

云化移动接入网中前传链路负载自适应技术

李隆胜¹ 毕美华^{1,2} 胡卫生¹

(1. 上海交通大学 区域光纤通信网与新型光通信系统国家重点实验室, 上海 200240;

2. 杭州电子科技大学 通信工程学院, 浙江 杭州 310018)

摘要 以5G为代表的未来移动接入网将采用集中式的云化网络架构,即基带处理单元(base-band unit, BBU)部署在中心机房,而远端射频单元(remote radio head, RRH)只保留射频处理功能或部分基带处理功能,二者的通信由前传链路承载。目前,以基于以太的通用公共射频接口(Ethernet common public radio interface, eCPRI)为代表的采用移动通信物理层功能单元解耦的前传接口逐渐成为业界的一大主流,随之带来的问题是在这种接口划分下,前传接口数据量会随着移动业务量的变化而波动。为了保证高负载时期的链路传输质量,部署的链路容量往往参考链路峰值速率,这导致链路的利用率整体较低。针对此问题,本文提出了一种弹性量化精度的方案,在高负载状态采用低量化位数来降低前传接口链路的峰值速率,从而节省链路资源的部署。该方案通过仿真与实验进行了验证,结果显示此方案可以大约节省38%的链路资源。

关键词 光纤通信;功能单元解耦;前传接口;通用公共射频接口;量化精度

中图分类号 TN.913.7

文献标识码 A

0 引言

近年来,随着第五代移动通信网络(5th generation mobile communication network, 5G)的标准化稳步推进,移动通信网络架构也正经历着革命性的变化。为了适应5G技术的发展,作为移动通信网络中离用户最近的一段传输网络,无线接入网面临着多方面的挑战。在传统移动通信系统中,无线终端通过无线空口传输实现与无线基站的通信。基站在接收到无线信号后进行射频信号处理与基带信号处理,处理后的数据包通过回传网络被传输至移动核心网关。而针对未来5G与后5G的新型业务,如增强移动宽带业务(enhanced mobile broadband, EMBB)、海量机器类通信(massive machine type communication, MMTTC)以及超可靠、低时延通信(Ultra reliable and low latency communication, URLLC),将对接入网的提出多维度的要求,例如大容量,低传输时延,大连接数量等。为了满足这些新型业务的要求并降低网络部署与运维成本,下一代移动接入网将采用以基带处理资源集中部署为主要特点的云化网络架构^[1-3]。云化架构下,远端射频单元仅保留物理层射频处理单元与部分物理层低层基带处理单元,高层基带处理单元与无线媒体接入控制(media access control, MAC)相关的处理资源被集中部署于中心机房中,以实现高效运维,以及协同传输(coordinated multi-point, CoMP)和资源共享等5G新技术^[4]。为了有效实现CRAN(centralized radio access network)的构架,BBU与RRH的通信一般由前传光纤链路承载。当前已有的前传接口规范中^[5-7],基于以太网的通用公共无线接口eCPRI采用了在无线基带处理的物理层进行功能单元解耦(intra-PHY split),即划分选项Option 7,且相对于其他划分方式,eCPRI采用的功能单元解耦在最大程度保留云化架构功能优势的前提下最大地节省了前传带宽,因而受到了业界的广泛重视,被认为是很有前景的接口标准。然而,这种功能单元解耦的接口将会带来以下问题:(1)一方面通过汇聚多个小区的流量实现前传链路上的统计复用增益;(2)另一方面由于接口速率和终端用户的实际通信量高度相关,导致链路的实际速率随时间有明显的变化^[8,9],这给链路的实际部署带来了极大的浪费。同时,经前期调研可知^[8],如果前传系统按照峰值速率83%来部署链

收稿日期:2018-04-29

基金项目:国家自然科学基金项目(61431009,61501157)资助

通讯作者:胡卫生,男,汉族,博士,教授,博士生导师,研究方向:光通信, E-mail: wshu@sjtu.edu.cn.

路容量,链路的平均利用率只有 40%,而如若减少部署的容量,必将导致链路拥塞^[10]. 本文针对此问题,基于前期的工作^[11],提出了一种采用弹性量化精度的 eCPRI 接口方案来减少链路的峰值速率以最终达到节省部署链路资源的目的. 通过搭建符合 3GPP 标准^[12-16]的上行无线传输系统,证明了所提量化精度自适应技术的有效性.

1 物理层功能分层的前传结构以及冗余度分析

1.1 物理层功能分层

如图 1 所示,根据 eCPRI 采用的 Option 7,即资源解映射之后的频域信号采样数据通过前传进行传输,移动基带处理可以分为多个功能层,功能层被分配到不同物理位置的处理单元处执行. 该系统中,对于上行信号,从用户设备(user equipment, UE)发射出的无线信号经过无线信道传播,在 RRH 中被天线接收. 然后,经过 RRH 处理得到解映射后的资源颗粒,即频域信号采样需要进行量化,串并转换后在 eCPRI 链路中传输. 其中,量化的精度直接影响了前传链路速率. 具体的,对于承载频域信号的 eCPRI 而言,其量化精度相较于传统时域采样的 CPRI 有显著的下降. 同时,在一般情况下,对于同相或正交分量的采样,量化精度大约是 8-10 位^[2,17].

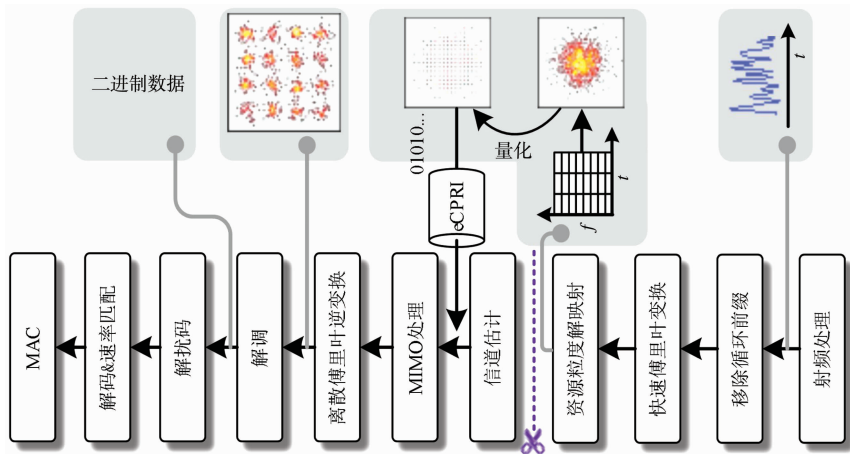


图 1 基带信号处理功能层及各功能层接口处信号类型

1.2 量化精度冗余度分析

首先,对于上行信号而言,RRH 处接收信号的信号与干扰噪比(signal to interference and noise ratio, SINR)是由无线信道的质量决定;同时在前传接口处,更高的量化精度能够减少由于量化带来的 SINR 的恶化. 图 2 显示了量化前后的 SINR 的变化. 由该图易知,当信号本身的 SINR 比较小的情况下(小于 5 dB),较低位的量化位数(约 4 位)就足以提供较好的信号保真度;但当信号本身质量较高(大于 5 dB),就需要较高的量化位数(5 位以上). 因此,由该结果可知,只要能够对前传接口处的信号的质量加以区分,就可以检测出潜在的冗余量化位数,提高传输效率.

从上述结果可以看出,之所以有冗余的量化位数,是因为信号量化后的量化比特随其权重不同,所包含的信息量也不同. 为了进一步精确描述量化比特的信息量,本文进行如下理论分析. 而对于上行采用单载波频分复用接入(single carrier frequency multiplexing division access, SCFMDA)的信号,其频域采样满足正态分布,如图 3 的插图(i)所示. 假设采样值的分布遵循 $(0, \sigma^2)$ 的正态分布,无线信道的带宽以及加性高斯白噪声的功率分别为 BW 和 N. 假设量化方式采用的是均匀量化,并且量化的动态范围设为 6σ . 正态分布 99.7% 的采样点都分布于此范围内. 对于 n 比特量化的系统,量化噪声是加性的,其功率为 $(6\sigma/(2n-1))^2/12$. 为了进一步验证,本文基于香农定理来进一步量化该系统的信息容量. 为此,本文假设量化噪声 s_n 的分布近似于白噪声,即 $s_n \sim (0, (6\sigma/(2n-1))^2/12)$, 设 C_n 代表在 n 位量化精度下的完整的光纤无线链路所能承载的信息容量. 根据上述假设可以得到系统的容量 C_n .

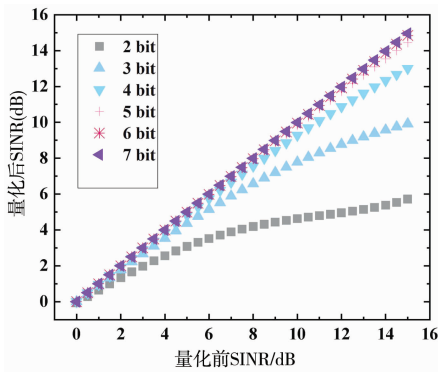


图2 量化前后信号信干噪比关系

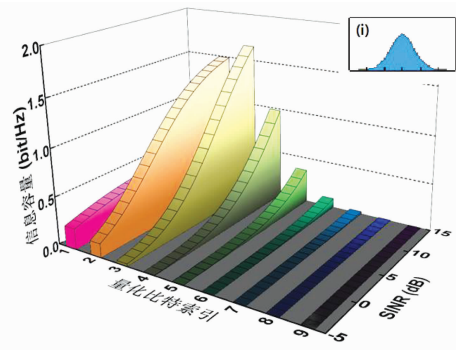


图3 量化比特所包含信息量

$$C_n = BW \log_2 \left(1 + \frac{\sigma^2}{N + (6\sigma / (2^n - 1))^2 / 12} \right), (n \geq 0). \quad (1)$$

进一步定义每一独立比特所包含的信息量 c_n , 其中 c_n 可以由 $c_n = C_n - C_{n-1}$, ($n \geq 1$) 计算得来. 根据此关系, 图3给出了每一个 c_n 量化比特在不同 SINR 下所贡献的信息量 c_n . 其中, SINR 用 σ^2/N 度量. 可以看到, 尽管需求的量化精度大约为 8-10 bit, 但是有很大一部分量化比特所具有的信息量十分小. 在此情况下, 如果降低这部分比特, 无线信号质量会有轻微的影响, 单个用户终端的速率只会有极少的降低, 但却能够有效地减小前传接口处的带宽. 因此, 在高负载情况下, 为了提升总体的前传链路效率, 牺牲掉不重要的量化比特, 即降低量化解码, 来换取承载更多无线资源块 (resource block, RB) 的能力是值得考虑的. 在后文的仿真系统中, 量化解码力, 前传容量与移动吞吐量这三者的关系将进一步研究, 结论表明, 通过减少一定的量化解码力冗余, 所需的前传容量将极大地被降低, 且对于无线吞吐量带来的影响极低. 此外, 在高负载场景下, 由于无线干扰变得严重, 信号质量的分布会向较差的区间偏移. 根据文献[1]的结果, 在 50% 负载情况下, 平均 SINR 下降达 5.33 dB, 而在 100% 负载情况下, 平均 SINR 下降达 8.28 dB. 因而, 根据上述的特性, 很容易得到在高负载情况下, 信号质量变差, 前传量化比特本身就很高, 具有较大的压缩空间.

2 基于无线信号质量监测的弹性量化方案

根据上文分析可知在前传系统中, 高比特量化精度带来了潜在的冗余量化比特, 而这部分比特相对而言是可以被牺牲以换取更高的传输效率. 因此, 为了实现有效的比特压缩, 需要能够定位这些冗余比特, 这就需要无线信号质量的信息来辅助. 值得一提的是, 为了实现信道传输能力的最大化, 移动系统标准中就采用了自适应编码调制技术, 而这一技术的正是基于对无线信号质量的监视, 即无线信号质量本身就可以从无线系统中获取. 图4给出了在无线信号质量反馈辅助下的前传接口逻辑图. 上行的信号数据首先通过上行链路传输到 BBU, BBU 实现剩余的物理层高层处理 (LTE high-PHY) 后, SINR 信息就被获取. SINR 信息通过 eCPRI 提供的下行实时监控通道反馈回到 RRH 处, RRH 最后根据获得的 SINR 调整量化精度, 实现弹性量化精度的功能.

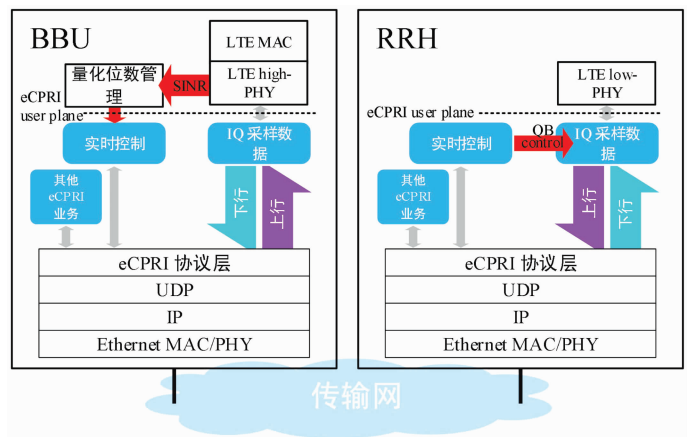


图4 SINR 辅助下的弹性量化精度接口框图

3 仿真系统及实验描述

为了进一步找到最优化的弹性量化精度的方案配置, 并检测本文所提方案的可行性, 我们设计了一个离线 LTE 系统模型, 实现了 low-MAC 以及 PHY 层的处理功能. 图5给出了系统的工作流程以及主要的实验

装置的配置. 首先,用户设备 UE 处生成标准的 LTE 信号,而后信号通过无线信道模型的传输. 在 RRH 侧,经过低 PHY 层的处理后,解映射出来的资源粒度需要被量化以装载到 eCPRI 接口上. 本文中主要对比了所提的弹性量化方案以及 8 bit 固定量化方案下的综合性能. 光纤传输之后,在 BBU 模块,完成剩余的高层 PHY 层处理. 最后,处理完成的数据通过了循环冗余校验的传输信息将会被计入吞吐量中. 在仿真和实验系统中,用到的主要参数见表 1 所示. 基于此模型,监测得到的未被量化的信号的信干噪比的分布图如图 5(b)所示,且后续的结果都将基于此结果. 图 5(c)到 (g)展示了前传各个接口处的信号格式.

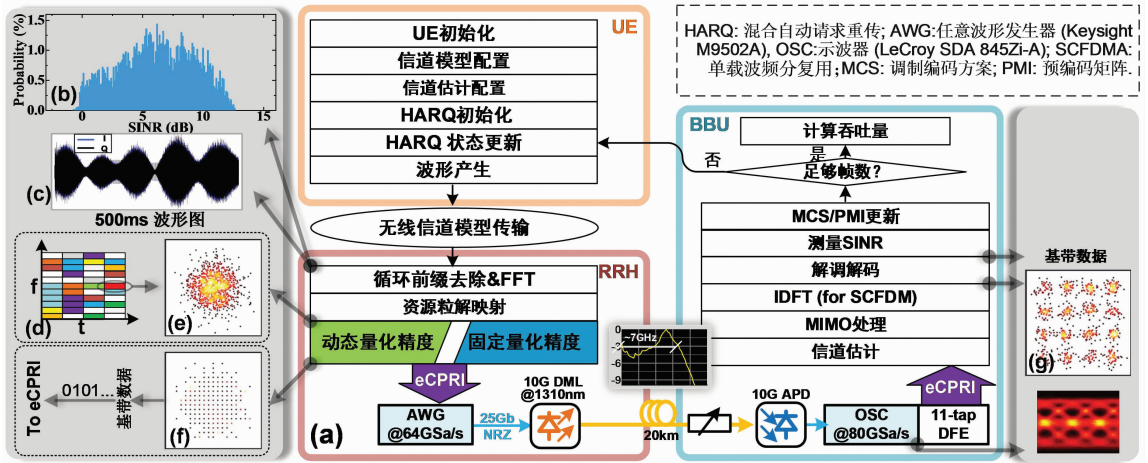


图 5 (a)系统工作流程以硬件设置;(b)SINR 的检测结果分布;(c)时域波形图;(d)解调后资源粒度;(e)资源粒度对应的星座图;(f)量化后的星座图;(g)SCFDM 解调后的星座图

4 实验结果分析

为了根据无线信号质量以及前传的链路负载确定最优的量化方案,本文首先定义 SINR 衰退的概念. SINR 衰退代表着由于量化带来的 SINR 的下降. 设置一个 SINR 衰退阈值,基于此阈值,在任意 SINR 处,都能找到一个最小的量化精度值以满足 SINR 衰退阈值. 而这个最小的量化精度将被用在弹性量化精度的方案中. 当阈值变小,量化的带来的 SINR 衰退会变得轻微,但是前传的数据压缩量会变小. 因此,当链路负载变大时,可以通过加大阈值来提升链路数据的压缩度,使得在高负载情况下,链路的峰值速率有效地被降低,因此,链路部署所需要的传输带宽也会被有效地降低.

图 6(a)给出了在不同的链路负载情况下,不同 SINR 信号所对应的量化精度图. 可以看到,对于 SINR 越好的信号,需要更高的量化精度来保证更为可靠的信号保真度. 链路负载加重的情况下,为了提升链路的效率,量化精度都相应地减少. 图 6(b)给出了,随着链路负载变化,无线传输块的错误概率 (transport block error rate, TBER). 可以看到,由于本仿真系统采用了实际移动通信系统中的自适应调制编码方案, TBER 并没有随着负载变化有明显的改变. 根据 3GPP 的参考标准^[13],

最严苛的 TBER 要求为 0.3,此图中的结果无论是固定量化精度还是弹性量化精度都满足这一要求. 图 6(c)给出了基于前述 SINR 分布的统计平均结果. 此结果比较了在提供 100%容量下使用固定量化比特方案与在提供 62%容量下,使用弹性量化方案的性能. 当链路负载超过 62%时,量化精度开始牺牲,随着负载加重,牺牲越大. 但是从吞吐量的结果可以看到,虽然量化精度明显下降,但是由于使用了 SINR 辅助的弹性量化方案,相比于全精度的方案而言,吞吐量并没有明显的影响. 结果表明,载满负荷,即负载为 1 的情况下,吞吐量的损失只有约 2%,而带来的优势是链路的容量可以节约 38%. 本仿真并没有考虑在高负载情况下

表 1 仿真系统主要参数

主要项目	参数
MIMO 配置	1×2
信道时延描述模型	Extended Pedestrian A model with 5-Hz Doppler frequency (EPA-5)
瑞利衰落信道模型	Generalized Method of Exact Doppler Spread (GMEDS)
传输带宽	1.08 MHz (6 资源块)
无线帧数	500
平均信干噪比	6 dB

SINR 本身的恶化,如果考虑在内的话,吞吐量损失将小于 2%,这样本方案的实际代价将会更小.最后,我们测试了在相同链路容量的情况下,所支持的移动数据的吞吐量最大的值,结果见图 7,可以看到,无论接受光功率多大,弹性量化方案带来的吞吐增益都是十分可观的.

5 总结

针对新型移动前传链路结构下的链路的负载波动的问题提出了在接口处采用弹性量化精度的方案.通过把无线信号质量的监测结果反馈到 eCPRI 接口,根据 SINR 的值定位并牺牲前传链路上的冗余比特,前传链路的速率能够极大地被压缩而不会严重影响用户的速率.仿真的结果表明,牺牲满载情况下小于 2% 的终端速率,使用弹性量化比特能够节约 38% 的链路部署.这极大地降低了前传网络的建设成本,为下一代高速低成本的移动接入网络提供了良好的参考.

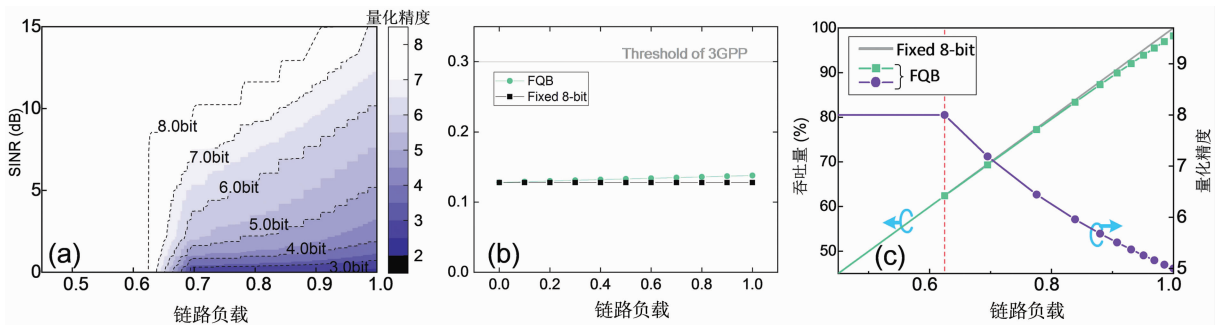


图 6 (a)量化精度随前传链路负载与无线信号质量的变化关系;(b)传输块错误概率(transport block error rate, TBER); (c)吞吐量与量化精度的统计结果,Fixed 8-bit:固定 8 比特量化,FQB:弹性量化

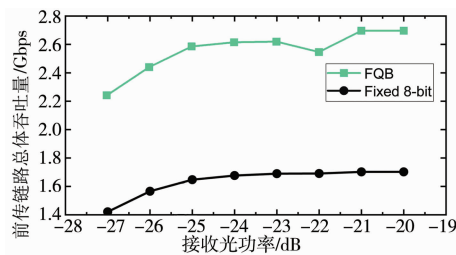


图 7 前传链路总体吞吐量

参 考 文 献

- [1] 中国移动通信有限公司研究院. C-RAN 白皮书:无线接入网绿色演进 V3.0[R]. 北京:中国移动通信有限公司研究院,2014.
- [2] 中国移动通信有限公司研究院. 下一代前传网络接口白皮书 V1.0[R]. 北京:中国移动通信有限公司研究院,2015.
- [3] Next Generation Mobile Networks (NGMN) Alliance. White paper:Next generation mobile networks[R]. UK:NGMN Alliance,2015.
- [4] Pizzinat,Anna. Things you should know about fronthaul[J]. Journal of Lightwave Technology,2015,33(5):1077-1083.
- [5] CPRI group. Common public radio interface;eCPRI interface specification V1.0[S/OL]. (2017-8-22). http://www.cpri.info/downloads/eCPRI_v_1_0_2017_08_22.pdf.
- [6] CPRI group. Common public radio interface (CPRI);interface specification V7.0[S/OL]. (2015-10-02). http://www.cpri.info/downloads/CPRI_v_7_0_2015-10-09.pdf.
- [7] Open Radio equipment Interface (ORI)ETSI Industry Specification Group (ISG). ETSI GS ORI 002-1 V4.1.1:Open Radio equipment Interface (ORI);ORI interface specifications;Part 1:low layers (Release 4)[S/OL]. (2014-10). https://www.etsi.org/deliver/etsi_gs/ORI/001_099/00201/04.01.01_60/gs_ORI00201v040101p.pdf.
- [8] Philippe Sehier. Bandwidth efficient and flexible 5G fronthaul[C]. //Proceeding of Optical Fiber Communication Conference,the United States,Optical Society of America (OSA),2018.
- [9] Philippe Sehier,Anne Bouillard,Fabien Mathieu,et al. Transport network design for frontHaul[C]. //Proceeding of 2017 IEEE 86th Vehicular Technology Conference (VTC-Fall),Canada IEEE,2017.

- [10] 李广松,沈来信,魏霖静. 移动自组网中一种基于 TCP Vegas 的拥塞控制方法[J]. 聊城大学学报(自然科学版),2016,29(2):90-94.
- [11] Longsheng Li, Meihua Bi, Wei Wang, et al. SINR-Oriented Flexible Quantization Bits for Optical-Wireless Deep Converged eCPRI[M]. Ireland, Proceeding of ONDM, IEEE, 2018.
- [12] 3rd Generation Partnership Project. 3GPP TS 36. 101 V15. 0. 0; user equipment (UE) radio transmission and reception (Release 15)[S/OL]. (2017-9). <http://www.3gpp.org/dynareport/36101.htm>.
- [13] 3rd Generation Partnership Project. 3GPP TS 36. 104 V15. 0. 0; Base Station (BS) radio transmission and reception (Release 15)[S/OL]. (2017-9). <http://www.3gpp.org/dynareport/36104.htm>.
- [14] 3rd Generation Partnership Project. 3GPP TS 36. 211 V14. 4. 0; Physical channels and modulation (Release 14)[S/OL]. (2017-9). <http://www.3gpp.org/dynareport/36211.htm>.
- [15] 3rd Generation Partnership Project. 3GPP TS 36. 213 V12. 7. 0; Physical layer procedures (Release 12)[S/OL]. (2015-9). <http://www.3gpp.org/dynareport/36213.htm>.
- [16] 3rd Generation Partnership Project. 3GPP TS 36. 814 V9. 2. 0; Further advancements for E-UTRA physical layer aspects (Release 9)[S/OL]. (2017-5). <http://www.3gpp.org/dynareport/36814.htm>.
- [17] Zhou S, Liu X, Effenberger F, et al. Low-Latency high-efficiency mobile fronthaul With TDM-PON[J]. Journal of Optical Communications and Networking, 2018, 10(1): A20-A26.

Traffic-Load Adaptive Technology for Cloud RAN

LI Long-sheng¹ BI Mei-hua^{1,2} HU Wei-sheng¹

(1. State Key Laboratory of Advanced Optical Communication Systems and Networks, Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200240, China; 2. School of Communication Engineering, Hangzhou Dianzi University, Hangzhou 310018, China)

Abstract The architecture of cloud/centralized radio access network will be the key of feature mobile access network represented by 5G, where the baseband units (BBUs) are centralized in the central office, and at the remote side only the radio circuit and partial baseband processing remain, and the communication between the two are realized by mobile fronthaul (MFH) link. To this end, the splitting-PHY based functional split architecture has become the mainstream in the RAN field, and eCPRI is one of the most popular protocol for this kind MFH interface. However, the emerged problem is that the traffic on MFH link fluctuates with the mobile traffic, and to guarantee the quality of services, the deployed link capacity is often based on the maximum link rate, resulting in a low link efficiency. In this paper, we propose a novel flexible quantization bit scheme for the MFH interface, where the quantization resolution is sacrificed to exchange the overall link efficiency and lower the peak rate. Results verify that 38% link resources are saved for deployment.

Key words fiber communication; function splitting; MFH interface; eCPRI; quantization resolution