

文章编号: 1001 - 893X(2012)07 - 1222 - 05

# 毫米波/红外共孔径复合导引头技术分析\*

何 均

(中国西南电子技术研究所, 成都 610036)

**摘 要:** 针对毫米波/红外(MMW/IR)复合导引头的共孔径方案进行讨论, 通过对多种共孔径方案的原理及特点进行对比分析, 指出了各种方案的优点和不足, 归纳出共孔径复合导引头研究的关键技术, 展望了复合导引头未来的发展趋势。

**关键词:** 毫米波/红外; 共孔径; 复合导引头

**中图分类号:** TN959.2      **文献标志码:** A      doi: 10.3969/j.issn.1001-893x.2012.07.036

## Technology Analysis of MMW/IR Common Aperture Compound Seeker

HE Jun

(Southwest China Institute of Electronic Technology, Chengdu 610036, China)

**Abstract:** The common aperture scheme of millimeter wave/infrared(MMW/IR) compound seeker is discussed. By comparing and analysing the principle and characteristics of many common aperture schemes, the advantages and disadvantages of each option are pointed out. Then the key technology is summarized and the developing trend is prospected.

**Key words:** millimeter wave/infrared ray(MMW/IR); common aperture; compound seeker

### 1 引 言

随着现代军事理论和军事装备技术的发展, 对导弹末制导的天时/天候适应能力、反隐身/抗干扰能力、打击目标精度等提出了越来越高的要求, 各种适用于末制导的光电、红外、毫米波技术纷纷研究并获得了实际应用。单一制导模式由于自身存在一些不可避免的缺点, 难以全面满足军事打击的要求, 为此各种复合制导技术如 MMW/IR 复合、光学/红外复合、红外/紫外复合、毫米波/微波复合、毫米波主/被动复合等方式得到了广泛研究<sup>[1]</sup>。

在采用多模复合制导的过程中, 应遵循一些复合原则: 一是频段间隔大, 为有效利用目标不同频段的信息, 模式的工作频率在电磁波谱上应尽量远离;

二是制导方式不同, 尤其当探测的能量为同一种形式时, 更应注意选用不同制导方式进行复合; 三是兼容性好, 复合模式间的探测器口径应能兼容, 便于实现共孔径复合结构; 四是互补性, 参与复合的模式在探测功能和抗干扰功能上应互补; 五是便于集成, 参与复合的各模式器件、组件实现固态化、小型化和集成化, 满足复合后导弹空间、体积和重量的要求。

在这些复合方式中, 由于 MMW/IR 复合具有制导精度高、抗干扰能力强、环境适应性好的特点, 成为末制导领域较有发展前途的复合方式, 是国内外多模复合制导技术优先发展的重要方向。根据毫米波和红外信号透过天线罩区域的不同, 有两种主要的复合方式, 一种为分孔径复合, 另一种为共孔径复合。分孔径复合尽管结构简单, 但受导引头安装空间限制、误差校正等因素的影响, 难以适应弹载环境

\* 收稿日期: 2012 - 02 - 28; 修回日期: 2012 - 05 - 18

的要求。共孔径复合具有体积小、误差校正简单,能较好地适应弹载环境要求。本文对 MMW/IR 复合导引头的发展动态、技术特点进行了分析,针对每种具体的共孔径方案,分析其工作原理、优缺点及可行性,并归纳总结相关关键技术,指出了复合导引头未来的发展方向。

## 2 国外 MMW/IR 导引头发展动态

MMW/IR 复合制导方式在国外已研究多年并获得了大量应用,早在 20 世纪 60 年代,部分发达国家就开始了 MMW/IR 制导技术的研究。进入 90 年代,各种 MMW/IR 复合导引头相继研制成功并装备部队。目前,MMW/IR 复合制导已成为多模复合制导技术发展的主流形式。国外研制情况如表 1 所示。

表 1 国外雷达/红外复合导引头研制情况

Table 1 The foreign researching status of radar-IR compound seeker

国别	导弹型号	制导方式	厂商	研制情况
美国	SADARM 末制导反装甲弹药	毫米波 (35 GHz)/红外	霍尼韦尔公司	已装备
美国	空地反坦克导弹	MMW/IR/半主动激光	洛·马公司	已开始装备
法国	TACED 反坦克末敏弹	MMW/IR	汤姆逊公司	
法国	ACED 反装甲炮弹	MMW/IR 成像		
俄罗斯	SA-N-8 近程舰空导弹	微波/红外		已装备
英国	S225X 远程空空导弹	微波/红外		研制中
德国	SMArt155 末制导炮弹	MMW/IR	GIWS 公司	已装备
德国	苍鹰反坦克导弹	MMW/IR		已装备
德国	ZEPL、EPHRAM 制导炮弹	MMW/IR		已装备
法国、德国	对陆攻击导弹 Astrid	毫米波 (94 GHz)/红外		
英国、法国、意大利、瑞典	120 mm 末制导迫击炮弹 Griffin	MMW/IR		
瑞典	ROSS 式 155 mm 智能炮弹	MMW/IR		

从表 1 中可以看出,国外发达国家对 MMW/IR 复合导引头研究广泛,在对空、对地、对海导弹上都有多种型号的研制和装备,成为复合制导技术发展的主要方式之一。

## 3 MMW/IR 共孔径复合的特点

MMW/IR 共孔径复合中,红外采用被动接收,毫米波采用主动工作方式,红外光学系统和毫米波收发天线设计成共口径的统一体。发射毫米波信号,同时接收红外和毫米波回波,将红外和毫米波能量分离,然后再分别传输至红外探测器和毫米波接收机。该复合方式具有以下特点<sup>[2]</sup>。

(1)扫描系统简单。采用共孔径的技术方案,可以减少扫描硬件,优化天线/光学孔径面积,同时保持瞄准线的校准,红外/毫米波双模传感器只需要安装在同一常平架上,光轴和电轴相互重合,两分系统的扫描方式便于统一,从而简化了扫描系统。

(2)探测精度高。在红外/毫米波复合传感器中,光轴与电轴重合,当复合系统探测同一目标时两个系统坐标一致,无需校准,避免了校准误差,提高了精度。

(3)体积小,质量轻,成本低。适应弹上严格的空间要求,是未来精确复合末制导技术的重要发展方向。

(4)加工难度大。头罩要能透过两个跨度较大的波带,同时设计良好的分光系统减少相互干扰。

实际使用过程中,由于毫米波作用距离较红外远,穿透云雾和烟尘能力强,波束比红外宽,因此在初段多采用毫米波制导,以便进行大范围搜索,迅速截获目标,且可利用高距离分辨技术实现目标检测与目标初始跟踪。在近距离时主要利用红外制导,这时可发挥红外分辨率高的优势,实现对目标的精确定位、跟踪及对目标的精确打击,克服毫米波导引头近距离情况下的角闪烁效应及相对较大的误差角度。除此之外,毫米波与红外复合可在目标识别阶段,充分利用毫米波雷达与红外探测器提供的目标特征,以提高目标识别性能。另外,为适应复杂多变的战场环境,可根据不同战场或目标属性,选择红外或毫米波中的一种来实现不同的制导功能,提高反隐身和抗干扰能力。

## 4 MMW/IR 共孔径复合方案分析

由于共孔径 MMW/IR 复合制导性能优越,因此受到了人们的重视。近年来,美国、英国、法国、德国和我国都进行了有效的研究。在 MMW/IR 共孔径复合方案中,毫米波可采用前馈源,也可采用后馈源。其中,毫米波通道可以是圆锥扫描方式、单脉冲方式或相控阵方式,红外通道可以是多元线阵串扫方式、并扫方式或焦平面阵列凝视成像方式。综合起来,一般有如下 5 种共孔径的复合类型<sup>[3]</sup>。

### 4.1 卡塞格林光学系统 - 卡塞格林天线复合

如图1所示,MMW/IR信号透过天线罩,经主、次反射镜的二次反射后汇聚于中心的焦点处,经分光镜透过毫米波反射红外信号,形成两个不同的支路分别经检测电路和处理电路后,在后端进行融合处理。其中,红外信号在经透镜处理前,采用光纤进行传输,保证红外信号损失最小且减小与毫米波之间的相互干扰<sup>[4]</sup>。

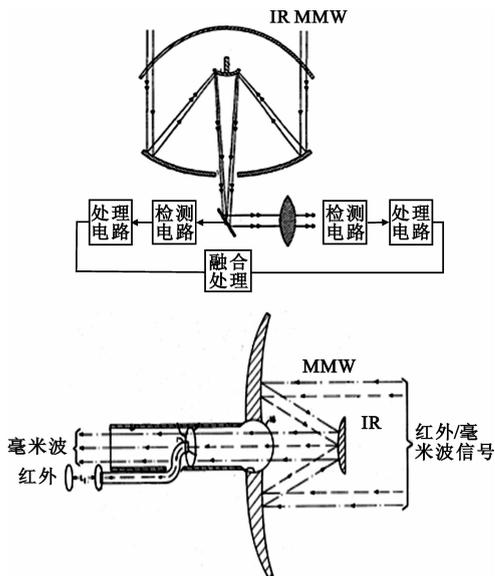


图1 卡塞格林光学 - 卡塞格林天线复合方案  
Fig.1 The compound scheme of cassegrainian optics - cassegrainian antenna

该复合方式为卡塞格伦后馈式共口径结构。这种结构具有以下特点:该反射系统没有色差,在多波段应用时不存在色差校正问题;实现成本低,反射系统对材料吸收性能要求低;陀螺负载小,除主镜和次镜由陀螺稳定外,红外探测器和毫米波收发器都不在陀螺上;毫米波和红外需在后端进行分光,分光镜的性能对系统的影响较大。

### 4.2 卡塞格林光学系统 - 抛物面天线复合

图2是前馈源的一种结构,由主镜和次镜组成卡塞格伦系统。这种结构的特点是:毫米波发射、接收部分会增加主次镜稳定陀螺的负担;主反射面的抛物面形式对于毫米波传输来说其效率不是最高的;此反射镜需要透过毫米波信号,导致毫米波信号幅度和相位误差,降低了毫米波天线的性能;由于主反射镜中间安装红外探测器,导致毫米波信号的泄漏或散射,影响毫米波天线的增益和旁瓣电平,尤其是当毫米波采用单脉冲体制时,对4个馈源的影响更为严重。

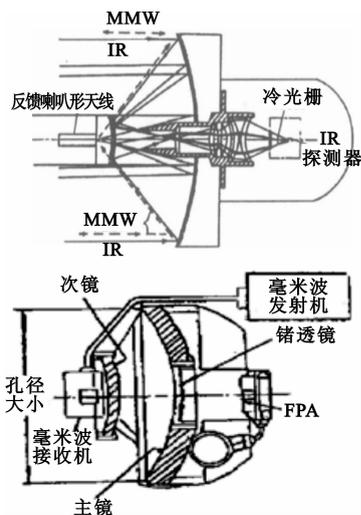


图2 卡塞格林光学 - 抛物面天线复合方案  
Fig.2 The compound scheme of cassegrainian optics - paraboloid antenna

图2中,毫米波信号采用前馈式方案,馈源放置于次反射镜前端,发射机置于主反射镜后方,通过波导将信号传输至馈源处,接收机可与馈源紧接放置,也可置于主镜后面。红外系统的次反射镜需具有良好的毫米波透过性能,同时,在主镜中心开孔处加入锩透镜,以透过红外信号而阻止毫米波信号通过<sup>[5]</sup>。

### 4.3 卡塞格林光学系统 - 单脉冲阵列天线复合

毫米波天线可采用微带天线形式,与红外主反射面形状一致<sup>[6]</sup>,也可采用波导裂缝天线形式,如图3所示。

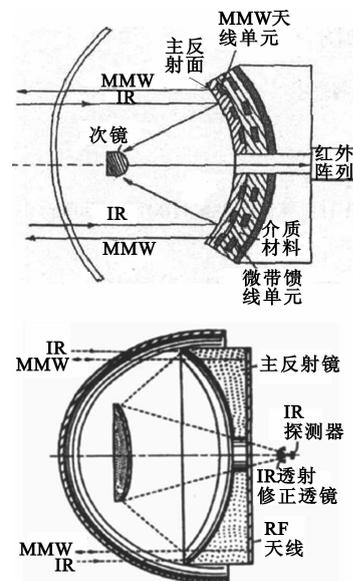


图3 卡塞格林光学 - 阵列天线复合方案  
Fig.3 The compound scheme of cassegrainian optics - array antenna

该复合方式中的毫米波 - 光学组件反射光学信号,毫米波天线单元位于组件的后端,毫米波天线与光学表面之间填充介质材料,凸透镜式的次反射镜与主反射镜具有相同的反射表面,将红外信号聚焦到中心的红外探测器上。该复合方式具有以下特点:该方式充分地利用了孔径尺寸,保证了光学能量采集的最大化;高精度的光学表面适合应用于较大的光学范围,包括紫外到红外频段;该系统的次镜挡光,毫米波有效接收口径降低,降低了天线增益,影响毫米波探测距离;天线面与主反射镜间的介质材料对毫米波传输有一定的影响。

#### 4.4 透镜式光学系统 - 格里高里天线复合

毫米波卡塞格林天线的馈源可以位于天线面中心轴线上,称为正馈方式,如图 1 所示,也可以位于轴线的一侧,称为偏馈方式,如图 4 所示。该方式中毫米波信号经主反射镜和次反射镜两次反射进入馈源,红外信号直接穿过主镜进行传输,主镜具有反射毫米波透过红外信号的特性,口径利用面积大,不存在次镜挡光问题<sup>[7]</sup>。

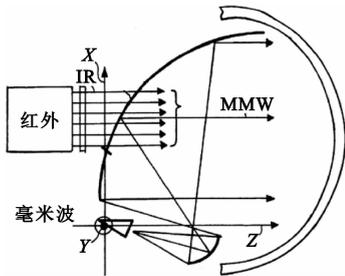


图 4 透镜式光学 - 格里高里天线复合方案  
Fig.4 The compound scheme of cassegrainian optics - Gregorian antenna

#### 4.5 卡塞格林光学系统 - 相控阵天线复合

前述的几种复合方式均为机械扫描,信号传输路径重合度高,相互之间的信号串扰严重,在两个导引头共用一个头锥的情况下,将天线安装的弹锥表面,与弹体共形,采用相控阵方式扫描波束,将内部空间留给红外导引头,根据弹体形状和制导应用需求,相控阵天线可采用柱形或锥形,如图 5 所示,这种复合方式具有以下特点。

(1)重量轻、省空间。天线和天线罩可采用一体化结构设计,天线不占用额外的空间,从而消除了天线罩对导引头性能的影响;消除导引头内的全部运动部件,减少了导引头重量,降低对弹体空间的需求,同时兼顾了飞行器对空气动力学的要求<sup>[8]</sup>。

(2)扫描角度大、速度快。特别适合快速、宽角扫描弹载相控阵导引头应用。

(3)波束赋形能力强,捷变灵活。共形相控阵天线由大量的(可能多达数百至数千个)单元天线组成,各个单元可以进行实时独立控制,从而具备了对发射或接收信号在时域、空域和频域的控制能力,以及对天线波束重构的能力。

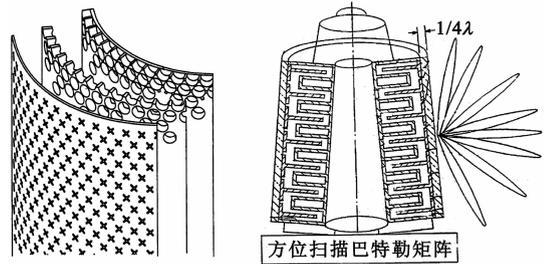


图 5 卡塞格林光学 - 相控阵天线复合方案  
Fig.5 The compound scheme of cassegrainian optics - phased array antenna

2002 年,美国的 PYONG K. PARK 和 TUCSON 提出了如图 5 右图的导引头共形相控阵。阵列单元是在图中所示的蛇形线结构侧面上开的槽缝。阵列通过纵向频扫,横向相控来形成波束扫描。

此外,共孔径复合还存在一些其他方式,如诺·格公司研制的主动毫米波/被动红外/半主动激光三模共孔径复合导引头,如图 6 所示。包括一个抛物面能量采集主镜单元,一个前置介质次镜单元,该单元介质表面将红外信号反射到位于中心纵轴线上的红外检测单元,从而为毫米波信号的传输提供无遮挡的传输路径,同时将激光信号转向以与射频红外信号分离,减小相互之间的干扰与耦合<sup>[9]</sup>。

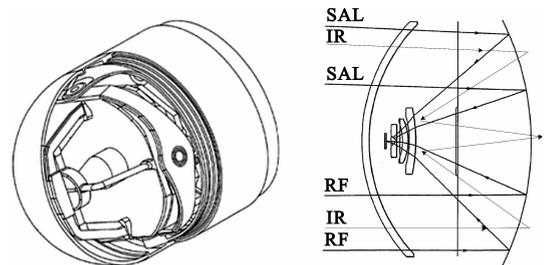


图 6 三模共孔径复合方案  
Fig.6 The compound scheme tri - mode seeker

## 5 关键技术分析

### 5.1 高强度透波材料

在上述的几种复合方式中,为实现毫米波与红

外分路径传输,需要主镜或次镜具有反射红外透射毫米波信号的能力。实现的方案主要有两种,一是通过在一定厚度的介质板表面镀光学膜来达到透红外而反射毫米波的效果;另一种方案采用频率选择表面来制造复用副面。无论哪种方式,高强度和高透过性能的材料都需进一步研究。

## 5.2 遮光问题

在第4.2和第4.3节所示的方案中,主反射镜中间掏空以透过红外能量,同时该主反射面作为毫米波收发天线,由于中心掏空导致毫米波天线波束增益下降,副瓣电平抬高,影响了毫米波的探测和杂波抑制性能。因此,需要对毫米波和红外工作性能折衷考虑,尽量减小中心掏孔的尺寸。

## 5.3 高精度、高负载转台

共孔径方案中,毫米波射频信号前端和红外光学系统共同作为转台的负载,该负载较大,并需具有高的稳定精度。因此,高精度的稳定系统是复合导引头的关键部件之一。通常采用以下几种形式:一是动力陀螺框架式常平架稳定结构,该系统结构简单,但精度不太高;二是稳定平台式结构,该方式稳定可靠,可完全消除载体运动引起的不平稳干扰误差,但设备复杂,成本高;三是气浮陀螺式结构,该方式耐高过载,精度高,结构复杂,难度大。

## 5.4 共形相控阵技术

弹载共形相控阵技术目前还处于研究之中,尚有许多关键技术需要突破,包括以下几方面:一是共形阵列方向图综合问题,在平面相控阵中使用的方向性乘积定理不再适用;二是阵列分析困难,目前的分析软件对电大超电大尺寸的曲面特性分析难以支持;三是交叉极化严重,较大的交叉极化分量往往导致很大的极化损失;四是馈电网络复杂,阵元之间的耦合严重;五是由于收发单元安装于弹体表面,需要承受高热、高动态的恶劣环境。

## 6 结束语

采取什么样的复合方案要从打击目标的特性、系统战术指标、系统技术参数、技术可实现性、成本与效率等多方面进行综合考虑。本文较为全面地对多种MMW/IR共口径复合方案进行了分析,指出每

种方案的特点及技术难点,对其中的关键技术进行了分析总结,可为从事MMW/IR共口径复合研究的科研人员提供借鉴和技术支撑。目前,尽管有少量的共口径复合导引头在某些低速战术弹上研究成功,但在高速、高机动导弹上还有很大的技术难度,特别是共形相控阵复合方面,尚有大量的技术难题需要突破。

## 参考文献:

- [1] 何均.反装甲导弹雷达导引头制导性能分析[J].电讯技术,2012,52(6):869-872.  
HE Jun. Guidance performance analysis of anti-armor missile radar seeker[J]. Telecommunication Engineering, 2012, 52(6):869-872. (in Chinese)
- [2] 胡体玲,李兴国.毫米波/红外复合导引头关键技术分析[J].激光与红外,2007,37(2):101-103.  
HU Ti-ling, LI Xing-guo. Analysis of the Key Technology of MMW/IR Compound Seeker[J]. Laser & Infrared, 2007, 37(2):101-103. (in Chinese)
- [3] 刘永昌.红外/毫米波复合导引头技术分析研究[J].红外技术,1994,16(4):1-8.  
LIU Yong-chang. An Analysis of IR/mmW Combined Seeker[J]. Infrared Technology, 1994, 16(4):1-8. (in Chinese)
- [4] Saffold J A, Green A H. Dual Mode Antenna for Millimeter Wave and Infrared Radiation: US,4652885[P],1987.
- [5] Brusgard T C, McCormick T C. Millimeter Wave and Infrared Sensor in a Common Receiving Aperture: US,5214438[P],1993.
- [6] Burkett F T, Bronson J G. Guidance apparatus with dual mode sensor: US,5182564[P],1993.
- [7] Munich G S, ErwinStockdorf E H. RF and IR bispectral window and reflector antenna arrangement including the same: US,6307521[P],2001.
- [8] Park P K, Tucson A Z. Electronically Scanned Dielectric Covered Continuous Slot Antenna Conformal to the Cone for Dual Mode Seeker: US,20030043085[P],2003.
- [9] Kierman S C, Dayton M D. Tri-Mode Co-Boresighted Seeker: US,6924772[P],2005.

## 作者简介:

何均(1975—),男,四川西充人,硕士,工程师,主要研究方向为雷达系统设计。

HE Jun was born in Xichong, Sichuan Province, in 1975. He is now an engineer with the M.S. degree. His research concerns radar system design.

Email: hjsxwl@sina.com