

关于微光像增强器的品质因数

周立伟

(北京理工大学 信息科学与技术学院, 北京 100081)

摘要:20 世纪 60 年代以来,微光夜视像增强器的技术进步一直是以“代”来评价的。通常理解是一代比一代优越。20 世纪,在微光夜视像增强器发展的过程中,相继出现 60 年代的纤维光学面板级联耦合的像增强器(第一代),70 年代的微通道板像增强器(第二代)和 80 年代的 GaAs 负电子亲和势光阴极像增强器(第三代)。从事夜视技术的科学家们一直在探索新一代或第四代像增强器技术。什么是第四代,在夜视学术界是有争论的。问题在于,像增强器以代来划分,以代来评价,是否合适和全面;评价像增强器的优劣是性能还是技术;以什么表示像增强器的性能更好和更全面;这些问题引起了夜视学术界的深思。文中阐述了微光像增强器总体性能应以品质因数而不是代的概念进行评价。

关键词:微光夜视; 像增强器; 纤维光学级联耦合像增强器; 微通道板像增强器;
GaAs 负电子亲和势光阴极像增强器; 品质因数

中图分类号:TN223 **文献标识码:**A **文章编号:**1007-2276(2004)04-0331-07

On figure of merit of low light level image intensifiers

ZHOU Li-wei

(School of Information Science and Technology, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China)

Abstract: Since 1960s, the technological progress of low light level night vision technology has always been evaluated by “generation”. According to usual understanding, the second generation is better than the first generation, and the third generation is superior to the second generation. In 20th century, during the developments of image intensifiers for low light level night vision (LLLNV), the first generation fiber optical cascade coupled image intensifier in 1960s, the second generation image intensifier with microchannel plate (MCP) in 1970s, the third generation image intensifier with GaAs negative electron affinity (NEA) photocathode in 1980s, appeared one and another. The new generation image intensifier or the fourth generation image intensifier has been continuously explored by scientists engaged in night vision technology. But, for the image intensifiers, what is the fourth generation, what can be called the fourth generation, it has some arguments in the night vision academic circle. The problems are as the following: whether or not it is appropriate and comprehensive for the image intensifiers to be divided by “generation” and evaluated also by “generation”; what is exactly when we evaluate an image intensifier by use

收稿日期:2004-04-10; 修订日期:2004-06-08

作者简介:周立伟(1932-),男,浙江诸暨人,中国工程院院士、教授,长期在宽束电子光学、夜视技术及光电子成像领域从事教学与科研工作,研究方向为静态和动态宽束电子光学的理论与计算机辅助设计。发表学术论文、科技报告 200 余篇,学术专著 4 部。

of the performance or the technology; and what is better and more comprehensive for expressing the performance of an image intensifier. All these problems have been paid attention by night vision academic circle. The present paper shows that the overall performance of low light level image intensifiers should be evaluated by the "figure of merit", rather than by the concept of "generation".

Key words: Low light level night vision (LLNV), Image intensifiers; Fiber optical cascade coupled image intensifier; Image intensifier with microchannel plate (MCP); Image intensifier with GaAs negative electron affinity (NEA) photocathode; Figure of merit

0 引言^[1]

20 世纪 60 年代出现的纤维光学级联耦合微光像增强器,利用夜间微弱的星光和月光,不需红外探照,完全被动式,隐蔽可靠,称为第一代微光夜视。第一代微光夜视仪投入越南战场后取得了很好的战术效果。70 年代,微通道板作为电子倍增器件的出现形成了第二代微光夜视技术,使夜视仪结构更为紧凑,质量轻且性能更优,甚至可做成夜视眼镜。80 年代,高灵敏度的 GaAs 负电子亲和势光阴极的出现形成了第三代微光夜视技术,它可以在更暗的夜间观察。特别是美国国防部的 Omnibus I、II、III、IV、V、VI 计划改进第二代、发展第三代、研制第四代的计划,使微光夜视更上一个台阶。与此同时,超二代微光夜视技术在灵敏度和信噪比方面的提高使其性能可与第三代技术竞争和抗衡。

长期以来,微光夜视像增强器技术的进步一直是以“代”来划分,以“代”来评价。“代”通常是技术的跳跃、进步及时序的表述,并伴随着性能的提高。但是,“代”是一个模糊的概念。技术的跳跃和进步并不意味着性能一定会同步提高。像增强器的总体性能以什么表示更为全面和科学。本文对微光夜视技术近期发展进行述评,进一步阐述用微光像增强器的“品质因数”作为评价其性能的新标准,而不是用笼统的“代”的概念。

1 一、二、三代微光夜视技术的发展概述^[1~5]

1955 年, A. Sommer 发现,若将 Na_2KSb 双碱光阴极进行铯处理,所形成的 $\text{Na}_2\text{KSb}(\text{Cs})$ 三碱光阴极

(S-20) 具有很高的灵敏度,且在可见光波段直到近红外有很好的光谱响应。加上 20 世纪 50 年代末期 Kapany 发明的纤维光学和 50 年代初期 P. Schagen 研究的同心球电子光学系统。这一新的光电发射体使低照度下图像增强成为可能。到 60 年代中期,以纤维光学面板作为输入、输出窗三级级联耦合的像增强器问世,称为第一代像增强器(一代管)。极微弱的目标图像通过光学系统成像在纤维光学输入窗上,传输到光阴极,电子光学系统将自光阴极逸出的光电子加速并聚焦到荧光屏上,形成可见光的输出图像;图像通过纤维光学传输到下一级。经过三级增强,使一代管具有很高的增益,从而可在微光下“被动”工作。这样,对于一个夜视望远镜,大口径物镜所捕捉的光能通过像增强器进一步增大了投入人眼的光通量。由于视网膜上的照度被提高,所获得的信息流也就增高,便能看到比较清晰的外界景物。显然,这是在视觉上对黑暗的又一个重大突破。

表 1 第一代像增强器的典型数据

Tab. 1 Typical characteristics for the first generation image intensifiers

Characteristics	The first generation image intensifiers $25/25 \text{ mm}^{-1}$		
	Single stage	Two stages	Three stages
Gain	80	4000	50000
Resolution/ lp mm^{-1}	65	40	25
Distortion/%	6	14	17
Effective diameter at exit end/mm	25	24	23

第一代像增强器不用照明源,全被动方式工作,隐蔽性好,增益高,成像清晰,可作为重武器和装甲车辆的微光观察镜、瞄准镜以及远距离夜间观察装置。但它的防强光性能差,特别是当战场上出现强闪光

时,整个画面出现光晕和开花,观察不到目标,在战火弥漫的战场上难以使用;且体积大、笨重,限制了它在轻武器、头盔镜上的应用。

第二代微光夜视像增强器(二代管)的研究始于20世纪60年代,是从探索新的电子倍增器件——微通道板(MCP)开始的。一代管的笨重是由三级级联引起的,每一级具有畸变、渐晕以及荧光屏的余辉,并由于前后两级级联间光纤的串光,引起图像的模糊,其清晰度难以提高,特别是防强光性能差,这是它的最大缺点。为克服这一缺点,人们经过10余年的探索,于20世纪70年代初成功地研制了能实现电子倍增的二维元件——微通道板,它由上百万个紧密排列空心通道管组成。通道芯径间距约 $12\ \mu\text{m}$,长径比为 $40\sim 60$,对于有效直径为 $18\ \text{mm}$ 的MCP,它的大小像壹角钱的硬币,但更薄一些,约有130万根通道($1\ \text{mm}^2$ 内有5000根通道)。通道板的两个端面镀膜,构成输入和输出电极。通道的内壁具有较高的二次发射特性,入射到通道的初始电子在电场作用下使激发出来的二次电子依次倍增,从而在输出端获得很高的增益。

第二代微光夜视像增强器的长度仅为第一代三级级联耦合像增强器的 $1/5\sim 1/3$,质量轻、畸变小、鉴别率高;能防强光和自动控制亮度。当遇到强光如照明弹与炮火时,虽有光晕,仍不妨碍观察。二代微光夜视的作用距离较一代微光夜视提高约 $1.2\sim 1.5$ 倍。

20世纪80年代中期,美国成功研制了负电子亲和势(NEA)GaAs光阴极型微光像增强器(三代管),使夜视下应用的视距提高约50%。第三代像增强器是在二代薄片管的基础上,将 $\text{Na}_2\text{KSb}(\text{Cs})$ 三碱光阴极置换为GaAs负电子亲和势光阴极。第三代微光夜视像增强器具有高灵敏度、高鉴别率、宽光谱响应、高传递特性和长寿命,且结构紧凑、能与二代管互换等优点。能充分利用夜间自然光,在 $10^{-3}\ \text{lx}$ 或更低的光阴极照度下,更为灵敏和有效。三代夜视仪的作用距离较二代夜视仪提高了30%以上。

大多数三代光阴极的光谱响应为 $500\sim 900\ \text{nm}$ 。图1示出了S-25、超S-25、GaAs光阴极的光谱响应曲线。90年代初,负电子亲和势光阴极又有新的进展,出现了向蓝延伸和向红延伸的NEA光阴极,分别被称为蓝加强NEA光阴极和红加强NEA光阴极,其灵敏度和光谱响应又有大幅度的提高和改善。

此外,还有向红外延伸的光阴极,其光谱区可延伸到 $1100\ \text{nm}$,这便可以观察由Nd:YAG激光器测距仪和目标定向器所发射的 $1.06\ \mu\text{m}$ 的激光。

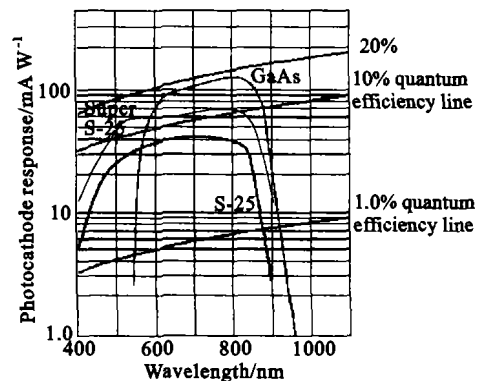


图1 S-25、超S-25(超二代),GaAs(三代)光阴极的光谱响应
Fig. 1 Spectral response for S-25, super S-25 (super-second generation), GaAs (third generation) photocathode

2 超二代微光:提高灵敏度与信噪比^[6,7]

如上所述,三代管的飞速进展主要是采用了GaAs负电子亲和势光阴极。那么,有没有可能在二代管的各部件如光阴极、微通道板、荧光屏以及结构上挖掘潜力,改进性能,从而提高二代管的水平,增大观察视距呢?答案是肯定的。

提高灵敏度和改善光谱响应的目的是获得一个更好的信噪比。高信噪比说明可允许降低对目标探测、识别所需的最小环境光的要求;或者说可在更低的环境光的条件下进行探测与识别。鉴别率乃是分辨目标细节的能力。在像增强器的发展中,鉴别率的提高是研究的重点。我们把给定对比度的鉴别率线条图案投射到光阴极上,通过微光像增强器成像后,荧光屏上每毫米黑白相间条纹的最多线对数定义为鉴别率。鉴别率以阴极面上能分辨每毫米最密的条对数(lp/mm)表示。当在月光或星光的条件下,管子的极限鉴别率(它实际与调制传递函数(MTF)相对应,即鉴别率愈高,其相应的调制传递函数也愈好)是影响整个系统性能最关键的参数。管子鉴别率的提高取决于许多因素,如微通道板孔径的大小、荧光粉颗粒的细度、输入光纤面板、输出扭像器的光纤孔径的尺寸等。这里,微通道板孔径的大小是一个重要的参量。

在带有微通道板的像管中,增大(S/N)输出有赖于提高光阴极的白光灵敏度和改善微通道板的质量

以减小噪声因数。三代管有很高的白光灵敏度,且红外区有很高的光谱响应。但是,为了要与 NEA 光阴极相容,微通道板不得不进行强烈的清洁处理。这种处理减小了二次发射系数,从而增大了噪声因数。其次,在三代管的微通道板上镀上一层大约 $0.75 \mu\text{m}$ 厚的 Al_2O_3 或 SiO_2 离子隔离膜。这层薄膜固然保护三代管的稳定性和可靠性,但俘获了来自光阴极的低能电子,且后向反射了部分电子,降低了微通道板的电子收集率,从而使噪声因数有明显的增加。这样,噪声因数的增大部分地抵消了三代管光阴极的高灵敏度。

90 年代初,二代管在传统的多碱光阴极的灵敏度上取得突破(灵敏度由 $300 \mu\text{A}/\text{lm}$ 提高到 $700 \mu\text{A}/\text{lm}$),通过减小微通道板噪声因数来提高输出信噪比(改进微通道板的性能)。同时改进管子结构和整管的 MTF,出现了高灵敏度、高性能的二代管,称为超二代管。其效费比好,鉴别率和输出信噪比接近三代管的水平,使用效果与标准的三代管接近。最新的结果是在 18 mm 二代管中,用 $6 \mu\text{m}$ 孔径的 MCP,鉴别率达到 $57 \text{ lp}/\text{mm}$,与 Omni IV 18 mm 三代管的 $64 \text{ lp}/\text{mm}$ 相接近。三代管在性能上虽有很大的改进,与二代管相比,作用距离增加了 30% ,但工艺复杂,价格昂贵。降低成本、提高效费比是三代管面临的重大任务。表 2 给出了二代管、超二代和三代管的特性比较。

表 2 二代管、超二代和三代管的特性比较

Tab. 2 Comparison of characteristics for the second generation, super-second generation, and the third generation image intensifiers

	Gen II	Super Gen II	High performance super Gen II	Gen III	High performance Gen III
Sensitivity/ μmlm^{-1}	240~350	500~700	700~800	800~1000	1300~2400
Resolution/ lp mm^{-1}	32	40~55	60~64	40	45~64
SNR @ 10^{-1} lx	14	21	22	14~21	21~25
Lifetime/h	2000	10000	15000	10000	15000
Price/\$	~2200	~2700	~3200	~3500	~5500

3 四代微光像增强器的探索^[8~10]

四代微光像增强器的探索经历了很长的时间。

如何使光阴极向红外波段延伸,于是出现了两种光阴极微光管的尝试。

(1) InGaAs/InP 传输电子近红外($0.9 \sim 1.06 \mu\text{m}$)光阴极微光管^[11,12]。光阴极结构为 P-InP(衬底)/P-In_{0.33}Ga_{0.17}As(吸收层)/O-InP(发射层)/Ag(场助极)/Cs₂O(NEA)层,其特点是:近红外高灵敏度光阴极,在 $1.06 \mu\text{m}$ 处有很高的辐射灵敏度(量子效率)。

(2) PbTe/PbSnTe 复合列阵式红外光阴极微光管(STIRP)($8 \sim 14 \mu\text{m}$ 或 $3 \sim 5 \mu\text{m}$)——热红外变像管。像管原理结构与三代管类似,但 STIRP 采用复层结构,它由两部分组成:一个光电二极管镶嵌列阵(光电二极管一般是外延的 PbSnTe/PbTe 异质结构,该镶嵌列阵可在 $3 \sim 5 \mu\text{m}$ 或 $8 \sim 14 \mu\text{m}$ 波段下工作)和一个金属-半导体-金属(MIM)冷阴极电子发射体构成所谓“复合式热红外光阴极”。

尽管这两种光阴极具有灵敏度高,向红外延伸等特点,但与二代的多碱光阴极、三代的 GaAs 光阴极完全不同,工艺上不兼容。同时,人们还逐渐明白了提高器件特性最重要的是两个指标:高信噪比和高鉴别率。既然二代能发展到超二代、高性能超二代,那么三代更有发展的潜力;也许改进二代和三代可以达到所期望“四代”的指标,而这种改进工艺完全与二代、三代工艺兼容。三代的弱点是在微通道板的入射端涂敷一层 Al_2O_3 薄膜,它起着壁垒的作用,以防止离子的反馈,缩短器件的工作寿命。因此制作了一种不镀膜或无膜的三代像增强器。

1998 年, Northrop Grumman 公司制造出一种不镀膜的像增强器,这种管子在非常低的阴云星空下工作很有效。此外还有一个重大的进展,即选用自动的选通(Auto-gate)电源代替了常用的连续电源。在自动选通时,光阴极在高速下时开时关,降低了强光下微通道板中的电子流,阻止其饱和并避免图像模糊。因此,当通过夜视头盔镜观看夜间景物,遇到强光如照明弹、炮火以及车灯照明时,自动选通也帮助减少光晕或图像开花。对于直升机飞行员来说,自动选通和低光晕是极为重要的,因为他会遇到各种各样的光照情况;同样,对于城市环境,时而黑暗、时而强光的区域,自动选通和低光晕也是十分重要的。图 2 为在强光照射下标准三代光晕与无膜四代无光晕的比较。

2001 年,ITT 公司在三代中引入了一种薄膜管,

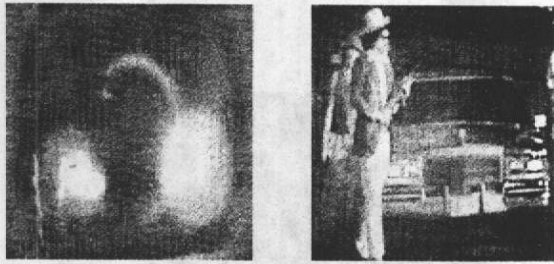


图2 在强光照射下标准三代光晕与无膜四代无光晕的比较

Fig. 2 Comparison between light blooming of standard third generation and without light blooming of non-film fourth generation in the condition of strong light

称为“Pinnacle™”，它的技术特性达到或超过了当时Omnibus V四代的指标。在发展四代技术的过程中，ITT公司发现：要防止信噪比的降低，并不是去掉这层防护膜，而是要保留一层很薄很薄的膜，这层薄膜厚度约为头发丝的万分之一，它一方面保护了GaAs光阴极免受损失，另一方面也满足了军方对四代的性能和寿命的要求。

4 以品质因数评价微光像增强器性能^[6,13]

在上面的讨论中，当二代发展到超二代、高性能超二代时，多碱光阴极、微通道板、荧光屏等元部件都没有实质上的变化。同样，当标准三代发展到高性能三代、无膜管三代、薄膜管三代时，其GaAs负电子亲和势光阴极、微通道板、荧光屏等元部件也都没有实质上的变化。这也就是说，我们在谈“代”时，主要是指它所代表的技术特征，而非它的性能。实际上，人们通常理解的是，更新换代，一代比一代强，故三代就比二代强。这里，存在着一些误解。因为，标准三代的性能确实超过二代，而超二代的性能并不比标准三代差多少，特别是高性能超二代XD-4、XR-5等其性能也与高性能三代接近。因此，以“代”来表示一种技术是合适的，而以“代”来评价性能是不合适的。

对一个光电成像器件而言，重要的是具备两个能力：一是从微弱景物的目标中探测光子的能力；二是分辨景物目标细节的能力。

对于第一个能力：接收入射光的光敏面在给定波长上的量子效率表明了从景物中探测光子的一种能力。这就是各国千方百计改进光阴极的表面激活工艺提高灵敏度的原因。三代管的负电子亲和势光阴极的探测效率在非常宽的光谱频带上能提供30%的

量子效率，积分灵敏度和辐射灵敏度都比二代管有很大的改善，表明它能提供很强的信号。这一信号随之被放大，便能把极低的微弱信号探测出来。但是，信号伴随着噪声，大的噪声甚至会淹没信号。故重要的不仅是信号，而是信噪比(S/N)。图3示出了不同照度下的信噪比曲线。

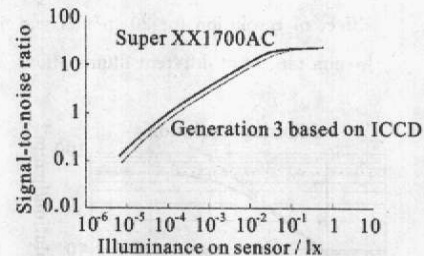


图3 超二代与标准三代在不同照度下的信噪比曲线

Fig. 3 Signal-noise ratio (S/N) curves at different illuminations for super second generation and standard third generation

对于第二个能力：分辨目标细节的能力，像增强器是用来放大光信号的。如果一点光都没有，则没有图像，观察者能看到的仅是暗噪声的效果。如果有一点点光，但没有连续光照，这时仅有单光子似“冰雹”的轰击而没有图像。因此，在非常低的光照水平下，由于没有足够的光子数，观察者是看不到图像的。随着光照的增大、光子数的增多，开始出现了有噪声的图像。但这样的带有噪声的图像观察者是难以分辨的。当光照进一步增大，鉴别率提高，细微的图像细节也能分辨了。由此可见，在低光照条件下，辨别细节的能力(鉴别率)与光照水平有关。当光照足够高(10^{-2} lx以上)时，噪声便消失。在白光条件下，图像的质量很高，它主要决定于轮廓鲜明的程度和对比度，而与光照的强度无关。由此，微光像增强器的鉴别率可分为两类：光子计数极限，亦称微光极限；光子噪声极限，亦称白光极限。

光子计数极限鉴别率：在微弱的光照下，提高光照水平，光子数的增加使图像斑点的密度提高。开始时，较大的图像细节(如20 lp/mm的靶面)显现了，但较小的图像细节仍隐藏在噪声里。当光照提高时，小的图像细节(如60 lp/mm靶面)亦看得见了，如图4所示。由此可见，管子输出端图像细节能看清的程度取决于管子的质量，即其信噪比和鉴别率。图5示出了不同光照下的极限鉴别率。

光子噪声极限鉴别率：从某一光照起，图像质量

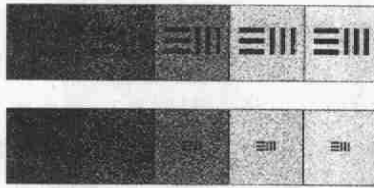


图 4 不同光照下 20 lp/mm 和 60 lp/mm 靶的鉴别率效果

Fig. 4 Effect of resolution for 20 lp/mm and 60 lp/mm targets at different illuminations

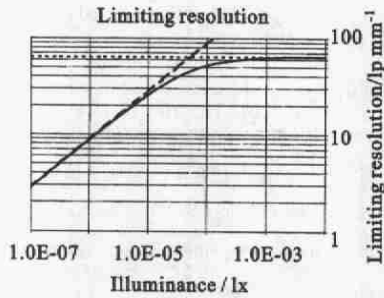


图 5 不同光照下的极限鉴别率

Fig. 5 Limiting resolution at different illuminations

不再与入射光照水平有关,而是与像增强器的传递特性有关。景物的对比度通过管子进行传递的能力通常用 MTF 表示,MTF 表明物平面为 100% 调制时各个空间频率谐波经过器件后的衰减程度,故它是空间频率(lp/mm)的函数。由 MTF 曲线可以推导极限鉴别率值。一般,极限鉴别率可由该曲线上调制度为 3%~5% 点所决定,取决于测量的方法。图 6 示出了标准三代和超二代的调制传递函数曲线。对于

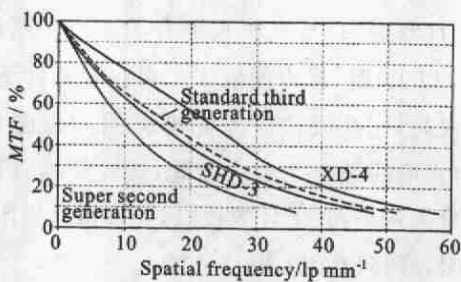


图 6 标准三代和超二代的 MTF 曲线

Fig. 6 MTF curves for the standard third generation and the super second generation image intensifiers

像管来说,在低的空间频率处有好的调制度(即对比度)便会有清晰的像,而低的调制度则其图像会给人雾蒙蒙的感觉,如图 7 所示。

像增强器的性能是以在低照度下提高探测与识别距离的能力来评价的。而探测与识别距离正比于

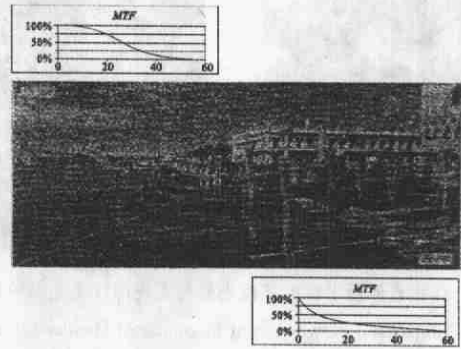


图 7 极限鉴别率相同而 MTF 不同的观察效果

(图中上半部分比下半部分的低频 MTF 高)

Fig. 7 Observation effect at same limiting resolutions but different MTF (in the picture, the low frequency MTF of upper part is higher than that of the lower part)

输出信噪比(S/N 或 SNR)和极限鉴别率(R)的乘积,用这两个参数来评价像增强器的性能是十分合适的。故新的评价像增强器性能的概念,可归结为一个品质因数(Figure of merit, FM),其数学表达式为:

$$\text{品质因数}(FM) = \text{信噪比}(S/N) \times \text{鉴别率}(R)$$

这是新的评价夜视像增强器的标准,不以代划分,而是一个数字,可以定量地比较。这里,信噪比和鉴别率的测量均是对白光而言。表 3 和表 4 给出美国 Litton 公司装备 AN/PVS-7 的二代管和三代管及美国 ITT 公司三代 MX-10160 18 mm 像增强器的数据。

表 3 美国 Litton 公司装备 AN/PVS-7 的二代管和三代管^[10]

Tab. 3 The second generation and third generation image intensifiers equipped for AN/PVS-7 by Litton Co. USA

Tube type	Gen II MX-18282	Gen II intensified MX-18282	Gen III Omni III MX-10130 C/UV	Gen III intensified MX-10130 C/UV	Gen III Omni IV MX-10130 C/UV
Resolution/lp mm ⁻¹	32	36	45	52	64
Sensitivity(min) /μA lm ⁻¹ @2856 K	240	350	1200	1350	1600
Radiation sensitivity(min) /mA W ⁻¹ @830 nm	15	30	120	130	190
SNR	11.5	11.5	17.1	18.0	21.0
Brightness gain (fl/fc)	22000	22000	30000	40000	55000
Figure of merit (S/N)×R	368	414	769.5	936	1344

表4 美国ITT公司三代MX-10160(F9800系列)
18 mm像增强器^[10]

Tab.4 The 18 mm third generation image intensifiers for MX-10160(F9800 series) by ITT Co. USA

Tube shape	F9800B	MX-10160 (Omnibus III)	F98003 Gen III+	F9800N Gen III+	MX-10160A (Omnibus IV)
Resolution: lp mm ⁻¹	45	45	51	64	64
Sensitivity(min) /μA lm ⁻¹ @2856 K	1000	1350	1550	1550	1800
Radiation sensitivity(min) /mA W ⁻¹ @830 nm	100	130	150	150	190
SNR	16.2	19.0	19.5	19.5	21.0
Brightness gain (fl ² /fc@2×10 ⁶ fc)	20000~ 35000	20000~ 35000	20000~ 35000	45000~ 65000	45000~ 65000
Brightness gain (fl ² /fc@2×10 ⁴ fc)	3500~ 10500	3500~ 10500	3500~ 10500	10000~ 20000	10000~ 20000
Figure of merit (S/N)×R	729	855	994.5	1248	1344

目前,美国现有的 Pinnacle™像增强器被认为达到预想的四代管器件的水平,其品质因数=信噪比×鉴别率=28×64=1792~1800。但荷兰的DEP公司二代XD-4像增强器的品质因数为24×64=1536;而且DEP公司声称,它的XR-5像增强器的品质因数将为24×70=1680。这就迫使美国政府不得不重新考虑1600和1250的技术转让的标准。美国的夜视器件制造商期望未来像增强器的品质因数可达到信噪比×鉴别率=30×90=2700的数字。

5 结束语^[14,15]

微光夜视像增强器技术品质因数的提出,使人们进一步明白了微光夜视以“代”划分的不确切性,“代”中包含的技术水平的概念是比较笼统的,仅能定性而不能确定像增强器的性能或质量的优劣。品质因数(S/N)×R弥补了这一缺陷,它非常简单,仅是一个数字,便于对器件达到的水平作定量的比较。品质因数还给我们的启示是:无论对哪一代夜视像增强器,包括未来所谓的第四代或第五代,最根本的、最主要的和要追求的就是两个参数:高信噪比和高鉴别率。

参考文献:

- [1] 周立伟. 微光成像技术的发展与展望[A]. 母国光. 现代光学与光子学的进展——庆祝王大珩院士从事科技活动六十五周年专集[C]. 天津:天津科学技术出版社,2003. 316-339.
- [2] Illes P Csorba. Selected papers on image tubes[A]. SPIE Milestone Series[C]. 1990,MS20.
- [3] Illes P Csorba. Electron image tubes and image intensifiers II [A]. SPIE[C]. 1991,1449. 1-192.
- [4] Roaux E, Richard J C, Piaget C. Third generation image intensifier [J]. Advances in Electronics and Electron Physics,1985.64A:71-75.
- [5] Pollehn H K. Performance and reliability of third generation image intensifiers[J]. Advances in Electronics and Electron Physics,1985,64A:61-69.
- [6] Leon A Bosch. Image intensifiers tube performance is what matters[A]. Image Intensifiers and Applications II, Proceedings of SPIE[C]. 2000,4128. 65-78.
- [7] Van Geest L K, Stoop K W J. Super inverter image intensifier[J]. Advances in Electronics and Electron Physics,1985.64A:93-100.
- [8] Estrera Joseph P, Bender E J, Adriana Giordana, et al. Long life-time generation IV image intensifiers with unfilmed micro-channel plate[A]. Image Intensifiers and Applications II. Proceedings of SPIE[C]. 2000.4128. 46-53.
- [9] Niles Thomas. System performance advances of 18 mm and 16 mm subminiature image intensifier sensors[A]. Image Intensifiers and Applications II, Proceedings of SPIE[C]. 2000.4128. 54-64.
- [10] Doug Richardson. Technology for tomorrow's night vision[J]. Armada International, 1997,(4):32-37.
- [11] Kenneth Costello, Cary Davis, Robert Weiss, et al. Transferred electron photocathode with greater than 5% quantum efficiency beyond 1 micron[A]. Electron Image Tubes and Image Intensifiers II, SPIE[C]. 1991,1449. 40-45.
- [12] Escher J S, Maloney T J, Gregory P E, et al. Photoemission to 1.7μm from an InP/InGaAs transferred photocathode[J]. IEEE Trans, 1978,ED-25:1347-1348.
- [13] Glenn W Goodman Jr. Night-fighting edge[J]. Armed Force Journal, 2002,32-34.
- [14] Sinor T W, Bender E J, Chau T, et al. New frontiers in 21st Century Microchannel Plate (MCP) Technology; Bulk Conductive MCP Based Image Intensifiers[A]. Image Intensifiers and Applications II, Proceedings of SPIE[C]. 2000,4128. 5-13.
- [15] Johnson C B. Photoelectronics; what have we been, and where are we going[A]. Image Intensifiers and Applications II, Proceedings of SPIE[C]. 2000,4128. 134-140.