

目标跟踪误差对导弹自导命中概率的影响分析

张国栋 张建强 刘忠

(海军工程大学电子工程学院 武汉 430033)

摘要 针对导弹的自导命中概率问题,详细探讨了目标跟踪误差对自导命中概率所产生的影响。首先建立了直角坐标系下转换坐标卡尔曼滤波系统的误差模型,其次分析了影响自导命中概率的主要因素,最后通过导弹命中目标的等效判定模型和基于落点散布的命中概率计算模型,探讨了目标跟踪误差对落点散布产生的影响,进而得到了目标跟踪误差对自导命中概率的影响程度。仿真试验说明了该分析方法的有效性和可行性,并得出了其具有一定指导意义的结论。

关键词 自导命中概率,制导精度,目标跟踪误差

中图分类号 TN972 **文献标识码** A

Influence Analysis of Target Tracking Error on Missile Guide Hit Probability

ZHANG Guo-dong ZHANG Jian-qiang LIU Zhong

(College of Electric Engineering, Naval University of Engineering, Wuhan 430033, China)

Abstract Aiming at the guide hit probability problem, this paper analyzed the influence of target tracking error on the missile guide hit probability. First this paper built up a convert measurements kalman filtering error model, and then it analyzed guide hit probability's influence factors, at last it built up equivalent hit the target decision model and hit probability model based on falling point dispersions, discussing the influence degree of the target tracking error on the guide hit probability. A simple example shows that the analysis method is useful and gets some instructive conclusions.

Keywords Guide hit probability, Guidance precision, Target tracking error

1 引言

随着防空导弹、电子战武器系统和近程反导舰炮的发展,反舰导弹的命中概率成为了其抗干扰能力的一项重要考核指标。目前对于命中概率的分析一般是通过建立目标运动模型、建立解命中模型、设定制导律^[1,2],综合考虑各种有源、无源干扰条件^[3],最后得出导弹在制导模型作用下准确导向目标的概率^[4,5]。文献[6]分析了目标的机动对末制导雷达初始捕获概率所产生的影响;文献[7]分析了在初始装订的目标位置信息存在误差的情况下,导引头的捕获概率模型和命中概率模型。但是,上述命中概率计算方法都未考虑目标跟踪精度对命中概率的影响,包括由于目标机动而导致的跟踪误差和导引头采样数据所包含的系统噪声、测量噪声对命中概率的影响。

在导弹的自导阶段,其上搭载导引头的自导命中概率主要取决于大气扰动误差、自动驾驶仪系统误差、弹体系统误差以及目标跟踪误差,其中目标跟踪误差又是最主要的影响因素,因此有必要对其进行详细研究。本文在分析影响导弹自导命中概率因素的基础上,通过建模分析重点考察了目标跟踪误差对自导命中概率的影响,给出了目标跟踪误差和导引头自导命中概率之间的关系,通过仿真实例说明了该模型的可靠性和有效性。

2 噪声引起的目标跟踪误差模型

当舰船发现来袭导弹后,为了以最快速度逃离导弹导引头的捕捉区,舰船应以垂直于导弹航路的方向进行匀速直线加速运动。但这样将使得舰船的命中面积最大,因此为减小己舰的命中面积,舰船的实际运动航路和导弹航路之间存在一定的夹角。

首先建立地面坐标系 $O-xyz$ 。原点 O 通常取导弹质心在水平面上的投影点, Ox 轴在水平面内,以导弹与目标在水平面投影的连线为正; Oy 轴与地面垂直,向上为正; Oz 轴按右手法则确定。

由于导引头是在极坐标系下获得的目标方位角、距离、速度等信息,因此在直角卡尔曼滤波系统中需要将其转换到地面坐标系中^[8,9],量测值 $z(k)$ 和状态向量 $X(k)$ 可分别表示为:

$$z(k) = \begin{bmatrix} z_1(k) \\ z_2(k) \\ z_3(k) \\ z_4(k) \\ z_5(k) \\ z_6(k) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x(k) \\ y(k) \\ z(k) \\ \dot{x}(k) \\ \dot{y}(k) \\ \dot{z}(k) \end{bmatrix} \cdot$$

张国栋(1987—),男,博士生,主要研究方向为复杂系统分析、建模与仿真。

$$\begin{bmatrix} r \cos \varepsilon \sin \varphi \\ r \cos \varepsilon \cos \varphi \\ r \sin \varepsilon \\ r \sin \varphi \cos \varepsilon + r \cos \varphi \cos \varepsilon \dot{\varphi} - r \sin \varphi \dot{\varepsilon} \\ r \cos \varphi \cos \varepsilon - r \sin \varphi \cos \varepsilon \dot{\varphi} - r \cos \varphi \dot{\varepsilon} \\ r \sin \varepsilon + r \cos \varepsilon \dot{\varepsilon} \end{bmatrix} \quad (1)$$

$$X(k) = [x \ y \ z \ \dot{x} \ \dot{y} \ \dot{z}]^T \quad (2)$$

式中: r 、 ε 和 φ 分别是极坐标系下导引头获取的目标径向距离、俯仰角和方位角信息, \dot{r} 、 $\dot{\varepsilon}$ 和 $\dot{\varphi}$ 分别为极坐标系下导引头获取的目标速度、俯仰角速度和方位角速度信息, 系统噪声协方差见参考文献[10]。

系统的量测噪声协方差为

$$R(k) = AP_r A' = \begin{bmatrix} \sigma_x^2 & \sigma_{xy} & \sigma_{xz} & 0 & 0 & 0 \\ \sigma_{xy} & \sigma_y^2 & \sigma_{yz} & 0 & 0 & 0 \\ \sigma_{xz} & \sigma_{yz} & \sigma_z^2 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \sigma_{\dot{x}}^2 & \sigma_{\dot{y}}^2 & \sigma_{\dot{z}}^2 \\ 0 & 0 & 0 & \sigma_{\dot{xy}} & \sigma_{\dot{y}}^2 & \sigma_{\dot{yz}} \\ 0 & 0 & 0 & \sigma_{\dot{xz}} & \sigma_{\dot{yz}} & \sigma_{\dot{z}}^2 \end{bmatrix} \quad (3)$$

σ_x^2 、 σ_φ^2 和 σ_ε^2 为径向距离、方位角和俯仰角测量误差的协方差, $\sigma_{\dot{x}}^2$ 、 $\sigma_{\dot{y}}^2$ 和 $\sigma_{\dot{z}}^2$ 为目标速度、方位角速度和俯仰角速度测量误差的协方差, 且它们之间相互独立。

以 Ox 方向为例, 初始时刻 Ox 方向上的位置估计误差为^[10]:

$$\tilde{x}(1|1) = x(1) - Z_1(1) = -v_4(1) \quad (4)$$

因为

$$x(1) = x(0) + \dot{x}(0) \cdot T + W_1 \quad (5)$$

$$\dot{x}(1) = \dot{x}(0) + W_4 \quad (6)$$

所以 Ox 方向上的速度估计误差为:

$$\begin{aligned} \tilde{\dot{x}}(1|1) &= \dot{x}(1) - Z_4(1) = \dot{x}(1) - [\dot{x}(1) + v_4(1)] \\ &= -v_4(1) \end{aligned} \quad (7)$$

同理可得 Oy 、 Oz 方向上的位置、速度估计误差。

3 跟踪误差对命中概率的影响分析

当水面舰艇遭受反舰导弹攻击时, 其迎弹面积也即目标命中面积可等效为舰艇在铅垂面上沿导弹落速方向的投影面积。若将舰船简化为一长方体, 则此长方体的尺寸可表示为^[11]:

$$V = L \cdot W \cdot H \quad (8)$$

式中, L 表示目标的等效长度; W 表示目标的等效宽度; H 表示目标的等效高度。

若建立一垂直于 Ox 轴平行于 yOz 平面的平面 Q , 定义导弹速度矢量方向与舰船航行方向的夹角为 θ , 则舰艇的迎弹面积可在此平面上进行投影表示, 其面积为 $S = 2l \cdot 2w$, 如图 1 所示。

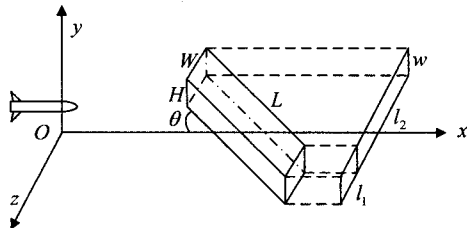


图 1 目标等效投影示意图

其中等效投影的宽为 $2w = H$, 长为 $2l = l_1 + l_2$, 且 $l_1 = W \cdot \cos \theta$, $l_2 = L \cdot \sin \theta$ 。定义导弹在该坐标系下的坐标为 (x_d, y_d, z_d) , 易知当导弹坐标满足 $-w \leq y_d \leq w$, $-l \leq z_d \leq l$ 时, 可判断导弹命中目标。

记导弹的自导命中概率为 P_z , P_z 的大小由导弹实际弹道与等效命中平面交点的散布特征和目标迎弹面积的大小决定。一般认为导弹落点在等效命中平面上按正态规律散布, 且在 Oy 轴和 Oz 轴上的散布相互独立。记落点的散布中心坐标为 m_y, m_z , 落点的散布概率偏差为 E_y, E_z , 则有:

$$P_z = \frac{1}{4} \left[\Phi\left(\frac{w+m_y}{E_y}\right) + \Phi\left(\frac{w-m_y}{E_y}\right) \right] \left[\Phi\left(\frac{l+m_z}{E_z}\right) + \Phi\left(\frac{l-m_z}{E_z}\right) \right] \quad (9)$$

式中, $\Phi(\cdot)$ 服从标准正态分布。由式(9)可以看到, 影响导弹自导命中概率的主要因素是落点散布大小和目标等效面积大小。

为考察目标跟踪误差在其中产生的影响, 将 E_y 和 E_z 表示成以下形式:

$$\begin{cases} E_y = E_{yf} + E_{yd} + E_{yg} \\ E_z = E_{zf} + E_{zd} + E_{zg} \end{cases} \quad (10)$$

式中, E_{yf}, E_{zf} 为作战环境如风速等产生的导弹落点散布误差, E_{yd}, E_{zd} 为动力系统等等系统误差产生的导弹落点散布误差, E_{yg}, E_{zg} 为导引头目标跟踪误差所产生的导弹落点散布误差, 3 类误差源之间相互独立。在 3 类误差中, 环境误差和系统误差是不可修正的, 而导引头的目标跟踪误差主要由环境噪声和跟踪雷达的测量误差产生, 是可以通过一定的目标跟踪算法进行修正的, 修正效果由跟踪算法的性能决定。

一般来说, 导弹落点统计规律为椭圆散布, 且椭圆长轴在导弹方位角 Oz 轴方向, 短轴在导弹俯仰角 Oy 轴方向, 说明导弹的方位跟踪误差比距离跟踪误差更能影响导弹的落点散布。为了提高自导命中精度, 减小导弹的方位跟踪误差是一个合理可行的选择。假设通过一定的目标跟踪算法减小了导弹的方位跟踪误差, 使得 $E_{zg}' \approx E_{zg}$, 则椭圆散布的短轴 E_y' 将会缩短, 同时长轴 E_z' 也会缩短至约等于短轴的长度, 理想情况下导弹落点散布规律将从椭圆散布变为近圆形散布。则式(2)可表示为:

$$P_z' = \frac{1}{4} \left[\Phi\left(\frac{w+m_y}{E_y'}\right) + \Phi\left(\frac{w-m_y}{E_y'}\right) \right] \left[\Phi\left(\frac{l+m_z}{E_z'}\right) + \Phi\left(\frac{l-m_z}{E_z'}\right) \right] \quad (11)$$

比较式(11)与式(9)的差距, 得:

$$\Delta P_z = P_z' - P_z \quad (12)$$

则导弹自导命中概率由于目标跟踪误差减小而提升的百分比为:

$$P\% = \frac{\Delta P_z}{P_z} \quad (13)$$

4 仿真试验

定义有关参数取值如下: 某驱逐舰舰船长 $2l = 130\text{m}$, 舰船高 $2w = 16\text{m}$; 因各种干扰因素产生的导弹落点散布概率偏差 $E_y = 10\text{m}$, $E_z = 30\text{m}$; 落点散布中心 $m_y = 3\text{m}$; $m_z = 8\text{m}$ 。经跟踪算法修正后的 E_y' 和 E_z' 分别从 10m 降低到 1m 和从 30m 降低到 3m , 则命中概率的变化可由表 1、表 2 得到。

表1 命中概率变化表

E_y, E_z	10,30	9,27	8,24	7,21	6,18
命中概率	0.7638	0.7916	0.8206	0.8507	0.8818
相比初始值变化百分比	0	3.64%	7.44%	11.38%	15.45%

表2 命中概率变化表

E_y, E_z	5,15	4,12	3,9	2,6	1,3
命中概率	0.9137	0.9457	0.9760	0.9969	0.9999
相比初始值变化百分比	19.63%	23.82%	27.78%	30.52%	30.91%

由表1、表2可以看到,因目标跟踪误差的改善而使得导弹落点散布概率偏差减小,进而增大了目标的命中概率。对于本文给出的舰船目标而言,当落点散布概率偏差减小10倍时,命中概率可提高近1/3,并且,若要使导弹达到95%以上的命中概率,需要y轴落点散布概率偏差至少在4m以下,z轴落点散布概率偏差在12m以下。

结束语 导引头的命中概率是考察精确制导武器作战效能的一个重要方面。本文分析了产生导引头命中概率误差的因素,并针对影响导引头命中概率的主要因素——目标跟踪误差进行了探讨,建立了命中概率模型并针对跟踪误差所产生的影响进行了理论分析。仿真试验说明对于一般舰船目标而言,若要保证导弹95%以上的命中概率,应控制跟踪误差,使得落点散布在 $4 \times 12\text{m}^2$ 的目标区域内。应当指出的是,随着目标舰船体积的缩小,在同一跟踪误差条件下导弹的命中概率也会降低,因而本文所提供的算例只是为了说明本分析方法的有效性,对于其他类型的舰船目标本分析方法同样适

(上接第56页)

商都宣布了自己的开源战略或产品。Android正是基于开源的Linux来建立开放手机联盟,以吸引大批的开发者来对Android进行开发,从而取得了巨大的成功。

(4)目前手机和平板电脑已从双核向四核迈进,内存从1GB升至2GB,整体性能已赶超2~3年前的主流PC,屏幕从4.5吋向5.0吋看齐。面对硬件设备能力不断提升的状况,MOS对于硬件设备的协调管理,使移动设备在转变到个人数字中心的过程中将起到更大的作用。更高的数据吞吐量、更高的数据处理能力也必然要求MOS能够充分挖掘硬件设备的能力并带给用户更多的体验和功能的提升。

(5)为了应对新的需求,一方面MOS从支持类似桌面应用风格向支持网页应用转移,如引入HTML5、CSS、JavaScript等元素。另一方面基于HTML5的新一代浏览器具有调动手机资源运行应用的能力,开始向网页操作系统演进,出现了手机操作系统和浏览器相互靠拢、融合的发展趋势,网页操作系统开始挑战桌面操作系统^[9]。

结束语 研发一个新的操作系统最主要的任务就是体系结构的设计。主流MOS体系结构的设计思想给我国研发自主MOS提供了多种案例。基于Linux、层次化平台式架构、优化使用开源软件、继承中创新的思想、开源的免费策略等等,是目前发展国产自主MOS的一种务实选择。

目前的MOS领域,Android、iOS、WP三足鼎立。一个大

国没有自主的操作系统,不仅信息安全无法得到保障,产业安

全也无法得到保障。研发我国自主的MOS尤其对促进我国移动互联网产业的发展意义重大,有利于未来占据移动互联网技术与产业的制高点,有助于我国摆脱Android、iOS、WP等原生应用的垄断与限制。

参考文献

- [1] 石进,陆音,谢立.操作系统体系结构的研究分析[J].计算机科学,2005,32(9):234-238
- [2] 薛进.基于Android的MSNV7_0手机客户端的设计与实现[D].北京:北京交通大学,2012
- [3] 王伟.基于iOS的旅游系统ITC产品的设计与实现[D].南京:南京大学,2012
- [4] 开发者应知道iOS移动操作系统架构图[EB/OL].<http://www.580114.com/Forum/t-36409>,2012-09-16
- [5] Morris B. Symbian OS架构手册——手机操作系统设计与演进[M].陈广辉,译.北京:人民邮电出版社,2008
- [6] 王仲远.关于Windows Phone 7平台的三个观点[EB/OL].http://tech.it168.com/a2012/0401/1333/000001333249_2.shtml,2012-04-06
- [7] Windows Phone 7架构文件完整泄露[EB/OL].<http://www.htc.cc/2245.html>,2010-05-18
- [8] 许洪波.抓住产业技术变革契机发展我国新一代网络操作系统[J].信息技术与标准化,2012(11):5-8
- [9] 顾玉良.智能手机操作系统和几点认识[EB/OL].<http://www.ccf.org.cn/sites/ccf/znzdjs.jsp#4>,2012-05-17

参考文献

- [1] 焦彦华,吴京,徐晖.反舰导弹落点精度和命中概率的评估和仿真[J].电子对抗,2004,4:24-26
- [2] 李邦杰,王明海.基于弹着点椭圆散布的矩形目标命中概率计算[J].火力与指挥控制,2005,30:82-84
- [3] 杨澍,朱建冲.有源干扰条件下防空导弹单发命中概率统计模型[J].海军工程大学学报,2002,14(1):62-65
- [4] 李相民,张安,史建国.防区外导弹对舰攻击的效能分析[J].火力与指挥控制,2004,29(4):16-19
- [5] 刘千里,朱建冲.反舰导弹超视距攻击作战的计算机仿真研究[J].海军工程大学学报,2004,16(1):107-110
- [6] 徐德坤,张士峰,杨华波.攻击移动目标的末制导弹命中概率评估方法[J].飞行器测控学报,2008,27(3):90-94
- [7] 王光辉,严建钢,郭荔生,等.目标位置误差存在条件下反舰导弹命中模型研究[J].弹箭与制导学报,2004,24(1):88-90
- [8] 杨春玲,倪晋麟,刘国岁.转换坐标卡尔曼滤波器的雷达目标跟踪[J].电子学报,1999,3:121-123
- [9] 徐毓,杨瑞娟,李锋,等.极坐标到直角坐标转换对卡尔曼滤波的性能影响[J].空军雷达学院学报,2001,2:26-30
- [10] 何友,修建娟,张晶炜,等.雷达数据处理及应用[M].北京:电子工业出版社,2006
- [11] 李红亮,宋宝贵,刘持胜,等.反舰导弹命中概率模型研究[J].海军航空工程学院学报,2005,20(1):181-184