



武汉大学学报(信息科学版)

Geomatics and Information Science of Wuhan University

ISSN 1671-8860, CN 42-1676/TN

《武汉大学学报(信息科学版)》网络首发论文

题目: 基线段长度限定的领海基点优化选取算法
作者: 董箭, 彭认灿, 李宁, 刘国辉, 唐露露
收稿日期: 2021-12-06
网络首发日期: 2022-02-18
引用格式: 董箭, 彭认灿, 李宁, 刘国辉, 唐露露. 基线段长度限定的领海基点优化选取算法[J/OL]. 武汉大学学报(信息科学版).
<https://kns.cnki.net/kcms/detail/42.1676.TN.20220218.1143.006.html>



网络首发: 在编辑部工作流程中, 稿件从录用到出版要经历录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿等阶段。录用定稿指内容已经确定, 且通过同行评议、主编终审同意刊用的稿件。排版定稿指录用定稿按照期刊特定版式(包括网络呈现版式)排版后的稿件, 可暂不确定出版年、卷、期和页码。整期汇编定稿指出版年、卷、期、页码均已确定的印刷或数字出版的整期汇编稿件。录用定稿网络首发稿件内容必须符合《出版管理条例》和《期刊出版管理规定》的有关规定; 学术研究成果具有创新性、科学性和先进性, 符合编辑部对刊文的录用要求, 不存在学术不端行为及其他侵权行为; 稿件内容应基本符合国家有关书刊编辑、出版的技术标准, 正确使用和统一规范语言文字、符号、数字、外文字母、法定计量单位及地图标注等。为确保录用定稿网络首发的严肃性, 录用定稿一经发布, 不得修改论文题目、作者、机构名称和学术内容, 只可基于编辑规范进行少量文字的修改。

出版确认: 纸质期刊编辑部通过与《中国学术期刊(光盘版)》电子杂志社有限公司签约, 在《中国学术期刊(网络版)》出版传播平台上创办与纸质期刊内容一致的网络版, 以单篇或整期出版形式, 在印刷出版之前刊发论文的录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿。因为《中国学术期刊(网络版)》是国家新闻出版广电总局批准的网络连续型出版物(ISSN 2096-4188, CN 11-6037/Z), 所以签约期刊的网络版上网络首发论文视为正式出版。

引用格式：

董箭, 彭认灿, 李宁, 等. 基线段长度限定的领海基点优化选取算法[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2022, DOI: 10.13203/j.whugis20210191 (DONG Jian, PENG Rencan, LI Ning, et al. An Optimal Selection Algorithm of Territorial Sea Baseline Points with the Limitation of Baseline Length Threshold [J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2022, DOI: 10.13203/j.whugis20210191)

基线段长度限定的领海基点优化选取算法

董箭^{1,2} 彭认灿^{1,2} 李宁³ 刘国辉⁴ 唐露露^{1,2}

1. 海军大连舰艇学院海洋测绘系, 辽宁 大连 116018
2. 海军大连舰艇学院海洋测绘工程军队重点实验室, 辽宁 大连 116018
3. 海军研究院, 北京 100161
4. 海图信息中心, 天津 300450

摘要：由于直线基线具有易于实施管理、与沿岸低潮线变化关联较小, 且有利于当事国获得更大管辖海域等优点, 广泛应用于沿海国家领海基点选取及基线的确定。本文针对当前直线基线系统中基点选取方法存在的问题, 在利用凸壳生成算法确定理想基点的基础上, 结合《联合国海洋法公约》对基线段长度的限定, 分析了基于备选基点的基线图构建及优化原理, 通过基点间通视性判定准则的建立, 构建了内水面积最大化原则下的备选基点快速判定及优化选取模型, 设计了面向最优基线图生成的备选基点点序确定步骤, 提出了一种基线段长度阈值限定的领海基点优化选取算法, 实现了“基线段长度阈值限制”和“内水面积最大化”联合约束条件下的备选基点快速选取。实验分析表明: 该算法可实现基线段长度阈值限定条件下, 优选基点所构基线图多边形面积的最小化(内水面积最大化), 且具有较高的算法效率, 可为沿海国家尤其是群岛国家领海基点的选取及直线基线的确定提供技术支持。

关键词：领海基线; 直线基线; 长度阈值; 内水面积; 领海基点; 优化选取

中图分类号: P229

文献标识码: A

收稿日期: 2021-12-06

项目资助: 国家重点研发计划(2017YFC1405505); 国家自然科学基金(42071439)。

第一作者: 董箭, 博士, 副教授, 主要研究方向为制图理论与方法。navydj@163.com

通讯作者: 彭认灿, 博士, 教授。pengrencan63@163.com

1 引言

领海基线(简称基线)是沿海国家领海、专属经济区和大陆架以及外大陆架的起始线,是国家间海洋划界的数据基础^[1-2]。根据基线系统的类型不同,可以划分为正常基线系统、直线基线系统和混合基线系统(正常基线系统与直线基线系统的组合)三种类型^[3]。相比于直接取自大比例尺沿岸低潮线的正常基线系统,直线基线系统受领海基点(简称基点)的选取数量及其空间点位分布影响较大,且与海洋划界结果关联密切^[4-6]。此外,由于采用直线基线系统有利于当事国获得更大的海洋权益,也便于海洋划界过程的实施管理和维护,因此包括我国在内的大多数海洋国家均采用直线基线系统,直线基线系统的优化构建对于沿海国家基点基线的公布及管辖水域的确定意义重大^[6-8]。

法理实践上,由于《联合国海洋法公约》(简称《公约》)中对于直线基线的确定方法定义却相对模糊,仅要求“直线基线不应在任何明显的程度上偏离海岸的总体方向”“群岛国家直线基线段总数中至多 3%可超过 100 海里,最长以 125 海里为限”^[1-3,6-8],这为采用直线基线系统的海洋国家确定基点基线提供了一定的灵活性。然而,需要指出的是:尽管《公约》只对群岛国家直线基线段长度及超限比例进行了数值约束,但非群岛国家直线基线偏离海岸总体方向的程度同样可由基线段长度加以限制,即通过基线段长度的数值约束实现直线基线偏离海岸总体方向程度的定量控制^[6,8-10]。为此,各沿海国家为获得尽可能大的内水(基线以内水域,国家对内水享有完全的排他性主权)面积,实现海洋权益的最大化,广泛开展了面向直线基线的备选基点(有利于确定最大内水面积之大陆、岛或(明)礁边缘向海一侧的凸出点位)选取技术研究(但受限于保密及技术封锁等原因,相关公开成果并不多见)^[8-14]。此外,考虑到我国在海洋划界中采用直线基线体系的现实情况,开展备选基点优化选取及直线基线确定方法研究,也将为我国后续第三批基线公布提供关键技术支持。

基点确定的首要原则是内水面积最大化。传统的人工基点选取方法,存在主观性高、效率低下等缺点,且缺乏量化的基点选取方案评估模型,基点选取结论的优劣性难以评价^[10-11,14]。为实现最大内水面积原则下基点选取方案的最优化,文献[11]提出了基于凸壳生成技术的基点选取方法^[10-11]。该方法利用非凸多边形面积始终不大于其凸壳多边形面积的几何特性,通过备选基点集凸壳的构建,实现了最大内水面积原则下理想基点(由备选基点所构凸壳多边形的入选基点)的自动选取。文献[11]所提方法本质上是一种凸壳生成算法在理想基点选取方面的特殊应用,其算法效率与凸壳生成算法相同。参照文献[15],凸壳生成算法效率与离散点集的序列相关。通常情况下,面向无序离散点集的凸壳生成算法,其时间复杂度的理论下限为 $O(n \log n)$;而面向有序离散点集(如简单多边形的顶点集合)的凸壳生成算法,其时间复杂度甚至可降低到 $O(n)$ 。因此,文献[11]所提方法不仅实现了领海基点的优化选取,且具有较高的算法效率。

然而,领海基点的选取还必须符合《公约》关于直线基线段长度阈值限制的规定。即在直线基线长度超限而使其明显偏离岸线总体走向时,应插入合适的备选基点,以实现理想基点选取方案的优化调整,且插入的备选基点应同样满足内水面积最大化原则^[10-14]。值得注意的是:凸壳生成算法并不涉及线段长度的比较与分析,其关键前提在于相邻线段向量叉积的运算与判断^[15-18],且该运算与判断过程直接决定了非凸多边形面积始终不大于其凸壳多边形面积的几何特性^[15,19-20]。因此,一方面,凸壳生成算法无法直接应用于基线段长度阈值限定的备选基点优化选取;另一方面,单纯通过基线段向量叉积运算与判断过程的基线段长度阈值约束,尽管可以实现备选基点的选取,但备选基点所构图形无法确保其符合凸壳多边形的几何特性。也就是说,基线段长度阈值限定的备选基点优化选取,尽管在求取目标上与凸壳相同,但优化选取的备选基点并不符合凸壳的数学定义,即难以通过简单的凸壳生成算法约束加以实现。

文献[11]尽管已经注意到直线基线长度阈值的限制,但由于涉及的备选基点较少,故直接采用组合遍历的方式对超长基线进行了调整,且对方法的效率影响较小。实际应用中,由于备选基点的数量通常较大,且与理想基点的组合方式较多,在备选基点优

化选取的过程中可能会出现基点“组合爆炸”现象，从而造成算法效率的显著降低，影响备选基点选取、直线基线确定及各类海洋界限生成与调整的灵活性及时效性^[10-11,14]。为解决上述问题，本文提出了一种基线段长度阈值限定的领海基点优化选取算法。通过对直线基线长度的数值条件约束，设计了基于备选基点的基线图构建及优化方案，结合内水面积最大化原则，构建了顾及基点通视性判定准则的备选基点快速判定模型，建立了通视性基准线内交的备选基点优化选取方法，实现了基于最优基线图生成的备选基点快速选取。最后通过具体对比实验验证了本文算法的正确性和有效性。

2 传统备选基点选取算法构建原理

记 $S = \{Q_1, Q_2, \dots, Q_n\}$ 为二维欧氏平面 (E^2) 上的备选基点集， $CH(S)$ 为经文献[11]所提算法解算获得的备选基点集 S 的凸壳 ($CH(S) \in S$)，则 $CH(S)$ 中的顶点集 $\{Q_1, Q_2, \dots, Q_n\}$ 即为基于凸壳生成算法的理想基点集。如图 1 所示， P_1 、 P_{12} 为理想基点，且基线段 P_1P_{12} 长度超出《公约》规定阈值 δ ； P_2 、 P_3 、 P_4 、 P_5 、 P_6 、 P_7 、 P_8 、 P_9 、 P_{10} 、 P_{11} 为理想基点间的备选基点。为保证理想基点 P_1 、 P_{12} 控制下的内水面积最大，需通过组合遍历的方式在 P_1 、 P_{12} 之间选取一定数量的备选基点，使得理想基点与备选基点所构多边形任意边长小于《公约》规定阈值 δ 且面积最小。

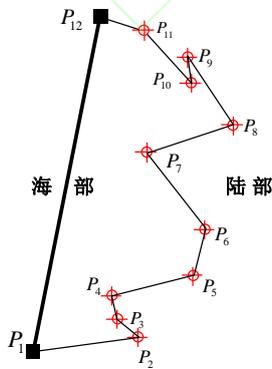


图1 备选基点选取原理

Fig.1 Selection Theory of alternative Baseline Points

记相邻理想基点 Q_i 、 Q_{i+1} 之间存在 n

个备选基点构成的点集 $S^n = \{P_2, P_3, \dots, P_{n+1}\}$ ，令 $P_1 = Q_i$ 且 $P_{n+2} = Q_{i+1}$ ，则理想基点 P_1 、 P_{n+2} 及备选基点集 S^n 共同构成了基点集 $V = \{P_1, P_2, \dots, P_{n+2}\}$ 。在不进行算法优化的前提下，对于备选基点集 S^n 中任意备选基点 P_i ($i \in [2, n+1]$)，其与后续备选基点 $P_{i+1}, P_{i+2}, \dots, P_{n+2}$ 可连接形成 C_{n+2-i}^1 条基线段。从而备选基点集 S^n 中各备选基点可连接形成 $C_n^1 + C_{n-1}^1 + \dots + C_1^1 = \frac{n(n+1)}{2}$ 条基线段。结合理想基点 P_1 与备选基点集 S^n 可连接形成的 C_n^1 条基线段（由于 P_1P_{n+2} 为超限基线，故不计入基线段数量统计），从而基点集 V 中可连接形成的基线段数量为 $\frac{n(n+3)}{2}$ 条。

为保证理想基点与备选基点所构多边形面积最小，基点集 V 中任意基线段应位于理想基点 P_1 、 P_{12} 控制下的理论最大内水区域（理想基点与备选基点顺次连线所围成的多边形区域）之内。参照文献[15]中线段与多边形包含关系判断算法，判定基点集 V 中任意两基点所构基线段是否被最大内水区域包含的时间复杂度为 $O(n+2)$ ，则判断 $\frac{n(n+3)}{2}$ 条基线段与最大内水区域包含关系的时间复杂度为 $O\left(\frac{n(n+3)(n+2)}{2}\right) \approx O(n^3)$ 。

3 基于备选基点的基线图构建及优化原理

3.1 基于备选基点的基线图构建原理

借鉴图论中关于图的相关概念^[15-20]，记基点集 V 与基线段集 E 构成的图形为基线图 $G(V, E)$ 。即：

$$G(V, E) = \left\{ \bigcup_{i=1}^{i=n+2} \bigcup_{j=1}^{j=n+2} L_{ij} \mid L_{ij} = P_i P_j \right. \\ \left. \mid \forall P_i \in V, \forall P_j \in V, i \neq j \right\} \dots (1)$$

式中： V 表示由理想基点 P_1 、 P_{n+2} 及备

选基点集 S'' 共同构成的基点集 $\{P_1, P_2, \dots, P_{n+2}\}$; E 表示其中 V 中任意基点 P_i 与 P_j ($i \neq j$) 之间的连线 L_{ij} 构成的基线段集。如图 2 所示, 理想基点及备选基点共同构成了基点集 $V = \{P_1, P_2, \dots, P_{12}\}$; 任意基点之间的连线(以红色虚线表示)构成了基线段集 E ; 备选基点 P_2, P_3, \dots, P_{11} 均位于理想基点所构基线段 P_1P_{12} 的向陆一侧。

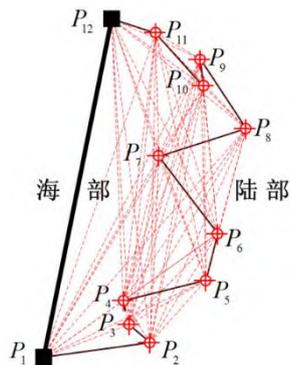


图2 基线图构建原理

Fig.2 Construction Theory of Baseline Graph

记顺次连接基点集 V 中各基点 P_i (按逆时针方向) 形成的多边形为基线图多边形 $G(V, E)_{Polygon}$ 。即：
 $G(V, E)_{Polygon} = \{P_1, P_2, \dots, P_{n+2}\}$ 。基线图多边形 $G(V, E)_{Polygon}$ 从理论上限定了以理想基点 P_1 为起点、 P_{n+2} 为终点的最大内水区域。从而对于基点集 V 中任意基点 P_i , 其与后续相异基点 P_j

($P_j \in \{P_{i+1}, \dots, P_{n+2}\}$) 所构基线段 L_{ij} 需在长度满足《公约》规定阈值 δ 的条件下, 不超出基线图多边形 $G(V, E)_{Polygon}$ 的分布范围。即:

$$G(V_i, E_i) = \left\{ \bigcup_{j=1}^{j=l} L_{ij} \mid L_{ij} = P_i P_j \mid d_{L_{ij}} < \delta, \right. \\ \left. L_{ij} \cap G(V, E)_{Polygon} = L_{ij} \right\} \quad (2)$$

式中: V_i 表示与基点 P_i 连线长度小于《公约》规定阈值 δ 且连线位于基线图多边形 $G(V, E)_{Polygon}$ 内的有效邻接基点 P_j 的集和; l 表示 V_i 中有效邻接基点 P_j 的数量; E_i 表示基点 P_i 与其有效邻接基点 P_j 所构基线段 L_{ij} 的集合; $G(V_i, E_i)$ 表示基点 P_i 的有效基线图。由于有效基线图 $G(V_i, E_i)$ 本质上是对基线图 $G(V, E)$ 中基线段 L_{ij} 长度及分布范围的二次条件约束, 故:
 $G(V_i, E_i) \in G(V, E)$ 。

3.2 基于备选基点的基线图优化原理

记以理想基点 P_1 为起点、 P_{n+2} 为终点且经过基点 P_i 有效基线段 L_{ij} 所构成的多边形为有效基线图多边形 $G_{ij}(V, E)_{Polygon}$ 。通过遍历 P_i 有效基线图 $G(V_i, E_i)$ 中各基线段 L_{ij} , 可解算对应于基点 P_i 的面积最小的优化基线图多边形 $OG_i(V, E)_{Polygon}$ 。即:

$$\left\{ \begin{aligned} G_{ij}(V, E)_{Polygon} &= \{P_1, \dots, P_i, P_j, \dots, P_{n+2}\} \\ OG_i(V, E)_{Polygon} &= \{G_{ij}(V, E)_{Polygon} \mid G_{ij}(V, E)_{Polygon}^S = \min_{j=1}^{j=l} (G_{ij}(V, E)_{Polygon}^S) \} \dots \dots \dots (3) \end{aligned} \right.$$

式中: S 表示多边形面积计算算子标记。在 (3) 式的基础上, 通过遍历基点集 V 中各基点 P_i , 可解算优化基线图多边形

$OG_i(V, E)_{Polygon}$ 中面积最小的最优基线图多边形 $OG(V, E)_{Polygon}$ 。即:

$$OG(V, E)_{Polygon} = \{OG_i(V, E)_{Polygon} \mid OG_i(V, E)_{Polygon}^S = \min_{i=1}^{i=n+2} (OG_i(V, E)_{Polygon}^S) \} \dots \dots \dots (4)$$

由于最优基线图多边形 $OG(V, E)_{Polygon}$ 的解算是以基点 P_i 有效基线图 $G(V_i, E_i)$ 构建为前提, 其中任意基线段 L_{ij} 长度均满足阈值约束条件 $d_{L_{ij}} < \delta$, 且

解算过程实现了任意基线段 L_{ij} 参与基线图多边形构造的面积最小值判断。因此, (4) 式可满足备选基点所构多边形任意边长小于《公约》规定阈值且总体积最小的应用需求。

3.3 基于备选基点的最优基线图构建效率分析

由基于备选基点的基线图构建及优化原理可知，对于任意不合理基线 P_1P_{n+2} ($d_{L_{n+2}} \geq \delta$)，需要在理想基点 P_1 、 P_{n+2} 之间插入适当的备选基点 S^* ，使其在满足基线长度阈值约束的前提下 ($d_{L_{ij}} < \delta$)，实现内水面积的最大化。假设理想基点 P_1 、 P_{n+2} 之间存在 n 个备选基点 $\{P_2, P_3, \dots, P_{n+1}\}$ ，则共有 $C_n^1 + C_n^2 + \dots + C_n^n = 2^n - 1$ 种可能的基点组合，若直接进行边长和面积判断，则算法复杂度为 $O(2^n - 1)$ ，且当备选基点数量较多时，算法运行时间将呈现爆炸性增长。考虑到最优基线图 $OG(V, E)$ 的构建前提在于生成任意基点 P_i 有效邻接基点集 V_i ，因此有效基线图多边形 $G_{ij}(V, E)_{Polygon}$ 面积最小原则下的基点 P_i 有效邻接基点 P_j 的快速确定，成为备选基点加速优化选取的核心问题。

4 基于最优基线图生成的备选基点快速选取模型

4.1 顾及基点通视性判定准则的备选基点快速判定

为实现有效基线图多边形 $G_{ij}(V, E)_{Polygon}$ 面积最小原则下，对基点 P_i 有效邻接基点 P_j ($j \in [1, l]$) 的优化选取。结合多边形面积计算的向量积累加原理^[15]，

本文提出基于基点通视性判定的有效基线图优化原则，以实现有效基线图多边形 $G_{ij}(V, E)_{Polygon}$ 面积不可能为最小的有效基线段 L_{ij} 及关联基点 P_j 的有效滤除。

对于任意基点 P_i 的有效邻接基点集 V_i ，在 V_i 非空且有效邻接基点数量大于 1 ($V_i \neq \emptyset$ 且 $l > 1$) 的条件下，记基点 P_i 的任意两个有效邻接基点分别为 P_k 、 P_j 。由多边形面积计算的向量积累加原理可知，与 P_k 相异的另一有效邻接基点 P_j ，需在基线段长度约束的基础上，应尽可能接近基线段 P_1P_{n+2} ，且远离其所在基线段 P_iP_j 的邻接基线段 P_iP_k ，即有效邻接基点 P_j 应位于基线段 P_1P_{n+2} 与基线段 P_iP_k 之间。由此，有效基线图多边形 $G_{ij}(V, E)_{Polygon}$ 面积最小条件下，基点 P_i 任意有效邻接基点 P_j 点位的向量约束条件为：

$$(\overrightarrow{P_1P_{n+2}} \times \overrightarrow{P_1P_j}) \cdot (\overrightarrow{P_iP_k} \times \overrightarrow{P_iP_j}) \leq 0 \dots (5)$$

为便于表述，将向量约束条件中的基线段 P_iP_k 定义为通视性基准线。若 (5) 式成立，表示有效邻接基点 P_j 与基点 P_i 通视，应保留；反之，表示有效邻接基点 P_j 与基点 P_i 不可通视，应滤除。如图 3 (a) 所示，记基点 P_1 的有效邻接基点集 $V_1 = \{P_2, P_3, P_4, P_5\}$ ，若基点 P_1 的通视性基准线为 P_1P_4 ，依据 (5) 式判断，则 P_1P_5 不可通视，即有效邻接基点 P_5 应滤除。

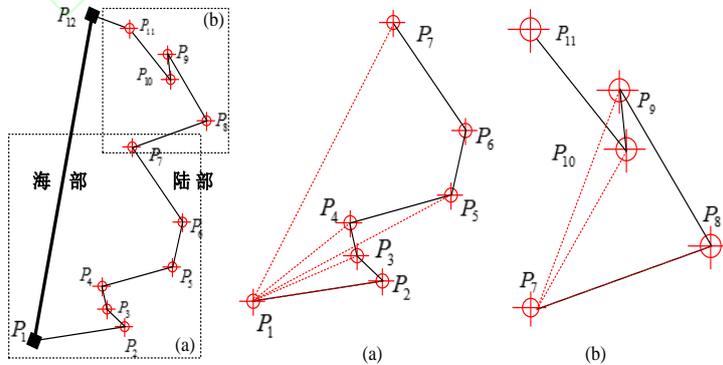


图3 基点通视性判定准则

Fig.3 Intervisibility Judging Principle of Baseline Points

需要指出的是：尽管基点通视性判定准则可有效滤除与基点 P_i 无法形成最小基线

图多边形面积的有效邻接基点 P_j , 但该判定准则却存在一定应用局限, 会出现部分有效邻接基点被不合理删除的情况。如图 3 (b) 所示, 经 (5) 式判断后, 基点 P_7 的有效邻接基点集 $V_7 = \{P_8, P_9\}$, 而 P_{10} 将不作为基点 P_7 的有效邻接基点。其原因在于若将 P_7P_9 作为通视性基准线时, P_7P_{10} 将不可通视, 故有效邻接基点 P_{10} 被滤除。然而, 相比于有效邻接基点 P_9 , 有效邻接基点 P_{10} 更为接近基线段 P_1P_{12} , 也更有可能与基点 P_7 共同形成面积最小的基线图多边形, 应予以保留。

造成上述有效邻接基点 P_{10} 被不合理滤除的原因在于基点通视性判定准则未充分考虑有效基线图构造的基本条件, 即任意有效基线段 L_{ij} 应处于其有效基线图多边形

$G_{ij}(V, E)_{Polygon}$ 的范围之内 ($L_{ij} \cap G_{ij}(V, E)_{Polygon} = L_{ij}$)。因此, 基点 P_i 的任意有效邻接基点 P_j 经基点通视性判定准则约束后, 需进一步判断该有效基线段 L_{ij} 是否在有效基线图多边形 $G_{ij}(V, E)_{Polygon}$ 内部, 若在, 则保留该有效邻接基点 P_j 。如图 4 所示, 依据基点通视性判定准则及有效基线段与有效基线图多边形包含关系的判定, 可得到每个基点 P_i 优化后的有效邻接点集 V_i 及关联边集合 E_i (以红色虚线箭头表示基点间的关联关系), 实现了有效基线图多边形 $G_{ij}(V, E)_{Polygon}$ 面积不可能为最小的有效基线段 L_{ij} 及关联基点 P_j 的快速滤除。

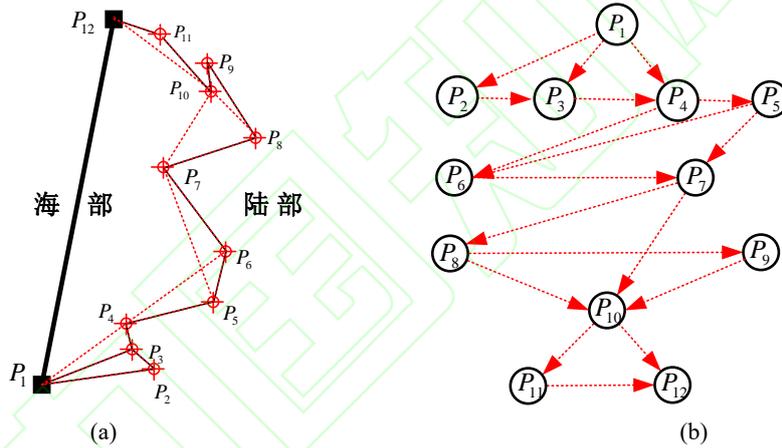


图4 有效基线图优化

Fig.4 Optimization of Effective Baseline Graph

4.2 通视性基准线内交的备选基点优化选取

基于基点通视性判定准则的有效基线图优化过程中, 由于通视性基准线选择的随机性, 不同基点的有效基线图中可能出现通视性基准线在基线图多边形 $G(V, E)_{Polygon}$ 内部相交的情况, 导致有效邻接基点被不合理滤除的情况。如图 5 (a) 所示, 记基点 P_4 的通视性基准线为 P_4P_6 ($P_6 \neq P_{n+2}$), 基

点 P_5 的通视性基准线为 P_5P_7 ($P_7 \neq P_{n+2}$), 且 P_5P_7 与 P_4P_6 相交。尽管依据基点通视性判定准则有效邻接基点 P_5 、 P_6 应分别从基点 P_4 、 P_5 各自的有效邻接基点集中滤除, 但由于 $\{P_4, P_5, P_7\}$ 与 $\{P_4, P_6, P_7\}$ 均有可能形成面积最小的基线图多边形, 从而基点 P_5 应加入基点 P_4 的有效邻接基点集, 基点 P_6 应加入基点 P_5 的有效邻接基点集。

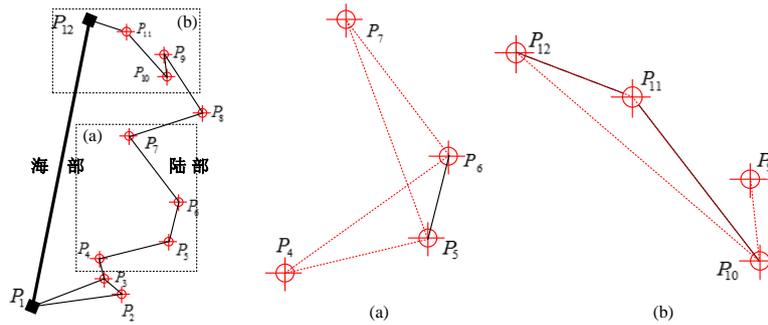


图5 通视性基准线内交判断

Fig.5 Internal Intersection Judgement of Intervisibility Fiducial Line

由此，对于基点 P_i 的通视性基准线 P_iP_k 而言，若 P_k 不是理想基点 P_{n+2} ，则需判断 P_iP_k 与其他基点 P_m 通视性基准线 P_mP_s 的相交情况，若 $P_iP_k \cap P_mP_s \neq \emptyset$ ，则此时的有效基线组合可能形成面积最小的基线图多边形，应保留 P_m 、 P_k 分别至基点 P_i 、 P_m 各自有效邻接点集。此外，对于基点 P_i 的通视性基准线 P_iP_k 而言，若 P_k 为理想基点 P_{n+2} ，则有效邻接点集 V_i 中其余有效邻接基点均不可能为最优邻接基点，应

予以滤除，此时 $V_i = \{P_{n+2}\}$ 。如图 5 (b) 所示，基点 P_{10} 的有效邻接点集 $V_{10} = \{P_{11}, P_{12}\}$ ，由于 $P_k = P_{12} = P_{n+2}$ ，则 P_{11} 不可能为最优邻接基点，予以滤除。如图 6 所示，经由通视性基准线内交判断后，每个基点 P_i 的有效邻接点集 V_i 及关联边集合 E_i 元素数量进一步减少，在确保最优基线图多边形 $OG(V, E)_{Polygon}$ 不被排除的前提下，实现备选基点选取优化的可能最优基线图构建。

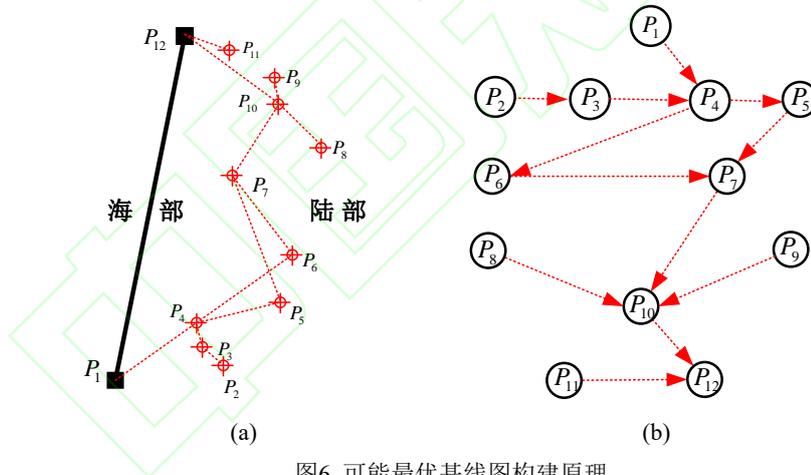


图6 可能最优基线图构建原理

Fig.6 Construction Theory of Possible Optimal Baseline Graph

4.3 面向最优基线图生成的备选基点序确定

通视性基准线内交的可能最优基线图构建后，可生成每个基点 P_i 的可能最优邻接点集。考虑到最优基线图生成的还需确定理想基点 P_1 到 P_{n+2} 路径上备选基点的点序，因此内水面积最大化原则下的可能最优基线图路径搜索成为最优基线图生成的关键前提。根据图的遍历理论，结合最优基线图包含理想基点 P_1 、 P_{n+2} 的基本特性，本文采用深度优先遍历算法对可能最优基线图

进行基线段遍历。具体步骤为：从理想基点 P_1 出发，访问 P_1 的第一个有效邻接基点 P_i ，并标记为已访问；然后以 P_i 为当前基点重复上述过程，直至搜索至理想基点 P_{n+2} ，记录搜索过程中备选基点的点序并生成可能最优基线路径；最后依次退回至尚未被访问的任意有效邻接基点，重复上述过程，得到其他可能最优基线路径。如图 7 (b) 所示，可能最优基线图经深度优先遍历后生成了两条可能最优基线路径 $P_1 \rightarrow P_4 \rightarrow P_5 \rightarrow P_7 \rightarrow P_{10} \rightarrow P_{12}$ 和

$$P_1 \rightarrow P_4 \rightarrow P_6 \rightarrow P_7 \rightarrow P_{10} \rightarrow P_{12}。$$

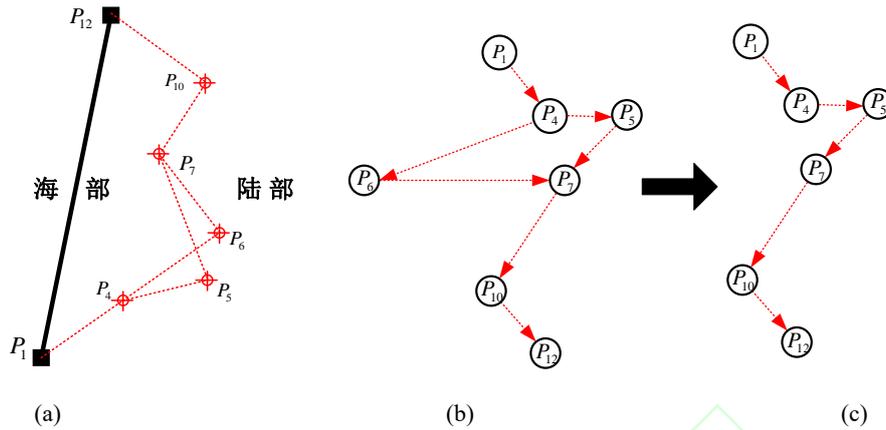


图7 最优基线路径生成原理

Fig.7 Construction Theory of Optimal Baseline Path

可能最优基线路径包含了满足基线长度限制且对应基线图多边形面积可能为最小的备选基点组合,需要进行基线图多边形面积对比以确定最优基线路径。如图7(c)所示,经基线图多边形面积对比,得到最优基线路径为 $P_1 \rightarrow P_4 \rightarrow P_6 \rightarrow P_7 \rightarrow P_{10} \rightarrow P_{12}$ 。

4.4 模型构建效率分析

由顾及基点通视性判定准则的备选基点快速判定原理可知,基点 P_i ($P_i \in V$)有效邻接基点集 V_i 的判定需遍历除 P_i 之外的基点集 V ,其时间复杂度为 $O(n+1)$,从而 n 个基点各自有效邻接基点集生成的总时间复杂度为 $O((n+1)(n+2))$ 。由通视性基准线内交的备选基点优化选取原理可知,基点 P_i ($P_i \in V$)的通视性基准线 $P_i P_k$ 与其他基点 P_m 通视性基准线 $P_m P_s$ 相交情况的判定同样需遍历除 P_i 之外的基点集 V ,其时间复杂度为 $O(n+1)$,从而 n 个基点各自通视性基准线相交判定的总时间复杂度亦为 $O((n+1)(n+2))$ 。最后,由最优基线路径生成原理可知,采用深度优先遍历算法和面积对比确定最优基线路径的时间复杂度为 $O(r+e)$ (其中: $r \in [2, n+2]$ 表示可能最优基线图的基点数量; $e \in [0, \frac{n(n+3)}{2}]$ 表示可能最优基线图的基线段数量)。

由此,基于最优基线图生成的备选基点快速选取模型构建的时间复杂度为 $O(2(n+1)(n+2)+O(r+e) \approx O(n^2))$ 。

5 实验结果与分析

5.1 有效性分析

为验证算法的正确性和有效性,本文在VC++环境下实现了基线段长度阈值限定的领海基点优化选取算法。实验数据采用1:700000比例尺某海区沿岸低潮线,基线段长度阈值 δ 设置为24海里(n mile)(δ 数值的确定不属于本文研究内容,实验中的 δ 取值,仅为验证算法)。在该段沿岸低潮线添加陆部封口线的基础上,利用凸壳生成算法确定其理想基点并计算各理想基线段长度。如图8所示,经由凸壳生成算法生成的理想基点分别为 P_1 、 P_2 、 P_3 、 P_4 、 P_5 。各理想基线长度统计如表1所示。

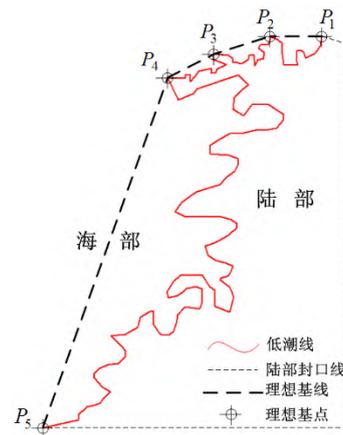


图8 基于凸壳生成算法确定理想基点

Fig.8 Ideal Baseline Points Based on the Convex Hull Construction Method

表1 各理想基线段长度统计
Tab.1 The lengths of ideal baselines

| 理想基线段 | P_1P_2 | P_2P_3 | P_3P_4 | P_4P_5 |
|-----------------|----------|----------|----------|----------|
| 基线长度 (/ n mile) | 14.26 | 16.86 | 14.60 | 105.98 |

如表 1 所示，理想基线段 P_4P_5 长度显著大于基线段长度阈值 δ ，无法实现该段基

线的法理性公布，需进一步采用本文算法对其进行优化处理。即从理想基点 P_4 、 P_5 间的备选基点中选取合适备选基点并插入，完成内水面积最大化原则下理想基线段 P_4P_5 的优化处理。利用本文算法进行备选基点优化选取的各步骤效果图如图 9 所示。优化后的各基线段长度如表 2 所示。

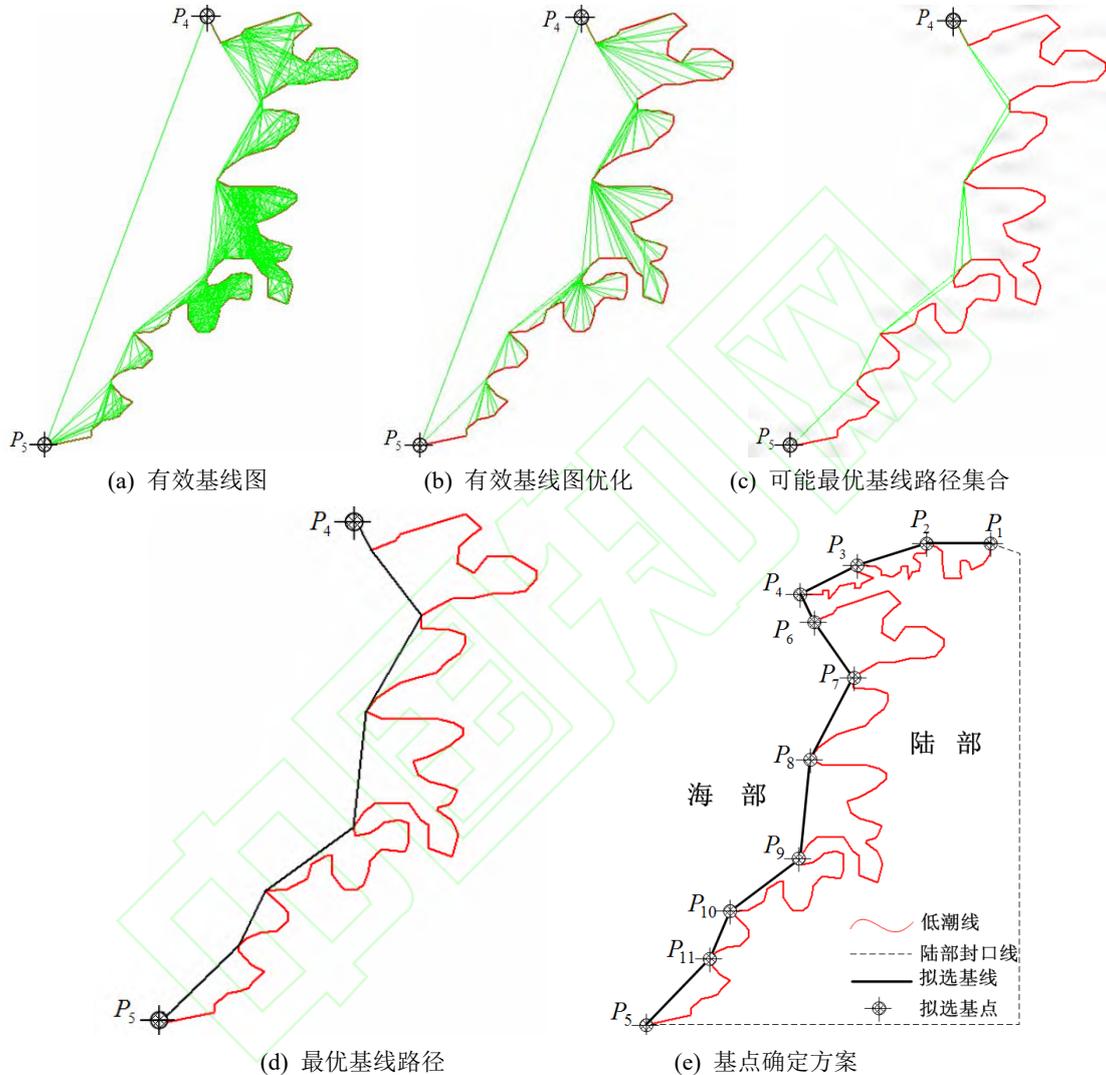


图9 本文算法确定的拟选基点

Fig.9 Formal Baseline Points Based on the Proposed Method

由图 9 可知，本文算法通过顾及基点通视性判定准则的备选基点快速判定、通视性基准线内交判断的备选基点优化选取处理排除了大量不合理的备选基点（基线段）组合，然后采用深度优先遍历算法确定可能的最优基线路径集合，最后进行面积对比确定最优基线路径

$P_6 \rightarrow P_7 \rightarrow P_8 \rightarrow P_9 \rightarrow P_{10} \rightarrow P_{11}$ ，即为理想基线段 P_4P_5 的基点优化方案。结合其他理想基点，该段沿岸低潮线最终确定的基点方案为 P_1 、 P_2 、 P_3 、 P_4 、 P_6 、 P_7 、 P_8 、 P_9 、 P_{10} 、 P_{11} 、 P_5 。

表2 优化后基线段长度统计

Tab.2 The lengths of optimization baselines

| 优化基线段 | P_1P_2 | P_2P_3 | P_3P_4 | P_4P_6 | P_6P_7 | P_7P_8 | P_8P_9 | P_9P_{10} | $P_{10}P_{11}$ | $P_{11}P_5$ |
|----------------------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|-------------|----------------|-------------|
| 优化基线段长度 (/n mile) | 14.26 | 16.86 | 14.60 | 7.05 | 15.77 | 21.40 | 23.00 | 20.16 | 11.68 | 21.24 |

实验结果表明：(1) 经本文算法优化后的各基线段长度均小于阈值 δ ；(2) 经对比分析，本文算法优选的基点与传统备选基点选取算法（简称传统算法）确定的基点一致，可保证在满足基线段长度阈值 δ 限制前提下所围成的内水面积为最大（基线图多边形 $P_5P_{11}P_{10}P_9P_8P_7P_6P_4P_5$ 面积为最小）。

5.2 效率分析

表3 基点优选效率对比

Tab.3 The comparison results of optimization efficiency

| 序号 | 理想基点间 备选基点数量 | 最优基线图多边形 面积 (n mile ²) | | 运行时间 (ms) | |
|----|-----------------|---------------------------------------|----------|-----------|------|
| | | 传统算法 | 本文算法 | 传统算法 | 本文算法 |
| 1 | 16 | 19154.5 | 19154.5 | 20 | 0 |
| 2 | 41 | 30939.5 | 30939.5 | 3442 | 16 |
| 3 | 71 | 33283.0 | 33283.0 | 182130 | 31 |
| 4 | 157 | ----- | 101775.0 | ----- | 125 |
| 5 | 278 | ----- | 105099.5 | ----- | 515 |

实验结果表明：(1) 实验一至实验三中，两类算法优选的基点组合对应的基线图多边形面积相等，即优选基点所围成的最大内水面积相等，说明本文算法优选的基点方案与传统算法结论相同，可保证在符合《公约》规定的前提下，实现内水面积最大化的目的；(2) 实验四至实验五由于出现了基点的“组合爆炸”现象，传统算法难以完成备选基点的优化选取。

此外，随着备选基点的数量增多，传统算法的基点优选效率显著性降低。表现为：实验一至实验二的耗时较少；实验三的耗时陡然增加；而实验四至实验五则无法实现备选基点的优化选取。分析原因为：实验一至实验二的备选基点数量较少，尽管相比于本文算法，传统算法的耗时尽管相对较多，但仍在可接受范围之内；实验三的备选基点数量显著增加，传统算法的耗时陡然增大，但本文算法的耗时仍然较少；实验四至实验五由于备选基点数量的急剧增大，导致备选基

为验证本文算法优选基点的效率，本文对五组需要优化的理想基线数据进行对比实验：实验环境为 Intel Core2 Duo 处理器，主频为 2.8 GHz，内存为 2G，分别采用传统算法和本文算法进行备选基点的优选实验。优选效率对比结果如表 3 所示。

点的组合呈现出爆炸性增长的趋势，传统算法基点优选工作难以完成。需要指出的是：尽管可以通过更大程度的制图综合，减少备选基点数量以提高工作效率，但综合过程存在着一定的不确定性，可能因综合尺度过大而舍去合适的备选基点，影响基点确定的准确性与稳定性。

6 结语

领海基点优化选取作为国家实施海洋划界的基础性工作，对于有效维护国家主权、实现国家海洋权益最大化意义重大。凸壳生成算法尽管可以实现采用直线基线系统相关国家理想基点的优化选取，但由于《公约》中对于直线基线段长度及超限比例的数值约束，理想基点需通过备选基点的优化选取与补充才能实现直线基线的有效构造。本文针对传统备选基点选取算法效率低下的问题，利用图论相关理论，提出了基线段长度阈值限定的领海基点优化选取算法，经过实

验、对比和分析, 得到以下结论:

(1) 本文算法通过对基线段长度阈值的数值约束, 设计了基于备选基点的基线图构建及优化方案, 结合基点间的通视性分析结论, 建立了内水面积最大化原则下的备选基点快速判定及优化选取模型, 实现了基线段长度阈值限定条件下, 优选基点所构基线图多边形面积的最小化(内水面积的最大化)。

(2) 相比传统备选基点选取算法, 本文算法时间复杂度较低, 克服了传统备选基点选取算法运算过程中可能出现的基点“组合爆炸”问题。

需要指出的是: 本文算法在对不合理的理想基线进行优化调整时, 只采用了“基线段长度阈值限制”和“内水面积最大化”两项约束条件, 下一步将考虑《公约》中对于“基线段超限比例”的要求, 研究复合约束条件下领海基点的自适应优化选取方法。此外, 由于海洋划界的目标是实现本国综合利益的最大化, 下一步研究中还将顾及各类资源储量与分布因素, 研究《公约》框架下综合利益最大化的领海基点自动选取方法。

参考文献:

- [1] Li Linghua. Determination of the Baseline Points and Baseline of the Territorial Sea[J]. Journal Of Ocean University Of China (Social Sciences Edition), 2007(3): 14-18. (李令华. 关于领海基点和基线的确定问题[J]. 中国海洋大学学报(社会科学版), 2007(3): 14-18.)
- [2] Cao Yingzhi, Fan Xiaoting. Research on the Development Trend of Baseline Points and Baseline Problem of Territorial Sea [J]. Pacific Journal, 2009(1): 66-73. (曹英志, 范晓婷. 论领海基点和基线问题的发展趋势[J]. 太平洋学报, 2009(1): 66-73.)
- [3] Yao Lingyi. The Territorial Sea Baseline of Outlying Archipelagos of Continental Countries[D]. Master's Degree Thesis, Wuhan University, 2018. (姚灵翌. 大陆国家远洋群岛领海基线制度研究[D]. 硕士学位论文, 武汉大学, 2018.)
- [4] Peng Rencan, Dong Jian, Chen Yi, etc. Research on Maritime Delimitation Model of High Accuracy Equiratio Method[J]. Hydrographic Surveying And Charting, 2009, 29(4): 14-18. (彭认灿, 董箭, 陈轶, 等. 高精度距离等比例线法海洋划界模型研究[J]. 海洋测绘, 2009, 29(4): 14-18.)
- [5] Dong Jian, Peng Rencan, Chen Yi, etc. An Algorithm for Centre Line Generation Based on Model of Approaching Intersection of Buffering Borderline from Reciprocal Direction[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2011, 36(9): 1120-1123. (董箭, 彭认灿, 陈轶, 等. 一种基于缓冲区边界相向逼近求交模型的曲线间中心线生成算法[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2011, 36(9): 1120-1123.)
- [6] Zhang Keyao. Research on 'Equidistance and Relevant Circumstance' Maritime Delimitation Methods[D]. Master's Degree Thesis, China Foreign Affairs University, 2018. (张珂瑶. “等距离+有关情况”海洋划界方法研究[D]. 硕士学位论文, 外交学院, 2018.)
- [7] He Xuewu, Li Linghua. Basic Status of the Baseline Points and Baseline of the Territorial Sea of Our Country and its Surrounding Maritime States[J]. Journal Of Ocean University Of China (Social Sciences Edition), 2008(3): 6-9. (何学武, 李令华. 我国及周边海洋国家领海基点和基线的基本状况[J]. 中国海洋大学学报(社会科学版), 2008(3): 6-9.)
- [8] Fan Litao. The Study on the Issue of Baseline Delineation of the Nansha Islands Are Applicable to the Mid-Ocean Archipelago[D]. Master's Degree Thesis, Southwest University of Political Science and Law, 2018. (范立涛. 南沙群岛适用远洋群岛领海基线划定的问题研究[D]. 硕士学位论文, 西南政法大学, 2018.)
- [9] Liang Deqing. Study on Maritime Delimitation Technology and Methods[D]. Master's Degree Thesis, Dalian Naval Academy, 2001. (梁德清. 海域划界技术与方法研究[D]. 硕士学位论文, 海军大连舰艇学院, 2001.)
- [10] Peng Rencan. Research and Practice on Maritime Boundary Delimitation GIS[D]. Doctoral Degree Thesis, China Information Engineering University, 2003. (彭认灿. 海洋划界 GIS 技术研究与实践[D]. 博士学位论文, 解放军信息工程大学, 2003.)
- [11] Peng Rencan, Wang Jiayao, Tian Zheng, etc. A

- Research for Selecting Baseline Point of the Territorial Sea Based on Technique of the Convex Hull Construction[J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2005, 34(1): 53-57. (彭认灿, 王家耀, 田震, 等. 基于凸壳构造技术的领海基点选取问题研究[J]. *测绘学报*, 2005, 34(1): 53-57.)
- [12] Peng Rencan, Xu Jian, Shen Wenzhou. The Solutions to Some Key Problems of Accurately Delimitating Sea Area Boundary on the Ellipsoid[J]. *Journal of Institute of Surveying and Mapping*, 2001, 18(3): 210-212. (彭认灿, 许坚, 沈文周. 椭球面上实施海域精确划界的几个关键问题[J]. *测绘学院学报*, 2001, 18(3): 210-212.)
- [13] Dong Jian. Research and Realization of Maritime Boundary Delimitation Technology Based on High-Precision Equal Ratio Line Method[D]. Master's Degree Thesis, Dalian Naval Academy, 2010. (董箭. 高精度距离等比例线法海洋划界技术研究与实现[D]. 硕士学位论文, 海军大连舰艇学院, 2010.)
- [14] Li Ning. Research on Low Tide Extraction and Baseline Point Selection[D]. Doctoral Degree Thesis, Dalian Naval Academy, 2014. (李宁. 沿岸低潮线推算及领海基点确定技术研究[D]. 博士学位论文, 海军大连舰艇学院, 2014.)
- [15] Zhou Peide. *Computation Geometry: Algorithm Analysis and Design*[M]. Tsinghua University Press, 2000. (周培德. 计算几何: 算法分析与设计[M]. 清华大学出版社, 2000.)
- [16] Li Gaixiao, Lü Cheng, Peng Rencan, et al. A Rapid Path Planning Algorithm Based on the Bilateral Convex-Hull Expanding Mode[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2021, 46(1): 58-64. (李改肖, 吕程, 彭认灿, 等. 一种利用双侧凸包扩张模型的路径快速规划算法[J]. *武汉大学学报 信息科学版*, 2021, 46(1): 58-64.)
- [17] Pang Shiyan, Liu Yawen, Zuo Zhiqi, etc. Combination of Region Growing and TIN Edge Segmentation for Extraction of Geometric Features on Building Facades[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2015, 40(1): 102-106. (庞世燕, 刘亚文, 左志奇, 等. 结合区域增长法和 TIN 边缘分割的建筑物立面几何特征提取[J]. *武汉大学学报 信息科学版*, 2015, 40(1): 102-106.)
- [18] Cui Xiaojie, Wang Jiayao, Gong Xianyong, etc. Hotspot Area Recognition by Using Fuzzy Density Clustering and Bidirectional Buffer[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2019, 44(1): 84-91. (崔晓杰, 王家耀, 巩现勇, 等. 利用模糊密度聚类 and 双向缓冲区自动识别热点区[J]. *武汉大学学报 信息科学版*, 2019, 44(1): 84-91.)
- [19] Li Zhaoxing, Zhai Jingsheng, Wu Fang. A Shape Similarity Assessment Method for Linear Feature Generalization[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2019, 44(12): 1859-1864. (李兆兴, 翟京生, 武芳. 线要素综合的形状相似性评价方法[J]. *武汉大学学报 信息科学版*, 2019, 44(12): 1859-1864.)
- [20] Guo Qingsheng, Feng Daipeng, Liu Yuangang, etc. A Shape Similarity Assessment Method for Linear Feature Generalization[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2014, 39(2): 177-180. (郭庆胜, 冯代鹏, 刘远刚, 等. 一种解算空间几何对象的最小外接矩形算法[J]. *武汉大学学报 信息科学版*, 2014, 39(2): 177-180.)

An Optimal Selection Algorithm of Territorial Sea Baseline Points with the Limitation of Baseline Length Threshold

DONG Jian^{1,2} *PENG Rencan*^{1,2} *LI Ning*³ *LIU Guohui*⁴ *TANG Lulu*^{1,2}

1. Department of Hydrography and Cartography, Dalian Naval Academy, Dalian 116018, China

2. Key Laboratory of Hydrographic Surveying and Mapping of PLA, Dalian Naval Academy, Dalian, 116018, China

3. Naval Research Institute, Beijing, 100161, China

4. Chart Information Center, Tianjin, 300450, China

Abstract: The straight baseline, which has the advantages of easy management, less correlation with the change of low tide line, and being conducive to the parties to obtain a larger jurisdiction area, is widely used in the baseline

points selection and baselines determination of territorial sea in coastal countries. Aiming at the problems in the selection of baseline points in the current straight line system, based on the determination of ideal baseline points by convex hull construction algorithm, and combined with the limitation of baseline length in the “United Nations Convention on the Law of the Sea”, the baseline graph construction and prioritization theory based on alternative baseline points is analyzed firstly. Then, by erecting the intervisibility judging principle between baseline points, a fast judgment and optimal selection model of alternative baseline points under the principle of maximum internal water area is established, and an alternative baseline point order determination steps for optimal baseline graph is designed. Lastly, the paper proposes an optimal selection algorithm of territorial sea baseline points with the limitation of baseline length threshold, which realizes the rapid selection of alternative baseline points under the limitation of baseline length threshold and internal water area maximization. The results show that: the algorithm can minimize the polygon area of the baseline graph (maximum the area of internal water) constructed by the optimal base point under the condition of baseline length limitation, and has a high algorithm efficiency, which can provide technical support for the selection of the baseline point of territorial sea of coastal countries, especially the archipelago countries and the determination of the straight baseline.

Key words: baseline of territorial sea; straight baseline; length threshold; internal water area; baseline point of territorial sea; optimum selection

First Author: DONG Jian, Ph D, associate professor, specializes in theories and methods of charting. E-mail: navydj@163.com

Corresponding author: PENG Rencan, Ph D, professor. E-mail: pengrencan63@163.com

Foundation support: The National Key Research and Development Program (2017YFC1405505); The National Natural Science Foundation of China (42071439)

网络首发:

标题: 基线段长度限定的领海基点优化选取算法

作者: 董箭, 彭认灿, 李宁, 刘国辉, 唐露露

收稿日期: 2021-12-06

DOI: 10.13203/j.whugis20210191

引用格式:

董箭, 彭认灿, 李宁, 等. 基线段长度限定的领海基点优化选取算法[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2022, DOI: 10.13203/j.whugis20210191 (DONG Jian, PENG Rencan, LI Ning, et al. An Optimal Selection Algorithm of Territorial Sea Baseline Points with the Limitation of Baseline Length Threshold [J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2022, DOI: 10.13203/j.whugis20210191)

网络首发文章内容和格式与正式出版会有细微差别, 请以正式出版文件为准!

您感兴趣的其他相关论文:

一种利用双侧凸包扩张模型的路径快速规划算法

李改肖, 吕程, 彭认灿, 董箭

武汉大学学报·信息科学版, 2021, 46(1): 58-64

<http://ch.whu.edu.cn/cn/article/doi/10.13203/j.whugis20180469>

一种基于缓冲区边界相向逼近求交模型的曲线间中心线生成算法

董箭, 彭认灿, 陈轶, 李宁

武汉大学学报·信息科学版, 2011, 36(9): 1120-1123

<http://ch.whu.edu.cn/article/id/666>

