

毫米波 / 红外成像复合天线

郝沛明 孔祥蕾 林 莉 阎秀芬

(中国科学院安徽光学精密机械研究所 合肥 230031)

卞南华

(航天工业部第二研究院 北京 100854)

摘要 在导弹武器装备中, 信号接收系统或红外成像系统, 即接收天线是非常重要的。本文对毫米波 / 红外成像复合天线研制的每个主要环节进行了系统地分析, 它包括四部分: 光学成像系统、毫米波探测器、光学扫描器和红外探测器。描述了光学成像系统和光学扫描系统的设计方法, 光学系统是由两个非球面反射镜所组成, 并给出了光学系统设计的各种数据。

关键词 复合天线, 非球面反射镜, 红外探测器

1 引 言

在现代化战争中, 自动跟踪导弹武器系统是必须具备的, 装在导弹头部的红外成像制导系统, 由红外成像系统, 即接收天线、图像处理器及随动系统等三大部分组成, 如图 1 所示。

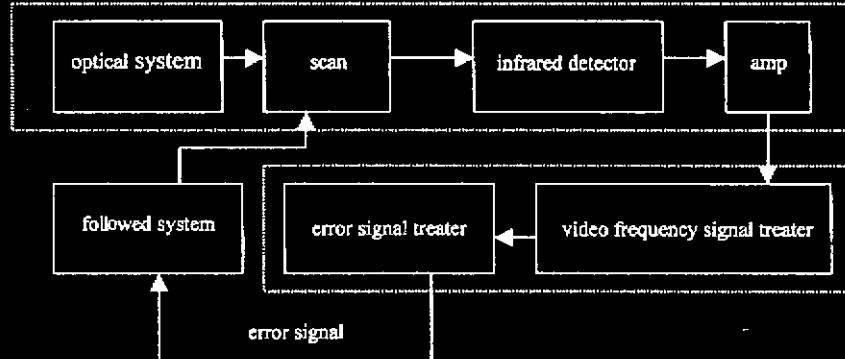


Fig.1 Sketch of infrared imaging guided system

目标的红外辐射经天线接收后, 即红外成像后输出相应的视频信号, 经图像处理器后可测定目标在视场中的位置, 以及与视场中心的偏离量。经误差信号处理器得出相应的误差信号电压, 此信号电压经功率放大器后, 驱动随动系统方位和俯仰的执行电机, 使红外成像系统的视场中心对准目标。这样不断地测量和修正, 保证对目标的跟踪和观察。与此同时, 装在随动系统轴上的角度传感器输出的角速度信号与误差信号一起输给自动驾驶仪处理, 然后输出与设定的制导规律相应的制导电压, 令导弹舵面的执行机构动作, 使导弹按要求的弹道飞行。因此, 对复合天线的设计要求是非常苛刻的, 设计要求作用距离大于 10 km; 在 $\pm 40^\circ$ 的条件下保证

仪器不变形，不离焦，保持成像清晰；重量要轻，体积要小；防震、防腐蚀；在全视场内，光学系统的综合指标，即弥散圆直径小于 0.1 mm，最好能达到 0.05 mm 以下；安装和维修方便，保证在任何条件下仪器能正常使用。

2 毫米波 / 红外成像复合天线的结构

复合天线由四部分组成：光学成像系统、毫米波探测器（本文不作介绍）、光学扫描器和红外探测器。按设计要求，根据参考文献 [1] 中的公式 (1) 论证光学成像系统的结构参数：

$$D_0 = \frac{I \tau_a A_d}{(f/\text{数}) L_B R^2 (S/B)}, \quad (1)$$

其中： D_0 为入瞳直径， I 为目标的辐射强度， τ_a 为大气透过率， A_d 为一线阵探测器中的一个单元探测器的面积， f 为光学系统的焦距， $(f/\text{数})$ 为光学系统相对孔径的倒数， L_B 为背景辐射亮度， R 为目视至探测系统的距离， S/B 为信号对背景的比值。按上面公式计算的复合天线的系统结构参数表示在图 2。在图 2 中：1 为毫米波探测器；2 为卡塞格林系统的次镜，口径 $D_e = 58 \text{ mm}$ ，透过毫米波，反射红外波；3 为卡塞格林系统的主镜，口径 $D_0 = 160 \text{ mm}$ ，卡塞格林系统的焦距 $f = 320 \text{ mm}$ ；4 为光学扫描器，它是用锗材料加工的带有三个不同角度的平行六面体棱镜；5 为红外探测器，采用扫积型 (SPRITE) 光导碲镉汞 (HgCdTe) 探测器。其余部分为桁架薄壳支撑结构。

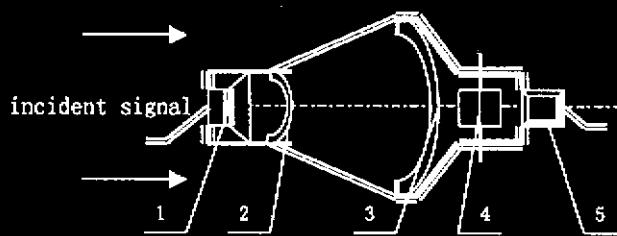


Fig.2 Sketch of compound antenna system

1 millimetre wave detector, 2 second mirror, 3 primary mirror, 4 optical scanner, 5 infrared detector

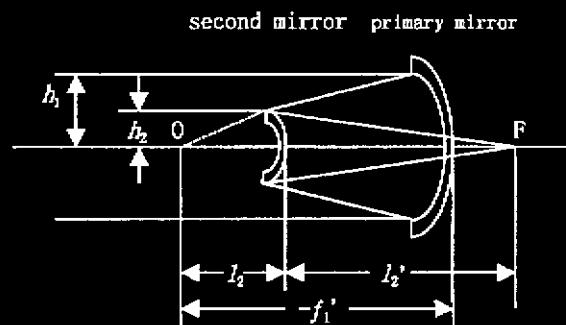


Fig.3 Cassegrain system

2.1 光学成像系统

红外光学成像系统一般采用卡塞格林系统，但有两种形式，一种是消球差的卡塞格林系统，另一种是同时消球差和彗差的卡塞格林系统，下面将分别描述。

1) 消球差的卡塞格林系统

按参考文献 [2] 中的下面公式,

$$S_I = \Sigma hP + \Sigma h^4 K = 0, \quad (2)$$

其中: $P = \left(\frac{\Delta u}{\Delta \frac{1}{n}} \right)^2 \Delta \frac{u}{n}, \quad K = -\frac{e^2}{R_0^3} \Delta n,$

h 为轴上光线的入射高度, u 为入射光线与光轴的夹角, n 为折射率, e 为二次曲面的偏心率, R_0 为二次曲面顶点的曲率半径。由图 3 可以看出, α 为光学系统的遮栏比, β 为次镜的放大率, 各种参数的关系由下面公式给出:

$$R_{01} = 2f'_1, \quad \alpha = \frac{l_2}{f'_1} = \frac{h_2}{h_1}, \quad \beta = \frac{l'_2}{l_2} = \frac{u_2}{u'_2}, \quad R_{02} = \frac{\alpha \beta R_{01}}{\beta + 1}. \quad (3)$$

现将所述的有关参数代入公式 (2), 就可以得出:

$$e_2^2 = \frac{(e_1^2 - 1)\beta^3 + \alpha(1 - \beta)^2(1 + \beta)}{\alpha(1 + \beta)^3}. \quad (4)$$

按公式 (3) 和 (4) 计算出消球差的卡塞格林光学系统的结构参数列入表 1, 计算的点列图表示在图 4, 弥散圆小于 0.099 mm。

表 1 卡塞格林系统的光学参数

NS	U0	H1	UPO	ISTOP
4	0.000000	80.000	-0.25	1
NO	RADIUS	SEPN	INDEX	HCA
1	0.0000	0.000	1.0000	80.000 0.0000
2	-200.0000	0.100	1.0000	80.069 1.0000
3	-96.9685	-66.667	-1.0000	28.405 3.6446
4	0.0000	106.666	1.0000	1.471 0.0000

表 2 R-C 系统的光学参数

NS	U0	H1	UPO	ISTOP
4	0.000000	80.000	-0.25	1
NO	RADIUS	SEPN	INDEX	HCA
1	0.0000	0.000	1.0000	80.000 0.0000
2	-200.0000	0.100	1.0000	80.069 1.1080
3	-96.9685	-66.667	-1.0000	28.405 4.6600
4	0.0000	106.666	1.0000	1.471 0.0000

注: NS: 光学系统的总面数, U0: 入射孔径角, 对目标在无限远而言 $U0=0$, H1: 入射高度, UPO: 光学系统的视场角, ISTOP: 光栏所在的面数, NO: 面的序号, RADIUS: 面的半径, SEPN: 面与面之间的间隔, INDEX: 光学材料的折射率, HCA: 通光口径的半高度, ASPH: 非球面的偏心率值, 用 e^2 来表示。

2) 同时消球差和彗差的卡塞格林系统

为提高光学系统的成像质量, 也可采用里奇 (Ritchey) 及克列季因 (Chrétien) 提出的同时消球差和彗差的改进型卡塞格林系统, 简称为 R-C 系统, 按参考文献 [2] 中的下面公式,

$$S_{II} = \Sigma yP - J \Sigma W + \Sigma h^3 yK = 0, \quad (5)$$

其中: $W = \frac{\Delta u}{\Delta \frac{1}{n}} \Delta \frac{u}{n},$

y 为主光线的入射高度, J 为拉格朗日 (Lagrange) 不变量, 利用公式 (2)、(3)、(4) 和 (5) 就可以解出:

$$e_1^2 = 1 + \frac{2\alpha}{(1 - \alpha)\beta^2}, \quad e_2^2 = \frac{\frac{2\beta}{1 - \alpha} + (1 + \beta)(1 - \beta)^2}{(1 + \beta)^3}. \quad (6)$$

按公式(3)和(6)计算出消球差和彗差的 R-C 光学系统的结构参数列入表 2, 计算的点列图表示在图 5, 弥散圆小于 0.013 mm。



Fig.4 Spot diagram of Cassegrain system

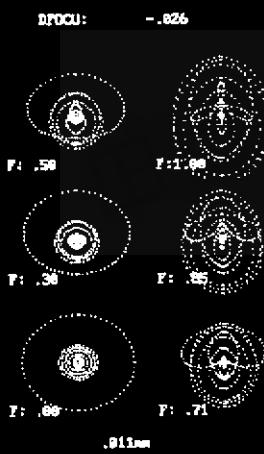


Fig.5 Spot diagram of R-C system

从点列图图 4 和图 5 的对比来看, 在同样大小的视场内, 图 5 中的弥散圆比图 4 中的弥散圆小得多, 这说明 R-C 系统比卡塞格林系统的成像质量要好, 但在 R-C 系统中的主镜为双曲面, 比加工抛物面要难得多。目前采用的卡塞格林系统已达到使用要求, 如果想扩大视场时, 就可以采用 R-C 系统。

2.2 光学扫描器

光学扫描器是用锗材料加工的带有三个不同角度的平行六面体棱镜, 如图 6 所示, 在

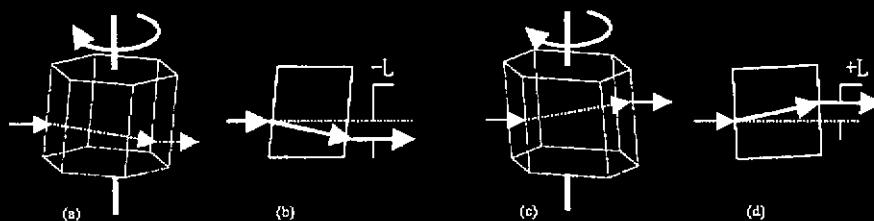


Fig.6 Light sketch of rotating 180° scanning prism

(a) $90^\circ + i$ place, (b) $90^\circ + i$ sectional drawing, (c) $90^\circ - i$ place, (d) $90^\circ - i$ sectional drawing

图 6 中, (a) 光轴与入射面法线的夹角为 $+i$; (b) 夹角为 $+i$ 时光路截面图, 光线和光轴向下平移; (c) 光轴与入射面法线的夹角为 $-i$; (d) 夹角为 $-i$ 时光路截面图, 光线和光轴向上平移。对于对面平行的光轴与入射面法线夹角分别为 $\pm i$, $\pm 2i$, $\pm 3i$ 的六面体棱镜, 固定在旋转轴上使棱镜旋转一周时, 在水平方向生成六次行扫描, 平移的条宽为 $\pm L$, $\pm 2L$, $\pm 3L$, 选择棱镜的厚度为 d , 折射率为 n , 行扫描的宽度 L 计算如下:

$$L = d \times \tan \left[\arcsin \left(\frac{\sin i}{n} \right) \right]. \quad (7)$$

2.3 串并扫体制专用探测器 — 扫积型红外探测器 (Sprite)

串并扫体制是在取串扫和并扫各自优点的基础上产生的, 扫积型探测器 (Sprite) 是 1981

年英国皇家信号与雷达研究中心的 Dr. Elliott 发明的新型 HgCdTe 光导探测器, 由英国马拉德公司研制成功, 于 1983 年正式投产。所说的扫积型探测器 (Sprite) 是在很薄的蓝宝石衬底上附着碲镉汞长条形晶片, 为了串并扫, 可以作成 4 条或 8 条晶片, 在每条 TCM 晶片 (n 型半导体) 的两端加直流偏压约 $30 \text{ V} \cdot \text{cm}^{-1}$, 电场的极性是左正右负。由于扫积型探测器具有许多优点, 得到广泛的应用, 大大地促进了红外成像技术的发展。

3 非球面的加工与检验

卡塞格林系统的主镜为抛物面, 通光口径 D_0 为 160 mm, 焦距为 100 mm, 主镜的相对孔径 $A_{01} = 1/0.625$, 这样超大相对孔径的抛物面国内外尚未见报道, 我们采用改进型零位 (NULL) 补偿检验方案, 如图 7 所示。设计的补偿透镜的系统误差小于 $\lambda/40$, 这样就确保主镜的加工质量。对于零位 (NULL) 补偿检验法, 请参阅参考文献 [4], 我们以后将专门论述这方面的研究工作。

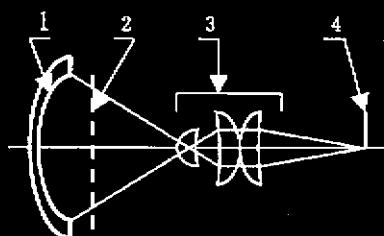


Fig.7 Null compensating test of primary mirror

1 primary mirror under test, 2 grid-plate,
3 compensator, 4 knifer,

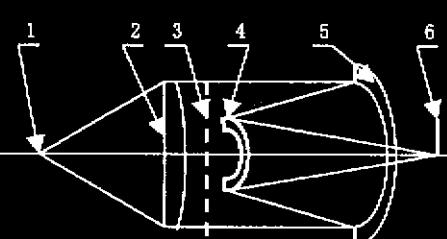


Fig.8 Testing of second mirror

1 star point, 2 collimator, 3 grid-plate,
4 second mirror under test, 5 primary
mirror, 6 knifer

卡塞格林系统的次镜为凸双曲面, 凸双曲面的加工是相当困难的。在主镜加工好的基础上, 利用现有的条件, 次镜与主镜组合成卡塞格林系统, 采用平行光管法检测和加工次镜, 如图 8 所示。有关非球面加工的问题, 在这里就不论述了, 请参阅参考文献 [3]。

4 测试结果

1) 实验室的测试结果:

卡塞格林系统装配好以后, 测试结果如下:

目视分辨率为 500 1/mm; 弥散圆直径小于 0.05 mm; 重量和体积都达到了设计要求; 仪器的总长度小于 160 mm。

2) 室外的测试结果:

1) 弥散圆直径 $\rho < 50 \mu\text{m}$; 2) 主镜相对孔径 D/F 为 1.6:1; 3) 次镜能透过 8 mm 毫米波, 透过率 95%, 同时反射 8 ~ 12 μm 红外波, 反射率 95%。该复合导引头系统对民航机 (波音 737) 的探测距离为 25 km。相对孔径为 1.6:1 的非球面反射物镜系统的设计和加工均为国内首创, 国际先进。

5 结 论

我们研制的毫米波 / 红外成像复合天线与电路系统、微机、显示系统对接，整机分别在昆明和北京等地作了外场试验，红外光学成像系统对 10 km 以外的目标成像清晰，也可探测到毫米波信号。这是我国首台毫米波 / 红外共同探测使用的仪器，基本上达到了预想的目的。此项工作得到航天部二院的好评，并得到中国科学院安徽光学精密机械研究所所长基金的资助，在此表示感谢。

参 考 文 献

- 1 徐南荣, 卞南华编著. 红外辐射与制导. 北京, 国防工业出版社, 1997. 6
- 2 潘君骅, 郝沛明. 两个二次曲面反射镜组成的一般研究. 天文学报, 1965, 13(1): 46~56
- 3 郝沛明. 凸非球面加工. 光学学报, 1993, 11(10): 931~937
- 4 Malacara D. *Optical Shop Testing*. New York, Chichester, Brisbans, Toronto: John wiley & Sons Inc, 1987.
- 5 Smith Warren J. *Modern Optical Engineering*. New York: McGRAW HILL BOOK COMPANY, 1966.
- 6 Dubner H. Optical design for infrared missile seekers. *Proceedings of the I.R.E.*, 1959, 47: 1537~1539
- 7 Lettington A H. Compact high performance thermal imager. *SPIE*, 1986. Vol.685

Compound Antenna for Millimeter Wave/Infrared Imaging

Hao Peiming Kong Xianglei Lin Li Yan Xiufen

(Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics, Academia Sinica Hefei 230031)

Bian Nanhua

(Second Research Institute, Ministry of Space Industry Beijing 100854)

Abstract It is very important for systems of signal receiving or infrared imaging in missile weaponry. Each key link for developing compound antenna of millimeter wave/infrared imaging is systematically analyzed in this paper. It includes four parts: an infrared imaging system, a millimeter wave detector, an optical scanner and an infrared detector. The designed method of optical imaging system and optical scanner have been described. This optical system consists of two aspherical mirrors i.e. Cassegrain system, the designed datas have been given.

Key words compound antenna, aspherical mirror, infrared detector

如何学习天线设计

天线设计理论晦涩高深，让许多工程师望而却步，然而实际工程或实际工作中在设计天线时却很少用到这些高深晦涩的理论。实际上，我们只需要懂得最基本的天线和射频基础知识，借助于 HFSS、CST 软件或者测试仪器就可以设计出工作性能良好的各类天线。

易迪拓培训(www.edatop.com)专注于微波射频和天线设计人才的培养，推出了一系列天线设计培训视频课程。我们的视频培训课程，化繁为简，直观易学，可以帮助您快速学习掌握天线设计的真谛，让天线设计不再难…



HFSS 天线设计培训课程套装

套装包含 6 门视频课程和 1 本图书，课程从基础讲起，内容由浅入深，理论介绍和实际操作讲解相结合，全面系统的讲解了 HFSS 天线设计的全过程。是国内最全面、最专业的 HFSS 天线设计课程，可以帮助你快速学习掌握如何使用 HFSS 软件进行天线设计，让天线设计不再难…

课程网址: <http://www.edatop.com/peixun/hfss/122.html>

CST 天线设计视频培训课程套装

套装包含 5 门视频培训课程，由经验丰富的专家授课，旨在帮助您从零开始，全面系统地学习掌握 CST 微波工作室的功能应用和使用 CST 微波工作室进行天线设计实际过程和具体操作。视频课程，边操作边讲解，直观易学；购买套装同时赠送 3 个月在线答疑，帮您解答学习中遇到的问题，让您学习无忧。

详情浏览: <http://www.edatop.com/peixun/cst/127.html>



13.56MHz NFC/RFID 线圈天线设计培训课程套装

套装包含 4 门视频培训课程，培训将 13.56MHz 线圈天线设计原理和仿真设计实践相结合，全面系统地讲解了 13.56MHz 线圈天线的工作原理、设计方法、设计考量以及使用 HFSS 和 CST 仿真分析线圈天线的具体操作，同时还介绍了 13.56MHz 线圈天线匹配电路的设计和调试。通过该套课程的学习，可以帮助您快速学习掌握 13.56MHz 线圈天线及其匹配电路的原理、设计和调试…

详情浏览: <http://www.edatop.com/peixun/antenna/116.html>



关于易迪拓培训:

易迪拓培训(www.edatop.com)由数名来自于研发第一线的资深工程师发起成立,一直致力于专注于微波、射频、天线设计研发人才的培养;后于 2006 年整合合并微波 EDA 网(www.mweda.com),现已发展成为国内最大的微波射频和天线设计人才培养基地,成功推出多套微波射频以及天线设计经典培训课程和 **ADS**、**HFSS** 等专业软件使用培训课程,广受客户好评;并先后与人民邮电出版社、电子工业出版社合作出版了多本专业图书,帮助数万名工程师提升了专业技术能力。客户遍布中兴通讯、研通高频、埃威航电、国人通信等多家国内知名公司,以及台湾工业技术研究院、永业科技、全一电子等多家台湾地区企业。

我们的课程优势:

- ※ 成立于 2004 年, 10 多年丰富的行业经验
- ※ 一直专注于微波射频和天线设计工程师的培养, 更了解该行业对人才的要求
- ※ 视频课程、既能达到了现场培训的效果, 又能免除您舟车劳顿的辛苦, 学习工作两不误
- ※ 经验丰富的一线资深工程师主讲, 结合实际工程案例, 直观、实用、易学

联系我们:

- ※ 易迪拓培训官网: <http://www.edatop.com>
- ※ 微波 EDA 网: <http://www.mweda.com>
- ※ 官方淘宝店: <http://shop36920890.taobao.com>