

基于反正切函数的可见光通信 LMS 均衡算法

张进玉, 王 翀, 杨 宏, 李国辉, 赵 瑶, 王 姣

(西安邮电大学 电子工程学院, 西安 710121)

摘要:针对室内可见光通信(VLC)系统存在的多径干扰问题,提出一种基于反正切函数的变步长自适应 IT-LMS 算法。分析室内 VLC 系统的信道模型,根据变步长最小均方(Least Mean Square, LMS)算法的步长因子调整原则,通过对反正切函数进行平移变换,建立了步长与误差的非线性关系,对改进的 LMS 算法的参数进行分析优化。仿真结果表明,该算法避免了指数运算,相对于传统算法提前 100 次迭代到达稳态,且稳定误差较小。

关键词:可见光通信; IT-LMS 算法; 反正切函数; 多径干扰; 均衡

中图分类号: TN929.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1002-5561(2018)05-0059-04

DOI: 10.13921/j.cnki.issn1002-5561.2018.05.015

LMS equalization algorithm based on inverse tangent in visible light communication

ZHANG Jinyu, WANG Chong, YANG Hong, LI Guohui, ZHAO Yao, WANG Jiao

(School of Electronic Engineering, Xi'an University of Posts and Telecommunications, Xi'an 710121, China)

Abstract: An variable step-size adaptive LMS algorithm based on inverse tangent is proposed for multipath interference problem in indoor visible light communication (VLC) system. The channel model of indoor VLC system is analyzed, and according to the principle of step factor adjustment for the variable step size LMS algorithm, the nonlinear relationship between step size and error is established by translating the inverse tangent function, and the parameters of the improved LMS algorithm are analyzed and optimized. The simulation results show that, the algorithm avoids exponential computation, 100 times iterations in advance to reaches the steady state compared with the traditional algorithms, and has lower steady-state error.

Key words: visible light communication; IT-LMS algorithm; inverse tangent function; multipath interference; equalization

0 引言

可见光通信(VLC)是一种新型的无线光通信技术,具有精度高、功耗低和抗电磁干扰等优点,而且可将照明与通信相结合使用^[1]。相对于其它无线通信方式, VLC 有着广泛的发展前景,但也有许多问题亟待解决^[2]。在室内 VLC 系统中,光信号通过不同的传输路径到达接收端,在传输过程中易产生多径干扰,影响通信质量^[3]。为了有效地消除这种干扰,提高系统的传输性能,在接收端采用均衡技术对信道进行补偿是一种有

收稿日期:2018-01-11。

基金项目:国家自然科学基金(批准号:51709228)资助。

作者简介:张进玉(1992-),男,硕士研究生,主要研究方向为光通信与光电检测方面。

效的方法^[4]。均衡技术通常分为两类:线性均衡和非线性均衡,其核心都为均衡算法,常见的有迫零算法、最小均方(Least Mean Square, LMS)算法、递归最小二乘(Recursive Least Square, RLS)算法及各种盲均衡算法等^[5]。目前,常用的是 LMS 算法和 RLS 算法,其中 LMS 算法因其算法简单、运算速度快而被广泛应用^[6],但传统的固定步长 LMS 算法无法同时保证收敛速度与稳定误差。为了克服这一缺陷,覃景繁等人提出了一种基于 Sigmoid 函数的变步长 SVS-LMS 算法^[7],该算法具有较好的收敛速度,但 Sigmoid 函数形式复杂,在稳定状态时步长变化较大,稳定性差。高鹰等人提出了一种改进 SVS-LMS 变步长 G-SVSLMS 算法^[8],这种

算法对 SVS-LMS 算法进行改进,但依旧存在指数运算、计算复杂度高等问题。在光通信系统中,由于传输介质的不同和光电器件的限制,传统的算法难以起到良好的均衡效果^[5],如 SVS-LMS 算法和 G-SVSLMS 算法存在指数运算,计算复杂度高;陈兰霞等人提出应用于光通信的基于正弦函数的 S-LMS 算法^[9],改变参数,当误差较大时不能使用较大步长,步长与误差变化不协调。

本文针对 VLC 系统的多径干扰,提出一种基于反正切函数的变步长 IT-LMS 算法。对反正切函数进行平移变换,建立新的步长与误差的非线性关系,以避免指数运算。

1 室内 VLC 系统中的信道模型

在室内 VLC 系统中,光传输链路有两种:视距链路和非视距链路。视距链路传输是指光信号直接从发送端到达接收端,无障碍物阻挡;非视距链路传输是指光信号在传输中会经过一次或多次反射后到达接收端。

视距链路下,光信号从发送端 P 直接到达接收端 R ,视距链路下的冲激响应^[10] $h(t)$ 为光信号从发送端到达接收端的光功率传递函数:

$$\begin{cases} h^{(0)}(t;P,R)=\frac{m+1}{2\pi}\cos^m(\varphi)d\Omega\times\text{rect}\left(\frac{\omega}{FOV}\right)\delta\left(t-\frac{d}{c}\right)\times \\ d\Omega=\frac{\cos(\omega)S}{d^2} \\ m=-\frac{1n2}{1n(\cos\varphi_{1/2})} \end{cases} \quad (1)$$

其中, $d\Omega$ 是指发送端 LED 到接收器的接收面所对应的立体角, S 为接收器的接收面积, m 为光的朗伯辐射模式数, $\varphi_{1/2}$ 表示光源的半功率角, φ 为 LED 光源的发射角, ω 为接收端的入射角, FOV 为视场角, d 为发送端 LED 到接收端的距离, c 为光速。

非视距链路下,光信号可经过一次或多次反射到达接收端,光信号经过一次反射的冲激响应^[10]为:

$$\begin{aligned} h^{(1)}(t;P,R) &= \sum_{i=1}^N h^{(0)}(t;P,\Phi_i) \otimes h^{(0)}(t;P,R) \\ &= \sum_{i=1}^N \frac{\rho_i \cos^m(\varphi) \cos(\omega)}{d^2} \times \text{rect}\left(\frac{2\omega}{\pi}\right) \\ &\quad h^{(0)}\left(t-\frac{d}{c};\{r,\hat{n},1\},R\right) \Delta S \end{aligned} \quad (2)$$

其中, N 为反射面个数, Φ_i 为第 i 个微反射面, ρ_i 为第 i 个微反射面的反射率, ΔS 为微反射面的面积。 r 为微反

射面位置向量, $\hat{n}$ 为微反射面的单位法向量。

室内 VLC 中,光信号可以直接到达接收端,也可以经过一次或多次反射到达接收端,产生多条传输路径。随着反射次数增加,非视距传输到达接收端的强度越来越弱。若仅考虑经过一次反射到达接收端的情况,信道的冲激响应^[10]可表示为:

$$h(t;P,R) \approx h^{(0)}(t;P,R) + h^{(1)}(t;P,R) \quad (3)$$

2 LMS 算法

2.1 传统 LMS 算法

为了消除多径信道的干扰,降低系统误码,可在接收端采用均衡器。均衡器原理是产生与信道相反的特性,从而消除多径引起的码间干扰。

假设室内 VLC 信道传递函数为 $H_c(z)$,接收端均衡器的传递函数为 $H_q(z)$ 。若要通过均衡器消除多径信道对传输的影响,则整个系统的传递函数^[5]应满足 $H(z)=H_c(z)H_q(z)=1$,即 $H_c(z)=H_q(z)^{-1}$ 。均衡器由横向滤波器组成,如何确定均衡器的

滤波器抽头权系数 $w(n)$ 为均衡器的核心研究内容,即均衡算法。LMS 算

法原理如图 1 所示。

图 1 LMS 算法原理图

自适应 LMS 算法的迭代公式^[5]为:

$$\begin{cases} y(n)=x(n)w^T(n) \\ e(n)=d(n)-y(n) \\ w(n+1)=w(n)+2\mu e(n)x(n) \end{cases} \quad (4)$$

其中, $x(n)=[x(n),x(n-1),\dots,x(n-N+1)]$ 是 n 时刻进入均衡器的信号向量, N 为均衡器的阶数; $y(n)$ 为均衡器的输出向量; $d(n)$ 为期望输出,是外部输入的确定信号; $w(n)$ 表为均衡器抽头权系数向量; μ 为 LMS 算法的步长因子,其决定了算法的收敛速度和稳态误差,且要求 $0<\mu<1/\lambda_{\max}$, $\lambda_{\max}$ 是 $x(n)$ 自相关矩阵的最大特征值^[11]; $e(n)$ 表示 $y(n)$ 与 $d(n)$ 的误差,根据 $e(n)$ 和 μ 来对均衡器的抽头权系数进行调整,逐渐达到稳定状态。

在传统的固定步长 LMS 算法中, μ 的值是常数,步长不变,不能解决收敛速度与稳定误差之间的矛盾。为此,人们提出了许多变步长 LMS 算法,这些算法通过不同的函数来改进步长,使得步长随误差非线性变化。其遵循的原则是:在收敛初期阶段,误差较大选用大步长,获得较快的收敛速度;当收敛趋近于平稳状态,误差较小或接近零,将步长调小,以减小稳定误差^[12]。

2.2 改进的 IT-LMS 算法

SVS-LMS 算法是经典的自适应变步长 LMS 算法,其根据 Sigmoid 函数来确立 $\mu(n)$ 和 $e(n)$ 的关系。反正切函数与 Sigmoid 函数具有相似的函数曲线,满足变步长 LMS 算法步长随误差的变化原则,基于反正切函数来改进 LMS 算法可避免 Sigmoid 函数中的指数运算,且在误差大时具有更大的步长,提高收敛速度。反正切函数曲线与 Sigmoid 函数曲线对比如图 2 所示。

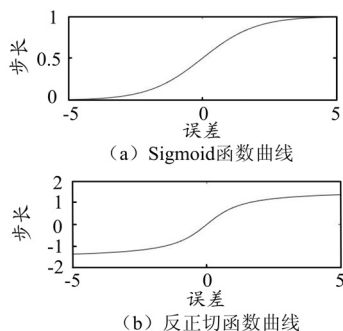


图 2 反正切函数曲线与 Sigmoid 函数曲线对比图

基于反正切函数,本文提出一种新的变步长 IT-LMS 算法。对反正切函数进行平移变换,使得误差趋于零时步长更小,以降低稳定误差。其步长因子 $\mu(n)$ 随误差 $e(n)$ 变化的函数表示为:

$$\mu(n) = \beta [\arctan(\alpha \times |e(n)|^\gamma - \xi) + \arctan(\xi)] \quad (5)$$

其中, β 为控制步长随误差变化的范围, α 决定着函数的形状,参数 γ 和 ξ 协调控制误差接近零时的步长及步长范围, $\gamma \geq 1$ 且 $\xi > 0$, 选择合适的参数有利于提高其均衡性能。

对式(5)中的参数进行逐一改变,可根据步长 $\mu(n)$ 与误差 $e(n)$ 函数曲线来设定参数。改变参数 β 、 α 、 γ 、 ξ 的步长和误差函数曲线,得到的不同参数的步长和误差函数曲线如图 3 所示。

由图 3 可知,改变任何一个参数都会使函数曲线形状发生改变。参数 β 主要控制步长的大小,根据实际调节大小, β 过大则可能使步长 $\mu(n) > \lambda_{\max}$, 起不到均衡效果,因此可把 β 设为 0.08。参数 α 改变函数曲线的整体形状,可将 α 设为 10,保证步长因子 $\mu(n)$ 随误差 $e(n)$ 变化有较高的灵敏度,使在 $e(n)$ 接近零处步长时 $\mu(n)$ 较小。参数 γ 调节曲线的形状和误差 $e(n)$ 趋于零时 $\mu(n)$ 的大小,由于 γ 是 $e(n)$ 的幂,不能太大,否则计算量较大,因而设定 γ 的值为 2。参数 ξ 的主要作用是调节误差 $e(n)$ 趋于零时 $\mu(n)$ 的大小,设定 ξ 为 1,在误差较大时步长较大,误差较小时步长较小。

3 仿真结果与分析

算法收敛速度、均方误差和跟踪能力是衡量算法性能的重要指标。为验证 IT-LMS 算法在室内 VLC 系

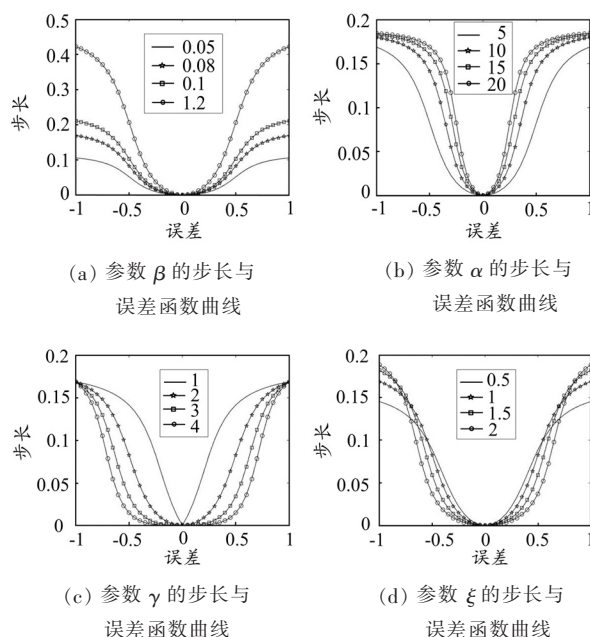


图 3 不同参数的步长和误差函数曲线

统中的性能,我们对上文提到的不同算法进行对比。

以一间房的室内 VLC 系统为例,房间的大小为 $5\text{m} \times 5\text{m} \times 3\text{m}$ 。发射端为 4 组光源,每组光源为 60×60 个 LED 组成,设定每个 LED 功率为 20mW。将房间地面中心设为原点,4 组光源坐标分别为 $(1.25, 1.25, 3)$ 、 $(-1.25, 1.25, 3)$ 、 $(1.25, -1.25, 3)$ 、 $(-1.25, -1.25, 3)$ 。发射半功率角为 70° , FOV 为 70° , 墙面反射率 ρ 为 0.8,接收端的坐标为 $(1.5, 1.5, 0.85)$,接收机的接收面积为 1cm^2 ,以下结果均为在

表 1 不同算法的参数设定

均衡算法	参数
固定步长 LMS	$\mu=0.01$
S-LMS	$\alpha=10, \beta=0.08$
SVS-LMS	$\alpha=10, \beta=0.08$
G-SVSLMS	$\alpha=10, \beta=0.08$
IT-LMS	$\alpha=10, \beta=0.08, \gamma=2, \xi=1$

此基础上仿真得到的。在同样环境下将新算法与已有的算法进行仿真,同一参数的大小要保持一致,不同算法的参数设定如表 1 所示。

仿真环境如下:在室内 VLC 环境下,两条路径,一条直达路径;一条延迟路径,延迟 2bit 数据。多径干扰因子 $p=0.1$;仿真中信噪比设置为 20dB;自适应均衡器阶数为 5,由于接收端对于初始数据未知,故设置初始未知系统的抽头权系数为 $w(n)=[0.1785, -0.5801, 0.3532, -0.6205, 0.6590]$, $w(n)$ 随接收到的数据自适应调节;迭代次数为 1000;进行 1000 次蒙特卡洛仿真,统计并求出均方误差,得到不均方误差与迭代次数的关系曲线如图 4 所示。

由图 4 可知,在室内 VLC 系统中,改进的 IT-LMS

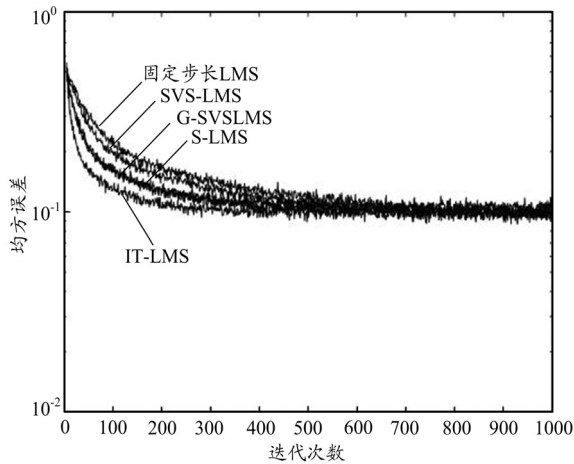


图4 均方误差与迭代次数的关系曲线

算法与原有的4种算法相比,在不增加稳定误差的情况下,取得了更快的收敛速度,约提前100次迭代到达稳态,故其在室内光通信多径情况下均衡性能更优。IT-LMS算法虽然提高了收敛速度,但稳定误差相对于其它算法没有明显改善。

在室内VLC系统中,发射端和接收端可能会发生相对位移,信道发生改变,需要算法有良好的跟踪能力,遇到突发状况能尽快趋于稳定。为验证算法跟踪性能,假设仿真环境及初始参数不变,在第500次迭代时信道发生突变,均衡器的抽头权系数跳变为 $w(n)=[0.5785, -0.3801, 0.6532, -0.2205, 0.8590]$,仿真得到的不同算法的跟踪能力对比曲线如图5所示。

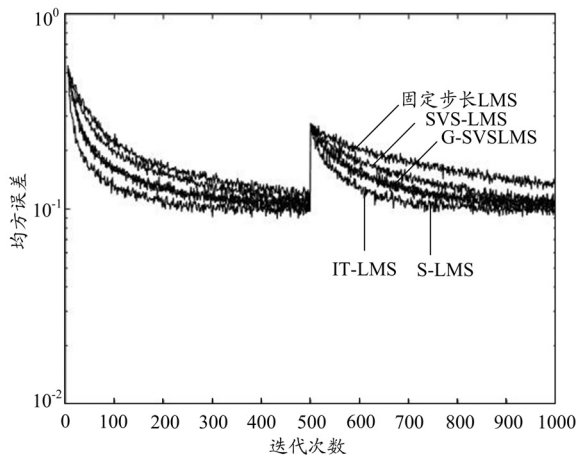


图5 不同算法的跟踪能力对比

由图5可知,在信道发生突变时,对比其它4种算法,IT-LMS算法能够快速收敛,以最快的速度恢复到稳态,因而有良好的跟踪性能,可以起到有效的均衡作用。

4 结束语

本文在室内VLC系统下,对传统LMS算法进行改进,提出了一种基于反正切函数的变步长LMS算法。通过对反正切函数进行平移变换,确定了新的步长因子和误差的关系。仿真结果显示:IT-LMS算法在室内VLC系统中能够获得更快的收敛速度、较低的稳定误差,可有效降低室内VLC系统中存在的多径干扰,且对信道突变状况具有更好的跟踪性能,提高了系统的通信性能,在实际通信中具有一定的应用价值。

参考文献:

- [1] FAN Bo, TIAN Hui, LIANG Shufei. Energy Efficient Illumination Optimization for Indoor Visible Light Communication [C]//Wireless Personal Multimedia Communications (WPMC), 2016 19th International Symposium on, November 14–16, 2016, Shenzhen, China. Piscataway: IEEE, 2017.
- [2] 宋小庆,魏有财,赵梓旭,等. 高速可见光通信硬件预均衡技术研究进展[J]. 激光与光电子学进展, 2017,54(8):26–36.
- [3] 张妥,梁忠诚,刘学明,等. 基于MIMO的可见光通信中的信道均衡[J]. 光通信技术, 2015,39(6):57–59.
- [4] 迟楠,卢星宇,王灿,等. 基于LED的高速可见光通信[J]. 中国激光, 2017,44(3):7–18.
- [5] 宋紫毓,彭盛亮,赵睿. 可见光通信中一种基于分段误差函数的变步长LMS算法[J]. 信号处理, 2017,33(4):551–557.
- [6] CAO Ping, CHEN Jian, YOU Xiaodi. An Initialization Scheme for Blind Equalization in VLC Systems [C]// Optical Communications and Networks (ICOCN), 2017 16th International Conference on, August 7–10, 2017, Wuzhen, China. Piscataway: IEEE, 2017.
- [7] 覃景繁,欧阳景正. 一种新的变步长LMS自适应滤波算法[J]. 数据采集与处理, 1997(3):171–174.
- [8] 高鹰,谢胜利. 一种变步长LMS自适应滤波算法及分析[J]. 电子学报, 2001,29(8):1094–1097.
- [9] 陈兰霞,王辉. 基于LMS算法的可见光通信自适应均衡技术[J]. 光通信研究, 2016,(3):65–68.
- [10] TANG Wei, ZHANG Junyi, CHEN Beibei. Analysis of Indoor VLC Positioning System with Multiple Reflections [C]//Optical Communications and Networks (ICOCN), 2017 16th International Conference on, August 7–10, 2017, Wuzhen, China. Piscataway: IEEE, 2017.
- [11] 张红梅,韩万刚. 一种新的变步长LMS自适应滤波算法研究及其应用[J]. 仪器仪表学报, 2015,36(8):1822–1830.
- [12] 还秋云,邱晓晖,刘晓飞. 引用范数的双曲正切函数变步长LMS算法[J]. 信号处理, 2014,30(1):93–99.