

# 基于数字子载波和概率整形的相干光通信系统设计及应用



## Coherent Optical Communication System Based on Digital Subcarrier and Probabilistic Shaping: Design and Application

陆源/LU Yuan<sup>1</sup>, 牛文林/NIU Wenlin<sup>2</sup>, 王永奔/WANG Yongben<sup>3</sup>, 胡子荷/HU Zihe<sup>3</sup>

(1. 山东省邮电规划设计院有限公司, 中国 济南 250101;  
2. 中国联通山东省分公司, 中国 济南 250000;  
3. 中兴通讯股份有限公司, 中国 深圳 518057)

(1. Shandong Posts and Telecommunications Planning and Design Institute Co., Ltd, Jinan 250101, China;  
2. China Unicom Shandong Branch, Jinan 250000, China;  
3. ZTE Corporation, Shenzhen 518057, China)

DOI: 10.12142/ZTETJ.202304014

网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/34.1228.TN.20230724.1927.013.html>

网络出版日期: 2023-07-25

收稿日期: 2023-06-15

**摘要:** 相比于传统的单载波架构, 数字子载波架构更能抵抗光纤传输中的信道损伤。概率整形技术相比于传统的常规调制格式可以更有效地抵抗光放大器引入的噪声。阐述了数字子载波和概率整形技术的原理以及它们在 800G 系统中的应用。数字子载波复用技术和概率整形技术的联合使用, 可以进一步提升系统的可重构光分插复用器穿通能力和传输容量。现网测试验证了两种技术在 800G 相干系统中的优越性。

**关键词:** 数字子载波复用; 概率整形; 相干光通信; 现网测试

**Abstract:** Compared with the traditional single-carrier architecture, the subcarrier architecture is more resistant to damage in optical fiber transmission. Probabilistic shaping technology can resist noise more effectively than traditional conventional modulation formats. The principles of these two new technologies and their applications in 800G systems are discussed. The combination of digital subcarrier multiplexing technology and probabilistic shaping technology can further enhance the system's reconfigurable optical add-drop multiplexer passthrough capability and transmission capacity. The network testing has verified the superiority of these two technologies in 800G coherent systems.

**Keywords:** digital subcarrier multiplexing; probabilistic shaping; coherent optical communication; network test

**引用格式:** 陆源, 牛文林, 王永奔, 等. 基于数字子载波和概率整形的相干光通信系统设计及应用 [J]. 中兴通讯技术, 2023, 29(4): 78-82. DOI: 10.12142/ZTETJ.202304014

**Citation:** LU Y, NIU W L, WANG Y B, et al. Coherent optical communication system based on digital subcarrier and probabilistic shaping: design and application [J]. ZTE technology journal, 2023, 29(4): 78-82. DOI: 10.12142/ZTETJ.202304014

光通信在过去几十年里得到了巨大发展。就在 10 年前, 主流的商用系统还是直接探测的 10G 系统。如今, 互联网时代的流量大爆发推动了 100G 系统的迅速发展。100G 系统的实现得益于相干探测和数字信号处理 (DSP) 以及高速模数转换 (ADC) /数模转换 (DAC) 的联合使用<sup>[1]</sup>。

随着 5G 时代的到来, 运营商对系统的容量需求急剧增加, 互联网流量增速已大大超过光网络传输容量的增速。为了应对容量需求的进一步增长, 未来的光通信系统有以下几个研究方向: 1) 基于灵活和感知光网络的高效资源管理; 2) 采用更高阶的调制格式和更高的波特率; 3) 采用更先进的 DSP 和前向纠错码 (FEC) 算法; 4) 支持光纤多波段的

传输器件; 5) 少模多芯等新型光纤的应用。高效的光网络资源管理是基础, 因为它可以通过高效地利用现有的光纤基础设施, 来推迟昂贵的新光纤和新器件的部署。采用更高阶的调制格式 (例如 32 符号正交幅度调制) 和更高的波特率 (>90 GBd) 可以实现单波 800 Gbit/s 的传输速率。而这会导致更严重的信道损伤, 例如窄带滤波效应、器件非线性效应以及 I/Q 之间的时延效应。这些都需要更复杂的 DSP 算法以及更先进的 FEC 方案进行补偿。此外, 采用先进的数字通信技术 (例如概率整形和数字子载波复用) 既可以实现灵活的频谱效率, 也可以提升传输性能。数字子载波复用技术更适用于灵活光网络, 可以更方便地处理信道的动态业务。此

外，使用C+L波段还可以进一步提升整根光纤的传输容量。

本文重点介绍数字子载波技术和概率整形技术的理论背景以及它们在单波800G系统中的优势，并给出中国联通研究院携手中兴通讯完成的单波800G现网测试结果。

## 1 数字子载波复用技术

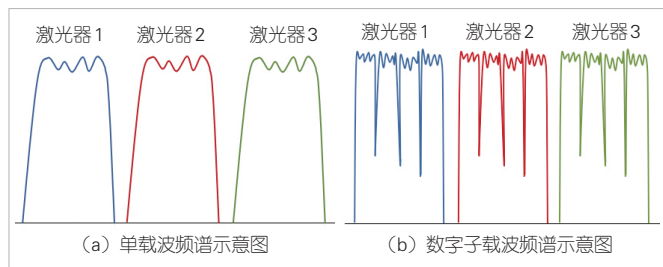
在传统的相干光通信系统中，单个激光器产生的光信号占据一段连续的频谱，如图1(a)所示。而对于数字子载波复用技术，在发端通过数字域上的特殊处理，可以将频谱上连续的光载波分割成若干个独立的奈奎斯特子载波，如图1(b)所示。子载波的个数可以根据总的波特率和应用场景来设定，一般选择4、8或者16。

### 1.1 数字子载波的优势

#### (1) 降低色散补偿复杂度

目前大部分相干光通信系统会在收端数字域上补偿光纤链路累积的色散。主流的色散补偿算法对信号做快速傅里叶变换(FFT)，并在频域上进行重叠存储补偿。补偿色散需要的滤波器阶数与色散和波特率大小密切相关<sup>[2]</sup>。假设采用4个子载波，在总波特率相同的情况下，每个子载波的波特率是单载波的1/4，那么在色散补偿时需要的滤波器阶数就只有单载波的1/16。这可以大大节省色散补偿所需要的硬件资源。

除了降低色散补偿的复杂度，数字子载波技术也可以降低色散补偿导致的传输代价。对于目前收端通用的相干DSP处理结构，均衡增强相位噪声(EEPN)效应并没有得到很好的解决<sup>[3]</sup>。EEPN效应主要是由收端激光器线宽导致的相位变化和色散补偿滤波器的共同作用引起的。当采用低阶调制格式且波特率较小时，EEPN的影响很小，可以忽略。然而，随着高阶调制格式的引入和波特率的上升(如上升到64 GBd和128 GBd)，EEPN导致的色散补偿代价就不能再忽略。例如，对于64 GBd的400G 16QAM传输系统，当收端激光器线宽为300 kHz，累积色散为20 000 ps/nm时，EEPN带来的光信噪比(OSNR)代价有0.2 dB。而如果采用数字子载波技术，当每个子载波的波特率为16 GBd时，EEPN的代



▲图1 单载波频谱与数字子载波频谱

价就不到0.05 dB。

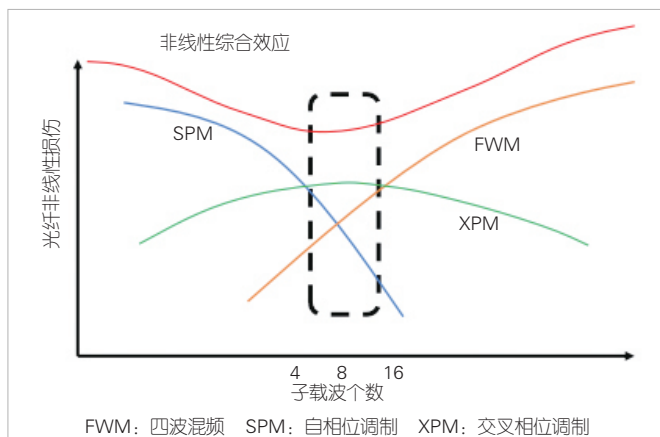
#### (2) 减少非线性传输代价

光纤中的非线性效应，包括自相位调制(SPM)、交叉相位调制(XPM)、四波混频(FWM)，已经成为限制光通信系统传输距离的主要因素之一。而光纤的非线性损伤补偿也是业界面临的挑战之一。一些有效的非线性补偿算法如数字反向传输补偿算法(DBP)，因为复杂度太高而无法在硬件上实现，不具有实用性。因此，有研究人员提出，不采用补偿方法，直接从源头降低非线性效应。这也是数字子载波技术诞生的原因之一。

通过优化每个子载波的波特率、子载波的个数，数字子载波复用技术使SPM、XPM和FWM这3种非线性效应的综合效应最小，从而减少非线性的损伤。如图2所示，FWM效应随着子载波个数的增加而增加，SPM效应随着子载波个数的增加而减少，XPM效应介于两者之间。可以看出，子载波数目存在一个最优区间，它能使得三者的综合效应达到最小。文献[4]深入分析和比较了多子载波和单载波的非线性传输性能。实验结果表明，与单载波相比，通过优化子载波数目，100G正交相移键控(QPSK)采用数字子载波技术可以额外传输25%的距离。

#### (3) 提高频谱利用率

在发射端对数字信号做奈奎斯特整形，可以有效减少信号占用的频谱带宽。这项技术已经被普遍应用在单载波系统中。由于在收端需要恢复信号时钟，因此发端奈奎斯特整形的滚降系数不能为0(一般设置在0.1~0.2之间)。在数字子载波系统中，当其中一个子载波的滚降系数设置高一些(用来做时钟恢复)时，其余子载波的滚降系数就可以设置低一些。假设一个32 GBd的单载波系统的滚降系数为0.2，那么其占用的总频谱带宽为 $32 \times 1.2 = 38.4$  GHz。对于数字子载波系统，假设子载波数目为4，每个子载波的波特率为8 GBd，



▲图2 光纤不同非线性效应与子载波个数关系

用来做时钟恢复的子载波的滚降系数为0.2，其余子载波的滚降系数为0.025，那么其占用的总频谱带宽为 $8 \times 1.2 + 24 \times 1.025 = 34.2$  GHz。这样总的频谱带宽占用就比单载波系统少4.2 GHz，有效提高了频谱效率。

### 1.2 数字子载波系统和单载波系统仿真性能对比

为了进一步验证数字子载波架构相比于单载波架构的性能优势，我们在800G系统下对两种架构做了仿真研究，选择调制格式为PM-16QAM，波特率为128 GBd，子载波个数为16。背靠背条件下子载波架构和单载波架构的OSNR曲线如图3所示。其中，蓝色曲线表示在128 GBd PM-16QAM理论情况下误码率（BER）随OSNR的变化曲线。当软判决前向纠错（SD-FEC）的纠错门限为0.02时，其对应的OSNR容限为22.8 dB。黑色和红色曲线分别代表单载波128 GBd PM-16QAM和 $16 \times 8$  GBd PM-16QAM子载波系统下的BER随OSNR的变化曲线。两种方式对应纠错门限的OSNR都在23.3 dB左右，与理论值相比代价约为0.5 dB。因此，在背靠背传输条件下，子载波系统的OSNR代价与单载波基本相当。

在长距离传输情况下我们对比了两种不同架构的性能。图4中黑色曲线表示单载波128 GBd PM-16QAM传输下BER随传输距离变化的曲线，其BER达到0.02时对应第22跨段（1760 km）。红色曲线代表子载波系统中BER（16个子载波的平均值）随传输距离变化的曲线，其BER达到0.02时对应第27跨段（2160 km）。仿真结果表明， $16 \times 8$  GBd子载波系统明显要优于单载波系统。在达到相同BER要求的情况下，子载波系统要比单载波系统多传输4~5个跨段（320~400 km）。这是因为子载波架构的传输方式对光纤传输中产生的非线性效应有较好的容忍性。

## 2 概率整形技术

### 2.1 概率整形原理

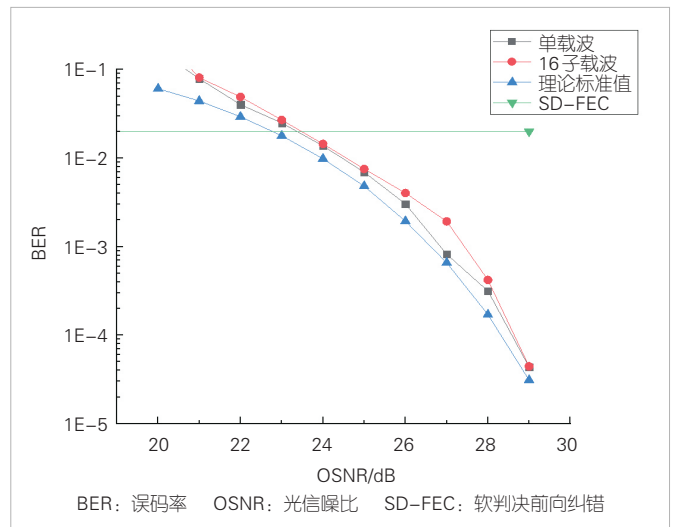
1948年，香农在信息论中提出：当信源的分布符合信道分布时，信道的传输容量达到最大。类似地，在光纤通信系统模型中，当发端的离散星座点近似高斯分布时，传输性能达到最优<sup>[5]</sup>。传统的QAM调制格式的星座点是均匀分布的，每个点出现的概率相同。概率整形技术通过改变星座点的概率让其近似高斯分布，进而提升传输性能。在概率整形技术中，星座图中各个星座点的间隔是等距的，但是每个星座点具有不同的概率。相比于传统星座点的等概率分布，概率整形技术可以让能量低的符号比能量高的符号出现的次数更多，即能量低的星座点出现概率大。这样可以降低平均发

射功率，有效应对噪声等因素带来的损伤。概率整形16QAM的互信息高于均匀16QAM，更加接近香农容限。

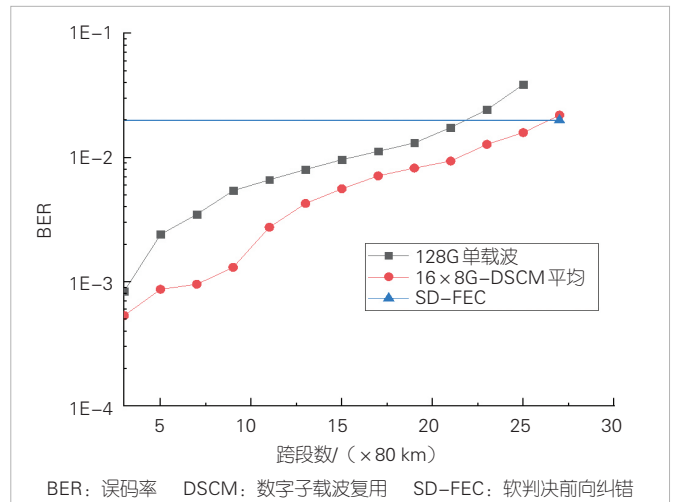
概率整形的另一个优点是可以实现灵活的频谱效率调整，以适应不同的信道环境。改变概率编码模块的输入输出比例有助于实现不同方差的高斯分布，调整有效的传输比特个数。不同的频谱效率可以应用于200~800 Gbit/s的传输速率，满足长距离骨干、中距离城际以及短距离数据中心等不同应用场景的需求。

### 2.2 概率分布匹配器的实现

分布适配器（DM）是概率整形能够实现的关键技术。它的作用是让均匀分布的01输入比特变成非均匀的映射符号。目前业界的主流DM算法为恒定成分分布适配器（CCDM）算法。该算法的性能好，编码损失小，但是计算



▲图3 背靠背单载波系统和子载波系统BER随OSNR变化曲线



▲图4 单载波系统和子载波系统BER随传输距离变化的曲线

量非常大，主要用于离线实验研究。文献[6]提出了一种基于级联查找表形式的DM方案（HiDM）。该方案不需要高精度的乘法运算，使用二叉树形式的并行结构，因此非常适用于硬件实现。以82输入128输出概率整形比例为例，我们设计了一个5层级联查找表的DM实现方式，具体结构如图5所示。该结构主要具有以下几点特征：

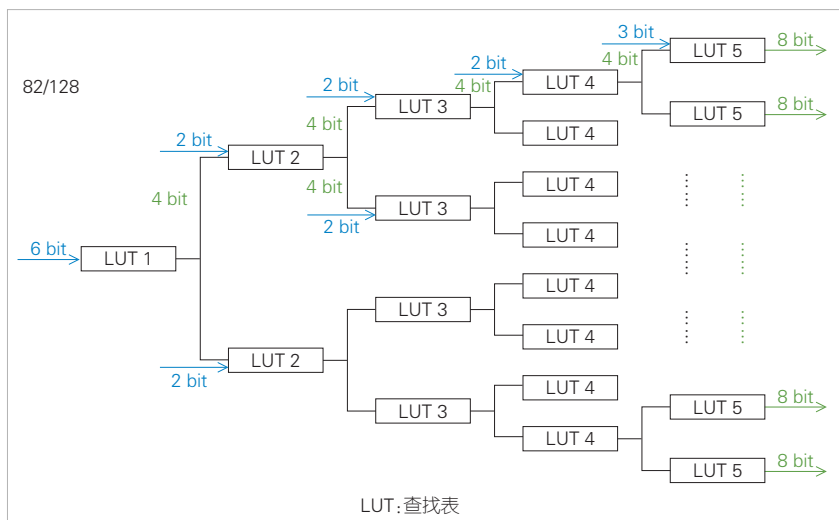
- 1) 第 $n+1$ 层的查找表个数是第 $n$ 层的2倍，可形成二叉树形式级联，即 $T_{n+1}=2T_n$ ；
- 2) 每层所有的查找表都输出8个比特，即 $U_n=8$ ；
- 3) 第 $n+1$ 层的查找表输入由第 $n$ 层的一半输出（图中红色比特值）和该层的净荷（图中蓝色比特值）共同构成，其中净荷处于低位。此时， $V_{n+1}=S_{n+1}+U_n/2$ ；
- 4) 总净荷比特数为 $\sum T_n \times S_n$ 。

### 2.3 基于HiDM概率整形的FPGA验证

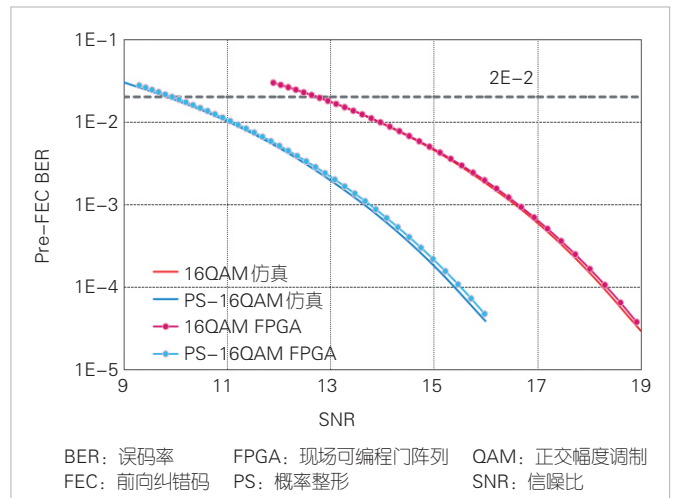
我们做了仿真和现场可编程门阵列（FPGA）实验来比较概率整形16QAM的性能优势。仿真和FPGA实验结果如图6所示。可以看出，FPGA实验结果与仿真结果高度吻合。在FEC纠错门限 $2E-2$ 处，相比于均匀16QAM，PS-16QAM大概有2.9 dB的信噪比（SNR）优势。在考虑概率整形编码冗余之后，PS-16QAM仍然有1.84 dB的净速率优势。

### 3 数字子载波技术与概率整形的结合

在长距离传输中，有些场景会级联很多个可重构光分插复用器（ROADM），这会增加滤波效应，进而影响传输性能。在正交频分复用系统（OFDM）中，这种频率相关的信噪比衰减损伤通常采用注水算法进行补偿，即不同的频段加



▲图5 82输入128输出的HiDM结构图



▲图6 PS-16QAM和16QAM仿真和FPGA实验结果对比

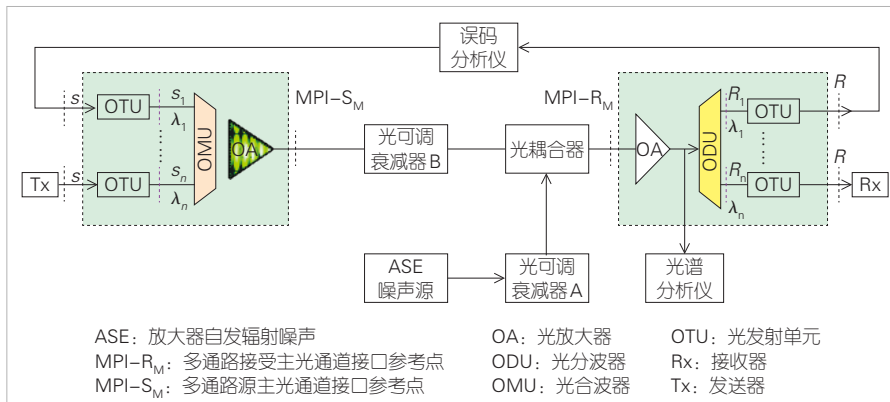
载不同的调制格式<sup>[7]</sup>。数字子载波和概率整形的结合就可以达到类似的效果。对于靠近中心的子载波，我们可以调制频谱效率高的弱整形64QAM；对于频率衰减比较严重且远离中心的子载波，我们可以调制频谱效率低的强整形64QAM，以应对更高的信道损伤和畸变。

### 4 基于数字子载波和概率整形技术的800G现网测试

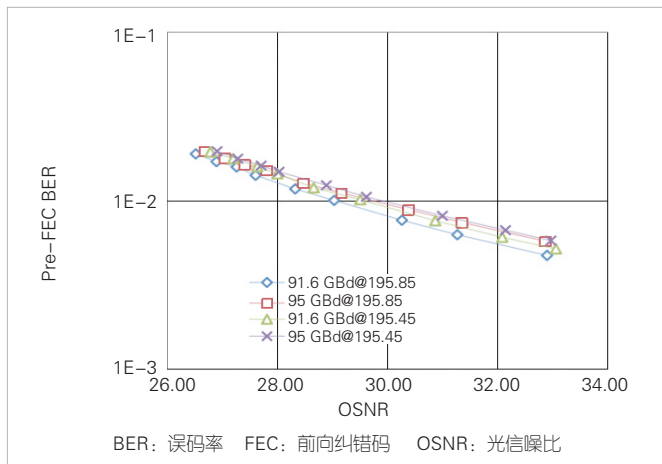
山东联通携手中兴通讯进行了单波800G现网传输测试。该测试采用新一代基于数字子载波和概率整形技术的800G光传输网（OTN）板卡。背靠背测试系统配置如图7所示。该系统最高波特率为95 GBd，调制格式为PS-64QAM。

图8给出了背靠背OSNR-PreBER测试结果。单波800G的OSNR容限约为26.2 dB，对应纠错门限为 $1.9E-2$ 。通过使用色散预补偿和数字子载波技术，该系统支持404 000 ps/nm

的色散补偿容限。得益于数字子载波的带宽优势，当采用95 GBd的波特率时，800G速率只需要100 GHz的通道间隔，进一步提升了频谱利用率。引入C++波段可提升传输带宽，使整根光纤的传输容量达到48 Tbit/s。通过采用800G PS-64QAM调制方式和C++传输系统，现网800G传输完成了 $1 \times 40$ 、 $2 \times 40$ 、 $3 \times 40$ 、 $1 \times 90$  km等应用场景测试。能达到这样的测试效果与概率整形、数字子载波这两项关键技术密切相关。如果采用常规的均匀调制64QAM，800G速率的OSNR容限在仿真系统中会高达27.5 dB。概率整形将OSNR需求至少降低1.3 dB。数字子载波的引入同样显著提升了色散补偿容限。常规单载波架构系统的



▲图7 800G背靠背测试配置



▲图8 800G背靠背测试系统的OSNR容量

色散补偿能力一般只有 20 000 ~ 30 000 ps/nm。测试充分验证了传输后 OSNR、长期稳定性、保护倒换能力、频谱分配等系统传输指标。结果表明，各项性能指标表现良好。

### 5 结束语

本文讨论了数字子载波复用技术和概率整形技术在高速相干光通信系统中的优势。数字子载波技术可以大幅降低色散补偿复杂度，使非线性损伤容忍度高于单载波，还可以进一步节省带宽，提高频谱效率。概率整形技术可以进一步接近香农容限，实现频谱效率的灵活可调。数字子载波复用技术和概率整形技术的联合使用，能够提升系统的ROADM穿通能力和传输容量。现网测试结果表明，这两项技术在800G相干系统中具有很高的优越性。

### 参考文献

[1] ROBERTS K, O'SULLIVAN M, WU K T, et al. Performance of dual-polarization QPSK for optical transport systems [J]. Journal of lightwave technology, 2009, 27(16): 3546-3559. DOI: 10.1109/JLT.2009.2022484  
 [2] GEYER J C, FLUDGER C R S, DUTHEL T, et al. Efficient frequency domain chromatic dispersion compensation in a coherent Polmux QPSK-receiver [C]// Proceedings of 2010 Conference on Optical Fiber Communication (OFC/NFOEC), collocated National Fiber Optic Engineers Conference. IEEE, 2010: 1-3

[3] SHIEH W, HO K P. Equalization-enhanced phase noise for coherent-detection systems using electronic digital signal processing [J]. Optics express, 2008, 16(20): 15718-15727. DOI: 10.1364/oe.16.015718  
 [4] POGGIOLINI P, NESPOLA A, JIANG Y C, et al. Analytical and experimental results on system maximum reach increase through symbol rate optimization [J]. Journal of lightwave technology, 2016, 34(8): 1872-1885. DOI: 10.1109/JLT.2016.2516398  
 [5] CHO J, WINZER P J. Probabilistic constellation shaping for optical fiber communications [J]. Journal of lightwave technology, 2019, 37(6): 1590-1607. DOI: 10.1109/JLT.2019.2898855  
 [6] YOSHIDA T, KARLSSON M, AGRELL E. Hierarchical distribution matching for probabilistically shaped coded modulation [J]. Journal of lightwave technology, 2019, 37(6): 1579-1589  
 [7] JANG J, LEE K B. Transmit power adaptation for multiuser OFDM systems [J]. IEEE journal on selected areas in communications, 2003, 21(2): 171-178. DOI: 10.1109/JSAC.2002.807348

### 作者简介



陆源，山东省邮电规划设计院有限公司传输网支撑中心主任、中国联通高级工程师、全国优秀通信设计工作者；主要从事干线传输和本地传送网工程项目的咨询设计与管理工作；主持设计的项目获省部级奖项20余项，参与制定通信行业标准1项，发表论文20余篇，拥有国家专利2项。



牛文林，中国联通山东省分公司云网运营中心云网承载组组长、技术总监，中国联通B级传送网专家人才，中国联通高级工程师；具有丰富的网络建设和管理经验，担任多年省公司专家组成员，在推动数字化转型、网络能力产品化、智能化运营等方面做出突出贡献；带领团队获得2020年信息通信行业“质量信得过班组”。



王永奔，中兴通讯股份有限公司算法系统工程师；主要从事相干光通信DSP算法的研究与应用。



胡子荷，中兴通讯股份有限公司算法系统工程师；主要从事相干光通信DSP算法的研究与应用。