

文章编号: 1672-8785(2013)09-0001-08

红外焦平面探测器阵列规格的发展

王忆锋 黄江平

(昆明物理研究所, 云南昆明 650223)

摘 要: 红外焦平面探测器阵列规格的发展是一个从疏到密、从小到大的过程, 受到大面积探测器材料生长和小像元制备等因素的限制。战略焦平面阵列一般用于探测点源目标, 而战术焦平面阵列则一般用于探测扩展源目标。从相关的基本概念出发, 分析了焦平面阵列规格的发展过程, 讨论了作用距离与焦平面阵列规格之间的关系。由于电视格式基本固定, 在战术焦平面阵列实现全帧格式以后, 其规格进一步增加的势头即便不是停止, 也必将会趋缓。但是另一方面, 因为焦平面阵列的规格越大, 其居高临下而一次看到的面积就越广, 所以战略焦平面阵列将会继续向超大规格发展。

关键词: 红外探测器; 焦平面探测器; 阵列规格

中图分类号: TN216 **文献标识码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.1672-8785.2013.09.001

Development of Infrared Focal Plane Array Detector in Format

WANG Yi-feng, HUANG Jiang-ping

(Kunming Institute of Physics, Kunming 650223, China)

Abstract: The development of infrared Focal Plane Array (FPA) detectors in format size is a process from sparseness to density and from smallness to largeness. It is limited by the factors such as material growth of large area detectors and fabrication of small pixels. Strategic FPAs are usually used to detect point source targets while tactical FPAs are usually used to detect extended source targets. Starting from the related basic concepts, the evolution of FPA format is analyzed and the relationship between the operation range and the FPA format is discussed. Since TV formats are changeless, the further increase trend of the tactical FPAs in format will be either stopped or slower after their full frame formats are realized. On the other hand, the larger the format of the FPA is, the wider area it can cover each time is. So, the strategic FPAs will develop toward super-large format.

Key words: infrared detector; focal plane detector; array format

0 引言

红外焦平面阵列探测器芯片规格的发展是一个从小到大、从疏到密、从点到线、从线到面的过程。20 世纪 60 年代, 红外焦平面阵列通常是一个单元探测器, 或者最多是放在一个通用

冷指上的少数几个分立探测器^[1]。长期以来, 大面积、高密度红外焦平面阵列的研发工作一直受到大面积探测器材料生长以及小像元制备技术等因素的限制^[2]。本文从相关的基本概念出发, 分析了红外焦平面阵列规格的发展过程, 并

收稿日期: 2013-07-31

作者简介: 王忆锋 (1963-), 男, 湖南零陵人, 工学士, 高级工程师, 主要从事器件仿真研究。

E-mail: wangyifeng63@sina.com

讨论了与焦平面阵列有关的几个作用距离之间的关系。

1 关于显示分辨率

由于红外图像一般是在电视屏幕上显示, 红外焦平面阵列的排列方式大多考虑与电视格式相兼容。显示屏幕上的一个像点称为像素。焦平面阵列上的一个探测单元称为像元。在英文文献中, 像素与像元之间没有区分, 都称为 pixel。显示分辨率是指屏幕上所显示出的像素个数, 一般用“水平像素数 $\times$ 垂直像素数”表示。分辨率越高, 像素的数目越多, 人眼感受到的图像就越精致。而在屏幕尺寸相同的情况下, 分辨率越高, 显示效果就越细腻。下面介绍常见的几种屏幕比例。

1.1 4:3 (标屏)

美国的 RS-170 电视标准是用约 500 条水平线序列来传递一帧图像的。为了使某些垂直回扫期有空载时间, 人们选择了 525 条线。在现有的标准中, 垂直效率为 0.925。这样得到的有效扫描线共有 485 条, 该值通常取作 480。另外, 要求显示宽度为高度的 4/3, 即所谓的宽高比为 4:3, 于是便有了 640×480 的显示格式。VGA 格式亦是按此值定义的。 768×576 为欧洲的 CCIR 标准。这两个是黑白电视显示的标准清晰度 (标清); 另外, 满足 4:3 的还有 1024×768 等。

1.2 16:9 (宽屏)

该比例主要有 1280×720 和 1920×1080 等。一般认为, 在水平或垂直方向上, 只要有一个方向上的分辨率在一千以上, 即可认为是高清晰度 (High Definition, HD)。用户一般更加关心显示格式的宽度, 而不是高度, 因此高清红外成像 (HDIR) 大多选取 16:9 的 HD 格式 [3]。

1.3 5:4

该比例主要有 1280×1024 。这是 SXGA 标准, 已属于高清水平。SXGA 格式的一半大小为 640×512 , 这是一个很有弹性的格式。一方面, 以此为基础往前发展, 在水平和垂直方向上各增加一倍即可得到 SXGA 或高清; 另一方面,

640×512 去掉 32 列后就是 640×480 的美国电视标准。可能是由于这一原因, 640×512 在红外成像技术领域也被认为是电视格式 [4]; 美国 FLIR 公司的产品说明书中亦将 640×512 称为 VGA 格式。

2 红外焦平面阵列像元的构成

红外焦平面阵列像元由光敏区 (面) 和非光敏区构成。这两部分合在一起, 称为一个探测单元, 简称像元, 如图 1 所示。光敏面与整个像元的面积之比称为填充因子。非光敏区又称为“死区” (dead space [5]), 它通常由一块共用母板上的机械间隔、芯片边缘上的非敏感区、芯片边缘上的附属电路以及相邻母板间的芯片间距构成, 如图 2 所示。为了使光敏面达到最大, 要求将死区减至最小。20 世纪 80 年代初, 人们对减少死区所设定的目标是, 同一母板上相邻芯片之间的死区小于 4 个像元, 相邻母板上相邻芯片之间的死区小于 6 个像元 [5]。两个相邻像元中心之间的距离称为中心 (间) 距。如图 2 所示, 它有水平中心距与垂直中心距之分。中心距限定了光敏面的大小。在过去的二十多年里, 红外焦平面阵列像元的中心距从 $50 \mu\text{m}$ 左右开始不断减小 [6]。 $12 \mu\text{m}$ 中心距现已成为中波和长

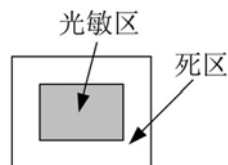


图 1 红外焦平面阵列像元由光敏区和非光敏区 (“死区”) 组成

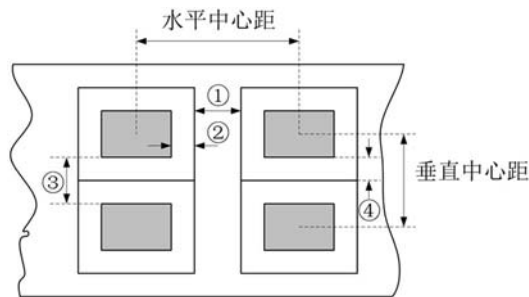


图 2 红外焦平面阵列芯片的死区, 其中: ①同一母板上芯片之间的间隔; ②芯片边缘上的非敏感区; ③相邻母板上芯片之间的间隔; ④芯片边缘上的附属电路

波红外探测器的标准,甚至有的还实现了 $5\text{ }\mu\text{m}$ 中心距^[7]。

红外焦平面阵列的规格及像元大小与芯片尺寸之间是相互制约的。英语里有 wafer、die 和 chip 三个术语。其中, wafer 是指完整的半导体晶体材料裸片,因其一般是圆形,故多将 wafer 译为圆晶。通过圆晶划片获得的小片材料称为 die (晶片);晶片封装后的成品称为 chip (芯片)。以中心距为 $30\text{ }\mu\text{m}$ 的 1280×720 元红外焦平面阵列为例^[3],构成该规格焦平面阵列的晶片大于 $22\text{ mm}\times 38\text{ mm}$ 。这将会导致一个圆晶仅能划出几个晶片,而且为了适应这么大的晶片,需要研发新一代的杜瓦/制冷机组件。当中心距为 $20\text{ }\mu\text{m}$ 时,不仅成本可以节省一半,而且还可以沿用现有的杜瓦设计。

一些红外焦平面阵列芯片可以直接地彼此邻接,其间的死区可以只有一个(或几个)像元的宽度,这种能力称为“拼接能力”^[1]。拼接可以是两边或三边拼接^[1,8],如图3所示。文献^[9]通过拼接制作出了超大规格的 2048×1536 元红外焦平面阵列。

3 红外焦平面阵列格式的发展

红外成像系统的最终结果一般呈现在显示器上,即需要将其转换为视频信号,因此将红外焦平面阵列的大小做得与显示分辨率一致是一种很自然的想法。但是由于可生产性、均匀性以及工艺能力等条件的限制,这一想法的实现推迟了几十年^[1]。我们实际上所看到的是一个从小到大、从疏到密、从点到线、从线到面的发展过程,如图4所示。

红外焦平面阵列的一个像元对应于显示器的一个像素。如果像元数与像素数相等(即全帧红外^[1]),那么红外焦平面阵列一次就可以“看完”整个视场,这就是所谓的凝视型红外焦平面阵列,如图5(a)所示;否则,红外焦平面阵列看完整个视场必须使用扫描方式,即通过若干次扫描动作来完成对整个视场的覆盖。其中,扫描有串联扫描和并联扫描之分,如图5(b)和图5(c)所示。红外焦平面阵列的像元数越少,所需要的扫描动作就越多。

人们无法利用落在死区上的光子,因为它

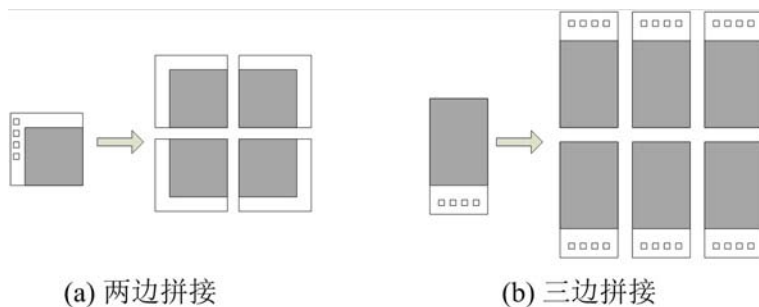


图3 将小规格焦平面阵列芯片拼接成为较大规格的焦平面阵列芯片

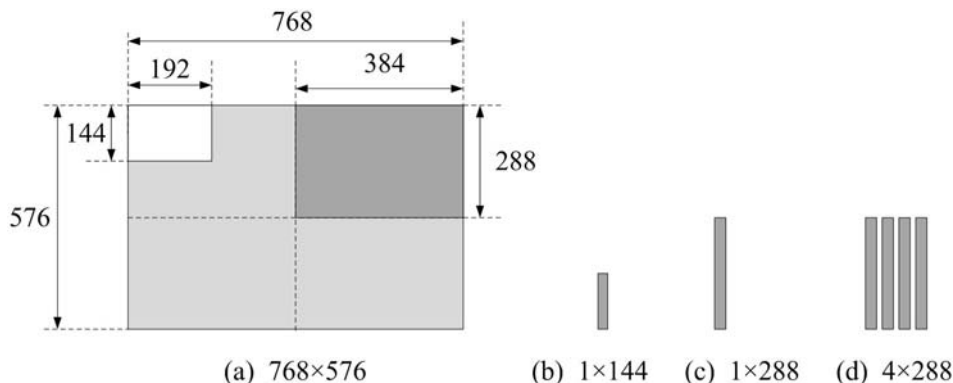


图4 红外焦平面阵列从小到大并向全帧规格发展

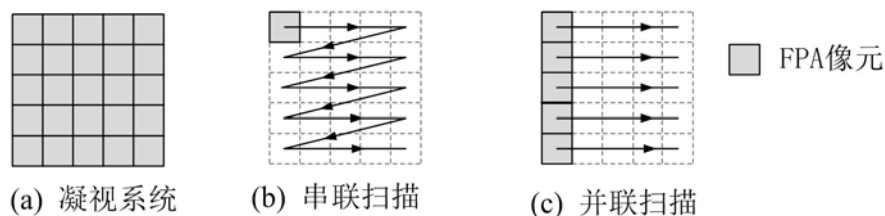


图 5 扫描格式

们不会产生信号。如果能够改变本来要落在死区上的光子的传播方向,让它们转落到光敏区上,那么无效光子就可以变为有效光子。若要实现这一点,就需要让光线产生相对移动,如图 6(b) 所示。这样一个过程在本质上也是扫描过程,只是与图 5 所示的扫描方式相比,其动作幅度微小,故称为微扫描。

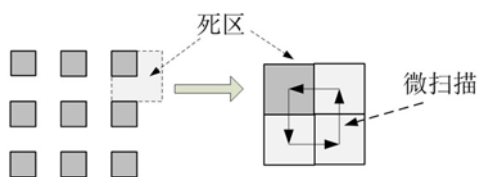


图 6 利用微扫描将落在红外焦平面阵列死区上的无效光子变为有效光子

图 6 利用微扫描将落在红外焦平面阵列死区上的无效光子变为有效光子

或许可以推测,法国 Sofradir 公司的研究人员在研制红外焦平面阵列时,首先考虑的是 768×576 欧洲标准,同时还要考虑与 640×480 美国标准的兼容问题,因为毕竟美国标准的背后拥有最大的市场和最强势的资源。一个很自然的思路是,既然一时制作不出全帧红外焦平面阵列,那么就制作半帧红外焦平面阵列;若半帧红外焦平面阵列还不好实现,则再减半,制作 $1/4$ 帧红外焦平面阵列。例如, $768 \times 576 \rightarrow 384 \times 288 \rightarrow 192 \times 144$, 等等;或者制作长线列(阵),例如 1×144 、 1×288 、 4×288 , 等等。总之按照一个递减的、可以掌握和控制的规格去做,直到获得一个基本稳定的红外焦平面阵列构型为止;然后一边将其推向应用,一边以此为基础逐步扩大红外焦平面阵列的规格。事实上, Sofradir 公司推出的第一代量子阱红外探测器就是 192×144 大小的^[10]。从 Sofradir 公司研究人员公开发表的文献中,基本

上看不出他们经历了哪些渐近的发展步骤;当他们推介红外焦平面阵列时, 4×288 元红外焦平面阵列已经是 Sofradir 公司的当家产品。通过采用机械扫描和奇偶行交错排列, 4×288 元红外焦平面阵列可以获得 768×576 大小的欧洲电视分辨率^[2]。 4×288 元红外焦平面阵列如果空置一部分 (4×48 个) 像元就可变成 4×240 元红外焦平面阵列,从而实现与美国标准的兼容。 Sofradir 公司还制作过 500×256 、 1000×256 和 1016×440 等规格的红外焦平面阵列^[11]。与此同时,美国也推出了 4×240 元红外焦平面阵列。在 4×240 系列上,有 4×960 、 6×480 、 320×240 、 320×256 和 640×480 等。其中, 6×480 为美国扫描型系统的分辨率标准^[2],为美国新一代通用组件 SADA I 和 SADA II 所采用^[2]。这些系统可以不用隔行来实现 4:3 和 16:9 的电视格式,或者只需要隔一行即可实现高清电视格式^[2]。

在 4×288 元红外焦平面阵列的基础上, Sofradir 公司推出了配用于美国陆军视线反坦克 (Line-of-Sight Antitank, LOSAT) 武器系统的 4×480 元红外焦平面阵列^[12]。 4×480 元红外焦平面阵列加上 4×288 元红外焦平面阵列,即可构成 8×768 元红外焦平面阵列,此时只需要进行一维扫描^[13]。当技术进步累积到一定程度时,其发展往往会呈现出加速的趋势。例如,在制作出 320×240 元红外焦平面阵列以后, Sofradir 公司很快就将产品更新至 320×256 元,然后又通过随机开窗处理,实现了 256×256 元正方形红外焦平面阵列,这是导引头应用中所需要的标准大小^[2]。有了 320×256 , Sofradir 公司再实现 $1/2$ 欧洲电视格式的 384×288 无疑就变得更加简单了。但是该公司接着并没有推出 768×576 元红外焦平面阵列,而是推出了 640×512 规格的产

品(注意:这基本上是一个美国标准),随后又推出了 1280×1024 规格的产品^[14]。文献[15]通过对 384×288 元红外焦平面阵列进行扫描,获得了 768×576 的分辨率。

顺便指出的是,LOSAT系统属于直(接)瞄(准)系统,与之相对的是非直瞄系统,例如美军近年来研发的非视线发射系统(Non-Line-of-Sight Launch System, NLOS-LS),其所配的精确攻击导弹(Precision Attack Missile, PAM)使用非致冷红外成像导引头,探测器为 640×480 元VO_x焦平面阵列^[16]。NLOS-LS系统是一种集装箱式导

弹发射系统,可以从指挥与控制中心接收目标信息;其末段采用非致冷红外成像导引头和半主动激光导引头,可提供一种平台独立的网络化精确打击能力。

4 目标光子数变化与距离相关性的概念性描述

光学系统可以等效为一个(薄)透镜。焦平面阵列通过透镜去看一个目标。如图7所示,设想从透镜的直径两端画两条平行于坐标轴的直线,这时可能会有以下三种情况:

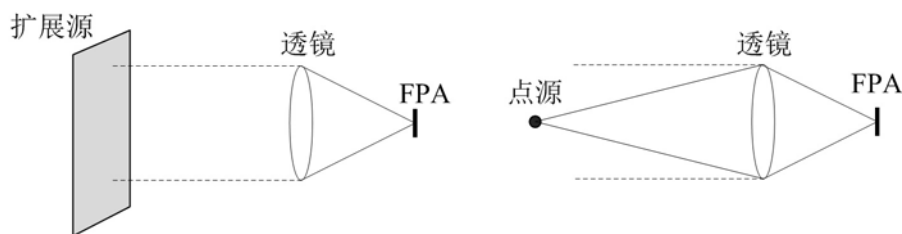


图7 扩展源和点源

(1) 两条直线均经过目标表面,说明目标离透镜很近,这时目标相对于透镜是一个扩展源。从直观上可以理解,投射到透镜上(随后又被透镜会聚到焦平面阵列上)的红外光子如同平行光入射一样,这时光敏面上所接收到的光子数与距离无关,即不论在哪个位置上,接收到的光子数都是一样的。

(2) 目标一直后退到远处,以至于呈现为一个点,这时目标相对于透镜是一个点源。距离越远,光敏面所接收到的光子数越少;距离越近,光敏面所接收到的光子数越多。因此,这时的光子数就引入了距离信息。

(3) 介于扩展源和点源之间的目标称为有限源^[17],如图8所示,其基本特点是目标投影小于透镜直径,同时又大于或者等于一个光敏元的尺寸。在一般情况下,都将有限源归于扩展源,对其不再细分。此时,虽然从目标投射到透镜上的光子数是与距离相关的,例如距离较近时投射到透镜上的光子数增加,但是这种效果随即由于目标成像面积扩大和占据的光敏元数量增加而被抵消,最终表现为光子数的变化与距离

无关。

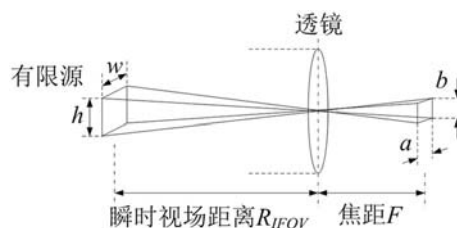


图8 有限源以及红外成像系统的瞬时视场距离

对基于目标与背景信号差值的红外成像,在同样的波长范围内,取差值后的光子数总是要变小的,而且该差值在本质上是由目标与背景之间的温(度)差(异)所决定的;如果目标与背景的温度相同,那么两者之间的光子数差值基本上为零(之所以说“基本上为零”,是因为光子发射具有随机性)。换言之,光子数差对应于温差。进一步来说,可以建立起温差与信噪比之间的关系,其中将信噪比等于1时的温差称为噪声等效温差(Noise Equivalent Temperature Difference, NETD),这就是众所周知的热灵敏度。也就是说,光子数是NETD或者热灵敏度的基础。

5 焦平面阵列格式与作用距离之间的定性关系

设光敏面为矩形, 其长度和宽度分别为 a 和 b , 它们的平面角 α 和 β 分别为

$$\alpha = \frac{a}{F}, \beta = \frac{b}{F} \quad (1)$$

式中, F 为光学系统的焦距。 α 与 β 的乘积为瞬时视场 (Instantaneous Field of View, IFOV), 即

$$\alpha\beta = \frac{ab}{F^2} = \text{IFOV} \quad (2)$$

IFOV 的大小反映了系统空间分辨率的高低。

设想在足够远处有一个目标向红外系统趋近运动。根据视觉经验可以理解为: 目标显现是一个感觉从无到有、面积从小到大的变化过程; 其中在某一位置上光敏元所看到的目标面积刚好是一个瞬时视场的面积, 如图 8 所示, 相应的距离称为瞬时视场距离, 记为 R_{IFOV} 。该位置是点源与扩展源的分界线。因为对顶角相等, 所以在水平方向上有

$$\frac{a}{F} = \frac{w}{R_{\text{IFOV}}} \quad (3)$$

式中, w 为目标宽度。另外, 在垂直方向上有

$$\frac{b}{F} = \frac{h}{R_{\text{IFOV}}} \quad (4)$$

式中, h 为目标高度。由式 (3) 和式 (4) 可以写出:

$$R_{\text{IFOV}} = \frac{wF}{a} \text{ 或者 } R_{\text{IFOV}} = \frac{hF}{b} \quad (5)$$

从式 (5) 中可以看出, 瞬时视场距离与光敏面的尺寸成反比; 降低光敏面的尺寸可以增加瞬时视场距离。

随着目标越来越远, 目标在焦平面阵列上的投影逐渐变大, 即所占据的光敏面积越来越大。在一般情况下, 设所占的光敏面积为 $A_{t,p}$, 目标面积为 A_t , 则有

$$\frac{A_{t,p}}{F^2} = \frac{A_t}{R_t^2} \quad (6)$$

$$R_t = F \sqrt{\frac{A_t}{A_{t,p}}} \quad (7)$$

因为 $A_t = w \times h$, 所以当 $A_{t,p} = a \times b$ 时, $R_t = R_{\text{IFOV}}$, 即为式 (3) 或式 (4) 的结果。

式 (7) 只是一个几何意义上的表达式, 或者说它给出的是距离的理论值。红外成像的特殊性是, 对于光敏元所看到的区域, 人眼是感受不到的; 人眼看到的只是红外光子经过转换以后在显示屏幕上所形成的具有不同灰度值的像素; 决定灰度值有无变化的是落在光敏元上的红外光子数, 而不取决于目标所对应的瞬时视场的数量大小; 换言之, 即使目标上已经对应有较多的光敏元, 如果光子数量不足, 红外成像系统的显示器上仍然看不到目标。

作为一个讨论, 首先需要考虑光子数没有衰减的情况, 这时可以分为:

(1) 距离非常远, 以至于没有一个光子落在光敏元上, 如图 9(a) 所示。这时目标是不可探测的, 相应地, 屏幕上没有出现灰度值变化的像素。

(2) 目标趋近, 光敏元开始接收到第一个红外光子, 这时可能有以下情况:

(a) 光敏元具有单光子放大机制, 例如增益大到一定程度的雪崩光电二极管。这时即使一个红外光子也会产生可读出的电信号, 进而反映为像素灰度变化, 否则就要等到累积到足够数量的红外光子为止。

(b) 若不是单光子探测器, 则要累积足够数量的红外光子。此时, 要么是等待累积, 要么是目标继续靠近光敏元。例如, 假设每一个红外光子都可以转换为一个电子电荷量 q ($q=1.6 \times 10^{-19}$ C= 1.6×10^{-19} A·s), 并且可检测的电流阈值为 1 pA ($=10^{-12}$ A), 则 1 pA 电流所对应的红外光子数为

$$\tilde{P} = \frac{10^{-12}}{1.6 \times 10^{-19}} = 6.25 \times 10^6 \text{ (个} \cdot \text{mm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1})$$

$\tilde{P}$ 值即为产生一个阈值电流所需要的最小光子数, 称为阈值光子数。只有当外来的红外光子数等于或者大于阈值光子数时, 显示器上才会呈现出像素灰度值变化。显然, 阈值光子数所对应的距离是最远探测距离, 图 9 中记为 R_1 。

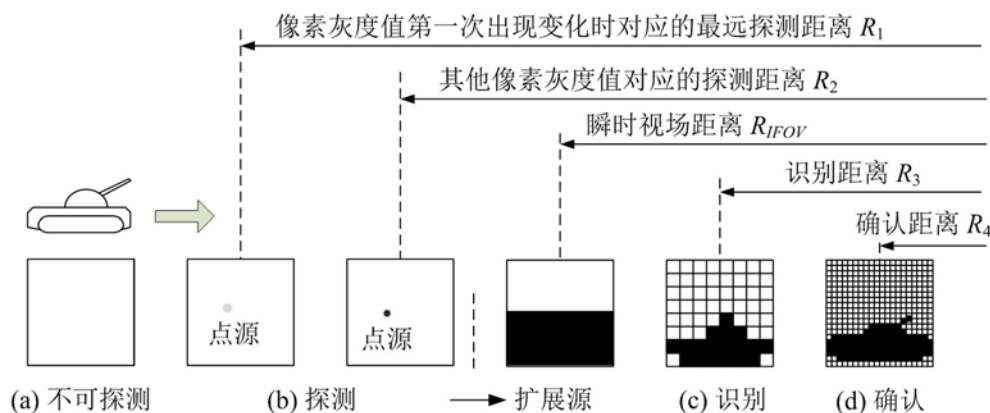


图 9 运动目标在红外成像系统上的出现过程

(c) 如果光敏面变小, 由于落在光敏面上的光子数减少, 相应地, 目标只有再往前移才能累积出阈值光子数。换言之, 最远探测距离 R_1 会随着光敏面的变小而减小。所以用于探测点源目标的焦平面阵列的光敏元尺寸通常设计得较大, 大体上与光学系统的光斑大小相当^[18]。

(d) 在红外图像中, 当灰度差小于 5 时, 人眼是无法分辨的^[19], 所以还必须等到目标再靠近些时, 人眼才能感受到屏幕上某点的灰度发生了变化。此后, 随着过来的光子数的增多, 该点会逐渐变亮, 此时的探测距离记为 R_2 ; 但是因为还在瞬时视场距离之外, 所以只有一个像素的灰度值在变化, 这时只能简单地判断出有个东西在某处。这样的信息可能是没有用的, 除非它还有另外的空间特征信息, 比如移动速度和方位变化等。这方面的典型例子是导弹预警卫星对弹道导弹的跟踪。

(3) 距离上总会有某一位置可使目标在焦平面阵列上的投影面积刚好占据一个像元, 此时的距离即为瞬时视场距离 R_{IFOV} 。

(4) 自 R_{IFOV} 以后, 随着目标投影所占光敏元数的增加, 显示器上出现的灰度变化的像素也就越来越多, 并逐渐成片、成形。当灰度区域大到一定程度时, 就可知道目标是一辆坦克。此时的距离称为识别距离, 图 9 中记为 R_3 。

(5) 随着细节信息的逐渐增多, 可以确认是哪一种类型的坦克, 相应的距离称为确认距离, 图 9 中记为 R_4 。对于目标确认来说, 为了区分

出形状和特征, 目标上至少需要有 12 个或者更多个像素^[3]。

(6) 上述过程没有考虑目标光子数的衰减。在实际情况下, 特别是在战场条件下, 水蒸气、雾霾、烟尘以及其他大气微粒所产生的吸收和散射会使目标光子数降低。假设坦克在驶向红外成像系统的过程中要穿过一个红外隐身烟雾区域。在没有穿过烟雾区之前, 尽管目标的投影面积已经覆盖了焦平面阵列的多个光敏元, 但是由于目标光子数的衰减, 显示器上的像素灰度值并没有发生变化, 即看不出有目标存在。而一旦目标驶出烟雾区, 由于光子数不再被衰减, 显示器上会立即出现可辨识的目标图像。

(7) 在同样的芯片尺寸下, 减小光敏面尺寸可以增加焦平面阵列的像元密度。以图 9 为例, 假定确认距离为 2 km, 识别距离为 4 km。光敏面减小后, 在 3.5 km 处即可获得图 9(d) 所示的显示效果, 说明确认距离从原来的 2 km 增加到了 3.5 km。这一距离上的增加完全是由于显示像素数量增多以及有利于观察者主观分辨判断所致。若作进一步描述, 可以导出最小可分辨温差 (Minimum Resolvable Temperature Difference, MRTD) 等量化指标。类似地, 识别距离也会有所增加。

(8) 上述分析是以相同的时间尺度为前提的。微扫描可以在不减小光敏面尺寸的同时提高系统的空间分辨率, 使得细节信息得以增加, 因此可以提高系统的识别距离和确认距离。但是这种效果是以处理时间为代价而获得的。

6 结束语

直观地看,如果能够制作好一个单元探测器,那么只要在水平方向和垂直方向上不断地复制单元探测器,就可以实现大规格焦平面阵列。但是具体到工艺实践中,则会受到一系列限制条件的制约。例如,点源焦平面阵列希望具有较大的光敏面,而半导体材料晶片的大小是一定的,这就可能难以在单一晶片上同时满足大光敏面和高密度的要求。解决这一矛盾的途径就是拼接。减小像元中心距可以在既有晶片尺寸的限制下扩大焦平面阵列的规格。中心距减小意味着光敏元尺寸降低,瞬时视场变小,空间分辨率增加,识别距离和确认距离得到改善。但是减小中心距提高了对光刻等加工制备工艺的要求。

用于探测点源目标的焦平面阵列属于战略焦平面阵列,而用于探测扩展源目标的焦平面阵列则属于战术焦平面阵列^[20]。由于受平台数量的限制,战略焦平面阵列的需求量一般较少,但是它们对包括可靠性在内的各项性能指标要求极高^[21]。例如,战略焦平面阵列对像元均匀性的要求比战术焦平面阵列高得多,因为性能衰减的像元或者盲元可能会完全错失目标。而战术焦平面阵列的需要量较大,成本也较低。它们通常可以容忍一些性能衰减的像元甚至盲元,而不会影响系统功能的发挥。在同类材料和工艺的前提下,战略焦平面阵列和战术焦平面阵列的研发工作是相辅相成的。一方面,战略焦平面阵列中所用的新技术和新工艺可以扩散为战术焦平面阵列所用;另一方面,战术焦平面阵列在量产中所形成的可靠性经验可以移植到战略焦平面阵列当中^[21]。

另外还可以预料,由于电视格式基本固定,在战术焦平面阵列实现全帧格式以后,其规格进一步增加的势头即使不是停止,也必将会趋缓。但是另一方面,因为焦平面阵列的规格越大,其居高临下而一次看到的面积就越广,所以战略焦平面阵列将会继续向超大规格发展。

参考文献

- [1] Miller J L. Principles of Infrared Technology, A Practical Guide to the State of the Art [M]. New York: Chapman and Hall, 1994.
- [2] Miller J L, Wiltse D J. Benefits of Microscan for Staring Infrared Imagers [C]. *SPIE*, 2004, **5407**: 127-138.
- [3] Horn S, Norton P, Cincotta T, et al. Challenges for Third-generation Cooled Imagers [C]. *SPIE*, 2003, **5074**: 44-51.
- [4] Lanfrey D B, Trinolet P, Pistone F, et al. New IR Detectors with Small Pixel Pitch and High Operating Temperature [C]. *SPIE*, 2010, **7854**: 78540M.
- [5] Schlessinger M, Chan W S. Design Requirements for Large-scale Focal Planes [C]. *SPIE*, 1981, **282**: 2-14.
- [6] Bercier E, Dessus J L, Manissadjian A, et al. State-of-the-art of Mass Production: Challenges for Low-cost and Application Benefits of High-performances Small-pitch IR Detectors [C]. *SPIE*, 2008, **6940**: 69400I.
- [7] Driggers R G, Vollmerhausen R, Reynolds J P, et al. Infrared Detector Size: How Low Should You Go? [J]. *Optical Engineering*, 2012, **51**(6): 063202.
- [8] Thorne P, Weller H, Hipwood L G. 12 μm Pixel Pitch Development for 3-side Buttable Megapixel MW FPAs [C]. *SPIE*, 2012, **8353**: 83532J.
- [9] Black S H, Sessler T, Gordon E, et al. Uncooled Detector Development at Raytheon [C]. *SPIE*, 2011, **8012**: 80121A.
- [10] Vuillermet M, Minassian C, Pitault B, et al. First MPQ IRFPA Results Using LCR/SOFRADIR Technologies [C]. *SPIE*, 1998, **3436**: 257-269.
- [11] Fieque B, Chorier P, Terrier B. Sofradir Detectors for Hyperspectral Applications from Visible up to VLWIR [C]. *SPIE*, 2010, **7826**: 78261I.
- [12] Kraus J P, Dietz J P, Chatard J, et al. Development and Demonstration of the SOFRADIR 480 $\times$ 4 Infrared FPA for the LOSAT Second-generation FLIR [C]. *SPIE*, 1994, **2269**: 524-539.
- [13] McDonald J, Crawford S, Craig R, et al. STAIRS C: Production SXGA Thermal Imaging [C]. *SPIE*, 2003, **4820**: 469-478.
- [14] Vuillermet M, Lanfrey D B, Reibel Y, et al. Status of MCT Focal Plane Arrays in France [C]. *SPIE*, 2012, **8353**: 83532K.
- [15] Fritze J, Munzberg M, Schlemmer H. Innovative Optoelectronics for the New PUMA Tank [C]. *SPIE*, 2010, **7660**: 76600A.

(下转第 28 页)