

# 空天信息支持反导武器系统拦截作战效果分析

黄树彩, 康红霞, 李为民

(空军工程大学导弹学院, 陕西 三原 713800)

**摘要:** 应用武器系统杀伤区计算方法, 研究空天信息支持反导武器拦截弹道导弹作战效果的评估问题。根据空天信息支持反导武器系统的导弹拦截作战流程和系统间的相互作用关系, 设计了衡量空天信息支持反导武器系统导弹拦截作战效果的拦截窗口计算模型。有效地把空天信息引导的及时性和精确性与反导武器系统的作战效果有机结合, 能够实现空天信息支持反导武器系统导弹拦截作战效果的综合整体分析和空天信息对反导武器的引导时机和引导精度等关键要素分析。数值仿真实例进一步说明了所取得的主要结果。

**关键词:** 空天信息; 反导武器系统; 拦截; 作战效果

**中图分类号:** TP 271

**文献标志码:** A

**DOI:** 10.3969/j.issn.1001-506X.2012.03.14

## Intercepting operational effects analysis of anti-BM weapon systems with aerospace information support

HUANG Shu-cai, KANG Hong-xia, LI Wei-min

(Missile Institute, Air Force Engineering University, Sanyuan 713800, China)

**Abstract:** The problem of intercepting operational effects analysis of anti-ballistic missile (BM) weapon systems based on aerospace information support is studied by using a computational method for the killing zone of weapon systems. Based on the intercepting operational workflow of anti-BM weapon systems with aerospace information support and their mutual connections, the algorithms of intercepting window of anti-BM weapon systems are designed, which can measure the operational effects of anti-BM weapon systems with aerospace information support. These algorithms integrate effectively the in-time character and accuracy of aerospace guiding information with the operational effects of anti-BM weapon systems, so it is able to analyze perfectly the support effect of aerospace information for operation of anti-BM weapon systems and the key guidance time and guidance accuracy of aerospace information. A numerical example is given to verify the gained outcomes.

**Keywords:** aerospace information; anti-ballistic missile weapon system; intercept; operational effect

## 0 引言

弹道导弹射程远、飞行速度快、突防能力强、威胁大、隐身性好, 单个预警探测系统发现目标和单个武器系统拦截目标的能力有限, 需要将地理上分散的指挥所、武器系统和多种传感器有效地集成到一起, 充分地一体化并相互深度铰链, 从而对来袭导弹进行全程探测、跟踪、识别和拦截<sup>[1-6]</sup>。因此, 弹道导弹防御作战是一种典型的体系作战。

反导作战要求体系具有更高的时效性、准确性、联动性和自主性, 有效的导弹防御是一项以信息为中心、具有高度计划性和时间敏感性的工作<sup>[7-8]</sup>, 需要依靠导弹防御体系中的各种探测器、指控系统和拦截武器系统之间的信息紧密交互。

反导武器系统导弹拦截作战的关键是及时准确地有效作用范围内精确捕获和跟踪目标并可靠杀伤来袭弹头,

因此反导作战的显著特点表现为快和准<sup>[9-10]</sup>。而反导武器系统在导弹拦截作战过程中, 实现这两点的核心装备是反导武器系统的跟踪制导雷达, 保证跟踪制导雷达快和准的前提是有空天信息的及时准确的提示和引导。

针对反导武器系统的导弹拦截作战这一显著特点, 本文提出能够衡量空天信息对反导武器系统导弹拦截支持作用效果的反导武器系统拦截窗口计算方法, 综合分析空天引导信息的时效性和精准性与反导武器系统的导弹拦截作战效果关系。

## 1 空天信息支持反导作战效果评估模型

空天信息对反导武器系统拦截弹道导弹作战的支持作用效果, 主要体现在反导武器拦截弹道导弹作战的拦截窗口的大小, 而拦截窗口的大小主要受空天信息引导的时效

和精度两个指标的约束。因此,可以以反导武器的拦截窗口作为空天信息支持反导武器系统战术应用效果评估的目标函数,以空天信息引导时机和引导精度作为约束条件,建立空天信息支持反导武器系统战术应用效果评估方法。

### 1.1 反导武器系统拦截窗口计算模型

假定反导武器系统部署在弹道导弹的落点位置,空天信息支持反导武器系统拦截导弹作战的时序关系如图1所示。

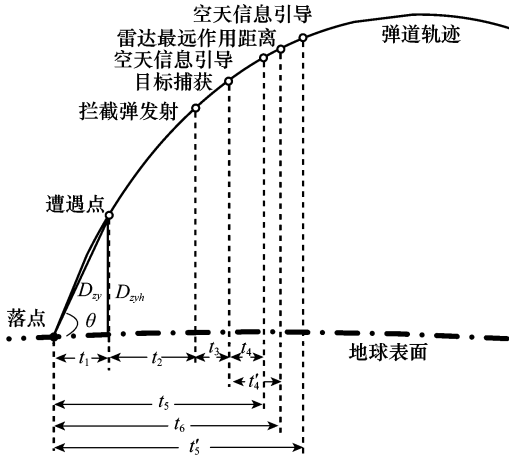


图1 空天信息支持反导武器系统拦截导弹作战时序

图1中各参数定义如下: $t_1$ 为弹道导弹与拦截弹遭遇时的落地剩余时间; $t_2$ 为拦截弹飞行到遭遇点位置的飞行时间; $t_3$ 为反导武器系统遭遇点预测和拦截决策时间; $t_4/t'_4$ 为空天信息引导下反导武器系统目标捕获时间; $t_5/t'_5$ 为反导武器系统接收到空天预警系统的目标引导信息时刻目标落地剩余时间(引导时机); $t_6$ 为反导武器系统制导雷达最远作用距离处目标落地剩余时间; $\theta$ 为遭遇点位置弹道导弹的再入角; $D_{zy}$ 为遭遇距离; $D_{zyh}$ 为遭遇位置的海拔高度。

空天信息支持反导武器系统反导作战的拦截窗口  $I_{window}$  计算式为

$$I_{window} = [D_{min}, D_{zy}] \cap [D_{hmin}, D_{zyh}]$$

$$D_{zy} = \begin{cases} \frac{V_l \cdot V_m}{V_l + V_m} \cdot (t_5 - t_4 - t_3), & \text{引导时刻落地剩余时间} \leq t_6 \\ \frac{V_l \cdot V_m}{V_l + V_m} \cdot (t_6 - t'_4 - t_3), & \text{引导时刻落地剩余时间} > t_6 \\ D_{zyh} = D_{zy} \cdot \sin \theta \end{cases} \quad (1)$$

$$D_{zy} \in [D_{min}, D_{max}], D_{zyh} \in [D_{hmin}, D_{hmax}]$$

式中, $V_l$ 为拦截弹平均飞行速度; $V_m$ 为弹道导弹再入段平均飞行速度; $D_{min}$ 为反导武器杀伤区近界; $D_{max}$ 为反导武器杀伤区远界; $D_{hmin}$ 为反导武器杀伤区低界; $D_{hmax}$ 为反导武器杀伤区高界。

如果经过式(1)计算的遭遇距离  $D_{zy}$  大于杀伤区远界  $D_{max}$ 时,通过  $D_{max}$ 按拦截弹飞行时间反推得出拦截弹发射时刻;如果经过式(1)计算的遭遇距离  $D_{zy}$  小于杀伤区近界  $D_{min}$ 时,则确定此次拦截不具备拦截条件。

同时,需要按式(1)计算的遭遇距离  $D_{zy}$  计算所对应的遭遇点位置距地面海拔高度,当  $D_{zyh}$  大于杀伤区高界  $D_{hmax}$

时,则通过  $D_{hmax}$ 按拦截弹飞行时间反推得出拦截弹发射时刻;当  $D_{zyh}$  小于杀伤区低界  $D_{hmin}$ 时,则确定此次拦截不具备拦截条件。

### 1.2 反导武器系统拦截作战时间序列计算模型

#### (1) 引导时机

为了能够为反导武器系统后续的跟踪和拦截争取更多的时间和机会,预警系统必须尽可能早地向反导武器系统的跟踪制导雷达提供预警引导信息<sup>[10]</sup>。对于反导武器系统的导弹拦截作战,引导时机可以用反导武器系统收到预警引导信息时刻的弹道导弹落地剩余时间来标定。提供较早的引导时机能够保证反导武器系统尽远拦截目标和提供多次拦截机会。

空天预警系统(预警卫星、前沿雷达、临近空间探测器和空基反导系统红外探测器)主要在主动段对导弹进行探测,在进行若干次探测获得导弹的到达角测量值之后,再通过预警卫星观测估计出弹道导弹的关机点,因此空天信息对反导武器系统的引导时机可以用式(2)来度量:

$$t_5 = t_{mg} - t_{ia} - t_{ps} \quad (2)$$

式中, $t_{mg}$ 为弹道导弹飞行时间; $t_{ia}$ 为弹道导弹主动段飞行时间; $t_{ps}$ 为关机时刻和弹道以及落点估计的信息处理时间。

预警雷达的探测通常在导弹发动机关机之后,此时目标已经进入自由飞行段,因此预警雷达发现目标后任意时刻对目标状态的估计值均可用于对弹道的预报,在是否能提供预警的问题上唯一需要考虑的就是状态估计的精度,一旦对目标状态的估计精度达到要求,便可以进行弹道预报提供预警引导信息。

#### (2) 目标捕获时间

反导武器系统的跟踪与制导雷达对弹道目标的捕获时间取决于空天信息的引导精度。

在引导搜索截获工作模式下,为使搜索屏截获目标的概率达到0.997,反导武器系统的跟踪与制导雷达需要设置搜索屏大小应为空天信息的位置引导精度的3倍<sup>[11]</sup>。考虑到水平和高低方向的二维截获,搜索屏的覆盖范围应为  $6\sigma_{az} \times 6\sigma_{el}$ 。则一次搜索的截获时间为

$$t_j = \frac{6\sigma_{az} \cdot 6\sigma_{el}}{(\eta \cdot \frac{\theta_B}{180} \cdot \pi \cdot r)^2} \cdot T_{dwell} \quad (3)$$

式中, $\sigma_{az}$ 为空天信息对雷达的水平方向位置引导精度; $\sigma_{el}$ 为空天信息对雷达的高低方向位置引导精度; $\eta$ 为雷达的波束跃度; $\theta_B$ 为雷达的半功率波束宽度; $r$ 为雷达最远作用距离,或者接收到引导信息时刻的目标距离; $T_{dwell}$ 为雷达波束驻留时间。

为保证导弹穿越搜索屏的过程中能被全概率检测到,雷达采用3次脉冲检测,因此目标截获时间为

$$t_4 \text{ (or } t'_4) = 3t_j \quad (4)$$

#### (3) 遭遇点预测和拦截决策时间

反导武器系统的遭遇点预测和拦截决策时间  $t_3$  是由反导武器系统制导雷达的自身能力所决定,包括雷达建立目标稳定跟踪航迹和识别时间,以及拦截弹发射决策时间等。

#### (4) 拦截弹飞行时间

拦截弹飞行到遭遇点位置的飞行时间  $t_2$  等于弹道导弹从在拦截弹发射时刻所处空间位置飞行到遭遇点所需时间,表达式为

$$t_2 = \frac{D_{zy}}{V_l} \tag{5}$$

(5) 遭遇时的落地剩余时间

弹道导弹与拦截弹遭遇时的落地剩余时间  $t_1$  计算式为

$$t_1 = \frac{D_{zy}}{V_m} \tag{6}$$

## 2 仿真分析

以某型末段高层反导武器系统为例,分析空天信息支持反导武器系统的导弹拦截作战效果。

### 2.1 系统性能参数及弹道导弹典型数据设定

假定某末段高层反导武器系统的性能参数<sup>[12-13]</sup>如表 1 所示,预警系统的性能参数<sup>[14-15]</sup>如表 2 所示。

表 1 反导武器系统性能参数

类型	性能	参数
拦截弹	作战距离/km	90~200
	作战高度/km	40~150
	平均速度/(km/s)	2
雷达	工作频段	X 波段
	波束宽度/(°)	0.35
	驻留时间/ms	10
	作用距离/km	≥1 000
	观察区域/(°)	方位 120 俯仰 0~90

表 2 预警系统性能参数

类型	性能	参数
预警卫星	LOS 随机误差 $\sigma_r/\mu\text{rad}$	15
	LOS 偏置误差 $\sigma_b/\mu\text{rad}$	50
	观测周期 $T_r/s$	1
	引导信息发出时机	小于导弹关机后 20 s
远程预警雷达	工作频段	L 波段
	波束宽度/(°)	0.46
	驻留时间/ms	30
	作用距离/km	≥3 900
	观察区域/(°)	方位 360 俯仰 3~85

典型目标数据<sup>[16]</sup>想定如下。

(1) 弹道导弹目标数据

TBM 发射点:经度/纬度

穿云飞行时间:cb

(2) 弹道导弹飞行数据/km; $rng$ =弹道导弹射程, $R_c$ =地球半径

主动段飞行时间/s; $bt=9.4 \cdot \sqrt[3]{rng}$

主动段距离/km; $bd=0.6 \cdot \sqrt[3]{rng^2}$

主动段距离修正因子; $cf=1-(cb/bt)^3$

观测的主动段距离; $abd=bd \cdot cf$

关机点速度/(km/s); $v=\frac{\sqrt{rng}}{11.5}$

关机点加速度/( $\text{km/s}^2$ ); $acc=5.5+\frac{rng}{600}$

关机点航路角/(°); $ang=45 \cdot (1-\frac{rng}{\pi}R_c)-2$

关机点到落点时间/s:

$$T_{imp} = \frac{(mg - bd)}{(v \cdot \cos(ang + (\frac{180}{\pi}) \cdot \frac{rng}{\pi}R_c))}$$

### 2.2 空天信息支持作用效果分析

假定反导武器系统和远程预警雷达均部署在弹道导弹的落点位置,两颗导弹预警卫均星部署在地球静止轨道。两颗卫星之间的雷达视线(line-of-sight, LOS)夹角为  $67.57^\circ$ <sup>[16]</sup>,实现对弹道导弹飞行的助推段重点监视,向远程预警雷达和反导武器系统提供引导信息;远程预警雷达对弹道导弹飞行的中段进行监视与跟踪,向反导武器系统提供精确的搜索引导信息。

针对 600~3 500 km 的弹道导弹,分别对导弹预警卫星系统<sup>[14,16]</sup>和远程预警雷达系统<sup>[11,16]</sup>的弹道预报精度进行仿真计算,并仿真分析空天信息对反导武器系统拦截弹道导弹的支持作用效果,结果如表 3 所示,同时给出典型的空天信息支持反导武器系统拦截 3 500 km 射程的弹道导弹的作用时序如图 2 所示。

表 3 空天信息对反导武器系统的支持作用效果

导弹射程/km	预警方式	引导误差/km	捕获时间/s	拦截窗口/km	可否实现二次拦截
3 500	预警卫星	48.57	91.80	[90,173]	否
	卫星+预警雷达	10.58	4.32	[90,200]	否
3 000	预警卫星	37.62	54.66	[90,200]	否
	卫星+预警雷达	3.95	0.66	[90,200]	否
2 500	预警卫星	28.14	30.60	[90,200]	否
	卫星+预警雷达	2.27	0.24	[90,200]	否
2 000	预警卫星	24.07	22.38	[90,200]	否
	卫星+预警雷达	1.61	0.12	[90,200]	否
1 500	预警卫星	12.44	6.00	[90,200]	否
	卫星+预警雷达	0.02	0.03	[90,200]	否
1 000	预警卫星	4.62	0.96	[90,200]	否
	预警卫星	4.60	3.30	[90,200]	是
600~3500	自主作战	—	1 176	0	否

从表 1 中的典型反导武器系统的性能参数可以知道,反导武器系统在没有空天信息的支持下自主作战时,由于制导雷达的波束宽度只有  $0.35^\circ$ ,在整个可观察区域内进行全空域搜索,要保证雷达在整个空域内全概率捕获目标,需要 1 176 s 的目标捕获时间,反导武器系统将不具备拦截窗口。

从表 3 中的分析结果亦可以看出,预警卫星协同远程预警雷达的空天信息对反导武器系统作用方式,远比单有预警卫星具有更高的引导精度,将使反导武器系统的制导雷达能够更加快速和准确地捕获目标,从而保证反导武器系统能够在杀伤区远界或更远的距离上拦截弹道导弹目标。

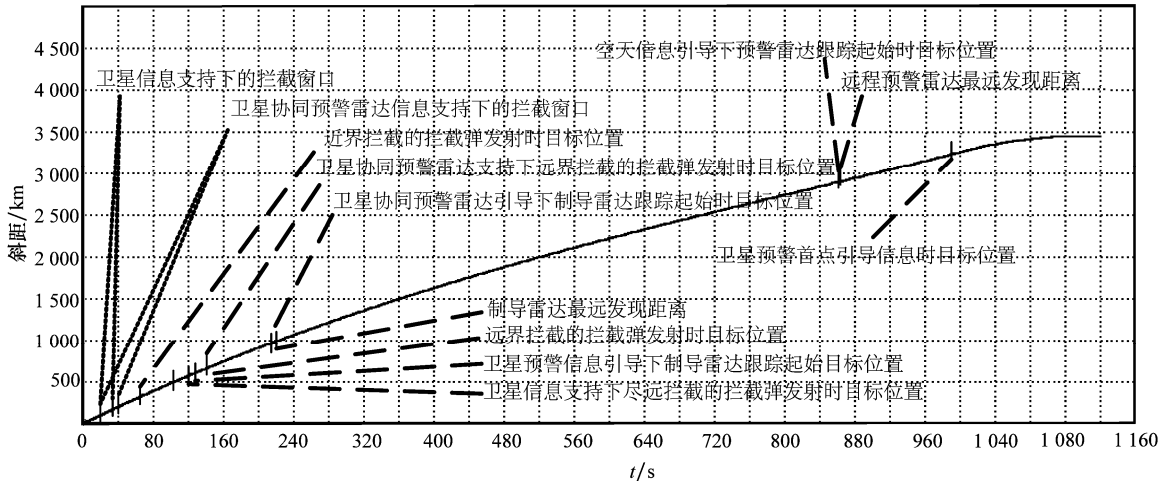


图2 空天信息支持反导武器系统拦截3500 km 弹道导弹的作用时序

### 3 结束语

本文根据反导武器系统的导弹拦截作战具有极高的时效性这一重要特点,提出了衡量空天信息支持反导武器系统拦截弹道导弹作战效果的拦截窗口计算模型。通过仿真计算可以看出,该模型能够从空天引导信息的及时性和精准性两个方面,综合分析空天信息对反导武器系统的支持作用效果。

通过算例分析亦可看出,单独的反导武器系统拦截导弹作战能力十分有限,反导武器系统的导弹拦截作战离不开空天信息的支持,反导作战是一种典型的预警系统和拦截系统高度协同的体系作战;另一方面必须综合利用空地多种预警探测资源且高度协同,并与指控系统和武器系统充分一体化并深度铰链,才能保证反导武器系统导弹拦截作战的时效性;同时空天信息的引导时机和引导精度对反导武器系统的导弹拦截作战起着决定性的作用。

### 参考文献:

[1] United States Government Accountability Office. Defense acquisitions: progress made in fielding missile defense, but program is short of meeting goals [R]. Washington DC: Government Accountability Office, 2008.

[2] George L, Lisbeth G. National missile defense: an indefensible system[J]. *Foreign Policy*, 1999, 117(12): 120 - 137.

[3] Wilkening D A. Airborne boost-phase ballistic missile defense[J]. *Science and Global Security*, 2004, 12: 1 - 67.

[4] Hildreth S A. Ballistic missile defense: historical overview[R]. America: Library of Congress Washington DC Congressional Research Service, 2007.

[5] Ronald O R. Sea-based ballistic missile defense-background and issues for congress[R]. America: Library of Congress Washington DC Congressional Research Service, 2007.

[6] Humali I G. Sensor fusion for boost phase interception of ballistic

tic missiles [D]. Monterey, California: Center for Joint Services Electronic Warfare Naval Postgraduate School, 2007.

[7] Blaha G A, Pendergraft T C, Riley F A. Exploring architectural options for a space based missile defense layer[C]// *Proc. of the AIAA SPACE Conference & Exposition*, 2007: 1 - 10.

[8] Akgül A, Karasoy S. Development of a tactical ballistic missile trajectory prediction tool[J]. *Journal of Electrical & Electronics Engineering*, 2005, 5(2): 1463 - 1467.

[9] Li H, Barbosa P R. Zero-error target tracking with limited communication [J]. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 2008, 26(4): 686 - 694.

[10] 赵峰. 弹道导弹防御跟踪制导雷达探测技术研究[D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2007. (Zhao F. Study on detection techniques of tracking and guiding radars in ballistic missile defense[D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2007.)

[11] United States General Accounting Office. Ballistic missile defense improvements needed in THAAD acquisition planning[R]. America: General Accounting Office Washington DC National Security and International Affairs Div, 1997.

[12] Andreas N S. Space-based infrared system (SBIRS) of systems [C]// *Proc. of the IEEE Aerospace Conference*, 1997: 429 - 438.

[13] He Y B, Qiu Y. THAAD-like high altitude theater missile defense: strategic defense capability and certain countermeasures analysis [J]. *Science and Global Security*, 2003, 11(2 - 3): 151 - 202.

[14] 王晓红. 基于 STK 的升级丹麦眼镜蛇雷达系统性能分析[J]. *现代雷达*, 2009, 31(1): 4 - 8. (Wang X H. Performance analysis of the upgraded cobra dane radar system based on STK[J]. *Modern Radar*, 2009, 31(1): 4 - 8.)

[15] Keil K H. Generic case study: evaluation of early warning satellites cueing radars against TBM [C]// *Proc. of the SPIE Conference on Signal and Data Processing of Small Targets*, 1999: 297 - 307.

[16] Jr Perrella A J, Kuhn W W. Cueing performance estimation using space based observations during boost phase[R]. America: Mitre Corp Mclean va, 1996.