

基于非凸包的灌注区包络自动拟合方法

谢家靖¹, 滕奇志¹, 何小海¹, 龚剑²

(1. 四川大学 电子信息学院 图像信息研究所, 四川 成都 610065;

2. 成都西图科技有限公司, 四川 成都 610065)

摘要: 在微观驱替实验中, 往往利用玻璃刻蚀模型来观察油水在岩心孔隙中的运动过程。对实验中采集到的微观驱替序列图进行分析研究, 能够对驱替效果进行定量计算。针对微观驱替序列图中灌注区数量不固定、形态特征不规则、图像数量多等问题, 提出了一种基于非凸包的灌注区包络自动拟合方法。即先对灌注区点集进行边缘提取, 再对灌注区进行聚类分析, 最后采用非凸包算法对每个灌注区提取包络。结果显示采用该方法得到的波及系数比传统凸包算法具有更高的精确性, 并可实现包络拟合的自动化, 具有比较高的应用价值。

关键词: 灌注区包络; 非凸包; 波及系数

中图分类号: TP312

文献标识码: A

DOI: 10.19358/j.issn.2096-5133.2020.11.014

引用格式: 谢家靖, 滕奇志, 何小海, 等. 基于非凸包的灌注区包络自动拟合方法[J]. 信息技术与网络安全, 2020, 39(11): 84-89.

Automatic envelope fitting method of perfusion areas based on non-convex hull

Xie Jiajing¹, Teng Qizhi¹, He Xiaohai¹, Gong Jian²

(1. Institute of Image Information, School of Electronics and Information Engineering,

Sichuan University, Chengdu 610065, China;

2. Chengdu Xitu Technology Company Limited, Chengdu 610065, China)

Abstract: During microscopic displacement experiments, the glass etching model is often used to observe the movement of oil and water in the core pores. The quantitative displacement effect is able to be obtained by analyzing the microscopic displacement sequential images collected in the experiment. Regarding the problems of the volatile number and shape of perfusion areas, large quantity of sequential images collected in the experiment, this paper proposes an automatic envelope fitting method of perfusion areas which is based on non-convex hull. After boundary extraction, cluster the point set of perfusion areas. Then the envelope of each perfusion area is calculated by non-convex hull algorithm. The result shows that the conformance coefficient obtained by this method has higher accuracy than the result of traditional convex hull algorithm. In addition, this method achieves the automation of envelope fitting which has high application value.

Key words: envelope of perfusion area; non-convex hull; conformance efficiency

0 引言

微观驱替实验^[1-2]是指利用真实岩心或者微观仿真模型进行驱替实验, 通过显微镜观察微观状态下油水在孔隙中的渗流情况, 从而分析水驱油、聚合物驱油等驱替方式的驱替效果以及剩余油的分布情况。由于良好的可视性和可重复利用性, 石油地质工作者往往采用玻璃刻蚀模型来代替真实岩心进行仿真实验, 其实验过程如图 1 所示^[3-4]。通过

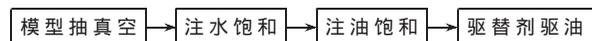


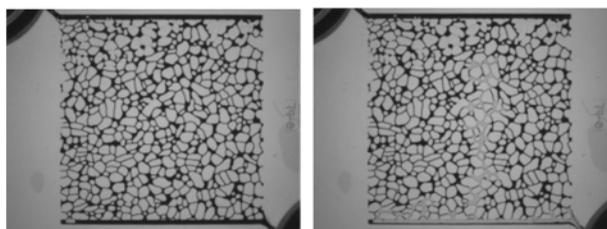
图 1 微观驱替仿真实验过程

玻璃刻蚀模型可以在驱替过程中观察到油、水、驱替剂在孔隙中的运移过程, 再通过连接摄像装置, 采集模型的动态图像, 利用图像处理技术对采集到的图像进行定量分析, 从而研究不同驱替剂的驱替效率和机理^[5]。

为分析驱替剂在模型中的波及程度,需要拟合灌注区包络。灌注区顾名思义是驱替剂灌注的区域。通过包络曲线拟合灌注入的驱替剂所波及到的范围,由此计算出驱替剂在该时刻下的波及系数,从而为评价驱替剂的驱替效率提供重要依据。由于灌注区形态复杂且不规则,难以得到准确的波及系数,目前大多系统中提取灌注区包络是通过手动拟合的方式。但手动拟合方法步骤繁琐,特别是对动态序列图进行处理时,要进行多次的重复操作,这给使用者带来较大的负担,不适合微观驱替序列图的批量处理。为实现提取灌注区包络的自动化,同时保证灌注区拟合的精确度,本文提出了一种基于非凸包的灌注区包络自动拟合方法。

1 灌注区图像介绍

以水驱油为例,图 2(a)、(b)分别为玻璃模型中充满油时的饱和油图像和驱替实验过程中水驱 14 min 39 s 的图像,通过将驱替过程中的图像与饱和油图像进行比较,可以很明显地观察到驱替剂灌注进的区域。

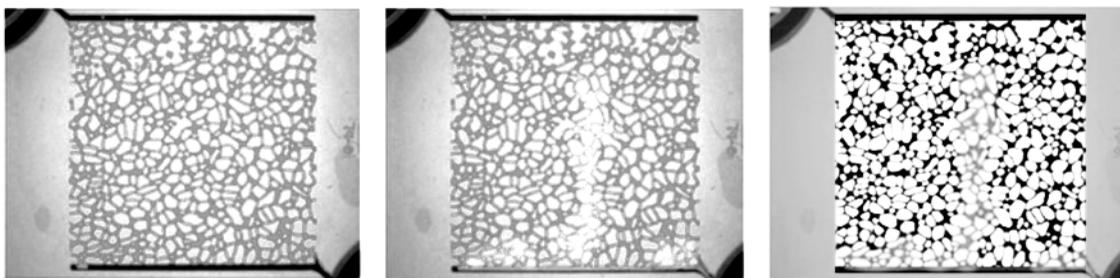


(a) 饱和油

(b) 水驱油

图 2 微观驱替实验图像

为了提取出灌注区的包络,首先需要将图片进行预处理,目的是为了将玻璃模型中充满原油的孔隙部分作为目标与仿真模型背景区分出来。目标区域的颜色单一,且颜色与背景颜色相区分度明显。



(a) 饱和油

(b) 水驱 14 min 39 s

(c) 灌注区区域

图 3 目标分割图像

利用这个特点,本文采用最大方差法,对图像进行分割。

以饱和油时刻的分割结果作为基准图,并将水驱过程中序列图的分割结果与基准图进行比较,就可以得到驱替过程中各个时刻的灌注区。以水驱 14 min 39 s 时刻的图像为例,图 3(c)红色的区域即为注入的水所填充的区域,也就是灌注区。本文的目的是自动计算上述预处理得到的灌注区的包络,也就是用比较平滑的曲线将灌注的区域包住形成一个封闭的形状,并保证包络的精确性,从而能够计算得到较为准确的波及系数。

2 非凸包拟合算法

凸包算法通常用来计算有限点集的闭合包络,已被广泛应用于图像处理、数据分析等领域。所谓凸包(Convex Hull),如图 4(a)、图 4(b)所示,即对于平面上离散的点集 Q ,寻找包含该点集的面积最小的凸多边形 P ,凸包也就是构成 P 的所有顶点,本文用 $CH(Q)$ 来表示 Q 的凸包。常用的凸包算法有Graham扫描算法、Jarvis步进法等^[6-7]。

对于较为规则的点集,如图 4(a)所示,使用凸包算法能够较好地拟合点集的形状;但对于类似图 4(b)的不规则点集,凸包算法并不能准确描述点集的包络。在微观驱替实验中,灌注区通常是不规则的,采用传统的凸包算法去拟合灌注区,将引入过多的无效区域,为后续的波及系数计算带来明显的误差。对于这种形态的点集,用非凸包(Non-convex Hull)或者凹包(Concave Hull)来描述更加准确^[8-9],如图 4(c)、图 4(d)所示,非凸包能够更好拟合不规则点集的边界。本文采用 $NCH(Q)$ 来表示 Q 的非凸包。

本文采用渐进迭代的思想,在凸包算法的基础上挖掘非凸包点,最终形成非凸包。目前对于非凸包数学上并没有明确的定义。对于同一个点集,采用

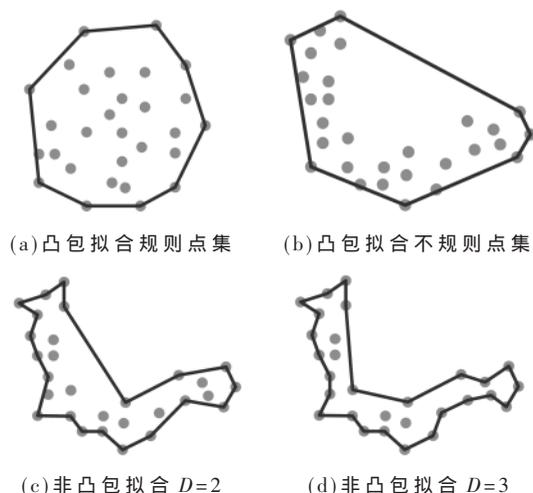


图4 凸包和非凸包

不同的挖掘深度 D , 获取的非凸包形态也不相同^[10]。挖掘深度顾名思义, 即挖掘非凸包点的程度, 本文定义为在凸包点之间寻找非凸包点的次数。如图4所示, 图(c)和图(d)采用同样的非凸包算法, 但采用不同的挖掘深度, 得到的包络也有所不同。若 D 值过小, 就无法精确地描述点集 Q 的形状; D 值过大, 则非凸包所构成的多边形边界就不够平滑。因此, 对于不同的点集, 需要采用合适的挖掘深度 D 。综上所述, 本文对传统的凸包算法进行改进, 算法具体如下:

(1) 使用传统凸包算法提取点集 Q 的凸包 $CH(Q)$, 构成凸多边形 $S = \{s_0, s_1, s_2, \dots, s_{N-1}\}$, 其中 s_i 是凸包点, 也就是凸多边形的顶点;

(2) 设置挖掘深度 D , 边长阈值 L ;

(3) 在每两个相邻凸包点 s_i 和 s_{i+1} 之间进行挖掘, 以 s_i 和 s_{i+1} 构成的边长为搜索直径, 计算待挖掘点与 s_i 和 s_{i+1} 构成的夹角 θ , 并选取 θ 最大的点为非凸包点, 存入 $NCH(Q)$ 中;

(4) 如果挖掘次数大于 D , 或者 s_i 和 s_{i+1} 的距离小于 L , 则停止挖掘, 寻找下两个相邻凸包点之间的非凸包点, 重复步骤(3);

(5) 最终生成的包络点集可表示为:

$$B(Q) = NCH(Q) \cup CH(Q) \quad (1)$$

以 s_0 和 s_1 为例, 以 s_0 和 s_1 构成的边长为搜索直径, 计算待挖掘点与 s_0 和 s_1 所构成的夹角, 并选取夹角最大的点为挖掘点, 如图5(b)所示, 选取 p 作为非凸包点, 并存入 $NCH(Q)$ 。通过不断迭代, 逐步缩小范围, 直到满足停止挖掘的条件, 再继续搜索

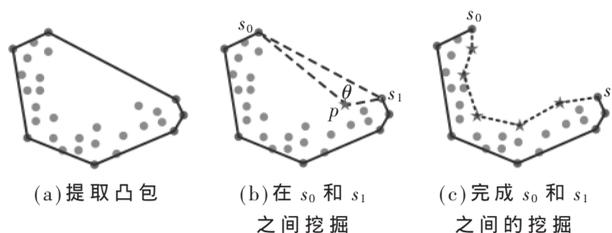


图5 非凸包算法

下两个凸包点之间的疑似非凸包点。通过这样的方法, 可以明显去除凸包中绝大多数的无效区域。

3 灌注区的自动拟合方法

不同于上述算法中离散的点集, 由于微观驱替图像中的灌注区属于块状点集, 直接使用该点集计算包络会带来巨大的计算量, 本文在拟合包络前先提取点集的边缘点, 剔除点集的内部点, 通过减少点数量大幅提升计算速度。

另外由于孔隙的非均质性, 灌注区的分布存在不确定性, 图像中可能存在多个灌注区。以图3(c)为例, 可以明显看到有3个间隔较大的红色区域。为更加准确地分析灌注区的特征, 进一步排除无效区域, 需要在拟合包络前先对点集进行聚类计算。通常传统的聚类算法需要人工设定参数, 不合理的参数会导致分类结果不符合预期。本文采用迭代的思路, 使用一种自适应参数的 DBSCAN 算法^[11], 寻找较为合适的邻域 (Eps) 和领域内最少点集数 (MinPts)。

综上所述, 本文提出了一种基于非凸包的灌注区包络自动拟合方法, 具体步骤如下:

(1) 为减少数据计算量, 提取灌注区的边界点, 得到点集 Q ;

(2) 设定 Eps 和 MinPts 的初始值, 使用 DBSCAN 算法对点集 Q 进行聚类, 获取分类数, 不断增加 Eps, 继续进行聚类, 如果连续三次进行迭代得到的分类数不变, 则选取当前的 Eps 为最优参数;

(3) 使用最优参数输入 DBSCAN 进行聚类, 得到灌注区点集 $Q_i (0 \leq i < N, N$ 为分类数);

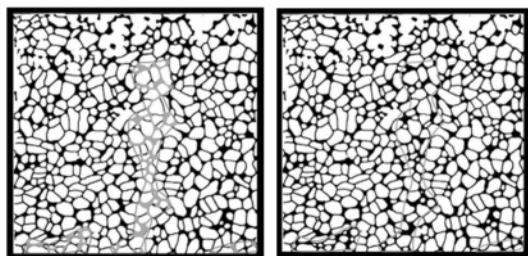
(4) 采用上节中的非凸包拟合算法对各个灌注区点集计算, 得到包络点集 $B(Q_i)$, 如图6(a)所示;

(5) 为模拟水前沿线的真实特征, 使用曲线拟合来平滑 $B(Q_i)$ 所构成的多边形边界;

(6) 计算各个灌注区的面积 A_i , 也即步骤(5)得到的曲线所围成的面积, A 为模型面积, 则波及系数 E_A 可以表示为:

$$E_A = \sum_{i=0}^{N-1} \frac{A_i}{A} \quad (2)$$

图 6(b)的结果显示,该方法能够较好地拟合灌注区,排除了绝大部分无效区域,所得到的结果更精确,拟合的水前沿线在直观上更符合实际情况。



(a)非凸包拟合算法 (b)平滑后结果

图 6 灌注区的自动拟合方法

4 实验结果分析

在实际微观驱替实验中,往往需要对整个实验过程中采集到的序列图进行批量处理,因此需要考虑灌注区包络提取速度。影响灌注区包络提取速度的两个主要因素为点集数量以及挖掘深度。对于前者,通过提取边界点,可以大幅度减少点集数量,从而提升计算速度;对于后者,挖掘深度的增大能够提升灌注区包络的拟合精度,但同时也会带来较大计算量。为选取较为合适的挖掘深度,选取实验中多张不同时刻具有代表性的驱替图像,分别计算不同挖掘深度所得到的波及系数与手动拟合之间的误差值。

如图 7、图 8 所示, D 代表挖掘深度,随着 D 的不断增大,波及系数逐渐逼近手动拟合得到的波及系数值。当 D 小于 20 时,此时挖掘深度过小,并没有完全排除无效灌注区;当挖掘深度大于 20 时,自动提取得到的波及系数和平均绝对误差不再变化,趋于稳定。因此本文选取挖掘深度为 20,在尽量减小挖掘次数的同时保证提取的精度。

由于灌注区的波及范围并没有绝对的参考值,直观判断具有一定的主观性,因此本文方法是采用多人手动拟合灌注区所得到的波及系数的平均值作为比较的参考值,在一定程度上弱化了主观性对结果的影响,具有较高的可信度。手动拟合方式得到的结果如图 9(b)所示。为检验上述方法的准确性,本文选取多张连续时间的具有代表性的驱替图像,表 1 中 E_1 、 E_2 、 E_3 分别表示采用凸包算法、本文方

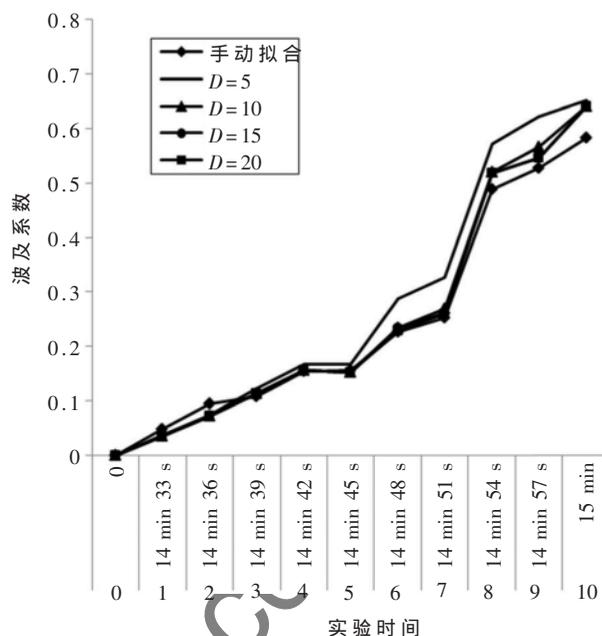


图 7 不同挖掘深度的波及系数对比

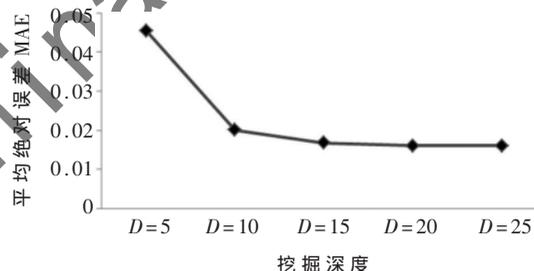
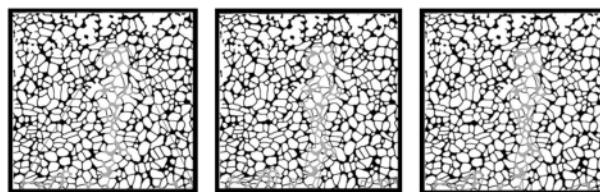


图 8 不同挖掘深度的误差分析



(a)凸包算法 (b)手动拟合 (c)本文方法

图 9 三种方法拟合包络结果对比

法以及手动拟合的方式拟合灌注区包络所计算得到的波及系数。其中图片编号为 0 的图片为基准图片,即饱和油图片。

从表 1 中的数据可知,采用这种方法自动提取灌注区包络,计算得到的波及系数与手动拟合的结果比较相近,可以准确地反映驱替剂所波及的范围。采用平均绝对误差(MAE)对表 1 中的数据进行误差分析:

$$MAE_{E_1, E_3} = 0.268 0$$

表 1 波及系数计算

图片编号	驱替时间	E_1	E_2	E_3
0	0	0	0	0
1	14 min 33 s	0.143 3	0.035 2	0.047 9
2	14 min 36 s	0.311 5	0.072 1	0.094 5
3	14 min 39 s	0.445 9	0.113 2	0.108 1
4	14 min 42 s	0.551 3	0.156 1	0.153 1
5	14 min 45 s	0.545 9	0.152 6	0.156 4
6	14 min 48 s	0.556	0.228 1	0.226 9
7	14 min 51 s	0.630 2	0.259 8	0.252 8
8	14 min 54 s	0.668 3	0.517 9	0.488 5
9	14 min 57 s	0.722 8	0.546 3	0.526 9
10	15 min	0.743 1	0.640 6	0.583 6

$MAE_{E_2, E_3} = 0.016 1$

根据计算结果,本文算法相比传统凸包算法进行灌注区包络拟合有更高的精确度。将上述数据放入同一折线图,如图 10 所示,可以看到本文算法与凸包算法相比,在各个时刻均有更高的精确度。驱替实验的 14 min 51 s 之前,本文方法计算得到的波及系数与手动拟合得到的波及系数几乎一致,由于此时的灌注区面积相对较小,目标个数较少,本文方法能够准确地拟合灌注区包络;但是随着灌注区面积的增大,目标个数增多,灌注区的包络更为复杂,甚至灌注区内部存在非灌注区,因此没有完全排除无效灌注区域。

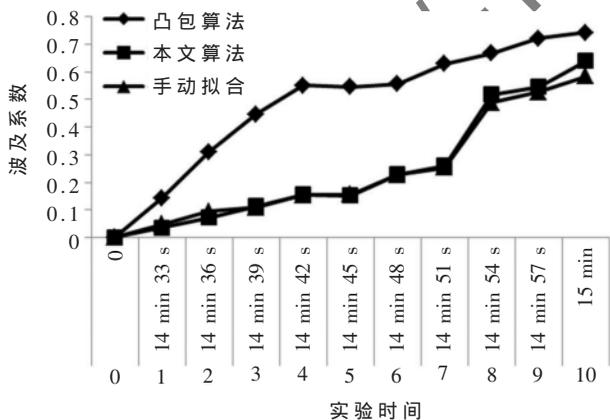


图 10 三种方法的波及系数变化

5 结论

由于灌注区形态复杂且不规则,采用凸包算法难以准确提取灌注区的包络,往往会引入大面积的无效区域。本文方法先对灌注区点集进行边缘提

取,减少计算量,再对灌注区进行聚类分析,最后采用非凸包算法对每个灌注区提取包络。另外,采用不同的挖掘深度对不同时刻具有代表性的驱替图像进行灌注区包络计算,通过误差分析得到最合适的挖掘深度,在保证精确度的情况下尽可能地提升计算速度。实验结果证明采用本文方法得到的波及系数相比凸包算法具有更高的精确性,与参照值的相关程度更高。相比步骤繁琐的手动拟合方式,本文方法在保证结果精确性的同时减少了大量的人工操作,具有比较高的应用价值。

参考文献

- [1] 李滔,肖文联,李闯,等.砂岩储层微观水驱油实验与数值模拟研究[J].特种油气藏,2017(1):1-7.
- [2] 宋明明,韩淑乔,董云鹏,等.致密砂岩储层微观水驱油效率及其主控因素[J].岩性油气藏,2020,32(1):135-143.
- [3] 闫伟超,孙建孟.微观剩余油研究现状分析[J].地球物理学进展,2016,31(5):2198-2211.
- [4] 陈浩,滕奇志,何小海,等.基于几何形状特征的剩余油形态识别[J].微型机与应用,2017,36(1):18-21.
- [5] 吴聃,鞠斌山,陈常红,等.基于微观驱替实验的剩余油表征方法研究[J].中国科技论文,2015,10(23):2707-2710,2715.
- [6] CORMEN T H, LEISERSON C E, RIVEST R L, et al. 算法导论[M].殷建平,徐云,王刚,等,译.北京:机械工业出版社,2013.
- [7] GALTON A, DUCKHAM M. What is the region occupied by a set of points?[J]. GIScience, 2006, 4197: 81-98.
- [8] ADRIANO M, MARIBEL Y S. Concave hull: a k-nearest neighbours approach for the computation of the region occupied by a set of points[C]. International Conference on Computer Graphics Theory and Applications, 2007.
- [9] LÓPEZ-CHAU A, LI X O, YU W. Convexconcave hull for classification with support vector machine[C]. 12th IEEE International Conference on Data Mining Workshops, 2012: 431-438.
- [10] PARK J S, OH S J. A new concave hull algorithm and concaveness measure for n-dimensional datasets[J]. Journal of Information Science and Engineering, 2013, 29(2): 379-392.

- [11] 李文杰, 闫世强, 蒋莹, 等. 自适应确定 DBSCAN 算法参数的算法研究[J]. 计算机工程与应用, 2019, 55(5): 1-7.

(收稿日期: 2020-06-23)

作者简介:

谢家靖(1996-), 男, 硕士研究生, 主要研究方向:

图像处理与数字通信。

滕奇志(1962-), 通信作者, 女, 博士, 教授, 博士生导师, 主要研究方向: 图像处理与模式识别。

何小海(1964-), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 主要研究方向: 图像处理与网络通信。

(上接第 73 页)

- [3] IBRAHIM M, LIU H, JAWAHAR M, et al. Verification: accuracy evaluation of WiFi fine time measurements on an open platform[C]. Proceedings of the 24th Annual International Conference on Mobile Computing and Networking, 2018: 417-427.
- [4] KOTARU M, JOSHI K, BHARADIA D, et al. Spotfi: decimeter level localization using WiFi[C]. Proceedings of the 2015 ACM Conference on Special Interest Group on Data Communication, 2015: 269-282.
- [5] XIE Y X, LI Z J, LI M. Precise power delay profiling with commodity Wi-Fi[J]. IEEE Transactions on Mobile Computing, 2018, 18(6): 1342-1355.
- [6] BARRAU A, BONNABEL S. Invariant Kalman filtering[J]. Annual Review of Control, Robotics, and Autonomous Systems, 2018, 1: 237-257.
- [7] KOIVISTO M, COSTA M, HAKKARAINEN A, et al.

Joint 3D positioning and network synchronization in 5G ultra-dense networks using UKF and EKF[C]. 2016 IEEE Globecom Workshops(GC Wkshps). IEEE, 2016: 1-7.

- [8] SCHMIDT R. Multiple emitter location and signal parameter estimation[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 1986, 34(3): 276-280.
- [9] HENDERSON H V, SEARLE S R. On deriving the inverse of a sum of matrices[J]. SIAM Review, 1981, 23(1): 53-60.

(收稿日期: 2020-06-28)

作者简介:

林杰(1993-), 男, 硕士研究生, 主要研究方向: 导航定位。

赵跃新(1992-), 男, 博士研究生, 主要研究方向: 导航定位。

刘鹏(1981-), 男, 博士, 副教授, 主要研究方向: 导航定位、计算机网络。

版权声明

经作者授权，本论文版权和信息网络传播权归属于《信息技术与网络安全》杂志，凡未经本刊书面同意任何机构、组织和个人不得擅自复印、汇编、翻译和进行信息网络传播。未经本刊书面同意，禁止一切互联网论文资源平台非法上传、收录本论文。

截至目前，本论文已经授权被中国期刊全文数据库（CNKI）、万方数据知识服务平台、中文科技期刊数据库（维普网）、JST日本科技技术振兴机构数据库等数据库全文收录。

对于违反上述禁止行为并违法使用本论文的机构、组织和个人，本刊将采取一切必要法律行动来维护正当权益。

特此声明！

《信息技术与网络安全》编辑部
中国电子信息产业集团有限公司第六研究所