

文章编号:1001-5078(2018)01-0061-07

· 红外技术及应用 ·

云雨天气情况下红外探测系统应用策略研究

李志伟

(空军工程大学航空机务士官学校,河南 信阳 464000)

摘要:针对目前用于地面或低空目标成像与识别的 $8 \sim 14 \mu\text{m}$ 波段红外探测系统云雨天气情况下的应用问题,以实验所在的地理位置为参照点,采用PcModWin大气仿真软件进行了晴朗大气、云雨天气环境下的模拟实验,分析了不同条件下一定距离范围内红外辐射透过率分布曲线和峰值参数的变化规律,参考比对红外系统拍摄的目标实物图像,证明了探测角度、大气能见度、降雨强度、云层类型等,都是影响该波段红外探测系统应用效果的主要因素,提出了工程应用中应当采取的策略方法。应用实践证明,该研究结论不但具有普遍的工程意义,而且对该波段红外武器系统的作战运用也具有重要的指导作用。

关键词:红外探测;云雨天气;红外透过率;天顶角;能见度

中图分类号:TN215 **文献标识码:**A **DOI:**10.3969/j.issn.1001-5078.2018.01.011

Research on application strategy of infrared detection system in cloud and rainy weather

LI Zhi-wei

(Aviation Maintenance School for Non-Commissioned Officer, Air Force Engineering University, Xinyang 464000, China)

Abstract: Aiming at the application of the $8 \sim 12 \mu\text{m}$ band infrared detection system used for the ground or low altitude target imaging and identifying in cloud and rainy weather, taking the experiment location as the reference point, the simulated experiments are carried out for the environment of clearness atmosphere and cloud rainy weather by Pc-ModWin atmospheric simulation software. The distribution curves of infrared radiation transmittance and the variation law of peak parameters in a certain distance range under different conditions are analyzed. Compared with the real infrared target image, it is proved that some parameters are the main factors affecting the application effect of infrared detection system in this band, such as the detection angle, atmospheric visibility, rainfall intensity, cloud type, etc., and the strategy methods are put forward which should be taken in engineering application. Application results show that the conclusion of the research has general engineering significance, and plays an important role in the war application of the infrared weapon system in this band.

Key words: infrared detection; cloud and rainy weather; infrared transmittance; zenith angle; visibility

1 引言

随着红外技术的迅速发展,用于目标成像与探测识别的红外系统在工业、医疗、军事等各个领域都得到了广泛应用。由于红外系统采集的信号来自于目标发出的红外光,而红外光在大气传输过程中,受大气分子组成、大气结构,以及云、雾、雨、雪等复杂气象

环境的影响^[1-2],能量将产生衰减,导致一定距离范围内红外透过率的降低^[3],从而影响红外系统对目标的成像及探测识别效果^[4]。正常大气环境下,其主要影响因素有大气分子、气溶胶等,而在云雨天气,除了这些因素之外,还有云层类型、云层厚度、大气能见度、降雨强度等^[5]。针对不同气象环境对红外辐射影

作者简介:李志伟(1964-),男,学士,副教授,主要研究方向为光电技术及其在航空武器装备中的应用。E-mail: xylzw@sohu.com。

收稿日期:2017-05-18

响的理论研究,已有相关的研究文献^[6-7]。然而在特定的气象环境下,如何采取相应的策略方法,提高目标探测识别效果,是本课题研究的重点,这在工程上不但具有普遍意义,而且具有重要的军事价值。

由于气象环境对红外系统的影响比较复杂,本文主要针对云雨天气情况下 $8 \sim 14 \mu\text{m}$ 红外系统的应用问题,通过模拟仿真、实验测试等方法,研究该波段红外透过率的分布规律,提出了有效提高红外探测系统成像及识别效果的应用策略。

2 模拟环境的构建

2.1 模拟仿真软件

大气环境对红外系统的影响比较复杂,很难用统一的模式进行研究。然而不管是哪种气象环境,其对红外系统目标探测效果的影响,归根结底都是对红外大气透过率的影响。因此建立一定的大气模拟环境,通过对红外透过率的分析研究,是问题解决的有效途径之一。

对于红外透过率的计算和分析,目前常用的方法是通过模拟仿真来进行,主要应用软件有 LOWTRAN、MODTRAN、FASCODE、PcModWin 等^[8],其中 PcModWin 是一款基于 Windows 的比较成熟的软件,它可以直接采用 MODTRAN 提供的大气代码,或通过用户界面设置不同的气象条件、地理位置、传输距离等,计算从微波到可见光波段任意大气路径上的光谱透过率或辐射率。本研究采用 PcModWin 3.7 大气仿真软件进行模拟实验。

2.2 主要参数设置

由于不同的地理位置、季节、大气路径等都对红外光的传输具有一定的影响,因此在应用 PcModWin 大气仿真软件时要设置正确的参数。自然环境下的实验测试地点位于河南省信阳市(东经 $114^{\circ}01' \sim 114^{\circ}06'$,北纬 $31^{\circ}46' \sim 31^{\circ}52'$)五星乡(海拔高度为 68 m),为了便于比对分析,仿真系统仍然以该地理位置为参照点,进行相应的模拟参数设置。

目前,不论是军用还是民用,用于地面或低空目标红外成像与识别的工作波段通常在 $8 \sim 14 \mu\text{m}$ 范围内,因此系统仿真选取该波段进行研究,同时,为便于分析比对,天顶角选取 80° 和 47° 二种,大气能见度选取 23 km 和 5 km 二种。

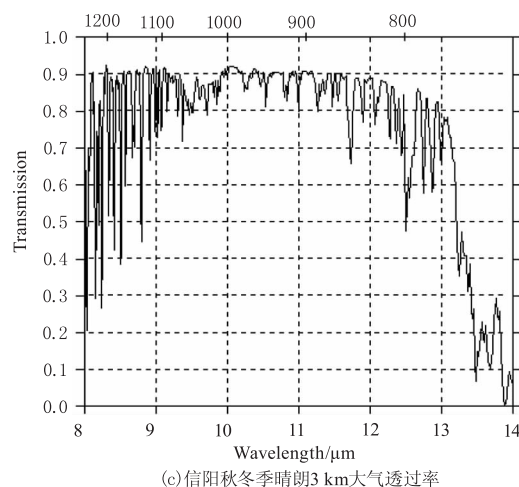
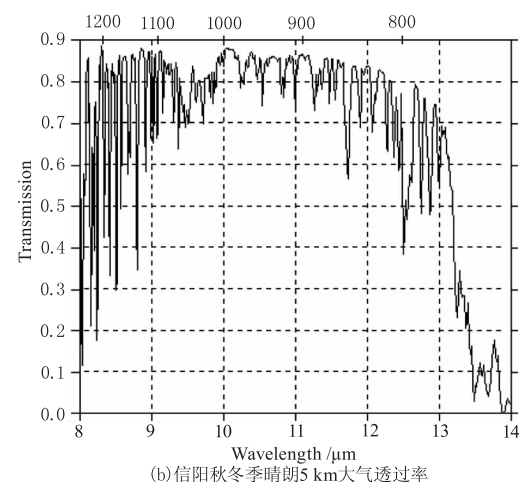
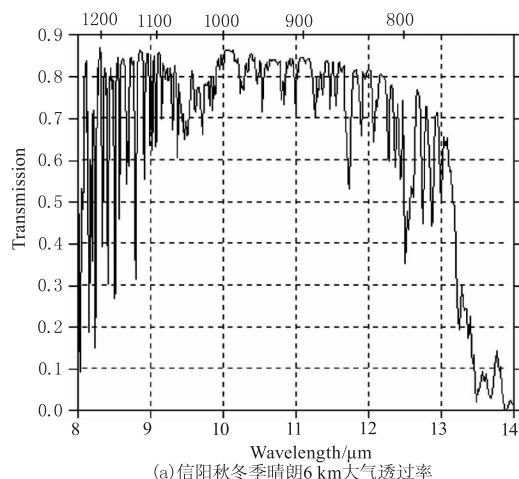
3 晴朗大气环境下红外探测应用分析

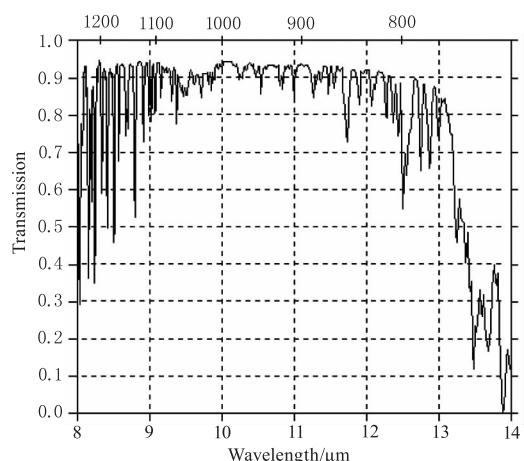
作为云雨天气情况下仿真实验分析的参考,首先需要了解分子组成相对稳定的晴朗大气环境下,不同探测方法对红外透过率的影响。

3.1 仿真实验

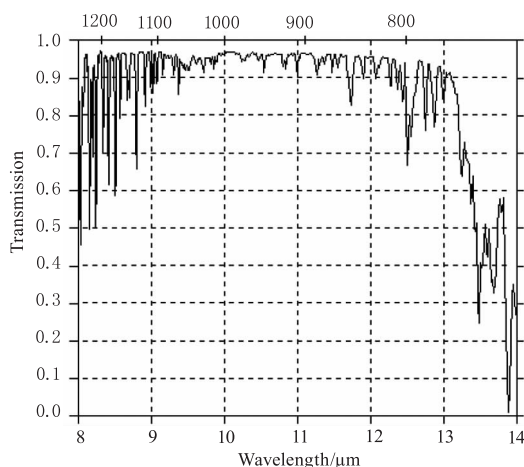
根据实验所处的地理位置和研究目的,采用 PcModWin 软件进行仿真实验时,设置的主要参数

为:模式大气选择“中纬度冬天,北纬 45° ,1月”;大气路径类型选择“倾斜路径”;气溶胶模式采用“乡村—能见度 = 23 km”;季节选择“秋冬季节”;无云无雨,地面海拔高度设置为 0.068 km,观察者海拔高度设为 0.1 km,红外波段范围设置为 $8 \sim 14 \mu\text{m}$,天顶角设置为 80° ,当观察者与目标之间的几何距离分别设置为 6 km、5 km、3 km、2 km、1 km、0.5 km 时,根据仿真实验结果,相应距离范围内红外透过率的分布曲线如图 1 所示。

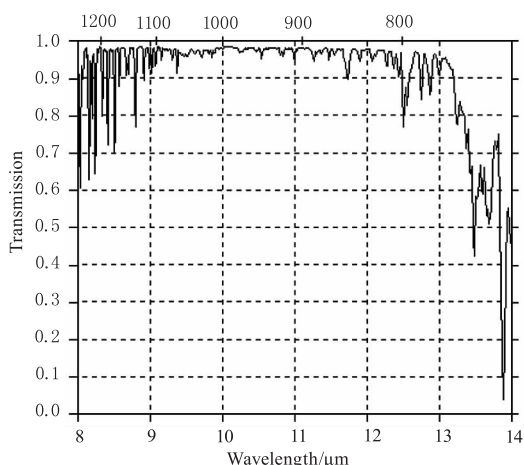




(d) 信阳秋冬季晴朗2 km大气透过率



(e) 信阳秋冬季晴朗1 km大气透过率



(f) 信阳秋冬季晴朗0.5 km大气透过率

图1 晴朗大气环境下不同距离范围内

8 ~ 14 μm 红外透过率分布曲线(信阳秋冬季, 能见度 23 km, 天顶角 80°)Fig. 1 Distribution curves of 8 ~ 14 μm infrared transmittance at different distances in the clearness atmosphere environment(Xinyang fall-winter, visibility 23 km, zenith angle 80°)

图1中, 纵坐标为红外透过率, 横坐标下部标识为波长(单位: μm), 上部标识为相应的波数(Wave

Number)。

按照同样的仿真实验方法, 对于同样距离范围内的目标, 分别测试能见度为 23 km、5 km, 天顶角为 80° 、 47° 时 8 ~ 14 μm 红外透过率分布曲线, 并对其峰值进行统计, 结果如表1所示。

表1 晴朗大气环境下不同距离范围内

8 ~ 14 μm 红外透过率峰值统计表Tab. 1 Peak statistical table of 8 ~ 14 μm infrared transmittance at different distances in the clearness atmosphere environment

目标距离	能见度 23 km, 天顶角 80°	能见度 23 km, 天顶角 47°	能见度 5 km, 天顶角 47°	能见度 5 km, 天顶角 80°
6 km	87%	93%	84%	70%
5 km	88%	94%	85%	72%
3 km	92%	95%	86%	81%
2 km	94%	96%	87%	87%
1 km	96%	97%	92%	92%
0.5 km	98%	98%	96%	96%

3.2 应用测试

为了进一步分析比对, 在上述仿真实验选取的同一地理位置, 采用 8 ~ 14 μm 波段的红外相机(型号: Tau)对同一目标景物, 在能见度较好的二种天气情况下进行了现场拍摄, 图2和图3分别是2016年2月25日15时12分(晴天, 能见度好)和2016年3月8日9时00分(大雨后阴天, 微风, 能见度好)拍摄的0.05 ~ 1 km处的目标红外图像。



图2 晴天0.05 ~ 1 km处的目标红外图像

Fig. 2 Target infrared image at 0.05 ~ 1 km in sunny day

3.3 实验分析

分析表1中的峰值数据可以看出, 在晴朗大气环境下, 影响 8 ~ 14 μm 波段红外透过率的主要因素有: 观察目标的天顶角、大气能见度、目标距离等。



图3 大雨后阴天0.05~1 km处的目标红外图像

Fig. 3 Target infrared image at 0.05 ~ 1 km in cloudy day after rain

(1) 天顶角的影响

对于同样能见度(如 $VS = 23$ km)的天气条件,观察同一距离范围内的目标,在较大天顶角方向上的红外透过率相对较小,也就是说,天顶角越大,红外透过率越小,但这种差别在能见度较好的晴朗大气中距离较近的范围内表现不是太明显。由于在地表附近水平方向上,水蒸气、气溶胶等物质的含量较高,对红外光的吸收和散射作用相对较强,而在垂直方向上大气中微粒的含量随着高度的增加而减少,对红外光的吸收和散射作用也逐渐减小,该实验结果与晴朗大气分子分布对红外传播影响的规律完全相符。

(2) 能见度的影响

对于同样的天顶角,在能见度分别为 23 km 和 5 km 的天气情况下,比较相同距离范围内 8 ~ 14 μm 红外辐射的透过率,可以看出,前者明显高于后者,说明能见度越高,红外透过率越高。当能见度为 23 km 时,对于同样为 47° 的天顶角,在 6 km 和 0.5 km 的目标距离范围内,8 ~ 14 μm 红外透过率的峰值分别可达 93% 和 98%,而且从相应的曲线图中也可以看出,大部分波段的红外透过率也都可以达到 90% 和 95% 以上,观察同样能见度下拍摄的实物图像(如图 2 所示),拍摄效果非常理想。

观察雨后拍摄的图像,如图 3 所示,尽管拍摄环境是阴天,能见度不及晴天,但由于大雨过后空气中气溶胶等杂质的含量较少,空气质量较好,且地表附近没有云层,因此拍摄图像的效果也比较理想。但仔细比较这两幅图像就会发现,对于同样的目标,由于阴天相对于晴天来说能见度仍然偏低,因此图 3 拍摄的远方目标图像就显得有些模糊,与表 1 中红外透过率分布规律反映的结果

完全一致。

(3) 探测距离的影响

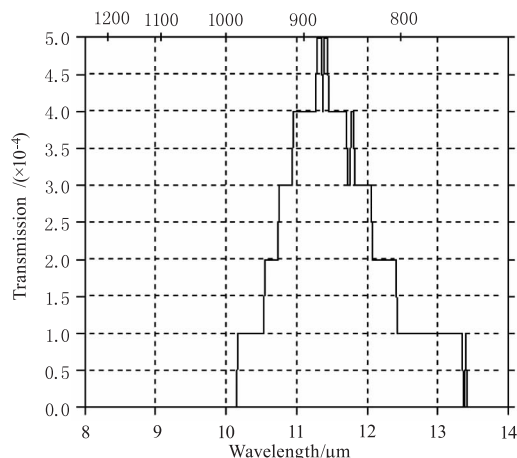
分析表 1 中的数据可以发现,不管是哪种情况,红外透过率几乎都与目标距离成线性关系。说明在同样气象环境下,距离越近,红外透过率越高,红外探测系统对目标的探测效果就越好。

4 云雨天气红外探测应用分析

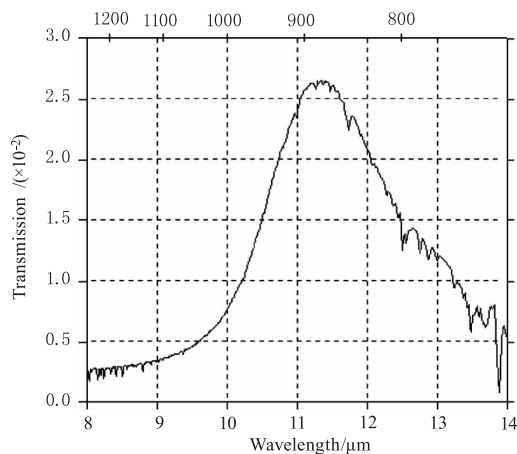
4.1 仿真实验

仍然采用上述仿真实验方法,气溶胶模式采用“乡下一能见度 = 5 km”,季节选择“春夏”,天气状况为降雨量每小时 5 mm 的小雨、乱云天气。设观察者位置高度仍为海拔 0.1 km,目标与观察者之间的几何距离为 6 km,天顶角为 80° ,测试红外波段范围为 8 ~ 14 μm ,通过模拟仿真软件计算红外透过率,在图像中无分布曲线出现,说明该条件下红外系统探测不到目标信号。

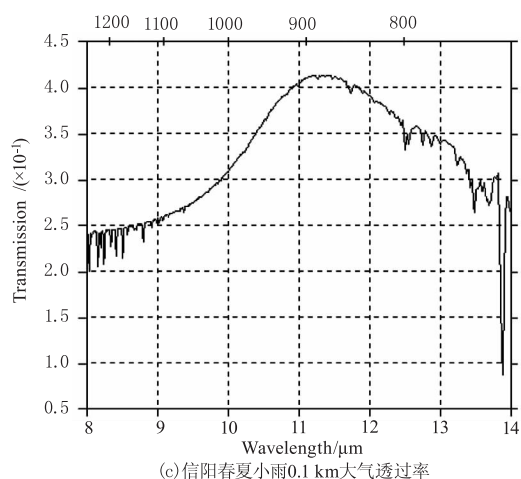
逐渐缩短探测距离,当达到 0.5 km 时才发现有微弱的红外信号出现。分别设定目标距离为 0.5 km、0.3 km、0.1 km、0.05 km,则其相应红外透过率分布曲线如图 4 所示。



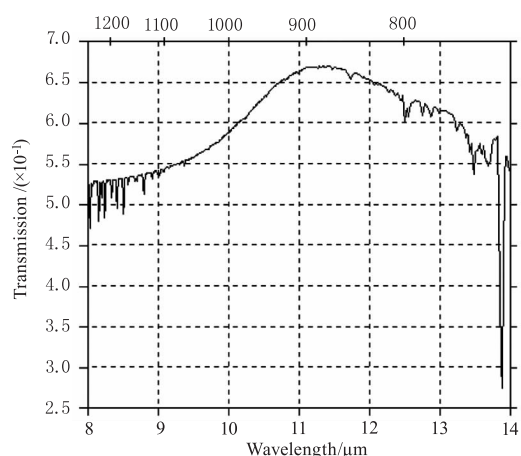
(a) 信阳春夏小雨0.5 km大气透过率



(b) 信阳春夏小雨0.3 km大气透过率



(c) 信阳春夏小雨0.1 km大气透过率



(d) 信阳春夏小雨0.05 km大气透过率

图4 云雨天气环境下不同距离范围内
8 ~ 14 μm 红外透过率分布曲线
(信阳春夏季节, 能见度 5 km, 天顶角 80° , 5 mm/h 小雨、乱云)

Fig. 4 Distribution curves of 8 - 14 μm infrared
transmittance at different distances in the cloud
and rainy weather environment

(Xinyang spring-summer, visibility 5 km, zenith angle 80° ,
5 mm/h light rain, nimbostratus)

按照同样的方法进行仿真实验, 对于同样距离范围内的目标, 分别设定能见度为 23 km、5 km, 天顶角为 80° 、 47° , 测试不同降雨量和云层类型条件下 8 ~ 14 μm 红外透过率分布曲线, 并对其峰值进行统计, 结果如表 2 所示。

4.2 应用测试

图 5 和图 6 是在与仿真实验设定的地理参数相同的河南信阳拍摄的两幅红外图像, 时间及条件分别是: 2016 年 9 月 28 日 9 时 15 分, 小雨、薄层积云; 2016 年 4 月 5 日 15 时 19 分, 大雨、厚层乱云。仍然采用 8 ~ 14 μm 波段的 Tau 型红外相机, 目标距离约 0.05 ~ 1 km。

表 2 云雨天气环境下不同距离范围内
8 ~ 14 μm 红外透过率峰值统计表

Tab. 2 Peak statistical table of 8 ~ 14 μm infrared
transmittance at different distances in the cloud
and rainy weather environment

目标 距离	能见度 5 km, 天 顶角 80° , 2mm/h 毛毛雨、 层云	能见度 5 km, 天 顶角 80° , 5mm/h 小雨、 乱云	能见度 5 km, 天 顶角 47° , 5mm/h 小雨、 乱云	能见度 5 km, 天 顶角 80° , 25mm/h 大雨、 积云	能见度 23 km, 天 顶角 80° , 25mm/h 大雨、 积云	能见度 23 km, 天 顶角 80° , 75mm/h 暴雨、 积云
6 km	0%	0%	0%	0%	0%	0%
0.5 km	72%	0.05%	0%	25%	26%	6.5%
0.3 km	82%	2.7%	0.03%	43%	44%	19%
0.1 km	94%	41%	26%	75%	77%	58%
0.05 km	96%	67%	59%	86%	87%	76%



图5 小雨、薄积云天气情况下
0.05 ~ 1 km 处的目标红外图像

Fig. 5 Target infrared image at 0.05 ~ 1 km in light rain
and light cumulus cloud weather

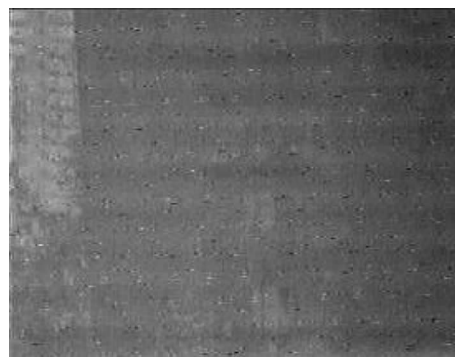


图6 大雨、厚层乱云天气情况下 0.05 ~ 1 km 处的
目标红外图像

Fig. 6 Target infrared image at 0.05 ~ 1 km in heavy rain
and heavy nimbostratus weather

4.3 实验分析

根据上述仿真与测试实验, 并对表 2 的统计数

据进行分析,可以发现在云雨天气情况下,影响8~14 μm 红外透过率的因素主要有天顶角、大气能见度、降雨强度和云层类型等。

(1) 天顶角的影响

对于同样能见度为5 km,降雨量为5 mm/h的小雨、乱云天气,同样距离范围内,天顶角为80°时的红外透过率明显高于天顶角为47°时的红外透过率,即水平方向上的红外透过率高于垂直方向上的红外透过率。这与晴朗大气中水平、垂直方向红外透过率的分布规律不相一致,说明在降雨天气,雨水在垂直降落路径上对红外的吸收和散射作用比水平方向上的要强,雨水对红外的影响远远超过大气中气溶胶等其他粒子的影响。

(2) 大气能见度的影响

在天顶角为80°,降雨量为25 mm/h的大雨、积云天气情况下,同样距离范围内23 km能见度和5 km能见度对红外透过率的影响仅相差1%左右。通过对测试数据的进一步分析,并与晴朗大气环境下能见度对红外透过率影响的规律进行比较,可知在降雨天气,随着降雨量的增加,能见度对红外透过率的影响越来越小。

进一步实验表明,在大到暴雨天气情况下,大气能见度对8~14 μm 波段红外透过率的影响已基本可以忽略。

(3) 降雨强度的影响

对于同样能见度为23 km的积云天气,若天顶角为80°,比较降雨量为25 mm/h大雨和75 mm/h暴雨时同样距离范围内的红外透过率,可以发现前者明显高于后者。说明在其他条件相同的情况下,对于大到暴雨的天气,降雨强度越大,红外透过率越小。

实际上,在降雨天气,降雨强度越大,水滴的直径及大气中水滴的密度就越大,其覆盖的空间截面就越大,对红外光的吸收和散射作用就越明显,势必大大降低红外光线的透过率。

(4) 云层类型的影响

当能见度为5 km、天顶角为80°时,比较“2 mm/h 毛毛细雨、层云”和“5 mm/h 小雨、乱云”天气情况下同样距离范围内的红外透过率,发现前者远远大于后者。二者降雨量虽有差别,但不是太大,都属于小降雨量天气,说明引起红外透过率巨大差别的主要原因是云层类型,其中乱云影响较大,层云影

响较小。

再对“5 mm/h 小雨、乱云”和“25 mm/h 大雨、积云”天气情况下同样距离范围内的红外透过率进行比较,如果按照降雨量对红外透过率影响的规律,应该是后者小于前者,然而事实却相反,说明在降雨量较小的天气,稀疏细小的雨滴对红外透过率的影响已不是主要因素,而是云层类型。进一步实验证明,乱云影响较大,积云和层云影响较小。

从图5和图6拍摄的实况天气目标图像也可以看出,降雨量越大、云层越厚,对目标红外探测的影响越严重,拍摄到的图像越模糊,甚至无法对目标进行辨识,与仿真实验结果一致。

由此可见,具有较小降雨量的层云天气,对8~14 μm 波段红外透过率没有太大影响,而云层较厚的乱云天气,以及大到暴雨的天气影响则比较严重。

5 结 论

根据研究结果,当采用8~14 μm 波段的红外探测系统对地面或低空目标成像与探测识别时,如下建议可作为云雨天气情况下应用策略的参考。

(1) 探测角度的选择

由于不同气象环境下,不同方向的红外透过率会出现一定的差异,因此建议根据气象环境选择合适的探测角度。晴朗天气,垂直方向的红外透过率相对较高,应当尽量选择较小的天顶角;而云雨天气,水平方向的红外透过率相对较高,应当尽量选择较大的天顶角。

(2) 阴天或小雨天气情况下的应用

阴天或有较小降雨量的天气,大气能见度是影响红外透过率的其中一个主要因素,且能见度越高,红外透过率越高,反之越小。较低能见度将会严重影响红外系统对目标的成像与探测识别效果,此时应当尽量避免使用该波段的红外系统。此外,这类天气情况下,还应当考虑云层类型对红外透过率的影响。

(3) 强降雨天气情况下的应用

大到暴雨天气,能见度对红外透过率的影响相对较小,可以不予考虑,而降雨强度则是影响的主要因素,且降雨强度越大,红外透过率越小,二者成反比关系,这种天气情况下应当慎用或尽量不用该波段的红外系统。

(4) 不同云层类型情况下的应用

一般天气或具有较小降雨天气情况下的层云,对红外透过率的影响不是太大,而乱云则对该波段红外透过率具有较大的影响,且云层越厚影响越大,此时应当慎用或不用该波段的红外探测系统。

由于降雪天气与降雨天气对红外系统的影响基本类似,因此上述策略同样适用于降雪天气情况下该波段红外探测系统的应用。

参考文献:

- [1] GE Mingfeng, QI Hongxing, WANG Yikun, et al. Performance of visible and infrared imaging system during haze-fog episodes[J]. Science Technology and Engineering, 2015, 15(13): 82–86. (in Chinese)
葛明锋, 仝洪兴, 王义坤, 等. 雾霾天气下可见光与红外成像系统性能研究[J]. 科学技术与工程, 2015, 15(13): 82–86.
- [2] ZHANG Yining, ZHANG Haochun, MA Rui, et al. Evaluation of infrared thermal in different cloud imaging system detection distance and rain conditions[J]. Journal of Applied Optics, 2016, 37(2): 288–296. (in Chinese)
张亦宁, 张昊春, 马锐, 等. 不同云雨条件下红外热成像系统作用距离评估[J]. 应用光学, 2016, 37(2): 288–296.
- [3] ZHANG Fang, QI Linlin, GE Jie, et al. Effect of typical-aerosol and visibility on the mid-and Far-Infrared light-wave transmission in the standard atmosphere[J]. Infrared Technology, 2016, 38(12): 1047–1051. (in Chinese)
张芳, 齐琳琳, 葛杰, 等. 气溶胶及能见度变化对标准大气中远红外传输的影响[J]. 红外技术, 2016, 38(12): 1047–1051.
- [4] FENG Yunsong, JIN Wei, LU Yuan, et al. Operating range analysis of infrared detection system to a stealth aircraft[J]. Fire Control & Command Control, 2014, 39(1): 153–156. (in Chinese)
冯云松, 金伟, 路远, 等. 红外探测系统对某型隐身飞机的作用距离分析[J]. 火力与指挥控制, 2014, 39(1): 153–156.
- [5] FANG Yiqiang, CHEN Wei, SUN Xiaojun, et al. Effects of cloud on air target IR detection[J]. Infrared and Laser Engineering, 2015, 44(7): 2034–2038. (in Chinese)
方义强, 陈卫, 孙晓军, 等. 云对空中目标红外探测的影响[J]. 红外与激光工程, 2015, 44(7): 2034–2038.
- [6] RAO Ruizhong. Modern Atmosphere Optics [M]. Beijing: Science Press, 2015: 68–234. (in Chinese)
饶瑞中. 现代大气光学[M]. 北京: 科学出版社, 2015: 68–234.
- [7] LIU Xinming, ZHOU Haiyuan, WANG Qianxue, et al. Design of infrared detection system based on radiation characteristics[J]. Laser & Infrared, 2016, 46(12): 1521–1525. (in Chinese)
刘新明, 周海渊, 王前学, 等. 红外系统辐射特性探测功能设计[J]. 激光与红外, 2016, 46(12): 1521–1525.
- [8] CHEN Fangfang, GENG Rui, LV Yong. Effect of ground altitude on laser atmospheric transmittance[J]. Journal of Beijing Information Science & Technology University, 2016, 31(2): 80–83. (in Chinese)
陈芳芳, 耿蕊, 吕勇. 地表海拔高度对激光大气透过率影响的研究[J]. 北京信息科技大学学报, 2016, 31(2): 80–83.