

引用格式:刘韵竹,李海军,吕晓峰,等.基于预警机的空空导弹制导交接区仿真[J].电光与控制,2019,26(4):81-85. LIU Y Z, LI H J, LYU X F, et al. Simulation of AAM guidance handover area based on AWACS[J]. Electronics Optics & Control, 2019, 26(4):81-85.

基于预警机的空空导弹制导交接区仿真

刘韵竹¹, 李海军¹, 吕晓峰¹, 唐玲²

(1. 海军航空大学, 山东 烟台 264001; 2. 中国人民解放军92957部队, 浙江 舟山 316000)

摘要:针对预警机协同制导条件下空空导弹的可制导交接区进行研究。在分析基于预警机的空空导弹协同制导流程的基础上,建立了预警机、发射载机及导弹的力学模型和运动模型,并从三者自身角度及相互关联的角度分析了影响协同制导交接区的限制因素;在求解协同制导可交接区域过程中,采用黄金分割法对已建模型进行仿真,并在仿真中设置了预警机和导弹的不同参数,根据仿真结果分析参数对制导交接区的影响。结果表明:在某一确定态势下,制导交接区与预警机-发射载机通信距离、制导距离、制导天线波束宽度、导弹接收天线波束宽度呈正相关关系;但当制导天线波束宽度与导弹接收天线波束宽度超过某一定值时,影响较小。

关键词:空空导弹;协同制导;协同制导交接区;黄金分割法

中图分类号: TJ765.3 文献标志码: A doi:10.3969/j.issn.1671-637X.2019.04.016

Simulation of AAM Guidance Handover Area Based on AWACS

LIU Yun-zhu¹, LI Hai-jun¹, LYU Xiao-feng¹, TANG Ling²

(1. Naval Aeronautical University, Yantai 264001, China; 2. No. 92957 Unit of PLA, Zhoushan 316000, China)

Abstract: The allowable guidance handover area of Air-to-Air Missile (AAM) under the cooperative guidance of AWACS is studied. On the basis of analyzing the process of cooperative guidance, the mechanical models and motion models of the AWACS, the launching vehicle and the missile are set up respectively, and the restrictive factors that affect the handover area are analyzed from the aspects of the AWACS, the launching vehicle and the missile and their interrelationship. In the process of calculating the cooperative guidance handover area, the golden section method is used to simulate the model. In the simulation, different parameters of the AWACS and the missile are set respectively. According to the simulation result, the influence of these parameters on the guidance handover area is analyzed. The results show that, under certain situation, the guidance handover area has a positive correlation with the communication distance, the guidance distance, the beam width of the guidance antenna, and the beam width of the missile receiving antenna. However, the influence becomes less when the beam widths of the guidance antenna and the missile receiving antenna exceed a certain value.

Key words: air-to-air missile; cooperative guidance; cooperative guidance handover area; golden section method

0 引言

目前,空空导弹的协同制导问题已有了不少研究成果。文献[1]首次提出了双机协同制导的概念,并给出了双机协同制导的过程描述;文献[2]分析了双机协同发射与制导中涉及的关键技术;文献[3]给出

了协同中制导原理与模型;文献[4]设计了一种制导交接的具体方法;文献[5]求解了空空导弹的协同允许发射区。但一方面,当前关于协同制导的文献中少有对空空导弹协同制导交接中可交接区域进行研究;另一方面,当前研究并没有考虑接班平台自身的限制因素。本文设定预警机为接班平台,由于预警机探测距离更远,可弥补单平台探测系统威力的不足;且我国预警机相较于国外预警机,采用相控阵体制和高频段,在协同火控应用方面更有优势。因此,对基于预警机的中远距空空导弹进行使用探索具有重大意义。

收稿日期:2018-04-24

修回日期:2019-02-19

作者简介:刘韵竹(1996—),女,安徽肥西人,硕士生,研究方向为空空导弹协同制导。

1 基于预警机的中远距空空导弹协同制导原理

1.1 协同制导流程

协同制导的主动雷达型空空导弹典型工作过程如图1所示。

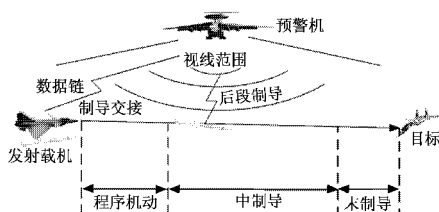


图1 协同制导典型工作过程

Fig. 1 Typical working process of cooperative guidance

在中制导段,发射载机将制导权移交给预警机,使用预警机代替发射载机向导弹发送修正指令^[6],其关键在于制导交接的顺利完成。

1.2 协同制导中的坐标系建立

本文主要用到两种坐标系——地面坐标系 $Axyz$ 和弹道坐标系 $Ox_2y_2z_2$ ^[7]。

惯性坐标系如图2所示。

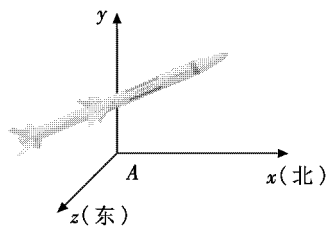


图2 惯性坐标系

Fig. 2 Inertial coordinate system

地面坐标系 $Axyz$ 也称惯性坐标系。惯性系初始时刻与地理坐标系重合,其原点处于载机下地球海平面上, Ax 轴指向北, Ay 轴垂直向上, Az 轴指向东,另外惯性系在绝对空间中进行匀速运动,其速度近似为

$$V_z = M \times R_z \times \cos F \quad (1)$$

式中: M 为地球自转角速度; F 为惯性系建立时的纬度; R_z 为当地地球半径。

弹道坐标系如图3所示。

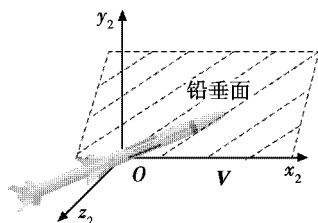


图3 弹道坐标系

Fig. 3 Ballistic coordinate system

弹道坐标系 $Ox_2y_2z_2$,原点 O 取导弹质心, Ox_2 轴在

导弹质心的速度方向上; Oy_2 在包含速度矢量 V 的铅垂平面内,且垂直于 Ox_2 轴,向上为正; Oz_2 轴按右手定则确定。

1.3 导弹运动方程组

1) 动力学方程。

导弹质心运动的动力学方程建立在弹道坐标系上。其动力学方程为

$$\begin{bmatrix} m \frac{dV_m}{dt} \\ m V_m \frac{d\theta_m}{dt} \\ -m V_m \cos \theta_m \frac{d\psi_{V_m}}{dt} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} P_m \cos \alpha_m \cos \beta_m - X_m - mg \sin \theta_m \\ P_m (\sin \alpha_m \cos \gamma_{V_m} + \cos \alpha_m \sin \beta_m) + Y_m \cos \gamma_{V_m} - Z_m \sin \gamma_{V_m} - mg \cos \theta_m \\ P_m (\sin \alpha_m \sin \gamma_{V_m} - \cos \alpha_m \sin \beta_m \cos \gamma_{V_m}) + Y_m \sin \gamma_{V_m} + Z_m \cos \gamma_{V_m} \end{bmatrix} \quad (2)$$

式中: m, V_m 分别为导弹质量、速度(下标 m 表示导弹); θ_m, ψ_{V_m} 分别为弹道倾角、弹道偏角; α_m, β_m 分别为导弹攻角、侧滑角; γ_{V_m} 为速度滚转角; P_m 为导弹的推力; X_m, Y_m, Z_m 为空气动力在速度坐标系上的3个分量。

2) 运动学方程。

导弹质心运动的运动学方程建立在地面坐标系上。其运动学方程为

$$\begin{bmatrix} \frac{dx_m}{dt} \\ \frac{dy_m}{dt} \\ \frac{dz_m}{dt} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V_m \cos \theta_m \cos \psi_{V_m} \\ V_m \sin \theta_m \\ -V_m \cos \theta_m \sin \psi_{V_m} \end{bmatrix} \quad (3)$$

式中, x_m, y_m, z_m 分别为导弹在地面坐标系的坐标位置。

发射载机与预警机的动力学方程和运动学方程与之类似,不再赘述。

2 协同制导交接条件分析

2.1 发射载机、预警机、导弹、目标间的相互关系

以发射载机-导弹相互运动模型为例,建立相互运动模型。假定发射载机至导弹的位移矢量为 r_{fm} (下标 f 表示发射载机),则 r_{fm} 在地面坐标系中有两种表达方式,一种是直角坐标系 $(r_{fmx}, r_{fmy}, r_{fmz})$,另一种是球坐标系 $(r_{fm}, \theta_{fm}, \psi_{fm})$,其中

$$\begin{cases} r_{fm} = \sqrt{r_{fmx}^2 + r_{fmy}^2 + r_{fmz}^2} \\ \theta_{fm} = \arcsin\left(\frac{r_{fmy}}{\sqrt{r_{fmx}^2 + r_{fmz}^2}}\right) \\ \psi_{fm} = \arctan(r_{fmz}/r_{fmx}) \end{cases} \quad (4)$$

类推可得其他两两间相互关系,不再赘述。

2.2 导弹自身限制因素

导弹的导引律采用比例导引法,可得

$$\begin{cases} \dot{\theta}_m = K\dot{\theta}_t \\ \dot{\psi}_m = K\dot{\psi}_t \end{cases} \quad (5)$$

式中:下标 t 表示目标;K 为比例系数。

1) 过载限制。

导弹在飞行过程中存在最大过载限制,在正常情况下,可用过载设有余量,满足需用过载需求,过载表达式为

$$\begin{cases} n_{mx} = \frac{1}{g} \frac{dV_m}{dt} + \sin \theta_m \\ n_{my} = \frac{V_m}{g} \frac{d\theta_m}{dt} + \cos \theta_m \\ n_{mz} = -\frac{V_m}{g} \cos \theta_m \frac{d\psi_m}{dt} \end{cases} \quad (6)$$

否则过载取最大可用过载 n_p 。

2) 飞行时长限制

$$t_m \leq t_{max} \quad (7)$$

3) 飞行距离限制

$$r_{min} \leq r_m = \sqrt{x_m^2 + y_m^2 + z_m^2} \leq r_{max} \quad (8)$$

4) 飞行高度限制

$$y_{min} \leq y_m \leq y_{max} \quad (9)$$

5) 飞行速度限制,导弹飞行速度在一定范围内,即

$$V_{min} \leq V_m \leq V_{max} \quad (10)$$

6) 导引头视场角限制。中末交接时,目标需在导引头视场角视线范围内,即

$$\begin{cases} |\theta_{mt} - \theta_m| \leq \frac{\alpha_m}{2} \\ |\psi_{mt} - \psi_m| \leq \frac{\alpha_m}{2} \\ r_{mt} \leq R_{mt} \end{cases} \quad (11)$$

2.3 制导限制因素

1) 预警机对导弹的制导限制。

预警机要实现对目标的探测和对导弹的制导。在探测目标方面有探测角度和探测距离限制^[8],限制条件可以表述为

$$\begin{cases} |\theta_{st} - \theta_s| \leq \varphi_{st} \\ |\psi_{st} - \psi_s| \leq \varphi_{st} \\ r_{st} \leq R_{stmax} \end{cases} \quad (12)$$

式中,下标 s 表示预警机。

在对导弹的制导方面,有预警机制导天线波束宽度 φ_{sm} 和导弹接收天线波束宽度 φ_{ma} 限制,以及制导距离限制,限制条件可以表述为

$$\begin{cases} \max\{|\theta_{sm} - \theta_s|, |\psi_{sm} - \psi_s|\} \leq \varphi_{sm} \\ \max\{|\theta_{fm} - \theta_m|, |\psi_{fm} - \psi_m|\} \leq \varphi_{ma} \\ r_{fm} \leq R_{fmmax} \end{cases} \quad (13)$$

2) 发射载机对导弹的制导限制。

发射载机可以不对目标进行探测,“盲目”发射后交接制导权,限制条件可以表述为

$$\begin{cases} \max\{|\theta_{fm} - \theta_f|, |\psi_{fm} - \psi_f|\} \leq \varphi_{fm} \\ \max\{|\theta_{fm} - \theta_m|, |\psi_{fm} - \psi_m|\} \leq \varphi_{ma} \\ r_{fm} \leq R_{fmmax} \end{cases} \quad (14)$$

2.4 制导交接限制因素

1) 交接时,两机需在有效通信范围内,即

$$r_{fs} \leq R_{fsmax} \quad (15)$$

2) 预警机需时刻在敌机攻击范围外,即

$$r_{st} \leq R_t \quad (16)$$

3 协同制导交接区域分析

制导可交接区域范围与交接时间点以及交接位置有关,在求取制导交接区域时,设定机弹“物理分离”1~2 s 后,导弹进入稳定飞行状态,转入中制导段,此时进行制导交接。预置预警机在某一位置进行交接,通过仿真,验证在该位置交接后导弹能否在中末制导交接段截获目标^[9]。通过对可交接预警机位置搜索,确定协同制导可交接区域。

在求取协同制导交接区域过程中,采用黄金分割法^[10]快速找出交接区域包络,包括远距离交接包络和近距离交接包络。

图4为制导交接的远距离包络搜索流程,研究中对制导误差进行理想化考虑。

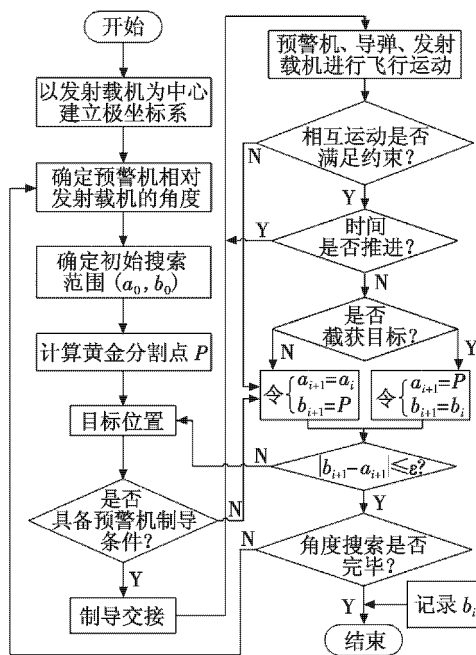


图4 制导交接远距离包络搜索流程

Fig.4 Searching process of long-distance envelope in guidance handover

近距离包络搜索流程与之类似,不同之处在于若

试点位置能引导导弹完成目标截获,令 $b_{i+1} = P, a_{i+1} = a_i$; 否则令 $a_{i+1} = P, b_{i+1} = b_i$ 。

4 协同制导交接区域仿真

4.1 仿真准备工作

以某空空导弹为例,设交接时导弹的位置为(0 m, 15 000 m, 0 m),发射载机的位置为(0 m, 15 000 m, 1200 m),相应高度发射载机与预警机飞行马赫数均为1.5。设预警机对目标探测距离为150 km,对目标探测角度为360°,与发射载机最大通信距离为20 km,两机最大制导距离均为80 km。设目标初始位置为(11 000 m, 10 000 m, 0 m),相应高度的飞行马赫数为1.2,与导弹迎头飞行,做匀速直线运动。

根据最大通信距离,设定仿真包络搜索的初始范围为[0 m, 20 000 m]。

4.2 仿真结果及分析

研究预警机制导天线波束宽度 φ_{am} 、导弹接收天线波束宽度 φ_{ms} 以及最大制导距离 d_m 对交接区域的影响。其中,图5展现了导弹接收天线波束宽度 φ_{ms} 对预警机与导弹的相对位置的限制作用。预警机制导天线波束宽度 φ_{ms} 的限制作用与之类似。根据实际运用情况,设定天线在无法正常工作,可在水平面内偏转180°继续工作。

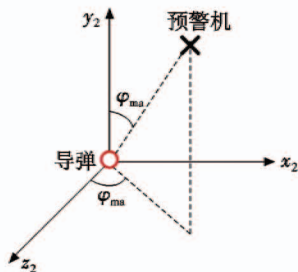


图5 导弹接收天线波束宽度限制作用示意图

Fig. 5 Relative position limitation by the beam width of missile receiving antenna

1) 仿真1 $\varphi_{am} = 360^\circ, d_m = 80 \text{ km}, \varphi_{ms} = 360^\circ$ 。仿真结果见图6。

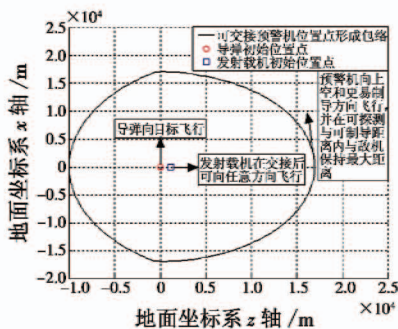


图6 协同制导交接区1

Fig. 6 Cooperative guidance handover area 1

由于发射载机初始位置位于导弹右侧,而包络是以发射载机为中心进行搜索的,因此图6中仿真出的协同制导交接区域偏向导弹右侧。又因天线可在水平面内偏转180°,故仿真区域具有对称性。此时,交接区域比较饱满规则,处于理想化状态。

2) 仿真2 $\varphi_{am} = 120^\circ, d_m = 80 \text{ km}, \varphi_{ms} = 360^\circ$ 。仿真结果见图7。

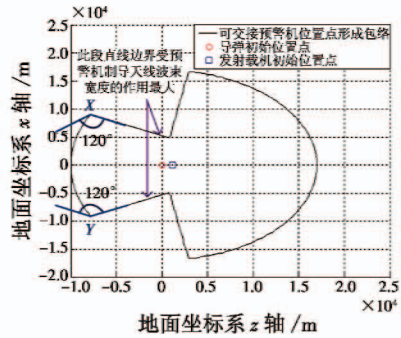


图7 协同制导交接区2

Fig. 7 Cooperative guidance handover area 2

对比图6,当预警机制导角度收缩到120°时,交接区域左侧包络形状明显改变,并有缺失。图7中X点和Y点的右段直线在限制因素中受预警机制导角度制约最大。仿真表明:当 $\varphi_{am} \ge 120^\circ$ 时, φ_{am} 值变化不改变包络形状,对包络大小略有影响;当 $\varphi_{am} < 120^\circ$ 时,交接区域左侧随着 φ_{am} 值的减小而显著减小。

3) 仿真3 $\varphi_{am} = 360^\circ, d_m = 80 \text{ km}, \varphi_{ms} = 90^\circ$ 。仿真结果见图8。

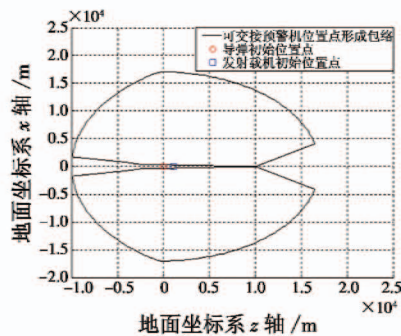


图8 协同制导交接区3

Fig. 8 Cooperative guidance handover area 3

对比图6,当导弹接收天线角度收缩到90°时,图8中交接区域包络形状明显改变,交接区域在发射载机左侧x轴附近呈现长条三角缺失;在发射载机右侧x轴附近呈现块状三角缺失。仿真表明:当 $\varphi_{ms} \ge 90^\circ$ 时, φ_{ms} 值变化不改变包络形状,对包络大小略有影响;当 $\varphi_{ms} < 90^\circ$ 时,交接区域随着 φ_{ms} 值的减小而显著减小。

4) 仿真4 $\varphi_{am} = 120^\circ, d_m = 80 \text{ km}, \varphi_{ms} = 90^\circ$ 。仿真结果见图9。

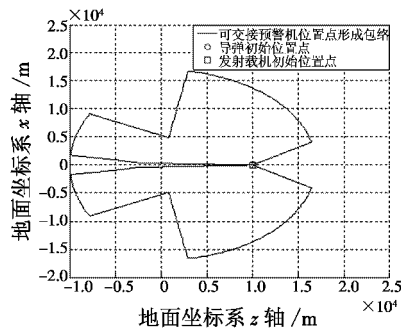


图9 协同制导交接区4

Fig. 9 Cooperative guidance handover area 4

对比图7、图8,图9几乎为二者交集。协同制导交接区同时受到预警机制导角度与导弹接收天线角度影响,随其减小而减小。

5 结论

本文以基于预警机中制导的中远距空空导弹为研究对象,采用比例导引律研究了影响协同制导交接区的限制因素,仿真表明:

- 1) 采用黄金分割法能够较为精确地求解出协同制导交接区,可用于不同交接条件下协同制导交接区的求解;
- 2) 协同制导交接区的边界与发射载机、预警机、导弹及目标的自身运动状态有关;
- 3) 在某一确定态势下,制导交接区与预警机制导天线波束宽度及导弹接收天线波束宽度呈正相关关系——在某一范围内,预警机制导角度与导弹接收天

线角度越大,则制导交接区域越大。

参考文献

- [1] 高坚,佟明安. 双机编队协同制导的火控机理[J]. 火力与指挥控制,2009,34(12):38-40.
- [2] 肖冰松,方洋旺,许蕴山,等. 双机协作发射与制导中程空空导弹技术研究[J]. 电光与控制,2011,18(2):13-17.
- [3] 付昭旺,丁雷. 双机协同导弹指令修正中制导技术[J]. 火力与指挥控制,2012,37(12):59-63.
- [4] 刁兴华,方洋旺,张磊,等. 中远程空空导弹多机协同制导交接方法[J]. 国防科技大学学报,2014,36(3):77-82.
- [5] 张平,方洋旺,乔治军,等. 超视距空空导弹协同允许发射区解算方法[J]. 电光与控制,2012,19(3):12-16.
- [6] 樊会涛. 空空导弹方案设计原理[M]. 北京:航空工业出版社,2013.
- [7] 李海军,陈育良,姜涛,等. 航空导弹飞行与发射控制[M]. 北京:国防工业出版社,2015.
- [8] 刁兴华,方洋旺,伍友利,等. 双机编队空空导弹协同发射区模拟仿真分析[J]. 北京航空航天大学学报,2014,40(3):370-376.
- [9] 吕振瑞,任宏光,王涛. 直升机载空空导弹射后截获误差源研究[J]. 弹箭与制导学报,2017,37(1):169-172.
- [10] 陈宝林. 最优化理论与算法[M]. 北京:清华大学出版社,2005.
- [11] 卞泓斐,杨根源. 基于动态贝叶斯网络的舰艇防空作战威胁评估研究[J]. 兵工自动化,2015,34(5):14-19.
- [12] 刘春生,王斌,卢义成. 基于Netica的机载雷达侦察效能评估[J]. 现代雷达,2017,39(3):8-12.
- [13] 李瀛,王永攀,周一蛟,等. 基于贝叶斯网络的防空预警监视系统作战效能评估[J]. 舰船电子对抗,2015,38(6):70-74.

(上接第80页)

- [7] 厉海涛,金光,周经伦,等. 贝叶斯网络推理算法综述[J]. 系统工程与电子技术,2008,30(5):935-939.
- [8] 肖秦琨,高嵩,高晓光. 动态贝叶斯网络推理学习理论及应用[M]. 北京:国防工业出版社,2007.
- [9] 徐冠华,董彦非,岳源,等. 基于察打任务的无人机作战效能评估[J]. 火力与指挥控制,2016,41(7):60-64.
- [10] 罗光,贺平. 基于动态贝叶斯网的野战防空演练效果评估研究[J]. 四川兵工学报,2014,35(7):