

弹道导弹弹载红外告警装置技术分析

宋万禄,王延新,张爱珍,张梦莹

(天津航技术物理研究所,天津 300308)

摘要:为提高中远程弹道导弹在飞行中段的突防能力,对导弹在飞行中段受到的威胁来源和目前应用的突防措施进行了分析,指出“程序式”突防策略的局限和“智能化”突防策略的优势。通过对陆基中段防御系统及其拦截子系统的工作模式及光谱特征的分析,针对动能拦截弹的特点,创新性地提出了在突防弹头上加装红外告警装置,对拦截弹进行探测和告警,实现“智能”突防的方法。分析了弹载红外探测告警装置需求的探测谱段、探测视场、探测距离、告警时间等指标。经过分析得出结论:弹载红外告警装置所需的技术指标具备技术可行性。

关键词:弹道导弹弹载红外告警系统; 中段突防; 动能拦截弹

中图分类号: TN916 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-2276(2014)08-2466-05

Technical analysis of BM-borne IR warning system

Song Wanlu, Wang Yanxin, Zhang Aizhen, Zhang Mengying

(Tianjin Jinhang Institute of Technical Physics, Tianjin 300308, China)

Abstract: In order to improve the penetration capability of middle-range/long-range ballistic missile in middle flight stage, the menaces for ballistic missile and the measures of penetration at present were analyzed. Meanwhile, the limitations of procedural penetration strategy and the advantages of intelligent penetration strategy were pointed out. By analyzing ground-based midcourse defense system and the operating mode of its interception subsystem as well as spectral signature, infrared (IR) warning system was innovatively installed on the warhead of penetration missile. According to the characteristics of Exoatmospheric Kill Vehicle (EKV) and its booster rocket, the method of smart penetration was proposed, which used Ballistic Missile-borne (BM-borne) IR detection system to detect EKV. Based on analysis and computation of the performance parameters of BM-borne IR detection system: field of view, operating distance, warning time and sense spectrum ranges for example, the conclusion that the method of smart penetration is feasible can be drawn.

Key words: BM-borne IR warning system; midcourse penetration; EKV

收稿日期:2013-12-14; 修订日期:2014-08-25

基金项目:总装航天支撑项目

作者简介:宋万禄(1981-),男,工程师,硕士,主要从事光电对抗系统的设计工作。Email:13752557977@163.com

0 引言

弹道导弹飞行全程分为助推段、中段和末段。从反导拦截效果上说,三个阶段分别从优到差^[1]:助推段拦截效果最好,但拦截难度极大;末段拦截,留给拦截系统的反应时间太短,而且拦截后放射性材料肯定会落入本土,是不得已的选择;中段拦截,虽然弹道导弹已经放出了子弹头和诱饵,拦截系统必须面对真假目标识别问题,但是中段飞行的弹道相对稳定、飞行时间长(最长可达 30 min),背景干净,同时中段拦截防御覆盖面积大,可以覆盖大部分国土。

因此,中段拦截是综合考虑导弹防御效果与技术实现难度的最佳方式,这也是当前各国积极发展中段拦截技术的主要原因之一。

1 弹道导弹飞行中段的主要突防手段和“智能”突防的需求

1.1 飞行中段面临的主要威胁

美国在 20 世纪 90 年代正式启动国家弹道导弹防御系统(NMD)的建设。到了 21 世纪,随着 NMD 和战区导弹防御系统(TMD)统一为一个弹道导弹防御系统(BMDS),NMD 的陆基部分改称陆基中段防御系统(GMD),GMD 系统的拦截子系统是陆基拦截器(GBI)。GBI 系统是一种动能杀伤防御武器,它通过直接碰撞摧毁目标,在大气层外拦截处于弹道中段的高速弹道导弹弹头。

系统作战示意图如图 1 所示^[2]。GBI 由一个多级火箭推进器、一个外大气层动能杀伤飞行器(EKV,

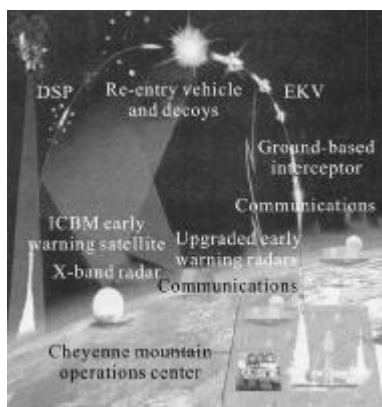


图 1 GBI 系统作战示意图

Fig.1 GBI system workflow sketch

如图 2 所示)和发射拦截弹所需的地面支援设备等组成。表 1 列出了 GBI 的主要性能指标^[3]。

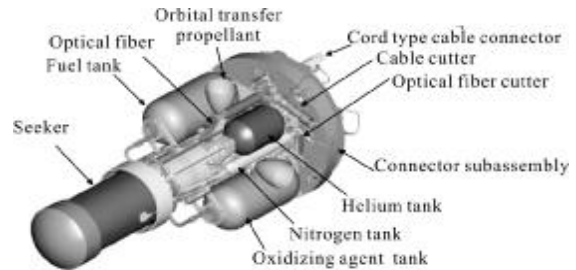


图 2 EKV 组成结构

Fig.2 EKV fabrication

表 1 GBI 主要性能指标

Tab.1 GBI system's performance parameters

	Length /m	Diameter /m	Speed /km·s ⁻¹	Acceleration /m·s ⁻²
EKV	1.4	0.6	2.7-3.2	≤4×9.8
Booster rocket	16.5	1.27	2.7	-

预警系统对来袭导弹连续跟踪,确定导弹飞行轨迹,计算拦截时机和拦截区域,助推火箭根据地面导引系统的信息将 EKV 送入指定拦截区域。EKV 自身装备有长波红外探测器和可见光探测器,同时还可以接收地面 X 波段雷达的数据,与助推火箭分离后,通过雷达的指引,和自身导引头的搜索,识别和跟踪目标,利用姿控和轨控发动机快速变轨和调姿,控制脱靶量,借助飞行的巨大动能,以直接碰撞方式摧毁来袭导弹的弹头。

1.2 “智能”突防的必要性

弹道导弹在飞行中段的突防手段主要有弹头隐身、释放诱饵、机动变轨、释放多弹头和假弹头等。但这些措施都属于“程序式”突防措施,即依据事先的情报分析,预先估计威胁的来源和种类,在预先设定的程序控制下在固定的时刻/位置施展突防手段。突防手段实施的目的性、针对性不强,突防效果也许会因此而打折扣。

以变轨机动突防方式为例,由于 EKV 在飞行的大部分时间段内都可以依靠地面高精度雷达指引方向,不断修正飞行轨道和姿态,如果对 EKV 的拦截时机、拦截空域把握不准,盲目地变轨机动,即使变轨次数很多、过载很大,也不一定能制造出理想的拦

截脱靶量;相反地,如果能针对 EKV 杀伤半径极小(仅 1~1.5 m)的弱点^[4],对 EKV 进行精确定位和跟踪,根据 EKV 的拦截态势,在恰当的时机做出适当的弹道机动,与 EKV 擦肩而过,就能取得事半功倍的效果。

再如对于气球诱饵,尽管多数情况下认为 100 km 以上高空的大气阻力影响可以忽略不计,但实际上,微气动阻力仍然对轻质量目标的速度有影响,因此气球诱饵并不一定越早(或越晚)释放越好;还有,红外诱饵(阵列)要起到干扰作用,必须保证诱饵与弹头间距离恰当,而两者的相对位置与释放的速度和释放时间相关。

通过以上分析,高效的突防策略的核心是准确把握突防手段的实施时机,让导弹能够“料敌先机、先发制人”,进行“智能”的突防。而实施智能突防策略的先决条件是导弹能够对拦截武器进行自主地探测、识别、告警和跟踪,以获得两者间的相对距离、相对速度和拦截弹的来袭方位、加速度等信息。

据此,文中提出在弹道导弹弹头/母舱上安装红外探测告警系统,对中段拦截弹进行探测与告警,继而启动有的放矢的突防手段,进行“智能”突防,提高弹道导弹的生存概率。

理论上讲,弹道导弹和拦截弹是同一类型的空间飞行器,区别仅仅是飞行轨迹不同,弹道导弹能够被拦截弹探测,同样拦截弹也能够被使用对等设备的弹道导弹弹载探测器探测和跟踪。目前,红外探测系统技术日渐成熟,功能日趋完善,并且进行过大量的天基平台的应用实践。而且在 80 km 外的太空,大气对红外辐射衰减极小,红外系统探测距离极远。因此,使用红外告警系统对拦截弹进行探测和告警是“智能”突防的需要,也具备可行性。

2 弹载红外告警系统参数需求分析

2.1 探测谱段

GBI 由两部分组成:三级固体推进剂火箭和 EKV。两者工作性质、阶段不同,探测手段也需区别考虑。

助推火箭的固体火箭发动机工作时会喷射出炽热的尾焰,温度在 1 200~3 500 K 之间,即使经过稠密大气的吸收,在太空中也可以观测到强烈的短波

红外辐射。

EKV 飞行在 80 km 以上的空间。根据仿真和估算,助推段结束时 EKV 表面温度最高,之后快速下降至 400 K 以下^[5](光照区接近 400 K,阴影区约 200 K)。

根据维恩位移定律, $\lambda_T=2\ 898$,200~400 K 温度范围内辐射峰值波长为 7.3~14.5 μm ,应使用长波红外探测系统对 EKV 进行探测。同时,由于 EKV 必须通过自身携带的火箭发动机进行姿控和轨控,短波探测器仍然能间断地探测到 EKV 发出的短波红外辐射。

但考虑到助推火箭关机时与飞行中段的弹道导弹距离在 200 km 开外(参考表 3 数据),对助推火箭探测的意义更偏向于“预警”而非“逼近告警”;再考虑到同时探测长波和短波辐射对告警系统体积的影响、双色共孔径光学系统的设计难度以及宽谱段红外窗口材料选型的限制,在资源有限的情况下应优先考虑对长波红外辐射进行探测。

由于逼近告警系统不需要通过光谱分析判别目标真假,探测谱段范围对探测性能影响不大,因此尽管更宽的探测谱段能够获得更多的能量;但从工程角度考虑,应优先考虑选择工艺技术较成熟的 8~12 μm 长波红外探测系统。

2.2 探测距离

对于弹载红外告警装置来说,拦截弹(无论对助推火箭还是对 EKV)属于“点”目标^[6]。对点目标的探测距离^[7]取决于目标的辐射强度、大气透过率、光学系统参数、红外探测器性能和红外探测系统工作参数。探测距离 R 计算公式如下:

$$R^2 = \frac{A \cdot L \cdot dS \cdot \tau_0 \cdot \tau_A \cdot D^*}{(A_d \cdot \Delta f)^{1/2} \cdot \text{SNR}}$$

式中:A 为光学系统的有效入射孔径面积; τ_0 为光学系统的光谱透过率; τ_A 为被探测红外谱段平均大气光谱透过率; D^* 为探测器在被探测谱段内的平均光谱比探测率;SNR 为信噪比; A_d 为探测器的有效面积; Δf 为系统的噪声等效带宽,即 $1/(2 \times T_{\text{int}})$, T_{int} 为探测器积分时间;L 为被探测谱段内目标平均辐亮度; dS 为标投影面积。

参考红外告警系统地面试验测试数据及红外探测器性能参数,将表 2 参数带入计算公式,如取光学系统有效孔径 $\varphi 200$ mm、积分时间 1 ms、光学系统透过率 70%、EKV 投影面积 0.56 m^2 (EKV 外形近似

圆柱体,根据表 1 数据,投影面积介于底面积 0.289m²与截面积 0.84 m²之间,计算中取中间值)、大气透过率 τ_A 为 100%(由于 EKV 与助推火箭分离时已经飞出稠密大气,大气吸收对探测距离的影响微乎其微),则当 EKV 表面温度 200K 时,探测距离约为 250km。

但考虑到红外告警系统需要安装在弹头上,光学系统的外形、焦距等会受到限制;并且外告警系统探测方向由天向地,不可避免地会受到来自地球的背景干扰,影响探测距离,综合考虑告警系统的探测距离应不小于 100km。在这个探测距离下,既给弹道导弹实施突防预留出了足够的反应时间,也可以降低红外告警系统的设计制造难度,更具有工程可实现性。

表 2 探测距离计算公式中的相关参数

Tab.2 Parameters of detection distance computational formula

Classification	Parameters
IRFPA performance	$D^* = 5 \times 10^{11} \text{ cm} \cdot \text{Hz}^{1/2} \cdot \text{W}^{-1}$ Area of FPA = $(30 \mu\text{m} \times 512)^2$
EKV's characteristics	Projected area of EKV = 0.56 m ² Surface emissivity of EKV = 0.7 Temperature of EKV = 400 K at sunshine; 200 K at darkness
Atmospheric transmittance	$\tau_A = 1$

2.3 探测视场

由于弹道导弹飞行速度极快,拦截弹几乎不可能使用追击的方式进行拦截,而且从目前的资料看,路基/海基发射的拦截弹只能攻击弹头的下半球。因此,在不考虑天基拦截武器的前提下,弹道导弹的威胁来源可以限定在前下方 1/4 球内(图 3 阴影区域所示)。也即对于拦截弹的探测角度,最大只需要 $2\pi \text{ srad}$ 的 1/4,即 $1/2\pi \text{ srad}$ 。

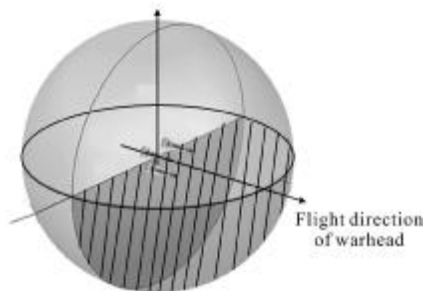


图 3 弹载红外告警系统探测视场示意图

Fig.3 FOV of missile-borne IR detection system

由于告警系统不需要探测拦截弹的形状、纹理等细节信息,因此可以使用角分辨率较低而探测视场很大的光学系统,通过拼接实现 $1/2\pi \text{ srad}$ 视场的覆盖。美国很多机载红外告警系统,如 AN/ALQ-212,使用的就是这类拼接方案。

2.4 告警时间

当告警探测距离为 100 km 时,参考表 1 和表 3 的速度数据,可以得到弹道导弹弹头和拦截弹相向运动直至交汇所用的最短时间:

$$T = D / (V_{BM} + V_{EKV}) = 12.3 \text{ s}$$

式中: D 为探测距离,此处取值 100 km; V_{BM} 为弹道导弹弹头飞行速度,4.9 km/s; V_{EKV} 为 EKV 飞行速度,3.2 km/s。

表 3 弹道导弹性能参数

Tab.3 BM's performance parameters

Range/km	Peak height/km	Maximum speed/km · s ⁻¹	Time of midcourse flight/min
3 500	687	4.9	14.2
2 500	486	4.2	11.1
1 500	259	3.2	7.3

3 结束语

随着拦截技术的快速发展,弹道导弹“按常理出牌”的突防策略不一定能形成理想的效果,传统的程序规避策略将逐渐过渡为“智能”突防策略。文中提出了一种弹道导弹中段智能突防方法的设想:在中远程弹道导弹上使用弹载红外告警装置对拦截弹进行主动、智能的探测与告警,有的放矢地实施防御手段,增加突防概率;并论述了这种方法在突防需求、探测方式、技术指标等方面的理论合理性和技术可行性。

参考文献:

[1] Jin Shengbiao. Current status and trend of USA ballistic missile defense system developent [J]. Missile and Space Vehcile, 2009(5): 57-61. (in Chinese)
金圣彪. 美国弹道导弹防御系统的发展现状及趋势[J]. 导弹与航天运载技术, 2009(5): 57-61.

[2] Jiang Yu. Development of hard-kill antimissile weapon and

- China's antimissile testing [J]. *Shipborne Weapon*, 2004(2): 14-21. (in Chinese)
- 江雨. 太空惊雷-反导硬杀伤武器的发展及中国反导试验[J]. *舰载武器*, 2010(2): 14-21.
- [3] Shao Yuhong. Development and status quo of BMD kinetic energy interceptors [J]. *Modern Defence Technology*, 2012, 40(4): 52-62. (in Chinese)
- 邵余红. 反导动能拦截武器的现状与发展研究[J]. *现代防御技术*, 2012, 40(4): 52-62.
- [4] Gao Peng. Characteristic and countermeasure method of kinetic kill vehicle [J]. *Electro-Optic Technology Application*, 2008, 23(4): 11-13. (in Chinese)
- 高鹏. 动能拦截弹特性及其对抗措施 [J]. *光电技术应用*, 2008, 23(4): 11-13.
- [5] Zhang Jun. Theoretical analysis of temperature field on the surface of ballistic missile warhead in midcourse[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2005, 34(5): 582-586. (in Chinese)
- 张骏. 弹道导弹中段弹头表面温度场分布理论分析[J]. *红外与激光工程*, 2005, 34(5): 582-586.
- [6] Fu Qiang. Modeling and evaluation of infrared point-target operating range [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2013, 42(8): 1991-1996. (in Chinese)
- 付强. 红外点目标作用距离数学建模与评估[J]. *红外与激光工程*, 2013, 42(8): 1991-1996.
- [7] Chen Qianrong. Equivalent calculations of operating distance for IR warning-reconnaissance systems in different weather conditions [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2012, 41(12): 3160-3164. (in Chinese)
- 陈前荣. 红外侦察告警系统在不同气象条件下作用距离等效推算[J]. *红外与激光工程*, 2012, 41(12): 3160-3164.