

基于通用计算机和 USRP 的 LTE 通信系统开发与实现

高月红¹, 高翔², 张洪坤², 袁洪权², 孙常皓¹

(1. 北京邮电大学 信息与通信工程学院, 北京 100876)

(2. 中国航天科工飞航技术研究院 创新研究院, 北京 100074)

摘要: 为了解决软件仿真不能进行真实信道环境下的性能演示、不能测量真实通信系统的传输速率与时延等方面的弊端, 研究了基于通用计算机和通用软件无线电外设 USRP 的 LTE 通信系统的实现方法; 对系统的基本结构与原理进行了分析; 采用通用计算机与软件无线电前端相结合的方式, 由通用计算机完成基带处理功能, 由 USRP 完成基带信号的射频收发, 并采用开放空中接口 OAI 平台作为软件架构实现数据处理与系统控制; 在 5 MHz 系统带宽配置场景下, 对所研究的 LTE 系统进行了软、硬件调试、测试与验证, 实现了完整的 LTE 通信系统的功能; 此外, 进一步开发和实现了支持包括电脑终端和商用终端在内的多用户接入场景; 测试结果表明所搭建的 LTE 通信系统能够与公共互联网实现互联互通, 并维持较为稳定的连接。

关键词: USRP; LTE; 通信系统; OAI; 多用户

Development and Implementation of LTE Communication System Based on Universal Computers and USRP

GAO Yuehong¹, GAO Xiang², ZHANG Hongkun², YUAN Hongquan², SUN Changhao¹

(1. School of Information and Communication Engineering, Beijing University of Posts and Telecommunications, Beijing 100876, China; 2. Innovation & Research Institute of HIWING Technology Academy, Beijing 100074, China)

Abstract: In order to solve the problems that software simulation cannot demonstrate the performance in real channel environment, and cannot measure the transmission rate and delay of real communication system, the implementation method of LTE communication system based on universal computer and universal software radio peripheral (USRP) is studied. The basic structure and principle of the system are analyzed. By combining general computer with the front end of software radio, the baseband processing functions are fulfilled by universal computers, while the transmission and receiving of radio signals are fulfilled by USRP, in addition, the open air interface (OAI) platform is used as software structure to realize data processing and system control. The software and hardware of the considered LTE system are configured, tested and verified in the scenario of 5 MHz system bandwidth, where all functions of LTE communication system are realized. In addition, the multi-user access scenario including computer terminals and commercial terminals is further developed and realized. The test results show that the LTE communication system can fulfill interconnection with public Internet and maintain stable connection.

Keywords: USRP; LTE; communication system; OAI; multi-users

0 引言

在每一代的通信系统中, 基于计算机的软件仿真方法一直作为开发与研究通信系统的主要方式, 被广泛应用于系统架构、关键技术等领域^[1-2]。软件仿真成本低, 开发周期短, 使用范围广, 目前已有多种支持通信系统仿真的软件^[3-5]。但随着通信系统的更新, 软件仿真方法在无线信道环境的真实性、数据传送的实时性及网络监测和时延测量的有效性等方面的不足日益明显。因此, 无论是学术界还是工业届对半实物通信系统的实现需求也日益迫切^[6-7]。基于半实物仿真平台, 可以开展不同类型和场景的研究, 例

如雷达网络^[8]、无线网络^[9-10]等。

半实物仿真的核心是可以通过软件编程实现不同功能的软件无线电平台。在众多平台中, 通用软件无线电外设 (USRP, universal software radio peripheral) 凭借其出色的性能脱颖而出^[11]。USRP 作为应用广泛的软件无线电平台之一^[12], 以低廉的价格、良好的开源性和广泛的兼容性受到了全球工程师的欢迎。USRP 能够支持 GNURadio 框架、LabVIEW、Matlab 等多种开发环境^[13], 可根据使用者的不同需求, 实现自定义的软件无线电系统, 因此被广泛应用于各类软件无线电平台的实现^[14]、算法开发^[15-16]以及通信

收稿日期: 2021-08-18; 修回日期: 2021-09-03。

作者简介: 高月红(1981-), 女, 河北隆尧人, 博士, 副教授, 博士生导师, 主要从事无线通信理论与技术方向的研究。

引用格式: 高月红, 高翔, 张洪坤, 等. 基于通用计算机和 USRP 的 LTE 通信系统开发与实现[J]. 计算机测量与控制, 2021, 29(10): 193-198, 222.

系统的研究等领域。

本文研究和实现了一套 LTE 系统的半实物仿真平台。该平台支持完整的 LTE 协议栈, 实现了核心网和空中接口的功能, 并能够支持商用终端接入, 为开展 LTE 系统的功能升级以及性能测试提供了基础。本文所研究的 LTE 移动通信系统采用 USRP 作为软件无线电前端, 同时通过在通用计算机上部署开放空中接口 (OAI, open air interface) 平台来完成基带处理的方式, 实现 LTE 系统的完整功能。与已有基于 OAI 和 USRP 的 LTE 半实物仿真系统相比^[17], 本系统的最大特点在于支持多用户接入, 特别是支持电脑终端和商用终端的混合接入。

本文介绍了该系统的结构与原理、硬件和软件设计、搭建流程, 并给出了运行和测试结果。此外, 为了提升系统的功能, 进一步研究了多用户接入场景的需求、软硬件配置方案, 实现并验证了其功能, 所开发的多用户系统, 可以支持基于通用计算机的电脑终端和商用终端的混合接入, 并可以实现所搭建的 LTE 系统与外部因特网的互联互通。

1 系统结构及原理

基于 USRP 的 LTE 通信系统采用通用计算机与软件无线电前端相结合的方式, 由计算机完成基带数据的处理, 由 USRP 实现数据的频带发送与接收, 二者相结合实现完整的通信系统功能。整个通信系统包括核心网 (EPC, evolved packet core)、基站 (eNB, evolved node B) 和用户 (UE, user equipment) 三部分, 其整体架构如图 1 所示。

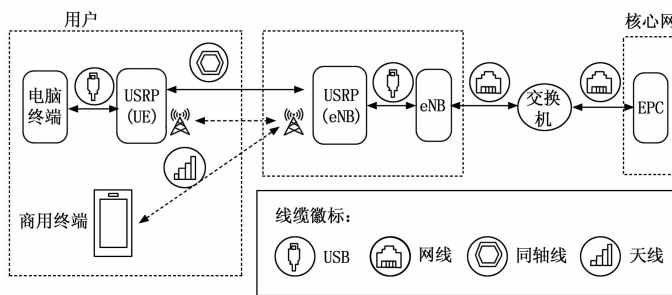


图 1 系统架构图

其中, 核心网不涉及无线信号的收发, 因此由一台通用计算机组成即可。核心网包括归属用户服务器 (HSS, home subscriber server)、移动管理实体 (MME, mobility management entity) 和服务与 PDN 网关 (SPGW, service and PDN gateway PDN) 3 个主要部分, 并通过网线连接到交换机上, 进而实现与外部网络的互通。基站需要完成无线信号的收发, 因此除了包含一台通用计算机以外, 还需要一台 USRP 设备。该 USRP 设备通过 USB 数据线与通用计算机相连, 再通过网线连接到交换机, 进而实现与 EPC 的连接。与基站类似, 若使用通用计算机实现用户的功能, 则必须同时配备一台 USRP 设备。在后文中, 使用电脑终端来指代使用通用计算机和 USRP 设备实现的用户。此外, 用户也可以使用商用终端接入, 需要注意的是, 商用终端

所支持的频段需要与所开发的 LTE 系统的工作频段相匹配, 否则商用终端无法接入。电脑终端的 USRP 既可以通过同轴线与基站 USRP 相连接, 也可以通过 USRP 天线与基站 USRP 天线进行无线连接。商用终端只能以无线的方式与基站的 USRP 天线实现无线连接。其中, 有线连接主要用于模拟和测试无干扰的理想信道场景, 在开发初期常常使用有线连接的方式屏蔽信道的不利影响, 辅助调试代码。在开发的后期, 通过使用无线连接来验证真实系统的功能和性能。

2 系统硬件设计

如前文所述, LTE 通信系统的硬件设计主要包括软件无线电前端和通用计算机两个方面。市面上可选的产品较多。此处介绍本文工作中所使用的硬件设备的配置。

2.1 软件无线电前端

本系统选取了兼容性较好的 USRPB210 作为软件无线电前端。USRPB210 是一款完全集成的、单板通用软件无线电平台^[18], 其原理结构如图 2 所示^[19]。该平台可以提供从 70 MHz~6 GHz 的连续频率覆盖; 结合了 Analog Devices 公司的 AD9364 RFIC 芯片, 提供高达 56 MHz 的实时带宽; 采用可编写的 Spartan 6 XC6SLX150FPGA, 实现信号的下变频, 并通过高速 USB 3.0 连接到通用计算机上^[13]; 兼容多款配件, 设备之间的通信可通过铜轴线或天线实现。

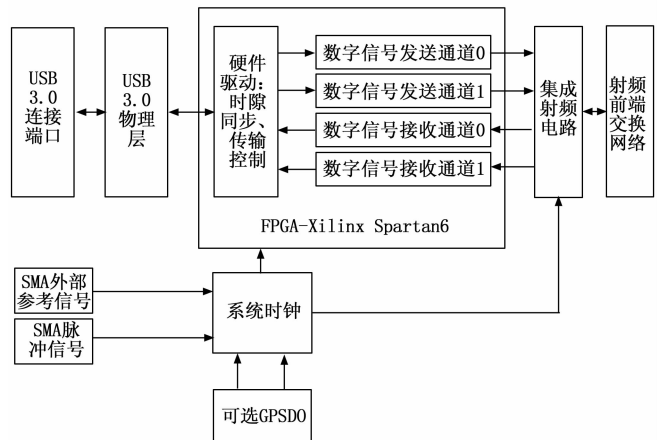


图 2 USRPB210 原理结构图

2.2 通用计算机

系统中包含 EPC、eNB 和电脑终端三台通用计算机。由于各个模块的功能不同, 因此对硬件配置的要求也不尽相同。在以下行传输为主的测试环境下, EPC 和电脑终端需要处理的数据量较少, 因此对硬件配置的要求也较低。但是在此场景下, eNB 处理的数据量较大, 也就对计算机的运算和处理能力提出了较高的要求。

在本文所搭建的系统中, EPC 采用配置了普通酷睿 i5 处理器的计算机, 电脑终端采用配置了普通酷睿 i7 处理器的计算机, eNB 采用配置了酷睿 i7-8700 3.2 GHz 处理器以及 64 G 内存的计算机。此外, 为了降低计算机处理时延、提升其处理速度, 建议为电脑终端和 eNB 安装低延迟内核。

在操作系统方面, EPC、eNB 和电脑终端统一采用 ubuntu 系统。其中 ubuntu 16.04 是目前较常用的版本, 也是本文所使用的版本。

3 系统软件设计

在软件实现上, 采用开放空中接口 OAI 平台作为底层架构, 在 ubuntu 环境下, 利用 C 语言实现 LTE 系统的通信功能。OAI 无线技术平台是由 EURECOM 引领的开源通信平台, 符合 3GPP 协议标准^[20]。该平台基于通用服务器和软件无线电前端, 通过收发器连接实现其通信功能^[21], 支持普通电脑终端和商用终端的接入, 且可以根据研究需要对源代码进行修改和编译。

系统源代码主要分为两个部分: 核心网 (CN, core network) 和无线接入网 (RAN, radio access network)^[12]。其中, 核心网对应源代码中的 openair-cn 项目是对 LTEPC 的软件实现; 无线接入网对应源代码中的 openair-interface5G 项目是对终端和基站的软件实现, 其整体架构如图 3 所示。

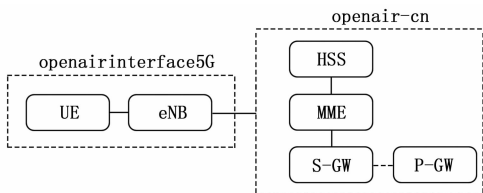


图 3 软件架构图

openair-cn 项目主要实现归属用户服务器 (HSS, home subscriber server)、移动管理实体 (MME, mobility management entity)、服务网关 (SGW, serving gateway)、PDN 网关 (PGW, PDN gateway) 等网元的功能。

openairinterface5G 项目可根据需求通过选择不同的编译参数, 令其实现 UE 或 eNB 的功能。该项目主要包括 openair1、openair2 和 openair3 等模块。其中, openair1 主要负责物理层实现, 实现基带信号的处理, 并为外部设备提供接口; openair2 主要负责相关协议栈的实现, 包括 RLC/PDCP/RRC/X2AP 等; openair3 主要负责 S1AP 等实现, 并提供了应用程序的接口^[22]。

4 系统搭建流程

4.1 EPC 的搭建

核心网的搭建主要分为 HSS、MME 和 SPGW (S-GW 和 P-GW) 共 3 部分, 在运行时按 HSS、MME 和 SPGW 的先后顺序启动, 故搭建时也采用了相同的顺序, 三部分部署在同一台通用计算机上, 组成了完整的核心网。

4.1.1 HSS 的安装

在联网状态下, 首先通过执行 HSS 脚本下载并安装一系列 HSS 所需的组件, 包括核心网数据库的创建与维护等。之后, 为 phpMyAdmin 组件设定密码并选择合适的 web 服务器, 其中密码可以根据提示选择随机生成或手动设置。在 web 服务器的选择方面, 本系统使用了 apache2 服务器。

然后使用超级权限将 OAI 脚本复制到系统对应目录中, 通过 nano 命令对所涉及的系统文件进行修改, 过程中需要重点关注数据库和本机相关信息。最后, 执行文件生成相应的 HSS 证书。上述准备工作完成后即可对 HSS 文件进行编译。首次运行时需要加载数据库, 之后则不再需要。通过浏览器访问 phpmyadmin, 打开数据库中的 mmeidentity 数据表, 将 mmeHost 字段中的对应记录修改为自己的主机名。

4.1.2 MME 的安装

首先, 执行 MME 脚本安装 MME 所需的各种组件, 可以通过 -h 命令查看各项参数的作用。然后将 OAI 包中提供的各种配置文件复制到系统目录下, 并根据需求修改配置文件的各项配置参数, 重点关注移动国家码 (MCC, mobile country code)、移动网络码 (MNC, mobile network code) 以及网络接口地址, 其中 MCC 和 MNC 在本系统中分别设置为 208 和 93, 网络接口地址可通过计算机上的 ifconfig 命令查看。编辑 MME 配置文件中的身份字段, 根据实际情况修改主机名。准备工作完成后即可进行 MME 文件的编译及 MME 证书的安装。

4.1.3 SPGW 的安装

将 OAI 包中的 SPGW 配置文件复制到系统目录下, 利用 nano 命令对配置文件进行修改。修改配置文件的过程中, 需重点关注 S-GW 和 P-GW 部分, 其中 S-GW 部分主要修改网口名称及接口地址, 本系统中 EPC 是单网卡配置, 具体网口信息可通过 ifconfig 命令查看; P-GW 主要修改 SGI 接口信息, 用于与外部互联网建立连接, 具体参数根据实际情况进行配置。

4.2 eNB 的搭建

4.2.1 环境配置

eNB 和电脑终端均涉及到计算机对 USRP 的操控, 同时计算机还要完成基带处理, 程序运行对实时性要求较高, 因此计算机性能配置的优劣在一定程度上会影响程序的运行效果。为了在现有硬件的基础上进一步提升性能, 推荐使用低延迟内核, 关闭 CPU 的节电特性和超线程等。低延迟内核的安装推荐先利用 apt-getupdate 命令更新包列表, 再执行低延迟内核的下载和安装, 这里不对低延迟内核的版本做硬性规定, 安装完毕后需重启才能生效。在系统选择界面通过高级启动项选择低延迟内核, 进入系统后可通过 uname 命令查看当前内核是否为低延迟。禁用 CPU 的某些特性操作因硬件而异, 主要包括 CPU 的 C-STATES、P-STATES、超线程、Frequencyscaling 特性等, 可通过进入计算机的 BIOS 或编辑系统文件等方式进行修改。利用 i7z 软件, 检查 CPU 的 C0 状态占比是否达到 100%, 如图 4 所示, 如未达到建议重新检查配置。通过上述操作, 可以充分发挥计算机的硬件能力, 进而从一定程度上降低对硬件配置的要求。

4.2.2 USRP 驱动安装

本系统使用的是 USRPB210。首先需要通过执行 build

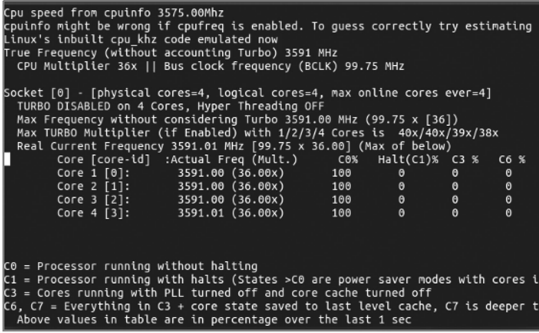


图 4 i7z 界面

_oai 文件的编译命令, 下载和安装 USRP 驱动。驱动安装完成后, 将 USRP 连接到计算机上, 通过 uhd_find_devices 命令查看 USRP 设备的连接情况。如果没能成功打印设备信息, 则需重新进行驱动的安装和检查。

4.2.3 参数配置

利用 sourceoaienv 命令加载环境变量, 执行此命令时一定要确保终端当前工作目录为 openairinterface5g。执行 build_oai 文件, 编译 eNB 相关文件并安装 eNB 必要的组件。编辑 eNB 的配置文件时, 可通过资源管理器进入配置文件目录, 根据实际需求选择合适的配置文件, 并重点关注配置文件中的带宽、频段及网络接口等信息。

本文所开发的系统采用 25 个 PRB (对应 5 MHz 带宽) 配置, 工作在 2.685 GHz 频段 (对应 Band7)。网络接口信息主要规定 EPC 中 MME 的 IP 地址和 eNB 的网口名称和 IP 地址, 根据计算机的实际 IP 地址进行配置即可。

4.3 电脑终端的搭建

电脑终端搭建过程中最重要的环节是填写鉴权信息。在编译电脑终端以前, 需要先填写电脑终端的身份识别信息, 使得电脑终端接入时能在 EPC 处顺利鉴权。从存储位置上看, 电脑终端的信息主要分为两部分: 一部分在 EPC 上, 使用 phpMyAdmin 维护; 另一部分在电脑终端自身计算机上, 在编译时会自动生成相应的鉴权信息。EPC 侧需要通过浏览器访问 phpMyAdmin, 查看 oai_db 数据库中的 users、mmeidentity 和 pdn 数据表, 选择所需的 UE 记录。其中, users 数据表主要记录 UE 的国际移动用户号码 (IMSI, international mobile subscriber identity) 和 MME 标识; mmeidentity 表记录 MME 标识对应的主机; pdn 表则记录 apn、pdn 和 pgw 等信息, 要确保所选记录对应的上述信息真实有效。电脑终端侧需要修改终端的鉴权文件信息, 对照 EPC users 数据表中选取的 UE 记录, 修改配置文件的 key、opc 和 hplmn, 使其与 EPC 数据库信息保持一致。

电脑终端中的通用计算机配置与 eNB 相似, 需要安装低延迟内核、禁用 CPU 特性、安装 USRP 驱动。在源代码的选择上与 eNB 保持一致, 编译时通过设定不同参数来指明是终端还是 eNB。

对准备好的源代码, 首先需要在 OAI 根目录下加载环

境变量, 以保证程序的正确运行, 然后通过 build_oai 来对电脑终端的相关文件、组件进行编译和安装。为方便调整运行命令、简化执行流程, 系统将终端的启动命令封装在启动脚本中, 这样在编辑终端的配置文件时只需关注脚本及脚本涉及各个执行文件即可。对照 4.2 节中 eNB 选取的配置文件修改电脑终端的脚本信息, 主要修改运行带宽、载波频率、通信模式、USRP 时钟等。最后根据实际配置环境修改脚本中各执行文件的路径及运行权限。

5 实验结果与分析

在整个 LTE 通信系统中, 大部分的启动命令都被封装在执行脚本中, 在系统启动时只需要按顺序运行各部分执行脚本即可, 简化了系统启动的流程; 除此之外, 部分运行参数也封装在对应执行脚本中, 大大降低了运行文件切换与修改的复杂度。本文首先开发了一套单用户通信系统, 其中仅包含最基本的网络节点, 即一个核心网、一个基站和一个电脑终端。之后, 重点研究了如何在单用户通信系统的基础上, 进行升级改造, 实现多用户以及多种终端的混合接入。

5.1 单用户通信系统

单用户通信系统主要由核心网、基站和一个电脑终端组成, 其组成架构如图 5 所示。其中, EPC 和 eNB 通过网线与交换机实现互联, eNB 与电脑终端通过 USRP 实现互联。为了降低实际传播环境对信号的干扰, 系统在实验前期采用了铜轴线直连的方式实现 eNB 和电脑终端的 USRP 连接, 在实验后期采用天线实现无线连接。系统的运行过程以及测试过程如下。

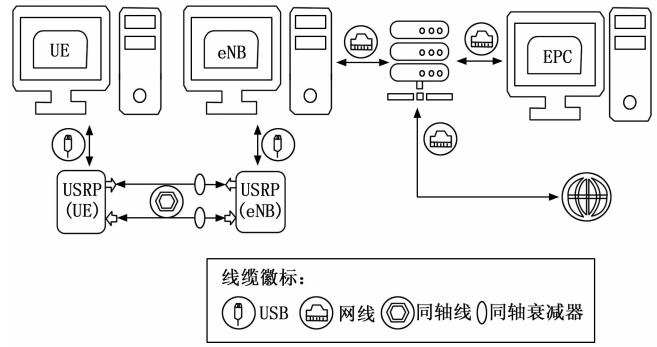


图 5 单用户通信系统架构

启动 EPC。每次运行 EPC 都需要打开 3 个终端窗口, 按顺序运行 HSS、MME、SPGW 的执行脚本。运行完毕后, 可以在 MME 窗口观察到电脑终端和 eNB 的连接信息, 如图 6 所示, 此时由于尚未启动 eNB, 也没有用户接入, 因此当前状态均为 0。

启动 eNB。将 USRP 接入 eNB 计算机, 通过驱动设备查找命令检测是否连接成功。在 OAI 根目录下加载环境变量, 运行 eNB 执行文件。eNB 正常运行的输出如图 7 所示; 此时, 在 EPC 的 MME 窗口重新观察额 NB 的数量, 可以看到数量变成了 1, 如图 8 所示, 表示 eNB 启动成功并连

入核心网。

```

===== STATISTICS =====
Connected eNBs | Current Status | Added since last display |
Attached UEs   |                |                          |
Connected UEs  |                |                          |
Default Bearers|                |                          |
S1-U Bearers  |                |                          |
===== STATISTICS =====

```

图 6 MME 窗口界面

```

===== STATISTICS =====
Connected eNBs | Current Status | Added since last display |
Attached UEs   |                |                          |
Connected UEs  |                |                          |
Default Bearers|                |                          |
S1-U Bearers  |                |                          |
===== STATISTICS =====

```

图 9 单用户接入时 MME 窗口界面

```

[PHY][I]initializing eNB 0 CC_id 0 (eNodeB_3GPP_sync to ext_device),
[HW][I][SCHED][eNB] eNB_thread_single started on CPU 0 TID 30048, sched_policy = SCHED_FIFO , prio
CPU 1 CPU 2 CPU 3
waiting for sync (eNB_thread_single)
Creating thread
[HW][I][SCHED][eNB] eNB_thread_prach started on CPU 2 TID 30052,
priority = 99, CPU Affinity= CPU_0 CPU_1 CPU_2 CPU_3
[HW][I][SCHED][eNB] eNB_thread_sync started on CPU 2 TID 30053, sched_policy = SCHED_FIFO , prio
CPU 1 CPU 2 CPU 3
waiting for sync (eNB_thread_sync)
Setting eNB buffer to all-RX
Sending sync to all threads
TYPE <CTRL-C> to TERMINATE
Entering ITTI signals handler
got sync (eNB_thread_single)
got sync (eNB_thread_sync)
[PHY][I]time in secs now: 48054664
[PHY][I]time in secs last pps: 45974549

```

图 7 eNB 运行界面

```

===== STATISTICS =====
Connected eNBs | Current Status | Added since last display |
Attached UEs   |                |                          |
Connected UEs  |                |                          |
Default Bearers|                |                          |
S1-U Bearers  |                |                          |
===== STATISTICS =====

```

图 8 eNB 接入时 MME 窗口界面

启动电脑终端。将 USRP 设备接入电脑终端的计算机并检测是否连接成功。在 OAI 根目录下加载环境变量, 运行电脑终端的执行文件。正常运行后, 能够通过 USRP 的数据收发与 eNB 建立连接, 并可以通过两者打印的实时日志和星座图观察连接情况。此时, EPC 的 MME 窗口也会显示终端的连接数量, 如图 9 所示。

在 3 个部分均正常启动和运行之后, 可以对整个系统的连通性和传输性能进行验证和测试。测试采用 5 M 带宽的配置文件, 利用 iperf 命令, 采用 UDP 的方式进行上行或者下行数据包大速率灌包发送。经测试, 在使用 USRPB210 的情况下, 上行速率最高可达 8.2 Mbits/s, 下行速率最高可达 16.2 Mbits/s, 且系统运行状态稳定。

5.2 多用户通信系统

本系统在单用户连通的情况下, 可通过新增计算机和 USRP 的方式来接入更多的电脑终端, 除此之外还可以采用烧制 SIM 卡的方式, 为系统接入商用终端。在多用户接入时, 需要重点考虑多用户的接入方式。本系统实现的多用户场景架构如图 10 所示, 其中红色部分为与单用户通信系统相比新增的内容。在单用户系统中, 电脑终端的接入方式只有一种, 即要么使用无线要么使用有线。而在多用户系统中, 由于存在多个终端, 因此可以同时演示有线和无线两种连接方式。此外, 多用户系统, 克服了单用户系统终端种类单一的弊端, 可以同时支持电脑终端和商用终端。

当存在多个电脑终端并采用有线连接时, 需要使用功分器和合路器将各终端的 USRP 连接到基站的 USRP 上。每台电脑终端都需要参照 EPC 注册表, 选择并配置不同的鉴权信息, 确保每个电脑终端有自己的 IMSI。

为了支持商用终端的接入, 需要为其烧制 SIM 卡。首先, 从 EPC 数据库中选取一条 UE 记录, 确保其相关的 apn、pdn 及 pgw 等信息真实有效, 然后利用写卡器将选取

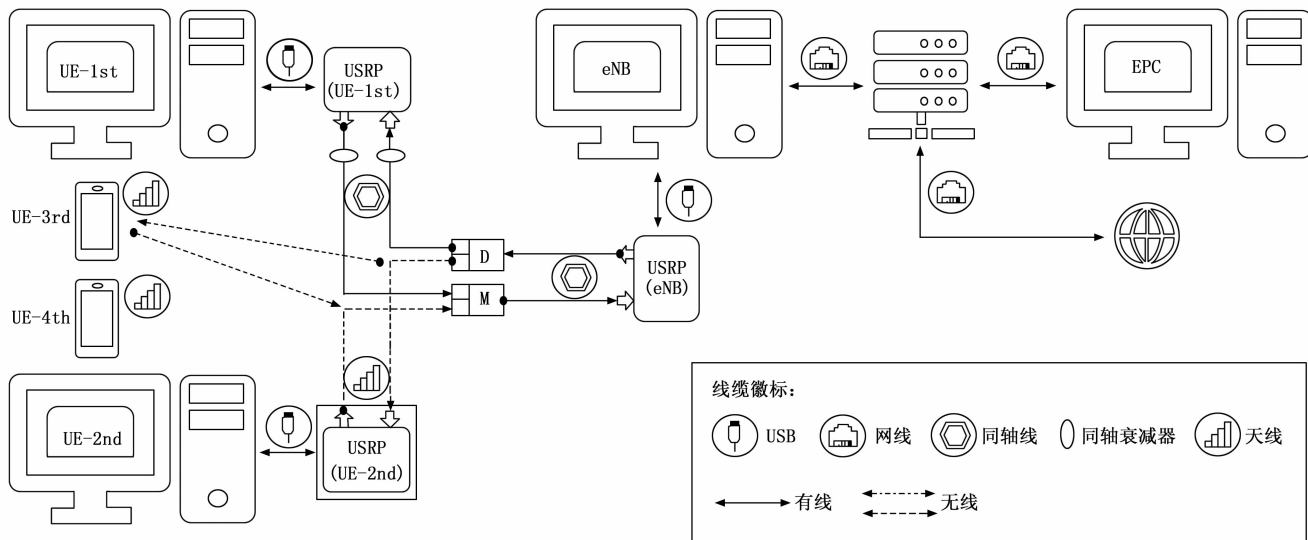


图 10 多用户通信系统架构

的 UE 信息写入 SIM 卡。值得注意的是，在商用终端的选择方面，要求终端支持所开发系统的工作频段。例如，在本系统中，频段为 2.685 GHz（对应 Band7）。将烧制好的 SIM 卡插入手机并打开数据网络，可以在 MME 窗口观察到 UE 的连接情况，也可以在手机设置中看到前文所设置的 MCC 和 MNC 标识，即 20893，如图 11 所示。



图 11 商用终端侧运营商信息

由于实验成本的限制，本系统在测试过程中，最多实现了 4 个终端的连接测试，包括一台有线电脑终端、一台无线电脑终端以及两台商用终端，4 台终端均可正常运行，同时在 EPC 的 MME 窗口也能够观察到 UE 的连接数量为 4，如图 12 所示。若具备更多的硬件条件，上述工作可以进一步扩展到更多终端的情况下。

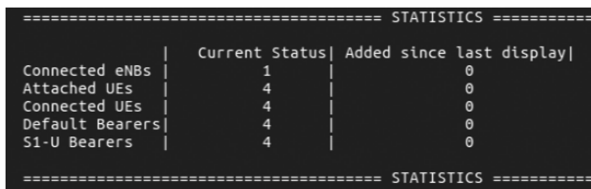


图 12 多用户接入时 MME 窗口界面

5.3 系统访问外网

在系统联通之后，需进一步验证所搭建的系统与外部网络的互联互通性能。

EPC、eNB 和 UE 顺利运行时，会自动建立一个内部网段，EPC 会为每一台接入的 UE 分配一个内部 IP。为了实现与外网的互联互通，首先需要将 EPC 连接至互联网。为了实现 UE 对外网的访问，需要为 UE 添加一个指向 EPC 的默认网关。此外，还需要修改 UE 的 DNS 配置文件，添加常用的 DNS 服务器。最后，查看网络接口信息，并设置 USRP 对应端口的 MTU 值。商用终端访问外网的操作因手机而异，需根据操作手册的说明，获取手机 root 权限，设置 MTU 值即可。图 13 给出了电脑终端访问外网观看视频的场景。

通过对系统进行多重操作和长时间的测试可知，eNB 通过一台 USRPB210 能够支持 2 台电脑终端和 2 台商用终端的同时接入，系统运行稳定，且 4 台终端均可维持较高的连接速度。



图 13 电脑终端访问外网

6 结束语

本文采用通用计算机与软件无线电平台 USRP 作为硬件基础，依托 OAI 平台作为软件架构，开发和实现了一套完整的 LTE 通信系统。系统通过连接到通用计算机上的 USRP 实现数据的收发，通过计算机来实现数据的处理，能够实现包括电脑终端和商用终端在内的多用户接入，能够正常访问外网并保持较稳定的网络连接。LTE 通信系统的实现为进一步开展真实环境下信道研究与实时性数据测量提供了一定的便利，同时也为后面开展 5G 通信系统的研究与实现奠定了重要基础。

参考文献：

- [1] CHENAND L, CHEN W, WANG B, et al. System-level simulation methodology and platform for mobile cellular systems [J]. IEEE Communications Magazine, 2011, 49 (7): 148 - 155.
- [2] WANG Y, XU J, JIANG L. Challenges of system-level simulations and performance evaluation for 5G wireless networks [J]. IEEE Access, 2014, 2: 1553 - 1561.
- [3] 杨莉, 樊岫云. 客舱数字压力控制系统的仿真分析 [J]. 计算机测量与控制, 2021, 29 (4): 100 - 104.
- [4] 康祥熙, 杜增, 张云涛, 等. 基于 Simulink 的电子对抗分布式仿真系统研究 [J]. 计算机测量与控制, 2021, 29 (3): 187 - 191.
- [5] 刘宴涛, 秦娜. 基于 OPNET 的按需组播路由协议仿真 [J]. 计算机应用, 2021, 41 (s1): 175 - 179.
- [6] 江甲沫, 冯浩, 杜滢, 等. 5G 通信系统半实物仿真方法研究 [J]. 信息通信技术与政策, 2019 (11): 1 - 7.
- [7] 管天, 卢泽新, 白建军. 半实物网络仿真技术研究 [C] // 中国电子学会青年学术年会, 2005: 67 - 71.
- [8] 何漫, 张恒, 刘佳, 等. 基于时分复用技术的组网地基雷达半实物仿真系统 [J]. 计算机测量与控制, 2017, 25 (10): 116 - 119.
- [9] 万抒, 毛玉明. 无线网络半实物仿真的 Linux 协议栈模型 [C] // 2007 中国西部青年通信学术会议论文集, 2007: 59 - 60.
- [10] 李佳迅, 张少杰, 赵海涛, 等. 基于 USRP2 的无线网络 MAC 协议半实物仿真系统设计与实现 [J]. 计算机应用, 2015, 35 (8): 2124 - 2128.

(下转第 222 页)