

文章编号 1004-924X(2010)02-0341-08

采用杂波模型进行天基目标红外探测波段的选择

张 伟,曹移明,丛明煜,鲍文卓,孟祥龙

(哈尔滨工业大学 空间光学工程研究中心,黑龙江 哈尔滨 150001)

摘要:为了及时发现导弹目标,美国国防支援计划(DSP)系统采用了大气吸收波段进行探测。本文对该系统的波段设置及其选择方法进行了探索性研究,提出了一种基于背景杂波模型的波段选择方法。推导了简化的场景辐射参数表达式,建立了场景空间杂波辐射模型,分析了中短波红外吸收波段内背景杂波辐射的主要影响因素,给出了综合信噪比解析式。然后,在可能的目标辐射特性与背景杂波水平内选择出最佳工作波段,使得探测系统对辐射特性相似的一类目标的综合探测性能达到最佳。最后,通过算例说明了该方法的有效性。计算分析表明,系统最佳探测波段与场景的杂波辐射水平以及目标的辐射特征密切相关。在不同的杂波水平下,对两种发动机喷焰的目标探测时,DSP的最佳工作波段为 $2.73\sim 2.85\ \mu\text{m}$ 与 $4.2\sim 4.43\ \mu\text{m}$ 。

关键词:杂波模型;天基目标探测;波段选择;探测性能

中图分类号:TN216 **文献标识码:**A

Band selection for space-based infrared target detection using background clutter model

ZHANG Wei, CAO Yi-ming, CONG Ming-yu, BAO Wen-zhuo, MENG Xiang-long

(Research Center for Space Optical Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China)

Abstract: In order to detect missile targets as early as possible, atmospheric absorption bands are used in the U. S Defense Support Program (DSP). To explore the band settings and their selection methods for the DSP, a new method to choose the optimal detection bands based on a background clutter model is proposed. The simplified parametric expression for a scene radiation is deduced, and then the spatial clutter model is established. The main factors impacting the clutter radiance are analyzed in absorption infrared wavebands, and the Synthetic Signal-to-noise Ratio(SSNR) is given in an analytic form. Finally, the optimal bands are chosen in all the possible scene clutter levels and target radiation characteristics, which provides the best system performance for detecting the same kinds of targets with the similar radiation characteristics under different clutter levels. The validity of the method is illustrated by examples. Calculation and analysis results indicate that the optimal detection bands are dependent on the scene clutter level and target radiation characteristics. For detection two different engine plumes, the optimal bands for DSP are $2.73\sim 2.85\ \mu\text{m}$ and $4.2\sim 4.43\ \mu\text{m}$.

Key words: clutter model; space-based target detection; band selection; detection performance

收稿日期:2009-09-25;修订日期:2009-11-20.

基金项目:国家 863 高技术研究发展计划资助项目;“十一五”预研项目(No. 113020303)

1 引言

现役的美国国防支援计划(DSP)与天基红外系统高轨部分(SBIRS-HIGH)均利用卫星平台上的红外传感器探测与寻找固定区域或者全球范围内发射的弹道导弹的助推段^[1],并将警报信息提供给其他系统进行进一步跟踪与识别。

DSP 系统直接以地球与大气为背景,背景的复杂性与多样性直接影响了它对目标的准确探测。由于导弹目标的光谱辐射具有一定的选择性,大气透过率随着波段不同差异也很大,因此,如何选择合适的探测波段是该类系统论证阶段的重点与难点。DSP 系统选取了大气吸收波段进行目标探测,但具体波段位置以及波段的选择方法未见报道。本文旨在对 DSP 系统导弹目标的探测波段及其选择方法做探索性研究。

在红外遥感与侦察应用中,通常选用 3~5 μm 或 8~12 μm 大气窗口波段对目标进行监视与观测,以减少大气对目标能量的衰减^[2-3];DSP 系统选用大气吸收波段主要是为了降低地球与大气背景对探测的影响,因此,以往的波段选择方法在此已不适用。

为了选出最佳的导弹探测波段,需从目标与背景的光谱辐射特性着手,特别是背景辐射的起伏,即背景杂波辐射着手,它在背景抑制过程中很难被处理,对目标的探测性能影响最大。以往的波段选择方法没有考虑背景杂波对波段选择的影响^[4-5],因而存在局限性。在背景杂波研究方面,近几年涌现出多种量化尺度表征其复杂性^[6-8],但都没有给出解析的背景杂波辐射的计算模型。本文通过建立背景杂波噪声模型,结合电子学噪声,给出了一种基于背景杂波模型的大气吸收波段选择方法。综合考虑了杂波、电子学噪声与目标辐射特性等影响目标探测性能的诸多因素,使得系统能在不同背景杂波水平下对辐射特性相似的一类目标的综合探测性能达到最佳,并利用杂波辐射模型分析了中短波红外吸收波段内背景杂波辐射的主要影响因素,最后通过对 DSP 系统的探测波段进行计算分析,验证了该波段选择方法的有效性与合理性。

2 波段选择方法

由于 DSP 系统面临的探测场景复杂多变,被测目标的辐射光谱特性随着导弹发动机推进剂的组分不同也有所区别,因此,最佳探测波段的选择应在可能的目标辐射特性与背景杂波水平内综合考虑,使得系统在不同背景杂波水平下对弹道导弹尾焰的综合探测性能达到最佳。

为了实现对目标具有高探测概率与低虚警概率,不仅要求目标在该波段内信号最强,系统噪声最弱,还要求背景对目标区分造成的干扰最小,其中主要的干扰(虚警源)来自杂波。因此将系统噪声从广义上分为:(1)杂波噪声,来自背景辐亮度在二维空间上的差异;(2)传感器电子学噪声,由各种独立的噪声源引起。对 DSP 这类点目标探测系统,选用系统等效目标(SET)^[9]表示系统综合噪声较为合适,其物理含义与系统等效辐射强度相同。类似信噪比与信杂比的定义,定义系统综合信噪比为

$$\text{SSNR}_{\lambda_1 \sim \lambda_2} = \frac{I_{t(\lambda_1 \sim \lambda_2)} \cdot \tau_{a(\lambda_1 \sim \lambda_2)}}{\text{SET}_{\lambda_1 \sim \lambda_2}}, \quad (1)$$

其中, $I_{t(\lambda_1 \sim \lambda_2)}$ 为目标在波段 λ_1 与 λ_2 之间的辐射强度; $\tau_{a(\lambda_1 \sim \lambda_2)}$ 为大气透过率。SSNR 将传统的信噪比(SNR)与信杂比(SCR)相结合,综合表征了系统的探测性能。SET 可理解为 SSNR 为 1 时探测系统入瞳处的目标辐射强度,

$$\text{SET} = (\text{NET}^2 + \text{CET}^2)^{1/2}, \quad (2)$$

其中,NET 为噪声等效目标,定义为 SNR 为 1 时入瞳处的目标辐射强度;CET 为杂波等效目标,定义为 SCR 为 1 时入瞳处的目标辐射强度。

选取带宽 $\Delta\lambda$ 与中心波长 λ_c 为设计变量,SSNR 为目标函数对波段进行优化选择。具体步骤如下:求得不同目标辐射特性与背景杂波水平下的 SSNR 集合,从中对大于 SSNR 阈值的集合求交集,其上界所处的波段位置即为最佳探测波段。

$$S_i = \{\text{SSNR}_{\lambda_c^p, \Delta\lambda^q}^i > k_i\}_{p=1, \dots, P; q=1, \dots, Q}, \quad (3)$$

$$\text{SSNR}_{\lambda_c^*, \Delta\lambda^*} = \max_{i=1}^{m \times n} S_i. \quad (4)$$

其中, m 、 n 分别为目标辐射特性与背景杂波水平

的样本数; i 为样本序号, k_i 为SSNR阈值; S_i 为某特定目标与背景杂波下的SSNR集合; p 与 q 分别为中心波长与带宽序号; P 与 Q 为中心波长与带宽数目,由波段区间以及步长决定; λ_c^* , $\Delta\lambda^*$ 为最佳中心波长与带宽。

3 噪声等效目标

DSP红外传感器工作在背景限噪声条件下,即电子学噪声主要来自背景产生的光子噪声,其他噪声可近似不作考虑,于是NET近似为^[9]:

$$\text{NET} \approx \frac{hc\bar{n}_b}{A_o\tau_o\eta\lambda K\tau_{\text{int}}} R^2 f, \quad (5)$$

其中, h 为普朗克常数, c 为光速, η 为量子效率, τ_{int} 为积分时间, τ_o 为光学系统透过率, A_o 为光学系统入瞳面积, f 为光学系统焦距, R 为目标与传感器距离, K 为系统衰减因子, \bar{n}_b 为背景噪声光子数,

$$\bar{n}_b = \frac{A_d A_o \tau_o \tau_{\text{int}} \lambda_c \eta}{f^2 hc} \int \bar{L}_b(\lambda) d\lambda, \quad (6)$$

其中, A_d 为单个像元面积, $\bar{L}_b(\lambda)$ 为背景光谱平均辐射亮度。

4 杂波等效目标

杂波噪声是背景、传感器运动与传感器系统特性以及背景抑制算法综合影响的结果。一般而言,杂波噪声分为以下3类:(1)空间杂波;(2)时间杂波;(3)视线抖动引起的杂波。空间杂波来自背景场景的空间不均匀以及视线的运动;时间噪声由背景场景随时间变化引起;抖动杂波是指在观测辐射亮度呈现一定空间分布的背景时,由视线的高频振动引起的杂波。抖动引起的杂波噪声主要与平台的抖动频率与抖动幅度有关,与光谱位置无关,因此式(2)中忽略了抖动杂波,同时忽略时间杂波。令 σ_b^2 为背景辐射亮度在二维空间上的方差,GSD为地面像元分辨率,有:

$$\text{CET} = \sigma_b \cdot \text{GSD}^2. \quad (7)$$

4.1 空间杂波

功率谱密度PSD被认为是衡量场景杂波的非常有效的指标之一,在基于稳态过程的假设下,PSD定义为自相关函数的傅氏变换^[10]。背景辐射变化的统计特性由PSD描述,归一化形式为:

$$\sigma_b^2 = 2 \int_0^\infty S(k) dk, \quad (8)$$

其中, $S(k)=\text{PSD}$, k 为空间频率。PSD的解析表达式基于随机理论与测量数据得到,对均匀辐射源而言,PSD可写成柯西函数^[7],

$$S(k) = \frac{a\sigma_b^2}{\pi(a^2+k^2)}, \quad (9)$$

其中, a 为突变频率(PSD斜率由0变至-2时的频率), $a=(2\pi l_c)^{-1}$,其中 l_c 为相关长度,单位为km。

对辐射亮度呈现一定空间分布的背景而言,总的PSD等于场景中独立杂波源各自PSD的叠加^[10]。为简单起见,这里考虑部分云覆盖的场景,云覆盖比例为 P_c ,且不考虑多层云叠加的情况。此时场景中的杂波辐射源包括云层 $S_c(k)$ 、大气/地面 $S_o(k)$ 与云边缘 $S_e(k)$ 3部分,于是总PSD为:

$$S(k) = S_c(k) + S_o(k) + S_e(k), \quad (10)$$

其中:

$$S_c(k) = P_c \frac{a_c \sigma_c^2}{\pi(a_c^2 + k^2)}, \quad (11)$$

$$S_o(k) = (1 - P_c) \frac{a_o \sigma_o^2}{\pi(a_o^2 + k^2)}, \quad (12)$$

$$S_e(k) = \frac{a_e \sigma_e^2}{\pi(a_e^2 + k^2)}, \quad (13)$$

$$\sigma_e^2 = (1 - P_c) P_c |L_c - L_o|^2, \quad (14)$$

其中, L_c 与 L_o 分别为云与大气/地面的平均光谱辐射亮度。

对理想探测器系统(令传递函数为1),并忽略系统中其他滤波器,由(8)可得到总方差为:

$$\sigma_b^2 = P_c \sigma_c^2 + (1 - P_c) \sigma_o^2 + \sigma_e^2. \quad (15)$$

4.2 有云/无云场景辐射方差计算模型

大气对太阳的散射对杂波辐射的影响较小^[11],而且很难得到其精确解析表达式,为简化问题在计算场景辐射方差时忽略太阳辐射在大气

中的散射,场景的辐射模型可写成:

$$L_s = \int_{\Delta\lambda} [L_{\lambda,\text{earth}}\tau_{\lambda,0} + L_{\lambda,c}\tau_{\lambda,h_t} + L_{\lambda,a}(0,h_b)\tau_{\lambda,c} + L_{\lambda,a}(h_t,H)]d\lambda, \quad (16)$$

其中,第一项为地表的辐射亮度,第二项为云层的辐射亮度,包括自身辐射项与太阳辐射散射项,后两项为大气辐射的贡献。 h_b 为云底高度, h_t 为云顶高度, H 为大气层顶高度,本文取 100 km。 $\tau_{\lambda,0}$ 为地表到大气层顶的透过率, $\tau_{\lambda,c}$ 为云层透过率,

$$L_{\lambda,\text{earth}} = \epsilon_{\lambda,\text{earth}}B_{\lambda,\text{earth}} + \frac{\rho_{\lambda,\text{earth}}}{\pi}E_{\lambda,\text{solar}}\mu_0, \quad (17)$$

$$L_{\lambda,c} = \epsilon_{\lambda,c}B_{\lambda,c} + \frac{\rho_{\lambda,c}}{\pi}E_{\lambda,\text{solar}}\mu_0, \quad (18)$$

$$L_{\lambda,a}(0,H) = \int_0^H J_{\lambda,z} \cdot \frac{\partial\tau_{\lambda,z}}{\partial z} dz. \quad (19)$$

其中, B_{λ} 为等效黑体光谱辐射亮度, $E_{\lambda,\text{solar}}$ 为到达地表/云顶的太阳光谱辐射照度, $\mu_0 = \cos\theta_0$ 是视线方向的天顶角余弦。 ρ_{λ} 为光谱反照率, $\epsilon_{\lambda} = 1 - \rho_{\lambda} - \tau_{\lambda}$ 为光谱发射率。 $L_{\lambda,a}(0,H)$ 为高度从 0 至 H 之间的路径辐射及大气散射光谱辐射亮度, $\tau_{\lambda,z}$ 为距离大气层顶垂直距离 z 处的大气单色透过率。 $J_{\lambda,z}$ 为大气辐射源函数,这里主要考虑大气自身(路径)热辐射项。

光谱反照率与双向反射率(BRDF)的关系近似为 $\text{BRDF} = \rho/\pi$,求得云层 BRDF 即可得到云层的反照率。采用 Young 的云层反射经验模型^[12] 计算云层的 BRDF,该模型能较好地与精确解吻合,且避免了复杂的多重散射计算。

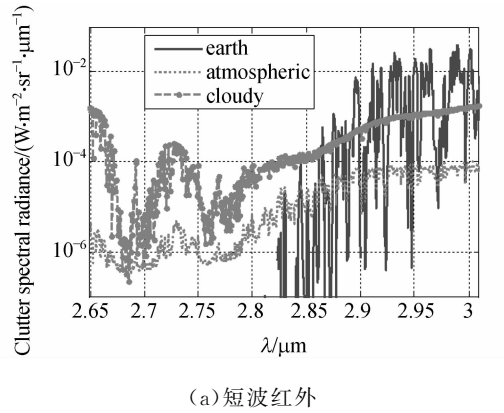
由式(16)~(19)可知,在局部平稳大气的假设下,背景辐射亮度波动 σ_b 主要来自云层反射率差异 σ_{ρ_c} 、云层厚度变化 σ_h 、云层温度波动 σ_{T_c} 、地表温度波动 $\sigma_{T_{\text{earth}}}$ 、地表反射率差异 $\sigma_{\rho_{\text{earth}}}$ 以及大气温度波动 σ_{T_a} ,于是云层与大气/地面的辐射方差可表达为各扰动源贡献的叠加,

$$\sigma_c^2 = \left(\frac{\partial L_s}{\partial T_c}\right)^2 \sigma_{T_c}^2 + \left(\frac{\partial L_s}{\partial \rho_c}\right)^2 \sigma_{\rho_c}^2 + \left(\frac{\partial L_s}{\partial h}\right)^2 \sigma_h^2, \quad (20)$$

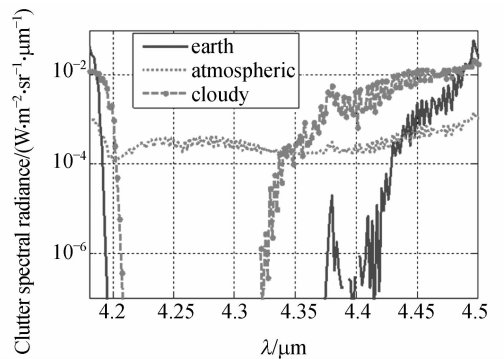
$$\sigma_o^2 = \left(\frac{\partial L_s}{\partial T_e}\right)^2 \sigma_{T_{\text{earth}}}^2 + \left(\frac{\partial L_s}{\partial \rho_e}\right)^2 \sigma_{\rho_{\text{earth}}}^2 + \left(\frac{\partial L_s}{\partial T_a}\right)^2 \sigma_{T_a}^2. \quad (21)$$

该模型中所需的大气透过率、大气层温度的廓线数据来源于 MODTRAN。需要说明的是,这里提及的场景辐射方差未考虑高层大气的贡献,并忽略了其他贡献较小的项,如大气组分变化引起的视线辐射波动。

取云高度为 9 km,云厚 1 km,假设云由球形冰晶粒子构成,根据米氏理论计算云层的单次反照率、消光系数与不对称因子等。取地表与云层的发射率标准差与反射率比值为 10%,地表、大气与云层温度波动 $\sigma_{T_{\text{earth}}}$ 、 σ_{T_a} 与 σ_{T_c} 为 10 K,云层厚度变化标准差 σ_h 为 0.01 km,计算短波红外(SWIR)与中波红外(MWIR)的场景辐射方差,见图 1。



(a) Short-wave infrared



(b) Mid-wave infrared

图 1 各杂波源对场景辐射方差的贡献分量

Fig. 1 Contributions of background clutter to scene radiance variance

可以看出 SWIR 杂波辐射较 MWIR 小,受云层影响严重,2.85 μm 左翼杂波主要来自云层;而 2.85 μm 右翼,由于大气部分透过,地表为主要杂波源。4.35 μm 左翼杂波主要来自大气温度扰动,而 4.35 μm 右翼,云层与地表贡献显著增强。

5 算例与分析

DSP 系统的光学系统口径为 600 mm,瞬视场为 40 μrad , $\eta = 0.7$, $\tau_{\text{int}} = 600 \mu\text{s}$, $K = 0.7^{[4-5]}$ 。选取两类复合固体推进剂的发动机喷焰作为探测目标(经归一化,见图 2)^[13-14],可以看出目标辐射特性基本类似,其峰值位于 2.7 μm 与 4.3 μm 附近。

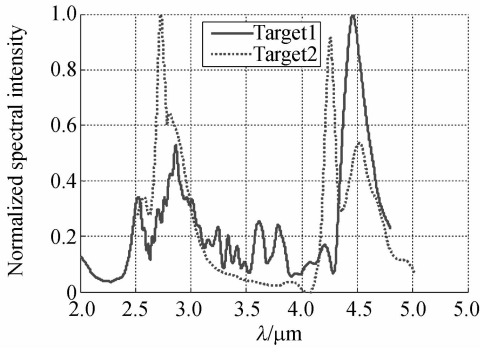


图 2 归一化目标光谱辐射强度曲线

Fig. 2 Spectral intensity of two kinds of targets

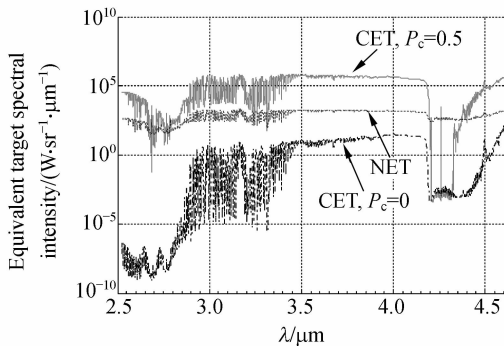


图 3 等效目标光谱辐射强度

Fig. 3 Spectral intensity of equivalent target

选取两种杂波情况,一种为无云背景 $P_c = 0$,空间杂波辐射弱;另一种为含卷云场景 $P_c = 0.5$,空间杂波辐射强。分别计算得到杂波等效目标与噪声等效目标的大小,见图 3。可以看出,在

2.6~3.1 μm 与 4.1~4.6 μm 区间 CET 较小,目标辐射较强,可以初步判断出最佳探测波段应集中在这两个区间内。2.6~3.1 μm 区间探测波段的选择主要受限于杂波的光谱特性;而 4.1~4.6 μm 区间,电子学噪声制约着最佳波段的选择。

以步长 1 nm 为波长间隔遍历两个波段区间计算 SSNR。表 1 给出了 SSNR 最大的波段,可以看出空间杂波辐射水平对波段的选择有一定的影响。

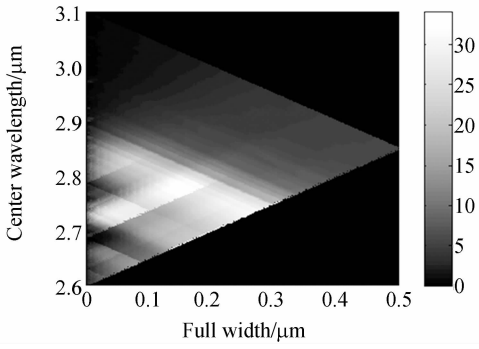
表 1 波段初步选择结果

Tab. 1 Results of the first-order band selection (μm)

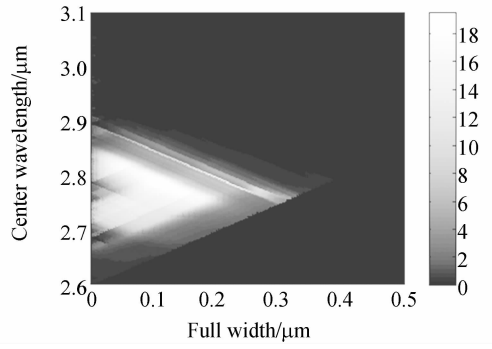
波段区间	探测对象	弱杂波	强杂波
		($P_c = 0$)	($P_c = 0.5$)
2.6~3.1	目标 1(10 km)	2.69~2.86	2.79~2.85
	目标 2(10 km)	2.69~2.85	2.74~2.85
4.1~4.6	目标 1(30 km)	4.33~4.49	4.33~4.42
	目标 2(30 km)	4.19~4.49	4.2~4.41

图 4 给出了探测目标 2 时的 SSNR 计算结果,图 4 中的点代表在不同杂波水平下对目标 2 可选探测波段的集合。可以看出,当场景中的杂波辐射水平不同时,可选的最佳探测波段集有所变化。在峰值 SSNR 附近区间内,SSNR 的值趋于逐渐衰减趋势。于是,在一定综合信噪比阈值下取 SSNR 等值轮廓线,等值线以内的点均为候选波段,求得不同目标与杂波下的等值线并取交集,从中选择 SSNR 最大的点,即为最佳工作波段。

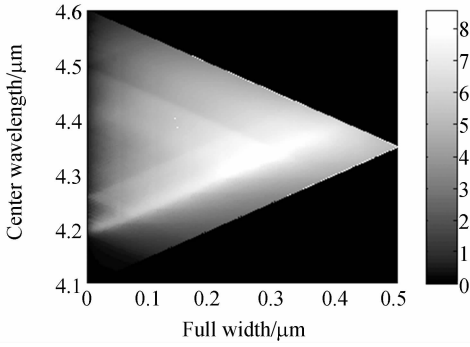
图 5 与图 6 给出了算例中的 2.6~3.1 μm 波段区间内的 SSNR 等值线与波段选择结果,其中 SSNR 经归一化,阈值系数(阈值 SSNR 与峰值 SSNR 之比)取 0.6,得到最佳工作波段为 2.73~2.85 μm 与 4.2~4.43 μm ,可以认为波段选择结果与 DSP 采用的 2.7 μm 与 4.3 μm 附近的波段基本一致。需要说明的是,这里仅以两种目标辐射特性样本作为示例,样本数目越多,所选波段的适应性越好。



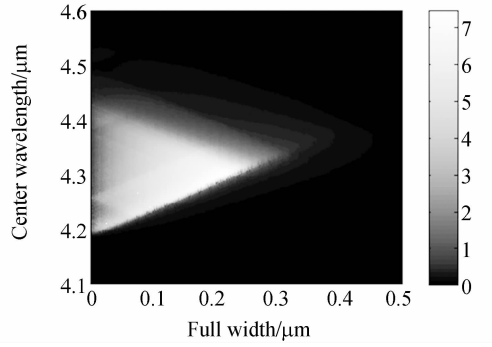
(a) 2.6~3.1 μm, $P_c=0$



(b) 2.6~3.1 μm, $P_c=0.5$



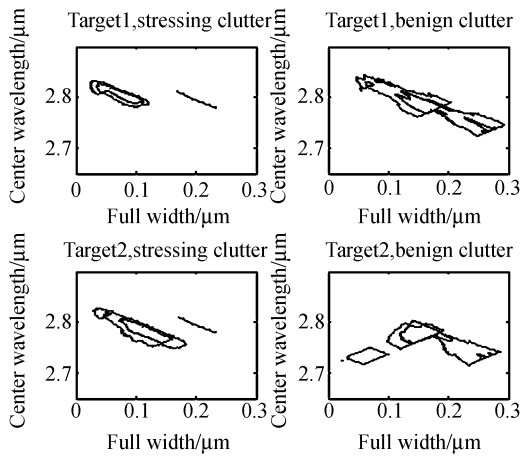
(c) 4.1~4.6 μm, $P_c=0$



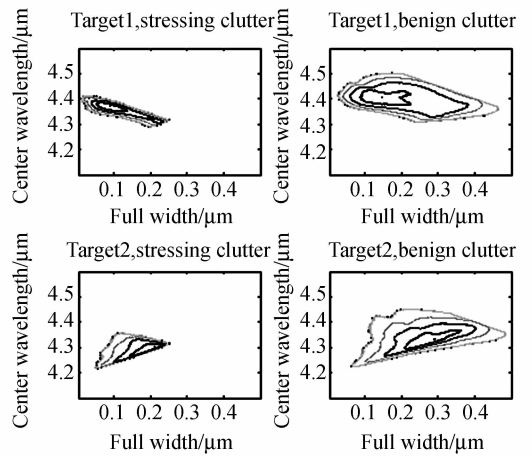
(d) 4.1~4.6 μm, $P_c=0.5$

图 4 不同中心波段与带宽时的 SSNR

Fig. 4 SSNRs of different full widths and center-wavelengths



(a) 2.6~3.1 μm



(b) 4.1~4.6 μm

图 5 经阈值后的 SSNR 等值线

Fig. 5 Isolines of thresholded SSNRs

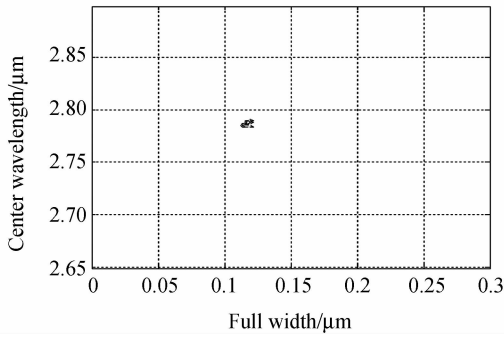
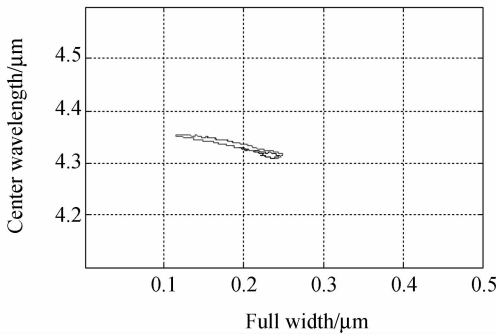
(a) 2.6~3.1 μm (b) 4.1~4.6 μm

图6 可选波段交集

Fig. 6 Intersection of available bands

6 结 论

本文建立了背景杂波辐射模型,分析得出背景辐射亮度的波动大小主要取决于云层、地表与大气的温度与反射率的起伏。引入综合信噪比的概念,对基于杂波模型的天基红外目标探测波段的选择方法进行了深入的研究,并通过分析 DSP 系统的探测波段验证了该方法的有效性与合理性。计算分析得知,系统最佳探测波段与场景的杂波辐射水平以及目标的辐射特征密切相关;在不同的杂波水平下,选用两种目标辐射特性作为样本,DSP 的最佳探测波段为 2.73~2.85 μm 与 4.2~4.43 μm 。下一步研究应考虑如何通过实际测量的背景辐射数据以及测量过程中的气象数据对背景的功率谱密度模型与辐射方差计算模型进行校验与验证,并应用校正后的模型进行大气背景场景图像的仿真生成,以支撑红外目标探测算法的验证与评估。

参考文献:

- [1] 马元中,尹志忠,张文静. NMD 中导弹预警卫星系统的发展[J]. 上海航天,2003(5):42-45.
MA Y SH, YIN ZH ZH, ZHANG W J. The development of the missile early warning satellite system in NMD [J]. *Aerospace Shanghai*, 2003 (5): 42-45. (in Chinese)
- [2] 丁金伟,张葆,李永刚,等. 气象测云红外成像系统的设计与分析[J]. 光学精密工程, 2008,16(12): 2429-2434.
DING J W, ZHANG B, LI Y G, *et al.*. Design and analysis of infrared imaging system for cloud meteorological observation [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2008,16(12):2429-2434. (in Chinese)
- [3] 万志,任建伟,李宪圣,等. 探测海洋目标的光学遥感器工作波段选择[J]. 光学精密工程, 2008,16(10):1864-1868.

- WAN ZH, REN J W, LI X SH, *et al.*. Waveband selection of optical remote sensor for detecting marine target [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2008, 16(10):1864-1868. (in Chinese)
- [4] 徐琰珂,羊彦,景占荣,等. 美国国防支援计划卫星探测波段的选择分析[J]. 红外技术,2009,31(4): 202-204.
XU Y K, YANG Y, JING ZH R, *et al.*. Analysis of how U. S Defense Support Program (DSP) satellites to select the right waveband [J]. *Infrared Technology*, 2009,31(4):202-204. (in Chinese)
- [5] 张光明,孙胜利,张伟,等. 导弹助推段天基红外探测的像面照度模型及其应用[J]. 红外与毫米波学报,2007,26(6):425-428.
ZHANG G M, SUN SH L, ZHANG W, *et al.*. Model and application of image plane illumination for the space-based infrared detection of boost-phase missile[J]. *Journal of Infrared and Millimeter*

Waves, 2007, 26(6):425-428. (in Chinese)

- [6] 何国经, 张建奇, 刘德连, 等. 一种基于结构相似度的杂波尺度[J]. 西安电子科技大学学报, 2009, 36(1):166-170.
HE G J, ZHANG J Q, LIU D L, *et al.*. Structure similarity based clutter metric [J]. *Journal of XiDian University*, 2009, 36(1):166-170. (in Chinese)
- [7] 张建奇, 何国经, 刘德连, 等. 背景杂波对红外成像系统性能的影响[J]. 红外与激光工程, 2008, 37(4):565-568.
ZHANG J Q, HE G J, LIU D L, *et al.*. Impact of background clutter on IR imaging system performance [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2008, 37(4):565-568. (in Chinese)
- [8] MONTGOMERY J B, MONTGOMERY C T, SANDERSON R B, *et al.*. Empirical modeling and results of NIR clutter for tactical missile warning [J]. *SPIE*, 2009, 7300:730008.
- [9] LOMHEIM T S. Performance/sizing relationships

for a short-wave/mid-wave infrared scanning point-source detection space sensor[J]. *IEEE*, 1999, 4: 113-138.

- [10] FUTTERMAN W I, BENSON R S. Infrared /IR scene generation and analytic statistical modeling [J]. *SPIE*, 1980, 253:107-120.
- [11] LINDQUIST G H, H KWON, R A NAGY J R. Model for atmospheric clutter as seen from a satellite platform[J]. *SPIE*, 1983, 430:24-31.
- [12] YOUNG S J. Diffuse reflectance of clouds: a semiempirical model[J]. *Applied Optics*, 1979, 18(12):1881-1882.
- [13] RAPANOTTI J, GILBERT B, RICHER G, *et al.*. IR sensor design insight from missile plume prediction models [J]. *SPIE*, 2002, 4718: 289-300.
- [14] BLANC A, L DEIMLING, EISENREICH N. UV- and IR-signatures of rocket plumes[J]. *Propellants, Explosives, Pyrotechnics*, 2002, 27(3): 185-189.

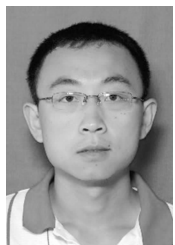
作者简介:



曹移明(1982—),男,江苏泰兴人,博士研究生,2004年、2006年于哈尔滨工业大学分别获得学士、硕士学位,主要从事空间红外相机性能评估与仿真方面的研究。E-mail: caoyiming888@126.com



丛明焜(1964—),男,黑龙江双鸭山人,工学博士,教授,博士生导师,主要从事空间监视、计算机仿真技术等方面的研究。E-mail: mycong@hit.edu.cn



鲍文卓(1983—),男,内蒙古兴安盟人,博士研究生,分别于2004年、2007年于哈尔滨工业大学获得学士、硕士学位,主要从事空间目标光学特性与图像仿真方面的研究。E-mail: latermouse@126.com



孟祥龙(1971—),男,黑龙江哈尔滨人,博士研究生,工程师,1993年、2000年于国防科技大学分别获得学士、硕士学位,主要从事遥感图像处理技术方面的研究。E-mail: xlmeng@126.com

导师简介:



张伟(1962—),男,黑龙江牡丹江人,工学博士,教授,博士生导师,主要从事空间光学工程与应用技术等方面的研究。E-mail: wzhang@hit.edu.cn