

## 面向毫米波无线接入网的数字型光载无线技术

叶佳, 罗健威, 郭仪, 潘炜

(西南交通大学信息科学与技术学院, 四川 成都 611756)

**摘要:** 随着 5G 空口标准将毫米波段定为无线接入网络的重要载波频段, 毫米波通信成为提高移动通信系统传输性能的关键技术。首先介绍了面向毫米波无线接入网的数字型光载无线 (DRoF) 传输技术, 然后对目前应用于 DRoF 系统中的不同量化编码算法进行了比较与总结, 对系统的误差矢量幅度 (EVM)、系统复杂度及频谱利用率等重要性能指标进行了分析, 以期毫米波无线接入网的构建提供参考。

**关键词:** 毫米波通信; 无线接入网; 数字型光载无线; 移动前传

**中图分类号:** TN929.5

**文献标识码:** A

**doi:** 10.11959/j.issn.2096-3750.2019.00128

## Digital radio over fiber transmission technique for millimeter-wave radio access network

YE Jia, LUO Jianwei, GUO Yi, PAN Wei

The School of Information Science and Technology, Southwest Jiaotong University, Chengdu 611756, China

**Abstract:** As the air interface standard of 5G confirms the millimeter wave as one important frequency band for the signal carrier, millimeter-wave communication is considered as the key technique to improve the transmission performance of the mobile communication system. Firstly, the digital radio over fiber (DRoF) link in 5G application was introduced. Then, the different quantization coding algorithms applied in DRoF system were compared and summarized. In order to provide reference for the construction of millimeter-wave radio access network, the important performance indexes such as the error vector amplitude (EVM), system complexity and spectrum utilization were analyzed.

**Key words:** millimeter-wave communication, radio access network, digital radio over fiber, mobile fronthaul

### 1 引言

随着移动互联网的大规模普及和各类移动应用类型的丰富化, 用户对移动通信网络各项性能的需求与日剧增。一方面, 移动端内容逐步从传统文本信息向更多元化的媒体形式演进, 尤其是各类视频直播类应用的兴起, 更高分辨率的视频传输对下一代移动通信网络的传输速率提出了更严格的要求; 另一方面, 物联网领域各类应用的实用化衍生出了众多新的通信场景, 移动通信网络不再仅为“人”服务, 更要为“物”服务。不同的应用场景也对应不同的传输功能需求: 共享类应用需要更大的连接数密度及流量密度, 而车联网技术则要求更低的传输时延和更可靠的网络性能保障<sup>[1]</sup>。

在这种需求背景下, 5G 移动通信标准经过多年的研究与讨论最终确定。在业务特性方面, 5G 重新划分了三大典型应用场景以满足“人”与“物”的不同需求, 包括增强型移动宽带 (eMBB, enhance mobile broadband)、超可靠低时延通信 (uRLLC, ultra reliable low latency communications) 和大规模机器类通信 (mMTC, massive machine type communications)<sup>[2]</sup>; 在传输速率方面, 5G 移动通信需要的区域容量约是 4G 的 1 000 倍, 边缘速率也需要达到 4G 的 100 倍左右, 需要约 1 GHz 的带宽<sup>[3-4]</sup>。在低频段频谱利用率已基本达到瓶颈的情况下, 高频段通信 (6~100 GHz) 成为 5G 通信必须考虑的选择<sup>[5]</sup>, 这一区域大多使用毫米波作为载波。相对于低频载波, 高频率的毫米波信号在无线空间传输

过程中会随着传输距离的增加发生严重的弥散消耗,导致信号的传输距离大大缩短,同时,强路径损耗、信号被大气和雨水吸收、穿透能力弱等因素也是毫米波段迟迟未被使用的原因<sup>[6-10]</sup>。因此,解决宽带毫米波段无线信号的前传问题成为 5G 通信系统布网的关键。

为了解决这一问题,采用光载无线(RoF, radio over fiber)技术实现毫米波信号前传成为一种极具潜力的方案,并得到了各界研究人员的广泛关注。RoF 技术作为微波光子学的一项重要应用<sup>[11-13]</sup>,将射频信号直接加载到光纤上传输,接收端可以通过光电转换获得射频信号到达天线阵列。该技术结合了光纤通信带宽大、损耗低、免疫电磁干扰和无线通信便捷灵活的优势,具有易于安装维护和方便多运营商联合运营的特点。利用光纤来替代部分无线链路,并通过安装大量成本低廉的基站来解决高频毫米波在无线空间传播距离较短的问题,能为 5G 移动通信提供一种可靠的高频信号前传方案,符合 5G 接入网铺设中绿色通信、多网融合接入的愿景<sup>[14]</sup>。在已有的文献中,基于高阶正交振幅调制(QAM, quadrature amplitude modulation)、用于 75~110 GHz 毫米波频段上的 RoF 系统已经实现<sup>[15-17]</sup>,并且基于毫米波前传网络的 RoF 中继问题<sup>[18-19]</sup>也已得到解决。

值得注意的是,毫米波信号在传统模拟光载无线(ARoF, analog radio over fiber)系统中将会受光纤非线性及色散造成的功率衰落等因素影响,系统传输性能将严重受制于光纤长度及所用器件的非线性性能。针对 ARoF 系统的此缺陷,近些年研究人员提出了数字型光载无线(DRoF, digital radio over fiber)通信技术<sup>[20-21]</sup>。与 ARoF 通信相比,DRoF 系统中传输的是将射频信号进行采样、量化、编码后得到的数字信号,传输到基站再通过数模转换重建模拟射频信号。由于传输的是数字信号而非模拟信号,因此,不容易受到物理层的非线性损伤;如今光纤中主要传输的是数字信号,因此,DRoF 系统更适配于目前的光传输链路,从而能实现集中且经济高效的数字分配网络架构。

## 2 面向毫米波接入网的光学前传链路

5G 通信系统下的接入网架构如图 1 所示。5G 对 4G C-RAN 下基站的各项功能进行了重构和功能分割,把基带处理单元(BBU, base band unit)拆

分为集中单元(CU, centralized unit)和分布式单元(DU, distributed unit)两个逻辑实体,CU 负责处理非实时协议和服务,DU 负责处理物理层协议和实时服务。每个基站都有一套 DU,每套 DU 下又有多个有源天线单元(AAU, active antenna unit),多个站点共用同一个 CU 进行集中式管理<sup>[22-23]</sup>。因此,CU 可以根据实地情况分为不同的应用场景部署在适宜的地方,不需要密集放置。中心站与 CU 相连,一个 CU 下可以有多个 DU,一个 DU 可以连接多个 AAU。相应的无线接入网(RAN, radio access network)也分成 3 部分,AAU 和 DU 之间是前传(fronthaul),DU 和 CU 之间是中传(middlehaul),CU 至核心网是回传(backhaul)。而 RoF 技术是应用于 5G 接入网中前传链路的解决方案之一。

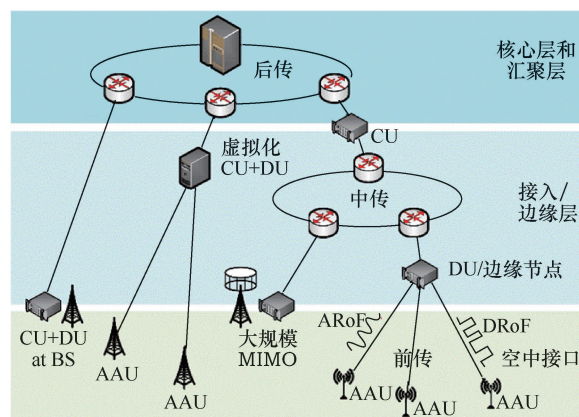


图 1 5G 通信系统下的接入网架构

基于 DRoF 的移动前传链路如图 2 所示,分布式单元 DU 中的基带数字信号通过光电转换器加载到光纤链路上,然后传输到 AAU,在 AAU 端通过光电转换器把光信号转换成射频信号并通过天线发送。由于目前的光纤承载网络以数字信号为主,数字化的移动前传技术可以匹配 4 电平脉冲幅度调制(PAM-4, 4 pulse amplitude modulation)等成型商用化设备,使这种数字化的移动前传网络易于部署。

在当前的 C-RAN 结构里,前传网络完全通过光链路传播,移动前端的通用公共无线接口(CPRI, common public radio interface)使用 15 位基于量化比特的非压缩扩展脉冲编码调制(PCM, pulse code modulation),一个 10 Gbit/s 的 CPRI 能够支持 4 个远端天线单元(RAU, remote antenna unit),每个 RAU 的 LTE 谱线宽度为 20 MHz,使用单扇区 2×2 天线。然而,在 5G 通信系统中,接入网中射频信号

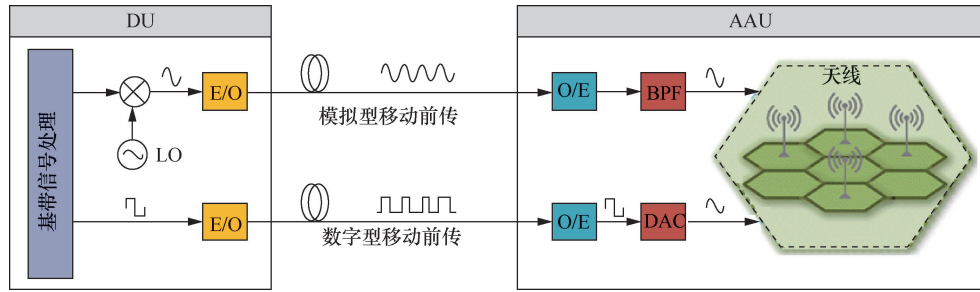


图 2 基于 DRoF 的移动前传链路

频段范围提升至毫米波段，需要使用更复杂的 RAU，4 个 100 MHz 带宽、3 扇区 8 天线的 RAU 需要高达 150 Gbit/s 的速率<sup>[24]</sup>，这是传统 CPRI 难以承载的。DRoF 信号在产生的过程中，需要经过抽样、量化和编码，相应的频谱效率会随着量化阶数的增大而成倍减小，增加了系统的复杂性，也就是说，如果能在保证信号传输的情况下将量化阶数减小，相应的频谱效率也会成倍增长。因此，发送端模拟信号的量化压缩编码技术是提升光学数字前传链路性能的关键。

### 3 数字移动前传网络中的 DRoF 技术

#### 3.1 基于标量量化的 DRoF 技术

在传统的 CPRI 中使用的 PCM 技术是一种均匀量化编码，量化电平间隔分布，极大地浪费了频谱资源。针对语音、视频等信号中常具有较强的相关性，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的 Zhang 等<sup>[25]</sup>将差分脉冲编码

调制 (DPCM, differential pulse code modulation) 技术应用于 DRoF 中，基于 DPCM 量化技术的光学前传链路如图 3 所示。在发送端，经过基带处理后的正交频分复用 (OFDM, orthogonal frequency division multiplexing) 信号进入 DPCM 模块中进行量化编码，再将 I/Q 两路输出值时分复用后合为一进行成帧、线路编码等操作。在接收端，经线路解码、拆帧、解复用、解码后的信号由数模转换器 (DAC, digital to analog converter) 生成射频信号送往天线发送。发送端和接收端 DPCM 模块结构如图 4 所示，输入 OFDM 信号  $s[n]$  和线性预测器的预测值  $\hat{s}[n]$  做减法，从而降低信号之间的相关性，使得输出信号  $e[n]$  较输入时具有更小的幅值动态范围。由此，在进行量化编码时，可以用更少的量化位数得到同样的效果，从而提高系统的频谱效率，并且有效降低信号的量化噪声 (SQNR, signal to quantization noise ratio)。

值得注意的是，线性预测器输出的预测值是输

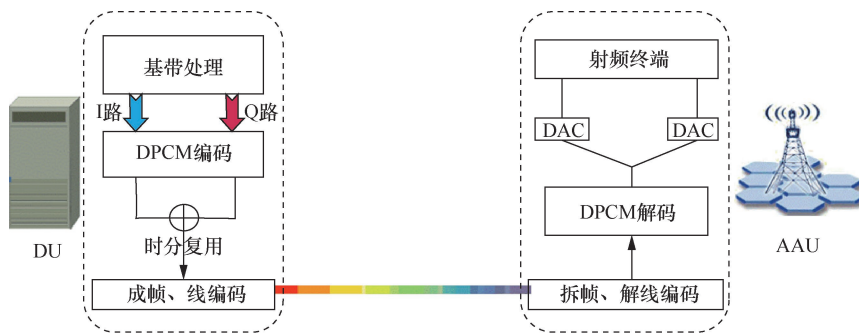


图 3 基于 DPCM 量化技术的光学前传链路

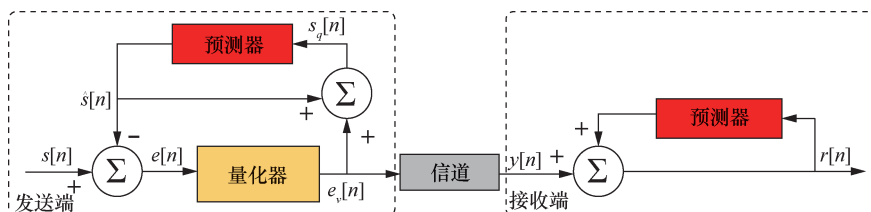


图 4 发送端和接收端 DPCM 模块结构

入信号的多个时延值与预测系数的乘积，而预测系数需要提前使用训练序列进行多次训练后得到。

不同调制格式下 DPCM 算法的 DRoF 30-Gbit/s PAM-4 前传网络中的 EVM 性能和频谱效率提升倍数如表 1 所示，展示了不同调制格式下使用 DPCM 算法的 DRoF 经过 20 km 30-Gbit/s PAM-4 调制的标准单模光纤 (SSMF, standard SMF) 传输且接收的光功率 (ROP, received optical power) 为 -8.5 dBm 时的光学数字移动前传网络误差矢量幅度 (EVM, error vector magnitude) 性能、所需的量化比特和频谱效率提升倍数，具体的实验参数设置见文献[25]。这里的频谱效率提升倍数是与传统使用 15 bit PCM 相比，如 64QAM 下量化比特数为 5，故提升 6 (15-bit/5-bit×2)倍。从表 1 中还可以看出，EVM 的值随量化比特数的增加而不断降低，这是因为缩小了量化的动态范围，DPCM 在相同量化比特下的 EVM 才能比 PCM 低，并且预测器阶数越大，则 DPCM 方案的性能优势越大。然而，增加预测器阶数会导致系统复杂度增加，因此在实际应用中，应该根据不同的应用场合权衡系统时延和性能的要求，选择合适的预测器阶数。

表 1 不同调制格式下 DPCM 算法的 DRoF 30-Gbit/s PAM-4 前传网络中的 EVM 性能和频谱效率提升倍数

调制格式	EVM	量化比特/bit	频谱效率/倍
4QAM	9.40%	3	10
16QAM	4.98%	4	7.5
64QAM	3.71%	5	6
256QAM	2.85%	6	5
1024QAM	0.96%	8	3.75
4096QAM	0.47%	9	3.33

在 Zhang 等<sup>[25]</sup>的基础上，光纤通信技术和网络国家重点实验室 (武汉邮电科学研究院) 的 Li 等<sup>[26]</sup>提出了在 DRoF 中利用噪声整形的 DPCM 技术 (NS-DPCM, DPCM with noise shaping)，通过在 DPCM 编码器的量化部分加入有限冲激响应滤波器组成的反馈回路，对噪声进行整形，从而降低 SQNR，以获得更好的 EVM 性能。

同年，Li 又提出了将离散余弦变换 (DCT, discrete cosine transform) 和多段量化 (MBQ, multi-band quantization) 技术用于光学数字移动前传中的方案<sup>[27]</sup>。DCT 是一种数学处理方法，由于变换后频率系数的主要成分集中于比较小的范围，因

此采用分段量化技术，在动态范围大的低频段采用较多量化比特，在动态范围小的高频段采用较少量化比特以及舍弃部分值极低的频率系数，从而提高压缩比，达到提高频谱效率的目的。

2019 年，美国有线电视实验室的 Xu 等<sup>[28]</sup>提出了在 DRoF 中使用基于自适应差分脉冲编码技术和松弛 Lloyd 算法的非均匀量化数据压缩技术。这种方案能够自适应地调整 DPCM 系统的加权系数，以适应不同概率分布的信号，在提高数字前传网络频谱效率的同时，减少了算法迭代次数。

基于标量量化的 4 种算法优缺点对比如表 2 所示，文献[25-26,28]中都使用了 DPCM 来减少量化误差，在一定程度上提高了系统的 SQNR 和 EVM 性能；与传统 PCM 方案相比，在满足系统性能要求的情况下，可以适当地减少量化比特数来提高频谱效率。然而，该方案的缺点是增加了系统的复杂度，基于高阶预测器的 DPCM 方案还可能会出现过拟合的情况；同时，当出现误码传输时，系统的抗噪声能力较差，将导致传输信号质量的急剧下降。

表 2 基于标量量化的 4 种算法优缺点对比

量化编码算法	优点	缺点
DPCM	较 PCM 编码技术在 EVM 性能、频谱效率上有明显提升	使用高阶预测器时会出现过拟合，且抗噪能力弱
NS-DPCM	同样的量化比特数下，EVM 性能较 DPCM 提升 40%	引入 FIR 滤波器回路，增加系统内存资源和功耗负荷
DCT-MBQ	在相同的压缩比下，较上述两种算法均有更好的 EVM 性能	算法不能自动划分量化段，移植性和适应新模式的能力差
自适应 DPCM-Lloyd	能够自适应地在不同的调制模式下保持较好的性能	系统较复杂，在低量化比特数时性能一般

### 3.2 基于矢量量化的 DRoF 前传技术

由于 OFDM 信号具有 I/Q 两路输出信号，在上文提到的量化编码算法中，需要对两路信号执行同步采样、同步量化和时分复用等调制步骤。为了避免执行同步操作，降低发送端的系统复杂度，使用矢量量化技术是一种非常适合的选择。这种数据压缩技术将多个一维数据编为一组，映射到高维度的矢量空间中实现量化。具体步骤为：将  $n$  个采样信号组合成一组，寻找矢量空间 (码本) 中与之对应的码字索引，从而将高维度的矢量信号映射到低维码字；在接收端，根据码字索引还原对应的矢量信号，最终获得

信息。矢量量化的关键在于码本的设计和高效的码字搜索算法。随着近年来机器学习的蓬勃发展，为矢量量化提供了高效可行的实现方案。

2018 年，Zhang 等<sup>[29]</sup>将 *K*-means 聚类算法应用到 DRoF 移动前传网络的量化技术中，实现将 DRoF 发送信号的维度从一维扩展到二维。*K*-means 是一种原型聚类算法，通过计算输入矢量与各簇之间的相似度来确定簇标记。基于 *K*-means 聚类算法的 DRoF 系统结构如图 5 所示，其中，发送端 OFDM 的两路 I/Q 信号输出作为二维矢量信号输入，利用 *K*-means 聚类算法，将二维矢量信号进行矢量量化，即在 *k* 个聚类簇中寻找离该矢量信号最相似的簇，再将该簇映射到一维的码字索引，然后由码字索引转换为二进制数，经 PAM-4 调制后加载到光路上进行传输。在矢量量化方案中，通常利用每采样点量化比特 (QB/Sa) 来代替量化比特数，即  $QB/Sa = (\log_2 k) / D$ ，其中，*D* 为矢量信号的维数。例如，用 1 024 个聚类簇来量化二维矢量信号时，则 QB/Sa 为 5。在数据接收端，PAM-4 解调后的信号被还原成码字索引，映射到对应的聚类簇，继而恢复成矢量信号。

与一维标量量化方法相比较，可以发现若将矢量信号先进行预处理，传输矢量为输入信号与预测信号的差值，可以降低矢量量化信号的动态面积，这意味着能用更少的聚类簇来量化相同的矢量信

号。因此，提出了在数字移动前传网络中使用二维线性预测矢量量化 (VLP-VQ, vector quantization with vector linear prediction) 的方案<sup>[30-31]</sup>。矢量线性预测算法原理如图 6 所示，矢量量化过程被分为两步。首先，将输入信号  $s_n$  与矢量线性预测器输出的值  $\hat{s}_n$  相加减，然后把得到的预测误差矢量  $e_n$  送入 *K*-means 矢量量化器中量化。按照训练好的码本进行编码后在光纤上传输，并在接收端还原。归一化的 VLP-OFDM 信号与 OFDM 信号如图 7 所示，从图 7 中可以看出，通过 VLP 模块后，输出信号具有较 OFDM 信号更小的动态范围，因此可以减少 QB/Sa 的开支，提高频谱效率。

除了使用 VLP-VQ 方法外，还提出了使用自组织特征映射聚类 (SOFM, self-organizing feature map) 进行信号矢量量化的 DRoF 数字前传方案<sup>[33]</sup>。SOFM 是一种“胜者为王”的竞争学习型神经网络，由输入层和输出层组成，其中，输入层的神经元数与样本维数相等，输出层为竞争层。二维 SOFM 神经网络结构如图 8 所示，输出层每个神经元与周围的其他神经元侧向连接，排列成棋盘状平面。输入层中的神经元通过权重向量连接到输出层中的某个神经元后，该神经元即获胜，其拓扑邻域  $N_c$  内的神经元有不同水平的兴奋值。在训练学习的过程中，获胜神经元会调整自身的权值向量，同时也会在其拓扑邻域  $N_c$  内按照兴奋水平调整周围神经元

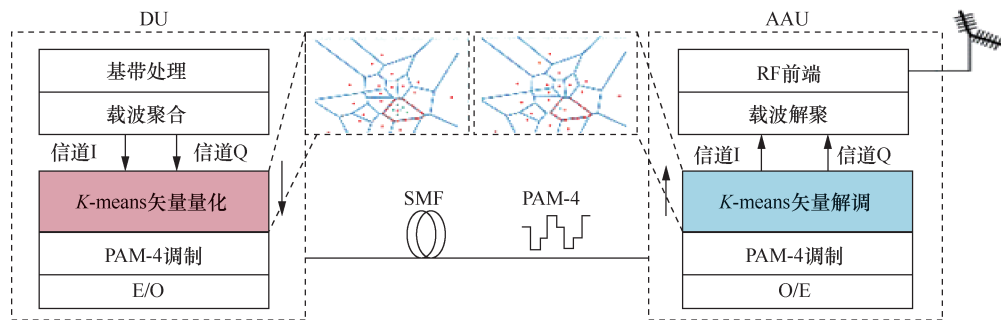


图 5 基于 *K*-means 聚类算法的 DRoF 系统结构

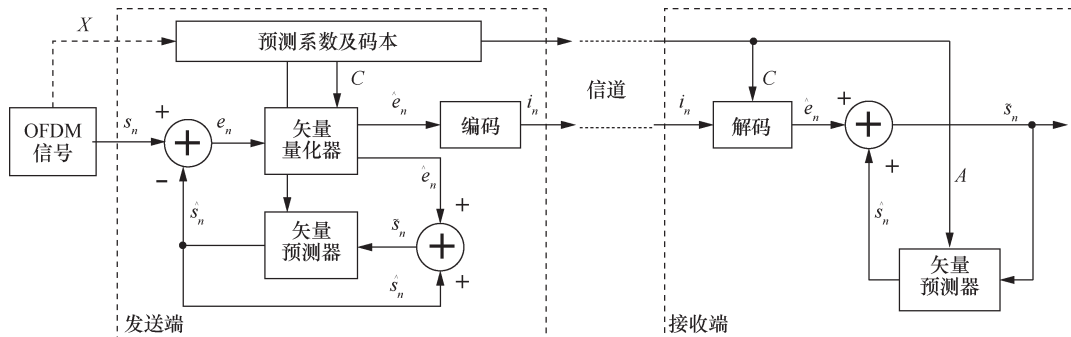


图 6 矢量线性预测算法原理

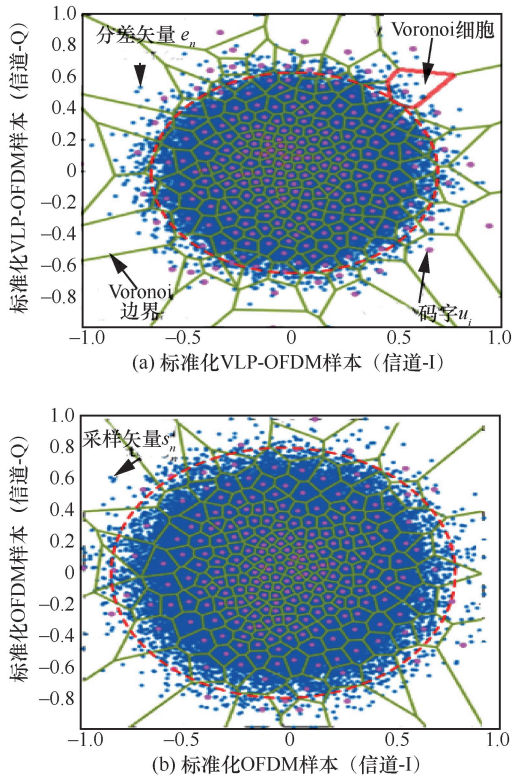


图7 归一化的VLP-OFDM信号与OFDM信号

的权值向量。 $N_c$  设置为时间相关的函数，随着学习时间的增加，面积逐渐减小直至 0。最后，输出层与输入层的映射关系被固定的码本记录下来。在 DRoF 中，根据码本对输入的矢量信号进行量化编码，并在接收端还原成原矢量信号。

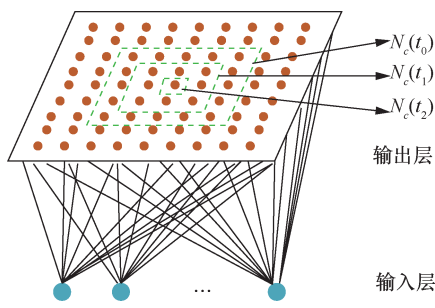


图8 二维 SOFM 神经网络结构

为了验证上述算法的性能和优劣，进行了相关实验，基于 VLP-VQ 的光学数字移动前传实验系统如图 9 所示，其他两种算法的实验也使用同样的设置，唯一变化的是矢量量化时所用的算法。如图 9 所示，在发送端，基带的 OFDM 信号带宽为 100 MHz (包含了 4 MHz 的保护带宽)。采用 1 600 个子载波间隔为 60 kHz 的载波信号，设置 FFT/IFFT 变换点数为 2 048，采样率为 122.88 MSa/s(2 048×60 kHz)。对于 4QAM、16QAM、64QAM、256QAM 的调制

阶数，QB/Sa 分别设置为 3、4、5、6。因此，27、20、16、13 个 4QAM、16QAM、64QAM、256QAM 调制的 100 MHz OFDM 信号分别通过时域复用不同的天线载波 (AxC) 容器帧来聚合。例如，对于 QB/Sa=5 的 64QAM 信号，10 Gbaud 的 PAM-4 信号可以支持约 16 (10 Gbaud×2/(122.88 MSa/s×5 bit×2)) 个 AxC 容器。I/Q 两路的 OFDM 采用信号输入到二维矢量量化器中，将得到的二进制码字序列调制成 PAM-4 信号通过 65 GSa/s 任意波形发生器 (AWG, arbitrary waveform generator) 控制 40 GHz 马赫曾德尔调制器 (MZM, Mach-Zehnder modulator)，从而将电信号加载到光路上。经过 25 km SSMF 10 Gbaud/λ 的 IM/DD 系统传输后，进行信号性能分析。其中，可变光衰减器 (VOA, variable optical attenuator) 用来调节 ROP，40 GSa/s 数字存储示波器 (DSO, digital storage oscilloscope) 用来捕获光电探测器 (PD, photodetector) 输出的电信号。

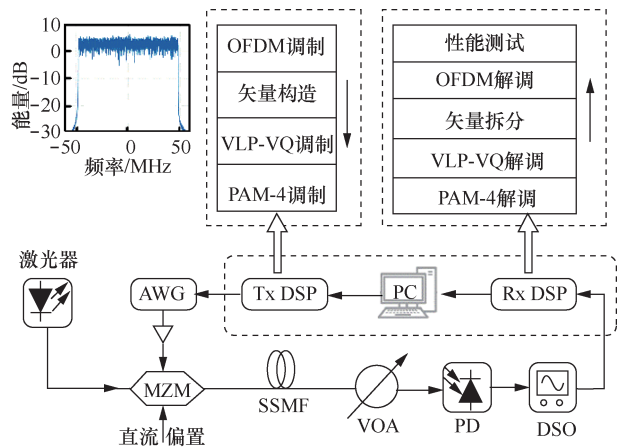


图9 基于 VLP-VQ 的光学数字移动前传实验系统

使用 K-means、VLP-VQ 和 SOFM 算法的 DRoF 系统在移动前传网络中的 EVM 性能对比如表 3 所示，体现了基于上述 3 种算法的 DRoF 系统在 25 km 单模光纤中传输、最优接收功率时的 EVM 性能。根据 3GPP 标准，在 4QAM、16QAM、64QAM、256QAM 的 QAM 调制阶数下，EVM 阈值分别为 17%、12.5%、8%和 3.5%<sup>[32]</sup>。基于 VLP-VQ 与 K-means 量化算法的信号 EVM 值随 ROP 变化曲线如图 10 所示，灰色虚线表示 EVM 阈值。从图 10 中可以看到，使用 VLP-VQ 的 EVM 性能比使用 K-means 聚类方法更好，针对 4QAM、16QAM、64QAM、256QAM 信号，分别使 EVM 值降低了 2.74%、1.43%、1.12%和 0.43%。这是由于在相同

条件下，VLP-VQ 方案引入的量化噪声更低。此外，当 QAM 的阶数较低时，基于 VLP-VQ 方案的 EVM 性能优势更明显。

表 3 使用 K-means、VLP-VQ 和 SOFM 算法的 DRoF 系统在移动前传网络中的 EVM 性能对比

算法	调制格式	EVM	QB/Sa
K-means	4QAM	16.15%	3
	16QAM	8.43%	4
	64QAM	5.01%	5
	256QAM	2.76%	6
VLP-VQ	4QAM	13.41%	3
	16QAM	7.00%	4
	64QAM	3.89%	5
	256QAM	2.33%	6
SOFM	4QAM	12.112%	3
	16QAM	6.211%	4
	64QAM	3.771%	5
	256QAM	2.85%	6

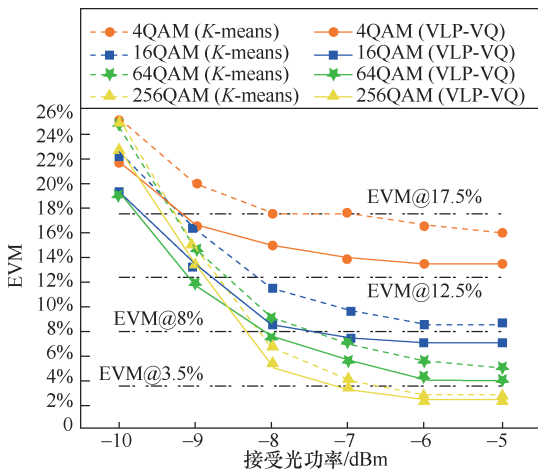


图 10 基于 VLP-VQ 与 K-means 量化算法的信号 EVM 值随 ROP 变化曲线

基于 SOFM 神经网络和 K-means 聚类进行线上 2-D 矢量量化的时间随 QB/Sa 变化曲线如图 11 所示，显示了在相同的实验环境下，K-means 聚类算法和 SOFM 聚类算法在数字移动前传系统中不同 QB/Sa 下矢量量化所需的计算时间。显然，随着 QB/Sa 的增加，K-means 聚类方案的矢量量化时间呈指数级增长，而 SOFM 神经网络聚类方案的矢量量化时间呈线性增长。因此，SOFM 聚类方法在 DRoF 系统的实时性能上明显优于 K-means 方法，能有效减少在线量化时间。

由于矢量量化的方法可以与 OFDM 信号天然地结合，与上一节提及的标量化方法相比，极大地减小了系统的复杂度，使得系统顽健性更好。在上述 3 种典型矢量量化方法中，K-means 方案有简

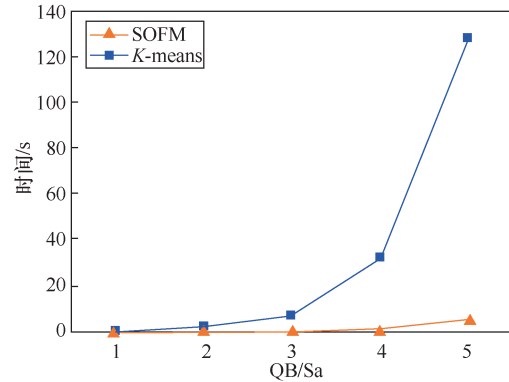


图 11 基于 SOFM 神经网络和 K-means 聚类进行线上 2-D 矢量量化的时间随 QB/Sa 变化曲线

单的系统结构；VLP-VQ 方案在一定程度上增加了系统的复杂度，但有更好的 EVM 性能和频谱效率；SOFM 方案缩短了信号的线上实时量化时间。在实际的 DRoF 系统中，应在满足 EVM 性能要求的同时，考虑频谱效率和实时性，选择合适的量化算法，矢量量化算法的优缺点如表 4 所示。

表 4 矢量量化算法的优缺点

量化算法	优点	缺点
K-means	结构简单，系统时延低	低量化位数时 EVM 性能较差
VLP-VQ	EVM 性能和频谱效率较 K-means 有较大的提升	系统结构复杂，预测阶数高时会出现过拟合
SOFM	实时性能较好，EVM 性能较好	线下训练时间较长

## 4 结束语

DRoF 作为一种接入网中的光学前传技术，在毫米波频段也有稳定的性能，受到了国内外研究人员的关注。本文对目前出现的基于标量量化和矢量量化的典型 DRoF 系统进行了归纳对比，内容涵盖了 5G 应用下的 DRoF 系统链路结构和其中的信号处理算法，既有对各个典型方案的具体介绍，也有各方案的优缺点对比。重点介绍了目前工作中提出的能有效提高系统传输性能的两种矢量量化方案。可以预见，致力于更高频谱效率和更快处理速度的 DRoF 系统的研究，将有助于 DRoF 更快地应用于毫米波无线接入网，对于推动相关领域的研究具有积极意义。

## 参考文献：

[1] BOCCARDI F, HEATHE R, LOZANO A, et al. Five disruptive technology directions for 5G[J]. IEEE Communications Magazine, 2014, 52(2): 74-80.  
 [2] 张平, 陶运铮, 张治. 5G 若干关键技术评述[J]. 通信学报, 2016, 37(7): 15-29.

- ZHANG P, TAO Y Z, ZHANG Z. Survey of several key technologies for 5G[J]. *Journal on Communications*, 2016, 37(7): 15-29.
- [3] ANDREWS J G, BUZZI S, CHOI W, et al. What will 5G be?[J]. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 2014, 32(6): 1065-1082.
- [4] 何世文, 黄永明, 王海明, 等. 毫米波无线通信发展趋势及技术挑战[J]. *电信科学*, 2017, 33(6): 11-20.  
HE S W, HUANG Y M, WANG H M, et al. Development trend and technological challenges of millimeter-wave wireless communication[J]. *Telecommunications Science*, 2017, 33(6): 11-20.
- [5] WATERHOUSE R, NOVACK D. Realizing 5G: microwave photonics for 5G mobile wireless systems[J]. *IEEE Microwave Magazine*, 2015, 16(8): 84-92.
- [6] PI Z, KHAN F. An introduction to millimeter-wave mobile broad-band systems[J]. *IEEE Communications Magazine*, 2011, 49(6): 101-107.
- [7] RAPPAPORT T S, SUN S, MAYZUS R, et al. Millimeter wave mobile communications for 5G cellular: it will work![J]. *IEEE Access*, 2013, 1(1): 335-349.
- [8] ROH W, SEOL J Y, PARK J, et al. Millimeter-wave beamforming as an enabling technology for 5G cellular communications: theoretical feasibility and prototype results[J]. *IEEE Communications Magazine*, 2014, 52(2): 106-113.
- [9] RANGAN S, RAPPAPORT T S, ERKIP E, et al. Millimeter-wave cellular wire-less networks: potentials and challenges[J]. *Proceedings of the IEEE*, 2014, 102(3): 366-385.
- [10] SKUBIC B, BOTTARI G, ROSTAMI A, et al. Rethinking optical transport to pave the way for 5G and the networked society[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2015, 33(5): 1084-1091.
- [11] CAPMANY J, NOVAK D. Microwave photonics combines two worlds[J]. *Nature Photonics*, 2007, 1(6): 319-330.
- [12] YAO J. Microwave photonics[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2009, 27(3): 314-335.
- [13] JAVIER M, JOSE C. Microwave photonics and radio-over-fiber research[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2009, 10(4): 96-105.
- [14] 雷秋燕, 张治中, 程方, 等. 基于 C-RAN 的 5G 无线接入网架构[J]. *电信科学*, 2015, 31(1): 112-121.  
LEI Q Y, ZHANG Z Z, CHENG F, et al. 5G radio access network architecture based on C-RAN[J]. *Telecommunications Science*, 2015, 31(1): 112-121.
- [15] BABIR M R N, CHOUDHURY P K. On the performance of high order QAM signals for analog and digital radio over fiber systems[C]//2017 4th International Conference on Advances in Electrical Engineering (ICAEE). 2015.
- [16] LI X Y, YU J J, XU Y M, et al. 60-Gbps W-Band 64QAM RoF system with T-spaced DD-LMS equalization[C]//2017 Optical Fiber Communications Conference and Exhibition (OFC). 2017.
- [17] LI X Y, YU J J, XIAO J N, et al. Field trial of 80-Gbit/s PDM-QPSK signal delivery over 300-m wireless distance with MIMO and antenna polarization multiplexing at W-band[C]//2015 Optical Fiber Communications Conference and Exhibition (OFC). 2015.
- [18] BAKAUL M, RAZIBUL ISLAM A H M, NIRMALATHAS A, et al. Recent progresses in gigabit wireless access using millimetre-wave RoFs[C]//2016 IEEE 6th International Conference on Photonics (ICP). IEEE, 2016.
- [19] PHAM T A, NGUYEN N T T, VU L T, et al. A novel hybrid fiber-wireless RoF/MMW system using bidirectional amplify-and-forward relaying[C]//2017 International Conference on Advanced Technologies for Communications (ATC). 2017.
- [20] NIRMALATHAS A, GAMAGE P A, LIM C, et al. Digitized radio-over-fiber technologies for converged optical wireless access network[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2010, 28(16): 2366-2375.
- [21] OLIVEIRA J M B, PESSOA L M, COELHO D, et al. Digitised radio techniques for fibre-wireless applications[C]//2014 16th International Conference on Transparent Optical Networks (ICTON). 2014.
- [22] LIEN S Y, SHIEH S L; HUANG Y, et al. 5G new radio: waveform, frame structure, multiple access, and initial access[J]. *IEEE communications magazine*, 2017, 55(6): 64-71.
- [23] CHIH-LIN I, HUANG J. RAN revolution with NGFI (xHaul) for 5G[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2018, 36(2): 541-550.
- [24] PFEIFFER T. Next generation mobile fronthaul architectures[C]//Optical Fiber Communications Conference and Exhibition (OFC). 2015.
- [25] ZHANG L, PANG X D, OZOLINS O, et al. Digital mobile fronthaul employing differential pulse code modulation with suppressed quantization noise[J]. *Optics Express*, 2017, 5(25): 31921-31936.
- [26] LI H B, LI X, LUO M, et al. Improving performance of differential pulse coding modulation based digital mobile fronthaul employing noise shaping[J]. *Optics Express*, 2018, 26(9): 11407-11417.
- [27] LI H B, LUO M, LI X, et al. Spectrally efficient digital mobile fronthaul with discrete cosine transform and multi-band quantization[J]. *Optics Letters*, 2018, 43(20): 5130-5133.
- [28] XU M, JIA Z S, WANG J, et al. Statistical data compression and differential coding for digital radio-over-fiber-based mobile fronthaul[J]. *Journal of Optical Communications and Networking*, 2019, 11(1): 60-71.
- [29] ZHANG L, PANG X, OZOLINS O, et al. Spectrally efficient digitized radio-over-fiber system with K-means clustering-based multidimensional quantization[J]. *Optics Letters*, 2018, 43(7): 1546-1549.
- [30] YE J, GUO Y, LI P, et al. Improving performance of digital mobile fronthaul employing 2-D vector quantization with vector linear prediction[J]. *IEEE Photonics Journal*, 2019, 11(2): 7201911.
- [31] YE J, GUO Y, YAN L S, et al. Vector linear prediction based two-dimensional quantization for digitized radio-over-fiber system[C]//2018 Asia Communications and Photonics Conference (ACP). 2018.
- [32] 3GPP. Evolved universal terrestrial radio access (E-UTRA); base station (BS) radio transmission and reception[S]. 2014.
- [33] YE J, GUO Y, LI P, et al. 2-D quantization scheme utilizing SOFM neural network clustering for a DRoF system[J]. *Optics Letters*, 2018, 43(19): 4663-4666.

## [作者简介]



叶佳 (1985- ), 男, 湖北仙桃人, 西南交通大学副教授, 主要研究方向为微波光子学、光载无线通信和无线信号感知。

罗健威 (1995- ), 男, 四川宜宾人, 西南交通大学硕士生, 主要研究方向为频率测量和矢量量化。

郭仪 (1993- ), 男, 湖北黄冈人, 西南交通大学硕士生, 主要研究方向为数字型光载无线和矢量量化。

潘炜 (1959- ), 男, 湖南岳阳人, 西南交通大学教授、博士生导师, 主要研究方向为通信与信息系统、微波光子学等。