

基于模板的天基预警系统目标性质匹配模型与仿真实现

高山¹, 王森², 刘建华¹

(1. 国防大学基本系, 北京 100091; 2. 空军工程大学导弹学院, 陕西 三原 713800)

摘要 防空反导作战过程中,地面反导指控系统为达成早期识别并估计弹道目标攻击企图,以提高防空反导系统拦截效率的目的,需要天基预警系统提供目标信息支援保障。基于天基预警系统的目标信息采用有效的匹配模型能够实现对弹道目标的快速发现及性质确认。以天基预警系统目标性质匹配模型与算法为研究重点,在建立反导天基预警系统测量模型的基础上,以仿真方法初步实现了目标性质匹配模型。仿真结果表明:所建立的匹配模型与算法具有较好的应用价值,可为反导指控系统的构建与完善提供一定参考。

关键词 天基预警系统;目标性质匹配;模板

DOI 10.3969/j.issn.1009-3516.2011.05.008

中图分类号 TP273 **文献标识码** A **文章编号** 1009-3516(2011)05-0035-05

反导作战中,对目标性质的早期确定将对后期反导作战的开展具有重要作用。目标性质一般包括:目标的国别、型号、战术技术指标等。如果能够在弹道导弹发射后尽早时间内确认目标的性质,将对后期目标的测轨、识别和拦截等提供很重要的参考依据。现有目标性质确认方法,多采用根据预估的目标发射点估计目标性质,由于可用数据较少,精度较低。而助推段目标特性模板数据库的建立,则为指控系统根据天基预警系统测量的信息从而快速、准确推断目标性质提供了可能^[1-6],对于反导战略预警具有重要的现实意义。

1 天基预警系统测量模型

预警系统是采用红外被动探测,其只能测量目标的视线方向,包括卫星测量坐标系下导弹的方位角 θ 和俯仰角 ε ,无法测量导弹的距离^[7-8]。2个角度的定义见图1。

通常情况下,导弹助推段的尾焰会被多颗卫星以异步的方式依次探测到,所有来自这些卫星的观测值在时间上是顺序排列的^[9-10]。假设在助推段导弹尾焰共被 m 颗卫星观测 n 次,其中第 k 次观测对应的观测时间为 $t_k, k=1, 2, \dots, n$ 。 t_k 时刻地心坐标系下导弹的位置记为 $\mathbf{r}_k = [r_{xk}, r_{yk}, r_{zk}]^T$,同一坐标系下卫星的位置记为 $\mathbf{s}_k = [s_{xk}, s_{yk}, s_{zk}]^T$ 。其中 \mathbf{r}_k 是导弹发射点参数 ξ 和时间 t_k 的函数,即:

$$\mathbf{r}_k = \Gamma(\xi, t_k) \tag{1}$$

式中: ξ 为发射点参数, $\xi = [t_0, \lambda_0, \phi_0, h_0, \alpha_0]^T$; t_0 为发射时间; λ_0 为发射点的经度; ϕ_0 为纬度; h_0 为发射点高度; α_0 为导弹在发射点的射向(从正北方向顺时针旋转的角度); $\Gamma(\cdot)$ 为目标运动状态与发射参数之间的函数关系。

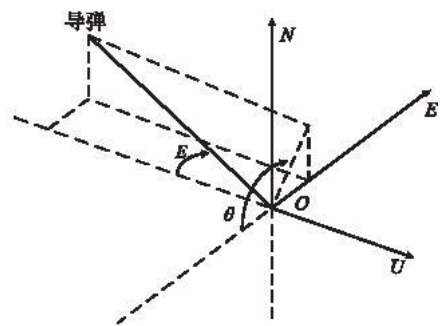


图1 卫星测量角度定义

Fig.1 Angle definition of satellite's measuring

* 收稿日期:2011-06-09

基金项目:国家“973”计划资助项目(613900201)

作者简介:高山(1979-),男,河北保定人,博士,主要从事信息化防空作战研究. E-mail:gs-speed@163.com

则 t_k 时刻 UEN 坐标系下导弹的位置 \mathbf{u}_k 为:

$$\mathbf{u}_k = [u_{xk}, u_{yk}, u_{zk}]^T = \Phi_{ECF}^{UEN} [\mathbf{r}_k - \mathbf{s}_k] \quad (2)$$

式中 Φ_{ECF}^{UEN} 为地心固定坐标系 ECF 坐标系到 UEN 坐标系的转换矩阵。则导弹 t_k 时刻相对于预警卫星的角度值为:

$$\psi(\mathbf{u}_k) = \begin{bmatrix} \varepsilon_k \\ \theta_k \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \arctan \left[-\frac{\sqrt{u_{yk}^2 + u_{zk}^2}}{u_{xk}} \right] \\ \frac{3\pi}{2} - \arctan \left[\frac{u_{yk}}{u_{zk}} \right] \end{bmatrix} \quad (3)$$

2 目标性质匹配模型与算法

指控系统在助推段确认目标性质的过程中,依据的是助推段目标特性数据库目标的 3 个特性,即:目标尾焰红外辐射强度 $i(t)$ 、当前位置到发射点的水平距离 $l(t)$ 、垂直高度 $h(t)$ 。在弹道导弹模板数据库中,目标特性标准型数据见表 1。

表 1 模板数据库标准型数据表

Tab. 1 Standard data table of template database

t/s	$i(t)/W(m^{-2} \cdot sr^{-1})$	$h(t)/km$	$l(t)/km$
t_1	$i(t_1)$	$h(t_1)$	$l(t_1)$
t_2	$i(t_2)$	$h(t_2)$	$l(t_2)$
...

在指控系统数据库中,对应的每种弹道导弹类型 $MODEL(i)$,存在一组随时间变化的离散的数据 $i_k(t)$ 、 $l_k(t)$ 、 $h_k(t)$ 与之对应,这些数据的获取由于来自不同的渠道,包括:已公开的有关目标的信息、预警卫星长期观测积累以及情报信息等多方面渠道获得。由于获取渠道不同,其精度也不同,需要将不同误差数据经过拟合处理,得到逼近真实值的数据与随时间变化曲线。

在天基预警系统对弹道导弹助推段测量过程中,由于存在测量周期,所以得到的是一系列点信息,点信息包括:红外辐射强度 i 、导弹的方位角 θ 和俯仰角 ε 。如将这些测量点连接,便可以得到助推段导弹的大致弹道轮廓,从而推出助推段导弹当前位置到发射点的水平距离 l 、垂直高度与测量时间的变化关系。由于天基预警系统测量周期的存在以及测量时段天气的影响,得到的测量点非常有限且误差较大,需要对实际测量数据进行平滑处理,并对未探测区域进行合理推测。

通过上述 2 步,可以得到数据库数据拟合以后的大量曲线和卫星实测数据形成的一组数据。指控系统需利用某种匹配算法,定位数据库中最接近实测曲线的最优匹配数据库曲线,其所对应的目标即为所求。所以,匹配算法的实质就是从巨量数据库中搜寻与实测曲线最匹配的曲线。模型匹配流程图见图 2。

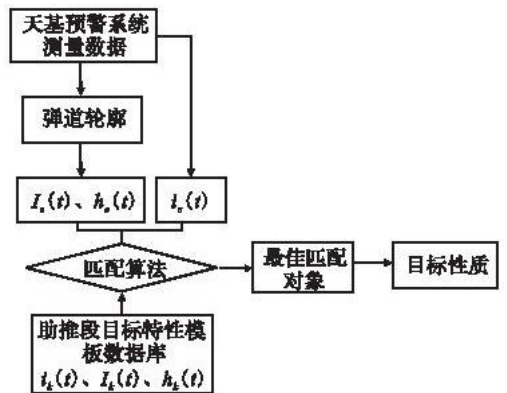


图 2 模型匹配流程

Fig. 2 Matching model process

在匹配算法中,本文采用最常用也最为可靠的欧氏距离作为衡量匹配性的量度。欧氏距离公式为:

$$d = \sqrt{\sum_{k=1}^m (X_{ik} - X_{jk})^2}, \quad i, j = 1, 2, \dots, n \quad (4)$$

式中 X_{ik} 、 X_{jk} 分别为要衡量接近程度的任意 2 个量值。

指控系统目标性质匹配算法中,需要衡量实际测量值与数据库值在 i 、 l 、 h 3 个方面的距离。即:

$$\begin{cases} d_i = \sqrt{\sum_{i=0}^n [i_k(t_0 + i\Delta t) - i_c(t_0 + i\Delta t)]^2} \\ d_l = \sqrt{\sum_{i=0}^n [l_k(t_0 + i\Delta t) - l_c(t_0 + i\Delta t)]^2} \\ d_h = \sqrt{\sum_{i=0}^n [h_k(t_0 + i\Delta t) - h_c(t_0 + i\Delta t)]^2} \end{cases} \quad (5)$$

式中: d_i 、 d_l 、 d_h 分别为实测值与数据库值在 i 、 l 、 h 方面的距离; i_k 、 l_k 、 h_k 为数据库值; i_c 、 l_c 、 h_c 为实测值; t_0 为发射点时刻; Δt 为时间步长。

最佳匹配对象并不一定保证在 i 、 l 、 h 3 方面都与实测值保持“距离”最小,但其“距离”的和必然是最小的,即:

$$d_{\min} = \min(d_i + d_l + d_h) \quad (6)$$

在确定了目标函数的基础上,建立匹配模型为:

$$\begin{cases} \text{Find: } M = D_{\min} & \min: D_{\min} = \min(\alpha D_i + \beta D_l + \lambda D_h) \\ D_i = \frac{\sum_{i=0}^n [i_k(t_0 + i\Delta t) - i_c(t_0 + i\Delta t)]}{\sqrt{\sum_{i=0}^n [i_k(t_0 + i\Delta t) - i_c(t_0 + i\Delta t)]^2}} & D_l = \frac{\sum_{i=0}^n [l_k(t_0 + i\Delta t) - l_c(t_0 + i\Delta t)]}{\sqrt{\sum_{i=0}^n [l_k(t_0 + i\Delta t) - l_c(t_0 + i\Delta t)]^2}} \\ D_h = \frac{\sum_{i=0}^n [h_k(t_0 + i\Delta t) - h_c(t_0 + i\Delta t)]}{\sqrt{\sum_{i=0}^n [h_k(t_0 + i\Delta t) - h_c(t_0 + i\Delta t)]^2}} & \text{s. t.} \\ & t_0 + i\Delta t \leq t_g \\ & i_k(\cdot), l_k(\cdot), h_k(\cdot) \in DB_k \\ & i_c(\cdot), l_c(\cdot), h_c(\cdot) \in MB_c \\ & 0 < \alpha, \beta, \lambda < 1, \quad \alpha + \beta + \lambda = 1 \end{cases} \quad (7)$$

式中: M 为目标函数,指控系统通过搜索助推段目标特性数据中的所有模板数据,计算得到 M ,其所对应的 MODEL 即为所测量目标在数据库中的最佳匹配对象,确定了 M 也就确定了目标的性质;由于 i 、 l 、 h 的单位不同,为了消除不同单位对计算比较的影响, D_i 、 D_l 、 D_h 采用了将式(5)的欧氏距离公式无量纲化; α 、 β 、 λ 分别为在匹配判断过程中 i 、 l 、 h 所对应的权重值,由于可信度相差不大,但 i 相对较重要,所以可以假设 $\alpha = 0.4$ 、 $\beta = 0.3$ 、 $\lambda = 0.3$; $t_0 + i\Delta t \leq t_g$ 为将时间约束在导弹关机前, $i_k(\cdot)$ 、 $l_k(\cdot)$ 、 $h_k(\cdot) \in DB_k$ 、 $i_c(\cdot)$ 、 $l_c(\cdot)$ 、 $h_c(\cdot) \in MB_c$ 则表示数据来源。

此模型只是一种比较简单的匹配模型,适用于数据库规模、数据量不大的情况,但当数据库数据量增加到一定数量时,则搜索时间会急剧增大,需要在匹配运算之前进行预处理,即“粗匹配”,可采用“粗匹配+细匹配”的模式。如在“粗匹配”过程中,可以首先建立基于多模板分级的树结构,在匹配之前先将所有模板按照某种度量聚成几类母板,在匹配过程中,依次用每一类母板进行搜索、匹配,而且只有在母板匹配的情况下才能逐一检测内子模板是否匹配,以此来获得较高的加速因子。

3 仿真实验分析

仿真实验目标考虑某型射程 1 500 km 弹道导弹,发射点选在北纬 33°,东经 45°,射向 40°,助推段时间 74 s。预警系统拟采用一颗地球同步红外预警卫星,位于东经 40°,扫描周期 $T = 5$ s,卫星测量噪声均方根取为 10 μrad ,卫星工作波段 2.7–2.95 μm 。假设测试当天天气背景为多云、白天,并不能够保证导弹一经发射便被预警卫星捕获。通过仿真计算,得到预警卫星实测数据见图 3 和表 2。

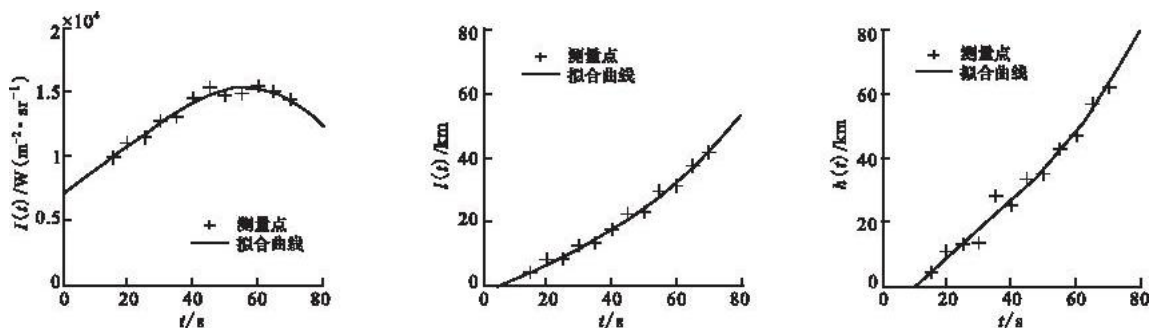


图3 卫星实测数据及拟合曲线

Fig. 3 Measuring data and combining curve of satellite

首先运用“粗匹配”对数据库数据进行初选预处理,得到匹配度较高的“母板”,其包括3种模型:模型1、模型2、模型3。将3种模型离散数据拟合后得到其拟合曲线见图4。

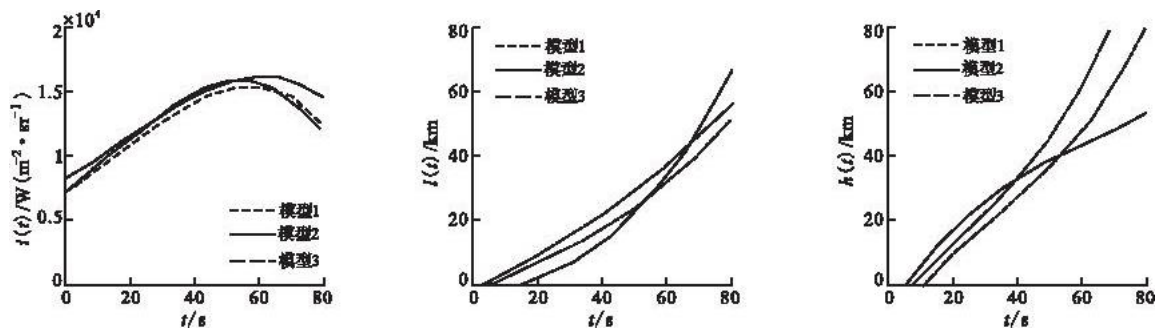


图4 3种模型拟合后曲线

Fig. 4 Combining curve of three models

运用匹配算法的计算过程中,取发射点时间为0, i, l, h 权重值取 $\alpha = 0.4, \beta = 0.3, \lambda = 0.3$ 。通过计算得到:

$$\begin{cases} M_1 = D_{\min}^1 = 6.3784 \\ M_2 = D_{\min}^2 = 10.8750 \\ M_3 = D_{\min}^3 = 7.7362 \end{cases}$$

由此可知,数据库中子模型1的曲线更加接近实际测量值,为实际目标的最优匹配对象。子模型3的 M_3 值较接近模型1的 M_1 值,容易造成混淆。由图4也可以看出,模型3与模型1的曲线走向与数据值较接近。

所以,最终匹配结果排序为: M_1, M_3, M_2 。

4 结论

通过上述仿真分析可以得到如下结论:

1) 卫星实测数据由于受到测量时段多方面因素影响存在误差,需对实际测量点进行拟合处理才能用于与数据库数据的信息匹配。而指控系统数据库数据则是通过多次实测、多方面情报信息融合处理后的数据,可信用度较高。

2) 在匹配过程中,“粗匹配”过程至关重要,其直接影响到匹配过程的速度从而影响后续作战的时间进程。在数据库规模较小时,由于数据模板数量较少,可略去这一过程而对匹配速度影响不大,但当数据库规模扩大到一定程度时,采用“粗匹配+细匹配”则显得更加重要。

表2 预警卫星测量数据

Tab. 2 Measuring data of warning satellite

t/s	$i(t)/10^4 \text{ W}(\text{m}^{-2} \cdot \text{sr}^{-1})$	$l(t)/\text{km}$	$h(t)/\text{km}$
0			
5			
10			
15	0.99	3.79	4.31
20	1.10	7.80	10.40
25	1.14	8.01	12.88
30	1.27	12.29	13.37
35	1.30	13.21	28.09
40	1.45	17.39	25.36
45	1.52	21.89	33.13
50	1.47	22.78	34.88
55	1.48	28.82	42.68
60	1.54	30.90	46.77
65	1.49	37.18	56.70
70	1.44	41.30	62.08

3)在本文涉及的匹配算法中,需综合兼顾*i*、*l*、*h* 3方面“距离”因素,而不只是片面追求对于某一指标的要求,这样更具科学性,更加合理。

4)指控系统目标性质匹配可采取不同的匹配算法,这也是其可扩展性的体现。

参考文献:

- [1] Rudd J G. Surveillance and tracking of ballistic missile launches[J]. IBM journal of research and development, 2004,38(2): 195 - 216.
- [2] Yicong Li, Kirubarajan T, Bar shalom Y, et al. Trajectory and launch point estimation for ballistic missiles from boost phase LOS measurements[C]//IEEE aerospace conference proceeding . Beijing:IEEE press,2009:425 - 442.
- [3] Jerardi T. Profile data[D]. Maryland:Johns hopkins university,2008.
- [4] Sitzman G L,Drescher G H. Tactical ballistic missile trajectory state and error covariance propagation[C]//IEEE position location and navigation symposium. New York:IEEE press,2004:839 - 844.
- [5] Woods E,Queeney T. Multi - sensor detection and tracking of tactical ballistic missile using knowledge - based state estimation signal processing sensor fusion and target recognition III [J]. Pro SPIE,2004,2232:111 - 121.
- [6] Beaulieu M. Launch detection satellite system engineering error analysis[D]. California:Naval postgraduate school, 2006.
- [7] Yicong Li, Thiagalingam Kirubarajan, Yaakov Bar shalom, et al. Trajectory and launch point estimation for ballistic missile from boost phase LOS measurements [C]//Proceeding of the 7th mediterranean conference on control and automation. Haifa, Israel:IEEE press,2008:1023 - 1037.
- [8] Norman J Dan Nis. Space - based tactical ballistic missile launch parameter estimation [J]. IEEE transactions on aerospace and electronic systems, 2008, 29(2):412 - 424.
- [9] 张守信. 外弹道测量与卫星轨道测量基础[M]. 北京:国防工业出版社,1992.
ZHANG Shouxing. Measuring base of outer trajectory and satellite orbit[M]. Beijing: National defence industry publishing company, 1992. (in Chinese)
- [10] 张金槐,蔡洪. 飞行器试验统计学[M]. 长沙:国防科技大学出版社,1995.
ZHANG Jinhuai, CAI Hong. Statistics of aircraft experiment[M]. Changsha: National defence science and technology university press,1995. (in Chinese)

(编辑:田新华)

Matching Target Character Model and Simulation Realization of Space - Ground Warning System Based on Template

GAO Shan¹, WANG Sen², LIU Jian - hua¹

(1. National Defence University of PLA Beijing 100091, China; 2. Missile Institute, Air Force Engineering University, Sanyuan 713800, Shaanxi, China)

Abstract: For identifying the target and estimating its attack attempt early to improve the intercepting efficiency in anti - missile battle, the information support about target is necessary and provided by space - ground warning system. Using an effective matching model can achieve detecting and affirming the target property quickly based on the information of target from the space - ground warning system. This text emphasizes on the matching model and the algorithm of target property and elementarily realizes the matching model of target property using emulation method based on the measuring model of space - ground warning system. The result indicates that the matching model and algorithm are of better value to application and can give some reference to the command and control system in construction and perfection.

Key words: space - ground warning system; matching target character; template