文章编号：1003－1251(2026)05－0048－07

VLC-PPM 系统变步长 LMS 干扰抑制方法

张林丛，张媛媛，孙心悦，崔众宇，刘雨晴，钱 博

（沈阳理工大学 信息科学与工程学院，沈阳 110159）

摘 要：为解决可见光通信脉冲位置调制（visible light communication-pulse position modulation，VLC-PPM）系统中多径效应、背景光噪声等因素导致的干扰问题，提出一种能够平衡收敛速度和稳态误差的记忆－正弦型变步长最小均方（nonlinear sine-based variable step size-least mean square，NSVSS-LMS）算法，通过引入历史步长以增强算法稳定性，同时采用正弦函数动态调整步长以平衡收敛速度与稳态精度，理论分析证明了该算法权重向量的收敛性。仿真结果表明，与其他四种算法（SVS-LMS、正弦 VSLMS、VSS-LMS 及 FSS-LMS）相比，该算法在保持计算复杂度基本不变的前提下，实现了更低的稳态误差、更快的收敛速度和更低的误码率，有效提升了 VLC-PPM 系统的抗干扰性能，为可见光通信（visible light communication，VLC）的干扰抑制提供了可行方案。

关 键 词：可见光通信；脉冲位置调制；变步长最小均方；收敛速度

中图分类号：TN911.72 **文献标志码：**A **DOI：**10.3969/j.issn.1003－1251.2026.05.007

Variable Step-Size LMS Interference Suppression Method for VLC-PPM System

ZHANG Lincong，ZHANG Yuanyuan，SUN Xinyue，CUI Zhongyu，LIU Yuqing，QIAN Bo

（Shenyang Ligong University，Shenyang 110159，China）

Abstract：To address the interference issues caused by the multipath-effect，background optical noise，and other factors in Visible Light Communication-Pulse Position Modulation（VLC-PPM）systems，a Nonlinear Sine-based Variable StepSize-Least Mean Square（NSVSS-LMS）algorithm is proposed，which achieves a balance between convergence speed and steady-state error. The algorithm enhances stability by incorporating historical step-size information and dynamically adjusts the step size using a sinusoidal function to optimize both convergence speed and steady-state accuracy. Theoretical analysis confirms the convergence of the weight vector of this algorithm. Simulation results demonstrate that，compared with the other four algorithms（SVS-LMS，sinusoidal VSLMS，VSS-LMS and FSS-LMS），the proposed algorithm achieves lower steady-state error，faster convergence speed，and reduced bit error rate while maintaining comparable computational complexity. The NSVSS-LMS algorithm significantly improves the anti-interference performance of VLC-PPM system and provides a feasible solution for interference suppression in VLC.

Key words：visible light communication；pulse position modulation；variable step size least mean square；convergence speed

收稿日期：2025－06－25

基金项目：辽宁省教育厅高等学校基本科研项目（LJ212410144067）

作者简介：张林丛（1985—），女，副教授，博士。

随着第六代移动通信技术的发展,可见光通信(visible light communication,VLC)因其抗电磁干扰、免授权频谱、高能效低成本等优势,成为射频通信的重要补充。VLC 系统基于发光二极管实现数据传输,同时兼具照明功能,在室内定位、智能照明及高速无线通信等领域展现出广阔的应用前景[1]。然而,在实际 VLC 系统中,多径效应、背景光噪声及 LED 非线性等因素会引入干扰,影响通信质量[2]。

在抑制系统干扰的方法中,自适应滤波技术扮演着重要的角色,最小均方误差(LMS)算法因其计算简单、实现方便等优点成为最广泛使用的自适应滤波算法之一。然而,传统 LMS 算法采用固定步长,在收敛速度和稳态误差之间存在固有矛盾,难以适应非平稳环境的需求[3]。为此,研究者们提出了多种改进方案,从不同角度优化算法性能。

在步长调整策略的改进上,文献[4]提出了一种基于预测误差平方的变步长 LMS 算法,通过动态调整步长有效平衡收敛速度与稳态失调的矛盾。这一思路为后续研究奠定了基础。文献[5]提出了两个 LMS 滤波器的仿射组合方法,通过优化参数组合,实现了收敛速度与稳态精度的兼顾。文献[6]则引入 Sigmoid 函数改进步长曲线,显著提升了算法的抗干扰特性。文献[7]提出的无参数变步长算法通过双曲正切函数建立误差与步长的非线性关系,实现了参数的自适应调整。

随着分布式信号处理需求的增长,变步长 LMS 算法在分布式估计中的应用取得了重要进展。文献[8]开发的变步长扩散 LMS 算法通过误差滤波和加权比值的迭代更新,显著提高了分布式估计的精度,特别是在低信噪比环境下表现出色。在主动噪声控制领域,文献[9]研究了基于 Filtered-xLMS 算法的主动噪声控制技术,通过结合前馈与反馈结构并引入变步长策略,有效提升了系统对相关噪声与非相关残余噪声的控制能力。

分数阶控制理论与智能优化算法的引入也为 LMS 算法的发展开辟了新方向。文献[10]将分数阶比例积分控制器与黑寡妇优化算法相结合,提出的分数阶修正自适应变步长最小均方算法不仅提高了收敛速度,还显著增强了动态电压恢复器系统的抗扰动能力。文献[11]针对帕金森病震颤抑制问题,系统比较了多种 LMS 变体算法,发现 Fsinx-LMS 在生理震颤和帕金森震颤抑制中效果较佳。文献[12]则为三相配电系统频率测量设计了基于广义线性(增广)复数最小均方(ACLMS)的变步长算法,在分布式发电孤岛运行等复杂工况下保持了良好的稳定性。

在算法鲁棒性提升方面,文献[13]提出的非参数变步长 LMS 算法通过非参数变量步长设计,有效解决了高斯噪声和脉冲噪声环境下的收敛矛盾。文献[14]则借助随机梯度下降方法动态学习特征矩阵以挖掘未知系统的隐藏稀疏性,实现了更优的滤波精度。上述研究共同推动了 LMS 算法在各种复杂环境下的适应性提升。

尽管变步长 LMS 算法在多领域取得进展,但缺少在高频成分丰富的可见光通信脉冲位置调制(visible light communication-pulse position modulation,VLC-PPM)系统中的应用研究。为此,本文以 VLC-PPM 系统为研究对象,提出一种记忆-正弦型变步长 LMS 自适应滤波算法(NSVSS-LMS),融合“历史步长记忆”与“非线性动态调节”,旨在提升系统抗干扰性能,为高可靠性 VLC 提供有效解决方案。

1　系统模型

VLC-PPM 系统模型如图 1 所示,分为发送端、接收端和信道[1],接收端信号在经过光电二极管(PD)接收后进行自适应均衡,使信号更准确地被解调出来。

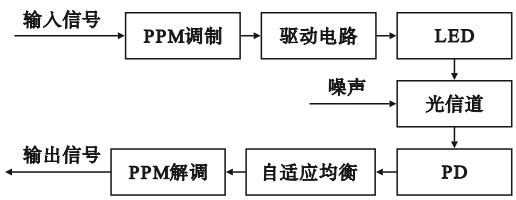


图 1　VLC-PPM 系统模型

Fig. 1　VLC-PPM system model

1)调制

在发送端,调制信号为矩形脉冲信号,有两种方波,其表达式为

$$g_0(t)=\begin{cases}1, 0\leqslant t\leqslant \dfrac{T}{2}\\ 0, \dfrac{T}{2}\leqslant t\leqslant T\end{cases} \tag{1}$$

$$g_1(t)=\begin{cases}0, 0\leqslant t\leqslant \dfrac{T}{2}\\ 1, \dfrac{T}{2}\leqslant t\leqslant T\end{cases} \tag{2}$$

式中:T 为脉冲周期;$g_0(t)$ 前半周期为“1”,后半周期为“0”,表示数据“0”;$g_1(t)$ 同理,表示数据“1”。

调制后的信号 $S_{\text{ppm}}(t)$ 表示为

$$S_{\text{ppm}}(t) = \sum_{k=0}^{\infty} g_{a_k}(t - kT) \tag{3}$$

式中 $a_k \in \{0,1\}$,代表了在第 k 个传输时隙所要发送的信息比特。

2)解调

在接收端,基于最大似然准则的 PPM 解调算法通过以下步骤恢复二进制数据:将每个周期 T 均匀划分为两个时隙 $\left[0,\frac{T}{2}\right]$ 和 $\left[\frac{T}{2},T\right]$,分别对应发送脉冲 $g_1(t)$ 和 $g_2(t)$。接收端计算各时隙内采样点的平均幅值,若第一个时隙幅值最大则判为“0”,第二个时隙幅值最大则判为“1”,以此实现信号的解调。

3)信道及其 PD 接收

图 2 为信道模型图。

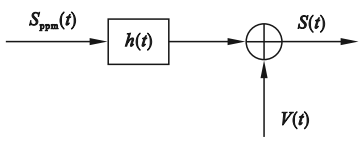


图 2 信道模型

Fig. 2 Channel model

图 2 中,$h(t)$ 是信道冲激响应,由视距 $h_{\text{LOS}}(t)$ 和非视距 $h_{\text{NLOS}}(t)$ 链路组成,$V(t)$ 是噪声,接收端信号 $S(t)$ 表示为

$$S(t) = \xi S_{\text{ppm}}(t)[h_{\text{LOS}}(t) + h_{\text{NLOS}}(t)] + V(t) \tag{4}$$

式中:$S(t)$ 是接收信号;ξ 是 PD 响应度,单位是 A/W。

视距增益 H_{LOS} 为

$$H_{\text{LOS}} = \frac{A_{\text{r}}(m+1)\cos^m(\Phi)g\cos(\Theta)}{2\pi d_0^2} \tag{5}$$

式中:A_{r} 是 PD 的接收面积;m 是朗伯模数,表示 LED 的光强分布;Φ 是发射角;g 是聚光片增益;Θ 是入射角;d_0 是发射端与接收端的信号传输距离。

视距脉冲响应为

$$h_{\text{LOS}}(t) = H_{\text{LOS}}\delta\left(t - \frac{d_0}{c}\right) \tag{6}$$

式中:c 是光速,$c = 3 \times 10^8$ m/s;δ 为单位冲激函数。

非视距增益 H_{NLOS} 为

$$H_{\text{NLOS}} = \frac{\rho A_{\text{r}}\cos(\Theta)}{\pi d_1^2} \tag{7}$$

式中:ρ 是反射系数;d_1 是反射路径距离。

非视距脉冲响应为

$$h_{\text{NLOS}}(t) = H_{\text{NLOS}}\delta\left(t - \frac{d_1}{c}\right) \tag{8}$$

$V(t)$ 由背景光噪声、热噪声和高斯白噪声组成,计算表达式为

$$V(t) = n(t)\sqrt{P_{\text{b}} + P_{\text{t}}} \tag{9}$$

式中:P_{b} 是背景光噪声功率;P_{t} 是热噪声功率,$n(t)$ 是均值为 0,方差为 1 的高斯白噪声。

由于 PD 接收到的信号功率微弱,需要对信号进行放大,放大器增益为 G,则放大后的信号为

$$Y(t) = GS(t) = G\{\xi S_{\text{ppm}}(t)[h_{\text{LOS}}(t) + h_{\text{NLOS}}(t)] + V(t)\} \tag{10}$$

2 变步长算法

2.1 NSVSS-LMS 算法

自适应均衡原理如图 3 所示,自适应均衡技术是按照一定的代价函数对输入信号进行选择性加权处理,使输出达到最优,能够跟踪和适应系统与环境的动态变化。图中 $u(n)$ 为输入信号,$d(n)$ 为期望信号,$y(n)$ 为滤波器的输出估计信号,误差信号 $e(n)$ 用于调整自适应滤波器的抽头系数[3]。

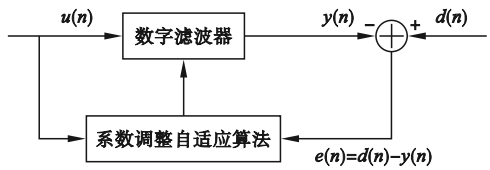


图 3 自适应均衡原理

Fig. 3 Adaptive equalization principle

LMS 算法是最常用的自适应均衡算法,但传统固定步长 LMS 算法在收敛速度和稳态误差上存在矛盾。在基于 VLC-PPM 系统中,矩形方波信号由于其高频成分丰富,极易受到多径效应与非线性失真的影响,进而引发严重的码间干扰。为此,本文 NSVSS-LMS 算法的步长更新公式为

$$\mu(n) = \alpha \cdot \mu(n-1) + \gamma \cdot \sin(\beta e^2(n)) \tag{11}$$

式中:α 是历史步长保持因子,控制记忆性,$0 < \alpha < 1$;γ 控制步长调整的幅度,$\gamma > 0$;$\beta > 0$,控制误差对步长影响的敏感度,用于调节正弦函数响应速度,使用正弦函数保证步长调整的平滑性;$\mu(n)$ 是步长,初始步长为 μ_0 且 $\mu_{\min} < \mu(n) < \mu_{\max}$,$\mu_{\max}$ 是限定步长的最大值,$\mu_{\min}$ 为限定步长的最小值,以保障算法具备基本的跟踪性能。可以看出,$\mu(n)$ 始终为正,并且由瞬时误差和参数 α、β 和 γ 控制,当瞬时误差增大时,自适应增大步长因子以提升跟踪速度;当瞬时误差减小时,则动态减小步长以实现更精细的稳态调节。

历史步长 $\mu(n-1)$ 可以在步长更新中保留历史信息,使步长变化更加平稳,从而降低噪声干扰带来的波动,改善算法稳定性。使用正弦函数 $\sin(\beta e^2(n))$ 实现对误差变化的非线性响应,使得步长能够灵活适应不同阶段的误差变化,提升收敛速度。

其自适应滤波器权重 w 更新方式为

$$w(n+1)=w(n)+\mu(n)u(n)e(n)=w(n)+[\alpha\cdot\mu(n-1)+\gamma\cdot\sin(\beta e^2(n))]u(n)e(n) \tag{12}$$

$e(n)$ 定义为

$$e(n)=d(n)-w^{\mathrm{T}}(n)u(n) \tag{13}$$

得

$$u(n)=d(n)+z(n) \tag{14}$$

式中:$z(n)$ 为噪声的取样值,是平稳随机过程,且与 $d(n)$ 独立,输出信号 $y(n)$ 为

$$y(n)=\sum_k u(n-k)h(k) \tag{15}$$

式中 $h(k)$ 为自适应滤波器的传递函数。

2.2　权重收敛性分析

算法的有效性依赖于权重向量的收敛性,本节将从理论上分析该算法权重向量的收敛条件。

定义误差权重为

$$\widetilde{w}(n)=w(n)-w^*(n) \tag{16}$$

式中:$\widetilde{w}(n)$ 为误差权重;$w^*(n)$ 为最优权重。为使自适应滤波器的权重可以收敛到最优权重,表示当前权重与最优权重之间的差距,即 $\widetilde{w}(n)$ 逐渐趋于零。

由公式(12)可知,步长 $\mu(n)$ 与输入信号 $u(n)$ 独立或相关性很弱,可以得到

$$E[\widetilde{w}(n+1)]=[I-RE\mu(n)]E\widetilde{w}(n) \tag{17}$$

式中:R 为输入信号;E 为期望函数。

$$R=E[u(n)u^{\mathrm{T}}(n)] \tag{18}$$

要使 $E[\widetilde{w}(n)]$ 最终趋于零,对于 R 的特征值 λ 必须有

$$|1-E\mu(n)\lambda|<1 \tag{19}$$

进一步得到收敛条件

$$E\mu(n)<\frac{2}{\lambda_{\max}} \tag{20}$$

式中 $\lambda_{\max}$ 表示 R 的最大特征值。

该条件意味着平均步长不能过大,否则权重会在最优值附近震荡;也不能过小,否则收敛速度太慢。只要步长满足上述条件,算法就能保证权重的平均收敛。

3　仿真

3.1　VLC-PPM 系统仿真

对图 1 系统进行仿真,仿真参数如表 2 所示。

表 2　VLC-PPM 仿真参数

Table 2　Simulation Parameters for VLC-PPM

参数	符号	值	单位
LED 视场	FoV	$\pi/3$	rad
接收面积	A_r	1e−4	m^2
聚光片增益	g	1.5	—
传输距离	d_0	3.46	m
光速	c	3^8	m/s
发射角	Φ	$36\pi/180$	rad
入射角	Θ	$20\pi/180$	rad
反射距离	d_1	5	m
反射系数	ρ	0.6	—
背景噪声功率	P_b	10^{-8}	W
热噪声功率	P_t	10^{-8}	W
PD 响应度	ξ	0.6	—
LED 电阻	R_{led}	300	Ω
发光效率	η	120	lm/W

如图 4 所示为发送端发送的二阶 PPM 调制信号的波形,每个周期 T 分为 2 个时隙,时隙的位置表示信号是“0”或“1”,对应调制部分的理论。仿真参数设置为采样率 50 GHz,脉冲宽度 1 ns,一个周期为 2 ns,PPM 时隙数为 2,总传输比特数为 1 000。图中显示了前 10 个周期的 PPM 信号。

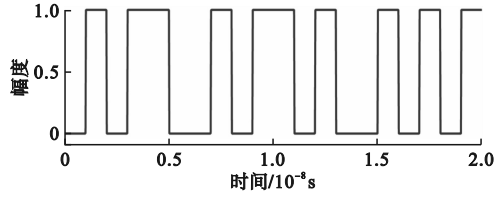


图 4　二阶 PPM 信号

Fig. 4　Second-order PPM signal

如图 5 所示,系统信道冲激响应在主脉冲处能量高度集中、幅值达峰值,表明信号主要通过直达路径传输。同时,主脉冲两侧存在次级波动,呈现典型多径效应特征,这些由光信号反射形成的波动反映了多径干扰问题,因此需在系统设计中采用自适应均衡算法抑制干扰。

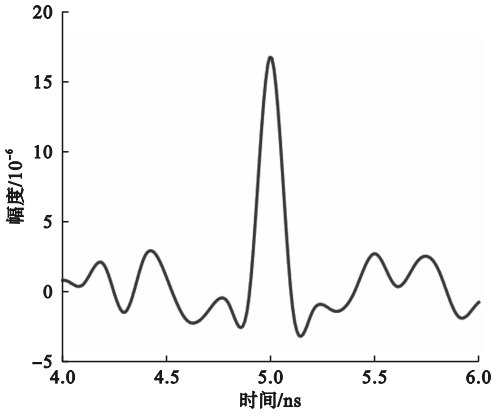


图 5 信道冲激响应

Fig. 5 Channel impulse response

3.2 NSVSS-LMS 算法仿真

NSVSS-LMS 算法仿真中参数取值为:$\mu_{max}=0.5$,$\mu_{min}=0.001$,$\alpha=0.6$,$\beta=0.5$,$\gamma=0.1$。经本文算法均衡前后的 PPM 信号对比结果如图 6 所示。

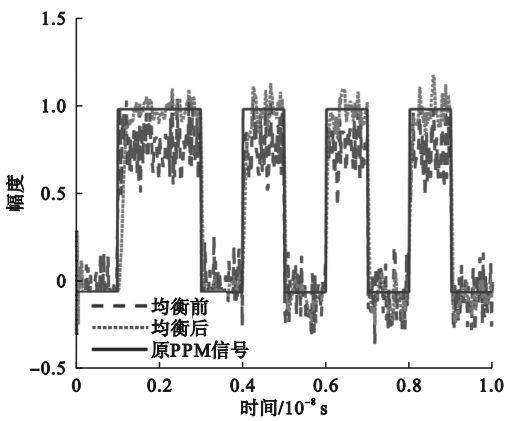


图 6 均衡前后 PPM 信号对比

Fig. 6 PPM signal comparison before and after equalization

由图 6 可知,均衡后的 PPM 信号受噪声的波动明显比均衡前要少,与初始信号的契合度得到改善,验证了算法在均衡信号方面的有效性。图 7 展示了误差与步长的关系。

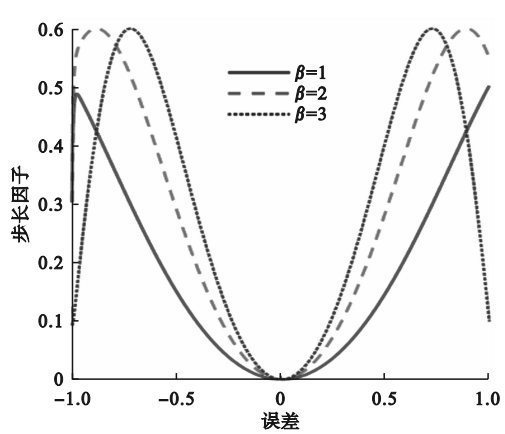
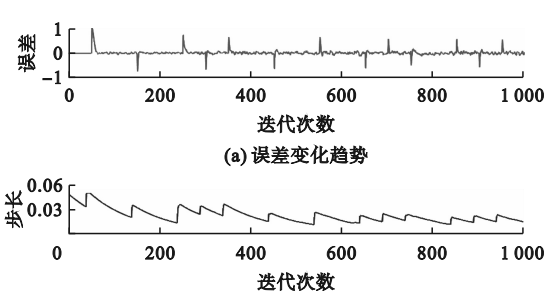
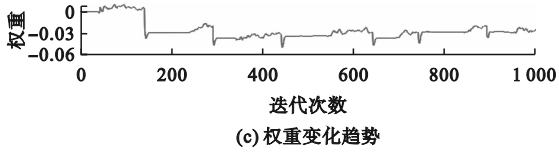


图 7 误差与步长的关系

Fig. 7 Relationship between error and step size

由图 7 可知,β 越大曲线越陡,当 $\beta=2$ 时,曲线在误差为(0.8,1)范围内步长下降,$\beta=3$ 时,曲线在误差为(0.6,1)范围内步长急剧下降,所以 β 取值过大会导致算法不稳定;当 γ 变化时,γ 越大曲线越陡,误差大时(误差值接近 1)步长变大,但收敛阶段误差小时(误差值接近 0)步长也较大,所以需要选择一个合适的值保证在初始阶段和收敛阶段都能保持稳定;当 α 变化时,α 的大小对曲线的陡峭程度影响较大,所以为了避免算法步长变化过大,α 值不宜过大。图 8 展示了误差、步长和权重随迭代次数的变化情况。





(c) 权重变化趋势

图 8　误差、步长和权重随迭代次数的变化

Fig. 8　Variations of error, step size, and weight with iteration count

由图 8 可见,误差的波动范围随着迭代次数的增加逐渐减小,步长能根据误差变化而做出相应的调整,初始阶段步长较大以加快收敛速度,后期步长逐渐减小以提高收敛稳定性,进而权重也逐步收敛,验证了算法的有效性。

3.3　对比算法仿真

本小节将所提 NSVSS-LMS 算法与三种变步长 LMS 算法(SVS-LMS[15]、正弦 VSLMS[16]、VSS-LMS[4])以及固定步长 LMS 算法(FSS-LMS)在误码率、收敛速度和稳态误差以及运行时间方面进行对比分析。误码曲线对比结果如图 9 所示。

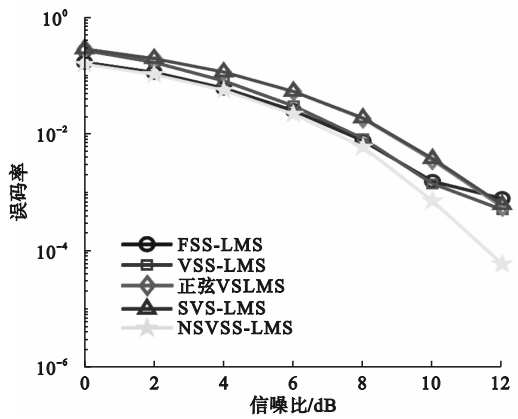


图 9　误码曲线对比

Fig. 9　Comparison of bit error rate curves

由图 9 可见,在信噪比小于 6 dB 时,信道噪声主导误码率,各算法性能逼近理论下限,故差异不显著。当信噪比大于 10 dB 时,NSVSS-LMS 通过非线性步长调整实现更小的稳态误差;固定步长 LMS 因步长恒定导致权值震荡,VSS-LMS 步长更新策略难以有效应对信道改善后的精准调节需求;正弦 VSLMS 和 SVS-LMS 在对抗噪声、适配信道变化上存在缺陷,没有经过均衡的信号缺乏有效调节手段,使得误码曲线基本重合,整体误码性能弱于其他对比算法。图 10 为不同算法的收敛曲线对比结果。

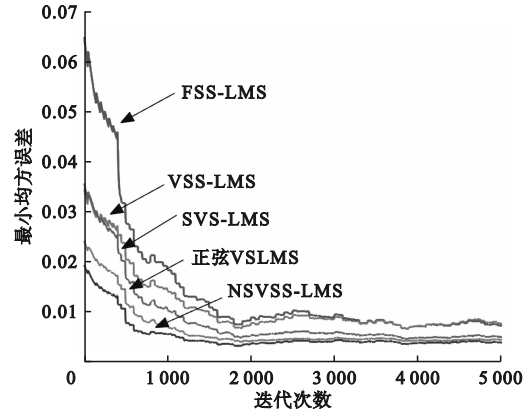


图 10　收敛曲线对比

Fig. 10　comparison of convergence curves

由图 10 可知,固定步长 LMS 算法收敛速度较慢,这是因为其收敛速度和稳态误差的固有矛盾;VSS-LMS 算法在收敛速度上有所提升,但稳态时因残留步长引起权值抖动,误差波动明显;正弦 VSLMS 的周期性可能导致步长非单调变化,在中等误差区间引入不必要的振荡,SVS-LMS 的 Sigmoid 函数的对称性导致负误差敏感度不足,可能影响 PPM 脉冲极性跟踪;相比之下,NSVSS-LMS 算法通过非线性函数动态调整步长进一步加快了收敛速度,MSE 下降更快且稳态误差最低,显示出较好的稳定性和鲁棒性。图 11 为不同算法运行时间对比结果。

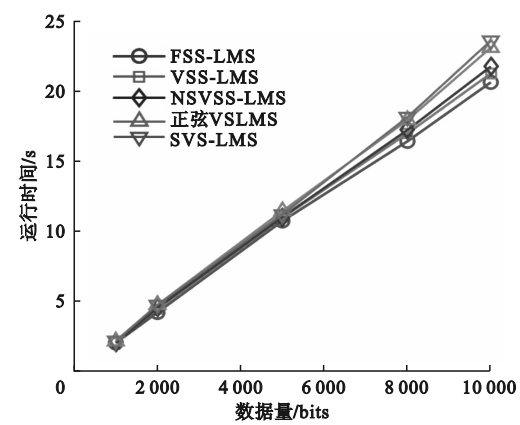


图 11　运行时间对比

Fig. 11　Comparison of running time

图 11 中,对于 10 000 bits 数据量,NSVSS-LMS 的计算时间比 SVS-LMS 快 1.83 s,但比固定步长 LMS 多 1.12 s,介于其他算法的中间。这主要源于算法复杂度的差异:相比 SVS-LMS 的指数运算,NSVSS-LMS 采用硬件优化的正弦计算,并利用历史步长平滑减少重复计算;而与固定步长 LMS 和 VSS-LMS 相比,其非线性步长调整和历史

步长加权增加了计算开销。NSVSS-LMS 在计算效率和性能之间取得了良好平衡。

4 结论

针对 VLC-PPM 系统中存在的多径干扰、背景光噪声等问题,本文提出了一种 NSVSS-LMS 自适应均衡算法,并通过理论分析证明了所提算法权重的收敛性。仿真结果表明,在存在多径效应和背景噪声的 VLC-PPM 系统中,NSVSS-LMS 算法能有效抑制信号波动,提升系统抗干扰能力。通过分析误差与步长在不同参数下的变化关系,以及误差、步长和权重随迭代次数的演变规律,验证了算法的自适应特性。与 SVS-LMS、VSS-LMS 及正弦 VSLMS 算法相比,NSVSS-LMS 算法在误码率、收敛速度和稳态误差等方面均表现出更优的性能,同时与计算开销之间取得了平衡。

参考文献(References):

[1] Sejan M A S, Rahman M H, Aziz M A, et al. A comprehensive survey on MIMO visible light communication: current research, machine learning and future trends[J]. Sensors, 2023, 23(2): 739.

[2] Raj R, Jaiswal S, Dixit A. Dimming-based modulation schemes for visible light communication: spectral analysis and ISI mitigation[J]. IEEE Open Journal of the Communications Society, 2021, 2: 1777 – 1798.

[3] 伍彩云,翁晶晶. 一种改进的自适应噪声抵消系统算法研究[J]. 沈阳理工大学学报,2022,41(3):1 – 7.
Wu C Y, Weng J J. Algorithm study on an improved adaptive noise cancellation system[J]. Transactions of Shenyang Ligong University, 2022, 41(3): 1 – 7. (in Chinese)

[4] Kwong R H, Johnston E W. A variable step size LMS algorithm[J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 1992, 40(7): 1633 – 1642.

[5] Bershad N J, Bermudez J C M, Tourneret J Y. An affine combination of two LMS adaptive filters: transient mean-square analysis[J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2008, 56(5): 1853 – 1864.

[6] Yu W, Cheng Q, Guan S H. Improved variable step-size least mean square algorithm based on Sigmoid function[J]. Procedia Computer Science, 2022, 199: 1466 – 1473.

[7] Li L, Zhao X S. Variable step-size LMS algorithm based on hyperbolic tangent function[J]. Circuits, Systems, and Signal Processing, 2023, 42(7): 4415 – 4431.

[8] Bin Saeed M O, Zerguine A. A variable step-size diffusion LMS algorithm with a quotient form[J]. EURASIP Journal on Advances in Signal Processing, 2020, 2020: 12.

[9] Kar A, Burra S, Shoba S, et al. Improved active noise cancellation using variable step-size combined fx-LMS algorithm[J]. Circuits, Systems, and Signal Processing, 2025, 44(1): 447 – 461.

[10] Singh S P, Pathak D, Kumar A, et al. An optimized fractional-order modified adaptive variable step-size LMS control approach to enhance DVR performance[J]. IEEE Transactions on Consumer Electronics, 2024, 70(1): 471 – 483.

[11] Araújo R S A, Tironi J C, Parreira W D, et al. Analysis of adaptive algorithms based on least mean square applied to hand tremor suppression control[J]. Applied Sciences, 2023, 13(5): 3199.

[12] Sanca H S, Costa F B, Souza F C Jr, et al. Robust three-Phase distribution system frequency measurement using a variable step-size LMS[J]. Electric Power Systems Research, 2021, 197: 107315.

[13] Patnaik A, Nanda S. The variable step-sizeLMS/F algorithm using nonparametric method for adaptive system identification[J]. International Journal of Adaptive Control and Signal Processing, 2020, 34(12): 1799 – 1811.

[14] Yazdanpanah H. Improved feature least mean square algorithm[J]. International Journal of Adaptive Control and Signal Processing, 2023, 37(2): 436 – 446.

[15] 罗小东,贾振红,王强. 一种新的变步长 LMS 自适应滤波算法[J]. 电子学报,2006,34(6):1123 – 1126.
Luo X D, Jia Z H, Wang Q. A new variable step size LMS adaptive filtering algorithm[J]. Acta Electronica Sinica, 2006, 34(6): 1123 – 1126. (in Chinese)

[16] 耿玉通. 室内 VLC 系统中信道均衡及调制解调技术研究[D]. 天津:天津大学,2020.

(责任编辑:和晓军)

(上接第 47 页)

[17] Han G Y, Han Y, Wang H, et al. Coordinated control of urban expressway integrating adjacent signalized intersections using adversarial network based reinforcement learning method[J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2024, 25(2): 1857 – 1871.

[18] 黄思萌,王梅,杨晨. 基于注意力机制的交通信号控制技术[J]. 信息技术与信息化,2023(3):93 – 96.
Huang S M, Wang M, Yang C. Traffic signal control technology based on attention mechanism[J]. Information Technology and Informatization, 2023(3): 93 – 96. (in Chinese)

[19] 于贺婷,刘思萌,文峰. 基于 CBAM 注意力机制的智能交通信号控制[J]. 沈阳理工大学学报,2024,43(5):34 – 40.
Yu H T, Liu S M, Wen F. Intelligent traffic control technology based on CB AM attention mechanism[J]. Journal of Shenyang Ligong University, 2024, 43(5): 34 – 40. (in Chinese)

(责任编辑:和晓军)