**文献综述**

**研究背景：**

随着云计算、5G/6G移动通信、AI大模型、智联网汽车等技术的快速发展，全球数据流量呈现指数级增长。作为信息基础设施的核心载体，光通信网络面临带宽需求激增与传输效率提升的双重挑战。在新型数据中心间接入网领域，亟需突破传统强度调制直接检测（IM-DD）系统的容量限制和色散敏感等瓶颈。相干检测虽能显著提升容量，但其依赖高速数字信号处理（DSP）和高成本窄线宽激光器的问题限制了在短距场景的应用。近年来，以“简化相干”为代表的技术路线成为研究热点，目标是通过光域信号处理替代复杂DSP算法，以及实现更大系统容量，实现低成本、低功耗的高容量传输。

因此，研究人员主要通过优化星座分布提升信道容量，或通过频谱效率提升系统容量的提升。在此背景下，概率成型技术及信号编码技术成为研究热点。

**研究现状：**

* **整形技术及非线性均衡：(研究方向：低复杂度，低功率，高性能)**

**一、概率整形（PS）的优化与非线性信道适配**

近年来，概率整形（PS）技术通过非均匀符号分布逼近香农极限，显著提升了光纤通信系统的频谱效率与非线性容限。然而，传统PS接收机面临复杂度高、对相位噪声敏感等问题。近期研究聚焦于低复杂度PS接收机设计，以平衡性能与实现成本。

从PS发射机本身出发，Yao, S.,等.(2020) 设计一种灵活的自适应PS-QAM系统，通过Maxwell-Boltzmann/角距导向（MB/ADD）混合分布，优化信号在低信噪比（SNR）与高激光相位噪声场景下的性能。动态调整整形参数，适应不同信道条件，达到相位噪声容忍度提升2 dB的效果[29]。

针对PS在载波相位恢复（CPR）问题中的性能退化问题，Barbosa等人（2020）提出通过调整整形因子优化盲相位搜索（BPS）算法，在低信噪比下减少相位噪声影响，同时结合导频辅助两阶段CPR策略，兼顾高/低信噪比场景的鲁棒性[1]。Civelli 等（2024）提出序列选择（Sequence Selection）技术，通过符号序列筛选实现非线性整形增益，同时降低对载波相位恢复的依赖[10]。Tian 等（2022）提出基于 8APSK 导频的载波相位恢复算法，将盲相位搜索（BPS）的复杂度降低 99.9%，适用于高阶 PS 调制。这些研究表明，通过算法优化和结构化设计，PS 接收机可在低复杂度下实现接近理论极限的性能[12]。Mello,D.A.A.等(2018).提出基于主成分分析（PCA）的低复杂度相位估计方案，解决PS方形QAM信号在盲相位搜索（BPS）中的决策相关性误差。PCA降维减少计算复杂度，同时抑制非线性相位噪声，得到1.4 dB Q因子提升[27]。另一方面，Dzieciol 等（2021）利用几何整形（GS）结合低复杂度解调器，在部分相干高斯噪声（PC-AWGN）信道中实现了对残留相位噪声的鲁棒性[19].

通过动态整形因子调整和算法优化，解决PS在高阶调制中的非线性损伤累积问题，Kong等（2022）进一步提出截断概率整形（TPS）技术，通过约束整形深度降低均衡器复杂度，并结合多输入多输出（MIMO）Volterra均衡器，在800 Gb/s/λ系统中实现2000 km传输[2]。Zhao等（2023）提出子星座重叠整形方法，通过优化星座截断减少额外性能损失，在7芯光纤系统中实现116.66 Tb/s的净速率[3]。此外，Fan 等（2024）通过多输入多输出 Volterra 多项式均衡器（MVPE），在 PS-4096QAM 系统中实现了 2.8 dB 的灵敏度提升，同时保持计算复杂度与传统均衡器相当[11]。

**二、多维几何整形与低复杂度信号处理**

几何整形（GS）通过优化星座点位置提升欧氏距离，而多维调制（如 4D/24D）进一步利用维度间相关性增强非线性容限。近期研究主要集中于通过低复杂度编码映射和检测算法，推动GS 与多维调制的实用化。

例如：Chen等（2023）提出基于象限复用的四维调制格式（GS-4D），通过集合划分（Set Partitioning）与粒子群优化（PSO）标签设计，在相同频谱效率下较PM-16QAM获得6.6 dB的OSNR增益[4]。Liu等（2024）设计24维Voronoi星座，结合混合标签与多级编码，在C波段超信道中实现12.2 bit/s/Hz的谱效率，复杂度较传统QAM降低30%[5]。Liu 等（2023）设计的 4D-2A-RS64 调制通过恒功率特性和简化标签，在非线性光纤中获得 10.6% 的传输距离提升[13]。此外，Yan 等（2023）提出基于象限复用的 4D 调制，通过集合划分（SP）和粒子群优化（PSO）降低检测复杂度，BER 性能较传统 16QAM 提升 3个数量级[14]。

近期PS的多维技术也有相应的进展，Wu, T., 等 (2024)提出一种基于概率整形（PS）的四维（4D）调制方案，结合软判决解码，用于自零差相干检测系统。通过幅度平移（Amplitude Translation, AT）与集合分割（Set Partitioning, SP）优化4D星座分布，提升频谱效率与非线性容忍度，并使用软判决机制结合概率分布优化，相比硬判决提升1.85 bit/symbol增益[26]。

这些工作通过多维空间相关性利用和低复杂度算法设计，解决了高维调制在系统中的实现难题。

**三、自适应均衡与机器学习辅助的低复杂度方案**

针对PS信号的非线性均衡挑战，Yuan等（2024）提出高斯加权决策均衡（GWDE）方法，结合离散高斯拟合理论自适应调整聚类权重，在PS-64QAM系统中将非线性功率容限提升0.7 dBm，复杂度降低12%[7]。此外，分布匹配器（DM）是 PS 的关键模块，其复杂度与速率损失直接影响系统性能。Fu 等（2021）提出并行二分法分布匹配（BS-CCDM），在保持线性性能的同时，通过优化查找表（LUT）减少非线性损伤，在 250 km 传输中获得 0.48 dB 的有效 SNR 增益[17]。Li等（2024）设计基于分布感知的卷积神经网络（DACNN），利用先验概率分布校准非线性均衡器，较传统Volterra均衡器提升2.6 dB接收灵敏度[8]。

在传输系统端到端优化方面，Zhang等（2024）提出前馈神经网络（ANN）辅助的熵加载机制，通过多通道动态熵分配在频率梳系统中提升34.91 Gb/s容量[9]。Neskorniuk 等（2023）通过端到端学习联合优化概率与几何整形，在 170 km 光纤链路中获得 0.47 bits/2D-symbol 的互信息增益[15]。Zhang 等（2024）利用神经网络估计概率整形参数，在速率自适应系统中实现连续熵调整，容量提升 34.91 Gbit/s[16]。

**Note：PS整形的同步算法。**

Xu等人（2024）设计低复杂度联合时钟恢复与自适应均衡（JCA）方案，支持小滚降因子奈奎斯特信号，在短距相干系统中实现PS兼容的色散与IQ偏斜补偿[18].

**四、概率整形（PS）与速率自适应/动态调制格式与多维度编码**

1.概率整形通过动态调整星座点分布，实现信息率的灵活适配，尤其适用于信道条件变化的场景：

Xing等人（2023） 在无光放大的相干无源光网络（CPON）中，提出混合PS方案（包括反向PS），通过固定调制阶数调整概率分布，实现动态范围扩展（72%）和净速率自适应（85-168 Gbps），适应不同光功率预算[20]。

2.通过多维调制或熵加载实现速率自适应：

Cai等人（2018） 提出混合概率与几何整形的4D调制格式（4D-PS-9/12-56APSK），通过多维编码动态逼近香农极限，支持跨不同光纤链路（7,600 km与6,970 km）的速率优化，实现70 Tb/s以上容量[21]。Tian等人（2024） 提出基于PS的多维调制（4D/8D/12D-QAM），通过冗余分离与光导频联合传输，实现高达57.29 bit/s/Hz的频谱效率，支持Tb/s级动态速率传输[22]。Lv, R.,等. (2019)提出一种基于几何整形（GS）的速率自适应方案，通过多对一标签映射优化11-QAM星座结构，兼容比特交织编码调制（BICM）[28]。

**~~Note：混沌加密方案：~~**

~~Wang, L.,等. (2023) 详细探究概率整形（PS）对相干光混沌通信性能的提升作用，优化系统对同步误差和非线性失真的容忍度，发现在16QAM系统中，PS使BER降低一个数量级，同步误差容忍度提升至±5%符号周期[23]。Wei, S.等. (2024) 提出一种结合安全传输与动态密钥更新的概率整形（PS）方案，解决传统PS在加密灵活性和安全性上的不足，在120 km光纤的相干OFDM 16QAM系统中，净速率达9.95 Gb/s，与传统无加密方案相比无性能损失[24]。Chen, Y.等. (2023) 设计一种基于4D联合加密的高安全性自零差相干系统，结合混沌序列的四种操作——异或、恒定分布匹配、相位扰动和光层时延扰动，实现多维加密，解决传统加密方案在物理层和数字层的安全漏洞[25]。此外，Zeng等（2024）提出基于混沌相位噪声加密的几何整形方案，通过等效透镜效应简化非线性补偿，在216 Gb/s 8-QAM系统中提升1.1 dB接收灵敏度[6]。~~

**参考文献**

[1] Barbosa, F. A., et al. (2020). "Phase and Frequency Recovery Algorithms for Probabilistically Shaped Transmission." \*Journal of Lightwave Technology\* 38(7): 1827-1835.

[2] Kong, M., et al. (2022). "800-Gb/s/carrier WDM Coherent Transmission Over 2000 km Based on Truncated PS-64QAM Utilizing MIMO Volterra Equalizer." \*Journal of Lightwave Technology\* 40(9): 2830-2839.

[3] Zhao, J., et al. (2023). "116.66-Tb/s WDM Transmission Over 16 Km Field Deployed 7-Core Fiber Based on Sub-Constellations Overlap Constellation Shaping." \*Optics Express\* 31(17): 28355-28369.

[4] Chen, B., et al. (2023). "Geometrically-Shaped Multi-Dimensional Modulation Formats in Coherent Optical Transmission Systems." \*Journal of Lightwave Technology\* 41(3): 897-910.

[5] He, Z., et al. (2024). "12.2 Bit/s/Hz C-Band Transmission With High-Gain Low-Complexity 24-Dimensional Geometric Shaping." \*Journal of Lightwave Technology\* 42(14): 4829-4836.

[6] Zeng, W., et al. (2024). "Chaotic Phase Noise-like Encryption Based on Geometric Shaping for Coherent Data Center Interconnections." \*Optics Express\* 32(2): 1595-1608.

[7] Yuan, X., et al. (2024). "A Flexible Multi-Rate Adaptive Blind Equalization Scheme Based on Constellation Probability Shaping in Coherent Optical Fiber Communication Systems." \*Journal of Lightwave Technology\*.

[8] Li, Y., et al. (2024). "DACNN-aided Nonlinear Equalizer for a Probabilistic Shaping Coherent Optical Communication System." \*Applied Optics\* 63(7): 1881-1887.

[9] Zhang, Z., et al. (2024). "Capacity Enhancement Through Entropy Loading With Probabilistically Shaped Signals in a Frequency Comb-Based Transmission System." Optics Letters 49(9): 2377-2380.

10.Civelli, S., et al. (2024). Sequence-Selection-Based Constellation Shaping for Nonlinear Channels. Journal of Lightwave Technology.

11.Fan, J., et al. (2024). MIMO Volterra polynomial equalizer for PDM ultrahigh-order QAM signals. Optics Letters.

12.Tian, F., et al. (2024). Design of Probabilistic Shaping 4D Ultra High Order Modulation Format With 8APSK Pilot Aided Carrier Phase Recovery

13.Liu, J., et al. (2023). Fault-tolerant four-dimensional constellation for coherent optical transmission systems. Optics Express.

14.Yan, X., et al. (2023). Quadrant Multiplexing-based Geometrically Shaped Four-Dimensional Modulation Format for Polarization Multiplexed Coherent Optical Communication System. Optical Fiber Technology.

15.Neskorniuk, V., et al. (2023). Memory-aware end-to-end learning of channel distortions in optical coherent communications. Optics Express.

16.Zhang, Z., et al. (2024). Capacity enhancement through entropy loading with probabilistically shaped signals in a frequency comb-based transmission system. Optics Letters

17.Fu, M., et al. (2021). Parallel Bisection-based Distribution Matching for Nonlinearity-tolerant Probabilistic Shaping in Coherent Optical Communication Systems. Journal of Lightwave Technology.

18.(2024)Low-complexity robust baud-rate clock recovery for probabilistically shaped Nyquist signals in short-reach coherent transmission systems

19. Dzieciol, H., et al. (2021). The partially-coherent AWGN channel: Transceiver strategies for low-complexity fibre links. Journal of Lightwave Technology.

20. Xing, S., et al. (2023). Probabilistic shaping probability distribution scrambling based on a chaotic system for integrating secure transmission and adaptive key updating. Journal of Optical Communications and Networking 15(8): 507-517.

21. Cai, J. X., et al. (2018). 70.46 Tb/s over 7,600 km and 71.65 Tb/s over 6,970 km Transmission in C+L Band Using Coded Modulation with Hybrid Constellation Shaping and Nonlinearity Compensation. Journal of Lightwave Technology 36(1): 114-121.

22. Tian, F., et al. (2024) 1.06 Tbit/s space division multiplexing self-homodyne coherent transmission with high spectral efficiency probabilistic shaping multidimensional modulation. Optics Express 32(24): 42500-42517.

23.Wang, L., et al. (2023) Performance improvement of coherent optical chaos communication using probabilistic shaping. Optics Letters

24. Wei, S., et al. (2024) Probabilistic shaping probability distribution scrambling based on a chaotic system for integrating secure transmission and adaptive key updating Optics Express

25.Chen, Y., et al. (2023) High-security constellation shaped self-homodyne coherent system with 4-D joint encryption. Optics Express

26. Wu, T., et al. (2024). "Probabilistic Shaping Four-Dimensional Modulation With Soft Decision for Self-Homodyne Coherent Detection Systems." IEEE Transactions on Communications 72(8): 4992-5002.

27. Mello, D. A. A., et al. (2018). "Interplay of Probabilistic Shaping and the Blind Phase Search Algorithm." Journal of Lightwave Technology, 36(22), 5096-5105.

28. Lv, R., et al. (2019). "A constellation shaped 11-QAM signaling scheme based on geometric and probabilistic shaping." Optics Communications, 452, 450-456.

29. Yao, S., et al. (2020). "Flexible Coherent Communication System with Adaptable SNR and Laser Phase Noise Tolerance for Probabilistically Shaped QAM." Journal of Lightwave Technology, 38(22), 6178-6186.

* **简化相干技术中的信号编码方式**

**“简化相干”的技术路线中，Alamouti编码作为一种极化时间块码（PTBC）技术，通过发射端冗余编码实现接收端的偏振不敏感，消除了传统相干接收机对偏振控制器（APC）的依赖，成为简化相干系统的核心解决方案。研究内容主要分为：**

**一、编码方式与传输技术优化**

[1]提出基于 Alamouti 编码的自零差系统，结合数字子载波复用（DSCM）技术，在 80 km 单模光纤（SMF）中实现了 50Gbaud 4SC-16QAM 信号的稳定传输。[2]进一步简化了 PTBC 解码器结构，通过单均衡器设计将接收机复杂度降低 50%，并在 20 km SMF 中实现了34dB功率预算。

**二、抗损伤能力提升**

针对偏振模色散（PMD）问题，[5]提出块反转 Alamouti（BR-Alamouti）编码，通过频率域正交性设计，使系统在 200ps DGD 下仍保持较好的性能。此外，结合数字导频辅助[3]或并行均衡器[6]的方法，系统在频率偏移、相位噪声及动态 PMD 场景下的鲁棒性显著增强。

**参考文献**

[1] Wang, W., Zou, D., Wu, Z., Sui, Q., Huang, D., Lu, C., & Li, F. (2025). Alamouti coding enabled polarization insensitive simplified self-homodyne coherent system for short-reach optical interconnects. Optics & Laser Technology, 182, 112164.

[2] Oh, J.-Y., Moon, S.-R., Chang, S.-H., & Kang, H.-S. (2024). Alamouti-coded DSP algorithm with a simplified PTBC decoder for next-generation optical access networks. Optics Express, 32(11), 18727-18741.

[3] Li, H., Luo, M., Li, X., Zhang, X., & Yu, S. (2024). Demonstration of polarization-insensitive coherent 56-Gb/s PAM-4 PON using real-valued Alamouti coding combined with digital pilot. IEEE Photonics Technology Letters, 36(10), 633-636.

[4] Faruk, M. S., Louchet, H., Erkılınç, M. S., & Savory, S. J. (2016). DSP algorithms for recovering single-carrier Alamouti coded signals for PON applications. Optics Express, 24(21), 24083-24091.

[5] Jin, T., Wang, R., Zhang, J., Lin, H., Zheng, Z., Hu, S., Wang, C., & Qiu, K. (2024). Large PMD Tolerance Using Block Reversal Alamouti Coding in Simplified Coherent System. Journal of Lightwave Technology, 42(14), 4800-4808.

[6] Torres-Ferrera, P., Faruk, M. S., Kovacs, I. B., & Savory, S. J. (2024). Parallel Adaptive Equalizer for Alamouti-Coded Signals Recovery in Simplified Coherent PON. IEEE Photonics Technology Letters, 36(10), 633-636.

* **低复杂DSP/DSP-free技术实现**

**DSP-Free相干检测架构**

提出基于 InP 集成发射器的 100 Gb/s 传输方案，通过4个直接调制 DFB 激光器阵列和准零差检测，实现 C 波段 6.5 km 传输。接收机通过低通滤波和平方处理补偿啁啾，误码率（BER）低于 FEC 阈值 [1]。进一步开发“简化相干”收发器，利用自零差检测和全双工光纤，实现单波长 400 Gb/s（50 Gbaud DP-16QAM）传输，功耗仅为传统相干系统的 5%（28 nm CMOS）[2]。

提出频率同步光网络（FSON）架构，通过光锁相环（OPLL）和声学光调制器（AOM）实现无 DSP 的 DP-QPSK 解复用，接收灵敏度达-30dBm [3]。结合光时钟同步和注入锁定激光器，实现全光处理的64 Gbaud QPSK 信号的波特率采样的自相干系统[4]。

**参考文献：**

1.Andriolli, N., Bontempi, F., Rannello, M., Presi, M., Ciaramella, E., & Contestabile, G. (2021). 100 Gb/s (4×28 Gb/s) transmission in C-band by a directly modulated integrated transmitter and DSP-free coherent detection. Optics Communications, 486, 126779.

2.Morsy-Osman, M., Sowailem, M., El-Fiky, E., Goodwill, T., Hoang, T., Lessard, S., & Plant, D. V. (2018). DSP-free ‘coherent-lite’ transceiver for next generation single wavelength optical intradatacenter interconnects. Optics Express, 26(7), 8890–8903.

3.Liu, L., Xue, B., Yuan, P., Lu, W., Fang, Y., Liu, Z., Yang, Q., & Shieh, W. (2024). DSP-Free Coherent Detection for Short-Reach Frequency-Synchronous Optical Networks. Journal of Lightwave Technology, 42(15), 5128–5133.

4.Zhao, C., Zhang, M., Wang, X., Li, C., Hu, Z., Du, H., Chen, J., Zhang, S., Liu, S., Li, W., Zhou, J., Cui, S., & Tang, M. (2023). First Baud-Rate Sampled DSP-Free Self-Homodyne Coherent Receiver.

**研究方向：**

1. 联合自注入锁定的相位噪声抑制能力提升高阶信号稳定性；
2. 高阶调制格式结合概率整形（PS）的低复杂/DSP-free接收机；
3. 全光信号处理的自相干系统；
4. 基于空分复用（SDM）的DSP-Free多芯光纤互联方案;
5. PMD消除技术与DSP-free架构的结合；
6. DSP-free架构的长距离传输；
7. 多波段（比如O波段）的DSP-free架构开发
8. 探索自零差检测与模拟信号处理结合，实现完全无DSP的相干传输；
9. 融合时分复用（TDM）、波分复用（WDM）与空间复用（SDM）；
10. Alamouti编码与PS技术结合；
11. Alamouti编码与多载波信号结合；
12. Alamouti编码与dsp技术结合，完成自相干系统中的非线补偿；
13. 多载波信号的PAPR问题；
14. PS-相噪容忍极限；
15. PS-DSP-free架构研究；
16. PS与信号编码结合；
17. PS与SE提升方式（FTN等）的结合；
18. PS同步算法；
19. PS的抗PMD算法；
20. 注入锁定的PS；
21. PS-多载波信号的传输；
22. 新型自相干发射机与PS的结合；
23. PS信号中的CD影响；
24. PS中CD与载波的作用机理及对信号影响；
25. 低复杂的PS接收机