

像增强器性能梯次及发展路线研究

刘宇^{1*}, 时荔蕙²

(1. 西安应用光学研究所, 陕西 西安 710065;

2. 系统工程研究所, 北京 100072)

摘要: 描述了一种判断夜视仪用微光像增强器性能梯次的方法, 基于视距模型对影响探测能力因素进行了分析, 研究了积分灵敏度、极限分辨率特性测试条件与实际夜视环境的差异, 分析了夜天光辐射光谱特性、大气传输的光谱衰减特性、背景反射特性的光谱差异以及光阴极响应光谱特性对视距的影响, 梳理了传统上以极限探测性能来判断像增强器优劣方法的不足, 提出了“能力因数”模型, 包含信噪比、低照度及低对比度下分辨率参数和技术特征因素, 采用该方法对像增强器两大技术路线(砷化镓器件、多碱器件)进行梯次和代际分析, 设计了三代像增强器发展路线。结果表明, “能力因数”模型(Figure of Capability, FOC)能够准确反映像增强器技术路线和性能梯次发展规律。

关键词: 夜视; 像增强器; 性能梯次; 光谱特性

中图分类号: TN223 文献标识码: A

Research of performance grade and development route of image intensifiers

LIU Yu^{1*}, SHI Li-Hui²

(1. Xi'an Institute of Applied Optics, Xi'an 710065, China;

2. System Engineering Research Institute, Beijing 100072, China)

Abstract: A method for judging the performance of image intensifiers is described and used for night vision devices. Based on the operating distance model, some factors affecting the detection ability are analyzed. The difference between test conditions for integral sensitivity, ultimate resolution and actual night vision environment is studied. The influences of night sky radiation spectral characteristics, spectral attenuation characteristics of atmospheric transmission, and spectral difference of background reflection characteristics on detection distance are analyzed. The shortcomings of traditional methods for judging the quality of the image intensifiers are sorted out. Figure of Capability (FOC) is proposed, which consists of signal-to-noise ratio, resolution tested in low illumination and low contrast, and technical features. The performance echelon and intergenerational of two major technology routes (including GaAs tubes and multi-alkali tubes) are analyzed with FOC, and one kind of Gen. 3rd development route is designed. Experimental results show that FOC can accurately reflect the developing law of the technical route and grade of image intensifiers.

Key words: night vision, image intensifier, performance grade, spectral characteristic

引言

像增强器是微光夜视仪的核心器件, 由像管与电源组成。与红外热像仪、短波红外探测器及胶体量子点探测器相比, 像增强器的缺点是工作在可见光、近红外波段, 受大气影响较大, 未充分利用夜天

光短波辐射, 探测性能受限; 它的优势是电真空器件的快速响应特性、自带荧光屏显示, 从而以轻便小巧、耗电极低、成像符合人眼视觉特性等特点, 广泛应用于单兵装备和侦察系统^[1]。同时, 像增强器因具有较高的灵敏度、时间分辨率等特性, 也使其成为高速成像探测、星载遥感成像、石油污染探测、

收稿日期: 2022-10-10, 修回日期: 2023-04-14

Received date: 2022-10-10, revised date: 2023-04-14

基金项目: 军委装备发展部应用创新(627010402, 627010403, 627010404)

Foundation items: Supported by Application Innovation Fund of the Equipment Development Department of the Military Commission (627010402, 627010403, 627010404)

作者简介(Biography): 刘宇(1965—), 男, 湖北荆州人, 研究员, 博士学位, 主要研究领域为光电系统及侦察体系, E-mail: 18991205200@189.cn

*通讯作者(Corresponding author): E-mail: 18991205200@189.cn

水下成像探测等领域解决探测难题的重要器件^[2-9]。

像增强器经历了零代、一代、二代,到目前的三代和超二代,并有不同的性能梯次。在确定微光像增强器发展路线布局以及设计夜视仪时,研究人员都十分关注像增强器代际和性能梯次,以此来判断能否满足探测能力和环境适用需求。

定义像增强器零代到第二代的时期,器件的代际特征比较清晰^[10],随着夜视技术进展呈现多样性,代际划分难以统一。20世纪80年代出现过以电荷耦合器件为第三代器件的情况,直到负电子亲和势技术成熟、比第二代器件性能显著提高,GaAs光阴极器件才被公认为第三代像增强器。目前,对第四代的定义再次出现不统一^[11-16],美国Litton公司提出无防离子反馈膜、选通工作的砷化镓光阴极像增强器为四代器件,虽然其光阴极产生的电子大部分得到利用(原来被膜阻挡),但由于器件寿命不佳,而未得到美军管理部门和同行的认同。2000年,Bosch提出弱光下像管特征指标是信噪比、强光下是极限分辨力,得到了一些专家的认可^[11-14],品质因数(Figure of Merit, FOM)(信噪比与极限分辨力的乘积)成为评价像增强器优劣的重要指标;也有一些不同意见^[15-17]。

如何设计微光技术发展路线图、不断提高夜视性能,如何为设计和选用夜视装备的用户选择更好的微光像增强器,需要首先合理确定像增强器性能梯次,以支撑代际的划分。

1 理论基础与分析

1.1 探测能力计算

夜视仪中,像增强器将物镜收集到的目标对微弱照明反射的信号,进行光电转换、增强,以人眼可接收的光谱和亮度呈现,探测效果受光学系统、像增强器、目镜或电子传感设备等组成部分共同作用。研究人员提出了多种微光夜视性能方程^[18],大都基于Rose的理想探测方程。

$$\alpha = \frac{2K}{C \cdot D_o} \sqrt{\frac{(2-C) \cdot e}{L_o \cdot S_a \cdot \tau_o \cdot t}}, \quad (1)$$

其中, α 为分辨角,单位'; K 为阈值信噪比; C 为对比度, $C=|L_o - L_b| / L_o$, L_o 为目标亮度, L_b 为背景亮度,单位 asb ; D_o 为物镜有效孔径,单位 mm ; e 为电子电荷; S_a 为夜间照明下像增强器光阴极灵敏度,单位 $\mu\text{A}/\text{lm}$; τ_o 为物镜透过率; t 为积分时间,单位 s 。

因为 $R = \frac{h}{\alpha n_f}$, $\alpha = \frac{1}{m_f}$,式中 R 为作用距离,单

位 m ; h 为目标高度(临界尺寸),单位 m ; m_f 为像增强器极限分辨力,单位 lp/mm ; n_f 为需要的空间频率,单位 lp 。所以:

$$R = \frac{h f_o m_f}{n_f} \quad (2)$$

$$\text{另外, } L_o = \rho E_o \tau_a \tau_o, S_a = k_c S_t, C_m = \frac{L_o - L_b}{L_o + L_b} = \frac{C}{2 - C},$$

其中 ρ 为目标反射比; E_o 为目标位置处照度,单位 lx ; k_c 为光阴极光谱匹配系数; S_t 为光阴极对标准光源的积分灵敏度,单位 $\mu\text{A}/\text{lm}$; C_m 为调制形式对比度。代入式(1),得:

$$R = 1.77 \times 10^9 \frac{h C_m D}{n_f K} \sqrt{\rho E_o \tau_a \tau_o \alpha_\gamma S_t} \quad (3)$$

$$\text{又有: } SNR = \frac{\Delta S}{N_{EMS}}, \Delta S = (E_c - EBI) \times A_c \times S_t, N_{EMS} =$$

$\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N I_i^2}{N}}$, $I_i = E_i \times A_c \times S_t$,式中, SNR 为输出信噪比, ΔS 为剔除背景的光照产出平均光电流值, N_{EMS} 为光电流起伏噪声(RMS值),单位 A ; EBI 为等效背景照度,单位 lx ; E_c 为光阴极面照度,单位 lx ; A_c 为光阴极有效面积,单位 m^2 ; N 为测试取样值; I_i 为第 i 个取样电流值,单位 A 。代入式(3),有:

$$SNR = (E_c - EBI) \sqrt{\frac{N \cdot A_c \cdot S_t}{\sum_{i=1}^N E_i}}$$

$$\text{即 } \sqrt{S_t} = \frac{SNR}{(E_c - EBI)} \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N E_i}{N \cdot A_c}}$$

再代入式(1),得到:

$$R = 1.77 \times 10^9 \frac{h C_m D \cdot SNR}{n K (E_c - EBI)} \sqrt{\frac{\rho E_o \tau_a \tau_o \alpha_\gamma \sum_{i=1}^N E_i}{N \cdot A_c}} \quad (4)$$

可以得知: $R \propto m_f$, $R \propto \sqrt{S_a} = \sqrt{k_c S_t}$, $R \propto SNR$ 。因此,人们以像增强器的灵敏度和分辨力作为选择像增强器优劣的判断依据,代表量子特性的积分灵敏度、代表几何特性的极限分辨力越高,则认为该像增强器的作用距离越远。

随着第三代像增强器的出现,灵敏度不能完全代表量子特性,原因是其砷化镓半导体光阴极非常灵敏,从微通道板(MCP)向光阴极反馈的离子也能够产生出光电子,从而叠加噪声。因此,第三代像管需要在MCP输入表面设置隔离离子的薄膜,这种膜在阻断反馈离子的同时也阻挡了一部分光电子信号^[19],也就是说, S_t 并没有全部实际用于倍增。

因此,针对这种灵敏度特性会被牺牲的情况,人们提出用 SNR 替代 S_i ,用 FOM 作为评价像增强器优劣的判断依据:

$$FOM=SNR \times m_i \quad (5)$$

1.2 FOM评价方法的不足

FOM 评价像增强器的性能是以极限分辨力和信噪比为基本指标,对于一般情况而言,是可反映像增强器性能好坏的一种方式,但是 FOM 并没有考虑实际环境下与理想环境下夜视特性的不同。

夜视仪对目标成像探测涉及夜天光(环境照明)、目标、背景、大气因素,还必须适应城市照明、前方汽车车灯照射、战场火光等的影响。这个过程涉及多种因素的影响,会导致目标与背景对比度的变化。

大气因素会降低目标视在对比度^[20-21]。含有水汽、尘埃等气溶胶粒子的大气对夜天光散射和吸收,将使目标的对比度衰减,这种衰减且与距离和波长有关: $\tau_a=e^{-\sigma R}$,其中 R 为大气距离, σ 为大气散射系数。

$$\frac{C_{mR2}}{C_{mR1}} = \frac{\tau_2 C_o}{\tau_1 C_o} = \frac{e^{-\sigma_2 R}}{e^{-\sigma_1 R}} = [e^{-\sigma_1 R}]^{\frac{\sigma_2}{\sigma_1} - 1} = \tau_1^{\frac{\sigma_2}{\sigma_1} - 1} \quad (6)$$

按照瑞利散射模型, σ 反比于波长的四次方:

$$\sigma = \frac{\pi^2(n^2 - 1)^2(1 + \cos^2\theta)}{2N} \times \frac{1}{\lambda^4}, \text{ 式中 } \theta \text{ 为散射方向, } \lambda \text{ 为辐射波长, } n \text{ 为散射介质(大气)折射率, } N \text{ 为分子浓度,代入式(6),可得:}$$

$$C_{mR2} = [e^{-\sigma_1 R}]^{\left[\left(\frac{\lambda_1}{\lambda_2}\right)^4 - 1\right]} C_{mR1} = \tau_1^{\left[\left(\frac{\lambda_1}{\lambda_2}\right)^4 - 1\right]} C_{mR1}, \quad (7)$$

即,就大气影响情况下,工作波长比较长的微光夜视设备比工作波长比较短的设备,能够得到更大的目标对比度。另外,军事目标常常会设法降低自身对比度,通过迷彩涂覆等方式可以接近其背景的反射特性,从而降低目标与背景的对比度。

受大气衰减、目标伪装等影响,目标对比度实际要远低于100%。 m_i 是实验室最佳照度条件下对100%对比度测试靶的检测结果,实际目标对比度一般不大于30%,这样实际像增强器分辨力一般都远小于极限分辨力。通过式(2)、(3),可以得到 $m_i \propto C_m$ 的关系:

$$m_i = 1.77 \times 10^9 \frac{C_m D}{f_o K} \sqrt{\rho E_o \tau_a \tau_o \alpha_i S_i} \quad (8)$$

此外,不同照度下的像增强器分辨力是不同的^[22],在 $10^{-3} \sim 10^{-5}$ lx区间,随着光阴极面照度的下降,分辨力几乎成倍下降。

所以, FOM 的评价未考虑实际目标对比度和光阴极面照度,不能准确反映夜视运用的能力。如何选择更好的像增强器,需要综合考虑这种实际环境的影响。

2 关键影响因素判断

2.1 光阴极光谱响应

由于大气对不同波长的衰减不同,导致目标对比度的传递变化不同。目前像增强器主要分为采用砷化镓光阴极和多碱光阴极,响应光谱有所差异(图1),主要在 $0.35 \sim 0.95 \mu\text{m}$ 以内,按照中心波长估算,可知多碱光阴极响应中心波长约660 nm,砷化镓光阴极的响应中心波长约为730 nm。

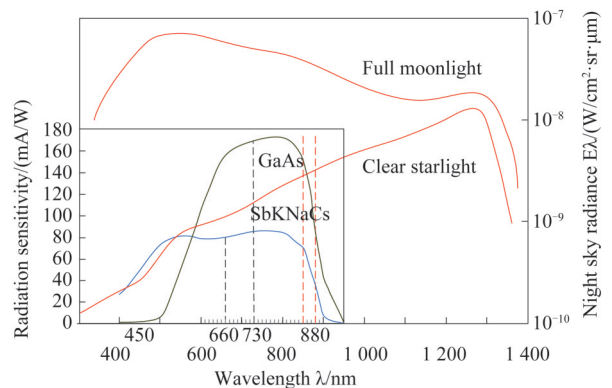


图1 夜天光辐射照度曲线与微光器件的两种响应光谱

Fig. 1 Night sky radiance curves and two photocathode spectral responses of image tubes

已知660 nm波长 λ_1 在标准能见度(23.5 km)下大气散射系数约为0.13/km,代入式(7)可得目标在730 nm波长 λ_2 下的对比度(C_{mR2})是660 nm波长对比度的2.0倍。按照式(3)计算,工作在730 nm的微光夜视仪对目标的作用距离将是同样系统配置下工作在660 nm的夜视仪作用距离的2.0倍。

同时,夜天光在星光下(10^{-3} lx)比月光(10^{-1} lx)有更多的近红外辐射;绿叶的反射率在近红外波段要比较短波长处高得多^[18](图2,两种光阴极积分灵敏度作相同处理)。

可知,在低照度(星光下)夜天光光谱辐射方面,较长波长的辐射要高于较短波长的辐射;背景的反射在较长波长处大于短波长处(绿叶的平均反射效率方面,在砷化镓光阴极中心波长730 nm约是在多碱光阴极中心波长660 nm的3.3倍),也就是,向近红外延伸响应的光阴极与夜天光辐射、大气衰减、背景反射的光谱特性都更加匹配。

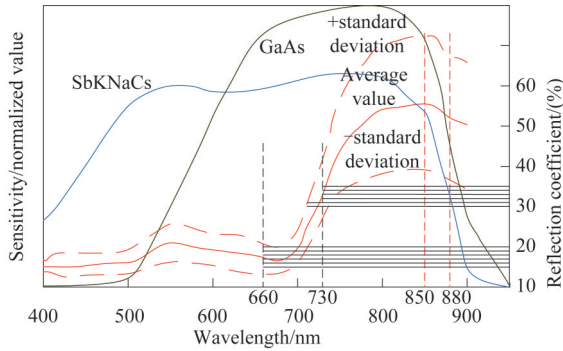


图2 绿叶的典型反射特性及光阴极响应的匹配性
Fig. 2 Typical reflection coefficients of green leaves and response ranges of photocathodes

2.2 夜间环境下目标照度

对2018年至2020年某地区8个城市周边夜晚环境照度进行测量、统计,如表1所示。

表1 某地区夜天光照度分布情况

Table 1 Distribution of night sky illuminance in somewhere

照度范围	2018年	2019年	2020年	平均
$10^{-3} \text{ lx} \leq E < 10^{-4} \text{ lx}$	45.38%	47.45%	39.00%	43.94%
$10^{-4} \text{ lx} \leq E$	16.97%	15.71%	25.00%	19.23%

可知,夜晚环境照度在 10^{-3} lx 至 10^{-4} lx 的天数占全年天数占比为43.94%,在 10^{-4} lx 及以下的天数占全年天数占比为19.23%。战时环境下,受照明管制,实际 10^{-4} lx 及以下的天数照度比例会更高。

因为光阴极面照度 E_c 与目标照度、大气透过率、物镜透过率及光学系统相对孔径有关:

$$E_c = \frac{\pi}{4} \rho E_o \tau_a \tau_o \left(\frac{D_o}{f_o} \right)^2, \quad (9)$$

其中, ρ 、 τ_a 远小于1, τ_o 、 D_o/f_o 小于或不大于1,可知 $E_c < E_o$, 大多情况下 E_c 会比 E_o 低一个数量级。

可知,选择夜视仪用像增强器,必须重点考虑夜间低照度情况,关注无月星光及更低的工作照度。

3 梯次评估方法及发展路线分析

3.1 能力因数方法

鉴于上述分析,提出一种像增强器性能梯次评价方法——能力因数,以大气传输光谱衰减特性、夜间无月星光辐射光谱特性、目标背景光谱反射特性等为依据,建立由低照度、低对比度、近红外辐射响应等因素决定的评价模型。

FOM的内涵,是将影响视距的信噪比和极限分

辨力两个整管技术指标作为判断因素,这种方法考虑了防离子反馈膜对灵敏度的实际损失,比采用积分灵敏度(光阴极特性)时相对准确;但是未考虑夜天光谱分布和照度范围、目标背景光谱反射差异、像增强器响应匹配性等实际因素。

补充这些实际因素,对式(5)进行修正,得出“能力因数”(Figure of Capability, FOC):

$$\text{FOC} = \text{SNR} \times m_n (1 + K_f \times 10\%), \quad (10)$$

其中, m_n 是低照度、低对比度下像增强器分辨力; K_f 是适用某种应用环境的典型技术特征(Features),出现1个新特征时 K_f 取1,特征的贡献取10%是考虑到各主要梯次像管的平均性能增长幅度。

因为 $m_n = m_i \times (k_c)^{1/2}$, k_c 又正比于 S_λ , 记 $k_c = \alpha_c \times S_\lambda$, S_λ 是特征近红外(880 nm 或 850 nm)辐射灵敏度, α_c 是光阴极的折算常数(一种光阴极一个值),所以也可以借助近红外特征光谱的辐射灵敏度来估算像增强器的性能变化:

$$\text{FOC} = \text{SNR} \times m_i \sqrt{\alpha_c S_\lambda} (1 + K_f \times 10\%). \quad (11)$$

由于 m_n 、 S_λ 反映夜间实际光照、反射及像增强器的匹配性,因此,FOC与FOM相比的主要差别是以下两方面。

一方面是将像管的极限分辨能力 m_i (目前大都在60 lp/mm左右)调整为实际环境下分辨力 m_n , 从理想照度 10^{-2} lx 换成实际的 10^{-4} lx 时, m_n 相对于 m_i 可下降约30%^[22],再考虑前述的光阴极响应与夜天光辐射、大气传输衰减及背景反射的光谱差异性,不同光阴极下的 m_n 将下降660%,FOC因此更为准确。

另一个方面是增加了适用功能特征,即在像管 $\text{SNR} \times m_n$ 没有增加的情况下,采取新的功能性特征改进也视为梯次提高,如电源“ATG”特征(扩大像管适用照度环境)、MCP防离子反馈膜“filmless”特征(增加光阴极有效量子效率)、荧光屏特征(“黄绿光”适合人眼,“白光”适合于传感器耦合等)、窗口特征(利于更高吸收的玻璃材料等)。

3.2 典型像增强器发展路线分析

3.2.1 美国像增强器发展路线分析

表2为美国砷化镓光阴极像增强器的指标,图3为美国三代像增强器的性能梯次。从表2和图3可知,FOC方法对其梯次规律判断是准确的,具体表现为以下两点。

(1)9个像增强器研制计划中,7个计划的 $\text{SNR} \times m_n$ (虚线)增加,幅度随着提升极限约束而逐年缩小

表2 美国砷化镓光阴极像增强器指标

Table 2 Specification of GaAs image intensifiers of USA

Parameter	Omni I	Omni II	Omni III	Omni IV	Omni V	Omni VI	Omni VII	Omni VIII	Omni IX	
	1982	1985	1990	1996	1999	2002	2006	2010	2010 STD	
Sensibility	$\mu\text{A/lm}$	850/1 000	1 000	1 350	1 800	1 800	2 000	2 200	2 000 thin film	2 200
	mA/W	100(830) 60(880)	100(830)	135(830)	190(830) 90(880)	190(830)	230(830)	- 100(880)	190(830) 80(880)	240(830) 120(880)
Resolution/(lp/mm)	36	45	51	57~64	57~64 36(HL)	57~64 36(HL)	57~64 36(HL)	57~64 36(HL)	64~72 36(HL)	
Gain $\times 10^4$ cd/m ² /lx	0.6~1.1	1~2 4~7	1~2 4~7	1~2 4~7	1~2 4~7	1.5~2.5 4~7	1.5~2.5 4~7	0.8~3.5 4~7	0.8~1.6	
Signal to noise ratio	14.5	14.5	19	21	21	25	28	≥ 25	33	
Life/h	7 500	7 500	7 500	7 500	7 500	10 000	10 000	7 500	12 500	
Halo/mm	1.47	1.47	1.47	1.25	1.25	0.9	0.7	1	0.75	
EBI $\times 10^{-7}$ lx	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5	3	3	2	
Phosphor	P20	P20	P20/P43	P43	P43	P43	P43	P43	P43/P45	
Power supply	ABC	ABC	ABC	ABC	ATG	ATG	ATG	ATG AVS-6	ATG	

(从增长 21% 逐步降低到增长 8% 左右);对光阴极近红外响应(实线)逐年提高要求(880 nm 处的辐射灵敏度从 Omni I 的 60 mA/W 提高到 Omni IX 的 120 mA/W,更加匹配夜天光、背景特性);

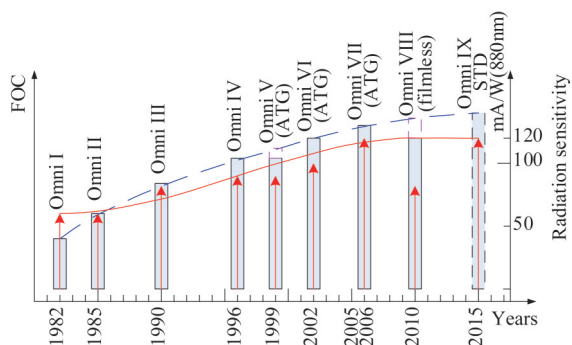


图3 美国三代像增强器的性能梯次

Fig. 3 Performance echelon of Gen. 3rd image intensifier in USA

(2)9个像增强器研制计划中,2个计划的 $SNR \times m_n$ (虚线)没有增加(图3),一次是 Omni V 采用 ATG 电源,使其适应战场强光,相应提出了强光分辨力指标(36 lp/mm HL200 lx);一次是 Omni VIII 为 filmless,并针对机舱照明提出响应光谱兼容的要求;调整了荧光粉(光谱、余晖),适应人眼或设备观察,减小了光晕(从 1.47 mm 逐步降低至 0.7 mm);此外对像增强器寿命(MTTF)从 7 500 h 分两个阶段提高到 10 000 h、12 500 h。

3.2.2 欧洲像增强器发展路线分析

表3分析了欧洲的像增强器发展情况,其性能梯次有类似情况。

像增强器信噪比、分辨力增加, $SNR \times m_n$ 提升,增幅也是逐年放缓;850 nm 的辐射灵敏度逐年增加(以适应夜视的照明、反射等光谱特性)。

特性方面,增加了 ATG,更换了荧光粉;在欧洲厂商自行定义的“4G”和“4G+”器件中,采用一种光栅窗口(Glass windows),以实现入射光线在光阴极层内偏转、反射,增加光程,提高对目标辐射的吸收(相应提高灵敏度,在 600~850 nm 可提高 40% 以上),这种显著提升灵敏度、并在近红外波段有更好性能的新特性成为提升代际的要素。

3.3 一种像增强器计划安排

采用 FOC 模型,对三代像增强器发展计划进行了设计(表4、图4)。5个研制计划 FOC 呈梯次提升趋势,P4 通过设置 ATG 的特性实现对 P3 的升级。

4 结论

微光夜视仪是伴随军事需求所发展出来的,其核心器件的代际与性能梯次划分,是该领域技术路线图的设计依据和装备发展的依据,必须更多考虑实际应用的需求。

传统以极限探测能力(积分灵敏度、极限分辨力等指标)的 FOM 判断方法,存在与实际夜视环境不符的问题。本文提出 FOC 评价方法,对 FOM 进行

表3 欧洲多碱光阴极像增强器指标

Table 3 Specification of multi-alkali image intensifiers of Europe

Parameter	Gen2+	SHD-3	XD-4	XR-5	4G	4G+
	1984	1985	1990	2001	2014	2019
$\mu\text{A}/\text{lm}$	550	600	700	700~850	1 100~1 350	1 500~2 300
Sensitivity	40(800 nm)	55(800 nm)	60(800 nm)	78(800 nm)	-	-
	30(850 nm)	45(850 nm)	50(850 nm)	65(850 nm)	-	-
Resolution/(lp/mm)	40	54	60~64	64~70	64~72	72~74
Gain $\times 10^4$ cd/m ² /lx	0.8	1.2	20(200 lx)	55(200 lx)	55(200 lx)	55(200 lx)
Signal to noise ratio	19	20	10~1.8	1.0~1.8	1~2	1~2
Life/h	7 500	10 000	20~22	25~28	28~30	30~32
Halo/mm	-	-	10 000	15 000	15 000	10 000
EBI $\times 10^{-7}$ lx	-	-	0.8	0.6~0.8	0.7	0.7
Phosphor	0.15	0.15	0.15~0.25	0.15~0.25	0.15~0.25	0.15~0.25
Power supply	P20	P20	P23/P43	P43/P22	P43/P22	P43/P22
	ABC	ABC	ATG	ATG	ATG	ATG

表4 三代像增强器性能设计

Table 4 Specification of Gen. 3rd image intensifier in plan

Parameter	P1	P2	P3	P4	P5
$\mu\text{A}/\text{lm}$	800~1 600	2 000	1 600~2 200	1 800 ~ 2 200	2 200
Sensitivity	-	-	135(830 nm)	155(830 nm)	200(830 nm)
	50(880 nm)	80(880 nm)	90(880 nm)	110(880 nm)	120(880 nm)
Resolution/(lp/mm)	24~36	55	50~64	64	68~74
Gain $\times 10^4$ cd/m ² /lx	-	-	32(100 lx)	36(200 lx)	40(200 lx)
Signal to noise ratio	0.8~1.0	1.0	1.0	1.3~2.5	1.5~2.5
Life/h	18	22~23	25	28	30~32
Halo/mm	5 000	10 000	10 000	10 000	10 000
EBI $\times 10^{-7}$ lx	0.8	0.6~0.8	0.7	0.7	0.7
Phosphor	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25
Power supply	P20	P20	P43/P20/P31	P43	P43
	ABC	ABC	ATG	ATG	ATG

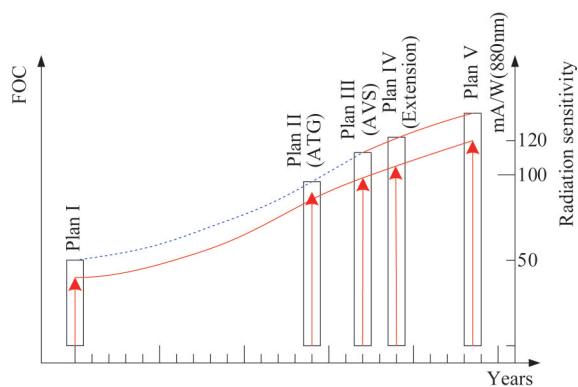


图4 三代像增强器的计划安排

Fig. 4 Scheduling of Gen. 3rd image intensifier

修正,既顾及了防离子反馈膜对有效灵敏度的影响,也增加了对夜天光辐射的光谱特性、照度范围和背景反射光谱差异等因素,以及像增强器响应特

性与夜间环境的匹配性,还增加了技术特征因素,以反映颠覆性和突破性技术的作用。

FOC评价方式能够用于对微光夜视(包含砷化镓光阴极、多碱光阴极)像增强器发展的梯次分析,其 m_n 包含的夜天光、大气散射、背景反射因素,为像管采用铟镓砷等材料向短波红外(0.8~1.7 μm)响应延伸发展提供了理论依据,可对像增强器发展技术路线的确定提供指导,对铟镓砷、胶体量子点等成像探测器的发展方向有一定参考意义。

References

- [1] Peter Donaldson, Andrew White. Night vision developments [J]. *Military Technology*, 2016, **40**(6): 20~34.
- [2] LIU Lu, GUO Ming, AN Yanmin, *et al.* High repeating frequency characteristics of image intensifier in high-speed imaging application [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2017, **46**

- (11): 1123004-1~1123004-5.(刘璐,郭明,安严明,等.像增强器在高速成像应用中的重复频率特性[J].光子学报),2017,46(11):1123004.
- [3] GAN Tao, YUAN Yinlin, ZHAI Wenchao, *et al.* Design and test of in-site radiometric calibration reference light source for spaceborne low light level remote sensors [J]. *Journal of Applied Optics*, 2020, 41(1): 140-144.(甘涛,袁银麟,翟文超,等.星载微光传感器外场辐射定标光源的研制和检测[J].应用光学),2020,41(1):140-144.
- [4] LIANG Li, BIAN Jinhu, LI Ainong, *et al.* Consistent inter-calibration of nighttime light data between DMSP/OLS and NPP/VIIRS in the China-Pakistan economic corridor [J]. *Journal of Remote Sensing*, 2020, 24(2): 149-160.(梁丽,边金虎,李爱农,等.中巴经济走廊DMSP/OLS与NPP/VIIRS夜光数据辐射一致性校正[J].遥感学报),2020,24(2):149-160.
- [5] ZHAO Xiaoran, SHI Hanqing, YANG Pinglyu, *et al.* Inversion algorithm of PM_{2.5} air quality based on nighttime light data from NPP-VIIRS [J]. *Journal of Remote Sensing*, 2017, 21(02): 291-299.(赵笑然,石汉青,杨平吕,等.NPP卫星VIIRS微光资料反演夜间PM_{2.5}质量浓度[J].遥感学报),2017,21(02):291-299.
- [6] ZHANG Yuantao. Research on technologies of high sensitivity and large dynamic range low level imaging in space [D]. Shanghai: University of Chinese Academy of Sciences (Shanghai Institute of Technical Physics), 2018: 1-21.(张元涛.空间高灵敏度大动态范围微光成像技术研究[D].上海:中国科学院大学(上海技术物理研究所)),2018:1-21.
- [7] LI Xiaolong, CHEN Yonghua, LI Jie, *et al.* Time-resolved fluorescence spectroscopy of oil spill detected by ocean lidar [C]. *Proc. of SPIE, Optical Measurement Technology and Instrumentation*. 2016, 10155.
- [8] XIAO Yihan, PANG Yongjie, ZHAO Lanfei. A radiometric calibration algorithm for an underwater laser-imaging system [J]. *Journal of Harbin Engineering University*, 2016, 37(5): 738-742.(肖易寒,庞永杰,赵蓝飞.激光水下成像系统辐射标定算法[J].哈尔滨工程大学学报),2016,37(5):738-742.
- [9] WANG Minmin, WANG Xinwei, ZHANG Yue, *et al.* Range-intensity-profile prior dehazing method for underwater range-gated imaging [J]. *Optics Express*, 2021, 29(5): 7630-7640.
- [10] XIANG Shiming, NI Guoqiang. The principle of photo-electronic imaging devices [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 1999:9.(向世明,倪国强.光电子成像器件原理)[M].北京:国防工业出版社,1999:9.
- [11] Leon A Bosch. Image intensifier tube performance is what matters [J]. *Proc. of SPIE*, 2000, 4128: 65-78.
- [12] ZHOU Liwei. A review of the recent development of low-level-light night vision technology [A]. *Proceedings of the Sixth National Membership Conference [C]*. Beijing: China Ordnance Society, 2003, 24-41.(周立伟.微光夜视技术近期发展评述[A].第六次全国会员大会学术报告集[C],北京:中国兵工学会),2003,24-41.
- [13] JIN Weiqi, LIU Guangrong, WANG Xia, *et al.* Image intensifier's progress and division of generations [J]. *Optical Technique*, 2004, 30(4): 460-463.(金伟其,刘广荣,王霞,等.微光像增强器的进展及分代方法[J].光学技术),2004,30(4):460-463.
- [14] LI Xiaofeng, ZHAO Heng, ZHANG Yanyun, *et al.* High performance super second generation image intensifier and its further development [J]. *Infrared Technology*, 2021, 43(9): 811-816.(李晓峰,赵恒,张彦云,等.高性能超二代像增强器及其发展[J].红外技术),2021,43(9):811-816.
- [15] Aebi V W, Costello K A, Arcuni P W, *et al.* EBAPS: next generation, low power, digital night vision [C]. *OPTRO 2005 International Symposium*, 2005: 1-10.
- [16] CHENG Hongchang, SHI Feng, LI Zhoukui, *et al.* Preliminary study on distinguishment method of low-level-light night vision devices [J]. *Journal of Applied Optics*, 2021, 42(6): 1092-1101.(程宏昌,石峰,李周奎,等.微光夜视器件划代方法初探[J].应用光学),2021,42(6):1092-1101.
- [17] PAN Jingsheng. Image intensifier upgraded performance and evaluation standard [J]. *Infrared Technology*, 2020, 42(6): 509-518.(潘京生.像增强器的迭代性能及其评价标准[J].红外技术),2020,42(6):509-518.
- [18] ZHANG Mingping, ZHANG Jingxian, LI Yudan. Night vision system [M]. Beijing: Beijing Institute of Technology Press, 1993, 225-239.(张鸣平,张敬贤,李玉丹.夜视系统)[M].北京:北京理工大学出版社,1993,225-239.
- [19] DONG Wei, DONG Yuhui, ZHOU Yujian, *et al.* General specification for image intensifier GJB 2000A [S]. 2020.(董伟,董煜辉,周玉鉴,等.像增强器通用规范 GJB 2000A [S]). 2020.
- [20] Radio Corporation of America. Electro-optics handbook [M]. SHI Si, WU Suo, translation. Beijing: National Defense Industry Press, 1978. 67.(美国无线电公司.电光学手册)[M].史斯,伍琐,译.北京:国防工业出版社.1978.67.
- [21] LIU Yu, RU Zhibing, GUO Cheng, *et al.* Research of low-level-light night vision system based on imaging through scatter medium theory [J]. *Optical Technique*, 2010, 36(1): 139-188.(刘宇,茹志兵,郭城,等.基于散射介质成像理论的微光夜视系统研究[J].光学技术),2010,36(1):139-188.
- [22] LI Xiaofeng, CHANG Le, ZHAO Heng, *et al.* Comparison of resolution between super gen. II and gen. III image intensifier [J]. *Acta Photonica*, 2021, 50(9): 0904003.(李晓峰,常乐,赵恒,等.超二代与三代像增强器低照度分辨力的比较[J].光子学报),2021,50(9):764-777.