

文章编号:1007-5321(2018)05-0143-06

DOI:10.13190/j.jbupt.2018-177

面向 5G 无缝连接的云无线接入网系统及实现

王子凡, 温向明, 陈亚文, 路兆铭, 常东旭

(1. 北京邮电大学 网络体系构建与融合北京市重点实验室, 北京 100876;

2. 北京邮电大学 先进信息网络北京实验室, 北京 100876)

摘要: 基于云无线接入网(C-RAN)灵活的无线功能部署模式,提出了面向第5代移动通信系统(5G)无缝连接的C-RAN架构,继而基于开源虚拟化的软件无线电系统OpenAirInterface搭建了C-RAN演示平台. 面向5G无缝连接的C-RAN演示平台实现了完整的蜂窝通信功能,既可以对接虚拟化的核心网,也支持用户设备的高效无缝接入,并且具备较高的可扩展性,可以面向5G新型需求和场景进行持续更新.

关键词: 第5代移动通信系统; 云无线接入网; 无缝连接; 软件无线电

中图分类号: TN929.53

文献标志码: A

Cloud Radio Access Network System and Implementation for 5G Seamless Connection

WANG Zi-fan, WEN Xiang-ming, CHEN Ya-wen, LU Zhao-ming, CHANG Dong-xu

(1. Beijing Key Laboratory of Network System Architecture and Convergence, Beijing University of Posts and Telecommunication, Beijing 100876, China;

2. Beijing Laboratory of Advanced Information Networks, Beijing University of Posts and Telecommunication, Beijing 100876, China)

Abstract: Based on the flexible function splitting ability of cloud radio access network (C-RAN), a C-RAN architecture of seamless connection was presented for the fifth generation of mobile communications system (5G). Then the demonstration platform of the proposed C-RAN architecture was built based on OpenAirInterface, which is an open source virtualization enabled software-defined radio system. The built C-RAN demonstration platform realized all the communication function of standard 5G, which can not only connect the virtualized core network, but also support efficient and seamless connection of user equipment. This demonstration platform has high scalability, so that it can be continuously updated according to the new demand and application scenario of 5G.

Key words: the fifth generation of mobile communications system; cloud radio access network; seamless connection; software-defined radio

目前,第5代移动通信系统(5G,the fifth generation of mobile communications system)面临着智能移动设备和无线业务急剧增长导致的无线数据流量爆炸性增长的挑战,同时5G网络需要支持具有更高带宽、更低时延的增强移动宽带(eMBB, enhanced

mobile broadband)业务、支持海量用户连接的物联网(mMTC, massive machine-type communication)业务以及超高可靠性、超低时延的工业物联网等垂直行业应用(URLLC, ultra reliable & low latency communication)等^[1-2]. 网络接入节点的部署需要更加

收稿日期: 2018-08-05

基金项目: 中央在京高校重大成果转化项目(201501001); 国家自然科学基金项目(61801047)

作者简介: 王子凡(1996—), 男, 博士生, E-mail: wangzif@bupt.edu.cn; 温向明(1959—), 男, 教授, 博士生导师.

密集,然而传统的无线接入网络架构不够灵活,接入节点的密集部署会导致能耗的大幅增加以及接入节点之间的相互干扰。因此,急需一种新型的网络架构以更加高效的方式实现接入节点的密集部署。由于云无线接入网(C-RAN, cloud radio access network)在第3代移动通信(3G, the third generation of mobile technology)、第4代移动通信(4G, the fourth generation of mobile technology)中的成功应用,成为了5G接入网关注的焦点,面向新需求和新场景进行了创新演进。C-RAN利用云计算、虚拟化等技术,在降低运营、部署成本、提高资源利用效率方面具有极大优势,因此得到了广泛关注^[3]。2010年,中国移动发布了C-RAN白皮书^[4],首次详细阐述了C-RAN的架构,并定义为集中化处理(centralized processing)、协作式无线电(collaborative radio)和实时云计算构架(real-time cloud infrastructure)的绿色无线接入网构架(clean system)的综合体。C-RAN主要由中央处理单元(BBU, base band unit)池、射频拉远单元(RRU, remote radio unit)以及前传网络3部分构成。中央BBU池利用虚拟化及云计算技术集合基带处理资源,形成一个基带资源池,并对其进行统一的管理与动态分配,在提升资源利用率、降低能耗的同时,通过对协作化技术的有效支持而提升网络性能^[2]。RRU主要由射频部分构成,大量RRU通过有线或者无线前传网络连接到中央BBU池。前传网络技术标准主要有公共无线电接口^[5](CPRI, common public radio interface)和下一代前传网络接口^[6](NGFI, next generation fronthaul interface)。华为^[7]、中兴^[8]、Intel^[9]等公司也纷纷推出了面向运营商的商用C-RAN架构。

车联网和无人机等新型重要应用场景,对5G接入网的无缝连接、高可靠性和低时延通信能力提出了严峻挑战,无人驾驶车辆和无人机在通信过程中都处在高速移动的状态中,为了保证通信的可靠性,5G接入网必须能够保证无缝连接服务。C-RAN由于高效的网络架构及灵活的功能拆分部署能力,在提供无缝连接服务方面具备天然优势。

另一方面,随着4G网络的商用和推广,4G网络架构已经暴露出了一些很尖锐的问题,比如网络功能依赖于特定网络设备、网络架构僵化难以灵活升级等。为了解决当前问题,虚拟化5G的理念萌生,旨在开发开源工具和虚拟化工具来确保概念的快速验证、设计,以达到功能的快速推进。因此,开

源是5G演进过程中的一大重要发展趋势^[10]。开源和虚拟化的平台可以对5G的新型关键技术进行研究论证,有助于解决5G技术发展验证效率低、速度慢的难题;开源平台还可以平衡行业内、产业链中成本分配,尤其降低运营商和设备商成本的同时可以激活通信产业生态环境,促进产业快速迭代;除此之外,开源平台还可以针对不同规模、不同应用场景进行无线网络的灵活定制。当前国际上已经有几个开源的软件无线电(SDR, software-defined radio)通用移动通信技术长期演进(LTE, long term evolution)项目,例如OpenAirInterface、OpenLTE、srsLTE等。其中OpenAirInterface可以称作是通信民主化的领路人,其是一个开源SDR LTE项目,简称为OAI,由法国的EURECOM发起并且维护,是一个独立法律实体^[11]。OAI平台包括完整的接入网和核心网,旨在为当前LTE系统提供一套开放的协议生态系统,能够实现网络设备的互操作。OAI平台为5G虚拟化及新技术的快速验证部署提供了良好的工具。目前,已经有5G新空口(NR, new radio)、非正交多址接入(NOMA, non-orthogonal multiple access)、大规模天线技术(massive MIMO)等多种5G新技术基于OAI平台进行了部署验证^[12]。

1 C-RAN 架构

1.1 面向5G的C-RAN

在面向5G的演进过程中,C-RAN传统的BBU-RRU两级架构逐渐转为CU-DU-RRU三级架构。其中,中央BBU池根据实时功能和非实时功能进行分割,拆分为CU和DU两部分。CU主要负责非实时性的无线高层协议栈功能,同时也支持部分核心网功能下沉以及边缘应用业务部署;DU主要处理物理层功能和实时性需求的层2功能,部分物理层低层的功能也可以下移至RRU处实现^[13]。CU-DU的分离可以根据前传网络的资源进行切分,当前传网络传输条件比较理想时,CU和DU可以集中化部署,通过协作化技术来获得最大的增益;而当前传网络传输条件不理想时,DU可以分布式部署。对于C-RAN系统的功能划分,不同的社区和标准化机构也提出了多种不同的切分方案^[4,14-15]。从优化系统频谱效率的角度来看,下层的功能切分更有优势,即在RRU处部署部分物理层底层的功能。

1.2 C-RAN支持的灵活功能划分

前传网络的传输问题是C-RAN部署的一个重

要挑战。LTE 时代 CPRI 接口的引入在一定程度上缓解了 C-RAN 前传网络对传输资源的压力,但是 CPRI 较高的带宽要求导致成本增加,也限制了 C-RAN 更大规模的部署;同时,C-RAN 也需要保证中央 BBU 池和 RRU 间的灵活路由;此外,CPRI 接口还存在传输效率低、可扩展性差、灵活性差等缺点。因此,在面向 5G 进行演进的过程中,CPRI 接口已经难以满足 C-RAN 组网的传输需求^[4]。为了设计一个更加灵活、更低带宽的前传网络以解决 C-RAN 的传输问题,NGFI 技术应运而生。

NGFI 定义了下一代无线网络主设备中基带处理功能与远端射频处理功能之间的前传接口,其作为一个开放性接口,具备两大特征:一方面,重新定义了 BBU 和 RRU 的功能,将部分 BBU 处理功能移至 RRU 上,进而改变了 BBU 和 RRU 的形态,重构后分别重定义为无线云中心(RCC, radio cloud center)和射频拉远系统(RRS, radio remote system)。这里的 RCC 与第 1.1 节中提到的 CU 功能相同,都是云化的中央处理单元。RRS 包括天线、RRU 以及传统 BBU 的部分基带处理功能等。另一方面,基于分组交换协议将前端传输由点对点的接口重新定义为多点对多点的前端传输网络^[4]。为了满足 5G 网络的组网需求,在 RCC-RRS 间合理分配各层的功能是设计 NGFI 接口考虑的核心问题,将部分无线协议栈功能及算法处理功能移至 RRU 侧实现会在一定程度上增加 RRU 侧的计算复杂度。

C-RAN 架构允许无线网络中 RCC 与 RRU 之间的灵活分离,以在 RCC 和 RRU 中的处理之间进行最佳权衡。根据 NGFI 接口协议,对计算节点功能的划分提出了一些方案,划分方案如图 1 所示,根据不同的划分节点,C-RAN 系统具有不同的上下行速率和时延。其中,IF5 类似于传统的 BBU-RRU 接口,并传输基带时域同相信号 I (in-phase)/正交信号 Q (quadrature) 样本,没有进行功能划分,传统的基站采用的是这种划分方案。

1.3 面向 5G 无缝连接的 C-RAN 架构

针对车联网和无人机场景中的低时延、高可靠性以及无缝连接的需求,C-RAN 架构中 DU 和 RRU 之间的接口划分应该更加靠近物理层底层,因此在面向 5G 无缝连接的 C-RAN 系统中,更具优势的划分方案是将 RRU 和 DU 之间的接口划分确定在离散傅里叶变换(FFT, fast Fourier transformation)/快速傅里叶反变换(IFFT, inverse fast Fourier trans-

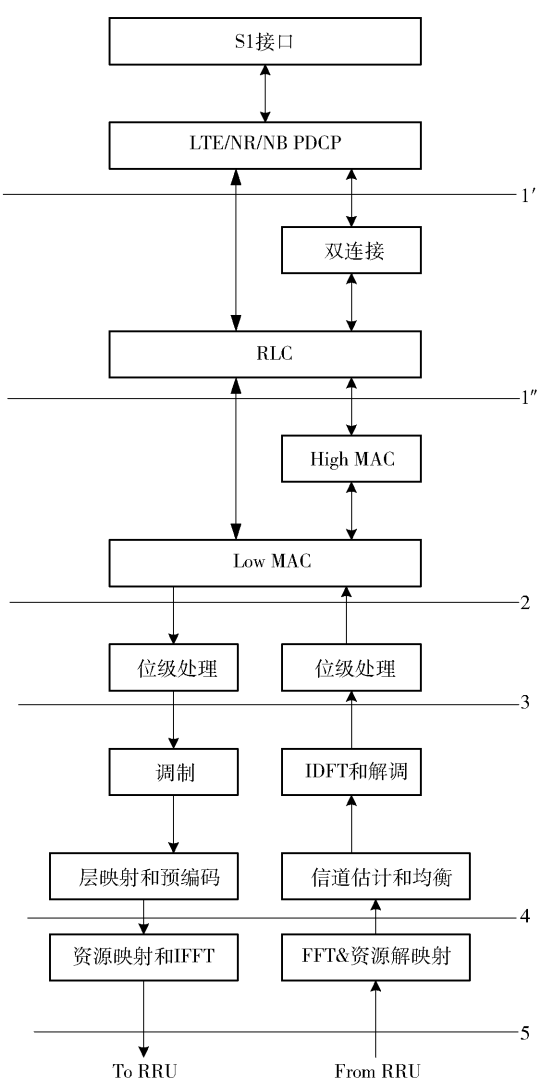


图 1 NGFI 功能划分

form)和资源映射之间,此时 RRU 具有部分物理层低层的功能。当系统将数据流传输到用户时,将即时估计的上行信道与计算的校准系数一起用于估计下行发射端信道状态信息和波束赋形权重,然后中央控制器向每个 DU 发送波束赋形权值以执行波束形成预编码,而预编码的正交频分复用(OFDM, orthogonal frequency division multiplexing)符号则通过 IF4p5 接口发送到 RRU。部分基带处理功能部署在 RRU 侧,虽然增加了 RRU 侧的计算复杂度,但是同时在一定程度上降低了 RCC 处的计算量,除此之外还可以通过部署更多数量的 RRU 来提高 C-RAN 系统的灵活性和覆盖范围。

2 云无线接入网系统实现

2.1 OAI 开源软件无线电平台

OAI 是一个开源的 SDR 平台,SDR 平台旨在通

过使用软件在通用的硬件平台上实现多种通信协议的功能. 传统的基站体积很大,由复杂的硬件电路构成,但是 SDR 基站是一种小型化基站,可以通过软件来实现通信功能,是未来无线通信系统的一大发展趋势. 目前,常用的 SDR 系统为基于通用处理器(GPP-based, general purpose processor-based)的 SDR 系统,GPP 可以是日常使用的台式机或者是笔记本电脑. GPP-based SDR 系统由 GPP 和射频外设两部分组成. 射频外设的种类众多,有 USRP、bladeRF、ExpressMIMO 等,用于信号的发射和接收.

OAI 的宗旨是为第三代合作伙伴计划(3GPP, the 3rd generation partnership project)蜂窝系统的核心网(EPC, evolved packet core)和演进的 UMTS 无线接入网(E-UTRAN, evolved UMTS terrestrial radio access network)协议提供开源生态系统,与网络设备实现互操作. OAI 是工业和学术界的一个潜在的交互工具,能够提供两者之间迫切需要的沟通机制,使学术界更接近由无线通信行业中的工业界人士控制的复杂现实世界系统. OAI 系统设计遵循 3GPP 标准协议,接入网络由模拟商用手机、USRP 伪基站组成,核心网由 HSS、SPGW 和 MME 等模块组成. 利用 OAI 系统,模拟商用手机可以进行稳定的语音、视频等数据业务通信.

OAI 工程在软件方面可以完整地实现 3GPP LTE 协议栈,其中,LTE 协议栈由控制平面协议栈和用户平面协议栈构成. 现阶段,OAI 平台软件部分使用 C 语言来实现,并且运行在 Linux 操作系统上.

在硬件方面,OAI 开源软件平台本身支持多个射频前端,例如 USRP B210、USRP x310、LimeSDR 等. 这些射频前端可以支持更高的传输带宽,并且可以同步,C-RAN 演示平台使用 USRP B210 作为射频前端.

2.2 C-RAN 演示平台

本文在 OAI 基础上设计的 C-RAN 演示平台可以支持时分双工(TDD, time division duplexing)和频分双工(FDD, frequency division duplexing)两种双工方式.

C-RAN 演示平台采用扁平化的网络架构,包含 RCC 和 RRU 两种网络实体,其中 RCC 是逻辑节点而非物理实现,无线接入网部分负责一个或多个小区中所有与无线相关的功能.

如图 2 所示,RCC 通过 S1 接口连接到 EPC,具体的说,RCC 通过 S1 用户平面部分(S1-U),连接到

服务网关(SGW, serving gateway),并通过 S1 接口控制平面部分(S1-C),连接到移动性管理实体(MME, mobility management entity). 为了达到负载分担和冗余的目的,一个 RCC 可以连接到多个 MME/SGW.

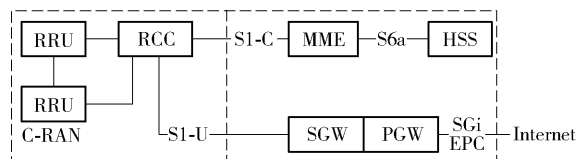


图2 OAI系统整体架构图

C-RAN 演示平台代码由 cmake_targets、openair1、openair2、openair3、common、targets 六部分组成. 每个部分都有其不同的作用,对各个部分功能说明如下:

1) cmake_targets 建立所有目标的新目录,包含 build_cran 脚本,作用是编译 C-RAN 演示平台运行环境.

2) openair1 存储 C-RAN 演示平台物理层和物理层射频仿真的主要函数.

3) openair2 存储实现 LTE 层 2 功能的主要函数,包括 X2 接口以及 RCC 的应用和分组数据汇聚等层 2 子层协议的实现.

4) openair3 存储实现 LTE 协议层 3 功能的主要函数,主要是控制平面.

5) common 存储 C-RAN 演示平台中各模块公用的工具,比如各种可视化工具.

6) targets 主要存储 C-RAN 演示平台硬件的具体代码(驱动、工具、仿真、lte_softmodem 等).

面向 5G 无缝连接的 C-RAN 系统架构如图 3 所示. 其中,核心网部分由 MME、HSS、SPGW 构成,核心网部署在一个迷你的 Intel 主机上,而由于 RCC 部分需要进行大量的信号处理运算,需要占用大量的 CPU 和内存资源,因此将 RCC 部署在 Dell System 3500X M5 的高性能服务器上,此时 RCC 是虚拟化的,RCC(或 CU)包括无线资源控制(RRC, radio re-

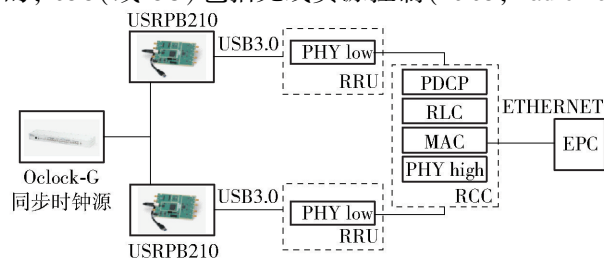


图3 C-RAN架构

source control) 协议、分组数据汇聚协议(PDCP, packet data convergence protocol)、无线链路层控制协议(RLC, radio link control)、媒体接入控制协议(MAC, media access control)、物理层高层的功能以及多个RRU的管控调度工作。RRU由Intel迷你主机、USRP和天线构成,RRU承担一部分物理层低层的功能。RCC可以和多个RRU相连,此时部署RCC代码的服务器和部署RRU的迷你主机分别承担一部分基带数据处理的功能。部署RCC(或CU)代码的服务器和部署RRU代码的迷你主机通过交换机用光纤进行连接,迷你主机与USRP通过USB3.0数据线进行连接。在当前的架构下,每个RRU都通过双工器连接一根天线。为了实现分布式RRU之间的协同工作,需要对RRU进行同步,采用一个外部Oclock-G时钟源,通过PSS和SSS信号实现多个RRU的同步。基于上述C-RAN架构成功实现了无缝连接的C-RAN演示平台,RCC工作在FDD模式下,工作在Band7,下行频率为2.68 GHz。这里以两个RRU为例进行了UE移动过程中的无缝连接情况的测试工作,其中两个RRU部署在相距100 m的位置。

在3GPP中定义了传输模式(TM, transmission mode)和天线端口的概念。本次搭建的C-RAN演示平台可以支持TM1和TM2两种模式,并且具有TM3和TM4的实验版本,同时TM8和TM9目前正在开发中。使用OAI UE分别进行了TM1和TM2两种模式下RRU的传输测试,其中OAI UE由迷你主机连接USRP以及天线构成。在进行两个RRU测试之前,首先进行了单个RRU的收发测试工作,在TM1和RM2模式下单个RRU都可以正常工作。在此基础上,分别在TM1和TM2两种模式下对两个RRU收发工作进行了测试。在TM1模式下,由于每个端口传输数据相同,所以两个RRU同时发送相同的数据;而在TM2模式下,需要对数据进行处理,对数据进行分流,利用奇偶来将数据分配给不同的RRU进行传输。在OAI UE上可以通过enablse软件示波器得到下行链路的控制信息,如图4和图5所示。图中呈现出了在当前子帧上发送的数据和关于为上行链路分配给UE的资源的信息,这些控制信息由物理下行链路控制信道(PDCCH, physical downlink control channel)执行,更确切地说,该信道携带涉及UE的资源分配的下行链路控制信息(DCI, downlink control information)。在图中,还呈

现了由物理下行链路共享信道(PDSCH, physical downlink shared channel)传输的用户下行链路业务,该信道还携带下行链路共享信道(DL-SCH, downlink share channel)信息。在两个RRU的覆盖范围内,C-RAN系统可以与UE保持通信,可以保证UE与信道状态最好的RRU连接,同时C-RAN演示平台可以保证移动中的UE的无缝连接。此外,利用Wireshark工具进行了各个接口数据的采集,包括RCC和两个RRU之间的接口、S1接口等。

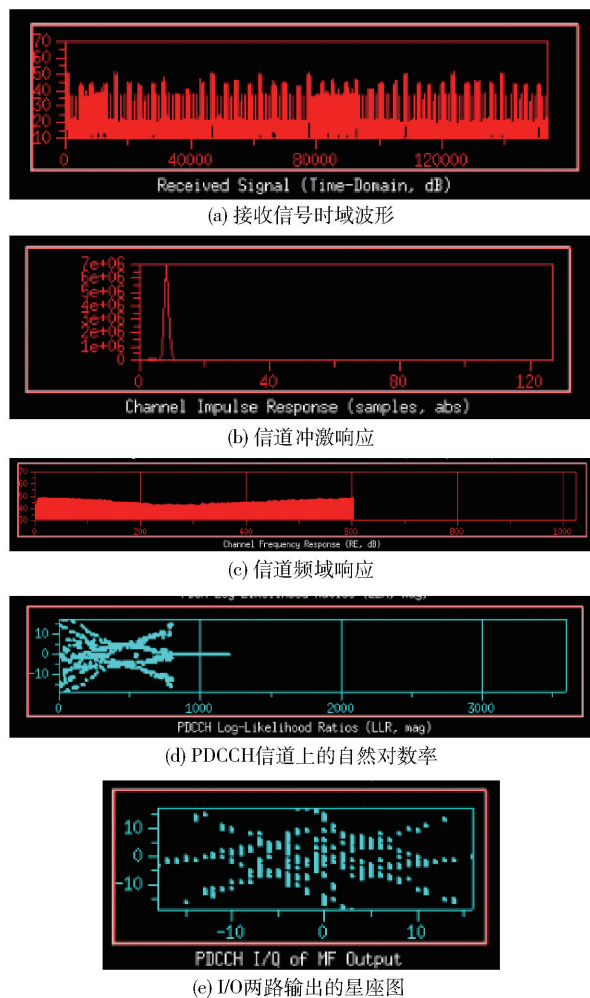


图4 TM1模式下RRU传输情况

3 C-RAN平台的不足及未来方向

目前,OAI开源社区对于接入网络平台的开发仍在进行,所提出的面向5G无缝连接的C-RAN系统也为OAI开源社区的研究做出了巨大贡献。今后需要在更复杂的环境中对平台进行测试,同时在C-RAN平台上也可以对5G的新算法进行验证。

未来的研究中,C-RAN平台会应用到实际的场

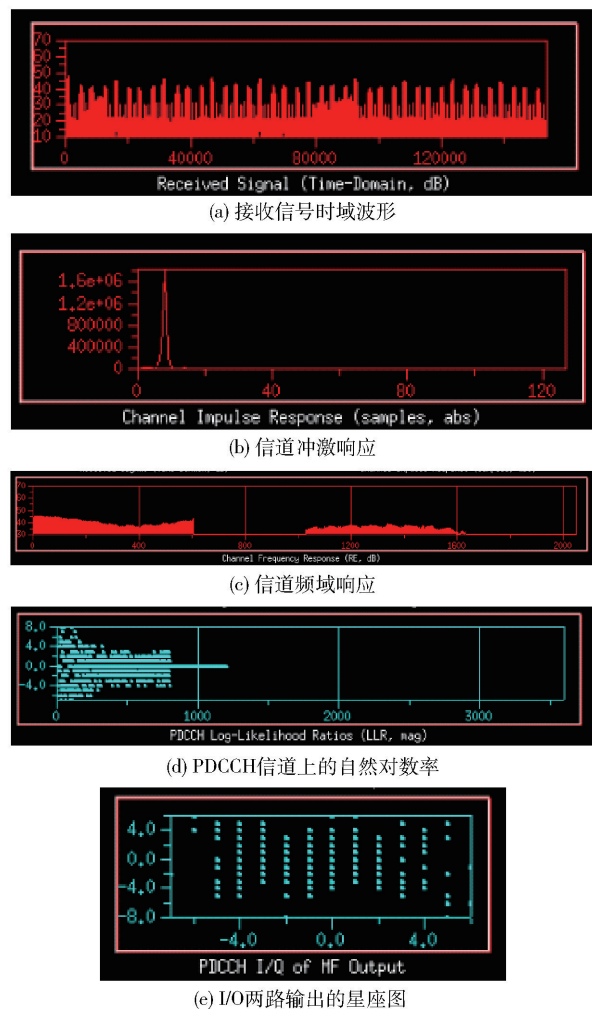


图5 TM2 模式下 RRU 传输情况

景下进行测试工作。车联网和无人机等作为重要应用场景,对 5G 接入网的无缝连接、高可靠性低时延通信能力提出了严峻挑战,如何保证高速移动中的车辆和无人机与不同的 RRU 之间的无缝连接,将是未来该 C-RAN 演示平台研究和设计的重要方向。

4 结束语

C-RAN 技术作为 5G 的关键技术之一,会在 5G 通信中具有广泛的应用。基于 OAI 搭建的 C-RAN 平台作为一个实际的通信平台可以验证各种新的算法,在实际的环境中测试算法的性能。OAI 作为一个开源的平台在 5G 的通信研究中扮演很重要的角色,其不仅可以提供各种算法在实际环境中的测试,还可以作为标准提案 (ITU、3GPP) 的验证平台。笔者介绍了面向 5G 无缝连接的 C-RAN 系统及实现,以 2 个 RRU 为例,展示了移动中的用户的无缝连接,指出了目前平台存在的问题以及未来的研究

方向。

参考文献:

- [1] NGMN Alliance. NGMN 5G white paper v1.0[EB/OL]. (2015-02-17)[2018-07-20]. <https://www.ngmn.org/5g-white-paper/5g-white-paper.html>.
- [2] Chih-Lin I, Rowell C, Han Shuangfeng, et al. Toward green and soft: a 5G perspective[J]. IEEE Communications Magazine, 2014, 52(2): 66-73.
- [3] Checko A, Christiansen H L, Yan Y, et al. Cloud RAN for mobile networks: a technology overview[J]. IEEE Communications Surveys and Tutorials, 2015, 17(1): 405-426.
- [4] China Mobile Research Institute. C-RAN: the road towards green RAN[EB/OL]. (2011-10-25)[2018-07-20]. <https://pdfs.semanticscholar.org/ea3/ca62c9d5653e4f2318aed9ddb8992a505d3c.pdf>.
- [5] Ericsson A B, Huawei Technologies Co., Ltd., NEC Corporation, et al. eCPRI specification V1.1. Common public radio interface: eCPRI interface specification[EB/OL]. (2018-01-10)[2018-07-20]. http://www.cpri.info/downloads/eCPRI_v1_1_2018_01_10.pdf.
- [6] China Mobile Research Institute, Alcatel-Lucent, Nokia Networks, et al. White paper for next generation fronthaul interface[EB/OL]. (2015-06-04)[2018-07-20]. <https://docplayer.net/46899964-White-paper-of-next-generation-fronthaul-interface.html>.
- [7] Huawei. Cloud RAN & next-generation mobile network architecture[EB/OL]. (2017-04-15)[2018-07-20]. <https://www-file.huawei.com/-/media/CORPORATE/PDF/mbb/cloud-ran-the-next-generation-mobile-network-architecture.pdf?la=en>.
- [8] ZTE. ZTE green technology innovations white paper[EB/OL]. (2011-12-28)[2018-07-20]. https://www.zte.com.cn/mi_imgs/global/investor_relations/353156/P020120918593482919117.pdf.
- [9] Intel. Intel heterogenous network solution brief[EB/OL]. (2011-10-11)[2018-07-20]. <https://www.intel.com/content/dam/www/public/us/en/documents/solution-briefs/communications-heterogeneous-network-brief.pdf>.
- [10] Sue Marek. Open source software & security are key to 5G[EB/OL]. (2016-09-08)[2018-07-20]. <https://www.sdxcentral.com/articles/news/open-source-software-security-key-5g/2016/09/>.

(下转第 158 页)

- [7] Liang L, Xu W, Dong X. Low-complexity hybrid precoding in massive multiuser MIMO systems[J]. *IEEE Wireless Communications Letters*, 2014, 3(6): 653-656.
- [8] Zhu X, Wang Z, Dai L, et al. Adaptive hybrid precoding for multiuser massive MIMO[J]. *IEEE Communications Letters*, 2016, 20(4): 776-779.
- [9] Lee J H, Kim M J, Ko Y C. IA-based hybrid beamforming design in MIMO interference channel[C]// *International Conference on Advanced Communication Technology*. Bongpyeong: IEEE, 2017: 358-361.
- [10] Yang J, Wei Z, Zhang X, et al. Correlation based adaptive compressed sensing for millimeter wave channel estimation[C]// *Wireless Communications and Networking Conference*. San Francisco: IEEE, 2017: 1-6.
- [11] Mallat S G, Zhang Z. Matching pursuits with time-frequency dictionaries[J]. *IEEE Trans on Signal Processing*, 1993, 41(12): 3397 - 3415.
- [12] Tropp J, Gilbert A C. Signal recovery from random measurements via orthogonal matching pursuit [J]. *IEEE Transactions on Information Theory*, 2007, 53(12): 4655-4666.
- [13] Donoho D L, Tsai Y, Drori I, et al. Sparse solution of underdetermined systems of linear equations by stagewise orthogonal matching pursuit[J]. *IEEE Transactions on Information Theory*, 2012, 58(2): 1094-1121.
- [14] Spencer Q H, Swindlehurst A L, Haardt M. Zero-forcing methods for downlink spatial multiplexing in multiuser MIMO channels [J]. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 2004, 52(2): 461-471.
- [15] Stankovic V, Haardt M. Generalized design of multiuser MIMO precoding matrices[J]. *IEEE Trans Wireless Commun*, 2008, 7(3): 953-961.
- [16] Palomar D P, Lagunas M A, Cioffi J M. Optimum linear joint transmit-receive processing for MIMO channels with QoS constraints[J]. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 2004, 52(5): 1179-1197.

(上接第148页)

- [11] Nikaein N, Knopp R, Kaltenberger F, et al. Demo: OpenAirInterface; an open LTE network in a PC[C]// *Proceedings of the 20th Annual International Conference on Mobile Computing and Networking*. New York: ACM, 2014: 305-308.
- [12] Nikaein N, Marina M K, Manickam S, et al. OpenAir-Interface; a flexible platform for 5G research[J]. *ACM SIGCOMM Computer Communication Review*, 2014, 44(5): 33-38.
- [13] China Mobile Institute. Toward 5G C-RAN: requirements, architecture and challenges [EB/OL]. (2016-11-18) [2018-07-20]. <https://max.book118.com/html/2017/0607/112211144.shtm>.
- [14] IEEE. P1914. 1 standard for packet-based fronthaul transport networks [EB/OL]. (2016-06-15) [2018-07-20]. https://standards.ieee.org/project/1914_1.html.
- [15] 3GPP. TS 38.801 “radio access architecture and interfaces” [EB/OL]. (2016-12-08) [2018-07-20]. http://www.3gpp.org/ftp//Specs/archive/38_series/38.801/.