

·光学设计·

空间相机共轴三反红外光学系统设计

袁涛¹, 熊衍建^{2,3}, 吴晗平^{1,2,3}

(1. 武汉工程大学理学院, 湖北 武汉 430205; 2. 湘潭大学材料与光电物理学院, 湖南 湘潭 411105;
3. 武汉工程大学光电子系统技术研究所, 湖北 武汉 430205)

摘要: 针对空间光学系统长焦距、大视场、轻质量、小外形尺寸、大相对孔径、高成像质量的特点和发展趋势, 利用 ZEMAX 求解并优化空间相机共轴三反光学系统的结构参数, 设计出了焦距为 5 000 mm, F 数为 10 的共轴三反射光学系统。设计结果表明: 该系统视场角达 8° , 空间频率为 50 lp/mm, 调制传递函数值均大于 0.4, 接近衍射极限, 满足高分辨率空间相机不同的使用要求。该设计对空间相机红外光学系统结构选型、设计与制造具有一定的理论指导作用和意义。

关键词: 空间相机; 共轴三反; 长焦距; 宽视场; 光学系统设计

中图分类号: TB851

文献标识码: A

文章编号: 1673-1255(2011)02-0021-06

Design of Coaxial Three-mirror Infrared Optical System for Space Camera

YUAN Tao¹, XIONG Yan-jian^{2,3}, WU Han-ping^{1,2,3}

(1. School of Science, Wuhan Institute of Technology, Wuhan 430205, China;
2. Faculty of Material and Photo-electronic Physics, Xiangtan University, Xiangtan 411105, China;
3. Institute of Optoelectronic System Technology, Wuhan Institute of Technology, Wuhan 430205, China)

Abstract: The developing trend and characteristics of the space optical system are long focal length, large view field, light weight, small dimension, large relative aperture and high image quality. The structural parameters of the coaxial three-mirror system can be solved and optimized by ZEMAX. The coaxial three-mirror system with focal length of 5 000 mm and F number of 10 is designed. The result indicates that the field of view of the system is 8° , and MTF is higher than 0.4 at 50 lp/mm. The image quality of the optical system approaches the diffraction limit, and can meet the different requirements of high-resolution space camera. This design has a theoretical guidance and significance for the design and selection of structure as well as manufacture of space camera IR optical system.

Key words: space camera; coaxial three-mirror; long focal length; wide view field; design of optical system

在空间光学领域中, 为了提高观察的清晰度和观察范围, 需要进一步提高相机的地面分辨率和地面覆盖范围。相机的地面分辨率的大小与光学系统的角分辨率大小及卫星高度有关。当卫星的高度一定时, 增大相机光学系统的角分辨率能够有效地提高地面分辨率。光学系统的入射光瞳的直径

越大, 角分辨率越高。在保持相对孔径一定的条件下, 增大焦距就能相应地增大入瞳直径, 从而提高地面分辨率。另一方面, 相机的地面覆盖范围与卫星高度及视场角有关。同样, 在卫星高度一定的条件下, 增大相机的视场角能够扩大相机的地面覆盖范围。因此, 长焦距、大视场望远系统的研制在空

收稿日期: 2011-02-23

基金项目: 国家部委科研基金项目

作者简介: 袁涛(1989-), 男, 湖北麻城人, 武汉工程大学在读, 主要研究方向为红外光学系统设计; 吴晗平(1964-), 男, 湖南澧县人, 工学博士, 教授, 博士生导师。主要研究方向为光电子系统总体技术及设计。

间光学领域中有着十分重要的意义。由于此种相机使用环境的特殊性——必须适应卫星平台的要求,这就要求相机的光学系统的尺寸要尽可能小,质量要尽可能轻^[1]。

1 光学系统方案选择

在光学设计中对于长焦距高分辨率成像系统,若采用折射式,则存在结构尺寸大和二级光谱等问题;若采用折反式光学系统如施密特-卡塞格林系统,存在体积质量大,口径受限等问题,这些问题都对长焦距高分辨率成像系统的应用产生一定的限制。反射式光学系统的铝或介质膜的反射层,在很宽的波段范围内有很高的反射率,能量损失少,而折射元件一方面有可能通过材料内部吸收降低透过率,另一方面容易产生鬼像(冷反射)的问题^[1]。冷反射现象是热成像系统所特有的一种图像异态,指的是被制冷的探测器从透镜组光学表面的反射中看到自己。反射式系统不产生色差,孔径可以做得较大,宜于轻量化,在抗热性能方面有较强的优势^[2,3],而且可以通过非球面来校正像差,使结构简单、像质优良^[4,5]。因此反射式光学系统在空间光学领域得到了广泛应用。例如,美国的锁眼(KH)系列军事照相探测卫星的光学系统采用类似卡塞格林系统的二反射镜系统。二反射镜系统由于可优化的变量少,所以不能满足大视场、大相对孔径的要求^[6]。人们又引入了三反射镜系统(TMA)。相对于二反系统,三反消像差系统可以满足消像差、平像场,有利于实现高分辨率和系统透过率,是适合航天应用需求的反射式光学系统。近年来,国内外开始在对地卫星探测光学系统中使用三反消像散系统,如HIRIS^[7]、COIS^[8]、Hyperion^[9]等,其中一个具有代表性的系统是数字地球公司快鸟卫星上的BHRC60相机。

三反系统分为同轴和离轴系统,离轴系统综合性能优于同轴系统,考虑到系统成本和技术难度,故该设计采用同轴三反系统。

三反镜系统所有可能的结构形式及其结构特点为:(1)如果3个反射镜都是凸反镜或凹反镜,系统不可能满足匹兹万条件^[10];(2)对于小体积的仪器,主镜和次镜不能同时为凸反镜,否则镜片口径会很大;(3)如果次镜和三镜都为凸反镜,则整机封装难度较大;

(4)三镜为凸反镜时,要得到理想的后焦距,主光线的入射角会很大,成像质量也会变差。具体情况如表1所示。凸反镜为CX,凹反镜为CV。

表1 三反镜面形式及结构特点

序号	三镜面型(主镜、次镜、三镜)	结构特点
1	CV CV CV	不满足匹兹万条件
2	CV CV CX	三镜为凸镜
3	CV CX CV	合理结构
4	CV CX CX	不满足匹兹万条件
5	CX CV CV	合理结构
6	CX CV CX	三镜为凸镜
7	CX CX CV	镜片口径过大
8	CX CX CX	不满足匹兹万条件

由表1可知:只有方案3和方案5两种面形排列结构合理。因为方案3对应的主镜为凹镜,所以,此种系统结构最紧凑。而凸镜做主镜的方案5可用于视场角较大的系统,例如反望远系统。这里选方案3所对应凹、凸、凹面形排列为设计方案。

2 共轴三反光学系统的设计原理

共轴三反射镜光学系统的初始结构如图1所示。其结构参数共有8个:3个面的半径,即 R_1 、 R_2 和 R_3 ;主镜到次镜的距离 d_1 ;次镜到三镜的距离 d_2 ;3个反射面的二次非球面系数 $-e_1^2$ 、 $-e_2^2$ 和 $-e_3^2$ ^[11]。其中用5个自由度来校正初级像差,其余的3个自由度用来安排光学系统的结构形式。因此共轴三反光学系统结构灵活多样,根据不同的使用目的寻找最优化的结构形式,一直是共轴三反光学系统的主要研究内容。

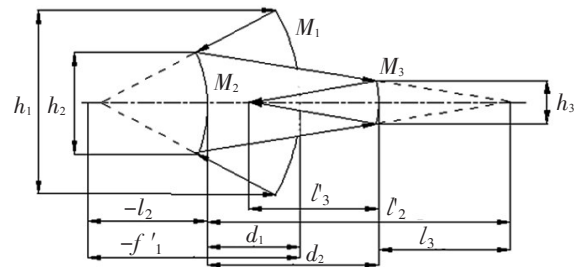


图1 共轴三反系统示意图

由图1可知,主、次、三镜的直径分别为 h_1 、 h_2 和 h_3 ; f_1' 为主镜的焦距; l_2 为次镜顶点到主镜焦点的距离; l_2' 为次镜顶点到主、次两反射镜顶点的距离; l_3 为三镜顶点到主、次两反射镜顶点的距离; l_3' 为三镜顶

点到三反镜系统焦点的距离。则次镜对主镜、三镜对次镜的遮拦比 α_1 、 α_2 分别为^[12]

$$\begin{aligned}\alpha_1 &= \frac{l_2}{f_1} \approx \frac{h_2}{h_1} \\ \alpha_2 &= \frac{l_3}{f_2} \approx \frac{h_3}{h_2}\end{aligned}\quad (1)$$

次镜、三镜的放大率 β_1 、 β_2 分别为^[12]

$$\begin{aligned}\beta_1 &= \frac{l'_2}{l_2} \\ \beta_2 &= \frac{l'_3}{l_3}\end{aligned}\quad (2)$$

利用近轴光学理论,可得系统结构参数的有关公式^[12]

$$r_1 = \frac{2}{\beta_1 \beta_2} f' \quad (3)$$

$$r_2 = \frac{2\alpha_1}{(1+\beta_1)\beta_2} f' \quad (4)$$

$$r_3 = \frac{2\alpha_1 \alpha_2}{(1+\beta_2)} f' \quad (5)$$

$$d_1 = \frac{r_1}{2}(1-\alpha_1) \quad (6)$$

$$d_2 = \frac{r_1}{2}\alpha_1\beta_1(1-\alpha_2) \quad (7)$$

由求出的 α_1 、 α_2 、 β_1 和 β_2 ,再根据系统要求的球差 S_1 、彗差 S_2 和像散 S_3 ,即可求出3个反射面的非球面系数 $-e_1^2$ 、 $-e_2^2$ 和 $-e_3^2$ 。至此,可以确定系统的8个结构参数。

共轴三反光学系统在满足焦距及球差、彗差、像散和场曲条件下剩余3个可变参数,如果再给定有关结构方面的3个条件,则整个系统就可以确定了。对于中间不成像的三反系统, $\alpha_1 > 1$, $\alpha_2 < 0$, $\beta_1 < 1$, $\beta_2 < 0$ 。当求出初始结构参数后,将光阑置于次镜上。在保证焦距为定值的条件下,对系统的结构参数进行优化。同时在三镜与像面之间加入折轴镜,可以大大缩短系统的长度,使系统结构更加紧凑。

中心遮拦将导致光学系统的有效通光口径变小,能量降低,最终导致整个光学系统的MTF下降。在共轴三反光学系统不可避免次镜对主镜造成遮拦的情况下,如何减少次镜对主镜的遮拦,避免或减少三镜对次镜造成的二次遮拦是整个光学系统设计成败的关键所在。

3 系统设计实例

根据上述共轴三反光学系统的设计方法,设计了一种光学系统,满足相机在500 km的轨道高度对地推扫成像,地元分辨率为1 m。单轨推扫成像对地覆盖范围为22.7 km,光谱覆盖范围为3~5 μm 。

3.1 光学系统指标的确定

遥感相机的地元素分辨率(ground sampled distance, GSD)由光电传感器的像元尺寸 a ,轨道高度 H 及光学系统的焦距 f 决定,光学系统焦距由式(8)所示^[13]

$$f = \frac{a \cdot H}{\text{GSD}} \quad (8)$$

取传感器像元尺寸 a 为10 μm ,为满足在50 km轨道高度,光学遥感相机地元素分辨率达到1 m,得光学系统焦距 f 为5 m。

地面的覆盖宽度将由空间相机的有效视场角 2ω 决定,当轨道高度 H 一定时,地面覆盖宽度 W 由式(9)决定^[14]

$$W = 2 \times H \times \tan \omega \quad (9)$$

式中, W 为覆盖宽度; ω 为半视场角。

对于共轴三反光学系统,为了达到相机的覆盖宽度 W 为22.7 km,在各种像差校正良好的情况下可求出最大视场角基本在 4° 左右,以有效视场 $2\omega = 8^\circ$ 计^[15]。

在共轴三反光学系统中,不可避免地存在次镜对主镜的中心遮拦,当遮拦存在时,虽然空间截止频率保持不变,但调制传递函数在低频部分有所下降,在高频部分有所上升。当中心遮拦为0.25时,其光学传递函数的下降不超过20%。因此,要得到较高的MTF值,中心遮拦应该小于0.25^[16]。

由光学系统的焦深公式可得

$$\sigma = \pm 2\lambda F^2 \quad (10)$$

式中, σ 为焦深; λ 为波长。由式(10)可知:相对孔径越小,焦深越大,同时也有利于扩大视场,便于光学设计及物理实现^[17]。

照相物镜的照度为^[18]

$$E' = \frac{\pi}{4} \tau L \left(\frac{D}{f}\right)^2 \quad (11)$$

式中, τ 为镜头透过率; L 为光亮度; $\frac{D}{f}$ 为镜头的相对

孔径。由式(11)可知:相对孔径越小,在像面上的照度就越低,可以通过采用TDI—CCD对同一目标多次曝光的方式解决光能弱所带来的问题。

根据以上分析,在兼顾地元分辨率、光能量、设计可实现程度等问题的基础上,文中采用 $F/10, D=500\text{ mm}$,线遮拦系数为0.25的全反射共轴三反射光学系统。

3.2 光学系统的参数设计过程

现设计一个焦距 $f=5\ 000\text{ mm}$,相对孔径 $D/f=1/10$,视场角(矩形视场)为 $8^\circ\times 0.8^\circ$,工作波段为 $3\sim 5\ \mu\text{m}$ 的系统。

当 $f=5\ 000\text{ mm}$,求出无中间像的初始结构。这是一个视场和相对孔径都不大的光学系统,初始结构的成像质量较好,通过优化可以得到成像质量有所改善

表 2 初始结构参数

放射镜	曲率半径/mm	距离下一面的距离/mm	二次非球面系数/mm
主镜	-2 031	-800	-2.378
次镜	-626	1 800	-2.673
三镜	-1 339	-595	-1.011

的共轴系统。系统初始结构参数如表2所示。

将光阑置于次镜上,保证系统无中心遮拦,再次优化。使用ZEMAX优化设计确定系统各光学表

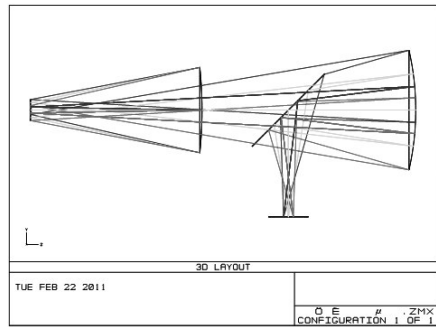
表 3 系统结构参数

反射镜	曲率半径/mm	距离下一面的距离/mm	二次非球面系数/mm
主镜	-2 067	-800	-0.788
次镜	-765	1 800	-2.319
三镜	-1 145	-595	-0.264
折轴镜	无定义	500	0

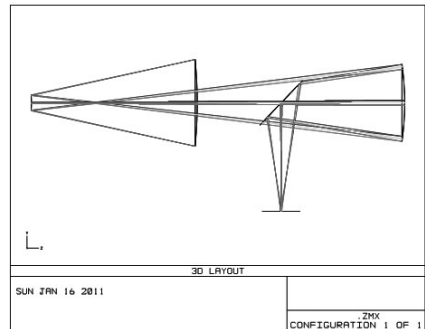
面的初始结构和非球面参数^[19],见表3。

从表2中可以看出,主镜和次镜均为双曲面,三镜为椭球面,孔径光阑与次镜重合。为了缩小结构尺寸,在三镜与像面之间加折轴反射镜将系统进行转折,缩短系统的长度,如图2所示。

为了反映这些视场的成像情况,分别用传递函数和包围圆能量来评价成像质量,如图3、图4所示。光学系统传递函数MTF客观地反映了光学系统所成图像的清晰程度,如图3所示。从上文可



(a) 系统初始结构形式图



(b) 系统优化之后结构形式图

图 2 光学系统形式

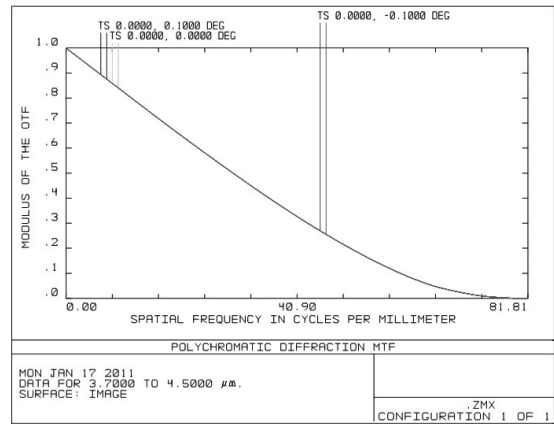


图 3 调制传递函数曲线

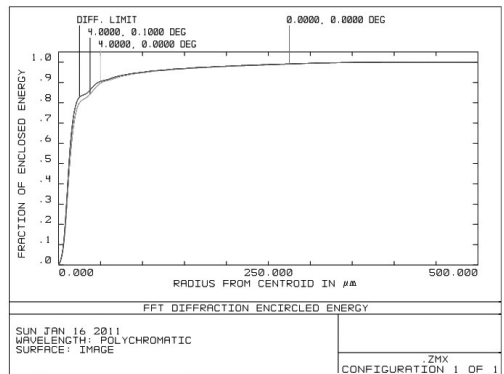


图 4 能量分布曲线图

以看出,奈奎斯特频率(奈奎斯特频率 $f_{NY} = \frac{1}{2 \times a} = \frac{1}{2 \times 10 \times 10^{-3}} = 50$ 线对/mm;其中, a 为传感器像元尺寸 $10 \mu\text{m}$ 处),MTF均大于0.4,各视场的MTF均接近衍射极限,满足指标要求。在各个视场 $10 \mu\text{m}$ 以内的能量集中度均优于80%。因此该系统的成像质量基本完好。

4 空间相机结构设计

空间相机一般装载在卫星平台上,要求相机结构紧凑、质量轻。相机质量配置主要在共轴三反光学镜头上,镜头轻量化措施十分重要。

4.1 光学材料

镜头光学材料要求质量轻、刚度好和稳定性高。制作反射镜的传统材料有熔石英玻璃、微晶玻璃、零膨胀玻璃,非传统材料有铍、硅、铝、钛和碳化硅。表4是光学材料的特性比较^[20,21],可知碳化硅是制作反射镜的理想材料。

表4 光学反射镜制作材料的特性比较

材料	密度/ (g/cm ³)	导热系数/ (W/(m·K))	线膨胀 系数	热形变/ (10 ⁸ m/W)
Be	1.85	157	11.4	7.2
Si	2.3	169	2.5	1.6
Al	2.7	220	23.9	11
Ti	4.5	9.6	8	83
SiC	3.05	185	2.5	1.4
熔融石英	2.2	1.38	0.55	40
微晶玻璃	2.5	1.46	0.05	3.3

4.2 结构材料

空间相机的结构材料选择的原理是保持结构性能的前提下,尽可能选择热膨胀系数低的轻质材料,以确保系统轻量化。表5是空间材料的特性比较,故选择碳纤维复合材料作为系统的结构材料。这种材料克服了碳和石墨的脆性和强度低的特性,具有较高的强度、较好的韧性、良好的导热性和较高的比刚度。此外,碳/碳复合材料的密度低,而且密度和线膨胀系数可以设计。碳/碳复合材料在高温下还具有高强度、良好的热稳定性、抗热冲击性。它还具有良好的加工特性,适合于各种机械加工。因此可以用来制造相机的外壳和结构件。

表5 空间相机结构材料的特性比较

材料	密度/ (g/cm ³)	导热系数/ (W/(m·K))	比热容/ (J/(kg·K))	比刚度/ (10 ⁷ (N·mm)/g)
铝合金	2.8	142	904	2.54
铁镍合金	8.1	13.9	NA	1.74
钛合金	4.44	7.4	611	2.45
碳纤维 复合材料	1.8	70/8.5	NA	5.28/1.72

5 结束语

共轴三反系统不仅解决了红外透射系统材料选择的困难,而且为冷屏的安装提供了多种选择,提高了设计和制造的灵活性。然而,共轴系统存在中心遮拦的问题,影响了进入系统的能量,从而降低了系统的调制传递函数,影响了成像质量。此外由于离轴三反系统加工、装调困难,而共轴偏光瞳三反射光学系统却恰好消去了这些不利影响,故今后高分辨率空间相机的发展趋势将会是共轴偏光瞳反射系统和由多子镜拼接的合成孔径光学系统。空间相机共轴三反红外光学系统的研究对空间光学遥感器的发展具有指导意义。

参考文献

- [1] 吴晗平. 光电系统设计基础[M]. 北京: 科学出版社, 2010.
- [2] 刘均, 高明. 光学设计[M]. 西安: 西安电子科技大学出版社, 2006.
- [3] 熊衍建, 吴晗平, 吕照顺, 等. 军用红外光学系统性能及其结构形式技术分析[J]. 红外技术, 2010, 32(12): 688-707.
- [4] Toshihide Dohi. Aspheric technology for zoom lenses. In-tl Symp on Optical Fabrication, Testing, and Surface Evaluation[C]// SPIE, 1992: 106-110.
- [5] Paul Scott. Recent Developments in the Measurement of Aspheric Surfaces by Contact Stylus Instrumentation[C]// Optical Design and Testing. SPIE, 2002: 199-207.
- [6] 王立辉, 郁蕴健, 陆段军, 等. 大线视场大相对口径红外成像系统的光学设计[J]. 红外与毫米波学报, 2008, 27(1): 39-41.
- [7] GOETZ A F H, HERRING M. The high resolution imaging spectrometer (HIRIS) for Eos[C]//Proceedings of IEEE, 1989, 27: 136-143.
- [8] DAVIS C O, HORAN D M, CORSON M R. On orbit calibration of the Naval Earth Map Observer (NEMO) coastal ocean imaging spectrometer (COIS) [C]//

- Proceedings of SPIE, Imaging Spectrometry VI, 2000, 4132:250.
- [9] FOLK M, PEARLMAN J, LIAO L B, et al. EO-1/Hyperion hyper-spectral imager design, development, characterization, and calibration [C]//Proceedings of SPIE, Hyper-spectral Remote Sensing of the Land and Atmosphere, 2001, 4151:40-51.
- [10] 王之江. 光学设计理论基础[M]. 北京: 科学出版社, 1985.
- [11] 潘君骅. 光学非球面的设计, 加工与检验[M]. 北京: 科学出版社, 1994:157-167.
- [12] 丁学专, 刘银年, 王欣, 等. 航天遥感反射式光学系统设计[J]. 红外技术, 2007, 29(5): 253-256.
- [13] 史光辉. 卫星对地观测高分辨率光学系统和设计问题[J]. 光学精密工程, 1999(2):16-24.
- [14] 李旭阳, 李英才. 高分辨率空间相机共轴三反光学系统实现形式研究[J]. 应用光学, 2009, 30(5):717-723.
- [15] 杨照金. 空间光学仪器与航天相机[J]. 应用光学, 2008, 29(4):665-668.
- [16] 樊学武, 陈荣利, 马臻, 等. 空间三反射望远镜光学系统的研究[C]//瞬态光学和空间光学技术专题, 2004.
- [17] 刘群龙, 吴晗平, 熊衍建, 等. 高空预警探测用450 mm口径红外非球面光学系统设计[J]. 红外技术, 2010, 32(9):517-522.
- [18] Michael R Descour, Mark R Wilier, Dana S Clarke, et al. EUVL projection-camera alignment methods[J]. SPIE, 1999, 3676:663-668.
- [19] ZEMAX 中文使用手册[S]. 南京: 光研科学有限公司, 2007.
- [20] Alexay C C, Palmer T A. A new modular optical system for large format scene projection[C]//Proceedings of SPIE, 2006, 6208: 620811.
- [21] Palmer T A. Infrared catadioptric lens design considerations[C]//Proceedings of SPIE, 2005, 5783: 835-840.

(上接第11页)

高出这一频率3个数量级。由式(3), 一般应用太赫兹频率为1.25 THz, 所需等离子体密度为 $2.325 \times 10^{20} \text{ m}^{-3}$, 比前面给出的工业水平高出4个数量级。因而, 就目前的工业水平而言, 要实现太赫兹隐身的等离子体层是不可能的, 这为太赫兹波对抗等离子体隐身飞机提供了独特的反隐身条件。

(3) 太赫兹雷达技术的发展

前面介绍的T. M. Goyette等人研制的测量坦克模型目标的太赫兹合成孔径成像雷达实验系统, 太赫兹激光发射采用光泵 CH_3OH , 输出光功率100 mW。另外, Takeshi Yasui制造了太赫兹脉冲车载雷达, 用光导天线(PCA)作太赫兹发射源和探测器, 并采用了2台激光器。目前测量精度在2 mm左右^[6]。说明太赫兹雷达具有现实可行性。

太赫兹技术中的关键技术是太赫兹源的问题, 目前, 非相干的热辐射源、电子学的高频微波辐射源、太赫兹激光器、光电子辐射源等多种发射源都为产生高功率的太赫兹波提供可能。其中, 自由电子激光和气体激光可以发射相对较强的太赫兹辐射, 并可以覆盖较宽的频率范围, 是探测雷达的理想太赫兹源。太赫兹波对抗等离子体隐身已发展成为现实可行的新技术。

4 结束语

从等离子体隐身技术的局限性出发, 分析了太

赫兹雷达探测等离子体隐身的现实可行性。提出了具有发展前景的太赫兹反等离子体隐身技术。反隐身技术是综合技术, 单独采用某一种反隐身技术都很难获得较好的反隐身效果, 必须综合运用各种反隐身技术才能提高探测隐身目标的效能, 太赫兹波反隐身技术与现有的其他反隐身技术相结合, 会更有效地探测、识别各种隐身目标。随着太赫兹应用技术不断发展, 太赫兹反隐身探测雷达将进入实用化发展阶段, 成为对抗等离子体隐身的有效手段。

参考文献

- [1] D J Gregoire, J Santoru, R W Schumacher. Electromagnetic-wave propagation in unmagnetized plasmas[P]. AD-A250710, 1992.
- [2] 凌永顺. 等离子体隐身及其用于飞机的可能性[J]. 空军工程大学学报(自然科学版), 2000, 1(2): 1-3.
- [3] 朱彬, 陈彦, 邓科, 等. 太赫兹科学技术及其应用[J]. 成都大学学报(自然科学版), 2008, 27(4): 304-307.
- [4] 郑新, 刘超. 太赫兹技术的发展及在雷达和通讯系统中的应用[J]. 微波学报, 2010, 26(6):1-6.
- [5] 林华. 无人机载太赫兹合成孔径雷达成像分析与仿真[J]. 信息与电子工程, 2010, 8(4):373-377.
- [6] YASUI T, KABETANI Y, YOKOYAMA S, et al. Real-time, terahertz impulse radar based on asynchronous optical sampling[C]// Infrared, Millimeter and Terahertz Wave, 2008, IRMMW-THz 2008, 33rd International Conference. CA, Pasadena, 2008.