

基于模拟目标的测量雷达实战化训练方法研究

蒋立民, 王 成

(中国人民解放军 91245 部队, 辽宁 葫芦岛 125001)

摘要: 针对精密测量雷达训练时, 由于缺少训练合作目标, 导致训练的针对性差, 有效性不好等实际问题, 结合测量雷达实际应用的特点和规律, 提出了采用计算机仿真技术构建训练合作目标的运动轨迹模型、RCS (目标的雷达散射截面积) 特性模型, 并利用测量雷达目标模拟器在测量雷达上实现基于模拟目标的测量雷达实战化训练方法; 经在某型测量雷达上实际应用进行验证, 结果表明方法可行, 利用本方法使训练更贴近实战, 训练的针对性、有效性得到很大提高。

关键词: 运动轨迹; RCS 特性; 目标模拟器; 实战化训练

Research on Actual Combat Training Method of Measurement Radar Based on Simulated Target

JIANG Limin, WANG Cheng

(Unit 91245 of PLA, Huludao 125001, China)

Abstract: For precision measurement radar training, due to a lack of training goals of cooperation, lead to training pertinence, effect is bad to practical problems. Such as combination of measurement radar and characteristics of practical application, puts forward the computer simulation technology was used to construct training cooperation target trajectory model of RCS feature model, and use the measurement of radar target simulator. The actual combat training method based on the simulated target is realized on the measurement radar. After the practical application on a certain measurement radar, the results show the method is feasible, which makes the training closer to the actual combat, and the pertinence and effect of the training are greatly improved.

Keywords: Movement locus; RCS characteristics; Target simulator; Actual combat training

0 引言

精密跟踪测量雷达是武器装备测试过程中测量系统重要的组成部分, 具有测角精度高、数据率高等特点。能够全天候、远距离实时跟踪测量空中飞行目标, 能够提供目标角度、距离、径向速度和 RCS (目标的雷达散射截面积) 等测量元素信息, 主要用于武器装备试验中目标外弹道的精确测量, 为武器装备试验过程的控制、指挥和决策提供有效支撑。目前, 测量雷达训练主要有以下两种途径: 1) 利用脱离装备的模拟训练器对操作手进行训练, 此方法训练成本低, 可重复性好, 但训练的真实度不高, 针对性不强, 训练效果难以达到预期; 2) 利用实际雷达装备跟踪布设站点周边过航飞机等目标进行训练, 此方法训练, 装备操作感真实, 但存在重复性差、缺乏针对性等缺点。随着科技发展, 武器装备试验中被测目标呈现高速、机动、大航程、低可探测性等特点, 试验的背景条件日趋复杂、风险系数急剧增大、测量精度、安全性和可靠性要求越来越高, 这就对雷达操管人员的装备操管水平提出了更高的要求, 急需采用贴近实战的训练方法对雷达操

管人员进行训练, 提高其操作装备搜索、捕获、稳定跟踪被测目标的能力。

为此, 提出了基于模拟目标的测量雷达实战化训练方法, 方法是以计算机仿真技术为基础, 通过构建训练合作目标的运动轨迹模型、RCS 特性模型, 利用软件编程的方式将目标轨迹与特性模型封装成训练目标模型, 并利用测量雷达本身的目标模拟器, 在测量雷达上实现模拟目标、真实装备的半实物仿真跟踪, 进而达到近实战化训练的效果。目前多数测量雷达均具有目标模拟器, 因此, 本文着重介绍训练目标模型的构建。

1 目标运动轨迹模型构建

目标运动轨迹建模有很多种方法, 根据不同目标类型采用不同的方法, 针对本文测量雷达实战化训练方法对合作目标的需求, 研究了两种不同目标运动轨迹模型的构建方法, 两种目标分别是: 无动力目标, 如传统火炮发射后出膛的弹丸; 动力目标, 如各种导弹、火箭弹。

1.1 无动力目标运动轨迹模型构建

无动力目标发射出膛后的运动轨迹, 可采用传统的弹

收稿日期: 2021-04-16; 修回日期: 2021-05-19。

作者简介: 蒋立民(1979-), 男, 吉林省吉林市人, 工程师, 主要从事靶场测量雷达技术方向的研究。

引用格式: 蒋立民, 王 成. 基于模拟目标的测量雷达实战化训练方法研究[J]. 计算机测量与控制, 2021, 29(7): 149-155.

道微分方程构建。为便于研究，构建过程中，假设无动力目标飞行过程中仅受到地球引力（方向不变）与大气阻力作用，无动力目标为标准轴对称体，在理想气象背景下，建立以发射点 O 为坐标系原点，以地球引力方向为 y 轴，引力相反方向为正，以射向面与过 O 点垂直 y 轴平面的交线为 x 轴，沿射向为正，按照右手法则确定 z 轴，建立发射坐标系，用 $o-xyz$ 表示。

规定大气阻力加速度 a ，建立基于发射坐标系，以时间为自变量的无动力目标运动方程组：

$$\begin{cases} a_x = \frac{\pi d^2}{8m} \rho_{on} v^2 C_{on} (Ma) \\ \frac{\partial \mu}{\partial t} = -a_x \cos\theta \\ \frac{\partial \omega}{\partial t} = -a_x \sin\theta - g \\ \frac{\partial y}{\partial t} = \omega \\ \frac{\partial x}{\partial t} = \mu \\ v = \sqrt{\omega^2 + \mu^2} \end{cases} \quad (1)$$

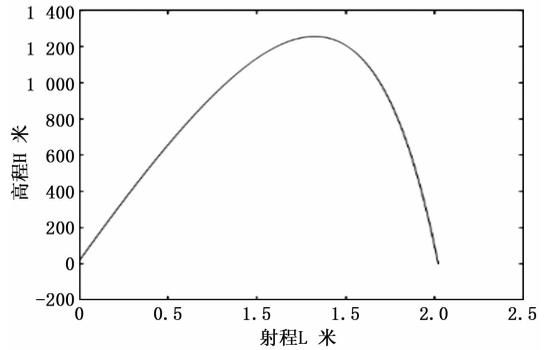
因研究过程中设定目标是轴对称体，假设攻角为 0 度，此时大气阻力矢量与目标对称轴重合，质心在目标对称轴上，大气阻力必定通过质心，这样可以认为作用在目标上的力都过质心，目标可作为一个质点来处理。规定：目标射出后重新落回到发射点水平面上的一点为落点，根据公式 (1) 变换可得发射直角坐标系的目标质心运动方程组如下：

$$\begin{cases} \frac{dv_x}{dt} = -CH(y)G(v, c_s)v_x \\ \frac{dv_y}{dt} = -CH(y)G(v, c_s)v_y - g \\ \frac{dx}{dt} = v_x \\ \frac{dy}{dt} = v_y \\ \frac{dp}{dt} = -\rho g v_y \end{cases} \quad (2)$$

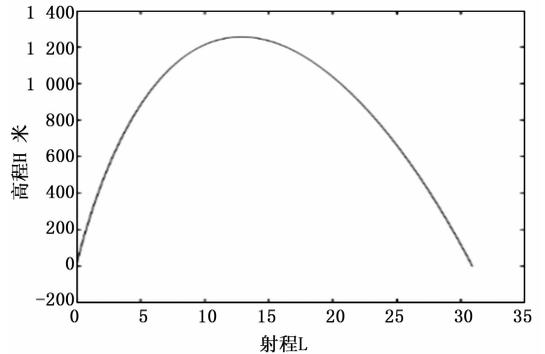
式中，弹道系数 $c = id^2 \times 10^3 / m$ (i 为无动力目标形体系数， d 为无动力目标直径， m 为目标质量)； $H(y) = \rho / \rho_{on}$ ， $\rho = p / R_1 \tau$ ， $R_1 = 29.27$ ， ρ_{on} 为理想气象条件的地面空气密度 (标准值为 1.206 kg/m^3)； $v = (v_x^2 + v_y^2)^{1/2}$ ； $G(v, c_s) = 4.737 \times 10^{-4} c_{xon} (M_a) v$ ， C_{on} 为标准形体的阻力系数， M_a 为以马赫为单位的的速度值 ($M_a = v / c_s$ ， $c_s = 20.047 \sqrt{\tau}$)； g 为地球引力加速度。积分方程起始条件为 $t = 0$ 时， $x = 0$ ， $y = y_0$ ， $v_x = v_0 \cos\theta_0$ ， $v_y = v_0 \sin\theta_0$ ， $\rho = \rho_{on}$ (v_0 为初速， θ_0 射角)。

据式 (2)，在气象条件为：气压 $p_{on} = 1\ 000 \text{ hPa}$ ；气温 $t_{on} = 20 \text{ }^\circ\text{C}$ ；密度 $\rho_{on} = 1.206 \text{ kg/m}^3$ ；地面湿温 $\tau_{on} = 288.9 \text{ K}$ ；相对湿度 $\varphi = 50\%$ ；声速 $c_{xon} = 341.1 \text{ m/s}$ ；无风；密度函数 $H(y)$ 在 $y < 10\ 000 \text{ m}$ 时采用经验公式 $H(y) = (1 - 2.1904 \times 10^{-5} \times y)^{4.4}$ ；阻力函数 $G(v, c_s)$ 中阻力系数 c_{xon}

(M_a) 根据 43 年阻力定律取值，在给定目标不同初始速度、发射点海拔高度、射角、弹形系数时，规定高低攻角和侧向攻角均为 0° ，通过仿真可得到目标不同的弹道曲线，如图 1 所示。



(a) 低初速低射角弹道曲线



(b) 高初速高射角弹道曲线

图 1 仿真运动轨迹图

从两个弹道曲线可以看出，同一无动力目标弹道主要由发射初速度、发射角度和弹道系数等确定。采用构建的无动力目标运动轨迹模型生成的仿真弹道曲线与掌握的预估理论弹道曲线基本一致，方法可行。

1.2 动力目标运动轨迹模型构建

动力目标与无动力目标的区别一是动力目标在发射后，本身具有动力系统，目标受力情况不同；二是动力目标可根据需要，进行空中机动。轨迹模型构建过程中，建立以发射点 O 为坐标系原点，以地球引力方向为 y 轴，引力相反方向为正，以射向面与过 O 点垂直 y 轴平面的交线为 x 轴，沿射向为正，按照右手法则确定 z 轴，建立发射坐标系，用 $o-xyz$ 表示。为便于研究，将目标运动轨迹进行分段处理，包括动力段，无动力段，机动段，二次动力段 4 个阶段。其中动力段为目标发射后靠自身动力系统加速飞行的阶段，理想条件下认为该阶段目标受到本身动力系统的推力、大气摩擦阻力、地球引力，该阶段可根据目标初始速度、射向角度、动力飞行时间、合加速度等参数求得目标轨迹点位坐标；无动力段为目标动力系统停止工作后，进行带有一定速度的类抛物运动阶段，理想条件下认为该阶段目标受到大气摩擦阻力和地球引力作用，该阶段可根据目标阶段初始速度、最大射高、射向角度、无动力飞行时间、阻力加速度等参数求得目标轨迹点位坐标；机动阶

段为目标进行机动飞行的阶段, 飞行中的目标进行机动方式很多, 可通过自身辅助动力系统给目标施加一个变向加速度, 也可通过目标弹翼、舵机来改变目标航向, 该阶段可根据目标阶段初始速度、预设航迹坐标点位、等参数求得目标轨迹点位坐标; 二次动力段为目标飞行过程中动力系统再次工作阶段, 理想条件下认为该阶段目标受到本身动力系统的推力、大气摩擦阻力、地球引力, 该阶段可根据目标阶段初始速度、攻向角度、被攻击目标点位坐标、合加速度等参数求得目标轨迹点位坐标, 运动轨迹分段示意图如图 2 所示。

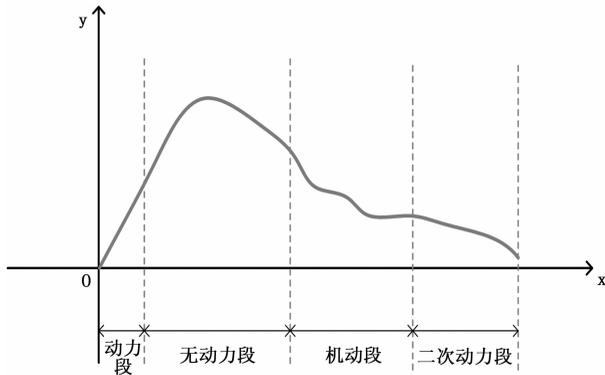


图 2 动力目标轨迹分段示意图

目标在发射坐标系下的点位坐标确定后, 按照发射坐标系到地心直角坐标系的转换关系对点位坐标进行转换, 设发射坐标系点位 (x_i, y_i, z_i) , 地心直角坐标系点位 (x_d, y_d, z_d) , 根据下式:

$$\begin{pmatrix} x_d \\ y_d \\ z_d \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} x_{of} \\ y_{of} \\ z_{of} \end{pmatrix} + R_x\left(\frac{\pi}{2} - \lambda_{of}\right) R_x(-\varphi_{of}) R_y\left(\frac{\pi}{2} + \theta\right) \begin{pmatrix} x_i \\ y_i \\ z_i \end{pmatrix} \quad (3)$$

其中: (x_{of}, y_{of}, z_{of}) 为发射原点的地心坐标, λ_{of} 、 φ_{of} 、 θ 分别为发射原点的经度、纬度、发射方位角 (即射向), $R_x(\theta)$ 、 $R_y(\theta)$ 、 $R_z(\theta)$ 值如下:

$$R_x(\theta) = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\theta & \sin\theta \\ 0 & -\sin\theta & \cos\theta \end{pmatrix}, R_y(\theta) = \begin{pmatrix} \cos\theta & 0 & -\sin\theta \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin\theta & 0 & \cos\theta \end{pmatrix}$$

$$R_z(\theta) = \begin{pmatrix} \cos\theta & \sin\theta & 0 \\ -\sin\theta & \cos\theta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

通过转换得到目标运动轨迹地心直角坐标系下的点位集 (x_d, y_d, z_d) , 但是由于采用算法及过程参数设置的关系, 不可避免的导致运动轨迹不平滑, 因此还需对点位数据集进行平滑处理以得到最终的运动轨迹模型, 本文采用的是 kalman 滤波方法进行数据平滑处理, 根据 (x_d, y_d, z_d) 的前两次测量值 z_1 和 z_2 求得 kalman 滤波的初值, 即有:

$$\hat{z}_{2/2}^T = [z_2, (z_2 - z_1)/T] \quad (4)$$

这里我们可以把数据集的不平滑点位数据看作噪声,

以 ω 表示, 假设它是平稳方差 σ_w^2 的零均值高斯变量, 可以得出协方差矩阵 $P_{2/2}$, 即为:

$$P_{2/2} = \begin{bmatrix} \sigma_w^2 & \sigma_w/T^2 \\ \sigma_w/T^2 & 2\sigma_w^2/T^2 \end{bmatrix} \quad (5)$$

按照滤波协方差矩阵初始值, 计算预测协方差矩阵, 可得:

$$\hat{P}_{k+1/k} = \Phi \hat{P}_{k/k} \Phi^T + Q_k \quad (6)$$

若已知 kalman 增益 K_{k+1} :

$$K_{k+1} = \hat{P}_{k+1/k} H^T (H \hat{P}_{k+1/k} H^T + R_{k+1})^{-1} \quad (7)$$

则可按照下式计算滤波协方差:

$$\hat{P}_{k+1/k+1} = (1 - K_{k+1} H) \hat{P}_{k+1/k} \quad (8)$$

由状态滤波值和状态转移矩阵, 按下式可计算状态预测值, 即为:

$$\hat{S}_{k+1/k} = \Phi_k \hat{S}_{k/k} + B_k u_k \quad (9)$$

由状态预测值、测量值和 kalman 增益就可以计算 kalman 滤波值, 即为:

$$\hat{S}_{k+1/k+1} = \hat{S}_{k+1/k} + K_{k+1} (z_{k+1} - H_{k+1} \hat{S}_{k+1/k}) \quad (10)$$

经过平滑处理后得到所需的目标轨迹 (x_i, y_i, z_i) 。如图 3 所示, 曲线代表采用模型构建的目标运动轨迹射程、高程变化趋势, 两条曲线分别代表原始数据和平滑处理后的数据, 从图中能够明显看到平滑处理的效果。

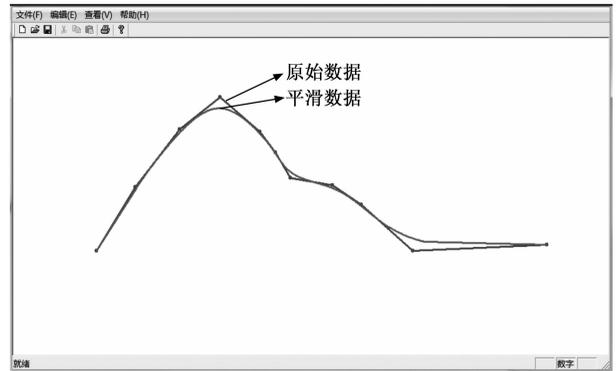


图 3 平滑处理前后数据曲线对比图

2 目标 RCS 特性模型构建

实际的空中目标跟踪测量过程中, 影响 RCS 测量结果的因素主要有目标尺寸、运动轨迹、观测角度、姿态变化等, 本文研究目标是针对导弹及炮弹弹丸这种形状简单的目标, 这类目标的姿态变化幅度通常较小, 变化平缓, 主要取决于观测角, 因此, 研究过程中姿态根据时刻射向简单处理, 不做过多考虑。RCS 特性模型构建主要分 3 个步骤: 1) 构建目标几何尺寸比例模型; 2) 利用计算方法获得目标静态 RCS 序列; 3) 根据目标运动轨迹、观测角等信息仿真获得目标动态 RCS 序列。

2.1 目标几何尺寸比例模型构建

目标几何尺寸比例模型构建主要采用计算机图形技术来实现, 本文采用的曲面造型技术, 即利用参数曲面来描

述目标的几何模型，具体采用的 B 样条曲线曲面的方法实现。B 样条曲线可以设计各种曲线曲面，是广泛使用的几何形状数学设计方法。其 k 次 B 样条曲线方程为：

$$P(t) = \sum_{i=0}^n p_i \cdot F_{i,k}(t), t \in [t_k, t_{n+1}] \quad (11)$$

式中 $p_i, i = 1, \dots, n$ 为控制顶点，按照顺序连接生成 B 样条多边形。 $F_{i,k}(t), i = 1, \dots, n$ 为 k 次 B 样条基函数， $F_{i,k}(t)$ 是一个 k 次分段多项式，其表达式：

$$F_{i,k}(t) = \frac{1}{n!} \sum_{j=0}^{k-i} (-1)^j \cdot c_{k+1}^j \cdot (t+k-j)^k, t \in [t_k, t_{n+1}] \quad (12)$$

式中，

$$c_{k+1}^j = [j! \cdot (k+1-j)!] / (k+1)! \quad (13)$$

利用 B 样条曲线方程构建的弹丸目标模型如图 4 所示。

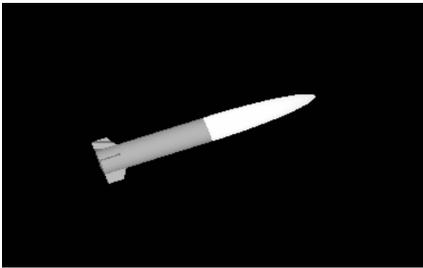


图 4 弹丸目标模型图

2.2 目标静态 RCS 序列

目标几何尺寸比例模型构建完成后，利用相关的计算方法可得出目标静态 RCS。本文研究的目标模型针对火炮弹丸目标和无翼导弹目标，因此在研究过程中，目标模型均可看作简单圆柱体弹身与锥体弹头或椭球体弹头的组合体，为便于研究，忽略弹体与弹头结合部位在计算中带来的增量值。

1) 圆柱体 RCS 计算：

圆柱体 RCS 可由物理光学法近似计算，在给定其几何尺寸参数的情况下，对于如图 5 所示的参数圆柱体，可根据式 (14) 求得。

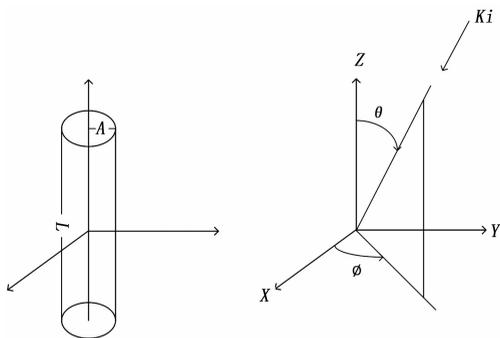


图 5 圆柱几何参数示意图

圆柱体 RCS 近似计算公式为：

$$\sigma_1 = KL^2 A \sin^2 \theta \cdot \frac{\sin^2(KL \cos \theta)}{(KL \cos \theta)^2} \quad (14)$$

式中， L 为圆柱长； A 为圆柱截面半径； λ 为波长； $K = 2\pi/\lambda$ 。

2) 锥体 RCS 计算：

特定时刻可将弹头近似看作无限锥体，当电磁波轴向射到弹头时，如图 6 所示，会产生尖顶散射，可根据式 (15) 求得 RCS。

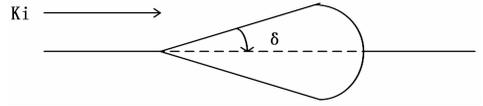


图 6 锥体柱几何参数示意图

无限锥体 RCS 近似计算公式为：

$$\sigma_2 = \frac{\lambda^2}{16\pi} \text{tg}^4 \delta \quad (15)$$

式中， λ 为波长； δ 为半圆锥角。

3) 椭球体 RCS 计算：

通常情况下，电磁波的射向并非沿着轴向，此时弹头 RCS 计算不能采用无限锥体方法计算，可采用几何光学法进行计算，椭球体几何尺寸参数如图 7 所示，根据公式 (16) 求得。

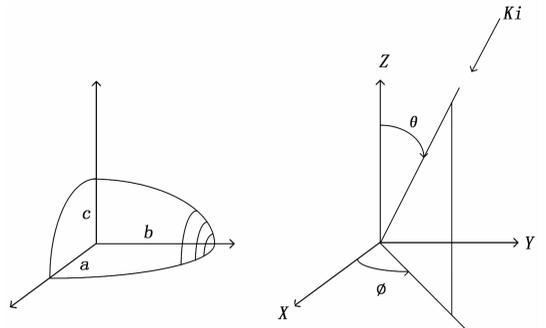


图 7 椭球几何参数示意图

椭球体 RCS 近似计算公式为：

$$\sigma_3 = \frac{\pi a^2 b^2 c^2}{(a^2 \sin^2 \theta \cos^2 \varphi + b^2 \sin^2 \theta \sin^2 \varphi + c^2 \cos^2 \theta)} \quad (16)$$

采用以上 3 种方法计算 RCS 时，默认目标材质为金属材料，其中在计算圆柱体 RCS 时需注意，入射波方向偏离表面较远时，由物理光学法得来的圆柱 RCS 计算公式失效，需要采用几何绕射理论来修正。最终获得的目标 RCS 近似值为：

$$\sigma_i = \sigma_{1i} + \sigma_{2i} \quad \text{或} \quad \sigma_i = \sigma_{1i} + \sigma_{3i} \quad (17)$$

以弹丸目标为例，以弹头方向为 0 度，弹尾方向为 180 度，建立弹丸外型、尺寸模型，计算不同观测角度下弹丸 RCS 值如图 8 所示。

2.3 目标动态 RCS 序列

目标静态 RCS 序列获得后，利用 VC 软件编程技术，根据目标运动轨迹、速度信息、测量雷达站址信息、雷达数据率等信息，仿真得到目标动态 RCS 序列，仿真流程如图 9 所示。

过程中，因研究针对的目标类型均可看作轴对称体，

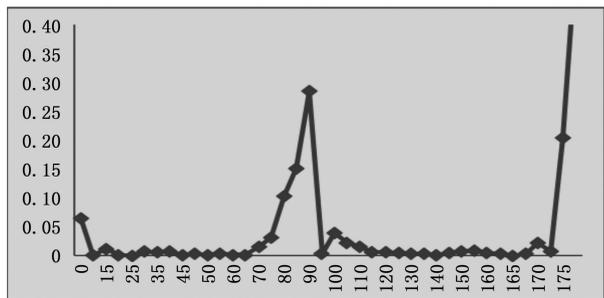


图 8 不同观测角度弹丸 RCS 计算值

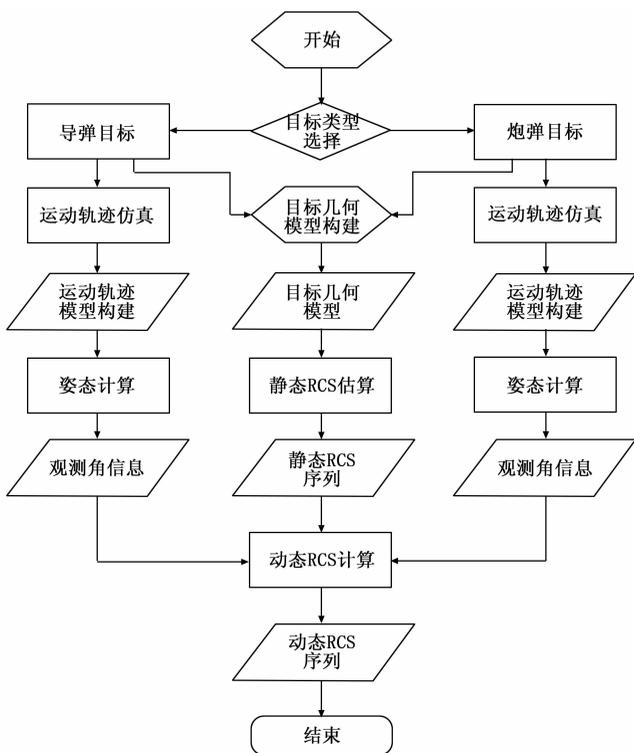


图 9 目标动态 RCS 获取流程示意图

所以在目标运动轨迹模型构建完成后, 根据目标运动轨迹变化趋势即可得到目标空中姿态, 结合测量雷达站址信息、电磁波射向等信息就可以得到对应时刻的射向角, 根据时刻、射向角就可以在 RCS 静态序列当作提取对应的 RCS 值, 作为该时刻的动态 RCS 值。仿真过程中未考虑实际过程中的大气、测量误差、环境噪声的干扰, 在实际应用当中, 应根据实际情况采集大气、环境噪声等加以添加应用, 使动态 RCS 更接近实际。图 10 为某弹丸目标利用上述方法获得的动态 RCS 仿真数据与该弹丸在实际飞行中的实测 RCS 数据。

从图 10 可以看出, 未考虑干扰因素的仿真数据和实际测量数据还是存在差异。由于弹丸目标本身特性决定了其雷达回波偏弱, 再者, 实际测量数据采用的是标准球 RCS 比较法获得, 测量本身即存在误差, 实测数据并不能作为绝对真值来考量。考虑的动态 RCS 仅作为仿真训练使用, 因此通过上述研究方法获得的目标动态 RCS 序列, 能够满

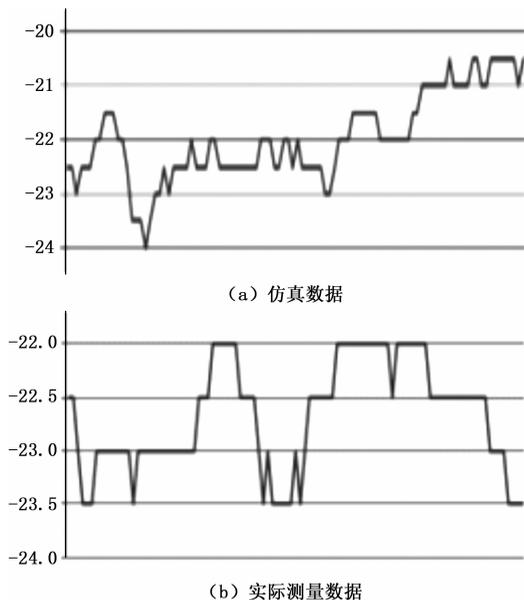


图 10 RCS 仿真数据与实测数据比较图

足为测量雷达仿真训练提供模拟目标的需求。

3 研究结果应用

目标的运动轨迹模型构建方法和 RCS 特性模型构建方法研究完成, 并通过仿真方式验证后, 如何将研究成果应用到测量雷达跟踪训练当中成为需要解决的问题。本文利用 VC 编程结合 OpenGL 绘图技术来实现对研究成功的运用。

3.1 运动轨迹模型构建方法应用

根据前文运动轨迹模型构建方法, 利用 Microsoft Visual C++ 程序开发平台, 开发轨迹模型设计软件, 用过软件将构建方法转化为实际运用, 软件流程如图 11 所示。软件界面如图 12 所示。

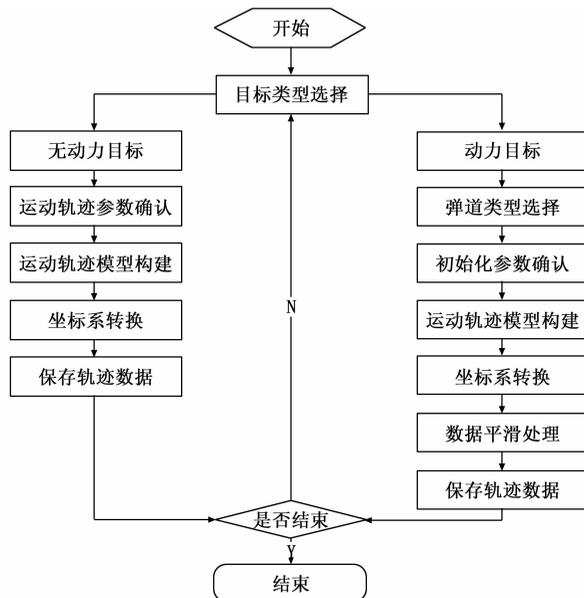
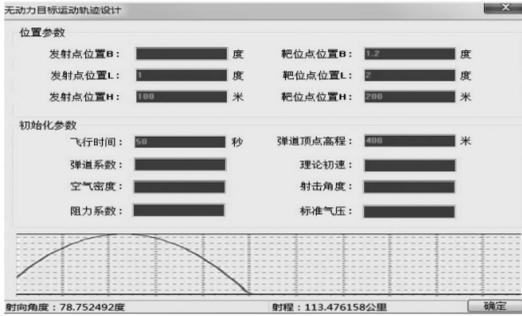
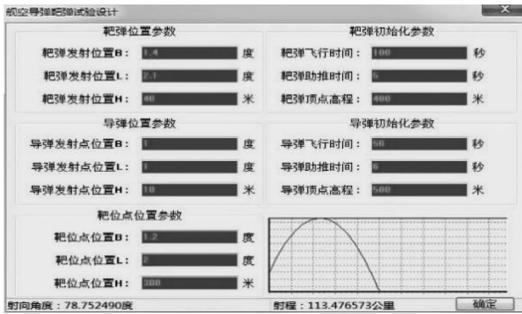


图 11 运动轨迹设计软件流程图



(a) 无动力轨迹设计界面



(b) 动力目标轨迹设计界面

图 12 目标运动轨迹设计软件界面

3.2 RCS 模型构建方法运用

根据前文目标 RCS 特性模型构建方法，利用 Microsoft Visual C++ 程序开发平台，开发目标 RCS 特性模型设计软件，通过软件将构建方法转化为实际运用，软件流程如图 13 所示。

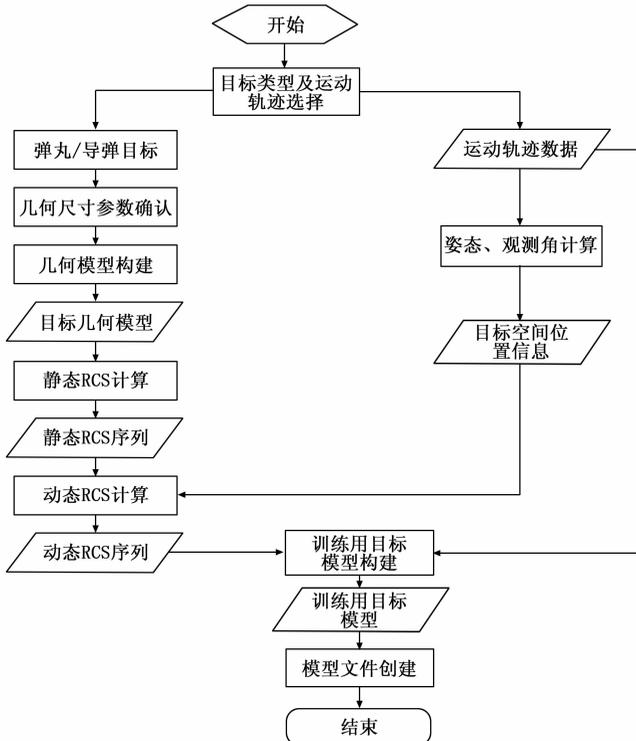


图 13 训练用目标模型设计软件流程图

4 训练方法在雷达装备上的实现

在模拟训练合作目标模型构建完成后，模型封装包如何与雷达结合，开展基于模拟目标、实际雷达装备的半实物仿真跟踪，是训练方法在雷达装备上得以实现的关键。通常的测量雷达都带有目标模拟器，可通过目标模拟器实现。本文方法在某型测量雷达上通过目标模拟器，很好实现了模型封装包如何与雷达结合。

目标模拟器包含波形生成控制、衰减控制、天线方向调制、多普勒频移、起伏调制以及数据收发处理等功能。其原理如图 14 所示。

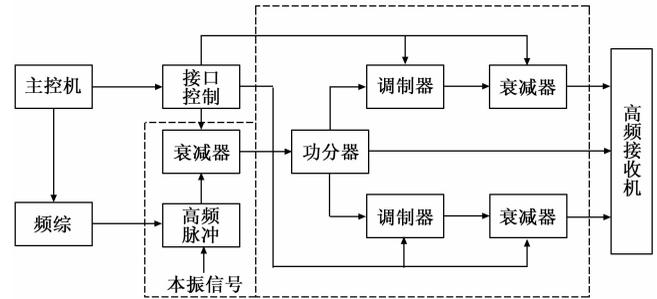


图 14 雷达目标模拟器原理图

实现过程为：首先，雷达数传系统将目标模型封装数据包加载，并发送给目标模拟器，目标模拟器对目标的模型数据包进行解析处理，生成目标的仿真回波，依据运动轨迹模型以及雷测装备站点坐标等信息，对仿真模拟回波进行多普勒频移、起伏调制等处理；然后，根据目标的运动轨迹模型、雷达波相对目标射向角度、距离波门位置、统一时间序列下的 RCS 特性等参数信息，对仿真模拟回波进行天线方向图函数调制、距离衰减、回波强度调制等处理；最后，将仿真模拟回波与雷达实际工作环境背景噪声回波叠加，在实际雷达装备上生成接近被模拟目标实际情况的雷达回波，供雷达装备在特定的时空域内搜索、发现、识别、捕获和跟踪测量，实现基于模拟目标实际雷达装备的实战化训练。具体在某型测量雷达上实际实现效果如图 15 所示。

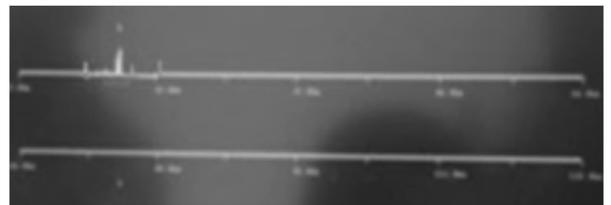


图 15 模拟目标在雷达上回波显示

5 结束语

为解决测量雷达实战化训练时，存在的由于缺少训练合作目标，导致训练真实性差、训练效果不理想等问题，本文通过研究，利用成熟的数学算法结合计算机仿真方式构建了针对炮弹弹丸和导弹类目标的运动轨迹模型、RCS

特性模型,在此基础上,利用 Microsoft Visual C++ 编程实现了目标运动轨迹模型和 RCS 特性模型实际应用,开发了测量雷达模拟训练目标设计软件。通过该软件设计的模拟目标,结合测量雷达目标模拟器,在测量雷达上实现了基于模拟目标的测量雷达实战化训练,该训练方法很好解决了测量雷达跟踪训练过程中缺少贴近实战的合作目标,训练效果不理想的问题,目前,该训练方法已经在某型测量雷达上投入使用,实际应用效果表明,该方法不但对测量雷达操作人员具有实战化训练价值,还可以根据实际跟踪测量任务中,目标的理论弹道、目标几何尺寸设计生成模拟目标,进行跟踪测量任务前的测量演练,演练对保证后续的实际跟踪测量任务具体显著效果,提高了测量任务成功率。研究成果还可推广至所有测量雷达装备上,对于测量雷达具有较好的实用价值。

参考文献:

- [1] 岳奎志. 作战飞机 RCS 的静态与动态特性分析 [M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2016.
- [2] 张 考. 飞行器对雷达隐身性能计算与分析 [M]. 北京: 航空工业出版社, 2013.
- [3] 桑建华. 飞行器隐身技术 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2013.
- [4] 李道奎. 导弹结构设计与分析 [M]. 北京: 科学出版社, 2019.
- [5] 余雄庆, 杨景佐. 飞行器隐身设计基础 [D]. 南京: 南京航空学院, 1992.
- [6] 林茂庸, 柯有安. 雷达信号理论 [M]. 北京: 国防工业出版社, 1981.
- [7] 黄培康, 等. 雷达目标特征信号 [M]. 北京: 宇航出版社, 1993.
- [8] 谢杨柳. 电磁轨道炮外弹道建模与仿真研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2008.
- [9] 刘付兵, 汪连栋, 等. 动态雷达目标 RCS 测量与分析 [J]. 南京: 雷达与对抗, 2005 (1): 6-16.
- [10] SKOLNZK M I. 雷达手册 (Second Edition) [M]. 王 军, 林 强, 等译. 北京: 电子工业出版社, 2003.
- [11] 张居凤. 弹道导弹目标动态雷达特性仿真与识别研究 [D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2004.
- [12] 呼 玮, 杨建军, 等. 弹道导弹被动段动态 RCS 建模与仿真 [J]. 电光与控制, 2010 (4): 22-25.
- [13] 牛 威, 杜 凯, 等. 空间目标 RCS 动态测量及特性分析 [J]. 飞行器测控学报, 2005, 24 (5): 44-48
- [14] 周 霞. 雷达目标动态 RCS 数据处理与仿真 [D]. 南京: 南京航空航天大学, 2012.
- [15] 李晓东, 白桂明等. 典型目标 RCS 的初步估算及仿真 [J]. 雷达科学与技术, 2006 (6): 332-334.
- [16] 何健雄. 空运动目标 RCS 仿真计算软件设计 [D]. 西安: 西安电子科技大学, 2005.
- [17] 许小剑. 雷达目标散射特性测量与处理技术 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2017.
- [18] 胡明春, 王建明, 等. 雷达目标识别原理与实验技术 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2017.
- [19] 黄培康. 雷达目标特性 [M] 北京: 电子工业出版社, 2005.
- [20] 王首勇, 万 洋, 等. 现代雷达目标检测理论与方法 [M]. 北京: 科学出版社, 2014.
- [7] BENGIO Y, DELALLEAU O, ROUX N. The Curse of Highly Variable Functions for Local Kernel Machines [J]. Advances in Neural Information Processing Systems, 2005, 18: 107-114.
- [8] HINTON G E, OSINDERO S, TEH Y W. A Fast Learning Algorithm for Deep Belief Nets [J]. Neural Computation, 2006, 18 (7): 1527-1554.
- [9] ERHAN D, COURVILLE A, BENGIO Y, et al. Why Does Unsupervised Pre-training Help Deep Learning [C] //Proceedings of the thirteenth international conference on artificial intelligence and statistics. JMLR Workshop and Conference Proceedings, 2010: 201-208.
- [10] SHANG C, YANG F, HUANG D, et al. Data-driven Soft Sensor Development Based on Deep Learning Technique [J]. Journal of Process Control, 2014, 24 (3): 223-233.
- [11] GOPAKUMAR V, TIWARI S, RAHMAN I. A Deep Learning Based Data Driven Soft Sensor for Bioprocesses [J]. Biochemical Engineering Journal, 2018, 136: 28-39.
- [12] 张琛琛. 基于多向核熵成分分析的间歇过程故障检测方法研究 [D]. 青岛: 中国石油大学 (华东), 2017.
- [13] VINCENT P, LAROCHELLE H, BENGIO Y, et al. Extracting and Composing Robust Features with Denoising Autoencoders [C] //Proceedings of the 25th International Conference on Machine Learning, 2008: 1096-1103.
- [14] VINCENT P, LAROCHELLE H, LAJOIE I, et al. Stacked Denoising Autoencoders: Learning Useful Representations in a Deep Network with a Local Denoising Criterion [J]. Journal of Machine Learning Research, 2010, 11 (12): 3371-3408.
- [15] LU C, WANG Z Y, QIN W L, et al. Fault Diagnosis of Rotary Machinery Components Using a Stacked Denoising Autoencoder-based Health State Identification [J]. Signal Processing, 2017, 130: 377-388.
- [16] LIANG P, SHI W, ZHANG X. Remote Sensing Image Classification Based on Stacked Denoising Autoencoder [J]. Remote Sensing, 2018, 10 (1): 16.
- [17] RANDEK J, MANDENIUS C F. On-line Soft Sensing in Upstream Bioprocessing [J]. Critical Reviews in Biotechnology, 2018, 38 (1): 106-121.
- [18] HU Y, MA H, SHI H. Enhanced Batch Process Monitoring Using Just-in-time-learning Based Kernel Partial Least Squares [J]. Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems, 2013, 123: 15-27
- [19] BIROL G, ÜNDEY C, CINAR A. A Modular Simulation Package for Fed-batch Fermentation; Penicillin Production [J]. Computers & Chemical Engineering, 2002, 26 (11): 1553-1565.

(上接第 139 页)