

〈系统与设计〉

浮空红外探测系统预警高动态目标性能分析

刘旭, 李为民, 别晓峰

(空军工程大学 防空反导学院, 陕西 西安 710051)

摘要: 高动态目标飞行速度快, 红外辐射强, 红外探测是对其预警的主要手段之一, 结合浮空平台, 能取得更好的预警效果。分析了浮空红外探测系统对高动态目标的预警优势; 考虑了气象、大气特性、地球曲率、高度等因素, 给出了红外传输的大气透过率计算模型; 建立了红外探测系统的预警距离模型; 通过仿真, 分析了不同天气下浮空红外探测系统对高动态目标的预警距离, 验证了所建模型的有效性, 得出了相关性能分析结论。结合结论, 给出了浮空红外探测系统的部署及应用建议。

关键词: 浮空红外探测系统; 高动态目标; 大气透过率; 预警距离; 仿真分析

中图分类号: TN216 文献标识码: A 文章编号: 1001-8891(2013)12-0788-05

Warning Capability Analysis of Floating Infrared Detection System to High-Speed Vehicle

LIU Xu, LI Wei-min, BIE Xiao-feng

(School of Air and Missile Defense, Air force Engineering University, Xi'an 710051, China)

Abstract: High-speed vehicle has high speed and infrared radiation, for which Infrared surveillance is one of the main warning ways. The better warning effect will be got when float-plane is used. The floating infrared detection system's warning advantage to high-speed vehicle is analyzed. Based on integrative considering on earth curvature, altitude, weather condition and atmosphere characteristic, the model of infrared atmosphere transmittance of is built. The warning range model of infrared detection system is given. Through a simulation analysis on warning ability of floating infrared detection system to high-speed vehicle under different weather, the validity of model built above is verified, and some conclusion on its capability is got. Combined with this conclusion, some advices on deployment and application of floating infrared detection system are given.

Key words: floating infrared detection system, high-speed vehicle, atmosphere transmittance, warning range, simulation analysis

0 引言

目前, 浮空探测技术已取得快速发展。美国所支持的“高空飞艇”(High Altitude Airship, HAA)项目中的试飞型号“高空长航时飞艇样机”(High Altitude Long Endurance Demonstrator, HALE-D), 携带载荷达到22.68 kg, 飞行高度达到18288~21336 m, 停留时间达到10~14天^[1]。可以说, 凭借其滞空时间长, 使用成本低, 可挂载荷多样, 生存能力强等特点, 浮

空探测已经成为空中预警、监视和情报收集系统中的重要一员。

高动态目标也称高超声速目标, 是指飞行速度达到 $5Ma$ 以上的目标。近年来, 世界各军事强国纷纷发展高动态武器, 如美国的X-51、X-43, 俄罗斯的“针”系列、“彩虹”系列, 印度的“布拉莫斯”等^[2]。高动态目标飞行速度快、高度高、突防能力强, 对我国现有空防体系构成了极大挑战。

高动态目标红外预警可以归于光电探测的范畴。

收稿日期: 2013-07-18; 修订日期: 2013-07-24.

作者简介: 刘旭(1987-), 男, 湖南湘潭人, 博士研究生, 研究方向为高空高速目标防御, E-mail: liuxu193@126.com。

通讯作者: 李为民(1964-), 男, 甘肃民勤人, 教授, 博士生导师, 主要从事防空反导作战运筹分析。

基金项目: 国防科技重点实验室基金项目。

利用浮空器挂载红外探测载荷对高动态目标进行预警,较好的结合了浮空器的平台优势和高动态目标红外辐射强的特点,是高动态目标预警的一条可行途径。

在针对浮空红外探测系统预警高动态目标的研究上,目前还没有公开的文献。本文在分析浮空红外探测系统预警高动态目标优势的基础上,建立其预警模型。通过仿真,着重分析了浮空平台飞行高度和探测系统探测仰角这2个因素对预警距离的影响情况。结合仿真结果,为实战中浮空红外探测系统的部署及应用提出了建议。

1 浮空红外探测系统对高动态目标预警优势分析

浮空红外探测系统受平台飞行高度限制,一般部署在0~30 km的空域^[3]。在这一空域,主要由大气层的对流层和一部分平流层组成。在对流层中,有大量的水气,二氧化碳等影响大气透过率的因素^[4],这些因素能大幅度吸收目标红外辐射,对红外探测系统的性能造成很大影响。高动态目标一般飞行于20~100 km的临近空间^[2],这一空域由部分平流层和中间层、电离层组成,在此空域,大气层空气稀薄,状态稳定,影响红外探测系统探测效能的因素较少。浮空红外探测系统对高动态目标的预警一般采用仰视姿势。如图1所示。

在对高动态目标进行预警方面,浮空红外探测系统具有独有优势。从平台方面比较:相比于天基平台,飞行空域处于或接近临近空间的浮空平台能获得更高的探测精度,有益于后续的稳定跟踪、目标识别;相比于空基平台,浮空平台的续航时间更长,覆盖面积更广,维修费用更低,1台浮空器所提供的平台效果能与数架飞机所提供的平台效果相媲美^[3];相比于

地基平台,浮空器能够进行灵活部署,无论在主动预警还是被动防御方面,都比地基平台拥有更多的手段,而且由于浮空器部署在高空,能有效克服地球曲率的影响而达到更好的探测效果。从探测技术比较,红外探测也是较适合高动态目标的预警手段。高动态目标体积小,自身的RCS较低,但其飞行速度快,在飞行过程中,蒙皮、发动机和尾焰都能有较大的红外辐射亮度,可视为明显的红外辐射源。利用红外探测系统对其进行探测,正好利用了高动态目标红外辐射亮度大这一特性。

2 大气透过率模型

红外探测系统接收目标红外辐射受大气影响,参考文献[5]和[9]首先建立目标红外辐射的大气透过率模型。

1) 大气模型

大气层内不同高度的大气特性是相异的,在这里对大气层进行分层建模处理。如图2和图3所示,假设大气层是由若干子大气层组成的,并且同一子层大气内的温度、压力、密度等大气特性相似。红外辐射源与红外探测系统处于不同高度,后者对前者的探测可以看成是红外辐射的大气跨层传输过程。考虑地球曲率,红外辐射的跨层传输过程有2种方式。将传输过程看成一根直线,则:①若直线的端点(两个端点中任意一个)为整条直线与地球球心的最近点,则称为单程传输,如图2中AB所示;②若直线的非端点为整条直线与地球球心的最近点,则称为双程传输,如图3中AC和BC所示。不同高度层的大气透过率差别很大,这时便需要对跨层大气透过率进行计算。

2) 单程大气透过率的计算方法

如图2、图3所示,A为高动态目标,B为浮空红外探测系统,D为A与B之间的距离,H_H、H_L分

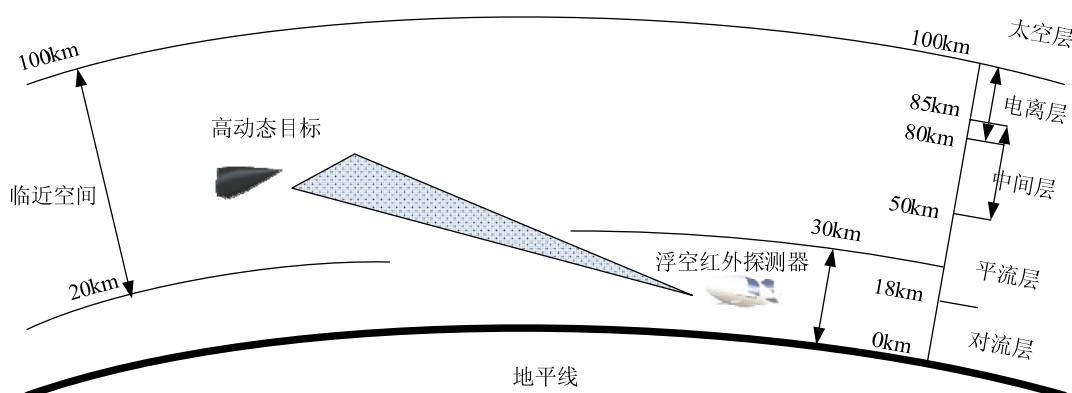


图1 浮空红外探测系统对高动态目标的预警示意图

Fig.1 Warning sketch map of floating infrared detection system to high-speed vehicle

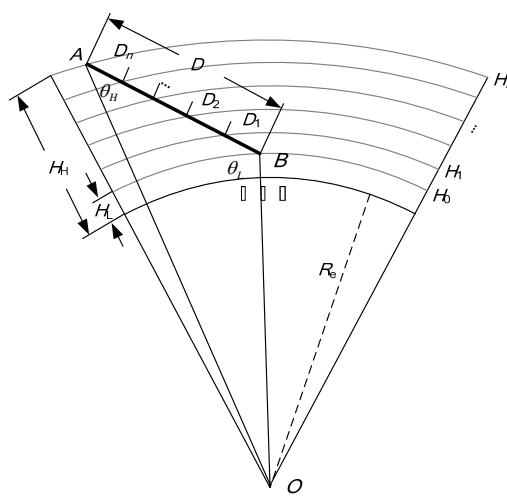


图2 单程传输

Fig.2 Transmission of single path

别为 A 、 B 距地面的高度; O 为地球球心, $R_e = 6371$ km 为地球的等效曲率半径; θ_H 和 θ_L 分别为 $\triangle ABO$ 中 A 点和 B 点对应的夹角。根据上一层的大气层分层建模思想, 将 A 、 B 之间的大气层均分为 n 等份, 各等份的大气层高度为 H_0 、 H_1 、 \cdots 、 H_n , 各等份大气层内红外辐射的传输距离为 D_1 、 D_2 、 \cdots 、 D_n 。则有:

$$H_i = \begin{cases} H_L + (H_H - H_L) \cdot i / n & i = 0, 1, 2, \dots, n \end{cases} \quad (1)$$

$$D_i = \begin{cases} (R_e + H_L) \cos \theta_L + \\ \sqrt{(R_e + H_1)^2 - (R_e + H_L)^2 \sin^2 \theta_L} & i = 1 \\ \sqrt{(R_e + H_i)^2 - (R_e + H_{i-1})^2 \sin^2 \theta_L} - \\ \sqrt{(R_e + H_{i-1})^2 - (R_e + H_L)^2 \sin^2 \theta_L} & i = 2, 3, \dots, n \end{cases} \quad (2)$$

红外辐射在大气中传输时, 主要受到大气分子(水蒸气、二氧化碳和臭氧等)与气溶胶(雾、烟、霾、微尘等)的衰减影响, 这2个因素对红外辐射有较大的吸收和散射作用。令 m 代表大气分子, a 代表气溶胶, k 为每千米大气分子与气溶胶对红外辐射的吸收系数, σ 为每千米大气分子与气溶胶对红外辐射的散射系数, μ 为每千米大气分子与气溶胶对红外辐射的衰减系数。则:

$$\mu = k + \sigma \quad (3)$$

式中: $k = k_m + k_a$; $\sigma = \sigma_m + \sigma_a$ 。不同高度大气分子与气溶胶对红外辐射的吸收与散射系数可由文献[4]查出。

参考文献[4]、[5]、[10]可知, 目前学术界对红外辐射大气透过率没有统一的数学模型。原因在于大气状态受诸多因素影响, 经常变化且无规律, 所建立的

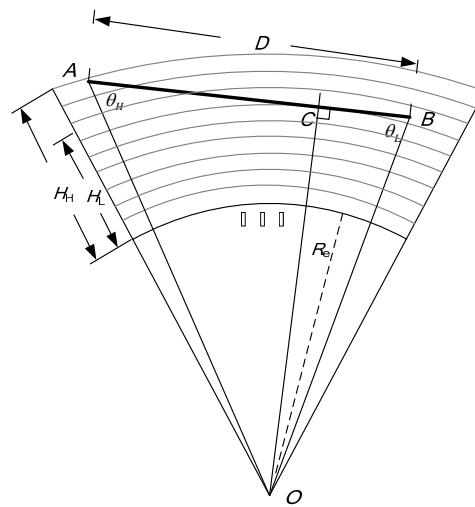


图3 双程传输

Fig.3 Transmission of double path

模型很难绝对反应实际, 只能大致描述。所以, 目前还未有得到公认的红外辐射大气透过率模型。在这里, 考虑到不同波段红外辐射受大气影响不同, 而选择大气吸收小的波段有益于对目标的观测, 选择 $3.4 \sim 4.0 \mu\text{m}$ 作为本文的观测波段, 并建立这一波段的红外辐射在第 i 层传输的大气透过率模型如下式所示:

$$\tau_i = e^{-\mu_i D_i} \quad (4)$$

在此基础上, 建立这一波段的红外辐射多层传输的大气透过率模型如式(5)所示。需要说明的是, 式(5)只适合单色波长或大气吸收非常弱的波段^[11-12]。本文考虑的波段为 $3.4 \sim 4.0 \mu\text{m}$, 属于大气吸收较小的波段, 所以式(5)是成立的。

$$\tau_{AB} = e^{-\mu_1 D_1} e^{-\mu_2 D_2} \cdots e^{-\mu_n D_n} \quad (5)$$

3) 双程大气透过率的计算方法

分析图3可知, 将 AB 直线中的 C 点视为新的端点, 则 AB 双程路径可分为 AC 和 CB 两个单程路径。假设 τ_{AC} 、 τ_{BC} 为 AC 、 CB 单程路径的大气透过率, 则双程路径 AB 的大气透过率为:

$$\tau_{AB} = \tau_{AC} \tau_{BC} \quad (6)$$

3 红外探测系统预警距离模型

假设预警对象在足够远的距离就能进入探测系统的视线范围内, 此时目标张角小于探测系统的瞬时视场时, 可视作点目标。结合文献[4]、[5], 建立红外探测系统预警距离计算模型为:

$$R = \left[\frac{\delta(L_t - L_b) \cdot A_t \cdot A_0 \cdot \tau_a(R) \cdot \tau_0 \cdot D^*}{N_t \cdot \text{SNR} \sqrt{A_d / t_{\text{int}}}} \right]^{1/2} \quad (7)$$

式中: δ 为信号提取因子; L_t 为目标红外辐射亮度, $W/(sr\cdot m^2)$; L_b 为背景红外辐射亮度, $W/(sr\cdot m^2)$, 一般为经验值; A_t 为目标在探测系统方向的投影面积, m^2 ; A_0 为光学系统的孔径面积, $A_0=\pi D^2/4$, m^2 (其中 D 为光学系统的孔径, m); $\tau_a(R)$ 为红外传输路径的大气透过率, 由上节大气透过率的计算方法进行计算; τ_0 为光学系统透过率; D^* 为红外探测系统比探测率; N_t 为目标在焦平面上所占的像元数; SNR 为信噪比; t_{int} 为工作时的积分时间, s ; A_d 为探测系统单个像元面积, $A_d=a^2$, m^2 (其中 a 为红外探测系统像元尺寸, m)。

4 仿真分析

1) 影响因素选取及参数设置

由式(7)可以看出, 红外探测系统对目标的预警距离主要影响因素为: 目标红外辐射亮度、大气透过率。而由式(2)、(5)、(6)可以看出, 大气透过率主要与平台飞行高度、目标飞行高度, 以及探测系统对目标的探测仰角有关。为了便于研究, 将目标红外辐射亮度和目标飞行高度设置为定值, 只研究平台飞行高度和探测系统探测仰角对预警距离的影响。

结合文献[6]、[7]、[8]设置高动态目标的相关参数。选择美国空军正在进行试验的 X-51A 高超声速巡航导弹作为研究对象。飞行速度为 $6.5Ma$, 飞行高度为 35 km, 观测角度为侧视, 观测波段选择为 $3.5\sim 4.0\mu m$ 。在这种情况下, 目标的红外辐射亮度近似为 $8\times 10^4 W/sr\cdot m^2$ 。取红外探测系统相关性能参数分别为表 1。

表 1 红外探测系统参数取值表

Table 1 The parameter number of infrared detection system

信号提取因子 δ	0.707
背景红外辐射亮度 L_b	$10 W\cdot sr^{-1}\cdot m^{-2}$
像元数 N_t	9
投影面积 A_t	$3 m^2$
光学系统的孔径 D	0.5 m
光学系统透过率 τ_0	0.9
像元尺寸 a	$30\times 10^{-6} m$
信噪比 SNR	5
工作时间 t	$20\times 10^{-3} s$
比探测率 D^*	$7\times 10^9 cmHz^{1/2}W^{-1}$

由于我国大部分地区处于亚热带地区, 大气模型选择中纬度夏季大气模型, 具体参数见文献[4]。将中纬度夏季大气模型应用于探测距离模型, 分晴朗、阴雨两种天气。

2) 仿真分析

分别对不同天气条件下浮空红外探测系统对高动态目标的预警距离进行了仿真, 结果如图 4。

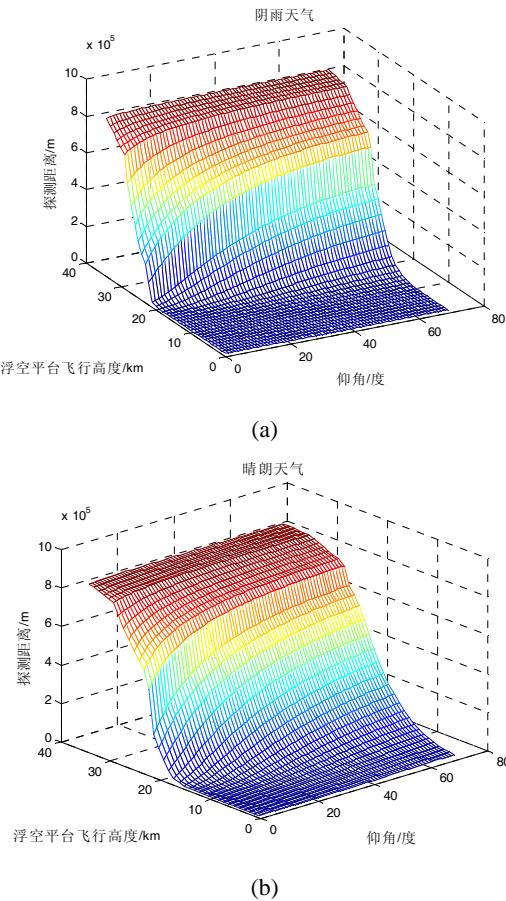


图 4 不同天气下浮空红外探测系统对高动态目标的预警距离

Fig.4 Warning distance of floating infrared detection system to high-speed vehicle under different weathers

分析图 4, 可以得出以下主要结论:

①浮空平台的飞行高度与红外探测系统的探测距离成正比关系。实际上, 平台所处位置越高, 则越脱离气象的影响, 目标与探测系统之间的大气分子、气溶胶等越少, 红外探测系统的探测距离也随之越大。仿真得出的结果与实际情况吻合, 论证了本文所建大气透过率模型的有效性。据此结论, 在对浮空平台进行部署时, 则应尽量选择更高的高度进行部署, 达到更好的探测效果。

②天气状况影响处于对流层飞行的红外探测系统预警能力。对比图 4(a)、图 4(b), 当浮空平台飞行于 $0\sim 18$ km (对流层) 时, 阴雨天气下红外探测系统对目标的预警距离远远小于晴朗天气下红外探测系统对目标的预警距离。而当浮空平台飞行于 $18\sim 35$ km (平流层) 时, 阴雨天气下红外探测系统对目标的预警距离与晴朗天气下红外探测系统对目标的预警距离无较大差别。这是因为, 气象的变化一般发生在对流层, 阴雨天气时, 对流层内诸如大气分子、气溶

胶等影响大气透过率的物质大大增加,导致探测系统探测距离下降,而平流层由于不受气象变化的影响,所以探测系统的探测距离无较大变化。在部署浮空红外探测系统时,应考虑这方面的因素,尽量选择在平流层进行部署,避免预警性能受到天气变化的影响。

③探测仰角对飞行于30km以下浮空红外探测系统的探测能力有较大影响。对比图4(a)、图4(b),当浮空平台飞行高度低于30km时,探测仰角与探测距离成正比关系;当浮空平台飞行高度高于30km时,探测仰角的变化对探测距离没有太大的影响。这是因为,在30km以下的高度,大气层的分子密度和气溶胶密度随着高度的增加而减少,底层大气对目标红外辐射的吸收能力强于高层大气对目标红外辐射的吸收能力。处于30km高度以下的传感器,探测仰角越小,目标红外辐射在传输到探测系统前被大气杂质吸收得越明显,探测系统的探测距离则越低。而30km以上高度的大气层中,大气层的分子密度和气溶胶密度与没有较大变化,处于这一空域的探测系统的探测仰角对探测距离影响不大。所以,飞行在30km以下的浮空红外探测系统,应尽量选择一个较大的探测仰角,以达到更好的预警效果。

5 结束语

预警探测是对高动态目标拦截作战过程中的关键环节,更优的预警探测能力能为作战部队提供更多的反应时间,提高拦截概率。论文的研究对高动态目标红外探测装备的发展具有一定意义。本文仅抛砖引玉,针对高动态目标预警方面的下一步研究还包括:

①其他平台(天基、空基、陆基)探测载荷对高动态目标的预警能力分析;②多种平台协同预警高动态目标方面的研究等。

参考文献:

- [1] 杨大伟. 球载雷达探测低空小目标的性能分析[J]. 舰船电子对抗, 2012, 25(2): 38-43.
- [2] 张丽静, 刘东升, 于存贵, 等. 高超声速飞行器[J]. 航空兵器, 2010(2): 13-16.
- [3] 范春石, 王彦广, 马蓉, 等. 深空自主飞艇探测器技术发展[J]. 航天器工程, 2012, 21(2): 85-93.
- [4] 张孝霖, 陈世达, 舒郁文. 红外技术应用[M]. 北京: 化学工业出版社, 2004.
- [5] 雷中原, 张琳, 李为民. 机载红外预警系统反导预警能力建模与仿真分析[J]. 红外与激光工程, 2009, 38(6): 1047-1053.
- [6] Lesliel Dm John, Dan E. hypersonic test capabilities overview. AIAA 2009-1702.
- [7] 田昌会, 蔡明, 王斌科, 等. 红外辐射对比度概念的探讨[J]. 空军工程大学学报: 自然科学版, 2013, 14(4): 81-83.
- [8] 刘旭. 空基红外预警系统对高超声速巡航导弹预警能力分析[D]. 西安: 空军工程大学导弹学院, 2012.
- [9] 雷中原, 李为民, 吕文平, 等. 空天面红外系统反巡航导弹预警能力建模与仿真分析[J]. 战术导弹技术, 2010(5): 116-120.
- [10] 陈学中. 大气环境与微波激光武器[M]. 北京: 解放军出版社, 2006.
- [11] 石晓光, 王彬, 杨进华. 红外系统[M]. 北京: 兵器工业出版社, 2005.
- [12] 张亮, 赵锋, 王雪松. 视线方向上飞机红外特性及大气衰减模型研究[J]. 红外技术, 2011, 33(6): 367-371.