

车载 InSAR 前视三维成像技术*

王建, 李杨寰, 张汉华, 陆必应, 宋千, 周智敏

(国防科技大学 电子科学与工程学院, 湖南 长沙 410073)

摘要:野外和非结构化环境下的障碍探测是无人驾驶车(UGV)环境感知的难题之一。基于高度识别障碍是一种有效的解决途径,提出了干涉合成孔径雷达(InSAR)的三维障碍物成像策略,研究了InSAR信息处理流程,分析了干涉基线和运动误差对车载InSAR高程测量精度的影响,仿真了无人车前场景存在遮挡时的InSAR高程测量,证明了InSAR用于UGV前方环境感知的可行性。

关键词:无人驾驶车;干涉合成孔径雷达;障碍探测;三维成像

中图分类号:TP957 **文献标志码:**A **文章编号:**1001-2486(2014)06-134-06

Forward-looking three dimensional imaging technique for InSAR mounted on ground vehicles

WANG Jian, LI Yanghuan, ZHANG Hanhua, LU Biying, SONG Qian, ZHOU Zhimin

(College of Electronic Science and Technology, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China)

Abstract: It is a difficult task for an unmanned ground vehicle (UGV) to sense obstacles in out fields or unstructured environments. Because the height information is a vital feature to boost the performance of obstacle discrimination, the three-dimensional imaging technique for sensing obstacles ahead UGV of interferometric synthetic aperture radar (InSAR) was presented. The basic signal process flow of InSAR was reviewed. Special factors of the UGV platform that impact the digital elevation model (DEM) measurement precision were analyzed, such as the baseline length, platform motion errors. The DEM of a partial sight-blocked obstacle scene was obtained by processing the three-dimensional InSAR image, which proved the feasibility of applying InSAR to obstacle sensing of UGV.

Key words: UGV; InSAR; obstacle sensing; three-dimensional imaging

无人驾驶车(Unmanned Ground Vehicle, UGV)具有广阔的应用前景,美国、西欧等国家早在20世纪70年代就进行了许多探索性研究,目前在自动控制、体系结构、人工智能、环境感知方面均取得了突破性进展,并且进行了大量试验测试,例如2012年谷歌研制的无人驾驶车累计行驶里程已达50万公里^[1]。我国清华大学、上海交通大学、湖南大学、国防科技大学等多所大学也在无人驾驶车研究领域取得了丰富的成果,其中国防科技大学和一汽联合研发的无人驾驶轿车于2011年完成了从长沙到武汉286km的高速全程无人驾驶实验^[2]。然而环境感知这一制约无人驾驶车有效应用的关键技术一直未能得到充分解决。

虽然光学、红外和激光雷达等传感器在无人驾驶车环境感知中获得了广泛应用,并在结构化和有利气候气象环境下,已取得较好的障碍探测效果^[3-5];但在非结构化道路特别是野外环境下,

无法有效探测树桩、土坡、坑洞等凸起和凹陷障碍物。微波雷达由于具备分辨率高、视角广、扫描快、植被穿透、可测距等优点,正成为无人驾驶车环境感知研究的热点^[6-9]。

常规车载前视微波雷达一般先对车前区域进行二维成像,然后基于二维图像的面积、形状和幅度等特征进行目标鉴别。由于地面介电常数不均匀,也会在图像中形成类似障碍物的响应,从而被误判为障碍,因此仅利用二维信息,雷达的虚警率将会较高,对无人驾驶车障碍探测十分不利^[10],如果能够有效提取和利用高程信息,无人驾驶车障碍识别的准确性将显著提高。但目前对车载三维成像雷达的研究非常有限,Nguyen^[7]团队提出了利用车辆前进构成二维平面孔径估计障碍物高度的思路,但没有给出结果。文献^[11]通过研究发现,二维平面孔径在斜前方的高度分辨率很低,难以满足障碍高度区分的需求,因此提出利用干

* 收稿日期:2014-03-21

基金项目:国家自然科学基金资助项目(61372163)

作者简介:王建(1981—),男,湖北宜城人,讲师,博士,E-mail:hurri_can@163.com

涉合成孔径雷达(Interferometric Synthetic Aperture Radar, InSAR)测量车前障碍高程的方案。虽然 InSAR 技术在雷达遥感领域研究比较成熟^[12],但用于无人驾驶车环境感知尚属首次,本文将对其系统性能、平台运动、视线遮挡等进行针对性分析,并给出仿真结果。

1 无人车载 InSAR 三维障碍成像处理技术

形成车载 InSAR 系统有两种主要途径:第一种是在车顶架设轨道,在轨道上安装可以左右运动的小车,并在小车上安装两个高度不同的天线,形成干涉基线;第二种是用阵列天线替代轨道,架设两个不同高度的阵列,或者配置成一个接收阵列,发射天线安装在不同的高度,形成干涉基线。这两种方法具有各自的特点,前者结构简单,但是扫描时间长,无法适应车辆的快速运动;后者可以通过开关控制实现快速电扫描,但是结构复杂,重量和成本高。两种 InSAR 的原理相同,我们以第一种系统模型为例进行分析,第二种系统模型可采用类似方法进行分析。合成孔径架设在车顶,其法向与车辆前进方向平行,车辆运动将造成合成孔径的实际法向存在一定的偏航角,偏航角的大小可通过提高孔径扫描速度进行抑制,同时结合车辆速度传感器在成像过程中进行校正,提高二维图像聚焦质量。

1.1 InSAR 高程测量原理

无人车载 InSAR 系统可以抽象化为如图 1 所示的几何示意图。其中 x 轴是车顶轨道方向, x 轴正向指向纸面外, y 轴表示距离方向, z 轴表示高度方向,车顶轨道高度为 H_0 ,上下天线分别为 S_1 和 S_2 ,地面上有一高度为 h 的目标 T ,其坐标为 $T_m = (x_m, y_m, h)$, r_1, r_2 分别表示 S_1, S_2 到 T 的距离, θ 表示 S_1 对 T 的下视角; β 为基线姿态角, B 为基线长度。假设 S_1 和 S_2 均为自发自收的单站 SAR,分析可知:在 S_1 和 S_2 的 SAR 单视复图像中, T 对应的理想相位分别是 $\phi_i = -4\pi \cdot r_i / \lambda$ ($i = 1, 2$),其中 λ 为雷达载波波长,记 T 到 S_1 和 S_2 的斜距差 $\Delta r = r_1 - r_2$,则干涉相位 ϕ_m 为:

$$\phi_m = \phi_1 - \phi_2 = -4\pi \cdot \frac{\Delta r}{\lambda} \quad (1)$$

若基线长度远远小于目标斜距,即 $B \ll r_1$,则在平面波假设下,波程差 Δr 约为:

$$\Delta r = -B \sin(\beta - \theta) \quad (2)$$

据此可计算高程 h 为^[14]:

$$h = H_0 - \frac{(\lambda \phi_m / 2\pi)^2 - B^2}{2B \sin(\beta - \theta) - \lambda \phi_m / 2\pi} \cos \theta \quad (3)$$

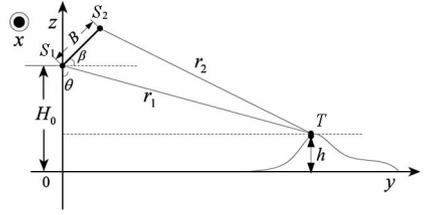


图1 InSAR 测量几何

Fig. 1 Geometry of an InSAR

InSAR 反演目标高度的计算流程是 $\phi_m \rightarrow \Delta r \rightarrow \theta \rightarrow h$ 。虽然 InSAR 测高的原理简单明了,但是具体实现的过程比较复杂,包括斜距平面二维成像、图像配准、平地相位去除、干涉相位滤波、干涉相位解缠、高程反演和数字高程模型(Digital Elevation Model, DEM)编码等步骤,其中相位解缠是关键技术之一^[12]。实际上,InSAR 高程测量精度受平台运动、干涉基线配置、雷达系统参数、场景相干性等诸多因素的影响,高程测量精度的分析可参见文献[13]。

1.2 无人车载 InSAR 的干涉基线设计

干涉基线是 InSAR 系统设计的重要参数,将基线沿 S_1 雷达视线方向的投影称为“水平基线”,记作 B_{\parallel} 。相应地,垂直于 S_1 雷达视线方向的投影称为“垂直基线”,记作 B_{\perp} 。

$$\begin{cases} B_{\parallel} = -B \sin(\beta - \theta) \\ B_{\perp} = B \cos(\beta - \theta) \end{cases} \quad (4)$$

根据 InSAR 测高原理,高度误差与垂直基线长度 B_{\perp} 成反比,其影响还与入射角 θ 和基线姿态角 β 有关,具体的定量关系如下^[12]:

$$\frac{\partial h}{\partial B} = \frac{\partial h}{\partial \phi_m} \frac{\partial \phi_m}{\partial B} = \frac{r_1 \sin \theta \sin(\beta - \theta)}{B_{\perp}} \quad (5)$$

由式(5)可知,当 $\beta = \theta$ 时,误差影响最小,由于无人车需要测绘车前较远目标的高度,且自身高度有限,入射角 θ 接近于 90° ,因此基线姿态角 $\beta = 90^\circ$ 可以降低基线测量误差对测高的影响,即:无人车干涉基线配置为垂直式比水平式更优。

在确定基线角后,需要对基线长度进行设计,基线长度与测高灵敏度成正比,与模糊高度成反比,最大基线长度不能超过关键基线 B_{Critical} 的长度,实际经验要求小于 $B_{\text{Critical}}/4$ 。 B_{Critical} 和模糊高度与系统相关参数的关系可参见文献[12]。

1.3 无配准的图像误差分析

如果按照地平面进行聚焦,对于偏离地平面的目标,聚焦后的成像位置将偏离其真实的地面位置,其中偏移量可以根据式(6)进行计算。

$$\begin{cases} \Delta r_i = \sqrt{(H_i - h)^2 - H_i^2 + x_m^2 + y_n^2} \\ \Delta x_i = \Delta r_i \times \frac{x_m}{\sqrt{x_m^2 + y_m^2}} \\ \Delta y_i = \Delta r_i \times \frac{y_m}{\sqrt{x_m^2 + y_m^2}} \end{cases} \quad (6)$$

其中 H_i 表示上下天线的高度。由于天线高度不同,目标在地平面的聚焦位置偏移量也是不同的,聚焦偏移量相减即为配准误差,其大小为:

$$\begin{cases} \Delta x = (\Delta r_1 - \Delta r_2) \times x_m / \sqrt{x_m^2 + y_m^2} \\ \Delta y = (\Delta r_1 - \Delta r_2) \times y_m / \sqrt{x_m^2 + y_m^2} \end{cases} \quad (7)$$

分析式(7)可知,目标配准误差具有空变性。当目标位于 $x_m = 0$ (车前中线)时, x 方向上的配准误差为 0;当 $x_m \neq 0$ 时, x 方向上将存在配准误差;我们按照表 1 所示的参数计算近处($x=3, y=5$)和远处($x=3, y=15$)两种目标的配准误差,可以得到配准误差随高度变化的曲线,如图 2 所示。可见:地平面之下目标误差为负,地平面之上的目标误差为正;近处目标入射角小,在 x 和 y 轴上的配准误差大,远处入射角大,配准误差较小。由于配准误差直接影响干涉相位的质量,一般要求误差小于 $1/10$ 分辨单元,因此当地面起伏较大时车前近区需要进行配准,而远区则无须配准。配准技术不是本文的重点,具体可参阅文献[12]。

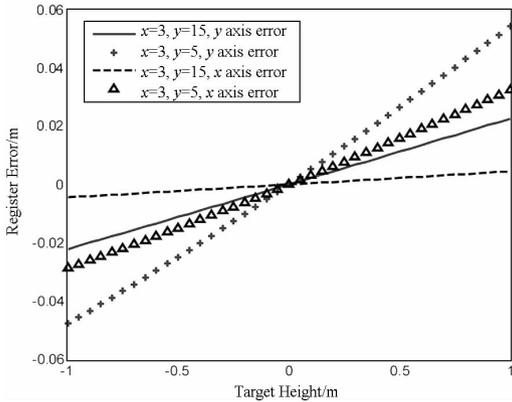


图 2 高程大小对图像配准误差的影响曲线

Fig. 2 Curve of DEM influence over registration error

2 仿真结果与讨论

利用 MATLAB 语言对车载 InSAR 三维成像处理进行仿真,InSAR 系统参数如表 1 所示。

表 1 InSAR 系统参数

Tab. 1 InSAR system parameters

| 工作频率 (GHz) | 孔径长 度(m) | 孔径间 距(m) | 基线高 度距(m) | 基线角 (°) |
|---------------|-------------|-------------|--------------|------------|
| 13 ~ 15 | 0.8 | 0.01 | 0.3 | 90 |

场景高程由 MATLAB 自带的“peak”函数生成,包括三个高于地面的峰和两个低于地面的凹陷组成,其中峰的最大高度为 0.3m,凹陷的最大深度为 -0.24m,分布范围为车前 10 ~ 16m,左右宽 5m,三维场景如图 3(a)所示。场景中目标的 RCS 值设置为 $|DEM| + 0.5$ 如图 3(b)所示。

2.1 起伏场景回波仿真与地平面二维成像

准确模拟地物场景的 RCS 和高程信息是面目标回波仿真的关键,常用的仿真方法包括时域叠加法、快速频域法和混合域法等^[16]。其中时域法虽然计算量大,但是可以精确仿真车辆运动和高程起伏。地表起伏用数字高程图(DEM)表征,并将其剖分成小平面单元,要求小平面单元尺寸大于信号波长,但远远小于雷达分辨率单元^[17]。在高精度面目标仿真中,由于地面网格分布均匀、目标相位已知,因此最终回波将存在较严重的 Bragg 散射和干涉条纹影响,我们采用随机位置扰动法进行抑制^[18]。由于车辆高度有限,起伏地面遮挡对 RCS 的影响较大,可以采用射线追踪法和几何光学法进行仿真,引入遮蔽因子,遮蔽因子是 $[0, 1]$ 分布的二值函数,其定义如式(8)所示。

$$\gamma(T_m, A_l) = \begin{cases} 1 & \theta_{m,l} > \max(\theta_{n,l}, T_n \in \{\psi_{n,l} \\ & = \psi_{m,l}, G_{n,l} < G_{m,l}\}) \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (8)$$

其中 $\theta_{m,l}, \psi_{n,l}, G_{n,l}$ 分别表示目标 T_m 到天线 $A_l = (x_l, y_l, H_l)$ 的入射角、方位角和地面投影距离,计算公式如式(9)所示。

$$\begin{cases} \theta_{m,l} = \arcsin\left(\frac{G_{m,l}}{\|T_m - A_l\|}\right) \\ \psi_{m,l} = \arcsin\left(\frac{x_m - x_l}{G_{m,l}}\right) \\ G_{m,l} = \sqrt{(x_m - x_l)^2 + (y_m - y_l)^2} \end{cases} \quad (9)$$

采用 BP 算法对仿真回波进行成像,以地平面作为参考,获得的二维图像对如图 3(c)和图 3(d)所示,从图中我们可以看到比较强的相干斑。在车载前视 InSAR 中,由于入射角较大,地物起伏造成的遮挡现象比较明显,遮挡区域为图 3(c)和图 3(d)中幅度较低的区域。

2.2 相位干涉和干涉相位滤波

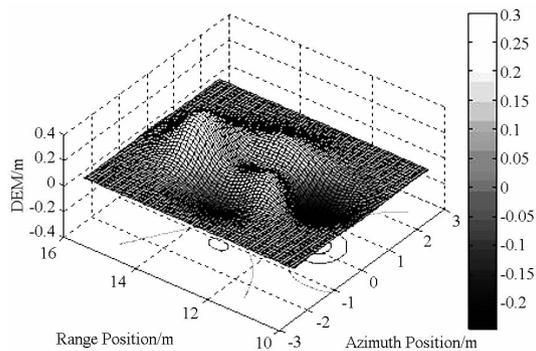
按照式(10)提取复图像对的干涉相位:

$$\phi_{in}(x_m, y_m) = \text{angle}[s_1(x_m, y_m) \times s_2^*(x_m, y_m)] \quad (10)$$

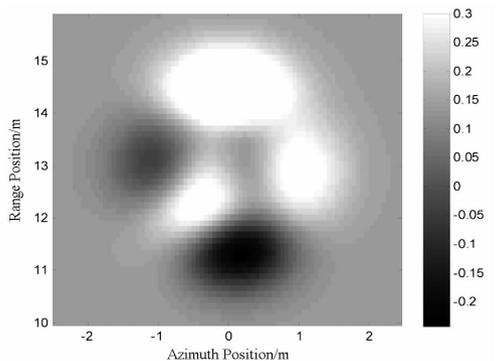
其中 $s_i(x_m, y_m)$ ($i=1, 2$), 表示地平面二维复图像,从图 3(e)中可见直接提取的干涉相位存在较大的噪声污染,相位噪声的存在将增加相位解缠的难

度,因此需要对相位噪声进行滤波,采用的滤波算法为常规 Goldstein 相位滤波算法^[19],经过相位滤

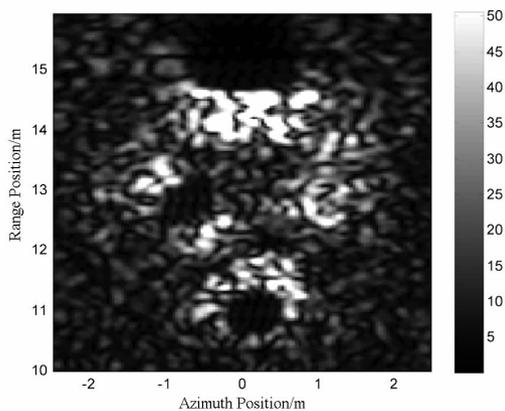
波后的干涉相位图如图 3(f)所示。



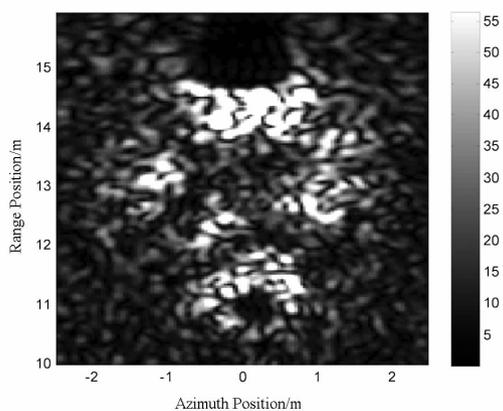
(a) 模拟 DEM 场景



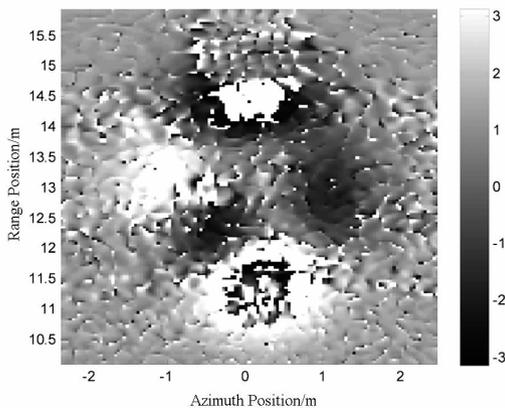
(b) 仿真场景的 RCS



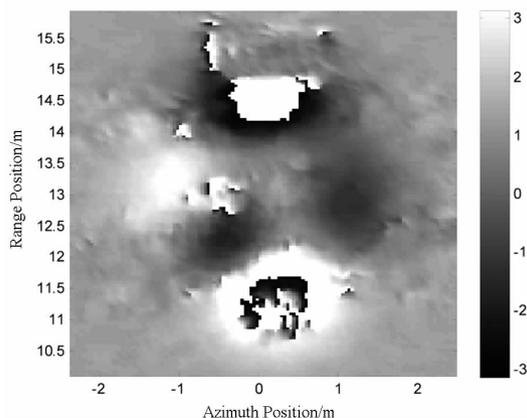
(c) 复图像对(主图像)



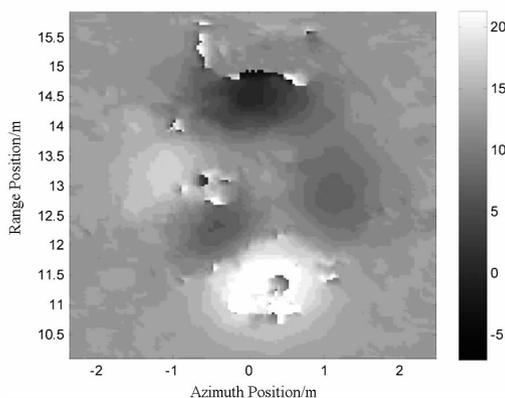
(d) 复图像对(辅图像)



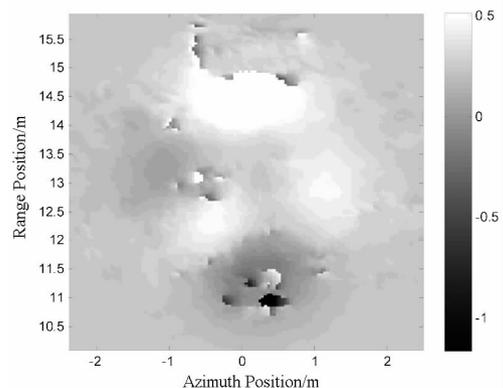
(e) 直接干涉相位图



(f) 滤波后的相位图



(g) 相位解缠绕结果



(h) DEM 重构结果

图 3 无人车载 InSAR 仿真处理结果

Fig. 3 Simulation results of the UGV based on InSAR

2.3 相位解缠与高程反演

相位解缠绕的方法较多,采用文献[15]所提的方法进行相位解缠,解缠后的干涉相位图如图3(g)所示,可见干涉相位与设置的 DEM 基本相符。

高程反演按照式(3)进行,需要注意的是,成像过程中,二维图像是按照地平面进行聚焦的,计算出的干涉相位已经消除了平地相位效应的影响,因此在高程反演之前需要加上已经消除的平地效应相位,该相位按照式(11)进行计算。

$$\phi_{Plane} = \frac{-4\pi}{\lambda}(\sqrt{(H_1^2 + x_m^2 + y_m^2)} - \sqrt{(H_2^2 + x_m^2 + y_m^2)}) \tag{11}$$

由高程反演得到是相对高度结果,计算绝对高度还需要校正高度偏置,一般通过选定已知高度的像素点进行校正^[12],经过校正后绝对高程就与设定 DEM 相适应了。将反演得到 DEM,如图3(h)所示,与输入 DEM 相减可以获得如图4所示的高度误差图,从图4可以发现,绝大多数地方的误差均接近于0,但部分遮挡造成相位解缠误差,造成最大误差为0.88m的若干异常区域,这些区

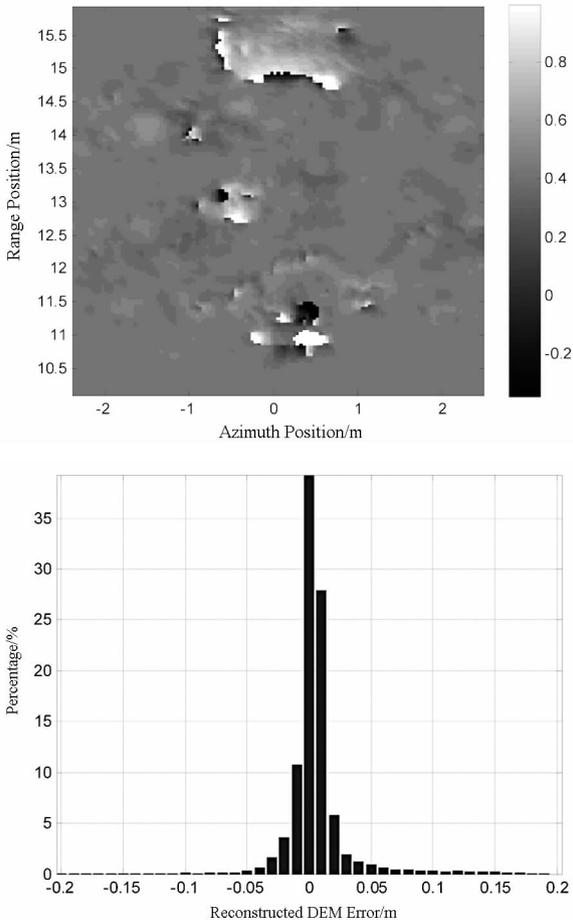


图4 高程反演绝对误差图和分布直方图

Fig. 4 Reconstructed DEM error and its histogram

域对应于幅度较大的凸起和凹陷,是 UGV 需要规避的障碍,未造成虚警误报;通过直方图统计可以得出,95%的高程误差均小于 ±5cm,统计得到的误差方差约为 4.5cm,可见利用干涉车辆能够获得很高的高程测量精度,满足无人驾驶车识别车前障碍的要求。

2.4 车辆运动误差对测高精度影响的仿真

车辆运动造成基线测角误差,高度误差与基线角度误差的关系为^[12]:

$$\frac{\partial h}{\partial \beta} = \frac{\partial h}{\partial \phi_{ln}} \frac{\partial \phi_{ln}}{\partial \beta} = r_1 \sin(\theta) \tag{12}$$

式(5)和式(12)定量描述了车辆运动时基线长度和基线角误差对测高的影响,但没有直接反映天线在 x, y 和 z 3 个方向上震动误差对测高的影响。下面仿真分析天线在 3 个方向上的震动误差对测高的影响,其中系统参数保持不变,分别在天线位置的 3 个方向上引入平均分布的测量误差,并测量高程重构方差,可得到 3 条高程测量误差方差随位置误差方差变化的曲线,如图 5 所示。从图 5 曲线中可以定性得出以下结论:

- 1) 高程测量对前进方向 y 的误差最敏感,如图 5 中虚线所示。InSAR 通过相位测量距离差,进而重建目标高度,y 方向是距离方向,当距离误差超过一个波长时,相位超过 2π 造成缠绕,形成 0 均值随机噪声,以致高程测量失效。因此,实际应用中需要对 y 方向的位置精密测量。
- 2) 高程测量对水平方向 x 和垂直方向 z 的误差不太敏感,可容忍两倍波长的测量误差。
- 3) 误差造成图像散焦,干涉相位变为随机噪声,因此高程测量方差不会无限增大,而是在两倍波长附近波动。

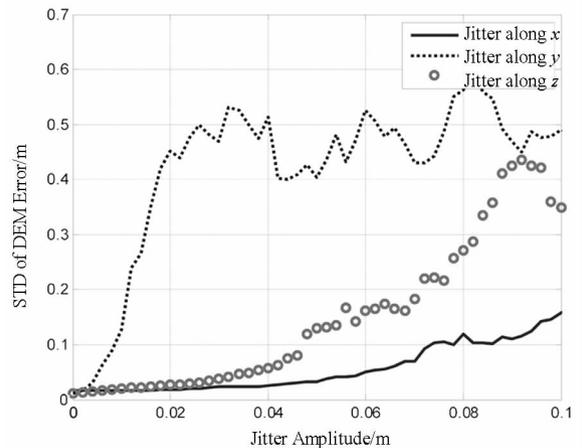


图5 运动误差对 DEM 测量精度的影响

Fig. 5 Motion error influence over DEM measurement

3 结论

将 InSAR 技术用于无人驾驶车的环境感知,研究了干涉三维信息处理的整个处理流程,针对无人驾驶车特点,设计干涉基线,分析了车辆运动对测高的影响,特别在地物视线遮挡的不利条件下,仿真了车前场景的三维成像,获得优于 4.5cm 的高程测量精度,验证了 InSAR 技术用于无人驾驶车障碍高度探测的可行性。本研究尚且刚刚起步,还有许多问题需要进一步深入研究,包括车辆运动补偿、耦合干扰抑制、相位解缠研究、高精度配准、凹陷障碍探测和识别等技术。

参考文献 (References)

- [1] The self-driving car logs more miles on new wheels[EB/OL]. <http://googleblog.blogspot.hu/2012/08/the-self-driving-cars-logs-more-miles-on.html>.
- [2] 戴斌, 聂一鸣, 孙振平, 等. 地面无人驾驶技术现状及应用[J]. 汽车与安全, 2012, 3: 46-49.
DAI Bin, NIE Yiming, SUN Zhenping, et al. Development and application of unmanned ground vehicle [J]. Auto & Safety, 2012, 3: 46-49. (in Chinese)
- [3] Barbe S, Krapez J, Louvet Y. Performance modeling and assessment of infrared-sensors applicable for TALOS project UGV as a function of target/background and environmental conditions [C]//Proceedings of SPIE, Infrared Imaging Systems: Design, Analysis, Modeling, and Testing XXIII, Baltimore, Maryland, USA, 2012.
- [4] 赵一兵, 王荣本, 李琳辉, 等. 基于激光雷达的无人驾驶车前方障碍物检测[J]. 交通与计算机, 2007, 25(2): 9-13.
ZHAO Yibing, WANG Rongben, LI Linhui, et al. Unmanned ground vehicles obstacle detection based on laser sensor[J]. Computer and Communications, 2007, 25(2): 9-13. (in Chinese)
- [5] Choi J, Lee J, Kim D, et al. Environment-detection-and-mapping algorithm for autonomous driving in rural or off-road environment [J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation System, 2012, 13(2): 974-982.
- [6] Mittr A K, Westbrook L, Corgan J, et al. Integrated RF modules for cooperative UGV/UAV tandems[C]//Proceedings of SPIE, Unmanned Systems Technology X, Orlando, Florida, USA, 2008.
- [7] Nguyen L, Wong D, Ressler M, et al. Obstacle avoidance and concealed target detection using the army research lab ultra-wideband synchronous impulse reconstruction (UWB SIRE) forward imaging radar [C]//Proceedings of SPIE, Detection and Remediation Technologies for Mines and Mine-like Targets XII, Orlando, Florida, USA, 2007.
- [8] Park S J, Ross J A, Shires D R, et al. Hybrid core acceleration of UWB SIRE radar signal processing[J]. IEEE Transactions on Parallel and Distributed System, 2011, 22(1): 46-57.
- [9] Sun S G, Cho B, Park G C, et al. UWB forward imaging radar for an unmanned ground vehicle [C]//Proceedings of 2011 3rd International Asia-Pacific Conference on Synthetic Aperture Radar, Seoul, Korea, 2011: 629-632.
- [10] 王玉明, 宋千, 金添, 等. 车载前视 GPSAR 浅地表杂波特性分析[J]. 现代雷达, 2009, 31(8): 39-42.
WANG Yuming, SONG Qian, JIN Tian, et al. Analysis of shallow buried ground clutter characteristics based on vehicle-mounted forward-looking GPSAR [J]. Modern Radar, 2009, 31(8): 39-42. (in Chinese)
- [11] Wang J, Song Q, Zhou Z M. Preliminary results of VFGPVR 3D imaging of shallow buried targets [C]//Proceedings of 3rd International Asia-Pacific Conference on Synthetic Aperture Radar, Seoul, Korea, 2011: 663-666.
- [12] 王超, 张红, 刘智. 星载合成孔径雷达干涉测量[M]. 北京: 科学出版社, 2002.
WANG Chao, ZHANG Hong, LIU Zhi. Spaceborne synthetic aperture radar interferometry [M]. Beijing: Science Press, 2002. (in Chinese)
- [13] Rosen P A, Hensley S, Joughin I R, et al. Synthetic aperture radar interferometry [J]. Proceedings of IEEE, 2000, 88(3): 333-382.
- [14] Miao F, Ye C M, Bi X J, et al. D-InSAR to inspect the active fault of kunlun mountains on qinghai-tibet plateau [C]//Proceedings of SPIE, Second International Conference on Space Information Technology, Wuhan, China, 2007.
- [15] Herrúz M A, Burton D R, Lalor M J, et al. A fast two-dimensional phase unwrapping algorithm based on sorting by reliability following a non-continuous path [J]. Applied Optics, 2002, 41(35): 7437-7444.
- [16] Deng B, Li X, Wang H Q, et al. Fast raw-signal simulation of extended scenes for missile-borne SAR with constant acceleration [J]. IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, 2011, 8(1): 44-48.
- [17] Franceschetti G, Migliaccio M, Riccio D, et al. SARAS: a synthetic aperture radar (SAR) raw signal simulator [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 1992, 30(1): 110-123.
- [18] Zeng D Z, Sun H W, Zeng T, et al. A high accuracy method for interference fringes suppression in SAR distributed targets' raw data simulation [C]//Proceedings of International Geoscience and Remote Sensing Symposium, Honolulu, USA, 2010: 4675-4678.
- [19] Goldstein R M, Werner C L. Radar interferogram filtering for geophysical applications [J]. Geophysical Research Letters, 1998, 25(21): 4035-4038.