

人眼和微光夜视仪

丰耕毅

(中国科学院生物物理研究所)

人眼是一个很好的图象检测器。人眼网膜的感受器有两种：视锥细胞和视杆细胞。视锥细胞分辨本领高，有色觉，但是灵敏度低，适用于明视觉；视杆细胞灵敏度高，但分辨力差，色盲，适用于暗视觉。

在正常照度下，人眼检测目标的效果主要受网膜感受器密度和其光学系统象差的限制。而在微光下，目标照度很低，人眼的局限性表现在灵敏度和光谱响应方面。

一、微光下影响人眼分辨力和视距的客观因素

除了眼睛本身的因素外，微光下眼睛直接观察目标时，目标的亮度，目标和背景的衬度是直接影响人眼分辨力和视距的主要因素。低照度下的量子“噪声”，相当于降低了目标和背景的衬度。

从晴天满月到密云无月，夜天光对地面目标造成的照度为：

$$2 \times 10^{-1} - 2 \times 10^{-4} \text{ (勒克司)}$$

如果夜间漫反射系数为0.4，那么目标相应的亮度为：

$$2.5 \times 10^{-6} - 2.5 \times 10^{-9} \text{ (熙提)}$$

而暗适应下，人眼对光斑的绝对视觉阈的可靠值为：

$$2 \times 10^{-7} - 5 \times 10^{-7} \text{ (熙提)}$$

可以看出，夜间目标的亮度接近或低于人眼的绝对视觉阈，尤其在密云无月的夜晚。因而直接用肉眼观察目标很困难。

另一方面，白天太阳是主要的光源，照到目标上的光线具有强烈的方向性，景物衬度很高。而在夜间，尤其是无月夜间，光线均匀而柔和，

被景物漫反射后，衬度比白天要低得多。

微光下用“兰道耳特”C型圆环对人眼进行实验获得的结果，有助于说明亮度对人眼分辨力和视距的影响。“兰道耳特”C型圆环为全黑色，背景为均匀亮背景（即衬度为100%）。如果给定的C型圆环缺口对人眼的张角为 α ，背景亮度为 B ，那么为了保持视觉所要求的最小“信噪比”，必须服从下述规律：

$$\alpha^2 B = \text{常数}$$

即网膜成象面积(α^2)与目标亮度(B)之积为一常数。

因为
$$\alpha = \frac{H}{L}$$

其中 H 为C型圆环缺口的线度； L 为缺口到眼睛的距离。

所以有： $L = K\sqrt{B}$ ，其中 K 为常数。

实验结果说明，目标亮度越低，人眼分辨力越差（分辨角越大），视距越小。

如果减小圆环和背景的衬度，那么为了保证视觉所需的最小“信噪比”，则圆环缺口对人眼张角必需进一步增大，即圆环到人眼距离进一步减小。

一般情况下，如果不考虑大气的吸收和散射，那么景物亮度越低，衬度越小，则眼睛的分辨力越差，观察距离越近。这是由于微光下景物发出的光子减少，涨落增大，因而“信噪比”降低。

二、微光下人眼怎样从“噪声”中提取“信号”？

微光下目标的光子发射为一随机过程。从量子发射观点出发，低照度下的目标图象和眼

睛网膜一样,都是不连续的。

被观察目标在单位时间内单位面积上发出的光子数,与目标的表面亮度成线性比例。

单位时间内被人眼所接收的目标发出的光子数,与两个因素有关:

1. 眼睛和景物发光面的距离;
2. 人眼瞳孔直径大小。

显然,人眼离目标越远、瞳孔越小,在单位时间内到达网膜单位面积上的平均光子数 N 越少。

在微光、“信噪比”较低的情况下,这种平均光子数的涨落的均方根值为 $\sqrt{N}$,这就是“噪声”。 N 越小,涨落的均方根 $\sqrt{N}$ 所占的比例越大,因而“信噪比”越小,观察目标越困难。

为了补偿微光下“信噪比”的降低,人眼由明适应进入暗适应,由视锥细胞起作用过渡到视杆细胞起作用,提高了对微光的感受灵敏度。瞳孔也尽量开大,以便多收集目标发出的光子。如果仍然不能识别目标,那么黑暗中人就不自觉地趋近目标,以增大目标对眼的张角,提高空间积累作用,即在网膜的更大面积上积累目标发出的光子。同时,夜间人眼对目标运动的灵敏度也下降,以便有较长时间在网膜上积累光子,这就是时间积累。

尽管微光下人眼采取种种办法补偿图象“信噪比”的下降,然而当景物亮度接近或低于人眼的绝对视觉阈时,“信号”将“湮没”于“噪声”中,以至于不借助夜视仪,就根本无法识别目标。

三、借助微光夜视仪为什么可以大大改善夜间人眼的观察效果?

首先,微光夜视仪都有一个光学性能优良的望远镜系统,它的物镜口径比人眼要大得多(暗适应下,人眼瞳孔的最大直径仅有八毫米)。因此,微光夜视仪具有比人眼高得多的集光力,接收到的目标象的“信噪比”也比人眼高得多。

其次,象增强器比人眼的量子效率高。级联式微光象增强器中的多碱阴极(如 S-20, S-25)和最近报道的 III-V 族半导体化合物阴

极,不但比人眼量子效率高得多,而且有较好的近红外响应,这对接收由目标反射的峰值在近红外的夜天光是非常重要的。

第三,微光夜视仪具有很高的光增益,这样就使得在夜间利用明视觉人眼的高分辨力成为可能。另外,微光夜视仪通过适当的光转换,可以选择观察屏上目标象的亮度、衬度及颜色,与低照度下人眼的生理光学特性相匹配,以满足最优观察条件。

最后,微光夜视仪中光阴极的有效接收面积比人眼网膜要大很多,这样就可以适当缩短图象在光敏面上的累积时间,提高仪器对运动目标的灵敏度,这对夜间观测低空高速飞行器极为重要。

总之,微光夜视仪有比人眼高的集光力,量子效率和光增益,有比人眼大的光敏接收面,因而补偿了微光下人眼灵敏度和光谱响应方面的不足,提高了接收到的目标象的“信噪比”,所以大大提高了观测能力。

四、微光夜视仪简介

夜视仪种类很多,分类方式也不同。根据观察方式,可分成直接观察和间接观察系统;根据接收器件有无主动照明光源,分成主动式和被动式接收;根据接收光谱成分,分成微光和红外等等。

主动式夜视仪,如红外夜视仪,是用人眼看不见的红外线将被观测目标照明,然后具有红外光敏阴极(如银氧铯阴极)的变象管将由目标反射回来的红外线转换为可见光,并使图象增强,被人眼所接收。

主动式夜视仪机动性好,图象清晰度高,不怕强光。但是,作用距离近,容易暴露,尤其当对方备有红外接收器时。

被动式夜视仪直接接收目标的微光象,荫蔽性好,作用距离较远。由于本身不带光源,所以,体积缩小,重量减轻。但被动式一般怕强光,受天气影响大,机动性较差,清晰度不高。

被动式也有红外(如所谓“热成像”系统,利用物体在自然温度下发出的红外射线,获取需

要的信息)和微光之分。微光夜视仪又可分为直接观察和间接观察两类。

1. 直接观察微光夜视仪

在绝对视觉阈附近,借助纯光学系统,如夜用望远镜,已不能明显地提高人眼的视觉敏锐度。特别是在无月密云的夜晚,纯光学系统对光的吸收甚至损失掉了大量的有用光子。微光象增强器的敏锐度曲线更趋向低照度,借助它,人眼可以明显地提高视觉敏锐度,大大改善观测效果。

一般象增强器主要由四部分构成:质量优良的望远物镜;电子光学象增强、转换系统、目镜系统和供电系统。电子光学部分又有静电聚焦和磁聚焦两种。

直接观察微光夜视仪有多种,如串联式和级联式、固体型、微通道板型等。

串联式和级联式的区别,仅仅在于耦合方式的不同。级联式采用光学纤维面板耦合,代替串联式的云母片耦合。它减少了象差,改善了管子的传递调制性能,同时也简化了工艺,是目前较成熟的所谓第一代产品。串联和级联一般由三级构成,光阴极采用多碱阴极和铯铷阴极。

固体象增强器利用光导层的内光电效应,使场致发光粉发光,达到光增强的目的。它突出的优点是体积小、结构牢靠、重量轻。如果能解决透镜系统小型化问题,可做成极为轻便的夜视眼镜。固体象增强器的灵敏度和反应速度,目前还不能满足实用要求。

微通道板象增强器利用微通道管中的二次电子倍增原理,达到了极高的光增益。微通道板厚度只有几毫米,体积小,并可以防强光。此种象增强器即所谓第二代产品。

2. 间接观察微光夜视仪

微光电视就是一种间接观察微光夜视系统。它由聚光物镜、光放大级、显象装置和电子线路组成。

微光电视是利用电子检读装置,把由增强的光学象所形成的电子“象”转换成视频信号。这种视频信号可以在另一地点显示,以供间接观察。

微光电视显示屏大,不用目镜,可供多人同时观察和研究,还可对视频信号进行信息加工。它的不足之处,是系统带来的附加噪声和图象的滞后现象。

微光电视的核心是成象器件,有正析象管、超正析象管、光导管、分流管、二次电导管、硅靶管等多种。管子的核心是累积靶,靶依照图象积累电荷信号,扫描电子束析读靶上的电荷信号,输出视频信号,供扫描显示。

* * *

夜视仪是一种助视系统,最后的图象检测器还是人眼。人眼在人的生活中占有极重要地位,差不多百分之九十的信息是由眼睛获得的。

人眼和其它动物视觉系统除了接收目标图象信息外,还对图象信息进行加工,这是区别于一般夜视器件的重要特点。例如,人眼的 Mach 效应;深海中低照度下生活的鲎,它的复眼中小眼间的侧抑制现象;夜间活动的猫等动物眼睛的“on-off”效应;以及其它动物视觉系统的边缘反差现象,都类似于对低“信噪比”图象进行了不同程度的空间微分和时间微分,突出了图象的轮廓,提高了边缘反差。事实上,微光下的目标象由于缺乏足够的信息提供给细节部分,因此,轮廓就是微光图象最重要、最基本的信息。所以,动物视觉系统识别低“信噪比”图象的原理,对于微光图象的信息加工,具有一定参考价值。

此外,视觉系统绝对视觉阈的存在,增加了抗“噪声”能力,网膜的积累效应提高了微光图象的“信噪比”。

因此,研制和改进夜视仪时,有必要对人眼的低照度生理光学特性和动物视觉系统信息加工原理予以注意。