

# 基于大气环境实验方舱的可见光图像增强研究

杨建清, 罗积军, 徐 军, 孙琦云, 王 婷

火箭军工程大学理学院, 陕西 西安 710025

**摘要** 雨雾条件下目标场景可见光成像是战场环境仿真的重要内容,可见光图像增强对于提高光学制导导弹的作用距离和打击精度具有十分重要的意义。在大气环境的实验方舱中开展雨雾条件下目标机构,即微缩景观沙盘的可见光图像的仿真研究,分别获得晴天,轻雾、中雾和浓雾,小雨、中雨和大雨条件下目标的可见光图像。采用改进的暗通道法获得不同雨雾条件下的增强图像,并计算了雨雾图像和增强后图像的标准差(MSE)和峰值信噪比(PNSR)。结果表明,轻雾、中雾和浓雾,以及小雨、中雨和大雨条件下,随着雨雾等级的提高,雨雾图像以及增强后图像的MSE逐渐增加,分别由245.78增加到383.07,和由46.84增加到222.01;PNSR逐渐减小,分别由24.23下降到22.29,和由31.42下降到24.66。据此说明,图像质量随着雨雾等级的提高而下降,经过图像增强依然存在此现象。另外,对比雨雾图像的MSE和PNSR与增强后图像的MSE和PNSR发现,增强后图像的MSE明显减小,PNSR显著增大,依据MSE和PNSR两个客观评价指标,图像质量在进行图像增强后显著改善。

**关键词** 成像系统;改进的暗通道法;大气环境实验方舱;雨雾;可见光图像;图像增强

中图分类号 O436 文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP54.101103

## Visible Light Image Enhancement Based on Experimental Cabin Under Atmospheric Environment

Yang Jianqing, Luo Jijun, Xu Jun, Sun Qiyun, Wang Ting

College of Science, Rocket Force University of Engineering, Xi'an, Shaanxi 710025, China

**Abstract** Visible light imaging of target scene under the condition of rain and fog plays an important part in the simulation of battlefield environment. It is of great significance to enhance visible image to improve the range and precision of the optical guided missile. In an experimental cabin under atmospheric environment, the simulation of target mechanical structure named miniature landscape sand table is carried out under various rain and fog conditions to obtain visible images in sunny day, mist, fog, dense fog, light rain, moderate rain and heavy rain. The visible images are enhanced based on the improved dark channel method, and the mean squared error (MSE) and peak signal to noise ratio (PNSR) of the rain and fog images and the enhanced images are calculated. The calculated results show that, with the increase of rain and fog level, MSEs of the rain and fog images and enhanced images gradually increases from 245.78 to 383.07, and from 46.84 to 222.01, respectively, and the PNSRs gradually decrease from 24.23 to 22.29, and from 31.42 to 24.66, respectively. The quality of the images decreases with the increase of rain and fog level, even after the images are enhanced. In addition, compared MSE and PNSR of the rain and fog images with those of the enhanced images, it shows that MSE decreases obviously and PNSR increases significantly. The quality of the images is improved significantly according to the two objective indexes of MSE and PNSR.

**Key words** imaging systems; improved dark channel method; experimental cabin under atmospheric environment; rain and fog; visible light image; image enhancement

**OCIS codes** 110.5405; 100.2980; 110.0113

收稿日期: 2017-04-30; 收到修改稿日期: 2017-05-31

基金项目: 军队科研基金(EP2016033100)

作者简介: 杨建清(1993—),男,硕士研究生,主要从事红外辐射在雨雾中传输特性方面的研究。

E-mail: 2809918419@qq.com

导师简介: 罗积军(1974—),男,硕士,副教授,主要从事强激光与光电对抗方面的研究。E-mail: 16430383@qq.com

## 1 引言

战场环境主要包括陆地自然环境、军事环境和社会环境<sup>[1]</sup>,其中陆地自然环境主要指作战地区内的自然情况,是战场环境中最基本的构成<sup>[2]</sup>。雨雾是最为常见的自然现象,会对光学制导导弹产生非常不利的影响。基于可见光图像的电视制导在实际作战中使用条件十分苛刻,只能在能见度较好且限定的传输距离条件下使用<sup>[2]</sup>。这是由于与晴朗天气相比,雨雾天气下不仅大气中的气体分子、气溶胶粒子会对可见光产生吸收和散射<sup>[3]</sup>,而且空气中雨雾粒子含量大大增加,还会对可见光产生更大的吸收和散射<sup>[4]</sup>,使可见光的大气透过率大大降低。在能见度很低且传输距离远的情况下,导引头开机后,摄像机采集到的可见光图像对比度变低<sup>[5]</sup>,当可见光图像的对比度阈值低到一定值后会导致视频跟踪器跟踪导引失败<sup>[6]</sup>。由此可见,探究雨雾条件下可见光图像的仿真以及对可见光图像增强非常重要<sup>[7]</sup>。

大气环境实验方舱是一个可以由人工控制,改变和再现多种气象条件,演示雨、雾和光照等大气环境的实验方舱,其结构包括环境实验方舱、可见光相机运动平台、微缩景观灯箱和沙盘等。可以通过大气环境实验方舱定性、定量地人工模拟晴天,轻雾、中雾、浓雾和小雨、中雨、大雨等自然条件,利用可见光相机获得不同气象条件下的可见光图像。关于图像增强的方法,Rao<sup>[8]</sup>提出了一种基于纹理分割和 Top-Hat 变换的合成孔径雷达(SAR)和可见光图像增强融合算法,提高融合图像的对比度,减少图像噪声对融合图像细节信息的影响;苏娟等<sup>[9]</sup>提出了一种结合脉冲耦合神经网络分割和模糊集理论的红外图像增强方法,对目标区域与背景区域进行重构获得最终的增强图像;吴一全等<sup>[10]</sup>基于多尺度 Retinex 的非下采样 Contourlet 域图像增强更有效地提高图像的对比度和信息熵,增强图像的整体视觉效果。对不同雨雾等级条件下的可见光图像进行增强处理方面,香港中文大学 He 等<sup>[12]</sup>提出的暗通道法是一种非常新颖且能够产生理想效果的方法,具体步骤为:1) 对整幅图像的像素暗通道强度由高到底进行排序;2) 选择排序后强度为 0.1% 的像素集;3) 在退化图像中,从选取的像素集中选择强度最大值作为大气光;4) 将精细化后的透过率和估计得到的大气光代入到复原公式中,获得去雨雾后的增强的可见光图像。

本文基于大气环境实验方舱开展雨雾条件下目标机构,即微缩景观沙盘的可见光图像的增强研究,获得不同雨雾条件下的目标机构可见光图像,并基于改进的暗通道法对雨雾条件下可见光图像进行增强,获取不同雨雾条件下的增强图像;选择均方误差(MSE)和峰值信噪比(PNSR)两个指标对图像增强效果进行客观评价。

## 2 暗通道法理论

暗通道法处理可见光图像是基于暗通道先验理论而提出的退化图像的还原方法<sup>[12]</sup>。水平均匀大气中图像退化光学模型表示为

$$I(x) = J(x)t(x) + A [1 - t(x)], \quad (1)$$

式中  $t(x)$  为大气介质透过率,  $A$  为大气光,  $x$  为二维空间位置。假设大气光  $A$  为全局常量。

暗通道先验假设:暗通道先验是通过大量户外清晰图像的观察统计得到的,即在非天空区的局部区域中,对于 RGB 颜色通道,至少有一个颜色通道的强度非常低,称为暗通道<sup>[13]</sup>,表示为  $J^{\text{dark}}(x) = \min_{c \in \{R,G,B\}} [\min_{y \in \Omega(x)} J^c(y)] = 0$ ,其中  $\Omega(x)$  为以像素点  $x$  为中心的局部小区域,  $c$  为 RGB 颜色通道。

在雨雾天气条件下,暗通道的亮度值主要由视线路径中的天空光决定,满足:

$$\min_{c \in \{R,G,B\}} [\min_{y \in \Omega(x)} I^c(y)] = A^c [1 - t(x)]. \quad (2)$$

由(2)式可以得到:

$$t(x) = 1 - \omega \min_{c \in \{R,G,B\}} \left[ \min_{y \in \Omega(x)} \frac{I^c(y)}{A^c} \right]. \quad (3)$$

最终图像恢复公式为

$$J(x) = \frac{I(x) - A}{\max[t(x), t_0]} + A. \quad (4)$$

在得到大气透过率  $t$  后,需要进行后续处理:1) 在(3)式中引入一个常数  $\omega$  ( $0 < \omega < 1$ ),即

$$t(x) = 1 - \omega \min_{c \in \{R,G,B\}} \left[ \min_{y \in \Omega(x)} \frac{I^c(y)}{A^c} \right], \omega \text{ 的值基于经验选取}^{[14]}; 2) \text{ 透过率 } t \text{ 为离散有突变的曲线,需要对曲}$$

线进行平滑处理使透过率  $t$  变得更加平滑<sup>[15]</sup>, 随后估计大气光  $A$ ; 3) 考虑到透射图  $t$  的值很小时, 会导致  $J(x)$  的值偏大, 进而使图像整体向白场过度, 因此设置阈值  $t_0$ <sup>[16]</sup>。

### 3 大气环境实验方舱基本情况

大气环境实验方舱的总体效果如图 1 所示, 为一个封闭长方形舱体结构, 由底座、实验舱和顶部等三层构成。实验舱位于中层, 其中部为实验舱室, 两侧分别为探测器平台和目标平台, 三者构成水平测试演示系统。雨、雾等大气环境要素通过实验舱室的顶部、底部、侧部进入舱室内的实验空间, 通过控制系统的调节, 能满足大气环境影响演示的各项要求。

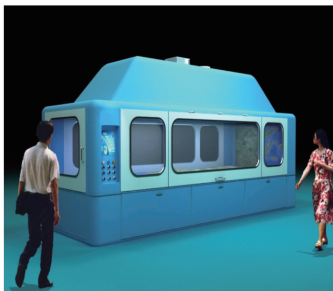


图 1 大气环境实验方舱

Fig. 1 Experimental cabin in atmospheric environment

人工模拟降雨系统采用恒压变频供水, 利用变频器控制压力实现对降雨量的分级控制, 分别为小雨、中雨和大雨。人工造雾系统采用造雾机进行高压雾化后通过电磁阀开关控制经由喷头释放。造雾机高压压力为  $60\sim 75\text{ MPa}$ , 对降雨量进行分级控制, 分别为轻雾、中雾和浓雾。人工模拟降雨系统框图和人工造雾系统框图分别如图 2 和图 3 所示。

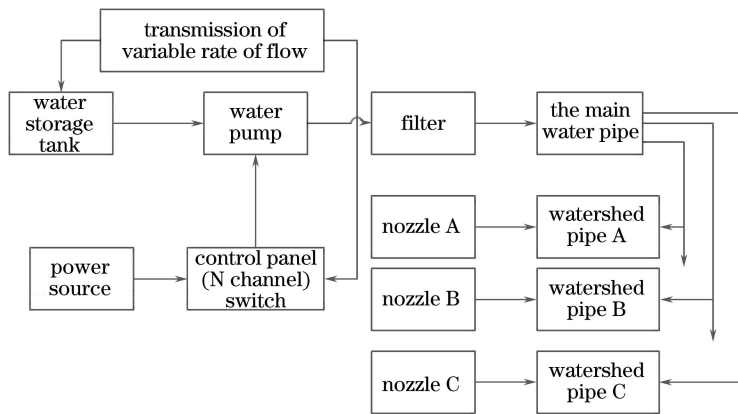


图 2 人工模拟降雨系统框图

Fig. 2 Diagram of artificial rainfall simulation system

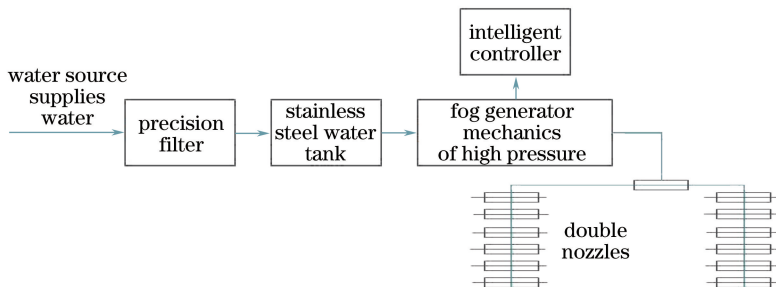


图 3 人工造雾系统框图

Fig. 3 Diagram of artificial fog system

目标微缩景观沙盘如图 4 所示,探测器运动平台可以在三维方向调节。

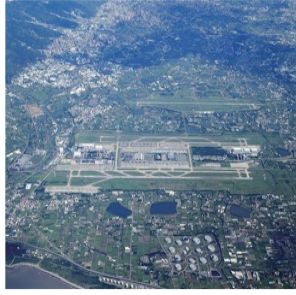


图 4 机场沙盘

Fig. 4 Sand table of airport

#### 4 暗通道法可见光图像去雨雾

基于大气环境实验方舱探测器获得晴天目标图像如图 5 所示,轻雾、中雾、浓雾和小雨、中雨、大雨条件下目标的可见光图像,分别如图 6~11 中的(a)所示。

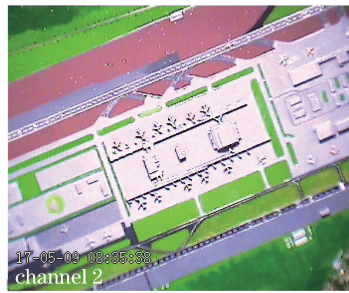


图 5 晴天目标图像

Fig. 5 Target image in sunny day

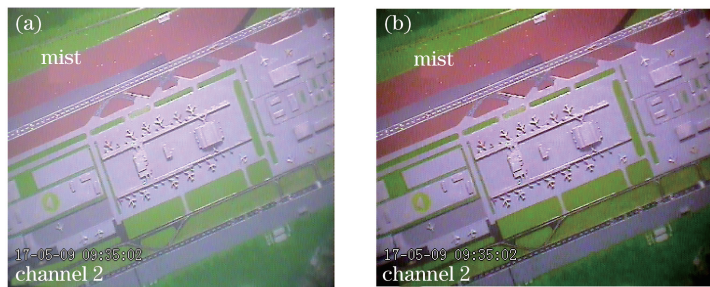


图 6 轻雾条件下目标(a)可见光图像和(b)增强图像

Fig. 6 (a) Visible light image and (b) enhanced image of target in mist

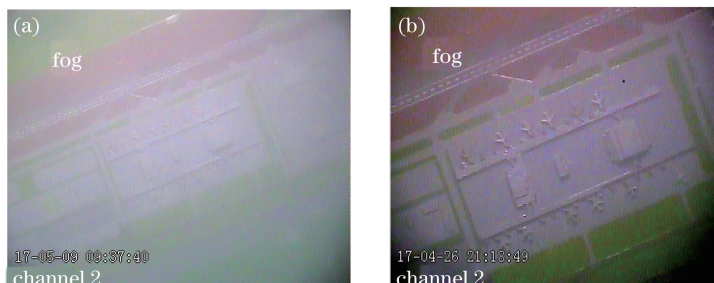


图 7 中雾条件下目标(a)可见光图像和(b)增强图像

Fig. 7 (a) Visible light image and (b) enhanced image of target in fog

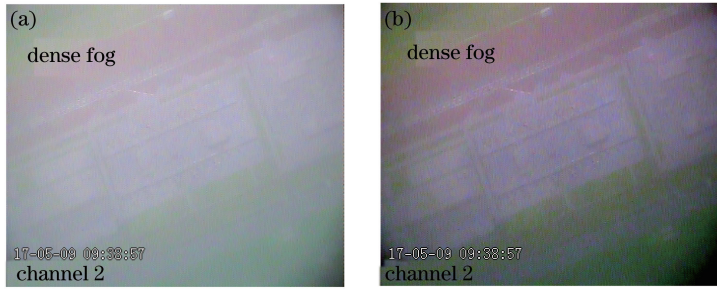


图 8 浓雾条件下目标(a)可见光图像和(b)增强图像

Fig. 8 (a) Visible light image and (b) enhanced image of target in dense fog

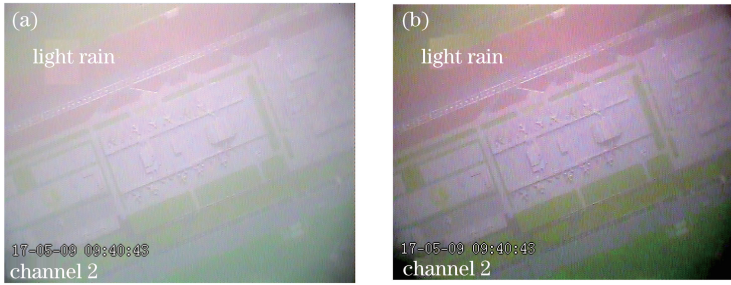


图 9 小雨条件下目标(a)可见光图像和(b)增强图像

Fig. 9 (a) Visible light image and (b) enhanced image of target in light rain

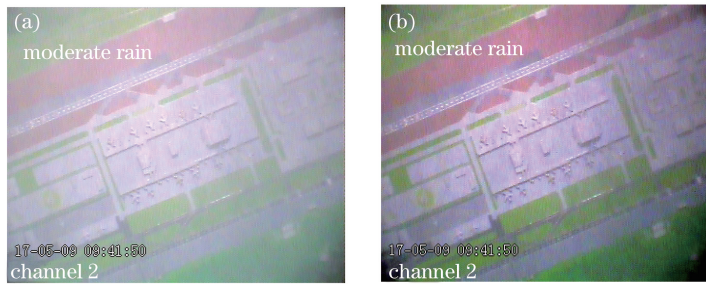


图 10 中雨条件下目标(a)可见光图像和(b)增强图像

Fig. 10 (a) Visible light image and (b) enhanced image of target in moderate rain

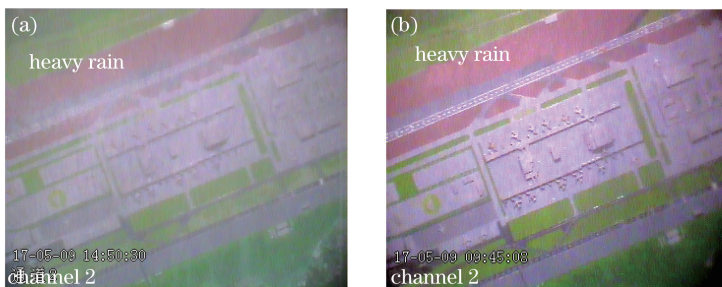


图 11 (a)大雨条件下目标(b)可见光图像和增强图像

Fig. 11 (a) Visible light image and (b) enhanced image of target in heavy rain

利用暗通道法进行图像增强处理,采用了改进型的软抠图插值算法,具体如下:1)基于原图像,取 $(R,G,B)$ 三个通道中的最小值获取暗通道图,从暗通道图中按照亮度的大小提取最亮的前0.1%像素,并记录像素位置;2)在原始有雾图像 $I$ 中寻找对应位置上的具有最高亮度的点的值,并以此作为 $A$ 值,然后对原图像进行归一化,设置窗口大小为7(经过仿真实验,去雨雾过程中的经验值窗口数选择7效果较好),令(3)式中 $\omega=0.95$ 、 $t_0=0.1$ ,然后求透过率 $t$ ,利用(4)式增强窗口图像。

需要注意的是,实际透过率 $t$ 近似为连续曲线,但由于暗通道法假设窗口内透过率 $t$ 相同使得其变成离

散有突变的曲线,进而产生图像块效应。采用软抠图、导向滤波等方法可使透过率  $t$  重新变成连续平滑的曲线。采用 Matlab 中的 Smooth 命令以及移动平均法对透过率  $t$  曲线进行平滑处理,最后输出整个去雨雾图像,即可有效地解决图像块效应。编写 Matlab 程序,基于暗通道法分别对轻雾、中雾和浓雾,小雨、中雨和大雨条件下目标的可见光图像进行去雨雾图像增强处理,效果分别如图 6~11 中的(b)所示。

## 5 讨 论

对于图像质量增强后效果的讨论,应该有主观和客观两种评价,主观评价是以人作为观察者,客观评价是通过计算图像质量评价指标进行定量评价。

从主观评价上来看,图 6~11 中的(b)轻雾、中雾、浓雾和小雨、中雨、大雨条件下的增强图像具有非常明显的图像增强效果,相比于轻雾、中雾、浓雾和小雨、中雨、大雨条件下的图像更接近于原图像,增大了图像的对比度,但是相比于晴天条件下的目标可见光图像依然有较大的差距,其中部分局部信息仍然不能辨识,如浓雾条件下,即便是经过了图像增强,目标图像中的飞机模型仍然无法分辨。

从客观评价上来看,选择均方误差和峰值信噪比作为指标客观地表征数字图像质量。将晴天目标图像(图 5)作为基准图像,分别计算轻雾、中雾、浓雾和小雨、中雨、大雨条件下以及增强后图像的 MSE 和 PNSR,表达式分别为

$$E_{\text{MSE}} = \frac{1}{mn} \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n [I(i,j) - K(i,j)]^2, \quad (5)$$

$$R_{\text{PNSR}} = 10 \lg \left( \frac{255^2}{E_{\text{MSE}}} \right), \quad (6)$$

式中  $K(i,j)$  为基准图像,即晴天目标图像; $I(i,j)$  分别为轻雾、中雾、浓雾和小雨、中雨、大雨条件下以及其增强后图像; $i,j$  为图像的行列变量; $m,n$  为图像的行数和列数;MSE 无量纲;PNSR 的单位为 dB。

根据(5)式和(6)式计算出轻雾、中雾、浓雾和小雨、中雨、大雨条件下以及其增强后图像的 MSE 和 PNSR,结果如表 1 所示。

表 1 不同图像的 MSE 和 PNSR 的计算结果

Table 1 Calculated results of MSE and PNSR of different images

Rain and fog level	Rain and fog image		Enhanced image	
	MSE	PNSR /dB	MSE	PNSR /dB
Mist	245.78	24.23	46.84	31.42
Fog	300.66	23.35	152.43	26.30
Dense fog	323.23	23.03	171.26	25.79
Light rain	375.48	22.38	202.42	25.07
Moderate rain	379.28	22.34	204.12	25.03
Heavy rain	383.07	22.29	222.01	24.66

从表 1 结果来看,在轻雾、中雾、浓雾和小雨、中雨、大雨条件下,随着雨雾等级的提高,雨雾图像以及增强后图像的 MSE 逐渐增加,分别由 245.78 和 46.84 增加到 383.07 和 222.01;PNSR 逐渐减小,分别由 24.23 和 31.42 下降到 22.29 和 24.66,表明图像质量随着雨雾等级的提高而下降,图像增强后仍然存在此现象。从雨雾图像与增强后图像的 MSE 和 PNSR 可以看出,增强后图像的 MSE 明显减小,PNSR 显著增大,图像质量显著改善,因而可以采用 MSE 和 PNSR 两个客观评价指标进行图像质量的判断。

## 6 结 论

为进一步提高雨雾条件下图像的质量,可以从以下几个方面开展工作:1) 改进暗通道理论,增强目标可见光图像,使增强后的图像更接近于晴朗天气条件下的目标可见光图像;2) 通过目标场景成像退化机理分析环境影响因素,建立各环境条件对成像退化的影响模型,定量表征各环境条件引起图像质量退化的程度;3) 构建图像质量评价体系,基于仿真图像完成图像质量参数的提取,并利用主成分分析方法实现图像质量参数的优选。

## 参 考 文 献

- [1] Sui Qisheng, Shi Zelin, Rao Ruizhong. Battlefield simulation technology of optical guided missile [M]. Beijing: National Defence Industry Press, 2016: 2-10.  
隋起胜, 史泽林, 饶瑞中. 光学制导弹战场环境仿真技术 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2016: 2-10.
- [2] Wang Ying. Virtual simulation technology on missiles homing phase [D]. Changchun: Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, 2014: 68-74.  
王莹. 图像末制导仿真技术的研究 [D]. 长春: 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 2014: 68-74.
- [3] Sun Shijie, Zhao Huaici, Hao Mingguo. The study on image transmission channel model of air-to-surface missile based on image terminal guidance [J]. Journal of Projectiles, Rockets, Missiles and Guidance, 2013, 33(1): 13-16.  
孙士洁, 赵怀慈, 郝明国. 图像末制导空对面导弹图像传输信道模型研究 [J]. 弹箭与制导学报, 2013, 33(1): 13-16.
- [4] Liu Zeqian. Research and application of precision strike simulation of TV guided missile weapon system [D]. Changchun: Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, 2006: 7-11.  
刘泽乾. 电视制导弹武器系统精确打击仿真研究及应用 [D]. 长春: 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 2006: 7-11.
- [5] Li Cheng, Li Jianxun, Tong Zhongxiang, *et al.* Research on partial image recognition and tracking in infrared imaging terminal guidance [J]. Acta Armamentarii, 2015, 36(7): 1213-1221.  
李成, 李建勋, 童中翔, 等. 红外成像制导末端局部图像识别跟踪研究 [J]. 兵工学报, 2015, 36(7): 1213-1221.
- [6] Ding Yang. Research of air-ground visible image-guidance-tracking [D]. Changchun: Changchun University of Science and Technology, 2014: 18-25.  
丁洋. 空对地可见光图像制导跟踪算法研究 [D]. 长春: 长春理工大学, 2014: 18-25.
- [7] Yang Jie. Image guidance technology and experimentation research [D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2011: 11-16.  
杨杰. 图像制导技术及实验研究 [D]. 南京: 南京航空航天大学, 2011: 11-16.
- [8] Rao R Z. Equivalence of MTF of a turbid medium and radiative transfer field [J]. Chinese Optics Letters, 2012, 10(2): 020101.
- [9] Su Juan, Li Bing, Wang Yanzhao. Infrared image enhancement based on PCNN segmentation and fuzzy set theory [J]. Acta Optica Sinica, 2016, 36(9): 0910001.  
苏娟, 李冰, 王延钊. 结合 PCNN 分割和模糊集理论的红外图像增强 [J]. 光学学报, 2016, 36(9): 0910001.
- [10] Wu Yiquan, Shi Junpeng. Image enhancement in non-subsampled contourlet transform domain based on multi-scale retinex [J]. Acta Optica Sinica, 2015, 35(3): 0310002.  
吴一全, 史骏鹏. 基于多尺度 Retinex 的非下采样 Contourlet 域图像增强 [J]. 光学学报, 2015, 35(3): 0310002.
- [11] Wang Zhishe, Yang Fengbao, Chen Lei, *et al.* SAR and visible image enhanced fusion based on texture segmentation and Top-Hat transformation [J]. Acta Optica Sinica, 2014, 34(10): 1010002.  
王志社, 杨风暴, 陈磊, 等. 基于纹理分割和 Top-Hat 变换的合成孔径雷达与可见光图像增强融合 [J]. 光学学报, 2014, 34(10): 1010002.
- [12] He K M, Sun J, Tang X O. Single image haze removal using dark channel prior [J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2011, 33(12): 2341-53.
- [13] Zhang J, Dong W, Li J, *et al.* Haze removal for a single image using adaptive template dark channel prior [C]. Applied Mechanics and Materials, 2014, 543: 2480-2483.
- [14] Ling Z G, Fan G L, Gong J W, *et al.* Perception oriented transmission estimation for high quality image dehazing [J]. Neurocomputing, 2017, 224: 82-95.
- [15] Geethu H, Shamna S, Kizhakkethottam J J. Weighted guided image filtering and haze removal in single image [J]. Procedia Technology, 2016, 24: 1475-1482.
- [16] Gu Z F, Ju M Y, Zhang D Y, *et al.* A single image dehazing method using average saturation prior [J]. Mathematical Problems in Engineering, 2017: 6851301.