

基于改进 k -means 算法的可见光通信非线性补偿技术

张 慧, 黄绪发, 郭心悦, 王镜阳, 姚茂新, 马仁伟

(上海理工大学 光电信息与计算机工程学院, 上海 200093)

摘要: 可见光通信系统中, 正交频分复用技术的高峰均功率比会加大发射信号产生非线性失真的概率。为了降低系统的误码率, 提出了一种改进的 k 均值 (k -means) 算法的非线性补偿技术。该算法考虑了信号的传输特性, 运用 Dijkstra 算法优化了 k -means 算法中初始点的选择, 能够准确地找到接收信号星座图的聚类中心, 避免了传统 k -means 算法在选择初始聚类点时陷入局部最优解。仿真结果表明, 相比于传统的 k -means 算法, 改进的 k -means 算法能更准确地找到非线性失真后信号的星座点位置, 因此能有效地解决可见光通信系统的非线性问题, 降低了系统的误码率。

关键词: 可见光通信; 改进 k -means 算法; Dijkstra; 误码率

中图分类号: TN 929.1; TN 312.8

文献标志码: A

Nonlinear compensation technology based on improved k -means algorithm for visible light communication

ZHANG Hui, HUANG Xufa, GUO Xinyue, WANG Jingyang, YAO Maoxin, MA Renwei

(School of Optical-Electrical and Computer Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China)

Abstract: The peak-to-average power ratio of orthogonal frequency division multiplexing increased the probability of nonlinear signal generation in visible light communication systems. In order to reduce the bit error rate, an improved k -means algorithm of the nonlinear compensation technology was proposed. The transmission characteristics of signals was considered, and the selection of initial points in k -means algorithm was optimized via Dijkstra. The cluster center of the received signal constellation was found, and the traditional k -means algorithm from falling into the local optimal solution was avoided. The simulation results show that this method is more accurate than the traditional algorithm in finding the constellation position of the signal after nonlinear distortion. Hence, it can effectively solve the nonlinear problem of visible light communication and decrease the bit error rate.

Keywords: visible light communication; improved k -means algorithm; Dijkstra; bit error rate

可见光通信(visible light communication, VLC)是一种利用可见光波段的光作为信息载体,不需要光纤等有线信道的传输介质而直接在空气中传输光信号的通信方式^[1]。在VLC系统中,由于发光二极管(light-emitting diode, LED)的频率响应具有指数衰减的特性,导致由LED、无线光信道和光电二极管(photo-diode, PD)三者组成的等效信道具有频率选择性衰落的特点,当通信速率很高时,会产生严重的码间串扰。正交频分复用(orthogonal frequency division multiplexing, OFDM)技术是VLC系统常用的调制技术,可有效克服信道的频率选择性衰落,因此,特别适用于VLC系统^[2]。然而,在VLC系统中,信号在发送和接收时会受到LED的电压-电流(V - I)特性曲线的非线性影响,而且OFDM的高峰均功率比会增加信号产生非线性失真的概率,从而降低系统的性能^[3]。国内外许多学者对VLC系统的非线性补偿问题进行了研究,Elgala等^[4]测量了LED的前向电压和前向电流,并且在无记忆的多项式模型下评估了LED的 V - I 特性曲线的反向特性,在LED设备前面增加一个反向非线性模块来补偿非线性失真,但是这种方式意味着必须在发送设备中额外增加物理设备来实现预失真,而且该预失真技术忽视了LED非线性的记忆问题。Qian等^[5]提出了一种基于多项式的记忆模型,该模型可以有效地处理LED非线性的记忆问题,但是必须在多项式的阶数较高的情况下才能有效地降低LED的非线性,而阶数较高则需要占用大量的计算资源。后失真技术相比于预失真技术不需要额外的物理设备。Wang等^[6]提出了一种基于Volterra级数的非线性后失真补偿模型,该模型的补偿精度很高,但是由于Volterra级数固有的复杂表达式,在相同抽头数的情况下,Volterra均衡器的计算复杂度会高于传统的线性均衡器,如果限制该级数的阶数,则该模型的非线性补偿精度会下降。Wang等^[7]提出了一种由线性均衡器、基于Volterra级数的非线性均衡器和决策导向的最小均方均衡器组成的混合均衡器,缓解了VLC系统的非线性失真。王玉峰等^[8]通过在发射端采用预失真技术和模拟预均衡技术,在接收端使用数字后均衡技术,进一步优化了VLC系统的性能。

2017年,Lu等^[9]首次提出将 k -means算法用于无载波调制的光通信系统的非线性补偿,该算法通过若干次迭代之后能准确地聚类出经过非线性

失真后的星座点位置,并根据得到的新星座图进行解调,从而有效地补偿了系统的非线性问题。Ma等^[10]提出在Nyquist PAM-4可见光通信系统中利用 k -means聚类算法,在超过80 cm的自由空间中实现了400 Mbit/s的数据传输。但是在上述两个研究中,作者都采用了经典的 k -means算法,而该算法在系统处于较严重的非线性情况下,即信号的聚类中心偏离了原有的区域时,会陷入局部最优解,即无法获得正确的接收星座点位置,因此也无法获得预期的性能改善。

本文提出改进的 k -means算法,该算法以发送端标准星座图点为出发点,采用Dijkstra算法分别找到距离标准星座图点最近的一个点,用这些找到的点作为 k -means算法的初始化聚类点,可以避免传统 k -means算法在可见光通信系统中陷入局部最优解的问题。仿真结果表明,采用改进的 k -means算法可以有效地改善系统的误码率性能。

1 系统模型

可见光的传播分为视距(line-of-sight, LOS)传播和非视距(non-line-of-sight, NLOS)传播。由于可见光超高频率的高路径损耗,使得室内可见光通信的信道测量具有很强的稀疏传播特性^[11-13]。与传统的室内无线信道相比,室内可见光的传播主要依赖于视线范围路径,从文献[14]中可以得知,在NLOS传输情况下,其反射链路的最强信号强度比LOS链路的最弱信号强度低至少7 dB,所以本文中仅考虑LOS传输情况,建立如图1所示的单发单收的可见光通信传输模型。

在图1系统中,随机产生的二进制比特序列经过正交振幅调制(quadrature amplitude modulation, QAM)后,进行直流偏置光OFDM(DC-biased optical OFDM, DCO-OFDM)调制^[15],即频域信号在频谱上呈Hermitian对称,再经过快速傅里叶反变换,以保证输出信号为实信号。然后,信号经过数模转换并加上直流偏置后驱动LED模块。在接收端,PD将光信号转换为电信号。经过模数转换和DCO-OFDM解调后,利用改进的 k -means算法对接收信号进行星座点聚类,以获得经过非线性失真传输后的新的星座图,并进行QAM解调。

图2给出了LED的 V - I 特性曲线图,可以发现当电压大于截断电压、电流达到饱和之前,电压与电流的函数关系在饱和区域内呈现非线性,

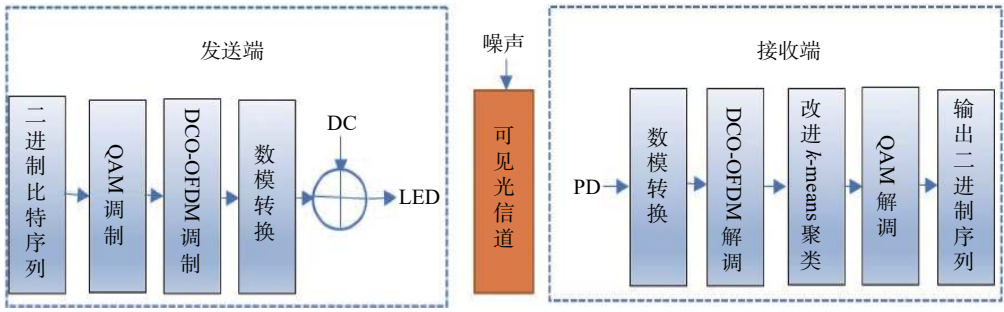


图1 系统模型

Fig.1 System model

这将使信号在伏安特性转换的过程中产生非线性失真。在接收端对接收到的信号进行解调时将会产生较大的误码率, 严重影响系统的性能。

$-\frac{\ln 2}{\ln(\cos \Phi_{\frac{1}{2}})}$, 其中 $\Phi_{\frac{1}{2}}$ 为半功率角。当 $\Phi_{\frac{1}{2}}=60^\circ$ 时, $k=1$, 此时发送端通常称为朗伯发送端; 当 $\Phi_{\frac{1}{2}}=15^\circ$ 时, $k=20$, 此时适用于典型的定向发送端。

收发信号的频域关系表达式可表示为

$$Y = HX + N \quad (3)$$

式中: X 为发送信号; Y 为经过信道传输后的接收信号; H 为信道矩阵; N 为加性高斯噪声。

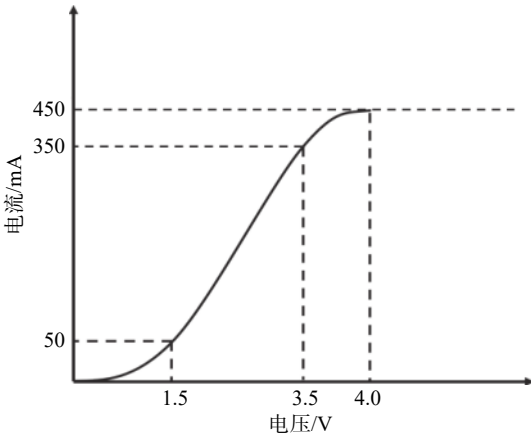
接收端经过 DCO-OFDM 解调后, 对信号进行基于最小二乘法估计准则的频域均衡, 可表示为

$$\hat{X} = H^{-1}Y \quad (4)$$

式中, $\hat{X}$ 为经过信道均衡后的信号。然后用改进的 k -means 算法对均衡后的信号值进行聚类, 将聚类中心作为更新的星座映射点。相比原始的星座映射点, 更新后的星座点包含了非线性的影响, 根据新的星座图进行信号解调, 能有效降低可见光通信系统的非线性影响。

2 聚类算法原理

系统的非线性主要是由于外围的星座点能量过高导致星座点发生旋转和幅值的衰减, 使得系统产生非线性失真, 进而导致系统的误码率升高。若在接收端仍然按照发送端的星座图进行解调, 就会导致误码率性能的下降^[4]。借助 k -means 算法, 可根据接收信号聚类出经过非线性传输后产生失真的星座点, 并根据新的星座图进行信号解调, 这样能大大改善系统的误码率性能。然而, 在非线性效应比较严重的情况下, 现有的 k -means 算法易受初始聚类点的影响, 使得聚类的结果陷入局部最优解, 不能正确聚类出准确的星座图。而改进的 k -means 算法可以有效地解决这个问题, 改进的思路是: 从每个标准的星座图点出发, 如图 3 中红色点所示, 利用 Dijkstra 算法, 来

图2 LED的 V - I 特性曲线Fig.2 V - I characteristic curve of LED

根据文献 [16], LED 的 V - I 特性曲线的非线性函数表达式为

$$f(V_i) = \begin{cases} \frac{V_i}{\left(1 + \left(\frac{V_i}{I}\right)^{2m}\right)^{\frac{1}{2m}}}, & V_i \geq V_0 \\ 0, & V_i < V_0 \end{cases} \quad (1)$$

式中: V_i 是 LED 的输入电压; V_0 是 LED 的截断电压; m 为控制 LED 非线性程度的参数; I 为电流值。

由文献 [17] 可知, 信道增益 h 可以表示为

$$h = \begin{cases} \frac{(k+1)A}{2\pi d} \cos^k(\varphi) \cos(\phi), & 0 < \varphi \leq \Psi_{\frac{1}{2}} \\ 0, & \varphi > \Psi_{\frac{1}{2}} \end{cases} \quad (2)$$

式中: k 为朗伯辐射阶数; A 为接收端的检测面积; d 为 LED 与 PD 之间的距离; φ 为 PD 与 LED 之间的接收角; ϕ 为 PD 与 LED 之间的发射角; $\Psi_{\frac{1}{2}}$ 为视场半角。式中 k 的表达式为 $k =$

寻找距离每个标准的星座图点最近的信号点，如箭头所示的蓝色点，将这些信号点作为改进的 k -means 聚类的新初始点，并将这些点集记做 $C(x_1, x_2, x_3, \cdots)$ 。通过这种方法可以有效地避免 k -means 算法陷入局部最优解，因为该算法考虑了系统信号的传输特征，即每簇信号一定是距离原调制中心最近的。

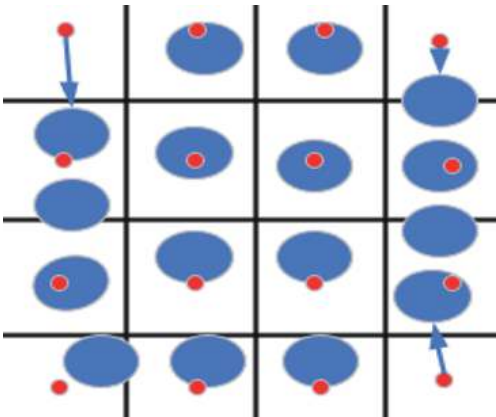


图3 算法原理图
Fig.3 Algorithm schematic diagram

改进的 k -means 算法步骤如下：

步骤 1 以标准星座图点为中心，用 Dijkstra 算法找出距离每个星座图点最近的点，把这些点记作点集 $C(x_1, x_2, x_3, \cdots)$ ；

步骤 2 用点集 $C(x_1, x_2, x_3, \cdots)$ 中的点作为 k -means 算法的初始化聚类点，将信号点集记作 $S(y_1, y_2, y_3, \cdots)$ ；

步骤 3 计算出所有点集 S 距离点集 C 的点与点之间的距离，将每个信号点分给距离它最近的聚类点，从而形成点簇记做 $D(z_1, z_2, z_3, \cdots)$ ；

步骤 4 用步骤 3 中得到的 $D(z_1, z_2, z_3, \cdots)$ ，求出每个点簇中坐标的算法平均值，将其值作为新的聚类中心点集 C ；

步骤 5 计算新旧聚类中心之间的偏移程度，重复步骤 3 和步骤 4，直到聚类中心不再移动。 k -means 算法的迭代过程结束，求得信号的聚类中心。

3 仿真试验和结果分析

根据文献 [9]，在仿真中模拟了可见光通信系统的非线性效应，结合可见光通信非线性的特点，假设经过非线性传输后调制信号出现了如图 4 所示的非线性失真。

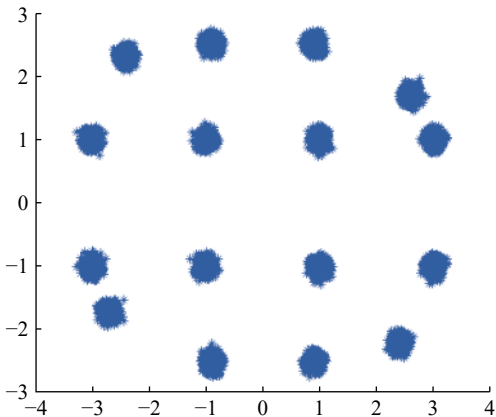


图4 非线性失真
Fig.4 Nonlinear distortion

仿真条件如下：发送端采用 16QAM 调制，然后进行 DCO-OFDM 调制，OFDM 调制子载波数为 256 个，循环前缀是子载波数的 1/8。发送信号的非线性由式 (1) 模拟，信道由式 (2) 给出的信道模型进行仿真，其中： $k=1$ ； $A=1\text{ cm}^2$ ； $d=1.8\text{ m}$ ； $\varphi_1=45^\circ$ ； $\phi=60^\circ$ 。信道噪声假定为高斯白噪声，通过设置噪声方差得到不同的接收端信噪比。从文献 [18] 可知，一般的光通信的传输信噪比在 20~25 dB 之间，本文在仿真中采用了这个信噪比区间。仿真结果如图 5 所示，星座图聚类结果如图 6 所示。

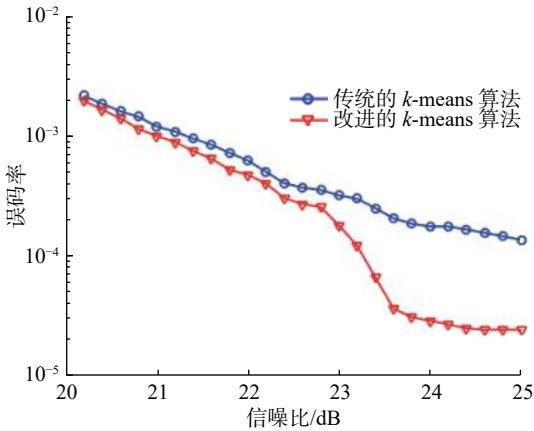
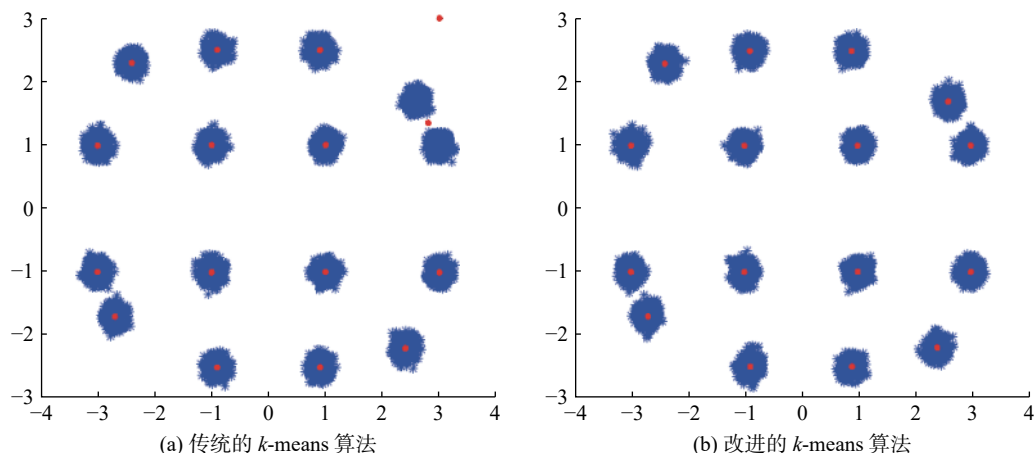


图5 误码率曲线
Fig.5 Curve of bit error rate

从图 5 可以看出，基于改进的 k -means 算法的系统误码率性能比传统的 k -means 算法有些许改善。从图 6 中两者的星座图聚类结果分析可知，当某个区域的信号发生较大的非线性偏移后，采用传统的 k -means 算法由于初始化聚类点选择不合理，使得聚类结果陷入局部最优解，所以无法正确聚类出信号的聚类中心，见图 6(a) 右上角。

图6 两种 k -means 算法的聚类结果Fig.6 Clustering results of two types of k -means algorithms

而采用改进的 k -means 算法能很好地处理这种情况, 使得算法能够准确地找到聚类中心, 从而准确地进行解调。此外, 改进的 k -means 算法由于初始的聚类点具有很强的导向性, 使得其收敛性能也优于传统算法。在实际的仿真过程中, 当信号的符号数为 160 时, 由于采用的是随机噪声, 每次的仿真结果并不总是相同, 因此取多次仿真结果的平均值。传统的算法迭代平均 8 次, 改进的算法迭代平均 5 次。传统的 k -means 算法会受初始聚类点的影响而使聚类的结果陷入局部最优解, 而改进的 k -means 算法对初始聚类点的选择具有全局性和导向性, 算法的迭代次数少, 所以改进的 k -means 算法比传统的 k -means 算法更优。

4 结 论

针对可见光通信的非线性问题, 提出了改进的 k -means 算法。该算法优化了传统的 k -means 算法对初始聚类点的选择, 根据光信号的传输特点, 利用 Dijkstra 算法的最短路径选点策略, 可以避免传统 k -means 算法在选择初始聚类点时陷入局部最优解。改进的 k -means 算法能够准确地找到接收信号星座图的聚类中心, 从而降低了可见光通信的误码率。与传统的 k -means 算法相比, 改进的 k -means 算法能更好地处理可见光通信系统产生的严重非线性失真情况, 且迭代次数明显减少。

参考文献:

[1] 陈泉润, 张涛, 郑伟波, 等. 基于白光 LED 可见光通信的研究现状及应用前景 [J]. 半导体光电, 2016, 37(4): 455–460, 476.

[2] 郭心悦, 李鑫. 基于 MIMO-OFDM 调制的室内 VLC 自适应传输方案研究 [J]. 光学技术, 2018, 44(1): 35–40.

[3] 王灿, 周盈君, 迟楠. 可见光通信中抗非线性方法的比较研究 [J]. 中国照明电器, 2017(7): 9–15, 26.

[4] ELGALA H, MESLEH R, HAAS H. Non-linearity effects and predistortion in optical OFDM wireless transmission using LEDs[J]. *International Journal of Ultra Wideband Communications and Systems*, 2009, 1(2): 143–150.

[5] QIAN H, YAO S J, CAI S Z, et al. Adaptive postdistortion for nonlinear LEDs in visible light communications[J]. *IEEE Photonics Journal*, 2014, 6(4): 7901508.

[6] WANG Y G, TAO L, HUANG X X, et al. Enhanced performance of a high-speed WDM CAP64 VLC system employing Volterra series-based nonlinear equalizer[J]. *IEEE Photonics Journal*, 2015, 7(3): 7901907.

[7] WANG Y G, TAO L, HUANG X X, et al. 8-Gb/s RGBY LED-based WDM VLC system employing high-order CAP modulation and hybrid post equalizer[J]. *IEEE Photonics Journal*, 2015, 7(6): 7904507.

[8] 王玉峰, 曹凡, 邓震宇, 等. 可见光通信中 LED 非线性补偿和带宽拓展技术 [J]. 光电工程, 2020, 47(3): 190671.

[9] LU X Y, WANG K H, QIAO L, et al. Nonlinear compensation of multi-CAP VLC system employing clustering algorithm based perception decision[J]. *IEEE Photonics Journal*, 2017, 9(5): 7906509.

[10] MA J, HE J, SHI J, et al. Nonlinear compensation based on k -means clustering algorithm for Nyquist PAM-4 VLC system[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2019, 31(12): 935–938.

[11] WEINSTEIN S, EBERT P. Data transmission by frequency-division multiplexing using the discrete Fourier transform[J]. *IEEE transactions on Communication Technology*, 1971, 19(5): 628–634.