

1-4-2019

Modeling and Simulation of C2 System for Intercepting LSS Targets

Zhipeng Zhang

Beijing Information Science and Technology University Beijing Key Laboratory of High Dynamic Navigation Technology, Beijing 100101, China;

Su Zhong

Beijing Information Science and Technology University Beijing Key Laboratory of High Dynamic Navigation Technology, Beijing 100101, China;

Follow this and additional works at: <https://dc-china-simulation.researchcommons.org/journal>



Part of the Artificial Intelligence and Robotics Commons, Computer Engineering Commons, Numerical Analysis and Scientific Computing Commons, Operations Research, Systems Engineering and Industrial Engineering Commons, and the Systems Science Commons

This Paper is brought to you for free and open access by Journal of System Simulation. It has been accepted for inclusion in Journal of System Simulation by an authorized editor of Journal of System Simulation.

Modeling and Simulation of C2 System for Intercepting LSS Targets

Abstract

Abstract: For analyzing the characteristics of low slow small (LSS) targets, a model of command and control (C2) system is established, the corresponding strategy is designed, and the designed scenario is simulated, which can improve the interception effect of the system on LSS targets. In the part of modeling, the trajectory of the target is plotted, the radar information is analyzed, *the coordinate transformation between the parts is designed, and the track fusion is designed, which can improve discovery process.* As the different characteristics of LSS targets, combined with the limited resources for intercepting weapons, *the threat assessment strategies and fire distribution strategies are designed to improve the operational effectiveness of weapons.* The numerical simulation is used to simulate the scene and the function of each part of the system is implemented well. The system has simple model programming, reasonable strategy formulation, and strong representativeness of the simulation scene, which can facilitate the design and analysis of technicians.

Keywords

low slow small target, coordinate transformation, track fusion, threat assessments, strike strategy

Recommended Citation

Zhang Zhipeng, Su Zhong. Modeling and Simulation of C2 System for Intercepting LSS Targets[J]. Journal of System Simulation, 2018, 30(11): 4340-4348.

拦截低慢小目标的指控系统建模与仿真

张志鹏, 苏中

(北京信息科技大学高动态导航技术北京市重点实验室, 北京 100101)

摘要: 分析了低慢小目标特性, 建立了指控系统的模型, 制定了相应的策略, 对设计的场景进行了仿真模拟, 可提高系统对低慢小目标的拦截效果。在系统建模部分, 绘制了目标的航迹, 分析了雷达信息的获取, 设计了各部分间的坐标变换以及航迹融合, 完善了目标的发现过程。考虑到低慢小目标不同的特性, 结合拦截武器资源有限的实际情况, 制定了相应的威胁评估策略以及火力分配策略, 提高了武器的作战效能。采用数值仿真对场景进行了模拟, 很好的实现了系统各个部分的功能。该系统的模型编程简单, 策略制定合理, 仿真场景剪表性很强, 可方便技术人员进行设计与分析。

关键词: “低慢小”目标; 坐标变换; 航迹融合; 威胁评估; 打击策略

中图分类号: TP391.9 文献标识码: A 文章编号: 1004-731X(2018)11-4340-09

DOI: 10.16182/j.issn1004731x.joss.201811035

Modeling and Simulation of C2 System for Intercepting LSS Targets

Zhang Zhipeng, Su Zhong

(Beijing Information Science and Technology University Beijing Key Laboratory of High Dynamic Navigation Technology, Beijing 100101, China)

Abstract: For analyzing the characteristics of low slow small (LSS) targets, a model of command and control (C2) system is established, the corresponding strategy is designed, and the designed scenario is simulated, which can improve the interception effect of the system on LSS targets. In the part of modeling, the trajectory of the target is plotted, the radar information is analyzed, the coordinate transformation between the parts is designed, and the track fusion is designed, which can improve discovery process. As the different characteristics of LSS targets, combined with the limited resources for intercepting weapons, the threat assessment strategies and fire distribution strategies are designed to improve the operational effectiveness of weapons. The numerical simulation is used to simulate the scene and the function of each part of the system is implemented well. The system has simple model programming, reasonable strategy formulation, and strong representativeness of the simulation scene, which can facilitate the design and analysis of technicians.

Keywords: low slow small target; coordinate transformation; track fusion; threat assessments; strike strategy

引言

指挥控制系统(指控系统)是作战系统的核心,

也是作战效能的倍增器^[1]。导弹指控系统是导弹防御系统的核心, 它连接预警探测系统和拦截武器, 能够实现它们的最佳组合与协同, 最终实现系统效能的最大化^[2]。刘华等^[3]提出分布式地空导弹武器系统, 可以使其在防御区域、反隐身、抗干扰等方面超越传统的地空导弹武器系统。董帅君等^[4]提出了一种新的多火力单元责任扇区调整方法, 能够确



收稿日期: 2018-05-29 修回日期: 2018-06-30;
基金项目: 国家自然科学基金(61471046), 北京市科技计划(Z161100003016011), 北京市教委市属高校创新能力提升计划(TJSHG20150772017);
作者简介: 张志鹏(1993-), 男, 山东, 硕士生, 研究方向为高动态导航与控制。

<http://www.china-simulation.com>

• 4340 •

定其调整方案。陆军指挥控制系统是作战部队形成体系作战能力的核心, 涉及兵力、武器平台及侦查设备, 包含多个交互频繁的子系统。谭亚新等^[5]提出了一种控制策略, 在解决指控系统功能验证过程的可信性问题方面, 取得了良好的效果。舰艇指挥控制系统是舰艇上的计算机系统, 不但能够管理舰艇上所有的作战单元, 更能根据作战数据提出相应的决策^[6]。谢德光^[7]等提出了一种基于 QFD 的舰艇指控系统评价方法, 不仅能够评价任务价值, 更能根据任务对指控系统能力的敏感性进行分析, 具有一定的应用价值。

这些年来, 随着技术的不断发展以及生成成本的不断降低, 无人机等低慢小飞行器在社会上出现的越来越多, 随之而来也产生了相当多的问题, 比如低慢小目标频繁出现在机场周边等敏感区域, 扰乱了航空管制, 带来了巨大的安全隐患^[8]。因此发展对应的拦截低慢小目标的指挥控制系统具有重要的现实意义。

本文在分析了低慢小目标特性的基础上, 对指控系统的各个部份进行建模, 最终构建了相应的指控系统。该系统会根据用户输入的目标参数, 计算并绘制目标的飞行航迹, 模拟雷达对目标信息的获取, 并根据雷达信息进行坐标变换和目标融合。当目标进入雷达探测范围时, 会自动评估目标的威胁, 并合理分配火力单元; 当目标进入防空武器的攻击范围时, 会按照火力分配策略进行攻击。经过仿真实例验证, 整个系统工作连贯、稳定。

1 低慢小目标特性

普遍认为^[8-11], 低慢小目标指的是低空、慢速、小型的飞行器, “低空”指的是目标的飞行高度在 1 000 m 以下; “慢速”指的是目标的飞行速度小于 200 km/h; “小型”指的是目标相对于雷达反射截面积小于 2 m², 主要包括无人机、空飘气球和航模等。由于目标具有低、慢、小这 3 个特点, 对指控系统的设计提出了新的要求。由于目标飞行高度低, 所以突防能力强, 在威胁评估时要合理评估考

虑目标飞行高度的影响; 由于目标飞行速度慢, 所以从它被雷达发现、到指控系统处置、再到防空武器对其进行打击, 目标的位置变化小。这样它的航迹好预测, 相应的火力分配无需考虑目标位置变化带来的影响; 由于目标形状小, 所以很难发现, 成群来袭难以分辨, 所以指控系统在收到雷达信息的基础上, 要合理制定规则, 将相同的目标进行融合, 将不同的目标区分开。

2 系统建模

2.1 目标航迹建模

目标航迹建模是为了模拟低慢小目标的来袭而设立的, 参考了通用飞行器的飞行特性。目标本身的运动姿态是在其飞行坐标系下, 相应的指标是其飞行速度 v , 航向角 φ , 俯仰角 ψ 。而目标的飞行位置也需要设定在相应的坐标系下。为方便研究, 将其飞行位置纳入要地坐标系。

本文提出的要地坐标系是将坐标系原点设定为要地, 地磁东方向为 X 轴正方向, 地磁北方向为 Y 轴正方向, 要地正上方为 Z 轴正方向, 建立的空间直角坐标系。在该坐标系下对于低慢小目标的飞行航迹依照通用航空器航迹模型建设, 参考公式^[12](1)~(2):

$$S_n = v * \Delta \quad (1)$$

$$\begin{cases} x_{n+1} = x_n + S_n \times \cos \cos(\psi) \times \sin \sin(\varphi) \\ y_{n+1} = y_n + S_n \times \cos \cos(\psi) \times \cos \cos(\varphi) \\ z_{n+1} = z_n + S_n * \sin \sin(\psi) \end{cases} \quad (2)$$

式中: S_n 为 Δt 时段内目标飞行的距离, 单位为 m; v 为目标飞行的速度, 单位为 m/s; φ 为目标的航向角, 它是目标与原点连线投影与坐标 Y 轴正向的夹角, 单位为 rad; ψ 为目标是俯仰角, 单位为 rad; (x_n, y_n, z_n) 为 t_n 时刻目标的位置, 单位为 m; $(x_{n+1}, y_{n+1}, z_{n+1})$ 为 $t_n + \Delta t$ 时刻目标的位置, 单位为 m。

在航迹仿真中, 当仿真时间增加 1 s 时, 目标的航迹代表这 1 s 飞行过的距离。目标在每一时刻的位置在图像上由一个小圆点表示, 多个圆点构成

的连线汇集成目标的飞行航迹。注意到每个圆点都有相应的三维坐标，代表其位置。

假设目标的起始坐标为(0, -2000, 40)，俯仰角为0，方位角为0，飞行速度为25 m/s，飞行时间为60s。目标航迹仿真如图1所示，目标每1s飞过的三维位置显示在图中的一个点，当飞行60s后，图中各点形成的线，就代表了目标的飞行航迹。

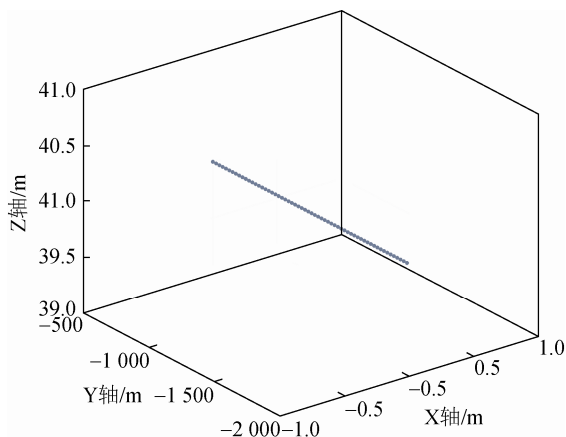


图1 目标航迹仿真
Fig. 1 Simulation of the target track

2.2 雷达信息获取

指控系统需要接收雷达对目标的探测信号。指控系统需要的雷达探测目标的指标包含如下5个：目标相对于雷达的距离、速度、高度、仰角以及方位。

其中通过测量雷达信号往返目标的时间，比较两个或多个波频率的相位，可测量目标的距离；对目标距离的连续测量可获得目标的飞行速度；通过窄幅射波瓣图天线测量回波波前到达雷达的角度，雷达可测出目标的方向。当接收到的信号达到最大时天线所指方向就是目标方向，这样就可以求得目标相对于雷达的仰角和方位角；通过测量目标的距离和仰角可以计算得到目标相对于雷达的高度。

本文提出的雷达坐标系建立在以雷达为原点O，以雷达O和目标M的连线R为极径，地磁东方向为X轴正方向，地磁北方向为Y轴正方向，极径R与其XOY平面的水平投影r所成角 α 为仰

角，水平投影r与Y轴正向所成角 β 为方位角。如图2所示，球坐标系与直角坐标系有相应的几何关系，将在下面论述。

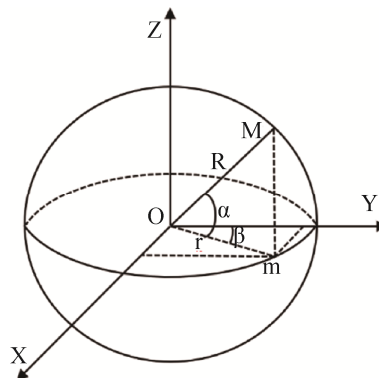


图2 球坐标系与直角坐标系关系图
Fig. 2 Relation between spherical coordinate and rectangular coordinate

2.3 坐标变换

本文提出的指控系统需要模拟目标的飞行航迹、雷达对目标信息的探测以及航迹的关联和融合，所以根据不同的需要，坐标系不同，且各坐标系下所求参数也不同，为完善目标的发现过程，需要对不同的坐标系下的指标进行相应的坐标变换。

雷达发现目标，根据目标在空间直角坐标系下的坐标(x, y, z)，得到球极坐标系下目标与雷达的距离r、俯仰角 α 、方位角 β 。本文针对空间直角坐标系到球极坐标系的参数变化，提出如式(3)的坐标变换。

$$\begin{cases} r = \sqrt{x^2 + y^2 + z^2} \\ \alpha = \arctan \arctan \left(\frac{z}{\sqrt{x^2 + y^2}} \right) \\ \beta = \pi - \pi/2 * \text{sign}(x) - \arctan \arctan(y/x) \end{cases} \quad (3)$$

注意到在该公式中，x坐标不能为0，所以当x坐标为0时，令x等于一个无穷小量 ε 。相应的，公式的值域为 $[0, 2\pi]$ 。

指控系统收到多个雷达发来的目标参数，这些参数都是目标与雷达之间的关系，需要通过坐标变换将其转换为目标与指控系统之间的关系。由于这些参数分别在各自独立的球极坐标系下，这就需要

进行如下三步的坐标变换:

1) 将雷达发来的参数由球极坐标系重新还原为各自的空间直角坐标系。相应的坐标变换公式是根据方位角划分的, 见公式(4)~(7)。

2) 在要地坐标系下, 根据雷达与要地的空间位置关系, 对坐标进行线性平移。

3) 要地坐标系下重新将空间直角坐标系还原为球极坐标系。

$$\begin{cases} x = R \times \cos \alpha \times \sin \beta \\ y = R \times \cos \alpha \times \cos \beta, \beta \in [0, \pi/2) \\ z = R \times \sin \alpha \end{cases} \quad (4)$$

$$\begin{cases} x = R \times \cos \alpha \times \cos(\beta - \pi/2) \\ y = -R \times \cos \alpha \times \sin(\beta - \pi/2), \\ z = R \times \sin \alpha \end{cases} \quad (5)$$

$$\beta \in [\pi/2, \pi)$$

$$\begin{cases} x = -R \times \cos \alpha \times \sin(\beta - \pi) \\ y = -R \times \cos \alpha \times \cos(\beta - \pi), \\ z = R \times \sin \alpha \end{cases} \quad (6)$$

$$\beta \in [\pi, 3\pi/2)$$

$$\begin{cases} x = -R \times \cos \alpha \times \cos(\beta - 3\pi/2) \\ y = R \times \cos \alpha \times \sin(\beta - 3\pi/2), \\ z = R \times \sin \alpha \end{cases} \quad (7)$$

$$\beta \in [3\pi/2, 2\pi]$$

2.4 目标融合

指控系统的目标融合采用的是分布式结构, 主要是航迹的关联和融合, 目的是将多个雷达采集到的目标信息去掉重复, 并转化为目标相对于要地的信息。在对目标区分方面, 由于目标到要地的距离、方位角、俯仰角在要地坐标系下具有唯一性, 再结合目标的飞行速度, 就可以比较好的区分目标了。

1) 各个雷达采集到的目标相对于自身的径向距离、方位角、俯仰角、径向速度传递给指控中心, 指控中心通过坐标变换将它们转换为雷达的空间直角坐标。

2) 根据雷达相对于要地的空间位置关系计算出各个目标相对于指控中心的空间直角坐标。

3) 通过坐标变换将空间直角坐标转化为目标

相对于指控中心的距离、高度、速度。

4) 如果多个目标相对于指控中心的距离、高度、速度都一样, 就去掉重复, 保留一个目标。

2.5 系统设计

本系统的建模与仿真采用数值仿真的方法, 采用面向过程的思想进行编程。系统设计是总体设计各部分, 并将其串联。系统通过键盘进行交互, 假设仿真时间为 60 s, 步长为 1 s, 系统结束是仿真时间结束或目标都被拦截后。系统的每个部分都单独编写函数, 包括航迹函数、雷达圈和武器圈函数、雷达函数、航迹融合函数、威胁评估函数、火力分配函数和打击过程函数。系统的算法流程图如图 3 所示。

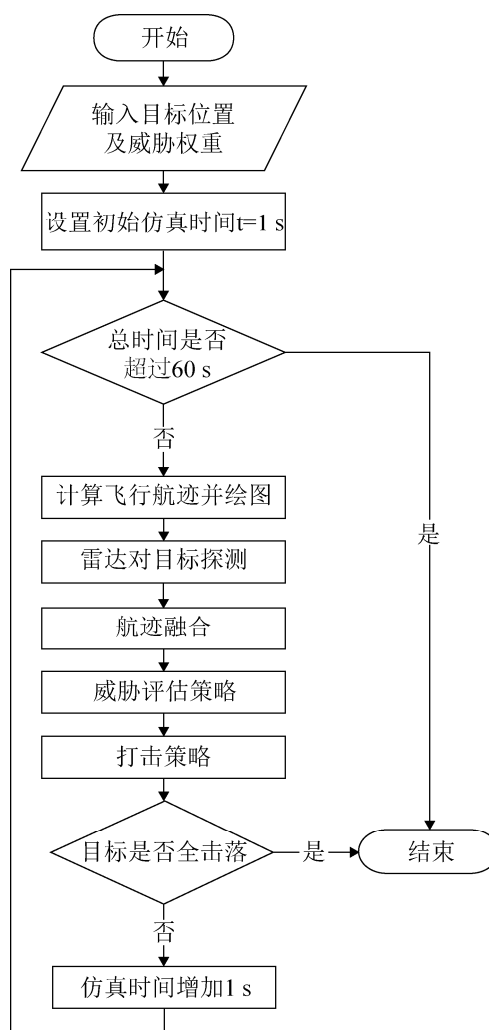


图3 算法流程图

Fig. 3 Flow diagram of algorithm

3 威胁评估策略

3.1 评估指标选取

对于低慢小目标,如小型的无人机、滑翔机而言,对其进行威胁评估产生影响的因素有很多,但其中有很多因素是难以进行度量的,比如抗干扰能力、机动特性等。如果根据这样的因素设定威胁评估的指标,那么评估后的结果往往比较主观。再者,指控系统收到的目标信息完全来自其配套的雷达,所以雷达对目标的探测能力也直接影响了威胁评估指标的选取。经过综合考虑,本文采用了目标的飞行速度、与要地之间的距离、以及飞行高度作为威胁评估的指标。

根据作战理论,目标的飞行速度越快、与要地之间的距离越短以及飞行的高度越低,都会使它的突防能力更强。这会减少防空武器的反应时间和二次打击的机会,降低命中的概率。因此这样的目标对于要地的威胁程度越高。

3.2 威胁等级划分

根据引言中讨论过的低慢小目标的飞行特性和上一小节讨论的威胁评估指标,应用1~9按比例标度法,提出如下的威胁等级划分方法,但是所选数值区间并不固定。

目标与要地之间的距离,在长度区间[0 m, 3 000 m]按照每300m分段,从小到大的每个区间分别量化数值为10~1;目标的飞行速度,在区间[0 m/s, 50 m/s]按照每5 m分段,从小到大的每个区间分别量化数值为1~10;目标的飞行高度,在区间[0 m, 100 m]每10 m分段,从小到大的每个区间分别量化数值为10~1。

3.3 决策矩阵生成

虽然实际中的决策属性源于多个方面,但本文提出的决策方法主要针对数值型的决策矩阵。而且它需要进行归一化处理。

设共有 n 个来袭目标 $A_i(i=1,2,\dots,n)$,威胁指标为 $C_j(j=1,2,3)$, C_1 表示目标与雷达间的距离, C_2

表示目标的飞行速度, C_3 表示目标的飞行高度, x_{ij} 表示目标 A_i 关于威胁指标 C_j 的实际值, x_{ij} 表示目标 A_i 关于威胁指标 C_j 等级划分下的量化数值, w_j 是威胁指标 C_j 的权重,如表1所示。

表1 决策矩阵
Tab. 1 Decision matrix

指标	C_1	C_2	C_3
A_1	x_{11}	x_{12}	x_{13}
A_2	x_{21}	x_{22}	x_{23}
A_3	x_{31}	x_{32}	x_{33}
...
A_n	x_{n1}	x_{n2}	x_{n3}
W	w_1	w_2	w_3

第 $i, i=1, 2, \dots, n$ 目标的威胁度矩阵 s_{ij} 表示为权重矩阵 w_{ij} 与量化数值矩阵 x_{ij} 转置的乘积。

$$S_{li} = w_{1j} \times x_{ij}^T \quad (8)$$

4 打击策略

由于拦截武器资源有限,为提高武器的作战效能,需要制定相应的打击策略。打击策略包含两部分,一个是火力分配,另一个是打击过程。前者是向指挥系统控制人员提供参考,并不真实进行攻击;后者则是系统自动进行攻击的模拟。

4.1 火力分配

火力分配(Weapon Target Assignment, WTA)是指挥控制系统研究的热点,目的是在有限武器资源的基础上,通过编制算法把目标合理地分配给火力单元,使得武器系统有条不紊地运行。

1) 目标在雷达的探测范围外,指控系统不会受到有关目标的信息,也不会分配给火力单元。

2) 目标在雷达的探测范围内,指控系统会收到各个目标的信息,计算目标的威胁度。首先,按照威胁度由大到小对目标进行排序,然后计算各个目标到武器火力单元的距离,最后指控系统向火力单元发出指令,先拦截威胁大的目标,将它分配给距离最近的火力单元。按照这个原则依次进行,直至目标或火力单元被分配完停止。如果还有目标没

被分配完, 则留到下一批进行。

4.2 打击过程

打击过程是模拟武器对低慢小目标的实际拦截过程。本文侧重对指控系统的研究, 假定防空武器对低慢小目标发射一次, 就可以完全拦截目标, 因此不考虑武器对低慢小目标的毁伤效能。

因此本文介绍的打击过程在本质上仍是一种策略问题, 规定目标只有在防空武器的射程内且分配了相应的火力单元时, 才对其进行拦截。一旦防空武器对目标进行了拦截, 目标就会被击落, 飞行航迹终止且目标相应的 Z 坐标、速度将被置为 0, 而保留了 X、Y 坐标, 这样可以既再现了打击过程, 又保留目标原有的飞行航迹, 方便指挥人员对战果的收集与研究。

5 系统仿真

5.1 仿真场景设定

在对系统的仿真实验中, 指挥控制系统配备有 4 个一体化的雷达和打击单元, 分别在布置在要地的正北、正东、正南和正西方向, 距离要地(坐标原点)为 600 m, 其中雷达的扫描半径为 1 200 m, 防空武器的打击半径为 800 m。指控系统的布置图如图 4 所示。

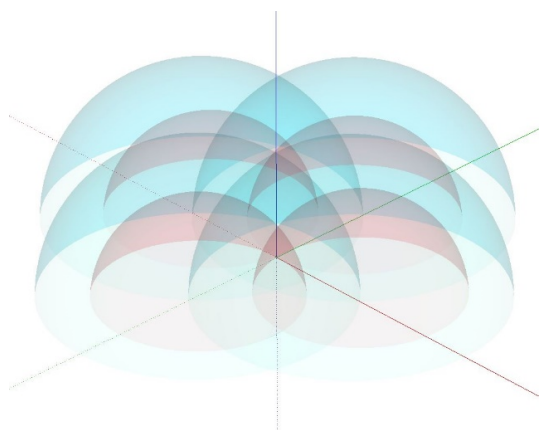


图 4 指控系统布置图

Fig. 4 Layout of command and control system

其中坐标系采用要地坐标系, 红色轴线代表 X

轴, 绿色轴线代表 Y 轴, 蓝色轴线代表坐标 Z 轴。4 个蓝色半圆分别代表 4 个雷达的探测区域, 4 个红色半圆分别代表 4 个打击单元的拦截区域。

假设有 4 架低慢小目标向要地飞行, 各个目标的位置及飞行参数如表 2 所示。现编制如下场景, 检验系统各部分拦截低慢小目标的能力。

表 2 目标的位置及飞行参数
Tab. 2 Position and flight parameters of targets

目标编号	初始坐标			飞行参数		
	X	Y	Z	$v/(m/s)$	ϕ/rad	ψ/rad
1	0	2 000	80	45	π	0
2	-2 000	0	60	35	$\pi/2$	0
3	0	-2 000	40	25	0	0
4	2000	0	20	15	$3\pi/2$	0

5.2 仿真过程

5.2.1 目标探测仿真

目标的探测是对目标进行拦截的前提, 因此有着重要的意义。这一部分主要包括目标的航迹仿真、雷达信息的仿真和航迹关联仿真。通过键盘输入各目标的位置及飞行参数, 代入系统进行计算。仿真时间 $t=14$ s 时的目标航迹仿真如图 5 所示。

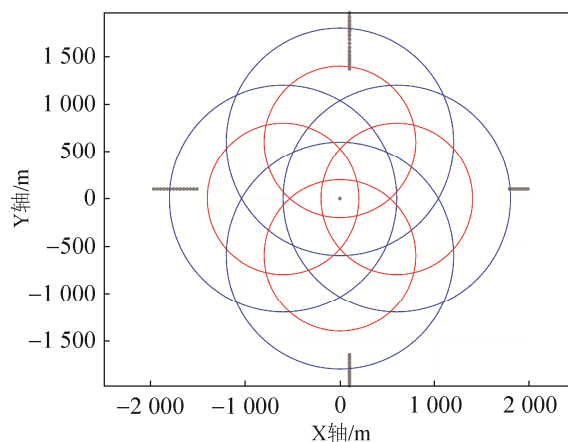


图 5 目标航迹仿真

Fig. 5 Simulation of target track

当仿真时间 $t=5$ s 时, 北方雷达发现目标 1, 目标相对于雷达的距离 $r=1 167$ m, 俯仰角 $\alpha=0.07$ rad, 方位角 $\beta=0.09$ rad, 飞行速度 $v=40$ m/s; 当仿真时间 $t=6$ s 时, 西方雷达发现目标 2, 目标

相对于雷达的距离 $r=1\ 196\ \text{m}$ ，俯仰角 $\alpha=0.05\ \text{rad}$ ，方位角 $\beta=4.79\ \text{rad}$ ，飞行速度 $v=35\ \text{m/s}$ ；当仿真时间 $t=6\ \text{s}$ 时，南方雷达发现目标 3，目标相对于雷达的距离 $r=1\ 179\ \text{m}$ ，俯仰角 $\alpha=0.03\ \text{rad}$ ，方位角 $\beta=3.05\ \text{rad}$ ，飞行速度 $v=25\ \text{m/s}$ ；当仿真时间 $t=14\ \text{s}$ 时，南方雷达发现目标 4，目标相对于雷达的距离 $r=1\ 194\ \text{m}$ ，俯仰角 $\alpha=0.02\ \text{rad}$ ，方位角 $\beta=1.48\ \text{rad}$ ，飞行速度 $v=15\ \text{m/s}$ 。

指控系统实时接收各个雷达传递来的目标的信息，通过坐标变换将其转换为目标相对于指控系统的指标。将各个雷达发现的目标进行坐标变换，转换到指控中心坐标系。当仿真时间 $t=14\ \text{s}$ 时，指控系统判断有 4 架来袭目标，如表 3 目标的航迹融合所示。

表 3 目标的航迹融合
Tab. 3 Track fusion of targets

目标	距离	速度	高度
1	1146	40	80
2	1515	35	60
3	1654	25	40
4	1793	15	20

5.2.2 威胁评估策略仿真

在本例中，设置距离、速度、高度的权重分别为 0.3、0.4、0.3。当仿真时间 $t=14\ \text{s}$ 时，目标实际值矩阵 X_{ac} 为：

$$X_{ac} = \begin{bmatrix} 1146 & 40 & 80 \\ 1515 & 35 & 60 \\ 1654 & 25 & 40 \\ 1793 & 15 & 20 \end{bmatrix}$$

划分等级后的量化矩阵 x_{ac} 为：

$$x_{ac} = \begin{bmatrix} 6 & 4 & 2 \\ 5 & 4 & 4 \\ 5 & 3 & 6 \\ 5 & 2 & 8 \end{bmatrix}$$

根据目标的不同属性，专家可以根据经验分别在线设置 3 个指标的权重，但最好保证权重归一化，可使得最后计算的总分整洁的限定在 1~10 范围内，保留小数点后一位。在这里，设置目标与要

地之间的距离权重为 0.3，目标的飞行速度权重为 0.3，目标的飞行高度权重为 0.4。最终得到表 4 目标的决策矩阵。

表 4 目标的决策矩阵
Tab. 4 Decision matrix of targets

目标	距离	速度	高度
1	6	4	2
2	5	4	4
3	5	3	6
4	5	2	8
权重	0.3	0.3	0.4

威胁度计算如下。目标 1 的威胁度为： $6 \times 0.3 + 4 \times 0.3 + 2 \times 0.4 = 3.8$ ；目标 2 的威胁度为： $5 \times 0.3 + 4 \times 0.3 + 4 \times 0.4 = 4.3$ ；目标 3 的威胁度为： $5 \times 0.3 + 3 \times 0.3 + 6 \times 0.4 = 4.8$ ；目标 4 的威胁度为： $5 \times 0.3 + 2 \times 0.3 + 8 \times 0.4 = 5.3$ 。

5.2.3 打击策略仿真

当仿真时间 $t=14\ \text{s}$ 时，4 个目标都进入火力雷达圈内，这时系统按照目标的威胁度进行排序，由大到小分别为目标 4、目标 3、目标 2、目标 1，计算各目标与打击单元之间的距离如表 5 所示。

表 5 目标与打击单元的距离
Tab. 5 Distance between targets and strike units /m

目标	北方	东方	南方	西方
1	849	1 591	2 252	1 858
2	1 526	2 113	1 724	1 194
3	2 044	1 665	1 055	1 922
4	1 603	917	1 792	2 392

将目标分配给距离最近的打击单元，相应的目标 4、目标 3、目标 2、目标 1 分配给东方打击单元、南方打击单元、西方打击单元、北方打击单元。

指控系统需要判断目标与所选取的打击单元之间的距离是否小于 800 m，如果大于等于 800 m，不进行打击操作，程序继续运行；如果小于 800 m，系统按照要求对目标进行打击。为模拟目标被击落，使目标的 X、Y 坐标保留，Z 坐标置 0，相应航迹停止。战场实时态势模拟见图 6，目标被击落后的位置见表 6。

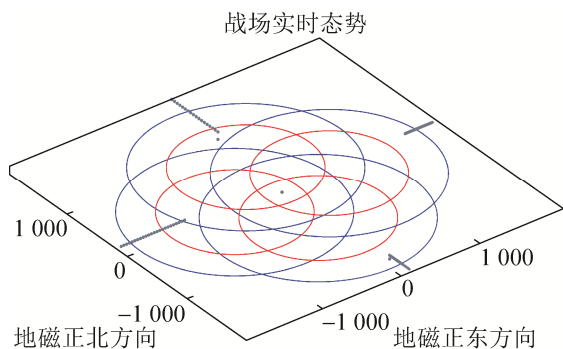


图 6 战场实时态势

Fig. 6 Battlefield real-time situation

表 6 目标被击落时的位置

Tab. 6 Distance between targets and strike units

目标编号	1	2	3	4
仿真时间 t/s	16	18	25	41
与要地间距离/m	770	778	782	791
X 坐标	100	-1 370	100	1 385
Y 坐标	1 360	100	-1375	100
Z 坐标	0	0	0	0

5.3 仿真结论

通过这一仿真实例,验证了系统各部分的功能设计是合理、可靠、有效的。系统不但能够得到最终的打击结果,而且在系统运行过程中,能够得到各个时刻的中间数据、战场实时态势。这能够方便指战员对战场态势的实时把握,也可以为研究人员对数据进行进一步的分析做了准备。

6 结论

本文通过构建指控系统,能够有效解决拦截低慢小目标的问题。首先,在分析了低慢小目标特性的基础上,提出了拦截低慢小目标的指控系统设计应该注意的方面。然后,通过对指控系统各部分进行建模,阐明了系统各部分的原理,实现了相应的功能。再次,针对目标对要地的威胁不同,武器资源有限的现状,编制了相应的威胁评估策略和火力分配策略。最后,设计了仿真场景,验证了系统的可靠性,得到的结果对于指战员和研究人员都有一定的参考价值。

参考文献:

- [1] 张云志, 王刚, 赵敏. 防空反导指控系统敏捷性需求分析[J]. 火力与指挥控制, 2017, 42(10): 1-4, 13.
Zhang Y Z, Wang G, Zhao M. Research of agility requirement in command and control system of air and missile defense[J]. Fire Control & Command Control, 2017, 42(10): 1-4, 13.
- [2] 邵文星, 丁建江, 刘宇驰, 等. 美军弹道导弹防御指控系统发展变迁与启示[J]. 飞航导弹, 2016(7): 42-48.
Tai W X, Ding J J, Liu Y C, et al. The evolution and inspiration of the US ballistic missile defense accusation control system[J]. Aerodynamic Missile Journal, 2016(7): 42-48.
- [3] 刘华, 吕开琦, 刘邦朝, 等. 分布式地空导弹武器系统研究[J]. 飞航导弹, 2018(2): 38-41.
Liu H, Lü K Q, Liu B C, et al. Research on distributed surface to air missile weapon system[J]. Aerodynamic Missile Journal, 2018(2): 38-41.
- [4] 董帅君, 栗高峰, 康传华, 等. 防空导弹指挥控制系统火力单元动态调整方法[J]. 火力与指挥控制, 2017, 42(4): 105-109.
Dong S J, Li G F, Kang C H, et al. Dynamic adjustment method of multi-firepower units of command and control system of anti-aircraft missiles[J]. Fire Control & Command Control, 2017, 42(4): 105-109.
- [5] 谭亚新, 夏永春, 范锐, 等. 陆军指控系统功能验证的可信性研究[J]. 系统仿真学报, 2016, 28(3): 696-704.
Tan Y X, Xia Y C, Fan R, et al. Research on credibility of function validation to C^2 system of land force[J]. Journal of System Simulation, 2016, 28(3): 696-704.
- [6] 张新刚. 水面舰艇作战指挥控制系统的研究与实现[D]. 长春: 吉林大学, 2017.
Zhang X G. Research and implementation of command and control system for surface Warship[D]. Changchun: Jilin University, 2017.
- [7] 谢德光. 基于 QFD 的舰艇指控系统综合评价方法[J]. 舰船电子工程, 2017, 37(1): 18-21.
Xie D G. A comprehensive evaluation method of ship command and control system based on QFD theory[J]. Ship Electronic Engineering, 2017, 37(1): 18-21.
- [8] 许道明, 张宏伟. 雷达低慢小目标检测技术综述[J]. 现代防御技术, 2018, 46(1): 148-155.
Xu D M, Zhang H W. Overview of radar LSS target detection technology[J]. Modern Defence Technology, 2018, 46(1): 148-155.