

SAR 轮式和履带式车辆三维微多普勒建模 与回波仿真研究*

骆宇峰, 陈华杰*

(杭州电子科技大学 通信信息传输与融合技术国防重点学科实验室, 浙江 杭州 310018)

摘要: 机载合成孔径雷达(SAR)回波数据是机载SAR信号处理的基础,然而靠飞行试验得到的实测数据价格昂贵且不灵活。针对这一问题,提出了一种可以在实验室中对机载SAR微动目标回波数据进行仿真的方法。首先,叙述了SAR运动点目标回波数据模拟的理论模型,提出了三维SAR运动点目标回波数据模拟的方法,并根据轮式和履带式车辆的结构特征与运动特征分别建立了两者的理论模型,给出了模拟实验的结果;然后,通过时频分析对不同车辆在不同速度情况下的回波信号进行了分析比较。仿真和研究结果显示:该理论建模方法正确有效,能够很好地用于在实验室中实现对机载SAR微动目标回波数据的仿真,回波信号的微多普勒特性为已有的目标识别方法提供了重要辅助条件。

关键词: 合成孔径雷达; 动目标; 轮式车辆; 履带式车辆; 微多普勒; 回波仿真

中图分类号: TN955 **文献标志码:** A

文章编号: 1001-4551(2012)12-1494-04

3D micro-doppler modeling of SAR wheeled and tracked vehicle and echo simulation

LUO Yu-feng, CHEN Hua-jie

(Key Laboratory of Fundamental Science for National Defense-Communication Information
Transmission and Fusion Technology, Hangzhou Dianzi University, Hangzhou 310018, China)

Abstract: Echo data of airborne synthetic aperture radar (SAR) is the foundation of airborne SAR signal processing, however the measured data from air trials is expensive and inflexible. Aiming at this problem, a method that can simulate an airborne SAR echoes data of micro moving target in the laboratory was proposed. Firstly, the theoretical model of SAR moving point target echoes data simulation was presented, and the method of 3-D SAR echoes data simulation was proposed. According to the structural characteristics and motion features of wheeled and tracked vehicles, two theoretical models were built and the results of simulation experiments were presented. Then the echo signals of different vehicles with different speeds were compared by using time-frequency analysis. The results indicate that this theoretical model is correct, and which can simulate airborne SAR echo data of micro moving target in laboratory, the micro-doppler characteristics analysis of echo data provides important supplementary conditions for existing target recognition methods.

Key words: synthetic aperture radar(SAR); moving target; wheeled vehicle; tracked vehicle; micro-doppler; echo simulation

0 引 言

合成孔径雷达(SAR)是一种全天候、全天时利用微波对地面目标进行监视的遥感技术,是获取地面信息的重要手段,在军事和民用领域获得了越来越广泛

的重视和应用。在现代战争中,实时地识别探测到的地面动目标具有十分重要的意义,而对轮式与履带式车辆目标的识别是这个领域的难点之一,其主要原因在于两类目标回波的多普勒频率大致相同,也就是在二维平面上的运动对回波调制大致相同,但研究者经

收稿日期: 2012-08-01

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(60905016)

作者简介: 骆宇峰(1987-),男,浙江诸暨人,主要从事SAR微多普勒特征分析方面的研究. E-mail: luoyufeng06061111@163.com

通信联系人: 陈华杰,男,副教授,硕士生导师. E-mail: chj247@hdu.edu.cn

过研究和实测发现在轮式和履带式车辆目标回波的微多普勒频率成分中^[1-4]尚存在一定的差别,可以作为区分这两类目标的特征。为了能进行微多普勒分析,就需要有SAR回波数据。

在试验室中,研究者若采用实际场地布景进行SAR仿真,将需要建立很大的实验室,并且缺乏灵活性,若利用计算机对SAR回波进行仿真,将可在试验室内方便地获取SAR回波数据。

目前,国内外关于微动目标雷达回波信号仿真已有了广泛的研究,其中有的研究是在普通雷达模式下,根据理想散射点模型建立了三维运动模型,如直升机旋叶、动物、行人三维运动模型^[5]和轮式履带式车辆三维运动模型的建立,此外,根据散射中心模型也可以建立三维运动模型,如舰船运动模型^[6]的建立,散射中心模型的建立需要有比较精细的目标CAD模型和专业的电磁散射计算软件,受条件所限在此无法进行。然而针对SAR微动目标回波信号仿真还主要集中在二维运动点目标^[7-11]的仿真,对于建立三维运动目标模型的研究还比较少,但是实际目标的运动模式往往都是三维的。

本研究根据SAR理想散射点目标典型运动模型,结合三维运动目标模型,建立不同类型的轮式和履带式车辆三维运动理论模型,然后计算SAR原始回波数据,最后通过时频分析进行比较。该方法有利于对具有特殊运动方式的目标进行仿真模拟。

1 机载SAR回波信号模型

合成孔径雷达发射信号是一串线性调频脉冲:

$$s(t) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} p(t - n \cdot PRT) \quad (1)$$

$$p(t) = \text{rect}\left(\frac{t}{T_r}\right) e^{j\pi K_r t^2} e^{j2\pi f_c t}$$

式中: PRT — 脉冲重复周期, T_r — chirp信号持续时间, $\text{rect}(\cdot)$ — 矩形信号, f_c — 发射信号载频, K_r — 距离向Chirp信号调频斜率。

下面分析静止和运动状态下的回波模型。

1.1 静止散射点回波模型

雷达回波信号由发射信号波形、天线方向图、斜距、目标RCS、环境等因素共同决定^[12],若不考虑环境因素,则单点目标雷达回波信号可写成:

$$s_r(t) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} \sigma \cdot w \cdot p(t - n \cdot PRT - \tau_n) \quad (2)$$

式中: σ — 一点目标的雷达散射截面; w — 一点目标天线方向图双向幅度加权; τ_n — 载机发射第 n 个脉冲时,电磁波在雷达与目标之间传播的双程时间。

于是将 $\tau_n = 2R(s; x, y)/C$ 代入式(2),可得:

$$s_r(t) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} \sigma \cdot w \cdot \text{rect}\left(\frac{t - n \cdot PRT - 2R(s; x, y)/C}{T_r}\right) \cdot \exp[j\pi K_r (t - n \cdot PRT - 2R(s; x, y)/C)^2] \cdot \exp[-j\frac{4\pi}{\lambda} R(s; x, y)] \exp[j2\pi f_c (t - n \cdot PRT - \tau_n)] \quad (3)$$

其中: s 称为慢时间变量(slow time), t 称为快时间变量(fast time),于是点目标回波信号可写成:

$$s_r(t) = \sigma \cdot \text{rect}\left(\frac{t - 2R(s; x, y)/C}{T_r}\right) \cdot \exp[j\pi K_r (t - 2R(s; x, y)/C)^2] \cdot \text{rect}\left(\frac{s}{T_{sar}}\right) \exp[-j\frac{4\pi}{\lambda} R(s; x, y)] \quad (4)$$

为了得到三维回波信号要考虑高度信息 h ,点目标到雷达中心的距离为 $R(s; x, y, h)$ 。为了理论分析方便,笔者假设方位向发射 N 个脉冲,距离向采样得到 M 个样值点,则SAR回波信号数据为一 $N \times M$ 矩阵, K 个理想点目标的回波经采样后的表达式为:

$$Sr(n, m) = \sum_{k=1}^K \sigma \cdot \exp\{j\pi [t(m) - \frac{2R(n; k)}{C}]\} \cdot \exp[-j\frac{4\pi}{\lambda} R(n; k)] \quad (5)$$

$$0 < [t(m) - \frac{2R(n; k)}{C}] < T_r; |R(n; k) - x(k)| < T_{sar}$$

$$n = 1, 2, 3 \dots N; m = 1, 2, 3 \dots M$$

1.2 运动散射点回波模型

与静止目标相比,运动散射点目标包含了目标运动分量,体现为合成孔径时间内目标与雷达平台的相对位移。只要在静止目标回波模型中反映出目标运动造成的实时相对位移量,研究者即可得到运动目标的回波模型。

运动散射器与雷达的几何关系如图1所示, $O(u_0, v_0, 0)$ 为散射点所在运动物体的中心坐标,该物体运动方向与 Y 轴成 θ 角,点 P 为一强散射点,设其在 $u-v-w$ 坐标系中的初始坐标为 (x_0, y_0, h_0) ,根据坐标

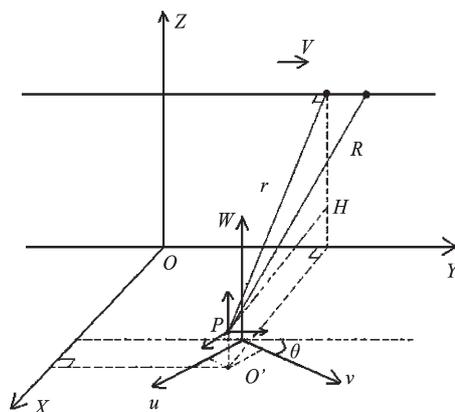


图1 运动散射点与雷达的几何关系

转换,其在 $X-Y-Z$ 坐标系中的坐标为:

$$(x, y, h) = (x_0, y_0, h_0) \begin{pmatrix} \cos(\theta) & \sin(\theta) & 0 \\ -\sin(\theta) & \cos(\theta) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} + (u_0, v_0, 0)$$

然后根据不同运动方式和运动参数可以得到任意时刻散射点目标的位移量,再由新位置的坐标信息就可以得到散射点目标和雷达中心的斜距为:

$$R(s; x, y, h) = \sqrt{(H-h)^2 + x^2 + (v \cdot s - y)^2} \quad (6)$$

最后根据上一节中的式(4)和式(5)便可得到运动散射点的回波模型。

2 轮式车辆建模

轮式车辆上的强散射点主要以车轮的转动和车体的平动这两种复合运动^[13]方式为主,下面本研究主要考虑车轮上散射点的运动建模,轮式车辆车轮部分的示意图如图2所示。

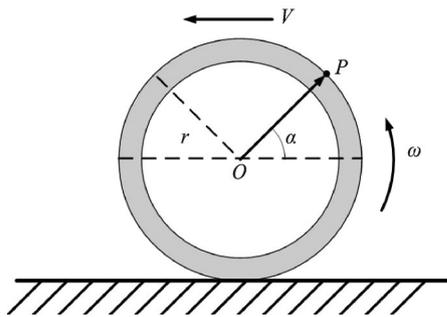


图2 轮子部分示意图

设点 P 为车轮上一强散射点,该点一方面随着车轮以 ω 的角速度转动,另外还以速度 V 进行着平动,则 X, Y, Z 轴上实时移动的距离分别为:

$$\begin{aligned} x_s &= [r \cdot \cos(\omega \cdot s + \alpha) - r \cdot \cos(\alpha) + v \cdot s] \cdot \sin(\theta); \\ y_s &= [r \cdot \cos(\omega \cdot s + \alpha) - r \cdot \cos(\alpha) + v \cdot s] \cdot \cos(\theta); \\ z_s &= r \cdot \sin(\omega \cdot s + \alpha) - r \cdot \sin(\alpha). \end{aligned}$$

根据式(6)可得点 P 与雷达中心的斜距为 $R_s = R(s; x + x_s, y + y_s, h + z_s)$ 。

对于车体上平动的散射点,其 X, Y 轴上实时移动的距离分别: $x_s = v \cdot s \cdot \sin(\theta)$, $y_s = v \cdot s \cdot \cos(\theta)$, 而 Z 轴上没有距离的变化。

3 履带式车辆建模

3.1 第一类履带建模

第一类履带式车辆的履带结构对称,履带式车辆以速度 V 匀速前进时,履带部分的示意图如图3所示。

对于该类履带上的强散射点可分为两类运动方式: P_1-P_2 段随车轮的转动和 P_3-P_4 段的平动。

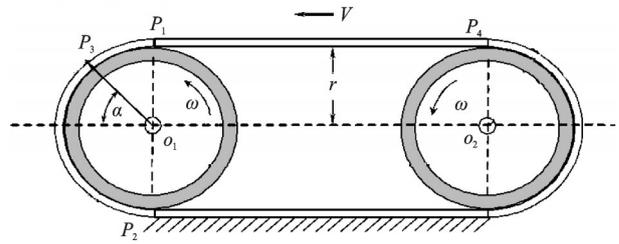


图3 第一类履带式车辆履带部分示意图

P_1-P_2 段上的强散射点与轮式车辆车轮上散射点的建模方法相同。

P_3-P_4 段上的强散射点在 X, Y 轴上实时移动的距离为: $x_s = 2 \cdot v \cdot s \cdot \sin(\theta)$, $y_s = 2 \cdot v \cdot s \cdot \cos(\theta)$, Z 轴上没有移动。

3.2 第二类履带建模

第二类履带式车辆采用主动轮和负重轮悬挂而不承受车体重量结构。第二类履带式车辆以速度 V 匀速前进时,履带部分的示意图如图4所示。

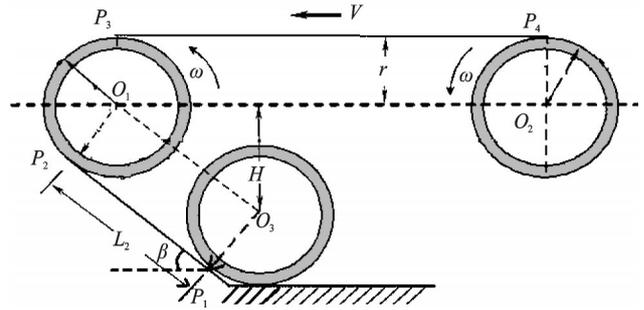


图4 第二类履带式车辆履带部分示意图

对于该类履带上的强散射点可分为3类运动方式: P_1-P_2 段沿履带的斜动, P_2-P_3 段随车轮的转动和 P_3-P_4 段的平动。

与前述轮式车辆的建模方法相同, P_1-P_2 段上的强散射点在 X, Y, Z 轴上实时移动的距离分别为:

$$\begin{aligned} x_s &= [v \cdot s \cdot \cos(\beta) + v \cdot s] \cdot \sin(\theta); \\ y_s &= [v \cdot s \cdot \cos(\beta) + v \cdot s] \cdot \cos(\theta); \\ z_s &= -v \cdot s \cdot \sin(\beta). \end{aligned}$$

P_2-P_3 段上的强散射点与轮式车辆车轮上散射点的建模方法相同。

P_3-P_4 段上的强散射点与前述第一类履带式车辆履带上 P_3-P_4 段的建模方法相同。

4 实 验

4.1 原始回波数据仿真

根据第1部分中的回波模型以及第2、3部分建立的轮式履带式车辆模型,本研究用 Matlab 进行仿真,仿真时所采用的载机、雷达参数为:载机高度 1 000 m、飞行速度 100 m/s、飞行方向自北向南(上北下南,左西右东)、雷达在目标的西侧(面向图看)、载频为

10 GHz、采用正侧视。根据轮式履带式车辆强散射点的分布状况,本研究分别通过在车轮、履带和车体上取多个点进行仿真。

笔者在此给出轮式车辆仿真结果如图5所示,原始雷达回波即为运动目标上各个强散射点原始回波的叠加。而通过采用这种数据形式的SAR回波可以直观地展现其在空间中的分布状况。

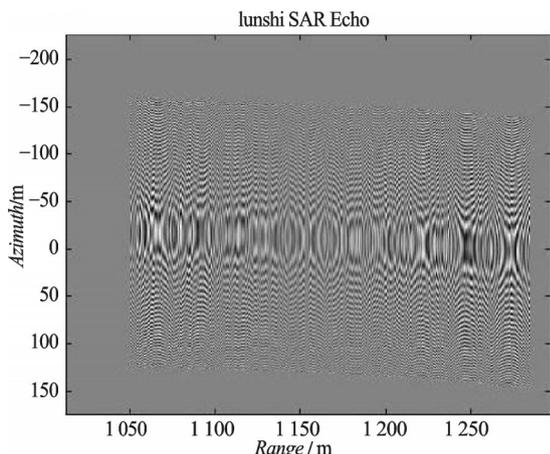


图5 轮式车辆原始回波

4.2 时频分析结果

本研究根据上文已经产生的轮式履带式车辆回波信号进行时频分析,从而可以比较存在不同运动方式的车辆回波在时、频域上的不同。

轮式车辆车轮上的点既存在随车轮的旋转运动,又存在随车辆的平动,其运动方式为两者的复合运动,本研究分别对速度为8 m/s和12 m/s的轮式车辆回波做加51点hanning窗的短时傅里叶变换(STFT),其时频分布如图6~7所示。

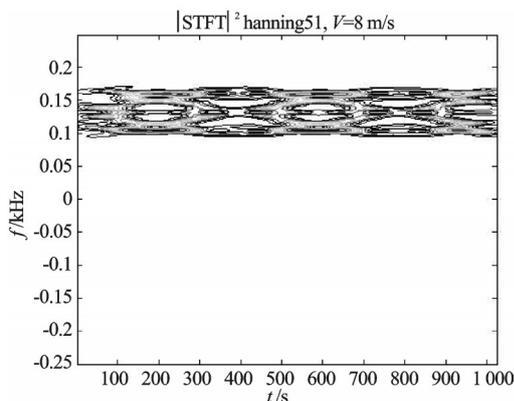


图6 轮式车辆回波时频分布($v=8$ m/s)

对于第一类履带式车辆履带上的一些散射点,如图3中 P_1-P_4 段上的点,开始时随履带做平动,当其运动到 P_1-P_4 段时,运动方式为由随车轮的转动和车辆的平动复合而成,本研究对速度为8 m/s的第一类履带式车辆回波做加31点hanning窗的短时傅里叶变换,其时频分布如图8所示。

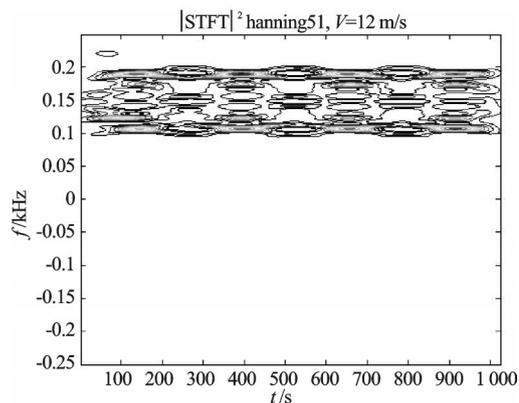


图7 轮式车辆回波时频分布($v=12$ m/s)

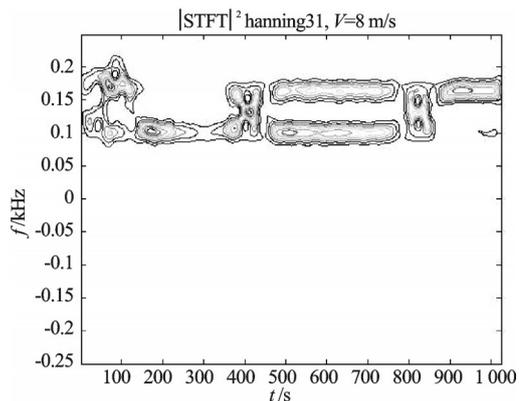


图8 第一类履带式车辆时频分布($v=8$ m/s)

对于第二类履带式车辆履带上的一些散射点,如图4中 P_2-P_3 段上的点,开始时在 P_2-P_3 段上随履带做旋转运动同时平动,当其运动到 P_1-P_2 段时,运动方式为由随履带的斜动和车辆的平动复合而成,本研究对速度为8 m/s的第二类履带式车辆回波做加31点hanning窗的短时傅里叶变换,其时频分布如图9所示。

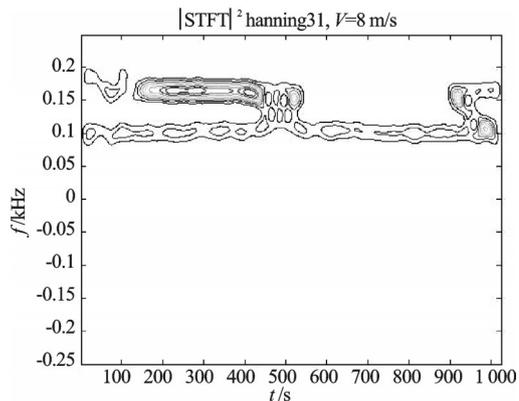


图9 第二类履带式车辆回波时频分布($v=8$ m/s)

通过对图6、图8、图9的对比,在速度相同的情况下,首先可以看到轮式车辆和履带式车辆的时频分布有明显的区别,而第一类和第二类履带式车辆也有显著的差别,正是由于3类车辆上不同强散射点的运动方式存在不同而产生了这种差异。另外,通过对图6

(下转第1502页)

远程路灯控制系统在测试运行中,服务器软件能够及时地响应客户端的命令要求,控制远程的路灯,运行稳定,表现出良好的性能。

5 结束语

本研究设计开发的城市路灯远程监控系统服务器端软件涉及 Winsock 网络编程、数据库编程以及如何进行线程同步和线程间的通信,采用了微软的完成端口模型,能够高效地实现与监控中心的客户端和远程监控终端的网络通信,并通过 ADO 技术实现了对数据库的访问,从而能够对保存在 Access 数据库里的数据实现自动的存储和读出。

本研究在程序设计的过程中重点考虑的是软件运行时的稳定性和后期的可扩展性,且通过调试运行,已经实现了基本的功能。

参考文献(References):

- [1] 王 翥,孙嘉宁,范士伟,等. 节能型城市路灯监控系统的设计[J]. 微计算机信息,2009,25(7):10-12.
- [2] 王成福,唐晓强. 基于 GPRS 的路灯监控系统的设计与实

现[J]. 电力系统通信,2008,29(8):18-21.

- [3] 刘敦东,黄 祚,孙洪飞. 完成端口在路灯监控软件中的应用[J]. 照明工程学报,2010,21(2):66-70.
- [4] [美] RICHTER J,[法] NASARRE C. Windows 核心编程[M]. 葛子昂,周 靖,廖 敏,译. 5版. 北京:清华大学出版社,2008.
- [5] 吴永明,何 迪. 基于完成端口的服务器底层通信模块设计[J]. 信息技术,2007(3):115-118.
- [6] 杜翔雷,跃 明. 基于 IOCP 的服务器端应用程序[J]. 计算机系统应用,2009(2):151-154.
- [7] 周 海. 智能路灯节能控制系统研究[D]. 武汉:武汉理工大学自动化学院,2009.
- [8] 侯其锋,李晓华,李 莎. Visual C++数据库通用模块开发与系统移植[M]. 北京:清华大学出版社,2007.
- [9] 徐 枫,马国之,刘良旭. 基于 ADO 技术的数据库访问研究与实现[J]. 计算机工程与设计,2004,25(1):107-110.
- [10] 宋 坤,李伟明,刘锐宁. Visual C++数据库系统开发案例精选[M]. 北京:人民邮电出版社,2006:311-360.
- [11] 王艳平,张 越. Windows 网络与通信程序设计[M]. 上海:人民邮电出版社,2006:67-99.

[编辑:李 辉]

(上接第 1497 页)

和图7的对比可见,同一类车辆当运动速度加快时其微多普勒频率范围增大,而时频谱周期缩短。

5 结束语

本研究讨论了轮式和履带式车辆的运动特征,推导了由轮式车辆轮子和履带式车辆履带运动激励的 SAR 回波信号的理论公式,分析了两者运动的时频特征,并对目标理论回波信号进行了仿真分析;同时通过短时傅里叶变换进行了时频分析,比较了三者时频特性的不同。

理论和仿真结果表明,该车轮转动激励的时频谱具有类似正弦的周期性,而由两类履带运动激励的时频谱存在间断性的类似正弦曲线,可作为区分3类目标的依据。

参考文献(References):

- [1] 冀振元,孟宪德. 轮式车与履带车目标的识别[J]. 现代雷达,1992,12(6):17-21.
- [2] 丁苏颖,刘宏伟. 基于微多普勒特征的轮式车辆和履带式车辆识别[C]// 第十届全国雷达学术年会论文集. 北京:国防工业出版社,2008:1234-1237.
- [3] 黄 健. 履带式车辆多普勒效应与特征提取[D]. 长沙:国防科学技术大学研究生院,2006.

- [4] 鄢晗菡,孙 华,刘 川,等. 基于多普勒效应的汽车刹车预警系统研究[J]. 机械,2010,37(11):56-58.
- [5] CHEN V C. The micro-doppler effect in radar [M]. Artech House Radar Library, 2011.
- [6] 张 安,卢在奇,范红旗,等. 基于散射中心模型的舰船 LFM 雷达回波仿真[J]. 雷达科学与技术,2011,8(5):316-320.
- [7] 冯思亮,王志刚,徐继麟. 机载合成孔径雷达回波数据仿真研究[J]. 现代电子技术,2005:28(23):42-48.
- [8] 吕静静. 机载合成孔径雷达回波信号模拟研究[D]. 西安:西北工业大学电子信息学院,2006.
- [9] 贺思三. 微动目标高分辨雷达信号建模及特征提取[D]. 长沙:国防科学技术大学研究生院,2010.
- [10] LI Xiang, DENG Bin, QIN Yu-liang, et al. The influence of target micromotion on SAR and GMTI[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2011, 49(7): 2738-2751.
- [11] 张 朋. 合成孔径雷达回波信号仿真研究[D]. 西安:西北工业大学电子信息学院,2004.
- [12] 张爱兵,计科峰,邹焕新,等. 高分辨 SAR 目标散射中心模型分析[J]. 雷达科学与技术,2009,12(6):416-422.
- [13] 陈广锋,张林让,王 纯,等. 复合运动目标微多普勒特征的分析 and 提取[J]. 西安电子科技大学学报:自然科学版,2011,38(3):212-216.

[编辑:李 辉]