

文章编号 1004-924X(2013)01-0167-07

基于相频空间稀疏性快速估计发光二极管灯点参数

宋喜佳^{1,2*}, 刘维亚¹, 陈 伟¹, 郑喜凤¹

(1. 中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033;
2. 中国科学院大学, 北京 100039)

摘要:为了得到每个发光二极管(LED)灯点对某些目标位置的贡献量,以便获得、记录或重现特定的 LED 照明模式,本文对控制 LED 灯点的脉宽调制波形(PWM)的参数(振幅、频率偏移量、相位延迟)估计问题进行了研究。首先,将频率偏移-相位延迟空间离散化成网状格点空间,根据测量到的数据在格点空间具有稀疏性的特点建立了稀疏模型。然后,基于该稀疏模型,利用正交匹配追踪算法(OMP)用很少的采样点快速地重建出未知参数。最后,采用逐级迭代细分网格技术优化稀疏模型以便有效地抑制估计误差。实验结果表明,本文方法仅使用相当于奈奎斯特采样定理要求的 27.5%的采样点即可准确地重建未知参数,从而快速估计 LED 灯点的参数。在理想情况下,本文算法的均方根误差小于 0.68%。另外,不同噪声条件下的对比实验说明该算法在信噪比大于 20 db 时鲁棒性较好。

关键词:发光二极管;稀疏模型;正交匹配追踪;网状格点;迭代细化

中图分类号: TM923.5; TN312.8 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20132101.0167

Estimation of parameters for LED points based on sparsity of frequency offset-phase delay space

SONG Xi-jia^{1,2*}, LIU Wei-ya¹, CHEN Wei¹, ZHENG Xi-feng¹

(1. *Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China;*
2. *University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China*)
* *Corresponding author, E-mail: songxijia2009@gmail.com*

Abstract: To obtain every single LED's contribution when they illuminate the target locations and to acquire, record or reappear some specific light patterns, this paper explores how to estimate the parameters of Pulse Width Modulation (PWM). These parameters are amplitude, frequency offset and phase delay, and they are generally used to control the LED points. Firstly, the frequency offset-phase delay space is dispersed into reticulated grid spaces, and a sparse model is established based on the measured data with sparsity characteristics in the grid space. Then, on the basis of the sparse model, very few samples are utilized to reconstruct the unknown parameters fast by means of Orthogonal Matching Pursuit (OMP) algorithm. Finally, an iterative refinement grid technique is introduced to optimize the sparse model so as to suppress the estimation error effectively. Experimental results indicate that the method presented in this paper can reconstruct the unknown parameters fast by using

收稿日期:2012-09-13;修订日期:2012-11-01.

基金项目:吉林省重大科技成果转化项目(No. 09ZDH006)

only 27.5% samples that of the traditional Nyquist sampling theorem. Simultaneously, this algorithm is found robustness when Signal to Noise Ratio(SNR) is higher than 20 db after lots of contrast tests in different noise conditions.

Key words: Light Emitting Diode(LED); sparse model; Orthogonal Matching Pursuit(OMP); reticulated grid; iterative refinement

1 引言

发光二极管(LED)具有使用寿命长,稳定性好,亮度高,可控性强等优点,已在显示领域得到迅猛发展^[1-3]。然而,随着半导体发光技术的不断进步以及“绿色照明”概念的日益深入人心,LED正受到越来越多的关注。与传统光源相比,LED光源除具有节能环保、亮度高,色彩丰富等优点之外,最重要的是组成LED光源的每个LED灯点(在显示领域,每个LED灯点被称作1个像素)都可以被单独控制,因此可以在采用LED光源照明的空间内的指定位置渲染出各种智能、动态的美学效果^[4-5](在本文中,每种美学效果被称为LED光源的一种“照明模式”或“照明样式”)。通常情况下,一个LED光源是由至少数百只LED灯点组成的,因此每种照明模式都是大量LED灯点共同作用的结果。为了获得某种照明模式,或者希望将已经在场所A得到的一种照明模式重现于另一场所B中,需要实时有效地估计出每个LED灯点对形成各种照明模式的独立“贡献”量。

为了有效辨别不同的LED灯点,一种最直接的做法是在每个LED灯点发出的光信号中嵌入一个唯一的标识码(ID),检测装置(如光敏二极管)通过ID来识别不同灯点,并记录相应的亮度值,这种做法最早见于LED通信领域的相关文献^[6-10]。然而,这种嵌入ID的做法一般都是基于正交频分复用(Orthogonal Frequency Multiplexing,OFDM)或分离复频变调(Discrete Multi-tone Modulation,DMT)原理实现的,不能与目前工业民用领域广泛采用的脉宽调制(PWM)技术兼容。为了节省研发成本,缩短开发周期,复用原有的软硬件资源,科研人员研发出一种结合码分复用和脉宽调制的CTDMA-PWM新技术^[11-12],在保持原有PWM驱动电路不变的情况下可以估计各LED灯点亮度的“贡献”值。它的缺点是要求LED灯点之间,以及LED灯点与测量设备之间都要保

持严格同步,这对测量设备,应用场合以及操作人员都提出了较高的要求,也限制了该方法的应用。因此,文献^[13-15]基于频分复用(FDM)原理,提出了一种在工程上更为实用的FDM-PWM技术,该技术使用的滤波器组简单,而且还消除了复杂的同步性限制。

本文在FDM-PWM技术的基础上,利用目前热门的稀疏表示技术,提出一种易于工程实现的新算法,仅需要很少的采样数据就可以快速有效地估计出每个LED灯点的未知参数。

2 FDM-PWM 原理及稀疏表示

2.1 FDM-PWM 原理

为了克服传统模拟调光引起的色偏现象,达到精细控制LED灰阶的目的,目前在LED显示及照明领域普遍采用PWM调光的方法^[16]。由于LED的发光强度与流过自身的电流成正比,PWM通过周期性地改变驱动LED发光电流的脉冲宽度(占空比 p_i)的方法来调节流过LED的平均电流,从而实现PWM调光的目的。频分复用技术是通信领域应用最为广泛的技术之一,它将用于传输信道的总带宽划分成若干子频带,在每个子频带内传输一路信号,同时在相邻的子频带内设置足够大的保护频带来防止信号间的相互干扰。

实施FDM-PWM技术时,首先选定一个频率范围,在这个范围内给第 i 个LED灯点分配一个与众不同的电流导通频率 f_i ,同时利用检测装置检测安装设计好的滤波器组,通过频率来识别并记录不同灯点的亮度值 a_i 。图1为FDM-PWM技术示意图。

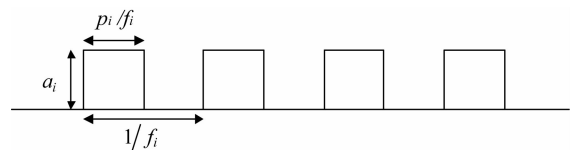


图1 FDM-PWM技术示意图

Fig. 1 Schematic diagram of FDM-PWM

2.2 稀疏表示

稀疏表示理论是目前医疗以及工程应用领域的一个研究热点。其基本原理是如果信号在某组基或冗余字典下具有稀疏性,那么采样设备就可以用远低于传统奈奎斯特采样间隔的频率对信号进行欠采样,并通过相关的优化理论还原出可靠的原始信号。由于所需的数据点极少,基于稀疏表示的相关应用一般都具有速度快,对数据采集设备、压缩存储设备要求低等优点。

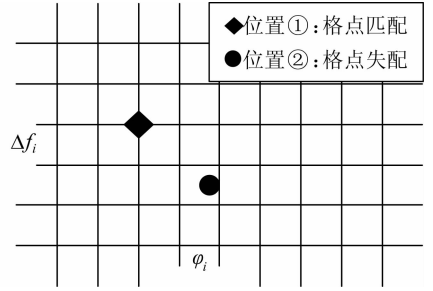


图2 离散化的频偏-相延空间

Fig. 2 Discretized frequency offset-phase delay space

3 基于稀疏模型的参数估计

3.1 建立稀疏模型

本文关心的是在形成某种照明模式时,组成LED光源的各LED灯点的亮度“贡献”量,因此,第*i*个灯点的亮度 a_i 是需要估计的最主要参数。理想情况下,该灯点的频率 f_i 是已知的,但是由于实际控制系统中采用的物理晶振存在不精确度和欠稳定性等因素,会不可避免地出现频率偏差。文献[17]指出即使很小的频率偏差 Δf_i 有时也会对亮度产生不可忽略的影响,因此本文也将频偏 Δf_i 作为估计量。同理,本文将相位延迟 φ_i 作为第3个估计量。因此,控制器驱动第*i*个LED灯点的PWM波形的解析形式为:

$$\begin{cases} y_i(t) = a_i \sum_{m=0}^{\infty} 2b_{i,m} \cos(2\pi m(f_i + \Delta f_i)t + m\varphi_i) \\ b_{i,m} = \sin(\pi m p_i) / (\pi m) \end{cases}, \quad (1)$$

这里 m 为谐波次数, $\{a_i, \Delta f_i, \varphi_i\}$ 为要估计的未知参数。

尽管频率偏移量 Δf_i 和相位延迟 φ_i 有无限种可能取值,但是如果所有可能的取值范围内,将 Δf_i 和 φ_i 划分成二维离散的网状格点空间,如图2所示,则检测装置的一次测量结果只对应于格点空间的一个点,即测量结果是1阶稀疏的。如果测量结果位于图2中的位置①处,称为格点匹配,是一种较为理想的情况。对于更为一般的格点失配情况(即位于图2中位置②处),为了有效地抑制估计误差,本文将稀疏格点空间进行局部迭代细分作为本方法的补充。

假设在划分好的格点空间中, Δf_i 共有 F 种取

值可能, φ_i 共有 P 种取值可能,则 $(\Delta f_i, \varphi_i)$ 共有 $L = F \times P$ 种可能。 L 一般取值较大,但是在所有取值点中只有一个点对应于正确的测量结果。故可以构造一个 L 维向量 s_i ,其各分量的取值原则为:

- (1)当第 l 个格点的取值 $(\Delta f_i^l, \varphi_i^l)$ 对应于正确的测量结果时, $s_i(l) = a_i$;
- (2)其他情况, $s_i(l) = 0$ 。

可见,这样构造出的向量 s_i 是1阶稀疏的。接下来,令:

$$\varphi_i^l = \sum_{m=0}^{\infty} 2b_{i,m} \cos(2\pi m(f_i + \Delta f_i^l)t + m\varphi_i^l). \quad (2)$$

当 $l \in [0, L]$ 时,基于公式(2)构造列向量如下:

$$\boldsymbol{\varphi}_i = [\varphi_i^1(n), \varphi_i^2(n), \dots, \varphi_i^L(n)]^T. \quad (3)$$

因此测量结果可以通过公式(4)表示:

$$y_i(n) = \boldsymbol{\varphi}_i(n)^T \mathbf{s}_i. \quad (4)$$

考虑实际的噪声影响,并假设噪声为加性高斯白噪声,则公式(4)演变为公式(5):

$$y_i(n) = \boldsymbol{\varphi}_i(n)^T \mathbf{s}_i + \mathbf{e}_i(n). \quad (5)$$

如果在一个测量周期内共采样 N (这里 $N \ll L$)个数据点,则 $\{y_i(n)\}_{n=1}^N$ 与 $\{\mathbf{e}_i(n)\}_{n=1}^N$ 分别构成一个 N 维的列向量, $\{\varphi_i(n)^T\}_{n=1}^N$ 构成一个 $N \times L$ 的矩阵。用公式分别表示如下:

$$\mathbf{y}_i = [y_i(1), y_i(2), \dots, y_i(N)]^T, \quad (6)$$

$$\mathbf{e}_i = [e_i(1), e_i(2), \dots, e_i(N)]^T, \quad (7)$$

$$\boldsymbol{\varphi}_i = [\varphi_i(1), \varphi_i(2), \dots, \varphi_i(N)]^T. \quad (8)$$

因此,最后的稀疏模型为:

$$\mathbf{y}_i = \boldsymbol{\varphi}_i \mathbf{s}_i + \mathbf{e}_i. \quad (9)$$

至此,参数估计问题已经转变为从测量结果 \mathbf{y}_i 重建1阶稀疏向量 \mathbf{s}_i 的逆反问题。

3.2 模型分析及恢复算法

由条件 $N \ll L$ 可知,公式(9)在理论上有无穷多解。当已知 s_i 是 1 阶稀疏向量时,公式(9)与公式(10)是等价的:

$$\begin{cases} \min_s \|s\|_0 = 1 \\ s. t. y_i = \varphi_i s_i + e_i \end{cases} \quad (10)$$

目前能够准确可靠地重建 s_i 的主要解法有以匹配追踪(Matching Pursuit, MP)和正交匹配追踪(Orthogonal Matching Pursuit, OMP)为代表的贪婪算法,以迭代阈值收缩为代表的门限算法和凸化压缩感知框架下的基追踪算法等^[18-26]。由于门限算法对数据噪声十分敏感,解不具有连续性,且无法保证收敛到全局最优,而基追踪算法需要进行大范围搜索,时间代价过高,无法满足实时快速估计的要求,故本文采用的是性能表现较为均衡的正交匹配追踪算法。

3.3 迭代细分策略

本文采用均方根误差(RMSE)作为衡量算法参数估计准确性的标准。在格点匹配的情况下,即使考虑噪声影响, RMSE 的量级一般稳定在 10^{-3} 左右,如果 RMSE 出现了较大值,一般是由于格点划分过于“稀疏”,导致了格点失配。

作为稀疏模型的补充,采用了迭代细分格点的策略,以 Δ_{f_i} 的迭代细分过程为例,算法描述如下:

- (1) 迭代计数变量为 $r=0$, 预设需要迭代的次数为 R , 并选择可信的初始搜索范围;
- (2) 将 Δ_{f_i} 进行等距划分, 并将其所有可能取值记为集合 $\tilde{\Delta}_{f_i}^{(r)}$;
- (3) 用正交匹配追踪算法在集合 $\tilde{\Delta}_{f_i}^{(r)}$ 中找到匹配的频率偏移值 $\hat{\Delta}_{f_i,r}$;
- (4) 令 $r=r+1$;
- (5) 如果 $r \geq R$, 则算法结束; 否则更新搜索范围为 $[\hat{\Delta}_{f_i,r} - \xi^{(r)}, \hat{\Delta}_{f_i,r} + \xi^{(r)}]$, 算法跳转到步骤(2), 循环执行。

对相位延迟 φ_i 的迭代细分过程与上面类似, 需要特别说明的是, 由于正交匹配追踪算法是对频率偏移量 Δ_{f_i} 和相位延迟 φ_i 同时估计的, 所以使用统一的迭代计数变量 r 。图 3 为一个 3 级迭代过程的示意图, 图 4 是算法的程序流程图。

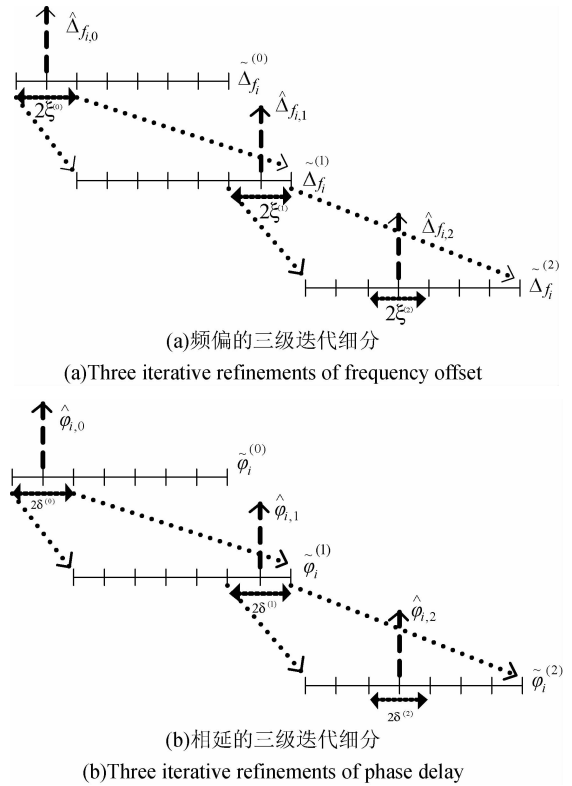


图 3 频偏和相延的三级迭代细分过程

Fig. 3 Three iterative refinements of frequency offset and phase delay space

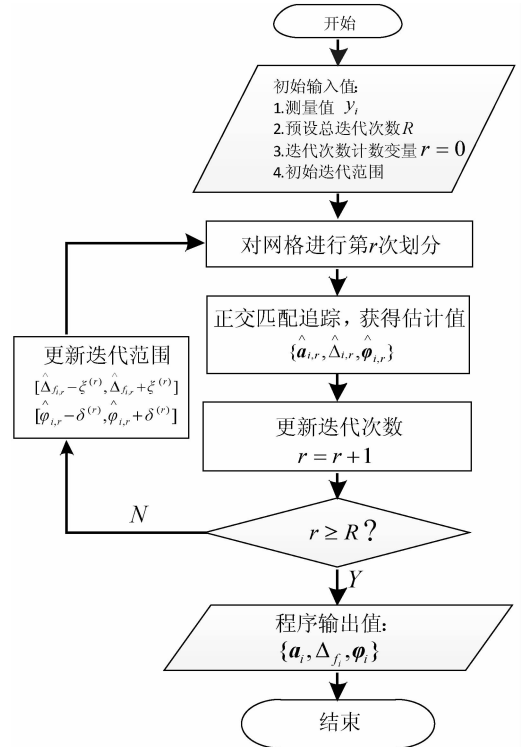


图 4 算法流程图

Fig. 4 Flow chart of algorithm

4 实验结果与分析

4.1 格点匹配的情况

实验中用到的测量数据由解析公式(1)计算得到。假设理想频率 $f_i = 4$ kHz, 占空比 $p_i = 0.6$, 未知参数的正确值分别为: $a_i = 1, \Delta f_i = 320$ Hz, $\varphi_i = 0.1$ ms。将频偏空间离散化为 26 个可能取值, 将相延空间离散化为 21 个可能取值, 则共有 $L = 546$ 个可能取值。以 10^{-5} s 为采样间隔采样 $N = 150$ 个数据点, 当信噪比 $\text{SNR} = 20$ db 时参数的重建情况如图 5 所示。

图 5 说明本文算法使用了极少的采样点数目

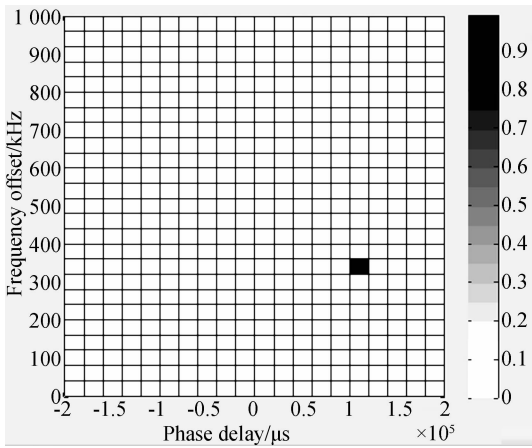


图 5 信噪比为 20db 时格点匹配参数的重建情况
Fig. 5 Reconstructed parameters on grid when SNR is 20 db

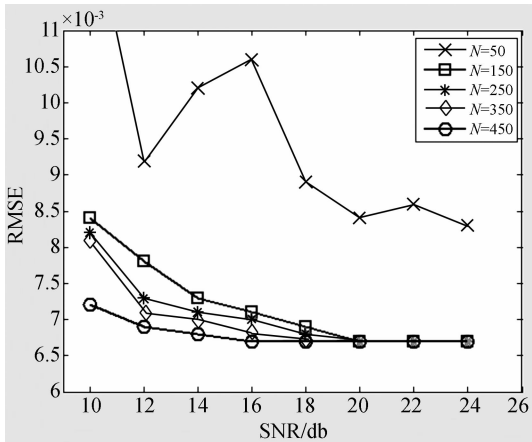


图 6 不同采样点时均方根误差随信噪比的变化情况
Fig. 6 RMSE as a function of SNR for different number of samples

(约为传统奈奎斯特采样定理要求的采样点总数的 27.5%) 高效地重建出了正确的参数值。图 6 则定量考察了在使用不同数量采样点的情况下, 均方根误差随信噪比的变化情况。当采样数 $N \geq 150$ 且信噪比 $\text{SNR} \geq 20$ db 时, 算法有较好的鲁棒性, 均值误差小于 0.68%。但是随着采样点总数的继续减少(如当采样点 $N = 50$ 时)算法的稳定性会逐渐恶化。

4.2 格点失配的情况

考察更一般的格点失配情况。假设 $N = 150$, 正确的参数估计值分别为: $a_i = 1, \Delta f_i = 323$ Hz, $\varphi_i = 0.1004$ ms, 参数的重建情况及能量集中情况分别如图 7 和图 8 所示。可见, 此时算法仍然可以准确地重建估计参数, 但是会出现能量分散, 导致均方根误差增大。

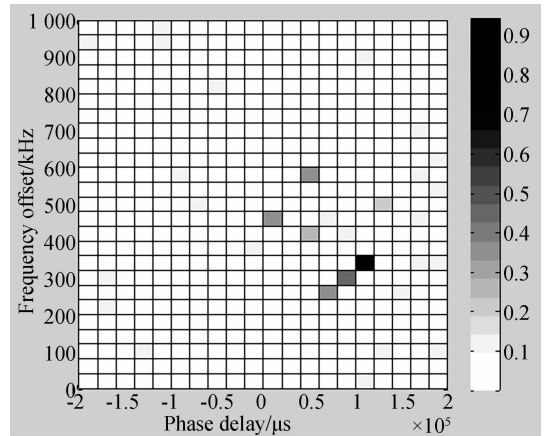


图 7 信噪比为 20 db 时格点失配参数的重建情况
Fig. 7 Reconstructed parameters off grid when SNR is 20 db

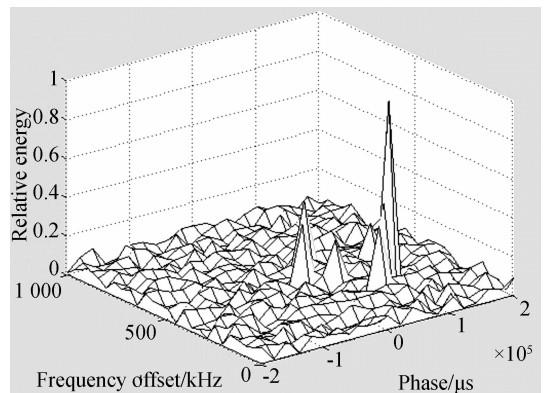


图 8 信噪比为 20 db 时格点失配参数的能量分布
Fig. 8 Energy distribution of reconstructed parameters off grid when SNR is 20 db

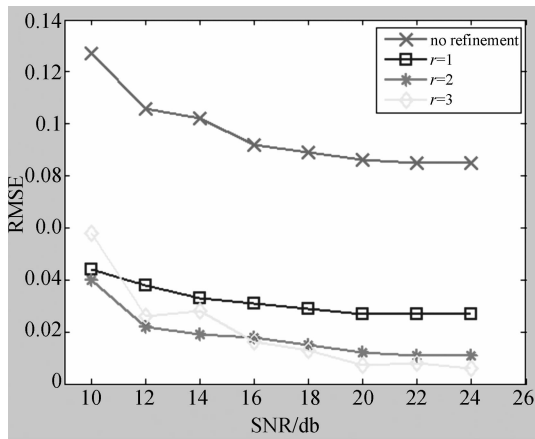


图 9 不同迭代次数时均方根误差随信噪比的变化情况
Fig. 9 RMSE as a function of SNR for different number of refinements

图 9 展示了采用迭代细化方法后均方根误差

的改善情况,可见该补充方法能有效地抑制较大的均方根误差(从 10%下降到 1%左右),但是由于能量分散的影响,迭代次数过多会导致算法不收敛,一般取 $R \leq 3$ 。

5 结 论

本文在稀疏理论的基础上建立了稀疏模型,以仅相当于奈奎斯特采样定理要求的 27.5%的少量数据点就准确重建出未知参数,从而达到快速估计 LED 灯点参数的目的。在理想情况下,本文算法的均方根误差小于 0.68%,在格点失配的情况下,通过将网格进行不多于 3 次的迭代细化,可以将均方根误差降低到 1%以下。另外,在信噪比大于 20 db 时算法的鲁棒性较好。

参考文献:

- [1] 常锋,孙志远,王瑞光,等. LED 显示图像的非均匀度校正改进方法[J]. 光学 精密工程, 2011,19(4): 929-937.
CHANG F, SUN ZH Y, WANG R G, *et al.*. Improvement of nonuniformity correction of LED display images [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2011, 19 (4):929-937. (in Chinese)
- [2] 张鑫,王瑞光,陈宇,等. LED 显示屏相机采集影像渐晕的修正[J]. 光学 精密工程, 2010,18(11): 2332-2338.
ZHANG X, WANG R G, CHEN Y, *et al.*. Calibration of image vignetting acquired by camera on LED display panel [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2010,18(11):2332-2338. (in Chinese)
- [3] 岳明晶,陈宇,郑喜凤,等. 大屏幕显示屏灰度等级检测技术研究[J]. 液晶与显示, 2010, 25(3): 407-411.
YUE M J, CHEN Y, ZHENG X F, *et al.*. Scale measurement technique of LED display panel [J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2010,25(3):407-411. (in Chinese)
- [4] SCHUBERT E F, KIM J K. Solid-state light sources getting smart [J]. *Science*, 2005, 308 (5726):1274-1278.
- [5] MORENO I, SUN C C. Modeling the radiation pattern of LEDs [J]. *Opt. Express*, 2008, 16 (3): 1808-1819.
- [6] PANG G, KWAN T, LIU H, *et al.*. LED wireless. Industry applications magazine [J]. *IEEE*, 2002, 8 (1):21-28.
- [7] KOMINE T, NAKAGAWA M. Fundamental analysis for visible-light communication system using LED lights [J]. *Ieee T Consum Electr*, 2004, 50 (1):100-107.
- [8] GRINER U N, ARNON S. Multiuser diffuse indoor wireless infrared communication using equalized synchronous CDMA [J]. *Ieee T Commun*, 2006,54(9):1654-1662.
- [9] ELGALA H, MESLEH R, HAAS H. Indoor broadcasting via white LEDs and OFDM [J]. *Ieee T Consum. Electr.*, 2009,55(3):1127-1134.
- [10] AFGANI M Z, HAAS H, ELGALA H, *et al.*. Visible light communication using OFDM [J]. 2006 *2nd International Conference on Testbeds and Research Infrastructures for the Development of Networks & Communities*, 2006:80-85.
- [11] LINNARTZ J P, FERI L, YANG H, *et al.*. Code division-based sensing of illumination contributions in solid-state lighting systems [J]. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 2009, 57 (10): 3984-3998.
- [12] LINNARTZ JPMG, FERI L, YANG H, *et al.*. Communications and sensing of illumination contributions in a power LED lighting system [J]. *IEEE Communication Society*, 2008, 5396-5400.
- [13] YANG H, SCHENK T C W, BERGMANS J W M, *et al.*. Parameter estimation of multiple pulse trains for illumination sensing [J]. *IEEE*, 2010, 3122-3125.
- [14] YANG H M, SCHENK T C W, BERGMANS J W M, *et al.*. Enhanced illumination sensing using multiple harmonics for LED lighting systems [J].

- IEEE Transactions on Signal Processing*, 2010, 58(11):5508-5522.
- [15] YANG H M, BERGMANS J W M, SCHENK T C W. Illumination sensing in LED lighting systems based on frequency-division multiplexing [J]. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 2009, 57(11):4269-4281.
- [16] 代国定,李卫敏,徐洋,等.一种新颖的脉宽调制平均分割调光算法的设计与实现[J].*光电子·激光*, 2009, (11):1434-1437.
DAI G D, LI W M, XU Y, *et al.*. Design and realization of a novel average separated PWM dimming [J]. *Journal of Optoelectronics · Laser*, 2009, (11):1434-1437. (in Chinese)
- [17] 成萍,赵家群,姜义成,等.稀疏信号表示中的幅度偏差及消除方法[J].*哈尔滨工业大学学报*, 2008, (9):1506-1508.
CHENG P, ZHAO J Q, JIANG Y C, *et al.*. Amplitude bias and its elimination in sparse signal representation [J]. *Journal of Harbin Institute of Technology*, 2008, (9):1506-1508. (in Chinese)
- [18] 石光明,刘丹华,高大化,等.压缩感知理论及其研究进展[J].*电子学报*, 2009, (5):1070-1081.
SHI G M, LIU D H, GAO D H, *et al.*. Advances in theory and application of compressed sensing [J]. *Acta Electronica Sinica*, 2009, (5):1070-1081. (in Chinese)
- [19] 焦李成,杨淑媛,刘芳,等.压缩感知回顾与展望[J].*电子学报*, 2011, (7):1651-1662.
JIAO L C, YANG SH Y, LIU F, *et al.*. Development and prospect of compressive sensing [J]. 2011, (7):1651-1662. (in Chinese)
- [20] MALLAT S G, ZHANG Z F. Matching pursuits with time-frequency dictionaries [J]. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 1993, 41(12):3397-3415.
- [21] TROPP J A, GILBERT A C. Signal recovery from random measurements via orthogonal matching pursuit [J]. *IEEE Transaction Inform Theory*, 2007, 53(12):4655-4666.
- [22] FORNASIER M, RAUHUT H. Iterative thresholding algorithms [J]. *Appl. Comput Harmon A*, 2008, 25(2):187-208.
- [23] GOGINENI S, NEHORAI A. Compressed illumination sensing [J]. *Ieee Signal Processing Letters*, 2011, 18(10):587-590.
- [24] 汪岚.智能LED信息显示屏控制系统设计与应用[J].*液晶与显示*, 2011, 26(5):655-659.
WANG L. Design and application of intelligent LED information display screen [J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2011, 26(5):655-659. (in Chinese)
- [25] 郝冬晶,钱可元,罗毅.大尺寸LED背光源网点的设计及优化[J].*液晶与显示*, 2011, 26(5):598-603.
HAO D J, QIAN K Y, LUO Y. Design and optimization of dot-pattern for large scale LED backlight unit [J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2011, 26(5):598-603. (in Chinese)
- [26] 于洪春,邓意成,等.面积约束下的最优阈值法分割LED像素点阵[J].*液晶与显示*, 2012, 27(1):653-657.
YU H C, DENG Y C, *et al.*. Use the optimal threshold method with area constraint to segment LED pixel matrix [J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2012, 27(1):653-657. (in Chinese)

作者简介:



宋喜佳(1985—),男,黑龙江木兰人,博士研究生,2008年于西安邮电学院获得学士学位,主要从事LED大屏幕光色参数采集,机器视觉,嵌入式系统开发的研究。E-mail: songxijia2009@gmail.com



刘维亚(1952—),男,吉林长春人,研究员,博士生导师,主要从事数据通信,信号检测方面的研究。E-mail: liuweiya@qq.com



陈伟(1984—),男,四川广安人,硕士研究生,2007年于吉林大学获得学士学位,2010年于中科院长春光学精密机械与物理研究所获得硕士学位,主要从事嵌入式系统、自动控制、机器视觉等方面的研究。E-mail: beelike@126.com



郑喜凤(1965—),女,吉林长春人,博士,研究员,博士生导师,1988年于吉林大学获得学士学位,1991年、2000年于中科院长春光学精密机械与物理研究所分别获得硕士、博士学位,主要从事数字信号处理等方面的研究。E-mail: llcfdx@126.com