

基于形态学增强型 HOG 特征的 InSAR 地形匹配算法

杨庆^{1,2*}, 张力¹, 李然², 占必超², 贾磊², 刘梦杨^{1,2}

¹火箭军工程大学基础部, 陕西 西安 710025;

²北京遥感设备研究所, 北京 100854

摘要 地形匹配导航是一种重要的利用地形和地物特征进行导航的技术。为了进一步提高地形匹配算法的精度, 提出了一种基于形态学增强型方向梯度直方图(EHOG)的地形匹配算法。该算法采用形态学闭运算对干涉合成孔径雷达(InSAR)获取的实时高程图(REM)进行预处理, 获取EHOG特征; 将地形匹配转换为HOG特征描述子的匹配, 以特征向量间的欧氏距离作为相似性度量。匹配过程中, 采用粗细精结合的三步优化匹配搜索策略, 提升了算法实时性。实验结果表明, 与未增强的HOG算法、传统的梯度互相关算法相比, 所提匹配算法具有更好的匹配精度和抗噪性, 同时具有较强的鲁棒性和实用性, 能够很好地应用于InSAR地形匹配。

关键词 数字图像处理; 形态学; 增强型方向梯度直方图; InSAR地形匹配; 欧氏距离

中图分类号 TP391

文献标志码 A

doi: 10.3788/LOP202259.0810001

InSAR Terrain Matching Algorithm Based on Morphologically Enhanced HOG Features

Yang Qing^{1,2*}, Zhang Li¹, Li Ran², Zhan Bichao², Jia Lei², Liu Mengyang^{1,2}

¹Basic Department, Rocket Force University of Engineering, Xi'an, Shaanxi 710025, China;

²Beijing Institute of Remote Sensing Equipment, Beijing 100854, China

Abstract Terrain matching algorithms use terrain features to aid navigation. To improve navigation accuracy of the terrain matching algorithm, this study proposes a terrain matching algorithm based on the morphological enhanced histogram of oriented gradients (EHOG). The proposed algorithm performs morphological closed operations to preprocess the real-time elevation map (REM) obtained by the interferometric synthetic aperture radar (InSAR), thereby obtaining the EHOG features. Then, it converts the terrain matching into the matching of the HOG feature descriptors. Euclidean distance between eigenvectors is used as a measure of similarity. In the matching process, we have adopted a three-step optimization matching search strategy that combines rough matching, smaller matching, and fine matching to improve the algorithm's real-time performance. Experimental results show that, compared to the unenhanced HOG algorithm and the traditional gradient cross-correlation algorithm, the proposed algorithm has better matching accuracy and noise resistance. Simultaneously, it has shown strong robustness and practicality and is well suited for InSAR terrain matching.

Key words digital image processing; morphology; enhanced histogram of oriented gradient; InSAR terrain matching; Euclidean distance

收稿日期: 2021-03-11; 修回日期: 2021-04-07; 录用日期: 2021-04-21

基金项目: 国家自然科学基金(62006240)、装发共用项目(41415010202)

通信作者: *asummit@163.com

1 引言

地形匹配导航技术^[1-2]是一种低空自主导航技术,通常简称为地形匹配技术,适用于复杂地形地貌,不受气候条件限制,成本可控,通过计算实时高程图(REM)与预先存储的参考高程图(DEM)的相似度建立两组地形测量数据的关联。相似程度的度量通常以距离函数表示,也称为定位估计的似然函数。地形匹配导航不仅具有较高的导航定位精确度,而且具有高自主性、抗干扰、高精度等特点,作为一种理想的修正系统,已在巡航导弹和战术飞机中获得成功应用,取得了极大的军事应用价值和经济效益。地形匹配技术的关键问题是与地形信息相关的特性问题,高精度DEM不足、适配区小、地形特征方向性和地形自相似等问题导致似然函数出现伪波峰和误匹配,所以匹配算法在很大程度上决定了匹配的效果和定位的精度。

Sandia 惯性地形辅助导航系统(SITAN)与地形轮廓匹配系统(TERCOM)是目前两种经典的地形匹配导航系统^[3-5]。SITAN利用递推的扩展卡尔曼滤波技术实时进行地形匹配导航,但系统容易发散,且须携带飞行航线全程的数字地图。TERCOM采用的匹配算法为断续的批相关处理算法,对实际高程与DEM进行相关分析,能快速、准确地搜索出配准位置,所得的相关极值点对应的位置就是飞行器的飞行位置,进而修正主导航系统的导航参数;但该方法对基准图地形的选取条件较为苛刻,在得到地形高度期间,一般要求做非机动飞行且对航向误差敏感。目前常用的地形匹配算法是在SITAN与TERCOM基础上的改进方法,英国不列颠航空公司开发的地形剖面匹配TERPROM系统^[6]是目前世界上应用最广泛的一种地形辅助导航系统,由SITAN系统和TERCOM系统以互补方式组成。以上地形相关匹配方法和基于扩展卡尔曼滤波的方法都已经在国内外的武器系统导航中得到了实际应用。

近几年学者对于地形匹配算法也有不断的创新。文献[7]提出了一种基于面特征的三维地形匹配算法,该算法将三维地形匹配问题转换为3D Zernike矩的匹配问题,矩的阶数越高,匹配概率和定位精度越高,但计算时间与3D Zernike矩的阶呈指数关系。文献[8]提出了一种基于地形轮廓面正交分解的三维地形匹配算法,该算法通过正交分解

构造地形特征矢量,通过矢量匹配和在线置信度分析提高地形匹配的可靠性,但计算方法较复杂,计算量较大。

以上方法都只考虑到地形轮廓曲面的特征,而忽视了地形高程的散点梯度信息。方向梯度直方图(HOG)特征可对空间信息进行精准描述^[9],主要用来描述局部梯度分布特性,能快速精确地提取地形的边缘和形态特征;且HOG特征描述子可以保证特征的鲁棒性,进行目标检测时能够获得较好的性能。因此增强HOG特征的表达能力和用散点的高程梯度大小和方向进行地形匹配是本文研究的重点。

2 REM的HOG特征提取

2.1 基于InSAR系统的REM生成

合成孔径雷达干涉测量(InSAR)技术是一种综合了信息、摄影测量、数字信号处理等相关技术快速发展起来的高精度对地观测新技术,具有全天时、全天候、高效率和高精度的成像特点^[10]。本文利用搭载在飞行器上的InSAR系统完成地形辅助导航。实时高程图为InSAR系统实时获取的数字高程图,参考高程图为预先装订的高程基准图像。

InSAR系统可以高效地获取REM。REM是干涉相位经过高程转换和地理编码得到的均匀分布在网格上的高程点,为栅格图像数据,展示地形的起伏变化。其基本原理^[11]是利用具有干涉成像能力的两部SAR天线同时观测地表的同一地区,或者利用一部天线重复观测同一地区,对回波信号进行处理得到两幅具有相干性的SAR复图像对;然后对SAR复图像对进行干涉处理,得到干涉相位;通过干涉相位到高程的转换和地理编码反演出观测地区的三维地形。

InSAR系统获取目标区域REM的步骤^[12]包括:主图像/辅图像输入、影像配准、影像预滤波、干涉图生成、基线估计、去平地效应、干涉图滤波、相位解缠、相位转高程地理编码,最后得到REM。

2.2 HOG特征提取

HOG特征的提取过程^[13-14]可分为3个步骤。

1) 将REM矩形块分成 n 个大小相等的单元(u_{cell})。

2) 统计每个单元的梯度直方图,即可形成每个 u_{cell} 的特征向量。计算梯度幅值和方向的公式为

$$G_x(x, y) = H(x + 1, y) - H(x - 1, y), \quad (1)$$

$$G_y(x, y) = H(x, y + 1) - H(x, y - 1), \quad (2)$$

式中: $G_x(x, y)$ 、 $G_y(x, y)$ 、 $H(x, y)$ 分别代表输入高程图中像元坐标点 (x, y) 处的东西方向梯度、南北方向梯度、高程值。

$$G(x, y) = \sqrt{G_x(x, y)^2 + G_y(x, y)^2}, \quad (3)$$

$$\alpha(x, y) = \arctan \left[\frac{G_y(x, y)}{G_x(x, y)} \right], \quad (4)$$

(3) 式和 (4) 式分别用于计算像元坐标点 (x, y) 处的梯度幅值和方向。

3) 沿梯度方向累加每个单元 (u_{cell}) 梯度大小, 以获得 c_{bin} 维单元特征向量; 每 $s \times s$ 个 u_{cell} 串联组成一个块 (b_{block}), 然后进行归一化; 最后将所有的块 (b_{block}) 对应的向量按照空间顺序排列, 形成 HOG 特征描述子。

以 320×320 像元的 REM 和 800×800 像元的参考高程图为例, 其中参数 u_{cell} 的大小设置为 160 像元, 2×2 个 u_{cell} 组成一个 b_{block} 。图 1 和图 2 分别展示了 REM 和 DEM 的三维高程和 HOG 特征描述子。

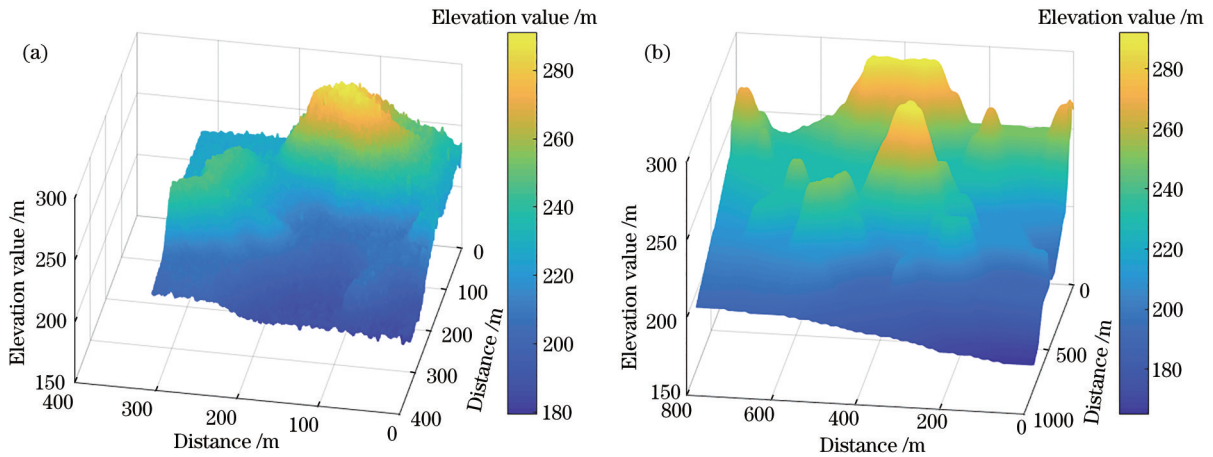


图 1 三维高程图。(a) REM; (b) DEM

Fig. 1 3D elevation maps. (a) REM; (b) DEM

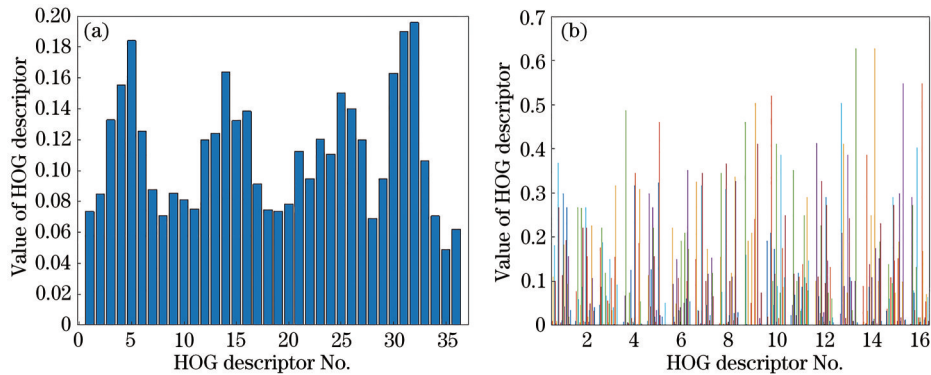


图 2 HOG 特征直方图。(a) REM; (b) DEM

Fig. 2 HOG feature histograms. (a) REM; (b) DEM

3 基于形态学增强型 HOG 的 InSAR 地形匹配算法

3.1 数学形态学基本原理

数学形态学的基本思想^[15-16]是用具有一定形态的结构元素对图像的集合进行运算, 以达到对图像分析和识别的目的, 包括图像分割、特征抽取、边界检测、图像滤波、图像增强和恢复工作, 具有原理简单、实现效率高等优点, 逐渐成为提取和分析图像

几何特征的工具。有 4 个基本运算: 膨胀、腐蚀、开运算和闭运算。数学形态学的本质^[17]是一种将图像看成点的集合, 建立在集合代数基础上, 用集合论方法定量地描述几何形状和结构的数学方法。研究的 InSAR 地形匹配算法使用的 DEM 是栅格图像数据, 为一系列点的集合, 可以用数学形态学对其进行运算处理。

1) 膨胀

$$F \oplus B = \{f | (f \sim B)_f \cap F \neq \emptyset\}, \quad (5)$$

式中： \oplus 为膨胀运算符；膨胀算法中 $(\sim B)_f$ 为结构元素。膨胀算法利用结构元素点先求反射，然后平移量化 f ，若存在于 F 元素集合中，则此元素选中；如果未选中，则剔除此点。膨胀运算将目标融合到背景当中进行填充，并向外部扩展，达到对断裂开的目标物进行连通的目的，便于提取目标边界。膨胀示意图如图 3 所示。

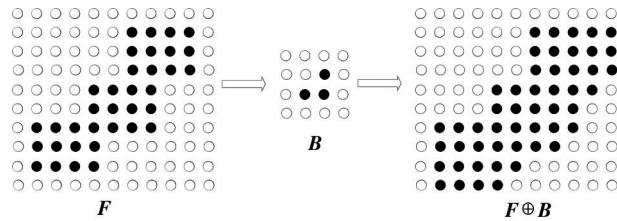


图 3 膨胀示意图

Fig. 3 Diagram of expansion

2) 腐蚀

$$F \odot B = \{ f | B_f \subseteq F \}. \quad (6)$$

(6) 式表示数据集 F 被结构元素 B 腐蚀，而 $F \odot B$ 为腐蚀算法结果。 f 表示腐蚀算法平移量， B_f 为平移量集合，若此集合仍属于 F ，则保留这些点，若不属于集合 F 则剔除，最终保留下的集合 B_f 为腐蚀算法处理后的结果。腐蚀运算通过去除边界点达到缩小目标、增大孔洞的效果，有效剔除噪声点影响。腐蚀示意图如图 4 所示。

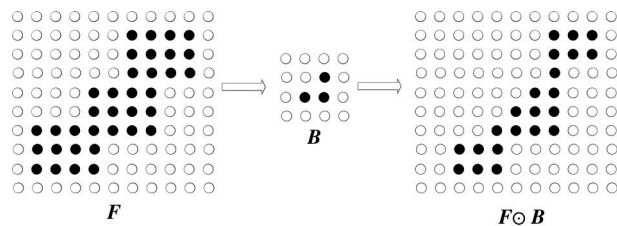


图 4 腐蚀示意图

Fig. 4 Diagram of corrosion

3) 开运算

$$F \circ B = (F \odot B) \oplus B. \quad (7)$$

(7) 式表示先腐蚀后膨胀，开运算可以擦除图像中的像素，能够去除孤立的小点和毛刺，而保持总的位置和形状不变。开运算效果如图 5 所示。

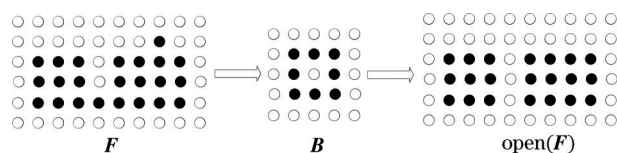


图 5 开运算效果图

Fig. 5 Diagram of open operation effect

4) 闭运算

$$F \bullet B = (F \oplus B) \odot B. \quad (8)$$

(8) 式表示先膨胀后腐蚀，闭运算^[18]可以使图像中的像素粘连，可用于填平小孔，弥合小裂缝，而保持总的位置和形状不变。闭运算效果如图 6 所示。

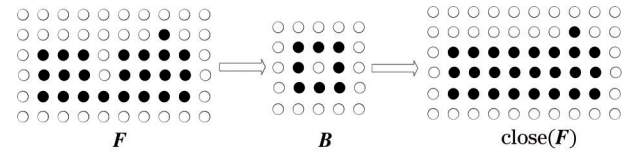


图 6 闭运算效果图

Fig. 6 Diagram of closed operation effect

3.2 增强型 HOG 特征

通过观察比较实时高程图和参考高程图可以发现，实时高程图中存在较多明显的小孔，斑点噪声较多，区域轮廓不明显。实时高程图中的小孔区域的高程值比周围小，与参考高程图存在一些差别，这是某些客观因素造成的，比如自然因素造成该区域出现凹陷，或者雷达测量时存在误差等。为了使实时高程图更趋近于参考高程图便于匹配，采用形态学闭运算对实时高程图进行预处理，用于填平小孔，填补轮廓破裂处，使它更光滑，达到去噪和增强的效果。结构元素形状、大小设计^[19]的适当与否将直接影响图像处理的质量。根据多次仿真实验以及实验结果比较可知，圆盘形结构元素形态变换的结果与 HOG 结合之后，能获得更好的效果，结构元素取 $B = \text{strel}(\text{'disk'}, 5)$ ，实验结果如图 7(c) 所示。

通过对比可以发现，进行闭运算后图像中原本的小孔被补上，与参考高程图更接近，斑点噪声明显减少，区域轮廓也更加明显。提取经过闭运算预处理后图像的 HOG 特征，从增强 HOG 特征对比度角度出发，提出了增强型 HOG (EHOG) 特征。EHOG 特征在与 HOG 特征整体变化趋势基本保持一致的情况下，EHOG 特征对比度显著增强。图 8 为三幅图的 HOG 特征值折线显示对比，更加直观地看到，EHOG 比 HOG 特征对比度更强，且更趋近于参考高程图的 HOG 特征，更有利于后续的匹配。

3.3 基于形态学 EHOG 的 InSAR 地形匹配算法流程

匹配搜索策略对匹配速度有很大的影响。以特征向量间的欧氏距离^[20]作为相似性度量，采用从粗匹配到精匹配的三步优化搜索策略，显著提高匹配效率。

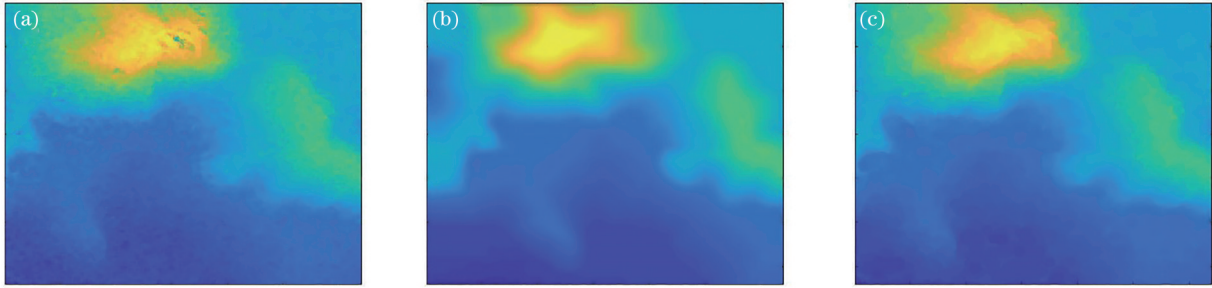


图 7 二维高程图。(a) REM; (b) DEM; (c) 闭运算后的图像

Fig. 7 Two-dimensional elevation maps. (a) REM; (b) DEM; (c) image after closing operation

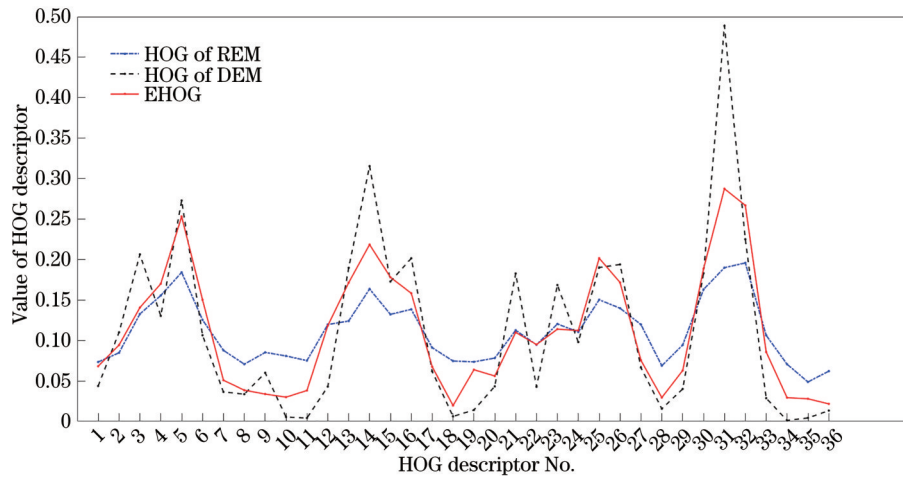


图 8 三种 HOG 特征值折线图

Fig. 8 Line graphs of three kinds of HOG eigenvalues

DEM 分辨率^[21]是 DEM 刻画地形精确程度的一个重要指标,是指 DEM 最小的单元格的长度。因为 DEM 是离散的数据,所以 (x, y) 坐标其实都是一个一个小方格,每个小方格上标识出其高程。这个小方格的长度就是 DEM 分辨率,分辨率数值越小,分辨率就越高,刻画的地形程度就越精确,同时数据量也呈几何级数增长。已知实时地形图分辨率为 a (单位为 m),参考地形图分辨率为 b ($b > a$)。

1) 粗匹配,降低实时高程图分辨率

1. 将实时高程图降到与参考高程图相同的分辨率,大大减少匹配的数据量,缩短匹配时间,提高匹配效率,选取有效区域为 $c \times c$ 像元的矩形。

2. 根据实时高程图和参考高程图上的原点地理坐标信息,在参考高程图上截取相对应的地理坐标的区域块,向外延伸 L_1 (单位为 m) 的搜索范围,即选取大小为 $(c \times a + 2L_1)$ 宽度的参考子区。

3. 将 u_{cell} 大小设置为 c/n_1 像元,每 2×2 个 u_{cell} 组成一个 b_{block} ,所以实时高程图的 EHOG 特征描述

子就可以用 b_{block} 的特征向量表示,记为 f_{a1} 。参考高程图的每个 b_{block} 特征向量记为 $f_b = (f_{b1}, f_{b2}, \dots, f_{bn})$ 。

4. 计算 f_{a1} 与 f_b 之间的欧氏距离。欧氏距离最小的窗口位置就是粗匹配结果。

2) 细匹配,提高参考高程图分辨率

1. 将参考高程图插值成与实时高程图的分辨率相等,以粗匹配的结果为中心,向外延伸 L_2 (单位为 m),得到新的参考子区。

2. 将 u_{cell} 大小设置为 c/n_2 像元,计算实时高程图的 EHOG 特征描述子,记为 f_{a2} 。

3. 设计的一个 $c \times c$ 个像元的滑动窗口在参考子区上滑动,滑动步长设置为 l_1 像元,依次计算滑动窗口内参考地形的 HOG 特征描述子,记为 $f_c = (f_{c1}, f_{c2}, \dots, f_{cn})$ 。

4. 计算 f_{a2} 与 f_c 之间的欧氏距离,距离最小的匹配区就是细匹配的结果,若欧氏距离大于等于阈值 e_1 ,则表明匹配误差较大,返回搜索下一张图片,反之进入到精匹配阶段。

3) 精匹配,搜索步长为 l_2 像元

1. 精匹配操作流程与细匹配类似,只需要以细匹配的结果为中心,向外延伸 L_3 (单位为 m),得到新的参考子区, u_{cell} 大小设置为 c/n_3 像元, EHOH 特征描述子记为 f_{a3} , 滑动步长设为 l_2 像元 ($l_2 < l_1/20$), 滑动窗口内参考地形的 HOG 特征描述子记为 $f_d = (f_{d1}, f_{d2}, \dots, f_{dn})$ 。

2. 计算 f_{a3} 与 f_d 之间的欧氏距离, 距离最小的匹配区就是精匹配的结果。若欧氏距离大于等于阈值 e_2 , 则表明匹配误差较大, 返回搜索下一张图, 反之输出匹配结果, 精匹配得到的结果就是最佳匹配位置。

基于形态学 EHOH 的 InSAR 地形匹配算法流程如图 9 所示。

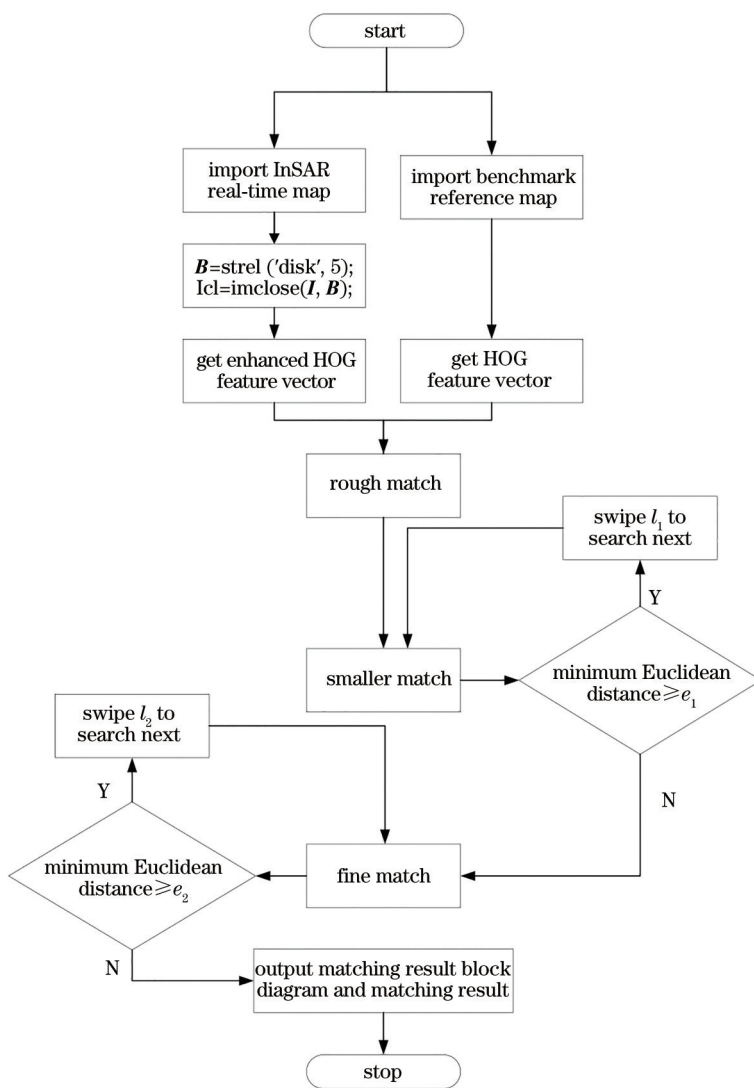


图 9 所提算法流程图

Fig. 9 Flowchart of proposed algorithm

4 仿真实验及结果分析

4.1 实验数据获取

选用基准数字地形高程图作为参考高程图, 利用 InSAR 成像仿真系统^[22-23]生成实时地形高程图。其中, 选取的参考高程图尺寸为 868×1316 像元, 分辨率为 $25 \text{ m} \times 25 \text{ m}$, 实时高程图尺寸为 512×512 像元, 分辨率为 $3 \text{ m} \times 3 \text{ m}$ 。

4.2 匹配结果

地形匹配需要利用地形地貌的分布特征进行匹配运算, 本实验选取地形信息量^[24-25]较丰富的适配区进行实验, 共进行①、②、③三组实验, 选取的实时高程图大小分别为 320×320 像元、 240×240 像元、 160×160 像元, 每组各进行 5 次匹配实验, 得到平均匹配误差, 实验参数设置如表 1 所示。之后将所提算法与未进行增强的 HOG 算法和传统的梯度

表 1 实验参数设置

Table 1 Experimental parameter setting

Parameter	①	②	③
c	320.00	240.00	160.00
L_1 / m	720.00	840.00	960.00
L_2 / m	288.00	216.00	144.00
L_3 / m	48.00	36.00	24.00
c_{bin}	9	9	9

互相关算法进行对照,梯度互相关算法^[26]是具有代表性的常用地形匹配算法。

选取其中的两次实验为例,左图为实时数字高程图,右图为参考子区的数字高程图。匹配结果如图 10 所示。每次实验的具体实验结果和平均匹配误差如表 2 所示。两次实验结果在表 2 中均由阴影标出。

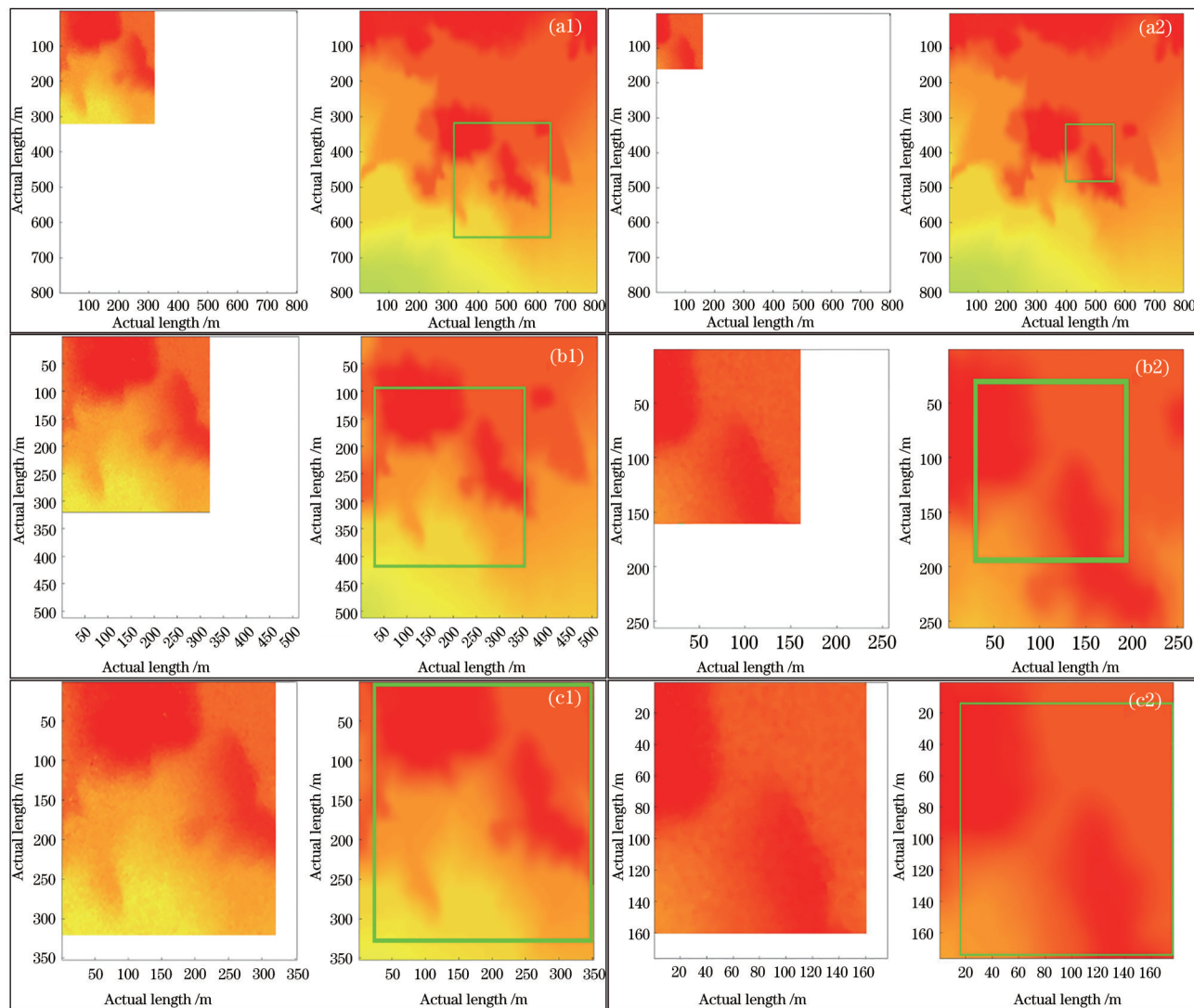


图 10 匹配结果。(a)粗匹配;(b)细匹配;(c)精匹配

Fig. 10 Match results. (a) Rough match; (b) smaller match; (c) fine match

从表 2 可以看出,第①组梯度互相关算法的平均匹配精度是(6.60 m, 13.80 m),HOG算法的平均匹配精度是(4.20 m, 9.00 m),EHOG算法的平均匹配精度是(2.40 m, 6.00 m)。第②组梯度互相关算法的平均匹配精度是(8.40 m, 15.60 m),HOG算法的平均匹配精度是(4.80 m, 8.40 m),EHOG算法平均匹配精度是(3.00 m, 7.20 m)。第③组梯

度互相关算法的平均匹配精度是(10.20 m, 16.80 m),HOG算法的平均匹配精度是(4.80 m, 9.60 m),EHOG算法平均匹配精度是(3.00 m, 7.20 m)。所以,相比HOG算法、梯度互相关算法,所提EHOG算法具有更高的匹配精度,匹配误差最小可以达到2.40 m,可以很好地体现优越性。

通过对三组的匹配结果进行比较,发现第①组

表 2 不同算法的性能比较

Table 2 Performance comparison of different algorithms

Algorithm	Matching result of ①						
	Error	1	2	3	4	5	Average error
Gradient cross-correlation	$\Delta x / m$	3.00	3.00	15.00	9.00	3.00	6.60
	$\Delta z / m$	6.00	9.00	18.00	27.00	9.00	13.80
HOG	$\Delta x / m$	3.00	6.00	3.00	6.00	3.00	4.20
	$\Delta z / m$	3.00	12.00	15.00	9.00	6.00	9.00
EHO	$\Delta x / m$	0.00	3.00	3.00	3.00	3.00	2.40
	$\Delta z / m$	3.00	3.00	9.00	9.00	6.00	6.00

Algorithm	Matching result of ②						
	Error	1	2	3	4	5	Average error
Gradient cross-correlation	$\Delta x / m$	12.00	12.00	3.00	6.00	9.00	8.40
	$\Delta z / m$	24.00	27.00	15.00	6.00	6.00	15.60
HOG	$\Delta x / m$	6.00	3.00	6.00	3.00	6.00	4.80
	$\Delta z / m$	15.00	9.00	6.00	6.00	6.00	8.40
EHO	$\Delta x / m$	0.00	3.00	6.00	3.00	3.00	3.00
	$\Delta z / m$	3.00	6.00	9.00	9.00	9.00	7.20

Algorithm	Matching result of ③						
	Error	1	2	3	4	5	Average error
Gradient cross-correlation	$\Delta x / m$	15.00	15.00	3.00	9.00	9.00	10.20
	$\Delta z / m$	6.00	15.00	27.00	30.00	6.00	16.80
HOG	$\Delta x / m$	6.00	3.00	9.00	3.00	3.00	4.80
	$\Delta z / m$	3.00	9.00	18.00	12.00	6.00	9.60
EHO	$\Delta x / m$	3.00	3.00	3.00	3.00	3.00	3.00
	$\Delta z / m$	3.00	9.00	12.00	6.00	6.00	7.20

的匹配精度更高,所以可以得出结论:在所提算法适应范围内,用于匹配的地形数据量大小对匹配精度有一定的影响,地形数据量越大,地形特征信息量越丰富,匹配精度越高。其中,存在一次误差较大的匹配,达到 12 m 的匹配误差。主要原因是实时高程图获取的时间与参考高程图获取时间有一定的时间间隔,地形的高程多少发生了一点变化,雷达在测量过程中存在一定的测量误差;而且实时高程图是存在斑点噪声的,同时选取的地形数据量较小,所以在匹配定位的时候会发生匹配误差较大的情况。

4.3 抗噪声性能测试

实时地形高程图是利用 InSAR 获得的,雷达在测量过程中不可避免地存在一定的测量误差,这些测量误差可以认为是加性高斯噪声。针对这种误差,通过在原来获取的第①组实时高程图上叠加不同信噪比(SNR)的高斯噪声来检测和比较 EHO 算法、HOG 算法和梯度互相关算法的抗噪性能。

本实验共进行了 5 个级别的噪声干扰测试,噪声信噪比为 1 dB~9 dB,其中 SNR 越小,代表所加的噪声干扰越大。实验结果如表 3 和图 11 所示。

表 3 不同噪声情况下的匹配结果

Table 3 Matching results under different noise conditions

Algorithm	Average matching error of noise with different signal-to-noise ratio					
	Error	9 dB	7 dB	5 dB	3 dB	1 dB
Gradient cross-correlation	$\Delta x / m$	9.60	10.20	12.60	16.80	17.40
	$\Delta z / m$	14.40	16.20	19.80	24.60	27.60
HOG	$\Delta x / m$	4.20	6.60	8.40	12.60	13.20
	$\Delta z / m$	9.00	9.60	10.20	17.40	18.00
EHO	$\Delta x / m$	2.40	5.40	7.20	10.20	12.00
	$\Delta z / m$	6.00	8.40	9.60	14.40	16.20

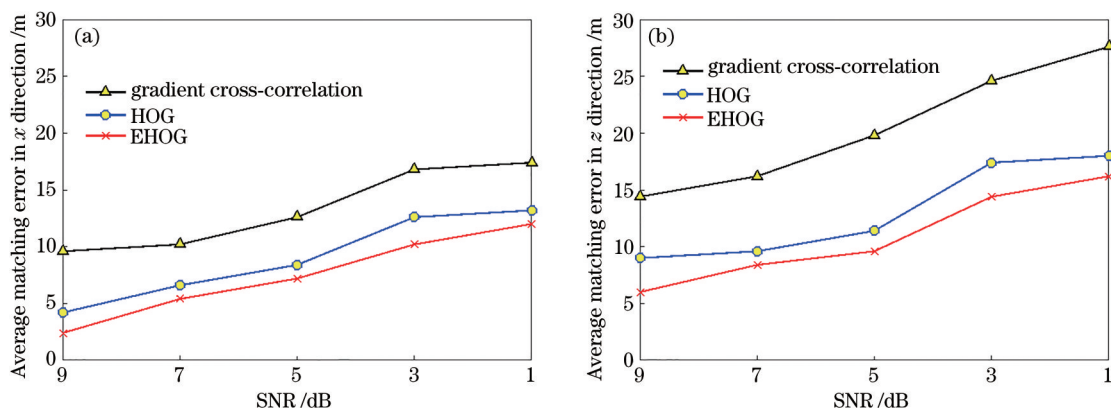


图 11 不同噪声匹配误差折线图。(a) x 方向的平均匹配误差; (b) z 方向的平均匹配误差

Fig. 11 Polyline graphs of matching error for different noises. (a) Average matching error in x direction; (b) average matching error in z direction

从表 3 和图 11 可以看出:弱噪声对 HOG 算法和 EHOg 算法的影响很小,说明了所提三步优化匹配搜索策略的有效性;强噪声对 EHOg 算法会有一定影响,但当信噪比大于 5 dB 时,产生的匹配误差仍不超过 10 m 的误差范围,所以 EHOg 算法具有较强的实用性;同时在不同的噪声情况下,所提算法的匹配误差比梯度互相关算法的匹配误差小很多,抗噪能力更强。

5 结 论

提出了一种基于形态学增强型 HOG 特征的 InSAR 地形匹配算法。采用形态学闭运算对实时 REM 进行预处理,提出具有增强型 HOG 特征 (EHOg 特征),以 HOG 特征描述子作为 REM 与 DEM 匹配的特征,以欧氏距离作为相似性度量的地形匹配方法。实验结果证明,与 HOG 算法、传统的梯度互相关算法相比,EHOg 算法具有更高的匹配精度和更强的抗噪性能,当噪声信噪比大于 9 dB 时可以达到 2.40 m 的匹配精度。因此 EHOg 算法具有较强的鲁棒性和实用性,能够很好地应用于 InSAR 地形匹配。

参 考 文 献

- [1] Yuan N. Research on matching algorithm of terrain aided navigation system[D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2007: 3-4.
苑娜. 地形辅助导航系统的匹配算法研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2007: 3-4.
- [2] Wang G J, Wang W, Wang W, et al. The terrain matching technology based on the Haar wavelet[J]. Chinese Journal of Radio Science, 2002, 17(3):

240-244.

王广君, 王巍, 汪文, 等. 基于 Haar 小波的地形匹配技术[J]. 电波科学学报, 2002, 17(3): 240-244.

- [3] Xu R, Zhu X H, Zhao J X. Analysis of the standard status and structure of matching navigation system [J]. Geospatial Information, 2012, 10(3): 1-6.
徐瑞, 朱筱虹, 赵金贤. 匹配导航标准现状与标准体系分析[J]. 地理空间信息, 2012, 10(3): 1-6.
- [4] Golden J P. Terrain contour matching (TERCOM): a cruise missile guidance aid[J]. Proceedings of SPIE, 1980, 0238: 10-18.
- [5] Han Y R, Wang B, Deng Z H, et al. A mismatch diagnostic method for TERCOM-based underwater gravity-aided navigation[J]. IEEE Sensors Journal, 2017, 17(9): 2880-2888.
- [6] Feng Q T. The research on new terrain elevation matching approaches and their applicability[D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2004.
冯庆堂. 地形匹配新方法及其环境适应性研究[D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2004.
- [7] Ye B, Hu X L, Zhang Y Y, et al. 3D terrain matching algorithm and performance analysis based on 3D Zernike moments[J]. Journal of Astronautics, 2007, 28(5): 1241-1245.
叶斌, 胡修林, 张蕴玉, 等. 基于 3D Zernike 矩的三维地形匹配算法及性能分析[J]. 宇航学报, 2007, 28(5): 1241-1245.
- [8] Gong J B, Cheng H, Ma J, et al. 3D terrain matching algorithm based on terrain contour orthogonal decomposition[J]. Infrared and Laser Engineering, 2008, 37(5): 924-928.
龚俊斌, 程华, 马杰, 等. 基于地形轮廓面正交分解

- 的三维地形匹配算法[J]. 红外与激光工程, 2008, 37(5): 924-928.
- [9] Zhao R Q, Wang H Q, Wang K, et al. Recognition of bronze inscriptions image based on mixed features of histogram of oriented gradient and gray level co-occurrence matrix[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2020, 57(12): 121003.
赵若晴, 王慧琴, 王可, 等. 基于方向梯度直方图和灰度共生矩阵混合特征的金文图像识别[J]. 激光与光电子学进展, 2020, 57(12): 121003.
- [10] Wang Q S. Research on high-efficiency and high-precision processing techniques of spaceborne interferometric synthetic aperture radar[D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2011: 1-4.
王青松. 星载干涉合成孔径雷达高效高精度处理技术研究[D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2011: 1-4.
- [11] Li Y J. Research on DEM/DOM generation method for airborne millimeter-wave InSAR[D]. Beijing: China University of Geosciences, 2020: 8-10.
李永杰. 机载毫米波 InSAR 生成高精度 DEM/DOM 方法研究[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2020: 8-10.
- [12] Zhu J C. Methods on high-accuracy DEM extraction from interferometric SAR and its accuracy analysis [J]. Computer Engineering & Software, 2018, 39(10): 170-174.
朱俊聪. INSAR 高精度 DEM 提取方法及其精度分析[J]. 软件, 2018, 39(10): 170-174.
- [13] Dalal N, Triggs B. Histograms of oriented gradients for human detection[C]//2005 IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR'05), June 20-25, 2005, San Diego, CA, USA. New York: IEEE Press, 2005: 886-893.
- [14] Li W S, Han Y, Ruan M H, et al. Improved pedestrian detection method based on enhanced HOG [J]. Computer Systems & Applications, 2020, 29(10): 199-204.
李文书, 韩洋, 阮梦慧, 等. 改进的基于增强型 HOG 的行人检测算法[J]. 计算机系统应用, 2020, 29(10): 199-204.
- [15] Chen Y G. Research on image processing algorithms based on mathematical morphology[J]. Information & Communications, 2019, 32(12): 67-68.
陈尹刚. 基于数学形态学图像处理算法研究[J]. 信息通信, 2019, 32(12): 67-68.
- [16] Zhao J, Qiao J, Ding X T, et al. fNIRS signal motion correction algorithm based on mathematical morphology and median filter[J]. Acta Optica Sinica, 2020, 40(22): 2230002.
赵杰, 乔吉日木图, 丁雪桐, 等. 基于数学形态学和中值滤波的 fNIRS 信号运动校正算法研究[J]. 光学学报, 2020, 40(22): 2230002.
- [17] Zeng Y J, He Y B, Li W. Edge detection algorithm of gear based on improved morphological gradient[J]. Tool Engineering, 2017, 51(1): 101-103.
曾亚君, 何毅斌, 李伟. 基于改进形态学梯度的齿轮边缘检测[J]. 工具技术, 2017, 51(1): 101-103.
- [18] Zhang D K, Luo S M. Function extension of morphological closing operation and its application [J]. Computer Engineering and Applications, 2010, 46(27): 185-187.
张大坤, 罗三明. 形态学中闭运算功能的扩展及其应用[J]. 计算机工程与应用, 2010, 46(27): 185-187.
- [19] Cheng D, Lu H C, Gao W G. License plate location based on improved Canny operator edge detection and mathematical morphology[J]. Journal of Heilongjiang University of Technology (Comprehensive Edition), 2019, 19(12): 68-72.
程聃, 陆华才, 高文根. 基于改进 Canny 算子边缘检测和数学形态学的车牌定位算法[J]. 黑龙江工业学院学报(综合版), 2019, 19(12): 68-72.
- [20] Tong X B, Meng C, Sun Y Z, et al. Contour matching algorithm based on HOG feature description [J]. Journal of Donghua University (Natural Science), 2020, 46(5): 787-792.
童小彬, 孟焯, 孙以泽, 等. 基于 HOG 特征描述的轮廓匹配算法[J]. 东华大学学报(自然科学版), 2020, 46(5): 787-792.
- [21] Shi D, Yang Q K, Zhu Q F. Effect of DEM resolution on elevation gradient in typical areas of farming-pastoral transitional zone[J]. Journal of Northeast Agricultural University, 2019, 50(9): 59-68.
师动, 杨勤科, 朱奇峰. 农牧交错带典型样区 DEM 分辨率对高程梯度的影响[J]. 东北农业大学学报, 2019, 50(9): 59-68.
- [22] Shi D Q. Research on InSAR imaging algorithm based on BP and multibaseline phase unwrapping[D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2014: 7-39.
时代奇. 基于 BP 的 InSAR 成像算法及多基线相位解缠算法研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2014: 7-39.
- [23] Zhang F, Li H S, Jiang T. Digital elevation model generation in LiDAR point cloud based on cloth simulation algorithm[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2020, 57(13): 130104.

- 张凡, 李华山, 江涛. 基于布模拟算法在 LiDAR 点云中生成数字高程模型[J]. 激光与光电子学进展, 2020, 57(13): 130104.
- [24] Xu X S, Tang J J, Zhang T, et al. Selection for matching area in terrain aided navigation based on entropy-weighted grey correlation decision-making [J]. Journal of Chinese Inertial Technology, 2015, 23 (2): 201-206.
- 徐晓苏, 汤郡郡, 张涛, 等. 基于熵值法赋权灰色关联决策的地形辅助导航适配区选择[J]. 中国惯性技术学报, 2015, 23(2): 201-206.
- [25] Rao Z, Zhang J Y, Feng W. Navigability evaluation method of terrain matching navigation area[J]. Journal of Henan University (Natural Science), 2016, 46(1): 89-95.
- 饶喆, 张静远, 冯炜. 一种地形匹配导航区域的可导航性评价方法[J]. 河南大学学报(自然科学版), 2016, 46(1): 89-95.
- [26] Gao J Q, Peng D D, Zhou T, et al. Terrain matching localization for underwater vehicle based on gradient fitting[J]. Journal of Sensors, 2018, 2018: 1-14.