

文章编号:1000-582X(2002)10-0001-04

目标移动情况下 SSPA 输出信号的分析

刘晓明¹, 刘宗行¹, 江泽佳²

(1. 重庆大学通信工程学院, 重庆 400044; 2. 重庆大学电气工程学院, 重庆 400044)

摘要:自扫描光电二极管阵列图像传感器用于物体测量时, 物体的外型尺寸反映在图像传感器的输出信号里, 对物体的识别测量以及指标的提提高很大程度上取决于对视频输出信号的特征的提取。基于对自扫描光电二极管阵列图像传感器输出信号的分析的要求, 文中根据光电二极管光电转换原理, 从理论上分析了自扫描光电二极管阵列图像传感器拍摄运动目标时视频输出信号的数学模型, 分析了用比较法处理视频输出信号时可能出现的误差大小。理论分析结果与传感器输出的实际波形相吻合。

关键词:图像传感器; 光电二极管阵列; 图像处理

中图分类号: TN364

文献标识码: A

应用固体图像传感器制作的摄像头已经得到广泛的应用。如果要拍摄快速运动的目标, 则需要提高传感器的帧速, 解决图像边缘识别等问题。自扫描光电二极管阵列作为一类图像传感器用于拍摄运动目标时, 也必须克服上述困难。笔者从光电二极管阵列图像传感器的工作原理入手, 研究在拍摄运动目标时, 各光电二极管输出信号的变化规律, 按二值化的处理方法, 确定图像的边缘, 以便获得高质量的图像信息。

1 自扫描光电二极管阵列图像传感器光电转换原理

自扫描光电二极管阵列图像传感器(Self scanned photodiode array image sensor 简称 SSPA)是一类固体图像传感器^[1]。就线阵列而言, 它是应用半导体集成电路制造技术将若干个形状和大小相同的光电二极管排成一条直线集成于一硅片上, 再辅以多路开关和移位寄存器构成线阵列图像传感器。在用于摄像时, SSPA 把入射到传感器光敏面上的按一维分布的光强信息转换为按时序串行输出的视频脉冲信号, 从而获得被摄目标的图像。

典型的电荷存贮工作方式的光电二极管的等效电路如图 1 所示。

当光电二极管 D_i 无光照时, 放电电流为光电二极管在反偏下的漏电流 I_D ; 当 D_i 有光照时, 将产生电流

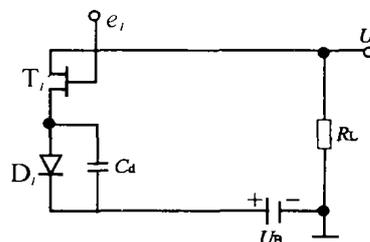


图 1 光电二极管的等效电路

I_L 。设光电二极管 PN 结光子转换为电子的效率是 η (量子效率), 每一个光子具有的能量为 $h\nu$ (h 为普朗克常数, $\nu = c/\lambda$, c 为光速, λ 为光的波长), 对于面积为 A 的光电二极管, 在功率为 P 的入射光照时的电流为

$$I_L = \frac{q\eta P\lambda A}{hc} \quad (1)$$

由式(1)可知, 电流 I_L 与入射光功率 P 成正比。在室温下, 光电二极管反偏漏电流 $I_D < 1 \times 10^{-12}$ A, 远小于 I_L , 因此, 在光照情况下, 电容 C_d 的放电电流近似于电流 I_L 。

根据光电二极管的工作原理可知, 其视频输出电压 U 与放电电流 I_L 的大小和放电时间等有关, 也就是说与入射光功率、光敏元受光照面积、光照时间有关。

2 拍摄运动目标时 SSPA 视频输出信号分析

运动目标在 N 位的光电二极管阵列上的成像

• 收稿日期: 2002-06-13

基金项目: 教育部博士点基金资助项目(97061107)

作者简介: 刘晓明(1963-), 男, 重庆市人, 重庆大学副教授, 博士后, 主要从事测控系统数字化、软化、智能化的研究。

示意图如图 2 所示,图中一个方格表示一个光敏元。为了便于描述,我们将目标在光照下落在传感器上的影

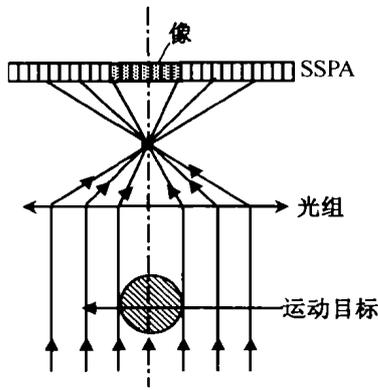


图 2 运动目标在 SSPA 上成像示意图

子称为像,带阴影的光敏元 ■ 为有像(无光照),不带阴影的光敏元 □ 为无像(有光照)。当运动目标成像在光电二极管阵列上时,各个光电二极管的光照度、光照面积、光照时间是不尽相同的^[2]。图 3 表示一个扫描周期内像移动的情况。设像是从左向右移动的,为了便于分析,令光敏元为 1×1 的正方形,我们用光敏元的个数来表示像的长度和像移动的距离。图 3(a) 为一个扫描周期开始时像的位置,从 X_1 开始到 X_2 光敏元上有像,在 X_1 光敏元上,像的面积为 $x_1 (0 \leq x_1 \leq 1)$,在 X_2 光敏元上,像的面积为 $x_2 (0 \leq x_2 \leq 1)$ 。图 3(b) 为一个扫描周期结束时像的位置,从 X'_1 到 X'_2 光敏元上有像,在 X'_1 光敏元上,像的面积为 $x'_1 (0 \leq x'_1 \leq 1)$,在 X'_2 光敏元上,像的面积为 $x'_2 (0 \leq x'_2 \leq 1)$ 。在串行输出的像的信号中, X_1 光敏元上的输出电压被先读出,我们称之为像的前缘, X_2 光敏元上的输出电压被后读出,我们称之为像的后缘。在一个扫描周期 T_s 时间内,像的前缘从 X_1 光敏元移动到 j 光敏元,像的后缘从 X_2 光敏元移动到光敏元。从图 3(c) 可知,除 X_1 到 X'_2 外的其余光敏元在整个扫描周期内被照射,设输出电压为 $U (0 \leq U \leq U_0)$;从 X_1 到 j ,从 $j+1$ 到 $n'_i - j'$ 的

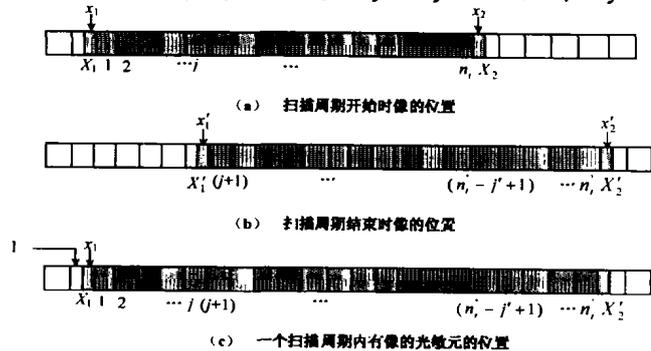


图 3 一个扫描周期内图像移动的情况

光敏元在整个扫描周期内光照时间小于 T_s ,其输出电压为 $U (0 \leq U \leq U_0)$;从 $j+1$ 到 $n'_i - j'$ 的光敏元,在整个扫描周期内光照为 0,输出电压为 0。

根据图像边缘识别的要求,用二值化方法处理,设光敏元上无像时光照度为 1,有像时光照度为 0,用光敏元个数表示的像的长度的计算式为 $n_{\text{像}} = x_1 + n_i + x_2$ 。设扫描周期 $T_s = 1$,在一个扫描周期内,像移动的距离为 $n_{\text{移}}$,有像的光敏元 X_1 到 X'_2 的输出电压如下^[3]:

1) 第 X_1 光敏元

面积为 $(1 - x_1)$ 的部分在整个扫描周期 T_s 内被全照射。

面积为 x_1 的部分有像,在 $0 \sim \frac{x_1}{n_{\text{移}}/T_s}$ 时间内光照面积逐渐增加,在 $\frac{x_1}{n_{\text{移}}/T_s} \sim T_s$ 时间内则被全照射。故第 X_1 光敏元输出信号为

$$U(X_1) = U_0 \left[(1 - x_1) T_s + \int_0^{\frac{x_1}{n_{\text{移}}/T_s}} \frac{n_{\text{移}}}{T_s} t dt + x_1 \left(T_s - \frac{x_1}{n_{\text{移}}/T_s} \right) \right] = U_0 \left[1 - 0.5 \times \frac{x_1^2}{n_{\text{移}}} \right] \quad (2)$$

2) 第 j 光敏元 ($j = 1, 2, \dots$)

第 j 光敏元光照的起始位置为 $x_1 + j - 1$ 。在 $0 \sim \frac{x_1 + j - 1}{n_{\text{移}}/T_s}$ 时间内,其光照度为零;在 $\frac{x_1 + j - 1}{n_{\text{移}}/T_s} \sim \frac{x_1 + j}{n_{\text{移}}/T_s}$ 时间内,光照面积逐渐增加;在 $\frac{x_1 + j}{n_{\text{移}}/T_s} \sim T_s$ 时间内,第 j 光敏元被全照射。故第 j 光敏元的输出信号为

$$U(j) = U_0 \left[\int_{\frac{x_1 + j - 1}{n_{\text{移}}/T_s}}^{\frac{x_1 + j}{n_{\text{移}}/T_s}} \left(t - \frac{x_1 + j - 1}{n_{\text{移}}/T_s} \right) \frac{n_{\text{移}}}{T_s} dt + \left(T_s - \frac{x_1 + j}{n_{\text{移}}/T_s} \right) \right] = U_0 \left[1 - \frac{x_1 + j - 0.5}{n_{\text{移}}} \right] \quad (3)$$

显然输出信号 $U(j)$ 应大于或等于零,即应有

$$1 - \frac{x_1 + j - 0.5}{n_{\text{移}}} > 0$$

故可得 $j \leq n_{\text{移}} - x_1 + 0.5$,按 4 舍 5 入取整。当 $n_{\text{移}} < n_{\text{像}}$ 时, $U(j+1) = 0$ 。

3) 从 $j+1$ 到 $n'_i - j'$ 的各光敏元在一个扫描周期内均有像,光照均为 0,输出电压均为 0。

4) 第 $n'_i - j' + 1$ 光敏元的输出信号为 ($j' = 1, 2, \dots$)

$$U(n'_i - j' + 1) = U_0 \left[1 - \frac{x'_2 + j' - 0.5}{n_{移}} \right] \quad (4)$$

5) 第 X'_2 光敏元的输出信号为

$$U(x'_2) = U_0 \left[1 - 0.5 \times \frac{(x'_2)^2}{n_{移}} \right] \quad (5)$$

在一个扫描周期内,从第 X_1 光敏元起到第 j 光敏元,其输出信号逐个减小;从第 $n'_i - j' + 1$ 光敏元到第 X'_2 光敏元,其输出信号是逐个增大的。鉴于光电二极管线阵的扫描频率为 100 kHz 以上,在一个扫描周期内可将运动目标视为匀速的。在拍摄运动的目标时,光电二极管线阵上输出脉冲幅值的包络线的波形如图 4 所示($n_{移} < n_{像}$ 情况)。

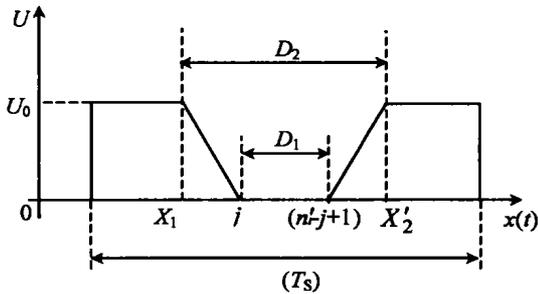


图 4 $n_{移} < n_{像}$ 时脉冲幅值的包络线波形

根据上述结果,可由 U 的曲线确定沿线阵方向运动的目标在线阵方向上的像的长度^[4]。设包络线上底为 D_2 、下底为 D_1 ,则像的长度应为 $\frac{1}{2}(D_1 + D_2)$ 。

当 $n_{移} > n_{像}$ 时,只要在一个扫描周期内,运动目标的像落在线阵上,则输出脉冲幅值的包络线的图形如图 5 所示。此条件下,像的长度与包络线上底、下底间满足的数学关系式不变,像的长度为 $\frac{1}{2}(D'_1 + D'_2)$ 。

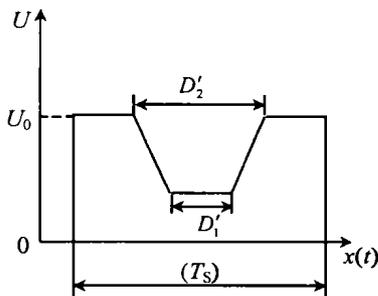


图 5 $n_{移} > n_{像}$ 时输出脉冲幅值的包络线波形

3 误差分析^[5,6]

在硬件电路对视频输出信号进行处理以确定像的边缘时,是将各光电二极管的输出信号与阈值电平进行比较,决定取舍后再进行计数的。根据前面的分析,像的边缘经过的光敏元其输出信号幅值的包络是斜坡

形状,在 $n_{移} < n_{像}$ 情况,通常选取 $0.5U_0$ 作为比较器的阈值电平。按该阈值电平决定脉冲的取舍必然带来误差。图 6 给出了像长 $n_{像}$ 为 15.2 个光敏元的目标,像移动速度 $n_{移}$ 为 7.8 个光敏元时,光敏元输出电压脉冲的示意图。选取 $0.5U_0$ 为阈值电平时,实际测得的像长为 15。

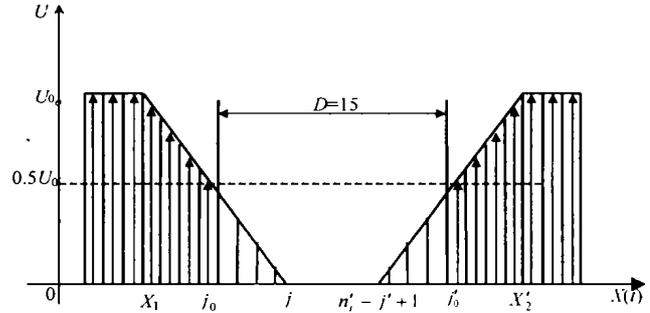


图 6 脉冲及包络波形图

现将可能出现的误差分析如下。

设前缘按运动方向依次经过 $X_1, 1, 2, \dots, j$ 光敏元。由前导出的第 j 光敏元的输出电压计算式(3)可知,输出电压幅值大于等于 $0.5U_0$ 的脉冲被记录,则被记录的光敏元编号 j 应满足

$$1 - (x_1 + j - 0.5) \frac{1}{n_{移}} \geq 0.5$$

即有 $j \leq 0.5n_{移} - x_1 + 0.5$

第 $j + 1$ 位光敏元的输出电压幅值小于 $0.5U_0$ 则应有

$$1 - (x_1 + j + 1 - 0.5) \frac{1}{n_{移}} \leq 0.5$$

即有 $j \geq 0.5n_{移} - x_1 - 0.5$

满足上两式的 j 即为临界值记为 j_0 。在实际应用中应对 j 进行取整运算。为了以后计算的方便,令

$$n_{移} = 2n + C$$

其中, n 为正整数, $0 \leq C < 2$ 。

对 j 的取整即为

$$j_0 = \text{int}(0.5n_{移} - x_1 + 0.5) = \text{int}(n + 0.5C - x_1 + 0.5)$$

显然,当 x_1 取最大值 1、 C 取最小值 0 时, $0.5C - x_1 + 0.5$ 有最小值 -0.5 ; 而当 x_1 取最小值 0、 C 取极限值 2 时, $0.5C - x_1 + 0.5$ 的极限值为 1.5。

因此, j_0 的取值范围为

$$j_0 = \begin{cases} n - 1 & -1 < 0.5C - x_1 < -0.5 \\ n & -0.5 < 0.5C - x_1 < 0.5 \\ n + 1 & +0.5 < 0.5C - x_1 < 1 \end{cases}$$

按相同的阈值电平,后缘经过的各光敏元输出电

压幅值大于等于 $0.5U_0$ 的光敏元被记录, 否则被舍去, 同理可得

$$j'_0 = \begin{cases} n-1 & -1 < 0.5C - x'_2 < -0.5 \\ n & -0.5 < 0.5C - x'_2 < 0.5 \\ n+1 & 0.5 < 0.5C - x'_2 < 1 \end{cases}$$

经过阈值电平 $0.5U_0$ 的比较器后, 在图 6 中得到的像长 D 为

$$D = n_{\text{像}} + n_{\text{移}} - (x_1 + j_0) - (x'_2 + j'_0)$$

误差为

$$\epsilon = D - n_{\text{像}} = 2n + C - (j_0 + j'_0) - (x_1 + x'_2)$$

鉴于 j_0 和 j'_0 的取值范围均为 $n-1, n, n+1$, 在理论上 ϵ 的取值有 9 种情况。

例如, 当 $j_0 = j'_0 = n-1$ 时,

$$\begin{aligned} \epsilon &= 2n + C - (2n - 2) + (x_1 + x'_2) = \\ &(0.5C - x_1) + (0.5C - x'_2) + 2 \end{aligned}$$

由 j_0, j'_0 取 $n-1$ 时 $0.5C - x_1$ 和 $0.5C - x'_2$ 应当满足的条件可得

$$0 < \epsilon < 1$$

同理可导出其他情况下的 ϵ 值。令 $A = 0.5C - x_1, B = 0.5C - x'_2$ 误差推导的结果见表 1。

表 1 测量结果误差表

ϵ	$-1 < B < -0.5$	$-0.5 < B < 0.5$	$-0.5 < C < 0.5$
$-1 < A < -0.5$	$0 < \epsilon < 1$	$-0.5 < \epsilon < 1$	不成立
$-0.5 < A < 0.5$	$-0.5 < \epsilon < 1$	$-1 < \epsilon < 1$	$-1 < \epsilon < 0.5$
$0.5 < A < 1$	不成立	$-1 < \epsilon < 0.5$	$-1 < \epsilon < 0$

4 结 论

用 SSPA 线阵列图像传感器拍摄运动目标时, 对于扫描频率很高的传感器, 其视频输出信号的幅值包络线是梯形曲线, 传感器输出的实际波形与理论分析结果相吻合。

根据该曲线可识别目标的像的边缘, 进而可确定像的前后缘间的几何尺寸、目标运动速度等。当选取 0.5 倍幅值电压为阈值电平对输出信号进行处理时, 在不考虑传感器不均匀性的条件下, 最大误差为 1 个脉冲。

参考文献:

- [1] 袁祥辉. 固体图像传感器及其应用[M]. 重庆: 重庆大学出版社, 1996.
- [2] 刘晓明. 自扫描光电二极管阵列图像传感器视频输出信号的研究[D]. 重庆: 重庆大学电气工程学院, 1999.
- [3] 江泽佳. 电路原理[M]. 北京: 高等教育出版社, 1985.5.
- [4] 刘晓明, 刘宗行. 自扫描光电二极管阵列图像传感器的灵敏度分析[J]. 传感器学报, 1999, 12(2): 119-122.
- [5] 杨小牛. 软件无线电原理与应用[M]. 北京: 电子工业出版社, 2001.1.
- [6] 程佩青. 数字信号处理教程[M]. 北京: 清华大学出版社, 1995.8.

Video Signals of a Self Scanned Photodiode Array Image Sensor

LIU Xiao-ming¹, LIU Zong-hang¹, JIANG Ze-jia²

(1. College of Communication Engineering, Chongqing University, Chongqing 400044, China;

2. College of Electrical Engineering, Chongqing University, Chongqing 400044, China)

Abstract: When self-scanned photodiode array image sensors are applied in object measurements, the outer sizes of the object are included in the video signal of image sensors. The identification and measurement of the object, and the enhancement of the performance is depended on the symbol extraction of the video output signals. Based on the working principles of self-scanned photodiode array image sensors, the mathematical models of image sensor's video signals are established when the moving object is captured. The comparative method and the measurement error are researched. The results of this paper provide a theoretic basis for the research of video signals processing.

Keywords: image sensor; photodiode array; image treatment

(责任编辑 李胜春)