

基于无人机平台的动目标航迹模拟算法

甘彤¹, 刘金龙¹, 马晓冬²

(1. 中电长城圣非凡信息系统有限公司, 北京 102200; 2. 华北计算机系统工程研究所, 北京 100083)

摘要: 测控设备是保障我国航天任务顺利进行的必要手段。多年来测控技术人员在任务间隙, 一直利用测控设备随机的软件模拟实战任务以进行日常训练。这种模拟方式一方面无法实现全系统的闭环模拟, 另一方面需要系统的更新系统仿真软件才可以实现新场景、新业务的模拟。通过引入无人机平台配合载荷模块这一概念, 从坐标转换的角度出发, 在理论上推导了利用“无人机+载荷”实现动目标模拟的算法流程。通过算法仿真, 证实了利用该算法流程实现真实弹道模拟的可行性。

关键词: 动目标; 航迹模拟; 无人机平台; 载荷

中图分类号: TN953

文献标识码: A

DOI: 10.16157/j.issn.0258-7998.212257

中文引用格式: 甘彤, 刘金龙, 马晓冬. 基于无人机平台的动目标航迹模拟算法[J]. 电子技术应用, 2022, 48(12): 100-103.

英文引用格式: Gan Tong, Liu Jinlong, Ma Xiaodong. A trajectory simulation algorithm based on the combination of drone and electronic payload[J]. Application of Electronic Technique, 2022, 48(12): 100-103.

A trajectory simulation algorithm based on the combination of drone and electronic payload

Gan Tong¹, Liu Jinlong¹, Ma Xiaodong²

(1. CEC Greatwall Shengfeifan Electronic System Technology Development Co., Ltd., Beijing 102200, China;

2. National Computer System Engineering Research Institute of China, Beijing 100083, China)

Abstract: Measure and control equipment in our country is a kind of necessary strategy to ensure the smooth progress of Chinese space mission. In recent years, technicians have used software simulation provided by this equipment to do daily training. However, this kind of simulation cannot simulate all the equipment functions. Furthermore, it is difficult to update the simulation program for a new scene. By combining a drone and an electric payload, this paper introduces an algorithm that simulates the movement of a target. The simulation results indicate that the proposed algorithm can calculate the real trajectory correctly.

Key words: moving target; track simulation; UAV platform; load

0 引言

近年来我国航天事业不断发展, 为保障航天任务的顺利进行, 先后装备了大量的测控设备。并且随着设备自动化程度的增高, 所装备设备大部分可由中心机远程进行统一的管理和调度。在实际发射任务中, 发射目标的跟踪是否准确、各类突发事件的应对措施是否正确等直接关系到任务的成功与否。因此, 需要构建一套模拟系统, 实现飞行任务以及具有代表性的突发事件的模拟, 以满足日常训练的需求。

在测控系统中, 遥测雷达用于快速飞行目标的外测, 在设计上具有波束窄、精度高以及跟踪目标难度大等特点。伴随着目标飞行特征的复杂化, 对于遥测雷达操作手的要求越来越高。动目标模拟作为一种真实目标的仿真模拟手段, 在遥测目标跟踪的日常作训演练中发挥着越来越重要的贡献。但是现阶段, 动目标仿真方法

通常是以特定的目标为基础进行设计的, 通过软件实现目标特性的模拟, 进而生成对应的信号, 实现模拟信号馈入。这种模拟方法一方面无法针对特征不明显的目标进行模拟; 另一方面注入式信号或者软件模拟信号, 无法最大程度地复原真实环境下的信号。本文以动目标弹道参数为基础, 利用无人机挂载信号模拟器, 研究对应模拟算法以实现真实环境下动目标模拟。

1 动目标航迹模拟算法

1.1 坐标系转换

在测控系统中, 全国范围内的测站根据任务段的划分完成整个飞行过程的测控, 因此理论弹道的描述一般采取地球坐标系的形式。在进行动目标飞行弹道模拟的过程中, 需要完成地球坐标系到测站系坐标的转换, 从而得出目标飞行过程中相对于测站的理论测量值^[1-3]。

协议地球坐标系有两种表达形式: 一种是地心空间

直角坐标系;另一种是地心大地坐标系,如图1所示。地心直角坐标系的定义是:坐标系的原点位于地球质心; Z 轴穿过地球质心,指向协议地极; X 轴在协议赤道面内,指向零度子午线; Y 轴与 X 轴和 Z 轴一并构成右手坐标系。之所以将 Z 轴指向协议地极,是由于地球的瞬时极在不断地变化,即存在极移现象,指向瞬时极的 Z 轴也会不断地改变,不利于使用。

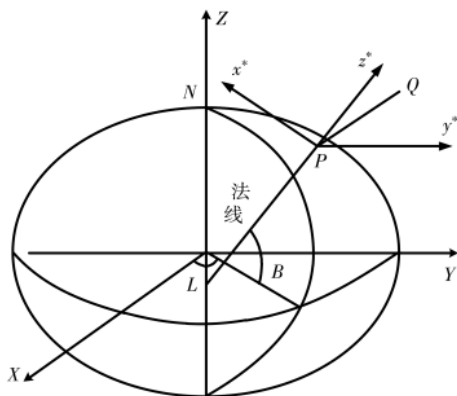


图1 地球坐标与测站系坐标

地心大地坐标系建立在总地球旋转椭球的基础上。其相关定义为:椭球的中心与空间直角坐标系的原点重合;椭球旋转轴与 Z 轴重合;过地面点的椭球子午面与格林尼治大地子午面的夹角称为大地经度 L ;过地面点的椭球面法线与椭球赤道面的夹角为大地纬度 B ;地面点沿椭球法线到椭球面的距离为大地高 H 。

XYZ 和 BLH 是同一个坐标点的不同表达形式,二者之间可以按照下式关系进行转换:

$$\begin{cases} X = (N+H)\cos B \cos L \\ Y = (N+H)\cos B \sin L \\ Z = [N(1-e^2)+H]\sin B \end{cases} \quad (1)$$

式中, N 为椭球卯西圈的曲率半径, e 为椭球的第一偏心率。

在站点测量中,由于雷达是从自身为出发点,实现径向测距、径向测速等工作,需要把地球坐标转化成以测站为圆心的测站系坐标。如图1所示,如果要求得到 Q 点相对于 P 点的空间位置,则可按如下的方式来定义以测站为中心的坐标系(后称站心坐标系):将 P 点作为坐标原点;过 P 点椭球法线的直线作为 Z 轴,方向朝向椭球外,记为 z^* ;过 P 点垂直于 z^* 轴,并且通过 P 点所在的子午面的直线作为 X 轴,记为 x^* ; Y 轴垂直于 x^*Pz^* 平面,且构成左手坐标系,记为 y^* 。

在极坐标的情况下,可以以 P 点作为极点, X 轴与 Y 轴构成的平面 XPY 作为基准面,点 P 与点 Q 之间的距离为极距(d), d 在 XPY 平面的投影与 X 轴的夹角为方位角(Azimuth, a), d 与 Z 轴的夹角为天顶角(Zenith Angle, z),与天顶角 z 对应的为俯仰角(Elevation, e), $z+e=90^\circ$,如图2所示。

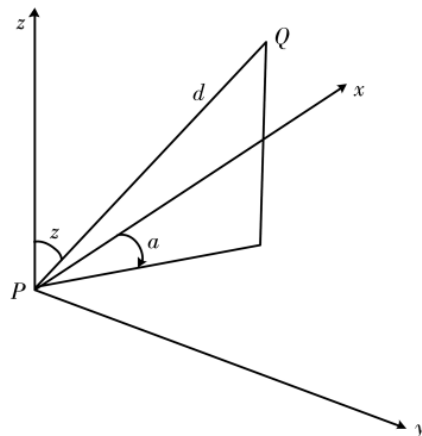


图2 极坐标投影映射关系

在已知 P 点和 Q 点在协议地球坐标系下的三维坐标,可以求得以 P 点为原点的坐标系下的坐标,如下:

$$\begin{bmatrix} x^* \\ y^* \\ z^* \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\sin B \cos L & -\sin B \sin L & \cos B \\ -\sin L & \cos L & 0 \\ \cos B \cos L & \cos B \sin L & \sin B \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_Q - X_P \\ Y_Q - Y_P \\ Z_Q - Z_P \end{bmatrix} \quad (2)$$

式中, B 和 L 分别为 P 点在协议地球坐标系下的大地纬度和大地经度。在得到以测站为原点的空间指标坐标 x^* 、 y^* 、 z^* 后,可以按照下式计算对应的测站系极坐标:

$$\begin{bmatrix} d \\ a \\ z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sqrt{(x^*)^2 + (y^*)^2 + (z^*)^2} \\ \arctan\left(\frac{y^*}{x^*}\right) \\ \arccos\left(\frac{z^*}{d}\right) \end{bmatrix} \quad (3)$$

其中, $d = \sqrt{(X_Q - X_P)^2 + (Y_Q - Y_P)^2 + (Z_Q - Z_P)^2}$ 。

同样,在已知两个点相对距离、方位角、天顶角的情况下,可以按照以下步骤完成相对位置到协议地球坐标系坐标的转换。

(1)测站系极坐标与测站系直角坐标转换: $[d, a, z]^T$ 分别为 Q 点在以 P 点为原点的极坐标, $[x^*, y^*, z^*]^T$ 为对应的直角坐标,则:

$$\begin{bmatrix} x^* \\ y^* \\ z^* \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} d \times \sin z \times \cos a \\ d \times \sin z \times \sin a \\ d \times \cos z \end{bmatrix} \quad (4)$$

(2)测站系直角坐标与协议地球坐标系直角坐标转换: $[B, L]$ 为 P 点对应大地纬度和大地经度, $[X_P, Y_P, Z_P]^T$ 和 $[X_Q, Y_Q, Z_Q]^T$ 分别为 P 点和 Q 点对应的协议地球坐标系下直角坐标,则:

$$\begin{bmatrix} X_Q \\ Y_Q \\ Z_Q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X_P \\ Y_P \\ Z_P \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -\sin B \cos L & -\sin L & \cos B \cos L \\ -\sin B \sin L & \cos L & \cos B \sin L \\ \cos B & 0 & \sin B \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x^* \\ y^* \\ z^* \end{bmatrix} \quad (5)$$

1.2 方位、俯仰模拟

动目标的飞行参数包括当前时刻(t)下所处的协议地球坐标系坐标(X 、 Y 、 Z)、飞行速度(v)等。为了实现动目标的模拟,即需要在以测站为中心的坐标系中实现上

述参数的模拟。其中,飞行速度和飞行距离可以通过信号的多普勒频偏以及对应的回波延迟来模拟。动目标相较于测站的方位、俯仰角等参数则需要通过无人机的飞行轨迹变化实现模拟——即需要以动目标运动轨迹为基础,实现无人机路径规划,通过无人机路径实现动目标运行过程中方位角和俯仰角的模拟^[4-5]。具体伪代码流程如下:

- (1)输入:动目标理论弹道文件,共计 n 个弹道点;
- (2)初始化:测站大地纬度 B 、大地经度 L 及对应的协议地球坐标系下的三维坐标 (X_P, Y_P, Z_P) 、无人机距离测站定点距离 R ;
- (3)循环:
 - ①依次读取动目标弹道点 (x_{Qm}, y_{Qm}, z_{Qm}) ;
 - ②调用式(2)、式(3)联合解算动目标相对测站的径向距离、方位角和俯仰角 (d_{Qm}, a_{Qm}, e_{Qm}) ;
 - ③以 (R, a_{Qm}, e_{Qm}) 为输入,调用式(4)、式(5)可以得到无人机所处对应协议地球坐标系下的三维坐标 (X_{Dm}, Y_{Dm}, Z_{Dm}) ;
 - (4)直到 $m=n$ 。

1.3 距离、速度模拟

通过无人机完成对应动目标方位和俯仰模拟后,需要利用挂载的载荷,对收到的信号进行存储-转发的形式,通过在转发信号中进行时间拖引和添加多普勒频偏实现距离和速度的模拟。存储-转发即载荷不主动生成信号,仅通过对接收到的信号进行延迟、整形后再发送以模拟反射信号。距离拖引本用于对常规的、通过距离波门对目标进行跟踪的脉冲雷达实施欺骗。在本算法中,通过距离拖引实现动目标距离的模拟,并通过人为添加多普勒频偏,实现动目标速度模拟。

针对单脉冲雷达,正常情况下雷达接收机输入端的目标回波信号可表示为^[6-8]:

$$S(t) = A_i e^{j2\pi(f_0 + f_d)(t - \frac{2r}{c})} \quad (6)$$

在受到距离拖引的情况下,其回波信号可以表示为:

$$S(t) = A_j e^{j2\pi(f_0 + f_d)(t - \frac{2r}{c} - \Delta t)} \quad (7)$$

其中, A_i 和 A_j 分别对应脉冲回波的幅度, f_0 为脉冲信号中心频率, f_d 为多普勒频偏, r 为目标距离雷达距离, c 为光速, Δt 为拖拽的延迟时间。在本算法中,动目标真实的延时为 $\frac{2d}{c}$, 其中 d 为动目标距雷达的径向距离。

在无人机模拟的情况下,由于无人机距雷达的径向距离仅为 R , 因此,对应的 Δt 可以表示为:

$$\Delta t = \frac{2(d-R)}{c} \quad (8)$$

即在存储-转发的模式下,载荷在收到雷达脉冲后,延迟 Δt 后再把对应的信号辐射出去以完成距离模拟。

式(7)中 f_d 为由于动目标运动导致的多普勒频偏,可

以通过两个航迹点相对于雷达的径向距离差计算得到:

$$\begin{cases} f_d = f_0 \times (\frac{c-v}{c+v} - 1) \\ v = \frac{d_i - d_j}{\Delta t} \end{cases} \quad (9)$$

其中, d_i 和 d_j 为相邻的两个航迹点对应雷达的径向距离。

综上,利用载荷实现距离和多普勒速度模拟的伪代码流程如下:

- (1)输入:解析后的动目标距离雷达测站的距离信息 $d_i, i=1, 2, \dots, n$;
- (2)初始化:雷达中心频率 f_0 、无人机距测站的距离 R ;
- (3)循环:
 - ①依次读取动目标距离测站距离信息 d_i 及下一点距离信息 d_{i+1} ;
 - ②调用式(8)完成回波延迟计算;
 - ③调用式(9)完成回波多普勒频偏计算;
 - (4)直到 $i=n$ 。

2 仿真分析

在动目标模拟仿真中,基于动目标航迹信息,规划无人机的飞行路径可以实现动目标方位、俯仰的模拟,通过控制载荷的回波参数,可以实现动目标距离和多普勒速度的模拟,进而实现动目标飞行模拟。按照文献[9]中 1 500 km 弹道,生成对应的动目标飞行轨迹,如图 3 所示。其中, X 、 Y 、 Z 分别代表飞行轨迹在地心空间直角坐标系下的坐标值,两点之间间隔为 1 s。

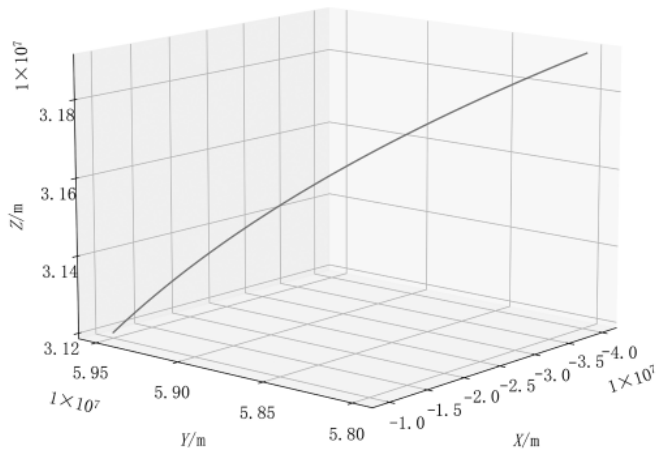


图3 地心空间直角坐标系下弹道

假设中国大地原点(北纬 $34^{\circ}32'27.00''$, 东经 $108^{\circ}55'25.00''$, 海拔 417.20 m)为虚拟测站,计算动目标测量值(距离 R 、方位角 AZ 、俯仰角 EL)如图 4 所示。

设定无人机以距离测站恒定的距离上飞行(e.g., $R=10$ km),模拟方位角和俯仰角,利用式(4)、式(5)可反算出无人机在地心直角坐标系下的飞行轨迹,如图 5 所示。通过导入无人机飞控系统,使无人机按照规划路径飞行即可实现动目标的方位角和俯仰角模拟^[10-11]。

此外,利用式(8)、式(9)生成载荷的信号延迟和频偏

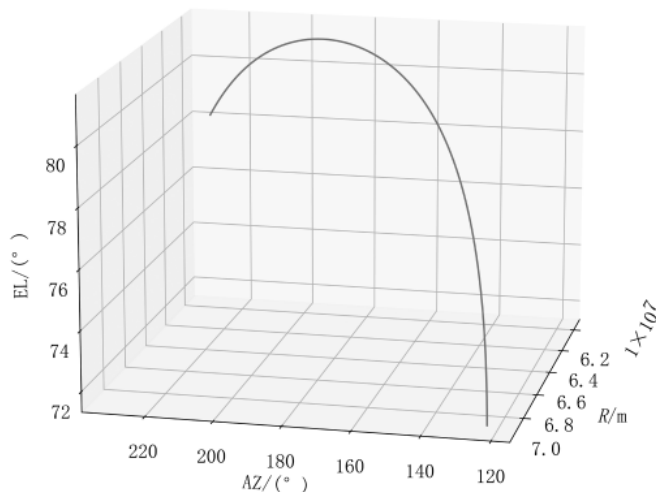


图4 测站理论测量值

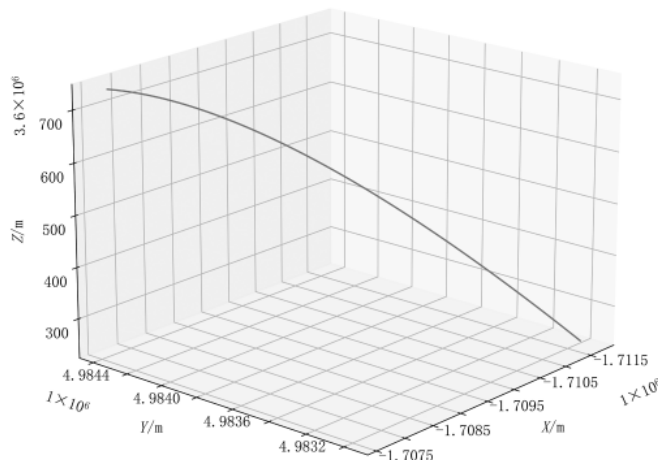


图5 无人机模拟飞行地心直角坐标系轨迹

控制参数,即可实现动目标的距离和速度模拟。

3 结论

本文给出了利用无人机挂在载荷实现动目标模拟的流程、方法和仿真结果,为后续的半实物仿真系统提供了理论基础和思路,为后续日常作战任务的开展提供了技术支撑。

参考文献

- [1] 胡凯.空中运动目标的特征航迹描述及仿真[J].通信技术, 2010, 43(5): 13-15.
- [2] 鲁尽义.航天测控系统测角分系统[R].西安:中电科技集团公司 39 所, 2006.
- [3] 杨冲.一种二维平面运动目标航迹仿真方法[J].陕西科技大学学报, 2014, 32(3): 153-157.
- [4] 原忠虎,焦乐乐,雷莹.无人机在组网雷达中的虚假轨迹生成策略[J].电子信息对抗技术, 2022, 37(1): 1-6.
- [5] 黄亚东.基于目标轨迹估计的无人机航路规划方法[D].西安:西安电子科技大学, 2019.
- [6] 田黎育,曾涛,龙腾.一种脉冲多普勒雷达信号模拟器的研究[J].北京理工大学学报, 2000, 20(6): 752-756.
- [7] 丁向丽.目标动态模拟器设计与实现[D].北京:北方工业大学, 2012.
- [8] 陈忠飞.距离拖引干扰对几种脉冲雷达的干扰效果分析[J].上海航天, 1995(5): 23-26.
- [9] 杨少春,吴林锋,王刚,等.弹道导弹中段轨迹预测研究[J].空军工程大学学报, 2012, 13(4): 31-35.
- [10] 罗军军.无人机遥测遥控地面站系统研究[D].南昌:南昌航空大学, 2014.
- [11] 王军,刘冬利.一种基于目标运动特性的航迹模拟方法[J].电声技术, 2021, 45(5): 66-69.

(收稿日期: 2021-10-24)

作者简介:

甘彤(1987-),男,博士研究生,高级工程师,主要研究方向:无线通信技术、深度学习算法。



扫码下载电子文档

版权声明

经作者授权，本论文版权和信息网络传播权归属于《电子技术应用》杂志，凡未经本刊书面同意任何机构、组织和个人不得擅自复印、汇编、翻译和进行信息网络传播。未经本刊书面同意，禁止一切互联网论文资源平台非法上传、收录本论文。

截至目前，本论文已经授权被中国期刊全文数据库（CNKI）、万方数据知识服务平台、中文科技期刊数据库（维普网）、DOAJ、美国《乌利希期刊指南》、JST 日本科技技术振兴机构数据库等数据库全文收录。

对于违反上述禁止行为并违法使用本论文的机构、组织和个人，本刊将采取一切必要法律行动来维护正当权益。

特此声明！

《电子技术应用》编辑部

中国电子信息产业集团有限公司第六研究所