

ЭКСПЛУАТАЦИЯ ВОДНОГО ТРАНСПОРТА, СУДОВОЖДЕНИЕ

DOI: 10.21821/2309-5180-2021-13-1-7-16

IDENTIFICATION OF THE RADAR CONSPICUOUS OBJECTS USING THE INTERNAL GEOMETRY OF THE CHARTED LANDMARKS POLYGON

B. V. Afanasev¹, V. V. Afanasev¹, S. S. Gubernatorov²

¹ — Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping,
St. Petersburg, Russian Federation

² — SSG NAVIGATION, Ltd, St. Petersburg, Russian Federation

The vulnerability of the global navigation satellite systems (GNSS) requires development of a resilient positioning system. One of the possible cost-effective approaches is the combination of ship's GNSS receiver with navigation radar. The key problem to be solved is the identification of echo signals of charted landmarks among all other radar conspicuous objects observed by means of the radar. The effectiveness of a new method of automatic identification of radar conspicuous landmarks and so the automatic position fixing, based on the use of the properties of the intrinsic geometry of the polygon formed by such objects is discussed in the paper. Identification of charted radar conspicuous objects that can be used as landmarks belongs to the class of tasks — "elimination of ambiguity". It is proposed to form a triangulation polygon formed by the stable echo signals from the radar objects. The identification of navigational landmarks among all observed objects is solved in local isometry, where affine transformations are valid and the main parameters of the internal geometry are preserved. Mathematical modeling performed for 5 objects has showed stable recognition of three of them (given ones). To get closer to the real situation, noise modeling is also performed. With significant random errors in the simulated directions and distances, a decrease in the significance of the objective function is observed, that is, the recognition of objects decreases. To reduce the impact of this effect, it is advisable to arrange the navigation landmarks so that small changes in the measured navigation parameters correspond to small changes in the parameters of the internal geometry, that is, to improve the conditionality of the task.

Keywords: vulnerability, alternative-position, resilient position fixing, intrinsic geometry, radar, identification, triangulation, affine transformations, elimination of ambiguity, differential geometry.

For citation:

Afanasev, Boris V., Viktor V. Afanasev, and Sergey S. Gubernatorov. "Identification of the radar conspicuous objects using the internal geometry of the charted landmarks polygon." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 13.1 (2021): 7–16. DOI: 10.21821/2309-5180-2021-13-1-7-16.

УДК 656.61.052

РАСПОЗНАВАНИЕ РАДИОЛОКАЦИОННЫХ ОБЪЕКТОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ВНУТРЕННЕЙ ГЕОМЕТРИИ ПОЛИГОНА ОРИЕНТИРОВ

Б. В. Афанасьев¹, В. В. Афанасьев¹, С. С. Губернаторов²

¹ — ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала С. О. Макарова»,
Санкт-Петербург, Российская Федерация,

² — ООО «ССГ НАВИГАЦИЯ», Санкт-Петербург, Российская Федерация

Тема предлагаемого исследования обусловлена актуальностью разработки устойчивой системы позиционирования, являющейся альтернативой Глобальной навигационной спутниковой системы. Отмечается, что одним из возможных и экономически эффективных подходов является сочетание судового приемника ГНСС с навигационным радиолокатором. Ключевой задачей, которую необходимо решить, является идентификация нанесенных на карту объектов и эхо-сигналов, наблюдаемых с помощью РЛС. В работе рассматривается вопрос эффективности реализации нового метода автоматического опознавания ориентиров, основанного на использовании свойств внутренней геометрии полигона, сформированного такими объектами. Этот подход, основанный на геометрических свойствах, свободен от возможного

влияния преднамеренных помех радиоэфирного происхождения и является универсальным. Так, например, «радиолокационные ответчики», активируемые по сигналу РЛС трехсантиметрового диапазона, не удовлетворяют требованиям, предъявляемым перспективным РЛС с непрерывным сигналом. Подчеркивается, что опознавание на полигоне объектов, которые могут быть использованы в качестве ориентиров, относится к классу задач «устранение многозначности». Предлагается сформировать триангуляционный полигон, образованный устойчивыми эхо-сигналами от радиолокационных объектов. Идентификация навигационных ориентиров среди всех наблюдаемых объектов решается в локальной изометрии, где справедливыми являются аффинные преобразования и сохраняются основные параметры внутренней геометрии. Математическое моделирование, проведенное для пяти объектов, показало стабильное распознавание трех из них (заданных). Для приближения к реальной ситуации выполнялось моделирование в шумах. При значительных случайных погрешностях в моделируемых пеленгах и расстояниях наблюдалось уменьшение значимости целевой функции, т. е. опознаваемость объектов снижалась. Сделан вывод о том, что для уменьшения влияния этого эффекта целесообразно расстановку навигационных ориентиров выполнять так, чтобы небольшим изменениям в измеряемых навигационных параметрах соответствовали небольшие изменения в параметрах внутренней геометрии, т. е. необходимо улучшить обусловленность задачи.

Ключевые слова: уязвимость, альтернативная навигация, надежное позиционирование, внутренняя геометрия, радиолокатор, опознавание, триангуляция, аффинные преобразования, многозначность, дифференциальная геометрия.

Для цитирования:

Афанасьев Б. В. Распознавание радиолокационных объектов с использованием внутренней геометрии полигона ориентиров / Б. В. Афанасьев, В. В. Афанасьев, С. С. Губернаторов // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2021. — Т. 13. — № 1. — С. 7–16. DOI: 10.21821/2309-5180-2021-13-1-7-16.

Введение (Introduction)

Процедура определения места судна классическими способами состоит из следующих этапов: первый — опознавание навигационных ориентиров, второй — измерение навигационных параметров и третий — расчет координат. Опознавание ориентиров относится к классу задач «устранение многозначности». Когда одновременно наблюдается несколько ориентиров, важно выбрать нужные. Для решения этой задачи при плавании в ночное время маяки оборудуются светящими огнями с известной характеристикой, указанной в навигационных пособиях или непосредственно на навигационных картах. По характеристикам огней: длительности свечения, периоду, цвету и т. п., происходит идентификация. В дневное время используются «ручные» методы, основанные на опыте судоводителя, например, способы траверзных расстояний и веера пеленгов, изложенные в курсе навигации высших морских учебных заведений¹.

Востребованность методов классической навигации как резервных остается актуальной. Резолюцией Ассамблеи ИМО А.1046(27) установлены высокие требования к точности и надежности ГНСС, однако многолетний опыт эксплуатации показал, что у спутниковых систем существует ряд проблем, обусловленных слабой помехозащищенностью. Для маломощных сигналов, идущих от источника, находящегося на расстоянии 20 тыс. км от поверхности Земли, и имеющих ограничения по энергетике, возрастает опасность влияния помех, в том числе преднамеренных, таких как подмены сигнала (*спуфинг*). Эта проблема является настолько актуальной, что было проведено международное исследование этого вопроса — EU H2020 project STRIKE3, в результате которого появилось общее понимание уровня угроз [1]. Кроме того, разработаны формы стандартизации отчетности об угрозах ГНСС и тестировании приемников на основе международного обмена результатами эксплуатации и экспериментов, позволившие отчеты о событиях из различных систем мониторинга сделать совместимыми. Специалистами широко обсуждаются методы, уменьшающие уязвимость и повышающие надежность позиционирования подвижных объектов [2], [3].

В настоящее время в отечественной литературе по судоводению появился специальный термин «альтернативная навигация», в зарубежных источниках — Alternative-Position, Navigation and Timing (A-PNT), дающий возможность понять, что одним из направлений борьбы с уязвимостью ГНСС является использование традиционных методов навигации, альтернативных ГНСС,

¹ Баранов Ю.К. и др. Навигация: учебник для вузов. 3-е изд., перераб. и доп. СПб.: Лань, 1997. 512 с.

действие которых основано на других физических принципах. Действующие рекомендации ИМО, изложенные в нормативных документах (Резолюция Ассамблеи ИМО А.893, Конвенция ПДНВ-78), свидетельствуют о необходимости использования классических методов навигации при плавании вблизи берега, изменении курса и т. п. В частности, к ним относятся методы определения места судна по пеленгам и расстояниям с использованием РЛС.

В статье рассматриваются вопросы, связанные с использованием классической навигации, и требующие высокой степени автоматизации.

Методы и материалы (Methods and materials)

Проблема опознавания навигационных ориентиров, в том числе радиолокационных, представляет определенные сложности, особенно в случае пологого побережья без характерного берегового рельефа. Предлагаемые способы ее решения¹ малопригодны в современных условиях при использовании РЛС с высокой степенью автоматизации, когда требуется выработка координат в реальном времени для транслирования в ЭКНИС при деградации ГНСС [4].

Опознавание ориентиров — это процедура отождествления наблюдаемого и нанесенного на карту (картированного) объекта. Возможная ошибка обычно приводит к промахам. В более широком смысле эта проблема, существующая во всех навигационных системах, является *проблемой многозначности* [5].

В данной работе рассматривается подход, основанный на свойствах внутренней геометрии поверхности и фигур на ней. Вопросам внутренней геометрии посвящены фундаментальные работы академиков А. Д. Александрова, А. В. Погорелова и других ученых. Основные математические результаты в этой области были получены в XX в. и рассматриваются в специальных курсах дифференциальной геометрии. Особенность заключается в том, что свойства внутренней геометрии поверхности и расположенных на ней фигур инвариантны к изометрическим преобразованиям и представляют собой аффинные преобразования на плоскости, когда величины сегментов и углы между исходной и преобразованной фигурами сохраняются. В этом типе преобразования ни форма, ни размер фигуры не изменяются (они являются конгруэнтными), происходит изменение положения фигуры либо в ориентации, либо в направлении. Таким образом, начальные и конечные количественные характеристики анализируемых свойств будут одинаковыми, а фигуры геометрически конгруэнтными.

Существует три типа движений, классифицирующих изометрическое преобразование: перемещение, вращение и отражение (симметрия) [6]. Главные теоремы (утверждения) внутренней геометрии сводятся к тому, что основные свойства фигур (например, площадь, периметр, углы) являются объектами внутренней геометрии поверхности, т. е. определяются исключительно метрикой поверхности. В общих геометрических теориях понятию «внутренняя геометрия» придается общий смысл, состоящий в том, что какая-либо фигура, с точки зрения ее внутренней геометрии, рассматривается как некоторое пространство *само в себе*. Доказательство этого утверждения, которое приведено в [6], строится на том, что многоугольник разбивается на треугольники, т. е. выполняется *триангуляция*, что позволяет получить его конкретные свойства, основанные на внутренней геометрии (ВГ).

Результаты (Results)

Рассмотрим процедуру опознавания ориентиров, когда одновременно наблюдается несколько объектов и среди них нужно опознать только навигационные (картированные). На рис. 1 схематично показана группа ориентиров (табл. 1).

Навигационные ориентиры 1, 2, 5 остальные: 3, 4 — объекты, не имеющие навигационного значения. Необходимо среди всех объектов идентифицировать только навигационные. Соединив все вершины между собой, каждую с каждой, получим фигуру, образованную треугольниками. Число таких треугольников определяется формулами комбинаторики. В теории графов этому соответствует ненаправленный граф, описываемый матрицей смежности (*инцидентности*) [7].

¹ Песков Ю. А. Использование РЛС в судовождении. М.: Транспорт, 1986. 144 с.

Исходные данные ориентиров

№ п/п.	Пеленг	Дистанция	X	Y
1	291,80	2,154	1	0,5
2	310,91	1,984	1,5	1
3	15,52	1,868	2	3
4	78,69	1,529	0,5	4
5	7,59	1,5132	1,7	2,7

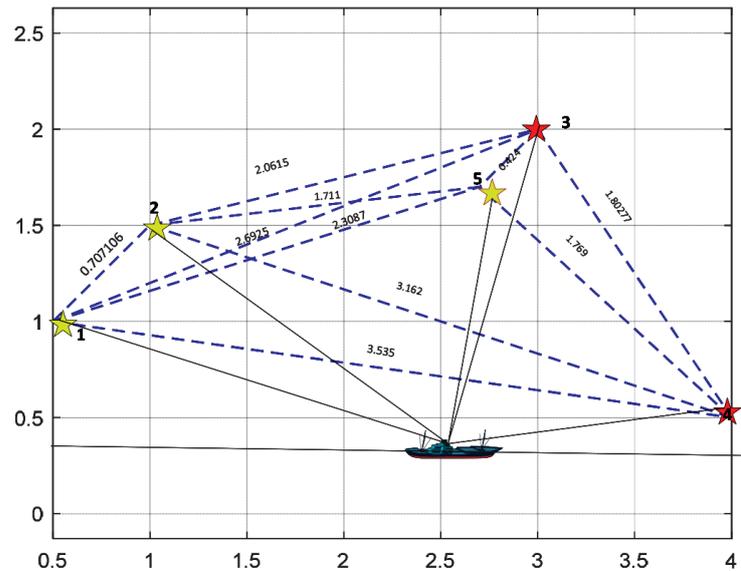


Рис. 1. Расположение навигационных ориентиров

Для пяти ориентиров группа (полигон) будет состоять из десяти треугольников [7], [8]. Для сорока ориентиров триангуляционный полигон уже будет состоять из 9800 треугольников, и матрица смежности будет иметь размер 9880×3 . Не уменьшая общности, в качестве системы координат примем *локальную прямоугольную* (в навигации это левая декартова система координат).

Задача решается в метрическом Евклидовом пространстве на плоскости. Для опознавания требуется из всего подмножества сочетаний (треугольников) выбрать только соответствующие картированным объектам. Вычислим для каждого треугольника параметры, которые зависят только от длин сторон и соотношений между ними. Таким образом, поиск конгруэнтного треугольника может осуществляться, например, по площади и отношению длины стороны к синусу соответствующего угла. Площадь характеризует размеры, а отношение сторон к синусам углов — внутреннюю конфигурацию треугольника. Для картированных ориентиров эти параметры вычисляются заранее и заносятся в базу данных. Важно то, что они не зависят от ориентации треугольника в пространстве и характеризуют только внутреннюю геометрию, т. е. систематическая погрешность в курсоуказателе не влияет на числовые значения параметров и, следовательно, на результат опознавания. Это следует из основных свойств изометрии и наглядно может быть представлено, если мысленно всю картинку (см. рис. 1) развернуть на некоторое число градусов относительно судна, при этом весь полигон развернется, но сохранит свою конфигурацию. Данное свойство активно используется в ЭКНИС при наложении радиолокационного изображения на картографическое (*радарный оверлей*).

На рис. 1 показано пять ориентиров, координаты которых рассчитаны по пеленгам и дистанциям из счислимой точки $x = 0,2, y = 2,5$ (см. табл. 1). Рассмотрению и анализу подлежит множество треугольников, образованных всеми вершинами. Процедура расчета триангуляционного полигона включает формирование матрицы смежности, которая показывает организацию связей между вершинами полигона (табл. 2).

Матрица смежности

Номер строки матрицы	Номер ориентира		
	1	1	2
2	1	2	4
3	1	2	5
4	1	3	4
5	1	3	5
6	1	4	5
7	2	3	4
8	2	3	5
9	2	4	5
10	3	4	5

Пусть ориентиры 1, 2, 5 являются *картированными*, т. е. их географические координаты известны и заранее занесены в специальную базу данных. Треугольник, объединяющий эти вершины, соответствует третьей строчке в табл. 2. Выбор треугольника, конгруэнтного картированному, из массива измеренных, образующих полигон, осуществляется на основе целевой функции, характеризующей степень их соответствия. Для корректного сопоставления необходимо формализовать меру «близости» измеренных треугольников и картированных, с учетом того, что измерения косвенные и выполняются с погрешностями. В качестве одного из вариантов рассмотрен *аддитивный критерий*, когда целевая функция учитывает расхождения между значениями параметров ВГ картированных и измеренных треугольников:

$$Q = \min_{1 < i < k} \left(\sum_{j=1}^t \lambda_j (c_i - c_{LHj}) \right)^2,$$

где индекс i — номер строки в матрице смежности;

t — число анализируемых параметров внутренней геометрии;

c_i — числовые значения анализируемых параметров, рассчитанных по результатам измерений;

c_{LHj} — параметры внутренней геометрии для картированного треугольника;

λ_j — масштабирующие коэффициенты.

Числовые значения λ_j выбирают так, чтобы влияние каждого слагаемого в целевой функции было равнозначным. В рассматриваемом примере их значения были приняты равными единице.

Таблица 3

Целевая функция без погрешностей измерений

№ п/п.	Значения целевой функции
1	2,2713
2	0,9675
3	0
4	2,5647
5	6,4406
6	1,9544
7	2,3217
8	3,6299
9	1,4559
10	3,8338

Размерность полигонов (матрицы смежности), как правило, небольшая. Это объясняется тем, что количество значимых устойчиво сопровождаемых одновременно радиолокационных объектов

ограничивается техническими возможностями и практическим наличием. В рассматриваемом примере $k = 10$. Числа в первом столбце табл. 3 соответствуют номерам строк в матрице смежности.

При формировании целевой функции в качестве c_1 использовалась площадь треугольника, а в качестве c_2 — отношение стороны к синусу соответствующего угла. Для третьей строчки целевая функция (ЦФ) равна нулю, поскольку рассчитанные c_i совпали с картированными c_{LHj} и их разность равна нулю. Это показывает, что параметры ВГ однозначно определяют треугольник, сформированный картированными навигационными ориентирами. Другими словами, при полном совпадении измеренного и картированного треугольников значение целевой функции равно нулю, т. е. треугольники конгруэнтны. Параметры ВГ для других треугольников существенно отличаются. Этот факт находится в основе процедуры опознавания.

Рассмотрим работу предлагаемого метода в условиях помех. Так как при опознавании выполняются измерения всех ориентиров, погрешностями будут отягощены в полной мере и картированные объекты. Оценим как результаты измерений будут отражаться на значениях целевой функции. Наиболее благоприятным вариантом для опознавания является тот, в котором зашумленные погрешностями измерения параметры ВГ для картированного треугольника незначительно отличаются от исходных и существенно отличаются от параметров для всех остальных в анализируемом триангуляционном полигоне.

Таблица 4

Навигационные параметры с погрешностями

№ п/п.	Пеленги с погрешностями	Расстояния с погрешностями	X	Y
1	290,76	2,147	0,96131	0,49205
2	313,66	2,002	1,58274	1,05144
3	9,27	1,828	2,00425	2,79466
4	76,21	1,513	0,56062	3,97031
5	3,17	1,485	1,68272	2,58235

Введение шумов в измеряемые навигационные параметры изменяет значения параметров ВГ триангуляционного полигона. По зашумленным измерениям восстанавливаем триангуляционный полигон (табл. 4) в соответствии с матрицей смежности (см. табл. 2). Погрешности измерений «переносятся» в погрешности координат ориентиров и в параметры ВГ триангуляционного полигона. Это видно из сравнения координат X и Y в табл. 1 и 4. Для анализа эффективности опознавания при различных погрешностях, возрастающих по абсолютной величине, были рассчитаны соответствующие значения ЦФ для всего триангуляционного полигона (табл. 5). Моделировались погрешности с различными СКП: по пеленгу от 0° до 3° , и дистанции от 0 до 0,1 мили. С учетом «зашумленных» значений навигационных параметров рассчитанные значения ЦФ заносились в соответствующие пять столбцов (см. табл. 5). Каждый столбец соответствует возрастающим по уровню погрешностям измерений.

Таблица 5

Значения целевой функции для различных погрешностей

	1	2	3	4	5
1	2,2713	1,8992	1,6441	1,4078	1,1884
2	0,9675	0,9653	0,9711	0,9900	1,0165
3	0	0,3569	0,5701	0,7684	0,9540
4	2,5647	2,5090	2,4658	2,4212	2,3752
5	6,4406	5,2062	4,6697	4,1874	3,7521
6	1,9544	1,9684	1,9748	1,9823	1,9909
7	2,3217	2,1930	2,1012	2,0042	1,9014
8	3,6299	3,8626	3,9618	4,0497	4,1279
9	1,4559	1,5550	1,6413	1,7435	1,8636
10	3,8338	3,8435	3,8500	3,8561	3,8620

По данным табл. 5 построена гистограмма (рис. 2), на которой показаны значения целевой функции для триангуляционного полигона (десять треугольников) и пяти случаев с различными погрешностями.

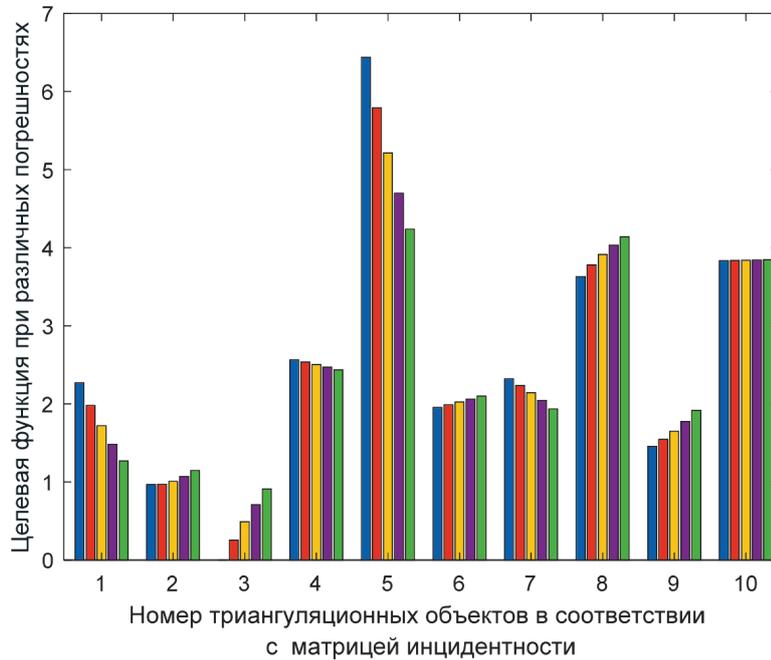


Рис. 2. Гистограмма целевой функции триангуляционного полигона

Каждая группа вертикальных полос на гистограмме соответствует одному и тому же треугольнику полигона (номеру строки в матрице инцидентности — см. табл. 2), а каждая вертикальная полоса — определенным значениям ЦФ (строке) табл. 5 для различных погрешностей. Для нулевых погрешностей значение ЦФ (третья строчка, первый столбец) равно нулю, так как это исходный объект, подлежащий опознаванию. Поэтому в третьей группе (объекты 1–2–5 матрицы инцидентности) всего четыре вертикальные полоски (первая равна нулю). С увеличением погрешностей измерений растет и значение ЦФ практически для всех элементов триангуляционного полигона, однако для картируемых (заданных) ориентиров значение ЦФ остается наименьшим, т. е. ориентиры опознаются, что свидетельствует об эффективности метода.

Форма картированного триангуляционного полигона содержит внутреннюю информацию аналогично отпечатку пальца в дактилоскопии. Однако существуют и вполне понятные ограничения. Можно так «зашуметь» измерения в картированном треугольнике, что он станет мало похож на исходный, т. е. эталон перестанет быть узнаваемым. При увеличении погрешностей измерений рассчитанные картируемые ориентиры будут все больше удаляться от оригинала, следовательно, вид и форма треугольников (элементов триангуляционного полигона) будут также меняться, а объекты ненавигационного значения могут образовать треугольники, похожие на картируемый, подлежащий опознаванию, при этом общая картина окажется «смазанной». Действительно, всегда можно сформировать треугольник, используя основные движения аффинных преобразований: разворот, движение и зеркальное отображение, которые сформируют значение ЦФ меньше, чем для зашумленных картированных. В этом случае в расчет ЦФ целесообразно вводить дополнительные условия (например, расстояние между центрами описанных окружностей). Это позволит уменьшить вероятность ложных срабатываний при возникновении зеркального отображения — одного из возможных аффинных преобразований.

На рис. 3 показано, как небольшое смещение объекта 2 в позицию 2' кардинально смещает центр описываемой окружности из точки C_1 в точку C_2 , что приводит к увеличению расстояния между центрами описываемых окружностей.

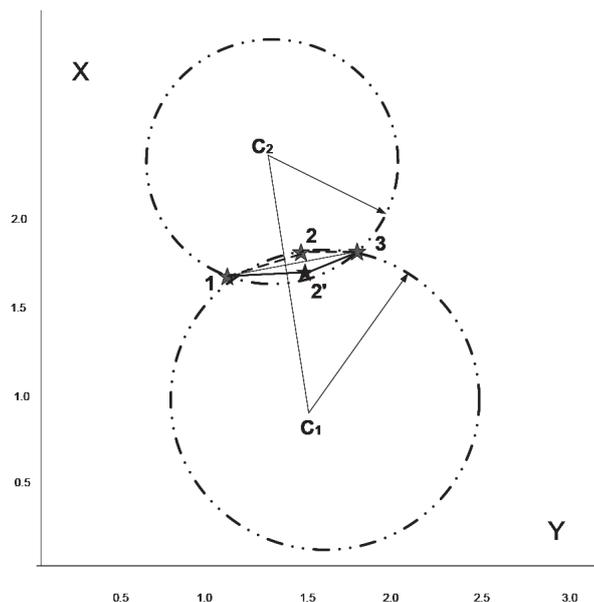


Рис. 3. Определение зеркального отображения

Фактически описанная ситуация соответствует плохо обусловленной задаче [9]. Небольшие значения в погрешностях измерений приводят к существенным изменениям параметров ВГ, т. е. решение неустойчиво. Для уменьшения вероятности возникновения подобных ситуаций необходимо использовать корректно расположенные картированные ориентиры и видоизменять ЦФ, вводя качественно новые параметры [10].

Выводы

На основе проведенного исследования можно сделать следующие выводы:

1. В целом можно отметить работоспособность метода автоматического опознавания объекта на основе свойств внутренней геометрии при рассмотренных ограничениях.
2. Практическое применение подразумевает автоматизированное опознавание объектов. Поэтому важно иметь хорошо наблюдаемые радиолокационные отметки, которые РЛС может устойчиво сопровождать. Как известно, на фоне берега таких объектов мало, а специально установленные пассивные радиолокационные отражатели «забиваются» радиолокационным фоном берега.
3. Для автоматизации всего процесса системы позиционирования альтернативной навигации необходима инфраструктура, состоящая из береговых радиолокационных датчиков. Это позволит дублировать определение места в автоматическом режиме и оперативно информировать о деградации ГНСС.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Thombre S.* GNSS threat monitoring and reporting: Past, present, and a proposed future / S. Thombre, M. Z. H. Bhuiyan, P. Eliardsson, B. Gabrielsson, M. Pattinson, M. Dumville, D. Fryganiotis, S. Hill, V. Manikundalam, M. Pölskey, S. Lee, L. Ruotsalainen, S. Söderholm, H. Kuusniemi // *The Journal of Navigation*. — 2018. — Vol. 71. — Is. 3. — Pp. 513–529. DOI: 10.1017/S0373463317000911.
2. *Jheng S. L.* 1090 MHz ADS-B-Based Wide Area Multilateration System for Alternative Positioning Navigation and Timing / S. L. Jheng, S. S. Jan, Y. H. Chen, S. Lo // *IEEE Sensors Journal*. — 2020. — Vol. 20. — Is. 16. — Pp. 9490–9501. DOI: 10.1109/JSEN.2020.2988514.
3. Пат. 2658679 Российская Федерация, МПК G01S 5/00. Способ автоматического определения местоположения» транспортного средства по радиолокационным ориентирам / С. С. Губернаторов, В. В. Афанасьев; заяв. и патентообл. С. С. Губернаторов, В. В. Афанасьев. — № 2017132606; заявл. 18.09.2017; опубл. 22.06.2018, Бюл. № 18.

4. *Афанасьев Б. В.* Процедура комплексной обработки радиолокационных данных в стробе и выбора радиолокационной метки / Б. В. Афанасьев, В. В. Афанасьев // Вестник государственного университета морского и речного флота им. адмирала С. О. Макарова. — 2018. — Т. 10. — № 3. — С. 608–618. DOI: 10.21821/2309-5180-2018-10-3-608-618.

5. *Карманов Ю. Т.* Устранение неоднозначности измерения пеленгов в малобазовых широкодиапазонных пеленгаторах путем алгоритмического формирования дополнительных «виртуальных» баз / Ю. Т. Карманов, И. И. Заляцкая // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника. — 2015. — Т. 15. — № 1. — С. 11–20.

6. *Погорелов А. В.* Внешняя геометрия выпуклых поверхностей / А. В. Погорелов. — М.: Изд-во «Наука». Главная редакция физико-математической литературы, 1969. — 760 с.

7. *Омельченко А. В.* Теория графов / А. В. Омельченко. — М.: Изд-во МЦНМО, 2018. — 416 с.

8. *Скворцов А. В.* Алгоритмы построения и анализа триангуляции / А. В. Скворцов, Н. С. Мирза. — Томск: Издательство Томского университета, 2006. — 168 с.

9. *Бураго Н. Г.* Вычислительная механика / Н. Г. Бураго. — М., 2012. — 275 с. DOI: 10.13140/RG.2.1.4610.5047.

10. *Мамедов Р. К.* Использование моментов инерций изображения для инвариантного к аффинным преобразованиям распознавания / Р. К. Мамедов, А. С. Муталлимова, Т. Ч. Алиев // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. — 2012. — Т. 4. — № 3 (58). — С. 4–7.

REFERENCES

1. Thombre, Sarang, M. Zahidul H. Bhuiyan, Patrik Eliardsson, Björn Gabrielsson, Michael Pattinson, Mark Dumville, Dimitrios Fryganiotis, Steve Hill, Venkatesh Manikundalam, Martin Pölöskey, Sanguk Lee, Laura Ruot-salainen, Stefan Söderholm, and Heidi Kuusniemi. “GNSS threat monitoring and reporting: Past, present, and a proposed future.” *The Journal of Navigation* 71.3 (2018): 513–529. DOI: 10.1017/S037346317000911.

2. Jheng, Siang-Lin, Shau-Shiun Jan, Yu-Hsuan Chen, and Sherman Lo. “1090 MHz ADS-B-Based Wide Area Multilateration System for Alternative Positioning Navigation and Timing.” *IEEE Sensors Journal* 20.16 (2020): 9490–9501. DOI: 10.1109/JSEN.2020.2988514.

3. Gubernatorov, S. S., and V. V. Afanas'ev. RU 2658 679 C1, IPC G 01S 5/00. Sposob avtomaticheskogo opredeleniya mestopolozheniya» transportnogo sredstva po radiolokatsionnym orientiram. Russian Federation, assignee. Publ. 22 June 2018.

4. Afanasev, Boris V., and Victor V. Afanasev. “Procedure of complex processing radar data in strobe and selection of radar mark.” *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 10.3 (2018): 608–618. DOI: 10.21821/2309-5180-2018-10-3-608-618.

5. Karmanov, Yu. T., and I. I. Zalyatskaya. “Disambiguation of measurement of bearings in lessbases widerange direction finders by algorithmic creation of additional “virtual” base.” *Bulletin of the South Ural State University, series “Computer Technologies, Control, Radioelectronics”* 15.1 (2015): 11–20.

6. Pogorelov, A. V. *Vneshnyaya geometriya vypuklykh poverkhnostei*. Glavnaya redaktsiya fiziko-matematicheskoi literatury izdatel'stva «Nauka», 1969.

7. Omel'chenko, A. V. *Teoriya grafov*. M.: Izdatel'stvo MTsNMO, 2018.

8. Skvortsov, A. V., and N. S. Mirza. *Algoritmy postroeniya i analiza triangulyatsii*. Tomsk: Izdatel'stvo Tomskogo universiteta, 2006.

9. Burago, N. G. *Vychislitel'naya mekhanika*. M., 2012. DOI: 10.13140/RG.2.1.4610.5047.

10. Mammadov, R. G., A. S. Mutallimova, and T. Ch. Aliyev. “The moment of inertia use images for invariant recognition to affine transformations.” *Eastern-European journal of enterprise technologies* 4.3(58) (2012): 4–7.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Афанасьев Борис Викторович — кандидат технических наук, доцент ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала С. О. Макарова» 198035, Российская Федерация, Санкт-Петербург, ул. Двинская, 5/7 e-mail: boris.afanasiev@rambler.ru, kaf_nav@gumrf.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Afanasev, Boris V. — PhD, associate professor Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping 5/7 Dvinskaya Str., St. Petersburg, 198035, Russian Federation e-mail: boris.afanasiev@rambler.ru, kaf_nav@gumrf.ru

Афанасьев Виктор Викторович —
кандидат технических наук, доцент
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала
С. О. Макарова»

198035, Российская Федерация, Санкт-Петербург,
ул. Двинская, 5/7

e-mail: AfanasievVV@gumrf.ru

Губернаторов Сергей Сергеевич —
генеральный директор

ООО «ССГ НАВИГАЦИЯ»

199106, Российская Федерация, Санкт-Петербург,
ул. Шкиперский проток, д. 14,

корп. 8, лит. Д, пом. 23

e-mail: sergey.gubernatorov@ssgnavigation.com

Afanasev, Viktor V. —

PhD, associate professor

Admiral Makarov State University of Maritime
and Inland Shipping

5/7 Dvinskaya Str., St. Petersburg, 198035,

Russian Federation

e-mail: AfanasievVV@gumrf.ru

Gubernatorov, Sergey S. —

Chief execution officer

SSG NAVIGATION, Ltd

office 23, 14–8 lit. D Skiperskiy Protok Str.,

St. Petersburg, 199106,

Russian Federation

e-mail: sergey.gubernatorov@ssgnavigation.com

Статья поступила в редакцию 26 января 2021 г.

Received: January 26, 2021.