

引用格式:宋雪倩,胡士强.基于Dubins路径的A*算法的多无人机路径规划[J].电光与控制,2018,25(11):25-29. SONG X Q, HU S Q. Dual-UAV path planning by Dubins-path based A* algorithm[J]. Electronics Optics & Control, 2018, 25(11):25-29.

基于Dubins路径的A*算法的多无人机路径规划

宋雪倩, 胡士强

(上海交通大学,上海 200240)

摘要:以两架固定翼无人机在同高度、有障碍物环境下的路径规划为应用背景,针对传统基于网格的A*搜索算法没有考虑飞行性能约束的问题,首先利用Dubins曲线找到有效节点,结合A*启发式搜索的思想,分别为每架无人机离线构建由Dubins曲线组成的最短避障路径;在两机同高度飞行过程中,通过相对运动关系判断是否碰撞,使用“向量共享”解得航向改变量以及在线路径重规划,得到两机的防撞避障路径。仿真表明,与传统A*搜索相比,此算法可更快地得到更短连续安全路径;通过在线重规划,可以得到两机的防撞避障路径。

关键词: UAV; 航迹规划; Dubins曲线; A*搜索; 防撞; 避障

中图分类号: V279 **文献标志码:** A **doi:**10.3969/j.issn.1671-637X.2018.11.005

Dual-UAV Path Planning by Dubins-Path Based A* Algorithm

SONG Xue-qian, HU Shi-qiang

(Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China)

Abstract: To implement collision-avoidance path planning for 2 fixed-wing UAVs flying at the same altitude with obstacles, as well as to solve the problem that the flight performance constraints are not taken into consideration in the path generated by grid-based A* algorithm, we proposed a Dubins-path based A* algorithm. Effective nodes were firstly found by Dubins path. By applying A* heuristic search, the shortest path constructed by Dubins path was obtained offline for each UAV. For two UAVs flying at the same altitude, the relative motion was analyzed and “Vector Sharing Resolution” was used for online path replanning, thus the collision-avoidance paths were obtained. Simulation results show the proposed method can generate a shorter path more effectively for single UAV and feasible and safe paths for 2 UAVs through online replanning.

Key words: UAV; path planning; Dubins curve; A* search; collision avoidance; obstacle avoidance

0 引言

无人机(Unmanned Aerial Vehicle, UAV)已经被广泛运用于民用和军用领域。为了达到真正的“无人”和“智能”,在环境已知并给定起始位置和航向角之后,无人机应能够自主规划一条满足任务需求的避障路径,通常要求这条路径最短;而当空中有两架无人机在同一高度执行任务时,必须考虑防撞,同时还要满足

飞行性能约束。对于固定翼无人机,它们不能像旋翼机一样悬停,必须保持最小速度,且转弯受到最小转弯半径的限制。

A*算法^[1]是路径规划中最著名的离散搜索算法之一。通常先将二维平面进行栅格化,再使用A*算法或改进A*算法进行最短路径搜索^[2-3]。这在规划时没有考虑飞行器的始末航向要求,得到的路径不能满足飞行性能约束且会对一些不必要节点进行搜索。文献[4-5]都使用了A*算法进行移动机器人的路径规划,都是在规划完成之后,对路径进行光滑处理,其中涉及较大计算量且无法保证光滑之后的路径依旧安全;文献[6]考虑了飞行性能限制,利用可视图法与Dijkstra算法,但仍需要较长计算时间;而Dubins路

收稿日期:2017-11-01

修回日期:2017-12-25

基金项目:国家自然科学基金(61773262);航空科学基金(20142057006)

作者简介:宋雪倩(1992—),女,浙江宁波人,硕士生,研究方向为无人机控制、路径规划。

径^[7]是给定始末方向以及在转弯半径有约束的情况下、两点之间的最短曲线,被广泛用于自主机器人的路径规划当中^[8-10]。本文提出的基于 Dubins 路径的 A* 算法的路径规划方法,考虑了固定翼无人机的最小转弯半径,利用 Dubins 路径进行可飞路径建模,以 Dubins 曲线与障碍圆切入点,即无人机的位姿为节点,边搜索下一步的有效节点,边利用 A* 算法进行寻优,由于剔除了不必要节点,提升了搜索效率。在两架固定翼无人机处于同一高度飞行的情况下,利用两机之间脱靶距离大小判断冲突,结合向量共享法 (Vector Sharing Resolution)^[11],在线调整航向并进行路径重规划,可以得到两者的安全航迹。

1 Dubins 路径

1.1 Dubins 路径

Dubins 路径定义为:在最大曲率限制下,平面内两个有方向的点间的最短可行路径是 CLC 路径或 CCC 路径,或是其子集,其中,C 表示圆弧段,L 表示与 C 相切的直线段^[9]。这里只考虑 CLC 型路径,如图 1 所示。

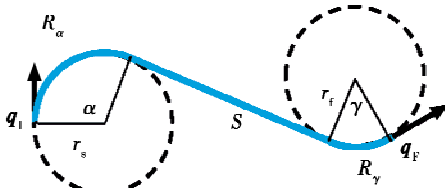


图 1 一种 CLC 型 Dubins 路径

Fig.1 Dubins path of the CLC type

1.2 CLC 型 Dubins 路径存在的充分条件

如果两个位姿分别对应的两个 Dubins 圆之间存在内外切线,即

$$|r_s + r_f| > |l| \quad (1)$$

则 CLC 型 Dubins 路径一定存在。式中: r_s 为起始圆弧半径; r_f 为终止圆弧半径。当满足这个条件时,则称两个位姿之间在给定起始和终止圆弧半径情况下,最短 CLC 型 Dubins 路径为 Dubins 路径。

1.3 Dubins 路径的长度

q_{\square} 表示无人机位姿, $q_{\square} = (x_{\square}, y_{\square}, \psi_{\square})$, ψ 为无人机航向角。如图 1 所示,两个位姿 q_1 和 q_2 之间的 Dubins 路径由 3 部分组成,即

$$L(q_1, q_2) = R_{\alpha} + S + R_{\gamma} \quad (2)$$

1.4 基于 Dubins 路径的避障

如图 2 所示, Dubins 路径 q_1, q_2 (图 2 中红线) 与圆形障碍物相交,即按此路径飞行,无人机与障碍物 obs, 相撞。令 S_{ij} ($i, j=1, 2, 3, \dots$) 为从第 i 个位姿到第 j 个位姿 Dubins 路径中直线部分或其长度; D_{ij}^k ($i, j, k=1, 2, 3, \dots$) 表示障碍圆 k 的圆心 (x_k^0, y_k^0) 到直线 S_{ij} 之间

距离。则图 2 中:当 $D_{12}^1 < r_1$ 时,路径不安全;当 $D_{12}^1 \geq r_1$ 时,路径安全。

当路径不安全时,无人机有 2 种避障方法:顺时针 (CW) 绕过障碍圆 (如图 2 绿线所示) 或逆时针 (CCW) 绕过障碍圆 (如图 2 蓝线所示)。

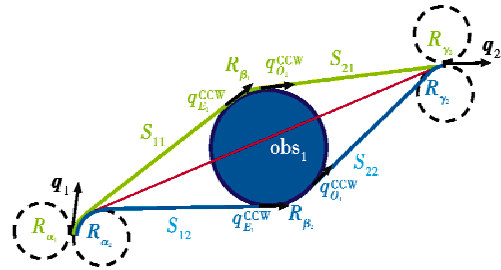


图 2 基于 Dubins 路径的两种避障方法

Fig.2 Two possible Dubins paths to avoid an obstacle

2 基于 Dubins 路径的 A* 算法的路径规划

具体规划流程如图 3 所示。

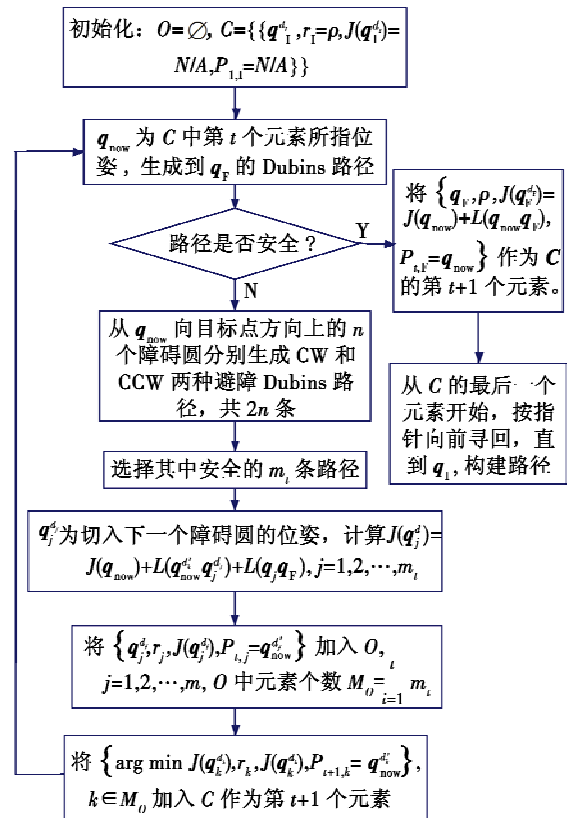


图 3 基于 Dubins 路径的 A* 算法的路径规划流程图

Fig.3 The flow chart of planning a path by Dubins-path based A* algorithm

假设环境已知,所有障碍物分散且可以用圆来建模。当所有障碍圆之间均满足 CLC 型 Dubins 路径存在的充分条件情况下,即可用本文方法进行路径规划。路径规划中加入了 A* 算法的启发式特点。

结合 Dubins 路径避障特点,以切入障碍圆的位姿

为可能的节点。算法的主要循环为：从当前节点 q_{now} 生成至终点位姿的 Dubins 路径，如果路径不安全，则向前方各障碍物分别生成 CW 和 CCW 两种避障 Dubins 路径，找到其中安全的 m_i 条路径对应的位姿和避障方向 $q_i^{d_i}$ ，计算每个节点的代价，即

$$J(q_j^{d_j}) = J(q_{\text{now}}) + L(q_{\text{now}}, q_j^{d_j}) + L(q_j, q_f) \quad (3)$$

式中： $L(\cdot)$ 表示从第 i 个位姿到第 j 个位姿的最短 Dubins 路径长度；上标 d 表示避障方向， $d = \{\text{CW}, \text{CCW}\}$ ；式(3)所表示的代价函数，包含了 A* 启发式搜索的算法； $J(q_j, q_f)$ 为节点的估算代价。选择代价最小的切入位姿为下一步节点，再进行此循环，直到从 q_{now} 生成至终点位姿的 Dubins 路径安全，则循环结束，由每个位姿所带指针寻回，构建整个路径。为便于算法实施，用到两个集合： O 表示开集，为待搜索节点表，存储每一步所有可能的节点(位姿)； C 表示闭集，为不需要再次检索的节点表，存储每一步代价最小的节点(位姿)。

3 多无人机防撞方法

假设两架固定翼无人机在同一高度飞行，且实时位姿、速度等状态都相互可知。首先可对两者分别用基于 Dubins 的 A* 算法进行路径规划，在按照此路径飞行过程中进行相撞判断并采取改变航向角的措施从而防止相撞，确认不会相撞之后，再利用第 2 章所述算法分别对两者进行航迹重规划。

3.1 相撞检测

通过分析两架无人机之间的相对运动来判断两者是否相撞，如图 4 所示。 \vec{v}_A 和 \vec{v}_B 分别为固定翼无人机 A 和 B 的速度向量， \vec{v}_r 则为相对速度。文献[11]提出了用最接近时间 τ 和脱靶量 \vec{r}_m 来判断的方法。

$$\text{最接近时间为} \quad \tau = -(\vec{r} \cdot \vec{v}_r) / (\vec{v}_r \cdot \vec{v}_r) \quad (4)$$

如果 $\tau < 0$ ，则两无人机间相对位置距离 $|\vec{r}|$ 增大；反之， $|\vec{r}|$ 减小，有相撞可能，则再进行下一步判断。

如图 4 可得，两架无人机之间脱靶距离为

$$\vec{r}_m = \vec{r} + \vec{v}_r \cdot \tau \quad (5)$$

其中：PCA 为最接近点；如果 $|\vec{r}_m| < r_{\text{safe}}$ ，则两者会相撞；反之，则安全。其中，安全距离 $r_{\text{safe}} = r_{A, \text{safe}} + r_{B, \text{safe}}$ 。

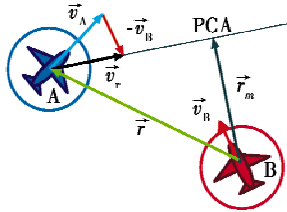


图 4 两架无人机的相对运动状态

Fig. 4 The relative motion between 2 UAVs

3.2 防撞措施

在文献[11]中提出向量共享法，即通过改变两架飞机的速度以增大两者之间的脱靶量来解决相撞问题。图 5 表示了两架无人机如何共享向量。A 的共享向量 $\vec{r}_{\text{VS},A}$ 与 \vec{r}_m 同向，B 的共享向量 $\vec{r}_{\text{VS},B}$ 与 \vec{r}_m 反向，且有

$$|\vec{r}_{\text{VS},B}| + |\vec{r}_{\text{VS},A}| + |\vec{r}_m| \geq r_{\text{safe}} \quad (6)$$

对无人机 A 有

$$\begin{cases} \vec{r}_{\text{VS},A} = \frac{|\vec{v}_B|}{|\vec{v}_A| + |\vec{v}_B|} \cdot \frac{r_{\text{safe}} - |\vec{r}_m|}{|\vec{r}_m|} \\ \vec{U}_A = \vec{v}_A \cdot \tau + \vec{r}_{\text{VS},A} \end{cases} \quad (7)$$

对无人机 B 有

$$\begin{cases} \vec{r}_{\text{VS},B} = \frac{|\vec{v}_A|}{|\vec{v}_A| + |\vec{v}_B|} \cdot \frac{r_{\text{safe}} - |\vec{r}_m|}{|\vec{r}_m|} \\ \vec{U}_B = \vec{v}_B \cdot \tau + \vec{r}_{\text{VS},B} \end{cases} \quad (8)$$

当无人机 A 和 B 的速度方向分别变为 \vec{U}_A 和 \vec{U}_B 的方向时，式(6)取等号，即两架无人机最小航向改变量为 $\Delta\psi_{A, \text{min}} = \frac{\vec{v}_A \cdot \vec{U}_A}{|\vec{v}_A \cdot \vec{U}_A|}$ ， $\Delta\psi_{B, \text{min}} = \frac{\vec{v}_B \cdot \vec{U}_B}{|\vec{v}_B \cdot \vec{U}_B|}$ 时才能防止相撞。

设无人机将以最小转弯半径进行速度方向改变，为了保证两架无人机在改变方向时不发生碰撞，在速度改变时，要满足

$$|\vec{r}| \geq r_{\text{safe}} + 2\rho_A + 2\rho_B \quad (9)$$

式中， ρ_A 和 ρ_B 分别为固定翼无人机 A 和 B 的最小转弯半径。当两架无人机调整到新的速度之后，保持新的速度 $\vec{v}_{A, \text{new}} = \vec{v}_A \cdot \vec{U}_A / |\vec{U}_A|$ 和 $\vec{v}_{B, \text{new}} = \vec{v}_B \cdot \vec{U}_B / |\vec{U}_B|$ 飞行，并通过式(3)实时计算最接近时间。当 $\tau > 0$ 时，即两架无人机之间开始远离，此刻也分别有了新的位姿，则开始分别进行基于 Dubins 路径的 A* 算法，重新规划路径。

但在以 $\vec{v}_{A, \text{new}}$ 和 $\vec{v}_{B, \text{new}}$ 飞行过程中，也需要加入避障的考虑，可以通过增加航向改变量进行此过程的避障。图 5 中可以增加未解区域圆的半径，即将 A 和 B，速度方向按避障需要，增加 $\Delta\psi_A$ 和 $\Delta\psi_B$ ，改变至 \vec{U}'_A 和 \vec{U}'_B ，从而避开防撞路径中存在的障碍物。

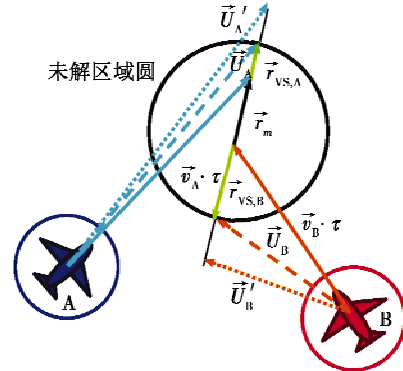


图 5 向量共享法防撞方法

Fig. 5 Collision avoidance by Vector Sharing Resolution

4 仿真验证

仿真条件:两架固定翼无人机在同一高度飞行, $r_{safe,A} = r_{safe,B} = 2$ m, $\rho_A = \rho_B = 3$ m, $\vec{v}_A = 10$ m/s, $\vec{v}_B = 12$ m/s。第 i 个障碍圆的位置和半径表示为 $O_{obs_i} = (x_i^o \ y_i^o \ r_i)$, $i=1,2,3,\dots$, 单位, m。

4.1 单无人机避障路径规划

区域中共有 4 个障碍物 $O_1 \sim O_4$, 其位置和半径分别表示为: $O_{obs_1} = (25 \ 10 \ 3)$, $O_{obs_2} = (25 \ 23 \ 4)$, $O_{obs_3} = (39 \ 31 \ 0.8)$, $O_{obs_4} = (41 \ 40 \ 3)$ 。A 的起始位姿 $q_{A,s} = (20 \text{ m} \ 0 \text{ m} \ 60^\circ)$, 目标位姿 $q_{A,f} = (45 \text{ m} \ 0 \text{ m} \ 60^\circ)$ 。

图 6 中红线为所得路径, 由 4 段 Dubins 路径组成, 长度为 67.9 m, 且路径光滑。在相同条件下, 将地图进行离散, 如图 7 所示, 蓝线为通过 A* 算法规划所得结果, 路径长度为 71.1 m, 其长度大于图 6 中结果, 且路径不够光滑, 不能直接投入实际应用。

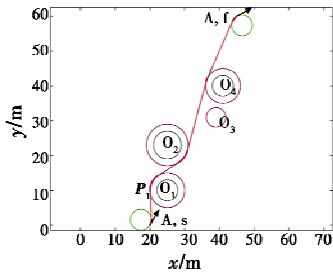


图 6 基于 Dubins 的 A* 算法的路径规划仿真结果

Fig. 6 The path planning simulation result for single UAV by Dubins-path based A* algorithm

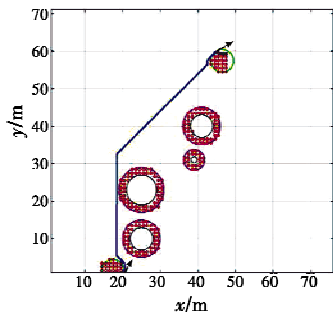


图 7 基于网格地图的 A* 算法路径规划

Fig. 7 Path planning by A* algorithm applied on a grid map

4.2 双无人机避障防撞路径规划

区域中共有 4 个障碍物 $O_1 \sim O_4$, 其位置和半径分别表示为: $O_{obs_1} = (35 \ 23 \ 4.2)$, $O_{obs_2} = (35 \ 10 \ 3)$, $O_{obs_3} = (49 \ 31 \ 0.8)$, $O_{obs_4} = (35 \ 45 \ 3.2)$ 。A 的起始位姿 $q_{A,s} = (30 \text{ m} \ 0 \text{ m} \ 60^\circ)$, 目标位姿 $q_{A,f} = (55 \text{ m} \ 60 \text{ m} \ 60^\circ)$; B 的起始位姿 $q_{B,s} = (0 \text{ m} \ 0 \text{ m} \ 30^\circ)$, 目标位姿 $q_{B,f} = (80 \text{ m} \ 65 \text{ m} \ 30^\circ)$, 状态采样频率为 20 Hz。

如图 8 所示, 无人机 B 在到达 $q_{B,1}$ 后逆时针改变

速度方向, 无人机 A 在到达 $q_{A,4}$ 时顺时针改变速度方向防止相撞。如果防撞路径上不考虑避障, 得到的 B 的路径如蓝色虚线所示, 可以看出, 与障碍圆 O_4 相交, 是一条不安全路径。通过更大幅度改变航向角, B 绕过障碍圆 O_4 。根据防撞完成的判断机制 $q_{B,3}$ 之后, 再通过基于 Dubins 的 A* 规划, 到达最终位姿, 如青色实线所示。红线为无人机 A 的路径。

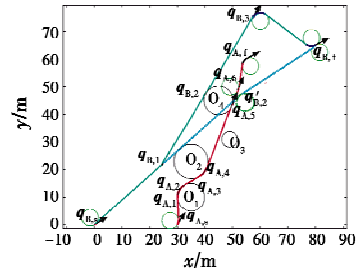


图 8 基于 Dubins 的 A* 算法的双无人机路径规划仿真结果

Fig. 8 The simulation result of path planning for 2 UAVs by Dubins-path based A* algorithm

图 9 为两架无人机之间距离的示意图。其中, 绿线为两者最小安全距离, 蓝线为两者按照各自所规划的路径飞行时的距离。如果按照原始路径飞行, 在 5.5 s 左右, 两者会相撞。而如果采取了防撞规避, 则两者会在 2.85 s 采取规避措施, 改变速度。两架无人机之间最小距离为 13.15 m, 不会发生相撞。

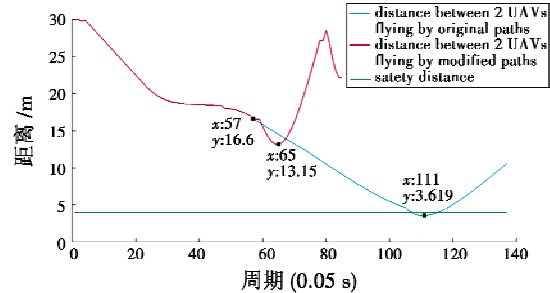


图 9 两架无人机之间距离

Fig. 9 The distance between 2 UAVs

5 结束语

本文提出了一种基于 Dubins 路径的 A* 算法的多无人机航迹规划方法。利用 Dubins 路径、环境中的有效节点, 再利用 A* 启发式算法的思想进行路点确定, 有效提高了航迹规划的效率, 且考虑了固定翼无人机的飞行性能限制以及保证得到的路径光滑; 在两架无人机同一高度飞行的情况下, 结合向量共享方法, 解得防撞避障所需偏航角度, 调整航线, 确保没有相撞危险后, 再进行重规划。仿真表明, 此方法所得路径优于传统 A* 算法, 且在双无人机同一高度飞行时可以得到安全可飞行路径。

本文的多无人机情况,仅考虑了两架无人机的情况以及航迹安全和避障等基本问题,在下一步研究中将研究如何优化每条无人机航迹,并且考虑如何拓展至更多无人机执行复杂任务的情况。

参考文献

- [1] HART P E, NILSSON N J, RAPHAEL B. A formal basis for the heuristic determination of minimum cost paths in graphs[J]. IEEE Transactions on Systems Science and Cybernetics, 1968, 4(2):100-107.
- [2] 杨润洲,丁勇,张承果. 基于 DTW 的改进 A* 算法在航迹规划中的应用[J]. 电光与控制, 2016, 23(6):5-10, 26.
- [3] 王玮,王玉惠,王文敬,等. 基于改进加权 A* 算法的舰机联合航迹规划[J]. 电光与控制, 2016, 23(9):7-10, 23.
- [4] 郭江,肖宇峰,刘欣雨,等. Bezier 曲线与 A* 算法融合的移动机器人路径规划[J]. 微型机与应用, 2017, 36(2):52-55, 59.
- [5] 王红卫,马勇,谢勇,等. 基于平滑 A* 算法的移动机器人路径规划[J]. 同济大学学报:自然科学版, 2010, 38(11):1647-1650, 1655.
- [6] 李大东,孙秀霞,彭建亮,等. 基于可视图法的改进 Dijkstra 算法[J]. 电光与控制, 2010, 17(3):40-43.
- [7] DUBINS L E. On curves of minimal length with a constraint on average curvature, and with prescribed initial and terminal positions and tangents[J]. American Journal of Mathematics, 1957, 79(3):497-516.
- [8] 关震宇,杨东晓,李杰,等. 基于 Dubins 路径的无人机避障规划算法[J]. 北京理工大学学报, 2014, 34(6):570-575.
- [9] 宋国浩,黄晋英,兰艳亭. 基于 Dubins 路径的智能车辆路径规划算法[J]. 火力与指挥控制, 2016, 41(6):41-45.
- [10] 胡蕾,高立娥,刘卫东,等. 基于 Dubins 曲线和改进 A* 算法的 AUV 路径规划方法[J]. 计算机测量与控制, 2016, 24(8):259-262.
- [11] PARK J W, OH H D, TAHK M J. UAV collision avoidance based on geometric approach[C]//SICE Conference, IEEE, 2008:2122-2126.

(上接第 14 页)

了分析,针对复杂地形建立了导弹在末制导再入段高速飞行时的点目标回波模型。在保证仿真精度的前提下,基于真实地形,采用三角剖分的 Lawson 算法将数字高程地形划分为若干个三角网格进行仿真;为说明模型适用性,采用抽象回波模型进行比较验证,最终证实了此模型的正确性与合理性,为下一步基于复杂地形与外部干扰条件下的雷达测高试验鉴定仿真工作奠定了良好的基础。

参考文献

- [1] WINGHAM D J, GILES K A, GALIN N, et al. A semianalytical model of the synthetic aperture, interferometric radar altimeter mean echo, and echo cross-product and its statistical fluctuations[J]. IEEE Transactions on Geoscience & Remote Sensing, 2018, 56(5):2539-2553.
- [2] 熊智,刘建业,林雪原. 高度辅助的 INS/SAR 组合导航系统研究[J]. 中国空间科学技术, 2003, 23(4):65-69.
- [3] 郑宗贵,王继平,林红斌,等. 一种基于雷达导引头的弹道导弹爆高解算方法[J]. 电子与信息学报, 2014, 36(2):465-470.
- [4] 孙璟潇,马红光,姜勤波. 弹载雷达模拟回波关键参数特性分析[J]. 电光与控制, 2016, 23(5):89-93, 103.
- [5] 李翔. 单脉冲雷达仿真系统中回波的实现[J]. 火力与指挥控制, 2011, 36(8):144-146.
- [6] BROWN G. The average impulse response of a rough surface and its applications[J]. IEEE Transactions on Antennas & Propagation, 1977, 2(1):67-74.
- [7] 王磊. 高精度卫星雷达高度计数据处理技术研究[D]. 北京:中国科学院研究生院, 2015.
- [8] 徐宗强. 基于机动平台的延时多普勒测高技术研究[D]. 绵阳:中国工程物理研究院, 2016.
- [9] 刘琴琴. 平面域 Delaunay 三角网节点定位算法研究综述[J]. 电子设计工程, 2017, 25(1):47-51.
- [10] 张艳,李强. 基于逐点插入法生成 Voronoi 图的算法研究及实现[J]. 黑龙江工程学院学报, 2016, 30(5):22-24.