

文章编号: 1001-2486 (2000) 05-0029-04

被动式寻的导弹的目标自适应制导算法*

邱玲, 沈振康

(国防科技大学电子科学与工程学院, 湖南 长沙 410073)

摘要: 主要解决以下两个问题: 一是在仅有角度信息的被动制导中如何获得距离信息; 二是对攻击点的选择问题作了初步的探索, 在获得距离信息的基础上, 利用交战双方几何关系实现目标自适应制导算法, 解决在红外被动制导中跟踪点和攻击点不同的问题。文末给出实验仿真结果及分析。

关键词: 仅有方位角信息; 被动制导; 扩展比例导引律; 扩展卡尔曼滤波

中图分类号: Tj7 **文献标识码:** A

Target Adaptive Guidance Algorithms for Homing Missile

QIU Ling, SHEN Zhen-kang

(College of Electronic Science and Engineering, National Univ. of Defense Technology, Changsha 410073, China)

Abstract: Two problems are dealt with in this paper: One is how to get the distance information in passive missile guidance with bearing-only measurements; the other is the target adaptive guidance. The adaptation includes the change of the guidance aim point from the point tracked by the seeker to a vulnerable point of the target. Simulation results indicate that the algorithm is efficient.

Key words: bearing-only measurements; passive guidance; augmentation proportional; navigation, extended kalman filter

在导弹的被动式制导中, 只能得到方位角和俯仰角信息 (bearing-only measurements), 利用角度信息推导出目标的距离、速度和位置是一个很重要的研究内容。从数学上看, 它可以描述为在直角坐标系下一个线性的状态方程和一个非线性的测量方程的滤波问题; 或者在极坐标系下一个非线性的状态方程和一个线性的测量方程的滤波问题^[1]。本文从系统的可观测性分析入手, 将估计和制导结合在一起考虑, 通过对比例导引法加以修正, 在拦截的初始阶段, 使视线转角产生摆动, 从而提高系统的可观测性和制导精度。当红外导引头跟踪目标时, 跟踪上的往往是目标上最热的点, 比如排气管, 但想攻击的是目标的要害部位。本文在获得距离信息的基础上, 结合交战双方几何关系, 通过目标自适应算法引导导弹飞向选择的攻击点。文末给出了实验仿真结果。

1 测距算法

对于仅有角度的被动定位跟踪问题, 前人已做了大量的研究^[2~4], 但很少有将制导规律考虑在内作为一个闭环系统来研究的。事实上, 控制规律对系统的可观测性有很大的影响。在导弹的拦截问题中, 目前广为使用的是比例导引法和扩展比例导引法 (考虑目标的机动), 它的一般形式如下:

$$A_{M\beta} = N \cdot V_c \cdot \beta + \frac{N}{2} A_{T\beta} \quad (1)$$

上式中, N 为导航比, V_c 为接近速度, β 为视线转率, $A_{T\beta}$ 是目标垂直于视线方向的加速度, $A_{M\beta}$ 为拦截弹在垂直于视线方向的加速度指令。加速度制导指令与导弹和目标之间的视线转率成正比, 最终目的是使视线转率 β 为零, 亦即视线在空间不转动, 那么导弹与目标总是在遭遇航线上, 最终实现碰撞杀伤。在文献 [2] 中对比例导引法的可观测性作了详细的分析, 最后得出结论: 比例导引法将导致 β 几乎是个常量, 系统是不可观测的, 从而将大大影响制导性能。因此我们考虑对比例导引法加以修正, 采用如下表达式:

* 收稿日期: 2000-3-13

作者简介: 邱玲 (1973), 女, 博士生。

$$A_{M\beta} = N \cdot V_c \cdot \beta + \frac{N}{2} A_{TN} + Fr\beta \quad (2)$$

上式中, F 为正常数, r 为导弹和目标的相对距离。

在拦截平面上有运动学方程: $\dot{r} = \dot{r} + \omega \times r$, 其中 $\omega = \dot{\beta}$,

$$\begin{aligned} \dot{r} &= \ddot{r} + \omega \times \dot{r} \\ \omega \times r &= \omega \times (\omega \times r) + (\dot{\omega} \times r) = \omega \times (\omega \times r) = \dot{\omega} \times r + \omega \times \dot{r} \\ &= \omega \times (\omega \times r) + \dot{\omega} \times r + \omega \times \omega \times r + \omega \times \dot{r} + \omega \times \omega \times r \\ \dot{r} &= \ddot{r} + \omega \times \dot{r} + \omega \times (\omega \times r) + \dot{\omega} \times r + \omega \times \omega \times r + \omega \times \dot{r} + \omega \times \omega \times r \\ &= \ddot{r} + 2\omega \times \dot{r} + \dot{\omega} \times r + 3\omega \times \omega \times r \end{aligned}$$

上式中, 取垂直于视线方向的分量, 有:

$$2\dot{\omega} + r\dot{\omega} = A_{T\beta} - A_{M\beta} \quad (3)$$

其中, $A_{T\beta}$, $A_{M\beta}$ 分别为目标和拦截弹在垂直于视线方向的加速度。又 $\dot{r} = -V_c$, $\omega = \beta \dot{\omega} = \ddot{\beta}$, 所以 (3) 式又可写成:

$$r\ddot{\beta} - 2V_c\dot{\beta} = A_{T\beta} - A_{M\beta} \quad (4)$$

将修正的比例导引法 (2) 代入 (4) 式得:

$$r\ddot{\beta} - 2V_c\dot{\beta} = A_{T\beta} - \left(NV\dot{\beta} + \frac{N}{2} A_{TN} + Fr\beta \right) \quad (5)$$

为了简化分析, 假设 V_c , $A_{T\beta}$ 为常数, $r = V_c(t_f - t)$, 则上式整理得:

$$\dot{\beta} + \frac{N-2}{t_f-t}\beta = \frac{2-N}{2V_c(t_f-t)}A_{T\beta} \quad (6)$$

上式是一个二阶变系数非齐次微分方程。当 $t \rightarrow t_0$ 时, $t_f - t$ 达到最大, (6) 式 β 的系数很小, 为简化分析暂时将其略去, 则有:

$$\dot{\beta} + F\beta = \frac{N-2}{2V_c(t_f-t)}A_{T\beta} \quad (7)$$

上式的特征方程:

$$\lambda^2 + F\lambda = 0$$

特征根:

$$\lambda = \pm j\sqrt{F}$$

也就是说 $\beta(t)$ 的解增加了一余弦项 $\cos\sqrt{F}t$, 这使 $\beta(t)$ 产生余弦振动, 振动的角频率 $\omega = \sqrt{F}$ 。

由上可知: 当 $T \rightarrow t_0$, 在制导的初始阶段, (2) 式的 $Fr\beta$ 项使 β 产生一余弦振动, 从而提高系统的可测性; 当 $t \rightarrow t_f$ 时, 在制导的末阶段, r 很小, (2) 式中的 $Fr\beta$ 项也很小, 修正的比例导引法 (2) \rightarrow 比例导引法 (1) 式, 使 $\beta = 0$, 从而保证击中目标。

为了验证上面的分析, 对修正的比例导引法实验仿真, 交战条件如下: 目标初始速度 340m/s, 当 $t = 5s$ 时, 目标开始机动, 垂直于速度方向产生 $-20m/s^2$ 的加速度, 加速度一阶时间常数 $\lambda = 0.1s$, 目标初始速度前置角 20° , 拦截弹初始速度为 680m/s, 速度前置角 10° , 初始视线方向设为 y 轴。在扩展卡尔曼滤波方程中, 初始状态估计值设为 $\hat{x}(0)^T = [0, 5000m, -240m/s, -636m/s, 0, 0]$, $P(0) = \text{diag}[100, 3000^2, 300^2, 300^2, 300, 300]$, $F = 8$, 亦即产生 $\cos\sqrt{8}/2\pi = 0.45\text{Hz}$ 的振动, 目标加速度方差 $(36m/s^2)^2$, 视线转角的测量频率 50Hz, 亦即 $\Delta t = 0.02s$, 测量噪声均值为零, 方差为 $1(\text{mrad})^2$, $N = 4$ 。

采用修正的比例导引法实验结果脱靶量为 0.012m。图 1 和图 2 是对各状态变量的估计曲线。从图中可看出, 在修正的比例导引法下, 对各个状态变量包括相对位置、相对速度的估计精度较高且收敛速度快, 一般在前 3s 内就可收敛。

2 目标自适应制导

当红外导引头跟踪目标时, 它跟踪的总是目标上最热的点, 比如说排气管, 而不一定是我们想攻

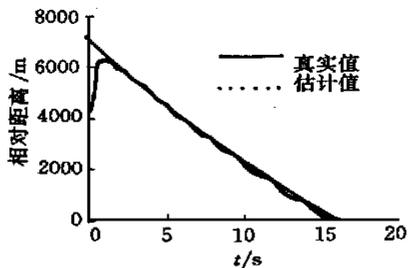


图 1 相对距离真实值与估计值曲线图

Fig 1 True and estimated relative distance

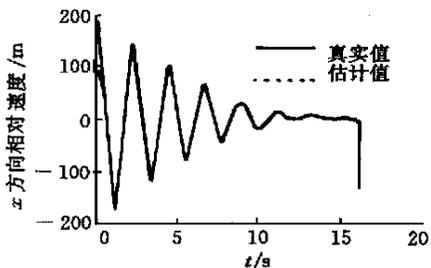


图 2 x 方向相对速度真实值与估计值曲线图

Fig.2 True and estimated relative velocity in x direction

击的点，这就降低了制导性能。因此为了提高制导性能，有必要修改制导指令。下面在可以获得距离信息的基础上，通过分析交战双方几何关系得到目标自适应算法，并给出实验仿真结果及分析。

交战拦截如图 3 所示。假设攻击点与跟踪点相距 l 米，忽略目标攻击仰角，攻击点在目标速度矢

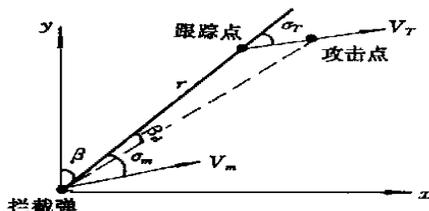


图 3 拦截几何图

Fig.3 Missile-target engagement geometry

量方向。则有如下几何关系：

$$\beta_d = \arctan \frac{l \sin \sigma_T}{r + l \cos \sigma_T}$$

$$\beta_d = \left(\arctan \frac{l \sin \sigma_T}{r + l \cos \sigma_T} \right)' = \frac{\left(\frac{l \sin \sigma_T}{r + l \cos \sigma_T} \right)'}{1 + \left(\frac{l \sin \sigma_T}{r + l \cos \sigma_T} \right)^2} = \frac{l(r \dot{\sigma}_T \cos \sigma_T - \dot{r} \sin \sigma_T + l \dot{\sigma}_T)}{r^2 + 2rl \cos \sigma_T + l^2}$$

$$\sigma_T = \frac{\pi}{2} - \beta - \arctan \frac{V_{Tx}}{V_{Ty}}$$

$$\dot{\sigma}_T = -\dot{\beta} - \frac{V_{Tx} \cdot V_{Ty} - V_{Ty} \cdot V_{Tx}}{V_{Tx}^2 + V_{Ty}^2}$$

采用如下制导规律：

$$A_{MB} = N \cdot V_c \cdot (\beta + \beta_d) + \frac{N}{2} A_{TN} + Fr(\beta + \beta_d)$$

在实际应用中，上式的各变量用估计值代替：

$$A_{MB} = N \cdot V_c \cdot (\hat{\beta} + \hat{\beta}_d) + \frac{N}{2} A_{TN} + Fr(\hat{\beta} + \hat{\beta}_d) \tag{8}$$

分析上式可看出，(8) 式用 $\hat{\beta} + \hat{\beta}_d$ 代替 (2) 式中的 β 。在制导初始阶段， β_d 很小，因此 (8) 式修正的比例导引法 (2) 式；而在末制导阶段， β_d 变大，逐渐引导导弹飞向攻击点而不是跟踪点，从而提高攻击效率。

实验仿真结果：交战环境如前所述，跟踪点与攻击点相距 $l = 5\text{m}$ ，图 4 和图 5 分别是拦截图和 β_d 的曲线图。实验结果表明距离攻击点的脱靶量是 0.02m 。从图 5 可看出， β_d 在制导的初始和中间阶段

是很小的, 只有在末制导阶段才发挥作用, 与上面的理论分析相同。

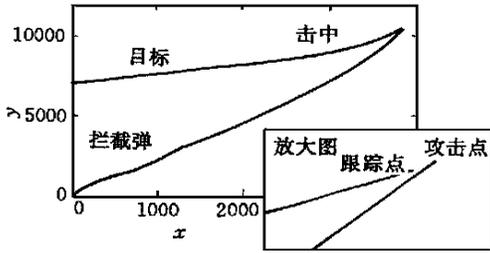


图4 拦截图

Fig. 4 Trajectory

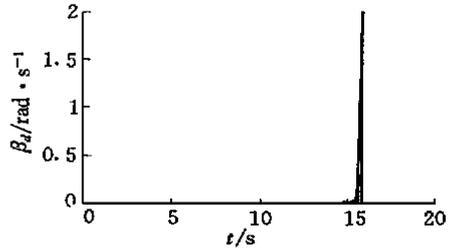


图5 B_d 曲线图

Fig 5 B_d Curve

3 结论

本文对被动式寻的导弹的测距问题和攻击点选择问题作了具体的阐述和分析, 实验仿真结果验证了算法的有效性。

参考文献:

- [1] Balakrishnan S N. Extension to Modified Polar Coordinates and Application with Passive Measurements [J]. Journal of Guidance, Control, and Dynamics, 1989, 12 (6): 906~ 912.
- [2] Taek L Song, Jason L Speyer. A stochastic analysis of a modified gain extended kalman filter with applications to estimation with bearings only measurements [J]. IEEE Trans. on Automatic Control, 1985, 30 (10): 940~ 949.
- [3] Taek L Song. Observability of target tracking with bearing-only measurements [J]. IEEE Trans. on Aerosp. Electron. Syst. 1996, 32 (4): 1468~ 1471.
- [4] Cadre J P, Jauffret C. Discrete-time observability and estimability analysis for bearings-only target motion analysis [J]. IEEE Trans. on Aerosp. Electron. Syst. 1997, 33 (1): 178~ 201.