

doi: 10.3969/j.issn.1006-1576.2012.08.002

舰载跟踪雷达测量弹道修正弹坐标转换模型

黄义, 汪德虎, 王建明, 李进军

(海军大连舰艇学院导弹与舰炮系, 辽宁 大连 116018)

摘要: 弹道修正弹是目前信息化弹药的研究热点之一, 为了对舰炮发射修正弹后的实际弹道与预定弹道进行比较、形成修正指令, 建立了舰载雷达所测量的相对弹道到相对地球静止的绝对坐标系的转换模型, 解决了舰炮发射修正弹以后舰艇继续航行, 雷达随舰艇运动、摇摆和升沉对测量弹道的影响。仿真结果证明, 该模型是可行的, 可为进一步研究弹道辨识问题提供依据。

关键词: 弹道修正弹; 坐标变换; 舰艇航行; 摇摆

中图分类号: TJ012 **文献标志码:** A

Model of Transforming Trajectory Coordinates of Trajectory Correction Projectile Measured by Ship Borne Tracking Radar

Huang Yi, Wang Dehu, Wang Jianming, Li Jinjun

(Dept. of Missile & Ship Borne Gun, Dalian Warship Academy of PLA Navy, Dalian 116018, China)

Abstract: Trajectory correction projectile is a hotspot of information-based ammunition at present. To compare factual trajectory with theory trajectory of the projectile fired by ship borne gun, and to create correction instruction, the model is set up that is used to convert the relative trajectory coordinates measured by ship borne tracking radar into the absolute coordinate system that is immobile on the earth, and solve problems of measuring trajectory, because of warship navigating, sway and fluctuation. The model is proved by simulating to be practicable and reference to make further research on trajectory identification algorithms.

Key words: trajectory correction projectile; coordinates conversion; warship navigating; sway

0 引言

弹道修正技术是指对发射出去弹箭的一段弹道参数进行测量, 与预定弹道参数进行比较, 进行弹道偏差计算、形成控制指令, 据此指令弹上控制机构作用、修正弹道向预定弹道逼近, 从而大幅度提高弹箭密集度的一种技术^[1]。舰炮发射弹道修正弹可以解决发射普通炮弹射击精度低的缺点, 又可以发挥反应速度快、储弹量多和火力密度大的优点^[2], 是目前研究热点和发展趋势。

为了计算弹道修正弹与目标的偏差、形成修正指令, 需要对观测的一段弹道参数进行辨识, 目前的辨识算法都是基于相对地球静止的射面坐标系的^[3-4], 但舰炮发射修正弹以后, 舰艇继续机动和摇摆, 航速和航向不断变化, 舰载跟踪雷达随之运动和摇摆, 测量弹道坐标采用坐标系的形式和零位与射面坐标系的形式和零位不一致^[5], 所以, 需要对舰载跟踪雷达测量的弹道坐标进行转换。

1 舰炮发射弹道修正弹工作原理

弹道修正弹发射后, 跟踪雷达实时测量一段弹

道数据, 火控设备进行滤波处理, 推算落点, 求取与目标的偏差量, 形成修正指令并发送。弹上接收机收到修正指令后传送给弹载修正执行机构, 执行机构工作, 对弹道进行修正, 从而提高射击精度^[6]。弹道修正弹工作过程如图 1 所示。

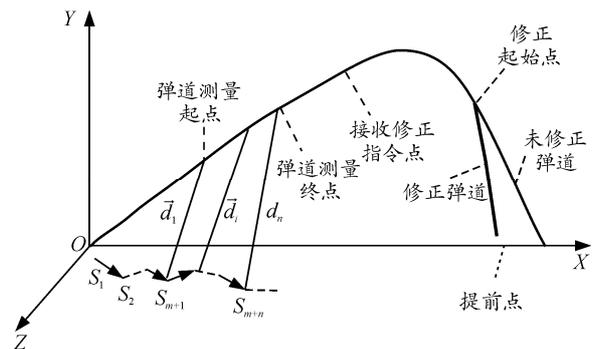


图 1 舰炮发射弹道修正弹工作过程示意图

图 1 中, 坐标系 $O-XYZ$ 为相对地球静止的以发射点为原点的直角坐标系, $S_1, S_2, \dots, S_{m+1}, \dots, S_{m+n}$ 为发射后雷达所在位置, m 为从发射到测量第 1 个弹道点之前所测量的我舰航速、航向的次数, n 为测量弹道点坐标的次数, $d_i (i=1, 2, 3, \dots, n)$ 表示以雷

收稿日期: 2012-03-05; 修回日期: 2012-04-06

基金项目: 海军大连舰艇学院科研发展基金

作者简介: 黄义(1978—), 男, 安徽人, 博士, 讲师, 从事舰炮火控系统及战斗使用研究。

达为坐标原点的相对弹道坐标向量。

2 跟踪雷达测量弹道坐标转换模型

2.1 不稳定球坐标转换为稳定直角坐标

跟踪雷达测量弹道点坐标向量 d_i 转换成直角坐标为 $(x_{bi}, y_{bi}, z_{bi}) (i=1,2,3,\dots,n)$, 每次测量 d_i 时, 跟踪雷达安装平台的横摇角、纵摇角为 (θ_i, ψ_i) , 则不稳定直角坐标 (x_{bi}, y_{bi}, z_{bi}) 到稳定直角坐标 (x_{gi}, y_{gi}, z_{gi}) 的转换公式为:

$$\begin{bmatrix} x_{gi} \\ y_{gi} \\ z_{gi} \end{bmatrix} = T_1 \cdot \begin{bmatrix} x_{bi} \\ y_{bi} \\ z_{bi} \end{bmatrix} \quad (i=1,2,3,\dots,n) \quad (1)$$

其中, 矩阵

$$T_1 = \begin{bmatrix} \cos \psi_i & -\sin \psi_i \cdot \cos \theta_i & \sin \psi_i \cdot \sin \theta_i \\ \sin \psi_i & \cos \psi_i \cdot \cos \theta_i & -\cos \psi_i \cdot \sin \theta_i \\ 0 & \sin \theta_i & \cos \theta_i \end{bmatrix}$$

坐标 (x_{gi}, y_{gi}, z_{gi}) 在以雷达中心为坐标原点的稳定直角坐标系 $O_G-X_g Y_g Z_g$ 中, $O_G-X_g Z_g$ 平面为水平面, $O_G X_g$ 轴为雷达安装平台的方向零线, $O_G Z_g$ 轴垂直于 $O_G X_g$ 轴, 向右为正, $O_G Y_g$ 轴铅直向上为正。

2.2 观炮间隔修正

将坐标系 $O_G-X_g Y_g Z_g$ 平移到发射时刻炮口相对舰艇所在位置, 得坐标系 $O_P-X_p Y_p Z_p$, 进行观炮间隔修正。则坐标系 $O_G-X_g Y_g Z_g$ 中的坐标 (x_{gi}, y_{gi}, z_{gi}) 转换到坐标系 $O_P-X_p Y_p Z_p$ 中的坐标 $(x_{ppi}, y_{ppi}, z_{ppi})$ 的公式为:

$$\begin{bmatrix} x_{ppi} \\ y_{ppi} \\ z_{ppi} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_{gi} \\ y_{gi} \\ z_{gi} \end{bmatrix} + T_1 \cdot \begin{bmatrix} \Delta x_{GP} - L_g \cdot \cos \phi_n \cos \beta_n \\ \Delta y_{GP} - L_g \cdot \sin \phi_n \\ \Delta z_{GP} - L_g \cdot \cos \phi_n \sin \beta_n \end{bmatrix} \quad (i=1,2,3,\dots,n) \quad (2)$$

其中: 矩阵 T_1 中的 (θ_i, ψ_i) 为雷达测量弹道坐标 $(D_i, \varepsilon_i, q_{wi}) (i=1,2,3,\dots,n)$ 的对应时刻火炮安装平台的横摇角、纵摇角; $(\Delta x_{GP}, \Delta y_{GP}, \Delta z_{GP})$ 为跟踪雷达中心在以火炮回转中心为原点的甲板坐标系 O_H-XYZ 中的坐标值; O_H-XZ 平面为甲板面; $O_H X$ 轴为舰艏线; $O_H Z$ 轴垂直于 $O_H X$ 轴, 向右为正; $O_H Y$ 轴垂直于 O_H-XZ 平面, 向上为正; L_g 为炮口距火炮回转中心的距离; β_n 和 ϕ_n 为火炮发射修正弹的不稳

定瞄准方向角和高低角。

2.3 旋转变换

将坐标系 $O_P-X_p Y_p Z_p$ 以 $O_P Y_p$ 轴为轴旋转, 将 $O_P X_p$ 轴旋转到发射时刻的射面内, 得到新的坐标系 O_P-XYZ , 则坐标 $(x_{ppi}, y_{ppi}, z_{ppi})$ 变换到坐标系 O_P-XYZ 中的坐标 (x_{pi}, y_{pi}, z_{pi}) 的公式为:

$$\begin{bmatrix} x_{pi} \\ y_{pi} \\ z_{pi} \end{bmatrix} = T_2 \cdot \begin{bmatrix} x_{ppi} \\ y_{ppi} \\ z_{ppi} \end{bmatrix} \quad (i=1,2,3,\dots,n) \quad (3)$$

其中,

$$T_2 = \begin{bmatrix} \cos(C_{wi} - C_{w1} - \beta - \Delta\beta_{PG0}) & 0 & -\sin(C_{wi} - C_{w1} - \beta - \Delta\beta_{PG0}) \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin(C_{wi} - C_{w1} - \beta - \Delta\beta_{PG0}) & 0 & \cos(C_{wi} - C_{w1} - \beta - \Delta\beta_{PG0}) \end{bmatrix}$$

C_{wi} 和 C_{w1} 分别为观测弹道点坐标时刻和发射修正弹时刻的我舰航向; β 为发射修正弹的稳定瞄准方向角; $\Delta\beta_{PG0}$ 为火炮平台的方向零位相对雷达平台的方向零位的偏差, $\Delta\beta_{PG0} = \Delta\beta_{P0} - \Delta\beta_{G0}$; $\Delta\beta_{P0}$ 为火炮平台的方向零位相对舰艏线的偏差; $\Delta\beta_{G0}$ 为雷达平台的方向零位相对舰艏线的偏差。 C_{wi} , q_{wi} , C_{w1} , β , $\Delta\beta_{P0}$ 和 $\Delta\beta_{G0}$ 如图 2 所示。

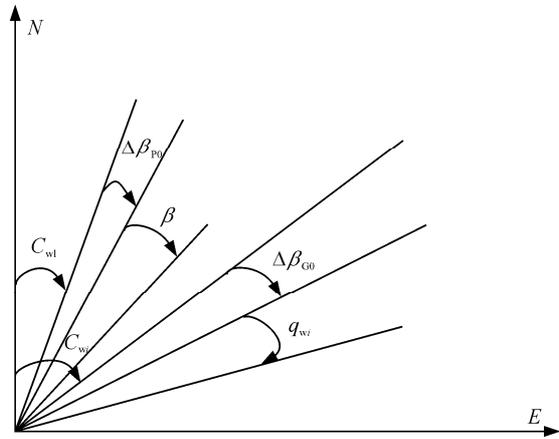


图 2 我舰航向、我舰舷角和火炮瞄准方向角的关系图

2.4 舰艇机动和升沉修正

为了进行舰艇运动和升沉修正, 将坐标系 O_P-XYZ 平移到发射时刻炮口相对地球所在的位置, 得射面坐标系 $O-XYZ$, $O X$ 轴为射面与水平面的交线, 指向射击方向为正; $O Y$ 轴在射面内, 垂直于 $O X$ 轴, 向上为正; $O Z$ 轴垂直于平面 $O X Y$, 按右手法则确定^[7]。坐标 (x_{pi}, y_{pi}, z_{pi}) 变换到坐标系 $O-XYZ$ 中的坐标 (x_i, y_i, z_i) 的公式为:

$$\begin{bmatrix} x_i \\ y_i \\ z_i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_{Pi} \\ y_{Pi} \\ z_{Pi} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \sum_{j=1}^{m+i-1} V_{wj} \cdot \cos(C_{wj} - C_{w1} - \Delta\beta_{P0} - \beta) \cdot \Delta T \\ \Delta h_{sci} \\ \sum_{j=1}^{m+i-1} V_{wj} \cdot \sin(C_{wj} - C_{w1} - \Delta\beta_{P0} - \beta) \cdot \Delta T \end{bmatrix} \quad (i = 1, 2, 3, \dots, n) \quad (4)$$

其中: m 为从火炮发射修正弹时刻到第一次测量弹道坐标之前记录我舰绝对航速和航向的次数; V_{wj} 和 $C_{wj}(j=1, 2, \dots, m+i)$ 为我舰绝对航速和航向; Δh_{sci} 为第 i 次测量弹道时刻舰艇的升沉减去发射时刻舰艇的升沉之差。

3 仿真

假设我舰航速 20 kn, 舰炮发射时刻我舰航向 30° , 之后以 $0.1 (^\circ)/s$ 的速度改变航向, 航向测量误差均值为 0, 均方差为 0.057° ; 舰炮发射修正弹的稳定瞄准方向角 $\beta = 5^\circ$, $\Delta\beta_{P0} = 0^\circ$, $\Delta\beta_{G0} = 0^\circ$; 我舰纵摇范围 $\pm 5^\circ$, 周期 6 s, 横摇范围 $\pm 10^\circ$, 周期 9 s, 摇摆角测量误差均值为 0, 均方差为 0.057° 。以某型弹为例, 仿真射角为 35° 、飞行时间 16~22 s 测量段的弹道如图 3 所示 (y 轴数量级为 10^4)。图 3 中, Line1 为在摇摆情况下雷达测量的相对弹道, Line2 为完成摇摆变换后的弹道, Line3 为完成摇摆变换和旋转变换后的弹道, Line4 为完成所有转换后的弹道。对完成转换的弹道坐标滤波, 仿真 10 次的 x 轴和 y 轴坐标误差如图 4 所示。

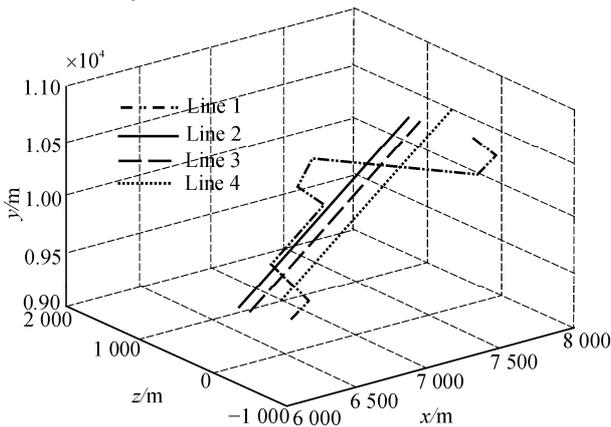


图 3 测量段弹道仿真图

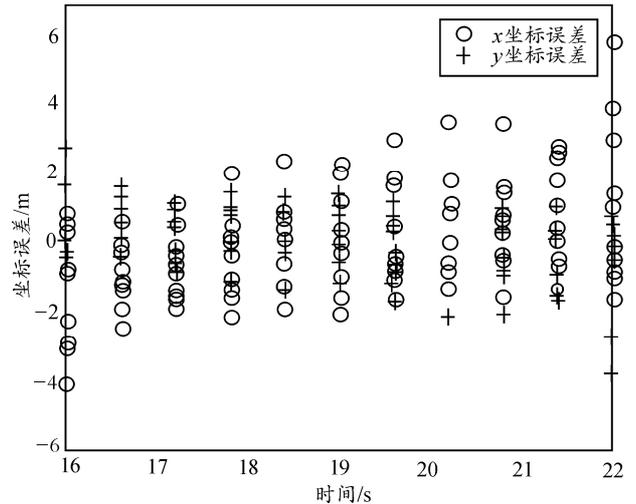


图 4 坐标误差统计图

4 结语

针对舰炮发射弹道修正弹区别于靶场的不同之处, 笔者研究了舰载跟踪雷达测量一段弹道的坐标数据转换到以发射时刻炮口相对地球所在位置为坐标原点的射面坐标系的模型, 并通过仿真证明了模型的正确性。文中的模型为进一步研究舰炮发射弹道修正弹的弹道辨识问题打下了基础, 可为舰炮发射弹道修正弹的火控软件研制提供参考。

参考文献:

- [1] 王中原, 史金光. 一维弹道修正弹气动布局与修正能力研究[J]. 南京理工大学学报: 自然科学版, 2008, 32(3): 333-336.
- [2] 汪德虎, 黄义. 舰炮对岸信息化制导弹药及作战运用[J]. 飞航导弹, 2011(2): 37-40.
- [3] 吴日恒, 郭泽荣, 等. 射程修正引信弹道辨识方法及精度分析[J]. 弹道学报, 2008, 20(1): 43-47.
- [4] 申强, 李世义, 等. 射程修正引信弹道辨识算法精度分析[J]. 北京理工大学学报, 2005, 25(1): 5-8.
- [5] 张旭东, 王昭, 孙洁. 舰艇编队雷达组网探测研究[J]. 四川兵工学报, 2010, 31(7): 8.
- [6] 陶陶, 王海川. 一维弹道修正弹阻力环修正控制算法研究[J]. 指挥控制与仿真, 2009, 31(3): 88-90.
- [7] 徐国亮. 弹道滤波算法研究[J]. 指挥控制与仿真, 2007, 29(1): 24-27.