

数据链信息误差对红外空空弹发射后截获性能的影响

丁明亮

(中国空空导弹研究院,河南 洛阳 471009)

摘要: 复合制导空空导弹在中末制导交接班时的导引头截获概率是全弹设计的核心,是总体设计时需解决的关键问题。研究了数据链传输信息误差对红外型空空导弹发射后截获概率的影响;结果表明,数据链传输信息误差对导弹截获性能有较大影响。研究结果对发射后截获导弹设计具有参考价值。

关键词: 红外空空导弹; 发射后截获; 中制导; 导引头

中图分类号: V448 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-637X(2014)06-0052-04

Effects of Data Link Error on Acquisition Performance of Lock-on-After-Launch Missiles

DING Ming-liang

(China Airborne Missile Academy, Luoyang 471009, China)

Abstract: The capture probability of the seeker when midcourse guidance switches to terminal guidance is the core for the design of the combined guidance air-to-air missiles, and is very important for the overall design of the missile. In this paper, the effect of data link error on intercept probability of infrared air-to-air missile after launching was studied. The results show that the data link errors have a great influence on performance of missile capture. The results can be taken as a reference for the design of lock-on-after-launch missile.

Key words: infrared air to air missile; lock-on-after-launch missile; midcourse guidance; seeker

0 概述

目前,红外型空空导弹都采用截获后发射,由于在迎头攻击状态下,导弹动力射程与导引头探测距离不匹配,即导弹飞得远而导引头看得近,造成目标落入导弹动力包线而不能发射导弹攻击目标,从而使导弹性能不能充分发挥。为了充分发挥红外导弹性能,采用发射后截获技术就成为必然。

对发射后截获空空导弹而言,需要依据载机数据链提供的目标运动信息完成中制导和实现目标截获^[1-6]。红外导引头视场角小,目标搜索需要较长时间,因此在弹目距离达到导引头探测距离范围时,目标必须处于导引头的视场角内才能保证导引头以很高的概率截获目标。中末制导交接班时,导弹截获概率与载机主惯导和导弹子惯导的对准误差、导弹陀螺误差、导弹加速度误差、数据链传输信息误差等有关。本文针对大机动目标的发射后截获问题,重点研究数据链

传输信息误差对导弹截获概率的影响。

1 数学模型

1.1 导弹动力学模型

在弹道坐标系中,导弹的动力学方程^[7-8]为

$$\begin{cases} m \times a_x = P_{XV} - X_V - G \sin \theta_c \\ m \times V \times \dot{\theta}_c = P_{YV} \sin \gamma_v + P_{ZV} \cos \gamma_v + Y_V \sin \gamma_v + Z_V \cos \gamma_v - G \cos \theta_c \\ m \times V \times \dot{\psi}_c \times \cos \theta_c = P_{YV} \cos \gamma_v - P_{ZV} \sin \gamma_v + Y_V \cos \gamma_v - Z_V \sin \gamma_v \end{cases} \quad (1)$$

式中: m 为导弹自由飞行时的瞬时质量; X_V 、 Y_V 、 Z_V 为弹道坐标系中的气动力分量; θ_c 、 ψ_c 、 γ_v 分别为导弹速度向量的弹道倾角、弹道偏角和速度倾角。

1.2 导弹运动学模型

导弹的运动方程为

$$\begin{cases} \dot{X}_E = V \cos \theta_c \cos \psi_c \\ \dot{Y}_E = V \cos \theta_c \sin \psi_c \\ \dot{Z}_E = -V \sin \theta_c \end{cases} \quad (2)$$

收稿日期:2013-09-22

修回日期:2013-11-01

作者简介:丁明亮(1982—),男,河南开封人,硕士,研究方向为机械电子工程。

式中, $\dot{X}_E, \dot{Y}_E, \dot{Z}_E$ 为导弹在地理坐标系中的速度分量。

1.3 目标学模型

目标的机动方式为圆周机动。

$$\dot{\theta}_T = \frac{n_y \times g}{V_T} \quad (3)$$

$$\dot{\psi}_T = \frac{n_z \times g}{V_T} \quad (4)$$

目标匀速运动为

$$\begin{cases} \dot{X}_T = V_T \cos \theta_T \cos \psi_T \\ \dot{Y}_T = V_T \cos \theta_T \sin \psi_T \\ \dot{Z}_T = -V_T \sin \theta_T \end{cases} \quad (5)$$

式中: θ_T, ψ_T 分别为目标的速度倾角和速度偏角; n_y, n_z 分别为目标铅垂面和水平面机动过载; V_T 为目标运动速度; X_T, Y_T, Z_T 为目标在地理坐标系中的位移分量。

1.4 弹目相对运动模型

导弹与目标相对运动模型为

$$\begin{cases} \dot{D}_{XE} = \dot{X}_E - \dot{X}_T \\ \dot{D}_{YE} = \dot{Y}_E - \dot{Y}_T \\ \dot{D}_{ZE} = \dot{Z}_E - \dot{Z}_T \end{cases} \quad (6)$$

$$\begin{cases} D = \sqrt{D_{XE}^2 + D_{YE}^2 + D_{ZE}^2} \\ \dot{D} = \frac{\dot{D}_{XE} \times D_{XE} + \dot{D}_{YE} \times D_{YE} + \dot{D}_{ZE} \times D_{ZE}}{D} \end{cases} \quad (7)$$

式中: D 为弹目相对距离; \dot{D} 为弹目相对速度; $\dot{D}_{XE}, \dot{D}_{YE}, \dot{D}_{ZE}$ 分别为弹目相对距离在地理坐标系的3个分量。

1.5 导引律模型

导弹的导引律为

$$a = N[\dot{D}] \dot{q} + k(t) \varphi \quad (8)$$

式中: N 为导航比; \dot{q} 为视线角速度; φ 为离轴角。

1.6 数据链信息误差模型

载机通过数据链传输给导弹的目标信息包括目标位置、目标速度、载机与目标的相对距离和相对角度。由于载机火控系统存在测量误差,故其传输的信息存在误差,因此弹目相对距离矢量存在误差^[9]。

导弹与带有误差的目标测量值的相对位置矢量为

$$\hat{D} = D + \phi_1 \times R_H + \Delta R \quad (9)$$

式中: ϕ_1 为火控系统测角误差; ΔR 为火控系统测距; R_H 为载机与目标相对距离。

因此,数据链信息误差引起的目标指示误差角 ϕ_a 为

$$\phi_a = \frac{\hat{D} \times D}{D^2} \quad (10)$$

2 截获概率的计算

复合制导空空导弹在中、末制导交接班时,导引头必须完成“距离截获”、“角度截获”和“速度截获”后才能截获目标。因红外型空空导弹不能测速和测距,故本文重点分析数据链信息传输误差对导弹角度截获概率的影响^[6,9-10]。

目标指示误差如图1所示,中制导结束时导弹的纵轴为 OX 方向,导引头光轴指向为 R_s (图中虚线表示导引头视场),它与导弹纵轴的夹角 Φ 为目标指示角。目标相对导弹的视线为 R_m ,则 R_s 与 R_m 的夹角 ϕ_a 即为目标指示的角度误差。设导引头视场角的宽度为 $\pm \omega$,如果 $\phi_a < \omega$,则认为导引头角度截获目标^[10-12]。

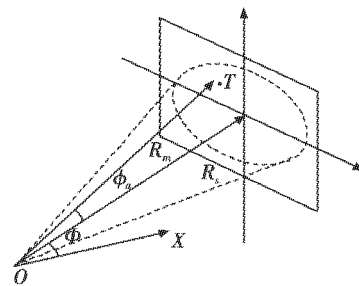


图1 目标指示误差

Fig.1 Target designation error

将目标指示误差 ϕ_a 在导引头平台系的 OX_s, Y_s, Z_s 内投影,得到 OY_s, OZ_s 轴上的分量 ϕ_{ay}, ϕ_{az} 。假设随机变量 ϕ_{ay}, ϕ_{az} 服从均值为0的正态分布,其概率密度函数分别为

$$\begin{aligned} f(\phi_{ay}) &= \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_{ay}} \exp\left(-\frac{\phi_{ay}^2}{2\sigma_{ay}^2}\right) \\ f(\phi_{az}) &= \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_{az}} \exp\left(-\frac{\phi_{az}^2}{2\sigma_{az}^2}\right) \end{aligned} \quad (11)$$

式中, $\sigma_{ay}^2, \sigma_{az}^2$ 分别为 ϕ_{ay}, ϕ_{az} 的方差。若认为 ϕ_a 在 OY_s, OZ_s 轴的分量是相互独立的,则二维随机变量 (ϕ_{ay}, ϕ_{az}) 的概率密度函数为

$$f(\phi_{ay}, \phi_{az}) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_{ay}\sigma_{az}} \exp\left(-\frac{\phi_{ay}^2}{2\sigma_{ay}^2} - \frac{\phi_{az}^2}{2\sigma_{az}^2}\right) \quad (12)$$

如果取 $\sigma_{ay} = \sigma_{az} = \sigma_a$, 则

$$f(\phi_{ay}, \phi_{az}) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_a^2} \exp\left(-\frac{\phi_{ay}^2 + \phi_{az}^2}{2\sigma_a^2}\right) \quad (13)$$

由 $\phi_a = \sqrt{\phi_{ay}^2 + \phi_{az}^2}$, 易证 ϕ_a 服从瑞利分布,其分布函数为

$$F(\phi_a) = 1 - \exp\left(-\frac{\phi_a^2}{2\sigma_a^2}\right), \phi_a \geq 0 \quad (14)$$

因导引头视场宽度为 $\pm \omega$,所以对目标的截获概率为

$$P = 1 - \exp\left(-\frac{\omega^2}{2\sigma_a^2}\right) \quad (15)$$

3 仿真验证

数据链传输信息误差包括两部分：一是数据链传输间隙目标机动引起的误差；二是载机雷达测量载机与目标相对距离和载机与目标相对角位置的误差。考虑上述误差因素，选取了3 km、10 km、15 km 3个典型高度，以及6、5、4这3个典型目标机动过载，分析数据链传输信息误差对导弹发射后截获概率的影响。详细仿真条件见表1。

表1 典型仿真条件

Table 1 Typical simulation conditions

条件	载机高度/km	载机Ma数	目标高度/km	目标Ma数	目标机动过载/g数	进入角/(°)	发射距离/km
1	15.0	1.5	15.0	1.5	4.0	150.0	22.0
2	10.0	1.2	10.0	1.2	5.0	150.0	12.0
3	3.0	0.8	3.0	0.8	6.0	180.0	8.0

表1中，进入角为载机速度与目标机速度方向夹角。

数据链的传输周期取1 s、2 s和3 s这3种情况，载机雷达测距误差取500 m，测速误差取150 m/s，测角误差取0.6°进行仿真。图2~图7为条件2下不同数据链传输周期的目标指示误差曲线和截获概率曲线，仿真结果见表2。

表2 仿真结果

Table 2 Simulation results

条件		数据链周期/s		
		1	2	3
1	最大截获概率	1.0	0.981	0.722
	最小截获概率	0.92	0.576	0.309
2	最大截获概率	0.999	0.859	0.854
	最小截获概率	0.994	0.774	0.335
3	最大截获概率	1.0	0.957	1.0
	最小截获概率	0.814	0.26	0.001

从表中可以得出如下结论。

1) 随着数据链信息传输周期加长，目标的机动对导弹截获概率的影响越来越大。当数据链信息传输周期为2 s时，数据链传输数据时刻，导弹最大截获概率为0.957，而不传输数据期间导弹最小截获概率为0.26；当数据链信息传输周期为3 s时，数据链传输数据时刻，导弹最大截获概率为1.0，而不传输数据期间导弹最小截获概率为0.001。

2) 载机雷达测量的载机与目标相对距离误差和载机测角误差对导弹截获概率影响较小。

由此可见，要保证导弹发射后稳定截获目标，必须要求载机快速给导弹传输目标信息，以减小数据链传输间隙因目标机动造成的目标指示误差。从仿真结果看，数据链传输周期需小于2 s，才能保证导弹发射后

有较高的截获概率。

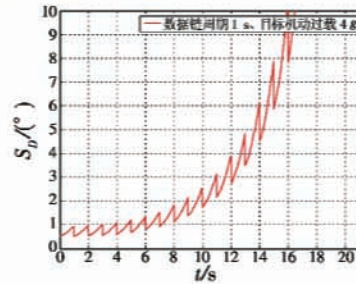


图2 条件2 目标指示误差随时间变化曲线
Fig. 2 Target designation error vs time of Case 2

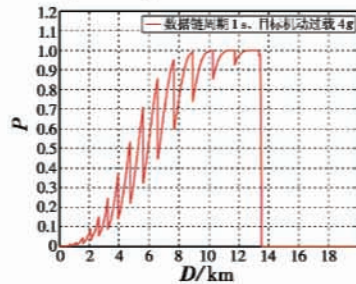


图3 条件2 导弹截获概率随距离变化曲线
Fig. 3 Missile capture probability vs distance of Case 2

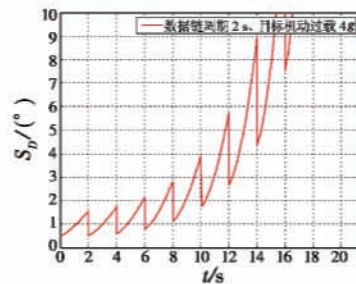


图4 条件2 目标指示误差随时间变化曲线
Fig. 4 Target designation error vs time of Case 2

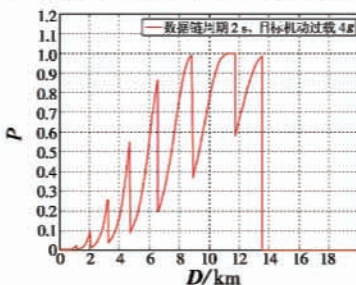


图5 条件2 导弹截获概率随距离变化曲线
Fig. 5 Missile capture probability vs distance of Case 2

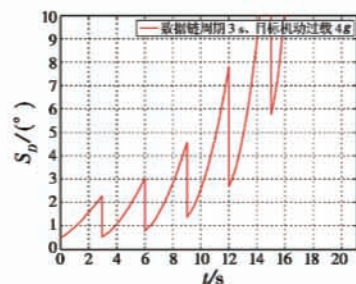


图6 条件2 目标指示误差随时间变化曲线
Fig. 6 Target designation error vs time of Case 2

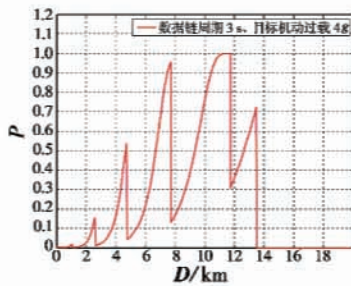


图7 条件2导弹截获概率随距离变化曲线

Fig.7 Missile capture probability vs distance of Case 2

4 结论

本文研究了载机数据链传输信息误差对红外型空空导弹发射后截获概率的影响。研究表明,对于机动目标,数据链传输信息误差对导弹截获概率有较大影响,尤其是数据链传输周期影响更大。

参考文献

- [1] 樊会涛. 复合制导空空导弹截获目标概率研究[J]. 航空学报, 2010, 31(6): 1125-1129.
FAN H T. Study on target acquisition probability of air-to-air missiles with combined guidance[J]. Acta Aeronautica Et Astronautica Sinica, 2010, 31(6): 1125-1129.
- [2] 方斌, 邓领民. 红外成像导引头点目标截获研究[J]. 电光与控制, 2003, 10(3): 31-34.
FANG B, DENG L M. Rapid point target acquisition method for imaging infrared seeker[J]. Electronics Optics & Control, 2003, 10(3): 31-34.
- [3] 胡磊力, 丁贤澄. 红外搜索跟踪系统的目标截获判据[J]. 火力与指挥控制, 1997(2): 41-43.
HU L L, DING X C. Acquisition criterion for infrared searching and tracking system[J]. Fire Control & Command Control, 1997(2): 41-43.
- [4] 陈兴林, 花文华. 微分几何制导律及其捕获性能分析[J]. 哈尔滨工程大学学报, 2010, 31(12): 1626-1631.
CHEN X L, HUA W H. Capturability analysis of a differential geometrical guidance law[J]. Journal of Harbin Engineering University, 2010, 31(12): 1626-1631.
- [5] 范红旗, 祝依龙, 付强. 机动目标拦截末制导状态估计器的误差特性[J]. 航空学报, 2008, 29(6): 1647-1655.

FAN H Q, ZHU Y L, FU Q. Error characteristics of state estimator in terminal guidance for maneuvering target interception[J]. Acta Aeronautica Et Astronautica Sinica, 2008, 29(6): 1647-1655.

- [6] 周义建, 万路军, 姚佩阳, 等. 基于数据链的空空导弹使用评估方法研究[J]. 弹箭与制导学报, 2011, 31(3): 45-48.
ZHOU Y J, WAN L J, YAO P Y, et al. The study on assessing method on air-to-air missile utilization based on data link[J]. Journal of Projectiles, Rockets, Missiles and Guidance, 2011, 31(3): 45-48.
- [7] 李新国. 有翼导弹飞行动力学[M]. 西安: 西北工业大学出版社, 2005.
LI X G. Winged missile flight dynamics[M]. Xi'an: Northwestern Polytechnical University Press, 2005.
- [8] 钱杏芳, 林瑞雄, 赵亚男. 导弹飞行力学[M]. 北京: 北京理工大学出版社, 2002.
QIAN X F, LIN R X, ZHAO Y N. Missile flight mechanics[M]. Beijing: Beijing Institute of Technology Press, 2002.
- [9] 任培, 王文政, 周经伦, 等. 数据链时延对超视距空战影响的分析[J]. 计算机工程, 2009, 35(14): 249-251.
REN P, WANG W Z, ZHOU J L, et al. Analysis of influence of datalink time delay on beyond visual range air combat[J]. Computer Engineering, 2009, 35(14): 249-251.
- [10] 丁赤飙, 毛士艺. 主动寻的末制导的截获性能分析[J]. 航空学报, 1997, 18(4): 473-476.
DING C B, MAO S Y. Acquisition performance of terminal guidance of active radar homing missiles[J]. Acta Aeronautica Et Astronautica Sinica, 1997, 18(4): 473-476.
- [11] 蓝伟华. 火控系统误差与雷达型空空导弹截获目标概率计算[J]. 电光与控制, 2004, 11(3): 14-16.
LAN W H. Error of FCS and calculation of interception probability for radar guided air-to-air missiles[J]. Electronics Optics & Control, 2004, 11(3): 14-16.
- [12] 周概素. 概率论与数理统计[M]. 北京: 高等教育出版社, 1986.
ZHOU G S. Probability and mathematical statistics[M]. Beijing: Higher Education Press, 1986.