

面向移动前传的大容量光接入网技术

Emerging Technologies of High Capacity Optical Access Network for Mobile Fronthaul

李隆胜/LI Longsheng, 胡卫生/HU Weisheng

(上海交通大学, 上海 200240)
(Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China)



摘要: 针对未来移动接入网大容量低成本的前传传输需求, 提出并研究了可用于承载移动业务的高速无源光网络(PON)的新型数字均衡技术和新型调制编码方式, 设计了针对光纤承载的增强型通用公共无线接口(eCPRI)的数据压缩方案。其中, 基于强度分类的均衡器能够高效地消除传输系统非线性; 调制编码方案利用无线信号量化数据的权重差异, 在光接口处采用非均匀4电平脉冲幅度调制(PAM4)信号及比特交织映射, 提升传输鲁棒性; eCPRI上行压缩方案通过根据前传链路负载自适应调整接口的量化精度, 降低前传接口量化精度, 进而提升传输效率。

关键词: 前传; 移动接入网; 无源光网络; 数字信号处理; 数据压缩; 增强型通用公共无线接口

Abstract: To meet the requirement of the high-capacity and low-cost fronthaul transmission for the future radio access network, a novel digital equalization technology and a new modulation coding scheme for the fronthaul-carrying passive optical network (PON) are proposed, and a data compression scheme for the fiber-based enhanced common public radio interface (eCPRI) is designed. The proposed intensity-directed feed forward equalizer can effectively remove the system nonlinearity at low computational cost. For the CPRI compression, given the significance diversity of quantized bits, the uneven 4-level pulse amplitude modulation (PAM4) is adopted to reinforce the transmission robustness. As for the uplink eCPRI, the load-adaptive flexible quantization scheme is proposed to reduce quantization resolution, thereby enhancing the transmission efficiency of eCPRI.

Key words: fronthaul; radio access network; passive optical network; digital signal processing; data compression; enhanced common public radio interface

DOI: 10.12142/ZTETJ.201905005

网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/34.1228.TN.20190929.1642.004.html>

网络出版日期: 2019-09-30

收稿日期: 2019-07-20

受 未来移动互联网高容量、低时延、大联接的应用场景的驱动, 第5代移动通信系统(5G)以及超5G(B5G)技术正蓬勃发展。以低成本网络提供高质量通信业务将是影响5G未来发展的关键因素。其中, 定义为终端到边缘数据中心

或核心网边缘网关的移动接入网(RAN)对于5G的性能与成本有重大影响, 也是5G众多新型网络、传输技术的目标领域^[1]。以云化无线接入网(C-RAN)^[2]和下一代前传接口(NGFI)^[3]为代表的集中化无线接入网架构是低成本实现接入网的重要技术之一。此类架构中, 无线基带处理资源被全部或部分地集中在

中心机房侧并构成基带单元池(BBU), 而远端基站退化为射频拉远单元(RRU)且功能极大地被简化。BBU与RRU之间的通信链路被称为前传链路(fronthaul)。由于5G高空口带宽、密集布站、大规模多天线阵列等技术的演进, 前传传输的带宽开销巨大, 因此基于光纤接入网的前传承载方案的优势日益

基金项目: 国家自然科学基金(61501157, 61431009, 61571291)

凸显。然而,基于传统的通用共无线接口(CPRI)标准^[4],5G单站点带宽需求将达到百吉比特每秒量级^[5],这对于成本敏感的光纤接入网而言也是一大挑战。目前在接入网领域,以无源光网络(PON)为代表的直调直检短距离传输系统,由于成本低,建设、运维方便等优势受到运营商与设备商的青睐。如何基于PON传输链路的现有特点,并且针对前传业务特性实现高效传输是5G技术演进中的重要研究方向。

本文中,围绕面向前传传输的低成本大容量光接入网中的关键技术,我们介绍了该领域最新的一些相关研究成果,主要包括以下3个方面:(1)针对低成本PON系统中的啁啾等非线性效应,提出了基于强度分类的前馈/反馈均衡器;(2)针对CPRI中无线基带信号有量化比特具权重差异,比特位的误码率对于信号保真度影响程度不同设计了非均匀4电平脉冲幅度调制(PAM4)信号与比特交织映射,提升了传输系统的保真度;(3)针对极具应用前景的增强版CPRI(eCPRI),提出了根据上行数据流量动态变化的这一显著特点,负载自适应地调整前传接口量化精度的数据压缩方案。

1 高速低成本PON中的新型均衡技术

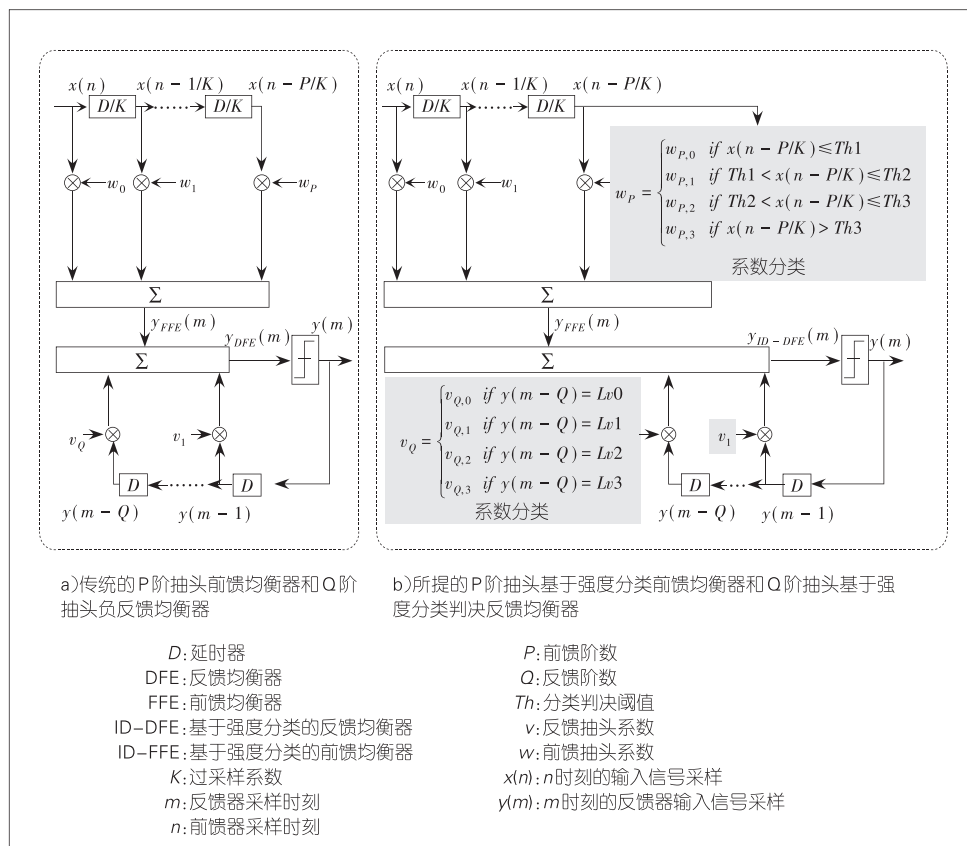
低成本直调直检系统是承载前传传输较为经济的方案,但也给前传扩容带来诸多

限制。一方面系统带宽受限,导致符号间串扰严重。传统的前馈均衡器(FFE)以及反馈均衡器(DFE)对于消除系统线性低通响应有显著作用。由于DFE与FFE相对复杂度低,以及高速芯片工艺日趋成熟,数字信号处理(DSP)的应用已成为未来PON与前传应用的一大趋势^[6]。另一方面,系统所采用的直接调制激光器(DML)带来的啁啾效应,以及其他低成本非线性光、电器件的引入会使得系统有严重的非线性响应。消除非线性响应需要引入非线性均衡器,但诸如Volterra的非线性均衡器涉及信号采样值之间的高阶运算,导致其计算复杂度极高而降低了实际应用的可行性。针对此问题,我们提出了一种基于强度分类

的FFE/DFE均衡器(ID-FFE/ID-DFE)^[7],在接近线性计算复杂度的前提下,达到优于Volterra均衡器的性能。

1.1 ID-FFE/ID-DFE原理

基于强度分类的均衡器主要针对PAM信号,文中我们以PAM4信号分析。图1对比了传统FFE/DFE与所提ID-FFE/ID-DFE的架构。由于FFE可以视作是把反馈抽头系数全部置零的DFE,这里不失一般性地只分析DFE与ID-DFE。和DFE相同,ID-DFE均衡器先对接收信号 $x(n)$ 进行前馈均衡然后进行判决反馈均衡,其不同之处在于所提均衡器中所有抽头系数并非固定,而是有4组(对应PAM4)系数可选。



▲图1 传统FFE/DFE与ID-FFE/ID-DFE的架构对比

对于前馈抽头系数,均衡器首先对接收信号 $x(n-P/K)$ 按幅度分类,根据分类切换抽头系数。对于PAM4,需要设置3个门限 $\{Th1, Th2, Th3\}$ 将接收信号分成4类,每一类信号对应的抽头系数需要单独训练,训练完成后存储为 $\{W_{p,0}, W_{p,1}, W_{p,2}, W_{p,3}\}$ 。之后在实际负载信号传输时,系统将根据当前 $x(n-P/K)$ 的分类,实时更新前馈抽头系数。对于反馈均衡器系数,判决后的 $y(m)$ 已经把信号分为4类,因此在训练系数及处理负载信号时,可以根据 $y(m)$ 更新滤波器反馈抽头的系数 $\{V_{q,0}, V_{q,1}, V_{q,2}, V_{q,3}\}$,而不需要引入额外判决过程。

ID-DFE 中对 $x(n-P/K)$ 分类的准确性会极大地影响均衡效果。当链路环境较差,直接使用ID-FFE,其分类能力不够准确。文中我们设计在ID-FFE/ID-DFE前串联一个

pre-FFE来消除部分符号间串扰(ISI),提升判决的准确度,然后再进行ID-FFE/ID-DFE均衡。

1.2 ID-FFE/ID-DFE 实验传输结果与啁啾抑制性能

为此我们搭建了56 Gbit/s的高速直调直检实验传输系统,试验系统采用PAM4调制格式。系统发射端不涉及DSP,所有DSP均为后处理。实验中,所有结果均是在驱动电信号峰峰值、DML输出光功率最优的情况下测量得到。

图2给出了0~35.9 km下的传输结果,其中FFE和ID-FFE的阶数均为21阶,接收端过采样率为2。图2a)中,由于ID-FFE/ID-DFE能消除部分系统非线性,其性能略好于FFE/DFE,即使在0 km下,啁啾带来的非线性很弱。相对地,传输距离达到35.9 km时,ID-FFE与

ID-DFE性能优势凸显,且只有ID-DFE能满足 2×10^{-3} 的误码门限。

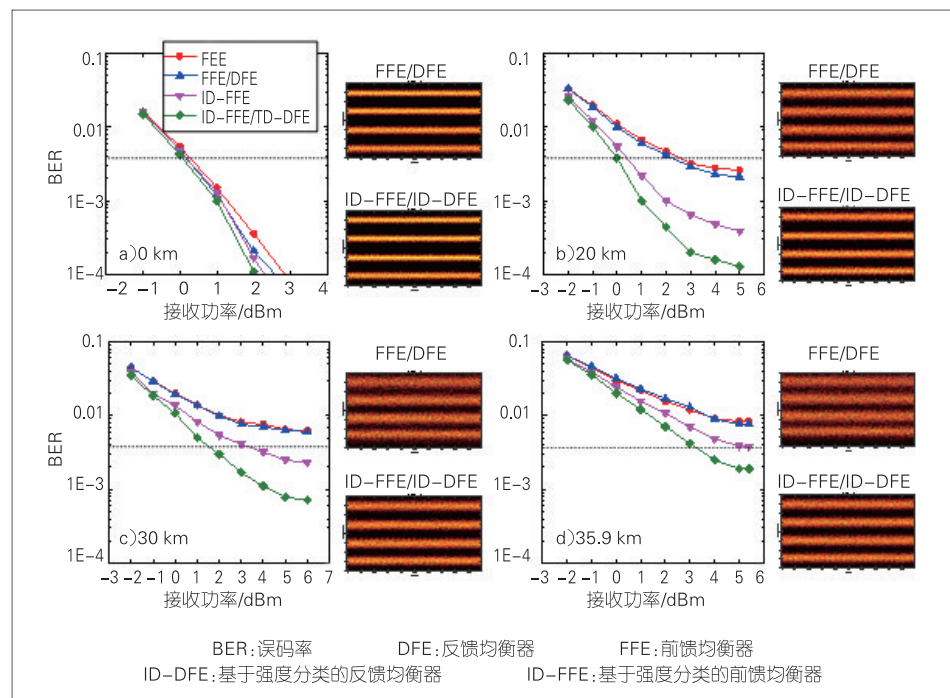
此外,进一步对比ID-FFE/DFE与Volterra的计算复杂度:以35.9 km来分析,1阶和3阶记忆长度设为31和3(3阶长度大于3时没有明显提升),此时2种均衡器效果相同;而此时Volterra所需乘法次数为233,远大于ID-FFE/DFE。所提的均衡器在较低复杂度下改善了低成本高速短距传输系统的性能,对前传光链路的扩容有显著效果。

2 承载CPRI业务的比特交织映射与非均匀PAM4光调制

2.1 系统原理

CPRI接口基于Option 7的基带功能划分方式^[8],传输的是基带时域波形经过采样、量化、编码后的数据。量化后的数据无论是基于线性量化或者非线性量化,不同比特位对应的权重是不同的,这导致不同比特位上的误码对于基带信号的损伤程度也有不同。目前,业界的主要研究方向之一是提升单波长的传输速率。但由于低成本器件性能的限制,PAM4类型的高阶调制格式的引入,以及更高的分光比需求,光传输链路的误码性能受到严重恶化。当传输链路无法满足无误码时,如何保持前传链路鲁棒性,将是一大挑战。本文中我们提出了一种量化比特交织映射到非均匀PAM4信号的方案^[9]。

图3给出了此方案前传接



▲图2 不同距离下的误码性能

口处的信号处理流程。模拟基带时域信号 $x(t)$ 首先被模数转换器(ADC)转换为数字信号。根据 CPRI 协议,每个码字保留 15 位有效量化位数。在本方案中,15 位比特被分为高阶有效位(7 位)和低阶有效位(8 位)2 组。2 组比特位交织排列,然后根据格雷码关系映射到 PAM4 信号上,其中码字的高阶组被映射到 PAM4 信号的高有效位上(1stb),低阶组被映射到低有效位上(2stb)。从图 3 中可以看到,符号 2 和符号 3 之间(即中间眼)的误判会导致 PAM4 高有效位的错误,符号 1 与符号 2 之间以及符号 3 与符号 4 之间的误判,会导致 PAM4 低有效位错误。扩大符号 1、2 间距能够降低 PAM4 高有效比特的误码率,即降低量化码字中高阶有效位

的误码,其代价是增加低有效比特的误码,即增加低阶有效位的误码。PAM4 信号通过光路传输后,在接收端可直接通过硬判决被恢复。最后,将交织的采样比特恢复成正常的顺序,重建无线基带信号。此方案中收发机都没有采用复杂信号处理。

2.2 实验系统结构

为了验证所提方案在有系统误码情境下的优越性,我们设计了如图 4 所示系统实验。高阶组和低阶组的比特分别由 2 个独立的脉冲码型发生器(PPG, Keysight N4951B)产生,信号速率为 12.5 Gbaud/s,即链路速率为 25 Gbit/s。系统中外腔调制器(EML)与 PD 的 3 dB 带宽分别为 33 GHz 和 40 GHz。接收端信

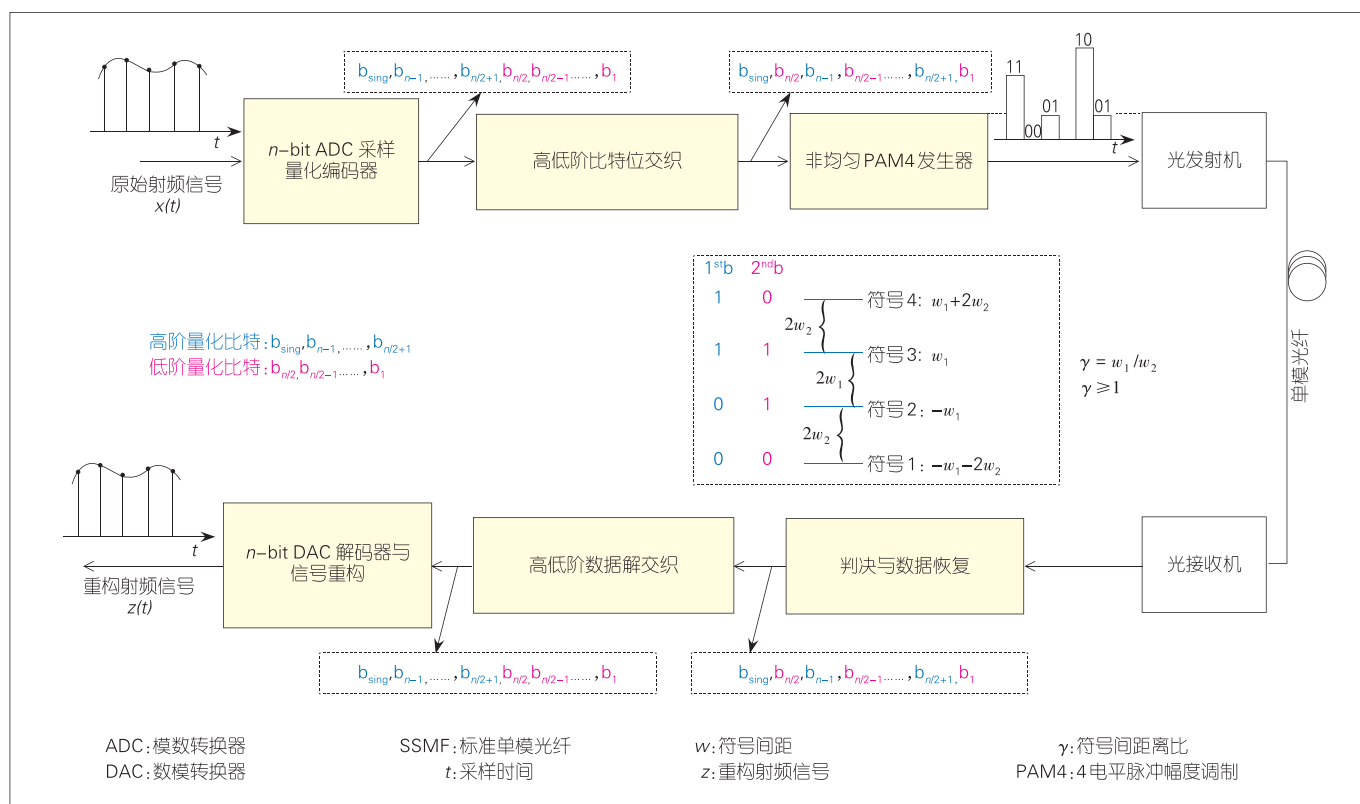
号由数字示波器(LeCroy SDA 845Zi-A)2 路二进制启闭键控(OOK)信号的峰峰值经过合理的调整,可实现不同的非均匀比例。

2.3 实验结果分析

图 5 中可以看到,对于 20 km 系统,当 $\gamma = 2$ 时,系统性能始终是最优的。图 5c) 给出最优 γ 随接收光功率变化的结果。在 0 km 和 20 km 传输系统中,相对于传统 PAM4 方案,所提方案中信号的 EVM 分别降低 10 dB 和 13 dB。

3 针对 eCPRI 链路负载波动的弹性量化方案

传统的类 CPRI 前传接口划分采用的是 Option 8^[8],此方式下前传传输的负载数据是连续不断的时域

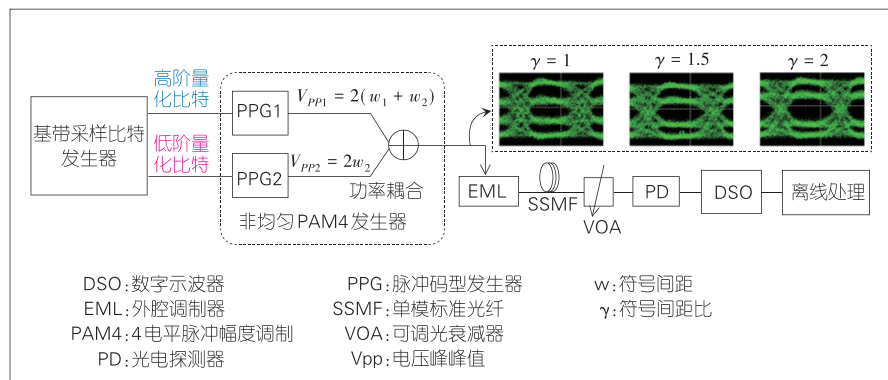


▲图 3 基于比特交织与非均匀 PAM4 的传输系统流程

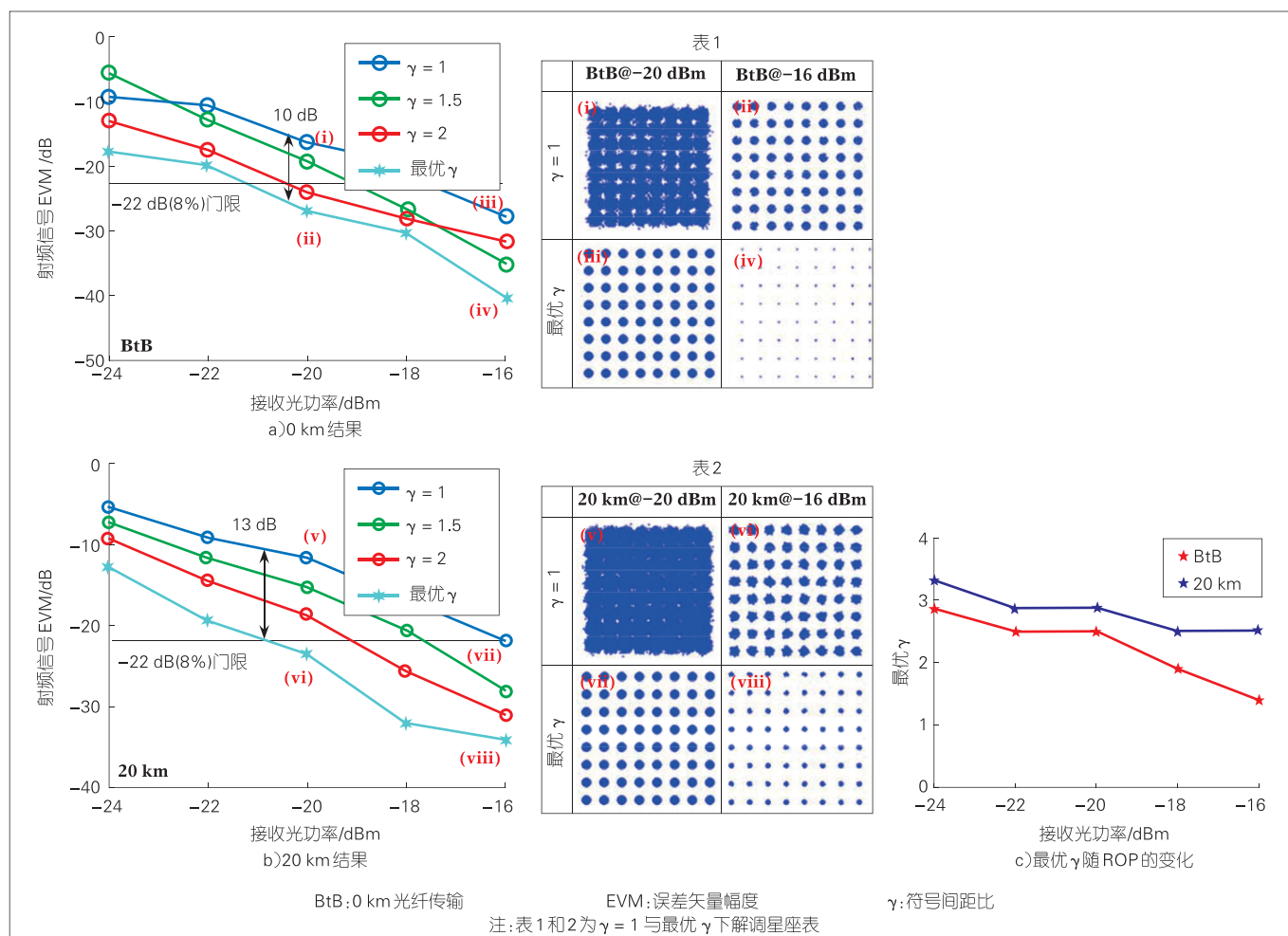
信号采样量化值,其数据量巨大,即使通过光纤传输媒介也难以满足5G应用需求。CPRI技术组提出的eCPRI标准采用了新型划分点下行

划分点1(Π_D)和上行划分点2(Π_U),分别对应上行、下行链路且二者都是基于Option7。此时链路中传递的负载信息是基带处理中间过程中

时频空间中的资源块(RB)。新的标准使前传数据量显著降低,适合工业界实际部署^[10]。与CPRI不同的是,eCPRI链路数据并非持续不断,而是和实际无线终端用户负载直接相关。因此,前传接口采用eCPRI必定会带来链路负载的波动,考虑到潮汐效应等问题,负载波动极大地降低了链路平均利用率。针对此问题,我们提出了一种用于eCPRI上行接口的动态调整RB量化精度的负载自适应方案。其核心思想可以概括为:在轻负载时段采用全分辨率量化RB,量化精度根据现有报道可设为8~10 bit。当链路



▲图4 基于非均匀PAM4信号和比特交织的传输实验框图



▲图5 非均匀4电平脉冲幅度调制加比特交织方案中前传信号保真度性能测试

过载时段,通过动态减少量化精度,合理丢弃最低有效位来达到降低链路速率的目的^[11]。通过此方式,链路的峰值速率能得到有效抑制,进而在光接入带宽不变的情况下,满足更大容量的无线接入(以可支持的RB数目衡量)。或者,在支持RB数目指标不变的前提下,大幅节省光传输资源。

3.1 eCPRI 冗余量化比特分析

和CPRI中采样量化数据类似,eCPRI上行中负载数据是对时频域的同相正交信号(IQ),或称资源格子(RE),进行采样量化。从整个无线光纤链路上来看,采样编码后的码字所包含的信息量由2部分决定:无线链路的信噪比、前传接口上的量化精度(即码字的位宽)。经过简单地推导,我们可以得到码字中每一位比特对应的信息量。

从图6中可以看到,在考虑上行空口信干噪比(SINR)的情形下,量化比特包含的信息量随有效索引(index)增长而降低,随空口SINR增长而增加。其次,此三维图底面的白色、粉色、红色区域分别代表相比于量化前的信息量(只考虑SINR),量化后信息容量损失3%,2%,1%所需要的最少量化位宽。此结果表明对于eCPRI接口,大量的量化比特位相对来讲是冗余的,丢失这部分比特对于整体光纤无线信道容量的损失很少。因此,我们提出在高负载状态下,以传送RB/RE数目为首要目标,合理地减少量化精度。另一方面,无线网络高负载情况下,往往导致空口信号质量下降,即更多的信号趋向于分布在低SINR区间。因此,高负载下冗余比特出现的概率更高,此时采用紧

缩的量化策略更为合理。

3.2 基于3GPP标准系统的eCPRI弹性量化方案仿真分析

为提供可靠且具有参考价值的结果,我们基于Matlab搭建了符合第3代合作计划(3GPP)标准的无线上行物理层(PHY)与低介质访问层(Low-MAC)仿真系统,实现单用户设备(UE)的通信。其中无线信道通过5 Hz多普勒频移下的扩展步行者信道模型(EPA-5)信道传输仿真,用以实现信号与SINR随时间

变化。图7中,所提负载自适应方案(LAFQB)是以相较于固定8比特方案节省40%传输带宽为目标来设计。图7a)的映射表存储于收发端,图7b)为在典型4G站点配置下,固定8比特量化方案与所提负载自适应弹性量化方案中单个UE吞吐量的比较。可以看到,由于所提方案是一种有损压缩,在高负载情形下信号质量受到一定影响而导致单个终端速率降低,但即使是在满负载的状态下损失也只有不到2%。图7c)中线路速率,所提方案

图6 均匀量化后码字中每一位比特位所包含的信息量与位数索引以及无线信干噪比之间的关系

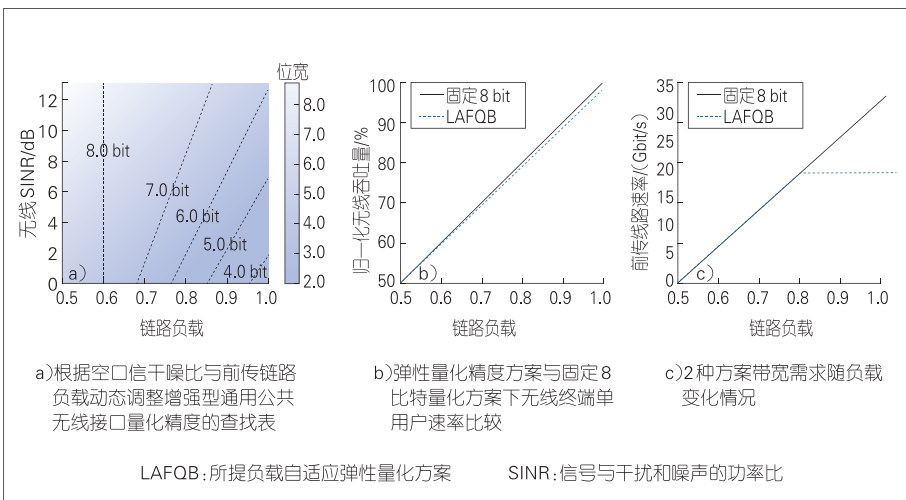
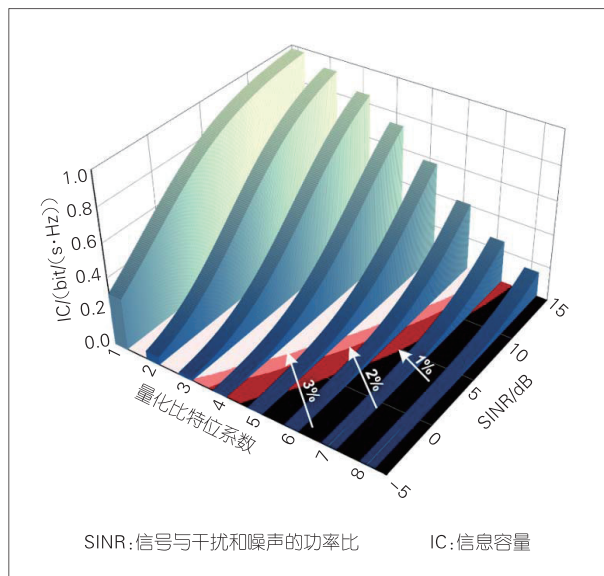


图7 弹性量化配置方案与仿真性能结果

把请求的峰值带宽抑制到只有对照组的60%,极大地提升了前传光链路的传输效率。

此外,上行eCPRI的压缩还可以引入消除瑞利衰落信道带来的影响的技术^[12]。通过补偿瑞利信道衰落来减少IQ信号的动态范围,可以有效地节省前传量化精度。

4 结束语

高速移动前传网络将是未来光接入网增长的重要驱动之一。随着芯片工艺进步与成本下降,通过先进的数字信号处理手段提升单波长传输容量与性能将是未来光接入网的发展趋势,也是业界研究工作的主要发力点。同时针对前传数据的特征使用新型编解码、调制格式也能够显著提升链路性能。通过构建无线前传协同系统,根据前传负载与空口信号质量灵活调整eCPRI参数,前传网络将变得更加智能与高效。多层次的技术革新将会更好地推进5G与B5G接入网络的落地。

致谢

本研究得到区域光纤通信网与

新型光通信系统国家重点实验室毕美华博士后、张阔博士、忻海云博士的帮助,谨致谢意!

参考文献

- [1] HU W S, HE H, ZHANG K, et al. A Comprehensive Optical Mobile Fronthaul Network Toward High-Fidelity, Flexible and Low-Latency Transport [J]. Photonic Network Communications, 2019, 37(3): 322. DOI: 10.1007/s11107-019-00829-z
- [2] 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]. 中国移动通信有限公司研究院, 2014
- [3] 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]. 中国移动通信有限公司研究院, 2015
- [4] CPRI Group. Common Public Radio Interface (CPRI); Interface Specification V7.0[EB/OL]. (2017-8-22)[2019-07-20]. http://www.cpri.info/downloads/eCPRI_v_7_0_2015-10-09.pdf
- [5] CPRI Group. Common Public Radio Interface: eCPRI Interface Specification V1.0[EB/OL]. (2015-10-02) [2019-07-20]. http://www.cpri.info/downloads/eCPRI_v_1_0_2015-10-09.pdf
- [6] RASMUSSEN J C, DRENSKI T. DSP for Short Reach Optical Links[C]//2017 European Conference on Optical Communication (ECOC). New York, USA: IEEE, 2017. DOI: 10.1109/ecoc.2017.8346204
- [7] ZHANG K, ZHUGE Q, XIN H, et al. Intensity Directed Equalizer for the Mitigation of DML Chirp Induced Distortion in Dispersion-Unmanaged C-band PAM Transmission[J]. Optics Express, 2017, 25(23): 28123-28135
- [8] 3GPP. Study on CU-DU lower layer split for NR (Release 15): 3GPP TR 38.816, V15.0.0[S]. 3GPP, 2017
- [9] XIN H, ZHANG K, HE H, et al. Fidelity Enhancement in High-Data-Rate Digital Mobile Fronthaul with Sample bits Interleaving and Unequally-Spaced PAM4[J]. Optics

Express, 2017, 25(9): 5559-5570. DOI: 10.1364/oe.25.005559

- [10] 中国电信 CTNet2025网络重构开放实验室. 5G时代光传送网技术白皮书[R]. 中国电信 CTNet2025网络重构开放实验室, 2017
- [11] LI L S, BI M H, MIAO X, et al. Quantization-Noise Suppression for Uplink eCPRI Assisted by Wireless-Channel Estimation Feedback [C]//2018 European Conference on Optical Communication (ECOC) 2018. New York, USA: IEEE, 2018. DOI:10.1109/ecoc.2018.8535188
- [12] LI L S, BI M H, WANG W, et al. SINR-Oriented Flexible Quantization Bits for Optical-Wireless Deep Converged eCPRI[C]//2018 International Conference on Optical Network Design and Modeling (ONDM), May 14-17, 2018. New York, USA: IEEE, 2018. DOI:10.23919/ondm.2018.8396126

作者简介



李隆胜, 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在读博士; 研究方向为光与无线融合的前传传输关键技术; 发表论文 10 余篇。



胡卫生, 上海交通大学特聘教授; 先后担任区域光纤通信网与新型光通信系统国家重点实验室主任、《Optics Express》和《Journal of Lightwave Technology》等期刊编委、OFC 等国际会议 TPC 委员等; 主要从事全光通信网的教学和科研工作; 发表学术论文近 500 篇。