

单视点双曲面折反射红外全景成像系统设计与分析

周星光¹, 贺宇¹, 王岭雪¹, 蔡毅^{1,2}, 刘福平³, 李茂忠³, 陈骥³

(1. 北京理工大学光电学院光电成像技术与系统教育部重点实验室
北京市混合现实与新型显示工程技术研究中心, 北京 100081;

2. 中国兵器科学研究院, 北京 100089; 3. 云南北方驰宏光电有限公司, 云南昆明 650217)

摘要: 在单视点结构约束条件下推导了给定红外探测器参数(像元规模和像元中心距)和俯仰角范围时, 二次曲面反射镜面型(离心率)、反射镜厚度、反射镜与折射镜头之间的安装距离、折射镜头焦距等参数的数学公式, 为建立单视点双曲面折反射红外全景成像系统提供了几何约束关系。与此同时, 针对双曲面反射镜的特点, 推导了其用于单视点折反射红外全景成像系统时空间分辨率(垂直方向瞬时视场和水平方向瞬时视场)的数学公式, 并在理想大气、假设目标对比度足够高、探测方程相关参数最简化的条件下将其与现有的 NVThermIP 模型结合获得系统作用距离的公式。采用不同像元规模和灵敏度(噪声等效温差)进行了仿真, 发现:(1) 系统空间分辨率随像元规模的增大而增大;(2) 系统作用距离随像元规模和灵敏度的增大而提高, 但灵敏度的增大对作用距离的改善不明显。

关键词: 折反射光学; 全景成像; 红外; 空间分辨率; 作用距离; 双曲面反射镜

中图分类号: TN216 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201645.0918004

Design and performance analysis of single-viewpoint hyperbolic catadioptric infrared panoramic imaging system

Zhou Xingguang¹, He Yu¹, Wang Lingxue¹, Cai Yi^{1,2}, Liu Fuping³, Li Maozhong³, Chen Ji³

(1. Beijing Engineering Research Center for Mixed Reality and Advanced Display Technology, Key Laboratory of Photoelectronic Imaging Technology and System, Ministry of Education of China, School of Optoelectronics, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China;

2. China Research and Development Academy of Machinery Equipment, Beijing 100089, China;

3. Yunnan KIRO-CH Photonics Co., Ltd., Kunming 650217, China)

Abstract: Under the constrains of single-viewpoint and the requirements of the specific detector and vertical field of view, the equations of eccentricity, thickness of the hyperbolic mirror, install distance and the geometric constraints of single viewpoint hyperbolic catadioptric infrared panoramic imaging system which utilizes the quadratic surface of reflective mirror were derived. At the same time, as for the hyperbolic mirror, the equation of the resolution which include instantaneous field of view in the vertical direction and instantaneous field of view in the horizontal direction of the single viewpoint hyperbolic

收稿日期: 2016-01-15; 修订日期: 2016-02-16

基金项目: 国家自然科学基金(61471044); 高等学校博士学科点专项科研基金(20131101110024); 国防预研基金

作者简介: 周星光(1992-), 男, 硕士生, 主要从事光学系统设计、图像处理、计算机视觉等方面的研究。Email: 1294585731@qq.com

导师简介(通讯作者): 王岭雪(1973-), 女, 副教授, 博士, 主要从事红外成像、图像处理、红外光谱方面的研究。

Email: neobull@bit.edu.cn

catadioptric infrared panoramic imaging system were deduced. Under the situation of ideal atmosphere, high target contrast, the simplest range equation which combined with the NVThermIP model was established. The simulation was under the conditions of different size and sensitivity of the detector. The simulation results show that: the spatial resolution of the system increases with the increase of the size of the detector; the range performance of the system increases with the increase of the size and sensitivity of the detector. However the increase of sensitivity is not obvious to the improvement of the range performance.

Key words: catadioptric optic; panoramic imaging; infrared; spatial resolution; range performance; hyperbolic reflective mirror

0 引言

折反射全景成像系统将反射镜与传统相机结合起来,在大俯仰角范围内获得周视视场,是一种无运动机构、仅使用单个成像器件就能将方位视场扩大到 360° 周视视场的新型系统。随着 CMOS、CCD 等成像器件像元规模的扩大、计算机处理速度的提升和网络带宽的增大,可见光波段的折反射全景成像系统已较为广泛地应用于机器人导航、视频监控网络、电话会议、计算机视觉、消费类电子产品等领域^[1]。然而,受红外焦平面探测器的像元规模、成本、灵敏度等因素的限制,红外波段的折反射全景成像系统的研究则刚刚起步,2010年,美国海军实验室的 Nichols J M^[2]等人利用 2048×2048 像元规模的碲化铟(InSb)中波红外焦平面探测器设计了俯仰角范围为 $-10^\circ \sim 30^\circ$ 的红外折反射全景成像系统作为潜艇的潜望镜。

可见光波段的单视点折反射全景系统已有较多研究,而红外波段系统总体设计与性能分析的研究较少。2014年 Orges Fuxhi^[3]在理想大气、假设目标对比度足够高、探测方程相关参数最简化的条件下,推导了针对抛物面反射镜的单视点红外折反射全景成像系统的作用距离方程,但是该文也没有描述系统的总体设计过程。文中针对面型较抛物面复杂的双曲面反射镜,推导了双曲面红外折反射全景成像系统在单视点结构约束下的反射镜面型参数、探测器尺寸、系统俯仰角、折射镜头焦距等参数之间的几何约束关系,在此基础上提出红外折反射全景成像系统的总体结构设计流程,最后对双曲面红外折反射全景成像系统的主要性能参数——空间分辨率和作用距离进行初步分析。

1 现有单视点折反射全景成像系统的结构特点分析

传统光学成像系统如相机的数学模型可近似为透视投影模型,即视场内的所有主光线都经过同一个点后再投影到探测器上,这个点称之为视点。根据视点的个数,折反射全景成像系统分为单视点和非单视点两类。相比非单视点系统,单视点系统的物-像映射过程较容易建立数学模型,模型中的参数经过标定后可以定量确定物-像的对应关系,从而可根据图像定量测量物空间中实际物体的方向和运动状态等。

1998年, Baker 和 Nayar^[4]证明了单视点结构约束的折反射全景成像系统的反射面必须是二次曲面。理论上圆、抛物面、双曲面、椭圆和平面都属于二次曲面。平面是二次曲面的退化形式,平面镜和透视投影相机的组合是最简单的折反射成像系统,但不能扩大视场;对于球面镜,透视投影相机的焦点需要放在球面上,这在实际操作中难以实现。对于抛物面镜,经其反射后的光线为平行光,需要与正交投影相机组合;对于双曲面镜和椭圆面镜,经其反射后的主光线将会聚到反射镜的外焦点上,不过由于椭圆面镜的曲率大,两个焦点之间的距离很近,不适宜用于折反射全景成像,而是常作为凹面反射镜会聚增强光信号。最早将双曲面镜应用于全景成像系统的是 Yamazawa^[5],他在1993年搭建的双曲面折反射系统用于机器人自主导航。目前常见的单视点折反射全景成像系统为:抛物面凸面反射镜(文中简称为抛物面镜)与正交投影相机组合,双曲面凸面反射镜(文中简称为双曲面镜)与透视投影相机组合。前一种组合中,抛物面镜将入射光线反射为平行光线,正交投影相机可以安装在任意位置,所以抛物面折反

射全景成像系统的整体安装较为简单,但是正交投影相机需要使用远心镜头,这又会增加系统的成本;后一种组合中,为保证单视点结构约束,需要将折射光学镜头的物方主点与双曲面反射镜的外焦点重合,这给折反射光学系统的设计、系统的整体安装带来挑战。选择哪一种组合,主要由实际应用和需求而定。

2013 年马相路^[6]等推导了双曲凹面折反射全景成像系统的设计过程。如无特殊说明,文中下面所述双曲面均为双曲凸面。

为缩短系统长度,有的折反射全景成像系统采用两个二次曲面反射镜,在数学上,单视点结构约束下的两个二次曲面反射镜仍等价为一个二次曲面反射镜。Nayar^[7]在 2001 年采用两个双曲面反射镜组合的形式实现了系统光路的折叠。除此之外,双反射镜有利于根据双目立体视觉的原理来获得深度信息,从而实现三维成像。采用两个反射镜的方案实现了通过折反射系统实现 3D 成像。苏连成等^[8]采用两套折反射系统,这两套折反射系统共用一个像面,其中一个折反射系统成像在圈饼图的外沿,另一个成像在圈饼图的内沿,从而对于物空间中的一点,在像面上成像为两个不同的位置,然后通过图像处理得到深度信息,从而实现场景重建。Miriam Schönbein 等^[9]运用 3 个折反射相机实现 3D 重建。

2 单视点双曲面折反射红外全景成像系统设计

2.1 设计思路与流程

文中在设计单视点双曲面折反射红外全景成像系统时的总体思路是:首先进行结构参数设计,接着进行性能分析,性能分析反过来又指导系统结构和性能参数的优化。具体流程为:(1) 在给定探测器参数(像元规模和像元中心距)以及系统要求的俯仰角范围的情况下,对系统结构参数(包括反射镜离心率、反射镜口径大小、折射镜头焦距等)进行设计,而以上这些参数的组合又会直接影响系统的最终性能;(2) 以空间分辨力和作用距离作为系统性能参数,检验第(1)步获得的结构参数是否满足性能需求;(3) 修改结构参数直到性能满足要求。

2.2 结构参数几何关系的推导

2003 年曾吉勇等^[10]推导了在给定安装距离、给

定俯仰视场和反射镜口径的情况下,双曲面反射镜的二次曲面参数表达式,并针对反射镜的厚度随安装距离的变化以及反射镜厚度随系统视场角的变化进行了相关仿真,但是没有推导系统安装距离、反射镜厚度和离心率等随折射镜头焦距的具体表达式,也未给出这些系统结构参数随折射镜头焦距的变化情况。因此该节重点研究在给定的俯仰角视场、红外探测器像元规模和像元中心距的情况下,以单视点结构为约束,推导了满足单视点约束且采用双曲面反射镜的系统结构参数,包括反射镜离心率、安装距离、反射镜厚度等,且重点关注这些结构参数随折射镜头焦距的变化。

如图 1 所示,文中将入射到双曲面反射镜边缘点 M 上的主光线在物空间中的一点令为 P 点,该点在 M 点处反射后先穿过双曲面反射镜的外焦点 F_2 ,再在探测器上成像为像点 I ,点 I 距探测器中心 O_2 的距离令为 r 。为了充分应用探测器的像元,在设计光学系统时一般要求 $r = \frac{d}{2}$, d 为探测器短边的长度。为描述方便,文中假设所使用的探测器均为方形,即像元规模令为 $N \times N$,像元中心距令为 p ,则探测器边长为:

$$d = N \times p \quad (1)$$

如图 1 所示建立坐标系,坐标原点为反射镜内外焦点连线的中点,反射镜内外焦点连线为 z 轴,过坐标原点且与反射镜内外焦点连线垂直的轴为 r 轴,其中 F_1 、 F_2 分别为双曲面镜的内外焦点,点 O 为坐标原点, r 轴为水平坐标轴, z 轴为垂直坐标轴,点 O_1 为反射镜的中心,点 O_2 为图像的中心。二次曲面反射镜口径为 D ,离心率为 ε ,相机镜头焦距为 f 。

假设双曲面的表达式为:

$$\frac{z^2}{a^2} - \frac{r^2}{b^2} = 1 \quad (2)$$

由于点 M 的横坐标为 $\frac{D}{2}$,代入双曲面方程(2)

可得到点 M 的纵坐标为 $\frac{a}{2b} \sqrt{4b^2 + D^2}$ 。

由几何关系可知线段 OO_1 的长度等于线段 OF_1 的长度加上线段 F_1O_1 的长度,即:

$$\frac{D}{2} = \tan\alpha + \sqrt{a^2 + b^2} = \frac{a}{2b} \sqrt{4b^2 + D^2} \quad (3)$$

式中: α 为入射到双曲面反射镜边缘光线的俯仰角。

因为三角形 MO_1F_2 相似于三角形 IO_2F_2 ,所以:

$$\frac{d}{f} = \frac{D}{\sqrt{a^2+b^2} + \frac{a}{2b} \sqrt{4b^2+D^2}} \quad (4)$$

定义安装距离 L 、镜子厚度 l 如图 1 所示,即

$$L = \sqrt{a^2+b^2} + \frac{a}{2b} \sqrt{4b^2+D^2} \quad (5)$$

$$l = -a + \frac{a}{2b} \sqrt{4b^2+D^2} \quad (6)$$

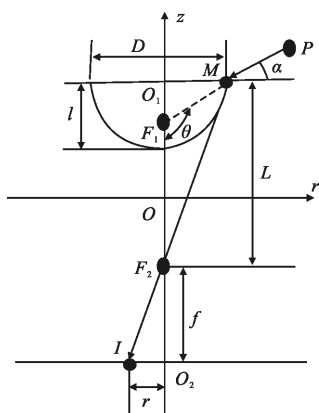


图 1 单视点折反射系统成像示意图

Fig.1 Schematic diagram of single-viewpoint catadioptric imaging system

联立上述公式(2)~(6)可得(为了简化表达式,引入 $A=a^2, B=b^2, C=c^2=A+B$, 其中 a, b 为公式(2)中反射镜二次曲面参数):

$$A = a^2 = \frac{D^2 \tan^2 \alpha}{16} + \frac{D^2}{8} + \frac{D^2 f^2}{4d^2} - \frac{\sqrt{d^2+4f^2} \times D^2 \times \sqrt{\tan^2 \alpha + 1}}{8d} \quad (7)$$

$$B = b^2 = \frac{\sqrt{d^2+4f^2} \times D^2 \times \sqrt{\tan^2 \alpha + 1}}{8d} - \frac{D^2 f \times \tan \alpha}{4d} - \frac{D^2}{8} \quad (8)$$

$$C = c^2 = A + B \quad (9)$$

$$L = D = \frac{f}{d} \quad (10)$$

$$l = L - \sqrt{C} - \sqrt{A} \quad (11)$$

离心率 ε 为:

$$\varepsilon^2 = \frac{C}{A} \quad (12)$$

3 单视点双曲面折反射红外全景成像系统的性能参数

该节以第 2.2 节推导的系统结构参数为基础,以瞬时视场作为空间分辨力参数的代表,推导了水平方向的瞬时视场即方位瞬时视场和垂直方向的瞬时

视场即俯仰瞬时视场的数学公式,并将这两个瞬时视场代入参考文献[3]给出的作用距离公式,获得双曲面单视点红外折反射全景成像系统的作用距离。

在图 1 中,假设入射光线和光轴的夹角为 θ ,其对应的在像面的径向距离为 $r(\theta)$ 。为了得到空间分辨力,先推导空间角度 θ 与其像面径向距离 r 之间的关系,此时将坐标原点放在 F_1 处,对于双曲面,其方程为:

$$\frac{(z'+c)^2}{a^2} - \frac{r^2}{b^2} = 1 \quad (13)$$

转化到极坐标下为: $z' = -\rho \cos(\theta), r = \rho \sin(\theta)$ 。

代入公式(14)就可以得到:

$$\rho = \frac{c \cos(\theta) - a}{\cos^2(\theta) - \left(\frac{a}{b}\right)^2 \sin^2(\theta)} \quad (14)$$

P 点(此时 P 不再限制为边缘点,而是任意点)对应的光线应该为经过 F_1 的光线,其角度 θ 满足:

$$\cos(\theta) = -\frac{z}{\sqrt{r^2+z^2}}, \sin(\theta) = \frac{r}{\sqrt{r^2+z^2}} \quad (15)$$

代入公式(15)就可以求出 M 点对应的 ρ 。

那么直线 MF_2 所对应的直线可以求出,其斜率

$$k = \frac{-\rho \cos(\theta) + 2c}{\rho \sin(\theta)} \quad (16)$$

直线 MF_2 为:

$$z = kr - 2c = \frac{-\rho \cos(\theta) + 2c}{\rho \sin(\theta)} r - 2c \quad (17)$$

由于图像成像在焦平面上,即 $z = -f - 2c$ 时,可以得到:

$$-f = \frac{-\rho \cos(\theta) + 2c}{\rho \sin(\theta)} r \quad (18)$$

在图像平面坐标系中上面的负号可以省掉, ρ 利用 θ 来表示,代入上式就可以得到:

$$r = f \frac{[c \cos(\theta) - a] \sin(\theta)}{-[c \cos(\theta) - a] \cos(\theta) + 2c \left[\cos^2(\theta) - \left(\frac{a}{b}\right)^2 \sin^2(\theta) \right]} \quad (19)$$

利用离心率 $\varepsilon = \frac{c}{a}$, 代入上式就可得到:

$$r = f \frac{(\varepsilon^2 - 1) \sin(\theta)}{[\varepsilon^2 \cos(\theta) + 2\varepsilon + \cos(\theta)]} \quad (20)$$

这就是空间对应的角度 θ 与径向距离 r 之间的关系:

$$r(\theta) = \frac{(\varepsilon^2 - 1) \sin(\theta)}{[\varepsilon^2 \cos(\theta) + 2\varepsilon + \cos(\theta)]} f \quad (21)$$

当 $\theta = \frac{\pi}{2} = 90^\circ$ 时, 代入公式(21)可得:

$$r\left(\frac{\pi}{2}\right) = \frac{\varepsilon^2 - 1}{2\varepsilon} f$$

而此时 r 对应的是过反射镜内焦点 F_1 的水平面内的入射光线在像面上的径向距离。

因此, 可以将公式(21)换为:

$$r(\theta) = \frac{2\varepsilon}{\varepsilon^2 - 1} r\left(\frac{\pi}{2}\right) \frac{(\varepsilon^2 - 1)\sin(\theta)}{[\varepsilon^2 \cos(\theta) + 2\varepsilon + \cos(\theta)]} \quad (22)$$

这里定义水平视场半径 h 的概念, 令 $f = \frac{2\varepsilon}{\varepsilon^2 - 1} h$,

代入公式(23)可得:

$$r(\theta) = h \frac{2\varepsilon \sin(\theta)}{[\varepsilon^2 \cos(\theta) + 2\varepsilon + \cos(\theta)]} \quad (23)$$

公式(24)可以写成关于像素的形式如下:

$$n(\theta) = n_h \frac{2\varepsilon \sin(\theta)}{[\varepsilon^2 \cos(\theta) + 2\varepsilon + \cos(\theta)]} \quad (24)$$

式中: $n(\theta)$ 为入射角为 θ 时其对应的像面径向距离(以像素为单位); n_h 为水平视场对应的像面径向距离(以像素为单位)。

对公式(24)两端进行微分可得:

$$d(n(\theta)) = n_h \frac{2\varepsilon^3 + 4\varepsilon^2 \cos(\theta) + 2\varepsilon}{[\varepsilon^2 \cos(\theta) + 2\varepsilon + \cos(\theta)]^2} d\theta \quad (25)$$

可以得到系统垂直视场分辨力为:

$$\text{IFOV}_V(\theta) = \frac{d\theta}{d(n(\theta))} = \frac{1}{n_h} \frac{[\varepsilon^2 \cos(\theta) + 2\varepsilon + \cos(\theta)]^2}{2\varepsilon^3 + 4\varepsilon^2 \cos(\theta) + 2\varepsilon} \quad (26)$$

系统水平视场分辨力为:

$$\text{IFOV}_H(\theta) = \frac{2\pi}{2\pi r(\theta)} = \frac{1}{n_h} \frac{[\varepsilon^2 \cos(\theta) + 2\varepsilon + \cos(\theta)]}{2\varepsilon \sin(\theta)} \quad (27)$$

对于传统成像系统(如相机), 当探测器是方形时, 那么水平和垂直方向的瞬时视场是相等的, 即系统水平分辨力和垂直分辨力是相等的。而对于双曲面单视点折反射全景成像系统, 从公式(26)和(27)可以看出: 即使采用方形探测器, 系统水平视场分辨力和水平视场分辨力也是不相同的。

Orges Furxhi^[3]针对抛物面折反射系统, 定义了作用距离(系统作用距离随俯仰角变化)如公式(28)所示:

$$\text{Range}(\theta) = \frac{D_{\text{TGT}} (C_{\text{TARGET}})^{\frac{1}{2}}}{V \sqrt{\text{IFOV}_V(\theta) \times \text{IFOV}_H(\theta)} \left[1 + k' \left(\frac{\text{NETD}}{\text{SCN}_{\text{TMP}}} \right)^2 \right]^{\frac{1}{4}}} \times$$

$$\begin{aligned} & [-0.0254 \left(\frac{F\lambda}{p} \right)^5 + 0.2686 \left(\frac{F\lambda}{p} \right)^4 - \\ & 0.9282 \left(\frac{F\lambda}{p} \right)^3 + 1.1314 \left(\frac{F\lambda}{p} \right)^2 - \\ & 1.6296 \left(\frac{F\lambda}{p} \right) + 7.6343] \quad (28) \end{aligned}$$

将公式(26)、(27)代入公式(28), 可以得到双曲面单视点红外折反射成像系统作用距离方程(29)。

$$\begin{aligned} \text{Range}(\theta) = & \frac{n_h \times D_{\text{TGT}} \times (C_{\text{TARGET}})^{\frac{1}{2}}}{V \left[1 + k' \left(\frac{\text{NETD}}{\text{SCN}_{\text{TMP}}} \right)^2 \right]^{\frac{1}{4}}} \times \\ & \left\{ \frac{[\varepsilon^2 \cos(\theta) + 2\varepsilon + \cos(\theta)]^3}{2\varepsilon \sin(\theta) [2\varepsilon^3 \cos(\theta) + 4\varepsilon^2 + \cos(\theta)] + 2\varepsilon} \right\}^{\frac{1}{2}} \times \\ & [-0.0254 \left(\frac{F\lambda}{p} \right)^5 + 0.2686 \left(\frac{F\lambda}{p} \right)^4 - \\ & 0.9282 \left(\frac{F\lambda}{p} \right)^3 + 1.1314 \left(\frac{F\lambda}{p} \right)^2 - \\ & 1.6296 \left(\frac{F\lambda}{p} \right) + 7.6343] \quad (29) \end{aligned}$$

式中: D_{TGT} 为目标面积(目标长度和宽度的几何均值); C_{TARGET} 为目标对比度; V 为任务标准; k' 为系统校正因子, 与具体系统有关; NETD 为探测器等效噪声温差; SCN_{TMP} 为场景温度差; $\frac{F\lambda}{p}$ 与光学系统 F 数、探测波长 λ 、探测器像元间隔 p 有关。

4 仿真结果与分析

假设设计一套安装于地基平台的红外全景成像系统, 探测目标为空中飞行器, 系统要求的俯仰视场角为 $-15^\circ \sim 15^\circ$, 即图 1 中的 $\alpha = 15^\circ$ 、 $\theta = 75^\circ \sim 105^\circ$, 由于安装位置的限制, 反射镜口径不能太大, 暂定为 100 mm, 即 $D = 100$ mm。另外, 假设现有不同像元规模的非制冷红外焦平面探测器(简称 UC-LWIR), 像元中心距为 $15 \mu\text{m}$, 即 $p = 0.015$, 工作波段的中心波长为 $10 \mu\text{m}$, 像元规模和 NETD 的情况如表 1 所示, 下面进行仿真分析。需要注意的是, 为探讨灵敏度的变化对系统性能的影响, 表 1 还给出了 5 mK 的 NETD, 按照目前的探测器水平, NETD = 5 mK 的应为制冷型红外焦平面探测器, 所以该探测器简称为 C-LWIR。

表 1 用于仿真的探测器参数

Tab.1 Simulation parameters of detectors

| System | Center wavelength/ μm | Detector size | NETD/mK |
|---------|----------------------------------|---------------|---------|
| UC-LWIR | 10 | 512×512 | 50 |
| UC-LWIR | 10 | 1 024×1 024 | 50 |
| UC-LWIR | 10 | 2 048×2 048 | 50 |
| UC-LWIR | 10 | 1 024×1 024 | 100 |
| C-LWIR | 10 | 1 024×1 024 | 5 |

对于作用距离的仿真,选取参考文献[3]中的参数(表 2)。具体参数如下: $k'=1\ 560$, $F=1.4$, $\lambda=10\ \mu\text{m}$, $C_{\text{TARGET}}=0.167$ 。

假设探测目标为美军的阿帕奇直升机,机长约为 17.76 m,机身高度约为 3.52 m,则 $D_{\text{TGT}}=7.91\ \text{m}$;假设背景为三种混杂程度不同的背景,那么把探测任务分为三类:中度混杂背景下探测静态目标(Static Moderate Clutter, SMC);低混杂背景下探测静态目标(Static Low Clutter)或中度混杂背景下探测移动目标(Moving Moderate Clutter, SLC/MMC);低混杂背景下探测移动目标(Moving Low Clutter)。三种探测任务下的相关参数如表 2 所示。

表 2 三种探测任务下的相关参数表

Tab.2 Parameters under three detection tasks

| | SMC | SLC/MMC | MLC |
|-----------------------|-------|---------|-------|
| V | 4.676 | 2.338 | 1.169 |
| SCN _{TM} /°C | 7.5 | 7.5 | 7.5 |

4.1 结构参数仿真

针对表 1 中探测器为 UC-LWIR 时,在 Matlab 下仿真得到离心率、反射镜厚度和安装距离随镜头焦距变化分别如图 2~4 所示。从图 2 可以看出,随着

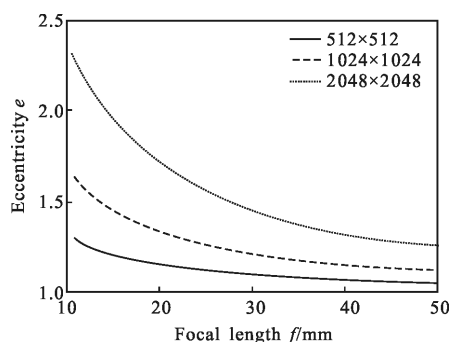


图 2 离心率随焦距变化

Fig.2 Eccentricity varies with focal length

焦距的增大,反射镜离心率变小,意味着反射镜面型向抛物面面型趋近;从图 3 和图 4 可以看出,随着焦距增大,反射镜厚度增大,安装距离线性增大。

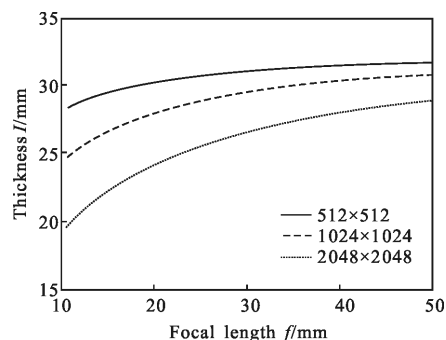


图 3 反射镜厚度随焦距变化

Fig.3 Thickness varies with focal length

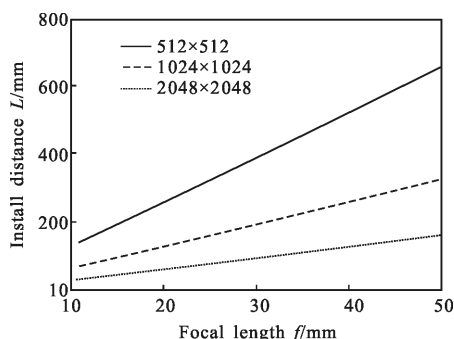


图 4 安装距离随焦距变化

Fig.4 Install distance varies with focal length

4.2 系统空间分辨力和作用距离仿真

对于系统空间分辨力和作用距离的仿真,选取折射镜头焦距 $f=30\ \text{mm}$ 。

为了研究探测器规模对系统空间分辨力的影响,假设上述其他参数不变的情况下只改变探测器规模参数。所选取的探测器规模参数分别为:512×512、1 024×1 024、2 048×2 048。仿真得到满足单视点约束时系统垂直分辨力和水平分辨力随探测器规模的变化情况如图 5 和图 6 所示。发现随着探测器规模的增大,系统分辨力变大。随着入射角的增大,垂直分辨力和水平分辨力增大。入射角越大时系统分辨力越好。如果按照图 1 方式安装折反射系统(反射镜在上,探测器在下),并且探测的是远处目标(对应着大俯仰角),由于此时的系统分辨力更好,意味着可以探测更远的目标。

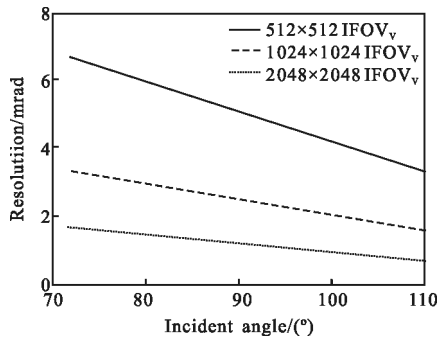


图 5 垂直分辨力随探测器像元规模变化
Fig.5 IFOV_v varies with the size of the detector

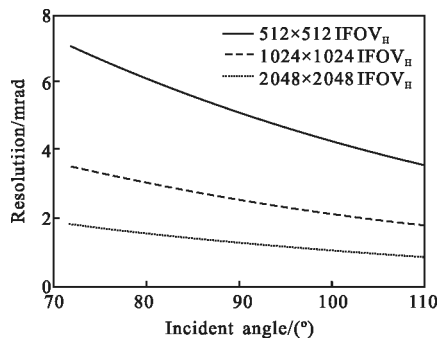


图 6 水平分辨力随探测器像元规模变化
Fig.6 IFOV_h varies with the size of the detector

不同探测任务下,针对面阵规模为 1 024×1 024、NETD=50 mK 时,作用距离仿真结果如图 7 所示。从图 7 可以看出,低混杂背景下探测移动目标(MLC)

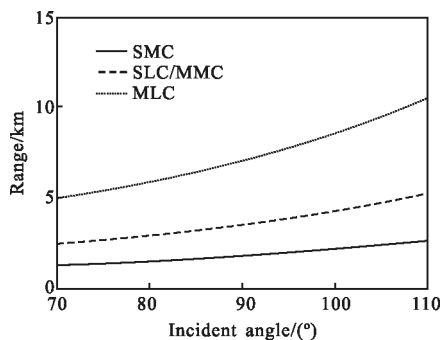


图 7 作用距离随入射角变化
Fig.7 Range varies with incident angle

的作用距离最远,低混杂背景下探测静态目标或中度混杂背景下探测移动目标(SLC/MMC)的作用距离次之,中度混杂背景下探测静态目标(SMC)的作用距离最短。假设最为关注的是地平面来袭的直升机($\theta=90^\circ$),此时 MLC、SLC/MMC 和 SMC 任务下的作

用距离分别为 7.00、3.50、1.75 km。

选取探测器规模分别为 512×512、1 024×1 024、2 048×2 048 进行仿真,得到作用距离随探测器规模的变化如图 8 所示。从图 8 可以看出,随着探测器规模的增大,系统作用距离增大。

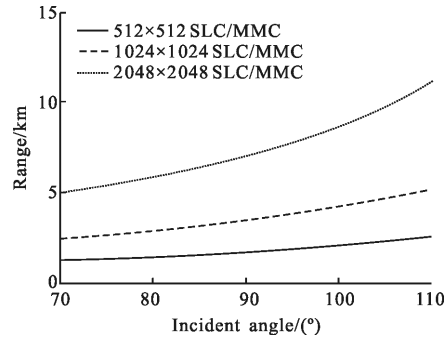


图 8 作用距离随探测器像元规模的变化
Fig.8 Range varies with the size of detector

作用距离随探测器 NETD 的变化如图 9 所示。从图 9 可以看出,随着探测器 NETD 的减小(即系统灵敏度的提高),系统作用距离仅有较小幅度的增大,与实际情况有一定出入,这一是说明了公式(29)是在目标对比度足够高即目标与背景的温差足够大的假设条件下推导的,因此提高探测器灵敏度起到的作用有限,二是说明了在探测低对比度目标时公式(29)有待进一步完善。

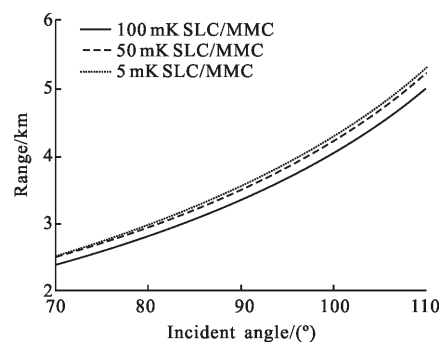


图 9 作用距离随探测器灵敏度的变化
Fig.9 Range varies with NETD

为了研究作用距离随对比度 C_{TARGET} 的变化,选取面阵规模为 1 024×1 024、探测器灵敏度 NETD=50 mK、折射镜头焦距 $f=30$ mm、瞬时俯仰视场角为 $\theta=100^\circ$,仿真结果如图 10 所示。可以看出,随着目标对比度的增大,系统作用距离增大。

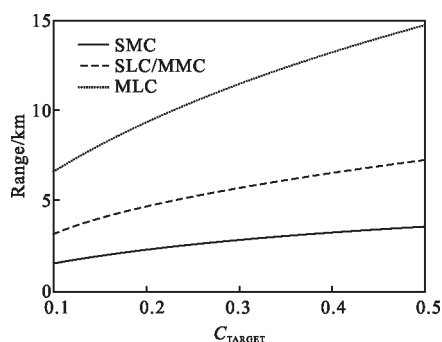


图 10 作用距离随目标对比度变化

Fig.10 Range varies with C_{TARGET}

经过以上仿真可以看出，在假设忽略大气的影响、目标对比度足够高的情况下，对于直升机目标，如果将探测任务定为在低混杂背景下探测静态目标或在中度混杂背景下探测移动目标，结合成本考虑可选择像元规模为 1024×1024 的探测器，对于观察俯仰视场角范围为 $75^\circ \sim 105^\circ$ ，对应文中系统设计的俯仰角范围 $-15^\circ \sim 15^\circ$ ，其周视红外成像的理论作用距离在 $2.71 \sim 4.70 \text{ km}$ 。探测器像元规模增大至 2048×2048 时，理论作用距离可提高为 $5.34 \sim 9.80 \text{ km}$ 。

5 结论与分析

文中针对双曲面单视点红外折反射全景成像系统，在给定探测器参数和俯仰角范围的情况下，根据单视点结构约束条件推导了单视点折反射红外全景成像系统时的空间分辨力(垂直方向瞬时视场和水平方向瞬时视场)的数学公式，并在理想大气、假设目标对比度足够高、探测方程相关参数最简化的条件下将其与现有的 NVThermIP 模型结合获得系统作用距离的公式。仿真了三种面阵规模下，系统结构参数随折射镜头焦距的变化。对于空间分辨力的仿真结果，发现随着探测器面阵规模的增大，系统空间分辨力增大。仿真了系统作用距离随探测器面阵规模的变化，发现随着探测器面阵规模的增大，系统作用距离增大。仿真了系统作用距离随探测器灵敏度的变化，发现随着探测器灵敏度的提高，系统作用距离增大。与此同时仿真了三种探测任务要求下，系统作用距离随系统瞬时俯仰角的变化，发现随着系统瞬时俯仰角的增大，系统作用距离增大，从而在设计阶段给予设计者以参考。

红外系统的作用距离往往受制于分辨力。对于

探测远处大俯仰角目标时，普通红外系统由于其边缘分辨力往往小于中心分辨力，往往其边缘视场的作用距离要小于中心视场。而对于单视点红外折反射成像系统，其边缘视场的分辨力要好于中心视场，因此其边缘视场的作用距离要大于中心视场。对于单视点红外折反射系统，相较于普通红外成像系统，其优点是无需扫描即可获得凝视大视场的图像，拥有较好的时间分辨力，其缺点是系统分辨力往往不如普通红外成像系统，拥有较差的空间分辨力。因此在实际应用中可以将二者结合起来，例如对于红外目标的识别，可以先利用单视点红外折反射系统良好的时间分辨力，在第一时间尽早发现目标，然后将目标的大致方位(粗扫)传给普通红外成像系统，引导普通红外成像系统利用其良好的空间分辨力进行精确扫描。

6 应用前景

折反射式红外全景成像系统无需扫描即可获得大视场的空间图像，具有良好的时间分辨力。目前，折反射系统的应用主要受制于其有限的分辨力，而影响其分辨力最大的因素是其光学系统的限制。反射元件的引入会给红外系统带来额外的畸变，而在红外成像和低照度情况下，往往需要红外系统拥有大的口径，而大口径下反射元件带来的畸变对折反射系统分辨力的影响十分显著。将折反射式红外全景成像系统和传统红外成像系统组合起来，充分利用二者各自的时间分辨力和空间分辨力的优点，将对未来(例如在周视视场内进行定向高能辐射武器预警、预警侦察机、目标快速发现与探测)产生重要的影响。折反射式红外全景成像系统提供了实时、 360° 水平视场、大俯仰视场的优点，非常适用于诸如港口安全、边界防护、视频监控、防空等安全和防御领域。

参考文献：

- [1] Zhang Yan, Zhao Lina, Hu Wanbao. A survey of catadioptric omnidirectional camera calibration[J]. *International Journal of Information Technology and Computer Science*, 2013, 5 (3): 13-20.
- [2] Nichols J M, Waterman J R, Menon R, et al. Performance characteristics of a submarine panoramic infrared imaging sensor[C]//SPIE Defense, Security, and Sensing. International

- Society for Optics and Photonics, 2010: 766005.
- [3] Furxhi O, Ggers R G, Holst G, et al. Performance analysis of panoramic infrared systems [C]//Proceedings of SPIE-The International Society for Optical Engineering, 2014, 9071 (18): 5450-5453.
- [4] Baker S, Nayar S K. A theory of catadioptric image formation [C]//International Conference on Computer Vision, IEEE Computer Society, 1998: 35-42.
- [5] Yamazawa K, Yagi Y, Yachida M. Omnidirectional imaging with hyperboloidal projection [C]//IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, 1993, 2: 1029-1034.
- [6] Ma Xianglu, Feng Ying, Cao Min. Concave hyperbolical catadioptric omnidirectional imaging system[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2013, 42(8): 2132-2136. (in Chinese)
马相路, 冯莹, 曹毓. 双曲凹面折反射全景成像系统[J]. 红外与激光工程, 2013, 42(8): 2132-2136.
- [7] Nayar S K, Peri V. *Folded Catadioptric Cameras* [M]//Panoramic Vision. New York: Springer New York, 2001: 103-119.
- [8] Su Liancheng, Zhu Feng. Design of a novel omnidirectional stereo vision system [J]. *Acta Automatica Sinica*, 2006, 32 (1): 67-72. (in Chinese)
苏连成, 朱枫. 一种新的全向立体视觉系统的设计. 自动化学报, 2006, 32(1): 67-72.
- [9] Schönbein M, Rapp H, Lauer M. Panoramic 3D Reconstruction with Three Catadioptric Cameras[M]// Intelligent Autonomous Systems 12. Berlin: Springer Berlin Heidelberg, 2013: 345-353.
- [10] Zeng Jiyong, Su Xianyu. Hyperbolical catadioptric omnidirectional imaging system [J]. *Acta Optica Sinica*, 2003, 23(9): 1138-1142. (in Chinese)
曾吉勇, 苏显渝. 双曲面折反射全景成像系统 [J]. 光学学报, 2003, 23(9): 1138-1142.