

文章编号:1002-2082(2008)04-0565-07

基于几何光学的红外成像模型

张昊酥, 赵 剡, 许 东

(北京航空航天大学 仪器科学与光电工程学院导航系, 北京 100083)

摘要: 提出一种基于光线追击法的CFD湍流场的红外成像模型,用“数字图像”模拟“真实目标”进行仿真计算。通过对比原始图与仿真结果,得出超高声速导弹附面层可引起降晰效应的结论,为弹载计算机的图像复原算法提供了理论依据。按照导引头的工作原理,把模型分为远距离、临界距离和近距离3种类型分别讨论,最后分析了点扩散函数与数字图像处理中降晰模板之间的关系。

关键词: 红外导航系统;气动光学;光线追迹;点扩散函数;降晰模板;CFD网格

中图分类号: TN219

文献标志码: A

Infrared imaging model based on geometrical optics

ZHANG Hao-su, ZHAO Yan, XU Dong

(Department of Navigation, School of Instrument Science and Photo-electricity Engineering,
Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100083, China)

Abstract: An infrared-imaging model for a CFD turbulence flow field was established with light ray tracing. It uses a “digital picture” to simulate an “actual target” to carry out simulation and calculation. It is concluded that there are blur effects of the wall-attached layer on a hypersonic missile by comparing the original picture with the simulated picture. It provides the missile computer the theoretical support for recovering images. This paper categorized the models into three types, long-distance, critical-distance and short-distance, according to the operation concept of infrared seeker. All these models were discussed respectively. The relationship between the PSF and the blur board used in digital image processing was analyzed.

Key words: infrared-guidance system; aero-optics; ray tracing; point spread function; blur board; CFD grids

引言

红外成像导引技术是当今精确制导技术发展的重点,也是国防高科技中的关键技术之一。它具有灵敏度及空间分辨率高、抗干扰能力较强、隐蔽性好、兼容性及扩展性好等优点,近几年来发展十分迅速,应用越来越广泛,尤其在对付复杂背景地物目标方面已成为主要方式^[1-2]。

然而,高超声速导弹在大气层中高速飞行时,

其头罩表面受大气气流的影响,使大量的动能转化为热能,这就产生了“气动热效应”。这些热能还会使导弹周围大气成分、密度及温度发生剧烈的变化,影响红外光的传输,使弹载成像系统所成的目标图像出现模糊、抖动、偏移和能量衰减等各种降晰效应,被称为“光学传输效应”^[3-7]。“光学传输效应”大大限制了红外制导技术的应用,本文主要针对它进行研究。

收稿日期:2007-08-07; 修回日期:2007-10-25

基金项目:国家重点基础研究发展计划资助项目(513230103-3)

作者简介:张昊酥(1983-),男,湖北宜昌人,北京航空航天大学仪器科学与光电工程学院导航系硕士研究生,主要从事气动光学机理方面的研究。E-mail:zhs_1983@163.com

美国早在上世纪 60 年代就开始了在对光在大气、湍流层、剪切层、附面层等复杂流动中传输规律的研究,为可压缩湍流,自由剪切层,斜激波的“气动光学效应”的分析打下了基础。现在美国已经编制了很多具有实用化功能的数学仿真软件,建立了相关试验验证系统并应用在许多重大国防项目中^[3-5]。国内对气动光学的研究起步较晚,目前大多集中于对气动光学效应获得的退化图像的校正。殷兴良、费锦东、韩志平和李桂春等人在该领域也取得了大量成果^[6-7],但还有很多工作有待开展。

本文利用湍流、光线追迹法^[8]及光学成像理论,从一个湍流场的密度和密度脉动数据出发,计算出了它在 3 种距离条件下的 3 个“光学传递函数”。把这些“传递函数”分别作用在模拟目标的清晰数字图像上,得到了 3 个仿真结果。通过对比“清晰图”与“结果图”,可同时计算出 3 种情况下各自的“气动光学传输效应”。

1 仿真背景

红外成像导引头的技术关键是多元红外探测器、计算机图像处理及模式识别与跟踪算法^[9]。只有通过研究气动光学效应的降晰机理,定量地计算出气动光学效应,才能很精确地复原出目标图像。

气动光学效应示意图如图 1 所示^[9]。常用的外冷式导引头的边界层包括冷却介质层和附面层,其中冷却介质层是一层很薄的冷却液,它对光学成像质量的影响很小,在本文的分析中忽略它的影响。激波层和附面层对成像的影响是由于密度的不均匀造成规则波阵面的“畸变”,这个“畸变”使成像系统产生了“散焦”,从而造成了降晰。用几何光学理论计算出的实际波面上各点相对于“高斯参考球面”的光程差就是对这个“畸变”程度的定量描述。利用这些光程差结合光学成像理论可以计算出流

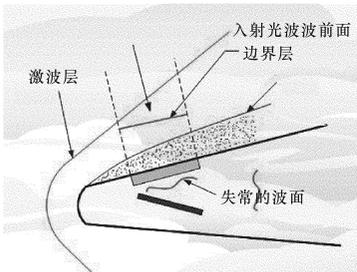


图 1 气动光学效应示意图

Fig. 1 Sketch map of aero-optics effects

场的“光学传递函数”,这个“传递函数”定量地描述了流场的降晰效应。本文为了简化计算过程,只计算“附面层”的降晰效应,流场厚度取附面层的厚度 80 mm。整个激波层的降晰效应可通过对本文的算法予以扩展即可。

图 1 中入射波投射的范围就是“视窗”——弹载成像系统的窗口。飞行器侧窗成像系统简图如图 2 所示。成像系统的出瞳一般是直径 60 mm~80 mm 的圆孔或边长 60 mm~80 mm 的方孔,等效透镜的焦距是 120 mm~150 mm。本文选择出瞳为 64 mm×64 mm 的方孔,焦距为 120 mm,仿真过程中红外光的波长为 9 μm。

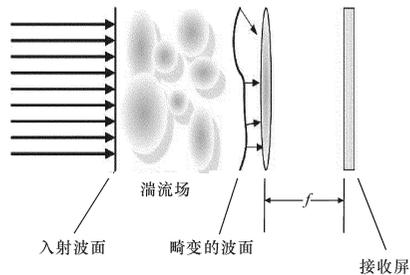


图 2 飞行器侧窗成像系统示意图

Fig. 2 Diagram of side-window imaging system on a aerial vehicle

为了精确地描述模糊效果,选择的图像尺寸与出瞳大小一致,因此选择一幅 64 mm×64 mm 的数字图像来模拟真实目标进行仿真计算。为了避免几何缩放效应,显示的图像也保持原始大小。

综合以上讨论,飞行器选择一个飞行高度为 30 km,速度为 5 Ma 的导弹,湍流场范围选在紧贴侧窗口正上方一个 64 mm×64 mm×80 mm 的长方体内(其中 80 mm 是厚度方向)。该长方体被划分为 64×64×80 个 1 mm³ 大小的均匀 CFD (Computational fluid dynamics) 网格,运用大涡模拟法计算出每个网格内的密度 ρ 和密度脉动 ρ',用这些网格分布来逼近真实流场中连续的不均匀分布。由 G-D 关系^[8]可知,相应的折射率也用这样的网格分布来逼近连续的不均匀分布,以计算其降晰效应。选择一幅尺寸为 64 mm×64 mm 且目标易于提取识别的数字图片的一个网格分布来逼近真实流场中的连续不均匀分布。

2 基本理论

此模型从纯几何光学角度出发,用光线的反

射、折射定律来研究其传输。由于湍流尺度的数量级在 $10^{-3} \text{ m} \sim 1 \text{ m}$ 之间, 并且本文选取的红外光波长的数量级为 10^{-6} m , 衍射和干涉等效应很小, 故几何光学成像模型的精度可以保证^[10-11]。计算过程如图 3 所示。

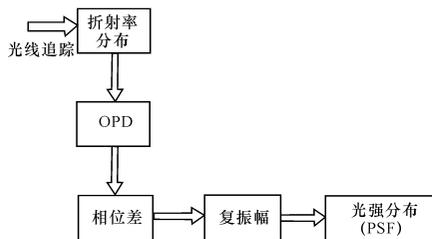


图 3 模型算法示意图

Fig. 3 Diagram of algorithm of the model

把 1 个像素看作一个点光源, 发出的光线组成一个球面波, 其振幅大小与像素的亮度的平方根成正比。追迹其中若干条光线, 按以下公式可得到每个光程长 OPL:

$$\text{OPL} = \sum_i n_i d = \sum_i (1 + k_{\text{GD}} \rho_i) d \quad (1)$$

式中: n_i 为光线传输路径上第 i 个网格的折射率; d 是网格厚度即 1 mm ; k_{GD} 是 G-D 关系中的 G-D 常数, 用来描述折射率与密度的关系。

选择穿越流场中心的一条光线为“参考光线”, 它的光程长为“参考光程长 OPL_{ref} ”, 按下式可以求出相对光程差 OPD_r :

$$\text{OPD}_r = \text{OPL} - \text{OPL}_{\text{ref}} \quad (2)$$

进而可以获得光线在流场中传输产生的波前相差, 即

$$\varphi(x, y) = k \cdot \text{OPD}_r \quad (3)$$

式中: (x, y) 为光线入射到探测窗口平面的位置; k 为波数。

本模型把高速流场看作一个相位变换因子, 光波通过高速流场后的波面的复振幅分布为

$$U'(x, y) = F[U_0(x, y) \exp(i\varphi(x, y))] \quad (4)$$

式中: $U_0(x, y)$ 表示为入射光波的复振幅; F 代表傅里叶变换。 $U'(x, y)$ 为出射光波的复振幅, 它就是相干光源照明时的点扩散函数。对“相干点扩散函数”取模后求平方就得到了“非相干点扩散函数”, 即非相干光源照明时出瞳上的光强分布。用 PSF (Point spread function) 表示“非相干点扩散函数”, 则有:

$$\text{PSF}(x, y) = I(x, y) = |U'(x, y)|^2 \quad (5)$$

对 PSF 作傅立叶变换得 OTF, 用 OTF 在频域

内运算。由于是非相干成像, 传递的变量是光强 I , 可通过下式计算:

$$I_{\text{out}}(x, y) = IF(F(I_{\text{in}}(x, y)) \cdot F(\text{PSF}(x, y))) \quad (6)$$

式中: F 与 IF 分别代表傅里叶变换与傅里叶反变换, I_{in} 和 I_{out} 分别表示目标图与模糊图的光强分布, 由此可以得到仿真结果^[11-12]。

3 模型的建立及仿真结果

红外导引头的作用距离一般是从锁定目标(距离几百米或几千米)到目标充满视场使成像 CCD 饱和(几米或更小)为止。CCD 饱和后, 弹载计算机就会停止成像制导的控制以提高命中率, 这就是导引头的工作原理^[13-15]。

一个球面波如果刚离开光源就受到湍流的扰动和传播了很远才受到扰动相比, 畸变的程度有很大的不同。本文正是基于这个道理, 又结合红外导引头的工作原理, 把模型按距离远近进行划分^[16-17], 根据各类模型各自的特点进行仿真图像的计算。

3.1 远距离模型

一般目标的三维尺寸从几米到几十米不等, 所以当目标刚被锁定时, 目标的尺寸相对于导弹与目标的距离来说是可以忽略的, 故此时的目标可以用“点目标”来近似代替。又由“两平行线间所夹的同心圆弧段随半径的增大逐渐接近直线”可知, 这时“点目标”发出的球面波也可以近似为平面波。平面波被湍流扰动的示意图如图 4 所示。

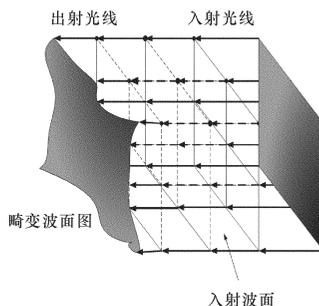


图 4 远距离模型示意图

Fig. 4 Diagram of long-distance imaging model

进行这样的近似处理后, 追迹光线时可以只追迹每个像素正入射到对应网格的一条光线, 把这些光线当作是同一个点目标发出的, 按照公式(1)到(6)计算, 先求出它们之间的相对光程差, 得到广义

的“点扩散函数”和广义的“光学传递函数”(由于此时选择的光线不是由真实点光源发出的,故计算出来的“点扩散函数”称为广义的)。把它当作降晰模板,作用到目标图上就可以得到仿真结果。用这样的近似计算方法大大简化了计算过程^[18-19]。

为了保证图片的清晰度并且使单个像素的大小与网格尺寸相比拟,把分辨率选为 512×512 , 仿真计算前对原来 64×64 的“流场密度数据”进行了二维插值,以便于与目标图像匹配,这样既保证了精度又不会增加太大的计算量。考虑到成像系统的透镜效果,在流场的“光学传递函数”的基础上叠加了一个理想透镜的“光学传递函数”^[20-21]。模拟目标的“清晰数字图”如图5所示,仿真结果如图6所示。



图5 模拟目标的清晰数字图

Fig. 5 Distinct digital picture to simulate a target



图6 远距离模型的仿真结果图

Fig. 6 Result picture of long-distance model

按数字图像处理理论^[18]计算这2幅图之间的各种降晰效应,结果见表1。

表1 远距离模型的降晰效应

Table 1 Blur effects of long-distance model

形心偏移		质心偏移		降晰模板 中心元素	能量 减弱	相关 测度
X方向	Y方向	X方向	Y方向			
3.48	-5.89	3.89	-5.55	0.883	0.992	0.986

表中质心和形心偏移的单位是一个像素的尺寸0.125 mm,其中正的X方向代表向右,正的Y方

向代表向下;第2个参数中的降晰模板是通过“图像复原理论”估算出来的一个空的不变模板,它的中心元素值近似表示了“模糊效应”的大小,该值越小表示模糊越严重,能量强弱表明了仿真结果图的整体灰度值分布与原图差异的大小;相关测度衡量了“结果图”与“原图”之间的相关性,越接近1就表示2幅图的差异越小。

3.2 临界距离模型

当导弹不断地接近目标,距离减小到与目标尺寸相当时,再用“远距离模型”计算就会产生很大的误差。因为此时球面波的曲率不会接近0,目标的尺寸也不能忽略了,也就是不能用平面波来代替球面波。但随着距离的减小,通过把二维目标进行分块的方法来减小它的尺寸,并且总能保证“子块”的尺寸远小于弹目距离,那么对每一个“子块”仍沿用远距离模型。把模糊后的“子块”再按顺序并联起来就得到了仿真结果。

划分完图像后,把流场和透镜也作相应的划分以便使用“远距离模型”进行计算。此模型由于人为地分割图像造成了子块之间的边缘锐化,观察起来灰度值有台阶式的突变,故最后在子块的边缘之间选用平滑算子来淡化边缘,以便减少人为分块带来的误差。

仿真结果如图7所示,降晰效应见表2。



图7 临界距离模型的仿真结果图

Fig. 7 Result picture of critical-distance model

表2 临界距离模型的降晰效应

Table 2 Blur effects of critical-distance model

形心偏移		质心偏移		降晰模板 中心元素	能量 减弱	相关 测度
X方向	Y方向	X方向	Y方向			
4.97	3.53	-6.25	-5.83	0.883	0.992	0.986

3.3 近距离模型

当导弹快要击中目标时,目标的尺寸相对于弹目距离已经不能忽略。这时只有把目标按像素划分,计算每个像素发出的若干条光线经过流场传输

后产生的光程差,然后利用这些光程差计算出每个像素的“点扩散函数PSF”才能保证仿真精度。

要计算一个像素发出的若干光线,就必须把每个像素看作是一个理想点光源,每个光源向四周辐射出均匀球面波。按照物理光学理论,该球面波的振幅与该像素亮度的平方根成正比^[12,19]。

采用这个模型计算时必须考虑光线斜入射的情形,这就对折射率的精度要求很高。湍流参数中每个网格内的密度脉动 ρ' 表示该网格内密度 ρ 不确定性的影响,因此引入 ρ' 来修正密度值,从而提高了折射率精度。修正方法见式(7)。

$$n_{ijk-correct} = 1 + K_{GD} \cdot (\rho_{ijk} + \rho'_{ijk} x_{ijk}) \quad (7)$$

式中:下标表示X-Y-Z方向的序号; x_{ijk} 表示相应网格内一个均值为0,方差为1的正态分布随机数。远距离与临界距离模型由于只考虑正入射情形,对折射率精度要求不高,故计算 n 时忽略了 ρ' 的影响。

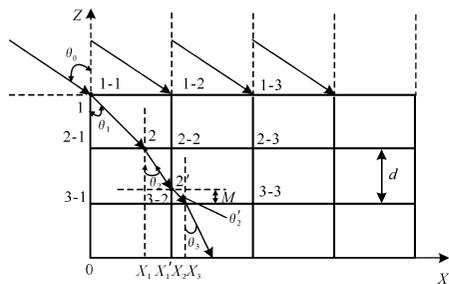


图8 CFD网格光线传输模型示意图

Fig. 8 Diagram of light transmission model based on CFD grids

为了能追迹斜入射的光线,必须建立基于CFD网格的几何光学传输模型。为了简化问题,认为同一个像素发出的所有光线都到达对应网格的左上点处,这种近似在球面波离光源很近时误差不大。这样就把问题简化到二维平面,并且把入射光作为平行光一次可以计算整幅图像在同一角度辐射出的光线。模型示意图如图8所示^[22-23]。

用该模型追迹某条光线时,假设光线在每个界面处发生无能量损失的折射。设光线初始入射角为 θ_0 ,通过节点1-1后折射角为 θ_1 ,第 k 次 (k 定义为光线Z向折变次数) 折射时对应折射角为 θ_k 。令 ΔX_k 表示光线单次平移量(偏差量),每发生一次折射就记录一个 ΔX_k ,并不断累加,一旦超过一个网格尺寸(1 mm),如图8中点2处,就会发生一次“局部坐标的旋转”,此时的界面和法线方向发生相应的旋转,入射角变为原来的余角。局部坐标转换完后,重

新追迹直到发生新的“旋转”,再次转换坐标进行追迹。重复此过程直到光线射出流场,并且追迹的光线射出流场范围到达入瞳处的参考球面。

追迹模型各参数的关系为

$$\begin{cases} \Delta X_k = d \tan \theta_k \\ n_{k+1,l} \sin \theta_k = n_{k,l} \sin \theta_{k-1} (l, k = 1, 2, \dots) \\ \text{OPL}_k = n_{k+1,l} d / \cos \theta_k \end{cases} \quad (8)$$

这样就得到了计算光程差所必需的光程长数据。但只能得到一组平行光线在X-Z平面以 0° 到 90° 从左向右入射时的光程长数据,这对于计算“PSF”是不够的。根据相对性原理,光线保持这种入射方式,对流场作关于X-Z平面,Y-Z平面及X-Y平面平分线与Z轴所成平面分别作对称运算,就可以把算法推广到平行光在X-Z及Y-Z平面以 0° 到 90° 从左向右和从右向左入射的情况。再从4个方向插值得到8个方向的数据用来计算“PSF”,运算方向间的关系如图9所示。

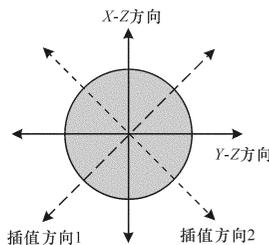


图9 运算方向示意图

Fig. 9 Diagram of calculated directions

由这些光程长数据可计算出这4个方向上的光强分布,此光强分布就是“PSF”。如果要提高精度可以进一步插值,使方向遍布整个圆区域。这个“PSF”的物理意义就是作为点光源的像素通过流场后所成的像。但这只是考虑一个独立像素的情况,实际的数字图像是由很多像素紧密地排列起来得到的,故此时的“PSF”外围元素值代表了周围像素对中心像素影响的大小。故此模型是把“PSF”当作“降晰模板”作用到“原始图”上来得到仿真结果的,即它把“降晰过程”看作是一个“空变的模板”作用到“清晰目标图”上的过程。

仿真结果如图10所示,降晰效应见表3。

表3 近距离模型的降晰效应

Table 3 Blur effects of short-distance model

形心偏移		质心偏移		降晰模板 中心元素	能量 减弱	相关 测度
X方向	Y方向	X方向	Y方向			
4.68	-6.45	5.35	-5.96	0.798	0.920	0.895

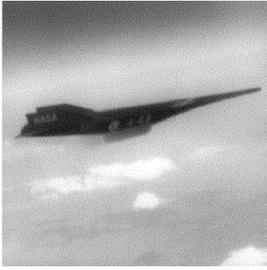


图 10 近距离模型的仿真结果图

Fig. 10 Result picture of short-distance model

4 结论

由图6、7、10及表1、表2和表3可知:附面层也会引起明显的降晰效应,若考虑整个激波层的影响,则造成的气动效应将会十分严重。一般高速导弹的飞行高度为1 km~100 km,飞行马赫数为4 Ma~25 Ma,本文以30 km,5 Ma的导弹为例进行了仿真运算,根据“飞行速度越大,空气被压缩得越厉害”及“空气密度随高度的降低而越来越稠密”可知,对于飞行高度更低,速度更快的导弹将产生更严重的降晰效应^[8]。

3个模型中近距离模型的精度最高的,因为它精确地描述了降晰过程。远距离和临界距离模型都是为了减少计算量,对近距离模型的近似。其中“远距离模型”近似程度比“临界距离模型”高,所以精度是最差的。如果条件允许,对远距离和临界距离的情形也可以采用近距离成像模型的计算方法,但计算量会增加。通过定量分析比较表1、表2和表3中的数据,可知目标离导弹越近,降晰效应越大,但变化十分微小,也就是说“气动光学传输效应”是“弹目距离”的弱函数,这也是符合实验结果及光学成像理论的。

本文成像模型的建立与仿真计算都是基于几何光学理论。模型中忽略了光的物理特性,没有考虑任何衍射和干涉效应,在波长较长或湍流长度尺度较细密时会带来很大的误差。这时需要用物理光学、波动光学及统计光学理论出发寻求新的模型来研究气动光学效应。

本模型是用“数字图像”来模拟真实目标,进行降晰过程的仿真计算。若引入真实物理目标的红外辐射图像的生成、仿真与传输理论后,本论文中的模型还可以应用于气动光学效应的实验分析中,并

为气动光学图像的复原提供理论依据^[24-25]。

参考文献:

- [1] 刘永昌. 精确制导红外成像导引头技术[J]. 红外与激光工程, 1996, 25(3): 47-53.
LIU Yong-chang. Infrared imaging precision guiding head [J]. Infrared and Laser Engineering, 1996, 25(3): 47-53. (in Chinese)
- [2] 陈宏, 雷鸣. 激光制导寻的导引头的应用[J]. 应用光学, 2002, 23(3): 34-38.
CHEN Hong, LEI Ming. Application of laser guidance seeker [J]. Journal of Applied Optics, 2002, 23(3): 34-38. (in Chinese)
- [3] SUTTON G W, POND J E. Hypersonic interceptor aero-optics performance predictions [J]. Journal of Spacecraft and Rockets, 1994, 31(4): 592-599.
- [4] JUMPER E J, FITZGERALD E I. Recent advances in aero-optics [M]. Progress in Aerospace Sciences, 2001: 299-339.
- [5] JUMPER E J. Recent advance in the measurement and analysis of dynamic aero-optic interactions [R]. AIAA, 1997: 2350.
- [6] 韩志平, 殷兴良. 湍流对超音速导弹光学图像的影响数值仿真[J]. 系统工程与电子技术, 2002, 24(11): 78-83.
HAN Zhi-ping, YIN Xing-liang. Numerical simulation of turbulent flows on optical images in supersonic missiles [J]. Systems Engineering and Electronics, 2002, 24(11): 78-83. (in Chinese)
- [7] 费锦东. 高超声速红外成像末制导对气动光学效应技术研究的需求[J]. 红外与激光工程, 1998, 27(1): 42-44.
FEI Jin-dong. Study on aero-optical effect technology for high speed missiles terminally guided by infrared imaging [J]. Infrared and Laser Engineering, 1998, 27(1): 42-44. (in Chinese)
- [8] 李桂春. 气动光学 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2006.
LI Gui-chun. Aero-optics [M]. Beijing: National Defence Industry Press, 2006. (in Chinese)
- [9] 曾宪林. 红外成像导引头及其成像制导武器述评[J]. 航天电子对抗, 2004, 45(5): 45-49.
CENG Xian-lin. Comment on infrared imaging seeker and weapon guided by imaging [J]. Space Electron Counter, 2004, 45(5): 45-49. (in Chinese)
- [10] 陈家璧, 苏显渝. 光学信息技术原理及应用 [M]. 北京: 高等教育出版社, 2001.
CHEN Jia-bi, SU Xian-yu. The principle and application of the optical information [M]. Beijing:

Perss of Advanced Education,2001. (in Chinese)

- [11] 王仕凡. 信息光学理论与应用[M]. 北京:北京邮电大学出版社,2004.

WANG Shi-fan. The theory and application of information optics [M]. Beijing: Perss of Beijing University of Posts and Telecommunications, 2001. (in Chinese)

- [12] 王之江,伍树东. 成像光学[M]. 北京:科学出版社,1991.

WANG Zhi-jiang, WU Shu-dong. Imaging optics [M]. Beijing: Press of Science, 1991. (in Chinese)

- [13] 车双良,汶德胜,李轶,等. 亚像元动态成像技术中系统的调制传递函数[J]. 应用光学,2002,23(3):42-44.

CHE Shuang-liang, WEN De-sheng, LI Yi, et al. The modulation transfer function of systems in subpixel dynamic imaging technique [J]. Journal of Applied Optics, 2002, 23(3): 42-44. (in Chinese)

- [14] 车双良,汶德胜. 线阵CCD的调制传递函数[J]. 应用光学,2001,22(5):4-6.

CHE Shuang-liang, WEN De-sheng. The modulation transfer function of linear array CCD [J]. Journal of Applied Optics, 2001, 22(5): 4-6. (in Chinese)

- [15] 孙传东,陈良益,高立民,等. 水的光学特性及其对水下成像的影响[J]. 应用光学,2000,21(4):39-46.

SUN Chuan-dong, CHEN Liang-yi, GAO Li-ming, et al. Water optical properties and their effections of underwater imaging [J]. Journal of Applied Optics, 2000, 21(4): 39-46. (in Chinese)

- [16] 邢强林,黄惠明,熊仁生,等. 红外成像探测系统作用距离分析方法研究[J]. 光子学报,2004,33(7):893-896.

XING Qiang-lin, HUANG Hui-ming, XIONG Ren-sheng, et al. Detect-ability analyzing of IR FPA tracking system [J]. Acta Photonica Sinica, 2004, 33(7): 893-896. (in Chinese)

- [17] 王卫华,牛照东,陈曾平. 海空背景凝视红外成像系统作用距离研究[J]. 红外与毫米波学报,2006,25(2):150-152.

WANG Wei-hua, NIU Zhao-dong, CHEN Zeng-ping. Research on the operating range of staring IR imaging system in sea-sky background [J]. J. Infrared Millim. Waves, 2006, 25(2): 150-152. (in Chinese)

- [18] CASTLEMAN K R. 数字图像处理[M]. 林志刚,林

学闯,石定机,等译. 北京:电子工业出版社,2004.

CASTLEMAN K R. Numeric image processing [M]. LIN Zhi-gang, LIN Xue-yin, SHI Ding-ji, et al. translated. Beijing: Press of Electronic Industry, 2004. (in Chinese)

- [19] 石顺祥. 物理光学与应用光学[M]. 西安:西安电子科技大学出版社,2000.

SHI Shun-xiang. Physic optics and application optics [M]. Xi'an: Press of Xi'an Electron Scientific and Technical University, 2000. (in Chinese)

- [20] 洪汉玉,喻九阳,陈以超,等. 红外目标湍流退化图像的优化复原算法[J]. 应用光学,2006,27(6):147-152.

HONG Han-yu, YU Jiu-yang, CHEN Yi-chao, et al. Optimization restoration algorithm for infrared object turbulence-degraded image [J]. Journal of Applied Optics, 2006, 27(6): 147-152. (in Chinese)

- [21] 庄松林,钱振邦. 光学传递函数[M]. 北京:机械工业出版社,1981.

ZHUANG Song-lin, QIAN Zhen-bang. Optical transfer function [M]. Beijing: Press of Mechanical Industry, 1981. (in Chinese)

- [22] 王涛. 高超声速流场中光传输效应研究[D]. 北京:北京航空航天大学,2006.

WANG Tao. A study of optical transmission through the flow of fluid-hypersonic [D]. Beijing: BeiHang University, 2006. (in Chinese)

- [23] 蔡喜平,李惠民. 主动式光学二维成像技术概述[J]. 激光与红外,2007,37(1):22-26.

CAI Xi-ping, LI Hui-ming, et al. Summarizer of the active optical two-dimensional imaging technology [J]. Infrared and Laser Engineering, 2007, 37(1): 22-26. (in Chinese)

- [24] 廖猛蛟. 飞机红外辐射图像生成,仿真与传输研究[D]. 西安:西北工业大学,2001.

LIAO Meng-jiao. Creation simulation and transmittal of infrared radiation image [D]. Xi'an: North-West University of Industry, 2001. (in Chinese)

- [25] 吴亚平,张天序. 红外图像的计算机仿真及仿真软件[J]. 红外与激光工程,2000,29(4):137-139.

WU Ya-pin, ZHANG Tian-xu. Simulation of infrared image and the simulation software [J]. Infrared and Laser Engineering, 2000, 29(4): 137-139. (in Chinese)