

doi: 10.3969/j.issn.1006-1576.2012.03.020

基于改进遗传算法的 SAR 末制导段弹道优化设计

赵振波, 张刚, 李相平

(海军航空工程学院电子信息工程系, 山东 烟台 264001)

摘要: 应用改进实数编码遗传算法, 对基于弹载合成孔径雷达 (synthetic aperture radar, SAR) 导引头的反舰导弹末制导段的弹道优化设计进行研究。分析飞行弹道和观测视角对弹载 SAR 导引头方位分辨力的影响, 给出弹载 SAR 成像对导弹飞行弹道的约束, 将导弹横向加速度作为优化变量, 构建与方位分辨率和波束驻留时间相关的目标函数。仿真结果表明: 与标准遗传算法优化相比, 改进遗传算法优化后的目标函数值减小更快, 能更快得到最优解。

关键词: 反舰导弹; 弹载 SAR; 改进遗传算法; 优化

中图分类号: TJ765 **文献标志码:** A

Trajectory Design and Optimization for SAR Terminal-Guidance Section Based on Improved Genetic Algorithm

Zhao Zhenbo, Zhang Gang, Li Xiangping

(Dept. of Electronic Information Engineering, Naval Aeronautical & Astronautical University, Yantai 264001, China)

Abstract: Trajectory optimization problem of anti-ship missile synthetic aperture radars (SAR) terminal guidance is researched using an improved real-coded genetic algorithm. The effect of trajectory and look angle to the azimuth resolution of the missile-borne synthetic aperture radar seeker was analyzed, and constraints of imaging of the missile-borne SAR to missile flying trajectory were given. Missile lateral acceleration was regarded as optimized variable, and objective function about the dwell time and the desired azimuth resolution was established. Simulation results show that the optimized values of objective function by the improved genetic algorithm reduce more sharply than by standard genetic algorithm, so the optimal solution can be obtained more quickly.

Key words: anti-ship missile; SAR; improved genetic algorithm; optimization

0 引言

当前反舰导弹雷达导引头的方位分辨率很低, 无法分辨同一波束内的不同舰船, 难以满足精确打击的要求。合成孔径雷达 (synthetic aperture radar, SAR) 具有全天时、全天候探测能力以及二维分辨成像的观测能力, 机载、星载等平台上 SAR 在军事侦察、地形测绘等任务中已经得到了广泛的应用^[1-3]。将 SAR 用于反舰导弹的末制导中, 可大大增强反舰导弹对舰艇编队的攻击点选择, 实现对港口内舰船的打击和对打击区域成像监控的能力。

SAR 成像导引头系统的性能, 除取决于系统参数外, 还取决于其飞行弹道, 同一导弹按不同的弹道飞行具有不同的性能。弹载 SAR 成像的最终目的是为了正确检测、识别目标, 对其实施精确打击, 这就对成像分辨率提出了要求。SAR 成像的距离分辨率由发射信号的带宽决定, 而其方位分辨率则与

导弹的飞行弹道和雷达观测视角有关^[4]。弹载 SAR 通常工作于大前斜视, 获得相同方位分辨率的波束驻留时间要比正侧视情况下长, 并且弹速较高, 飞行时间有限。因此, 要在限定时间内获得最佳的合成孔径分辨率, 导弹必须按照一定的弹道飞行, 即需要对弹道进行优化设计。

基于弹载 SAR 导引头的反舰导弹末制导段的弹道优化设计问题, 可转化为求一组横向加速度序列使其控制下形成的弹道满足一定约束条件下, 目标函数达到最小值, 本质上是一个包含线性与非线性约束的多元变量寻优问题^[5]。遗传算法作为模拟生物在自然环境中的遗传和进化过程而形成的一种全局优化概率搜索算法, 由于寻优过程的自适应性, 隐含的并行性以及解决复杂非线性问题的鲁棒性的特点, 适用于对大规模非线性问题优化^[6]。因此, 笔者利用遗传算法并结合文献[7]中的聚束 SAR 成像策略对弹道进行优化。

收稿日期: 2011-10-05; 修回日期: 2011-11-11

基金项目: “泰山学者”建设工程专项经费资助

作者简介: 赵振波(1984—), 男, 河北人, 硕士, 助理工程师, 从事精确制导技术研究。

1 数学模型

1.1 导弹运动模型

首先对导弹动力学模型作一定的简化, 假设导弹质点和导弹的速度幅度保持恒定。由于导弹运动速度远大于舰船目标的运动速度, 可忽略目标运动影响。三维空间中导弹运动如图 1 所示, 惯性坐标系下导弹质点运动方程^[4]

$$\begin{aligned} \dot{X} &= V \cos \gamma \cos \psi, \dot{Y} = V \cos \gamma \sin \psi, \dot{Z} = V \sin \gamma \\ \dot{\gamma} &= \frac{a_z}{V}, \dot{\psi} = \frac{a_y}{V \cos \gamma} \end{aligned} \quad (1)$$

式中: \dot{X} 、 \dot{Y} 和 \dot{Z} 为导弹的速度矢量; V 为速度的大小; γ 、 ψ 分别为轨迹倾角和偏航角; a_y 、 a_z 分别为正交于速度矢量的加速度 (a_y 为偏航方向上的横向加速度; a_z 为俯仰方向上的纵向加速度)。

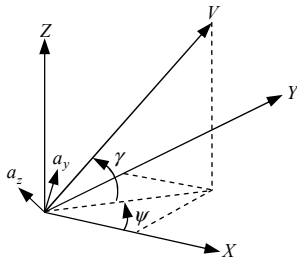


图 1 三维空间中导弹运动示意图

1.2 方位分辨率与波束驻留时间的关系

弹载 SAR 在末制导段飞行时, 为保证其方位分辨率, 雷达波束的驻留时间应足够长, 而波束驻留时间受导弹飞行弹道和观测视角的影响。笔者依据聚束 SAR 模式的成像特点, 分析其方位分辨率与波束驻留时间的关系^[7]。

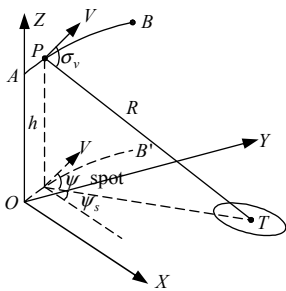


图 2 聚束 SAR 成像时的弹目几何关系

聚束 SAR 成像时的弹目几何关系如图 2 所示。导弹在高度为 h , 平行于水平面 XOY 的平面内沿曲线 \widehat{AB} 运动, \widehat{AB} 为 SAR 聚束成像阶段导弹的飞行弹道, 即待优化的弹道。 P 是弹道上的任意点, 坐标为 (x, y, h) ; T 为目标点; 坐标为 (x_t, y_t, h_t) ; R 为弹

目之间的瞬时距离; 导弹速度矢量与弹目视线之间的夹角为 σ_v ; 弹目视线 PT 的偏航角为 ψ_s ; 俯仰角为 γ_s ; 导弹速度与弹目视线的偏航角之差为 $\psi_{spot} = |\psi - \psi_s|$, 根据弹目几何关系可知

$$\gamma_s = \arctan \left| \frac{h_t - h}{\sqrt{(x_t - x)^2 + (y_t - y)^2}} \right| \quad (2)$$

$$\psi_s = \arctan \left| \frac{y_t - y}{x_t - x} \right| \quad (3)$$

导弹速度方向单位矢量 u_v 和弹目视线方向的单位矢量为 u_{Los} 的表达式为

$$u_v = \begin{bmatrix} \cos \gamma \cos \psi \\ \cos \gamma \sin \psi \\ \sin \gamma \end{bmatrix}, u_{Los} = \begin{bmatrix} \cos \gamma_s \cos \psi_s \\ \cos \gamma_s \sin \psi_s \\ \sin \gamma_s \end{bmatrix} \quad (4)$$

$$\text{则 } \sigma_v = \arccos(u_v \cdot u_{Los}) \quad (5)$$

由于优化的对象是低空和超低空掠海反舰导弹的末制导段, 考虑到反舰导弹末制导段加速度控制系统主要对偏航方向进行控制, 因此, 笔者在对其进行弹道优化时只需考虑横向加速度 a_y 。不妨假定末制导段导弹飞行的轨迹倾角 γ 和纵向加速度 a_z 为零, 即导弹在水平面内飞行, 因而, 可在二维平面上对其进行弹道优化设计。需要说明的是, 三维空间中的导弹速度矢量与弹目视线之间的夹角 σ_v 与弹速与弹目视线偏航角之差 $(\psi - \psi_s)$ 在二维空间是重合的。

聚束 SAR 成像模式下方位分辨率 ρ_a 与波束驻留时间之间的关系式为

$$DT = \frac{\lambda R}{2V \cdot \rho_a \cdot (1 - \cos^2 \sigma_v)} = \frac{\lambda R}{2V \cdot \rho_a \cdot (\cos \gamma \cos \gamma_s \cos(\psi - \psi_s) + \sin \gamma \sin \gamma_s)} \quad (6)$$

从式 (6) 可以看出, 当目标距离为 R , 且所需的方位分辨率 ρ_a 一定时, 导弹速度矢量与弹目视线之间的夹角 σ_v 越大, 波束驻留时间就越短, 最理想的情况是弹载 SAR 工作于正侧视。但是导弹必须完成打击目标的任务, 且攻击时间要短, 因此弹载 SAR 只能工作在大斜视的状态。导弹通过侧向飞行获得 SAR 的高分辨率二维图像, 同时也会使得导弹攻击时间增长。弹道优化的目的是为了在满足一定方位分辨率 ρ_a 的前提下, 设计一条波束驻留时间最短的飞行弹道。而飞行弹道的控制又是通过对导弹

舵施加一定的切向力来实现的,即通过对导弹施加的横向加速度来实现。因此,弹道优化设计问题就转化为对横向加速度的优化设计。

1.3 目标函数

假设导弹在 SAR 成像阶段飞行时间为 t , 将其离散为 N 个节点, 采用聚束 SAR 成像策略, 在保证其方位分辨率不低于一定值的前提下, 最优弹道的波束驻留时间应最短, 因而目标函数建立如下

$$J = \sum_{k=1}^N (DT(k))^2 = \sum_{k=1}^N \left(\frac{\lambda R}{2V \cdot \rho_a \cdot (1 - \cos^2 \sigma_v)} \right)^2 \quad (7)$$

给出状态方程 (1) 的各项的初始条件和横向加速度控制变量的初始假设, 则可通过积分求得式 (7) 中各项在弹道上每一节点处的值。从而问题转化为求一个横向加速度控制序列, 使得在满足一定的 SAR 成像方位分辨率前提下, 波束驻留时间最短, 即目标函数 (7) 达到最小值。

1.4 约束条件

由于应用要求及导弹设备限制, 导弹飞行受到一定的约束^[2], 主要包括:

约束 1, 由于弹载雷达视场范围有一定限制, 因此有导弹速度瞬时方向与弹目视线之间的夹角

$$|\sigma_v| \leq \sigma_{v_max} \quad (8)$$

约束 2, 加速度控制变量必须满足过载要求

$$|a_y| \leq a_{max} \quad (9)$$

约束 3, 由于弹速的偏航方向与弹目视线的偏航方向平行时无法进行方位分辨, 因此有弹速的偏航方向与弹目视线的偏航方向之差, 也即导弹速度瞬时方向与弹目视线之间的夹角

$$|\sigma_v| \geq 5^\circ \quad (10)$$

2 基于改进遗传算法的弹道优化设计

由 1.3 节分析可知, 基于弹载 SAR 导引头的反舰导弹的弹道优化设计问题, 可转化为求满足式 (8)~(10) 的横向加速度序列, 使式 (7) 表示的目标函数值最小。横向加速度序列是一个离散常数序列, 由于导弹节点通常为几十个, 因此它实质上是一个多元变量寻优问题, 除包含线性约束 (9) 外, 还包含非线性约束 (8)、(10)。

遗传算法作为一种智能计算方法, 是模拟生物在自然环境中的遗传和进化过程而形成的一种自适应全局优化概率搜索算法。它具有较强的全局搜索功能和求解问题的能力, 还具有简单通用、鲁棒性

强、适于并行处理等特点^[6], 适合于对几十个甚至更大规模的横向加速度序列进行寻优。

笔者基于改进实数编码遗传算法来优化弹道, 实数编码可以直接将变量作为基因^[8], 将实数串作为染色体, 避免了复杂的编码与解码过程, 增强寻优效率。同时采用最优保存策略, 保证算法收敛于最优解。具体步骤为:

1) 种群初始化。设定场景及系统初始条件, 在给定的过载范围内, 采用实数编码的方法随机产生由一定数目个体构成的初始种群, 每个个体为一个横向加速度控制序列, 每个节点处的横向加速度 (a_y) 即为一个基因。

2) 个体评价。即计算种群中每个个体的适应度, 评估个体解的优劣。笔者采用线性评估, 按从小到大的顺序对个体目标函数值进行排序, 个体的目标函数值越小, 适应度越高。

3) 执行选择算子。为保证适应度最好的个体尽可能地保留到下一代种群, 采用了最优保存策略, 将种群中适应度最高的个体不经遗传操作直接复制到下一代, 以防最优个体被破坏。

4) 执行交叉算子。将种群中个体的部分基因进行交换, 也即交换部分弹道节点处的横向加速度。设交叉概率 $Pc=0.8$, NP 为种群规模, 将其中的 $NP \times Pc$ 个个体放入交配池。以交叉概率 Pc 对交配池中的个体按下式进行交叉操作:

$$\begin{cases} x_{2i}^{t+1} = x_{2i}^t + r_i (x_{2i}^t + x_{2i+1}^t) \\ x_{2i+1}^{t+1} = x_{2i}^t - r_i (x_{2i}^t + x_{2i+1}^t) \end{cases} \quad \left(i=1, 2, \dots, \frac{NP}{2} - 1 \right) \quad (11)$$

式中: x_{2i}^t, x_{2i+1}^t 是父代中的双亲, 其中 x_{2i}^t 的适应度大于 x_{2i+1}^t 的适应度。 $x_{2i}^{t+1}, x_{2i+1}^{t+1}$ 是交叉操作产生的子代新个体, r_i 是 [0,1] 均匀分布的随机数。

5) 执行变异算子。自适应变异算子能够在遗传过程中根据群体的多样性的变化自动调整大小, 有效避免早熟现象的发生。采用自适应的方法, 如式 (12):

$$x_i^{t+1} = \begin{cases} x_i^t + \Delta(t, x_i^t - x_i^l) & rnd > 0.5 \\ x_i^t - \Delta(t, x_i^t - x_i^l) & rnd \leq 0.5 \end{cases} \quad (12)$$

其中: x_i^t, x_i^{t+1} 分别是第 i 个变量变异前后的实数; x_i^u, x_i^l 分别是 x_i^t 的上下界; rnd 为 [0,1] 区间的随机数。 $\Delta(t, y) = y \cdot \left(1 - r \cdot \left(1 - \frac{t}{T} \right)^b \right)$ 为个体变异程度, 式

中, r 为 $[0,1]$ 区间的随机数, t 为变异个体所处的进化代数, T 为最大代数, $b=2\sim 5$ 为变异形状因子。

6) 若已经达到预先设定的进化代数, 则输出种群中适应度最高的个体作为问题的满意解, 否则继续执行第 2) 步。

3 仿真结果

由于雷达初始姿态的不确定性, 在仿真设计时, 假定雷达波束初始指向在以点 (6 km, 35 km) 为中心的 2 km 范围内随机变化。雷达先在横向面上扫描 3 个波束宽度, 而后固定波束中心位置在 (6 km, 35 km) 处, 在导弹飞行中一直对准此位置。其余相关参数参考典型值设置见表 1, 仿真结果如图 3~图 7 所示。

表 1 仿真参数

初始条件	参数值
雷达波长 λ/m	0.03
方位分辨率 ρ_a/m	5
飞行时间 t/s	30
节点数 N	80
最大视角 $\sigma_{v_max}/(^{\circ})$	45
雷达作用距离 R_{max}/km	40
过载 a_{max}/g	5
导弹速度 $V/(km/s)$	0.7
初速度方向 $\psi_0/(^{\circ})$	90

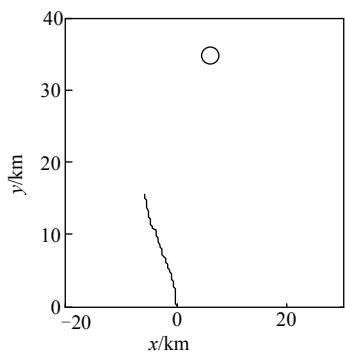


图 3 优化后的弹道

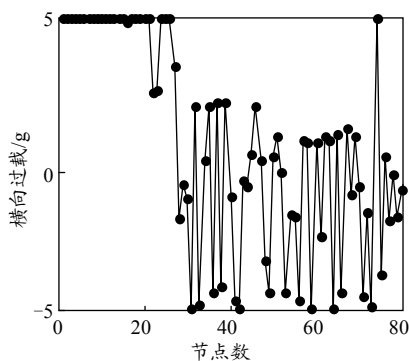


图 4 瞬时横向加速度

图 3 所示为经过改进遗传算法优化设计后形成的弹道, 圆圈表示目标所在的区域。

从图 4 可以看出, 导弹飞行过程中的横向加速度始终小于过载 5 g。

图 5 为聚束 SAR 成像方位分辨率为 5 m 时的波束驻留时间。由图 5 可见, 优化后聚束 SAR 的波束驻留时间变化曲线是随节点数增大而迅速减小的, 最长波束驻留时间为 5.33 s, 在飞行至第 36 个节点时波束驻留时间已缩短到 0.255 6 s, 小于扫描波束所需的时间, 完全可满足成像的需要。因此, 导引头可在限定的飞行时间内实现所需方位分辨率。

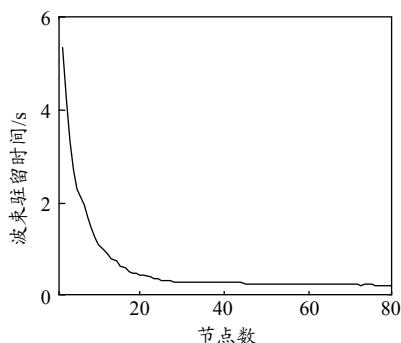


图 5 $\rho_a = 5 m$ 所需的波束驻留时间

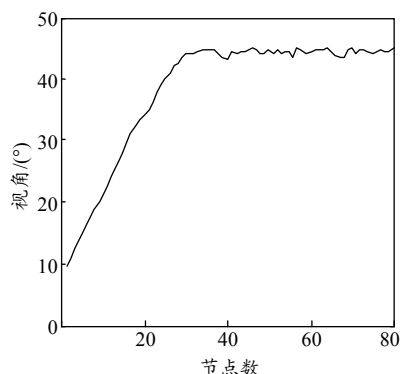


图 6 视角 σ_v 变化曲线

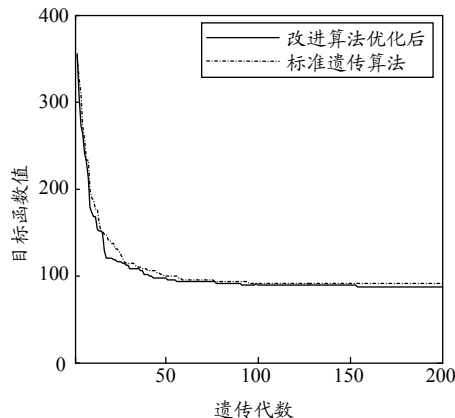


图 7 遗传算法目标函数值

图 6 给出了弹道各节点处的视角 σ_v 。表示弹速与弹目视线之间的夹角，在弹道各节点处均小于最大视角约束 45° ，并始终大于最小约束 5° 。

从图 4~图 6 可见，改进遗传算法优化设计出的弹道可在限定飞行时间内实现所需方位分辨率，并且满足所要求的约束条件，是可行的。

图 7 中，经过 200 代遗传操作后，标准遗传算法得到的解为 91.878 4，改进遗传算法得到的解为 87.429 3。可见，采用改进遗传算法目标函数值减小更快，能更快得到最优解。

4 结束语

通过建立导弹运动模型，分析聚束模式下弹载 SAR 的方位分辨率与驻留时间、观测视角等因素的关系，结合 SAR 成像制导模式中的一系列约束条件，笔者提出了一种基于改进实数编码遗传算法的 SAR 末制导段弹道设计优化方法。仿真结果表明：该方法可在反舰导弹有限的飞行时间内实现所需要的方位分辨率，并且满足给出的弹道飞行约束条件。和标准遗传算法相比，改进遗传算法优化后的目标函数值减小更快，可在更短的时间内得到最优解，证明了该方法的有效性。

(上接第 54 页)

参考文献：

[1] Clive S. Fraser, Simon Cronk, A hybrid measurement approach for close-range photogrammetry[J]. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing 64, 2009: 328-333.

[2] Harris, M Stephens. A combined corner and edge detector[J]. Alvey88, 1988: 147-152.

[3] Lowe, D G. Object recognition from local scale invariant features[J]. Proceedings of the International Conference on Computer Vision, 1999: 1150-1157.

[4] Ambar Dutta, Avijit Kar, Chatterji B N. A new approach to corner matching from image sequence using fuzzy similarity index[J]. Pattern Recognition Letters32, 2011: 712-720.

[5] Zhou D, Li G, Liu Y. Effective corner matching based on Delaunay triangulation[J]. Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation,

参考文献：

[1] Neumann C, Senkowski H. MMW-SAR seeker against ground targets in a drone application[C]//European Conference on Synthetic Aperture Radar, Germany: EADS Deutschland GmbH, 2002: 457-460.

[2] Hodgson J A, Lee D W. Terminal guidance using a Doppler beam sharpening radar[C]//AIAA Guidance, Navigation and Control Conference and Exhibit, Austin, Texas: American Institute of Aeronautics and Astronautics, 2003: 1-11.

[3] 俞根苗, 尚勇, 邓海涛, 等. 弹载侧视合成孔径雷达信号分析及成像研究[J]. 电子学报, 2005, 33(5): 778-782.

[4] Lip man Y, Shinar J, Oshman Y. Stochastic analysis of the interception of maneuvering antisurface missile[J]. Journal of Guidance, Control and Dynamics, 1997, 20(4): 707-714.

[5] 谢华英, 范红旗, 赵宏钟, 等. SAR成像导引头的弹道设计与优化[J]. 系统工程与电子技术, 2010, 33(2): 332-337.

[6] 周明, 孙树栋. 遗传算法原理及其应用[M]. 北京: 国防工业出版社, 1999.

[7] 李道京, 张麟兮, 俞卞章. 主动雷达成像导引头几个问题的研究[J]. 现代雷达, 2003(5): 12-15.

[8] 李克婧, 张小兵. 改进型实数编码遗传算法在内弹道优化中的应用[J]. 弹道学报, 2009, 21(3): 19-22.

[9] New Orleans, LA, 2004: 2730-2735.

[6] Qing Zhu, Yunsheng Zhang. Multiple close-range image matching based on a self-adaptive triangle constraint[J]. The Photogrammetric Record 25(132), 2010: 437-453.

[7] Mauricio Galo, Clésio LTozzi. Feature-point based matching: a sequential approach based on relaxation labeling and relative orientation[R]. Journal of WSCG, 2004, 12: 1-3.

[8] 魏士伊. 地面立体影像匹配技术研究[D]. 北京: 北京建筑工程学院, 2009.

[9] 范丽丽. 多目视觉中的匹配问题研究[D]. 青岛: 青岛大学, 2009.

[10] 罗川, 张征宇. 模型变形视频测量的相机位置坐标与姿态角确定[J]. 实验流体力学, 2010(6): 88-91.

[11] 王小梅. 图像特征提取与匹配算法研究及其在印刷品图像检测中的应用[D]. 南京: 南京理工大学, 2008.

[12] 季铮. 近景目标三维重建的自动化方法研究[D]. 武汉: 武汉大学, 2007.