

引用格式:王庆江,盛沛,彭军.基于几何原理的反舰导弹协同攻击时航路规划方法[J].电光与控制,2019,26(9):19-25. WANG Q J, SHENG P, PENG J. Geometric principle based route planning of anti-ship missile in coordinated attacking[J]. Electronics Optics & Control, 2019, 26(9):19-25.

基于几何原理的反舰导弹协同攻击时航路规划方法

王庆江, 盛沛, 彭军
(海军航空大学, 山东烟台 264001)

摘要: 协同攻击时反舰导弹的航路规划是航路规划问题中较特殊的一种。分析了反舰导弹进行协同攻击时对航路规划的特殊要求,并指出了反舰导弹自身对其航路规划的约束;针对上述特点,提出了一种基于几何原理的反舰导弹快速航路规划方法。对此航路规划方法进行介绍及仿真验证,结果表明,使用此方法可以解决反舰导弹协同攻击时的航路规划问题。

关键词: 反舰导弹; 协同攻击; 航路规划; 几何原理

中图分类号: E837 **文献标志码:** A **doi:**10.3969/j.issn.1671-637X.2019.09.005

Geometric Principle Based Route Planning of Anti-ship Missile in Coordinated Attacking

WANG Qing-jiang, SHENG Pei, PENG Jun
(Naval Aviation University, Yantai 264001, China)

Abstract: Route planning of anti-ship missile in coordinated attacking is one of the specific problems of route planning. The special requirements of anti-ship missile for route planning in coordinated attacking are analyzed, and the constraints of the anti-ship missile itself on route planning are discussed. Considering the above characteristics, a sort of rapid method for anti-ship missile route planning is put forward based on geometric principle. The route planning method is presented here, and simulation results have proved that the proposed method is efficient for route planning of anti-ship missile in coordinated attacking.

Key words: anti-ship missile; coordinated attacking; route planning; geometric principle

0 引言

以飞机、车辆或舰艇(空基、陆基、舰基、潜基)为平台,现代反舰导弹^[1-3]多采用“初始段程序控制转弯+中段自控掠海巡航飞行+末段自导飞行”的模式。由于末段多按照某种设定好的制导律飞行,因此对反舰导弹的航路规划多是指对其的“初始段+中段”(自控段或称巡航段,即从程序控制飞行结束到导弹雷达开机这段飞行航程)进行航路规划,也称路径规划。

目前对反舰导弹航路规划的研究较多^[4-9],按规划时导弹数量的多少,可分为两个方向,即对单枚导弹航路的规划和对多枚导弹航路的规划。多枚导弹协同攻击的典型应用就是饱和攻击^[4-5],这也是本文研究的重点。

反舰导弹航路规划方法较多^[6-9],可以分为基于

智能优化算法的航路规划方法和基于几何原理的航路规划方法。基于智能优化算法的航路规划方法目前研究的较多,但这些算法存在信息量大、运算时间长、对计算机性能要求较高的缺点;基于几何原理的航路规划方法针对反舰导弹航路规划的战术应用背景,深入挖掘航路规划的几何学本质,提出的算法具有方法简单、运算迅速的特点。本文将根据几何学的一些原理,对多枚导弹协同攻击时的航路进行规划。

1 协同攻击时反舰导弹航路规划特点

1.1 反舰导弹航路规划特点

航路规划问题涉及到多个应用领域,典型的如无人机的航路规划、机器人的路径规划等。与之相比,反舰导弹进行航路规划时具有以下特点。

1) 航路点数量有限。规划航路中的航路点数量原则上是有限制的,如对无人机的航路规划。但是,反舰导弹有自身特点:巡航段一般是无线电高度表测高,这对导弹飞行时的俯仰姿态和滚转姿态均有要求;

此外,巡航段一般采用精度不高的惯性导航系统导航,导弹射程较远时导航误差较大,而且航路转弯多时误差更大。因此,通常情况下巡航飞行时的航路点不可能太多(一般是个位数),因而反舰导弹航路中规划出的航路点较少。

2) 航路规划空间是二维平面空间。通常,如无人机,航路规划的空间是变高的三维空间。但是,反舰导弹的巡航段是掠海定高飞行(高度一般不超过 100 m,被称为“低-低弹道”),因此,可以将反舰导弹的规划空间从三维空间简化为二维平面空间。

3) 巡航速度不变。反舰导弹在巡航段飞行时通常只做定高、定速飞行,因此,当航路长度已知时,可以通过控制反舰导弹的发射时刻使其在预定到达时间攻击目标。

1.2 协同攻击时反舰导弹航路规划特点

多枚反舰导弹协同攻击时的航路规划具有以下特点。

1) 时间协同。协同攻击要求在尽可能短的时间内以足够多的反舰导弹攻击目标,因此航路规划时需要做到多枚导弹的时间协同。

2) 方向协同。由于受环境影响(如风)以及导弹自身原因(如惯导的导航精度),实际弹道与规划弹道有偏差,所以同一个方向的导弹之间应有一个最小安全距离;此外,为了防止可能出现的碰撞,反舰导弹规划出的航路最好不要有交叉。因此,方向上的协同也是实现饱和攻击时需要考虑的因素。

3) 方法简单有效。由于海军作战的高时效性,这就要求进行航路规划的方法简单、高效,在占用较少资源的前提下能迅速得到结果。

4) 强调任务目的。多枚反舰导弹协同攻击的最终目的是完成对目标的毁伤而不是强调单枚导弹的最优。因此只要能完成任务,个别反舰导弹的航路是否最优是次要问题。

2 航路规划的约束

反舰导弹航路规划时的约束主要分为反舰导弹自身约束、障碍物约束和战术协同约束 3 部分。

2.1 反舰导弹自身约束

1) 技术参数约束。反舰导弹作为有动力飞行器,必然存在着最大/最小射程、最大加速度、最大机动过载等技术参数的约束。

2) 最小转弯半径约束。匀速转弯时,如果反舰导弹按照最大机动过载 n_{\max} 转弯,则此时的转弯半径 r_{\min} 最小,即

$$r_{\min} = \frac{v^2}{n_{\max}} \quad (1)$$

式中: v 为反舰导弹转弯时的速度;在速度一定时要想转弯半径小,则反舰导弹必须承受较大的过载。显然,反舰导弹飞行时的转弯半径 r 必须满足 $r \geq r_{\min}$ 。

3) 航路点数量约束。如 1.1 节中特点 1) 所述,航路规划时存在最多航路点 N_{\max} (不算发射点和目标点) 的数量约束,因此,在规划航路时,航路点数量 N 在满足 N_{\max} 的前提下,数量越少越好。

4) 航路点距离约束。第一个航路点必须保证反舰导弹能按发射扇面角转弯/越障爬升-降低到平飞高度(如果需要的话);最后一个航路点是雷达开机点,它与目标的距离由弹头上雷达性能决定;中间任意两个航路点的距离要保证反舰导弹能按最小转弯半径 r_{\min} 完成转弯。

2.2 障碍物约束

在反舰导弹的航路上可能存在岛屿、钻井平台等真实存在的障碍物,可能存在军事禁飞区、风暴区等不可飞行的区域,也可能存在敌防空火力区、敌警戒区等可飞越但危险的区域,本文将上述区域统一认为/称为不可穿越的障碍物。当在二维平面内进行航路规划时,对于障碍物,可以将其处理成不规则的多边形^[10-11],也可以将其处理成一个外接圆^[7-8,12]。按照文献[12]的方法将障碍物处理成一个最小外接圆。

2.3 战术协同约束

2.3.1 时间约束

如上文所述,协同攻击时要求多枚反舰导弹在极短时间内(最好是同时)到达指定地点(雷达开机点)后对目标进行攻击。因此,航路规划时时间约束实质上是(多枚导弹的)时间协同问题,可以通过控制导弹的发射时刻来实现。

当 m 枚反舰导弹航路规划完毕,由于其速度已知,因此从发射点到达雷达开机点的飞行时间 t_i ($i = 1, 2, \dots, m$) 可以确定。设第 i 枚导弹的发射时刻为 $t_{i\text{-fire}}$,所有导弹中飞行时间最长的时间为 t_{\max} (也是发射时倒计时的基准时间),则可得

$$t_{i\text{-fire}} = t_{\max} - t_i \quad i = 1, 2, \dots, m \quad (2)$$

$$t_{\max} = \max(t_1, t_2, \dots, t_m) \quad (3)$$

例如:有 2 枚反舰导弹需要时间协同,第 1 枚飞行时间 $t_1 = 424$ s,第 2 枚飞行时间 $t_2 = 443$ s,则可得 $t_{\max} = 443$ s(基准时间), $t_{1\text{-fire}} = t_{\max} - t_1 = 19$ s, $t_{2\text{-fire}} = t_{\text{norm}} - t_2 = 0$ s。因此,基准时间开始时立即发射第 2 枚导弹,接着在基准时间后 19 s 发射第 1 枚导弹。

当发射平台发射导弹的数量不大于 1 枚反舰导弹时,各平台的发射时刻完全由导弹的时间协同要求来决定;当平台发射导弹的数量大于 1 枚时,此平台发射前后 2 枚导弹之间的发射时间间隔不得小于其齐射时

间间隔 t_p , 否则调整发射平台或重新规划导弹航路。

2.3.2 方向约束

反舰导弹航路规划时的方向约束实质上就是确定其雷达开机点和巡航飞行区域的问题。

确定雷达开机点的问题即确定反舰导弹的攻击角和攻击差角^[12,14]的问题,如图1所示。

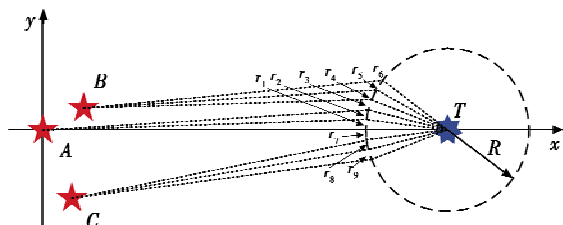


图1 攻击角与攻击差角

Fig. 1 Attack angle and differential angle

如图1所示,设有3个反舰导弹的发射平台A,B和C,每个平台可以发射3枚反舰导弹。雷达开机点与目标T的距离为R,则对于目标T而言,反舰导弹的雷达开机点 r_1, r_2, \dots, r_n 必定在以R为半径的雷达开机圆的圆周上,在雷达开机点处,反舰导弹的弹轴和雷达波束的电轴并不一定指向目标,这是由现代反舰导弹多采用“现在点攻击”的方式决定的。完成导弹的弹轴、雷达波束的电轴、弹一目连线这“三轴合一”的任务在导弹末端的自导段实现。平面内:以3个反舰导弹发射平台中平台A(如果平台数量为偶数,则选择中间2个平台中距离较远的那个平台)的质心为坐标原点A;原点A与目标T之间的连线,即“弹一目线”为x轴(正方向为从平台指向目标);z轴在发射平台的对称面内,经过原点A并垂直x轴,方向指向发射平台的上方;y轴经过坐标原点A,方向通过右手定则确定。这样,得到如图2所示的坐标系Axxyz即反舰导弹进行航路规划时所用的坐标系,此坐标系与发射平台固连,随平台运动,实际上就是火控问题中的瞄准线坐标系^[13]。

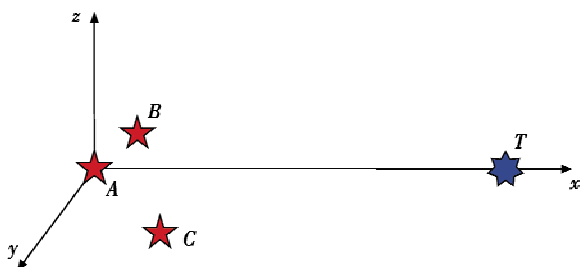


图2 反舰导弹航路规划时的坐标系

Fig. 2 Coordinate system of anti-ship missile for route planning

按照文献[12]的定义,在坐标系Axxyz中,平台A中某枚反舰导弹(完整航路为 $\Delta r_1 T$)的攻击角为零。按文献[14]定义,攻击差角(例如 $\angle r_1 T r_2$)可以人为选

择。考虑到现实原因,如目标舰船运动、反舰导弹自身导航和制导精度、各反舰导弹在大区域飞行时所受的环境干扰不相同等原因,反舰导弹基本上不可能按计划同时攻击目标,使用大角度的攻击差角效果不好^[5],因此本文在保证相邻反舰导弹有足够安全距离的前提下,采用一个固定的小角度 β 作为攻击差角。

确定导弹巡航飞行区域是为了避免出现“当规划出的航路有交叉时”反舰导弹在实际飞行中出现碰撞。为了避免规划的航路出现交叉,方法之一就是在保证航路尽量为直线的前提下,人为地为每个发射平台规定各自的导弹巡航区域。划分导弹巡航区的方法如下所述。

1) 将第1枚反舰导弹的规划航路外扩安全边界 R_{safe} 后形成的区域确定为障碍物,规划出第2枚反舰导弹的航路,这时虽然在初始段两航路的距离小于 R_{safe} ,但考虑到2枚导弹即便是齐射也在时间上有间隔,因此是安全的。这2条航路(都外扩 R_{safe} 后)以及 r_1, r_2 点在雷达开机圆上的劣弧所围成的区域为此时反舰导弹巡航飞行区域,如图3所示。

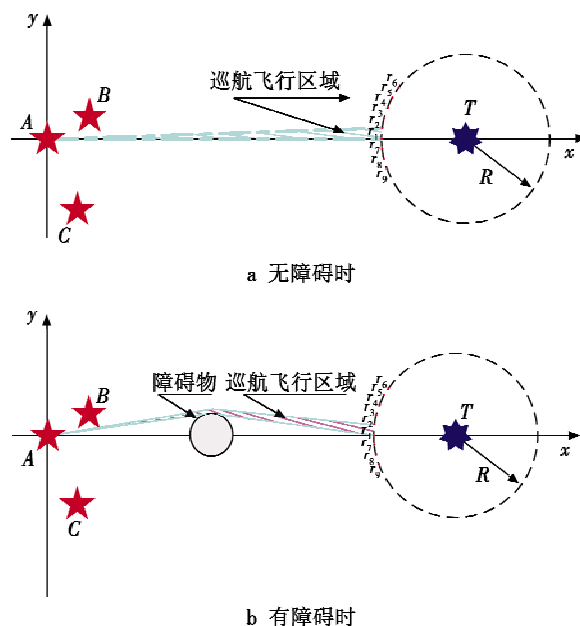


图3 平台A的反舰导弹巡航飞行区域

Fig. 3 Anti-ship missile cruise flight area of Platform A

如果平台只发射1枚反舰导弹,则此平台的反舰导弹巡航飞行区域就是将这条规划航路外扩 R_{safe} 后形成的区域,将此区域看成障碍物并直接跳到步骤4)。

2) 将上述反舰导弹巡航飞行区域看成障碍物。如果平台A只发射2枚反舰导弹,则跳到步骤4),否则规划第3枚反舰导弹的航路。在规划好的3条航路中,找出航路点中y轴值最大和最小的2个点(如果区间内没有障碍物,这2个点为距x轴距离最远和最近的2个雷达开机点)。那么,以这2个航路点所在的航路(都外扩

R_{safe} 后)以及这2条航路所对应的雷达开机点在雷达开机圆上的劣弧所围成的区域,就是此时反舰导弹巡航飞行区域并将此区域看成障碍物。

3) 按步骤2),依次完成平台A中所有剩余反舰导弹巡航飞行区域的确定,得到的反舰导弹巡航飞行区域就是平台A的反舰导弹巡航飞行区域。将此区域看成障碍物,确定下一个发射平台的反舰导弹巡航飞行区域。

4) 在剩余的平台上,按其坐标中y轴数值分为两组:包含所有y值为正的y+组;包含所有y值为负的y-组。在y+组(也可以先从y-组开始)中按y值从小到大的顺序(y值相同时按其x值从小到大的顺序排列),先选出y值最小的那个发射平台确定其反舰导弹巡航飞行区域,方法类似步骤1)~3)。

5) y+组中所有发射平台的导弹巡航飞行区域确定完毕后,再确定y-组中发射平台的反舰导弹巡航飞行区域(方法类似步骤1)~4)),直到全部完毕。

2.3.3 安全距离约束

如上文所述,由于自身、环境干扰及其他随机原因,反舰导弹实际飞行路线与理论规划的航路总是有偏差,而且飞行距离越远,偏差越大。从空间上看,此偏差的作用区域就是一个以理论航路为中心线的圆锥体;从平面上看,此偏差的作用区域就是一个以理论航路为中心线的三角形。为了保证反舰导弹安全,避免出现碰撞,在此偏差区域内不允许出现障碍物和其他导弹,此偏差区域的最大值再加上安全裕量(不大于十几公里)即反舰导弹的安全距离 L_{safe} 。

3 基于几何原理的航路规划方法

3.1 航路规划原则

对于规划反舰导弹航路的方法,应遵循以下原则。

1) 快速高效、占用软/硬件资源少,是对规划方法的基本要求。进行航路规划的时机通常是在战争状态下进行。与平时时期相比,战场条件有限,时间要求严格,因此对规划方法的有效性和可靠性有较高的要求。

2) 能飞直线,不飞曲线。从几何学的原理可知,两点之间直线的距离最短。航程的缩短,即飞行时间的缩短,可以减少敌舰的反应时间、减少环境及导弹自身对飞行精度的干扰,并使整个规划方法简单、高效,从而使规划方法适合紧张的战场环境。

3) 避绕飞行是应对障碍物的唯一方法。对于障碍物有绕行和直接穿越两种方法,对于敌防空火力区或敌警戒区采取“直接穿越而过”的方法可能成功,但对于岛屿等真实障碍物则不行,因此反舰导弹对于障碍物只能采用避绕飞行法。

3.2 航路规划方法

基于几何原理的反舰导弹协同攻击时航路规划方法如下所述。

1) 在反舰导弹的规划空间内建立坐标系。反舰导弹航路的规划空间是一个指定的、有限的,包含障碍物/发射平台/目标的二维平面空间。按2.3节所述,建立航路规划时所需的坐标系,并将障碍物、发射平台、目标等的坐标从原坐标系中转换到此坐标系中。此外,在确定反舰导弹巡航飞行区域时,用到了安全边界 R_{safe} 为

$$R_{\text{safe}} = \max(r_{\text{min}}, L_{\text{safe}}) \quad (4)$$

2) 确定雷达开机点。雷达开机点的数量 K ($K = m + n$,其中, m 表示在雷达开机圆上按顺时针方向确定雷达开机点数量之和, n 表示在雷达开机圆上按逆时针方向确定雷达开机点数量之和)与反舰导弹的数量一致。如图1所示:第1个雷达开机点 r_1 的攻击角为零;然后以 β 为攻击差角,在雷达开机圆上按顺时针方向依次确定雷达开机点 r_2, r_3, \dots, r_n ,使得y值为正(包含为零)的平台所发射反舰导弹数量等于雷达开机点数量 m ;同理,从 r_1 开始、以 β 为攻击差角,在雷达开机圆上按逆时针方向依次确定雷达开机点 r_{n+1}, \dots, r_{n+m} ,使得y值为负的平台所发射反舰导弹数量等于雷达开机点数量 n 。

3) 规划第1个平台所发射的反舰导弹的航路。首先规划第1枚反舰导弹航路(注意,可能并不是第1枚被发射的反舰导弹),如图3、图4所示。

① 以发射平台组中最中间的平台A为起点、以第1个雷达开机点 r_1 为终点,将终点与起点用直线 Ar_1 连接。如果 Ar_1 不与任一障碍物相交,则 Ar_1 就是第1枚反舰导弹的规划航路,并进行步骤③。

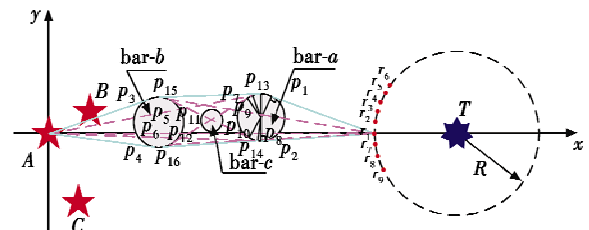


图4 第1枚反舰导弹航路规划

Fig. 4 Route planning for the first anti-ship missile

② 如图4所示,如果直线 Ar_1 与障碍物相交,则分别以点 r_1 和点A为起点、向其最近的、与直线 Ar_1 相交的障碍物bar-a和bar-b引切线,分别得到了线段 $r_1p_1, r_1p_2, Ap_3, Ap_4$ 。分别以点 r_1 和点A为起点、向障碍物bar-b和bar-a的上端和下端引切线,得到 $r_1p_5, r_1p_6, Ap_7, Ap_8$,如果这4条切线中有1条不与任何障碍物相交,例如 r_1p_5 ,则线段 $Ap_3-p_3p_5$ (弧线)- p_5r_1 就是规划出的第1枚

导弹的航路 L_1 ；如果不相交的切线大于1条，例如 $r_1 p_5$ 和 $A p_7$ ，则第1枚导弹的航路 L_1 为

$$L_1 = \min(Ap_3 - p_3 p_5 - p_5 r_1, Ap_7 - p_7 p_1 - p_1 r_1) \quad (5)$$

如果 $r_1 p_5, r_1 p_6, A p_7, A p_8$ 中任一条都与任何障碍物相交，且如果障碍物 bar-a 和 bar-b 相离（相切或相交也可以，只是切线数量不同），则可分别得到其2条内公切线 $p_9 p_{12}, p_{10} p_{11}$ 和2条外公切线 $p_{13} p_{15}, p_{14} p_{16}$ 。4条切线中，如果有不小于1条的切线不与障碍物相交，例如2条外公切线 $p_{13} p_{15}, p_{14} p_{16}$ 不与障碍物相交，则可得到第1枚反舰导弹的航路 L_1 为

$$L_1 = \min(Ap_3 - p_3 p_{15} - p_{15} p_{13} - p_{13} p_1 - p_1 r_1, Ap_4 - p_4 p_{16} - p_{16} p_{14} - p_{14} p_2 - p_2 r_1) \quad (6)$$

如果在2个障碍物之间得到的切线都与障碍物相交，例如与障碍物 bar-c 相交，那么分别在 bar-a, bar-c 和 bar-c, bar-b 之间作内公切线和外公切线，直到找出不与障碍物相交的切线，并按上述方法得到第1枚反舰导弹的航路 L_1 。

确定第1枚反舰导弹航路后，按2.3节所述方法确定其反舰导弹巡航飞行区域，并将其看成障碍物。

③ 以平台 A 为起点、以第2个雷达开机点 r_2 为终点，按2.2节所述方法对第2枚反舰导弹进行航路规划，得到其航路 L_2 后按2.3节所述方法确定其反舰导弹巡航飞行区域。

④ 按本节中所述方法对平台 A 中剩余反舰导弹分别以 r_3, r_4, \dots 为终点进行航路规划，并按2.3节所述方法确定这些反舰导弹巡航飞行区域。

4) 规划其他平台所发射的反舰导弹的航路。从2.3节所述 $y +$ 组中按其按 y 值从小到大的顺序依次规划其所发射导弹的航路，方法类似本节方法3)，并确定其反舰导弹巡航飞行区域。最后，再按上述方法规划 $y -$ 组中发射平台所发射导弹的航路，并确定其巡航飞行区域，直到所有平台的反舰导弹航路全部规划完毕。

3.3 规划航路长度的计算

由式(5)可知反舰导弹规划的航路都是平面内的直线和弧线，以图5为例进行计算。

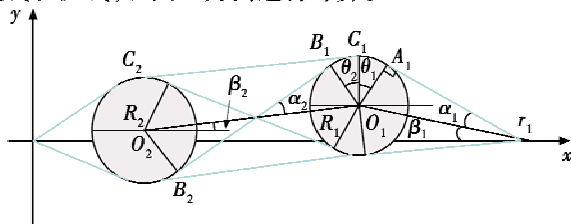


图5 规划航路长度的计算

Fig.5 Calculation of the length of the planned route

已知：平台 $A(x_A, y_A)$ 和雷达开机点 $r_1(x_{r1}, y_{r1})$ 的坐标；障碍物 $O_1(x_{o1}, y_{o1})$ 和 $O_2(x_{o2}, y_{o2})$ 的坐标及其半径 R_1 和 R_2 ；切点 $A_1(x_{A1}, y_{A1}), B_1(x_{B1}, y_{B1}), B_2(x_{B2}, y_{B2}), C_1(x_{C1}, y_{C1}), C_2(x_{C2}, y_{C2})$ 的坐标可以通过几何知识计算出。

外公切线 $C_1 C_2$ 长度为

$$C_1 C_2 = \sqrt{(O_1 O_2)^2 - (R - r)^2} \quad (7)$$

内公切线 $B_1 B_2$ 长度为

$$B_1 B_2 = \sqrt{(O_1 O_2)^2 - (R + r)^2} \quad (8)$$

切线 $A_1 r_1$ 长度为

$$A_1 r_1 = \sqrt{(r_1 O_1)^2 - (R_1)^2} \quad (9)$$

弧线 $A_1 B_1$ 长度为

$$\widehat{A_1 B_1} = \frac{\theta_1 + \theta_2}{360} \times 2\pi R_1 \quad (10)$$

其中： $\alpha_1 = \arcsin\left(\frac{R_1}{r_1 O_1}\right)$ ； $\alpha_2 = \arcsin\left(\frac{R_1}{0.5 \times O_1 O_2}\right)$ ； $\beta_1 = \arcsin\left(\frac{y_{o1}}{r_1 O_1}\right)$ ； $\beta_2 = \arcsin\left(\frac{y_{o1} - y_{o2}}{O_1 O_2}\right)$ ； $\theta_1 = \alpha_1 + \beta_1$ ； $\theta_2 = \alpha_2 + \beta_2$ 。

根据式(7)~式(10)并依据式(5)，可得每枚反舰导弹规划航路的长度。

4 航路规划的仿真算例

4.1 仿真条件

仿真条件：1) 战场环境，作战区域 $100 \text{ km} \times 300 \text{ km}$ ，只有一个目标，其位置是 $(240 \text{ km}, 0 \text{ km})$ ；2) 武器平台，反舰导弹只有1个发射平台 A，其坐标为 $(0 \text{ km}, 0 \text{ km})$ ，需要发射4枚反舰导弹；3) 反舰导弹自身约束，反舰导弹为同一型号，射程 450 km 、巡航 $Ma = 0.8$ （假设与导弹初始段速度相同）、巡航高度 0.05 km 、最小转弯半径 $r_{\text{min}} = 5 \text{ km}$ 、雷达开机距离 30 km 、 N_{max} 个数不大于5（不包括发射点但包括目标点）；4) 障碍物约束，障碍物只有1个，将其等效为1个外接圆，其坐标是 $(50 \text{ km}, 5 \text{ km})$ 、作用半径为 15 km ；5) 战术协同约束，平台齐射时间间隔 $t_p = 15 \text{ s}$ ，第1枚导弹发射时的攻击角为 0° ，相邻导弹的攻击差角 $\beta = 10^\circ$ ，安全边界 $R_{\text{safe}} = 5 \text{ km}$ 。

4.2 仿真及结果分析

仿真分为无障碍物条件下与有障碍物条件下的反舰导弹的航路规划及仿真两种情况，仿真及结果分析如下所述。

1) 无障碍物条件下反舰导弹航路规划。按4.1节中的仿真条件进行仿真，按2,3章规划航路并得到如表1所示的相关参数。

表1 无障碍时反舰导弹规划航路的参数

Table 1 Parameters of planned routes for anti-ship missile with no obstacle

反舰导弹	1	2	3	4
发射点/km	(0,0)	(0,0)	(0,0)	(0,0)
雷达开机点/km	(210.4458, 5.2094)	(211.8092, 10.2610)	(214.0192, 15.0000)	(217.0187, 19.2840)
航路长度/km	210.5202	212.0576	214.5442	217.8737
飞行时间/s	773.9714	779.6235	788.7656	801.0063
发射次序	4	3	2	1
发射时间/s	27.0349	21.3828	12.2407	0

通过 Matlab 仿真反舰导弹的规划航路,仿真结果如图6所示。

通过对表1和图6的分析可知:由于没有障碍物,4枚反舰导弹规划出的航路是1条从发射平台开始、以相应雷达开机点为终止的直线,这显然满足反舰导弹自身约束(r_{min} 和 N_{max})、障碍物约束(无障碍物)、战术协同约束(t_p, β, R_{safe})。

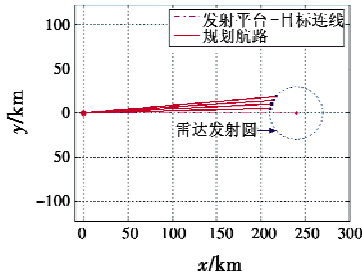


图6 无障碍时反舰导弹的规划航路

Fig. 6 Planned route for anti-ship missiles with no obstacle

2) 有障碍物条件下反舰导弹航路规划。按4.1节中仿真条件进行仿真,按2,3章规划航路并得到如表2所示的相关参数。

表2 有障碍物时反舰导弹规划航路的参数

Table 2 Parameters of planned routes for anti-ship missile with obstacle

反舰导弹	1	2	3	4
障碍物/km	(50,5)	(50,5)	(50,5)	(50,5)
发射点/km	(0,0)	(0,0)	(0,0)	(0,0)
雷达开机点/km	(210.4458, 5.2094)	(211.8092, 10.2610)	(214.0192, 15.0000)	(217.0187, 19.2840)
航路点1/km	(44.1201, 18.7995)	(40.2534, 22.4644)	(35.4659, 25.3411)	(29.7835, 27.1651)
航路点2/km	(51.4023, 19.9343)	(52.4707, 24.8468)	(53.8035, 29.7090)	(55.3690, 34.5157)
航路长度/km	215.0642	218.5497	223.3291	229.2975
飞行时间/s	790.6694	803.4917	821.0630	843.0045
发射次序	4	3	2	1
发射时间/s	52.3360	39.5137	21.9424	0

通过 Matlab 仿真反舰导弹的规划航路,仿真结果如图7所示。

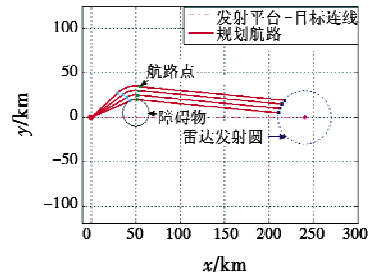


图7 有障碍物时反舰导弹的规划航路

Fig. 7 Planned route for anti-ship missiles with obstacle

对障碍物附近的航路点及航路进行局部放大,放大结果如图8所示。

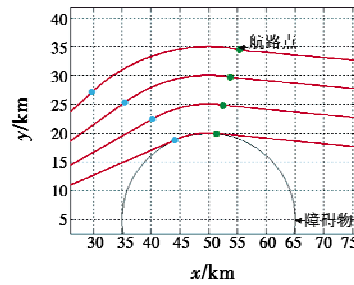


图8 障碍物及航路点的局部放大图

Fig. 8 Enlarged view of the obstacle and the waypoints

通过对表2、图7、图8的分析可知:4枚反舰导弹规划出的航路是直线-圆弧-直线(从发射平台开始到航路点1的直线、航路点1到航路点2的圆弧、航路点2到相应雷达开机点的直线),其目的是绕开作战区域的障碍物,因此可以满足障碍物约束;规划出的航路上有4个航路点(航路点1、航路点2、雷达开机点、目标点)以不小于 r_{min} 的半径转弯,因此满足反舰导弹自身约束;观察规划的航路,反舰导弹的雷达开机点都在以“雷达开机距离”为半径的雷达开机圆的圆周上并以 β 角度的间隙到达,同时任意两航路间的距离大于 R_{safe} 。观察表2可知,任意2枚导弹之间发射的时间间隔大于 t_p 。因此,规划出的航路满足战术协同的要求。

总之,基于几何原理的反舰导弹协同攻击时规划出的航路满足反舰导弹的特点和约束,航路规划方法简单、可行,完全可满足反舰导弹航路规划的要求和需要。

5 结束语

根据反舰导弹协同攻击时的特点和反舰导弹自身的约束,本文提出一种基于几何原理的航路规划方法,该方法简单、快速,较适用于多枚反舰导弹协同攻击时的航路规划,具有一定的工程应用价值。本文方法适用于无障碍物或障碍物较少的战场环境,当战场环境内障碍物较多且外形复杂时此方法不一定能得到正确的结果,这也是下一步研究的重点。

参考文献

- [1] 王金云,王孟军. 反舰导弹发展趋势分析及其末端防御[J]. 现代防御技术,2012,40(3):14-17,38.
- [2] 杨卫丽,耿国桐,李秋娜,等. 国外反舰导弹发展初步分析[J]. 战术导弹技术,2014(2):1-6.
- [3] 袁华,严必虎. 外军反舰导弹装备使用现状及发展趋势研究[J]. 国防科技,2014,35(6):46-50.
- [4] 张金春,张晶,张书宇,等. 反舰导弹对海目标饱和攻击辅助决策系统研究[J]. 战术导弹技术,2014(2):21-27.
- [5] 张书宇,张金春,李雪梅. 多方向饱和攻击时反舰导弹航路规划方法[J]. 兵工自动化,2012,31(11):6-9.
- [6] 刘钢,老松杨,谭东风,等. 反舰导弹航路规划问题的研究现状与进展[J]. 自动化学报,2013,39(4):347-355.
- [7] 张承果,丁勇,申兴盼. 基于量子双向 RRT 算法的多平台反舰导弹协同航路规划[J]. 火力与指挥控制,2017,42(4):36-41.
- [8] 陈榕,沈培志,张海峰,等. 多型反舰导弹协同攻击岛礁区目标攻击方向选择研究[J]. 电光与控制,2016,23(5):22-25.
- [9] 李红亮,宋贵宝,曹延杰. 多反舰导弹攻击多目标协同航路规划[J]. 系统工程与电子技术,2013,35(10):2102-2109.
- [10] 王建国,徐晓刚,高军亮. 基于目标点的反舰导弹航路规划方法[J]. 火力与指挥控制,2008,33(s):119-124.
- [11] 陈玉文. 反舰导弹航路规划快速搜索算法[J]. 系统仿真学报,2009,21(20):6424-6428.
- [12] 郭新奇,严建钢,郑宝华. 反舰导弹预设航路末端攻击角选取问题[J]. 火力与指挥控制,2010,35(10):118-119,130.
- [13] 李相民,孙瑾,谢晓方,等. 火力控制原理[M]. 北京:国防工业出版社,2007.
- [14] 曾家有,宋友凯,车志宇. 基于航路规划的反舰导弹发射顺序和间隔研究[J]. 航天控制,2009,27(2):22-25.

(上接第12页)

4 结束语

本文提出了基于动态规划算法的多目标卫星星座资源优化配置方案。该方法从本质上讲是一种非线性规划方法,原理可归结为一个基本递推关系式,通过将预警卫星星座单帧时间内可观测到弹道目标的星座作为一种资源进行分配,建立星座方案评价函数,使丢失弹道目标的可能性最小,从而达到不丢失目标或部分状态信息的目的。仿真表明,该算法针对多目标跟踪探测问题给出了较为合理的卫星星座资源配置方案,在既定目标下满足最优的原则,通过与其他算法对比,更有效地证明了该算法可以使卫星星座资源得以发挥其最大的作用。但是本文也存在着评价函数不够科学的问题,同时未考虑到卫星星座的不确定性及其寿命对实现连续高概率探测目标的影响,这些将在下一步工作中继续研究。

参考文献

- [1] 常辉,胡修林,张蕴玉. 基于 CART 算法的卫星星座原始构型选择策略[J]. 华中科技大学学报:自然科学版,2011,39(6):1-5.
- [2] 胡敏,宋旭民,杨雪榕. 基于 Petri 网的 Walker 导航星座备份策略研究[J]. 航天器工程,2017,26(2):14-21.
- [3] 林宇生,蒋洪磊,董彦磊,等. 基于遗传算法的通信卫星资源动态调度方法研究[J]. 无线电工程,2017,47(6):20-23.
- [4] 朱卫宵,祝前旺,陈康. 一种基于遗传算法的多传感器目标分配方法[J]. 电子信息对抗技术,2015,30(3):30-34.
- [5] 刘文,张育林,刘昆. 基于多目标进化算法的卫星通信星座优化设计[J]. 宇航学报,2008,29(1):95-99.
- [6] 郑蔚. 模型多目标演化算法(OMEA)在星座优化设计中的应用研究[D]. 武汉:中国地质大学,2007.
- [7] FAGGIAN S, GOZZI F. Optimal investment models with vintage capital: dynamic programming approach[J]. Journal of Mathematical Economics, 2010, 46(4):416-437.
- [8] CHEN S. A dynamic programming implemented resource competition game theoretic model[J]. Ecological Modelling, 2010, 221(16):1847-1851.
- [9] 李端,钱富才,李力,等. 动态规划问题研究[J]. 系统工程理论与实践,2007(8):56-64.
- [10] STEFFEN P, GIEGERICH R. Table design in dynamic programming[J]. Information and Computation, 2006, 204(9):1325-1345.
- [11] 李强. 动态规划算法时间效率优化策略研究[D]. 武汉:中南民族大学,2015.
- [12] 张士磊,张朋,熊志刚. 基于改进蝙蝠算法的多传感器多目标分配[J]. 电光与控制,2018,25(4):92-96.
- [13] 雷科,林忠贤. 基于动态规划的制导滑翔炸弹最优控制研究[J]. 电光与控制,2012,19(7):28-31.
- [14] 刘洋,唐好选. 针对路面建模的 Delaunay 三角网格分治算法[J]. 智能计算机与应用,2017,7(2):87-89.
- [15] 孙启豪,蔡爱华. 航空搜潜布阵航路优化研究[J]. 电光与控制,2017,24(4):39-42.