

文章编号 1004-924X(2004)02-0216-05

CCD 像素响应不均匀性的校正方法

陈迎娟,张之江,张智强
(上海大学 通信与信息工程学院,上海 200072)

摘要:从理论上分析了 CCD 暗电流和光电响应不均匀性产生的原因,根据光电响应模型提出了 CCD 像素光电响应不均匀性的校正方法,给出了像素光电响应不均匀性的校正系数用以计算校正量;并针对实际情况中干扰光的影响,提出了采用变波长去除干扰方法,对校正方法进行了修正;最后通过仿真对算法进行了验证。结果表明,能量和噪声的不同对算法的影响不大,校正量是随着光信号能量分布变化的,标定过程不受信号的影响,具有自适应性。该校正方法可以有效地减小 CCD 像素光电响应不均匀性带来的图像噪声。

关键词:电荷耦合器件;不均匀性;暗电流;光电响应;校正算法

中图分类号: TN386.5 **文献标识码:** A

Correction of CCD pixel nonuniformity

CHEN Ying-juan, ZHANG Zhi-jiang, ZHANG Zhi-qiang

(School of Communication and Information Engineering,
Shanghai University, Shanghai 200072, China)

Abstract: The causes for CCD dark current and photoelectric response are theoretically analyzed. An algorithm based on the photoelectric signal is proposed for correction of CCD photoelectric response nonuniformity, and a coefficient is given for calculation of electronic quantity to be corrected as well. The interference is eliminated by varying the wavelength according to the effect of actual interference light. Simulation results indicate that the algorithm proposed can be used to effectively reduce the image noise resulting from CCD pixel photoelectric response nonuniformity.

Key words: charge-coupled device; nonuniformity; dark current; photoelectric response; correction algorithm

1 引言

自 1970 年美国贝尔实验室研制成功第 1 只电荷耦合器件(CCD)以来,依靠已经成熟的 MOS 集成电路工艺,CCD 技术得以迅速发展。作为一种新型光电转换器,CCD 图像传感器现已广泛应用于电视摄像、图像采集、目标跟踪以及工业测量等领域。但是,在某些应用领域,特别是在高精度的测量系统中,CCD 像素不均匀性会给测量结果

带来较大的误差。为了提高测量精度,必须对像素响应不均匀进行校正。

目前已有针对微光 CCD 器件图像的校正算法^[1-2]以及红外聚焦平面的不均匀性的校正算法^[3]。其原理是根据输出数据的特性对不均匀性进行校正。本文根据基于光源能量分布的 CCD 器件光电响应模型,提出了一种采用变波长消除干扰、具有自适应特性的像素响应不均匀性校正方法。

收稿日期:2003-12-14;修订日期:2004-01-10.

基金项目:国家自然科学基金资助项目(No. 50005012)

2 CCD 像素响应不均匀性

造成不均匀性的原因是多种多样的,硅材料本身的质量以及 CCD 的生产工艺造成的不均匀性都是无法改变的,如沟道掺杂浓度不均匀、表面态密度分布不均匀以及栅氧化物厚度不同造成的开启电压不同,感光单元有效面积不同,从而引入了固定模式噪声,表现为暗电流及光电响应的不均匀性。

2.1 CCD 暗电流的不均匀性

暗电流的大小与光照强度无关,而与 CCD 像素的本征材料、大小、温度等有关。CCD 暗电流的主要成分有:(1)耗尽区内通过复合-产生中心的热产生;(2)通过表面态的热产生;(3)通过本征跃迁过程的热产生;(4)在耗尽区边界的扩散电流。由文献[4]可知,在室温下,边界扩散电流可以忽略,以体内、表面复合中心贡献为主,本征产生贡献比它们小一个数量级以上。由此,CCD 输出端一个像素产生的暗电流为:

$$J_d = J_d + J_s = \frac{1}{2} qn_i x_{D0} v_{th} N_t + \frac{1}{2} q s_0 n_i \quad (1)$$

其中, q 为单位电荷量; n_i 为本征载流子浓度; x_D 为耗尽层宽度; s_0 是对空穴或电子的俘获截面; v_{th} 为电子热运动平均速度; N_t 是复合中心浓度; $s_0 = s v_{th} D_s^* / KT$ 为表面复合速度; s 是表面态的俘获截面; D_s^* 是有效表面态密度; K 是波尔兹曼常数; T 是绝对温度。

由于受到加工工艺的限制,每个像素的材料、面积大小各不相同,导致了 CCD 暗电流的不均匀性。

2.2 CCD 像素光电响应不均匀性

设投射到 CCD 光敏面上的光信号能量分布函数为 $f(x, y, x, y)$ 。其中 t_0 表示时间 t 间隔内投射到 CCD 光敏面上的光信号总能量; $f(x, y, x, y)$ 表示信号能量的分布规律。 x, y 为分布函数中代表位置特征点的位置参数(如峰点、重心位置等)。假设分布不随时间变化,且光源为一准单色光源,则在第 (i, j) 像素上,光信号所产生的光电子数为^[5]:

$$N_{s(i,j)} = \frac{t_0}{h} \int_{x_i-\frac{d}{2}}^{x_i+\frac{d}{2}} \int_{y_j-\frac{d}{2}}^{y_j+\frac{d}{2}} f(x, y, x, y) dx dy \quad (2)$$

其中, η_{ij} 为像素的量子效率; h 为普朗克常数; ν 为光子的频率; d 为像素的边长。假设像素是正方形的, x_i, y_i 为第 (i, j) 个像素几何中心位置坐标。

具有较长吸收长度的光子(波长小于 100 nm 或大于 60 μm),量子效率主要决定于感光区域的厚度;中间波长的光子具有相对短的吸收长度,这个光谱区内的量子效率主要决定于感光区域上层材料的透明度、反射系数和表面状态^[6]。每个像素的材料不同,导致了透明度、反射系数、表面状态以及感光区域厚度的不同,所以每个像素的量子效率互不相同,相同光信号在不同像素产生的光电子数不同,即导致了 CCD 光电响应的不均匀性。

3 光电响应不均匀性的校正

在制冷条件下暗电流的值一般很小,可以降低到大小不足一个量化单位;响应率的不均匀性则比较明显,但随温度的变化不大。在常温和低温条件下,CCD 的不均匀性主要表现为光电响应的不均匀性^[7],所以只需对光电响应的不均匀性进行校正。

根据式(2)可知,不同像素间 $N_{s(i,j)}$ 值的差异是光电响应不均匀性的根源,可以得到各个像素的量子效率:

$$\eta_{ij} = \frac{h N_{s(i,j)}}{\int_{x_i-\frac{d}{2}}^{x_i+\frac{d}{2}} \int_{y_j-\frac{d}{2}}^{y_j+\frac{d}{2}} f(x, y, x, y) dx dy} \quad (3)$$

平均量子效率为:

$$\bar{\eta} = \frac{1}{M \times N} \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N \eta_{ij} \quad (4)$$

选择其作为基准像素的量子效率,其中 M, N 分别为行、列的像素个数。

那么定义校正系数:

$$k_{ij} = \left(\frac{\eta_{ij}}{\bar{\eta}} \right)^{-1} \quad (5)$$

反映了像素 (i, j) 相对于基准像素的光电响应的不一致性。

校正量为:

$$N_{(i,j)} = k_{ij} \int_{x_i-\frac{d}{2}}^{x_i+\frac{d}{2}} \int_{y_j-\frac{d}{2}}^{y_j+\frac{d}{2}} f(x, y, x, y) dx dy / h, \quad (6)$$

校正以后,像素光电子数实际应为:

$$N_{ij} = N_{s(i,j)} - N_{(i,j)}, \quad (7)$$

由式(6)可以看出,光电响应不均匀性(校正量)与信号能量成正比,这一结论也可以通过实验来验证。如图 1 所示,此结果为 10 次结果的平均值。

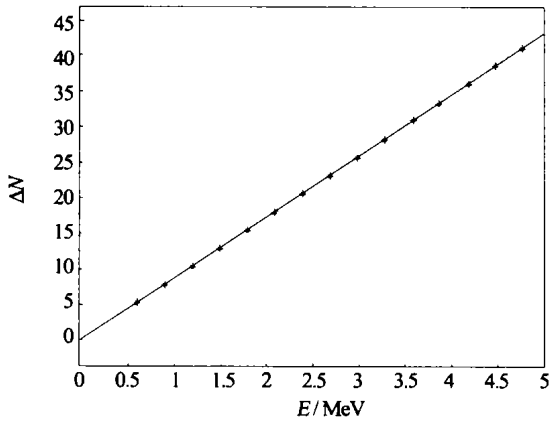


图 1 像素不均匀性与信号能量之间的函数关系

Fig.1 Pixel nonuniformity as a function of signal energy

上述模型仅仅是在理想情况下得到的,但在实际应用中,应考虑到标定中会有很多未知波长的杂光射入。假设 CCD 像素对未知波长的光响应为 W ,则像素产生的光电子数为:

$$N_{r(i,j)} = N_{s(i,j)} + W, \quad (8)$$

由于 W 为恒定值,所以可通过改变已知光的波长(频率)改变 $N_{s(i,j)}$ (假设波长变化不大(1 nm),量子效率的变化可以忽略不计),即:

$$N_{s_1(i,j)} = \frac{0.ij}{h_1} \int_{x_i-\frac{d}{2}}^{x_i+\frac{d}{2}} \int_{y_j-\frac{d}{2}}^{y_j+\frac{d}{2}} f(x, y, x, y) dx dy, \quad (9)$$

$$N_{s_2(i,j)} = \frac{0.ij}{h_2} \int_{x_i-\frac{d}{2}}^{x_i+\frac{d}{2}} \int_{y_j-\frac{d}{2}}^{y_j+\frac{d}{2}} f(x, y, x, y) dx dy, \quad (10)$$

那么像素对所有光的响应相应地变为:

$$N_{r_1(i,j)} = N_{s_1(i,j)} + W, \quad (11)$$

$$N_{r_2(i,j)} = N_{s_2(i,j)} + W, \quad (12)$$

以上两式相减,并将(9)、(10)两式代入,得到量子效率为:

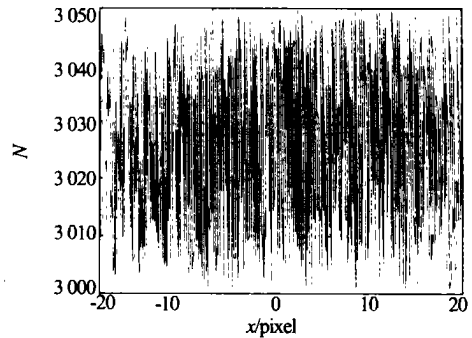
$$ij = \frac{h_1 \int_{x_i-\frac{d}{2}}^{x_i+\frac{d}{2}} \int_{y_j-\frac{d}{2}}^{y_j+\frac{d}{2}} f(x, y, x, y) dx dy - N_{r_1(i,j)}}{h_2 \int_{x_i-\frac{d}{2}}^{x_i+\frac{d}{2}} \int_{y_j-\frac{d}{2}}^{y_j+\frac{d}{2}} f(x, y, x, y) dx dy - N_{r_2(i,j)}}. \quad (13)$$

以后的校正方法如前所述。

4 实验结果

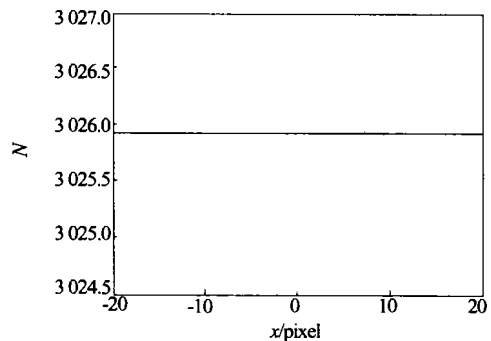
4.1 算法验证

对于面阵 CCD 像素不均匀性校正可以看作是线阵 CCD 校正的多次重复过程。一维情况即线阵 CCD 像素不均匀性的校正如下所述:假设像素个数为 1 000,灰度级为 4 096,光信号分布为均匀分布,利用上述方法得到校正系数。对于同一 CCD 光电响应特性是不变的,可以利用均匀分布光信号得到的不均匀性去校正其他分布的光信号。仿真结果如图 2 所示:



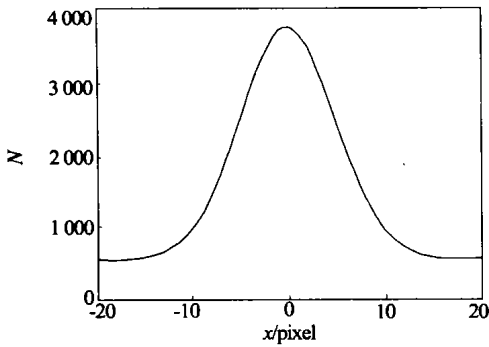
(a) 均匀分布

(a) Uniform distribution

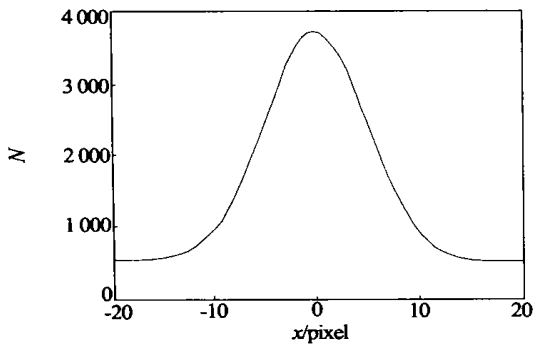


(b) 校正结果

(b) Corrected result



(c) 高斯分布
(c) Gaussian distribution



(d) 校正结果
(d) Corrected result

图 2 两种光源分布及其校正结果

Fig. 2 Two optical sources and corrected results

设校正前光源分布函数 f 为均匀分布,以不均匀性分布为一随机分布进行校正,幅值为 50,如图 2(a)所示,校正后不均匀性为 4.5475×10^{-13} ,由于变化较小,图 2(b)中校正结果显示为一直线。图 2(c)、(d)分别是 f 为高斯分布校正前后的结果,高斯分布校正前的不均匀性分布与均匀分布的不均匀性相同。

4.2 标定中不均匀性大小对算法的影响

表 1(a)给出了光源的不同能量,相同不均匀性(50)情况下的校正结果,每组数据重复 10 次。表 1(b)给出了相同能量(4.8 MeV),不同不均匀性情况下的校正结果,每组数据重复 10 次。

表 1(a) 光源能量不同对算法的影响

Tab. 1(a) Effects of different optical energy					
能量 (MeV)	0.6	1.2	2.4	3.6	4.8
平均量子效率 (%)	68.49	66.88	66.05	65.78	65.58
校正结果	1.1369×10^{-13}	2.2737×10^{-13}	3.8654×10^{-13}	5.0022×10^{-13}	7.6991×10^{-13}

表 1(b) 不均匀性大小对算法的影响

Tab. 1(b) Effects of pixel nonuniformity					
不均匀性	10	20	50	80	100
平均量子效率 (%)	65.25	65.33	65.58	65.83	65.98
校正结果	7.2486×10^{-13}	6.7983×10^{-13}	7.6991×10^{-13}	7.2486×10^{-13}	6.7983×10^{-13}

由以上 2 表可见,能量和噪声的不同对于算法的影响不大,即校正量是随着光信号能量分布而变化的,此标定过程不受信号分布的影响,具有自适应性。

5 结 论

(1)提出了基于 CCD 光电响应模型的不均匀性校正方法,使之具有随能量变化而变化的自适应标定特性。该方法可以有效地减小 CCD 像素光电响应不均匀性带来的图像噪声,但是当信号能量较大时,校正比较困难,存在一部分无法校正的固定模式噪声。

(2)提出了采用变波长消除干扰方法,用于消除未知波长的干扰光对光电响应输出的影响。

参考文献:

[1] 张丕壮,路宏年.面阵 CCD 微光像感器图像的校正[J].兵工学报,2000,21(4):361-364.
ZHANG P ZH, LU H N. The correction of image photographed by CCD image sensors[J]. *Acta Armamentarii*, 2000, 21(4):361-364. (in Chinese)

[2] 李仰军,马俊婷,郝晓剑.微光 CCD 相机的噪声分析与处理[J].应用基础与工程科学学报,2001,9(2-3):277-282.
LI Y J, MA J T, Hao X J. Noise analysis and process of low light-level CCD camera[J]. *Journal of Basic Science and Engineering*, 2001, 9(2-3):277-282.

- [3] SCHULZ M, CALDWELL L. Nonuniformity correction and correctability of infrared focal plane arrays[J]. *Infrared Physics & Technology*, 1995, 36:763-777.
- [4] 王以铭. 电荷耦合器件原理及应用[M]. 北京:科学出版社,1987.
WANG YM. *The theory and application of charge-coupled device* [M]. Beijing: Science Press, 1987. (in Chinese)
- [5] 袁峰. CCD 亚像素分辨技术及其在自准直中应用的研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学博士学位论文,1994.
YUAN F. *Study on the CCD sub-pixel resolution technique and its application to auto-collimation* [D]. Harbin: Doctor Thesis of Harbin Institute of Technology, 1994. (in Chinese)
- [6] JANESICK J R, TOM E, STEWART C, et al. Scientific charge-coupled devices[J]. *Optical Engineering*, 1987, 26(8):692-714.
- [7] 吴裕斌,曹丹华. CCD 成像器件的不均匀性测试[J]. 华中理工大学学报,1998,26(8):58-60.
WU YB, CAO D H. Testing of nonuniformity of charge-coupled image devices[J]. *J Huazhong Univ of Sci & Tech*, 1998, 26(8):58-60. (in Chinese)

作者简介:陈迎娟(1982-),女,河南人,上海大学通信与信息工程学院硕士研究生,2001年7月毕业于中国人民解放军信息工程大学计算机应用专业,主要研究方向为计算机视觉。