

文章编号:1007-2780(2026)09-1282-15

基于高斯径向基函数的非饱和随机共振 低照度图像增强

孙学锋^{1,2}, 凌 泉¹, 党鹏飞³, 李 沛¹, 张蓉蓉², 徐 明^{2*}

(1. 中建八局 浙江建设有限公司 未来城市研究院, 浙江 杭州 311122;

2. 中国计量大学 计量测试与仪器学院, 浙江 杭州 310018;

3. 中国人民解放军 32021 部队, 北京 100094)

摘要:针对低照度图像对比度低下、细节丢失及经典双稳随机共振易输出饱和、噪声能量利用受限的问题,本文提出基于高斯径向基函数的非饱和随机共振增强方法。构造了高斯径向基与线性函数组合的非饱和对称双稳态势函数,设计了亚阈值输入生成、逐像素随机共振求解及响应引导亮度融合的增强流程;提出亮暗共振分离度指标,并从 8 个维度构建综合增强质量指标(CEQI)。结果表明,相较于经典双稳态势函数,本文所提非饱和势函数提高了共振分离度,有效噪声参数范围更宽。在明亮对比不明显与明显的两类低照度图像上,本文方法的平均 CEQI 分别达 0.801 2 和 0.757 1,优于经典随机共振(0.704 3、0.692 9)及 CLAHE、Gamma、MSRCR、SSR 等传统方法。真实场景下平均 CEQI 为 0.78。本研究将非饱和随机共振引入低照度图像增强,为提升暗区细节恢复与抑制过曝提供了新思路。

关 键 词:随机共振;图像增强;低照度图像;非饱和势函数;高斯径向基函数

中图分类号:TP391.4 文献标识码:A doi:10.3724/CJLCD.2026-0156 CSTR:32172.14.CJLCD.2026-0156

Low-light images enhancement via unsaturated stochastic resonance based on Gaussian radial basis functions

SUN Xuefeng^{1,2}, LING Quan¹, DANG Pengfei³, LI Pei¹, ZHANG Rongrong², XU Ming^{2*}

(1. Future City Research Institute, Zhejiang Construction Co., Ltd. of China Construction
Eighth Engineering Division, Hangzhou 311122, China;

2. College of Metrology Measurement and Instrument, China Jiliang University,
Hangzhou 310018, China;

3. Unit 32021 of Chinese People's Liberation Army, Beijing 100094, China)

Abstract: To address the issues of low contrast and detail loss in low-light images, as well as the output saturation and limited noise energy utilization of classical bistable stochastic resonance(SR) systems, this paper proposes an unsaturated SR method for low-light image enhancement based on Gaussian radial basis functions. An unsaturated symmetric bistable potential function composed of Gaussian radial basis functions

收稿日期:2026-08-07;修订日期:2026-08-18.

基金项目:浙江省自然科学基金(No.LY20A020006)

Supported by Natural Science Foundation of Zhejiang Province (No.LY20A020006)

*通信联系人, E-mail: xuming@cjlu.edu.cn

and a linear term is constructed. An enhancement framework is designed, comprising subthreshold input signal generation, pixel-wise SR response computation, and response-guided brightness fusion. A brightness-darkness resonance separation metric is proposed to quantify the differential enhancement capability of SR, and a Comprehensive Enhanced Quality-Index(CEQI) is constructed from eight dimensions. Experimental results demonstrate that the proposed unsaturated potential function improves the resonance separation and expands the effective noise parameter range compared with the classical bistable potential. On low-light images with subtle and significant brightness contrasts, the proposed method achieves average CEQI values of 0.801 2 and 0.757 1, respectively, outperforming classical SR (0.704 3 and 0.692 9) as well as CLAHE, Gamma correction, MSRCR, and SSR. In real-life scene images, the average CEQI reaches 0.78. This study introduces unsaturated SR into low-light image enhancement, providing a new approach for recovering dark-region details while suppressing overexposure.

Key words: stochastic resonance; image enhancement; low-light image; unsaturated potential function; Gaussian radial basis function

1 引言

低照度环境下获取的图像因光照不足,普遍存在整体亮度偏低、对比度下降以及细节信息淹没于噪声等问题,严重制约了夜间监控、自动驾驶、矿井掘进及医学影像等领域的视觉信息处理能力^[1-4]。在远程被动探测、光学神经形态处理、神经阵列元成像以及时间门控拉曼成像等新型成像与处理技术中^[5-8],低照度图像的质量同样直接影响后续信息获取与识别的准确性。随着夜间经济活动规模扩大、全天候安防监控需求提升以及低照度成像设备日益普及,图像增强技术的重要性愈发凸显,已成为视觉领域的研究热点。

在改善低照度图像视觉效果方面,现有传统方法多将噪声视为需消除的有害干扰。贾侯等^[9]利用直方图均衡化(Histogram Equalization, HE)增强图像的对比度实现边缘轮廓提取。李仁强等^[10]通过引入阈值改进了双平台HE算法,实现细节增强与整体灰度调节的平衡。马鑫等^[11]提出了一种基于光照分量和自适应目标均值的二维伽马校正方法,通过将图像划分为亮暗区域实现了对非均匀光照图像的自适应增强,有效避免了过度增强问题。基于Retinex理论的方法以单尺度Retinex(SSR)和多尺度Retinex(MSRCR)为代表,通过将图像分解为光照分量与反射分量恢复场景反射率,广泛应用在海上与水下等散射介质图像增强中,但对尺度参数较敏感,在复杂场景中易导致色调偏移与噪声放大^[12-13]。此外,

还有学者从网络结构重构、多模态感知融合、感知驱动分类以及色彩通道统计优化等角度出发,基于深度学习提出了差异化的改进策略^[14-17]。在具体技术路径上,现有研究将傅里叶频域与Transformer结合进行光照引导增强^[18],利用光照强度扩散模型生成训练数据并融合大气光估计^[19],采用跨级特征自适应融合网络增强暗光图像^[20]。同时,相关方法也被进一步拓展至遥感^[21]和水下场景^[22-23]的图像增强任务中。上述方法的共同局限在于将噪声与信号完全对立,然而,低照度条件下的有用信号往往已被噪声严重掩盖,单纯的去噪操作在削弱噪声的同时不可避免地损失了部分高频细节与边缘信息,难以同时达成对比度提升与细节保留的双重目标。

与传统去噪思路不同,随机共振(Stochastic Resonance, SR)理论揭示了噪声在特定非线性条件下对微弱信号的增强作用。该理论指出,在非线形系统中,适量的噪声能将部分能量转向亚阈值输入信号,辅助其跨越势垒,从而实现微弱信号的定向增强^[24]。自Benzi等^[25]提出随机共振概念以来,该理论已被广泛拓展至微弱信号检测、故障诊断及生物信号处理等领域^[26-28]。在图像处理方面,Chouhan等^[29]将动态随机共振引入空间域图像对比度增强;Jha等^[30]在奇异值域中利用随机共振实现了图像对比度的有效增强;高文等^[31]提出动态双稳随机共振算法,通过设定低照度像素迭代阈值,有效增强了非均匀低照度彩色图像;魏敏等^[32]构建了四稳系统并将其应用于低

照度图像增强,结果表明增加系统稳态个数有利于提高噪声利用率、增强随机共振效应。上述工作表明,随机共振为低照度图像增强开辟了一条区别于传统去噪范式的新途径。

然而,现有随机共振图像增强方法几乎全部基于经典势函数系统,属于饱和型势函数,其中经典双稳态势阱外侧以四次方增长,粒子在强噪声驱动下难以逃逸至远处,导致输出饱和^[33-34]。值得指出的是,在随机共振理论研究中,以非饱和势函数替代经典双稳态势函数,抑制输出饱和的思路,已在微弱信号检测等一维信号处理问题中得到研究与验证^[35-36],而将非饱和特性应用于随机共振图像增强是否能展现出更好的增强效果尚未展开研究。

本文提出基于高斯径向基函数的非饱和势函数,建立逐像素扫描的随机共振增强低照度图像的方法,首次将非饱和势函数引入该领域。该势函数以高斯径向基函数构造核心势阱区、两侧以线性延拓,在保留稳定双稳态势阱结构的前提下,借助线性外区抑制经典双稳态势函数在强噪声下的饱和输出。本研究在此势函数的基础上构造亚阈值输入信号,并进行逐像素随机共振生成输出图,最后通过亮度增强融合来实现低照度图像增强的效果;提出亮暗共振分离度以及融合多维度指标的综合增强质量评价(Comprehensive Enhanced Quality-Index, CEQI),为随机共振效果与最终图片增强效果提供客观量化依据。

2 随机共振系统

2.1 非饱和势函数

经典双稳态随机共振模型能够利用适量噪声诱导粒子在两个势阱之间发生协同跃迁,从而实现低照度图像中微弱亮度信息和结构特征的增强。然而,其外侧势壁快速增大远离稳定点时,会形成较强约束而压缩输出响应。对于同时包含不同亮暗程度及细节的低照度图像,这种响应压缩可能限制不同亮度层次和微弱结构之间的有效区分,因此本文提出了一种基于高斯径向基函数的对称双稳态势函数:

$$U(x) = \begin{cases} a_L x + b_L, & x < x_L \\ \sum_{k=1}^N \lambda_k e^{-\frac{(x-\xi_k)^2}{\sigma^2}}, & x_L < x < x_R \\ a_R x + b_R, & x > x_R \end{cases} \quad (1)$$

该势函数由高斯径向基函数与线性函数共同组成,通过独立调节高斯径向基函数的个数 N 、权重 λ_k 、中心位置 ξ_k 和有效宽度 σ ,可灵活描述势阱位置、势垒高度及势阱形状,并通过线性外侧势壁限制恢复力快速增长。 a_L 与 a_R 为线性项的斜率, b_L 与 b_R 为截距常数。

在随机共振模型中,常用的非线性系统为过阻尼系统,可用如下朗之万方程(Langevin)描述^[37]:

$$\frac{dx(t)}{dt} + \frac{dU(x)}{dx} = s(t) + \eta(t), \quad (2)$$

其中: $x(t)$ 为系统的输出信号, $U(x)$ 为随机共振系统的势函数, $s(t)$ 为外部微弱激励信号, $\eta(t)$ 为噪声。

将两势函数进行对比,图1(a)显示了经典双稳态势函数 $U(x) = -a/2 \cdot x^2 + b/4 \cdot x^4$ 与本文基于高斯径向基构造的非饱和双稳态势函数在几何形态上的差异。在中心区域,两势函数曲线均保持对称的双势阱与中央势垒结构,几乎重合;在外侧势壁区域,经典双稳态以四次方急剧攀升,输出响应易被压缩而输出饱和,非饱和双稳态增大速率明显下降,可形成更宽的动态响应,这种现象在输入弱周期信号中表现明显。在两势函数系统中输入频率相同、幅值 A 不同的弱余弦信号,结果如图1(b)所示。在经典双稳态系统中,随着输入幅值的增大,输出幅值达到上限后难以得到突破;反观非饱和双稳态系统(图1(c)),较小的输入幅值得到更大的输出增益,从而为非饱和势函数逐像素随机共振图像增强提供了物理基础。

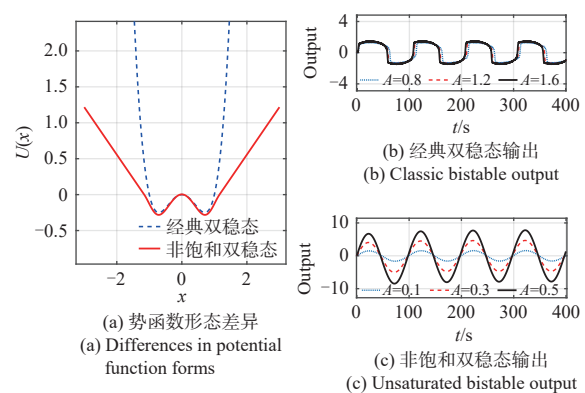


图1 饱和与非饱和双稳态势函数对比

Fig. 1 Comparison of saturated and unsaturated bistable potential functions

2.2 随机共振增强低照度图像的算法流程

基于上述高斯径向基非饱和双稳态势函数,在过阻尼系统中每个像素粒子的运动由朗之万方程描述为式(3)形式^[29,38]:

$$\frac{dx(t)}{dt} + \frac{dU(x)}{dx} = S(x, y) + \sqrt{2D} \zeta(t), \quad (3)$$

其中: $S(x, y)$ 为原始低照度图像的亚阈值输入信号, D 为噪声强度, $\zeta(t)$ 为零均值单位方差的高斯白噪声。本文算法的整体框架如图2所示,由亚阈值输入信号、随机共振响应输出图和随机共振响应输出图引导的亮度融合输出3大模块组成。

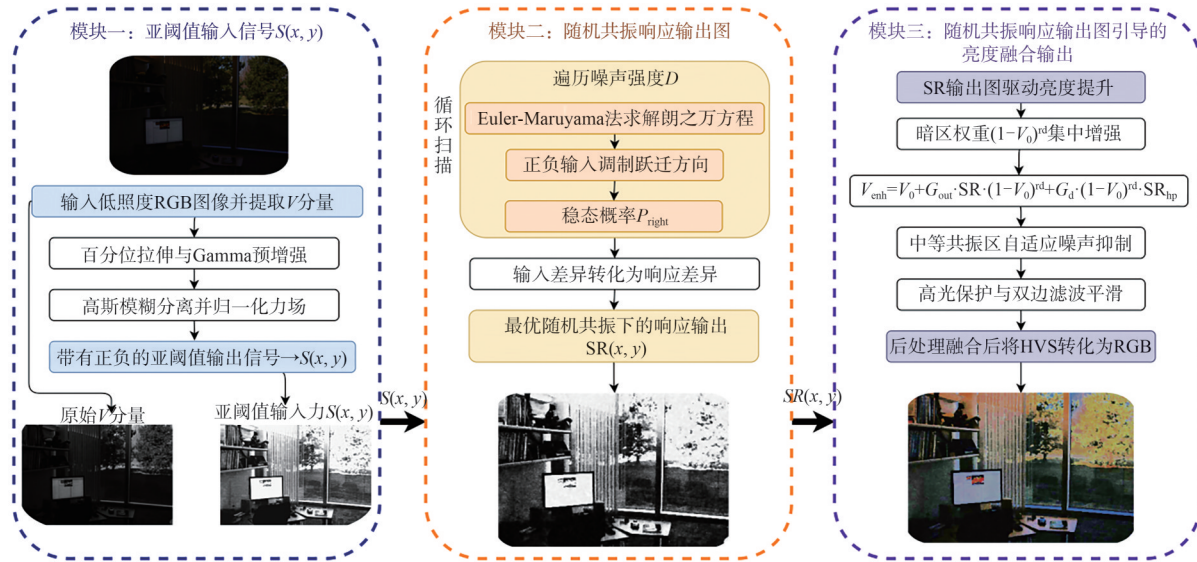


图2 基于双稳态随机共振的低照度图像增强算法框架流程图

Fig. 2 Flowchart of algorithm framework for low-light image enhancement based on bistable stochastic resonance

低照度图像中的弱目标、纹理及边缘信息通常表现为较小的相对亮度差异。为将该空间信息映射为适合双稳态系统处理的亚阈值驱动信号,首先对原始 V 分量进行百分位拉伸,以降低极端像素对动态范围的影响,此时,为确保图像在增强过程中色调与饱和度保持不失真,本文在HSV色彩空间中仅处理 V 分量,而 H 分量与 S 分量保持不变;随后采用Gamma非线性变换调节亮度分布,并将其分解为局部基础分量和细节分量,分别归一化后加权融合,经双曲正切函数压缩,得到归一化特征信号 $f_{\text{norm}}(x, y)$ 。亚阈值输入力定义为:

$$S(x, y) = A \cdot F_{\text{crit}} \cdot \tanh(B \cdot f_{\text{norm}}(x, y)) + \delta \cdot F_{\text{crit}}, \quad (4)$$

其中: F_{crit} 为亚阈值临界信号, A 为输入力相对于临界力的幅值比例, B 为非线性压缩斜率, δ 为输入偏置。通过参数约束和最大幅值缩放,使所有像素满足 $|S(x, y)| < F_{\text{crit}}$,从而保证输入本身不足以越过势垒。亚阈值输入 $S(x, y)$ 本质上是

原图像信息编码为一个满足系统要求的输入信号,每个像素位置 (x, y) 都对应一个独立的输入值。

其次,在随机共振响应输出图 $SR(x, y)$ 的求解阶段,亚阈值输入信号 $S(x, y)$ 为系统输入,每个像素点分别进行独立的随机共振过程,并利用Euler-Maruyama方法对其离散求解,最终选取随机共振最优状态所对应的输出,组合成一幅随机共振响应输出图,为后续亮度提升提供指导。由于图像信号具有非周期性,无法采用信噪比评价共振效果,因此借鉴统计物理方法,通过多次独立集成,计算粒子处于右势阱的稳态概率 $P_{\text{right}}(D)$,以此定义随机共振响应输出图:

$$SR(x, y) = \max\left(\frac{P_{\text{right}}(D) - P_{\text{right}}(0)}{1 - P_{\text{right}}(0) + \epsilon}, 0\right). \quad (5)$$

该图表征加入噪声后相对于无噪声条件新增的正向系统响应,较大的 $SR(x, y)$ 表明噪声显著增强了系统对该位置弱输入的响应,较小的 $SR(x, y)$ 则表明噪声未产生明显的有效增益。通

过提取噪声辅助下图像弱信号产生的有效响应,形成空间随机共振响应输出图 $SR(x, y)$ 。以最优噪声强度下的响应输出图作为亮度提升的标准,从而能够根据每幅图像的统计特性自适应选择最优共振工作点。为使随机共振效果最大化,通过遗传算法选取最优噪声强度,算法 1 给出了完整的优化流程。

算法 1: 基于遗传算法优化的最优噪声强度选择

输入: 原始低照度图像 V 分量; 噪声强度范围 $[0, D_{\max}]$

输出: 使亮暗共振分离度 S_{sep} 最大化的最优噪声强度 $D_{\max}$

1. 设置遗传算法种群大小 N 、最大代数 G 、交叉概率 p_c 、变异概率 p_m 、精英保留个数 E 和锦标赛规模 T , 并初始化种群 $P_0 = \{0, 1\}^{N \times L}$ (L 为编码长度)
2. 计算适应度 $F(P_0) = S_{\text{sep}}(P_0)$ (解码 D , 叠加噪声, 计算亮暗共振分离度)
3. for $g = 1, 2, 3, \dots, G$
4. 锦标赛选择 $P_g^{\text{sel}} \leftarrow \text{Select}(P_g, F, T)$
5. 交叉 $P_g^c \leftarrow \text{Crossover}(P_g^{\text{sel}}, p_c)$
6. 变异 $Q \leftarrow \text{Mutate}(P_g^c, p_m)$
7. 计算适应度 $F(Q) = S_{\text{sep}}(Q)$
8. 找最优个体 $(\theta^*, F^*) \leftarrow \arg \max F(Q)$
9. 精英保留 $Q' \leftarrow \text{Elitism}(Q, F, \theta^*, F^*, E)$
10. 更新种群 $P_{g+1} \leftarrow Q'$
11. 存储最优 $F_g^{\text{best}} = F^*$
12. if 早停条件满足 then break
13. end for
14. return $D_{\text{opt}} = \arg \max_g F_g^{\text{best}}$

在由随机共振响应输出图引导的亮度增强融合输出模块中, 将随机共振响应输出图作为空间自适应亮度增量的调制权重, 与基于原始亮度相关的暗区权重结合, 构建增强模型:

$$V_{\text{enh}} = V_0 + G_{\text{out}} \cdot (1 - V_0)^{\gamma_d} \cdot SR(x, y) \cdot$$

$$(1 - V_0) + G_d \cdot (1 - V_0)^{\gamma_d} \cdot SR_{\text{hp}}(x, y), \quad (6)$$

其中: V_0 为图像原始 V 分量; G_{out} 与 G_d 分别为输出增益和细节增益; 根据 V_0 构造暗区权重 $(1 - V_0)^{\gamma_d}$, 其中 γ_d 为暗区权重指数, 原始像素越暗, 暗区权重越大, 使得增强集中于低亮度区域。暗区权重与随机共振响应输出结合, 使仅当像素原始亮度较低且 SR 响应较强时, 才能获得显著提升; 而平坦背景因 SR 响应较弱、高亮区域因暗区权重较小, 其亮度增量均受到抑制, 避免了过度增强与

背景抬升。除此之外, 为改善局部纹理和边缘, 进一步从随机共振响应输出图中提取高频分量 $SR_{\text{hp}}(x, y)$ 构造细节补偿项, 较小的细节增益使该项仅作为辅助补偿, 避免过度放大随机噪声和产生光晕。增强后, 对中等水平的随机共振响应区域施加自适应噪声抑制, 即按局部噪声估计值的 20% 比例抑制高频分量, 对高亮区域施加平滑过渡保护, 最后经双边滤波平滑与亮度范围约束后的融合, 将增强后的 HSV 图像转换回 RGB 空间输出。

2.3 亮暗共振分离度与 CEQI 评价指标

2.3.1 亮暗共振分离度

在随机共振增强低照度图像过程中, 会选用最优共振下的逐像素随机共振响应输出图, 而系统对亚阈值输入信号中亮区和暗区的分离程度可以体现出随机共振现象。因此, 引入亮暗共振分离度 (Brightness-Darkness Resonance Separation, S_{sep}) 来主要描述随机共振输出不同亮度区域的响应差异, 作为评价随机共振选择性响应能力的指标。以亚阈值输入信号的亮度分布为基准, 将亮度值高于第 72 百分位的像素集合定义为亮区, 亮度值低于第 28 百分位的像素集合定义为暗区, 以避免极端像素和中间过渡区域对统计结果的影响。随后, 根据随机共振输出图, 计算亮区和暗区内的平均响应的差值:

$$S_{\text{sep}}(D) = \overline{SR}_{\text{right}}(D) - \overline{SR}_{\text{dark}}(D), \quad (7)$$

式中, $\overline{SR}_{\text{right}}$ 和 $\overline{SR}_{\text{dark}}$ 分别为亮区和暗区像素的平均 SR 共振值。 S_{sep} 表征随机共振过程亮暗差异大小, 本文将该指标作为随机共振噪声参数优化的重要依据之一, 通过寻找 S_{sep} 峰值作为判断系统工作是否处于最佳随机共振状态, 从而在增强低照度区域有效信息的同时保持原始图像的亮暗层次结构。

2.3.2 结果图的 CEQI 综合评价指标

经亮度融合后最终输出图像的增强质量评价涉及多维度耦合, 单一指标难以全面衡量增强效果。例如, 信息熵可反映细节丰富程度但对噪声水平敏感, 平均梯度可表征锐度却无法判断曝光是否合适。为此, 本文提出综合增强质量指标 (CEQI), 从以下 8 个维度对最终的增强结果图的质量进行量化评估: (1) 细节恢复分量: 以增强结果图与原始图像的梯度幅值之比作为综合边缘

增益,结合平均梯度进行对数加权求和并归一化,反映增强过程对边缘及高频细节的恢复程度。(2)自然度分量:以亮度均值趋近0.50、标准差趋近0.23为理想状态,分别施加高斯权重;同时计算色调直方图与均匀分布的偏离度作为色彩自然度评分;三者加权综合得到自然度指标。(3)无参考质量分量:融合PIQE(Perception-based Image Quality Evaluator)与NIQE(Natural Image Quality Evaluator)两种无参考质量评价算法的得分,分别映射至 $[0,1]$ 区间后等权平均。(4)曝光合适度分量:综合亮度均值评分、标准差评分以及欠曝、过曝和饱和像素比例的惩罚项。(5)信息熵分量:采用归一化直方图熵度量输出图像的信息量。(6)熵过冲惩罚分量:当增强后信息熵与原始熵之比处于 $[1.0, 1.3]$ 区间时视为正常增强,不施加惩罚;超出1.3时按指数衰减施加惩罚,以避免噪声放大导致的熵虚高被误判为质量提升。(7)颜色结构保真分量:由RGB三分量相关系数、V分量相关系数、色调保真度和结构保真度综合构成,衡量增强过程对原始色彩与结构信息的保持能力。(8)伪影抑制分量:综合平坦区噪声得分与光晕伪影得分,分量值越大表明伪影抑制效果越优。

所有分量经鲁棒归一化处理后按式(8)加权求和, S_i 代表8个维度的指标, w_i 为其指标权重,最终CEQI取值范围为 $[0, 1]$,数值越大表示图像综合质量越优。该指标兼顾了增强效果与质量约束,能够较全面、客观地评价不同方法的增强性能。

$$CEQI = \sum_{i=1}^8 w_i \cdot S_i. \quad (8)$$

3 算例1

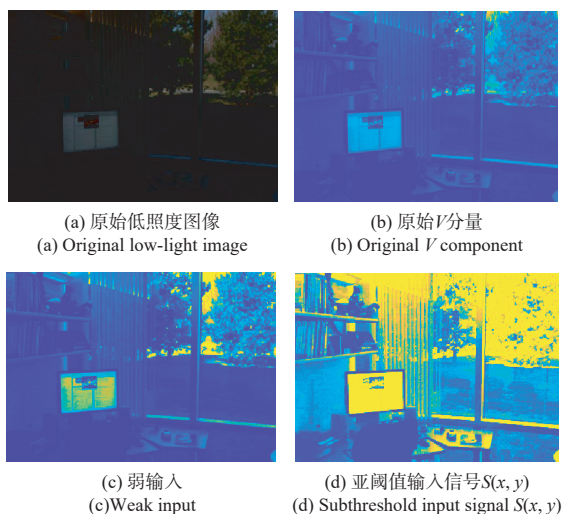
为验证本文方法在低照度图像增强中的有效性,本节以Matlab图像库中的office_1.jpg作为测试图像进行仿真分析。该图像为室内外明亮对比明显的工作场景,整体亮度偏低且包含丰富的纹理细节,能够较好地反映低照度条件下图像的典型特征。在亚阈值输入信号作用下,系统在一定强度噪声的驱动下,通过逐像素随机共振扫描实现了低照度图像的增强。

在仿真实验中,经典双稳态势函数取为 $a=2$ 、 $b=4$ 。为了对比饱和与非饱和势函数的差异性,

保持两个势函数的势垒与势阱基本一致,则非饱和高斯径向基双稳态势函数点数取 $N=7$,对应参数 x_L 与 x_R 分别取 $-1.162\ 0$ 和 $1.162\ 0$,权重 λ 分别取 $0.164\ 0$ 、 $-0.314\ 2$ 、 $-0.072\ 1$ 、 $0.067\ 8$ 、 $-0.072\ 1$ 、 $-0.314\ 2$ 和 $0.164\ 0$,7个中心位置 ξ 分别为 $-1.162\ 0$ 、 $-0.821\ 7$ 、 $-0.410\ 8$ 、 0 、 $-0.410\ 8$ 、 $-0.821\ 7$ 和 $1.162\ 0$,有效宽度 $\sigma^2=0.168\ 8$ 。在满足亚阈值条件、避免过曝与噪声放大等约束下,通过预实验确定亚阈值输入信号 $A=0.75$, $B=1.25$, $\delta=0.012$,对应输入信号约为 $-0.762F_{\text{crit}} \leq S(x, y) \leq 0.762F_{\text{crit}}$ 。在亮度融合输出中,输出增益 $G_{\text{out}}=0.88$ 与细节增益 $G_d=0.06$,暗区权重指数 $\gamma_d=1.2$ 。以视觉自然性、细节显现、整体感知质量和合理曝光为主要目标,评价指标CEQI的8个分量的权重 w 分别为 0.18 、 0.22 、 0.18 、 0.14 、 0.06 、 0.08 、 0.08 以及 0.06 ,其结果越接近1越好。

本文采用Euler-Maruyama方法对双稳态随机共振系统进行数值积分。为确保实验的可重复性,要明确在图像增强过程中数值求解关键参数设定。求解积分步长设定为 $\Delta t=0.02$ 。在图像增强过程中将最大图像边长设置为360 pixels,积分步数为1 000步,其中前300步作为截断时间给予舍弃,后700步用于稳态统计,独立随机集成次数 M 为16。因此,每个像素用于稳态统计的有效随机样本数为11 200。随机积分过程中,初始状态中心设置为由势函数数值诊断获得的左稳态势阱位置,且在初始位置叠加标准差为0.001的零均值高斯微扰,以避免完全相同的确定性初值。为降低不同参数设置之间由随机样本差异引入的额外方差,数值实验采用固定基础随机种子8 848并使用公共随机数策略,因此在相同数值参数下可以获得确定性可复现的随机积分结果。此外,系统状态转换为右势阱激活概率时使用的陡峭度参数设置为5.5。通过对积分步长及集成次数分别选取不同参数值进行分析,发现在细步长区域趋于收敛,独立集成次数达到一定规模后趋于稳定。因此,本文采用的Euler-Maruyama数值参数能够兼顾计算效率、统计稳定性和结果鲁棒性。

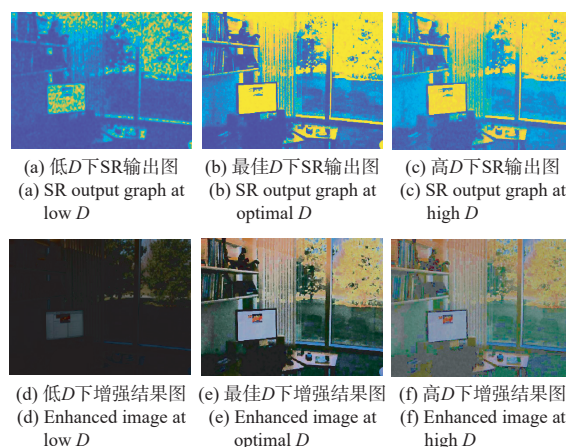
图3展示了原始低照度图像经过一系列处理后最终形成亚阈值输入信号的过程。将原始图像(图3(a))转换至HSV空间后,仅保留图3(b)

图3 亚阈值输入信号 $S(x, y)$ 的生成过程Fig. 3 Process of generating a subthreshold input signal $S(x, y)$

所示的 V 分量,此时暗区几乎不可见。经过百分位拉伸和伽马(Gamma)预增强后,得到图 3(c)所示的弱信号,经式(4)的转换,最终构造了图 3(d)所示的亚阈值输入信号 $S(x, y)$ 。亚阈值输入图在保持像素空间位置的基础上,将原始图像编码成有正有负的亚阈值输入。相对较亮区域通常对应正输入,使有效势向右倾斜;相对较暗区域通常对应负输入,使有效势向左倾斜。每个像素位置都对应一个输入力,因此后续将得到的亚阈值信号输入系统后,势函数会有不同的有效倾斜,使噪声能量定向转化,进而产生随机共振现象。

将亚阈值输入信号作用于系统上,势函数虽会有一定程度的倾斜,但粒子自身能量太小,不能独立越过势垒,此时适量噪声的加入会帮助粒子进行跃迁。在合适的噪声强度下,输入越大右势阱就更加倾斜,对应的右跃迁概率就越高;相反输入越小对应的右跃迁概率就越低。该过程将弱输入的微小差异转化为更明显的状态响应差异,进而生成随机共振输出图。将随机共振输出图作为空间自适应亮度增量的调制权重,并与原始亮度相关的暗区权重结合,使低亮度且具有明显随机共振响应的位置获得较大提升,从而避免了整幅低照度图都使用同一个亮度增益时造成暗背景也被大幅提亮、背景噪声变明显以及原本较亮的区域可能过曝的问题。随后通过细节补偿、噪声抑制和高光保护得到最终增强图像。

为验证随机共振输出图与后续图像融合增强的有效性,本文在非饱和势函数下,选取低噪声欠共振、最佳共振以及高噪声过共振 3 种代表性工况,对比 SR 输出图与增强结果图的变化,结果如图 4 所示。在低噪声欠共振工况(图 4(a))下,噪声强度过低,粒子难以跨越势垒,此时跃迁概率 $P_{\text{right}}(D) \approx P_{\text{right}}(0)$,对应 SR 输出图几乎为零,未呈现出有效的增强效应,增强结果中暗区细节仍模糊不清。在最佳共振工况(图 4(b))下,噪声强度达到最优匹配,噪声能够帮助跨阱,同时输入的倾斜方向控制跃迁方向,此时弱目标与背景的响应差异最大,增强后图像亮度显著提升,办公场景中的桌面纹理、书本文字和墙面细节均清晰可辨。在高噪声过共振工况(图 4(c))下,粒子几乎被噪声随机推动,输入倾斜的控制作用减弱,SR 输出图出现颗粒状噪声,纹理和噪声一起被放大,图像增强质量可见退化。

图4 不同噪声强度(D)下 SR 输出图以及增强结果对比
Fig. 4 SR output plots at different noise levels (D) and comparison of enhancement results

为比较非饱和势函数与经典饱和双稳态势函数在随机共振增强低照度图像中的效果,图 5 描述了两势函数在低照度图像增强过程中的响应曲线,采用无量纲噪声强度 $D/\Delta U$ 作为横轴,旨在统一的物理尺度下,客观地比较非饱和与饱和的两种势函数在随机共振中的性能差异。由图 5(a)可知,两曲线均呈现先增强后衰减规律,验证了噪声辅助亚阈值信号增强机制的有效性。相比经典双稳态势函数,非饱和双稳态势函数在亮暗共振分离度上均取得更高响应峰值,并表现出

更宽的有效噪声工作范围,说明其能够在保持亮暗结构差异的同时提高低照度亚阈值信息的响应能力。图5(b)中对最终增强效果图的质量评价指标也呈现相同规律,进一步说明该非饱和势函数在保持经典饱和势函数增强能力的基础上,改善了增强效果图的质量,表现出更强的鲁棒性。

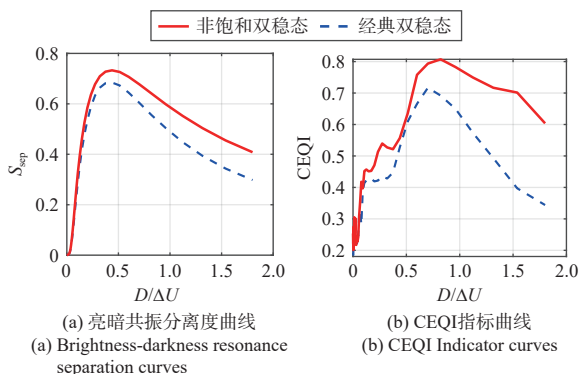


图5 饱和与非饱和的两种势函数的随机共振能力曲线对比

Fig. 5 Comparison of SR capability curves for saturated and unsaturated potential functions

图6给出了经典双稳态与非饱和双稳态随机共振最终增强图像。由图6可见,两者增强效果相近,但非饱和随机共振最终增强效果图在细节增强方面表现更优。为了客观对比,对两种增强方法在不同噪声工况下的增强效果图进行CEQI评价,结果如表1所示,噪声过低或过高均会导致

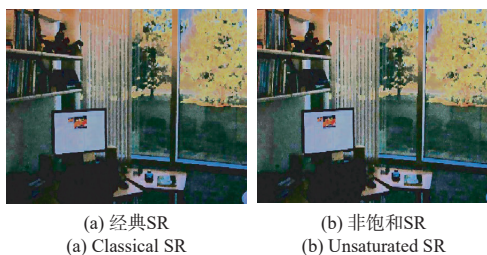


图6 随机共振增强图像效果对比图

Fig. 6 Comparison of SR enhanced image effects

表1 随机共振增强图像的CEQI指标

Tab. 1 CEQI metric for SR-enhanced images

office_1 图片	经典 SR	非饱和 SR
低噪声	0.359 8	0.360 0
最佳噪声	0.716 8	0.807 2
高噪声	0.364 7	0.527 0

图像增强效果下降。该结果说明两者均符合随机共振现象的基本规律,其中非饱和增强指标大于经典双稳态的指标,符合图6的对比结果,同时也验证了CEQI指标评价综合增强效果的有效性。

4 算例2

为验证本文方法的有效性和普适性,从明亮对比不明显与明亮对比明显两个角度选取6幅不同场景下具有代表性的低照度图像进行实验。明亮对比不明显的图像包括:照明度低的落叶图像、室外环境光线暗的秋河图像以及带雾城市建筑图像;明亮对比明显的图像包括:室内外对比明显的工作图像、室外对比明显的海滩图像以及室内对比明显的桌椅图像。将本文方法与自适应直方图均衡化(CLAHE)、伽马校正(Gamma)、带色彩恢复的多尺度Retinex算法(MSRCR)、单尺度Retinex算法(SSR)以及经典双稳态势函数随机共振方法(经典SR)进行性能对比。

4.1 明亮对比不明显的低照度图像

图7~图9分别展示了不同方法在落叶、秋河与城市建筑3幅明亮对比不明显低照度图像上的增强结果。在图7(a)原始落叶图像中,叶片纹理边缘难以辨认,暗区细节丢失严重。CLAHE提

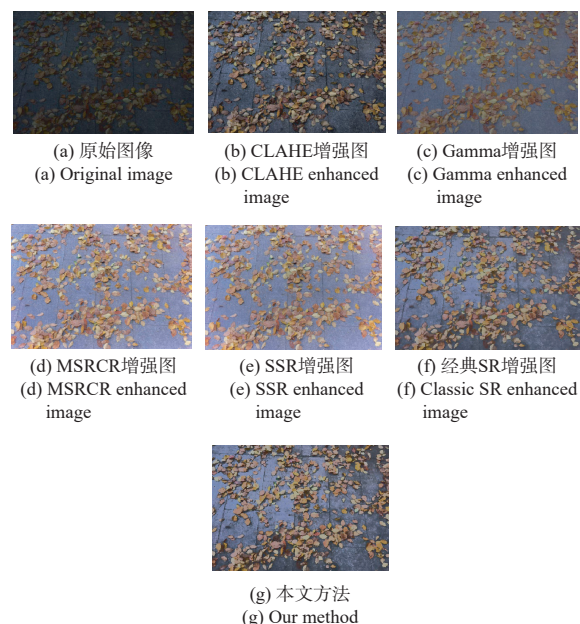


图7 不同方法增强低照度落叶图像的实验结果

Fig. 7 Experimental results of different methods for enhancing low-light fallen leaf images

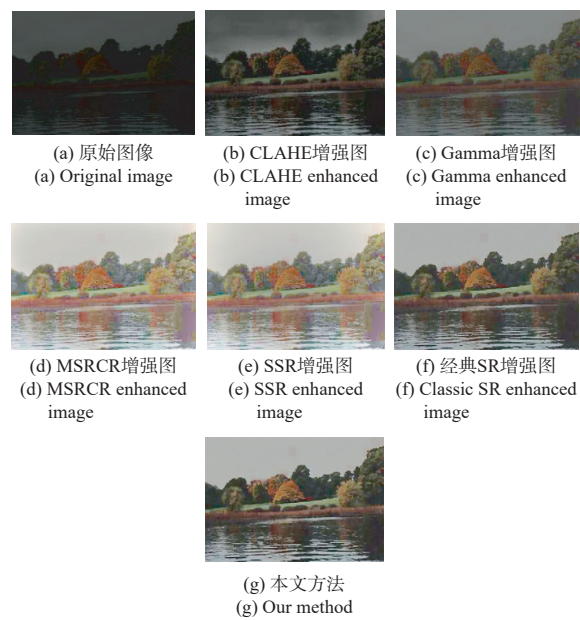


图 8 不同方法增强低照度秋河图像的实验结果
Fig. 8 Experimental results of different methods for enhancing low-light autumn river images

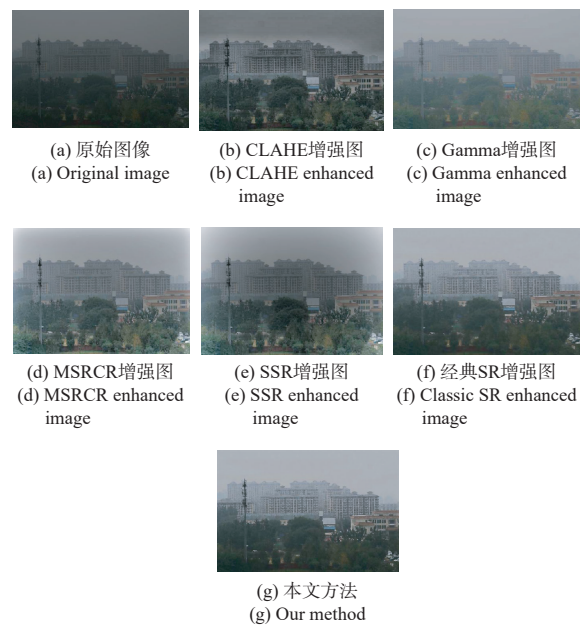


图 9 不同方法增强低照度带雾城市建筑图像的实验结果
Fig. 9 Experimental results of different methods to enhance low-light foggy city building images

升局部对比度后图像整体仍偏暗,暗区细节未充分显现;Gamma校正虽提升了亮度,但部分区域出现灰化现象;MSRCR对比度有所提升,但色彩生硬;SSR亮度均匀但边缘存在明显光晕。经典SR方法可增强暗区,但细节恢复仍较模糊。本

文方法有效恢复了叶片纹理与地面细节,层次分明,无明显色彩失真与噪声放大,视觉效果最优。在秋河图像中,原始图像(图8(a))的水中倒影与岸边细节严重丢失;CLAHE对均匀低照度区域的增强效果有限;Gamma校正压缩了暗部细节,边缘模糊,秋季色彩特征不显著;MSRCR画面明亮并兼顾了动态范围压缩,但暗部细节产生了伪影;SSR整体画面色彩饱和度偏低,图像过曝。经典SR对比度提升,恢复了部分信息,比原始图像效果好;本文方法在提升整体亮度的同时保留了丰富的色彩层次,树木的棕色、天空和水面的细节都被良好保留,无过曝或伪影现象。在带雾城市建筑图像中,原始图像(图9(a))受雾气和低照度双重影响,对比度极低,远处建筑细节几乎不可见。CLAHE虽能显现建筑轮廓,但亮度分布不均匀,未能有效抑制雾气影响;Gamma校正的层次感不足,远处建筑仍难以识别;MSRCR整体亮度提升但过曝与欠曝现象并存,去雾效果不明显;SSR画面整体偏亮,但有明显的Halo效应;经典SR增强了建筑主体,但仍残留些许雾感,细节恢复有限;本文方法在显著提升亮度的同时,清晰呈现了建筑与树木的细节,有效抑制了雾气干扰,亮暗过渡自然均匀,对比度适中。

表2列出了明亮对比不明显的低照度图像经各方法增强后的CEQI指标。结果显示,本文方法平均CEQI为0.8012,显著高于其他方法。CLAHE、Gamma校正、MSRCR和SSR四种传统方法的平均CEQI均低于0.50,表明这些方法在处理此类图像时综合质量提升有限。其中,CLAHE在图7中CEQI取得最高值0.5630,但其局部直方图均衡策略对均匀低照度区域增强效果受限;MSRCR在图9中达到0.6000,但在图7和

表 2 明亮对比不明显的低照度增强图像的 CEQI 指标
Tab. 2 CEQI metrics for images with enhanced low-light performance and subtle brightness contrast

Methods	Fig. 7	Fig. 8	Fig. 9	平均CEQI
CLAHE	0.563 0	0.377 7	0.495 3	0.478 7
Gamma	0.388 6	0.449 9	0.493 9	0.444 1
MSRCR	0.416 8	0.463 4	0.600 1	0.493 4
SSR	0.434 3	0.454 1	0.551 8	0.480 0
经典SR	0.696 0	0.731 4	0.685 5	0.704 3
Our method	0.832 0	0.790 4	0.781 3	0.801 2

图8中表现不佳,说明多尺度 Retinex 对非均匀光照场景的适应性不够稳定;经典 SR 方法的平均 CEQI 为 0.704 3,虽优于传统方法,但经典双稳态势函数的饱和性限制了其对不同场景的适应能力。综合而言,在明亮对比不明显的3类场景中,本文方法在亮度提升、细节恢复与色彩保持方面均优于传统方法与经典 SR 方法。传统方法普遍存在噪声放大、过曝或光晕等问题;经典 SR 方法虽能利用噪声增强信号,但受限于势函数形态,增强幅度有限;本文所提非饱和势函数利用更宽的共振工作区间,使暗区像素得到充分共振,同时较好地保持了图像结构与色彩信息。

4.2 明亮对比明显的低照度图像

图10~图12分别展示了不同方法在工作、海滩与桌椅3幅明亮对比明显的低照度图像上的增强结果及局部放大对比。这3种图像的原始画面整体亮度偏低,但场景内存在局部高亮区域,亮暗分布更具结构性,增强时需在恢复暗区细节与避免亮部过曝之间取得平衡。图10(a)的原始工作图像中窗框、室内桌台和摆放物等高频细节几乎完全淹没在黑暗中,CLAHE 和 Gamma 校正虽将暗区整体提亮,但仅是灰度级的简单拉伸,局部噪点放大,窗框边缘模糊。MSRCR 与 SSR 在恢复暗部细节时呈现青蓝色调的偏差,破坏了

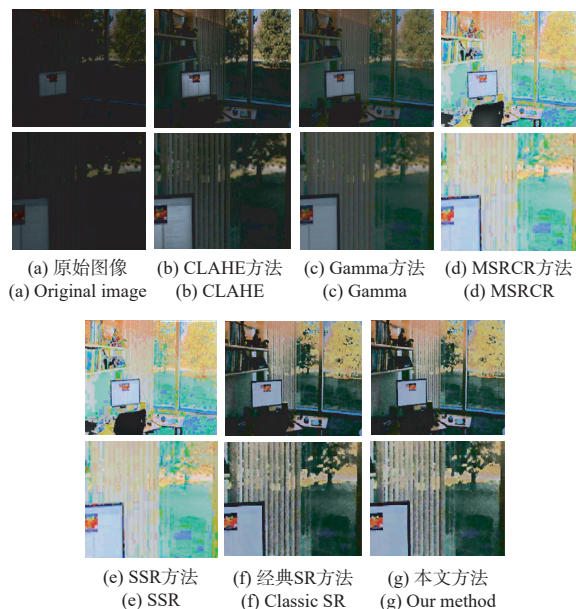


图10 不同方法增强低照度工作图像的实验结果
Fig. 10 Experimental results of different methods for enhancing low-light work images

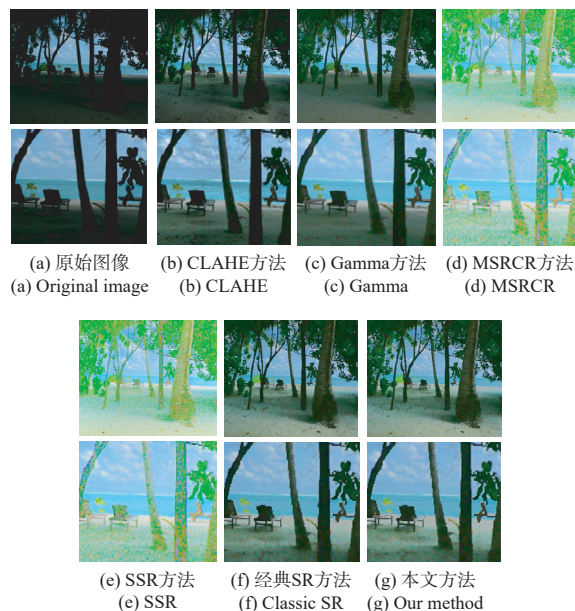


图11 不同方法增强低照度海滩图像的实验结果
Fig. 11 Experimental results of different methods for enhancing low-light beach images

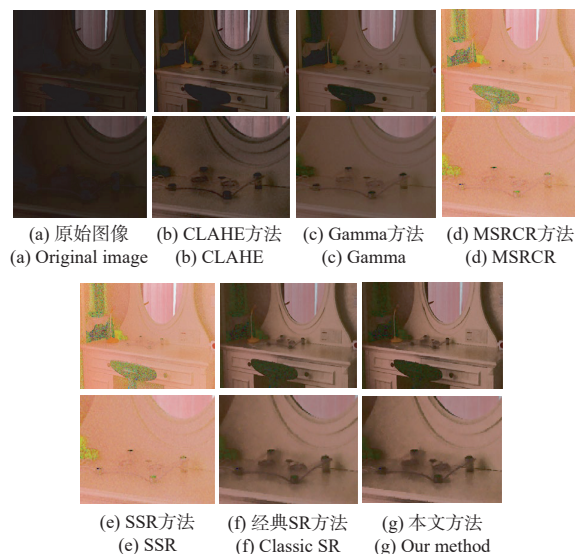


图12 不同方法增强低照度桌椅图像的实验结果。
Fig. 12 Experimental results of different methods for enhancing low-light desk and chair images

自然质感。经典 SR 在锐度上有所提升,但对暗区信息的恢复能力有限。相比之下,本文方法(图10(g))在亮度恢复和细节清晰度上达到了最佳平衡。从局部放大图中可以清晰辨认出窗框的纹理和室内的陈设轮廓,且有效避免了色彩漂移,整体观感自然真实。海滩图像中包含树木、海滩和天空的自然风光场景,旨在评估算法在

复杂自然纹理和丰富色彩空间下的处理能力。图 11 的结果表明,CLAHE 和 Gamma 处理后图像有所改善,但沙滩与树木影子难以区分,缺乏层次感。MSRCR 和 SSR 在此类自然场景时渲染出不自然的黄绿色,严重偏离了人类视觉感知。经典 SR 与本文方法在该场景下表现出极佳的色彩保真度,不仅有效恢复了树枝、树叶和沙滩的纹理细节,其色彩分布也更加符合自然光环境下的真实状态,证明了随机共振在处理色彩丰富且明亮对比度明显的低照度图像时具有显著优势。在图 12(a)中,桌椅亮度过暗,无法分辨,与镜中局部反射光形成鲜明对比,CLAHE 和 Gamma 处理后的图像仅镜中亮度适宜,整体依然过暗。MSRCR 和 SSR 出现亮度过曝,细节被掩盖,另外图像中最暗的部分出现色彩失真。经典 SR 有效恢复了场景结构与细节,色彩趋于真实。本文方法表现最稳健,不仅清晰恢复了台面物品,还有效抑制了原始色偏,呈现出最接近真实场景的视觉效果。

从图中各方法的增强结果来看,CLAHE 和 Gamma 校正对暗区的提升幅度有限,场景轮廓仅隐约可见,且 Gamma 校正在亮部区域呈现模糊。MSRCR 和 SSR 虽能区分不同明暗度的区域,但细节信息损失,色彩出现明显偏移。本文所提出的非饱和双稳态势函数随机共振增强方法在明暗对比显著的低照度场景下,依然展现出优于经典双稳态势函数随机共振增强方法的稳定增强性能。

表 3 列出了明亮对比明显的低照度图像上经各方法增强后的 CEQI 指标,本文方法获得的平均 CEQI 优于其余对比增强方法的平均 CEQI 结

表 3 明亮对比明显的低照度增强图像的 CEQI 指标
Tab. 3 CEQI metrics for low-light-enhanced images with high brightness and high contrast

Methods	Fig. 10	Fig. 11	Fig. 12	平均 CEQI
CLAHE	0.449 2	0.438 8	0.329 5	0.405 8
Gamma	0.351 8	0.499 8	0.317 0	0.389 5
MSRCR	0.362 0	0.175 9	0.201 0	0.246 3
SSR	0.377 7	0.177 8	0.193 5	0.249 7
经典 SR	0.716 8	0.703 8	0.658 1	0.692 9
Our method	0.807 2	0.748 0	0.716 1	0.757 1

果。传统方法在此类图像中的表现进一步下降:MSRCR 和 SSR 的平均 CEQI 较明亮对比不明显场景下的值更低,原因在于高动态范围的明暗区域使多尺度 Retinex 的光照估计产生严重偏差,色彩恢复机制失效,同时 SSR 的光晕伪影问题更加突出。CLAHE 和 Gamma 校正的平均 CEQI 虽略高于 MSRCR 和 SSR,但局部对比度增强与全局幂律变换均无法有效处理明暗交界处的细节丢失问题。经典 SR 方法的平均 CEQI 为 0.692 9,在图 10 中达到 0.716 8,但受限于势函数结构的固定性,对亮区过曝的抑制能力不足。本文方法的 CEQI 在图 10、图 11、图 12 中分别取得 0.807 2、0.748 0 和 0.716 1,表明基于高斯径向基的非饱和双稳态势函数在噪声驱动下的动态响应能够有效平衡明暗区域的增强需求,同时抑制过曝与伪影的产生。

综上,本文方法在明亮对比明显的低照度图像上的平均 CEQI 显著高于各对比方法,表明其增强性能具有较强的稳定性和场景适应性。传统方法在明亮对比不明显的图像中尚可取得一定效果,但在明亮对比明显的图像中性能急剧下降。经典 SR 方法虽优于传统方法,但仍不及本文方法。这说明非饱和势函数和双稳态势函数通过灵活的参数配置和更宽的共振工作区间,在多种低照度场景下均能取得较优的综合增强质量。

4.3 实际场景增强的实验效果

为验证本文方法在真实复杂环境下的有效性,本节选取了 6 个代表性的实际场景图像进行增强测试,分别为办公室、武汉长江大桥夜景、日出、道路、树木和文本场景,结果如图 13 和图 14 所示。这些场景覆盖了室内弱光、城市夜景、晨昏微光、户外道路、自然景物、文本拍摄 6 大类常见低照度成像工况,兼顾不同光照条件、物体类型、纹理复杂度,能够全面客观地衡量算法的细节恢复、色彩保真、伪影抑制等综合性能增强,有效检验本文方法的综合性能。

从图 13 和图 14 可以看出,本文方法在真实不同场景下均表现出良好的适应性。从表 4 可以看出,这几种不同场景下的平均 CEQI 指标达 0.78,说明本文方法能够有效改善实际场景图像的综合质量。

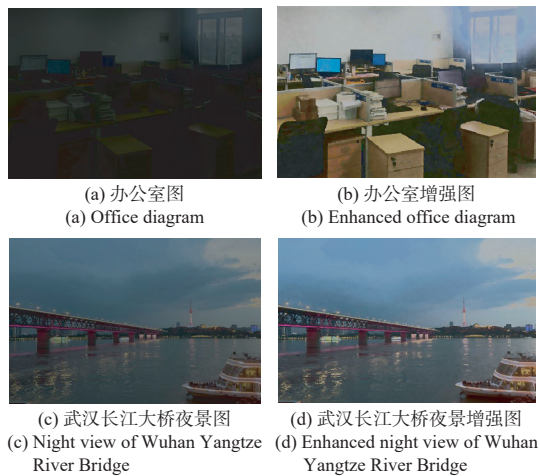


图13 两种场景图的增强结果

Fig. 13 Enhancement results of images in two scenarios



图14 4种场景图的增强结果

Fig. 14 Enhancement results of images in four scenarios

表4 不同场景增强图的CEQI结果

Tab. 4 CEQI results of enhanced images in different scenarios

场景	CEQI
办公室	0.807 9
武汉长江大桥夜景	0.794 3
日出	0.701 9
道路	0.813 7
树木	0.844 7
文本	0.717 6

5 结 论

本文针对低照度图像增强中暗区细节难以恢复的难题,提出了一种基于非饱和高斯双稳态势函数的逐像素随机共振增强方法。主要内容包括以下3个方面:(1)构造了一种以高斯径向基函数构造核心势阱区、两侧以线性延拓的新型对称双稳态势函数,通过调整势函数外侧恢复力,改善经典双稳态系统对不同强度图像信息的响应压缩问题,使系统能够在更宽的噪声强度范围内维持有序跃迁,从而提升噪声能量的利用。(2)建立了基于该势函数的随机共振图像增强框架:将低照度图像转换至HSV空间后,对V分量依次进行百分位拉伸、Gamma预增强和非线性压缩,构造符合亚阈值条件的输入信号;采用Euler-Maruyama方法逐像素求解朗之万方程,通过多次集成统计粒子位于右势阱的稳态概率生成SR响应输出图,融合暗区权重与细节增益实现自适应亮度增强,使亮度提升并有效抑制过曝。(3)提出了亮暗共振分离度指标与包含8个维度的综合增强质量指标CEQI,为随机共振增强效果提供了系统性的量化评估手段。

实验结果表明,该势函数在保持经典模型增强能力的基础上,提高了共振分离度、扩大了有效噪声参数范围。在明亮对比不明显与明亮对比明显两类低照度场景下共6幅测试图像的实验表明,本文方法的平均CEQI分别达到0.801 2和0.757 1,显著优于CLAHE、Gamma校正、MSRCR、SSR以及经典双稳态随机共振方法,且在真实生活场景图中平均CEQI为0.78,说明其具有实际应用价值。主观视觉评价方面,本文方法在暗区细节恢复、色彩保持与伪影抑制上均表现最优,验证了非饱和高斯势函数在不同低照度场景下的适应性与有效性。本文方法为低照度图像增强提供了一种新的有效途径,后续研究可围绕最优噪声强度的快速预测、势函数形态的自适应优化等方向展开,以进一步提升算法的运行效率与泛化能力。

参 考 文 献:

- [1] 张岩,汪靖哲,张永雪,等. 基于LogRetinex-Net的低照度站库监控图像增强方法[J]. 吉林大学学报(信息科学版), 2026,44(2):435-445.

- ZHANG Y, WANG J Z, ZHANG Y X, *et al.* An enhancement method of low-light monitoring image for storage facilities based on LogRetinex-Net [J]. *Journal of Jilin University (Information Science Edition)*, 2026, 44(2): 435-445. (in Chinese)
- [2] 宋建坤,孙扬,李韵鹏. 复杂光照场景下的自动驾驶汽车行人检测[J]. 计算机应用与软件,2025,42(1):102-107,188.
SONG J K, SUN Y, LI Y P. Pedestrian detection in self-driving cars in complex lighting scenes [J]. *Computer Applications and Software*, 2025, 42(1): 102-107, 188. (in Chinese)
- [3] 李长鹏,戴振宇,马天兵,等. 融合改进自校准照明的掘进工作面图像增强方法[J]. 科学技术与工程,2026,26(16): 6966-6977.
LI C P, DAI Z Y, MA T B, *et al.* Image enhancement method for excavation face by integrating improved self-calibration illumination [J]. *Science Technology and Engineering*, 2026, 26(16): 6966-6977. (in Chinese)
- [4] 王永飞,王春. 基于改进 Retinex 算法的低照度医用彩色图像增强算法[J]. 山东航空学院学报,2025,42(2): 52-60.
WANG Y F, WANG C. Low illumination medical color image enhancement algorithm based on improved Retinex algorithm [J]. *Journal of Shandong University of Aeronautics*, 2025, 42(2): 52-60. (in Chinese)
- [5] WU S X, HU J Y, GE J Q, *et al.* 10-km passive drone detection using broadband quantum compressed sensing imaging [J]. *Light: Science & Applications*, 2025, 14(1): 244.
- [6] DONG Y B, BAI Y C, ZHANG Q M, *et al.* High-throughput optical neuromorphic graphic processing at millions of images per second [J]. *eLight*, 2025, 5(1): 29.
- [7] DUN X, ZHANG J, CHEN F S, *et al.* Neural array meta-imaging [J]. *eLight*, 2025, 5(1): 33.
- [8] COLLARD L. Time-gated Fourier-transform Raman imaging achieves high temporal and spectral resolution with SPAD arrays [J]. *Light: Advanced Manufacturing*, 2026, 7(1): 17.
- [9] 贾侯,梅芳. 直方图均衡化下图像模糊边缘轮廓提取仿真[J]. 计算机仿真,2025,42(2):395-398,404.
JIA Y, MEI F. Simulation of image fuzzy edge contour extraction under histogram equalization [J]. *Computer Simulation*, 2025, 42(2): 395-398, 404. (in Chinese)
- [10] 李仁强,浦恩祥,韩子建,等. 双平台直方图均衡改进算法及其FPGA实现[J]. 红外技术,2026,48(2):212-219.
LI R Q, PU E X, HAN Z J, *et al.* Improved dual-platform histogram equalization algorithm and its implementation on FPGA [J]. *Infrared Technology*, 2026, 48(2): 212-219. (in Chinese)
- [11] 马鑫,喻春雨,陈刚,等. 分区自适应伽马校正的非均匀光照图像增强[J]. 激光与光电子学进展,2024,61(14): 1437006.
MA X, YU C Y, CHEN G, *et al.* Adaptive Gamma correction of subregion for non-uniform illumination image enhancement [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2024, 61(14): 1437006. (in Chinese)
- [12] 孟祥坤,朱钰瑄,章文俊,等. 融合暗通道先验与Retinex理论的海上图像去雾算法[J]. 安全与环境学报,2026, 26(5):1709-1717.
MENG X K, ZHU Y X, ZHANG W J, *et al.* Maritime image dehazing algorithm by integrating dark channel prior and Retinex theory [J]. *Journal of Safety and Environment*, 2026, 26(5): 1709-1717. (in Chinese)
- [13] 丁忠军,邱伟平,李德威,等. 基于改进 CLAHE-MSRCR融合的水下偏振图像增强算法[J]. 红外技术,2026:1-7.
DING Z J, QIU W P, LI D W, *et al.* Underwater polarization image enhancement algorithm based on improved CLAHE-MSRCR Fusion [J]. *Infrared Technology*, 2026: 1-7. (in Chinese)
- [14] 吴浩楠,杨文,胡昊,等. 铁路低照度环境下图像增强方法研究[J]. 铁道科学与工程学报,2026:1-17.
WU H N, YANG W, HU H, *et al.* Research on image enhancement method for railway under low illumination environment [J]. *Journal of Railway Science and Engineering*, 2026: 1-17. (in Chinese)
- [15] 毕诗帆,叶亮,王志祥,等. 夜间无人机航拍图像目标检测与跟踪方法研究进展[J]. 中国图象图形学报,2026,31(7): 2434-2470.
BI S F, YE L, WANG Z X, *et al.* Progress of research on object detection and tracking methods for nighttime UAV aerial imagery [J]. *Journal of Image and Graphics*, 2026, 31(7): 2434-2470. (in Chinese)
- [16] LI Y H, XIE J Y, CHI K C, *et al.* Feature intensification using perception-guided regional classification for remote sensing image super-resolution [J]. *Remote Sensing*, 2024, 16(22): 4201.

- [17] AL-AMEEN Z. Efficient image color enhancement using a new tint intensification algorithm [J]. *Journal of Real-Time Image Processing*, 2023, 20(4): 79.
- [18] 张易航,钟寒. 基于光照引导的三阶段低光照图像增强[J]. 光学精密工程,2025,33(13):2108-2123.
ZHANG Y H, ZHONG H. Three-stage low-light image enhancement based on illumination guidance [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2025, 33(13): 2108-2123. (in Chinese)
- [19] 闫光辉,吴佰靖,马龙. LightDiffu-DCE:基于光照强度扩散的低光照图像增强[J]. 光学精密工程,2025,33(7): 1114-1129.
YAN G H, WU B J, MA L. LightDiffu DCE: low light image enhancement based on light intensity diffusion [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2025, 33(7): 1114-1129. (in Chinese)
- [20] 梁礼明,朱晨锐,阳渊,等. 跨级特征自适应融合的暗光图像增强算法[J]. 液晶与显示,2024,39(6):856-866.
LIANG L M, ZHU C K, YANG Y, et al. Cross-level feature adaptive fusion network for low-light image enhancement [J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2024, 39(6): 856-866. (in Chinese)
- [21] 吴庆玲,石强,杜永盛,等. 基于张量分解与非下采样 Contourlet 变换遥感图像增强[J]. 中国光学(中英文),2024, 17(6):1307-1315.
WU Q L, SHI Q, DU Y S, et al. Remote-sensing image enhancement based on tensor decomposition and nonsubsampling Contourlet transform [J]. *Chinese Optics*, 2024, 17(6): 1307-1315. (in Chinese)
- [22] 常志文,王立忠,梁晋,等. 基于图像块分解融合的水下标定图像增强[J]. 中国光学(中英文),2024,17(4):810-822.
CHANG Z W, WANG L Z, LIANG J, et al. Underwater calibration image enhancement based on image block decomposition and fusion [J]. *Chinese Optics*, 2024, 17(4): 810-822. (in Chinese)
- [23] 李文彪,陶洋,董源,等. 基于颜色先验引导和注意力机制的水下图像增强[J]. 液晶与显示,2025,40(8):1163-1176.
LI W B, TAO Y, DONG Y, et al. Underwater image enhancement based on color prior guidance and attention mechanism [J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2025, 40(8): 1163-1176. (in Chinese)
- [24] WALLA P. Introducing noise can lift sub-threshold signals above the threshold to generate perception: a new perspective on consciousness [J]. *Applied Sciences*, 2025, 15(19) 10574.
- [25] BENZI R, SUTERA A, VULPIANI A. The mechanism of stochastic resonance [J]. *Journal of Physics A: Mathematical and General*, 1981, 14(11): L453-L457.
- [26] WANG S, YUAN Y, ZHANG M W. Study on weak signal feature extraction based on asymmetric hybrid bistable stochastic resonance [J]. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 2024, 73: 3537115.
- [27] WANG Y, JIAO S B, YANG H B, et al. Adaptive two-dimensional coupled bistable stochastic resonance and its application in bearing fault diagnosis [J]. *Chaos, Solitons & Fractals*, 2025, 194: 116245.
- [28] CURCIO L, SPEZIA S, VALENTI D, et al. Double stochastic resonance in stink bug sexual communication [J]. *Scientific Reports*, 2025, 16(1): 256.
- [29] CHOUHAN R, JHA R K, BISWAS P K. Enhancement of dark and low-contrast images using dynamic stochastic resonance [J]. *IET Image Processing*, 2013, 7(2): 174-184.
- [30] JHA R K, CHOUHAN R. Noise-induced contrast enhancement using stochastic resonance on singular values [J]. *Signal, Image and Video Processing*, 2014, 8(2): 339-347.
- [31] 高文,肖海峰. 基于动态双稳随机共振的低照度彩色图像增强[J]. 液晶与显示,2021,36(6):861-868.
GAO W, XIAO H F. Low illumination color image enhancement based on dynamic bistable stochastic resonance [J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2021, 36(6): 861-868. (in Chinese)
- [32] 魏敏,胡晓峰,林敏. 基于四稳随机共振的低照度图像增强方法[J]. 液晶与显示,2022,37(7):871-879.
WEI M, HU X F, LIN M. Low illumination image enhancement method based on quad-stable stochastic resonance [J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2022, 37(7): 871-879. (in Chinese)
- [33] 刘高辉,刘仕钦. 二次方分段双稳调参随机共振的微弱 OFDM 信号检测方法研究[J]. 微电子学与计算机,2025, 42(3):117-126.
LIU G H, LIU S Q. Research on weak OFDM signal detection method based on quadratic piecewise bistable tuned parametric stochastic [J]. *Microelectronics & Computer*, 2025, 42(3): 117-126. (in Chinese)
- [34] 贺利芳,刘秋玲,张刚. 高斯势分段双稳随机共振在不同噪声下的轴承故障诊断[J]. 振动与冲击,2023,42(3):

30-42.

HE L F, LIU Q L, ZHANG G. Bearing fault diagnosis under different noises with GPPBSR system [J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2023, 42(3): 30-42. (in Chinese)

- [35] 刘小峰, 黄洪升, 柏林. 非饱和非对称二维随机共振系统的优化及在高速铁路轴承故障诊断中的应用[J]. 铁道学报, 2023, 45(11): 70-77.

LIU X F, HUANG H S, BO L. Optimization of unsaturated-asymmetric two-dimensional stochastic resonance system and its applications in fault diagnosis of high-speed railway bearings [J]. *Journal of the China Railway Society*, 2023, 45(11): 70-77. (in Chinese)

- [36] LI Y W, LI F, ZHANG T, *et al.* Adaptive detection of weak light signals in underwater laser communication via piecewise-exponential unsaturated bistable stochastic resonance [J]. *IEEE Sensors Journal*, 2026, 26(8): 12286-12300.

- [37] 马珊珊, 李伟勤, 杨沼翔, 等. 基于随机共振的震电测井信号检测方法[J]. 石油钻探技术, 2025, 53(4): 142-149.

MA S S, LI W Q, YANG Z X, *et al.* A signal detection method for seismoelectric logging based on stochastic resonance [J]. *Petroleum Drilling Techniques*, 2025, 53(4): 142-149. (in Chinese)

- [38] DEIVALAKSHMI S, PALANISAMY P, GAO X Z. Balanced GHM mutiwavelet transform based contrast enhancement technique for dark images using dynamic stochastic resonance [J]. *Intelligent Automation and Soft Computing*, 2019, 25(3): 459-471.

作者简介:



孙学锋, 男, 学士, 教授级高级工程师, 2000年于哈尔滨工业大学获得学士学位, 主要从事智能建造及未来建筑技术应用的研究。E-mail: 331605518@qq.com



徐 明, 男, 博士, 副教授, 2013年于浙江大学获得博士学位, 主要从事机器视觉及自动控制方面的研究。E-mail: xuming@cjlu.edu.cn