

临近空间红外探测像面照度建模与仿真

黄 晨,梁小虎,王建军,高 昕

(北京跟踪与通信技术研究所,北京 100094)

摘 要: 低空突防目标飞行高度低、时间短,对其进行有效的探测一直是研究的重点和难题。以 $2.7\ \mu\text{m}$ 、 $4.3\ \mu\text{m}$ 作为探测系统的中心波长,建立了临近空间红外探测像面照度模型。模拟 SBIRS 天基红外系统和临近空间探测系统,仿真典型目标弹道,考虑大气影响,得到主动段、被动段红外辐射分别在 SBIRS 预警卫星和临近空间平台的像面照度及目标背景调制对比度。仿真结果表明:对于低空突防目标,临近空间平台较 SBIRS 拥有更高的信号对比度及更长的探测时间。在被动段,以 $4.3\ \mu\text{m}$ 为探测中心波长探测效果好于 $2.7\ \mu\text{m}$ 。

关键词: 低空突防目标; SBIRS; 临近空间; 红外辐射; 像面照度

中图分类号: TN21 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-2276(2014)10-3217-05

Modeling and simulation of imaging plane irradiance for near space infrared detecting

Huang Chen, Liang Xiaohu, Wang Jianjun, Gao Xin

(Beijing Institute of Tracking and Telecommunications Technology, Beijing 100094, China)

Abstract: It has been the focus of the study for effective detection of low altitude penetration target which has low altitude, short flight time. To $2.7\ \mu\text{m}$, $4.3\ \mu\text{m}$ wavelength as the center of the detection system, a near space infrared detection image plane irradiance model was established. SBIRS space-based infrared system and the near space detection system were simulated. Simulating typical target trajectory, considering the atmospheric effects, infrared radiation image plane irradiance and modulation contrast of object and background of boost phase and post-boost phase at SBIRS and near space platform were obtained. Simulation results show that near space platform has a higher signal contrast and a longer detection time than SBIRS. For TBM's post-boost phase, the detection effect of $4.3\ \mu\text{m}$ is better than that of $2.7\ \mu\text{m}$ as detection center wavelength.

Key words: low-altitude penetration target; SBIRS; near space; infrared radiation; image plane irradiance

0 引言

对低空突防目标的探测识别预警已成为研究热点。以美国为例,采用天基红外探测卫星对低空突防目标的红外辐射信号进行预警探测。20 世纪 70 年代部署“国防支援计划”(DSP)为其第一代天基预警探测系统,并于 1995 年研制新一代的天基红外预警卫星系统(SBIRS)^[1],包括天基红外系统高轨(SBIRS-GEO)和低轨系统(SBIRS-LEO)。对于典型低空突防目标如战区弹道导弹(TBM)、无人机等,其飞行时间短、飞行高度低、红外信号较弱,现有天基卫星探测手段难以完成,如何进行有效探测成为目前面临的新课题。2006 年初,美国空军科学咨询委员会发布了“在近太空高度持久执行任务”的咨询报告,报告认为,利用近太空这一尚未全面、系统地开发和利用的空域是在近期内执行持久高度监视、情报收集和通信中继等任务的最好选择^[2]。

针对利用临近空间平台对低空突防目标进行探测的成像问题,文中模拟典型目标 TBM 弹道,建立临近空间红外辐射探测像面照度模型,模拟比较美国 SBIRS 天基红外预警系统和临近空间探测系统对目标进行探测,仿真结果表明:临近空间平台相较 SBIRS 对目标红外辐射信号拥有更高的对比度及更长的跟踪探测时间。红外辐射探测角度进一步验证了利用临近空间平台探测低空突防目标的可行性。

1 临近空间平台探测特点及优势

1.1 临近空间

临近空间又称为亚轨道或空天过渡区,包括大气平流层区域、中间大气层区域和部分电离层区域。根据国际航空联合会(FAI)的定义^[3],临近空间的范围确定在 23~100 km;美国空军参谋长 Jumper J 国防部航天负责人 Teets P 和空军航天司令部负责人 Lord L 共同确定的美国临近空间高度为 20~300 km。中国将临近空间定义为 20~100 km。

1.2 临近空间探测优势

临近空间飞行器作为一种新型探测预警平台,在执行相同的探测预警任务时有着得天独厚的优势。

(1) 与天基预警卫星相比

以美国 SBIRS 为例,其高轨预警卫星位于 GEO 轨道(36 000 km)上,低轨预警卫星位于 LEO 轨道

(1 600 km) 上,而临近空间高度远低于预警卫星高度,可达到更好的探测效果。天基预警卫星系统复杂、不易部署,而临近空间平台成本低、便于部署。

(2) 与空基、地基探测相比

预警飞机受国际法约束无法进入对方领空进行预警,且受到燃料、飞行时间限制无法持续长时间滞空工作。地基雷达等探测设备受地球曲率限制、部署环境制约,对早期预警十分有限。

2 TBM 运动方程^[4]

导弹主动段的运动在物理学上属于多相(固相、液相和气相)变质量质点系的复杂运动问题。在研究探测问题时,由于 TBM 距离临近空间平台及 SBIRS 较远,可以把变质量的导弹当作一个可变质量的质点,建立变质量质点的基本方程。在发射坐标系下导弹目标主动段运动方程为:

$$m \frac{dV}{dt} = P + P_c + R + G + F_e + F_c \quad (1)$$

式中: V 为导弹在发射系下的速度矢量; P, P_c, R, G, F_e, F_c 分别为推力、控制力、空气动力、地球引力、牵连惯性力、科氏惯性力。

当导弹发动机工作在稳定状态时,推进剂秒流量为常值。仿真时设推力基本恒定。将推力与控制力的合力建模为大小恒定的有效推力。在攻角不为零时,空气动力包括阻力和升力。不考虑偏离射面的侧向运动,则发射系下射面内的主动段运动方程为:

$$\begin{cases} \frac{dV_x}{dt} = \frac{1}{m(t)} [P_e \cos \varphi - C_x q S_m \cos \theta - C_y^\alpha \alpha q S_m \sin \theta] + g_x + a_{ex} + a_{cx} \\ \frac{dV_y}{dt} = \frac{1}{m(t)} [P_e \sin \varphi - C_x q S_m \sin \theta + C_y^\alpha \alpha q S_m \sin \theta] + g_y + a_{ey} + a_{cy} \\ P_e = g_0 I_{sp} \delta_m \\ m(t) = M_0 - \delta_m t \\ q = \frac{1}{2} \rho (V_x^2 + V_y^2) \\ \varphi = \varphi_{ct}(t) \\ \theta = \tan^{-1}(V_y/V_x) \\ \alpha = \varphi - \theta \end{cases} \quad (2)$$

式中: P_e 为有效推力; δ_m 为发动机燃料秒消耗量; I_{sp} 为相对比冲; C_x, C_y^α 分别为阻力系数、升力系数; $m(t)$ 为导弹瞬时质量; M_0 为导弹起飞质量; ρ 为导弹所在位置高度处的空气密度,这里采用 US1976 标准大气模型 $\rho(h) = 1.219 07 e^{-h/9 146.64}$, g_0 为地面重力系数,这里取 9.8 kg/m^2 , $\varphi_{ct}(t)$ 为俯仰角飞行程序, θ 为速度倾

角, α 为攻角。

根据对飞行程序的要求,最常用的飞行程序方案都包括垂直上升段、转弯段和瞄准段。参考文献[5]中给出一种针对最大射程的飞行程序为:

$$\varphi_{cx} = \begin{cases} \pi/2, 0 \leq u_1 < c_1 \\ 1/(c_2 - c_1)^2 \cdot (\pi/2 - \varphi_k) \cdot (c_2 - u_1)^2 + \varphi_k, c_1 \leq u_1 < c_2 \\ \varphi_k, u_1 \geq c_2 \end{cases} \quad (3)$$

式中: $u_1 = \frac{\delta_m}{M_0} t$; c_1, c_2 为可设参数,控制垂直上升段、转弯段时间; φ_k 为最佳速度倾角, $\varphi_k = \frac{\pi}{4} - \frac{\beta_c}{4} = \frac{\pi}{4} - \frac{L}{4Rk_L}$, 这里 L 为射程, R 为地球半径(取 6371 km), k_L 为射程估计系数。

3 大气红外透过率及背景亮度

根据国外已公布的资料,红外预警卫星探测最佳波段应在 2.63~2.83 μm 和 4.18~4.50 μm 两个波长附近^[6]。采用 Lowtran7 软件计算以 2.7 μm 、4.3 μm 为中心波段红外波段在 0~70 km 高度的大气透过率,如图 1 所示。根据参考文献,得到地球/大气背景辐射^[7],如图 2 所示。

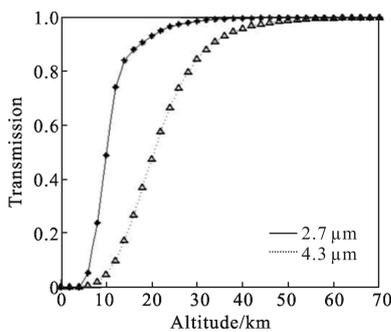


图 1 不同高度大气红外透过率

Fig.1 IR transmission in different atmosphere altitudes

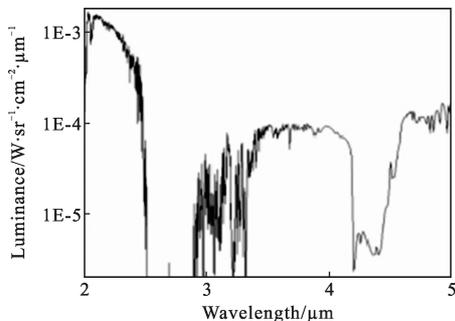


图 2 地球/大气背景红外辐射光谱分布

Fig.2 Infrared radiation spectral distributions of all geo-atmospheric backgrounds

4 红外探测像面照度建模

导弹在主动段期间尾焰可视为 2000 K 黑体辐射源,被动段期间目标可视为 400 K 黑体辐射源^[8]。在探测器像面产生的辐照度关系^[7]如下:

$$E_o = \frac{I \cdot A_{op} \cdot \tau_{op} \cdot \tau \cdot \tau_u}{R^2 \cdot A_m} \quad (4)$$

式中: I 为尾焰辐射强度; A_{op} 为红外光学接收面积; τ 为大气红外透过率; R 为辐射源到探测器的距离; τ_{op} 为光学透过率; τ_u 为红外滤光片透过率; A_m 为像斑面积。

大气背景产生的辐照度:

$$E_{bg} = L_{bg} \cdot A_{op} \cdot \tau_{op} / f^2 \quad (5)$$

式中: L_{bg} 为天空背景辐亮度; f 为红外探测系统焦距。

目标和背景的调制对比度如公式(6)所示,其中 E_{bg} 为背景在探测器像面上的辐照度, E_o 为目标在探测器像面上的辐照度。

$$C = \frac{E_o - E_{bg}}{E_o + E_{bg}} \quad (6)$$

5 模拟仿真

5.1 弹道仿真

在仿真时,采用“大力神-II”空气动力系数利用这组仿真参数,对 TBM 弹道仿真,弹道的 φ_k 取为 $\pi/7$,飞行程序的 c_1 取为 0.05。用四阶龙根库塔数值积分方法得到的发射系下主动段弹道, TBM 射程为 300 km、全弹道飞行时间为 309 s,整个飞行弹道,如图 3 所示。

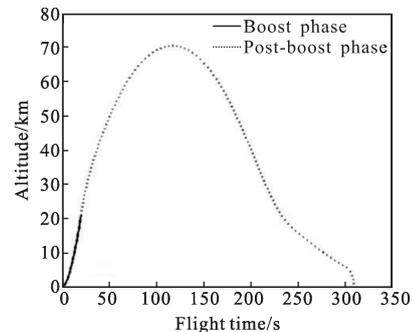


图 3 飞行高度随飞行时间的变化

Fig.3 Flight altitude change with flight time

5.2 红外探测仿真

设临近空间平台星下点为 $A(E105^\circ, 0^\circ)$ 。以 SBIRS 为例,设一颗 SBIRS-GEO、一颗 SBIRS-LEO 预警卫

星,其星下点为 $A(E105^\circ, 0^\circ)$ 。导弹发射工位为 $O(E110^\circ, 0^\circ)$,射向西北。在发射坐标系下的情况如图 4、5 所示。对导弹主动段,对比临近空间平台和 SBIRS-GEO 卫星对目标探测,对导弹被动段,对比临近空间和 SBIRS-LEO 卫星对目标探测。仿真得到像面上目标与背景的调制对比度如图 6 所示。

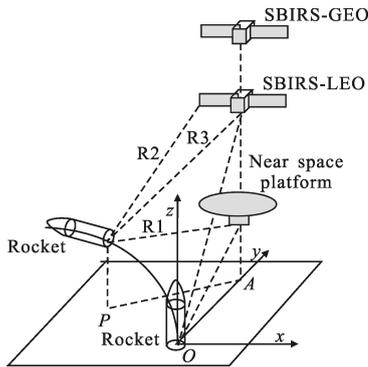


图 4 探测示意图

Fig.4 Schematic diagram of IR detection

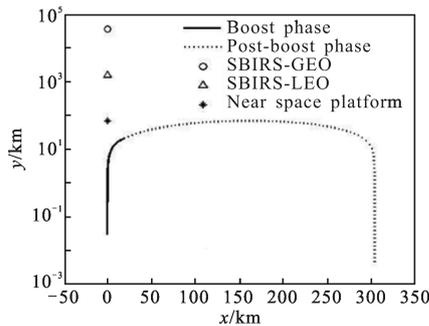


图 5 发射系下导弹弹道与探测器位置关系

Fig.5 Location relation of missile trajectory and detector in launch coordinate system

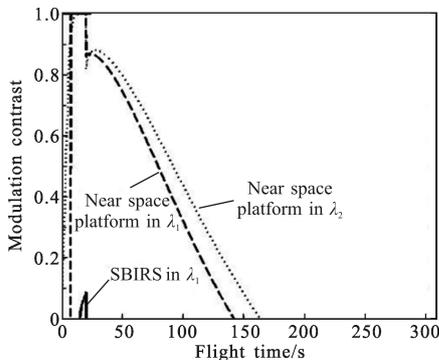


图 6 像面上目标与背景的调制对比度

Fig.6 Modulation contrast of object and background in imaging plane

设探测器最低可探测到的目标与背景调制对比

度为 0.02,波段 1(λ_1)为红外探测波段 $2.7 \mu\text{m}$,波段 2(λ_2)为红外探测波段 $4.3 \mu\text{m}$ 。主动段发现时间 DT,弹道跟踪时间 TT,主动段平均照度 EB,被动段平均照度 EP,主动段平均对比度 MB,被动段平均对比度 MP,仿真数据如表 1 所示。

表 1 仿真数据统计

Tab.1 Simulation data statistics

Platform	Wave-band	EB / $\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$	EP / $\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$	MB	MP	TT/s
Near-space	λ_1	782.8	0.006	0.99	0.476	131.6
	λ_2	45.6	0.077	0.83	0.488	159.7
SBIRS-GEO	λ_1	0.002	-	0.06	-	4
	λ_2	0	-	0	-	0
SBIRS-LEO	λ_1	-	0	-	0	0
	λ_2	-	5.1×10^{-4}	-	0	0

5.3 分析

从以下 5 个方面进行分析:

(1) 对于导弹主动段,GEO 卫星在 14.27 km 高度发现目标,临近空间平台在 3.93 km 高度发现目标,且临近空间的信号强度和对比度优于 GEO 卫星。

(2) 发动机关机进入被动段之后,由于目标的红外辐射信号较于主动段大幅降低,此时在波段 1 及波段 2 上,LEO 卫星已经无法探测到目标,临近空间探测目标信号的平均调制对比度为 0.476 和 0.488。

(3) 对于整个飞行弹道(309 s),在两个波段上,临近空间对导弹目标的探测时间为 131.6 s、159.7 s,SBIRS 仅在主动段对目标保持 4 s 探测时间。

(4) 进入被动段后,随着导弹高度降低,大气透过率降低及探测距离的增大,导致像面照度降低,使得临近空间在波段 1 和波段 2 在导弹飞行 139.1 s、160.2 s 后无法提取目标。

(5) 对于参考文献给出的两个探测波段,在被动段,目标温度较低时,红外辐射主要集中在中长波段,使得波段 2 的像面照度及调制对比度高于波段 1。

6 结论

建立临近空间红外探测像面照度模型,以 $2.7 \mu\text{m}$ 、 $4.3 \mu\text{m}$ 作为探测系统的中心波长,对比 SBIRS 天基预警卫星系统对低空突防目标进行探测。仿真结果

表明临近空间平台对目标的红外辐射信号拥有更高的对比度, 更长的跟踪时间, 能够更有效地探测预警, 较现有的天基系统更有优势。利用临近空间平台部署在指定地区能够对短距离射程、飞行高度低的导弹等低空突防目标进行有效的监视探测。未来在临近空间平台考虑采用可见光、红外、雷达复合探测手段进一步提高对导弹等飞行器的精确探测。

参考文献:

- [1] Andreas N S. Space-Based Infrared System (SBIRS) system of systems[J]. *IEEE*, 1997, 5: 429-437.
- [2] Allen E H. The case for near space[J]. *Aero-Space America Pattern Recognition*, 2006, 44(2): 234-238.
- [3] Zhang Guohua. Analysis of near space target detection [J]. *Modern Radar*, 2011, 33(6): 13-15, 19. (in Chinese)
张国华. 临近空间目标探测分析 [J]. 现代雷达, 2011, 33(6): 13-15, 19.
- [4] Huang Chen, Liang Xiaohu, Wang Jianjun, et al. Modeling and simulation of imaging plane irradiance for the space-based UV detecting of Ballistic missile boost phase [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2013, 42(6): 1405-1407. (in Chinese)
黄晨, 梁小虎, 王建军, 等. 导弹主动段天基紫外探测像面照度建模与仿真[J]. 红外与激光工程, 2013, 42(6): 1405-1407.
- [5] Farina A, Timmoneri L, Vigilante D. Classification and launch-impact point prediction of ballistic target via multiple model maximum likelihood estimator (MM-MLE)[C]//IEEE Conference on Radar, 2006: 802-806.
- [6] Ye Qing, Sun Xiaoquan, Shao Li. Analysis of optimum detective wavebands for infrared early-warning satellite [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2010, 39(3): 390-393. (in Chinese)
叶庆, 孙晓泉, 邵立. 红外预警卫星最佳探测波段分析[J]. 红外与激光工程, 2010, 39(3): 390-393.
- [7] Zhang Weiqing, Xuan Yimin, Han Yuge. Approach of generating infrared picture about the earth background [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2006, 35(1): 40-44. (in Chinese)
张伟清, 宣益民, 韩玉阁. 地球红外辐射背景成像方法研究[J]. 红外与激光工程, 2006, 35(1): 40-44.
- [8] Lei Zhongyuan, Zhang Lin, Li Weimin. Modeling and simulation analysis for the antimissile-warning-ability of the airborne IRealy warning system [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2009, 38(6): 1048-1053. (in Chinese)
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): 1048-1053.