文章编号: 1001-5078(2006)05-0335-03

海面舰艇红外隐身效能评估

陈 翾,杨 立
(海军工程大学 307教研室,湖北 武汉 430033)

摘 要:运用红外辐射理论的知识,分析计算出舰艇在采用各种隐身手段情况下红外探测系统的最大作用距离,以及在不同最大温差 ΔT 下探测系统对目标的发现、识别与认清概率,通过结果的分析与比较可定量地评价出舰艇的各红外隐身技术的效能。其分析结果可为今后进一步对海面舰艇的隐身研究提供一定的借鉴。

关键词:红外辐射;作用距离;隐身技术;效能
中图分类号: TN976 **文献标识码**: A

The Evaluation of the Infrared Stealth Efficiency of the Shipboard

CHEN Xuan, YANG Li
(Naval University of Engineering, Wuhan 430033, China)

Abstract: Based on the theory of infrared radiation, a shipboard's operating range of infrared detection system in all kinds of stealth methods and the probabilities of the discovery, distinction and recognition of the target of the system at different maximum temperature differences are calculated and analyzed. By analyzing and comparing the results, the infrared stealth efficiency of a shipboard can be evaluated quantitatively, which will provide certain reference for the relevant research in the future.

Key words: infrared radiating; operation range; stealth technology; efficiency

1 引 言

随着军用光电技术的飞速发展,海面舰艇正面临着日趋严重的光电威胁。现代海战中,各种反舰精确制导武器迅速发展,对海面舰艇形成了多层次、多方面、多样性、突然性的威胁。现代军事技术已经达到了"目标只要被发现,就能被命中;只要被命中,就能被摧毁"的水平。因此,为了提高海面舰艇的生存能力,各国对舰艇的红外隐身技术进行了大量研究。

在国外,光电隐身技术于上世纪七十年代末期基本完成了基础研究和先期开发工作,并取得了突破性进展,已由基础理论研究阶段进入实用阶段;从八十年代开始,技术先进的国家在它们研制的新型战舰上已广泛地应用了红外隐身技术。如美国洛克希德研制的"海影"号隐身舰和法国海军现役的"拉斐特"级护卫舰等,都大量地运用了红外隐身技术[1,2]。

本文通过对各种舰艇红外隐身策略的效能进行评估,分析出其对红外制导武器的探测距离以及发现与识别概率的影响,为今后进一步对海面舰艇的隐身研究提供一定的理论参考。

2 红外隐身原理与探测性能

2.1 目标辐射出射度

红外隐身技术就是降低或改变目标的红外辐射特性,从而降低目标的可探测性。这可通过改进结构设计和应用红外物理原理来衰减、吸收目标的红外辐射能量,使红外探测设备难以探测到目标。

由红外物理可知,物体辐射出射度由斯蒂芬——玻尔兹曼定律决定[3]:

作者简介:陈 翾(1981-),男,海军工程大学船舶与动力学院2004级在读硕士研究生,工程热物理专业。
收稿日期: 2005-10-14

© 1994-2006 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

$$E = \varepsilon\sigma_b T^4 \quad (1)$$

其中,ε为物体的黑度;σ_b为斯蒂芬——玻尔兹曼常数;T为物体的温度。

由(1)式可以看出,物体的辐射出射度与其温度和黑度有关。鉴于一般军事目标的辐射都强于背景,所以采用黑度较低的涂料可显著降低目标的红外辐射能量。另一方面,为降低目标表面的温度,热红外伪装涂料在可见光和近红外范围内还具有较低的太阳能吸收率和一定的隔热能力,以使目标表面的温度尽可能接近背景的温度,从而降低目标和背景的辐射对比度,减小目标的被探测概率。

2.2 红外探测系统的作用距离

在考虑红外制导武器对海面舰艇的威胁时,一般将舰艇视为点目标。红外探测系统对点目标的最大作用距离 D 表示为[4]:

$$D = [I_{\lambda_1-\lambda_2} \cdot \bar{\tau}_a]^{1/2} \cdot [\frac{\pi}{2} D_o (NA) \cdot \tau_o]^{1/2} \cdot [D^*]^{1/2} \cdot [(\omega \cdot \Delta f)^{1/2} \cdot (\frac{V_s}{V_n}) / K]^{-1/2} \quad (2)$$

其中,$I_{\lambda_1-\lambda_2}$为目标在工作波段内的辐射强度;$\bar{\tau}_a$为平均透射率;D_o为光学系统有效入射孔径直径;τ_o为光学系统的光谱透射率;D^*为敏感元件的光谱探测度;ω为系统的瞬时视场;Δf为电路等效噪声带宽;V_s为信号电压;V_n为深测器噪声电压的均方根值。

为了降低来自于红外制导武器的空中威胁,减小红外系统的最大作用距离是行之有效的方法。由(2)式可以看出,红外系统的最大作用距离主要由目标和大气透射率、光学系统、探测器与系统特性及信号处理这四个因素决定。对目标来说,只有降低在工作波段内的辐射强度 $I_{\lambda_1-\lambda_2}$,才能降低红外制导武器的空中威胁。

2.3 目标的发现、识别与认清概率

红外探测系统对目标的探测一般可粗分为发现、识别、辨认三个不同的等级。假设目标为某型舰艇,发现目标表示能从背景中区分出目标来(但不知道是舰艇),识别目标表示知道目标为舰艇,认清目标表示能辨认出舰艇的型号来。

红外探测系统的一个重要的性能参数为最小可分辨温差(MRTD),它是指在一定的空间频率下能分辨的目标与背景间温差或目标与背景各部分之间的温差,它同时反映了系统温度灵敏度和空间分辨率,引入了系统各环节对仪器性能的影响,并且与目标的正确判读概率相联系,因而能够全面代表系统的探测能力。研究人员通过大量的实验,得出了不同的探测等级在不同概率 P 的情况下所需的目标等效的线对数 r,其结果如图 1所示。

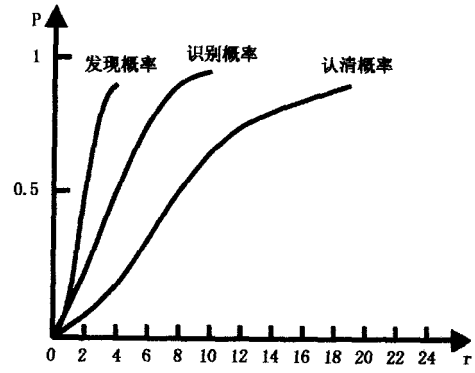


图 1 各种探测概率下所需的 r

Fig 1 the r's required by various detection probabilities

计算各概率值的关键在于得出目标等效的线对数 r。目标等效的线对数 r的数值可由(3)式决定[5]:

$$\Phi\left[\left(\frac{\Delta T}{K} \cdot \sqrt{\frac{7}{m}} - \frac{MRTD}{K}\right) / \sigma\right] = 0.9 \quad (3)$$

其中,Φ为正态分布函数;ΔT为目标与背景的温差;m =L/(H/2r)为目标的实际长宽比(L,H分别为目标的实际长度与宽度);MRTD为最小可分辨温差;K为概率换算系数;σ为正态分布的均方差。求出目标等效的线对数 r后,可根据图 1求出红外系统对目标的发现、识别与认清概率。

3 红外隐身技术

控制舰艇红外辐射特征的目的是降低不同区域的温度差,从而降低红外侦察设备和红外制导导弹的识别能力。舰艇采用的热抑制措施主要有冷却和屏蔽两种。同时还可以对舰桥等上层建筑涂敷红外隐身涂料,这样不仅能减少红外辐射,而且能减少光反射。

3.1 冷却技术

冷却技术的目的是降低舰艇在 3～5μm波段内的红外辐射。燃气轮机和柴油机排放的高温废气是舰艇在 3～5μm波段内最强烈的红外辐射源,因此国外在舰艇红外隐身领域的工作大都从降低废气温度、抑制红外辐射开始。对燃气轮机和柴油机排放的高温废气需要采用不同的冷却技术降低其红外辐射特性。

3.1.1 引射和烟囱喷水技术

对燃气轮机来说,由于排气量大,排气流速高,普遍采用引射技术和烟囱喷水技术,它可使烟囱部位的红外辐射强度大大降低。引射技术简单地说就是将燃气轮机排出的废气引入混合管,使高温废气

© 1994-2006 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

与外界低温空气充分混合,达到降低排气温度的目的。烟囱喷水技术也是为了降低排气温度,同时也有降低烟囱内壁温度的效果。这种技术已应用在美国"斯普鲁恩 级驱逐舰上。采用这种技术后,舰艇在 3～5μm 波段内的红外辐射可降低 95%以上。

3.1.2 烟道冷却与海水喷射技术

对于柴油机排气的红外抑制,目前普遍采用烟道冷却和海水喷射技术。英国的舰艇采用烟道冷却后,舰艇红外辐射降低 60%以上。德国海军采用海水喷射装置后,可使排气温度由 500℃降低到 60℃。减少舰艇燃气轮机和烟囱的热红外辐射,一般还采用双层烟囱。在烟囱底部开有冷空气进孔,以便使燃气轮机的热气与大量的冷空气混合,从而大大降低烟囱排出废气的温度。

3.2 屏蔽技术

屏蔽技术的目的是降低舰艇在 8～14μm 波段内的红外辐射。目前比较常见的屏蔽技术主要有以下三种:

(1)应用红外隐身材料,改变舰艇的红外辐射特征;

(2)使用隔热材料来阻止舰艇舱内热源向外辐射;

(3)采用喷淋水幕技术,将舰艇笼罩起来,达到降温、屏蔽的效果。

本文重点研究喷淋水幕技术的红外隐身作用,水雾隐身技术是一种较为理想且经济适用的目标特征信号控制技术,其系统能在数秒内产生细微水雾遮蔽目标并强烈地吸收和散射目标的红外辐射,从而将入射的光辐射衰减到光电观瞄探测系统不能可靠工作的程度,防止敌方光学侦察器材的观察,降低红外侦察器材的探测距离。研究表明采用喷淋水幕技术可以屏蔽大约 80%的红外辐射能量[6]。

3.3 隐身涂料

隐身涂料一般是采用具有较低发射率($\varepsilon = 0.5 \sim 0.7$)的涂料,以降低舰船的红外辐射能量,且涂料还应具有较低的太阳能吸收率和一定的隔热能力,以避免舰船表面吸热升温,并防止舰船有过多热红外波段能量辐射出去。

4 隐身效能分析

本文主要分析的是各种隐身手段对红外探测系统最大作用距离以及目标的发现、识别与认清的影响。

4.1 作用距离与目标辐射强度的关系

由(2)式可以得出红外系统的最大作用距离与目标波段辐射强度的关系。同时值得注意的是大气的透射率也与距离具有一定的关系。研究得知,在使用高度上,3～5μm 波段范围内水平路程上的水蒸气、二氧化碳透过率 τ_{H_2O}、τ_{CO_2}与距离 D 的关系如表 1所示:

表 1 τ_{H_2O}、τ_{CO_2}与作用距离 D 的关系

Table 1 the relationship of distance D and τ_{H_2O}、τ_{CO_2}

D(km)	1	3	4	8	10	12	16	18	20
τ_{H_2O}	0.97	0.94	0.93	0.88	0.85	0.82	0.776	0.74	0.71
τ_{CO_2}	0.38	0.375	0.37	0.36	0.355	0.35	0.335	0.33	0.325

所用红外探测系统参数如下:光学系统有效接受口径 $D_o = 76.8$mm,焦距 $f = 96$mm,光学系统透过率 $\tau_o = 0.43$,探测器面积 $A_d = 7\text{mm}^2$,在工作波段(3～5μm)内的平均比探测度 $D^* = 4.3 \times 10^{10}\ \text{cm} \cdot \text{Hz}^{1/2}\text{W}^{-1}$,系统噪声等效带宽 $\Delta f = 1000$Hz,信噪比 V_s/V_n 取 1.7,修正因子 $K = 0.16$。将参数代入(2)式,可得红外系统的最大作用距离与目标波段辐射强度的关系图,如图 2所示。

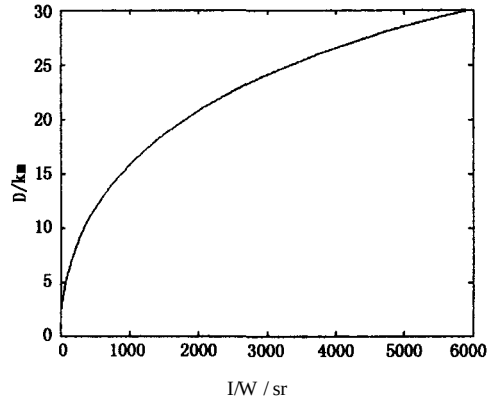


图 2 作用距离与目标波段辐射强度关系图

Fig 2 the relationship of distance D and radiant intensity of the target

4.2 隐身手段对作用距离的影响

假设目标(舰艇)没有采用任何红外隐身手段时,在 3～5μm 波段内的红外辐射强度为 1000W / sr,则各隐身手段对红外探测系统最大作用距离影响如表 2所示。

表 2 各隐身手段对作用距离 D 的影响

Table 2 the effect of stealth technologies to the distance D

	没采用隐身手段时的作用距离	采用隐身手段时的作用距离
引射和烟囱喷水技术	15.8km	小于 4.2km
烟道冷却与海水喷射技术	15.8km	小于 10.4km
喷淋水幕技术	15.8km	7.8km
隐身涂料	15.8km	11.6～13.5km

(下转第 347页)

© 1994-2006 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

通过优化结构参数及调整泵浦功率,提高了增益平坦性。图 4为输出功率与波长关系曲线,VOA调整值为 2dB,其 3dB 平坦区达 30nm(1530～1560nm)。从图中可以看出其可以为 40个以上的WDM信道波长提供增益钳制放大。VOA值为 2dB时,不同泵浦功率下输入 0.1mW的信号,放大器输出功率曲线如图 5所示。测量了 4个不同波长的信号,其功率输出平坦且随泵浦功率的增加而增加。

4 结 论

设计了一种基于环形腔激光器的增益钳制掺铒光纤放大器,利用光纤布拉格光栅反射 1520nm的光反馈而形成激光,其可以对 1530～1560nm波段信号光的增益进行有效的钳制。1550nm小信号(-40dBm)增益 20dB,其输出功率可达 16dBm。测量了放大器在不同腔内损耗条件下从 -40～10dBm的信号增益,其增益稳定。实验结果说明这种光纤放大器可以为 40个以上的 WDM信道波长提供稳定的增益。

参考文献:

[1] SM Harun, H Ahmad. L-band erbium-doped fiber amplifier with clamped and flattened-gain using FBG[J]. Electronics Letters, 2003, 39: 962 - 964.

[2] S Selvakennedy, P Poopalan, M A Mahdi, et al. Gain-clamped erbium-doped fiber amplifier for wavelength division multiplexed systems [J]. Journal of Modern Optics, 2000, 47(9): 1599 - 1605.

[3] J F Massicott, S D Willson, R Wyatt, et al. 1480nm pumped erbium doped fiber amplifier with all automatic gain control[J]. Electronics Letters, 1994, 30: 962 - 964.

[4] Kyo Inoue. Gain-Clamped Fiber Amplifier with a Loop Mirror Configuration[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 1999, 11: 533 - 535.

[5] Zimgibl M. Gain control in erbium-doped fibre amplifiers by an all-optical feedback loop [J]. Electron. Lett, 1991, 27: 560 - 561.

[6] Delevaque E, George T, Bayon J F. Gain control in erbium-doped fibre amplifiers by lasing at 1480nm with photoinduced Bragg gratings written on fibre ends[J]. Electron. Lett, 1993, 29: 1112 - 1113.

(上接第 337页)

4.3 隐身手段对发现、识别与认清概率的影响

假设目标(舰艇)长 L=120m,高 H=10m,红外探测系统 MRTD为 1.4,在探测概率为 90%条件下,K取 1.5。由于背景与目标的温差受许多复杂因素的影响,易随外界环境的变化而变化,所以假设在没有采用隐身手段时,目标与背景最大温差 ΔT为 10℃,当采用隐身手段后,目标与背景最大温差 ΔT差分别降为 8℃、6℃和 4℃。计算得出在各温差条件下探测系统对目标的发现、识别与认清概率,其具体值如表 3所示。

表 3 目标在各温差条件下的发现、识别与认清概率

Table 3 the probabilities of the discovery, distinction and recognition of the target at different temperature differences

ΔT \ P	发现概率	识别概率	认清概率
10℃	1.0	0.9	0.4
8℃	1.0	0.7	0.2
6℃	0.9	0.4	≤0.1
4℃	0.3	≤0.1	≤0.02

5 结 论

(1)红外系统的最大作用距离随目标波段辐射强度的增大而递增,但递增的趋势逐渐减缓。当目标的波段辐射强度达到 6000W/sr时,对于上述指标的红外系统其最大作用距离可达到 30km左右;

(2)各种隐身手段对红外探测系统的最大作用距离有非常明显的影响。特别是引射和烟囱喷水技术使红外系统的作用距离降低了 73.4%。如果合理地综合运用多种隐身手段,还可以进一步缩短红外系统的最大作用距离,最大限度地降低红外制导武器对目标的空中威胁;

(3)通过分析,在各温差条件下探测系统对目标(舰艇)的发现、识别与认清概率可知,当目标与背景的温差 ΔT小于 4℃时,目标具有很好的隐身效果。这可作为评价一种隐身手段效能的依据。

参考文献:

[1] 侯振宁. 舰艇的红外隐身技术[J]. 舰船电子对抗, 2001(6): 24 - 26.

[2] 王宏. 红外、雷达隐身在舰船上的应用[J]. 舰船电子工程, 2004(5): 111 - 114.

[3] 俞佐平,等. 传热学[M]. 北京:高等教育出版社, 1995.

[4] 杨宜禾,等. 红外系统[M]. 北京:国防工业出版社, 1995, 145 - 149.

[5] 周刚. 红外成像系统对目标的发现识别概率[J]. 红外技术, 2001, (3): 16 - 18.

[6] 蔡志刚,等. 水幕流场特性诊断与隔热性能的实验研究[J]. 火灾科学, 2004(4): 224 - 230.

© 1994-2006 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net