动的触发技术来完成。在其上创建 IP 数据包的 IPsec 隧道被创建在 UDP / IP 隧道传输的 IP 数据包上。对于 ns-3 实现, 由于利用了相同的 LWA 机制, 因此使用了 Xw 接口。事实证明, 已实现的 Xw-U 接口仅负责数据包的传输。

### 4.1 假设

在我们的实现中, 我们做出以下假设: (1) 假设采用非并置方案, 其中 LTE 网络通过 SeGW 连接到已经存在的 Wi-Fi 网络。 (2) 我们假设一个理想的 Xw-C 接口, 其中通讯和设置没有错误。 (3) 不考虑流动性模型。 (4) Wi-Fi 站已配置并与 AP 关联。 (5) LWIP SeGW 与 Wi-Fi 站之间的 LWIP 隧道已通过 Wi-Fi 基础架构建立。 (6) IPsec 隧道使用身份验证, 但不加密。

## 4.2 实施细节

在本节中,我们描述了在 ns-3 中模拟 LWIP 协议期间发生的事件顺序。图 5 表示与不同技术 (LTE, PointToPoint, VirtualNetDevice 和 Wi-Fi) 相对应的多个网络组件一起用于开发 LWIP 协议。使用 VirtualNetDevice 创建 IP 隧道,该 VirtualNetDevice 使用新的 IP 标头包装 UDP 数据包。首先,从远程主机到 UE 的任何通信都尝试遵循直接路径。但是,如果要将下行链路流量转发到 Wi-Fi 网络,则使用安全隧道将数据集中到 LWIP UE (即 Wi-Fi 站)。PDCP 类中的修改以及不同类之间的互连的详细信息在图 6 中突出显示。该“owgraph”提供了新的网络节点/模块上的数据包的详细说明和随后的“ow”信息包,这些新的网络节点/模块被添加为通过 IP 隧道连接 LTE 和 Wi-Fi 网络 (图 5 中突出显示为 ns-3 的部分)。接下来说明 LWIP 体系结构的实现。

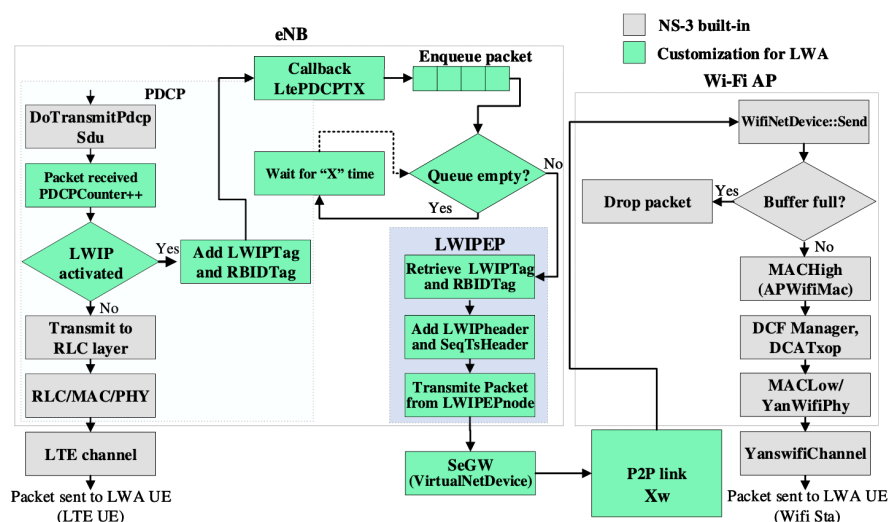


图 6:LWIP 实施活动图

### 4.2.1

远程主机上的数据包生成,并传输到 PDCP 层。与 LWA 实施类似,OnOff/ PacketSink 应用程序用于通过客户端/服务器配置将 UDP 数据包突发从远程主机传输到 LTE UE。

### 4.2.2

LWIP 数据流区分。为了将 LWIP 的激活或去激活通知给 eNB 的 PDCP 层,添加了新的属性。此属性称为 lwipactivate,与用于访问基础成员变量的机制相关联,该成员变量用于激活和停用 LWIP 连接。i)0-禁用 LWIP,并且 ii)1-LWIP 被激活。

在模拟开始时, Config :: SetDefault 方法用于覆盖 PDCPDecLwip 属性的初始(默认)值。如图 6 所示,“owgraph”的第一阶段用于做出有关 LWIP 激活的决定。如果未通过设置激活 LWIP,则将接收到的数据包传递到 TransmitPdcPdu 函数,以转发到 RLC 层。

### 4.2.3

RBID 和 LWA 激活状态标签。与 LWA 相似,当为变量分配一个与 LWIP 激活相对应的值时,所有数据包在被排队以从 LWIPEP 节点传输之前都被标记有相应的 RBID 和 LWIP 状态信息。为 LWA 定义的 LCIDtag 被重用。怎么样曾经,对于 LWIP 状态,定义了一个新标签(称为 LWIPTag)。这在图 10 中显示为实体“添加 LWIPTag 和 RBIDTag”。

LTE PDCP 层中的流控制。到达 PDCP 层的数据包带有变量,该变量被分配了一个与 LWIP 激活的值相对应的数据包,将被标记并排队以通过 Wi-Fi 基础设施进行传输。为了允许在 LWA UE 上层按顺序传送帧,已经为到达 eNB 的 PDCP 层的每个数据包分配了序列号。此数字嵌入在 12 个字节的 SeqTsHeader 中。为了从 PDCP 层提取带有 LWIP 标签的帧,使用了第 3.2.4 节中描述的相同方法。

### 4.2.4

LTE PDCP 层中的流控制。到达 PDCP 层的数据包带有变量,该变量被分配了一个与 LWIP 激活的值相对应的数据包,将被标记并排队以通过 Wi-Fi 基础设施进行传输。为了允许在 LWA UE 上层按顺序传送帧,已经为到达 eNB 的 PDCP 层的每个数据包分配了序列号。此数字嵌入在 12 个字节的 SeqTsHeader 中。为了从 PDCP 层提取带有 LWIP 标签的帧,使用了第 3.2.4 节中描述的相同方法。

### 4.2.5

到 LWIPEP 实体的数据包生成。3.2.5 节中描述的过程用于将数据包传输到 LWIPEPnode。

### 4.2.6

由 LWIPEP 制定数据包并传输到 SeGW 链路。如第 2.2 节所述, LWIPEP 模块的职责是生成用户纯数据以及承载者标识。类似于 LWA, 首先从标记中提取 RBID 和 lwip 激活信息, 然后将其作为标头添加到要通过 Xw 接口发送的数据包中。定义了一个名为 LwipHeader 的新的 2 字节标头, 其中包含 lwip 激活状态和承载 ID 信息。此阶段由图 6 中的 LWIPEP 实体表示。

在下一阶段,数据包从 LWIPEPnode 传输到 SeGW,以通过 IPSec 隧道传输。

### 4.2.7

通过 IP 隧道将数据从 SeGW 转发到 Wi-Fi 站。为了创建 IP 隧道, 在 SeGW 链接上安装了额外的虚拟接口, 并在 Wi-Fi 站上安装了虚拟接口 (即, 在 P2P 链接上安装了新地址设置为 11.0.0.1 的接口, 并安装了地址为 11.0.0.254 的接口) 通过 Wi-Fi 站)。因此, “数据包的流量将在 11.0.0.x 之间 (即隧道) 而不是实际的 IP 地址 (P2P 和 192.168.xy 为 10.0.xy 用于 Wi-Fi 网络)。SeGW 上 VirtualNetDevice 的使用代表了与外部 Wi-Fi 网络的联系点。这是启动安全 IPSec 隧道的地方。创建一个使用回调函数在 VirtualNetDevice 上创建虚拟 UDP 源套接字和目标套接字的隧道类。这些套接字用于将 IP 封装的 LWIP 数据包从 SeGW 传输到 Wi-Fi 站。为 LWA 定义的 Xw 接口被重用于提供 SeGW 和 Wi-Fi AP 之间的连接。

### 4.2.8

Wi-Fi 站的数据包接收。在 Wi-Fi 站点的目的地接收到的数据包包括 SeqTsHeader 和 LwipHeader 标头。该信息可以用于在 UE 的应用层处聚合分组。

因此, 详细的 WLAN 测量, 支持建立, 修改和错误处理机制都没有被考虑。尽管可以将 LWIP 配置为通过 WLAN 传输上行链路和下行链路数据, 但我们将研究重点放在了实现上, 尤其是下行链路通信。

## 5 绩效评估

在本节中,我们描述评估方案的定义和结果的收集。我们评估了通过使用 LWA 和 LWIP 所获得的总容量,以及它们如何在效率与附近具有 Wi-Fi 干扰网络相关的不同影响方面进行比较。表 3 列出了所使用的参数,对于 LWA 和 LWIP Wi-Fi 传输,我们考虑了没有 MIMO 和聚合。模拟运行 100 秒,已重复 10 次。我们使用恒定比特率(CBR)UDP 源。

我们首先比较未许可频谱中 LWA 和 LWIP 的效率。为此,我们模拟了 1 个 eNB, 1 个 Wi-Fi AP, 1 个 Wi-Fi STA 和 1 个 UE,同时 eNB 生成了朝向 UE 的下行链路流量。为了评估网络效率,我们 LTE 和 Wi-Fi 通道都饱和。也就是说,我们使确保始终有一个要由 eNB 和 Wi-Fi AP 传输的数据包。这样,我们可以比较 LWA 和 LWIP 的最大容量。在没有其他网络干扰的情况下,由于 IPSec 隧道的额外报头会减少 LWIP 可以在每个站点传输的有效信息,因此我们希望 LWIP 能够以比 LWA 更低的程度增强 LTE 容量。Wi-Fi 传输尝试。结果绘制在图 7 中,其中显示了未激活 LWA 和 LWIP 时的 LTE 吞吐量,以及通过使用 LTE 以及具有可变数据包大小的 LWA 和 LWIP 获得的聚合容量。请注意,由于此处假设处于饱和条件,因此使用部分或全部 LWA 不会对吞吐量结果产生任何影响。因此,我们有选择仅显示完整的 LWA 结果。

从图 7 中可以看出,对于所考虑的参数,LWA 和 LWIP 的使用可以显著提高总容量。请注意,我们使用了 IEEE 802.11ac 参数,并且获得的 Wi-Fi 吞吐量可以高达 78 Mbps。正如我们之前介绍的,我们可以观察到,使用 LWIP 会导致吞吐量略低于 LWA。这是由于 IPSec 隧道的额外标头所致。我们可以在以及增加数据包大小的效果(每个数据包传输的有效数据)。在 Wi-Fi 结果中增加数据包大小和每次通道尝试传输更多数据时,吞吐量会更高,通过补偿开销(无论是标头还是通道访问效率)(例如由于 DIFS, SIFS 和 backoff)插槽而导致的空通道持续时间)。从图中可以看出,这种趋势的综合效果(随着数据包大小的增加,吞吐量增加)和更高的 LWIP 与 LWA 相比,效率低下。请注意,对于较小的数据包大小,由于开销引起的 LWIP 较高的效率更加明显。对于更长的数据包大小,随着通道访问变得更加有效,在 LWIP 中引入的额外增加的开销可以忽略不计。

现在,我们评估具有 Wi-Fi 网络干扰 LWA 和 LWIP 链路的影响,并分析 Wi-Fi 网络中上行链路传输数量增加的影响。因此,有效评估 LWA 和 LWIP 在竞争下的表现。图 8 显示了 LTE 链路的吞吐量以及 LWA 连接(现在不再与 LTE 进行汇总,以便更好地与 Wi-Fi 比较)所实现的吞吐量 Wi-Fi 干扰网络中实现的吞吐量。现在,发射功率已设置为 15 dBm, Wi-Fi 和 LTE 的数据包大小均已设置为 500 字节,载波侦听阈值已设置为 -72 dBm。仿真时间已设置为 10 s

我们可以在图 8 中观察到,随着上行链路 Wi-Fi 发射机数量的增加,LWA 和 LWIP 的吞吐量会下降。这是由于 Wi-Fi 的信道访问可为每个设备提供公平性。我们看不到所

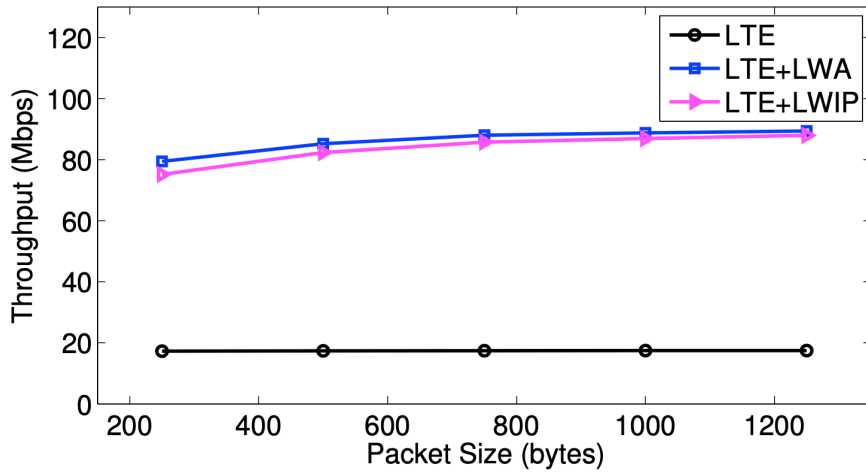


图 7:使用 LWA 和 LWIP 的 LTE 聚合容量

有设备 (2、4 和 6 个 Wi-Fi 发射器以及 LWA / LWIP AP) 之间的资源分配比例, 由于默认情况下 ns-3 优先处理 AP 通道访问。但是, 即使使用更高的优先级, 我们也可以在图中看到, 随着来自 Wi-Fi 网络的争用, LWA 和 LWIP 吞吐量会大大降低。同样有趣的效果是, 随着 Wi-Fi 干扰源数量的增加, 由于必须传输额外的报头而导致的 LWIP 的效率变得微不足道。我们认为, 这是由于与争用导致的信道访问效率低下相比, 这种额外开销现在可以忽略不计。还值得注意的是, 即使将 LTE 带宽设置为 5 MHz, 将 Wi-Fi 侧的带宽设置为 20 MHz, 通过 LWA 和 LWIP 连接获得的吞吐能力也比 LTE 链路的吞吐能力小。但现在需要与共存的 Wi-Fi 网络共享

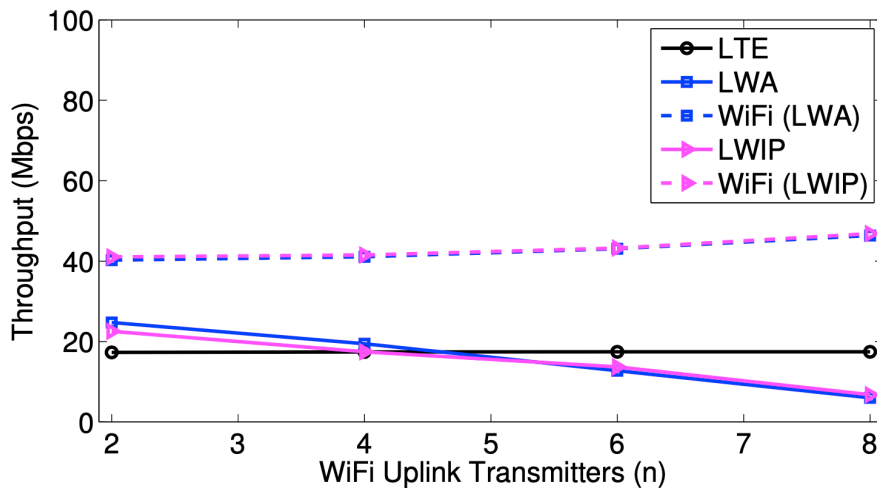


图 8:将 Wi-Fi 干扰网络放置在附近时, LTE 和 LWA 链路中实现的吞吐量



在下文中,我们评估了具有 Wi-Fi 网络干扰源的影响,并通过增加两个网络 (Wi-Fi 和 LWA 链路) 之间的距离以及通过增加两个网络之间的距离来分析干扰的影响如何变化。Wi-Fi 干扰网络和 LWA 连接的传输功率。图 9 显示了 LTE 链路的吞吐量以及通过 LWA 连接实现的吞吐量 (现在不再与 LTE 集成在一起,以更好地实现与 Wi-Fi 进行比较),以及在 Wi-Fi 干扰网络中实现的汇总吞吐量。Wi-Fi 发射机的数量 (仅在上行链路中) 被认为等于  $n = 2$  和  $n = 3$ 。现在,发射功率设置为 15 dBm, LWA 链路和 Wi-Fi 网络的数据包大小设置为 1000 字节,载波侦听阈值设置为 -72 dBm。在 5.19 GHz Wi-Fi 频带中使用三个对数距离传播路径损耗模型 (路径损耗指数为  $\alpha_1 = 2$ ,  $\alpha_2 = \alpha_3 = 3.5$ )。仅显示 LWA 的结果,因为 LWIP 的性能类似于图 8。

从图 9 中可以看出,当两个网络靠近时,由于它们现在共享信道资源并创建竞争,因此实现的吞吐量会大大降低。只要我们增加它们之间的距离,吞吐量就会提高,直到它们不再相互干扰为止。从小距离可以看出,当 Wi-Fi 干扰源与 2 个节点而不是 3 个节点竞争时,通过 LWA 达到的吞吐量更高。同样, $n = 2$  时, LWA 链路的吞吐量大约是 Wi-Fi 网络实现的吞吐量的一半。值得注意的是,通过增加 LWA 接收器将获得相反的效果。但是,我们没有观察到完全比例除法由于 LWA 设备是 AP,并且某些信道访问参数默认在 ns-3 中优先于 AP 传输,因此根据网络用户数分配资源。

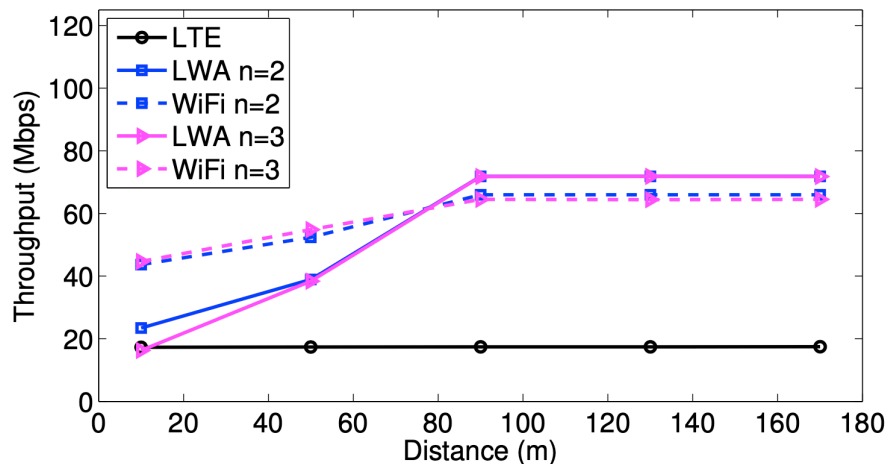


图 9: 将 Wi-Fi 干扰网络放置在附近时, LTE 和 LWA 链路中实现的吞吐量

这就是 LWA 链路传输在此结果中以某种方式受益于与 Wi-Fi 共享的无执照频谱的原因。有趣的是,我们也可以从该图中看到,即使 Wi-Fi 信道带宽被认为等于 20 MHz,而 LTE 被设置为 LTE,现在吞吐量也可以与 LTE 链路中的吞吐量相媲美。这些仿真为 5 MHz。

## 6 结论

在本文中,我们介绍了 3GPP 在版本 13 中提出的 LTE-WLAN 卸载技术(即 LWA 和 LWIP)实现的设计细节。我们提供了这两种技术的详细信息,并提供了实现的不同方面的分步说明,并通过仿真结果对其进行了验证。首先,我们分析了饱和条件下 LWA 和 LWIP 实施的效率。结果表明,在没有干扰的情况下,LTE-WLAN 互通方案的总容量将大大增加。但是,由于 IPsec 隧道开销,发现 LWIP 的效率较低。接下来,观察到来自相邻 Wi-Fi 小区的干扰对主要 WLAN 网络(支持 LWA / LWIP)的影响。重要的结果是,对于友好操作,应选择较少的主单元干扰附近的电台。未来的工作包括将 ns-3 中的 LAA 与我们已实现的 LWA / LWIP 技术进行比较。

## 致谢

这项工作已得到欧洲地平线 2020 计划根据赠款协议 732174(ORCA 项目,UP-ORCA EXT3)的部分支持,并得到了欧洲区域发展基金 TEC2015-71303-R 的资助(MINECO / FEDER)的部分支持。

## 参考文献

- [1] Index C V N. Global mobile data traffic forecast update, 2016–2021 white paper[J]. Cisco: San Jose, CA, USA, 2017.
- [2] Access E U T R. and evolved universal terrestrial radio access network (e-utran)[J]. Overall description, 2008, 126.
- [3] Afaqui M S, Cano C, Kotzsch V, et al. Implementation of the 3gpp lte-wlan inter-working protocols in ns-3[C]//Proceedings of the 2019 Workshop on ns-3. [S.l.]: ACM, 2019: 25-32.
- [4] HUAWEI. U-lte: Unlicensed spectrum utilization of lte[J]. White Paper, Jan, 2014.
- [5] Alliance M. Multefire release 1.0 technical paper[J]. White Paper, Jan, 2017.
- [6] ns 3 project. The network simulator ns-3[M/OL]. 2016. [www.nsnam.org](http://www.nsnam.org).
- [7] Nohrborg M. Lte overview[M/OL]. 2015. <http://www.npac.syr.edu/projects/cpsedu/summer98summary/examples/hpf/hpf.html>.