



## 数模混合交织调制的电力通信专网研究

张俊<sup>1</sup>, 徐翔<sup>2</sup>, 芮文君<sup>2</sup>, 胡卫生<sup>3,4</sup>

(1. 中国电力工程顾问集团华东电力设计院有限公司, 上海 200063;

2. 国家能源集团泰州发电有限公司, 江苏 泰州 225327;

3. 上海交通大学, 上海 200240;

4. 鹏城实验室, 广东 深圳 518055)

**摘要:** 电力系统通信网是确保电网安全、稳定、经济运行的重要组成部分。电力专网中主要采用光纤传输系统, 尽管该系统能提供较大的传输带宽, 但仍存在信噪比提升的瓶颈。基于此, 提出一种数字模拟混合交织调制的传输方案, 在发射端, 将原始波形拆分成离散的数字部分和连续的模拟部分, 并进行复用传输。在接收端, 通过取整运算移除数字部分的链路噪声, 同时利用模拟部分的线性组合提升频谱效率。在此基础上, 通过同相和正交分量的时域交织降低峰均功率比, 从而在峰值功率受限的条件下提升有效信噪比。在直接检测系统实验中, 经过 1 km 标准单模光纤直接检测传输后, 68 GBd 数字模拟混合交织调制信号的恢复信噪比能够达到 33.0 dB, 可支持 17 GHz 带宽的 1 024 进制正交幅度调制 (1 024-ary quadrature amplitude modulation, 1 024-QAM) 信号接入, 实现 170 Gbit/s 的比特率, 以及 1 Tbit/s 的通用公共射频接口等效速率。仿真和实验结果表明, 与传统调制方案相比, 所提出的交织型数字模拟混合方案具有信噪比增益, 为低成本、大带宽、高保真的电力专网提供了一个可行的解决方案。

**关键词:** 电力通信; 交织型数字模拟混合调制; 直接检测; 信噪比

**中图分类号:** TP393

**文献标志码:** A

**doi:** 10.11959/j.issn.1000-0801.2025006

## Research on power communication private network based on interleaved digital-analog hybrid modulation

ZHANG Jun<sup>1</sup>, XU Xiang<sup>2</sup>, RUI Wenjun<sup>2</sup>, HU Weisheng<sup>3,4</sup>

1. East China Electric Power Design Institute Co., Ltd., China Power Engineering Consulting Group, Shanghai 200063, China

2. China Energy Group Taizhou Power Generation Co., Ltd., Taizhou 225327, China

3. Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China

4. Pengcheng Laboratory, Shenzhen 518055, China

**Abstract:** Power communication network is an important part to ensure the safe, stable, and economical operation of

收稿日期: 2024-10-12; 修回日期: 2024-11-25

通信作者: 张俊, qq355113@163.com

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (No.62271305)

**Foundation Item:** The National Natural Science Foundation of China (No.62271305)

power grid. The optical fiber transmission system is widely used in the power communication network to provide wide bandwidth. However, there is a signal-to-noise ratio obstacle for high-fidelity transmission. Based on this, an interleaved digital-analog hybrid modulation scheme was proposed. At the transmitter, the original waveform was divided into a discrete digital part and a continuous analog part. At the receiver, the link noise in the digital part was removed by rounding operation, and the spectral efficiency was improved by the linear combination of analog part. Besides, the time-domain interleaving of in-phase and quadrature components reduced the peak-to-average power ratio, and enhanced the effective signal-to-noise ratio under the peak power constraint. In the direct detection-based experiment, after 1 km standard single-mode fiber transmission, the recovered signal-to-noise ratio of 68 GBd signal with interleaved digital-analog modulation could achieve 33.0 dB, which supports the 1 024-ary quadrature amplitude modulation (1 024-QAM) signal with 17 GHz bandwidth. The corresponding bitrate was 170 Gbit/s, and the common public radio interface-equivalent rate was 1 Tbit/s. Both simulation and experimental results indicate that the interleaved digital-analog modulation scheme exhibits a signal-to-noise ratio gain compared with the conventional modulation scheme, and offers a feasible scheme for low-cost, high-bandwidth and high-fidelity power communication network.

**Key words:** power communication, interleaved digital-analog hybrid modulation, direct detection, signal-to-noise ratio

## 0 引言

电力系统通信网是确保电网安全、稳定、经济运行的重要组成部分<sup>[1]</sup>。目前,电力专网的传输层主要依赖于光纤传输,辅以少部分微波通信和电力载波通信。尽管光纤传输系统具有大带宽和低损耗的优势,但其信噪比存在提升瓶颈<sup>[2-3]</sup>,难以支持高可靠性和高保真信号传输。

数字模拟混合交织调制是一种高保真度和高谱效的传输方案<sup>[4-11]</sup>。在发射端,该方案将输入波形拆分成离散的数字部分和连续的模拟部分,并进行复用传输。在接收端,该方案通过数字再生技术移除数字部分的链路噪声,并利用模拟部分提升频谱效率。因此,该方案充分融合了数字调制的高信噪比特性和模拟调制的高频谱效率特性,为构建低成本、高可靠的电力通信专网提供了潜在解决方案。

本文设计了一种数字模拟混合交织调制方案,以降低信号的峰均功率比。经过 1 km 标准单模光纤直接检测传输后,68 GBd (吉波特)的数字模拟混合调制信号可达到 32.0 dB 的恢复信噪比门限,支持

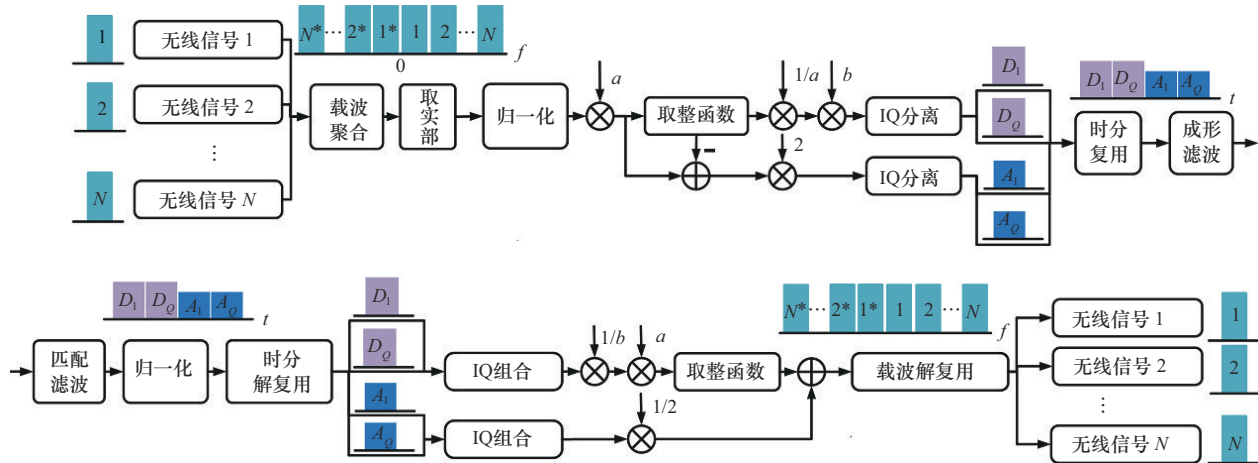
17 GHz 带宽的 1 024 进制正交幅度调制 (1 024-ary quadrature amplitude modulation, 1 024-QAM) 信号接入,对应的数据传输速率为 170 Gbit/s,通用公共射频接口的等效速率为 1 Tbit/s。

## 1 交织型数字模拟混合调制方案的原理和性质

本文设计的交织型数字模拟混合调制方案原理如图 1 所示。在调制过程中,该方案将多路无线信号在频域进行载波聚合,并加入共轭对称的频谱分量来确保聚合后的时域波形为实数。输入波形  $S_0$  经过幅度归一化处理,按取整因子  $a$  放大,并通过取整运算进行数字化处理,生成的数字部分按放缩因子  $b$  放大。同时,模拟部分通过输入波形与数字部分作差生成。数字部分  $S_D$  和模拟部分  $S_A$  的生成如下所示:

$$\begin{cases} S_D = b \cdot \text{round}(S_0 \cdot a) / a \\ S_A = (S_0 \cdot a - a S_D / b) / 2 \end{cases} \quad (1)$$

其中,  $\text{round}(\cdot)$  表示取整运算,取整因子  $a$  和放缩因子  $b$  分别决定数字部分的星座图大小以及数字和模拟部分的幅度比,从而根据链路噪声水平提



$a$ : 取整因子;  $b$ : 放缩因子;  $D_i$ : 数字部分的同相分量;  $D_o$ : 数字部分的虚部;  
 $A_i$ : 模拟部分的同相分量;  $A_o$ : 模拟部分的正交分量;  $f$ : 频率;  $N$ : 无线信号通道数;  $*$ : 共轭;  $t$ : 时间。

图1 交织型数字模拟混合调制方案原理

供灵活、低复杂度的生成方式。对于交织型数字模拟混合调制，该方案将数字和模拟部分的同相和正交分量相分离，经过时分复用和成形滤波后，波形以实数形式在基带上传输，与低成本的强度调制直接检测系统兼容。

在解调过程中，首先对接收波形进行滤波匹配和时域解复用，接收的数字部分  $S'_D$  和模拟部分  $S'_A$  的同相和正交分量被重新合并，如下所示：

$$S'_D = \text{round}(S'_D \cdot a/b) + S'_A/2 \quad (2)$$

其中，对数字部分进行缩放，并通过取整运算去除链路噪声。然后，将数字部分和模拟部分叠加重构无线波形。相比于传统方案，交织型数字模拟混合调制方案不需要射频源进行上/下变频，降低了硬件复杂度。根据式 (2) 可知，当功率受限时，接收信噪比降低，此时应选用较大的放缩因子  $b$  和较小的取整因子  $a$ ，以确保取整运算后数字部分的正确性。

接下来，本文分析交织型数字模拟混合调制方案的性质，并将其与传统结构进行对比。不同取整因子下的数字部分星座图分布情况如图2所示。理论上，星座点数量为  $(2[a]+1)^2$  个，其中， $[\ ]$  表示最接近的整数。当取整因子分别为 1.0、2.0、3.0、4.0、5.0 和 6.0 时，星座图分别对应为

9-QAM、25-QAM、49-QAM、81-QAM、121-QAM 和 169-QAM。在实际系统中，数字部分的星座点数量需要根据链路信噪比，优化取整因子  $a$  决定。此外，根据中心极限定理，采用离散多音频调制的无线信号幅度呈高斯分布。

不同缩放因子下的数字模拟混合调制时域波形如图3所示。由图3可知，数字部分的振幅小于模拟部分，原因是外圈星座点出现的概率较低。因此，放缩因子有助于平衡数字部分和模拟部分的传输信噪比。

交织型数字模拟混合调制和传统方案生成信号的互补累积分布函数 (complementary cumulative distribution function, CCDF) 随峰均功率比 (peak-to-average power ratio, PAPR) 的变化曲线如图4所示。其中，交织型数字模拟混合调制方案的峰均功率比为 11.1 dB，低于传统方案的 12.9 dB。在无光放大的短距离直接检测系统中，由于主要受限于峰值功率<sup>[12]</sup>，因此较低的峰均功率比有助于在传输后获得较高的有效信噪比。

基于交织型数字模拟混合调制和传统方案生成信号的频谱如图5所示。由图5可知，交织型数

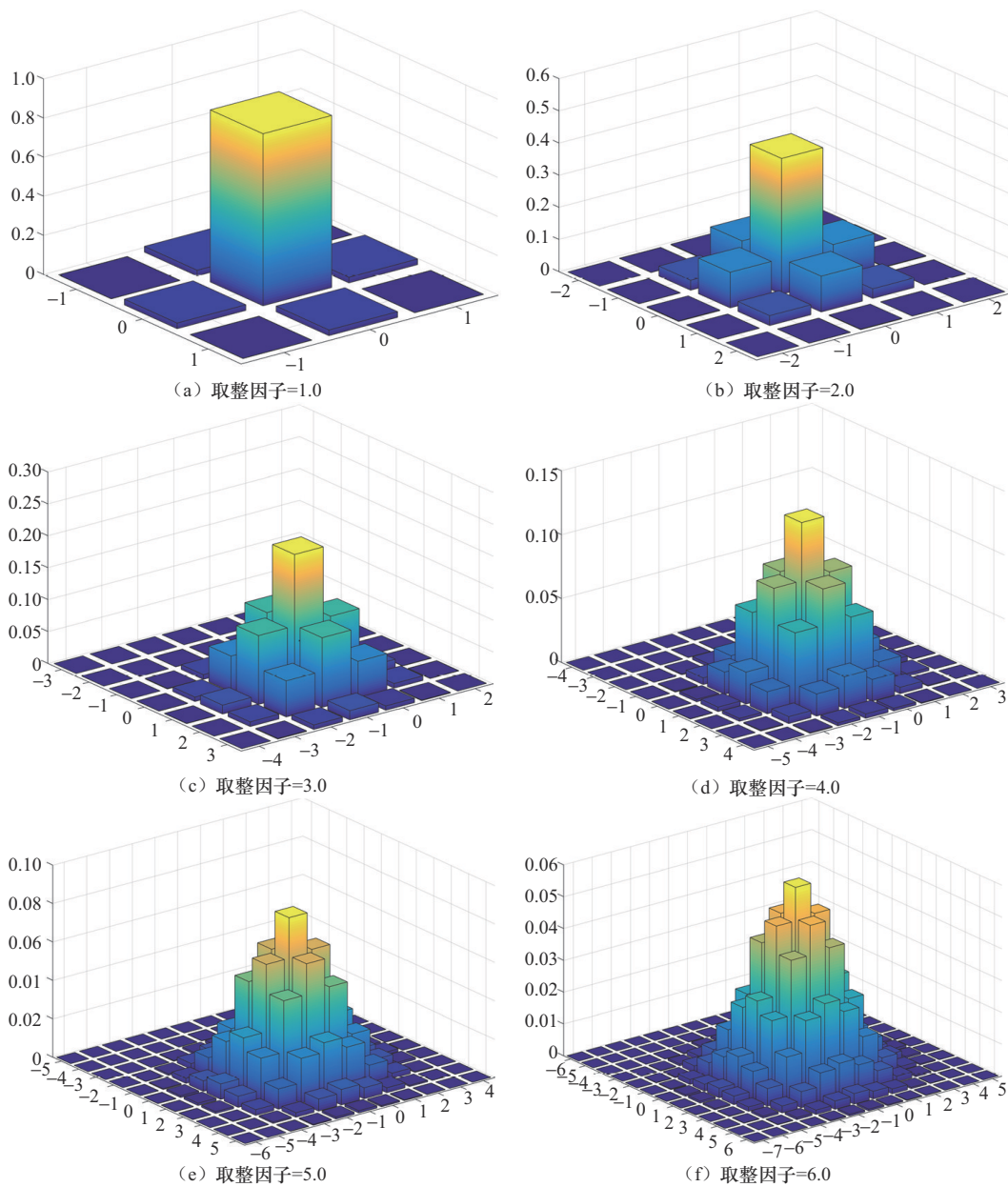


图2 不同取整因子下的数字部分星座图分布情况

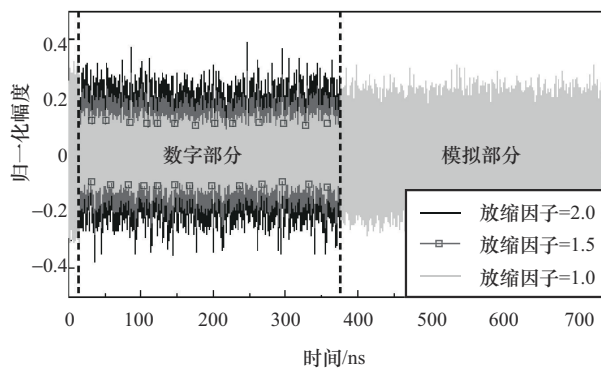


图3 不同放缩因子下的数字模拟混合调制时域波形

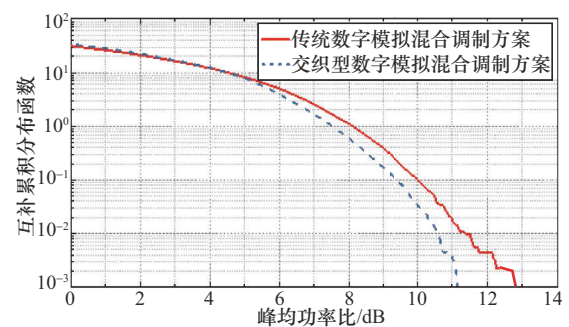


图4 交织型数字模拟混合调制和传统方案生成信号的互补累积分布函数随峰均功率比的变化曲线



字模拟混合调制方案的信号带宽略小于传统方案。传统方案基于副载波调制，对滚降系数有更严格的要求，以避免频谱重叠，且由于零频率附近的保护带较小，其对带宽限制的容限稍差。假设成形滤波后的基带带宽为 $B$ ，则基于副载波调制的传统方案信号带宽的理论值为 $B(f_{sc} + (1+r)/2)$ ，其中 $f_{sc}$ 为副载波频率， $r$ 为根号升余弦滤波器的滚降系数。交织型数字模拟混合方案的信号带宽理论值为 $B(1+r)$ 。为避免频谱重叠，副载波频率通常要求 $f_{sc} > (1+r)/2$ ，因此理论上交织型方案更加节省带宽。

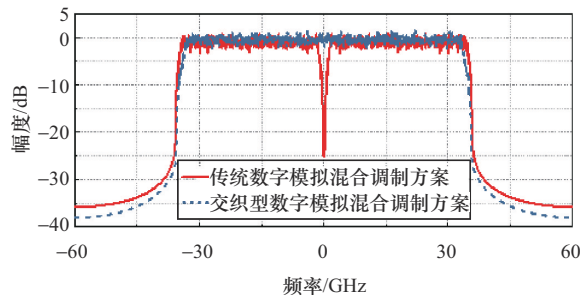


图5 基于交织型数字模拟混合调制和传统方案生成信号的频谱

两种方案生成时域信号的幅度分布如图6所示。由图6可知，在交织型方案中观察到多个峰值，这是由于采用强度调制的数字部分电平呈离散分布。作为对比，在传统方案中，上变频后的时域信号电平是混合的，无特定峰值分布。

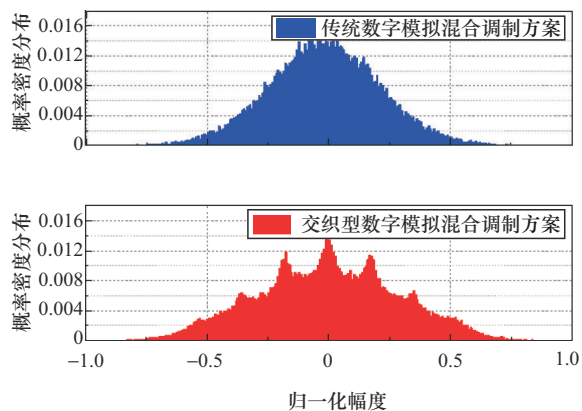


图6 两种方案生成时域信号的幅度分布

恢复信噪比随取整因子和放缩因子的变化如图7所示，图7对取整因子和放缩因子进行了二维参数优化。电力专网链路被数字建模成无带宽限制的加性高斯白噪声信道。交织型数字模拟混合调制信号的符号率设定为68 GBd，滚降系数为0.01。在光信噪比为23 dB时，最佳恢复信噪比为29.8 dB，相应的最佳因子组合为(5.5, 3)。随着链路光信噪比的增加，数字部分可支持更高的调制格式，无线信号的恢复信噪比增益将会更大。

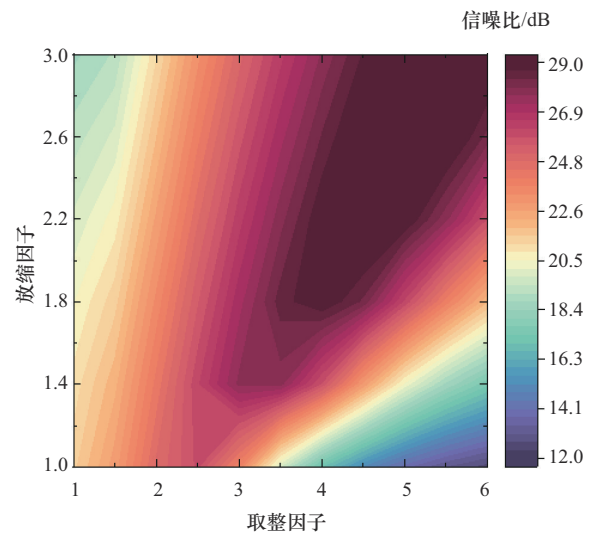


图7 恢复信噪比随取整因子和放缩因子的变化

## 2 实验装置与数字信号处理流程

在交织型数字模拟混合调制方案的基础上，本文演示了高保真度、大容量和低成本传输系统。基于交织型数字模拟混合调制方案的强度调制直接检测实验装置如图8所示。在发射端，采用波长为1 550.34 nm的外腔激光器作为光源，其输出光功率为14.5 dBm。经过交织型数字模拟混合调制后，生成信号的同相和正交分量分别由120 GSa/s采样率的任意波形发生器产生，并加载到35 GHz带宽的双驱动马赫-曾德尔调制器上。无中继传输链路包括1 km标准单模光纤，其累积色散量为170 ps/nm。对于O波段边缘的1 340 nm波长处，

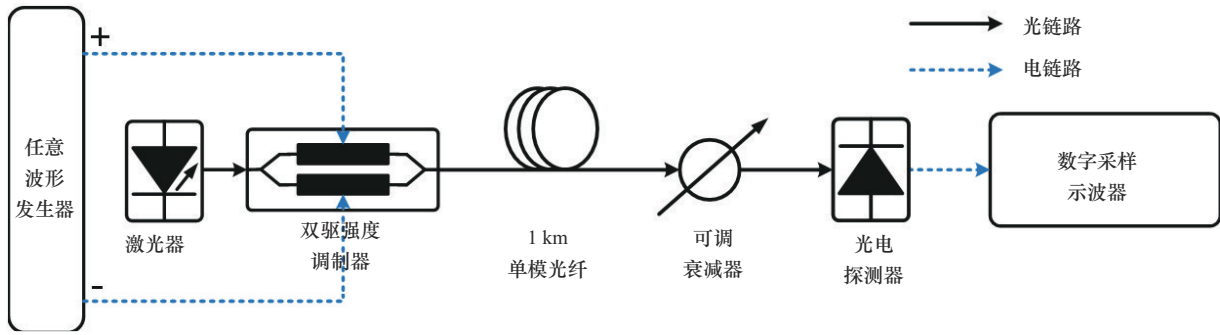


图8 基于交织型数字模拟混合调制方案的强度调制直接检测实验装置

其等效传输距离约为 8 km。在接收端，设置可调光衰减器用于控制信号的接收光功率。然后，通过 40 GHz 带宽的光电探测器完成光电转换。最后，由 100 GSa/s 采样率的数字采样示波器对电信号进行采样和量化。整个链路不使用任何电放大器或者光放大器，以降低系统功耗。

发射端和接收端的数字信号处理流程如图 9 所示。在发射端，生成的 1 024-QAM 符号序列由二进制比特序列映射而成。本实验采用离散多音频调制，以模拟图 1 中经过载波聚合后的原始无线信号，并且确保实值化处理后的信号与强度调制直接检测系统兼容。快速傅里叶变换大小被设为 1 024，其中有效子载波个数为 1 000。经过交织型数字模拟混合调制或传统方案调制后的信号，在帧结构前端插入同步和训练序列，其长度分别为 256 和 1 024 个符号。然后，使用滚降系数为 0.05 的根号升余弦滤波器对波形进行成形滤波处理。最后，采用基于二次曲线拟合的频域预加重来补偿发射机带宽限制。

在接收端，首先将波形重新采样，确保每符号有 2 个采样点，通过搜索接收信号与同步序列之间的互相关峰值完成帧同步。然后，使用三阶 Volterra 非线性均衡器消除符号间干扰和调制器的非线性影响，其抽头系数通过基于训练序列的递归最小二乘算法进行更新。1 阶、2 阶和 3 阶的抽头长度分别设置为 201、9 和 5。随后，波形下

采样为每符号 1 个采样点，并将其送入数字模拟混合解调模块。最后，仅通过快速傅里叶变换恢复离散多音频信号。根据恢复的星座图，计算信噪比。

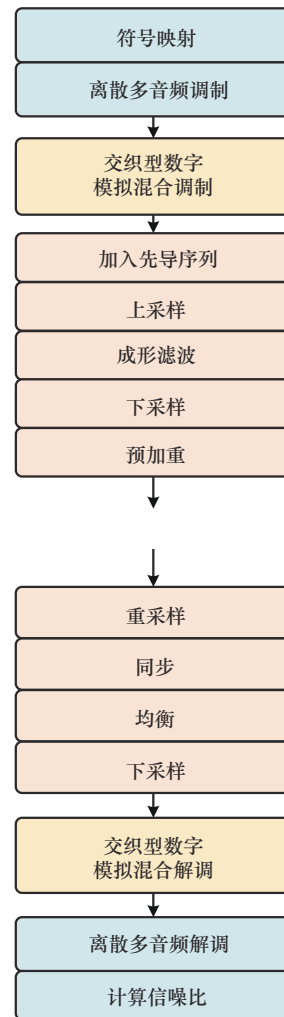


图9 发射端和接收端的数字信号处理流程



### 3 实验结果与分析

传统数字模拟混合调制方案的恢复信噪比随取整因子和放缩因子的变化曲线如图 10 所示。为了公平比较，信号调制格式固定为 1 024-QAM。由于模拟部分的放大增益，恢复的信噪比首先随着取整因子增大而增大，随后在数字部分发生判决错误时下降。在放缩因子的帮助下，数字部分幅度得到放大，从而在相同的链路噪声下获得更大的最优取整因子。在最优因子组合(5.0,2.0)下，传统方案的最大恢复信噪比为 31.8 dB。

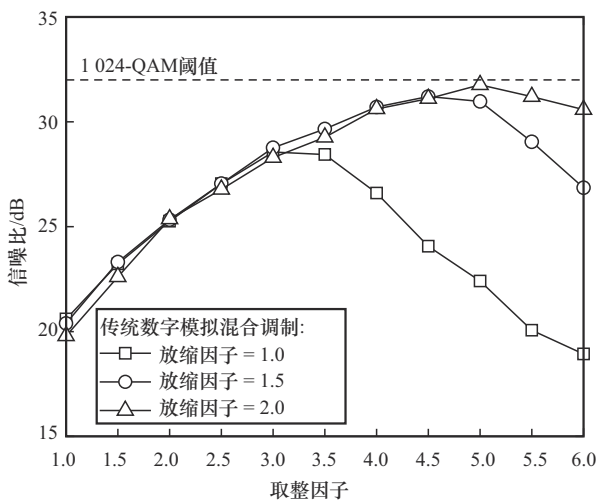


图 10 传统数字模拟混合调制方案的恢复信噪比随取整因子和放缩因子的变化曲线

作为对比，交织型数字模拟混合调制方案的恢复信噪比随取整因子和放缩因子的变化曲线如图 11 所示。在最优因子组合(5.0,1.5)下，传统方案的最大恢复信噪比为 33.0 dB。这是因为交织型方案具有更低的峰均功率比，在峰值功率受限系统中可获得更大的有效信噪比。

两种方案的恢复信噪比随符号率变化曲线如图 12 所示。其中，以模拟调制的性能作为基准。在符号率为 68 GBd 时，交织型方案可以达到 32.0 dB 的信噪比阈值，支持 1 024-QAM 传输。

相比于模拟调制方案，交织型数字模拟混合调制方案在符号率 48~68 GBd 范围内均可取得 11 dB 以上的信噪比提升，而传统型方案仅在符号率 64~68 GBd 范围内可取得 11 dB 以上的信噪比提升。随着符号率降低，交织型方案相比传统型方案的信噪比优势逐步增大。这是因为随着符号率降低，带宽限制逐渐放宽，系统从平均功率受限回到峰值功率受限。尽管数字调制可以通过增加量化比特数取得更高的信噪比，但是其频谱效率较低，难以通过单波长直接检测架构来支持 10 GHz 以上带宽的无线信号传输。

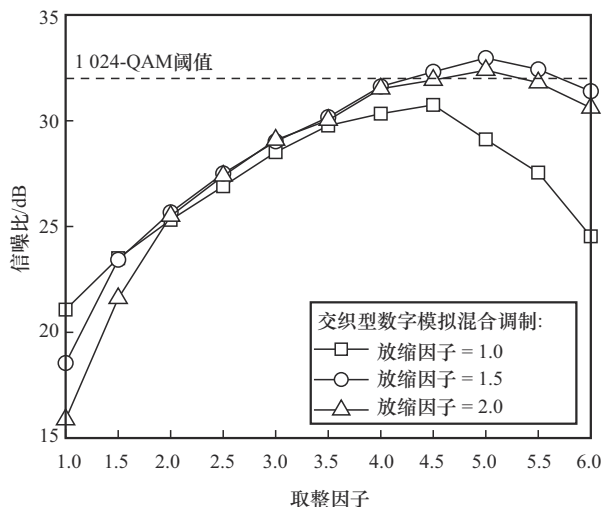


图 11 交织型数字模拟混合调制方案的恢复信噪比随取整因子和放缩因子的变化曲线

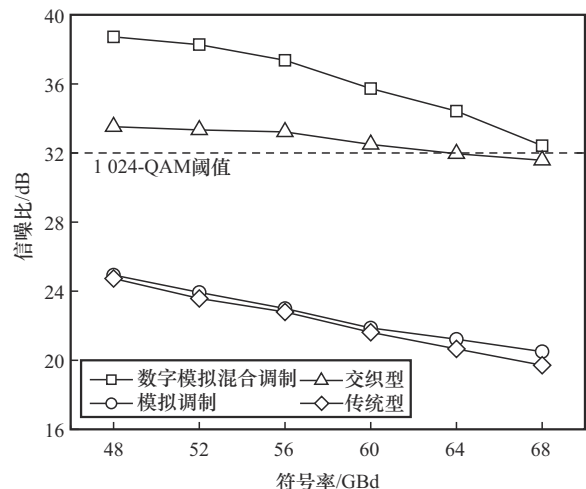


图 12 两种方案的恢复信噪比随符号率变化曲线

不同取整因子下交织型数字模拟混合调制和传统方案的恢复信噪比随符号率变化曲线如图 13 所示。其中，信号调制格式从 1 024-QAM 提升至 4 096-QAM。当符号率高于 66 GBd 时，由于带内噪声的增加，信噪比下降，需要将取整因子从 5.5 降至 5.0，以确保数字部分恢复的正确性。在信噪比为 37.8 dB 的信噪比门限上，最高可支持 52 GBd 的信号传输，对应 13 GHz 带宽的 4 096-QAM 信号。

背靠背和 1 km 单模光纤传输后的接收光功率灵敏度曲线如图 14 所示。符号率为 68 GBd，调制格式为 1 024-QAM。在背靠背和 1 km 光纤传输后，接收灵敏度分别为 0.2 dBm 和 1.3 dBm。接收灵敏度代价主要来自光纤色散。

1 km 单模光纤传输后恢复的 1 024-QAM 星座如图 15 所示。信号带宽为 17 GHz，恢复信噪比为 33.0 dB，星座点基本分离，表明信号传输质量较高。

为充分结合数字高保真度和模拟高频谱效率的优势，近年来有一系列数模混合的调制方案。例如，增量总和调制方案，在发射端通过数字调制实现高量化信噪比，在接收端采用模拟带通滤波器，降低硬件复杂度。但是，增量总和调制方案往往需要 8 倍以上的过采样率，限制了可用的信号传输带宽。相比之下，数模混合交织调制方案仅用 2 倍带宽取得 10 dB 以上的信噪比提升，在频谱效率和信噪比的折中关系上更具优势。此外，相比于传统数模混合调制，交织型方案通过将实部和虚部分离，有效降低信号的峰均功率比，从而在峰值功率受限的无光放大直接检测系统中提升有效信噪比。

硬件复杂度方面，交织型数字模拟混合调制方案降低了信号峰均功率比和带宽要求，可以在无光放大的直接检测<sup>[13]</sup>链路中应用，降低系统的功耗和复杂度<sup>[14]</sup>；在链路适应性方面，交织型数字模拟混合调制方案可进一步应用于相干检测链路，从而大幅拓展传输距离和接收灵敏度。

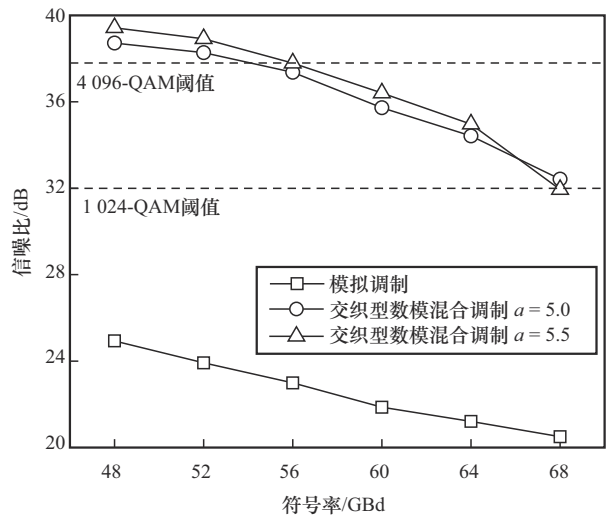


图 13 不同取整因子下交织型数字模拟混合调制和传统方案的恢复信噪比随符号率变化曲线

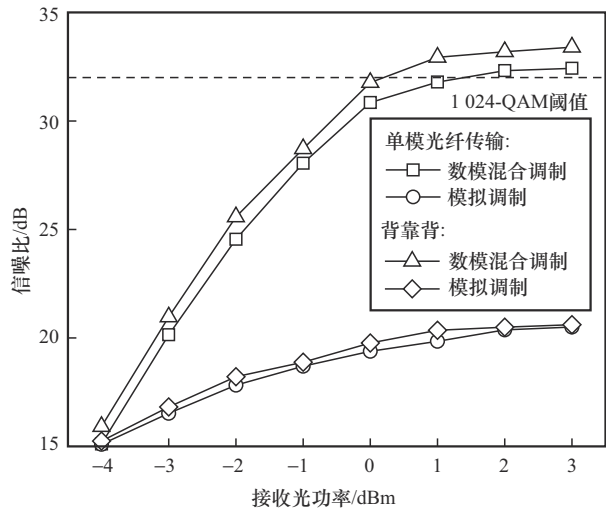


图 14 背靠背和 1 km 单模光纤传输后的接收光功率灵敏度曲线

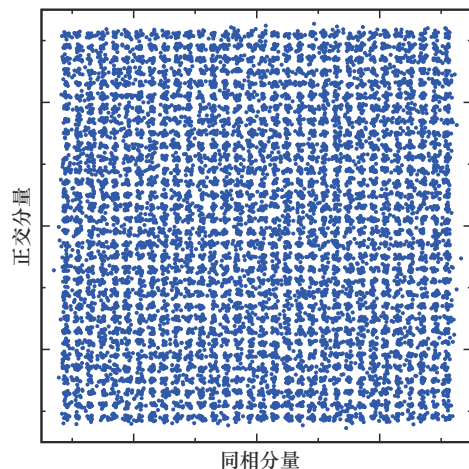


图 15 1 km 单模光纤传输后恢复的 1 024-QAM 星座



## 4 结束语

本文针对电力通信专网的高保真、大带宽、低成本接入需求,设计了数字模拟混合交织调制方案,通过将原始波形拆分成数字和模拟两部分,分别获得了抗噪声能力和高频谱效率,并降低了信号的峰均功率比,从而在直接检测系统中获得了信噪比增益。经过1 km标准单模光纤的直接检测传输实验后,17 GHz带宽下1 024-QAM信号可达到33.0 dB的恢复信噪比,对应的数据传输速率为170 Gbit/s,通用公共射频接口的等效速率为1 Tbit/s。该方案为未来电力通信专网高保真度、高频谱效率、高可靠性的信号一体化接入提供了方案参考。

### 参考文献:

- [1] 国家市场监督管理总局, 国家标准化管理委员会. 电力通信网运行评估指标体系: GB/T 38438—2019[S]. 北京: 中国标准出版社, 2019.  
State Administration for Market Regulation, Standardization Administration of the People's Republic of China. Operational evaluation index system for electric power communication network: GB/T 38438—2019[S]. Beijing: Standards Press of China, 2019.
- [2] JI H L, SUN C, SHIEH W. Spectral efficiency comparison between analog and digital RoF for mobile fronthaul transmission link[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2020, 38(20): 5617-5623.
- [3] LIU X. Hybrid digital-analog radio-over-fiber (DA-RoF) modulation and demodulation achieving a SNR gain over analog RoF of >10 dB at halved spectral efficiency[C]//*Proceedings of the Optical Fiber Communication Conference (OFC) 2021*. Washington, D.C.: Optica Publishing Group, 2021: Tu5D.4.
- [4] LIU X. Enabling optical network technologies for 5G and beyond[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2022, 40(2): 358-367.
- [5] XU Y C, ZHUGE Q B, FAN Y Y, et al. Coherent digital-analog radio-over-fiber (DA-RoF) system with a CPRI-equivalent data rate beyond 1 Tb/s for fronthaul[J]. *Optics Express*, 2022, 30(16): 29409.
- [6] ZHU Y X, XU Y C, HU W S, et al. Cascaded digital-analog radio-over-fiber for efficient SNR scaling at >10 dB per extra bandwidth[J]. *Optics Letters*, 2022, 47(15): 3836-3839.
- [7] ZHANG C B, ZHU Y X, HE B B, et al. Clone-comb-enabled high-capacity digital-analog fronthaul with high-order modulation formats[J]. *Nature Photonics*, 2023, 17: 1000-1008.
- [8] WANG M X, YU J J, ZHAO X M, et al. SNR improved digital-cascaded-pulse-code-modulation radio-over-fiber scheme supporting 16, 777, 216 QAM for mobile fronthaul[J]. *Journal of Optical Communications and Networking*, 2023, 15(12): 948-957.
- [9] WANG M X, YU J J, LI W P, et al. SNR improved digital-analog radio-over-fiber scheme for a millimeter wireless fronthaul[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2024, 42(10): 3531-3539.
- [10] ZHAO J H, YAN A, LI G Q, et al. 1.92-Tb/s CPRI-equivalent rate direct detection transmission based on ANN pre-equalization for digital-analog radio-over-fiber mobile fronthaul[C]//*Proceedings of the Optical Fiber Communication Conference (OFC) 2024*. Washington, D.C.: Optica Publishing Group, 2024: Tu3K.3.
- [11] ZHANG C B, ZHU Y X, LIN J J, et al. High-fidelity sub-petabit-per-second self-homodyne fronthaul using broadband electro-optic combs[J]. *Nature Communications*, 2024, 15(1): 6621.
- [12] CHE D, CHO J, CHEN X. Does probabilistic constellation shaping benefit IM-DD systems without optical amplifiers?[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2021, 39(15): 4997-5007.
- [13] CHE D, CHEN X. Modulation format and digital signal processing for IM-DD optics at post-200G era[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2024, 42(2): 588-605.
- [14] RIBEIRO M V, DE L FILOMENO M, CAMPONOGARA Â, et al. Seamless connectivity: the power of integrating power line and wireless communications[J]. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 2024, 26(1): 1-40.

[作者简介]



张俊 (1987-), 男, 中国电力工程顾问集团华东电力设计院有限公司高级工程师, 主要研究方向为电力系统通信规划设计。



芮文君 (1982-), 女, 国家能源集团泰州发电有限公司工程师、电气专业维护工程师, 主要研究方向为电力系统二次技术。



徐翔 (1983-), 男, 国家能源集团泰州发电有限公司高级工程师, 主要研究方向为电气工程及其自动化。



胡卫生 (1964-), 男, 博士, 上海交通大学教授、鹏城实验室研究员, 主要研究方向为全光通信网与光交换、高速光接入与移动前传等。