中波红外隐身目标光谱探测的谱带选择方法

林 涛[1],刘 飞[1],韩平丽[1],邵晓鹏[1],任 勐[2],吕鸿鹏[2],张建奇[1]

(1. 西安电子科技大学 物理与光电工程学院,陕西 西安 710071;
2. 西安现代控制技术研究所,陕西 西安 710065)

摘 要: 针对采用各种隐身技术的红外目标与周围背景之间的辐射差异不明显,导致探测困难这一问题,利用目标和背景在窄波带内的辐射特征具有较大差异这一特性,建立了基于红外光谱探测的谱带内红外辐射对比度的研究。通过对红外辐射相对对比度以及绝对对比度的分析,综合大气条件在整个传输过程中的影响,结合理论计算以及实验分析确定出用于红外隐身目标探测的最优谱带为 2.86~3.30 μm 和 4.17~4.55 μm 两个窄波带。实验结果表明:在所选取的用于谱带探测的窄波带能够很好的消除背景红外辐射的影响,以此突出目标辐射,具有良好的可探测性。

关键词: 光谱探测; 红外隐身目标; 辐射对比度; 窄波带

中图分类号: TN29 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-2276(2014)04-1047-05

Band selection method of spectrum detection about medium wave infrared stealth target

Lin Tao[1], Liu Fei[1], Han Pingli[1], Shao Xiaopeng[1], Ren Meng[2], Lv Honpeng[2], Zhang Jianqi[1]

(1. Institute of Physics and Opto-Electronic Engineering, Xidian University, Xi′an 710071, China;
2. Xi′an Institute of Modern Control Technology, Xi′an 710065, China)

Abstract: A study establishing the infrared radiation contrast in wave band of infrared spectrum detection, based on the great difference of radiation characteristics in the narrow wave band about target and background, was proposed to accurately detect the infrared stealth targets whose infrared radiation characteristics were similar with that of background. The optimum wave band, through analyzing the relative contrast and absolute contrast of target and background and considering the influence of atmospheric conditions in the whole transmission procession, was determined 2.86-3.30 μm and 4.17-4.55 μm. The results show that the narrow wave band which was selected by infrared contrast could eliminate radiation of background well, highlighting the target radiation and enhancing the detectability of target.

Key words: spectrum detection; infrared stealth target; radiation contrast; narrow waveband

收稿日期: 2013-08-10; **修订日期:** 2013-09-25

基金项目: 国防科工局基础科研项目(A0920110004)

作者简介: 林涛(1969-),男,博士生,主要从事光电对抗及信息处理研究方面的工作。Email:taolin@dhld.com.cn

导师简介: 张建奇(1968-),男,博士,教授,博士生导师,主要从事光电对抗方面的工作。Email:jqzhang@mail.xidian.edu.cn

0 引 言

随着光电技术等高科技领域成果不断涌现和发展,各种干扰与对抗措施也在不断进步,战术导弹所面临的战场环境日益复杂,对抗性更加激烈[1],而且精确制导导弹、炮弹等武器的大量使用,战场地面机动设备的防护已经成为现代战争中必须考虑的关键问题之一[2]。全球近十几年的多次局部战争统计数字表明,94%的飞机毁损于导弹,其中红外制导约占 90%。红外制导作为先进的寻的制导方式在各个国家的武器系统中受到广泛关注[3]。但是红外隐身技术的快速发展及应用对红外制导武器的命中率造成了很大的影响,如何快速准确的进行目标探测,实施精确打击就成为了近年国内外研究的主要方向。

随着光谱技术的迅速发展,且基于自身分辨率高、有利于定量分析等的优点,使得光谱技术在目标探测方面也具有广泛应用。而对于探测波段的选择是利用光谱技术进行目标探测的关键,对此国内外在这方面也进行了一些相应的研究。国内西安电子科技大学的宗靖国等对隐身飞机尾焰的红外辐射特性进行了研究,得到了在几种常见隐身措施下尾焰辐射能量集中的谱带[4]。中科院上海技物所的高思莉等研究了飞机尾焰的红外辐射特征,建立了定量分析模型 [5]。国外 Jörgen Karlholm 和 Ingmar Renhorn 主要研究了如何选择合适的滤波器抑制背景杂波,得到更高的信噪比[6]。Arvind G Rao 等人则主要在尾焰的红外辐射特征建模和辐射谱带方面做了研究,分析了飞机尾焰的红外辐射特征及大气传输对其造成的影响[7]。

基于以上研究成果,从隐身目标的光谱探测方法出发,通过对目标和背景的光谱辐射的研究分析,综合探测波带内的目标和背景的特征差异,利用目标和背景的对比度特征,对隐身目标探测的波带进行选取。并从理论上进行了详细的分析和计算,对所选取的波带的适用性进行了详细的分析和证明。

1 红外隐身目标光谱探测的可行性分析

红外隐身目标光谱探测是受所选取谱带内目标自身和威胁物两种辐射特征控制的。其中目标特征的生成过程相对较复杂,不仅与目标辐射的难以预测有关,也与目标最接近背景难以预测有关[8]。在目标探测中,目标的特征即所有鉴别量的组合体,应是整个探测的关键与核心,鉴别量是指那些能将目标特征从其他相混的背景物体中分开的特性。因此,目标与背景在各个谱带中的辐射以及分布特性决定了红外隐身目标光谱探测方法的可行性以及实用性。

对于一般非成像传感器生成的目标特征可以从探测器瞬时视场中出现目标和没有出现目标时接收的信号的差别中简单求得,即定义红外对比度特征是含有不可分辨目标的探测器像元与其相邻像元的辐射之差[8]。而成像传感器所接收到的目标可分辨特征则不易被获取。目前,随着多模制导技术的发展,利用光谱鉴别的方法来分辨目标和背景,是目标探测的一种有效手段。

如图 1 所示,红外隐身目标探测识别系统可利用目标的辐射特征和谱线特征,这两种主要特征与目标自身的光谱辐射量、大气辐射传输以及探测器光谱响应特性等有关。以图 1 中的目标红外光谱辐射模型、典型天空背景辐射特性模型及大气辐射特性模型等各个模型为基础,将分离的数据进行合并处理,综合红外隐身目标、背景辐射特性和目标谱线特征提取的框架,建立目标的对比度特征用以红外隐身目标的光谱探测。

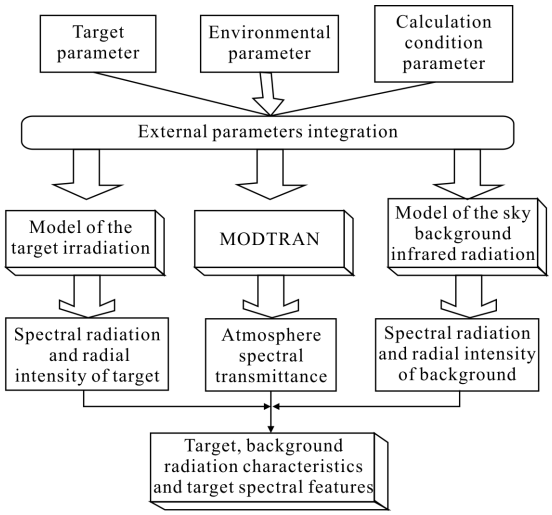


图 1 红外隐身目标辐射特性和谱线特征提取框架

Fig.1 Diagram of target radiation and spectral feature extraction

2 红外隐身目标的对比度特征研究

2.1 红外辐射对比度分析

红外辐射对比度有多种表示方法，由于多数辐射源一定条件下可以视为灰体，并且在工程计算中有足够的准确度，因此常采用辐射出射度表示的目标红外辐射对比度[9]。由 Planck 公式和Wien 位移定律可知，一般红外隐身目标尾焰辐射出射度的峰值波长都在 2~5 μm 内，因此研究红外隐身目标与背景的特征在这一波段的对比度具有重要意义。

设目标温度为 T_o，背景温度为 T_B，环境温度为 T_E，可得出目标和背景在 2~5 μm 的有效辐射出射度分别为[8]：

$$M_1=\varepsilon_O M_O+(1-\varepsilon_O)M_E+(1-\varepsilon_O)M_B \tag{1}$$

$$M_2=\varepsilon_B M_B+(1-\varepsilon_O)M_E \tag{2}$$

式中：ε_o、ε_B 分别为目标和背景的发射率；M_O、M_B 和 M_E 分别为相同温度的黑体的辐射出射度，可表达为[8]：

$$M_O=\int_2^5 \frac{C_1}{\lambda_5}\cdot\frac{1}{e^{C_2/\lambda T_o}}\mathrm{d}\lambda \tag{3}$$

$$M_B=\int_2^5 \frac{C_1}{\lambda_5}\cdot\frac{1}{e^{C_2/\lambda T_B}}\mathrm{d}\lambda \tag{4}$$

$$M_E=\int_2^5 \frac{C_1}{\lambda_5}\cdot\frac{1}{e^{C_2/\lambda T_E}}\mathrm{d}\lambda \tag{5}$$

则目标和背景的辐射对比度为：

$$C=\frac{|M_1-M_2|}{\max\{M_1,M_2\}} \tag{6}$$

2.2 红外隐身目标对比度特征研究

对比度特征是描述目标特征的基本特征，对目标红外信号的探测，在很大程度上取决于目标与周围背景之间的对比度，由于大气对于目标和背景的对比度的影响，故应对目标的对比度做更为仔细的定义与分析，由对比度的基本性质可知，同一物理量所表示的对比度还可分为绝对对比度和相对对比度。

(1) 绝对对比度

目标背景的绝对对比度定义为[9]：

$$C_A=N_T-N_B \tag{7}$$

式中：下标 T 和 B 分别指目标和背景的辐射，在机载目标的情况下，背景辐射为来自目标(尾焰)平面后的大气辐射。绝对对比度的单位即辐射量的单位。

(2) 相对对比度

在实际情况下，经常能见到的是相对对比度[9]，其定义为：

$$C_R=\frac{N_T-N_B}{\frac{1}{2}(N_T+N_B)}\approx\frac{N_T-N_B}{N_B} \tag{8}$$

目标辐射在传输到探测器的过程中经历了大气的消光作用(包括吸收和散射)，同时大气或太阳的辐射又会构成一定的背景辐射，因大气消光减小了对比度，故对相对对比度也存在影响。则定义经过大气传输之后的目标和背景的辐射度为：

$$n_T=E_{p_detector}=N_T\tau+N_{ae}$$

$$n_B=E_{B_detector}=N_B\tau+N_{ae} \tag{9}$$

式中：τ 为谱带内平均大气传输率；N_{ae} 为同一谱带内的大气路径辐射亮度。

由此，两种传输的对比度可写为：

$$c_A=n_T-n_B=\tau(N_T-N_B)=\tau C_A \tag{10}$$

$$c_R=\frac{n_T-n_B}{\frac{1}{2}(n_T+n_B)}=\frac{\tau(N_T-N_B)+N_{ae}-N_{ae}}{\frac{1}{2}\tau(N_T-N_B)+N_{ae}}\approx$$

$$\tau C_R\left(\frac{N_B}{\tau N_B+N_{ae}}\right) \tag{11}$$

综上分析，在短的水平路径时，对于相对对比度则有 $N_B\tau+N_{ae}\approx N_B$，可得 $c_R\approx\tau C_R$。

3 实验结果及分析

选择计算条件为：低云，云底高 3.0 km，云顶高 4.0 km，太阳天顶角 60°，探测器天顶角 30°，太阳方位角 0°，探测器方位角 180°，视场因子 0.9，观测距离 5 km，飞行高度 4 km，圆喷口，喷口半径 0.31 m，喷口尾焰温度尾焰 800 K。结合参考文献[4]中公式(16)和参考文献[10]中的公式(3-25)~(3-27)及上节对比度的相关分析，计算获得图 2 和图 3 的实验结果。其中图 2 中，图(a)、(b)为目标和背景的红外辐射，图 3 所示为不同波段红外辐射对比度。

由图 2(a)可以看出，目标能量集中在 2 200~2 410 $\mathrm{cm^{-1}}$ 和 3 000~4 400 $\mathrm{cm^{-1}}$ 两个波段；图 2(b)中相应波段的背景辐射能量较低。即在这两个波段内弱辐射背景能够明显突出强辐射目标。

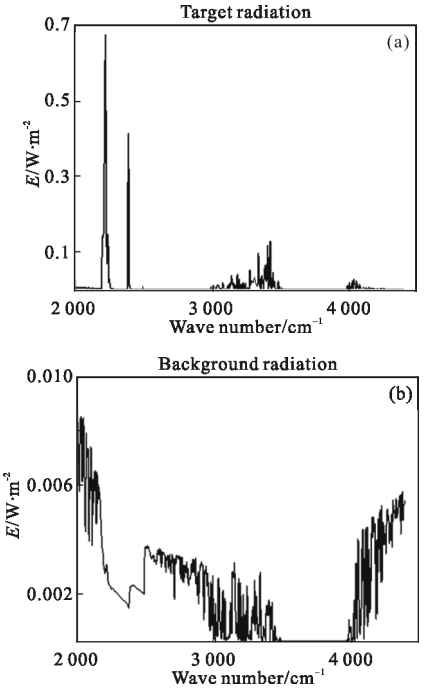
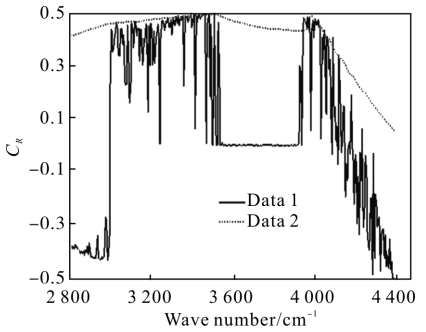


图 2 目标和背景的辐射强度

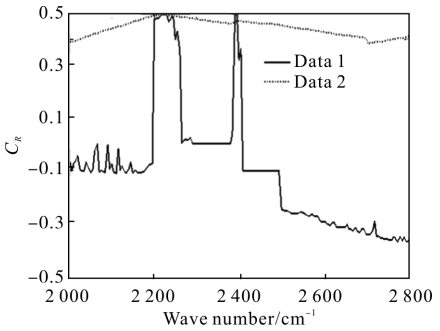
Fig.2 Radiation intensity of target and background

图 3 中横坐标为波数,曲线 1(数据 1)为以 5 cm^{-1} 光谱间隔计算的光谱对比度,曲线 2(数据 2)为积分对比度。



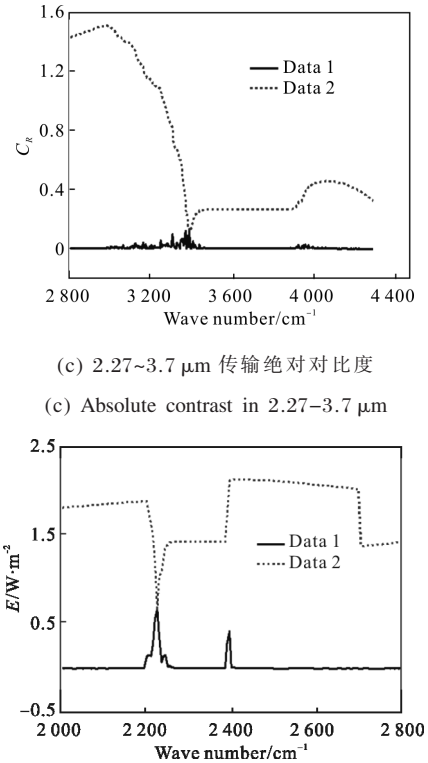
(a) 2.27~3.7 μm 传输相对对比度

(a) Relative contrast in 2.27–3.7 μm



(b) 3.7~5 μm 传输相对对比度

(b) Relative contrast in 3.7–5 μm



(c) 2.27~3.7 μm 传输绝对对比度

(c) Absolute contrast in 2.27–3.7 μm

(d) 3.7~5 μm 传输绝对对比度

(d) Absolute contrast in 3.7–5 μm

图 3 目标及背景辐射、传输对比度在波段的分布

Fig.3 Distribution of contrast about target and background radiation in waveband

光谱对比度指目标和背景在某个光谱谱带内的辐射强度之差与谱带内背景辐射强度之比;积分对比度指:以光谱对比度的峰值为起始/结束波长,以某点(x 点)的波长(图中横坐标)为结束/起始波长进行积分,计算此波段的对比度,计算结果为某点(x 点)的结果(图中纵坐标)。积分绝对对比度曲线最低点一般是光谱绝对对比度的峰值点, 曲线的驻点说明随积分波段范围扩展波段内的能量差反而减少。

图 3(b)和(c)中曲线 1 中存在明显峰值,证明在 2 200~2 410 cm^{-1} 和 3 000~4 400 cm^{-1} 两个波段内弱背景能够突出显示目标, 且目标存在显著的对比度特征。

在 3 000~4 400 cm^{-1}(2.27~3.7 μm)波段,由图 3(c)中的曲线 1 可以定位此波段光谱传输绝对对比度的峰值波长为 3 445 cm^{-1}(2.90 μm);并分别计算 3 445~2 700 cm^{-1} 和 3 445~4 400 cm^{-1} 波段内的积分传输绝对对比度,即图 3(c)中的曲线 2。

由积分传输绝对对比度曲线可得以下结论:

(1) 3 445~3 495(2.86 μm)处传输绝对对比度在上升后保持平缓到 4 000 cm^{-1}(2.50 μm)处继续上升，上升趋势在 4 100 cm^{-1}(2.44 μm)处再次停止，然后自 4240 cm^{-1}(2.36 μm)处开始持续下降。另外，从 3495 cm^{-1} (2.86 μm)峰值点到 4 100 cm^{-1}(2.44 μm)峰值点，传输绝对对比度从 0.257 上升到 0.445。

(2) 传输绝对对比度在 3 445 cm^{-1} 到 3 035 cm^{-1} (3.30 μm)上升后持续下降。在此唯一上升阶段，传输绝对对比度从 0.134 上升到 1.47。

(3) 可以确定 2.27~3.7 μm 波段内对增强目标与背景对比度有益的波段范围应该是 3 495~3 035 cm^{-1} (2.86~3.30 μm)波段。

同理确定 2 200~2 410 cm^{-1} (4.15~4.55 μm) 波段内能够有效增强目标与背景对比度的波段为 2 200~2 400 cm^{-1}(4.17~4.55 μm)。

表 1 为不同波段内对比度数值，其中相对对比度 C_R 在 2.86~3.30 μm 和 4.17~4.55 μm 波段存在极大值，即红外弱小目标检测最优谱带。

表 1 不同波段范围对比度变化

Tab.1 Variation of contrast in different wavebands wave bands

Waveband	2.86–3.30 μm	4.17–4.55 μm	2.27–3.33 μm	4.15–4.55 μm	3.5–5 μm
$E_{p-detector}$	8.37	17.12	10.28	17.19	18.38
$E_{B-detector}$	0.37	0.40	1.74	0.42	2.93
Transmittance	0.25	0.06	0.28	0.09	0.61
C	8.00	16.72	8.54	16.77	15.45
C_R	1.83	1.91	1.42	1.90	1.45

以上分析论证了隐身目标尾焰的峰值光谱辐照度在特定窄波带内具有良好的可探测性。

4 结　论

针对空中隐身目标自身红外辐射特征不明显导致探测困难这一问题进行研究，利用目标和背景在红外光谱谱带内辐射特征的明显差异，分析研究两种红外辐射对比度(绝对对比度和相对对比度)。结果表明：在 2.86~3.30 μm 和 4.17~4.55 μm 波段目标的红外辐射特征明显强于背景的辐射特征，即红外隐身目标的对比度特征明显。由此选择进行红外隐身目标探测的最佳谱带为 2.86~3.30 μm) 和 4.17~4.55 μm)。且红外目标的对比度特征是一种表征目标和背景的差异的良好方式，依此为依据进行目标探测具有良好可行性。

参考文献：

[1] Wang Jingli. Maximum band screening and its application to hyperspectral target detection [J]. ***Infrared and Laser Engineering***, 2012, 41(6): 1514–1519. (in Chinese)

[2] Xu Fuyuan, Gu Guohua, Qian Weixian, et al. Research of CFAR in infrared airspace small target detection system [J]. ***Infrared and Laser Engineering***, 2012, 41 (9): 2554–2558. (in Chinese)

[3] Xu Dingguo, Feng Weilin, Sang Jianhua. IR characteristics of aircraft aft fuselage skin [J]. ***Infrared and Laser Engineering***, 2013, 42(1): 7–13. (in Chinese)

[4] Zong Jingguo, Zhang Jianqi, Liu Delian. Infrared radiation characteristics of the stealth aircraft [J]. ***Acta Photonica Sinica***, 2011, 40(2): 289–294. (in Chinese)

[5] Gao Sili, Tang Xinyi. Building model of the plume released from the flying machine and simulation [J]. ***Opto–electronic Engineering***, 2007, 34(8): 25–28. (in Chinese)

[6] Jörgen Karlholm, Ingmar Renhorn. Wavelength band selection method for multispectral target detection [J]. ***Applied Optics***, 2002, 41(32): 6786–6795.

[7] Rao A G. Infrared signature modeling and analysis of aircraft plume[J]. ***Int J Turbo Jet–Engines***, 2011, 28: 187–197.

[8] Lou Heli, Lv Xiangyin, Zhou Yuanpu, et al. Infrared radiation contrast between ground target and background [J]. ***Infrared and Laser Engineering***, 2012, 41 (8): 2002–2007. (in Chinese)

[9] Schmieder D E, Walker G W. The infrared and Electro–optical systems handbook: Countermeasure systems [C]// SPIE, 1994, 7(2): 22–25.

[10] Pan Hao. Calculation and image simulation of infrared radiation of cloud background [D]. Xi′an: Xidian University, 2006. (in Chinese)