

文章编号: 1672-8785(2011)03-0023-06

基于作用距离的红外探测系统 工作波段选择方法

徐振亚 白晓东 李丽娟

(中国空空导弹研究院, 河南 洛阳 471009)

摘 要: 选择合适的工作波段对获得性能优越的红外探测系统具有十分重要的意义。通过对红外探测系统与高光谱遥感工作波段的选择原则进行比较, 从探测原理出发, 结合高光谱遥感类间可分性的波段选择思想, 发展了一种基于作用距离的波段选择方法。仿真结果表明, 这种方法是可行的, 能有效地计算出符合要求的工作波段参数。

关键词: 红外探测系统; 波段选择; 高光谱; 作用距离

中图分类号: O439 **文献标识码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.1672-8785.2011.03.006

Selection of Operating Waveband for Infrared Detection System Based on Working Distance

XU Zhen-ya, BAI Xiao-dong, LI Li-juan

(China Airborne Missile Academy, Luoyang 471009, China)

Abstract: It is very important for a high performance infrared detection system to select an appropriate operating waveband. By comparing the operating waveband selection criteria of infrared detection systems with those of hyperspectral remote sensors, a waveband selection method based on working distance is proposed according to the detection principle and the hyperspectral classification. The simulation result shows that this method is feasible and can be used to calculate the desired operating waveband parameters effectively.

Key words: infrared detection system; waveband selection; hyperspectral; working distance

1 引言

工作波段选择是红外探测系统总体设计中十分重要的问题之一。选择使用合适的工作波段对红外探测系统的性能有非常大的影响。目标和背景的辐射特性、大气传输特性、对抗自然背景和人工干扰能力的要求、可用光学材料的透过率及其性价比等多种因素对最终确定红外探测系统的工作波段都有影响, 因此工作波段的确定必须综合考虑到上述各种因素^[1]。

2 工作波段选择方法

2.1 红外探测系统

目前, 人们通常是先选定波段的起始或截止波长, 同时考虑可使得到的目标信号足够大、目标和背景的信噪比接近最大值的选择判据, 最终经详细计算得到工作波段的^[2]。设计双波段或多波段红外探测系统是为了能够充分利用目标、干扰以及背景之间的光谱信息, 提高红外探测系统的抗干扰能力, 因此在选择判据中, 目

收稿日期: 2010-12-08

作者简介: 徐振亚 (1985-), 男, 山东曹县人, 硕士研究生, 主要从事红外成像制导探测技术研究。E-mail: xzy17342@163.com

标和干扰及背景的双色比或多色比等应具有相当高的区分度。一般情况下,设计者通常会通过分析目标、干扰以及背景的光谱辐射特性,并结合实际工作经验选择一些潜在的波段组合来进行性能比较,最终从中选出性能相对较佳的组合作为最终的工作波段。这种工作波段组合缺少合适的理论支撑,说服力较差。

在红外成像探测技术方面,哈尔滨工业大学的张伟等人^[3]是根据探测理论导出一个用以区分弱小目标和杂波的代价函数,并利用匹配追踪算法找到一个近似最小的代价函数,进而确定滤波器的参数的。但是对于实际的设计者来讲,这种方法不太容易控制波段探测和性能识别,对考虑复杂背景的工作波段的选择更不适用。因此,寻找一种简单、有效的波段选择方法显得十分有必要。

2.2 高光谱遥感技术

高光谱遥感技术是人们为了获得更高的物质探测和识别能力而通过把光谱分辨率和空间分辨率相结合发展起来的技术,其光谱分辨率在 $\lambda/100$ 左右。由于工作波段多,每一个波段都是独立地形成一幅图像,总体数据量极其庞大。同时,由于光谱分辨率较高,相邻波段间形成的图像具有很大的相关性,使得多个波段之间存在相当大的数据冗余。如何既能有效利用高光谱数据,同时又能对其进行较快处理成为高光谱数据处理研究的重要方向^[4]。波段选择是遥感图像识别与分类的重要环节之一,至今已形成了比较成熟的波段选择算法^[5]。

在高光谱领域中,最佳波段的选择原则有三点:(1)所选波段的信息量应最大;(2)所选波段数据间的相关性要小;(3)待识别目标与背景的光谱响应差异大,目标与背景之间容易区分。目前,按信息量选择原则和类间可分性,可将工作波段选择方法分为两类。

本文主要参考高光谱波段选择中基于类间可分性的思想,通过已知样本地物的空间分布或具体光谱信息,分别以拍摄到的高光谱图像或具体光谱为计算数据,计算各波段或波段组

合在区分不同样本地物之间的统计距离。距离越大,相关系数越小,表明波段或波段组合的类间可分性越好,两种样本越容易区分。具体的评价函数包括均值间的标准距离、离散度、混合距离和光谱相关系数等。

3 基于作用距离的研究方法

3.1 选择方法概述

通过比较红外成像探测技术和高光谱遥感技术的波段选择原则可知,两者都希望通过计算比较找到易将兴趣目标从背景中区分出的波段或波段组合。然而,红外成像探测技术在强调区分目标类辐射源与背景类辐射源的同时,对波段所能获得的目标类辐射源的辐射能有尽可能大的要求。其目的是提高信噪比,增加系统的作用距离,而高光谱遥感技术对此没有提出明确要求。

因此,可以考虑通过以下方法来完成多波段红外成像探测技术的波段选择。

首先,设定探测距离指标,根据探测原理利用式(1)计算出不同起始波长恰好能够探测到目标类辐射源所需要的最小的波段带宽和截止波长,并将其作为待选波段或波段组合的组成波段。

$$\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} I(\lambda) \frac{\pi \tau_a(\lambda) \tau_o(\lambda)}{4} \frac{1}{A_m} \left(\frac{D}{R} \right)^2 R(\lambda) d\lambda = SNR \frac{\sqrt{A_d \Delta f}}{D_{\lambda_p}^* A_d} \quad (1)$$

其次,根据具体需要,在设定的识别距离指标下,计算各待选波段或波段组合上目标与其他非目标之间的区分度大小。

最后,通过综合考虑和比较,选择出能够满足实际需要的工作波段或波段组合。

3.2 评价函数

根据红外成像探测技术的经验和对高光谱类间可分性波段选择方法的了解,在实际的波段选择过程中可采用以下评价函数:

3.2.1 单波段选择评价函数

(1) 灰度差

记 t 和 c 为成像系统视场中目标和干扰两类辐射源, G_t 和 G_c 分别为两类辐射源在输出图像上的灰度值, 可得:

$$\begin{cases} G_t = K \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} P_t(\lambda) R(\lambda) d\lambda \\ G_c = K \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} P_c(\lambda) R(\lambda) d\lambda \end{cases} \quad (2)$$

式中, K 为探测器的灰度变换系数, P_t 和 P_c 分别为目标-干扰两类辐射源在单个探测器像元上的辐射功率, 因此:

$$\Delta G = |G_t - G_c| \quad (3)$$

(2) 灰度对比度

当干扰为点辐射源时, 使用灰度差具有较好的效果。但是当干扰为面辐射源时, 使用对比度作为评价函数能够更好地说明问题, 同时还可以避免大灰度差——小对比度的情况出现。

记 C_{tc} 为目标-干扰两类辐射源在输出图像上的对比度, 则有:

$$C_{tc} = \left| \frac{G_t - G_c}{G_t + G_c} \right| \quad (4)$$

3.2.2 双波段选择评价函数

双波段选择评价函数与单波段选择评价函数比较相似。考虑到需对双波段的互补性进行比较, 可使用双色比差和双色比对比度作为双波段选择评价函数。

(1) 双色比差

假设 G_{t1} 和 G_{t2} 分别为目标类辐射源通过 1 和 2 两个波段后在输出图像上得到的灰度值, G_{c1} 和 G_{c2} 分别为干扰类辐射源通过两个波段后在输出图像上得到的灰度值, 可得:

$$\begin{cases} B_t = \frac{G_{t1}}{G_{t2}} \\ B_c = \frac{G_{c1}}{G_{c2}} \end{cases} \quad (5)$$

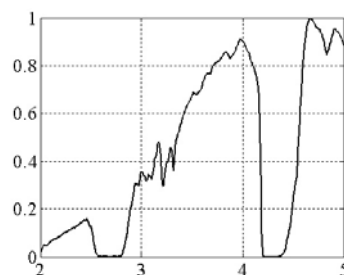
$$\Delta B = |B_t - B_c| \quad (6)$$

(2) 双色比对比度

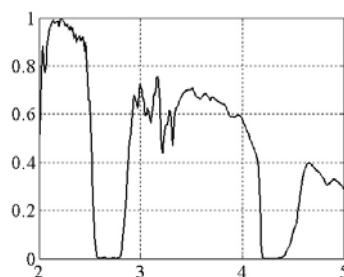
$$CB_{tc} = \left| \frac{B_t - B_c}{B_t + B_c} \right| \quad (7)$$

4 数值模拟结果

根据研究方法介绍, 利用 MATLAB 编写程序对波段选择进行数值仿真。假设系统的探测目标是干扰为 1200K 的 550K 黑体, 我们可以得到目标和干扰在系统窗口前的相对光谱辐射曲线, 如图 1 所示。



(a) 目标



(b) 干扰

图 1 目标及红外干扰的辐射光谱

大气透过率可通过 LOWTRAN 计算获得。计算条件为: 1976 年的标准大气模型, 水平路径传输, 乡村气溶胶 5km 能见度, 无云无雨, 6km 海拔, 12km 传输距离。大气透过率曲线如图 2 所示。

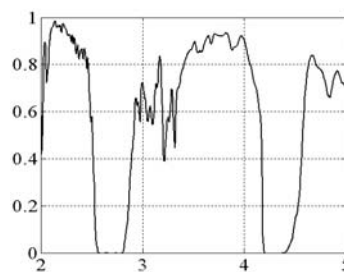


图 2 由 LOWTRAN 计算出的大气透过率曲线

其他条件^[6,7]为: 衍射斑面积 $A_m = 2.5 \times 10^{-5} \text{cm}^2$, 光学系统的入瞳直径为 7.5cm, 探测器的像元尺寸 $A_d = 30\mu\text{m} \times 30\mu\text{m}$, 系统带

宽 $\Delta f = 1\text{MHz}$ ，可靠探测所需信噪比值取 8， $D_{\lambda p}^* = 4 \times 10^{10}(\text{cm} \cdot \text{Hz})^{1/2}/\text{W}$ 。我们可以得到探测距离指标分别为 12km 和 8km 时待选波段初始波长与对应带宽的关系曲线，如图 3 所示。

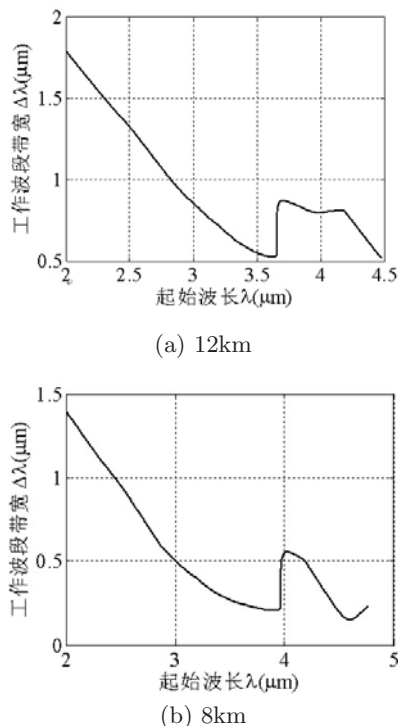


图 3 探测距离指标分别为 12km 和 8km 时待选波段初始波长与对应带宽的关系曲线

利用波段及组合性能评价函数对目标-干扰在待选波段或组合上的区分度进行比较，可以得到图 4 所示的区分度分布。

从图 4 中可以看出，对目标具有相同探测性能的各波段对目标-干扰的区分度满足：靠近短波段方向的波段具有相对较大的区分度。假设可分辨目标和干扰灰度差阈值对应的功率为 $3 \times 10^{-7}\text{W}$ ，对比度阈值为 0.97，则可知图 4 中阴影部分所对应的波段满足性能要求。假设经综合考虑后确定起始波长为 $2.5\mu\text{m}$ 时所对应的波段可以作为工作波段，参照图 3 即可知工作波段为 $2.5\mu\text{m} \sim 3.8\mu\text{m}$ 。

对于双波段探测，假设其中一个波段为主要探测波段，具有较大的探测距离；另一个波段为存在红外干扰时用于目标识别的辅助波段，

具有较小的探测距离。

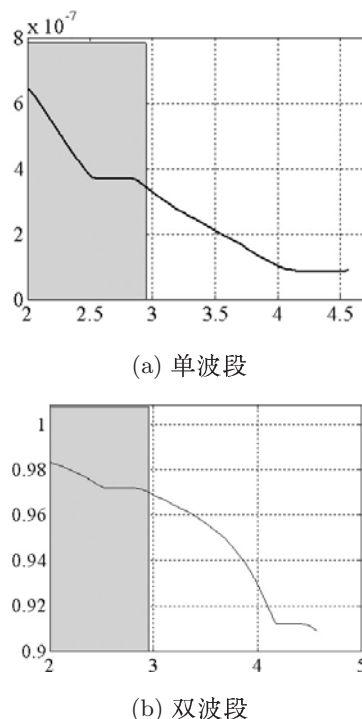


图 4 以辐射亮度差和对比度为评价函数说明各波段对目标和干扰的区分度

假设主波段的探测距离指标为 12km，次探测波段的指标为 8km，生成的待选波段如图 3 所示。此时，所有可能的探测波段组合对目标-干扰的双色比区分度如图 5 所示。

从图 5 中可以看出， 45° 对角线附近的波段组合具有相对较小的双色比区分度，即波段间的重叠会导致双色比区分度降低，不利于目标-干扰区分。同时，在 -45° 对角线的两端，对应的波段组合具有相对较大的双色比区分度，即两波段相差较大的波段组合具有较大的区分度。这些与波段选择的经验相一致。假设系统能够可靠区分目标与非目标的双色比差阈值为 2、双色比对比度阈值为 0.4，可以知道图 5 中阴影部分所对应的波段可以使用。结合其他情况即可确定具体的工作波段参数。

为了方便在波段选择中选择合适的作用距离指标，我们进行以下分析讨论：

(1) 单波段选择时探测距离指标与区分度之间的关系

保持光学系统等参数不变, 讨论当生成待选波段的探测距离分别为 6km、9km、12km 和 15km 时识别验证距离 5km 处的目标-干扰区分度。

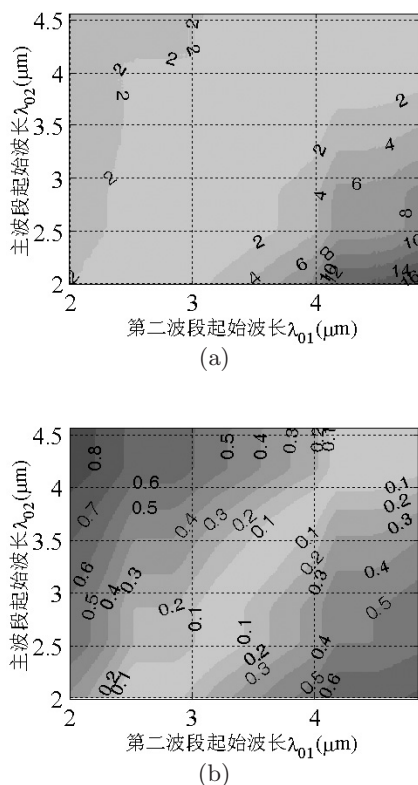


图 5 双波段工作时, 各待选波段组合区分目标-红外诱饵弹干扰的能力比较

由表 1 可知, 随着探测距离值的增大, 目标-干扰之间的灰度差和对比度也在增加。由于干扰的辐射强度在各波段均比目标的辐射强度大, 探测距离值的增大导致待选波段的带宽也在增加, 显然有利于目标-干扰的区分。

(2) 双波段选择时两个探测距离指标的选择与双色比区分度之间的关系

由表 2 可知, 当主次探测距离相等时, 随着探测距离的增加, 双色比区分度会降低; 当主次

探测距离不等时, 随着主探测距离的增加和次探测距离的减小, 双色比的区分度会增加, 反之双色比的区分度会降低。

在确定的波段选择范围内, 主次探测距离的增加将导致该范围内两个波段间的最大差异越来越小, 双色比的区分度自然也会降低; 同理, 在确定的波段选择范围内, 主探测距离的增加和次探测距离的减小将会增加该范围内两个波段间的最大差异, 进而增加双色比区分度。

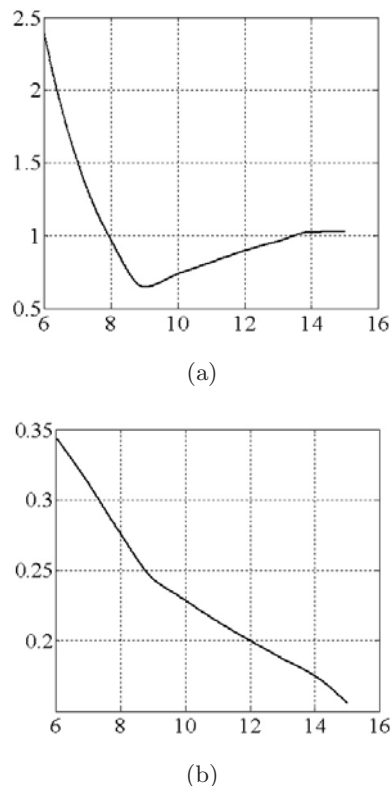


图 6 $R_1=9\text{km}$ 时 R_2 与双波段最大区分度的变化曲线

5 结论

由仿真结果可知, 利用基于作用距离的工作波段选择方法, 可以简单、有效地计算出符合

表 1 探测距离指标与最大区分度之间的关系

距离指标	R=6km	R=9km	R=12km	R=15km
最大区分度				
灰度差 (*K)	1.0×10^{-3}	3.0×10^{-3}	6.0×10^{-3}	1.1×10^{-2}
对比度	0.8193	0.8524	0.8670	0.8805

表 2 探测距离指标与双色比区分度之间的关系

距离指标 最大区分度	$R_1 = R_2 = 6\text{km}$	$R_1 = R_2 = 9\text{km}$	$R_1 = R_2 = 12\text{km}$
双色比差	1.2615	0.6491	0.3458
双色比对比度	0.3786	0.2443	0.1461

系统探测和识别要求的工作波段参数。这对于确定红外探测系统的工作波段和设计探测系统都是有参考价值的。

参考文献

- [1] 范晋祥. 高性能红外成像探测系统设计中值得重视的几个问题 [J]. 红外与激光工程, 2006, 35(S1): 20-27.
- [2] 郑志伟, 白晓东, 胡功衡, 等. 空空导弹红外导引系统设计 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2007: 98-99.
- [3] 张伟, 李克新, 武春风, 等. 多光谱目标探测的波段选择 [J]. 光学技术, 2005, 31(6): 893-897.
- [4] 董延华. 超光谱遥感图像处理关键技术研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨理工大学, 2006.
- [5] 苏红军, 杜培军, 盛业华. 高光谱影像波段选择算法研究 [J]. 计算机应用研究, 2008, 25(4): 1093-1096.
- [6] 柴金广, 刘云猛. 空间低温点目标红外探测系统的作用距离的计算与等效测试 [J]. 红外, 2010, 31(1): 8-11.
- [7] 吕明春, 梁红卫. 中长波红外辐射模拟的等效性研究与应用 [J]. 红外与激光工程, 2008, 37(6): 963-967.

新闻动态 News

美国第一颗导弹预警卫星 即将发射

据 www.lockheedmartin.com 网站报道, 由美国空军 / 洛克希德·马丁公司领衔的天基红外系统 (SBIRS) 团队已经成功完成第一颗地球同步 (GEO-1) 卫星的最后总体系统测试, 验证了该卫星的性能和功能, 准备运往发射场, 并将于 2011 年春季发射。

此前, 美国已经发射过多个 SBIRS 高倾斜轨道有效载荷, 这些有效载荷都已达到或超过所有性能要求。GEO-1 卫星的发射将可以大大增强美国的导弹预警能力, 同时还可以支持美国其他一些重要的安全飞行任务, 如导弹防御、技术情报和战场感知任务等。

美国空军有关人员认为, 由政府和企业组成的联合团队已经取得了巨大的进步, 并在第一颗 SBIRS 地球同步卫星的发射准备方面展现出了其非凡的责任性。GEO-1 卫星最后总体系统测试的成功完成使得他们对 SBIRS 飞行任务的成功执行充满信心, 该卫星将为美国提供前

所未有的持久全球红外监视能力。



图 1 SBIRS GEO-1 卫星

□ 高国龙