

文章编号: 1002-2082(2005)01-0029-03

凝视型电荷耦合器件探测器数学模型

陈治平, 陈建设, 陈培彬, 朱岳超, 叶结松

(中国人民解放军炮兵学院一系, 安徽 合肥 230037)

摘要: 首先分析了电荷耦合器件(CCD)的工作特点和电荷的产生、存储、传输及输出的特征, 然后, 根据光电理论和探测器的工作原理, 由电荷耦合器件的探测器面阵列图推导出一种军用电荷耦合器件(CCD)摄像机的探测器面阵调制传递函数, 最后得到了一定入射条件下探测器元的输出电子数目, 这一结果对从理论上分析这种光电结构的性能具有参考意义。

关键词: 探测器; 摄像机; 电荷耦合器件(CCD); 调制传递函数

中图分类号: TN386.5; O141.4

文献标识码: A

Mathematical Model of Staring CCD Detector Arrays

CHEN Zhi-ping, CHEN Jian-she, CHEN Pei-bin

ZHU Yue-chao, YE Jie-song

(The 1st Dep of HAA, Hefei 230037, China)

Abstract: At first the operating characteristics of CCD and the feature of charge formation, storage, transfer, output are analyzed. Then the modulation transfer function of CCD camera detector arrays for military application is derived from the array diagram of CCD detector. Finally, the quantity of the electron output of CCD detector is obtained at a certain condition with the algorithm. this is very important on the theory to analyze the performance of the optoelectronic structure.

Keywords: detector; camera; CCD; MTF

引言

电荷耦合器件(CCD)是20世纪60年代出现的一种新型半导体器件, 其突出特点是以电荷作为传输信号, 不同于其它以电压和电流为传输信号的器件, 基本功能是电荷的存储和传输, 即工作过程是电荷的产生、存储、传输和输出。

CCD的这些特点使其在图像传感、尺寸测量、定位测控、信号传输、数字信号处理和电视摄像等领域得到广泛应用。

1 CCD面阵探测器及其调制传递函数

将光学探测器和CCD连接起来便构成了CCD摄像器件。CCD摄像器件与一般的摄像机相比没

有场、行扫描电路和摄像管高、低压电路, 具有体积小、重量轻的优点, 目前已经广泛应用于国防、武警、边防、公安、金融、交通等领域。

面阵CCD摄像器件的结构如图1所示。

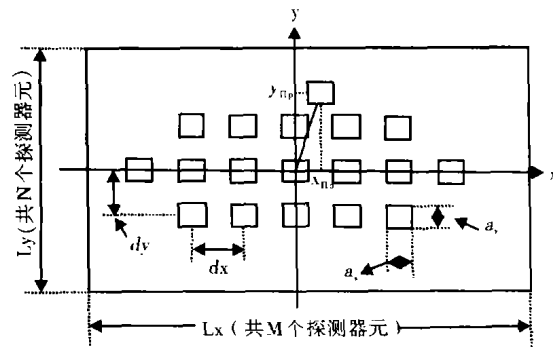


图1 带有电荷耦合器件的探测器面阵图

Fig. 1 Chart of CCD detector array

收稿日期: 2003-12-28; 修回日期: 2004-03-11

作者简介: 陈治平(1967-), 男, 安徽太和人, 中国科技大学博士毕业, 中国人民解放军炮兵学院作战指挥系副教授, 中校军衔, 2002-2003 赴俄罗斯作访问学者, 主要从事雷达和光电子侦察与反侦察方面的研究工作。

图1中 a_x 代表单个探测器元的宽度; a_y 代表单个探测器元的高度; d_x 代表水平方向2个相邻探测器元的间隔; d_y 代表垂直方向2个相邻探测器元的间隔。为了分析方便,我们建立一个直角坐标系。置于前部的光学系统把远方目标和景物聚焦在器件表面的探测器上,形成光学图像。由于每一个电极所存储的电荷与入射的光强成正比,光学图像转换成电荷图像。随着时间的增加,积累的电荷越来越多,在各电极上按时序变化的脉冲电压使电荷按一定的规律转移至输出端,并以不同的方式进入外部电路,从而使光学图像进一步转变为视频信号。

假定传输的能量在每个探测器窗口(x_{Π_p}, y_{Π_p})是均匀的,那么,探测器窗口处的穿透函数可以写为

$$H_1(x', y', x_{\Pi_p}, y_{\Pi_p}) = \text{rect}\left(\frac{x' - x_{\Pi_p}}{a_x}, \frac{y' - y_{\Pi_p}}{a_y}\right) \quad (1)$$

这时探测器入射面的照度为 $E(x', y')$,则单个像元入射量可以表示为

$$\Phi_1(x_{\Pi_p}, y_{\Pi_p}) = \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} E(x', y') \times \text{rect}\left(\frac{x' - x_{\Pi_p}}{a_x}, \frac{y' - y_{\Pi_p}}{a_y}\right) dx' dy' \quad (2)$$

由上式不难看出,此表达式与该元的位置(x_{Π_p}, y_{Π_p})有关。根据相关理论,(2)式又可以写为卷积变换的形式,即

$$\Phi_1(x_{\Pi_p}, y_{\Pi_p}) = E(x', y') \otimes H_1(x', y', x_{\Pi_p}, y_{\Pi_p}) \quad (3)$$

对于图1,我们研究的对称面阵结构中 $M \times N$ 元探测器像元存在相似的穿透函数 $H_1(x', y')$,区别在于位置不同,带有反映不同位置关系的因子 md_x, nd_y 不同。这种反映离散位置关系的因子可用奇异函数表示。面阵中第 $m \times n$ 元的入射量为

$$\begin{aligned} \Phi_{m,n}(x_{\Pi_p}, y_{\Pi_p}) &= [E(x', y') \otimes \text{rect}\left(\frac{x'}{a_x}, \frac{y'}{a_y}\right)] \\ &\times \sum_{m,n=-\infty}^{+\infty} \delta\left(\frac{x_{\Pi_p}}{d_x} - md_x, \frac{y_{\Pi_p}}{d_y} - nd_y\right) \end{aligned} \quad (4)$$

式中

$$\sum_{m,n=-\infty}^{+\infty} \delta\left(\frac{x_{\Pi_p}}{d_x} - md_x, \frac{y_{\Pi_p}}{d_y} - nd_y\right)$$

$$= \frac{1}{d_x d_y} \text{comb}\left(\frac{x_{\Pi_p}}{d_x}, \frac{y_{\Pi_p}}{d_y}\right)$$

(4)式又可以表示为

$$\begin{aligned} \Phi_{m,n}(x_{\Pi_p}, y_{\Pi_p}) &= \frac{1}{d_x d_y} [E(x', y') \otimes \text{rect}\left(\frac{x'}{a_x}, \frac{y'}{a_y}\right)] \\ &\times \text{comb}\left(\frac{x_{\Pi_p}}{d_x}, \frac{y_{\Pi_p}}{d_y}\right) \end{aligned} \quad (5)$$

我们注意到,(5)式是个 $l_x \times l_y$ 的面阵。对于整个面阵结构而言,通量表达式为

$$\begin{aligned} \Phi_{m,n}(x_{\Pi_p}, y_{\Pi_p}) &= \frac{1}{d_x d_y} [E(x', y') \otimes \text{rect}\left(\frac{x'}{a_x}, \frac{y'}{a_y}\right)] \\ &\times \text{comb}\left(\frac{x_{\Pi_p}}{d_x}, \frac{y_{\Pi_p}}{d_y}\right) \text{rect}\left(\frac{x'}{l_x}, \frac{y'}{l_y}\right) \end{aligned} \quad (6)$$

对(6)式求傅里叶变换,有

$$\begin{aligned} \tilde{\Phi}_{m,n}(\nu_x, \nu_y) &= F[\Phi_{m,n}(x_{\Pi_p}, y_{\Pi_p})] \\ &= \{\tilde{E}(\nu_x, \nu_y) a_x a_y \times \text{sinc}(\pi a_x \nu_x, \pi a_y \nu_y)\} \\ &\otimes \text{comb}(d_x \nu_x, d_y \nu_y) \otimes l_x l_y \text{sinc}(\pi l_x \nu_x, \pi l_y \nu_y) \end{aligned} \quad (7)$$

一般情况下, $l_x \gg d_x$ 或 a_x ,同时 $l_y \gg d_y$ 或 a_y 。此时,有如下近似:

$$\lim_{l_x, l_y \rightarrow \infty} l_x l_y \text{sinc}(\pi l_x \nu_x, \pi l_y \nu_y) \rightarrow \delta(\nu_x, \nu_y)$$

$\tilde{\Phi}_{m,n}(\nu_x, \nu_y)$ 变化为

$$\begin{aligned} \tilde{\Phi}_{m,n}(\nu_x, \nu_y) &= a_x a_y \{\tilde{E}(\nu_x, \nu_y) \\ &\times \text{sinc}(\pi a_x \nu_x, \pi a_y \nu_y)\} \\ &\otimes \text{comb}(d_x \nu_x, d_y \nu_y) \end{aligned} \quad (8)$$

δ 函数的替代性为

$$\begin{aligned} \tilde{E}(\nu_x, \nu_y) \text{sinc}(\pi a_x \nu_x, \pi a_y \nu_y) &\otimes \delta\left(\nu_x - \frac{m}{d_x}, \nu_y - \frac{n}{d_y}\right) \\ &= \tilde{E}\left(\nu_x - \frac{m}{d_x}, \nu_y - \frac{n}{d_y}\right) \times \text{sinc}\left[\pi a_x \left(\nu_x - \frac{m}{d_x}\right), \pi a_y \left(\nu_y - \frac{n}{d_y}\right)\right] \end{aligned}$$

(8)式又变化为

$$\begin{aligned} \tilde{\Phi}_{m,n}(\nu_x, \nu_y) &= \frac{a_x a_y}{d_x d_y} \times \sum_{-\infty}^{+\infty} \tilde{E}\left(\nu_x - \frac{m}{d_x}, \nu_y - \frac{n}{d_y}\right) \\ &\times \text{sinc}\left[\pi a_x \left(\nu_x - \frac{m}{d_x}\right), \pi a_y \left(\nu_y - \frac{n}{d_y}\right)\right] \end{aligned} \quad (9)$$

展开上式,得到

$$\begin{aligned} \tilde{\Phi}_{m,n}(\nu_x, \nu_y) &= \frac{a_x a_y}{d_x d_y} \tilde{E}(\nu_x, \nu_y) \text{sinc}[\pi a_x \nu_x, \pi a_y \nu_y] \\ &+ \frac{a_x a_y}{d_x d_y} \sum_{\substack{m,n=-\infty \\ m,n \neq 0}}^{+\infty} \tilde{E}\left(\nu_x - \frac{m}{d_x}, \nu_y - \frac{n}{d_y}\right) \\ &\times \text{sinc}\left[\pi a_x \left(\nu_x - \frac{m}{d_x}\right), \pi a_y \left(\nu_y - \frac{n}{d_y}\right)\right] \end{aligned} \quad (10)$$

3 微光 CCD 摄像机探测器面阵元输

出电子数的确定

根据探测器理论,由推导出的(10)式可确定探测器面阵元输出量子数为

$$\begin{aligned} \tilde{q}_{out}(\nu_x, \nu_y) &= \frac{a_x a_y \eta(\lambda) t_H}{d_x d_y h\gamma} \tilde{E}(\nu_x, \nu_y) \times \text{sinc}[\pi a_x \nu_x, \pi a_y \nu_y] \\ &+ \frac{a_x a_y \eta(\lambda) t_H}{d_x d_y h\gamma} \times \sum_{\substack{m, n = -\infty \\ m, n \neq 0}}^{+\infty} \tilde{E}(\nu_x - \frac{m}{d_x}, \nu_y - \frac{n}{d_y}) \\ &\times \text{sinc}[(\pi a_x (\nu_x - \frac{m}{d_x}), \pi a_y (\nu_y - \frac{n}{d_y}))] \quad (11) \end{aligned}$$

式中, $\eta(\lambda)$ 为一定波长的探测器的量子效率; $h\gamma$

为量子能量; t_H 为探测器面阵的积聚时间。对上式求二维傅里叶反变换,即可得到对应于每个探测器像元的电荷量。

参考文献:

- [1] В Е Карасик, В Е Орлов, Лазер-ные Системы Веления[М]. Москва: МГТУ, 2001.
- [2] Л Л Лазарев, Оптико-электронные Приборы Навеления[М]. Москва: МГТУ, 1989.
- [3] 谢建平, 明海 等. 近代光学基础[М]. 合肥: 中国科技大学出版社, 1990.

美陆军封杀最大武器项目“科曼奇”直升机

2月23日,美国陆军宣布取消总预算高达390亿美元的“科曼奇”武装侦察直升机研发项目,这是美军继消耗资20亿美元的“十字军”火炮计划之后取消的又一个大型项目。

“科曼奇”计划从1983年开始实施以来,历时21年,耗资69亿美元。已经研制成RAH-66“科曼奇”和“科曼奇长弓”两种型号,采用了直升机中前所未有的全面隐身设计、先进的导航、目标瞄准系统和计算机辅助侦察系统等一系列先进技术。原计划用它代替JH-58“基奥瓦”和AH-1“眼镜蛇”,并协助AH-64“阿帕奇”发现目标,也一度希望能与“阿帕奇”一起形成21世纪美国陆军航空兵的主力机群。陆军参谋长斯库梅克将军承认,放弃“科曼奇”计划是一个重大而艰难的决定,但是“这是一个正确的决定”。

为什么?

“科曼奇”计划从冷战时期的1983年开始,计划的所有要求都针对美苏最可能发生冲突的欧洲战争环境而设计。这一对抗前苏联大规模坦克群的致命武器计划已远远落在时代的后面。目前战场上地对空导弹和高射炮的作战能力已大大提高,最近在阿富汗和伊拉克的战争中,不少直升机被并无雷达追踪功能的火炮近距离击落,这使“科曼奇”直升机上各种躲避雷达的隐形设计形同虚设。而其装甲保护性能又不如阿帕奇,这样“科曼奇”的价值和生存性能已大打折扣。随着美国陆军现代作战模式的转变,这一冷战时期武器研制计划的产物已显过时。

这样,“科曼奇”的唯一生路是进行现代化改装。但是,该计划开始以来已经过6次结构性调整,多年来屡次超支,使价格从起初估计的单机1200万美元飙升到2002年的5000万美元。在陆军不得已将5023架的采购计划削减到650架后,单机再次猛增到5890万美元,而预算费用更是高达390亿美元。五角大楼已清楚认识到,这类过时又耗资巨大的武器研制计划已经严重影响到了美国军队的现代化进程。

此外,该计划自1983年以来一拖再拖,虽然历经21年,到目前为止仅仅研制出了RAH-66“科曼奇”和RAH-66“科曼奇长弓”两种机型,还迟迟无法投入全速生产。

相比之下,今天的无人驾驶飞机研制成本低廉,能完成“科曼奇”所有的作战侦察任务,即使被敌方击落,也不存在搜救驾驶员的问题。如在阿富汗和伊拉克战争中表现出色的“掠食者”无人侦察机,不仅能为后方将领“现场直播”前线的情况,而且一旦装上“地狱火”导弹后,它还可进行反装甲任务。

所以,根据阿富汗和伊拉克两场战争的经验,陆军参谋长花了半年的时间检讨陆军的军备采购计划得出结论,决定取消这一过时的计划,将余下的20亿美元的资金购买多达80架“黑鹰”直升机,升级现役1400架作战机,并加大无人机项目的资金投入。

(力源 供稿)