

基于 DirectX 的弹头进动 3D 视景及 微多普勒特征仿真软件的实现

梁必帅^{1,2}, 李开明¹, 张群¹, 夏春云¹

(1. 空军工程大学信息与导航学院, 陕西西安, 710077; 2. 68205 部队, 宁夏中卫, 755100)

摘要 利用 VC++6.0, 基于短时傅里叶变换对弹头回波进行时频分析, 得到弹头回波微动信息, 利用兼容位图将回波微动信息进行可视化显示, 采用 DirectX 三维显示技术, 开发出弹头进动微多普勒特征分析及相应的弹头运动形态三维视景仿真软件。软件可提供弹头目标在不同雷达载频、自旋频率、锥旋频率、进动角等参数下的弹头理论微多普勒曲线, 以及对回波时频分析得出的微多普勒曲线, 实现了弹头目标三维视景与弹头微多普勒曲线的同步实时显示。软件运行表明: 该软件运行流畅、理论推导结果与通过时频分析进行仿真验证的结果一致, 软件对操作人员的响应迅速, 三维视景显示与微动显示相一致。

关键词 微多普勒曲线; 三维视景; 弹头目标; 进动; 微动

DOI 10.3969/j.issn.1009-3516.2013.04.015

中图分类号 TN957.52 **文献标志码** A **文章编号** 1009-3516(2013)04-0062-05

Realization of Simulation Software about 3D Visual System Based on DirectX and Micro-Doppler Feature of Warhead's Precession

LIANG Bi-shuai^{1,2}, LI Kai-ming¹, ZHANG Qun¹, XIA Chun-yun¹

(1. Information and Navigation College, Air Force Engineering University, Xi'an 710077, China;
2. Unit 68205, Zhongwei 755100, Ningxia, China)

Abstract: Micro-motion is one of the most significant characteristics that can distinguish warhead from decoys. A simulation software is built based on VC++6.0 in the paper, which can be used to analyze the warhead's micro-Doppler feature and display three-dimensional, visual view of warhead with micro-motion. The software can acquire micro-motion information from warhead echoes by means of STFT, in the meanwhile, the 3D visual view is obtained by DirectX technique. The software can provide both theoretical and practical micro-Doppler feature curves of warhead which vary from different radar carrier frequencies, spinning frequencies, conning frequencies, precession angle, et al. The software works smoothly and responds quickly. The theoretical micro-Doppler curves are consistent with micro-Doppler curves of the echoes by time-frequency analysis method, and the 3D view scenes coincide with the micro-motion greatly in display.

Key words: micro-Doppler curve; 3D view scenes; warhead; precession; micromotion

弹道导弹以速度快、威力大、打击精度高等突出优点, 成为最具威胁的攻击性武器之一^{[1]-2}。弹道

收稿日期: 2013-01-04

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(61172169); 国家自然科学基金青年基金资助项目(61201369; 61102109)

作者简介: 梁必帅(1981-), 男, 山西平遥人, 博士生, 主要从事雷达成像、雷达信号处理研究。

E-mail: liang1323957@126.com

导弹的中段弹道在外太空高速飞行,同时会释放几批轻重诱饵、箔条等无源及有源干扰^{[2]1-3},同时伴有发动机、燃料箱的残骸等,因而真假弹头目标识别成为反导的关键技术之一。

微动(Micro-Motion)^[3-6]是一种常见的运动形式,微动会对雷达回波产生调制形成微多普勒(micro-Doppler)效应,微动特征被认为是目标的特征之一,对目标识别具有重要意义。在防空反导领域,弹头目标的微动特征提取^[7-9]以及基于微动的二维、三维成像^[10-11]等研究已成为弹头目标识别的重要研究方向。

弹头在中段飞行因受到扰动而进动,其微动形式较为复杂,本文以 VC++6.0 为平台,采用 DirectX 技术,设计开发了弹头进动的运动视景及雷达回波微多普勒特征仿真软件。

1 弹头进动回波模型

为得到弹头进动微多普勒特征参数化描述与表征,需要对弹头进动进行建模分析。这里所述的进动是指“规则进动”,即轴对称刚体在绕对称轴自旋的同时,对称轴绕某确定轴所做的锥旋运动^{[12]27-28}。

假设其平动已被补偿,在图 1 中,雷达位于全局坐标系(U, V, W)的原点 Q 处,全局坐标系(U, V, W)在弹头的飞行过程中保持不动,参考坐标系(X, Y, Z)与全局坐标系平行,其原点 O 位于弹头质心,随弹头一起平动。本地坐标系(x, y, z)以弹头质心 O 为原点,以弹轴延伸方向为 Oz 轴,随弹头一起运动。图 1 中 ON 为锥旋轴, Oz 为自旋轴,进动过程中,弹头在绕 Oz 轴做自旋的同时绕 ON 轴作锥旋运动。点 O 在全局坐标系的方位角与俯仰角分别为 α 与 β 。在参考坐标系下,弹头自转角速度矢量 ω_s 的大小为 $\|\omega_s\| = \omega_s$,锥旋角速度矢量 ω_c 的大小为 $\|\omega_c\| = \omega_N$ 。

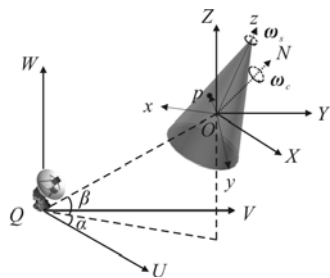


图 1 弹头进动空间位置关系示意图

Fig. 1 Warhead procession geometry position relationship

弹头在本地坐标系下的自旋角速度矢量为 $(0, 0, \omega_s)^T$,其在参考坐标系下的单位矢量为:

$$\omega'_s = (\omega'_{sX}, \omega'_{sY}, \omega'_{sZ})^T = R_{\text{int}} \omega_s / \|\omega_s\| = (\cos\beta_z \cos\alpha_z, \cos\beta_z \sin\alpha_z, \sin\beta_z)^T \quad (1)$$

式中: α_z 和 β_z 分别为自旋轴(右旋方向)在参考坐标系下的方位角与俯仰角; R_{int} 为本地坐标系到参考坐标系的欧拉旋转矩阵^[13]。

设 $\Omega_s = \|\omega_s\| = \omega_s$,则 t 时刻自旋旋转矩阵为:^[13]

$$R_s = \exp(\Omega_s \omega'_s t) = I + \omega'_s \sin(\Omega_s t) + \omega'_s{}^2 [1 - \cos(\Omega_s t)] \quad (2)$$

式中 ω'_s 为 ω'_s 对应的斜对称阵。

同理,则 t 时刻锥旋旋转矩阵可写为:^[13]

$$R_c = \exp(\Omega_c \omega'_c t) = I + \omega'_c \sin(\Omega_c t) + \omega'_c{}^2 [1 - \cos(\Omega_c t)] \quad (3)$$

式中: $\Omega_c = \|\omega_c\| = \omega_N$; ω'_c 为 ω'_c 的斜对称阵。对于弹头表面某一点 p ,在本地坐标系下坐标为 $r_p = (x_p, y_p, z_p)^T$ 。则经过自旋和锥旋之后, t 时刻 p 点在参考坐标系下的坐标为:

$$r_t = R_c R_s R_{\text{int}} r_p \quad (4)$$

散射点 p 到雷达的距离为:

$$R_p(t) = \|\mathbf{QP}\| = \|\mathbf{r}_0 + R_c R_s R_{\text{int}} r_p\| \quad (5)$$

当雷达发射单频信号:

$$p(t) = \exp(j2\pi f_c t) \quad (6)$$

式中: f_c 为载波频率; t 为时间。

p 点回波经基带变换后为:

$$s_b(t) = \sigma_p \exp[j2\pi f_c (2R_p(t)/c)] \quad (7)$$

式中: c 为光速; σ_p 为 p 点的散射系数; t 为时间。

p 点的理论微多普勒频率为:

$$f_{\text{MD}} = \frac{2f_c}{c} \frac{d(R_p(t))}{dt} \quad (8)$$

利用差分法计算式(8)即得到 p 点的理论微多普勒频率,对式(7)作时频分析即可得到 p 点回波的回波微多普勒信息。

2 软件开发

软件要实现弹头进动的实时动画,若采用 Matlab 软件,由于其代码效率及渲染效率不高,特别是图形硬件加速功能不好,严重影响了回波仿真及时频分析的计算速度,同时影响实时动画的连续性,使软件运行失去实时性。因此,这里采用运行效率较高的 C++ 语言(VC++6.0)进行开发,并利用目前较为流行的 PC 三维动画 DirectX 技术实现其三维视景动画^[14]。

2.1 软件模块划分及主要模块功能实现

软件主要实现以下功能:①参数输入及控制;②回波计算及分析;③三维场景实时显示等功能。

软件所包括的功能模块及相互关系见图2。

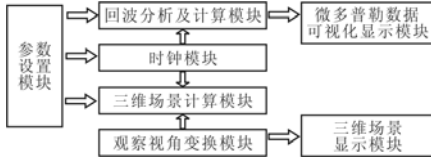


图2 软件模块划分

Fig.2 The software block partition

参数设置模块主要完成操作人员对参数的输入,同时将相应的数据传递到对应的模块。其中,自旋频率、进动角、锥旋频率和雷达视线与锥旋轴夹角4个参数的变化对微多普勒曲线及三维场景都会带来变化,但雷达载频的变化只会对微多普勒曲线产生变化。

微多普勒数据可视化模块,主要实现对弹头理论微多普勒及回波时频分析得到的微多普勒信息显示的功能。采用兼容位图显示短时傅里叶分析得到的微多普勒数据是二维数据。软件设立“观察视角变换模块”,实现对弹头进动场景的全方位观察。

2.1.1 回波分析计算模块的实现

采用1个弹顶散射点和2个弹底散射点散射模型计算弹头回波。微多普勒理论计算与回波计算包含:自旋频率、锥旋频率、进动角、雷达视线与锥旋轴夹角、雷达载频等5个输入参数。理论微多普勒和回波微多普勒计算应包含3个散射点输出,其逻辑关系见图3。

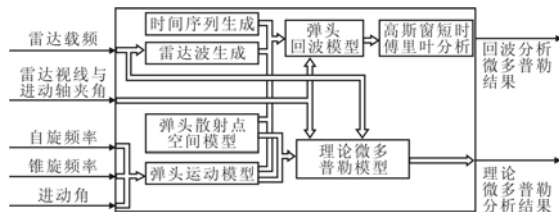


图3 回波计算模块输入输出及子模块逻辑关系

Fig.3 Sub-blocks, input and output of echoes computation block

理论微多普勒计算的主要步骤如下:①根据式(2)计算时间序列对应的自旋旋转矩阵 \mathbf{R}_s ;②根据式(3)计算时间序列对应的锥旋旋转矩阵 \mathbf{R}_c ;③根据雷达视线与进动轴夹角、弹头进动角和锥旋频率计算 \mathbf{R}_{mit} ;④根据式(4)计算散射点的旋转矢量 \mathbf{r}_i ;⑤根据式(8)利用差分法计算弹头散射中心的理论微多普勒频率;⑥将计算得到的理论微多普勒曲线显示。

回波分析及微多普勒计算的主要步骤如下:①根据式(2)计算对应时刻的自旋旋转阵 \mathbf{R}_s ;②根据

式(4)计算对应时刻的锥旋旋转阵 \mathbf{R}_c ;③根据雷达视线与进动轴夹角、弹头进动角和锥旋频率计算 \mathbf{R}_{mit} ;④根据式(7)计算散射点的回波;⑤利用高斯窗短时傅里叶时频分析得到散射点回波微多普勒频率;⑥以兼容位图方式将时频分析结果进行显示。

2.1.2 三维场景计算模块的实现

三维场景中弹头的进动是通过 Direct3D 的3次旋转命令实现的,见图4:(a)弹头几何模型先绕自旋轴 Oz 旋转一个自旋角 $\Omega_s t$, (b)再将自旋轴以 O 为轴心转动 θ (进动角), (c)而后绕锥旋轴 ON 旋转一个锥旋角 $\Omega_c t$ 。

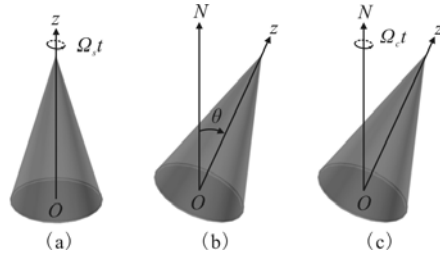


图4 弹头几何模型进动的实现

Fig.4 The process of warhead procession

2.2 软件界面设计

图5为弹头进动三维场景计算实现的流程图。

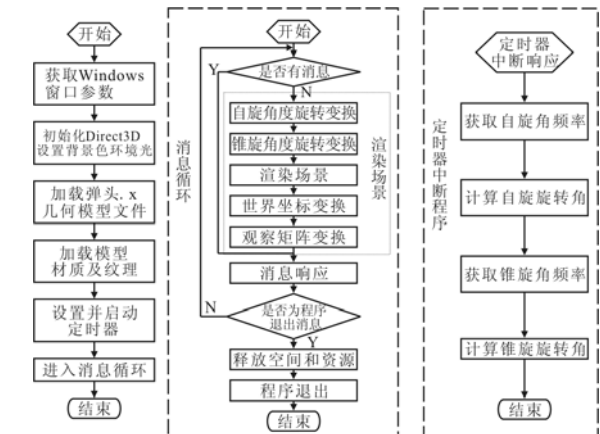


图5 弹头进动三维场景计算流程图

Fig.5 Three-dimensional view calculation flowchart of warhead procession

图6为仿真软件的界面,左上方为弹头目标的理论微多普勒曲线,左侧中部为弹头目标回波分析的微多普勒曲线,左下方为参数设置面板,包括弹头的自旋频率、锥旋频率、进动角、锥旋轴与雷达视线的夹角、雷达载频5个参数设置。右侧为弹头运动的三维场景显示。

当操作人员在三维视景中按下左键拖动鼠标时,可对目标进行不同视角的观察,当滚动鼠标滚轮时可对弹头进行不同远近的观察。如图7所示,弹头设置为半透明,便于操作人员对弹头整体及内部进行观察。

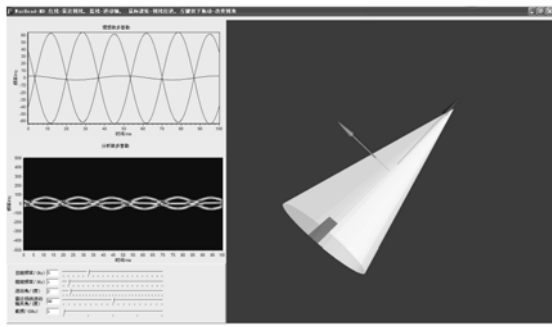


图 6 弹头进动三维场景显示流程图

Fig. 6 The interface of the simulation software

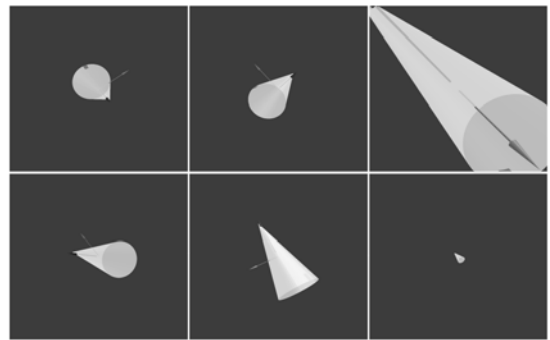


图 7 弹头不同视角和不同远近的观察

Fig. 7 Views of warhead in different angles and range

3 仿真软件运行

在高低配置的计算机上运行进行测试,结果

表明:该软件适应性较好,响应迅速,三维视景运行流畅,三维视景变换响应(指对观察角度、视点远近等操作的响应)迅速,微多普勒计算时长适当,其测试结果见表 1。

表 1 软件不同硬件配置测试结果

Tab. 1 The test effects in different hardware configuration

计算机	CPU	主频/GHz	内存/GB	GPU	显存/MB	三维视景	三维视景变换操作响应	微多普勒计算响应/s
高配置	Intel(R)4Core (TM)i5760 @2.80G	2.8	4	NVIDIA GeForce GTS 250	512	流畅	流畅	≤0.1
低配置	DualCore Intel Pentium	2.7	1	Intel(R)G41 Express Chipset	256	流畅	流畅	≤0.2

设置不同参数检验软件的运行状况。设置弹头自旋频率为 1.0 Hz,进动角为 0°,弹头锥旋频率为 0 Hz,雷达视线与锥旋轴夹角为 90°,雷达载频为 2.0 GHz,仿真得到的弹头微多普勒曲线及三维视景见图 8。可以看出,回波时频分析得到的微多普勒频率与其理论值是一致的。

及三维视景见图 9。可以看出,回波时频分析后得到的微多普勒频率与其理论值在周期和最大频率及最小频率上基本一致。

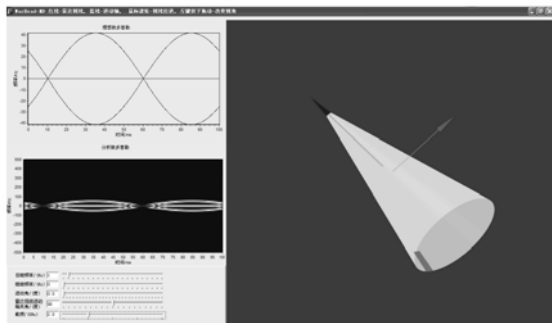


图 8 自旋弹头无进动的微多普勒仿真

Fig. 8 The micro-Doppler simulation of spinning warhead without precession

设置弹头自旋频率为 4 Hz,进动角为 1°,弹头锥旋频率为 1 Hz,雷达视线与锥旋轴夹角为 90°,雷达载频为 2.0 GHz,仿真得到的弹头微多普勒曲线

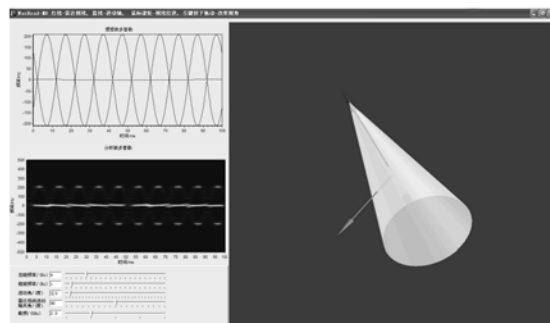


图 9 低速自旋弹头进动的微多普勒仿真

Fig. 9 The micro-Doppler simulation of spinning warhead with low rotational speed

设置弹头自旋频率为 10 Hz,进动角为 5°,弹头锥旋频率为 5 Hz,雷达视线与锥旋轴夹角为 90°,雷达载频为 1.0 GHz,仿真得到的弹头微多普勒曲线及三维视景见图 10。从图 10 的结果可以看出,在锥旋及自旋频率较高时,其回波时频分析得到的微多普勒频率与其理论值基本一致。

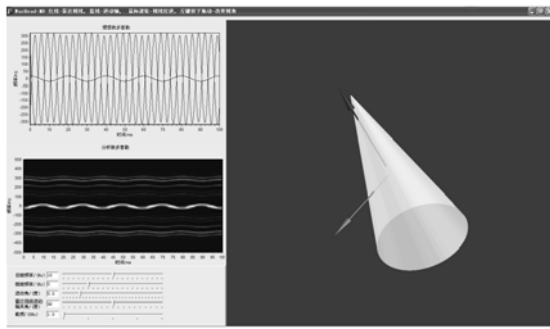


图10 高速自旋弹头进动的微多普勒仿真

Fig. 10 The micro-Doppler simulation of spinning warhead with high rotational speed

4 结语

本文利用 VC++6.0 环境,基于 DirectX 技术,开发了弹头目标进动的微多普勒仿真软件,该软件实时性较好,运行流畅,使用方便,可为操作人员提供直观的弹头运动形态,并同时得到理论微多普勒和回波时频分析后的微多普勒。该软件可为研究弹头微多普勒的初学者提供学习平台,也可作为进动目标微动研究的仿真验证平台。

参考文献(References):

- [1] 周万幸. 弹道导弹雷达目标识别技术[M]. 北京:电子工业出版社, 2011.
ZHOU Wanxing. Ballistic missile radar targets identification technology [M]. Beijing: Publishing house of electronics industry, 2011. (in Chinese)
- [2] 王国雄. 弹头技术[M]. 北京:宇航出版社, 2005.
WANG Guoxiong. Warhead technology [M]. Beijing: Aerospace press, 2005. (in Chinese)
- [3] Lei JiaJin. Pattern recognition based on time-frequency distributions of radar micro-Doppler dynamics [C]//IEEE proceedings of the sixth international conference on SNPD/SAWN. [S.l.]: IEEE press, 2005:14-18.
- [4] Chen V C, Li F, SHo S, et al. Analysis of micro-Doppler signatures[J]. IEE proc radar, sonar, navig, 2003, 150(4):271-276.
- [5] Gray J E, Addison S R. Effect of non-uniform target motion on radar backscattered waveforms [J]. IEE proceedings on radar and signal processing, 2003, 150(4):262-270.
- [6] 张群, 罗迎, 何劲. 雷达目标微多普勒效应研究概述 [J]. 空军工程大学学报:自然科学版, 2011, 12(2): 22-26.
ZHANG Qun, LUO Ying, HE Jin. Review of researches on micro-Doppler effect of radar targets [J]. Journal of air force engineering university; natural science edition, 2011, 12(2):22-26. (in Chinese)
- [7] 关永胜, 左群声, 刘宏伟, 等. 空间进动目标微动参数估计方法[J]. 电子与信息学报, 2011, 33(10), 2427-2432.
GUAN Yongsheng, ZUO Qunsheng, LIU Hongwei, et al. Micro-motion parameters estimation of space precession targets[J]. Journal of electronics & information technology, 2011, 33(10), 2427-2432. (in Chinese)
- [8] 邹小海, 艾小锋, 李永祯, 等. 基于微多普勒的圆锥弹头进动与结构参数估计[J]. 电子与信息学报, 2011, 33(10), 2413-2419.
ZOU Xiaohai, AI Xiaofeng, LI Yongzhe, et al. Precession and structural parameter estimation of the cone-shaped warhead based on the micro-Doppler[J]. Journal of electronics & information technology, 2011, 33(10), 2413-2419. (in Chinese)
- [9] 刘进, 王雪松, 马梁, 等. 空间进动目标动态散射特性的实验研究[J]. 航空学报, 2010, 31(5): 1014-1023.
LIU Jin, WANG Xuesong, MA Liang, et al. Experimental study on dynamic scattering properties of space precession target[J]. Acta aeronautica & astronautica sinica, 2010, 31(5): 1014-1023. (in Chinese)
- [10] 王虹现, 梁毅, 邢孟道, 等. 基于稀疏信号表示的空间碎片成像[J]. 宇航学报, 2011, 32(10): 2194-2199.
WANG Hongxian, LIANG Yi, XING Mengdao, et al. Sparse signal representation-based space debris imaging[J]. Journal of astronautics, 2011, 32(10): 2194-2199. (in Chinese)
- [11] Wang Qi, Xing Mengdao, et al. High-resolution three-dimensional radar imaging for rapidly spinning targets[J]. IEEE transactions on geoscience and remote sensing, 2008, 46(1): 22-30.
- [12] 刘延柱. 陀螺力学[M]. 北京:科学出版社, 2009.
LIU Yanzhu. Gyroscopic dynamics[M]. Beijing: Science press, 2009. (in Chinese)
- [13] Chen V C, Fayin Li, Ho S-S, et al. Micro-Doppler effect in radar: phenomenon, model, and simulation study[J]. IEEE trans on AES, 2006, 42(1): 2-21.
- [14] 王德才. DirectX 游戏编程基础教程[M]. 北京:机械工业出版社, 2010.
WANG Decai. DirectX game programming basic course [M]. Beijing: China machine press, 2010. (in Chinese)

(编辑:徐楠楠)