

双模型空中目标红外谱段的联合 SNCR 评估方法

张磊¹, 陈略^{2,3,4}, 朱含露^{2,3,4}, 饶鹏^{2,3*}

- (1. 北京跟踪与通信技术研究所, 北京 100094;
2. 中国科学院智能红外感知重点实验室, 上海 200083;
3. 中国科学院上海技术物理研究所, 上海 200083;
4. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要:在天基平台下实现对空中飞机目标的探测, 存在距离远、目标信号弱、背景杂波复杂和探测器噪声等不利因素, 因此, 要获取目标的最强信号, 确定在探测过程中的谱段至关重要。为此系统地建立了飞机羽流的梯形羽流和锥形羽流仿真模型, 并提出了利用信噪比(SNR)和信杂比(SCR)联合的SNCR方法对空中目标的探测谱段进行确定。实验结果表明: 针对空中目标, 不同目标SNCR值不同, 但峰值区域不变, 由此方法可以确定探测谱段, 最终确定探测的谱段分别为: 中波波段为 3.7~4.15 μm , 波段间隔在 0.3 μm 以上; 长波波段为 8~12 μm , 波段间隔在 0.35 μm 以上。

关键词: 红外探测; 红外谱段; SNCR; 空中目标; 双模型
中图分类号: TN215 **文献标识码:** A

Combining-SNCR evaluation of dual-models aerial targets' infrared bands

ZHANG Lei¹, CHEN Lue^{2,3,4}, ZHU Han-Lu^{2,3,4}, RAO Peng^{2,3*}

- (1. Beijing Institute of Tracking and Telecommunication Technology, Beijing 100094, China;
2. Key Laboratory of Intelligent Infrared Perception, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200083, China;
3. Shanghai Institute of Technical Physics of the Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200083, China;
4. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: The detection of the aerial targets applied on the space-based platform has disadvantages of long distance, weak signal of targets, complex background clutters and detector noises. Therefore, to obtain the strongest signal of the target, it is crucial to determine the bands used during the process of detection. The trapezoidal plume and the cone plume simulation model are systematically established, meanwhile an SNCR method combining the signal to noisy ratio(SNR) and the signal to clutter ratio(SCR) is proposed to determine the detection bands. The experimental result shows that, different aerial targets have different SNCR values, but with the same peak value. According to the method mentioned above, bands have been determined and eventually the values are as follows: 3.7~4.15 μm in MWIR band in which interval is not less than 0.3 μm , 8~12 μm in LWIR band in which interval is not less than 0.3 μm .

Key words: infrared detection, infrared bands, SNCR, aerial targets, dual-models
PACS: 07. 57. Kp, 42. 30. Tz

引言

在远距离条件下对目标进行探测时, 由于探测

距离远, 目标的信号较弱, 而背景杂波复杂, 探测器的噪声明显, 因此需要获取大的信噪比和信杂比,

使得探测器获取强信号。国内外学者主要都仅是采用单一参数对目标的谱段进行确定,如对比度、信杂比和信噪比等,文献^[1-3]等文章都只是分析目标和背景的辐射对比度来确定探测谱段,文献^[4-5]则仅是利用信噪比分析确定探测谱段,文献^[6]则是采用信杂比和对比度联合的方法确定探测谱段,但是没有考虑到噪声的影响。综上,现阶段国内外的研究都无法全面地系统性考虑对探测谱段影响的关键参数。本文通过建立羽流仿真模型,全面构建目标辐射特性,结合信噪比 SNR 和信杂比 SCR 的 SNCR 联合指标分析探测谱段,最终确定合理的针对于飞机目标探测的具体谱段。

1 飞机羽流特性建模

1.1 真实飞机羽流形态

涡轮发动机排出的气体,通常被称为羽流,是红外辐射的一个重要来源。为了准确地确定羽流辐射,必须对喷管内外的流动进行建模^[7]。羽流特性的建模与其喷管口的形状有巨大的关系,文中主要对两类常见的喷管口类型进行建模,这两类喷口会形成梯形和锥形的羽流形态。图 1 显示了梯形羽流真实形态,其中 R 表示喷口的初始半径, K_1, K_2, K_3 分别表示羽流三个部分的不同温度, R_1, R_2, R_3 分别表示羽流三个部分的不同半径长度。图 2 显示了锥形羽流真实形态,其主要有自身尾喷管内部燃烧产生的锥形内核和热量释放后形成的释放蒸汽 free stream 构成。

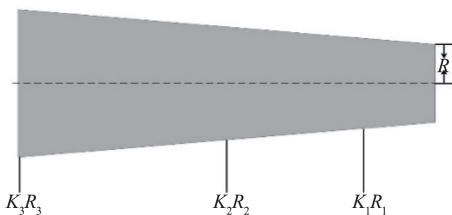


图 1 梯形羽流真实形态
Fig. 1 The real form of trapezoidal plume

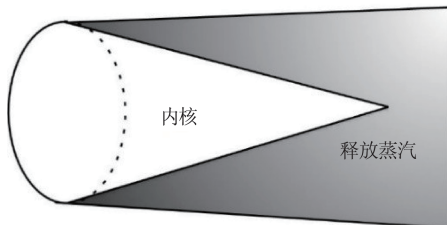


图 2 锥形羽流真实形态
Fig. 2 The real form of cone plume

1.2 飞机羽流建模

通过上述对飞机目标的真实羽流形态进行分析,为进一步具体分析羽流辐射特性,将真实模型进行建模。对于梯形羽流结构,这种轴对称流可以方便地用一组同心圆柱壳来表示,用于辐射度计算,如图 3 所示。假设柱间各环形区域内的羽流特性是恒定的。为了计算排放,羽流的特性由各环形区域内的温度 K、气缸半径 R 的羽流物理尺寸和探测的视线方向确定。在详细的处理中,可以在出口平面下游的许多轴向位置指定羽流的截面特性。因此,梯形羽流仿真结构模型的探测面积 S_{plume} 计算如下:

$$S_{plume} = \sum_{k=1}^n 2\pi R_k L_k \cos\alpha \sin\beta + \pi R_n^2 |\cos\beta|, \quad (1)$$

其中, k 为梯形羽流划分为的同心圆柱个数,最大个数 n 取值 4, R_k 和 L_k 分别为各个圆柱的半径和长度, R_n 为最大圆柱的半径,即为最外层圆柱半径, α 为探测的高度角,范围为 $0\sim 90^\circ$, β 为探测的方向角,范围为 $0\sim 180^\circ$ 。

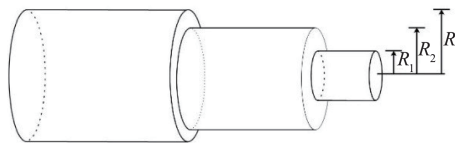


图 3 梯形羽流仿真模型
Fig. 3 The simulation model of trapezoidal plume

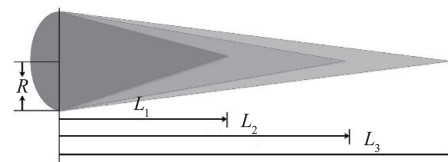


图 4 圆锥羽流仿真模型
Fig. 4 The simulation model of cone plume

同样地,为了计算锥形羽流结构,可以方便地用一组同心圆锥壳来表示,用于辐射度计算,如图 4 所示。仍然假设柱间各环形区域内的羽流特性是恒定的。为了计算排放,羽流的特性由各个圆锥内的温度 K,圆锥高度 L 和喷口半径的物理尺寸和探测的视线角度确定。由于锥形结构的特殊性,其在不同的探测高度角 α 下的投影面积形状存在较大差异,具体投影状态如图 5 所示。因此锥形羽流的探测面积 S_{plume} 计算如下:

$$S_{\text{plume}} = \begin{cases} \sum_{k=1}^n R_k \cdot L_k & \alpha = 0 \\ \sum_{k=1}^n \pi R_k^2 \sin^2 \alpha + \frac{R_k}{L_k \cos \alpha} (L_k \cos \alpha - R_k \sin \alpha)^2 & 0^\circ < \alpha < \varphi \\ \sum_{k=1}^n \pi R_k^2 \sin^2 \alpha & \varphi < \alpha \leq 90^\circ \end{cases}, \quad (2)$$

$$\frac{L}{R} = \frac{\sin \varphi}{\cos \varphi} = \tan \varphi, \quad (3)$$

$$\varphi = \tan^{-1} \left(\frac{L}{R} \right), \quad (4)$$

其中, R_k 和 L_k 分别表示各个圆锥体的半径和高度, φ 为划分各个投影部分的边界角度, 其计算方法如公式(3)和(4)所示. 公式(2)中, 第一个求和公式表示图5中的(a)投影面积, 第二个求和公式表示图5中的(b)投影面积, 第三个求和公式表示图5中的(c)和(d)的投影面积.

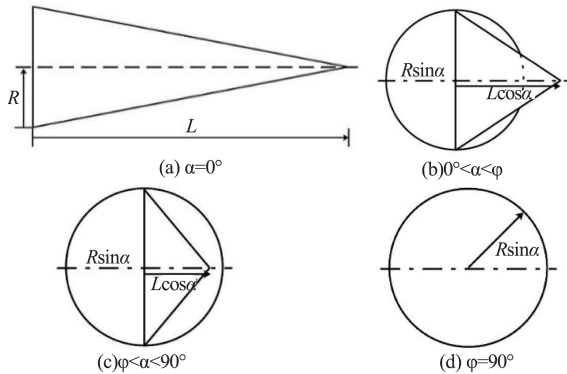


图5 不同探测角度 φ 下的投影形状

Fig.5 The projection shape under different detection angles φ

根据上述对两种羽流结构的形态仿真建模, 再进一步结合普朗克黑体辐射定律, 可以得到羽流的辐射亮度 $L_{\text{plume}}(\lambda, K_{\text{plume}})$:

$$L_{\text{plume}}(\lambda, K_{\text{plume}}) = \frac{M_{\text{plume}}(\lambda, K_{\text{plume}}) \cdot \varepsilon_{\text{plume}}(\lambda)}{\pi}, \quad (5)$$

其中, $M_{\text{plume}}(\lambda, K_{\text{plume}})$ 为在光谱为 λ , 温度为 K_{plume} 下的光谱辐射出射度, $\varepsilon_{\text{plume}}(\lambda)$ 为羽流的发射率, 由于羽流主要是由 CO_2 , H_2O 和 CO 三种气体构成, 而这些气体在不同谱段的吸收情况不同, 因此羽流在不同谱段的发射率存在差异, 根据文献^[8]可以得到羽流的发射率情况如图6所示. 根据公式(2)和(5)最终可以得到整个羽流的辐射强度, 参照文献^[9-10]也

可以得到飞机其他部分的辐射强度, 从而获得飞机目标的整体辐射特性 $\phi_{\text{tar}}(\lambda)$.

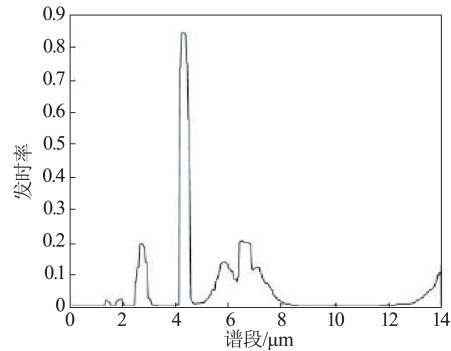


图6 羽流部分的发射率

Fig.6 The emissivity of the plume

2 SNCR 联合谱段选择方法

在远距离对空中目标进行探测时, 探测效果主要受到三方面的影响: 第一是目标在飞行过程中, 背景变化的多样性, 如海面背景、云背景、城市背景等, 因此存在强变化的背景杂波; 第二是大气的影 响, 目标辐射在穿透大气的过程中会被大气中某些气体有选择性地吸收, 或被大气悬浮微粒散射, 上述现象均会使目标辐射产生衰减, 从而降低信噪比和信杂比; 第三方面, 在探测器中的噪声也会对目标信号产生巨大的干扰. 因此考虑信号与杂波关系的信杂比和信号与噪声关系的信噪比两个联合指标 $SNCR$ 来对探测的谱段进行确定. 通过羽流的建模完成整体飞机目标特性建模, 在此基础上进一步实现对 $SNCR$ 的仿真计算, 为飞机探测波段的确定提供更充实的理论依据.

杂波是场景中类似于目标, 但不是目标的物体. 由于杂波的存在会导致目标难以探测, 根据 Silk 统计方差的方法可以定义杂波^[11], 并进一步可以得到在目标探测过程中的信杂比 $SCR(\lambda_1, \Delta\lambda)$:

$$SCR(\lambda_1, \Delta\lambda) = \frac{\left| \phi_{\text{tar}}(\lambda_1, \Delta\lambda) - \phi_{\text{bk}}(\lambda_1, \Delta\lambda) \right|}{\sigma_{\phi_c}(\lambda_1, \Delta\lambda)}, \quad (6)$$

式中, $\phi_{\text{tar}}(\lambda_1, \Delta\lambda)$ 为起始波长 λ_1 , 波段宽度 $\Delta\lambda$ 的目标辐射通量均值, 是目标光谱辐射通量 $\phi_{\text{tar}}(\lambda)$ 在此波段上的积分, $\phi_{\text{bk}}(\lambda_1, \Delta\lambda)$ 为起始波长 λ_1 , 波段宽度 $\Delta\lambda$ 的目标周围局部范围内的背景辐射通量均值; $\sigma_{\phi_c}(\lambda_1, \Delta\lambda)$ 为目标周围局部范围内的背景辐射

通量标准差。

焦平面探测器中的噪声主要由时间噪声和空间噪声两部分构成,主要包括量子噪声、读出噪声、暗电流噪声等。一般在表达信噪比时都是使用信号电子数来计算,因此需要将信号的辐射通量转化为信号电子数 $N_s(\lambda_1, \Delta\lambda)$,如下所示:

$$N_s(\lambda_1, \Delta\lambda) = \phi_q \cdot \eta \cdot t_{int} \quad (e/\text{pixel}) \quad (7)$$

其中, ϕ_q 为光敏面上的光子辐射通量, $\text{photon} \cdot \text{s}^{-1}$, η 为量子效率, t_{int} 为积分时间, 因此信噪比 $\text{SNR}(\lambda_1, \Delta\lambda)$ 的表达式如下所示:

$$\text{SNR}(\lambda_1, \Delta\lambda) = \frac{N_s(\lambda_1, \Delta\lambda)}{\sqrt{N_{rd}^2 + N_s(\lambda_1, \Delta\lambda) + N_d}} \quad (8)$$

其中, $N_s(\lambda_1, \Delta\lambda)$ 为波段 $\Delta\lambda$ 上的光电流信号电子数, N_{rd} 为波段 $\Delta\lambda$ 上的读出噪声, N_d 为波段 $\Delta\lambda$ 上的暗电流噪声。结合公式(6)和(8)可以得到SNCR联合参数公式:

$$\text{SNCR}(\lambda_1, \Delta\lambda) = \frac{1}{\sqrt{\frac{1}{\text{SNR}(\lambda_1, \Delta\lambda)^2} + \frac{1}{\text{SCR}(\lambda_1, \Delta\lambda)^2}}} \quad (9)$$

3 仿真和结果

根据以上小节对目标特性的分析,以及建立的SNCR谱段选择方法,对三类实际的目标:B2, F15和波音737进行了仿真,其三类目标的基本参数如表1中所述。尾焰和探测系统的相关参数分别如表2、3所示,并分别仿真了三类目标在中波的 $3 \mu\text{m}$ 和长波的 $8 \mu\text{m}$ 为起始波长,以 $0.01 \mu\text{m}$ 为波段间隔的400个间隔段内的 $0.1 \sim 0.5 \mu\text{m}$ 波段范围的SNCR(3~5, 0.1~0.5)和SNCR8(12, 0.1~0.5),仿真结果如图7、8、9和10所示,并将结果汇总在表4中。

从图7、8、9和10以及表5的结果可以看到,不

表1 三类目标基本参数

Table 1 The basic parameters of three types of targets

飞机类型	B2	F15	波音
机长/m	21.03	19.43	36.5
翼展/m ²	483	56.5	91.8
机身半径/m	13	0.8	1.88
喷口半径/m	1.1	0.6	0.5
喷口温度/K	1099	948	1099

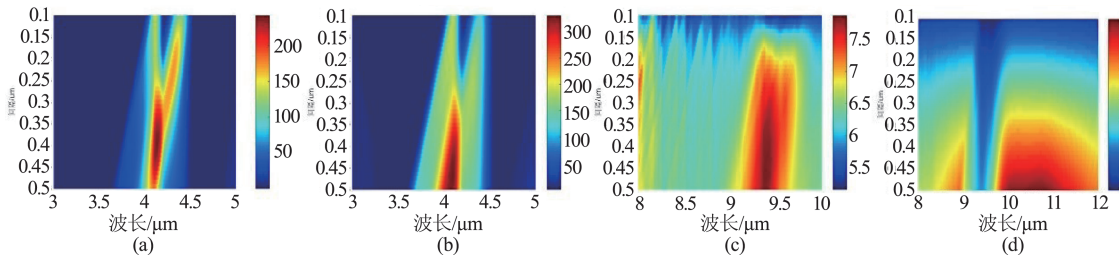


图7 B2在飞行高度为15km的SNCR值,(a)中波3~5 μm 高积云背景下的SNCR,(b)中波3~5 μm 标准卷云背景下的SNCR,(c)长波8~12 μm 高积云背景下的SNCR,(d)长波8~12 μm 标准卷云背景下的SNCR

Fig.7 SNCR of B2 at a flying height of 15 km, (a) medium wave 3~5 μm high cumulus cloud background SNCR, (b) medium wave 3~5 μm standard cirrus background SNCR, (c) long wave 8~12 μm high cumulus cloud SNCR in the background, (d) SNCR in the background of long-wave 8~12 μm standard cirrus clouds

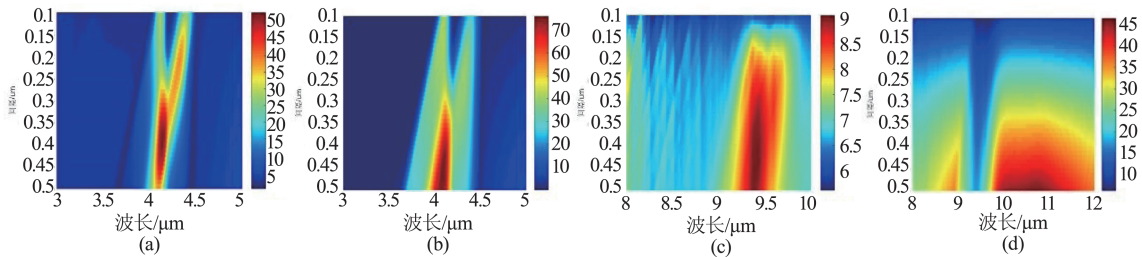


图8 F15在飞行高度为15 km的SNCR值,(a)中波3~5 μm 高积云背景下的SNCR,(b)中波3~5 μm 标准卷云背景下的SNCR,(c)长波8~12 μm 高积云背景下的SNCR,(d)长波8~12 μm 标准卷云背景下的SNCR

Fig.8 SNCR of F15 at a flying height of 15 km, (a) medium wave 3~5 μm high cumulus cloud background SNCR, (b) medium wave 3~5 μm standard cirrus background SNCR, (c) long wave 8~12 μm high cumulus cloud SNCR in the background, (d) SNCR in the background of long-wave 8~12 μm standard cirrus clouds

表2 尾焰参数

Table 2 The parameters of tail frame

飞机类型	锥形尾焰半径/m, 温度/K	筒形尾焰半径/m, 温度/K
B2	(1,1,1,1)	无
	(1,4,8,16)	
	(934,496,365,310)	
F15	(0.6,0.6,0.6,0.6)	(0.6,0.9,1.2)
	(1.2,2.4,4.8,9.6)	(0.9,1.2,1.5)
	(805,420,320,260)	(800,660,500)
波音	(0.5,0.5,0.5,0.5)	(0.5,0.75,1)
	(0.5,1,1.5,2)	(0.75,1,1.25)
	(640,336,250,200)	(640,530,400)

表3 探测系统相关参数

Table 3 The parameters of detection system

波段/参数	中波3~5 μm	长波8~12 μm
尺寸/ μm	15	30
焦距/m	0.5	0.5
口径/mm	400	400
F#	1.25	1.25
轨道高度/km	1000	1000
积分时间/ μs	0.1	0.2
满阱电荷/ Me^-	5.8	18
读出噪声/ Me^-	500	5000
量化位数/bit	14	16

同目标在相同的飞行高度下其SNCR的曲面是相似的,只存在数值上的差异;不同目标在相同的飞行高度下其SNCR的曲面不同。从表5的参数中可以看到,对于三种飞机类型,除F15以外,其它目标的峰值SNCR都达到了5.7以上,所以均可以实现探测;此外,不同目标的SNCR峰值不同,但其峰值波段和波段间隔在相应背景和波段条件下相差无

几。通过对比中波的数据,可以看到在高积云下,各类型的飞机的峰值波段为4.05~4.15 μm ,最优波段间隔在0.3 μm 以上,在标准卷云下,各类型的飞机的峰值波段为3.95~4.15 μm ,最有波段间隔在0.3 μm 以上;对比长波的数据,可以看到在高积云下,各类型的飞机的峰值波段为9.2~9.6 μm ,最优波段间隔在0.2 μm 以上,在标准卷云下,各类型的飞机的峰值波段为8.5~9 μm 和9.6~12 μm ,最优波段间隔在0.35 μm 以上,结合现有探测器性能,在长波波段8.5~9 μm 更容易获取目标信号。综合这些参数可以确定最终的探测谱段为:中波波段为3.7~4.15 μm ,波段间隔在0.3 μm 以上;长波波段中为8.5~9 μm ,波段间隔在0.35 μm 以上。

4 结论

建立了针对于羽流的梯形仿真模型和锥形仿真模型,对羽流的辐射特性进行了全面系统的分析,并提出了利用信噪比(SNR)和信杂比(SCR)联合的SNCR方法对空中目标的探测谱段进行确定。并针对不同目标类型仿真在一定探测系统中的SNCR值的变化情况,通过对仿真曲线的分析发现:针对于不同的飞机其SNCR曲线趋势一致,只是存在峰值的差异,其中在中波波段,B2在高积云和标准卷云背景下峰值均为最大,分别为235和315,F15次之,波音最小;在长波波段,F15的SNCR峰值在两种云背景下峰值均为最大,高积云和标准卷云背景下SNCR峰值分别为9和46,40,波音次之,B2最小。因此,可以确定,背景的改变对最优谱段的选择影响较小,可以通过SNCR的曲线趋势确定飞机的谱段,并得到飞机目标的探测谱段为:中波波段为3.7~4.15 μm ,波段间隔在0.3 μm 以上;长波波段为

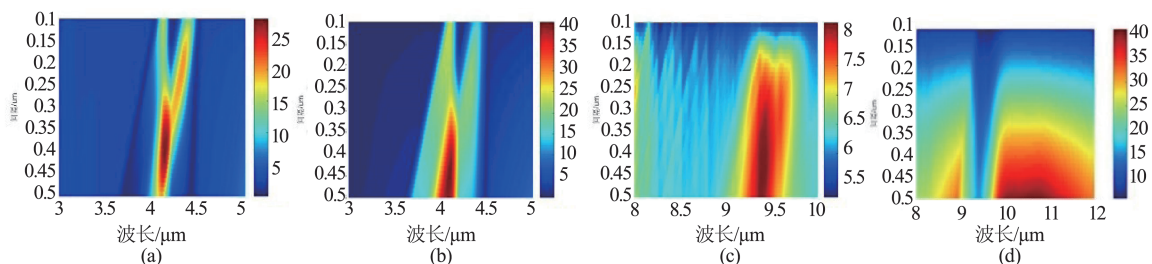


图9 波音在飞行高度为15 km的SNCR值,(a)中波3~5 μm 高积云背景下的SNCR,(b)中波3~5 μm 标准卷云背景下的SNCR,(c)长波8~12 μm 高积云背景下的SNCR,(d)长波8~12 μm 标准卷云背景下的SNCR

Fig.9 SNCR value of Boeing at a flying height of 15 km, (a) SNCR in the background of 3~5 μm high cumulus cloud in medium wave,(b)SNCR in the background of 3~5 μm standard cirrus cloud in medium wave,(c)Long wave 8~12 μm high cumulus cloud SNCR in the background,(d)SNCR in the background of long-wave 8~12 μm standard cirrus clouds

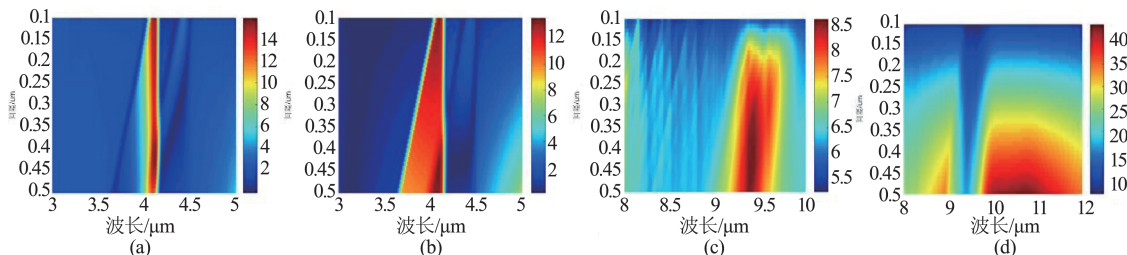


图 10 波音在飞行高度为 5 km 的 SNCR 值, (a)中波 3~5 μm 高积云背景下的 SNCR, (b)中波 3~5 μm 标准卷云背景下的 SNCR, (c)长波 8~12 μm 高积云背景下的 SNCR, (d)长波 8~12 μm 标准卷云背景下的 SNCR

Fig.10 SNCR value of Boeing at a flying height of 5 km, (a)SNCR in the background of 3~5 μm high cumulus clouds in medium wave,(b)SNCR in the background of 3~5 μm standard cirrus in medium wave,(c)Long wave 8~12 μm high cumulus cloud SNCR in the background,(d)SNCR in the background of long-wave 8~12 μm standard cirrus clouds

表 4 飞机各部分在不同波段的辐射强度

Table 4 Radiation intensity of different parts of the aircraft in different bands

飞机类型	波段 μm	4.05~4.15	3.95~4.15	8.5~9	9.2~9.6	9.6~12
B2	尾焰辐射强度 W/Sr	1 438	1 477	100	16	69
	整体辐射强度 W/Sr	1 440	1 480	1 479	420	2 692
F15	尾焰辐射强度 W/Sr	313	321	28	4.6	20.7
	整体辐射强度 W/Sr	313	322	188	55	384
波音	尾焰辐射强度 W/Sr	101	104	15.6	2.7	12.5
	整体辐射强度 W/Sr	102	106	629	186	1 223

表 5 三类飞机目标在不同背景下的 SNCR 峰值波段、波段间隔和峰值 SNCR、SNR 和 SCR 值

Table 5 SNCR peak band, band spacing and peak SNCR、SNR、SCR values for three types of aircraft targets in different backgrounds

云背景	飞机类型	波段 μm	波段间隔 μm	峰值 SNCR	峰值 SNR	峰值 SCR
中波高积云	B2	4.05~4.15	0.3~0.5	78.6	79	803
	F15	4.05~4.15	0.3~0.5	16.9	17	175
	波音	4.05~4.15	0.3~0.5	5.67	5.7	57
中波标准卷云	B2	3.95~4.15	0.3~0.5	80.7	81	600
	F15	3.95~4.15	0.3~0.5	17.6	17.8	130
	波音	3.95~4.15	0.3~0.5	5.9	6	42
长波高积云	B2	9.2~9.6	0.2~0.5	18.7	18.9	118
	F15	9.2~9.6	0.2~0.5	2.6	2.6	16
	波音	9.2~9.6	0.2~0.5	8.02	8.12	50.6
长波标准卷云	B2	8.5~9/9.6~12	0.35~0.5	73/131	82/174	165/201
	F15	8.5~9/9.6~12	0.35~0.5	9.8/20	11/26	22/30
	波音	8.5~9/9.6~12	0.35~0.5	29.5/58	33/78	66/89

8.5~9 μm, 波段间隔在 0.35 μm 以上。本文全面地结合信噪比和信杂比联合的 SNCR 值对目标的谱段进行确定, 对实现空中目标探测具有重要的意义。本文全面地结合信噪比和信杂比联合的 SNCR 值对目标的谱段进行确定, 对实现空中目标探测具有重要的意义。本文主要进行飞机特性建模的理论研究和仿真, 因此还需要采用不同波段的红外设备, 开展对不同背景条件下飞机目标的实拍实测实验,

对本文所提方法进行验证。

References

[1] Yang F B, Ni G Q, Yao J M. Analysis on radiation contrast of IR small target and background[J]. *Optical Technique* (杨风暴, 倪国强, 姚剑敏. 红外小目标与背景辐射对比度的研究. *光学技术*), 2006, **32**(s1): 290-292.

[2] Hodgkin V A. Impact of waveband on target-to-background contrast of camouflage[J]. *Proceedings of SPIE-The International Society for Optical Engineering*, 2012, **8355**: 40.

- [3] Qi L L, Ji Wei, An Jie. Characteristic of Target-background Contrast of Actual Atmospheric Infrared Band [J]. *Command Control and Simulation*, (齐琳琳, 吉微, 安洁. 基于区域实际大气的红外制导波段目标背景对比度变化特性数值计算. *指挥控制与仿真*), **2016**(1):116-121.
- [4] Qi Ming, Liu Delian, Zhang Erlei. Band selection for aircraft targets detection [J]. *Infrared Technology*, (祁鸣, 刘德连, 张二磊. 面向飞机目标探测的波段选择方法. *红外工程*), 2016, **33**(08).
- [5] XU Yuannan, LI Junwei, WU Kaifeng, *et al.* Detection band selection for mid-wave infrared spectrum using synthetic signal-to-noise ratio [J]. *Infrared & Laser Engineering*, (许元男, 李军伟, 吴开峰, 等. 采用综合信噪比的中波光谱探测波段选择. *红外与激光工程*), 2014, **43**(7):2126-2131.
- [6] Hanlu Zhu, Tingliang Hu, Peng Rao, *et al.* Key parameters design of an aerial target detection system on a space-based platform [J]. *Opt. Eng.* **57**(2), 023107(2018), doi: 10.1117/1.OE.57.2.023107.
- [7] Signature Prediction and Modeling, J.A. Conant and M.A. LeCompte in *The Infrared & Electro-Optical Systems Handbook*, Vol. 4 - Electro-Optical Systems Design, Analysis, and Testing, ed. by Michael C. Dudzik, *Environmental Research Institute of Michigan*, SPIE Optical Engineering Press, Bellingham WA (1993).
- [8] Rao, Arvind G. Infrared Signature Modeling and Analysis of Aircraft Plume [J]. *International Journal of Turbo and Jet Engines*, 2011, **28**(3).
- [9] Wang Zhongxian, Fan Xiang, Ma Donghui. Study on the characteristics of the omnidirectional IR radiation of airplane [J]. *Electronic Warfare*, (汪中贤, 樊祥, 马东辉. 飞机全向红外辐射特征研究. *电子对抗*), **2009**(3):42-46.
- [10] Li Jiairun, TONG Zhongxiang, WANG Chaozhe, *et al.* Infrared radiation characteristic calculation and image simulation of aircraft [J]. *Acta Armamentarii*, (李建勋, 童中翔, 王超哲, 等. 飞机目标红外特性计算与图像仿真. *兵工学报*), 2012, **33**(11):1310-1318.
- [11] Silk J D. Statistical Variance Analysis of Clutter Scenes and Application to a Target Acquisition test [R]. Institute for Defense Analysis, Nov, 1995: **2950**.