

多波段共孔径光学成像系统的几种实现途径 (特约)

邓 键¹, 曲 锐², 黄建兵^{1*}

- (1. 苏州领锐源奕光电科技有限公司, 江苏 苏州 215216;
2. 中国科学院西安光学精密机械研究所, 陕西 西安 710119)

摘 要: 借助微分方法, 提出光学系统内的消波段间色差和波段内色差条件, 建立了扩展的复消色差理论, 通过对比各自波段和全波段的折射率-色差系数, 进行材料配对, 并迭代优化校正各类像差。由此介绍了几种多波段共孔径光学系统的实现途径和具体设计实例, 包括: 透射式结构的宽波段及多波段成像物镜光学系统; 透射式结构的中波/近红外二次成像变焦系统; 透射式结构的中/长波红外二次成像变焦系统; 通过反求工程 (Reverse Engineering) 设计了 AN/AAQ-33“狙击手 XR”吊舱采用的中波/近红外共孔径透射式前置望远系统主光路; AN/ASQ-228 ATFLIR 吊舱采用的共孔径离轴三反射式消像散前置望远系统主光路; AN/AAS-52 MTS-B 吊舱采用的同轴偏视场三反前置望远系统主光路; EKV 采用的同轴四反二次成像系统; 拓展介绍了采用同轴折反式前置望远+后置成像结构的光路结构, 包括同轴折反式中波/短波/近红外和长/中/短波红外望远系统+后置分光成像系统的设计; 以及一些典型弹载光学系统共孔径或共光路的设计。

关键词: 光学设计; 多波段; 共孔径; 折反式光学系统; 前置望远系统

中图分类号: TH751 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA20201017

Several ways to realize multi-band common aperture optical imaging system(Invited)

Deng Jian¹, Qu Rui², Huang Jianbing^{1*}

- (1. Suzhou Leading and High Power Optics Co., Ltd, Suzhou 215216, China;
2. Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710119, China)

Abstract: By using differential method, the inter-band chromatic aberration and intra-band chromatic aberration conditions in optical system were introduced, and the extended complex chromatic aberration theory was established. By comparing the refractive vs chromatic coefficients of each band and the whole band, the material was matched and iteratively optimized to correct all kinds of aberrations. Several ways of realizing the multi-band common aperture (MCA) optical system were discussed, including the medium-wave (MW)/near-infrared (NIR) secondary imaging system with transmission structure, which was introduced into the respective detectors by the dichroic beam splitter in convergent optical path; the MW/long-wave (LW) infrared secondary imaging system with transmission structure, which adopted the co-focal surface design of the co-optical road; and the AN/AAQ-33 “Sniper XR” pod’s main optical system, which adopted MW/NIR co-aperture transmission fore telescope system; the AN/ASQ-228 ATFLIR pod’s main optical system, which adopted the MCA off-axis three-mirror anastigmatic (TMA) fore telescope system; the AN/AAS-52 MTS-B pod’s main optical system, which adopted

收稿日期:2020-03-10; 修订日期:2020-04-15

作者简介:邓键(1976-),男,研究员,博士,主要研究方向为光电总体和光学设计、装调与检测。Email: warhorse99@sina.com

通讯作者:黄建兵(1976-),男,研究员,博士,主要研究方向为强激光子系统及关键元器件。Email: hoptics@vip.163.com

the MCA coaxial bias field of view (FOV) TMA fore telescope system; the EKV's main optical system, which adopted the MCA coaxial four mirror secondary imaging system. And correspondingly, some coaxial mirror-lens fore telescope systems were introduced, and the last, some typical missile borne MCA imaging optical structures were introduced.

Key words: optical design; multi-band; common aperture; mirror-lens optical system; fore telescope

0 引言

多波段共孔径光学系统是实现光电成像系统小型化、轻量化和低功耗 (SWaP) 的最佳途径。目前已有多种工程路线: (1) 共光路共焦面结构; (2) 共光路后置汇聚/发散光束分光结构; (3) 前置望远系统+后置平行分光系统+后置成像结构等。文中介绍了一些较为经典的设计, 希望可作为引玉之砖, 对读者有所启发。

1 设计理论

透射式宽波段成像光学系统设计基本遵循复消色差理论, 即对于理想透镜系统, 需同时满足下述各条件:

$$\left\{ \begin{aligned} \varphi &= \frac{1}{h_i} \sum h_i \varphi_i & (a) \\ L_{1ch} &= \frac{1}{h_1^2 \varphi^2} \sum h_i^2 C_{1i} \varphi_i & (b) \\ L_{2ch} &= \frac{1}{h_1^2 \varphi^2} \sum h_i^2 C_{2i} \varphi_i & (c) \\ L'_p &= \frac{1}{(h_1 \varphi)^2} \sum h_i^2 P_i \varphi_i & (d) \\ \alpha_L L &= \frac{1}{h_1^2 \varphi^2} \sum h_i^2 T_i \varphi_i & (e) \end{aligned} \right. \quad (1)$$

式中: φ 为光焦度; h 为光线高度; L 为位置色差; C 为波段内色差系数; P 为部分相对色散, α 为镜筒的线膨胀系数; L 为镜筒长度; T 为镜筒的温度。公式 (1) 中, (a) 为光焦度; (b) 为波段 1 内的色差; (c) 为波段 2 内的色差; (d) 为全波段的色差; (e) 为热差。相对传统光学系统, 公式 (1) 增加了消热差的条件, 尤其在红外光学系统中, 透镜材料的折射率温度系数 dn/dT 较大, 且线膨胀系数也较大, 导致光焦度随温度的变化较大, 需在设计中予以考虑 (即便是可调焦系统也应进行复核复算)。

复消色差理论的推导公式较为复杂, 可参阅相关文献 [1-2]。一个直观的结论是: 单透镜无消色差能力; 双胶合透镜具有一定的消色差能力, 其位置色差

曲线为二次曲线; 而一般的, 宽波段系统欲实现复消色差, 至少需要三种光学材料, 使位置色差曲线变为高次曲线, 如图 1 所示。

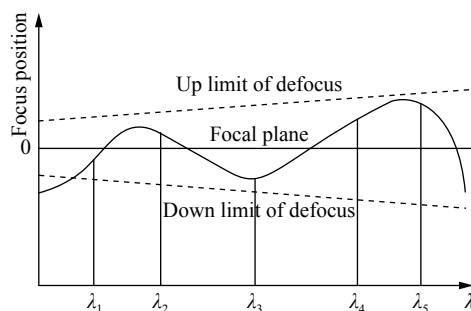


图 1 复消色差光学系统的焦深与离焦量关系

Fig.1 Relation between focal depth and defocus of apochromatism system

对于公式 (1), 要满足色差为零的条件极为苛刻。但考虑光学系统的瑞利判据, 即与位置色差相对应的波像差小于四分之一波长时, 可认为光学系统在两个不同波段都成完善像, 即光学系统焦深放宽了消色差难度。焦深的计算公式如下:

$$DOF = \pm \lambda / (2NA)^2 \quad (2)$$

式中: DOF 为焦深; λ 为波长; NA 为光学系统数值孔径。

从公式 (1) 和图 1 可知, 复消色差光学系统通过细分中心波长, 将位置色差导致的离焦量控制在焦深范围内, 即可获得宽波段的消色差效果。

对于多波段共孔径光学系统, 如短波+中波 $0.6 \sim 1.7 \mu\text{m} + 3.7 \sim 4.8 \mu\text{m}$ 双波段共孔径成像系统, 受大气窗口和探测器对中间 $1.8 \sim 3.6 \mu\text{m}$ 谱段限制, 无需考虑该波段的色差校正, 只需校正谱段间色差即可。此时, 可对图 1 中曲线作如图 2 的改进, 进一步给消色差条件减负:

不幸的是, 光学材料折射率是波长的非线性函数, 同一材料在不同波段具有不同的色散特性, 即传统的阿贝数、规化色差系数等参量只能描述材料在单一波段内的色散特性, 不能保证波段间色差的校正。

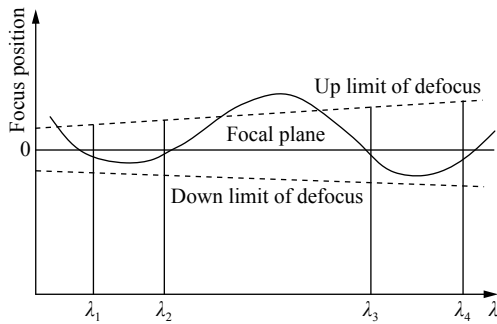


图 2 双波段光学系统的焦深与离焦量关系

Fig.2 Relationship between focal depth and defocus of two-band system

一些常用红外材料在不同波段的色散情况如表 1 所示,其中最为异常的是 Ge 材料,在 3~5 μm 的中波红外和 8~12 μm 的长波红外波段的色散系数与其他材料成反常变化,在中波红外波段可与 Si 搭配作为火石玻璃成为负透镜,但在长波红外波段 Ge 却可作为冕牌玻璃作为正透镜使用。因此,多波段共孔径(共

光路)系统的光学设计需要从对材料在不同波段的色散特性了解开始,引入微分的思考方式,对材料的特征波段色散特性进行细化,通过镜组配对,既平衡波段内色差,又平衡波段间色差。从某种意义上,多波段系统减小小波段间色差的方法可认为类似于光学系统中减小位置色差的方法:

(1) 加入波段间相对离焦量为控制变量,约束该值小于两个波段焦深之和,可对系统优化进行控制;

(2) 在材料配对上既要同时满足各个波段内的色差控制要求,也要满足波段间色差系数较小的要求,即:正光焦度元件在满足波段内色差系数较小的同时还需要同时满足波段间色差较小;负光焦度元件在满足波段内色差系数较大的同时尽量采用波段间色差系数较大的材料;

(3) 同时尽可能地控制元件表面光线的入射高和入射角。

表 1 常用红外材料的色散特性对比

Tab.1 Comparison of dispersion characteristics of common infrared material

Material	Index of refraction		Chromatic dispersive power		Thermal dispersive power	Interband chromatic dispersive power
	$n_{4\mu m}$	$n_{10\mu m}$	$C_{3-5\mu m}$	$C_{8-12\mu m}$	$T(\times 10^{-5} K)$	$P_{3-12\mu m}$
BaF ₂	1.456 7	1.414 4	2.22%	5.91%	-5.51	9.26%
Zns	2.250 1	2.198 3	0.91%	4.36%	3.02	4.32%
Znse	2.433 1	2.406 7	0.50%	1.71%	3.77	1.88%
IRG201	2.514 6	2.498 1	0.5%	0.91%	3.61	1.09%
IRG202	2.510 1	2.494 4	0.51%	0.84%	1.98	1.03%
IRG205	2.623 9	2.605 2	0.57%	0.92%	3.00	1.15%
IRG206	2.794 5	2.777 7	0.06%	0.62%	-0.25	0.95%
CsBr	1.668 1	1.662 5	0.25%	0.76%	-17.3	0.85%
GaAs	3.307 0	3.278 1	0.68%	1.53%	5.58	1.27%
Ge	4.022 4	4.003 6	0.99%	0.10%	12.61	0.63%

如此选择的材料组合代入初始结构进行优化,再据材料在各波段色散特性对比表进行材料的增减、替换、合成(短波红外及以下波段可胶合)等,以达到宽波段范围消色差的目的。

对于轴外像差,可通过透镜曲率、厚度、空气间隔、非球面系数等变量进行优化。为控制光线的入射高,可采用折反式光学系统,让无色差和热差的反射镜承担主要光焦度,再通过透射元件扩大视场。

热差也是现代光学设计中不可忽视的像差,尤其是对某些大相对孔径红外镜头,热差可能会成为主要

像差。相关研究文献较多^[3-4],此处不再赘述。但值得注意的是,材料的温度折射率系数 dn/dT 是温度和波长的函数,不同温度和不同波长下的实测值差异较大,尤其是长波红外光学材料往往理化性能不理想,或易潮解,或易解理,或有毒,或内应力大,而且波长跨度越大的红外材料越稀少,这都导致光学被动消热差难以同时兼顾多波段共孔径系统的所有波段,往往需要温度调焦来补偿。近年来国产硫系玻璃材料研究进步显著^[5-7],包括宁波大学、中国建材研究院、湖北新华光信息材料有限公司、成都光明光电股份有限

公司等厂家相继推出了系列可工程使用的硫系玻璃,尤其是湖北新华光,以平均两年一种新材料的速度推出新型硫系玻璃,并制定了多项国际验收标准。

硫系玻璃的理化性能尚可,但光学性能尤其是色散和热性能优良(如表 1 中的 IRG201、IRG202、IRG205 和 IRG206),且能覆盖很宽的波长范围而价格适中,具有广阔的应用前景。

2 几种典型设计

2.1 两种宽波段复消色差光学系统

按照复消色差理论通过在三个波段(0.48~0.9 μm 的 TV 波段、0.9~1.7 μm 的 SWIR 波段和 0.48~1.7 μm 的宽波段)对比折射率 vs 阿贝系数、相对色散 vs 阿贝系数、折射率 vs 色散图选材进行优化设计,通过反复迭代最终采用了 HFK、HQB、HLAF 和 HZF 四种光学玻璃材料(比参考文献 [8] 增加了一种 HQK 材料)完成了一款 0.48~1.7 μm 的超宽波段摄远物镜,光

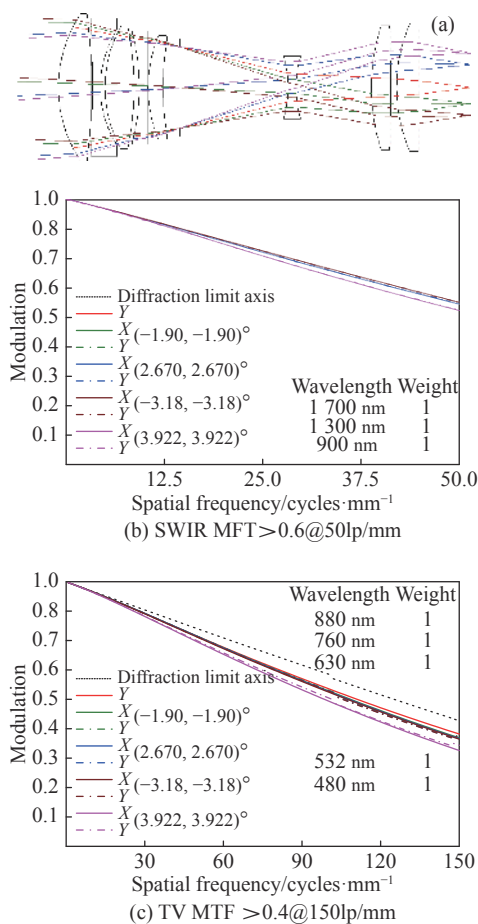


图 3 一种 0.48~1.7 μm 超宽波段物镜及其 MTF 曲线

Fig.3 An 0.48~1.7 μm ultra wide band objective and its MTF curves

学系统 $F\#4$, 焦距 180 mm, 采用对角线尺寸为 35 mm 的探测器, $FOV \approx \pm(3.92^\circ \times 3.92^\circ)$, 总长 ≤ 155 mm, MTF 接近衍射限, 并利用 FK 玻璃较大的线膨胀系数配合铝合金镜筒在 $-45 \sim 60$ °C 温度范围进行了光学被动消热差, 使高低温 MTF 基本与常温情况一样。光路和 MTF 曲线如图 3 所示。

按照同样的设计理论和方法完成的另一款宽波段大视场光学系统, 采用了反摄远结构, 光学材料配对与图 3 系统类似, 使用波段 0.65~1.7 μm, $F\#1.4$, 焦距 6 mm, 采用对角线尺寸为 12.3 mm 的探测器, $FOV \approx \pm(34^\circ \times 40^\circ)$, 总长 ≤ 150 mm, 畸变小于 5%, 光学被动消热差。光路和 MTF 曲线如图 4 所示。

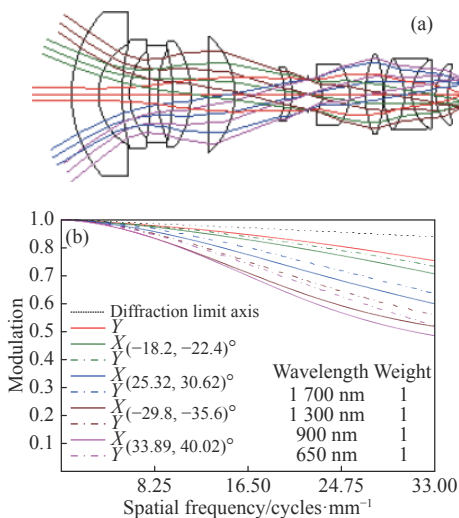


图 4 一种 0.65~1.7 μm 宽波段物镜及其 MTF 曲线

Fig.4 An 0.65~1.7 μm wide band objective lens and its MTF curves

2.2 三种紧凑型多波段共孔径光学系统

通过用微分原理扩展复消色差理论, 并利用波段间和波段内的折射率 vs 色差系数和折射率 vs 热差系数图表进行材料选择和配对, 完成了一个二次成像的 2.7~3.3 μm/3.7~4.8 μm/7.7~9.5 μm 三波段共光路光学成像系统, 采用硫系材料为主的透镜组合。探测器 $F\#2$, 256×256 面阵, 30 μm 像元间距, 光学被动消热差, 焦距 82 mm; 光路及 MTF 曲线如图 5 所示。

硫系材料(除硫系玻璃外, 还包括 ZnS 和 ZnSe 等)基本都具有透短波红外的能力。如下提供了一种采用长波非制冷红外+激光半主动+TV 的弹载光学系统设计, $F\# < 0.95$, 全部采用硫系化合物材料, 光学被动消热差, 全口径集成了激光半主动探测通道, 后端采用棱镜分光(激光波段牺牲了一定的透过

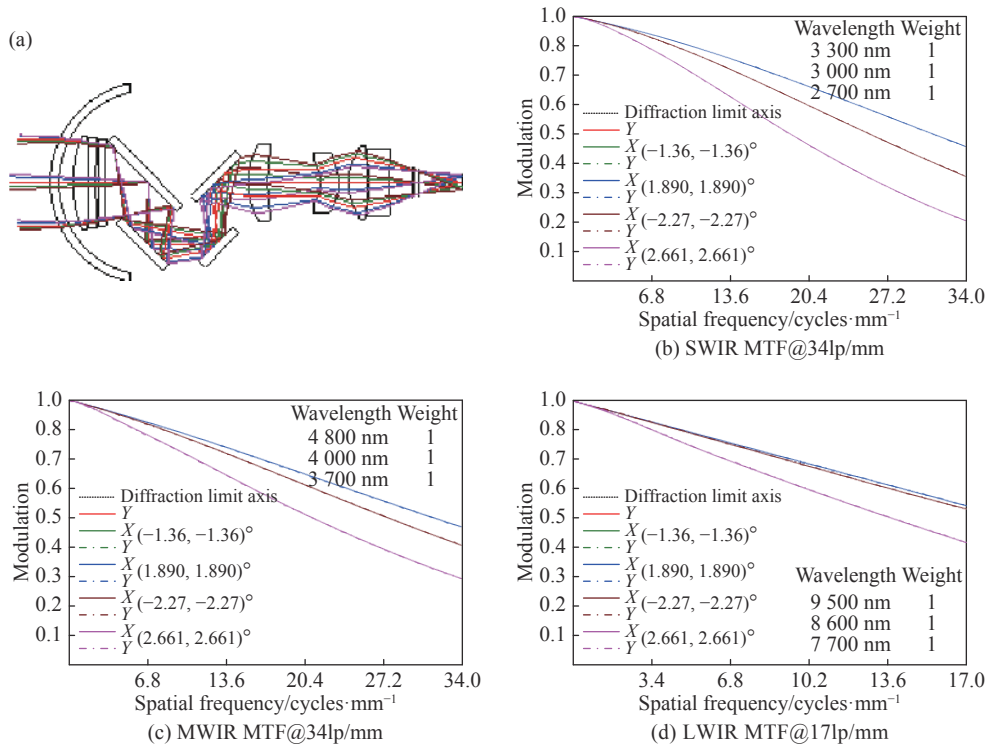


图 5 一种三波段共光路光学系统及其 MTF 曲线

Fig.5 A tri-band co-path optical system and its MTF curves

率), 并通过类似法国 MMP 导弹掏孔的方式集成了 TV 成像通道。光路和 MTF 曲线如图 6 所示。

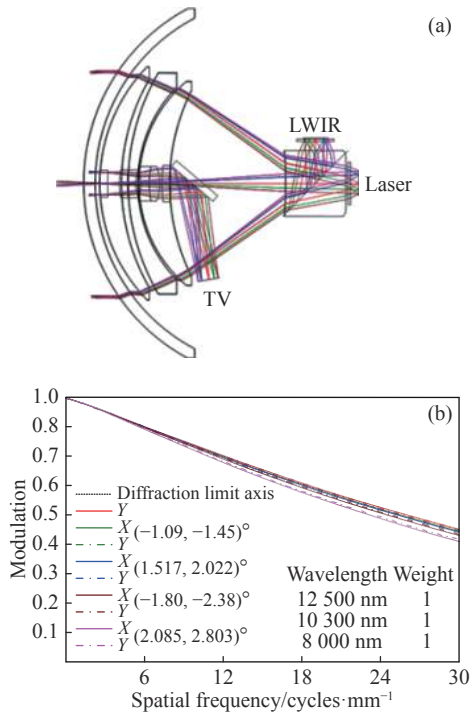


图 6 一种小型多波段光学系统及其长波红外谱段的 MTF 曲线

Fig.6 A small multi-band optical system and its LWIR MTF curves

另一种更紧凑并采用制冷探测器的 3.7~4.8 μm /7.7~9.5 μm 双波段光学系统, 采用了曼金折反镜作主镜, 以硫系材料为主的透镜组合, 适配 $F\#2$, 128 \times 128 面阵, 30 μm 像元间距探测器, 焦距 110 mm, 光学被动消热差; 这种曼金折反镜外形类似德国的 IRIS-T 空空导弹光学系统 (见图 7), 且球罩曲率半径和系统总长也按照 127 mm 弹径进行约束。光路和 MTF 曲线如图 8 所示。



图 7 IRIS-T 导弹及其导引头光学系统

Fig.7 IRIS-T and seeker's optical system

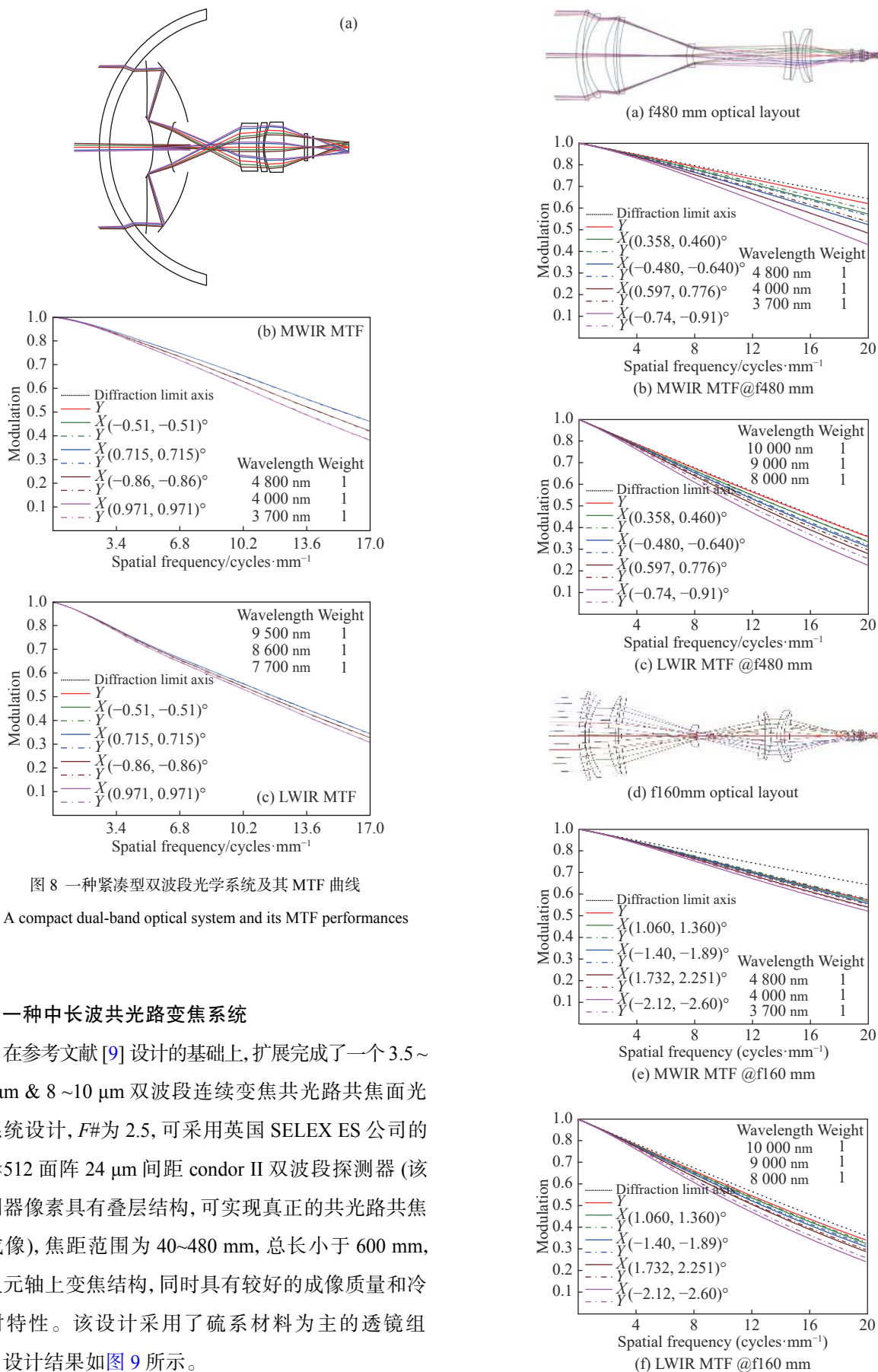


图 8 一种紧凑型双波段光学系统及其 MTF 曲线

Fig.8 A compact dual-band optical system and its MTF performances

2.3 一种中长波共光路变焦系统

在参考文献 [9] 设计的基础上, 扩展完成了一个 3.5 ~ 4.8 μm & 8 ~ 10 μm 双波段连续变焦共光路共焦面光学系统设计, $F\#$ 为 2.5, 可采用英国 SELEX ES 公司的 640×512 面阵 24 μm 间距 condor II 双波段探测器 (该探测器像素具有叠层结构, 可实现真正的共光路共焦面成像), 焦距范围为 40~480 mm, 总长小于 600 mm, 三组元轴上变焦结构, 同时具有较好的成像质量和冷反射特性。该设计采用了硫系材料为主的透镜组合。设计结果如图 9 所示。

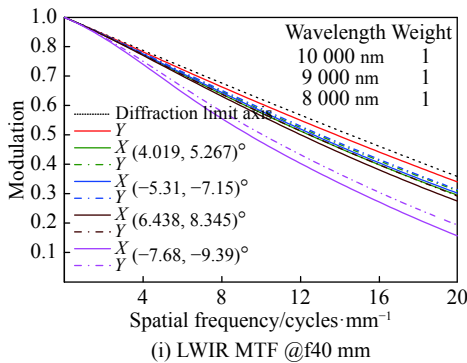
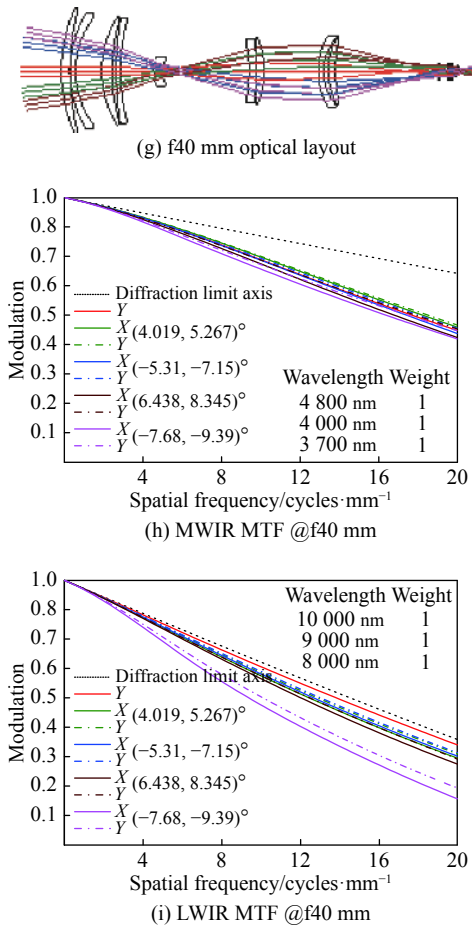


图 9 一种共光路中长波红外变焦系统及其 MTF 曲线

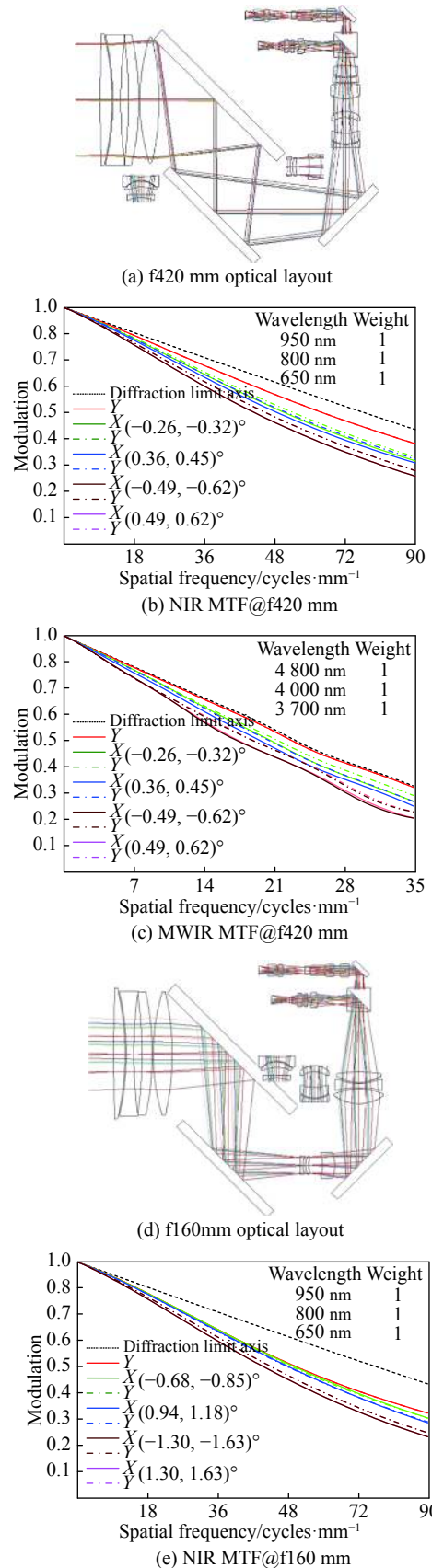
Fig.9 A MWIR and LWIR dual-band common optical path zoom system and their MTF performances

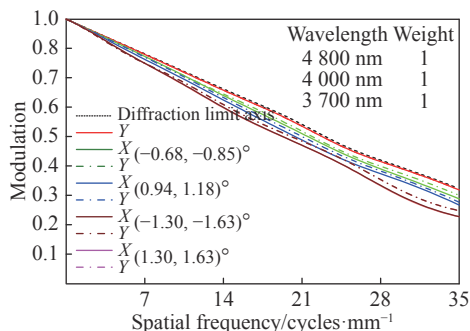
2.4 两种中波近红外共孔径变焦系统

相比 2.2、2.3 节，中波和近红外共孔径的材料较多，选择余地较大，有更多的材料组合，但麻烦的是分光。平行或准平行光路分光较简单，但在汇聚或发散光路中分光对分光镜尤其镀膜工艺提出了极高要求。一个解决办法是不追求同时成像而采用切换的方法；或在光学性能和价格上做出让步（如图 6 的棱镜分光，就牺牲了激光波段的透过率——好在全口径接收激光，能量可以满足使用要求）。

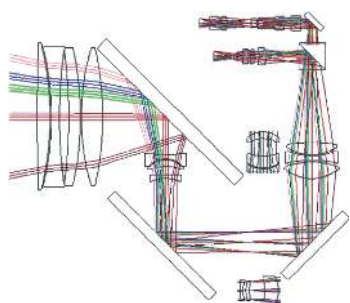
完成的一个切换式三视场变焦共孔径光学系统，采用二次成像的双组元变倍结构，不同的变倍组在不同的位置径向切换改变视场，补偿组在轴上前后运动；在一次像面前汇聚光路中通过切换棱镜完成分光；一次像面前全部为球面透镜，采用了硫系化合物、氧化物和卤族化合物材料组合，设计波段 0.65~0.9 μm@F#5.6/3.7~4.8 μm@F#3.5；焦距分别为 40、160、

420 mm。光路和 MTF 曲线如图 10 所示。

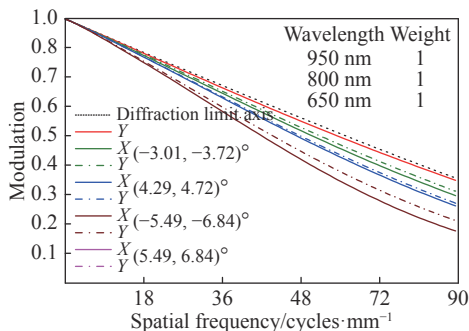




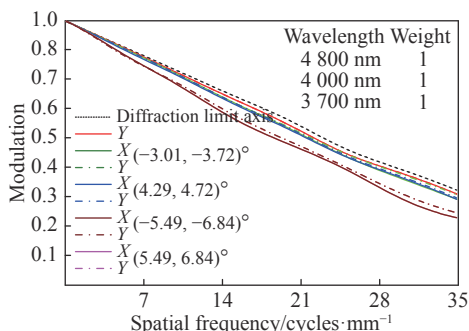
(f) MWIR MTF@f160 mm



(g) f40 mm optical layout



(h) NIR MTF@f40 mm



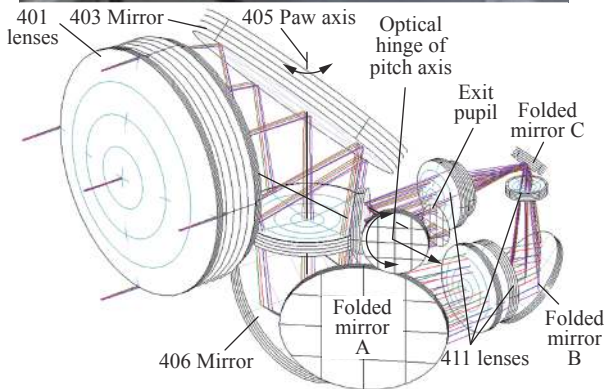
(i) MWIR MTF@f40 mm

图 10 一种共孔径电视/中波红外变焦系统及其 MTF 曲线

Fig.10 A TV and MWIR dual-band common aperture zoom optical system and their MTF performances

美国 AN/AAS-33“狙击手 XR”光电瞄准吊舱的光学系统采用了准平行光路中分光以实现多波段同时成像目的^[10]。用反求工程完成了该光学系统主光

路的设计: 硫系和卤族化合物光学材料组合的三分离镜组+负透镜组成伽利略式望远系统实现激光收发与近红外、中波红外成像通道的共孔径集成, 然后分光; 其中激光发射天线/激光接收和近红外成像通道一路, 中波红外成像通道单独一路; 中波红外成像通道又增加了透镜组构成开普勒式前置望远系统, 然后+分光器 (与激光发射分离)+FSM+合束器 (与激光发射合束)+后置二次成像系统成像, 并在开普勒式结构的一次像面前后切换式镜组构成双视场; 激光接收 (含测距与光斑跟踪) 和 TV 成像通道为一次成像结构; 系统在满足 $\Phi 305$ mm 局部异型突出舱体结构要求前提下最大通光孔径约为 150 mm (而非广泛报道的 127 mm 通光孔径), 并可实现 0.7~0.9 μm 和 3.7~4.8 μm 以及 1.064 μm 和 1.5 μm 的多波段共孔径同时探测, 并在中波红外成像通道具有良好的冷反射特性; 激光收发通道采用了偏振分光原理和自适应自动增益控制, 可有效抑制后向散射; 本设计 $F\#4$, 焦距为 600 mm, 可采用 640×512 面阵 15 μm 像元间距探测器和 1280×1024 面阵 7.6 μm 像元间距的近红外探测器 (在“狙击手 SE”项目上已升级为 1280×1024 面阵的 10 μm 像元间距中波红外探测器); 折叠后的小视场光路和 MTF 曲线如图 11 所示。



(b) Main optical layout

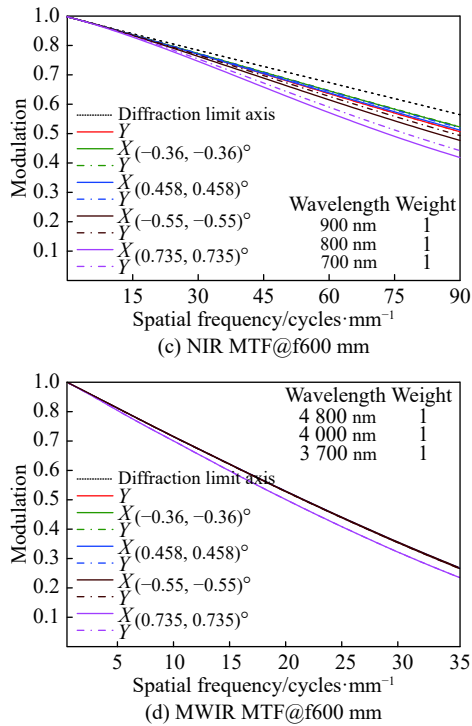


图 11 狙击手 XR 吊舱的多波段共孔径电视/中波红外光学系统及其 MTF 曲线

Fig.11 TV and MWIR multi-band common aperture optical system used by Sniper XR pod and their MTF curves

2.5 三种折反式共孔径设计

折反系统可将大部分光焦度由反射镜承担,降低了消色差和热差难度,并可采用空间折叠方式压缩系统总长。参照第三代 DB-110 相机指标^[11]设计了一个双波段折反式成像系统,采用曼金折反镜为次镜,构架为折反前置望远系统+FSM+分光镜+后置成像系统,使用波段为 0.65~0.9 μm/3.7~4.8 μm,仍然采用硫系和卤族化合物材料配对;系统通光孔径 280 mm,对角视场 FOI>1.5°,中波红外成像通道可采用 F#4.6, 1 280×1 024 面阵 15 μm 像元间距探测器;近红外成像通道采用 F#5.5, 4 K×3 K 面阵 5.5 μm 像元间距探测器;MTF 曲线接近衍射限;光路如图 12 所示。

另一个设计为 0.7~0.9 μm/3.7~4.8 μm/8~10 μm 三波段的折反式前置望远系统,口径 254 mm,对角视场 FOI>1.7°。该系统主次镜为高次非球面,在一次像面前有一片厚透镜作为场镜以扩大视场;为降低透镜数量,目镜组透镜采用了高次非球面;透镜材料也采用了卤族化合物和硫系化合物材料,MTF 接近衍射限。但该设计采用的透镜材料理化性能较差,工程实现难度较大。光路如图 13 所示。

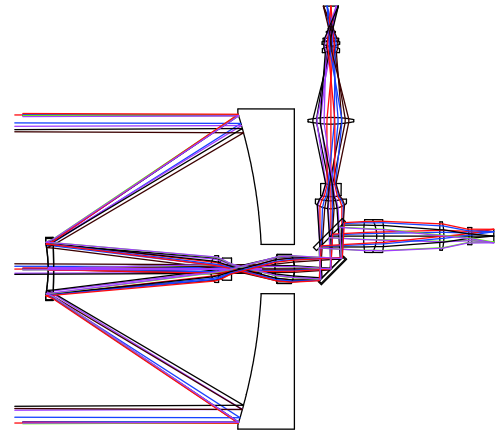


图 12 一种折反式近/中红外多波段共孔径光学系统

Fig.12 A NIR/MWIR dual-band mirror-lens common aperture optical system

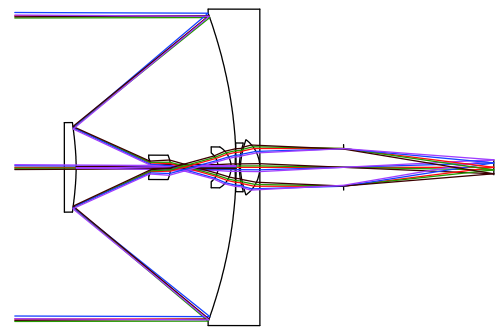


图 13 一种折反式近/中/长波多波段红外共孔径光学系统

Fig.13 A NIR/MWIR/LWIR multi-band mirror-lens common aperture optical system

折反式光学系统特别适用于弹载多模复合制导领域,例如美国雷神公司的 JAGM 和 SDB II,采用了毫米波雷达、激光半主动和长波非制冷红外成像三种探测模式,其中:长波非制冷成像通道为一次成像结构,目标辐射透过球罩在主镜上反射,再在次镜上反射,通过透镜组成像在探测器上;毫米波雷达馈源置于球罩和次镜之间,雷达波透过次镜与长波非制冷成像通道共用主反射镜;激光半主动探测通道置于球罩和雷达馈源之间,为分孔径形式布置,从目标反射的激光通过球罩后直接进入激光半主动探测通道的透射式光学系统。导引头结构如图 14 所示。

由于硫系材料可透射 1.064 μm 的激光,因此三种探测模式完全可以共用主反射镜,雷达馈源仍然置于球罩和次镜之间,但长波非制冷成像通道变为二次成像结构,激光和红外在次镜上反射并在一次像面后置一片目镜形成准平行光路,此时用分光镜分开激光和

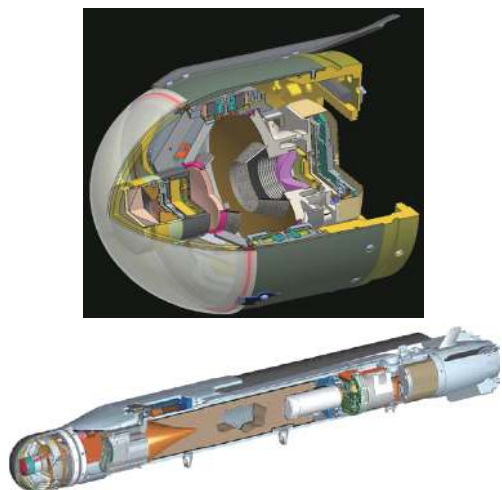


图 14 雷神公司 SDB II 炸弹的三模导引头

Fig.14 Three-mode seeker of Raytheon SDB II bomb

红外光。在此基础上还可以扩展为激光雷达+长波非制冷红外成像双模制导装置,激光扩束天线置于球罩和次镜之间。完成的光路和长波非制冷成像通道 MTF 曲线如图 15 所示。该设计的长波非制冷红外成

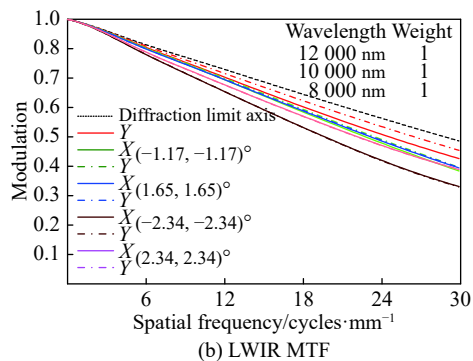
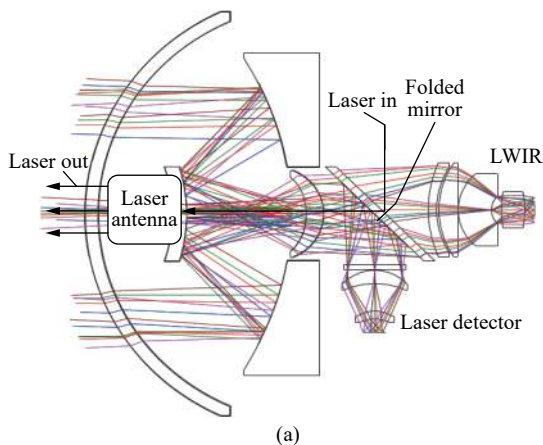


图 15 一种两模复合导引头光路图及其长波非制冷红外通道的 MTF 曲线

Fig.15 A dual-mode seeker optical layout and its LWIR MTF performance curves

像通道名义 $F\# < 0.9$, 可采用 512×512 面阵 $17 \mu\text{m}$ 像元间距的探测器, 光学被动消热差。

2.6 四种反射式共孔径光学系统

反射式光学系统无色差和冷反射, 与镜面与镜架为同种材料时无热差。随着非球面加工检测和计算机辅助装调工艺的成熟, 越来越广泛地应用在高端光电系统中。

EKV 就使用了同轴四反射的“反射透镜”结构, 如图 16 所示。光线在主镜 1 反射到次镜 2, 在中央通孔附近有一中间像; 再到三镜 3 反射到四镜 4, 最后汇聚到焦面 5; 主镜 1 和四镜 4 背靠背一进一出, 看似一个透镜, 故称为“反射透镜”结构; 焦面 5 可分光到各自不同波段的探测器上。该设计焦距 300 mm, $F\# 1.5$, 视场角可达到 $3^\circ \times 3^\circ$ 以上, MTF 接近衍射限。

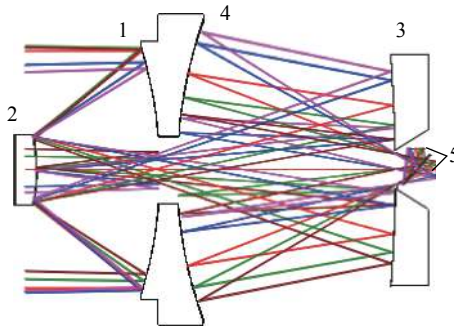


图 16 EKV 使用的反射透镜结构

Fig.16 Reflective lens structure used by EKV

在图 16 基础上改进, 可获得一种三反结构的前置望远系统, 如图 17 所示。但这种结构的放大率不能太大, 否则出瞳过小, 会使一次像面的折叠反射镜口径变小, 而且中央通孔将使遮拦比受到一定影响。该设计放大率约为 $5\times$, 口径 203 mm, 对角视场角 $< 1.2^\circ$, MTF 接近衍射限。

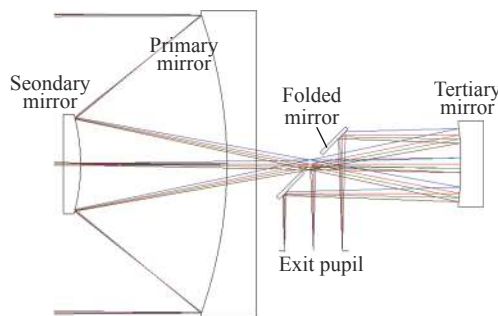


图 17 一种同轴三反的前置望远系统

Fig.17 A coaxial triple mirror fore-telescope system

美国雷神公司的 MTS-B 光电瞄准吊舱使用了同轴偏视场三反射消像散 (TMA) 结构的前置望远系统作为小视场接收光路。这种 TMA 结构最初为全反射的二次成像系统^[12-14], 出现于 20 世纪 90 年代的 IKNOS、Quickbird、SPOT 5 等推扫式成像卫星上, 特点是通过次镜、三镜在子午面上的偏心和倾斜, 牺牲俯仰视场而提高方位视场的像质, 因而, 在这种 TMA 结构上改进获得的前置望远系统的俯仰视场较小。按反求工程要求完成了一个类似光学设计, 通光孔径约 290 mm, 放大倍率 12 \times , 在一定的空间限制下 (以满足吊舱较为苛刻的空间布局), 视场可达到 3 $^{\circ}$ (方位) \times 0.9 $^{\circ}$ (俯仰) 以上; 而 MTS-B 实际使用视场不超过 0.7 $^{\circ}$ \times 0.5 (由此说明 MTS-B 还具有很大的升级空间), 此时 MTF 接近衍射限, 光路如图 18 所示。

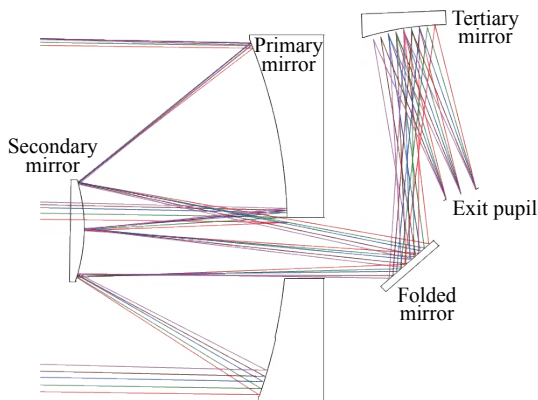


图 18 MTS-B 吊舱使用的 TMA 前置望远系统

Fig.18 TMA fore-telescope system used by MTS-B pod

美国雷神公司的 AN/ASQ-228 ATFLIR 和 MTS-A 光电瞄准吊舱采用了离轴三反前置望远系统设计^[15-16], 尤其是前者的结构要求极为紧凑, 需要将通光孔径 150 mm 的离轴三反前置望远系统置于 Φ 330 mm 的吊舱转塔内并将压缩后的平行光束通过光学铰链 (穿过转塔的俯仰轴) 导入到后端舱体完成成像。该系统通过增大反射镜的离轴量压缩光路, 牺牲了部分加工检测和装配的工艺性, 但结构简单, 可方便地增加可见光、长波红外等成像通道, 且透过率高, 视场较大。虽然比 AN/AAQ-33 “狙击手 XR” 吊舱的 Φ 305 mm 直径稍大, 但可扩展性强, 是一种面向未来的设计。反求设计的光路如图 19 所示, 其中外圆直径 Φ 320, 主镜通光孔径 150 mm, F #4, 通过次镜和三镜在俯仰方向的倾斜和平移补偿, 最大视场可达到 3 $^{\circ}$ \times 1.8 $^{\circ}$ 以上

(但该吊舱实际使用视场不到 1 $^{\circ}$ \times 0.8 $^{\circ}$), MTF 接近衍射限。

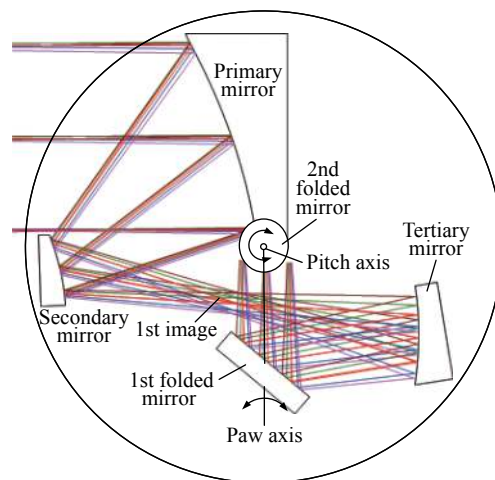


图 19 ATFLIR 吊舱使用的离轴三反前置望远系统

Fig.19 Off-axis TMA fore-telescope system used by ATFLIR pod

3 结 论

多波段共孔径光电系统有多种实现途径, 通过文中重点介绍的透射式光学系统的实现条件可知, 其设计原理仍是传统复消色差理论的拓展和衍生。

对于大口径大像面的系统要求, 透射式光学系统将越来越受制于光学材料特性; 而随着非球面加工检测工艺的进步, 折反式和 TMA 结构的反射式光学系统的视场大, 结构简单, 镀膜难度小等优点将使之得到广泛运用, 因此文中也对一些经典结构进行了设计举例。即便如此, 透射系统的复消色差理论和由此发展出的分段消色差原理仍然是实现多波段共孔径成像设计的基础, 需要光学设计师予以高度重视。

致 谢

特别感谢湖北新华光信息材料有限公司徐光以副总经理、徐华峰副总经理和胡智峡经理, 胡向平研究员的长期合作和支持。

参考文献:

[1] Qu Rui, Deng Jian. Methods of correcting between-band chromatic aberration in infrared dual-band dual-field of view athermalized optical design [J]. *Acta Optica Sinica*, 2015, 35(1): 0122006. (in Chinese)

- 曲锐, 邓键. 红外双波段双视场消热差光学系统设计中消波段间色差条件(方法)的研究[J]. *光学学报*, 2015, 35(1): 0122006.
- [2] Thomas H. Jamieson. Decade wide waveband optics[C]// SPIE, 1998, 3482: 306-320.
- [3] Tamagawa Y, Tajime T. Dual-band optical systems with a projective athermal chart: design [J]. *Appl Opt*, 1997, 36(1): 297-301.
- [4] Zhang Chunyan, Shen Weimin. Design of an athermalized MWIR and LWIR dual band optical system [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2012, 41(5): 1323-1328. (in Chinese)
张春艳, 沈为民. 中波和长波红外双波段消热差光学系统设计[J]. *红外与激光工程*, 2012, 41(5): 1323-1328.
- [5] Dai Shixun, Chen Huiguang, Li Maozhong, et al. Chalcogenide glasses and their infrared optical applications [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2012, 41(4): 847-852. (in Chinese)
戴世勋, 陈惠广, 李茂忠, 等. 硫系玻璃及其在红外光学系统中的应用[J]. *红外与激光工程*, 2012, 41(4): 847-852.
- [6] Sun Jie, Nie Qiuhua, Wang Xunsi, et al. Research on thermal and optical properties of novel Ge-Te-Se-Sn far infrared transmitting chalcogenide glasses [J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, 31(11): 1116003. (in Chinese)
孙杰, 聂秋华, 王训四, 等. 新型远红外Ge-Te-Se-Sn硫系玻璃的热学与光学性质研究[J]. *光学学报*, 2011, 31(11): 1116003.
- [7] Jiang Bo, Wu Yuehao, Dai Shixun, et al. Optical design of inspection lens for internal defect of large-diameter chalcogenide glasses and experimental verification [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2016, 45(7): 0718002. (in Chinese)
姜波, 吴越豪, 戴世勋, 等. 大口径硫系玻璃内部缺陷检测物镜设计及实验验证[J]. *红外与激光工程*, 2016, 45(7): 0718002.
- [8] Qu Rui, Deng Jian, Peng Xiaole, et al. 0.4-1.7 μm wideband fast F -number optical system design [J]. *Acta Optica Sinica*, 2015, 35(8): 0822007. (in Chinese)
曲锐, 邓键, 彭晓乐, 等. 0.4~1.7 μm 宽波段大相对孔径光学系统设计[J]. *光学学报*, 2015, 35(8): 0822007.
- [9] Deng Jian, Wu Hui, Zhong Xiaobing. Common optical path common focal plane infrared dual-band zoom optical system: China, CN103197407A[P]. 2013-07-10.
邓键, 吴辉, 钟小兵. 共光路红外双波段共焦面变焦光学系统: 中国, CN103197407A[P]. 2013-07-10.
- [10] Housand Brien J, Tener Gens D, Jesse Susan J - EP. Combined laser/FLIR optics system[P]. US6359681 B1. 2002-03-19.
- [11] Ken Riehl. Raptor (DB-110) reconnaissance system: in operation[C]//SPIE, 2002: 4824:1-12.
- [12] Xu Shiwen, Fu Ling, Xu Bo, et al. Design of a compact all-reflective optical system for a CCD remote sensing camera [J]. *Acta Optica Sinica*, 2000, 20(9): 1268-1271. (in Chinese)
许世文, 付苓, 徐波, 等. 小轻型CCD遥感相机全反射光学系统设计[J]. *光学学报*, 2000, 20(9): 1268-1271.
- [13] Chang Jun, Weng Zhicheng, Jiang Huilin, et al. Design of long focal length space optical system with three reflective mirrors [J]. *Opt Precision Eng*, 2001, 9(4): 315-318. (in Chinese)
常军, 翁志成, 姜会林, 等. 长焦空间三反光学系统的设计[J]. *光学精密工程*, 2001, 9(4): 315-318.
- [14] Chen Zhe, Zhang Xingxiang, Chen Changzheng, et al. A common aperture coaxial three-mirror optical system with high resolution [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2015, 42(11): 1116002. (in Chinese)
陈哲, 张星祥, 陈长征, 等. 高分辨率共孔径同轴三反光学系统[J]. *中国激光*, 2015, 42(11): 1116002.
- [15] Gerald Uyeno. Raytheon advanced forward looking infrared (ATFLIR) pod[C]//SPIE, 2006, 6209: 62090H.
- [16] Wu Heyun, Wang Peigang. Designs of reflective off-axis system [J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2006, 33(1): 34-37. (in Chinese)
伍和云, 王培纲. 离轴反射式光学系统设计[J]. *光电工程*, 2006, 33(1): 34-37.