

引用格式:吴威,卢发兴,许俊飞,等.初速可控舰炮制导炮弹对海射击多发同时弹着技术研究[J].电光与控制,2019,26(9):79-83. WU W, LU F X, XU J F, et al. On MRSI technique of guided projectiles of controllable muzzle velocity shipborne gun for sea target shooting[J]. Electronics Optics & Control, 2019, 26(9):79-83.

初速可控舰炮制导炮弹对海射击多发同时弹着技术研究

吴威¹, 卢发兴¹, 许俊飞¹, 李雄飞²

(1. 海军工程大学兵器工程学院, 武汉 430033; 2. 中国人民解放军92474部队, 海南 三亚 572018)

摘要: 针对海上运动目标定位误差较大的特点, 制导炮弹多发同时弹着法(MRSI)可有效提高命中精度和火力密度。初速可控舰炮具有发射弹丸初速可调的优势, 发射的制导炮弹可以进行弹道修正并以预先规划的制导律攻击目标。通过建立炮弹外弹道模型和带落角约束的最优制导律, 提出了海上目标提前点计算方法, 根据制导炮弹弹道特性, 在分析初速固定舰炮火控方法的基础上, 研究了初速可控舰炮的火控解算方法, 并进行了算例仿真。结果表明, 初速可控舰炮可大幅增加同时弹着的弹丸数量, 增强火力密度。

关键词: 制导炮弹; 多发同时弹着; 初速可控舰炮; 对海射击

中图分类号: TJ391 文献标志码: A doi:10.3969/j.issn.1671-637X.2019.09.017

On MRSI Technique of Guided Projectiles of Controllable Muzzle Velocity Shipborne Gun for Sea Target Shooting

WU Wei¹, LU Fa-xing¹, XU Jun-fei¹, LI Xiong-fei²

(1. Weapon Engineering College, Naval University of Engineering, Wuhan 430033, China;
2. No. 92474 Unit of PLA, Sanya 572018, China)

Abstract: To the characteristics of large error in sea target positioning, the method of Multiple Rounds Simultaneous Impact (MRSI) of guided projectile can effectively improve the hitting accuracy and firepower density. The shipborne gun with controllable muzzle velocity can adjust the muzzle velocity of guided projectiles, correct the trajectory of the projectile, and attack the target by using the preplanned guidance law. The models of projectile exterior ballistic and the optimum guidance law with angle constraints are established, and the method for calculating the predicted point of sea target is proposed. According to the guided projectile trajectory characteristics, an analysis is made to the fire control method of the shipborne gun with fixed muzzle velocity, based on which the fire control method of the shipborne gun with controllable muzzle velocity is studied. The simulation results show that the controllable muzzle velocity shipborne gun can greatly increase the number of simultaneous projectiles, and enhance the firepower density.

Key words: guided projectile; Multiple Rounds Simultaneous Impact (MRSI); shipborne gun with controllable muzzle velocity; sea target shooting

0 引言

初速可控舰炮不同于传统舰炮, 是指发射弹丸的初速可以根据实际需要, 通过控制发射能源, 实现弹丸初速可调的新型舰炮武器系统^[1]。制导炮弹多发同时弹着方法^[2-4]在提升打击精度的同时, 可有效提高火力密度, 增强作战效果, 因此, 研究初速可控舰炮发射

制导炮弹的多发同时弹着方法, 具有很大的应用价值。

目前, 在多发同时弹着方法的应用中, 文献[5-9]针对修正弹、增程弹, 研究了对陆射击同时弹着的火控技术; 文献[10-11]基于瞄准点排布模型, 分析了大口径舰炮多发同时弹着的射击诸元解算方法和射击效力; 文献[12]针对舰炮对岸区域射击, 研究了表尺梯次差及基于预定毁伤概率的射击弹丸数量求解方法; 文献[13]通过局部插值算法与并行加速方法, 提高多发同时弹着的计算精度。可见, 当前同时弹着方法的应用仅局限于对岸射击, 且多应用于大口径舰炮或者增程弹、修正弹, 而在制导炮弹对海射击同时弹着

收稿日期: 2018-09-27

修回日期: 2019-05-26

作者简介: 吴威(1994—), 男, 河南驻马店人, 硕士生, 研究方向为作战指挥系统。

方面的研究较少。

本文利用初速可控舰炮自身优势,突破传统舰炮仅依靠改变射角达到同时弹着的禁锢,实现弹丸初速与射角多种组合下的多发同时弹着的新方法。通过建立制导炮弹外弹道模型和带落角约束的最优制导律,推导了制导炮弹与海上运动目标相遇点的计算方法,在提出舰炮初速固定条件下同时弹着火控方法的基础上,研究分析了初速可控舰炮同时弹着火控算法,可大幅增加同时弹着弹丸数量。

1 制导炮弹外弹道模型

制导炮弹采用 GPS/INS 复合制导方案,其飞行弹道可分为被动段和主动段两个阶段:首先炮弹在离开炮口后,进入被动段,保持零攻角飞行,并进行搜星定位,确定弹丸质心位置;而后进入主动段,制导炮弹根据卫星信号,以预先规划的制导律导引飞行并攻击目标。

为描述制导炮弹的运动过程,进行弹道分析,建立制导炮弹的外弹道模型^[14]为

$$\begin{cases} m\dot{V} = m\mathbf{g}_x + \mathbf{F}_x \\ mV\dot{\theta} = m\mathbf{g}_y + \mathbf{F}_y \\ -mV\cos\theta \cdot \dot{\sigma} = m\mathbf{g}_z + \mathbf{F}_z \\ \dot{x} = V\cos\theta\cos\sigma \\ \dot{y} = V\sin\theta \\ \dot{z} = -V\cos\theta\sin\sigma \end{cases} \quad (1)$$

式中: m 为弹丸质量; V 为弹丸速度; x, y, z 为制导炮弹在发射坐标系中各坐标轴上的分量; $\mathbf{F}_x, \mathbf{F}_y, \mathbf{F}_z$ 为制导炮弹空气动力在弹道坐标系各坐标轴上的分量; θ 为弹道倾角; σ 为弹道偏角; $\mathbf{g}_x, \mathbf{g}_y, \mathbf{g}_z$ 为重力加速度在弹道坐标系各坐标轴上的分量。

方程组的初始条件为:当炮弹离开炮口,即 $t=0$ 时, $x=0, y=0, z=0, \sigma_0=0, V_x=V_0\cos\theta_0, V_y=V_0\sin\theta_0, V_z=0$,其中, V_0 为弹丸初速, θ_0 为弹丸射角。

2 制导炮弹最优制导律

随着现代控制理论的发展,采用最优制导律^[15-16]既可以满足制导炮弹的导引控制需求,实现制导炮弹以规定的落角命中目标,又可以使控制过程的能量损失达到最小。本文对制导炮弹采用基于落角约束的最优导引律,将制导炮弹的运动解耦分解成纵向平面、侧向平面两个分量上的运动,得到纵向平面和侧向平面弹目相对运动方程分别为

$$\ddot{\eta}_d = (\dot{v}/v - 2\dot{r}/r)\dot{\eta}_d + \dot{r}/r \cdot \dot{\theta} \quad (2)$$

$$\ddot{\eta}_l = (\dot{v}/v - 2\dot{r}/r)\dot{\eta}_l + \dot{r}/r \cdot \dot{\sigma} \quad (3)$$

式中: r 为制导炮弹与目标之间的相对距离; v 为制导炮弹的速度; η_d 为目标高低视线角; λ_d 为制导炮弹速度矢

量与弹目视线间的夹角; λ_l 为制导炮弹速度矢量在侧向平面内与纵向平面的夹角; η_l 为目标方位视线角。

由于制导炮弹末端为无动力飞行,此时 $\dot{v}/v \ll 1 \approx 0$,在纵向平面内, θ_f 为落角约束角。令 $x_1 = \eta_d - \theta_f, x_2 = \dot{x}_1 = \dot{\eta}_d$,控制量 $u = \dot{\theta}$,则可以得到状态方程为

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = x_2 \\ \dot{x}_2 = -2\dot{r}/r \cdot x_2 + \dot{r}/r \cdot u \end{cases} \quad (4)$$

根据纵向平面内的状态方程,建立系统的二次型性能指标函数,并根据极小值原理进行求解,得到法向导引方程为

$$\dot{\theta}_c = 4\dot{\eta}_d - 2\dot{r}/r(\eta_d - \theta_f) \quad (5)$$

一般地,在炮弹命中目标时,落角约束仅对落点的落速方向进行约束,对炮弹的进入方向不作要求,即在侧向平面内是无约束的。同理,可求得侧向导引方程为

$$\dot{\sigma}_c = 4\dot{\eta}_l \quad (6)$$

3 海上目标提前点计算

使用制导炮弹打击海上目标,需要根据目标当前坐标位置,结合目标运动模型,计算目标提前点位置,对目标提前点实施打击。在发射坐标系中,建立对目标的命中方程组

$$\begin{cases} x_q = x + v_{ux}t_f + (\mathbf{a}_{ux}t_f^2)/2 \\ y_q = y + v_{uy}t_f + (\mathbf{a}_{uy}t_f^2)/2 \end{cases} \quad (7)$$

式中: x, y 分别为目标当前点坐标分量; x_q, y_q 分别为目标的提前点坐标分量; t_f 为炮弹的飞行时间; v_{ux}, v_{uy} 分别为目标速度分量; $\mathbf{a}_{ux}, \mathbf{a}_{uy}$ 分别为目标加速度分量,当目标做匀速直线运动时, $\mathbf{a}_{ux} = \mathbf{a}_{uy} = 0$ 。

若要通过公式求取命中点,需要求解炮弹飞行时间 t_f ,而 t_f 又需要根据目标提前点坐标进行确定,因此,需要采用时间迭代的方法求解 t_f 。建立直角坐标系 $OX'Y'Z'$,以炮弹发射点为坐标原点 O ,以射击瞬间与目标速度矢量在水平面上的投影相平行且在水平面上指向目标方向为 OX' 轴, OY' 轴垂直向上, OZ' 轴与 OY' 轴、 OX' 轴相互垂直,方向为右手坐标系所形成方向。

假设发射瞬间($t=0$)目标位于点 $u_0(x_{u0}, 0, z_{u0})$,此时炮弹到目标之间的水平距离为 D_{u0} ,制导炮弹初速为 V_{0p} ,射角为 θ_{0p} ,通过弹道解算进而可以求取制导炮弹到达目标现在点的时间 t_{n1} 。

假设目标沿靠近我舰的方向做直线运动,速度为 V_u ,加速度为 \mathbf{a}_u ,如图1所示。

则经历时间 t_{n1} 后,得到目标的第1个近似提前点 u_1 ,此时,第1个近似目标提前点 u_1 的坐标为

$$(x_{u1}, y_{u1}, z_{u1}) = (x_{u0} - V_u t_{n1} - 1/2 \mathbf{a}_u t_{n1}^2, 0, z_{u0}) \quad (8)$$

对目标提前点 $u_1(x_{u1}, y_{u1}, z_{u1})$ 进行打击,制导炮弹初速仍保持 V_{0p} ,通过弹道解算得到炮弹到达第1个近似目

标提前点 u_1 的飞行时间为 t'_{n1} , 时间差值 Δt_{n1} 为

$$\Delta t_{n1} = t'_{n1} - t_{n1} \quad (9)$$

记目标由现在点 u_0 到第2个近似提前点 $u_2(x_{u2}, y_{u2}, z_{u2})$ 所需的时间 t_{n2} 为

$$t_{n2} = t_{n1} + \Delta t_{n1} = t'_{n1} \quad (10)$$

则可以得到目标的第2个近似提前点 u_2 的坐标为

$$(x_{u2}, y_{u2}, z_{u2}) = (x_{u0} - V_u t_{n2} - 1/2 a_u t_{n2}^2, 0, z_{u0}) \quad (11)$$

弹道解算得到炮弹到达第2个近似目标提前点 u_2 的飞行时间为 t'_{n2} , 时间差值 Δt_{n2} 为

$$\Delta t_{n2} = t'_{n2} - t_{n2} \quad (12)$$

同理, 求取目标由现在点 u_0 到第 i 个近似提前点 $u_i(x_{ui}, y_{ui}, z_{ui})$ 所需的时间 t_{ni} 为

$$t_{ni} = t_{n(i-1)} + \Delta t_{n(i-1)} = t'_{n(i-1)} \quad (13)$$

计算得到目标的第 i 个近似提前点坐标 u_i 为

$$(x_{ui}, y_{ui}, z_{ui}) = (x_{u0} - V_u t_{ni} - 1/2 a_u t_{ni}^2, 0, z_{u0}) \quad (14)$$

通过弹道解算求得炮弹到达第 i 个近似目标提前点的飞行时间为 t'_{ni} , 时间差值 Δt_{ni} 为

$$\Delta t_{ni} = t'_{ni} - t_{ni} \quad (15)$$

记允许的时间误差为 σ_t , 当时间差值 Δt_{ni} 满足 $|\Delta t_{ni}| \leq \sigma_t$ 时, 认为炮弹命中目标。因此, 得到弹丸飞行时间 t_f 为

$$t_f = t'_{ni} \quad (16)$$

炮弹对目标的命中点, 即目标提前点 $u_i(x_{ui}, y_{ui}, z_{ui})$ 的坐标为

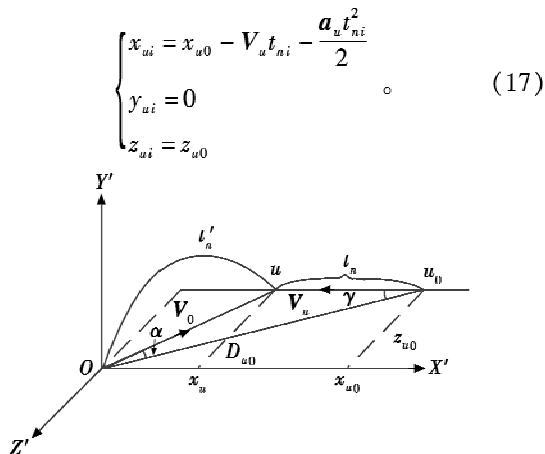


图1 目标提前点计算示意图

Fig.1 Schematic diagram of predicted target point calculation

4 同时弹着方法的实现

4.1 初速固定时同时弹着方法的实现

首先, 对制导炮弹在发射初速固定情况下的同时弹着技术进行研究。

由于制导炮弹采用最优制导律, 具有一定的修正能力, 无论打近或者打远, 均可在飞行过程中的弹道修正, 因此, 在一个弹丸初速下, 存在多个射角可以使得弹丸到达同一距离。

虽然制导炮弹存在这样的弹道特性, 但是一个弹丸初速下, 弹丸飞行时间与射角之间不是一种单调的变化关系, 当制导炮弹射程为 30 km、初速为 900 m/s、射角为 0~60°、落角约束为 70°时, 在不同射角情况下飞行时间的变化情况如图 2 所示。

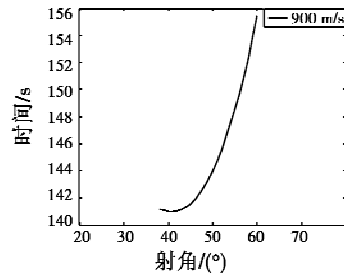


图2 初速固定时弹丸飞行时间随射角变化关系
Fig.2 Projectile flying time vs firing angle with fixed muzzle speed

此时, 实现制导炮弹同时弹着的火控方法如下。

1) 根据目标现在点信息进行目标提前点计算, 在各个射角下求解命中点, 确定最大弹丸飞行时间, 并以此最大飞行时间作为第1发弹丸的飞行时间 $t_{f,1}$, 相对应的射角为第1发弹丸的射角 $\theta_{0,1}$, 相对应的命中点即为所求目标提前点。

2) 根据舰炮发射率计算任意相邻2发炮弹之间的最小发射时间间隔 Δt 。

3) 改变弹丸射角进行弹道解算, 计算弹丸飞行时间作为下一发弹丸的飞行时间, 即

$$t_{f,i} - t_{f,i+1} \geq \Delta t \quad (18)$$

式中, $t_{f,i}$ 为第 i 发炮弹的弹丸飞行时间, 则其相对应的弹丸射角为 $\theta_{0,i}$, 若存在同一弹丸飞行时间对应于2个射角, 则射角取为与上一发弹丸射角差值最小的射角, 即满足

$$\min\{|\theta_{0,i+1} - \theta_{0,i}|\} \quad (19)$$

4) 为确定弹丸射角的改变规则, 先减小射角, 进行弹道解算一次, 若有解, 则说明此时弹丸飞行时间随射角的减小而减小, 按照射角从大到小的规则改变弹丸射角, 重复步骤3); 若无解, 则说明此时弹丸飞行时间随射角的减小而增大, 按照射角从小到大的规则改变射角, 重复步骤3)。

5) 当弹丸飞行时间无法满足式(18)时结束, 获得同时弹着的弹丸数量, 依次发射弹丸, 即可实现同时弹着。

4.2 初速可控条件下同时弹着方法的实现

初速可控舰炮的优势在于, 可以根据实际需要, 调节制导炮弹的初速, 当初速可控舰炮射程为 30 km、初速为 900~2000 m/s、射角为 0~60°、落角约束为 70°时, 制导炮弹的弹丸飞行时间随射角的变化关系如图 3 所示。

由图 3 可知: 当制导炮弹初速为最低初速 900 m/s

时,弹丸飞行时间最长,并且随着弹丸初速的增加,各个初速下的最小弹丸飞行时间逐渐缩短,其相对应的射角也逐渐减小。

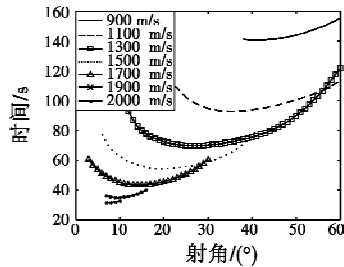


图3 初速可控时弹丸飞行时间随射角变化关系

Fig. 3 Projectile flying time vs firing angle with controllable muzzle speed

因此,当制导炮弹在当前初速下无法满足同时弹着需求时,可增加弹丸初速,进而寻求弹丸飞行时间更短的弹道方案。此时,初速可控舰炮实现制导炮弹同时弹着的火控方法可在4.1节基础上改进,求解流程见图4。

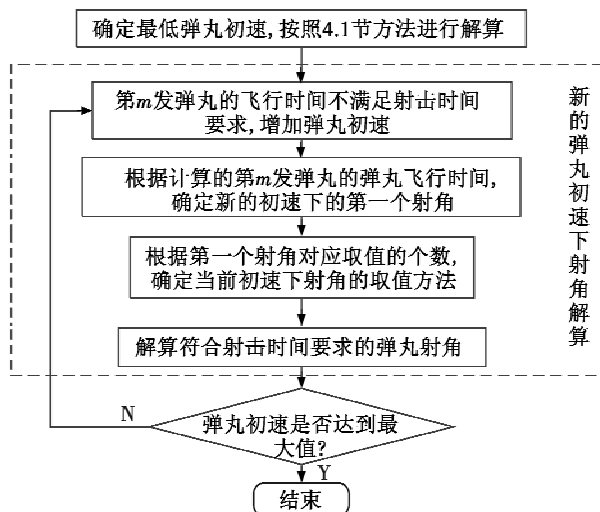


图4 同时弹着求解流程图

Fig. 4 Flow chart of solving time-on-target

初速可控舰炮实现制导炮弹同时弹着的火控方法为:

- 1) 取弹丸初速为最低初速,按照4.1节中步骤1)~4)进行解算;
- 2) 在当前初速下,当第 m 发弹丸的飞行时间无法满足式(18)时,增加弹丸初速;
- 3) 根据计算的第 m 发弹丸的弹丸飞行时间,确定新的弹丸初速下的第1个射角,若此时射角有2个值,转至4),若此时射角有1个值,转至5),若此时没有对应的射角,转至6);
- 4) 按照射角从大到小的顺序进行解算,重复4.1节中的步骤3);
- 5) 重复4.1节中的步骤3)~4),先确定弹丸飞

行时间随射角变化关系,再解算符合要求的弹丸射角;

6) 以当前新的弹丸初速下的最大弹丸飞行时间作为第 m 发弹丸的飞行时间,重复4.1节中的步骤3)~4);

7) 重复步骤2)~6),直至弹丸初速增加至最大时结束,此时,求得的同时弹着的弹丸数量为初速可控舰炮可实现同时弹着的弹丸总数。

4.3 算例仿真

舰炮发射率是由舰炮武器系统自身的性能决定的,它指的是舰炮每分钟发射的弹丸数量 n ,因此,可以求得任意相邻2发炮弹之间的最小发射时间间隔 Δt 为舰炮发射率的倒数,即 $\Delta t = 1/n$ 。

假设目标距离为30 km、射角为 $0 \sim 60^\circ$ 、落角约束为 70° 、固定初速为900 m/s,初速可控舰炮的初速范围为900~2000 m/s,舰炮发射率为15发/min,即当 Δt 为4 s时,分别针对初速固定舰炮和初速可控舰炮,计算实现制导炮弹同时弹着的弹丸射角及弹丸飞行时间,见表1、表2。

表1 初速固定舰炮的同时弹着方案

Table 1 Time-on-target scheme of fixed-speed naval gun

发射次序	射角/(°)	飞行时间/s
1	60.00	148.63
2	57.17	144.62
3	53.60	140.62
4	48.72	136.61

表2 初速可控舰炮的同时弹着方案

Table 2 Time-on-target scheme of controllable-speed naval gun

发射次序	弹丸初速/(m·s ⁻¹)	射角/(°)	飞行时间/s	发射次序	弹丸初速/(m·s ⁻¹)	射角/(°)	飞行时间/s
1	900	60.00	148.63	8	1000	53.41	120.62
2	900	57.17	144.62	9	1000	50.37	116.62
3	900	53.60	140.62	10	1000	46.84	112.62
4	900	48.74	136.62	∴	∴	∴	∴
5	950	56.31	132.62				
6	950	51.94	128.62	29	1850	13.07	36.62
7	950	46.06	124.62	30	1950	9.89	32.62

由表1、表2可知:1)采用上述方法,初速固定舰炮和初速可控舰炮均能实现制导炮弹的多发同时弹着;2)初速可控舰炮通过改变弹丸初速,能显著增加同时弹着的弹丸数量,增强火力密度。

5 结束语

制导炮弹可以进行弹道修正并以预先规划的制导律攻击目标,本文根据制导炮弹的这一弹道特性,可以在同一初速不同射角下实现多发制导炮弹的同时弹着,进而利用初速可控舰炮发射的制导炮弹初速可调的特点,大幅增加初速可控舰炮的同时弹着弹丸数量,提升作战效果。

参考文献

- [1] MCNAB I R, FISH S, STEFANI F. Parameters for an electromagnetic naval railgun[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2015, 37(1):223-228.
- [2] MORRISON P H, AMBERNTSON D S. Guidance and control of a cannon-launched guided projectile[J]. Journal of Spacecraft & Rockets, 1977, 14(6):328-334.
- [3] 张相炎. 现代火炮技术概论[M]. 北京:国防工业出版社, 2015.
- [4] 郭锡福. 远程火炮武器系统射击精度分析[M]. 北京:国防工业出版社, 2004.
- [5] 黄义,汪德虎,汪汇川,等. 舰炮发射一维修正弹多发同时弹着研究[J]. 弹箭与制导学报, 2012, 32(5):127-129.
- [6] 李陆军,吕金建,丁建江,等. 基于时频分布的导弹目标识别方法[J]. 火力与指挥控制, 2017, 42(6):45-50.
- [7] 黄义,黄景德,由佳. 一维弹道修正弹多发同时弹着火控新算法[J]. 兵工自动化, 2018, 37(5):6-7.
- [8] 石章松,傅冰,胡献君,等. 基于增程修正弹的同时弹着火控机理[J]. 海军工程大学学报, 2013, 25(3):7-12.
- [9] 刘剑威,王海川. 增程修正弹单炮多发同时弹着火控技术研究[J]. 指挥控制与仿真, 2012, 34(1):70-72.
- [10] 程恭,石章松,王航宇. 基于瞄准点排布模型的多发同时弹着射击诸元解算[J]. 舰船电子工程, 2011, 31(11):29-32.
- [11] 李开龙,石章松,龚驰,等. 大口径舰炮多发同时弹着射击效力分析[J]. 舰船电子工程, 2011, 31(9):31-33.
- [12] 卢发兴,贾正荣,吴威. 舰炮对岸区域射击最优表尺分配模型研究[J]. 系统工程与电子技术, 2018, 40(3):571-576.
- [13] 程李东,姜毅,牛钰森. 单炮多发同时弹着的局部插值算法与并行加速[J]. 弹道学报, 2018, 30(2):19-25.
- [14] 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, 2016.
- [15] HE S M, LEE C H. Gravity-turn-assisted optimal guidance law[J]. Journal of Guidances, Control & Dynamics, 2017, 41(1):1-13.
- [16] CHO H, RYOO C K, TSOURDOS A, et al. Optimal impact angle control guidance law based on linearization about collision triangle[J]. Journal of Guidance, Control & Dynamics, 2014, 37(3):958-964.

(上接第44页)

无法定位,实验结果证明了算法的有效性。

4 结论

本文提出了一种利用支持向量机的载波跟踪算法,采用支持向量机算法建立起判决因子和权值之间的非线性关系,根据跟踪环路运行情况调节锁相环和锁频环相对作用大小,有效地提高了载波环高动态跟踪性能。但本文只是进行了基于软件接收机的仿真,而在实际情况下,可能要考虑电离层干扰和电路系统带来的热噪声等其他因素,未来工作将考虑在实际情况下进一步提升跟踪环路性能。

参考文献

- [1] 谢刚. GPS原理与接收机设计[M]. 北京:电子工业出版社, 2009.
- [2] JIANG C H, CHEN S, CHEN Y W, et al. Research on a chip scale atomic clock driven GNSS/SINS deeply coupled navigation system for augmented performance[J]. IET Radar, Sonar & Navigation, 2018, 13(2):326-331.
- [3] KIESEL S, ASCHER C, GRAMM D, et al. GNSS receiver with vector based FLL-assisted PLL carrier tracking loop [C]//ION GNSS, Proceedings of the Institute of Navigation, 2008:197-203.
- [4] 唐小妹,徐鹏程,王飞雪. 两种相位鉴别器下的导航接收机跟踪环路性能分析及比较[J]. 国防科技大学学报, 2010, 32(2):85-90.
- [5] LIAN P. Improving tracking performance of PLL in high dynamic applications [D]. Calgary:University of Calgary, 2004.
- [6] 吴琼,寇艳红,郑兴平. 高动态GPS接收机环路跟踪技术研究[J]. 无线电工程, 2008, 38(12):32-36.
- [7] GAO G J. INS-assisted high sensitivity GPS receivers for degraded signal navigation [D]. Calgary: University of Calgary, 2007.
- [8] 匡鸿博,茅旭初,王永凯. 一种用于高动态环境的GPS信号跟踪方法[J]. 上海交通大学学报, 2012, 46(6):854-858, 864.
- [9] JIANG C H, CHEN S, BO Y M, et al. An adaptive tuning method of GNSS carrier tracking loop for high dynamic application[J]. Journal of Aeronautics, Astronautics and Aviation, 2016, 48(4):271-278.
- [10] JIANG C H, CHEN S, BO Y M, et al. Implementation and performance evaluation of a fast relocation method in a GPS/SINS/CSAC integrated navigation system hardware prototype[J]. IEICE Electronics Express, 2017, 14(6). doi: 10.1587/eie.14.20170121.
- [11] DIETRICH R, OPPER M, SOMPOLINSKY H. Statistical mechanics of support vector networks [J]. Physical Review Letters, 2010, 82(14):2975-2978.