

背景杂波对红外偏振成像系统作用距离的影响

梁建安¹, 赵万里², 王霞^{1,2}, 贺思¹, 金伟其¹

- (1. 北京理工大学光电成像技术与系统教育部重点实验室, 北京 100081;
2. 光电信息控制和安全技术重点实验室, 河北三河 065201)

摘要: 基于红外成像系统作用距离估算最小可分辨温差(MRTD)方法建立了红外偏振成像系统作用距离模型, 分析了背景杂波影响下红外偏振成像系统作用距离。通过仿真发现, 红外偏振成像系统作用距离是由目标/背景红外偏振特性、大气传输过程和观察方式等众多因素共同决定的, 背景杂乱程度大幅影响红外偏振成像系统作用距离, 偏振成像模式与强度成像模式依据应用条件的不同具有不同的优势。

关键词: 背景杂波; 作用距离; 红外偏振; MRTD 法

中图分类号: TN21 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201746.1004003

Effect of the background clutter on the operating range of infrared polarization imaging system

Liang Jian'an¹, Zhao Wanli², Wang Xia^{1,2}, He Si¹, Jin Weiqi¹

- (1. Key Laboratory of Photoelectronic Imaging Technology and System, Ministry of Education of China, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China;
2. Science and Technology on Electro-Optical Information Security Control Laboratory, Sanhe 065201, China)

Abstract: The operating range model of the infrared polarization imaging system was established based on the minimum resolvable temperature difference (MRTD) between the target and the background. The impact of the background clutter on the operating range was also analyzed. Simulation results show that the operating range is concurrently dependent on the target/background polarization characteristics, atmospheric transmission and the observation geometry. Among these factors, the background clutter greatly affects the operating range of infrared polarization imaging system. Besides, polarization imaging mode and intensity imaging mode may have different advantages compared with each other under different imaging conditions.

Key words: background clutter; operating range; infrared polarization; MRTD method

收稿日期: 2017-02-05; 修订日期: 2017-03-03

基金项目: 武器装备预研基金(9140A03031215BQ01031); 重点实验室基金(E12102841-20150120)

作者简介: 梁建安(1988-), 女, 博士, 主要从事红外偏振成像方面的研究。Email: liaotnh@163.com

通讯作者: 王霞(1972-), 女, 副教授, 博士生导师, 博士, 主要从事光电检测、光谱分析及微光与红外成像方面的研究。

Email: angelniuniu@bit.edu.cn

0 引言

作用距离是衡量成像系统性能的一个重要指标,也是成像系统实际应用能力的重要标志。光电成像系统的作用距离除受自身系统性能限制外,背景杂波、大气湍流等干扰因素的影响也不可忽视。红外偏振成像技术可以在一定程度上提高目标与背景的对比如,提高杂乱背景下成像系统的作用距离^[1]。目前对红外偏振成像系统作用距离模型的研究主要基于红外成像系统作用距离模型。针对点源目标,胡晓强^[2]等从信噪比的角度建立了偏振成像红外系统作用距离公式。针对扩展源目标,Edson Guimaraes^[3]通过修正系统的最小可分辨温差(Minimum Resolvable Temperature Difference, MRTD)建立了利用红外偏振成像技术的探测系统的最大探测与识别距离模型; Mehmet Yildirim^[4]、周程灏^[5]建立了基于目标-背景表观温差(Apparent Temperature Difference, ATD)的红外偏振成像系统目标探测距离模型;赵大鹏^[6]等通过建立偏振热成像系统的噪声等效温差从而得到偏振热成像系统的最小可分辨温差,并分析了偏振热成像系统的作用距离;夏润秋^[7]等通过计算针对 Stokes 矢量的 MRTD 得出海面环境中 Stokes 偏振成像系统的最大探测识别距离。这些模型均未考虑外界干扰因素的影响。文中将偏振信息的作用引入目标与背景的温差,参考对扩展源目标的红外偏振成像系统作用距离模型,重点分析背景杂波对单通道红外偏振成像系统作用距离的影响,将干扰因素引入红外偏振成像系统的性能分析。

1 红外偏振成像系统作用距离模型

1.1 红外偏振成像系统的表观温差

表观温差为目标和背景辐射在通过大气、偏振片以及光学系统等衰减后在探测器上呈现的等效黑体温度差。若已知目标和背景的 0 距离温度,根据普朗克公式可以得到目标和背景的 0 距离辐亮度 $L_{\text{target}}(0)$ 、 $L_{\text{bg}}(0)$ 。假设大气对红外辐射的衰减与传输路径长度相关,偏振片的检偏角为 ψ_p ,透过率为 τ_{pp} ,背景偏振角为 α_b ,背景偏振度为 p_b ,辐射路径长度(观测距离)为 l_d 时大气的透过率为 $\tau_{\text{atom}}(l_d)$,观测路径上的大气程辐射为 $L_{\text{atom}}(l_d)$,且已知目标的偏振度为 p_t ,

偏振角为 α_t ,经过偏振片滤波后,目标与背景的辐亮度分别为:

$$L_{\text{target}}'(l_d) = \tau_{pp} \{ \tau_{\text{atom}}(l_d) \cos^2(\psi_p - \alpha_t) L_{\text{target}}(0) p_t + 0.5 [\tau_{\text{atom}}(l_d) L_{\text{target}}(0) (1 - p_t) + L_{\text{atom}}(l_d)] \} \quad (1)$$

$$L_{\text{bg}}'(l_d) = \tau_{pp} \{ \tau_{\text{atom}}(l_d) \cos^2(\psi_p - \alpha_b) L_{\text{bg}}(0) p_b + 0.5 [\tau_{\text{atom}}(l_d) L_{\text{bg}}(0) (1 - p_b) + L_{\text{atom}}(l_d)] \} \quad (2)$$

根据辐亮度和温度之间的关系,通过插值的方法可以由目标和背景通过偏振片后的辐亮度值 $L_{\text{target}}'(l_d)$ 和 $L_{\text{bg}}'(l_d)$ 得到在一定波长范围内的相应温度值 $T_{\text{target}}'(l_d)$ 和 $T_{\text{bg}}'(l_d)$,则通过偏振片后探测器接收到的目标与背景的表现温差为:

$$\Delta T'(l_d) = T_{\text{target}}'(l_d) - T_{\text{bg}}'(l_d) \quad (3)$$

1.2 系统 MRTD 的修正

MRTD 表征了系统的温度分辨能力,是目标空间频率 f 的函数。由于 MRTD 是实验室参量,观察实际目标时须对函数 $\text{MRTD}(f)$ 进行修正。MRTD 测试通常使用四条带靶标,函数中的空间频率 f 为条带靶标中其中一组线对对应的空间频率,而此时靶标自身的空间频率为线对空间频率的 $1/N$, N 为条带数。结合 Johnson 准则^[8],目标等效为条带靶标后其张角可表示为 $\alpha_T = N_e/f$, N_e 为按 Johnson 准则所要求的目标等效条带数;而实际目标张角为 $\alpha_T' = l_c/l_d$, l_c 为目标二维等效空间尺度。由此对目标对应的空间频率数 f 进行修正,根据 $\alpha_T = \alpha_T'$,可将 $\text{MRTD}(f)$ 表示为:

$$\text{MRTD}(f) = \text{MRTD} \left(N_e \frac{l_d}{l_c} \right) \quad (4)$$

1.3 作用距离模型

单通道红外偏振成像系统由偏振片和热像仪组成,目标和背景的辐射经过大气传输以及偏振片衰减到达探测器,当目标和背景的表现温差仍大于该探测器对应频率的 MRTD 值时,目标可以被探测到;当表现温差等于探测器对应频率的 MRTD 值时,该频率对应的目标成像距离即为红外偏振成像系统的最远作用距离(公式(5))。同时需满足目标对系统的张角大于或等于探测所要求的最小视角(公式(6))。

$$\Delta T'(l_d) = \text{MRTD}_a \left(\frac{l_c \cdot f}{N_e} \right) \quad (5)$$

$$\frac{1}{2f} \leq \frac{\theta}{N_e} = \frac{h}{N_e l_d} \quad (6)$$

式中: f 为目标的空特征频率; h 为目标高度; N_e 为按 Johnson 准则所要求的目标等效条带数; $\Delta T'$ 为作用距离为 l_d 时目标与背景的表现温差,由公

式(1)~(3)得到;MRTD_a为根据目标张角修正后的 MRTD,由公式(4)得到。

2 背景杂波的影响

在实际场景中,背景中往往存在着与目标相似或干扰目标探测的杂波,是限制成像系统目标获取性能的一个重要因素。量化杂波的方法有很多,文中采用美国 NVESD (Night Vision and Electronic Sensors Directorate) 采用的 SV 杂波尺度:为了评价整体背景辐射起伏分布对成像系统现场性能的影响,Schmieder 和 weathersby^[9]将背景杂波广义地分为低、中、高三等级,分别对原 Johnson 准则进行修正。杂波只影响目标的探测,背景杂波修正后的 Johnson 探测准则如表1所示。

表 1 背景杂波修正后的 Johnson 探测准则

Tab.1 Johnson detection criterion after background clutter correction

Clutter level	Examples	N_e
Low clutter	There is little or no object in the field of view similar to the target	0.75
Moderate clutter	Object in the field of view is intermittently distributed	1.5
High clutter	Field of view has a large number of objects similar to the target	3

3 仿真与结果

根据上述红外偏振成像系统作用距离模型,对杂波影响下的红外偏振成像系统作用距离进行仿真分析。假设目标为坦克,背景为丛林,采用中波红外偏振成像系统,大气选择为中纬度夏季,忽略大气程辐射。为了研究目标偏振特性对系统性能的影响,文中仿真设置目标偏振度的范围为 0~10%。参数设定如表 2 所示。

表 2 参数设置

Tab.2 Parameter settings

Parameter name	Value of the parameter
Target	Temperature: 24 °C; p_t : 0~10%; α_t : 60°; Observation zenith angle: 80°
Background	Temperature: 20 °C; p_b : 0.5%; α_b : 0
System	F : 100 mm; Pixel size: 15 μm ; NETD: 20 mk; ψ_p : 90°; τ_{pp} : 0.9

3.1 表观温差仿真结果

目标和背景的表观温差与目标偏振特性、背景偏振特性、大气透过率、观测天底角(观察方向与垂直方向夹角)有关。首先不考虑目标偏振特性($p_t=0$),根据 Modtran 软件计算不同观测天底角大气在路径上的透过率,再计算目标和背景的表观温差(图 1)。表观温差随作用距离的增加呈下降趋势,观测天底角越大,表观温差下降越明显。此时表观温差主要受大气透过率的影响,与大气透过率变化趋势相同。

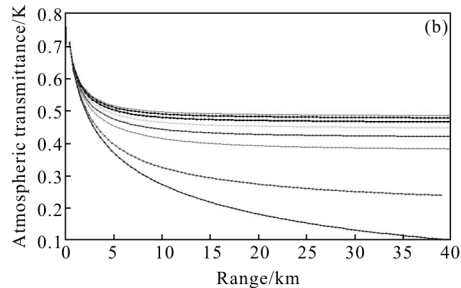
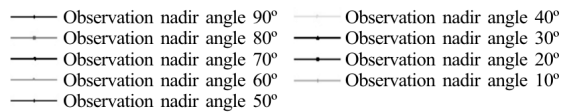
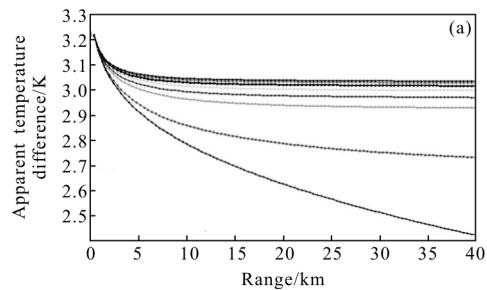
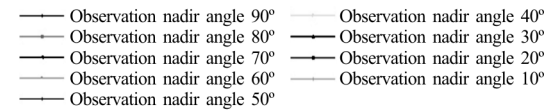


图 1 不同观测天底角情况下表观温差(a)和大气透过率(b)随距离变化情况(图中曲线从上到下代表观测天底角从 10°变化到 90°,变化间隔 10°)

Fig.1 ATD (a) and atmospheric transmittance (b) with range under different observation nadir angles(The curves from top to bottom represent the observed variation nadir angle from 10° to 90°, change interval of 10°)

然后考虑目标偏振特性。图 2(a)为成像距离为 40 km 时目标与背景的表观温差随目标偏振度和偏振角的变化情况。偏振度的范围是 0~0.1,偏振角的范围是 0°~180°。在文中设定的参数情况下,当目标偏振度不变,表观温差随目标偏振角增大而先增大

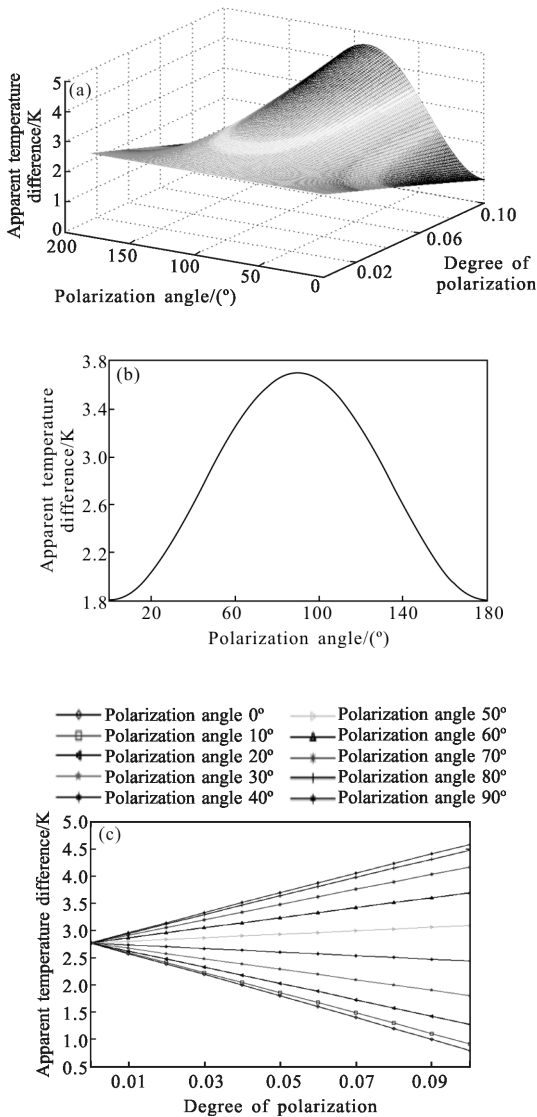


图 2 成像距离为 40 km 时表观温差与目标偏振特性关系(a)表观温差随偏振度偏振角变化情况(b)表观温差随偏振角变化情况(c)表观温差随偏振度变化情况(图中曲线从下到上代表偏振角从 0°变化到 90°,变化间隔 10°)

Fig.2 Relationship between ATD and polarization characteristic of the object($l_o=40$ km)(a) change with p_t and α_t (b) change with α_t (c) change with p_t (The curves from bottom to top represent the observed variation AOP from 0° to 90° change interval of 10°)

后减小(图 2(b)),在 90°时达到最大值,此时目标偏振角与偏振片检偏角相同;当目标偏振角不变,表观温差可能随着目标偏振度的增加而升高(偏振角大于 45°时)或降低(偏振角小于 45°时),也可能不变(偏振角为 45°时),表观温差与偏振度呈线性关系(图 2(c))。由此看出,目标与背景表观温差和目标

与背景的偏振特性密切相关,红外偏振成像技术在实际应用中需要充分考虑目标与背景的偏振特性。

3.2 修正 MRTD 仿真结果

在实际成像过程中,大气湍流会导致像的运动、畸变和模糊,对成像质量影响较大。文中采用一种大气湍流模型,考虑其对系统调制传递函数的影响^[10],旨在说明干扰因素对红外偏振成像系统作用距离的影响。根据表 2 中的系统参数仿真得到大气湍流修正前后不同杂波等级的系统 MRTD 与观测距离关系曲线(图 3)。对于同样的杂波等级,大气湍流作用使系统的 MRTD 值增加;对于不同杂波等级,系统 MRTD 对应的作用距离范围差别很大,说明杂波以及大气湍流等干扰因素对系统性能的影响很大,分析其作用十分必要。

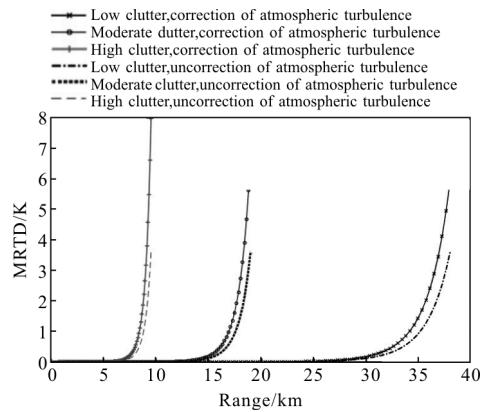


图 3 大气湍流修正后的不同杂波等级 MRTD 与作用距离关系图

Fig.3 Relationship between MRTD and range of different clutter levels after atmospheric turbulence correction

3.3 作用距离仿真结果

表观温差和不同杂波等级 MRTD 随距离变化曲线交点的横坐标值即红外偏振成像系统在该等级下的最远作用距离,如图 4 所示。对比强度成像(中波红外成像)模式和偏振成像(中波红外偏振成像)模式的最远作用距离(见表 3)可发现,在文中设定的条件下,不同杂波等级对两种成像模式的系统作用距离的影响都非常大,杂波等级每升一级,最远作用距离下降约 1/2;而对于任一杂波等级,偏振成像最远作用距离均大于强度成像,说明在杂波影响下偏振成像在一定条件下有利于系统作用距离的提高。根据公式(5),此时系统的光学限制作用距离为 51.126 2 km。

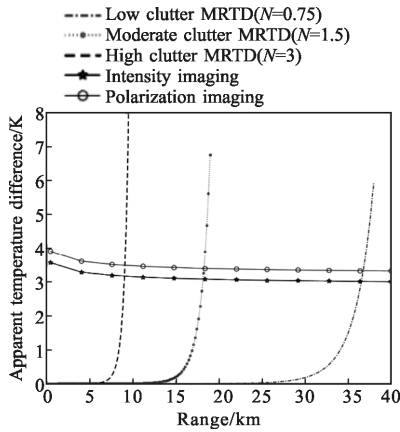


图 4 强度成像和偏振成像最远作用距离

Fig.4 Intensity imaging and polarization imaging farthest range

表 3 最远作用距离

Tab.3 Farthest operating range

Imaging mode	Farthest operating range/km		
	Low clutter	Moderate clutter	High clutter
Intensity imaging	36.554 1	18.160 9	9.019 3
Polarization imaging	36.768 9	18.274 6	9.068 5

当目标偏振度不同时(见图 5),在文中设定的仿真条件下,目标偏振度较小时(偏振度为 0、2%),强度探测优于偏振探测。随着偏振度的增加,偏振探测最远作用距离也在增加并优于强度探测,偏振度越大优势越明显(见表 4)。说明在实际应用中,需要根据具体条件选择成像模式,而目标偏振度越大则偏振成像模式越具有优势。

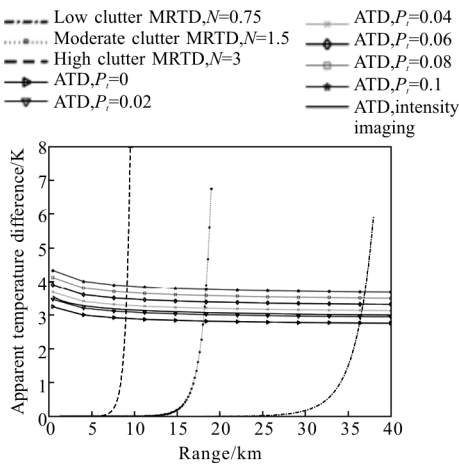


图 5 不同偏振度最远作用距离

Fig.5 Farthest operating range under different p_t

表 4 不同偏振度最远作用距离

Tab.4 Farthest operating range under different degrees of polarization

Imaging mode	Farthest operating range/km			
	Low clutter	Moderate clutter	High clutter	
Intensity imaging	36.554 1	18.169 0	9.019 3	
$P=0$	36.371 7	18.076 6	8.970 5	
$P=2\%$	36.515 4	18.146 8	9.006 8	
Polarization imaging	$P=4\%$	36.642 7	18.215 5	9.038 9
$P=6\%$	36.768 9	18.274 6	9.068 5	
$P=8\%$	36.885 8	18.330 5	9.097 9	
$P=10\%$	36.988 6	18.386 0	9.125 0	

当目标偏振角不同时(见图 6),最远作用距离随偏振角的增加而增加(见表 5),在接近偏振片检偏方

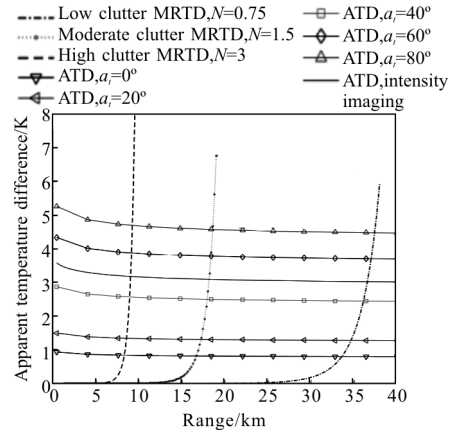


图 6 不同偏振角最远作用距离($p_t=10\%$)

Fig.6 Farthest operating range under different α ($p_t=10\%$)

表 5 不同偏振角最远作用距离

Tab.5 Farthest operating range under different polarization angles

Imaging mode	Farthest operating range/km			
	Low clutter	Moderate clutter	High clutter	
Intensity imaging	36.554 1	18.169 0	9.019 3	
$\alpha=0^\circ$	33.573 8	16.689 6	8.280 1	
$\alpha=20^\circ$	34.652 2	17.222 5	8.547 2	
Polarization imaging	$\alpha=40^\circ$	36.099 8	17.938 8	8.903 0
$\alpha=60^\circ$	36.988 6	18.386 0	9.125 0	
$\alpha=80^\circ$	37.395 9	18.589 7	9.225 6	

向时,偏振探测才优于强度探测。这是由于在偏振成像中,根据马吕斯定律,目标入射光的振动方向越接近偏振片检偏方向,透过偏振片的能量越大,二者方向垂直则透过偏振片的能量最小。在偏振成像中,如果偏振片检偏方向和背景偏振角垂直,能够最大程度地抑制来自背景的辐射,抑制背景杂波的影响。

图 7 是达到不同杂波等级的最远作用距离时偏振探测的优势范围,z 轴坐标表示的是偏振成像与强度成像的最远作用距离之差,其值大于 0 时表明偏振成像具有优势。从图中可以看到,受目标偏振度和偏振角的影响,偏振成像并不一定优于强度成像,在文中设定的条件下,当目标偏振角大于 40°、偏振

度大于 1%时偏振成像才可能会优于强度成像。偏振成像轻杂波、中等杂波和重杂波的最远作用距离优势范围分别为[0~891 m]、[0~447 m]、[0~217.8 m],较强度成像最远作用距离最大提高百分比为:轻杂波 2.44%,中等杂波 2.46%,重杂波 2.41%。

当观测天底角不同时,设目标偏振度为 6%,则偏振探测的优势十分明显(见图 8)。对任何杂波等级下的任一观测天底角,偏振成像的最远作用距离均大于强度成像最远作用距离,在文中设定的仿真条件下,观测天底角为 50°时最远作用距离达到最大值。

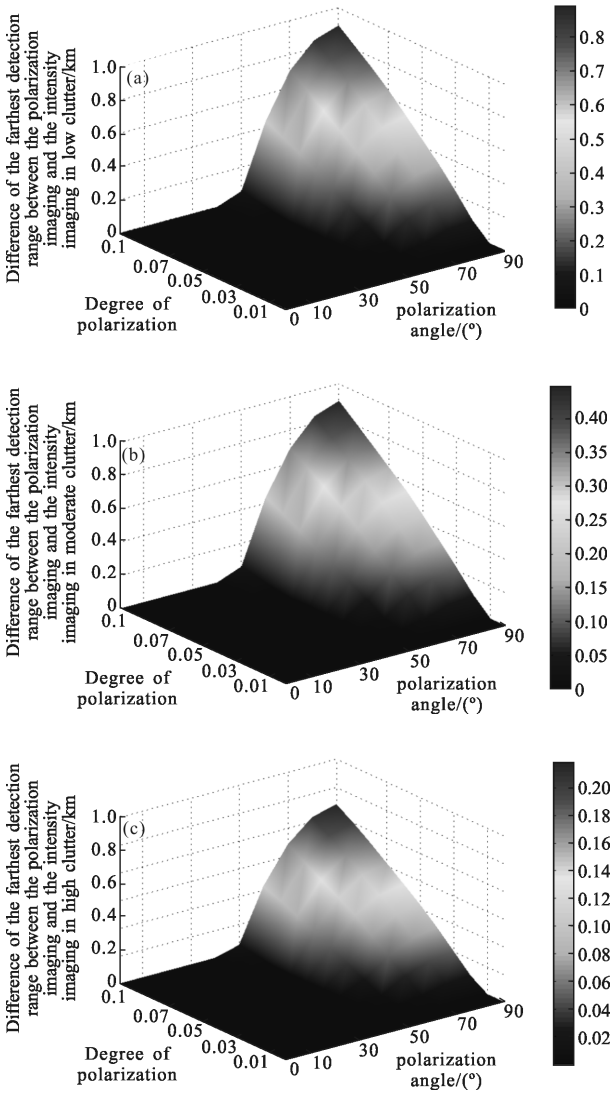
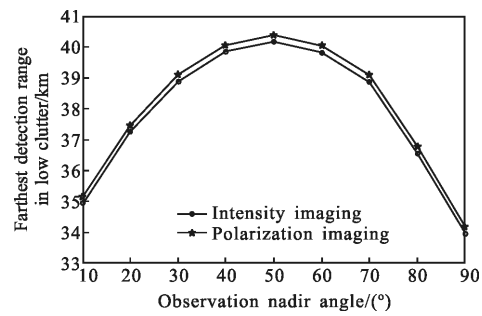
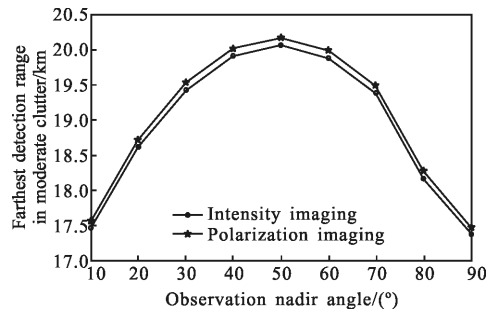


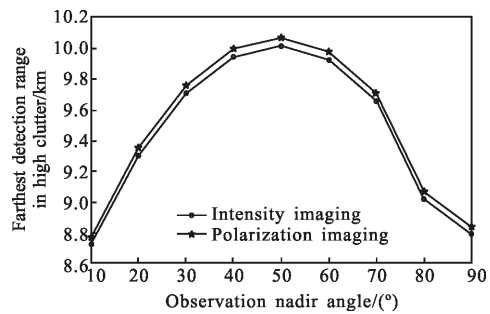
图 7 偏振探测优势范围(a)轻杂波(b)中等杂波(c)重杂波
Fig.7 Polarization detection advantage range (a) low clutter (b) moderate clutter (c) high clutter



(a) 轻杂波
(a) Low clutter



(b) 中等杂波
(b) Moderate clutter



(c) 重杂波
(c) High clutter

图 8 不同观测天底角作用距离

Fig.8 Distance under different observation nadir angle

4 结 论

通过文中的分析可以发现:(1) 背景杂波对红外偏振成像系统性能影响很大,随着背景杂乱程度提高,系统作用距离大幅下降;(2) 红外偏振成像系统作用距离与目标和背景的偏振特性、大气影响、观测方式等众多因素有关,红外偏振成像系统性能需要考虑这些因素的综合作用;(3) 偏振成像模式与强度成像模式各有优势,受客观条件制约,需要结合具体情况具体分析。

该方法从理论上探究了干扰因素对红外偏振成像系统性能的影响,对系统的实际应用具有很大的指导意义。仿真中以单通道红外偏振成像系统为基础,并未考虑杂波的偏振特性,接下来将研究多通道红外偏振成像系统作用距离模型,细化杂波分类,考虑杂波偏振特性,开展相关实验,完善红外偏振成像系统作用距离模型。

参考文献:

- [1] Wang Xia, Xia Runqiu, Jin Weiqi, et al. Technology progress of infrared polarization imaging detection [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2014, 43(10): 3175-3182. (in Chinese)
王霞, 夏润秋, 金伟其, 等. 红外偏振成像探测技术进展 [J]. 红外与激光工程, 2014, 43(10): 3175-3182.
- [2] Hu Xiaoqiang, Zhang Jing. Analysis of the operating range for polarization infrared detection system [J]. *Laser & Infrared*, 2016, 45(6): 709-712. (in Chinese)
胡晓强, 张晶. 红外偏振探测系统的作用距离分析 [J]. 激光与红外, 2016, 45(6): 709-712.
- [3] Guimaraes Edson F. Investigation of minimum resolvable temperature difference formulation for polarized thermal imaging range prediction [D]. Monterey: Naval Postgraduate School, 1999.
- [4] Mehmet Yildirim. Modeling second generation FLIR sensor detection recognition and identification range with polarization filtering[D]. Monterey: Naval Postgraduate School, 2000.
- [5] Zhou Chenghao. Modeling and analysis of operating range of infrared polarization imaging system [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2013. (in Chinese)
周程灏. 红外偏振成像系统作用距离建模与分析[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2013.
- [6] Zhao Dapeng, Shi Jiaming, Wang Jiachun, et al. Investigation of the operating range for polarized thermal imaging system [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2013, 42 (5): 1146-1152. (in Chinese)
赵大鹏, 时家明, 汪家春, 等. 偏振热成像系统的作用距离分析[J]. 红外与激光工程, 2013, 42(5): 1146-1152.
- [7] Xia Runqiu, Wang Xia, Jin Weiqi, et al. Distance model of infrared polarization imaging system used in sea-surface environment [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2016, 45 (3): 0304007. (in Chinese)
夏润秋, 王霞, 金伟其, 等. 海面环境中红外偏振成像系统作用距离模型[J]. 红外与激光工程, 2016, 45(3): 0304007.
- [8] Bai Tingzhu, Jin Weiqi. Principle and Technology of Photoelectric Imaging [M]. Beijing: Beijing Institute of Technology Press, 2010. (in Chinese)
白廷柱, 金伟其. 光电成像原理与技术 [M]. 北京: 北京理工大学出版社, 2010.
- [9] Schmieder D E, Weathersby M R. Detection performance in clutter with variable resolution [J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 1983, 19(4): 622-630.
- [10] Gerald C Holst. Electro-Optical Imaging System Performance [M]. Washington: SPIE Press, 2008: 300-312.