

〈制导与对抗〉

反舰导弹中波与长波红外成像制导优势对比研究

钱 昂, 何友金, 刘 亮

(海军航空工程学院 控制工程系, 山东 烟台 264001)

摘要: 反舰导弹红外成像制导工作波段的选择是一项重要而又复杂的工作。首先对海面舰船目标的红外特性进行理论分析; 然后选择中纬度夏、冬两个季节, 白天海洋消光系数、自置气象视距气溶胶模式作为两个典型的大气模型, 并利用光学大气传输计算软件 ART2100 计算典型大气模型条件下的红外传输透过率; 最后结合理论分析和计算结果, 对中波和长波红外制导优劣进行分析研究, 得出工作波段选择的参考依据。

关键词: 舰船目标; 红外辐射特性; 大气传输; 波段选择

中图分类号: TN215

文献标识码: A

文章编号: 1001-8891(2013)08-0671-05

A Comparative Study of the Advantage of Infrared Imaging Guidance Anti-ship Missiles Based on Medium Wave and Long-Wave

QIAN Ang, HE You-jin, LIU Liang

(Department of Control Engineering, Naval Aeronautical and Astronautical University, Yantai 264001, China)

Abstract: The selection of working band of the anti-ship missiles seeker which is guided by infrared imaging is an important and complicated task. Firstly, this article analyzes the theoretical infrared characteristic of the sea-surface ship targets, and then chooses the mid-latitude in summer and winter two seasons, marine extinction coefficient in the daytime, and sets up the aerosol model respectively as two typical atmospheric models, and computes the infrared transmission of typical atmospheric model through optical software ART2100. Finally, combining with theoretical analysis and calculation results, we get the reference frame of selection of the working band by analyzing the advantage of infrared guidance based on medium wave and long-wave.

Key words: ship targets, the characteristics of infrared radiation, atmospheric transmission, the selection of working band

0 引言

在现代海战中, 基于红外成像制导的低空掠海飞行导弹作为一种精确打击武器可以对水面舰艇构成严重威胁, 随着红外探测识别技术的发展, 目前基于红外成像探测的反舰导弹已成为打击舰船目标的重要手段和亮点。采用红外成像技术探测识别海上舰船目标, 是国内外反舰导弹和海上光电侦查的重要发展方向。红外成像系统使用的工作波段先由长波段开始, 逐步扩展到中波段和短波段, 目前在红外成像制导中主要采用长波和中波红外。针对反舰导弹的红外成像制导技术, 由于受具体使用环

境、任务使命、使用方式、技术成熟度、系统价格等诸多因素的影响, 对于红外工作波段的选择在工程界一直存在纷争^[1], 其定量的、系统性的研究不够。本文在分析舰船目标和背景红外特性的基础上, 具体计算中波和长波红外辐射的海上大气传输效果, 并结合探测器的发展现状等, 对红外工作波段选择进行研究, 为反舰导弹红外成像制导工作波段的选择和作战应用提供参考。

1 舰船及背景红外特性

红外制导技术因其制导精度高、抗干扰能力强、隐蔽性好、效费比高、结构紧凑、机动灵活

收稿日期: 2014-01-15; 修订日期: 2014-04-20.

作者简介: 钱昂 (1990-), 男, 陕西西安人, 硕士, 主要研究方向为舰船目标的红外探测与识别。E-mail: Qiang_20140110@163.com。

等优点^[2],使得这种技术在现代武器装备得到了广泛的应用,国内外有大量的反舰导弹都采用了红外制导或者含有红外成像制导的复合制导技术。因此,对以舰船为目标的红外成像系统进行研究是进行红外制导技术研究的基础,具有重要意义。以红外成像系统技术为支撑的反舰导弹获取的图像的主要特点就是海天为背景,舰船为目标。

1.1 舰船目标红外辐射特性

根据波尔兹曼定律,物体的红外辐射量是由物体的温度和发射率决定的,而红外辐射出射度与温度的4次方成正比,当把物体看成灰体时,其全辐射出射度可以表示为:

$$E = \frac{\varepsilon \pi^4 c_1 T^4}{15 c_2^4} = \varepsilon \sigma T^4 \quad (1)$$

式中: c_1 为普朗克定律第一辐射常数; c_2 为普朗克定律第二辐射常数; σ 为斯忒藩-玻耳兹曼常数; T 为物体的绝对温度; ε 为物体的发射率^[3]。

从公式(1)可以看出,温度是决定红外辐射幅出度大小的主要因素,当物体温度有很小的变化时,就会引起辐出度的很大变化。

舰船目标的红外辐射源主要由舰船自身的红外辐射、舰船表面的反射辐射和舰船在行进中产生的红外辐射这3部分组成。舰船表面的红外辐射为灰体辐射^[4],主要来自于舰船四周壳体、甲板和上层建筑的辐射。反射辐射相比于自身辐射要弱,主要来源为天空和大海。

1.2 海面、海空背景红外辐射特性

在海面背景环境下,由于海水本身相比于周围的环境温度比较低,所以它所散发的红外辐射除了海面自身散发的红外热辐射之外,主要还是来自于海面背景对周围环境的红外辐射所进行的反射,如对天空、太阳、云层等背景辐射的反射。对于不同波段的红外辐射其来源也各不相同,研究表明^[5]:对于 $3\text{ }\mu\text{m}$ 以下波段的红外辐射,其主要来源是白天海面背景对周围环境的红外辐射所进行的反射;对于 $4\text{ }\mu\text{m}$ 以上波段,主要来自于海面自身的红外热辐射。

海空背景的主要构成是海面、天空和海天线(即海天交界处)这三部分。在海空背景条件下探测器接收到的红外辐射除了上面所说的海面背景条件下的红外辐射,还有从目标到探测器之间光学路径上的大气辐射。

2 海上红外辐射传输特性计算分析

由于在海上舰船目标红外成像探测中,探测器

接收到的红外辐射是经过大气路径传输后的红外辐射信号。因此,红外成像探测不仅需要研究舰船目标与背景环境的红外辐射特性,还需要研究目标和背景红外辐射在大气中的传输特性。

根据分子物理学理论^[6],目标和背景的红外辐射在经过大气路径传输时,会被大气中某些气体有选择地吸收,同时也会被大气中悬浮的微粒散射,从而造成辐射能量的衰减。造成红外辐射在大气传输中衰减的原因主要有3个:一是大气中的吸收气体对红外辐射进行吸收,是决定红外光谱透过率特性的主要因素,它依赖于吸收性气体分子的类型及其浓度;二是气溶胶和云雨滴对红外辐射的散射,主要取决于大气中悬浮微粒的尺寸、特性和密度;三是沿传输路径上各点的温度和压强等气象条件对红外辐射传输特性的影响。吸收、散射和气象条件的影响虽然机理不同,其作用结果均使辐射功率在传输过程中发生了衰减。

2.1 红外辐射大气传输透过率的分析

反舰导弹在攻击海上目标时常采用低空突防,因此飞行中段和末段的弹道高度一般会比较低,通常距海面 $10\sim 30\text{ m}$ 。在这种低空飞行的情况下,红外成像制导的初始阶段目标舰船由于距离探测器还比较远,会是在海天附近,随着距离的缩短,目标舰船会逐渐融入到海背景之中。海上红外辐射传输特性的计算,主要针对海天处舰船目标所处环境的气象数据,运用大气传输软件进行计算,分析选择哪一种波段探测效果最好。

红外辐射通过实际大气的传输过程是非常复杂的^[7],在这个过程中辐射能会受到大气中各种因素的影响而衰减,衰减的程度用大气透过率来衡量。大气透过率就是根据大气中各种分子对红外辐射吸收和散射造成的衰减来计算的,即辐射穿过大气未被衰减的能量与总辐射能量之比。大气透过率一般呈指数规律变化,如下式所示:

$$P = P_0 \exp(-\beta x) \quad (2)$$

式中: β 为衰减系数,一般是波长 λ 和距离 x 的函数。零距离下 $P = P_0$ 。由此可得大气透过率 τ 为:

$$\tau = P/P_0 = \exp(-\beta x) \quad (3)$$

$$\text{在大多数情况下: } \beta = \alpha + \gamma \quad (4)$$

式中: α 是吸收系数,起因于大气中气体分子的吸收^[8]; γ 是散射系数,起因于大气中气体分子、霾和雾的散射, α 和 γ 二者均随波长而变化。

尽管红外辐射在大气中的传输过程非常复杂,但通过建立模型,可以通过大气传输软件 ART2100 模拟大气环境来进行分析计算。ART2100 是应用程

序 Lowtran7^[9]进行各种复杂大气辐射传输计算条件的界面软件,在缺乏实测数据的情况下,文中使用 ART2100 模拟给定气象模型下的大气透过率。

2.2 计算结果及分析

在大气中存在弱吸收的光谱区称为“大气窗口”, $3\sim 5\mu\text{m}$ 与 $8\sim 14\mu\text{m}$ 波段是红外热成像常用的两个主要窗口^[10]。在分析计算中,结合反舰导弹红外末制导特点,选用软件中给定的大气模型来模拟现实中诸如地理位置、季节、温度、湿度等海上气象数据条件,利用 ART2100 对这两个波段红外辐射大气传输透过率进行计算分析,为目标探测最优波段的选择提供理论依据。

标准大气模型的假设^[11]:空气服从理想气体定律和流体静力学方程。其目的是用于描述中纬度的大气年平均状态。目前权威的标准大气模型是美国 1976 年的标准大气模型。在建立中国标准大气模型之前,经中国国家标准局批准,采用 30km 以下的美国 1976 年的标准大气模型作为中国的标准大气模型。

在建立大气模型时,气溶胶模型选择海军海洋消光系数、自置气象视距;选择中纬度夏季、春夏季气溶胶廓线来模拟我国中纬度地区在高温、高湿的大气条件下的海洋大气模型;选择中纬度冬季、秋冬季气溶胶廓线来模拟我国中纬度地区在低温、低湿的大气条件下的海洋大气模型;自置大气用户输入模型,选择黄海某海域夏季气溶胶廓线来作验证。考虑到在 $3\sim 5\mu\text{m}$ 与 $8\sim 14\mu\text{m}$ 两个波段热成像的空间分辨和热灵敏度都难以分辨 10 km 以外的目标,并且导弹飞行中段和末段基本不会超过 5 km,所以大气模型的建立都是在 10 km 范围以内。

最终根据所建立的大气模型,利用 ART2100 计算在不同的目标探测距离下的红外大气透过率随

气象视距的变化而变化的情况,并对中、长波段的透过率计算情况进行对比分析。

图 1 为中纬度夏季高温潮湿气候条件下,在不同的目标探测距离下的大气红外透过率随气象视距变化的计算结果。

由图 1 可以看出透过率有如下变化规律:

1)在我国中纬度地区夏季高温高湿的气候条件下,气象能见度比较差时(气象视距在 5 km 范围内),在近距离探测时(探测距离 $<10\text{ km}$),长波段红外的透过率要高于中波段;在远距离探测时(探测距离 $>10\text{ km}$),中、长波红外大气透过率差别不是很明显,透过率均很低。

2)随着大气中湿度相对变小,即气象条件变好时(气象视距 $>5\text{ km}$),在探测距离 $<5\text{ km}$ 时,长波红外要高于中波红外的大气透过率;在探测距离 $>5\text{ km}$ 时,长波红外要低于中波红外的大气透过率。可以明显看出,随着气象视距的增大,中波段红外透过率增长优势明显,尤其是表现在远距离探测上,但这种优势的增长表现的不是很明显。

图 2 为黄海某海域夏季高温潮湿气候条件下,不同的目标探测距离下的大气红外透过率随气象视距变化的计算结果,是选择特定地区对上边中纬度夏季的模型进行验证。可以看出:红外大气透过率随气象视距和探测距离的变化趋势基本上和上边的仿真结果类似,即在这种地理气候条件下,中、长波段的优势跟地理位置、天气情况、背景与目标的红外辐射特征等因素是密切相关的,夏季在中低视距情况下,长波总是优于中波的;而高视距情况下,即在 5 km 之外,中波大气透过优于长波,但是优势不太明显。

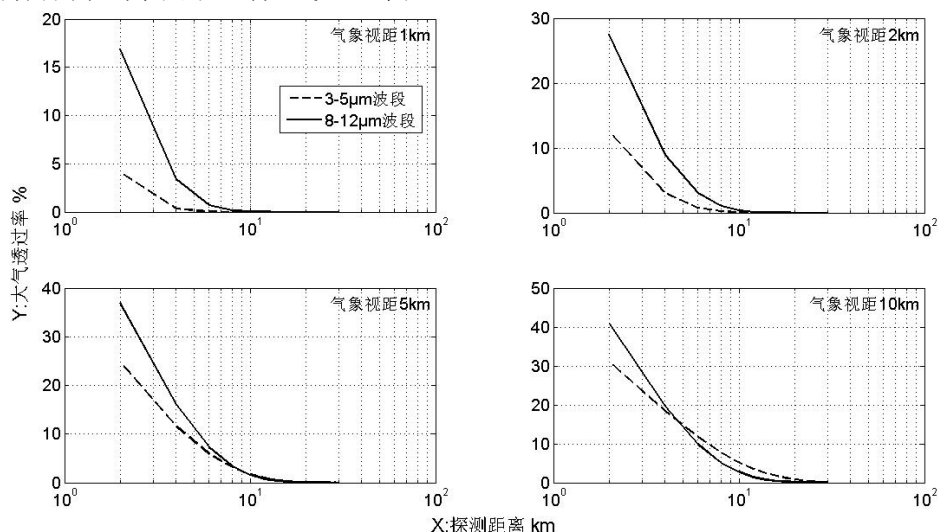


图 1 中纬度夏季大气透过率 Fig.1 The atmospheric transmittance of mid-latitude region in summer

图3为中纬度冬季干冷的气候条件下,不同的目标探测距离下的红外大气透过率随气象视距变化的计算结果。

由图3可以得出如下规律:

- 1) 在冬季干冷的气候条件下,由于雾霾等天气情况的影响,使气象条件比较差时(气象视距在5 km 范围内),当近距离探测时(探测距离<10 km),长波段红外要高于中波段红外的透过率;在远距离探测时(探测距离>10 km),长波段红外依然高于中波段红外的透过率,但两个波段的大气透过率都很低。
- 2) 天气晴朗,气象条件比较好时(气象视距>

- 5 km),长波段始终要强于中波段大气透过率。
 - 3) 冬季长波段始终优于中波段的大气透过率,且没有出现两个波段透过率大小反转的情况。
- 从上边的分析中可以得知:在我国中纬度春夏季高温高湿的气候地理条件,在近距离(5 km 范围)的探测距离情况下,长波红外的透过率要优于中波的,这种优势随着探测距离的变大而逐渐放缓,当探测距离>5 km,中波红外的大气透过率要优于长波,但优势不太明显。考虑到在3~5 μm 与8~14 μm 两个波段热成像的空间分辨和热灵敏度都难以分辨10 km 以外的目标,并且导弹飞行中段和末段基本不会超过5 km,所以这个优势也没有太大的意义。

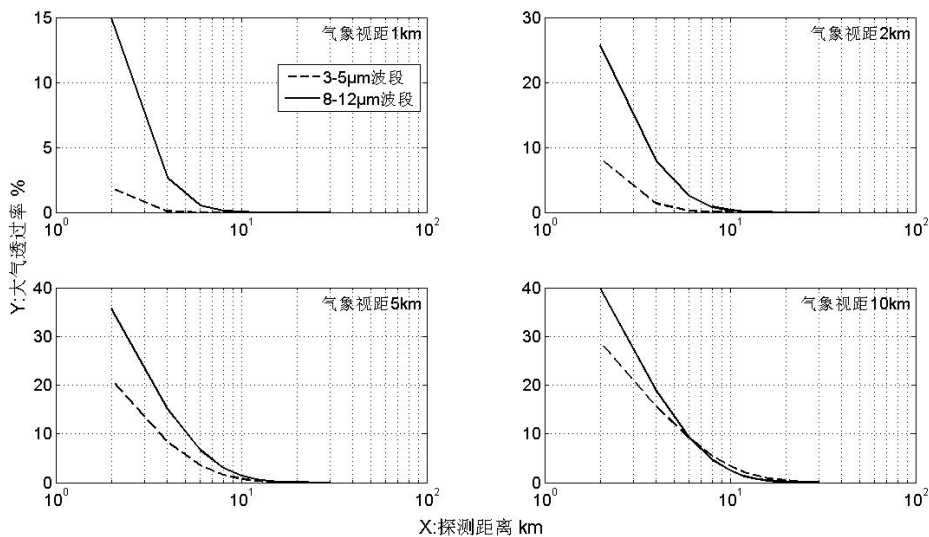


图2 黄海某地区夏季大气透过率

Fig.2 The atmospheric transmittance of somewhere in the yellow sea region in summer

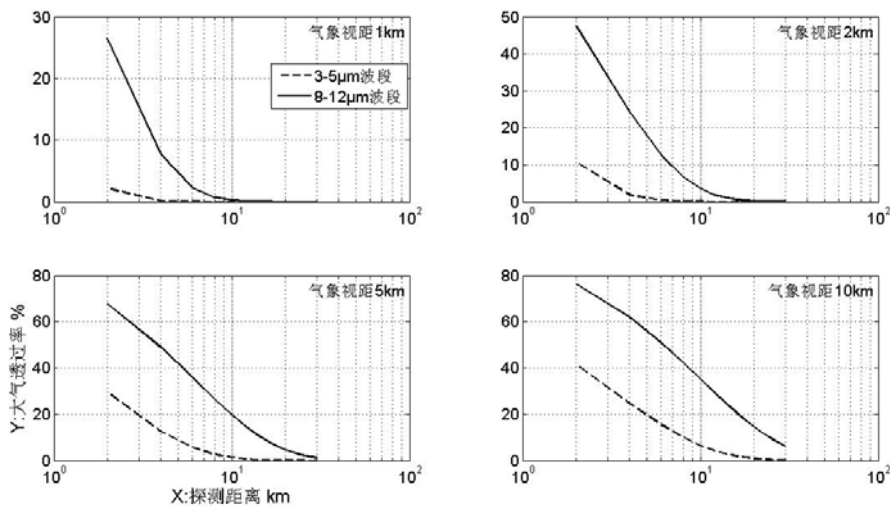


图3 中纬度冬季大气透过率

Fig.3 The atmospheric transmittance of mid-latitude region in winter

对于我国中纬度秋冬季高温高湿的气候地理条件,长波红外的透过率要优于中波的,这种优势很明显,并且探测距离对于这种优势也没有太大的影响。

综合比较,在大气物理模型的基础上,可知在我国中纬度地区,无论是春夏季,还是秋冬季,长波红外的大气透过率的优势总体上要大于中波红外。在实际的应用中,需要综合考虑探测器的选择、技术难度、具体的应用环境和要求、成本等多方面因素,趋利避害,选择成像效果最佳的波段。

3 红外工作波段选择研究

反舰导弹红外成像制导工作波段的选择,是一项重要而又复杂的工作,波段选择的合适,有助于导弹作战效能的发挥和适应海上复杂环境能力的提升。由于反舰导弹红外成像制导工作波段的选择涉及很多方面的因素或问题,下面结合前面的一些研究结果,主要从技术的角度进行研究。

3.1 最多利用舰船目标红外辐射能量

通过前面对舰船目标红外辐射特性的计算分析,得到了舰船在 $8\sim 14\ \mu\text{m}$ 的能量要高于 $3\sim 5\ \mu\text{m}$ 的能量,即使烟囱和火焰部位长波也比中波的红外辐射能量强,原因是长波红外要比中波红外的透射波段范围宽。从提高探测距离或信噪比的角度出发,选择长波红外制导要比中波有利。

3.2 有好的红外透射窗口和高的红外透过率

$3\sim 5\ \mu\text{m}$ 和 $8\sim 14\ \mu\text{m}$ 均是大气红外透射窗口,仅从窗口的角度这两个波段均可以选择。通过前面中、长波段大气透过率的计算得到:①两个波段的透过率与地域、季节、大气能见距、目标探测距离等有关;②夏季近距离(4 km 以内)目标探测时长波比中波红外的透过率高,远距离目标探测长波比中波红外的透过率低;③冬季不论距离远近长波比中波红外的透过率高。

3.3 抗干扰能力强

反舰导弹的红外成像制导面临海上自然和人为干扰的问题,对于舰船目标的红外自动识别和自动跟踪,必须具备较强的抗干扰能力。海面亮带和鱼鳞波是一种比较典型的自然干扰,通过海上实测试验,发现长波红外对此类干扰的抗干扰能力比较强,其背景较干净,探测识别和跟踪目标比较有利,而中波红外则表现的较差。

在抗人为干扰方面,目前面临的干扰类型主要

是烟幕、红外诱饵、红外假目标、激光等。针对烟幕和红外诱饵干扰,长波红外要强于中波红外的抗干扰能力;针对红外假目标和激光干扰,两个波段差别不大,可能中波的优势明显些。

3.4 其他方面

在其他方面,如红外探测器的技术成熟度、成像的分辨率、成像系统的价格等,一般来说中波红外占据一定优势,国内这方面分析研究较多,如蔡毅、王岭雪在文献^[12]中的分析,本文不再具体分析研究。

4 结语

以上基于海上舰船目标特性、大气传输、抗干扰等技术,对中波和长波红外成像制导技术进行了对比研究,两个红外波段大气传输透过率和热成像技术的部分对比,得出了各自的优缺点和一些研究结果,为反舰导弹红外成像制导进行工作波段的选择提供技术参考。针对海上具体的作战环境,红外成像波段的选择,需要结合多方面的因素综合考虑,趋利避害,以求得最佳的应用方案。

参考文献:

- [1] 赵晓. 掠海导弹红外辐射特性研究[D]. 西安: 西安工业大学, 2007.
- [2] 汪中贤, 樊祥. 红外制导导弹的发展及其关键技术[J]. 飞航导弹, 1998(10): 14-19.
- [3] 吴宗凡, 柳美琳, 张绍举. 红外与微光技术[M]. 北京: 国防工业出版社, 1998.
- [4] 季卫东, 胡江华, 李晓光, 等. 舰船的红外辐射特性[J]. 舰船电子对抗, 2007(5): 43-45.
- [5] 王学伟, 王世立, 李珂. 舰船目标红外图像特性研究[J]. 应用光学, 2012(5): 837-840.
- [6] 孟凡斌, 郑丽. 基于 LOWTRAN 7 的红外大气透过率计算方法[J]. 光电技术应用, 2009(3): 29-66.
- [7] 邢强, 任海刚, 陈汉平, 等. 经过大气传输的红外热像仿真[J]. 红外与激光工程, 2007(1): 43-46.
- [8] 陈波若. 红外系统[M]. 北京: 国防工业出版社, 1998.
- [9] 李楠, 何友金. 基于大气传输软件激光透过率对比研究[J]. 海军航空工程学院学报, 2005, 20(4): 425-428.
- [10] 吴诚, 苏君红, 潘顺臣, 等. 对中波与长波红外焦平面热成像的一些探讨[J]. 红外技术, 2002, 24(2): 6-8.
- [11] 邢素霞. 红外热成像与信号处理[M]. 北京: 国防工业出版社, 2011.
- [12] 蔡毅, 王岭雪. 红外成像技术中的 9 个问题[J]. 红外技术, 2013, 35(11): 671-682.