

文章编号:1007-2780(2015)01-0095-08

一种航迹跟踪雷达模拟系统软件设计与实现

苏爱东*,高维珉
(空军大连通信士官学校,辽宁 大连 116600)

摘要:为了满足高仿真度和交互性的跟踪雷达模拟要求,建立了一种基于 Visual C++ 的航迹跟踪雷达模拟软件。对该软件系统所采用的基础理论模型、软件结构设计和实现难点进行了分析解决。根据雷达目标散射统计结果,产生包含噪声的目标回波模型和杂波散射统计模型,构建了飞机的运动模型、建立批次和航迹滤波算法。对模拟系统进行了功能设计和工作流程介绍,着重介绍了软件实现中解决的技术难点,包括目标与山体遮挡的判断和目标回波合成技术。介绍了模拟系统的主界面和功能窗口。在通用计算机上软件运行结果表明,软件计算响应时间小于 0.1 s, A 显和 P 显图像更新流畅、无闪烁,可移植性好。山体杂波和飞机目标的回波逼真度高,软件运行流畅、实时性好,达到航迹跟踪雷达的目标检测、杂波滤除和航迹跟踪要求。

关 键 词:航迹跟踪;雷达模拟系统;软件实现;卡尔曼滤波
中图分类号:TN955.2 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/YJYXS20153001.0095

Software design and implement of flight track radar modeling system

SU Ai-dong*, GAO Wei-min
(Air Force Dalian Sergeant Communication School, Dalian 116600, China)

Abstract: In order to meet the need of a high-fidelity and interactivity of tracking radar simulation requirements, this paper sets up a kind of path tracking radar simulation software based on Visual C++. The basic theory, structure design and implementation of the software system are analyzed. According to the statistics results of the radar targets scattering, the paper presents the scattering statistical model containing the target echo model of noise and clutter, builds the aircraft's motion model, and sets up the batch and track filtering algorithm. Then, the simulation system for the functional design and working process is introduced, and emphatically the software implementation to solve the technical difficulties is introduced, including the goal and the mountain shade of judgment and the synthetic technology of the target echo. Finally, this paper presents the main interface and the function window of the simulation system. In general computer the software running results show that the calculating response time is less than 0.1 s, A scope and PPI image update smooth, flicker-free, good portability. The simulation of mountains clutter and targets is vivid, software running is fluent, and has good real-time operation, which indicates that the software system can meet the target detection, noise filtering and path tracking requirements of the path tracking radar.

Key words: flight track; radar modeling system; software implement; Kalman filter

1 引言

雷达是现代战争不可或缺的电子对抗设备,不断研制、更新雷达设备是提高武器装备现代化水平的必然要求。雷达模拟系统根据雷达的工作原理,可以产生高仿真度的雷达信号数据,在选定的工作模式下,能仿真雷达的主要功能、再现雷达的工作环境。雷达模拟系统可以作为雷达功能、性能的验证平台,不受场地、天气、时间的限制,缩短了研发过程、节约了研制经费,并可为雷达操作人员提供设施,降低了保障经费。而近年来,随着雷达对目标检测、识别能力需求的提高,以及雷达信号处理能力的发展,对雷达可视化、多功能、可扩展性等要求进一步提高^[1-2],开发先进的雷达模拟系统具有很强的现实需求。

面向雷达的模拟系统通常有硬件系统模拟和软件系统模拟两种实现方式。其中,基于硬件的雷达模拟系统,利用专用硬件开发平台的高速计算优势,模拟雷达系统的直接数字频率合成技术(DDS),产生仿真的雷达信号。如通过在专用的工业控制计算机上安装 VxWorks 嵌入式操作系统,构建了高速的雷达模拟器平台^[3]。而文献[4]专门设计了一种单脉冲体制下的中频雷达模拟器,可作为相控阵雷达等新体制雷达的调试机。一般来说,采用硬件平台需要在 DSP、FPGA 等专用芯片基础上,再加上显示、控制平台等,投入较大。而采用在通用计算机平台上开发的雷达模拟器具有开发周期短,可移植性、可扩展性好,成本低廉的优势,一直受到研究机构的关注。尤其是近年来,随着计算机处理速度的快速提高,存储空间的大幅增长,通用计算机完全可以支撑相当的功能计算,加之开发软件更具便利,基于软件开发的模拟系统不断增多。如文献[5]采用 MapX 作为开发环境,通过 MFC 支持各种独立控件。文献[6]在专门的地理信息系统基础上进行了二次开发,其模拟界面带有真实的地理信息环境。文献[7]侧重对干扰状态下的雷达进行了仿真。在仿真理论方面,文献[8]对雷达目标的运动信息、几何特征和物理参数进行了比较详细的介绍与分析,文献[9]从技术实现上对雷达散射截面积,检测概率和点迹凝聚现象进行了专门的讨论。

但总的来说,当前基于软件开发的雷达模拟系统侧重于对雷达显示界面的仿真,大多只能实现对雷达部分功能的模拟,开发对回波波形具有高仿真度和交互性的航迹跟踪雷达模拟软件系统仍然具有相当重要的意义。

本文将介绍一种基于 Visual C++ 开发环境下的地面通用航迹跟踪雷达模拟软件系统。该系统完全模拟雷达工作的基本过程,对目标和杂波环境进行了准确建模,通过界面上入口参数的更改实现人机交互,并根据操作指令快速、准确的更新雷达工作状态,返回波形等雷达参数。此外,模拟系统重点设计了目标航迹跟踪模块,实现对视野内目标的实时跟踪和记录。文章首先介绍了雷达模拟软件系统的任务目标和工作理论基础,接下来着重介绍了雷达参数设计和航迹跟踪的实现算法,并对系统实现中的技术难点和解决手段进行了回顾,最后对模拟软件的交互界面进行了说明。

2 模拟系统工作原理

对于航迹跟踪雷达模拟系统而言,其核心是回波信号的产生和目标航迹的获取。本节以飞机作为典型目标,生成了带有杂波的雷达回波信号,并通过构建运动方程和卡尔曼滤波方法获得飞机航迹。

2.1 飞机目标回波信号模型

真实的雷达可以提供目标多种特征信息,包括目标的距离、方位、高度等,更为先进的雷达甚至可以通过识别来提供目标的尺寸分类及姿态等信息。运动目标的回波特征极为复杂,为了简化模型,考虑到本文雷达中检测的目标为空中飞行的目标,主要提供目标的距离方位信息,受分辨率的限制,目标在雷达上看起来只有一个点,相对于地杂波而言为点状目标。

目标信号回波的功率可根据雷达方程估计

$$P_r = \frac{P_t G_t}{4\pi R^2} \cdot \frac{\sigma}{4\pi R^2} \cdot A_e, \quad (1)$$

式中:第一因子为雷达在距离 R 处以 P_t 为发射功率、采用增益为 G_t 的天线对目标进行照射的系数,第二因子为目标散射截面积为 σ 在距离雷达为 R 处散射回雷达的功率值,第三因子表示雷达天线孔径对目标回波功率的有效截获。

对于固定不变的雷达通常 P_t 、 G_t 及 A_e 都为常数, σ 和 R 为与目标有关的参数,表 1 为各类飞机的雷达散射截面(RCS, σ)的典型值^[10]。

表 1 各类飞机 RCS 典型统计平均值($\lambda=5\text{ cm}$)

Tab. 1 Statistic average RCS for different aircrafts (mm)

机 型	RCS 值(m^2)	
	鼻锥向 $\pm 45^\circ$	正侧向 $90^\circ \pm 5^\circ$
B-52 轰炸机	100	1 000
F-15 战斗机	4	400
F-16S 准隐身战斗机	0. 4	10
侦察飞机	0. 2	
B-2 隐身轰炸机	0. 1	
F-117 隐身战斗机	0. 02	0. 1
CM-30 隐身无人机	0. 001	0. 1

由于目标散射截面 σ 还与目标的姿态密切相关,如表 2 所示,因此在目标回波的散射仿真中需要加入因目标姿态而带来的目标散射截面积的变化。采用的方法是,根据目标当前的瞬时航向角、目标位置及雷达视线方向,算出目标相对雷达的瞬时方位角,然后查表求出目标的散射系数。

表 2 某飞机不同方位角 RCS 变化(15. 2 GHz)

Tab. 2 RCS of a plane for different azimuth angles (15. 2 GHz)

方位角/ $^\circ$	RCS/ $(\text{dB} \cdot \text{m}^2)$
0	2
30	-2
60	0
90	24
120	4
150	0
180	2

此外,为了使目标回波看起来更真实,还需要对目标回波每次加入一定的噪声,这里采用伪随机方法形成随机噪声。目标回波算法流程图如图 1 所示。

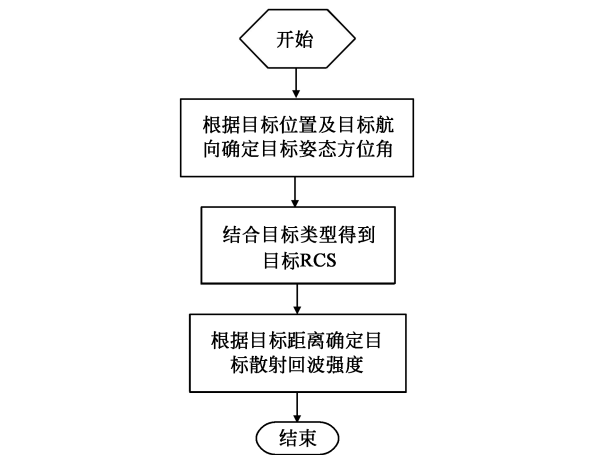


图 1 目标回波强度计算流程图
Fig. 1 Chart of target echoes calculation

2. 2 雷达杂波模型

雷达杂波指除了目标回波之外的回波干扰。主要包括地面、地物、山体等组成的地杂波,由海面、海浪组成的海杂波,由云、雨、雪、冰雹等组成的气象杂波,以及由鸟群、昆虫等形成的仙波。

杂波通常是分布在空间区域的,在雷达显示上显示为面状区域,此外还有诸如高楼、水塔等点状离散杂波,但更多的是面杂波。对于对空雷达来说,地面杂波主要由较远处高大山体的回波造成,点状离散杂波相对较少,由于山体通常伴随树木、灌木等各种植被,因此需要将树木等植被的杂波一并进行仿真。面杂波通常用单位面积的杂波横截面积(σ^0)描述面杂波,它是一个无量纲的量,常用 dB 来表示。

对于山体的杂波计算,如图 2 所示,其杂波回波由图中杂波散射区域组成,进一步分析可以发现,如果山体表面不垂直,则当脉冲到达山体的表面时,某时刻散射回波为该距离单元所覆盖的区域。

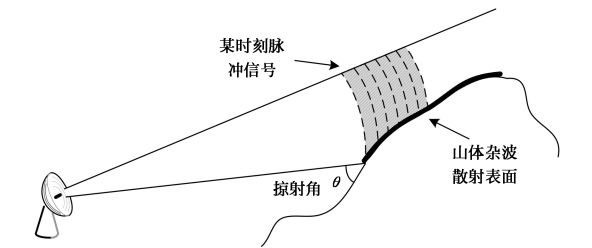


图 2 山体表面杂波形成示意图
Fig. 2 Clutter formation sketch map of mountain surface

因此其散射截面积应当为

$$\sigma = \sigma^0 R \theta_B T_p c / \cos \theta, \tag{2}$$

其中: σ^0 为山体表面地杂波散射强度,即单位面积散射截面积, R 为雷达到山体表面的距离, θ_b 为波束宽度, T_p 为脉冲持续时间, c 为光速, θ 为波束掠射角。

为了方便生成山体杂波,运用以下两种山体计算山体的杂波强度,如图 3 所示。其中,图 3 (a)是锥形山体,可用于生成点状杂波,在选择中可以通过点选的方式选择后放置到 PPI 上;图 3 (b)是块状山体,可用于生成面积型杂波。

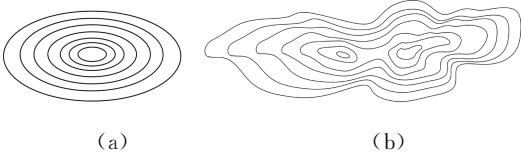


图 3 生成地杂波的两 种山体等高线模型

Fig. 3 Contour line model of two different mountains for formatting ground clutter

对于复杂的山体,山体表面通常存在遮挡,也即山体迎波面才回有回波后向散射,如图 3 所示。为了将被遮挡回波的影响考虑在内,需要研究山体表面是否存在遮挡问题。

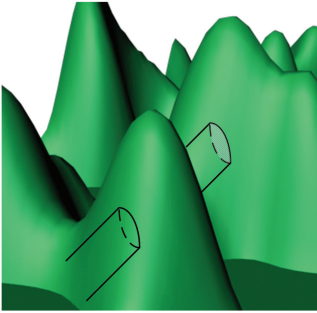


图 4 山体表面对雷达照射的遮挡

Fig. 4 Radar electromagnetic wave occluded by mountain surface

山体的杂波是由大面积面状山体表面形成的,考虑到雷达波长尺度要远小于山体尺度,因此可以采用几何光线追踪的算法。如果将山体表面离散化之后,山体表面则是由一个个面元组成,这里采用计算机图形学里的 Z-Buffer 进行计算,如图 4 所示,将山体表面按照延视线方向由远到近存入视区缓冲,则可见部分将不可见表面就会覆盖,这样就得到了山体表面哪些面元产生山体杂波。对产生杂波的面元按照式进行计算就得到相应的散射系数,图 5 为山体杂波形成流程图。

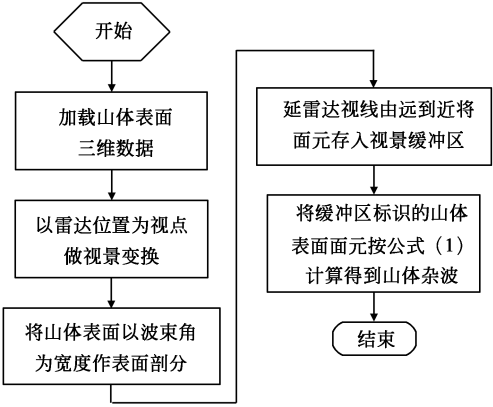


图 5 山体杂波形成流程图

Fig. 5 Chart of mountain clutter formation

而将目标回波和杂波回波按照时域模型进行叠加,即可得到完整的时域信号波形。

2.3 飞机目标运动轨迹建模

目标除了具有较为真实的 RCS 特性之外还需要有较为真实的运动特性。目标的运动轨迹主要包括直线运动、圆周运动以及由直线运动和圆周运动组合的混合运动。在二维坐标系统中,飞行目标运动轨迹方程为

(1)直线运动:

$$\begin{cases} V_{x_i} = V_{x_{i-1}} + a_{x_{i-1}} \cdot T \\ V_{y_i} = V_{y_{i-1}} + a_{y_{i-1}} \cdot T \\ V_{z_i} = V_{z_{i-1}} + a_{z_{i-1}} \cdot T \\ X_i = X_{i-1} + V_{x_{i-1}} \cdot T \\ Y_i = Y_{i-1} + V_{y_{i-1}} \cdot T \\ Z_i = Z_{i-1} + V_{z_{i-1}} \cdot T \end{cases} \quad (3)$$

(2)圆周转弯运动:

$$\begin{cases} a_{x_i} = a_{x_{i-1}} + \left(\frac{V_{i-1}^2}{R} \right)_x \cdot T \\ a_{y_i} = a_{y_{i-1}} + \left(\frac{V_{i-1}^2}{R} \right)_y \cdot T \\ a_{z_i} = a_{z_{i-1}} + \left(\frac{V_{i-1}^2}{R} \right)_z \cdot T \\ V_{x_i} = V_{x_{i-1}} + a_{x_{i-1}} \cdot T \\ V_{y_i} = V_{y_{i-1}} + a_{y_{i-1}} \cdot T \\ V_{z_i} = V_{z_{i-1}} + a_{z_{i-1}} \cdot T \\ X_i = X_{i-1} + V_{x_{i-1}} \cdot T \\ Y_i = Y_{i-1} + V_{y_{i-1}} \cdot T \\ Z_i = Z_{i-1} + V_{z_{i-1}} \cdot T \end{cases} \quad (4)$$

式中: a_{x_i} 、 a_{y_i} 、 a_{z_i} 和 V_{x_i} 、 V_{y_i} 、 V_{z_i} 分别为目标在第 i 个时刻的加速度和速度, V_i 为 i 时刻速度的模, R 为旋转半径的大小, T 为计算步长。

(3) 目标航迹

为了得到目标航迹, 目标的距离和方位需要进行采样并保存, 其采样周期为雷达扫描一周所需要的时间。当雷达首次获得目标的距离和方位信息之后, 因为目标的速度和运动方向未知无法预测目标的下一位置, 但根据大气层内飞行器的速度范围可确定目标在下一时刻环形区域。这时再在该区域搜索目标。根据先前的目标位置确定目标的速度和方位, 并根据估计误差, 就可对下一时刻目标位置进行预测。

航迹建立的基本步骤可以归纳如下:

- (1) 确定目标的航向与航速;
- (2) 目标位置的预测及平滑;
- (3) 确定目标位置的范围;
- (4) 搜索在预测区域出现的目标;
- (5) 回到步骤(1), 进行下一轮目标航迹的建立。

在目标位置的平滑步骤中通常采用卡尔曼滤波(Kalman filter)或 α - β 滤波。这里采用卡尔曼滤波^[11], 其主要工作步骤如下:

设目标 i 时刻的距离和方位分别为 r_i 和 θ_i , 待估计的径向速度和方位角速度分别为 $\dot{r}_i$ 和 $\dot{\theta}_i$ 。则矢量可写为

$$\mathbf{s}_i = \begin{bmatrix} r_i \\ \dot{r}_i \\ \theta_i \\ \dot{\theta}_i \end{bmatrix}. \quad (5)$$

观测方程可写作

$$\mathbf{x}_i = \begin{bmatrix} x_i \\ y_i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r_i + n_i \\ \theta_i + v_i \end{bmatrix} = \mathbf{C}\mathbf{s}_i + \mathbf{n}_i. \quad (6)$$

式中 n_i 和 v_i 分别为观测加性白噪声, 观测矩阵为

$$\mathbf{C} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}. \quad (7)$$

则信号模型如图 6 所示。

得到卡尔曼滤波方程组关系:

(1) 滤波方程

$$\hat{\mathbf{s}}_i = \mathbf{A}\hat{\mathbf{s}}_{i-1} + \mathbf{K}_k(\mathbf{x}_i - \mathbf{C}\mathbf{A}\hat{\mathbf{s}}_{i-1}). \quad (8)$$

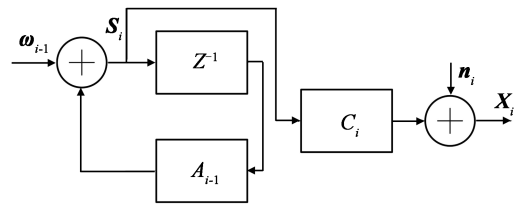


图 6 利用卡尔曼滤波进行平滑的信号模型

Fig. 6 Kalman filter model for signal smoothing

(2) 观测均方误差修正

$$\mathbf{P}'_i = \mathbf{A}\mathbf{P}_{i-1}\mathbf{A}^T + \mathbf{Q}_{i-1}. \quad (9)$$

(3) 增益方程

$$\mathbf{K}_k = \mathbf{P}'_k\mathbf{C}^T (\mathbf{C}\mathbf{P}'_k\mathbf{C}^T + \mathbf{R}_k)^{-1}. \quad (10)$$

(4) 均方误差

$$\mathbf{P}_i = (\mathbf{I} - \mathbf{K}_i\mathbf{C}_i)\mathbf{P}'_i. \quad (11)$$

(5) 信号误差协方差

$$\mathbf{E}(\omega_i\omega_i^T) = \mathbf{R}_i\delta_{ik}. \quad (12)$$

(6) 观测误差协方差

$$\mathbf{E}(n_i n_i^T) = \mathbf{Q}_i\delta_{ik}. \quad (13)$$

3 软件设计及实现

3.1 软件功能设计

航迹跟踪雷达模拟系统应实现的功能包括对战环境、雷达参数、目标及其运动轨迹的设置和更改, 模拟雷达工作状态、输出目标参数, 实时显示雷达扫描过程, 并输出目标波形。这就要求雷达模拟软件的界面应该具有平面位置显示器(P显, PPI)和A型显示器2个显示窗口, 并实时输出雷达图像。与此同时, 在这2个模拟显示窗口旁边还应有一个参数设置区域, 用来配置雷达的基本参数、工作环境、目标信息等。相应的, 系统后台主要完成雷达信号的数据产生和数据处理任务。数据产生模块将获取的目标参数、天线扫描速度、控制参数等传递给后台处理。图7简要说明了本雷达模拟系统的数据输入、处理和输出显示的工作流程。由于该软件系统计算及更新采用了类似于计算机图形学中的有关算法, 对计算的效率要求较高, 且雷达本身的显示实时性要求较强, 而 Visual C++ 开发的代码比较紧凑, 运行效率高, 所以采用 Visual C++ 作为开发环境。

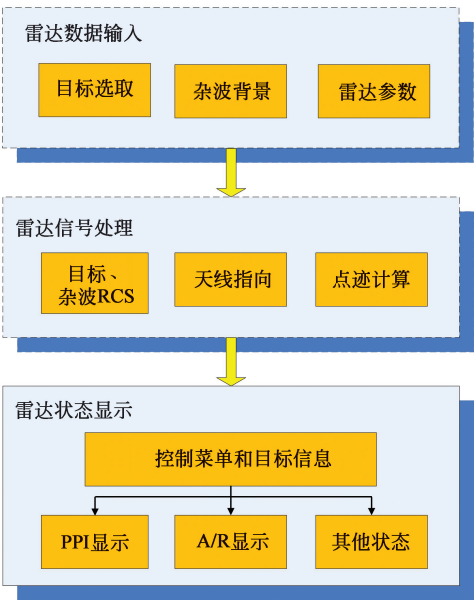


图 7 雷达模拟系统数据流程

Fig. 7 Data flow of radar modeling and training system

3.2 软件解决的技术难点

3.2.1 目标与山体遮挡的判断

当目标飞行路线被山体遮挡时,目标回波及飞行航迹均会消失。为了实现该功能,需要对目标当前位置进行隐显判断,由于目标的回波可以认为是一个散射点散射的,因此采用与山体杂波仿真时山体面元的隐显算法相同的 Z-buffer 算法进行判断。将目标作为一个“山体面元”一同进行山体面元隐显判断。如图 8 所示,将目标及山体的三维空间进行变换,使雷达位于视点的位置,这时山体及目标都将位于一个窗口之内,目标及山

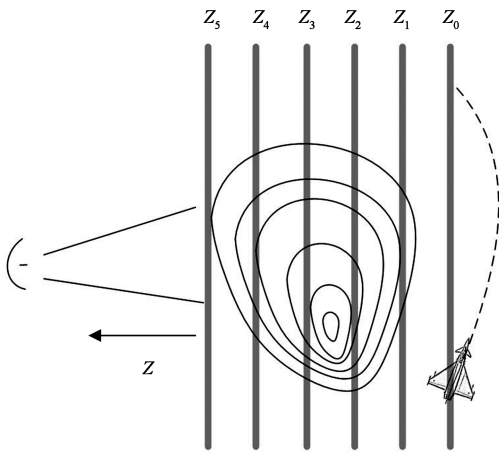


图 8 目标与山体遮挡的判断

Fig. 8 Judge of target occlusion by mountain

体将由远至近沿视轴分布,这个视轴就是 Z 轴。将山体离散为面元,将窗口的划分为栅格,山体的面元都将落在窗口相应的栅格内,将目标也作为一个面元,由远到近填充到窗口对应的栅格内,如沿 $Z_0 \sim Z_5$ 投影到窗口的栅格内,这时目标面元会被山体在 Z_2 及 Z_3 的某两个面元覆盖两次。因此,此时判断雷达的可见散射点时,只会得到有 Z_3 的山体面元,从而实现目标被山体遮挡的判断,其实现流程如图 9 所示。

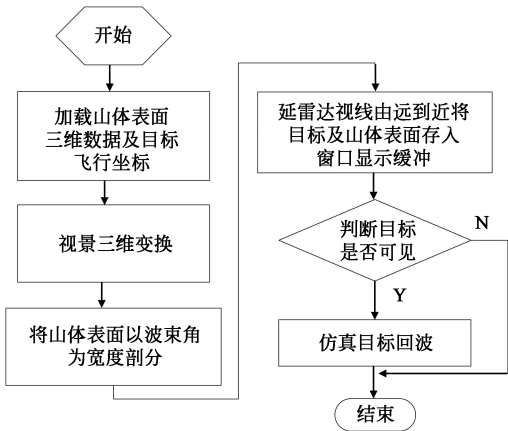


图 9 判断目标是否可见流程图

Fig. 9 Chart to judge target whether visible

3.2.2 目标回波合成技术

目标回波输入后,将其和产生的噪声、地面杂波进行数据合成。为了增强合成信号的逼真度,实际操作中不是采用简单叠加的方式实施,而是把数据分为 3 个区域:目标区、杂波区(如图 10 所示)和中间区。目标区和杂波区分别取各自的原始信号即可,但中间区域如果采用图 10(c)的叠加式处理就显得有些失真。这里采用系数加权的方式进行。即以目标为中心,向杂波区乘以一个 $e^{-\beta x}$, $1 < x < N_1$ 的系数因子。 β 是衰减因子, N_1 为中间区宽度,其具体数值根据经验确定。如图 10(d)所示是采用这种技术后的回波结果,显然和图 10(c)相较,真实度获得较大的提升。

3.3 软件界面设计

3.3.1 主界面设计

按照 3.1 节提出的设计要求,PPI 和 A 型显示器是雷达模拟软件的界面的主要部分。其中,PPI 显示是雷达操作手进行判读、分析的主要界面,因此,应把 PPI 显示器放置在整个界面的中间,并占据较大的面积。A 型显示器是显示了当

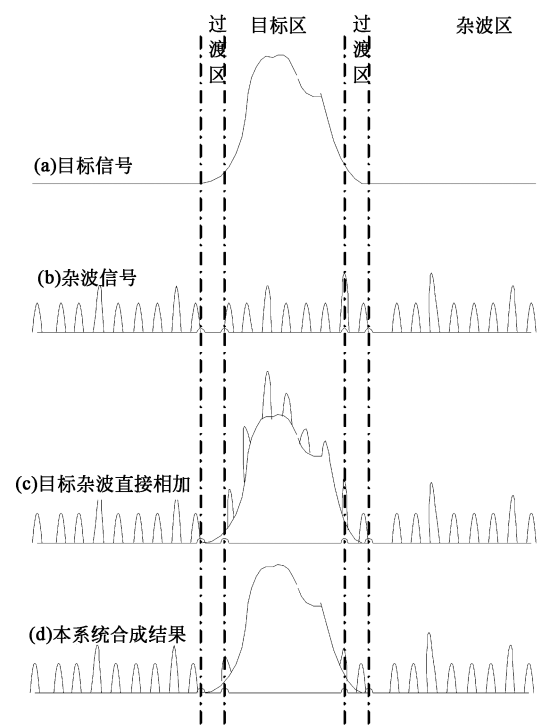


图 10 回波信号合成示意图

Fig. 10 Sketch diagram of target echoes and clutter signal synthesis

前方位的雷达回波,也是进行目标识别的主要窗口,将 A 型显示器放置在 PI 显示器的左侧靠下处。参数设置区域包括雷达参数设置和目标参数设置 2 个部分,设计有脉冲重复周期、占空比、天线扫描速度、检测门限、更新速度等可调参数。目标参数区域包括目标编号、RCS、速度和航迹控制点设计等可操作参数。其中,通过改变航迹控制点数、坐标就可以使得飞机目标在雷达工作时间内按照特定的航迹运动。

在软件设计中,设计了天线扫描余迹效果,即令天线在扫描过程中,上一个波束点在较短的时间内是逐渐变断、消失的。与此同时,A 型显示器输出的 1 维距离向的目标回波输出结果与 PPI 扫描过程是同步对应的。

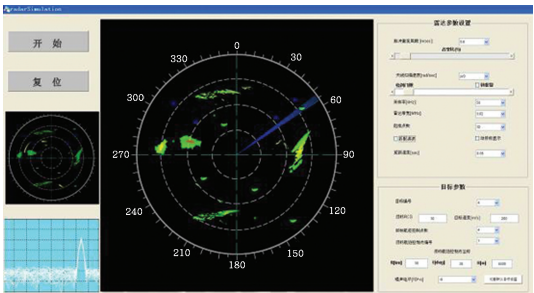


图 11 模拟系统软件主界面

Fig. 11 Judge of target occlusion by mountain

3.3.2 航迹跟踪界面

本系统作为飞机航迹跟踪雷达的平台,采用了卡尔曼滤波为基础的目标跟踪的算法,实现了对运动目标航迹的实时显示。如图 12 所示,3 个动目标运行轨迹各不相同。其中一个目标拖尾较长,表明该目标的速度较快,且在做转弯机动。而另外两个目标沿着不同的方向在以较低的速度做直线巡航。

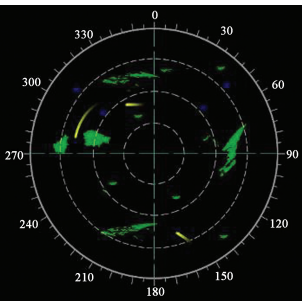


图 12 PPI 中实现运动目标航迹跟踪(黄色拖尾)

Fig. 12 Moving target track in PPI(yellow track)

3.4 软件测试

为了检验软件在不同硬件平台的计算机上的运行效果,现选择了两个较典型配置的通用计算机进行了运行测试,其参数和结果见表 3。测试表明,软件计算响应时间小于 0.1 s,A 显和 P 显图像更新流畅、无闪烁,符合软件移植及运行要求。

表 3 软件在不同配置计算机运行测试结果
Tab. 3 Result of software test in computers with different hardware

计算机	CPU	主频/GHz	GPU	内存	显存/MB	A 显	P 显	操作响应	计算响应/s
较高配置	Intel(R)4Core (TM)i5760 @2.80 G	2.6	NVIDIA GeForce GTS 250	4G	512	流畅	流畅	无卡滞	≤0.05
较低配置	DualCore Intel Pentium,	2.8	Intel(R)G41 Express Chipset	1G	128	流畅	流畅	无卡滞	≤0.1

4 结 论

为了满足高仿真度和交互性的跟踪雷达模拟要求,开发了一种基于 Visual C++ 的航迹跟踪雷达模拟软件。首先,根据雷达目标散射统计结果,产生包含噪声的目标回波模型和杂波散射统计模型,构建了飞机的运动模型、建立批次和航迹滤波算法。接着,对模拟系统进行了功能设计和工作流程介绍,着重介绍了软件实现中解决的技

术难点,包括目标与山体遮挡的判断和目标回波合成技术。最后,介绍了模拟系统的主界面和功能窗口。在通用计算机上软件运行结果表明,软件计算响应时间小于 0.1 s, A 显和 P 显图像更新流畅,可移植性好。达到航迹跟踪雷达的目标检测、杂波滤除和航迹跟踪要求。本软件还不能对山体等杂波进行任意设置,也没有对应数字高程信息的加载接口。下一步将针对这些问题提出通用数据模型和对应算法,进一步提高模拟系统仿真的真实性。

参 考 文 献:

- [1] 屈恒阔,张清源,阮友田.扫描成像跟踪激光雷达[J].中国光学,2012,5(3):242-247.
Qu H K, Zhang Q Y, Ruan Y T. Laser radar based on scanning image tracking [J]. *Chinese Optics*, 2012, 5(3): 242-247. (in Chinese)
- [2] 张清源,李丽,李全熙,等.直升机防撞激光雷达综合信息处理系统[J].中国光学,2013,6(1):80-87.
Zhang Q Y, Li L, Li Q X, et al. Comprehensive information processing system of helicopter anticollision laser radar [J]. *Chinese Optics*, 2013, 6(1): 80-87. (in Chinese)
- [3] 李焱.舰载光电全息显控系统[J].液晶与显示,2012,27(3):378-384.
Li Y. full information display and control system for shipborne optical electronic [J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2012, 27(3): 378-384. (in Chinese)
- [4] 邢福成,王波,孙保良,等.一种中频雷达模拟器的设计[J].海军航空工程学院学报,2010,27(3):267-270.
Xing F C, Wang B, Sun B L, et al. Design of one radar intermediate frequency simulator [J]. *Journal of Naval Aeronautical and Astronautical University*, 2010, 27(3): 267-270. (in Chinese)
- [5] 陈宁,李荣川,孙玉科. MapX 船舶电子海图与导航雷达模拟系统的开发[J].船舶工程,2012,34(3):50-53, 71.
Chen N, Li R C, Sun Y K. Development of simulation system of electronic chart and navigation radar based on MapX [J]. *Shipment Engineering*, 2012, 34(3): 50-53, 71. (in Chinese)
- [6] 陈丽平,杨峰,梁彦.雷达模拟器中可视化仿真技术的实现[J].计算机仿真,2010,27(4):324-328.
Chen L P, Yang F, Liang Y. Implement of visualized simulation technique in radar simulator [J]. *Computer Simulation*, 2010, 27(4): 324-328. (in Chinese)
- [7] 管行,李方圆,许稼,等.软件化雷达 P 显实时坐标变换与实现[J].雷达科学与技术,2013,11(1):71-76.
Guan H, Li F Y, Xu J, et al. Real-time coordinate transform of PPI raster display for software radar [J]. *Radar Science and Technology*, 2013, 11(1): 71-76.
- [8] 张坤峰,罗杰.雷达目标回波模拟研究与实现[J].舰船电子对抗,2012,35(3):81-84.
Zhang K F, Luo J. Research and realization of radar target echo simulation [J]. *Shipboard Electronic Countermeasure*, 2012, 35(3): 81-84. (in Chinese)
- [9] 郭佳意,马敏,任清安.岸基雷达模拟器的设计与实现[J].现代电子技术,2012,35(14):90-92, 94.
Guo J Y, Ma M, Ren Q A. Design and implementation of shore-based radar simulator [J]. *Modern Electronic Technique*, 2012, 35(14): 90-92, 94. (in Chinese)
- [10] 马浩,林学,成伟明.面向雷达模拟操作的雷达回波仿真[J].指挥信息系统与技术,2011,2(3):66-71.
Ma H, Lin X, Cheng W M. Radar echo signal simulation for radar operation training [J]. *Command Information System and Technology*, 2011, 2(3): 66-71. (in Chinese)
- [11] Song T L, Musicki D, Lee H. Point target probabilistic multiple hypothesis tracking [J]. *IET Radar, Sonar and Navigation*, 2011(5): 632-637.