

# 红外辐射特征信号与目标机动模式的相关性

寇添, 周中良, 刘宏强, 杨远志

空军工程大学航空工程学院, 陕西 西安 710038

**摘要** 通过建立目标光谱辐射的包络模型和目标姿态角的动态特征模型, 分析了目标机动模式与姿态角变化率之间的关系。建立了红外辐射的响应信号模型, 并对影响信号特征的关键因素进行了理论分析。结果表明, 空间距离的指数项和高次幂项是影响红外辐射信号幅度整体变化趋势的主要因素, 目标姿态角的变化率对红外辐射响应信号的局部特征影响显著, 且红外辐射响应信号的时间导数与目标姿态角的变化率成正比。选取三种典型的目標机动模式进行了仿真实验, 结果表明, 不同机动模式下目标红外辐射响应特征信号的差异性显著, 这为目标机动模式的识别提供了可行性, 对空间机动目标的跟踪、机动检测和态势评估具有较大意义。

**关键词** 探测器; 红外辐射; 特征信号; 姿态角变化率; 机动模式

中图分类号 TN215

文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201838.0204003

## Correlation between Infrared Radiation Characteristic Signals and Target Maneuvering Modes

Kou Tian, Zhou Zhongliang, Liu Hongqiang, Yang Yuanzhi

Aeronautics Engineering College, Air Force Engineering University, Xi'an, Shaanxi 710038, China

**Abstract** By establishing the envelope model of the spectral radiation of target and the dynamic characteristic model of target attitude angle, the relationship between the target maneuvering mode and the changing rate of the attitude angle is analyzed. The model of response signal for infrared radiation is established and the key factors influencing the signal features are theoretically analyzed. The results show that the exponential terms and the high order power terms of spatial distance are the main factors which influence the overall trend of amplitude change of infrared radiation signal, and the changing rate of the target attitude angle has a significant effect on the local features of the infrared radiation response signals. The time derivative of the infrared radiation response signals is proportional to the changing rate of the target attitude angle. Three typical target maneuvering modes are chosen to perform simulation experiments, and the results show that the target infrared radiation response characteristic signals are significantly different under different maneuvering modes, which provides a feasibility to identify the target maneuvering modes and has great significance to the target maneuver tracking, maneuvering detection and situation evaluation.

**Key words** detectors; infrared radiation; characteristic signals; changing rate of attitude angle; maneuvering mode

**OCIS codes** 040.3060; 040.1880; 070.2025

## 1 引 言

复杂电磁环境下, 以雷达探测为主的传感器常被干扰; 随着隐身技术及高速飞行器研究的发展, 这种主动探测的传感器的战场感知能力大大减弱<sup>[1]</sup>。相反, 以被动红外探测为主的传感器不受电磁环境

干扰, 具有隐蔽性好、灵敏度高和可全天候工作的优势, 在战场上的地位日益凸显<sup>[2]</sup>。目前, 红外目标的识别技术已成为研究热点之一, 它包括目标属性和机动模式的识别。其中, 关于目标属性识别的研究较多, 而基于红外辐射信号的目标机动模式识别的研究鲜有报道。这种识别方法主要是对红外辐射的

收稿日期: 2017-06-29; 收到修改稿日期: 2017-09-13

基金项目: 国家自然科学基金(61172083)

作者简介: 寇添(1990—), 男, 博士研究生, 主要从事光电探测与对抗技术方面的研究。E-mail: shanxiakkt@163.com

导师简介: 周中良(1978—), 男, 博士, 副教授, 博士生导师, 主要从事光电武器作战试验与效能评估方面的研究。

E-mail: zhouzl@163.com

时空信号进行分析并提取潜在的信号特征<sup>[3]</sup>,从信号层级上提供一种目标机动模式识别的新方法,主要解决目标意图的预测问题,这对空战决策和态势威胁评估具有重要意义。

当前,目标机动模式的识别主要通过目标加速度或速度矢量的变化来估计目标的机动状态;而传感器不能直接获取目标的加速度信息,仅依靠距离变化的信息难以准确识别目标的机动模式<sup>[4-5]</sup>。红外传感器可接收远距离目标的红外辐射信号,而这种信号中隐含着目标丰富的时空特征,它们与目标的属性和状态变化密切相关。然而,利用红外成像的方式进行目标探测识别的方法,常常局限于目标的红外序列图像特征,其作用距离短,且往往将目标姿态变化所引起的红外辐射的特征信号当作干扰辐射信号加以抑制,忽略了包含在目标时空特征信号中的机动行为信息<sup>[6-9]</sup>。在现代空战中,顺应高速目标拦截和机动目标跟踪识别的迫切需求,以红外探测为主的传感器需要提取出目标机动状态的时空特征信号,这种特征信号是机动目标跟踪识别的重要基础<sup>[10-12]</sup>。在飞行器光学寻的制导领域,为提升导弹的抗干扰和跟踪识别能力,很多学者利用目标机动模式与红外辐射特征信号之间的密切关系辅助导弹制导结构的设计,以增强复杂环境下导引头的自主决策能力。然而,他们并没有从理论上深入分析辐射特征信号与目标机动模式之间的关联性和可分性<sup>[13-14]</sup>。

光学序列图像的识别方法通过成像姿态的旋转变化所引起的目标形心位置的变化来识别目标机动模式,识别概率较低,因此需要采用确定性的方法来分析目标在特定运动模式下的特征信号,从理论上建立红外光谱特征信号与目标运动模式间的关系,建立相应的参数化模型,解决目标运动模式的可分性问题。

## 2 红外机动目标的特性

目标特性分析是红外辐射探测的重要研究内容之一。红外机动目标特性主要表征在红外辐射包络和目标姿态变化上。红外辐射包络是指目标本征辐射和反射背景辐射的空间强度分布,其分布特性取决于目标的材料、高度、运动状态等因素;而目标姿态角的变化特性与机动模式密切相关。

### 2.1 目标的红外辐射特性

目标辐射强度包括目标本征的辐射强度和反射背景的辐射强度,虽然反射辐射强度总体上小于目

标本征辐射强度,但在目标的特定方位上,反射环境的光谱辐射能量较大。建立目标反射背景辐射的空间分布,如图1所示,其中 $Oxyz$ 表示以目标中心为原点的直角坐标系, $\alpha$ 和 $\theta$ 分别为探测器的水平观测角和俯仰观测角。图2所示为目标蒙皮面元辐射和反射环境辐射的示意图,其中 $A_k$ 为面元面积, $\rho_k$ 为蒙皮面元反射率, $\beta$ 为太阳光线与面元法线间的夹角。

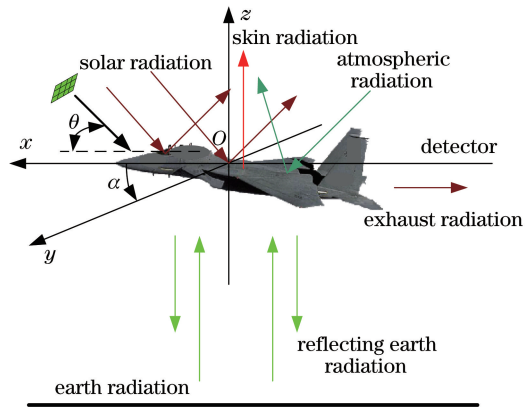


图1 目标反射背景辐射的示意图

Fig. 1 Schematic of target reflecting background radiation

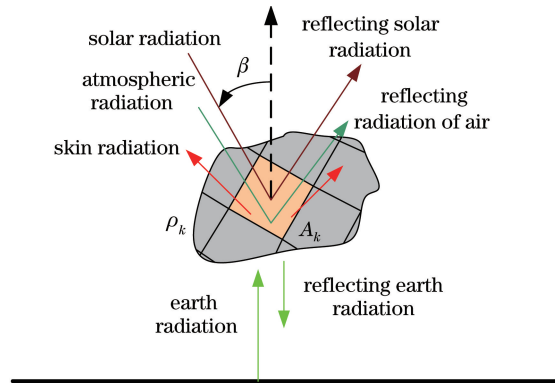


图2 目标蒙皮辐射的示意图

Fig. 2 Schematic of target skin radiation

目标上表面和下表面的反射背景辐射不同,需从 $xOy$ 水平面和 $xOz$ 俯仰面进行分析。若目标迎着太阳飞行,即太阳辐射夹角 $\beta \in (0, \pi/2)$ ,则面元 $k$ 反射的太阳辐射亮度<sup>[15]</sup>为

$$L_{\text{sun}_k} = \frac{1}{\pi} \rho_k E_{\text{sun}} \tau_h \sin \beta [F(\lambda_2 T_{\text{sun}}) - F(\lambda_1 T_{\text{sun}})], \quad (1)$$

$$\text{式中 } F(\lambda T) = \frac{\int_0^\lambda M_b(\lambda, T) d\lambda}{\int_0^\infty M_b(\lambda, T) d\lambda}, \quad M_b(\lambda, T) = \frac{c_1}{\lambda^5} \cdot$$

$$\frac{1}{\exp[c_2/(\lambda T) - 1]}, \lambda_1 \text{ 和 } \lambda_2 \text{ 为积分波段边界的波长,}$$

$T$ 为辐射温度,  $\lambda$ 为红外辐射波长,  $c_1 = 3.7415 \times 10^{-16} \text{ W} \cdot \text{m}^2$ 和  $c_2 = 1.4388 \times 10^{-2} \text{ m} \cdot \text{K}$ 分别为第一和第二辐射常数;  $E_{\text{sun}}$ 为大气层外太阳的有效辐照度;  $\tau_h = \exp[-\overline{\mu(\lambda)} \cdot h]$ 为大气层外边界与目标(高度为  $h$ )间的透过率,  $\overline{\mu(\lambda)}$ 为大气的平均衰减系数;  $T_{\text{sun}}$ 为太阳温度。面元  $k$ 反射的大气亮度<sup>[15]</sup>为

$$L_{\text{atmo}_k} = \frac{1}{\pi} \rho_k \sigma T_{\text{atmo}}^4 [F(\lambda_2 T_{\text{atmo}}) - F(\lambda_1 T_{\text{atmo}})], \quad (2)$$

式中  $T_{\text{atmo}}$ 为大气温度,  $\sigma = 5.67 \times 10^{-8} \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K}^4)$ 为斯特芬-玻尔兹曼常量。面元  $k$ 反射的地球辐射亮度<sup>[15]</sup>为

$$L_{\text{earth}_k} = \frac{1}{\pi} \rho_k \sigma T_{\text{earth}}^4 \tau_H [F(\lambda_2 T_{\text{earth}}) - F(\lambda_1 T_{\text{earth}})], \quad (3)$$

式中  $T_{\text{earth}}$ 为地表温度,  $\tau_H$ 为飞行高度路径上地球红外辐射的透过率。在不同方位上, 探测器视线方向上目标的反射背景辐射特性不同。当探测器的视线方向与目标保持水平即探测器在  $xOy$  面内时, 目标反射背景空间的光谱辐射包络为

$$F_{\text{ref}}(\alpha) = \sum_{k=1}^N \rho_k (L_{\text{sun}_k} + L_{\text{atmo}_k}) A_k |\cos \alpha|, \quad 0 \leq \alpha < 2\pi, \theta = 0, \quad (4)$$

式中  $N$ 为视线方向的可见面元数。同理, 当探测器处于目标上方( $xOz$ 面内)时, 目标反射背景空间的光谱辐射包络为

$$F_{\text{ref}}(\theta) = \begin{cases} \sum_{k=1}^N \rho_k [(L_{\text{sun}_k} + L_{\text{atmo}_k}) A_k |\cos \theta|], & 0 \leq \theta < \pi, \alpha = 0 \\ \sum_{k=1}^N \rho_k [(L_{\text{earth}_k} + L_{\text{atmo}_k}) A_k |\sin(2\pi - \theta)|], & \pi \leq \theta < 2\pi, \alpha = 0 \end{cases} \quad (5)$$

空中目标的光谱辐射强度还来源于目标蒙皮和排气系统, 在辐射强度的计算中, 需要将机体蒙皮和排气系统作为一个整体进行网格划分, 然后计算每个网格在视线方向上的辐射强度, 即可得到总的辐射强度包线。因此, 在目标  $xOy$  水平面内, 目标的总体辐射强度为

$$F(\alpha) = \sum_{k=1}^N \epsilon_k \frac{M_k(\lambda T_k)}{\pi} A_k |\cos \alpha| + F_{\text{ref}}(\alpha), \quad 0 \leq \alpha < 2\pi, \theta = 0, \quad (6)$$

式中  $\epsilon_k$ 为面元  $k$ 处的发射率,  $T_k$ 为蒙皮面元  $k$ 的温度,  $M_k(\lambda T_k)$ 为面元  $k$ 处的红外辐射出射度。则在目标  $xOz$  俯仰平面内, 目标的总体辐射强度为

$$F(\theta) = \sum_{k=1}^N \epsilon_k \frac{M_k(\lambda T_k)}{\pi} A_k |\cos \theta| + F_{\text{ref}}(\theta), \quad 0 \leq \theta < 2\pi, \alpha = 0. \quad (7)$$

## 2.2 目标的姿态角动态特性

为简便起见, 分析目标在二维平面内的运动, 载机与空中目标的相对位置关系如图3所示, 其中  $X_d O_d Z_d$ 为机载探测器的坐标系,  $X_t O_t Z_t$ 为目标体的坐标系。以探测器平台坐标系为参考, 目标距离为  $R$ , 目标相对探测平台的方位角为  $\phi$ , 目标偏角为  $\varphi$ , 规定水平面内观测角  $\alpha$ 为探测器视线方向的目标姿态角, 该角度与目标的红外辐射特征信号间有确定性关系。假定机载探测器沿直线接近目标, 并规定其初始速度方向  $V_d$ 为正。目标机动模式的变化体现为速度矢量的变化, 而速度矢量的变化必然会引起目标姿态角的变化, 因此, 目标不同的机动模式对应着不同的姿态角变化率。

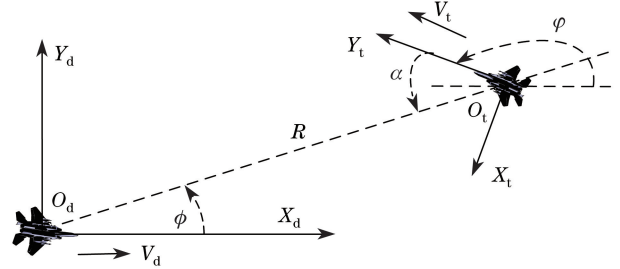


图3 载机与空中目标的相对位置关系

Fig. 3 Relative position relationship between aerial carrier and aerial target

在红外探测器的动态视场下, 目标的姿态角相对于机载探测器是时刻变化的, 目标的红外辐射包络也呈随机过程性的特征, 因此同一方位处探测器红外辐射的响应强度不同。在图3中, 目标姿态角可表示为  $\alpha = \pi + \phi - \varphi$ , 则某时刻  $t$  目标在机载探测器坐标系下的位置  $(x_d, y_d)$  为

$$\begin{cases} x_d = V_d t + R \cos \phi + V_t t \cos \varphi + \frac{1}{2} N_x t^2 \cos \varphi + \frac{1}{2} N_z t^2 \sin \varphi \\ y_d = R \sin \phi + V_t t \sin \varphi + \frac{1}{2} N_x t^2 \sin \varphi + \frac{1}{2} N_z t^2 \cos \varphi \end{cases}, \quad (8)$$

式中  $V_t$ 为目标速度,  $N_x$ 和  $N_z$ 分别为目标的切向和法向过载。由几何关系可得

$$\phi = \arctan\left(\frac{y_d}{x_d}\right). \quad (9)$$

把(8)式代入(9)式, 并对时间  $t$  进行求导, 得到

$$\frac{\partial \phi}{\partial t} = \frac{-4R(V_t + N_x t) \sin \alpha + 2N_z t [V_t \cos 2\varphi + 2R \cos(\alpha + \varphi)] + 4RV_d \sin \phi}{N_x^2 t^4 + N_z^2 t^4 + 2N_x t^2 (2V_t t + N_z t^2 \sin 2\varphi + 2R \cos \alpha) + 4N_z t^2 [V_t t \sin 2\varphi + R \sin(\alpha + \varphi)] + 4V_t^2 t^2 + 2RV_t t \cos \alpha + R^2} \quad (10)$$

实际上,目标姿态角变化引起的红外辐射的响应时间较短,假设探测器和目标的速度变化量远小于其自身速度,即  $N_x t \ll V_t, N_z t \ll V_t$ ;假设距离的变化量也远小于初始距离,即  $V_t t \ll R, V_d t \ll R$ ;再由  $V_t' = N_x, \varphi' = N_z/V_t$ ,得到简化的目标姿态角的变化率公式为

$$\alpha' = \frac{V_t \sin \alpha + N_x t \sin \alpha + N_z t \cos(\phi + \varphi) - V_d \sin \phi}{R - 2V_t t \cos \alpha - N_x t^2 \cos \alpha + N_z t^2 \sin(\phi + \varphi)} - \frac{N_z}{V_t} \quad (11)$$

(11)式是姿态角变化率的一般性表达式。当目标作匀速(CV)运动,即  $V_t, \varphi$  为常数且  $N_x = N_z = 0$

时,目标的姿态角变化率为  $\alpha'_{CV} = \frac{V_t \sin \alpha - V_d \sin \phi}{R - 2V_t t \cos \alpha}$ ,

由于距离  $R$  较大,此时姿态角的变化率很小;当目标作匀加速(CA)运动,即  $N_x$  为常数、 $N_z = 0$  时,目标的

姿态角变化率为  $\alpha'_{CA} = \frac{V_t \sin \alpha + N_x t \sin \alpha - V_d \sin \phi}{R - 2V_t t \cos \alpha - N_x t^2 \cos \alpha}$ ,

同样,距离  $R$  较大,切向过载  $N_x$  较小,故  $\alpha'_{CA} \approx \alpha'_{CV}$ ,此时姿态角的变化率也很小;当目标作匀速圆周(CT)运动,即  $N_z$  为常数、 $N_x = 0$  时,目标的姿态角变化率

为  $\alpha'_{CT} = \frac{V_t \sin \alpha + N_z t \cos(\phi + \varphi) - V_d \sin \phi}{R - 2V_t t \cos \alpha - N_z t^2 \sin(\phi + \varphi)} - \frac{N_z}{V_t}$ ,由

于一  $\frac{N_z}{V_t}$  项的存在,CT 运动模式下目标的姿态角变

化率远远大于其他模式的;当目标作蛇形(S)运动,即  $N_z, N_x$  均为常数时,目标姿态角变化率即为(11)式,此时目标姿态角  $\alpha_s$  的变化率也较为显著。

### 3 红外辐射特征信号与机动模式间的相关性分析

由上面分析可知,空中目标的机动过程伴随着目标姿态角的变化,这种关系说明目标不再是静态点源辐射,而是具有姿态旋转的六自由度辐射源。当从不同观测方向探测目标并考虑时间轴的辐射积分过程时,目标会呈现不同的辐射特征。对于红外探测器捕获的信号来说,除了大气环境和红外探测器性能的影响外,探测到的红外辐射信号特性还受到目标机动模式的影响。以水平面内的机动为例,根据图 3 中机载探测器与目标的空中相对位置关

系,当在一定时段内连续进行目标探测跟踪时,目标的红外辐射在探测器中形成具有一定特征的连续辐射信号,电压响应信号可表达为

$$v_s = \frac{F(\alpha) \tau_0 \tau(\lambda, R) \cdot V_n A_0 D^*}{(A_d \cdot \Delta f)^{1/2} R^2} \quad (12)$$

式中  $\tau_0$  为光学系统透过率,探测器与目标间的大气透过率为  $\tau(\lambda, R) = \exp[-\mu(\lambda) \cdot R]$ ,  $V_n$  为噪声电压,  $D^*$  为比探测率,  $A_d$  为光敏元面积,  $\Delta f$  为系统的等效噪声带宽,  $A_0$  为有效入瞳面积。从(12)式可以看出,红外辐射信号的特征与目标姿态角  $\alpha$ 、辐射波长  $\lambda$ 、目标辐射以及探测器的性能等因素紧密相关。

在机动过程中,目标机动空域的背景辐射变化不大,因此目标辐射波段随速度的变化不明显。当探测器的性能在一定时间内的响应稳定时,红外辐射响应的信号特征主要受目标姿态角  $\alpha$  和空间距离  $R$  的影响,而它们都是时间  $t$  的变量,对(12)式求时间导数得

$$\frac{\partial v_s}{\partial t} = \frac{V_n A_0 D^* \tau_0}{(A_d \cdot \Delta f)^{1/2}} \cdot \exp[-\mu(\lambda) \cdot R] \times \left[ \frac{\alpha' F'(\alpha) R + \mu(\lambda) R^2 R' F(\alpha) - 2F(\alpha) R'}{R^3} \right] \quad (13)$$

从(13)式可以看出,由于空间距离指数项和高次幂项的存在,红外辐射信号的变化幅度受空间距离  $R$  的影响较大。但一般来说,红外辐射特征信号的响应时间较短,  $\Delta R$  变化微小,为便于分析目标姿态角的变化率  $\alpha'$  与红外辐射信号的变化率  $K_{SNR}$  之间的关系,(13)式可进一步化简为

$$K_{SNR} = \frac{\partial v_s}{\partial t} = \alpha' \cdot \frac{V_n A_0 D^* \delta \tau_0 F'(\alpha)}{(A_d \cdot \Delta f)^{1/2} R^2} \exp[-\mu(\lambda) \cdot R] \quad (14)$$

式中  $\delta$  为信号衰减因子。从(14)式可以看出,  $K_{SNR}$  与目标姿态角的变化率  $\alpha'$  成正比关系,即目标姿态角的变化越快,红外辐射响应信号的变化越显著,在高过载机动下,红外辐射响应的信号甚至剧烈变化。空中目标通常有较为固定的几种机动模式,红外辐射响应特征信号的变化率与姿态角变化率之间的正比映射关系为目标机动模式的识别提供了一种新方法。

## 4 仿真结果与分析

选取 CA、S 和 CT 运动这三种典型的机动方式进行仿真验证。对空目标的红外探测器的响应波段一般为中波段,故选取  $\lambda_1=3\ \mu\text{m}, \lambda_2=5\ \mu\text{m}$ , 目标和载机的初始速度  $V_i$  和  $V_d$  可设定为  $300\ \text{m/s}$ ; 作战空域常处于  $H=5\ \text{km}$  左右高度; 在大气层外边界到目标所在高度间, 不同大气层的红外辐射衰减系数不一样, 根据文献[16]可知, 平均衰减系数  $\overline{\mu(\lambda)}=0.4$ , 太阳辐射常数  $E_{\text{sun}}=1353\ \text{W/m}^2$ , 仿真参数的设置见表 1, 其中  $D_0$  (NA) 为光学系统入瞳直径, NA 为数值孔径,  $N_{\text{pixel}}$  为探测器光敏元件个数,  $a$  为光敏元件尺寸。

表 1 仿真参数设置

Table 1 Setting of simulation parameters

Parameter	Value	Parameter	Value
$\lambda_1-\lambda_2/\mu\text{m}$	3-5	$D_0$ (NA) /m	0.5
$V_d/(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$	300	$A_d/\text{mm}^2$	0.0225
$V_i/(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$	300	$N_{\text{pixel}}$	64
$\beta/\text{rad}$	$\pi/6$	$a/\text{mm}$	0.15
$H/\text{km}$	5	$\tau_0$	0.95
$\overline{\mu(\lambda)}$	0.4	$\Delta f/\text{kHz}$	5.0
$E_{\text{sun}}/(\text{W}\cdot\text{m}^{-2})$	1353	$D^*/(10^{10}\ \text{cm}\cdot\text{Hz}^{-1/2}\cdot\text{W}^{-1})$	2.0

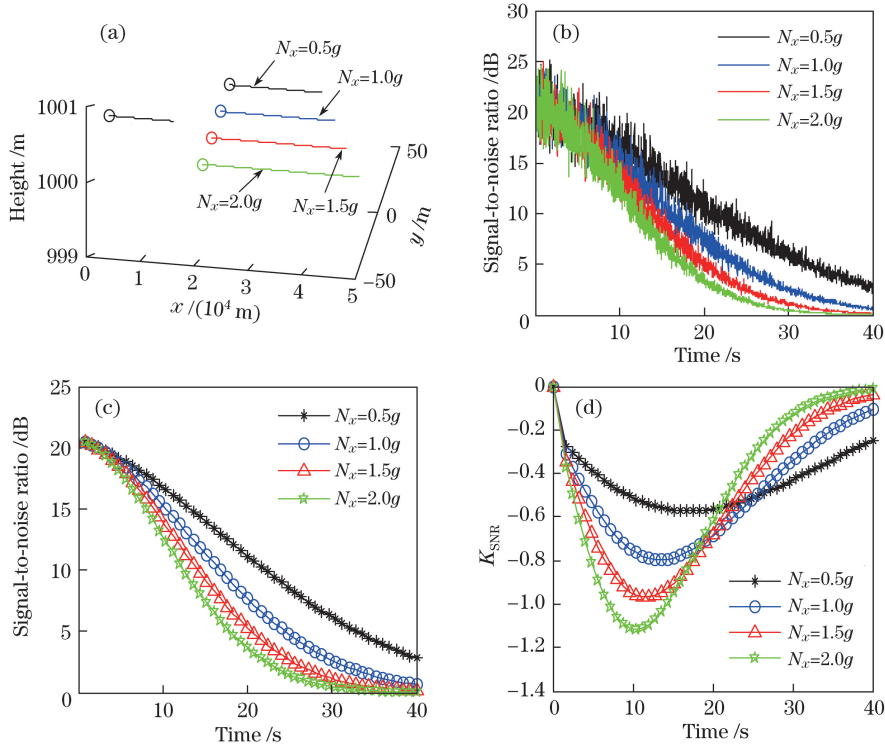


图 4 目标 CA 机动的红外辐射响应特征。(a) 目标和载机的空间航迹;(b) 探测器的红外辐射响应信号;(c) 红外辐射特征信号的滤波结果;(d) 红外辐射响应信号的变化率

Fig. 4 Infrared radiation response characteristics of target which moves with CA maneuvering mode.

(a) Paths of target and aerial carrier; (b) infrared radiation response signals of detector;

(c) filtering results of infrared radiation characteristic signals; (d) changing rate of infrared radiation response signals

### 4.1 目标 CA 机动的红外辐射响应特征

当目标分别以  $0.5g$ 、 $1.0g$ 、 $1.5g$  和  $2.0g$  的切向过载加速且与载机同向飞行时 ( $g$  为重力加速度), 目标和载机空间航迹及探测器的红外辐射响应信号分别如图 4(a)、(b) 所示。由于不同轨迹的间距较小, 分析中可以忽略空间位置对红外辐射响应信号的影响。如图 4(b) 所示, 红外辐射响应信号呈随机过程性的特征, 这是由机载振动平台、大气背景环境和探测器噪声的干扰造成的。对随机特征信号进行滤波处理, 得到图 4(c) 所示结果。

在开始阶段, 目标发动机的尾喷口朝向机载探测器, 目标高温尾焰具有较高的辐射强度, 因此机载探测器的红外辐射响应的信噪比较高。随着目标机动时间的延长, 空间距离的变化量  $\Delta R$  增大, 红外辐射响应信号的幅度整体上呈现衰减特性。目标法向过载  $N_z=0$ , 即目标姿态角的变化率  $\Delta\alpha_{\text{CA}}\approx 0$ , 故在较小的时间间隔  $\Delta t$  内, 红外辐射响应信号的幅度变化平缓。对图 4(c) 所示红外辐射的滤波信号进行时间求导, 得到图 4(d) 所示结果, 可以看到, 随着时间域的扩展, 当目标切向过载  $N_x$  不断增大时,

$K_{\text{SNR}}$  的特征较为明显,但这个特征主要受空间距离的影响。由  $K_{\text{SNR}}$  在时间域上的整体取值来看,  $|K_{\text{SNR}}|$  的取值在  $0 \sim 1.2$  之间(包括 0 和 1.2,下同),均值较小,红外辐射响应信号的变化较为平缓,这也是目标 CA 机动模式的特征。

#### 4.2 目标 S 机动的红外辐射响应特征

当目标以  $N_x = 2g$  的切向过载和  $3g$ 、 $5g$ 、 $7g$ 、 $9g$  的法向过载接近载机飞行时,目标和载机的空间航迹如图 5(a)所示,图 5(b)所示为红外辐射响应源的信号。对随机特征信号进行滤波处理,得到图 5(c)所示结果,可以看出,随着目标机动时间的延长,红外辐射的响应信号整体上呈非线性增长的趋势。由于目标的过载  $N_z$ ,  $N_x$  为常数,即目标姿态角的变化率  $\Delta\alpha_s$  近似不变,故在某些较小的时间间

隔  $\Delta t$  内,随着空间距离  $R$  的减小,红外辐射响应信号的变化越来越显著。

对图 5(c)所示红外辐射的滤波信号进行时间求导,得到结果如图 5(d)所示,可以看到,当目标的法向过载  $N_z$  不断增大时,  $K_{\text{SNR}}$  的特征基本一致。这是因为在较大时间尺度上,随着目标法向过载的增大,目标速度增大,同时目标辐射强度也增大,但由于  $N_z > N_x$ ,目标逐渐偏离机载探测器,距离的偏离量  $\Delta R$  随着过载的增大而增大,这使得红外辐射响应信号在幅度上没有显著差异。从图 5(d)可以看出,  $|K_{\text{SNR}}|$  的取值在  $0 \sim 6$  之间,且大约在时刻  $t = 2, 16, 22, 34, 38$  s,目标姿态角的快速变化和空间距离的变化使光谱响应信号呈周期性的剧烈振荡,且随着时间的延长越来越剧烈。

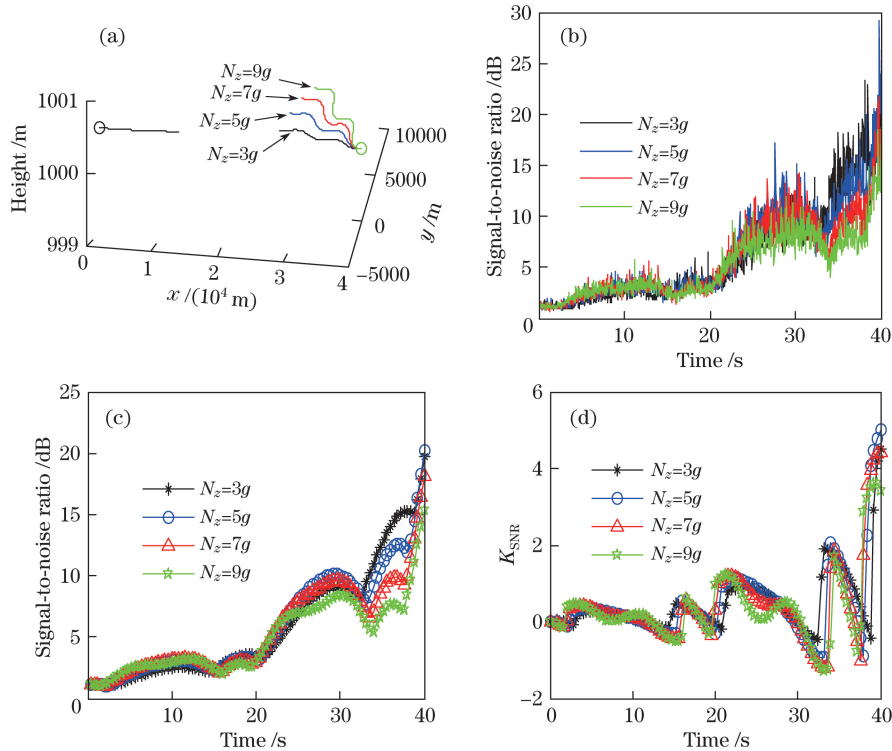


图 5 目标 S 机动接近载机的红外辐射响应特征。(a)目标和载机的空间航迹;(b)探测器的红外辐射响应信号;(c)红外辐射特征信号的滤波结果;(d)红外辐射响应信号的变化率

Fig. 5 Infrared radiation response characteristics of target which approaches aerial carrier with S maneuvering mode.

(a) Paths of target and aerial carrier; (b) infrared radiation response signals of detector;

(c) filtering results of infrared radiation characteristic signals; (d) changing rate of infrared radiation response signals

当载机和目标同向飞行时,目标和载机的空间航迹及探测器的红外辐射响应信号分别如图 6(a)、(b)所示,图 6(c)所示为滤波处理后的红外辐射响应信号。从图 6(c)可以看出,目标的法向过载  $N_z$  越大,目标姿态角  $\theta_s$  的变化率越大,故光谱响应信号的变化越显著。随着目标机动时间

的延长,在较小过载下,红外辐射的响应信号整体上呈非线性衰减趋势;但当过载越大时,红外辐射响应信号的幅度逐渐增大,呈现类似周期性的正弦变化特性。对图 6(c)所示的红外辐射滤波信号进行时间求导,得到图 6(d)所示的结果,可以看到,当目标的法向过载  $N_z$  不断增大时,  $K_{\text{SNR}}$  值起

伏较大,特征差异明显。这是由于在载机尾追情况下,目标姿态角的变化越快,其高温尾喷口越快转向机载探测器,红外辐射度越强,因此红外辐射

响应信号越剧烈,最高可达  $|K_{\text{SNR}}| \approx 6$ 。由此看出,目标作 S 机动比作 CA 机动的  $|K_{\text{SNR}}|$  大,且信号特征较为显著。

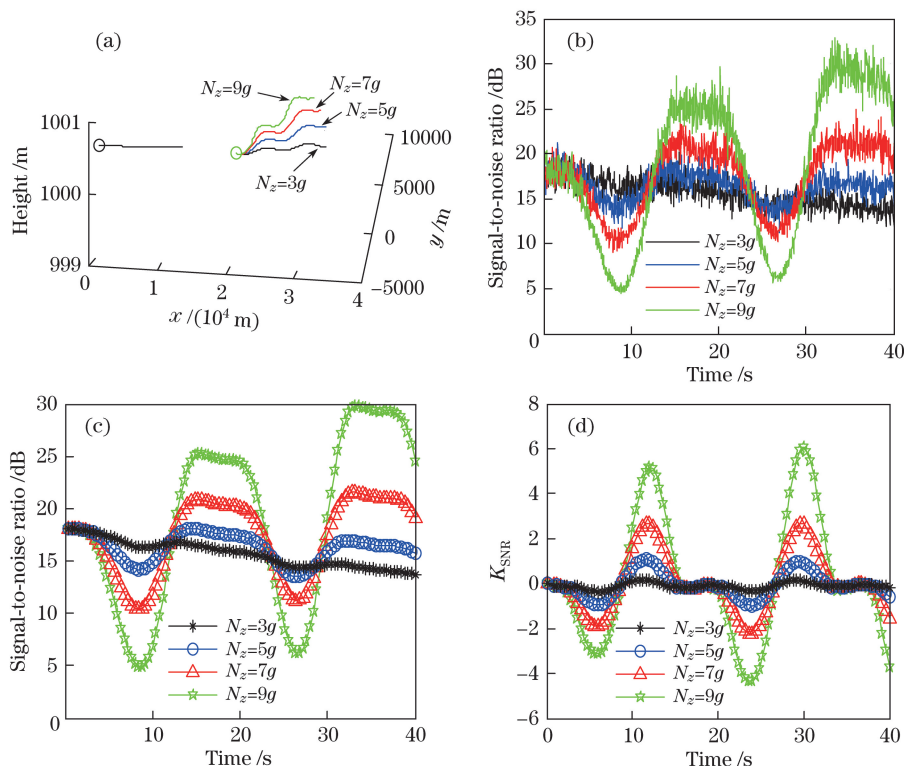


图 6 目标 S 机动远离载机的红外辐射响应特征。(a) 目标和载机的空间航迹;(b) 探测器的红外辐射响应信号;(c) 红外辐射特征信号的滤波结果;(d) 红外辐射响应信号的变化率

Fig. 6 Infrared radiation response characteristics of target which is away from aerial carrier with S maneuvering mode.

(a) Paths of target and aerial carrier; (b) infrared radiation response signals of detector;

(c) filtering results of infrared radiation characteristic signals; (d) changing rate of infrared radiation response signals

### 4.3 目标 CT 机动的红外辐射响应特征

当目标以  $N_x=0$  的切向过载和  $3g、5g、7g、9g$  的法向过载作 CT 运动时,目标和载机的空间航迹如图 7(a)所示,随机过程性的红外辐射响应源信号如图 7(b)所示,对源信号进行滤波处理后得到图 7(c)所示结果。

从图 7(a)可以看出,目标的法向过载越大,其转弯半径越小,姿态角的变化率越大。从图 7(c)可以看出,红外辐射响应信号在特定时间段具有剧烈变化的特征。对图 7(c)所示的红外辐射滤波信号进行时间求导,得到图 7(d)所示结果,可以看出,当目标的法向过载  $N_z$  不断增大时,  $K_{\text{SNR}}$  值变化的周期变短,这是由于此时目标姿态角的变化率  $\Delta\alpha_{\text{CT}}$  仅在法向上变化,法向过载越大,红外辐射响应信号的变化越快,同时  $|K_{\text{SNR}}|$  的均值最大可达  $|K_{\text{SNR}}| \approx 12$ ,远大于目标 CA 机动模式下的均值。从图 7(d)还可以看到,在不同的时刻,  $K_{\text{SNR}}$  出现了阶跃跳变

情况,这是由于目标的高温尾喷口快速转向机载探测器,光谱响应信号发生了剧烈变化。

## 5 结 论

围绕红外辐射响应的特征信号与目标机动模式间的相关性问题,结合目标红外辐射的空间分布特性,分析了目标机动模式与姿态角变化率之间的关系。选取了三种典型的目标机动模式进行仿真实验,实验结果表明,在不同机动模式下,目标的红外辐射响应特征信号的差异性显著。当红外辐射信号呈现缓慢平滑的变化特性且  $0 \leq |K_{\text{SNR}}| \leq 1.2$  时,目标相对于载机作直线机动,  $K_{\text{SNR}}$  为正说明目标接近载机,反之目标远离载机;当红外辐射信号呈现周期性变化且变化越来越剧烈时,说明目标作蛇形机动接近载机,目标的法向过载  $N_z$  越大,则红外辐射信号的变化越剧烈;反之,当红外辐射信号呈现类似于周期性的正弦变化特性且  $0 \leq |K_{\text{SNR}}| \leq 6$  时,说明

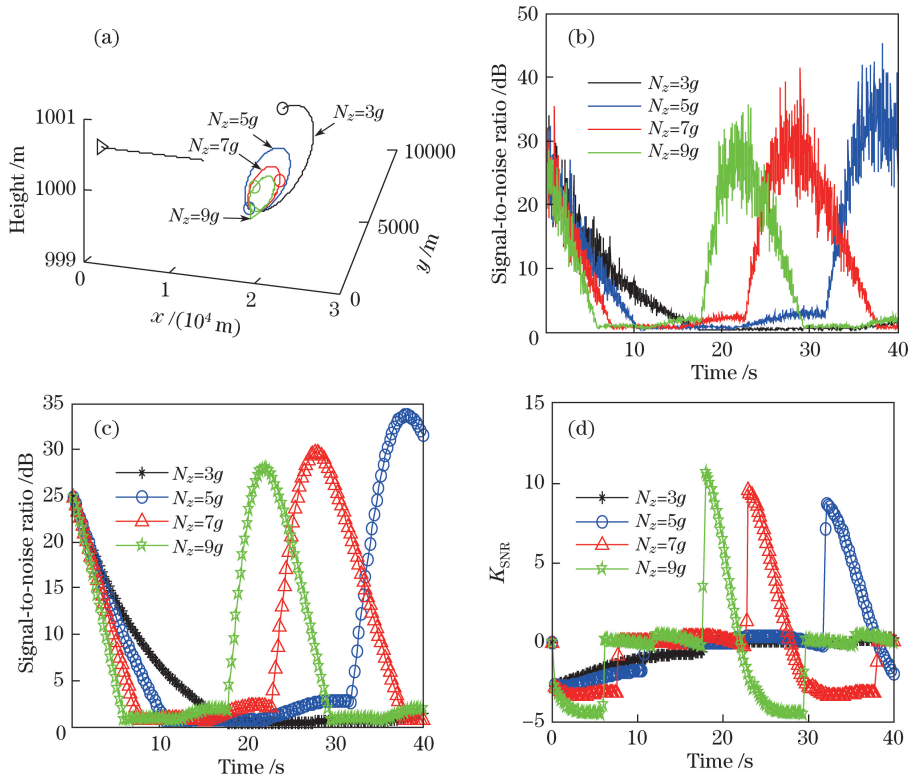


图 7 目标 CT 机动的红外辐射响应特征。(a)目标和载机的空间航迹;(b)探测器的红外辐射响应信号;  
(c)红外辐射特征信号的滤波结果;(d)红外辐射响应信号的变化率

Fig. 7 Infrared radiation response characteristics of target which moves with CT maneuvering mode.

(a) Paths of target and aerial carrier; (b) infrared radiation response signals of detector;

(c) filtering results of infrared radiation characteristic signals; (d) changing rate of infrared radiation response signals

目标作蛇形机动远离载机;当红外辐射信号呈现阶跃跳变特性且  $0 \leq |K_{SNR}| \leq 12$  时,说明目标相对于载机作圆周转弯机动。这些红外辐射响应的特征信号不仅与目标的机动模式有着紧密的映射联系,而且为目标机动模式的识别提供了参考。通过分析目标红外辐射响应的特征信号可进一步估计目标过载、速度和距离变化以及运动态势,这为载机的攻击决策和威胁评估提供了量化的可能,同时对复杂电磁干扰环境下目标的被动识别跟踪具有重要意义。

参 考 文 献

[1] Sangston K J, Gini F, Greco M S. Coherent radar target detection in heavy-tailed compound-Gaussian clutter[J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 2012, 48(1): 64-77.  
 [2] Molebny V, Zarubin P, Kamerman G. The dawn of optical radar: a story from another side of the globe[C]. SPIE, 2010, 7684: 76840B.  
 [3] Karlholm J, Renhorn I. Wavelength band selection method for multispectral target detection[J]. Applied

Optics, 2002, 41(32): 6786-6795.

[4] Li X R, Jilkov V P. Overview of multiple-model methods for maneuvering target tracking[C]. SPIE, 2003, 5204: 200-210.  
 [5] Li X R, Jilkov V P. Survey of maneuvering target tracking. Part II: motion models of ballistic and space targets[J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 2010, 46(1): 96-119.  
 [6] Hao Z C, Zhu M. Serial image registration based on multiple restriction matching algorithm[J]. Acta Optica Sinica, 2010, 30(3): 702-708.  
 郝志成, 朱明. 基于多约束准则匹配算法的序列图像配准[J]. 光学学报, 2010, 30(3): 702-708.  
 [7] He Y J, Li M, Zhang J L. Infrared small target detection method based on correlation filter[J]. Acta Optica Sinica, 2016, 36(5): 0512001.  
 何玉杰, 李敏, 张金利. 基于相关滤波器的红外弱小目标检测算法[J]. 光学学报, 2016, 36(5): 0512001.  
 [8] Dong X B, Zheng Y B, Bai S J. Infrared small moving target detection based on graph matching[J]. Chinese Optics Letters, 2014, 12(12): 121002.  
 [9] Song T L, Lee D G. Effective filtering of target glint[J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic



- Systems, 2001, 36(1): 234-241.
- [10] Zhu Y, Fan H, Lu Z. A novel maneuver detector based on back propagation neural network[J]. Signal Processing, 2011, 91(4): 1054-1059.
- [11] Fan H Q. Maneuvering target movement pattern recognition technology in active searching guidance[D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2008: 11-26.  
范红旗. 主动寻的制导中机动目标运动模式辨识技术[D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2008: 11-26.
- [12] Singer P F, Coursey A L. Feature aided tracking (FAT)[C]. SPIE, 2004, 5428: 249-259.
- [13] Oshman Y, David A. Differential-game-based guidance law using target orientation observations[J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 2006, 42(1): 316-326.
- [14] Zhang T X, Wang Y H, Zhong S. Guidance information processing methods in aircraft optical imaging seeker[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2014: 158-172.  
张天序, 王岳环, 钟胜. 飞行器光学寻的制导信息处理技术[M]. 北京: 国防工业出版社, 2014: 158-172.
- [15] Wang H Y. Infrared radiation and application[M]. Xi'an: Xidian University Press, 2014: 40-51.  
王海晏. 红外辐射及应用[M]. 西安: 西安电子科技大学出版社, 2014: 40-51.
- [16] Wu H P. Infrared search system[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2013: 80-102.  
吴晗平. 红外搜索系统[M]. 北京: 国防工业出版社, 2013: 80-102.