

延时型储备池计算系统掩码噪声鲁棒性研究*

赵彤^{1)2)3)†} 白志敏¹⁾²⁾ 冯保峰¹⁾²⁾ 崔天培¹⁾²⁾ 常鹏飞²⁾³⁾ 乔丽君²⁾³⁾ 闫

肃⁴⁾ 樊晓鹏²⁾³⁾

1) (太原理工大学, 新型传感器与智能控制教育部重点实验室, 太原 030024)

2) (太原理工大学, 物理与光电工程学院, 太原 030024)

3) (太原理工大学, 精密测量物理山西省重点实验室, 太原 030024)

4) (汾阳丰源网架股份有限公司, 汾阳 032200)

摘要

随着延时型储备池计算 (Time-delay reservoir computing, TDRC) 相关技术的成熟, 全硬件集成成为主流发展方向, 硬件生成掩码时将不可避免引入噪声。掩码信号作为输入层时间复用与高维状态编码的重要部分, 其噪声的存在会直接破坏固定的输入映射权重, 影响系统的计算性能。本文将高斯白噪声融入掩码信号, 对比研究了数字掩码 (二值、六值) 与模拟掩码 (混沌) 在不同强度噪声下 TDRC 的性能表现。结果表明, 使用数字二值掩码的系统最高可容忍信噪比 7.539 dB 的强掩码噪声, 其噪声容忍度远大于模拟混沌掩码 (约 18dB)。同时发现, 掩码波形的拓扑复杂度对系统抗噪能力也有关键影响, 即使在同类型掩码下, 不同波形模式的系统掩码噪声容忍度最大可差 10.8 dB。结合非线性动力学开展机理剖析, 阐明该性能差异的内在物理成因, 为未来延时型储备池计算系统的全硬件集成提供了重要指导。

关键词: 掩码噪声, 系统鲁棒性, 延时型储备池计算, 掩码波形模式

PACS: 84.35.+i, 42.65.Sf, 42.79.Ta

基金: 国家自然科学基金 (批准号: U23A20375, 52273252, 62475185)、山西省科技发展基金 (批准号: YDZJSX2024D018) 和山西省重点研发计划项目 (批准号: 202202030201004, 202302150101002) 资助的课题。

† 通信作者. E-mail: zhaotong.tyut@outlook.com

第一作者. E-mail: zhaotong.tyut@outlook.com

1 引言

人工智能的快速发展暴露了传统类脑计算在处理复杂任务时的速度局限性

[1]。储备池计算 (Reservoir computing, RC) 是一种基于系统动力学的计算框架, 其特点是功耗低、效率高且易于硬件实现[2-4]。它已被广泛应用于信号处理、模式识别和时间序列预测。延时型储备池计算 (Time-delay reservoir computing, TDRC) 利用带有延迟反馈的单个非线性节点, 取代了传统 RC 中的多个节点, 将高维状态编码为时间复用的轨迹。其简单的结构推动了神经网络的快速发展。TDRC 系统输入层中的掩码预处理可以增强输入向高维空间的映射, 促进多样化的动态响应, 并提高 TDRC 系统的计算效率[5-9]。

前期研究人员针对掩码形状对 TDRC 性能的影响展开了诸多研究, 从传统二值掩码到改进的二值掩码[10], 以及通过使用同属数字掩码的六值掩码以减轻系统中噪声的影响[11]。随后采用更不规则的序列 (如混沌信号或滤波噪声) 作为掩码获得了更好的性能表现[12, 13]。近期, 为了适应 TDRC 全硬件集成的趋势, 研究人员开始尝试使用硬件直接产生掩码信号替代现有任意波形发生器。Apostolos 等人利用带有不同带宽衰减器和放大器的光反馈半导体激光器生成了准正弦掩码信号[14], Yue 等人将锁模激光器与色散补偿光纤相结合, 直接生成全光掩码[15-17]。随后, Chen 等人通过调整带有光反馈的半导体激光器的反馈强度生成了周期性全光掩码, 并验证了其可行性[18]。简单硬件产生掩码已获得越来越多的关注, 成为 TDRC 系统走向全硬件集成的关键一步。

而在实际的硬件集成 TDRC 系统中, 噪声主要来源于输入层硬件产生掩码信号时伴随的掩码噪声, 以及储备池非线性节点噪声和输出层如光电探测器的散粒噪声等。其中节点噪声和输出层噪声此前已有相关研究[19], 而本文研究的输入层掩码噪声对储备池计算性能的影响目前缺乏系统探讨。基于此, 本文针对性地研究了搭载不同掩码类型的 TDRC 系统对掩码噪声的容忍度, 以及深入探究了性能差异的深层物理机制。

2 方 法

本研究向数字二值、六值掩码及模拟混沌掩码叠加噪声, 探究掩码噪声对延时型储备池计算系统性能的作用规律。利用 MATLAB 软件中的 Randn 函数生成高斯白噪声, 以模拟硬件掩码生成过程中引入的噪声, 相应的含噪掩码波形如图 1 所示。对于数字掩码, 带有噪声的掩码 (紫色和蓝色曲线) 仅在其离散拓扑振幅电平 (黑线) 周围波动, 而伴随在混沌掩码 (红色曲线) 上的噪声则直接使理想掩码 (黑线) 的振幅波动发生畸变。研究过程中, 系统模型中生成的每个噪声序列与所使用的整个掩码长度相同, 且随机不重复, 而噪声强度通过缩放因子进

行调整。通过评估 Santa-Fe 混沌时间序列预测任务，我们综合分析了掩码波形结构模式与其抗噪性之间的关系。测量了每种掩码下系统的最大可容忍掩码噪声（System's maximum tolerable of mask-noise, STMN）以量化其影响。

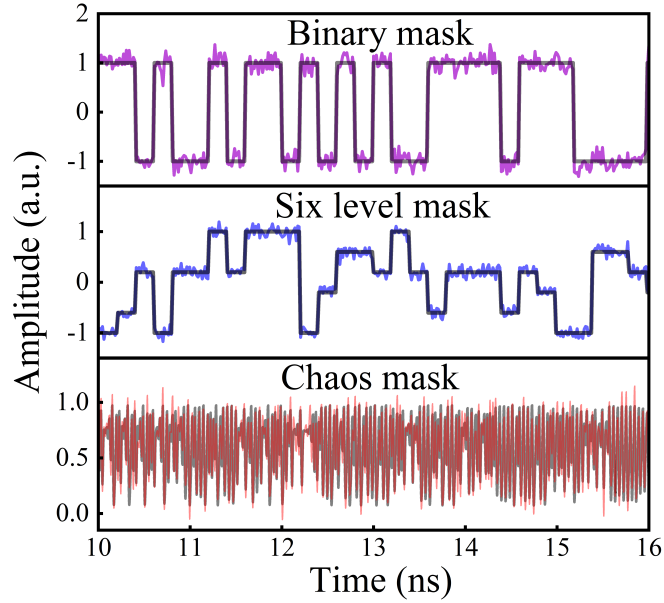


图 1 包含噪声（彩色曲线）和不含噪声（黑线）的三种类型掩码的时间序列

Fig.1. The time series of three types of masks with (colored curves) and without noise (black lines).

本文使用基于马赫-曾德尔调制器作为非线性节点的 TDRC 系统^[11, 20]，参数设置如下：虚拟节点数 $N = 50$ ，节点间隔 $\theta = 0.2$ ns，延迟反馈长度 τ 等于掩码周期 $T = N \times \theta$ 。根据主流任意波形发生器（Arbitrary waveform generator, AWG, Keysight M8195A）的规格，仿真中的采样率设置为 65 GSa/s，因此每个时间步包含 650 个采样点。在 Santa-Fe 混沌时间序列预测任务设置中，使用 3000 个样本进行训练，950 个样本用于测试，测试中依据归一化均方误差（Normalized mean square error, NMSE） ≤ 0.1 为 TDRC 系统成功预测该任务的标准^[21]。采用信噪比（Signal-to-noise ratio, SNR）来量化噪声强度，其表达式如下：

$$SNR = 10 \log_{10} \left(\frac{\sum_{i=1}^N x_i^2}{\sum_{i=1}^N n_i^2} \right) \quad (1)$$

其中 n_i 和 x_i 分别表示高斯白噪声和输入信号的第 i 个样本。SNR（单位为 dB）通过转换功率比计算得出。

在本 TDRC 系统中，初始相位偏移 φ 、非线性增益 β 和输入缩放比例 γ 的设置在决定计算性能方面起着至关重要的作用。叠加掩码噪声前，系统通过参数遍

历完成最优工作点测定。如图 2(a)所示, 在 $\varphi = \pi/2$ 时, 使用二值掩码系统最低的 NMSE 为 0.011。在固定 φ 的情况下, 遍历 β 和 γ 测得最佳工作点位于 $\beta = 1$ 和 $\gamma = 0.1$ 处, 这由图 2(b)中的红色空心五角星突出显示。类似地, 对于使用六值和混沌掩码的 TDRC 系统进行测试, 在 $\varphi = 3\pi/4$ 且 $\gamma = 0.1$ 时达到最佳性能, 此时 β 分别为 1.1 和 1.2。在它们各自的最佳参数设置下, 系统在每种情况下都能达到其最佳工作状态。

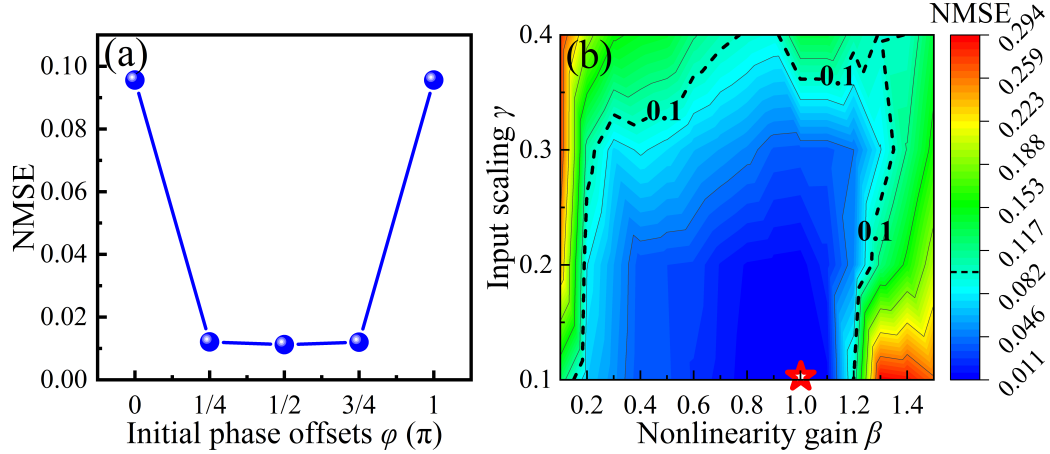


图 2 系统参数对使用二值掩码的系统性能的影响 (a) 在不同初始相位偏移 φ 下测得的 NMSE; (b) 在 $\varphi = \pi/2$ 时, 不同非线性增益 β 和输入缩放比例 γ 下的 NMSE, 红色空心五角星突出显示了具有最小 NMSE 的条件

Fig.2. Effect of system parameters on the performance of the system using binary mask: (a) NMSE obtained for different initial phase offsets φ ; (b) NMSE under varying nonlinearity gain β and input scaling γ at $\varphi = \pi/2$. The red open five-pointed star highlights the condition with the minimum NMSE.

3 结 果

3.1 不同类型掩码系统抗噪性能对比

图 3 展示了 TDRC 系统在使用三种掩码以及在三种噪声强度（无噪声、SNR ≈ 20 dB 和 SNR ≈ 10 dB）条件下的预测结果差异对比。其中, 灰色、红色和蓝色曲线分别代表原始信号、预测结果和误差。与之前的研究一致, 在无噪声情况下, 使用混沌掩码的系统性能最佳 (NMSE = 0.003), 优于使用二值和六值掩码的结果。当 SNR 增大至约为 20 dB 时, 使用二值和六值掩码的系统保持相似水平, NMSE 值约为 0.05-0.06, 优于混沌掩码系统的性能。当 SNR ≈ 10 dB 时, 使用六值掩码的系统接近 NMSE 阈值, 而使用混沌掩码的系统则预测失败, NMSE 达到 0.2, 远超出了可接受的范围。因此, 使用数字掩码可保留适度的鲁棒性, 而模拟掩码则在存在噪声的情况下其掩码能力受影响更为明显。

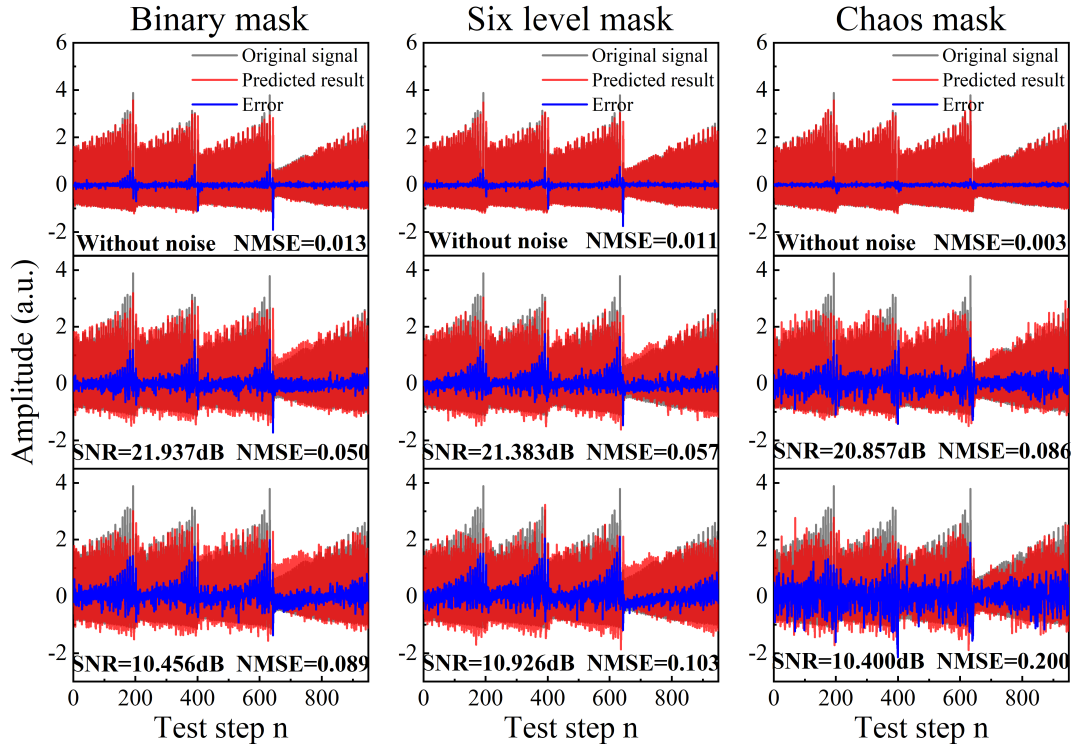


图 3 Santa-Fe 混沌时间序列预测任务在不同掩码信噪比下的测试结果。波形代表原始信号（灰色）、预测结果（红色）和误差（蓝色），三列分别对应于使用二值、六值和混沌掩码的系统，三行分别表示在无噪声掩码、信噪比约为 20 dB 和 10 dB 的条件下进行直接的定性比较

Fig.3. Test results of the Santa-Fe chaotic time series prediction task under different SNRs in masks. The waveforms represent the original signal (gray), predicted result (red), and error (blue), with the three columns corresponding to binary, six level, and chaos masks, enabling a direct qualitative comparison under mask without noise, approximately 20 dB and 10 dB for SNR conditions.

3.2 二值掩码波形结构模式的影响

多组重复测试结果表明，同一类掩码下，掩码噪声对系统预测性能的影响存在明显区别。以二值掩码为例，STMN 的波动高达 10.878 dB。因此，我们进行了详细的分析以研究出现这种现象的原因。

图 4(a)展示了使用二值掩码的 TDRC 系统在两种极端 STMN 下分别对应的掩码波形时序图。其中，高低电平持续时间不同且随机分布的波形被定义为复杂模式（如红色曲线所示），而另一种以相对规则交替的高低电平持续时间为特征的模式被定义为简单模式（如紫色曲线所示），分别对应于 7.539 dB 和 18.417 dB 的 STMN。为了进一步观察分析两种模式的区别，我们从不同方面进行了统计特性分析，如图 4(b-d)所示。

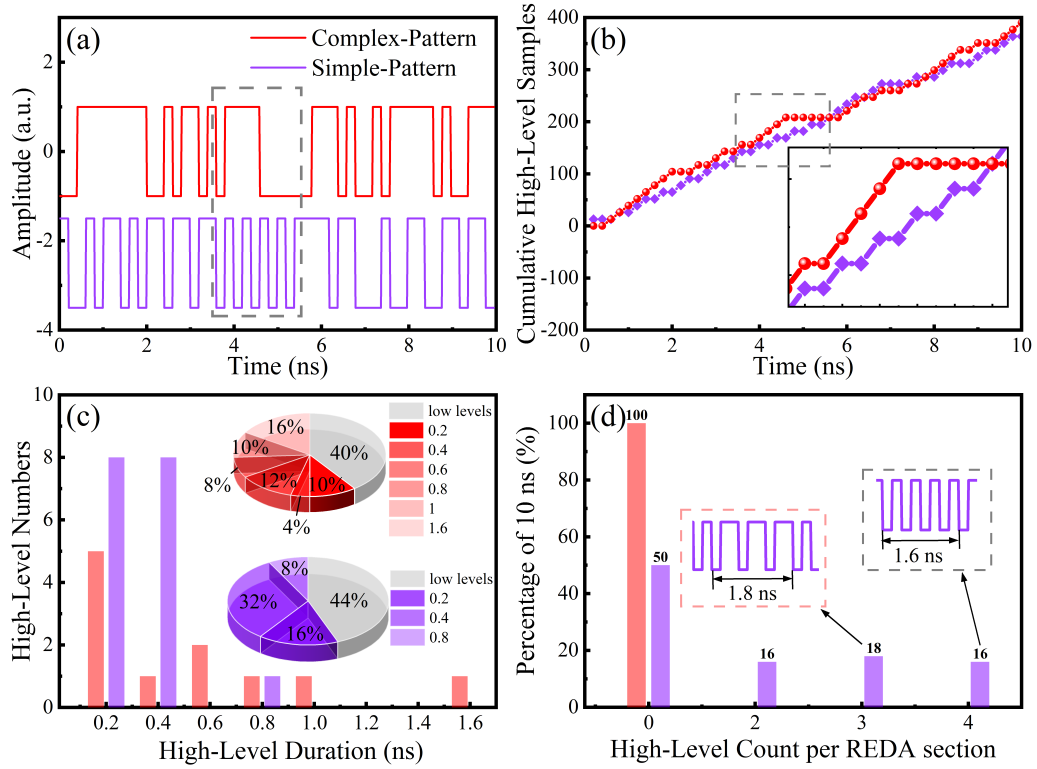


图4 二值掩码两种模式的特征 (a) 复杂模式和简单模式的掩码波形分别显示为红色和紫色；(b) 虚线表示一个周期内高电平的累积样本；(c) 条形图显示了高电平持续时间的分布，步长为 0.2 ns，范围从 0.2 到 1.6 ns；(d) 具有不同高电平出现次数的规则、等长高低交替（REDA）部分占据总共 10 ns 周期的比例

Fig.4. The characteristic of the two patterns of binary mask: (a) The complex-pattern and simple-pattern mask waveforms are shown in red and purple, respectively; (b) Dotted lines denote the cumulative samples of high levels within one period; (c) The bar chart shows the distribution of high-level durations with a 0.2 ns step from 0.2 to 1.6 ns; (d) Proportion of the total 10 ns period occupied by regular, equal-duration high-low alternating (REDA) sections with different high-level occurrence counts.

图 4(b)展示了两种模式中高电平的累积样本数量，其中点间隔等于虚拟节点间隔。曲线的上升区域和水平区域分别对应于图 4(a)中的高电平和低电平段。这两条曲线表现出截然不同的上升趋势，如灰色框标记的放大区域所示，复杂模式（红色曲线）显示了四个点的上升与随后六个点持续的水平，对应于图 4(a)灰色虚线框内的 0.8 ns 高电平和 1.2 ns 低电平。同时，简单模式（紫色曲线）表现出交替的上升-水平走势。

这种结构多样性在图 4(c)中得到了进一步量化。其中柱状图表示不同高电平持续时间的分布情况。紫色柱（简单模式）仅显示了三种不同的持续时间，且主要集中在 0.2 ns 和 0.4 ns。相比之下，红色柱（复杂模式）展示了六种不同的持续时间，每种时间存在不同数量的高电平，反映出更复杂、更多样的波形结构。饼图则展示了每种持续时间的高电平相对于整个周期（10 ns）的比例。虽然这两

种模式的总体高电平比例相似（约 60%），但红色掩码图表被划分为具有不同百分比的更多区域。使用这种具有更丰富变化的复杂模式掩码的系统能够容忍更强的掩码噪声。

图 4(d)展示了规则、等时长的高低电平交替（Regular, equal-duration high-low alternating, REDA）部分在总 10 ns 周期中所占的比例。对于简单模式掩码（紫色柱），其包含相当大比例的 REDA 部分，占总周期的 50%。形成明显对比的是，这类周期性片段在复杂模式中完全不存在（0%），突显了其结构的不规则性。例如如图 4(c)中插图所示，由三个连续 0.4 ns 高电平组成的部分达到 1.8 ns 的总持续时间，占整个周期的 18%。类似地，包含四个连续 0.2 ns 高电平的部分总持续时间为 1.6 ns，对应占周期的 16%。相反，对于复杂模式情况，没有观察到此类结构段。

综合上述分析结论，硬件掩码设计若要提升系统最大可容忍掩码噪声 STMN，需优先选用拓扑复杂度更高的波形。对于二值掩码，避免在一个周期内出现规则的方波结构，并确保具有不同保持时间的高低电平交替。这种丰富且不规则的掩码波形模式提高了噪声鲁棒性，从而增强输入编码的多样性，使得有效维度得到扩展，TDRC 系统的整体非线性处理能力得到加强。

作为评估系统稳定性的基础，TDRC 系统的一致性不可避免地受到掩码输入过程的影响。基于上述结果，使用复杂波形模式二值掩码的 STMN 对应于 7.5 dB 的 SNR。因此，我们统一采用该噪声水平下对使用这两种模式掩码的系统进行响应一致性测试，如图 5 所示。对于每种模式，掩码输入保持固定，系统在独立随机生成的噪声条件下运行 100 次，确保一致性评估的有效性。为了消除系统运行过程中的记忆效应，我们分别选择第 1 次和第 50 次运行的响应作为 ROUND A 和 ROUND B，而图 5(c)和(f)代表的皮尔逊相关系数的热力图是通过选择这 100 次运行中每十次运行的响应进行两两比较获得。

图 5(a)和(b)展示了使用简单模式掩码得到的输入信号和相应的响应。尽管两轮的噪声（紫色曲线）明显不同，但相应的响应（蓝色曲线）整体保持一致。皮尔逊相关系数最小为 0.9604，如图 5(c)所示。类似地，图 5(d)-(f)展示了使用复杂模式掩码获得的结果，其最小皮尔逊相关系数增加到了 0.9915。尽管这两种模式都表现出良好的一致性，但复杂模式掩码表现出更高的相关系数，另外对比图 5(c)和(f)可以直观看到在相同相关系数的色卡范围内，红色方块（复杂模式结果）整体相较于紫色（简单模式结果）表现出更小的色差，这表明使用复杂模式掩码的

系统响应间始终保持着更高的一致性，进一步证明了复杂模式掩码噪声下系统更优的稳定性。

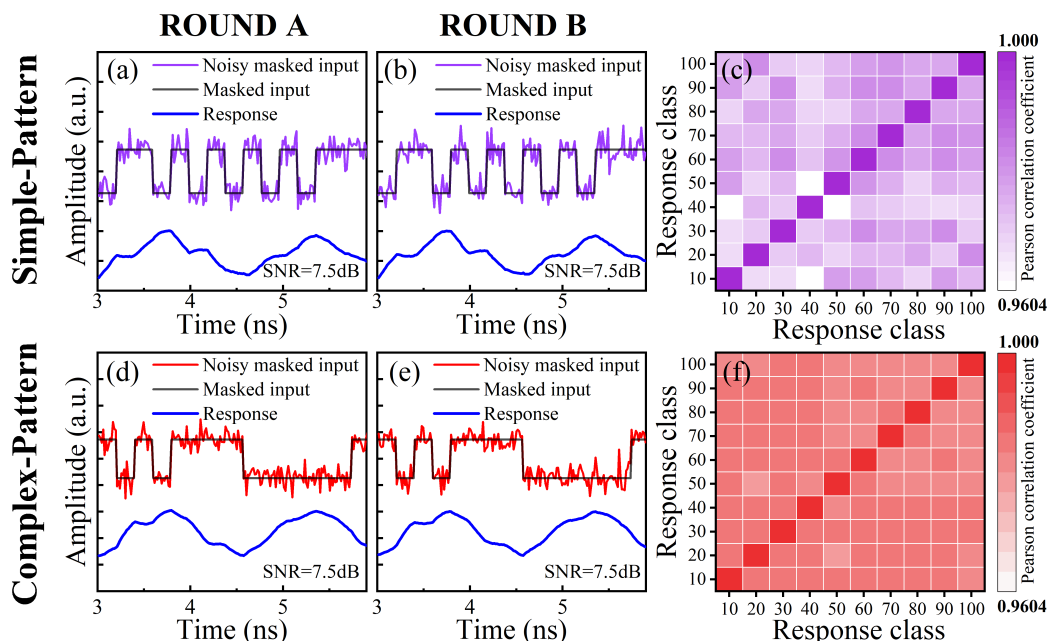


图 5 一致性测试结果。具有简单模式掩码的系统(a-c)和具有复杂模式掩码的系统(d-f)在 $\text{SNR} = 7.5 \text{ dB}$ 时的固定掩码输入情况下分别运行系统两次（回合 A 和回合 B）。蓝色曲线表示响应，紫色和红色曲线分别表示两种模式下的含噪掩码输入，黑色曲线表示理想掩码输入。对于每种掩码，每十次运行选择一个响应进行皮尔逊相关性分析，如(c)和(f)所示

Fig.5. Consistency test results. The system with the simple-pattern mask (a-c) and the complex-pattern mask (d-f) are each executed twice (Round A and Round B) using a fixed masked input with the $\text{SNR} = 7.5 \text{ dB}$. The blue curve represents the response, the purple and red curves denote the noisy masked inputs in the two patterns, and the black curve indicates the ideal masked input. For each mask, one response is selected every ten runs for Pearson correlation analysis, as shown in (c) and (f).

4 机理分析

4.1 两种波形模式之间的性能差异

为探究两类掩码模式产生性能差距的底层机理，研究以二值掩码为对象，对比不同掩码下提取输入特征的系统响应曲线。通过固定如图 6(a)所示的掩码噪声序列，我们将掩码模式分离为唯一变量，并比较了对应于三个输入样本（蓝色曲线）的从 10 到 40 ns 的连续三个周期的响应曲线。图 6(b)表明使用简单模式掩码系统的响应（紫色曲线）表现出不均匀且抖动单一的波动，这与其含噪掩码输入（灰色曲线）的结构有着直接关联。特别是在输入振幅较小的周期（30-40 ns），其响应曲线显示出非线性的显著退化，例如曲线从 35 ns 开始趋于平缓。

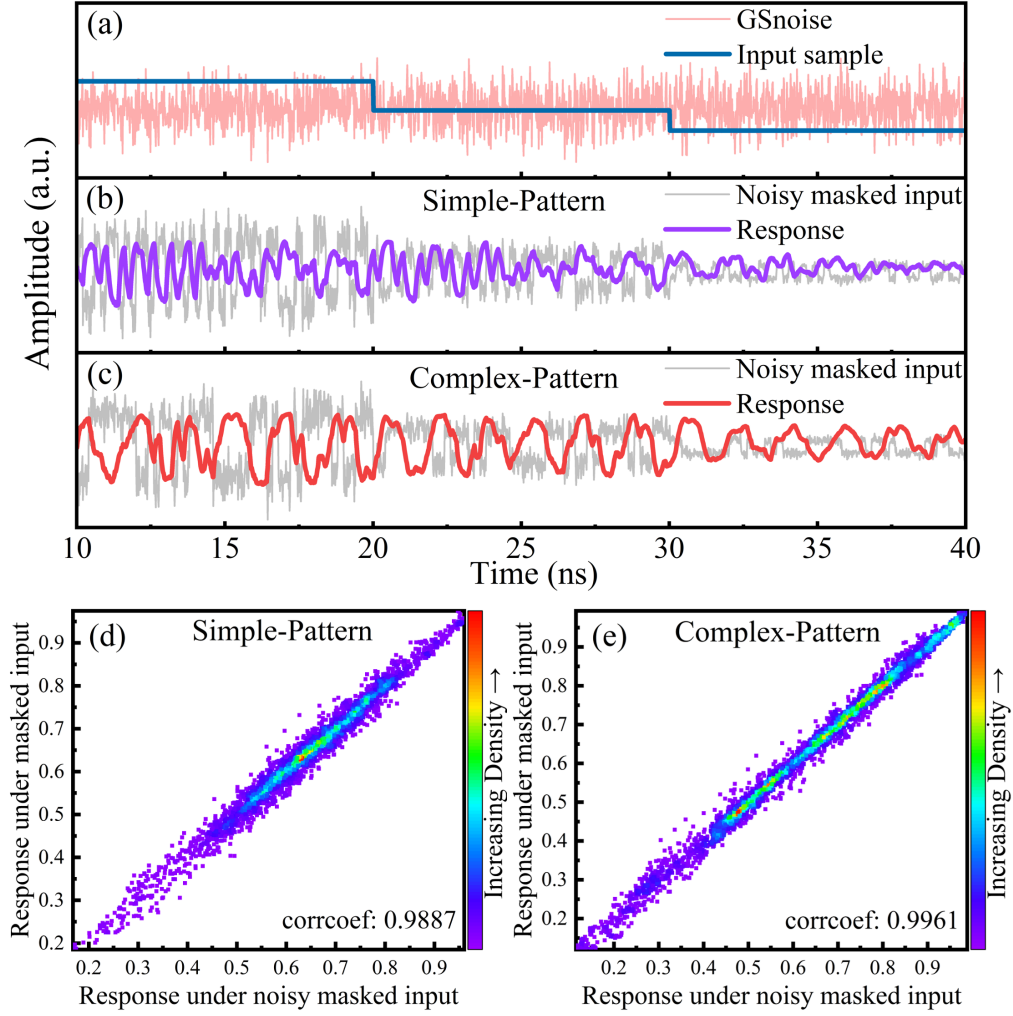


图 6 在 $\text{SNR} = 7.5 \text{ dB}$ 时 (a) 三个周期内的固定噪声序列及相应的输入样本; (b)-(c) 分别由使用简单模式 (紫色) 和复杂模式 (红色) 掩码的系统生成的非线性响应曲线, 其中掩码输入显示为灰色; (d)-(e) 噪声掩码条件下的响应与其理想的、无噪声对应物之间的相关性图

Fig.6. At $\text{SNR} = 7.5 \text{ dB}$: (a) The fixed noise sequence and corresponding input samples across three periods. (b)-(c) Nonlinear response curves generated by the system using simple-pattern (purple) and complex-pattern (red) masks, respectively, with the masked inputs shown in gray. (d)-(e) Correlation plots between the responses under noisy mask conditions and their ideal, noise-free counterparts.

相比之下, 使用复杂模式掩码的系统响应的非线性 (红色曲线) 几乎不受输入样本振幅的影响。如图 6(c) 所示, 即使在低振幅输入下, 它也保持稳定的非线性变换。其响应曲线展示出更丰富的全局变化特征, 例如在 11-13 ns 之间有较大的平滑包络, 随后在 13-16 ns 期间呈现快速瞬态趋势。通过对掩码噪声影响下的以及理想条件下的系统响应序列进行一致性对比, 并计算它们的皮尔逊相关系数 (如图 6(d) 和 (e) 所示), 我们对这种差异进行了进一步的定量分析。对于简单模式掩码, 系统响应点密集分布在 0.5 到 0.8 之间, 表现出有限的数值多样性。相反, 使用复杂模式掩码的系统生成的响应序列展示了更为丰富的数值分布, 其皮

尔逊相关系数提高到 0.9961。虽然这两种模式掩码的系统响应之间相关系数的增加在数值上差距较小，但基于相同掩码类型下不同波形模式的这种结构变化在系统内部导致了噪声鲁棒性的明显差异。

从非线性动力系统的角度来看，波形的时域拓扑结构与系统固有动态时间尺度之间的耦合是决定噪声鲁棒性的关键因素。在 TDRC 系统中，对输入扰动的响应主要由 τ 控制，而 θ 决定了输入调制与系统动力学之间的时间同步性。对于简单模式掩码，其具有固定持续时间的高低电平规律交替产生了一种与系统响应参数高度统一的时间匹配度。尽管其响应在局部时间尺度上表现出明显的振荡和丰富的瞬态波动，但这些变化主要源于其规则结构强加的周期性强制激发。当掩码切换时间尺度与系统响应时间非常接近时，状态很难在相邻的虚拟节点之间充分演化。这导致高维状态空间内响应特征高度相关。在这种同步驱动下，扰动容易受到相干放大的影响，并且掩码噪声更有可能同时干扰多个相似的特征方向，使得系统对噪声极其敏感。

相反，复杂模式掩码引入了不规则的高电平持续时间，从根本上改变了其时间占空比分布。虽然它可能会在特定的时间间隔内诱发相对平滑的动态行为，但其不规则的时域拓扑结构相对于系统动力学覆盖了更广泛的尺度。这种多尺度的不规则驱动打破了周期同步性，迫使系统在不同的虚拟节点进行发散性的动态演化。通过这种机制，它有效地减轻了任何单一响应模式中噪声的累积影响，显著提高了输入映射的有效维数和去相关性，从而确保在噪声条件下稳定的一致性。

4.2 掩码类型和波形模式对性能的综合影响

此外，我们对本研究中使用的三种掩码类型各自的复杂模式和简单模式系统分别进行十次 NMSE 结果的误差分析，并综合测试了其各自对应的 STMN。对于混沌掩码，根据强弱混沌^[22]为参考依据对应划分本研究中的复杂、简单模式。如图 7 所示，误差棒的振幅随掩码噪声强度的增加而拉长，这表明增强的噪声不仅会降低整体性能，而且会严重降低系统稳定性。对于复杂模式掩码（红色）在所有掩码类型和 SNR 范围内均展现出比简单模式掩码（紫色）显著优越的噪声鲁棒性。在数字掩码（二值或六值）下，NMSE 在约 20 dB 的 SNR 时突破了性能阈值。相比之下，复杂模式掩码在 SNR 低于 10 dB 时仍保持稳定的性能。对于使用模拟（混沌）掩码的系统，两种模式下对应于 STMN 的 SNR 从 18.347 dB 上升至 24.352 dB，进一步表明了这种掩码类型的功能更容易受到掩码噪声的影响。

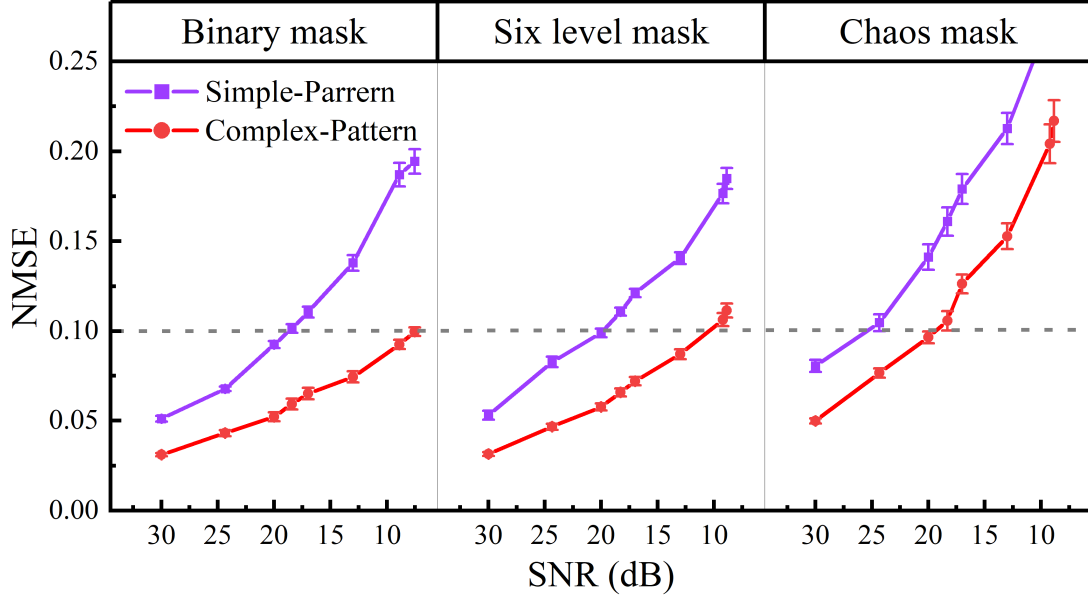


图 7 三种掩码类型（二值、六值、混沌）下，采用复杂模式（红线）和简单模式（紫线）的预测结果的 NMSE 趋势及误差棒图

Fig.7. NMSE trend and error bar plots for prediction results under three mask types (binary, six level, and chaos), with complex- (red lines) and simple-pattern (purple lines).

比较各种掩码类型，同属于数字掩码的二值和六值掩码表现出相似且最佳的整体性能。随着噪声的增加，NMSE 的增长趋势相对平缓，能够在较宽的 SNR 范围内将误差保持在较低水平。相反，使用模拟掩码（混沌掩码）的系统性能最差且不稳定，其总体误差棒更高，并且在中等 SNR 区域（ < 20 dB）达到性能失效临界状态。总而言之，掩码类型和波形模式的复杂性共同对系统的抗噪性能产生决定性影响。在强噪声环境中，采用数字掩码与复杂模式相结合的配置可以实现最佳且最稳定的系统抗噪性能，而模拟掩码则表现出对噪声的极高敏感性。

5 讨 论

此前针对系统噪声对 TDRC 性能影响的研究表明，模拟掩码（例如混沌掩码）由于其优越的高维特征编码能力通常优于数字掩码^[12]。然而，本研究发现，当噪声直接破坏掩码本身时，出现了截然相反的趋势。造成这种性能下降的根本机制并不主要归因于储备池非线性特性的改变或记忆容量的下降，而是掩码噪声对输入编码映射的破坏性影响。在 TDRC 系统中，每个输入样本在映射到虚拟节点之前都通过掩码序列进行时间复用。因此，掩码波形跨周期的可重复性对于保持每个虚拟节点稳定的映射权重至关重要。当物理生成的掩码信号带有噪声时，波形在周期之间波动，导致虚拟节点的等效输入权重发生时间漂移。这种现象从根本上违背了 TDRC 系统中固定输入权重的前提，从而破坏了系统进行稳定特征表示

的能力。

为定量解析该作用机理，研究量化噪声干扰下掩码波形的跨周期重复程度，引入跨周期掩码一致性评价指标，定义式如下：

$$C_m^{\text{period}}(n) = \frac{\langle m^{(n)} - \bar{m}^{(n)}, m^{(n+1)} - \bar{m}^{(n+1)} \rangle}{\|m^{(n)} - \bar{m}^{(n)}\| \|m^{(n+1)} - \bar{m}^{(n+1)}\|}, n = 1, \dots, 3999 \quad (2)$$

其中 $m^{(n)}$ 和 $m^{(n+1)}$ 分别表示连续周期中第 n 个和第 $n+1$ 个输入的掩码周期向量。通过对掩码序列进行归一化，该公式有效地消除了全局振幅偏差的影响。因此，它能够分离并量化不同周期内虚拟节点空间中掩码波形的结构同源性。全局一致性随后被定义为所有跨周期掩码一致性的算术平均值：

$$\bar{C}_m = \frac{1}{3999} \sum_{n=1}^{3999} C_m^{\text{period}}(n) \quad (3)$$

由于同属数字掩码的六值掩码具有更高的离散量化层级，使其在多个离散电平之间的间隔较短，从而导致在相同噪声强度下更容易发生幅度跳变。因此在相同噪声条件下，使用六值掩码的系统其掩码噪声鲁棒性略逊于使用二值掩码系统，其抗噪能力介于二值掩码和混沌掩码之间。针对前文研究得到的这一结果，我们选取二值掩码为代表的数字掩码和混沌掩码为代表的模拟掩码进行跨周期掩码一致性的测试。

在复杂模式下，使用二值掩码和混沌掩码系统的跨周期掩码一致性的算术平均值随 SNR 变化的趋势如图 8 所示，在一定的噪声强度范围内，二值掩码始终保持较高的值，而混沌掩码的值随着噪声强度的增加而快速衰减。结果表明，二值和混沌掩码的 SNR 分别约为 8 dB 和 18 dB 时，此时跨周期掩码一致性达到性能显著下降的临界拐点。这一测试结果与我们之前在 $\text{NMSE} = 0.1$ 时的研究结果完全一致。对于数字掩码，编码信息主要由离散符号分布（如掩码的正负拓扑结构）控制。当噪声幅度不足以引起符号翻转时，掩码波形的相对振荡拓扑结构保持不变，从而在较高水平上维持跨周期一致性。相反，混沌掩码利用连续振幅进行信息编码，使得其虚拟节点之间的相对权重向量对噪声极其敏感。噪声扰动直接破坏了其振幅分布拓扑结构，促使掩码向量在连续的高维空间中发生快速的相对错位，这表现为跨周期掩码一致性的迅速下降。

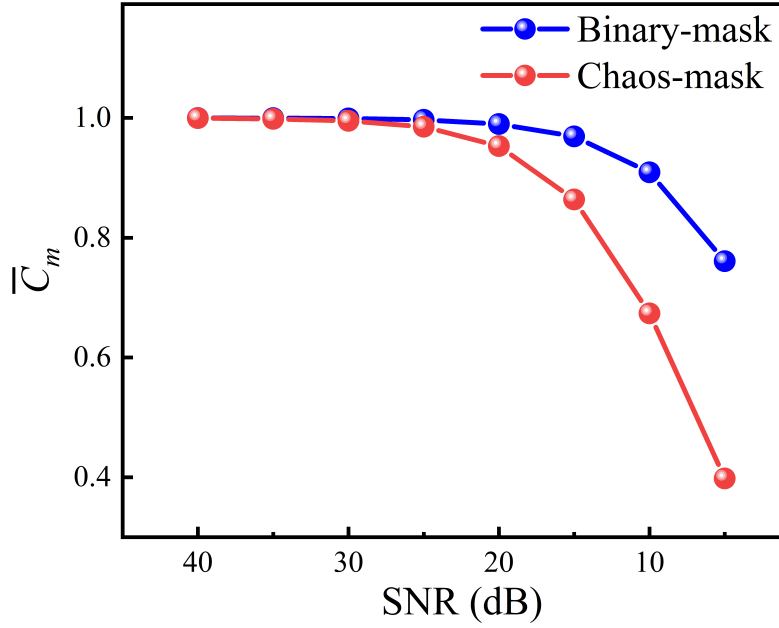


图 8 数字掩码（以二值掩码为代表）和模拟掩码（以混沌掩码为代表）在不同 SNR 下测试的平均跨周期掩码一致性的变化趋势

Fig.8. Variation trend of the average cross-period mask consistency tested under different SNRs for digital mask (represented by the binary mask) and analog mask (represented by the chaos mask).

此外，跨周期掩码一致性的降低意味着不同周期间相对应的虚拟节点未能在各个时间周期内保持一致的特征映射，这直接引发了储备池状态空间内输入映射的漂移，阻碍了稳定状态表示的形成。相反，数字掩码所表现出的更优的跨周期掩码一致性保证了虚拟节点的拓扑稳定性，为 TDRC 系统提供了高维特征基础，从而即使在掩码噪声存在的情况下也能保持结构完整性和系统性能。

6 结 论

TDRC 系统性能下降程度与掩码类型和波形模式有着本质的关联。虽然混沌掩码在无噪声环境中产生了最佳性能，但其对掩码噪声的极度敏感性导致了性能的快速崩溃。相反，二值和六值掩码在含噪条件下表现出更优的稳定性，使用这类掩码的 TDRC 系统在进行预测任务时可容忍低至约 8 dB 的 SNR，达到了比使用混沌掩码宽约 10 dB 的噪声容忍度余量。此外，即使在同一种掩码类型内，波形模式的拓扑复杂性也显著影响 STMN。例如，使用了复杂波形模式的二值掩码系统的 STMN 对应的 SNR 为 7.539 dB，而在使用简单波形模式下只能达到 18.417 dB。该结果证明，高不规则度的复杂掩码波形能够提升虚拟节点特征多样性与去相关性，有效抑制噪声扰动、提升系统鲁棒性。

基于这些发现，可以建立以下掩码设计原则：首先，应优先考虑具有更稳定拓扑结构的掩码类型，如二值或多电平数字掩码，因为与模拟掩码相比，它们在

噪声条件下表现出更优越的抗噪稳定性。进一步地，在数字掩码中二值掩码凭借更大电平间隔具有更优异的掩码噪声鲁棒性，而六值掩码因丰富的电平结构，在低噪声环境下拥有更高计算精度，因此在高噪声硬件场景建议使用二值掩码，在噪声可控、高精度需求场景可考虑选用多值掩码。确定掩码类型后，可通过增加掩码波形的结构复杂性来进一步增强系统的噪声鲁棒性。研究证实了输入层硬件集成可行性的同时，还为 TDRC 系统中的物理掩码生成方案提供了理论基础和重要的指导。

此外，由于 TDRC 系统自身在输入编码、虚拟节点高维映射的固有动力学特性，所有依赖稳定输入映射关系的时序预测任务均可获得相似结果，因此本研究仅以 Santa-Fe 混沌时间序列预测任务展开。但多类型任务的对比实验仍需探索，以定量验证该抗噪策略的普适性能。

参考文献

- [1] Chembo Y K 2020 *Chaos* **30** 013111
- [2] Abdalla M, Van der Sande G, Argyris A, Pavanello F, Soriano M C, Rontani D 2026 *J. Phys. Photonics* **8** 022003
- [3] Yan M, Huang C, Bienstman P, Tino P, Lin W, Sun J 2024 *Nat. Commun.* **15** 2056
- [4] Tanaka G, Yamane T, Héroux J B, Nakane R, Kanazawa N, Takeda S, Numata H, Nakano D, Hirose A 2019 *Neural Netw.* **115** 100
- [5] Zhao T, Xie W L, Xu J W, Jia Z W 2022 *Acta Phys. Sin.* **71** 194205 (in Chinese) [赵彤, 谢文丽, 许俊伟, 贾志伟 2022 物理学报 **71** 194205]
- [6] Liu Q, Li P, Kai C, Hu C Q, Cai Q, Zhang J G, Xu B J 2021 *Acta Phys. Sin.* **70** 154209 (in Chinese) [刘奇, 李璞, 开超, 胡春强, 蔡强, 张建国, 徐兵杰 2021 物理学报 **70** 154209]
- [7] Tang J, Lin B, Shen Y, Li R, Yu J, He X, Wang C 2023 *Opt. Express* **31** 2456
- [8] Goldmann M, Koster F, Ludge K, Yanchuk S 2020 *Chaos* **30** 093124
- [9] Appeltant L, Soriano M C, Van der Sande G, Danckaert J, Massar S, Dambre J, Schrauwen B, Mirasso C R, Fischer I 2011 *Nat. Commun.* **2** 468
- [10] Appeltant L, Van der Sande G, Danckaert J, Fischer I 2014 *Sci. Rep.* **4** 3629

- [11] Soriano M C, Ortín S, Brunner D, Larger L, Mirasso C R, Fischer I, Pesquera L 2013 *Opt. Express* **21** 12
- [12] Nakayama J, Kanno K, Uchida A 2016 *Opt. Express* **24** 8679
- [13] Kuriki Y, Nakayama J, Takano K, Uchida A 2018 *Opt. Express* **26** 5777
- [14] Argyris A, Schwind J, Fischer I 2021 *Sci. Rep.* **11** 6701
- [15] Yue Y, Liu S, Zhai Y, Wang C 2022 *Proceedings of the 2022 IEEE Photonics Conference (IPC)*
- [16] Yue Y, Zhang H, Wang C 2026 *J. Lightwave Technol.* **44** 4414
- [17] Yue Y, Liu S, Wang C 2024 *Proceedings of the 2024 IEEE Photonics Conference (IPC)* p1
- [18] Chen J, Hou Y, Guo X, Li Q, Li S, Guo C, Yue D 2025 *Appl. Phys. B* **131** 149
- [19] Nathe C, Pappu C, Mecholsky N A, Hart J, Carroll T, Sorrentino F 2023 *Chaos* **33** 041101
- [20] Larger L, Soriano M C, Brunner D, Appeltant L, Gutiérrez J M, Pesquera L, Mirasso C R, Fischer I 2012 *Opt. Express* **20** 3241
- [21] Huang Y, Zhou P, Yang Y, Li N 2021 *Opt. Lett.* **46** 6035
- [22] Heiligenthal S, Dahms T, Yanchuk S, Jüngling T, Flunkert V, Kanter I, Schöll E, Kinzel W 2011 *Phys. Rev. L* **107** 234102

Mask Noise Robustness in Time-Delay Reservoir Computing System*

Tong Zhao^{1),2),3*)}, Zhimin Bai^{1),2)}, Baofeng Feng^{1),2)}, Tianpei Cui^{1),2)}, Pengfa Chang^{2),3)}, Lijun Qiao^{2),3)}, Su Yan⁴⁾ and Xiaopeng Fan^{2),3)}

1) (Key Laboratory of Advanced Transducers and Intelligent Control System Ministry of Education, Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024, China)

2) (College of Physics and Optoelectronics, Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024, China)

3) (Shanxi Key Laboratory of Precision Measurement Physics, Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024, China)

4) (Fenyang Fengyuan Grid Co., Ltd., Fenyang 032200, China)

As artificial intelligence rapidly develops, time-delay reservoir computing (TDRC) has emerged as a highly efficient and hardware-friendly framework for processing complex temporal tasks. Driven by the inevitable trend toward full hardware integration, recent advancements have focused on directly generating input mask signals using physical optoelectronic devices. However, this physical generation process unavoidably introduces mask noise. Despite extensive previous studies exploring diverse input mask designs, the specific impact of hardware-induced mask noise on TDRC computational performance has remained unexplored. To address this gap, we systematically investigate the system's maximum tolerable mask-noise (STMN) within an optoelectronic TDRC system, utilizing a Mach-Zehnder modulator as the central nonlinear node. We evaluate the noise robustness of three primary mask categories: digital binary mask, digital six level mask, and analog chaos mask. Gaussian white noise is injected to simulate hardware generation imperfections, and the system's performance is rigorously assessed via the Santa-Fe chaotic time series prediction task using a normalized mean square error (NMSE) threshold of 0.1. Our findings reveal a critical trade-off between mask encoding complexity and noise tolerance. In noise-free environments, the analog chaos mask achieves optimal predictive performance. However, under noisy conditions, its performance degrades precipitously, exhibiting a severe vulnerability to noise. In stark contrast, digital masks demonstrate vastly superior stability over a broad noise range. Crucially, we discovered that even within the exact same mask type, the topological complexity of the waveform pattern decisively dictates the STMN. By categorizing binary masks into simple-patterns (dominated by regular, equal-duration high-low alternating sections) and complex-patterns (characterized by highly irregular, multi-scale duration distributions), we observe a profound performance divergence. The system utilizing a complex-pattern binary mask can tolerate a severe noise level down to a signal-to-noise ratio (SNR) of 7.539 dB, expanding the noise tolerance margin by nearly 11 dB compared to the simple-pattern configuration (18.417 dB). An in-depth mechanistic analysis from a nonlinear dynamic's perspective elucidates these phenomena. By introducing the metric of cross-period mask

consistency, we reveal that digital masks prevent feature mapping distortion by preserving the topological stability of their discrete levels. Furthermore, the complex-pattern mask's irregular temporal topology covers a broader spectrum of scales, disrupting the synchrony of short-term regular fluctuations (forced periodic excitations). This multi-scale, irregular driving forces divergent dynamical evolutions across distinct virtual nodes, effectively suppressing coherent noise amplification and significantly elevating the effective dimensionality of the system. Ultimately, this research establishes a robust design principle for hardware-integrated TDRC: prioritizing digital masks combined with highly complex waveform patterns maximizes noise resilience, providing critical theoretical guidance for the future physical synthesis of TDRC input masks.

Keywords: Mask noise, System robustness, Time-delay reservoir computing, Mask

waveform pattern

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. U23A20375, 52273252 and 62475185), Development Fund in Science and Technology of Shanxi Province (Grant No. YDZJSX2024D018), Shanxi Provincial Key Research and Development Project (Grant Nos. 202202030201004 and 202302150101002).

† Corresponding author. E-mail: zhaotong.tyut@outlook.com
The first author. E-mail: zhaotong.tyut@outlook.com