

ЭКСПЛУАТАЦИЯ ВОДНОГО ТРАНСПОРТА, ВОДНЫЕ ПУТИ СООБЩЕНИЯ И ГИДРОГРАФИЯ

DOI: 10.21821/2309-5180-2024-16-3-335-346

ASSESSING THE ACCURACY OF SHIP POSITION THROUGH REAL-TIME MEASUREMENTS

V. A. Loginovsky

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

One of the most important tasks of shipping for ensuring the efficiency and safety of navigation is accurately determining the ship position during the voyage. Research on the accuracy of finding a ship coordinates is always at the top of the list of urgent navigational issues, even nowadays with the widespread implementation of state-of-the-art information technologies and the progress of navigation systems and techniques. If to follow measurement standards, there are two close terms applied in marine navigation in this context. They are “accuracy” and “precision” of measurements, which in principle might confuse the understanding of the task onboard the ship. In marine navigation, the traditional understanding of ship current position accuracy is to assess the impact of a combination of random errors in measured navigation parameters on random errors in computed coordinates. Two-dimensional confidence intervals centered on the fixed ship position serve as a graphical representation of the assessed accuracy, which is algebraically, might be described by the covariance matrix of coordinate errors. As a result of the high level of uncertainty caused by the effect of random errors in real-time measurements, it is impossible to assess the accuracy of ship position during the voyage. The magnitude and mathematical sign of these errors are unknown, and the navigation parameter indications themselves do not provide any information on their accuracy. For this reason, a priori prediction of the precision of navigation parameters associated with certain sets of measurements made in the past under specific standard conditions are used to assess the accuracy of the real-time ship position. This priori data inspires to substitute the concept of accuracy of the real-time ship position with the concept of precision of the navigation system, technique, or device operation, which is essentially the theoretical inconsistency. The purpose of this study is to partially solve this inconsistency. The study outcome is a proposed indicator that, by using information gathered from redundant measurements of navigation parameters obtained in real time without the use of priori data, can indirectly assess the accuracy of the real-time fixed coordinates of the ship position. The indicator concept is based on assessing the area of the real-time figure of errors. This area is limited by its outer contour of position lines and has a high degree of measurement redundancy to guarantee that, the probability of locating the true point within this figure is 100 %. In addition to having high precision features, modern navigation technology also makes it possible to handle a larger volume of measurement data utilizing contemporary technologies, such as Big Data platforms, which do not restrict the number of measurements. Consequently, higher number of navigation measurements can significantly raise the probability of finding the true position in the ensuing complicated figure of errors. The shape of the figure allows for a spatial analysis of the proximity of potential navigational hazards and the ship location, by using, for example, the least squares method. The area of such a figure is a characteristic of the uncertainty (an analog of precision) of coordinate errors, and its minimum area provides the best accuracy. The ability to determine the real-time figure area with sheer certainty of existing the true point in it stimulates the development of the next more technologically advanced and encouraging level of alternative and autonomous methods for determining the vessel position. These methods are based primarily on the possibility of increasing the volume of processed measurement information. It directly relates, for example, to the development of azimuthal methods of nautical astronomy, which make it possible to perform an unlimited number of autonomous navigation measurements in the absence of a visible horizon, which undoubtedly becomes valuable when ships are sailing in high latitude regions, especially during a long period of polar night.

Keywords: determination of the ship position, probability, figure of errors, confidence interval, redundancy of measurements, accuracy, precision.

For citation:

Loginovsky, Vladimir A. “Assessing the accuracy of ship position through real-time measurements.” *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 16.3 (2024): 335–346. DOI: 10.21821/2309-5180-2024-16-3-335-346.

ОЦЕНКА ТОЧНОСТИ ОПРЕДЕЛЕНИЯ КООРДИНАТ МЕСТА СУДНА ПО ИЗМЕРЕНИЯМ В РЕАЛЬНОМ МАСШТАБЕ ВРЕМЕНИ

В. А. Логиновский

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

Темой исследования является одна из наиболее важных задач морской навигации в обеспечении безопасности и эффективности мореплавания, а именно точность определения координат места судна. Несмотря на интенсивное внедрение информационных технологий и повышение точности навигационных систем и методов в списке актуальных задач мореплавания постоянно находятся исследования, связанные с точностью определения координат места судна. Традиционно под оценкой точности текущих координат места судна в морской навигации понимается априорная оценка влияния комбинации случайных погрешностей измеренных навигационных параметров на случайные погрешности рассчитанных координат. С помощью этой информации осуществляется подмена точности текущих координат места судна понятием «точность работы навигационной системы или метода», что принципиально является теоретическим несоответствием. Целью данного исследования является попытка частично компенсировать это несоответствие. Для этого предложен индикатор, позволяющий косвенно оценить текущую точность обсервованных координат места судна по информации, содержащейся в избыточных измерениях, полученных в масштабе реального времени без использования априорных данных. Идея индикатора основана на оценке площади фигуры погрешностей линий положения, ограниченной ее внешним контуром при высоком уровне избыточности измерений, обеспечивающих вероятность нахождения истинной точки в этой фигуре, равной 100 %. Отмечается, что современная навигационная техника характеризуется не только высокими точностными характеристиками, но и позволяет наращивать объем измерительной информации, используя для ее обработки современные технологии, включая платформы Big Data. Возможность определения текущей области с полной достоверностью нахождения в ней истинной точки стимулирует развитие следующего более технологичного и перспективного уровня автономных методов определения места судна, который напрямую относится, например, к развитию азимутальных методов мореходной астрономии, позволяющих выполнять неограниченное количество измерений в отсутствие видимого горизонта, что, несомненно, является актуальным при плавании судов в условиях высоких широт, особенно в длительный период полярной ночи.

Ключевые слова: определение места судна, вероятность, фигура погрешностей, доверительный интервал, избыточность измерений, точность, прецизионность.

Для цитирования:

Логиновский В. А. Оценка точности определения координат места судна по измерениям в реальном масштабе времени / В. А. Логиновский // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2024. — Т. 16. — № 3. — С. 335–346. DOI: 10.21821/2309-5180-2024-16-3-335-346.

Введение (Introduction)

Точное и надежное определение координат места судна (ОМС) является одной из наиболее важных задач морской навигации для обеспечения безопасности и эффективности мореплавания. Исследования, связанные с точностью ОМС и навигационной безопасностью, постоянно находятся в списке актуальных задач морской навигации, которые включают обеспечение безопасного движения судов по заданным траекториям [1], применение методов автономной навигации [2]–[4], а также детальное исследование альтернативных и интегрированных навигационных систем [5], [6]. Большое внимание уделяется реальным измерениям [7], [8], повышению их точности [9]–[11] и информативности [12]–[13], включая оценку надежности [14], [15] применяемых методов ОМС.

Традиционно под оценкой точности ОМС (обсервации) в морской навигации понимается оценка влияния комбинации случайных погрешностей измеренных навигационных парамет-

ров (НП) на случайные погрешности обсервованных координат места судна (*прецизионность* — precision (англ.))¹ согласно ГОСТу Р ИСО 5725-1–2002. Оценка точности ОМС в общем виде формируется с помощью ковариационной матрицы погрешностей координат и геометрически иллюстрируется двумерными доверительными интервалами (областями) с центром в обсервованной точке. Контуры таких интервалов в навигационном пространстве ограничены либо эллипсом, либо окружностью определенных размеров, в которых с некоторой вероятностью прогнозируется нахождение истинного места судна. Предполагается, что эта вероятность зависит от принимаемого закона распределения случайных погрешностей обсервации, в качестве которого обычно используется закон Гаусса. Термин «прецизионность» в настоящее время не нашел применения в практике морской навигации, поэтому, во избежание терминологической путаницы в изложении материала, в данной работе использован термин «априорная точность».

Оценка *априорной точности* обсервованных координат места судна включает высокий уровень неопределенности, ее расчет не является тривиальной задачей, прежде всего, из-за того, что текущие погрешности измерений неизвестны ни по модулю, ни по знаку, а сами измерения навигационных параметров (НП) не несут какой-либо информации о своей точности и количество измерений обычно мало. Поэтому для оценки точности конкретной обсервации применяется априорный подход, основанный на параметрах обобщенного вероятностно-статистического закона распределения, что, по сути, является вероятностным прогнозом.

Априорная точность характеризует некоторую генеральную совокупность погрешностей измерений НП, полученных в специальных стандартных условиях задолго до момента текущей обсервации (возможно, много лет тому назад) с помощью конкретной техники (прибора, метода, системы). В такой постановке она описывает точность работы измерительной техники, но не характеризует текущую точность конкретного измерения [16] (*ассигасу* (англ.))² и, соответственно, текущую точность обсервации, подобно тому, как средняя зарплата сотрудников компании не характеризует уровень дохода конкретного работника и наоборот. Единственным источником информации, влияющим на текущую точность обсервации, является *геометрический фактор* (ГФ), определяющий взаимное расположение судна и навигационных ориентиров, составляющие которого являются элементами матрицы частных производных от навигационных функций (НФ) по координатам (матрица Якоби). В чистом виде ГФ можно выделить только для равноточных и однородных измерений. Этим объясняется ограничение его применимости как для оценки априорной точности, так и для оценки текущей точности обсервованных координат. ГФ является некоторым аналогом числа обусловленности системы линейных уравнений линий положения.

Методы и материалы (Methods and Materials)

Распространение характеристик (общего) закона распределения на конкретную обсервацию с неизвестными погрешностями измерений НП в динамически меняющихся условиях эксплуатации судна выявляет некоторое логическое несоответствие в теории, прежде всего, потому, что единичной обсервации присваиваются свойства математического ожидания закона распределения, т. е. центра искусственно принятого доверительного интервала. В такой постановке задачи этот центр при повторении измерений будет иметь различные координаты в навигационном пространстве в силу действия случайных погрешностей (рис. 1) даже если судно находится все это время в одной и той же опорной (истинной точке).

¹ Прецизионность (precision) — степень близости друг к другу независимых результатов измерений, полученных в конкретных регламентированных условиях. Прецизионность зависит только от случайных погрешностей, она не имеет отношения к истинному или установленному значению измеряемой величины. Меру прецизионности обычно выражают в терминах неточности и вычисляют как стандартное отклонение результатов измерений; меньшая прецизионность соответствует большему стандартному отклонению.

² Точность (assiguasy) — степень близости результата измерений к принятому опорному значению.

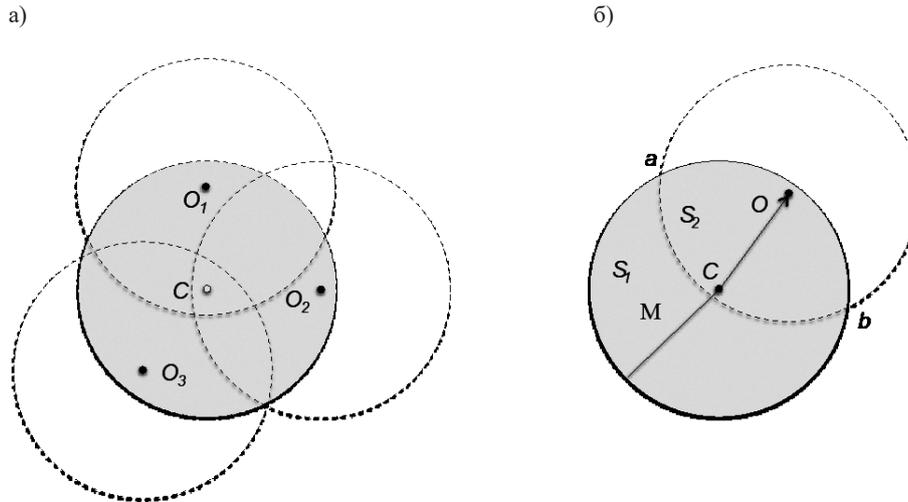


Рис. 1. Оценка точности (прецизионности) работы навигационной системы (а) и единичной обсервации (б)

Fig. 1. Assessment of the accuracy (precision) of the navigation system (a) and single observation (b)

В качестве гипотетического примера предположим, что судно для проведения исследований точности (прецизионности) навигационной системы NS находится в опорной (истинной) точке C (прямая задача). В течение некоторого интервала времени проведено условно неограниченное количество обсерваций по навигационной системе NS и математическое ожидание полученной совокупности обсерваций практически совпало с истинным значением координат (см. рис. 1, а), получен доверительный интервал, покрывающий полученные погрешности координат с уровнем вероятности $P = 0,95$ (затененный контур). Пусть в этом доверительном интервале для любой его точки матрица Якоби предполагается практически постоянной, поэтому выбранные произвольно из него точки O_{1-3} , согласно принятому *априорному подходу*, имеют свойства точки C (обратная задача), т. е. их *априорная точность* оценивается такими же доверительными интервалами с утверждением, что истинная точка в любом из трех приведенных на рисунке интервалов содержится в них с вероятностью $P = 0,95$.

Некорректность обратной задачи заключается в следующем: (i) — эти точки O_{1-3} не являются центрами распределения случайных погрешностей координат; (ii) — точки имеют свойства смещенных оценок; (iii) — истинная точка не может находиться в незакрашенных областях искусственных доверительных интервалов; (iv) — вероятность $P = 0,95$ не может распространяться на незакрашенные области. Исходя из (iv) для завершения анализа в данном случае целесообразно применить концепцию геометрической оценки вероятности P_g нахождения истинной точки в секторе ab пересечения окружностей (рис. 1, б), определяемой как $P_g = S_2 / S_1$, где S_2 — площадь сектора ab , а S_1 — площадь полного круга радиуса M . Очевидное неравенство $0 \leq P_g < 1$ доказывает некорректность применения такого подхода к оценке априорной точности текущей обсервации в точке O . В итоге анализ показал, что в априорной оценке точностных характеристик обсервованных координат имеются тонкости, которые находятся вне зоны внимания исследователей и практиков, стимулирующие поиск иных подходов к постановке задачи и ее решению.

В данной работе для исследования качества обсервации применяется подход, основанный на другом определении точности, приведенном в стандарте [16]. В нем термин «точность» (accuracy (англ.)) определяется как степень близости результата измерения к принятому опорному значению. При исключении систематических погрешностей в серии навигационных измерений термин «точность обсервации» будет определяться сочетанием только случайных независимых погрешностей и определяться близостью к опорной (истинной) точке. В статье этот термин определен как *текущая точность*.

Таким образом, интерпретация термина «точность» в практической навигации имеет два значения и может относиться как к характеристикам работы конкретной измерительной техники и оцениваться с помощью ковариационной матрицы или геометрически с применением доверительного интервала и использоваться как *априорная точность* для выбора навигационной техники или метода ОМС, так и к конкретному измерению или обсервации (*текущая точность*) как степень близости результата измерения к принятому опорному значению или близости обсервации к истинной точке нахождения судна, которая на практике неизвестна. Стандарты точности, представленные в документах ИМО, относятся к точности навигационных систем [16], [17].

Несмотря на то, что единичные измерения НП не несут информации об их точности, однако комбинация избыточных измерений рождает такую новую информацию, которая геометрически наглядно проиллюстрирована в виде образующихся в навигационном пространстве фигур погрешностей в отличие от традиционных доверительных интервалов, описанных ранее. В этих фигурах истинная точка может содержаться с определенной вероятностью P , причем при таком подходе не предполагается использование априорной информации для ее оценки — это *текущие (мгновенные) навигационные интервалы*, существующие только на момент обсервации. Утверждение справедливо при любом законе распределения случайных погрешностей измерений (линий положения), который с практической точки зрения может приниматься как симметричный. Так, в соответствии с результатами работы [8], в таблице показаны численные значения этих вероятностей как комбинации навигационных пространств различной размерности $n = 1-10$ и избыточности измерений в них: $r = 1-10$.

n	r									
	1"	2"	3"	4"	5"	6"	7"	8"	9"	10"
1"	0,5000	0,7500	0,8750	0,9375	0,9688	0,9844	0,9922	0,9961	0,9980	0,9990
2"	0,2500	0,5000	0,7500	0,8750	0,9375	0,9688	0,9844	0,9922	0,9961	0,9980
3"	0,1250	0,2500	0,5000	0,7500	0,8750	0,9375	0,9688	0,9844	0,9922	0,9961
4"	0,0625	0,1250	0,2500	0,5000	0,7500	0,8750	0,9375	0,9688	0,9844	0,9922
5"	0,0313	0,0625	0,1250	0,2500	0,5000	0,7500	0,8750	0,9375	0,9688	0,9844
6"	0,0156	0,0313	0,0625	0,1250	0,2500	0,5000	0,7500	0,8750	0,9375	0,9688
7"	0,0078	0,0156	0,0313	0,0625	0,1250	0,2500	0,5000	0,7500	0,8750	0,9375
8"	0,0039	0,0078	0,0156	0,0313	0,0625	0,1250	0,2500	0,5000	0,7500	0,8750
9"	0,0020	0,0039	0,0078	0,0156	0,0313	0,0625	0,1250	0,2500	0,5000	0,7500
10"	0,0010	0,0020	0,0039	0,0078	0,0156	0,0313	0,0625	0,1250	0,2500	0,5000

Приведенные данные показывают, что при увеличении избыточности измерений r вероятность P покрытия истинной точки фигурой погрешностей увеличивается. Этот результат не является противоречивым, так как он подтверждает *свойство состоятельности* такой оценки вероятности, но при этом возникают следующие вопросы:

- 1) можно ли с помощью информации, извлеченной из этих мгновенных фигур погрешностей, оценить *текущую точность* обсервации при наличии случайных погрешностей измерений;
- 2) является ли уменьшение площади фигуры погрешностей основанием считать, что такая фигура находится ближе к истинной точке, т. е. действует ли принцип «чем меньше, тем точнее».

Очевидно, что для ответа на эти вопросы необходимо оценить функциональную связь расстояния D между опорной точкой и центром тяжести фигуры погрешностей с площадью S в последовательности измерений.

Рассмотрим традиционное навигационное пространство ($n = 2, r = 1$), в котором случайные погрешности формируют фигуры в виде треугольников (2-симплексов). В такой постановке задачи нет смысла комбинировать вероятность покрытия опорной точки треугольником с его размерами, так как эта вероятность P составляет всего 0,25. Указанный факт позволяет ответить на второй вопрос, который является немаловажным для навигации, а именно верна ли гипотеза о том, что чем меньше площадь текущего треугольника погрешностей S , тем точнее проведенные измерения или перефразируя эту гипотезу, чем меньше треугольник погрешностей, тем ближе он находится к принятому истинному значению координат места судна, т. е. расстояние D между истинной точкой и центром тяжести треугольника уменьшается при уменьшении его площади S . Вряд ли ответ

на этот вопрос может быть положительным, так как комбинации независимых случайных погрешностей измерений могут формировать фигуры погрешностей различных размеров случайным образом на различных удалениях D от истинной точки.

Для подтверждения или опровержения данной гипотезы было проведено моделирование последовательности из 50 блоков навигационных измерений по трем измерениям в каждом, используя генератор нормально распределенных случайных чисел, которые имитировали погрешности линий положения. Были заданы следующие параметры закона распределения: математическое ожидание $\mu = 0$, среднеквадратическое отклонение $\sigma = 10$ у. е. Градиенты трех навигационных функций для упрощения были равномерно распределены по горизонту в опорной точке, т. е. $\tau_1 = 0^\circ$, $\tau_2 = 120^\circ$, $\tau_3 = 240^\circ$, поэтому все треугольники погрешностей в последовательности измерений появлялись как равносторонние, но разных размеров. Последовательность таких треугольников позволила сделать еще одно упрощение, заключающееся в том, что вместо площадей треугольников для анализа использовались радиусы вписанных в них окружностей R , которые функционально связаны с площадями S , но численно имеют ту же размерность, что и D . Это упрощает их совместное графическое представление (рис. 2). На этом рисунке представлена R -последовательность радиусов вписанных окружностей в треугольники погрешностей в у. е. и фрагментарно показаны площади некоторых треугольников S как функции R ; D — последовательность расстояний от опорной точки до центра тяжести соответствующего треугольника.

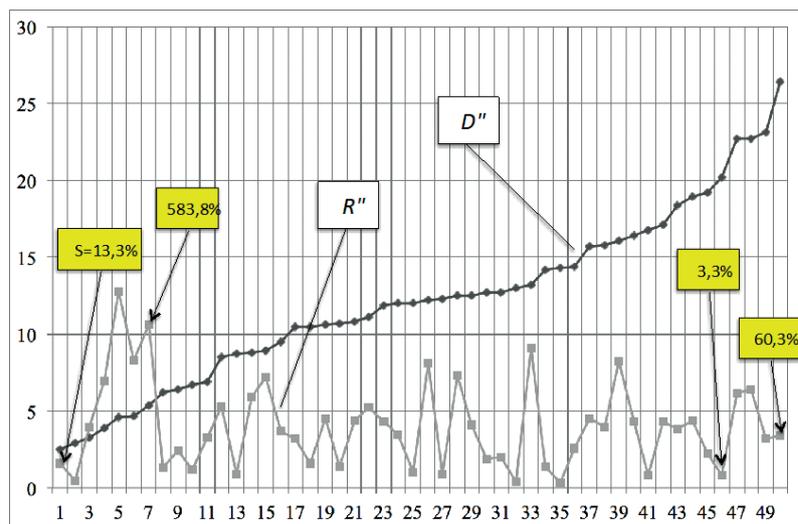


Рис. 2. Соотношения между размерами треугольников погрешностей и их положением относительно опорной точки

Fig. 2. Relationships between the sizes of error triangles and their position relative to the reference point

Процесс моделирования показал следующие результаты:

1. При нормальном законе распределения случайных погрешностей линий положения условно малые треугольники погрешностей ($R < 5$) встречаются чаще, чем треугольники условно больших размеров ($R > 5$).

2. Формирование малого треугольника погрешностей не означает увеличение *текущей точности* измерений как близости его к опорной точке. Так, например, на рис. 2 центр тяжести треугольника с $S = 3,3$ (у. е.)² находится на расстоянии от опорной точки $D = 20,2$ у. е.; треугольник с $S = 583,8$ (у. е.)² отстоит от опорной точки всего на $D = 4,7$ у. е.

Рассмотрим более информативную ситуацию, когда применяется восемь линий положения, т. е. избыточность навигационных измерений $r = 6$. В соответствии с результатами работы [8] вероятность P покрытия опорной точки такой фигурой близка к единице, что делает вполне приемлемым использование такого количества линий положения для практического исследования.

В публикации [8] комбинации знаков погрешностей линий положения описана в виде формулы бинорма Ньютона, где g и h — соответственно положительные и отрицательные погрешности линий положения без фиксации их численных значений:

$$(g + h)^8 = g^8 + 8g^7h + 28g^6h^2 + 56g^5h^3 + 70g^4h^4 + 56g^3h^5 + 28g^2h^6 + 8gh^7 + h^8.$$

В данном исследовании численные значения погрешностей линий положения включены в процесс моделирования для определения площадей фигур погрешностей. При моделировании использовались те же условия, которые применялись для избыточности $r = 1$ со следующей ориентацией градиентов НФ: $\tau_1 = 0^\circ$, $\tau_2 = 120^\circ$, $\tau_3 = 240^\circ$, $\tau_4 = 45^\circ$, $\tau_5 = 315^\circ$, $\tau_6 = 200^\circ$, $\tau_7 = 30^\circ$, $\tau_8 = 90^\circ$.

Высокая вероятность P покрытия опорной точки фигурой погрешностей дает возможность сконцентрироваться на площади полученной фигуры, ограниченной контуром, соединяющим внешние точки пересечения линий положения (рис. 3), исключив саму вероятность P покрытия как константу для этого блока измерений.

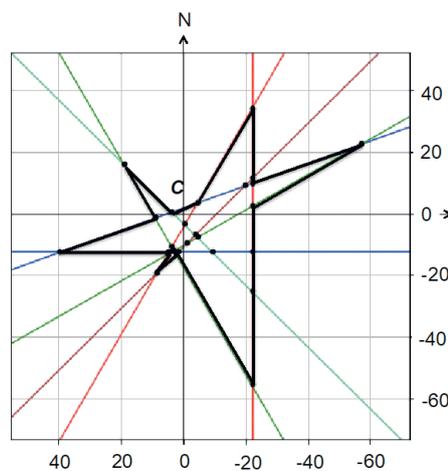


Рис. 3. Фигура погрешностей линий положения в навигационном пространстве при $r = 6$
 Fig. 3. Figure of position lines errors in navigation space at $r = 6$

В исследовании не ставится вопрос о выборе точки нахождения места судна в полученной фигуре погрешностей. Вполне очевидно, что если истинная точка находится в этой области с $P \approx 1$, то и обсервованная точка, в соответствии с принципом внутренней сходимости, должна находиться в той же области. Тогда справедливо утверждение о том, что чем меньше площадь области S , тем ближе обсервованная и истинная точки находятся друг к другу, что соответствует определению *текущей точности* конкретного измерения (обсервации). Учитывая принцип внутренней сходимости, можно сделать вывод о том, что это может быть любая точка внутри фигуры погрешностей, включая точку, полученную по методу наименьших квадратов (МНК) как наиболее естественную. При увеличении избыточности измерений r точка по МНК будет стремиться к положению истинной точки, расстояние между ними будет уменьшаться, т. е. текущая точность обсервации [8] будет повышаться. Это определяет целесообразность применения МНК для расчета обсервованных координат в фигуре погрешностей, где вероятность $P \approx 1$. Современные технологии позволяют решать такие задачи с большим количеством измерений при использовании платформ Big Data, что может стимулировать развитие, например, техники и технологии азимутальных методов мореходной астрономии для ОМС в высоких широтах в условиях полярной ночи (Северный морской путь).

На рис. 3 представлена фигура погрешностей для условий ($n = 2$, $r = 6$), которая включает 28 точек пересечения линий положения и опорную точку C , находящуюся на пересечении координатных линий, отмеченных стрелками. Внешний контур фигуры и ее площадь S фиксируют зону неопределенности, внутри которой с вероятностью $P \approx 1$ находится опорная точка.

Эта комбинация параметров зоны является *косвенной характеристикой* близости обсервации к опорной точке, т. е. чем меньше S , тем ближе к опорной точке находится обсервация. Для моделирования применялась онлайн-платформа для расчета площади фигуры, ограниченной линиями положения [18].

Фигура погрешностей с $r = 6$ существенно отличается от треугольника тем, что истинная точка находится в этой зоне с вероятностью $P \approx 1$. Поэтому применение принципа внутренней сходимости (например, МНК), в отличие от ситуации с $r = 1$, где $P = 0,25$, вполне оправданно. При наличии нескольких блоков измерений с $P = 1$ возможна оптимизация, заключающаяся в том, что из нескольких комбинаций линий положения при $r \geq 6$ появляется возможность выбрать фигуру погрешностей с минимальной площадью S .

Таким образом, в результате исследования сделан вывод о том, что необходимо обратить внимание на следующие различия между двумя подходами к оценке точности ОМС в морской навигации:

- оценке точности навигационной измерительной техники (прибора, метода, системы), полученной по характеристикам экспериментального доверительного интервала (precision) в конкретном районе плавания, фиксируемая в технической документации и впоследствии используемая в качестве априорной оценки точности информации для выбора навигационной техники для ОМС;
- оценке точности текущей обсервации в фигуре погрешностей линий положения, полученной по ее площади S при избыточности измерений $r \geq 6$.

На рис. 4 в качестве примера показаны четыре комбинации по восемь линий положения, формирующие фигуры погрешностей различной формы с различными площадями S_{1-4} .

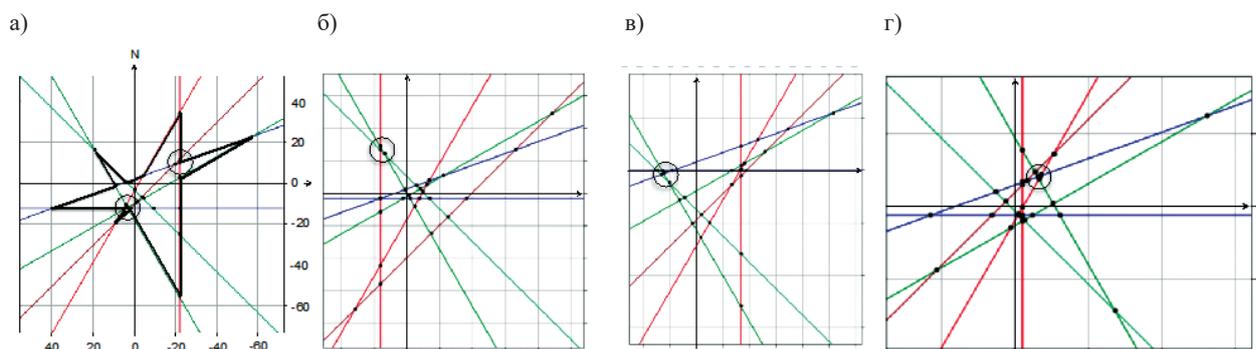


Рис. 4. Фигуры погрешностей и их площади в (у. е.): а — $S = 2967$; б — $S = 3288$; в — $S = 2224$; г — $S = 4910$
Fig. 4. Figures of errors and their areas in (conventional unit); а — $S = 2967$; б — $S = 3288$; в — $S = 2224$; д — $S = 4910$

Кружками отмечены условно малые треугольники, находящиеся на значительных расстояниях от опорной точки, подтверждающие результаты, представленные на рис. 2. В соответствии с рис. 4 наиболее точная комбинация измерений НП имеет площадь $S = 2224$ у. е., а наименее точная формирует фигуру с $S = 4910$ у. е.

Результаты (Results)

В выполненном исследовании получены результаты, акцентирующие внимание на существенных различиях в применении на практике двух подходов к оценке точности навигационных измерений, которые заключаются в следующем:

1. Для оценки точности работы навигационной техники (прибора, метода, системы) применяется подход, основанный на экспериментальных характеристиках доверительных интервалов, полученных в конкретных стандартных условиях испытаний. Эта информация в виде средних квадратических погрешностей (отклонений) фиксируется в технической документации навигационных приборов и инструментов и впоследствии используется в качестве априорной информации при выборе навигационной техники и методов для ОМС. Показано логическое несоответствие в применении *априорной точности* т. е. закона распределения случайных погрешностей измерений НП к оценке *текущей точности* обсервации.

2. На практике координаты обсервации определяются с помощью навигационных измерений, отягощенных случайными погрешностями, и положение истинного места судна неизвестно, но при $r \geq 6$ вероятность P его нахождения в фигуре погрешностей близка или равна единице. Это дает основание сделать вывод об области истинного положения судна. Для оценки размеров этой области, т. е. косвенной оценки близости обсервации и истинного места судна, предлагается оценка площади S фигуры погрешностей. Так как обе точки находятся в фигуре погрешностей, при ее меньшей площади S расстояние D между этими точками меньше, т. е. *текущая точность* обсервации выше.

3. При нормальном законе распределения случайных погрешностей линий положения условно малые треугольники погрешностей встречаются чаще, чем треугольники условно больших размеров.

4. Формирование малого треугольника случайными погрешностями линий положения не означает увеличение точности измерений (близости треугольника к опорной точке).

Обсуждение (Discussion)

В статье выполнен анализ различия двух методов оценки точности навигационных измерений и сформулирован вопрос о некорректности применения априорных методов оценки точности для эпизодических обсерваций, изложенных в курсах морской навигации. Основным признаком такой некорректности заключается в переносе свойств совокупности ранее идентифицированных погрешностей навигационных измерений на неизвестные погрешности единичной обсервации и придании ей статуса математического ожидания этой совокупности, т. е. центра навигационного априорного доверительного интервала, ограниченного контуром эллипса или окружности.

В процессе исследования зафиксирован вывод о том, что избыточность измерений при наличии независимых случайных погрешностей играет ключевую роль и связана с методом оценки текущей точности эпизодической обсервации. Достаточно неочевидным является полученный результат, свидетельствующий о том, что при $r = 1$ размеры площади S треугольника погрешностей и расстояние D между треугольником (центр тяжести) и опорной точкой не связаны между собой. Несмотря на то, что по результатам моделирования при нормальном распределении погрешностей условно малые треугольники образуются чаще в последовательности измерений, такие треугольники не обязательно располагаются ближе к опорной (истинной) точке. Этот факт опровергает утверждение о том, что меньший треугольник погрешностей является подтверждением большей точности ОМС, что может явиться причиной сосредоточения более пристального внимания на некоторых вопросах навигации, связанных с этим неочевидным явлением, включая малый уровень вероятности покрытия треугольником истинной точки.

Увеличение избыточности измерений r приводит не только к образованию сложных фигур погрешностей, но и к увеличению вероятности покрытия P ими истинной точки. При $P \approx 100\%$ площадь S фигур погрешностей является косвенной характеристикой точности единичной обсервации, которая может быть формально получена с использованием МНК, причем чем меньше площадь S , тем ближе расположены истинная точка и точка по МНК внутри фигуры погрешностей. Увеличение избыточности измерений при $r \geq 6$ реализует свойство практической состоятельности оценки по МНК, т. е. тенденцию к совмещению точек, а площадь фигуры S погрешностей может играть роль некоего эквивалента геометрическому фактору и регламентироваться в зависимости от навигационной сложности района плавания.

В исследовании рассмотрено только двумерное навигационное пространство, исходя из предположения, что экстраполяция на пространства других размерностей (например, на $n = 3$) даст теоретически аналогичные результаты, а также в нем не учитываются систематические погрешности измерений.

Выводы (Summary)

На основе выполненного исследования можно сделать следующие выводы:

1. Современная навигационная техника, характеризующаяся высокой точностью измерений, в перспективе позволяет наращивать объем измерительной информации, используя для ее обработки платформы Big Data без ограничения количества данных.

2. Увеличение количества навигационных измерений не исключает необходимости решения задачи оценки точности единичной обсервации, которая может быть выполнена косвенно с помощью оценки площади фигуры погрешностей линий положения или фигуры погрешностей, образованной внешними контурами навигационных изолиний.

3. Интенсивное внедрение информационных технологий в мореплавании стимулирует развитие следующего более технологичного и перспективного этапа альтернативных и автономных методов ОМС, основанного на возможности увеличения объема обрабатываемой измерительной информации. Этот этап напрямую относится, например, к азимутальным методам мореходной астрономии, которые позволяют выполнять неограниченное количество навигационных измерений в отсутствии видимого горизонта, что несомненно, является актуальным при плавании судов в непростых условиях высоких широт, особенно в длительный период полярной ночи.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Васьков А. С. Планирование и контроль криволинейной траектории движения судна / А. С. Васьков, А. А. Мироненко // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2023. — Т. 15. — № 3. — С. 401–415. DOI: 10.21821/2309-5180-2023-15-3-401-415.

2. Дерябин В. В. Модель движения судна для счисления пути / В. В. Дерябин // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2022. — Т. 14. — № 1. — С. 17–24. DOI: 10.21821/2309-5180-2022-14-1-17-24.

3. Дерябин В. В. Нейросетевой подход к созданию системы определения счислимого места судна / В. В. Дерябин // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2018. — Т. 10. — № 3. — С. 469–476. DOI: 10.21821/2309-5180-2018-10-3-469-476.

4. Дерябин В. В. Определение местоположения судна по глубинам при помощи нейронной сети / В. В. Дерябин // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2024. — Т. 16. — № 1. — С. 7–16. DOI: 10.21821/2309-5180-2024-16-1-7-16.

5. Ююкин И. В. Картографирование изоповерхности дополнительных вторичных факторов методом сплайн-аппроксимации как условие повышения точности обсерваций e-Lozan / И. В. Ююкин // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2024. — Т. 16. — № 1. — С. 37–54. DOI: 10.21821/2309-5180-2024-16-1-37-54.

6. Czaplewski K. The Concept of Using the Decision-Robustness Function in Integrated Navigation Systems / K. Czaplewski, B. Czaplewski // Sensors. — 2022. — Vol. 22. — Is. 16. — Pp. 6157. DOI: 10.3390/s22166157.

7. Specht M. Determination of navigation system positioning accuracy using the reliability method based on real measurements / M. Specht // Remote Sensing. — 2021. — Vol. 13. — Is. 21. — Pp. 4424. DOI: 10.3390/rs13214424.

8. Логиновский В. А. Оценка вероятности нахождения места судна в геометрической фигуре погрешностей линий положения / В. А. Логиновский // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2023. — Т. 15. — № 2. — С. 161–171. DOI: 10.21821/2309-5180-2023-15-2-161-171.

9. Nguyen T. D. Evaluation of the accuracy of the ship location determined by GPS global positioning system on a given sea area / T. D. Nguyen // Journal of Physics: Conference Series. — IOP Publishing, 2020. — Vol. 1515. — No. 4. — Pp. 042010. DOI: 10.1088/1742-6596/1515/4/042010.

10. Specht M. Consistency of the empirical distributions of navigation positioning system errors with theoretical distributions — comparative analysis of the DGPS and EGNOS systems in the years 2006 and 2014 / M. Specht // Sensors. — 2020. — Vol. 21. — Is. 1. — Pp. 31. DOI: 10.3390/s21010031.

11. Zalewski P. Evolution of Maritime GNSS and RNSS Performance Standards / P. Zalewski, A. Bał, M. Bergmann // Remote Sensing. — 2022. — Vol. 14. — Is. 21. — Pp. 5291. DOI: 10.3390/rs14215291.

12. Filipowicz W. Mathematical theory of evidence in navigation / W. Filipowicz // Belief Functions: Theory and Applications: Third International Conference, BELIEF 2014, Oxford, UK, September 26–28, 2014. Proceedings 3. — Springer International Publishing, 2014. — Pp. 199–208. DOI: 10.1007/978-3-319-11191-9_22.

13. Specht M. Statistical distribution analysis of navigation positioning system errors — issue of the empirical sample size / M. Specht // Sensors. — 2020. — Vol. 20. — Is. 24. — Pp. 7144. DOI: 10.3390/s20247144.

14. Filipowicz W. Position fixing and its accuracy evaluation / W. Filipowicz // *Zeszyty Naukowe/Akademia Morska w Szczecinie*. — 2013. — № 36 (108) z. 1. — Pp. 42–48.

15. Specht C. A method for the assessing of reliability characteristics relevant to an assumed position-fixing accuracy in navigational positioning systems / C. Specht, J. Rudnicki // *Polish Maritime Research*. — 2016. — Vol. 23. — Is. 3. — Pp. 20–27. DOI: 10.1515/pomr-2016-0028.

16. Resolution A.915(22). Revised maritime policy and requirements for a future global navigation satellite system (GNSS) [Электронный ресурс]. — Режим доступа: [https://wwwcdn.imo.org/localresources/en/KnowledgeCentre/IndexofIMOResolutions/AssemblyDocuments/A.915\(22\).pdf](https://wwwcdn.imo.org/localresources/en/KnowledgeCentre/IndexofIMOResolutions/AssemblyDocuments/A.915(22).pdf) (дата обращения: 30.04.2024).

17. Resolution A.1046(27). Worldwide radionavigation system [Электронный ресурс]. — Режим доступа: [https://wwwcdn.imo.org/localresources/en/KnowledgeCentre/IndexofIMOResolutions/AssemblyDocuments/A.1046\(27\).pdf](https://wwwcdn.imo.org/localresources/en/KnowledgeCentre/IndexofIMOResolutions/AssemblyDocuments/A.1046(27).pdf) (дата обращения: 30.04.2024).

18. Площадь фигуры, ограниченная линиями online [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <https://mreham.ru/graph/area> (дата обращения: 30.04.2024).

REFERENCES

1. Vas'kov, Anatoliy S., and Aleksandr A. Mironenko. "Planning and control of the ship curvilinear route." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 15.3 (2023): 401–415. DOI: 10.21821/2309-5180-2023-15-3-401-415.

2. Deryabin, Victor V. "A model of vessel motion for dead reckoning." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 14.1 (2022): 17–24. DOI: 10.21821/2309-5180-2022-14-1-17-24.

3. Deryabin, Victor V. "Neural network based approach to a vessel's dead reckoning position fixing system construction." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 10.3 (2018): 469–476. DOI: 10.21821/2309-5180-2018-10-3-469-476.

4. Deryabin, Victor V. "Depth-based vessel position fixing by means of a neural network." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 16.1 (2024): 7–16. DOI: 10.21821/2309-5180-2024-16-1-7-16.

5. Yuyukin, Igor V. "Map-aiding of the additional secondary factors isosurface by the spline approximation method as a condition of improving the e-Loran observations accuracy." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 16.1 (2024): 37–54. DOI: 10.21821/2309-5180-2024-16-1-37-54.

6. Czaplewski, Krzysztof, and Bartosz Czaplewski. "The Concept of Using the Decision-Robustness Function in Integrated Navigation Systems." *Sensors* 22.16 (2022): 6157. DOI: 10.3390/s22166157.

7. Specht, Mariusz. "Determination of navigation system positioning accuracy using the reliability method based on real measurements." *Remote Sensing* 13.21 (2021): 4424. DOI: 10.3390/rs13214424.

8. Loginovsky, Vladimir A. "Assessment of ship position probability in the geometrical figure of position lines errors." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 15.2 (2023): 161–171. DOI: 10.21821/2309-5180-2023-15-2-161-171.

9. Nguyen, Thai Duong. "Evaluation of the accuracy of the ship location determined by GPS global positioning system on a given sea area." *Journal of Physics: Conference Series*. Vol. 1515. No. 4. IOP Publishing, 2020. DOI: 10.1088/1742-6596/1515/4/042010.

10. Specht, Mariusz. "Consistency of the empirical distributions of navigation positioning system errors with theoretical distributions — comparative analysis of the DGPS and EGNOS systems in the years 2006 and 2014." *Sensors* 21.1 (2020): 31. DOI: 10.3390/s21010031.

11. Zalewski, Paweł, Andrzej Bąk, and Michael Bergmann. "Evolution of Maritime GNSS and RNSS Performance Standards." *Remote Sensing* 14.21 (2022): 5291. DOI: 10.3390/rs14215291.

12. Filipowicz, Włodzimierz. "Mathematical theory of evidence in navigation." *Belief Functions: Theory and Applications: Third International Conference, BELIEF 2014, Oxford, UK, September 26–28, 2014. Proceedings* 3. Springer International Publishing, 2014. 199–208. DOI: 10.1007/978-3-319-11191-9_22.

13. Specht, Mariusz. "Statistical distribution analysis of navigation positioning system errors — issue of the empirical sample size." *Sensors* 20.24 (2020): 7144. DOI: 10.3390/s20247144.

14. Filipowicz, W. "Position fixing and its accuracy evaluation." *Zeszyty Naukowe/Akademia Morska w Szczecinie* 36(108) z. 1 (2013): 42–48.

15. Specht, Cezary, and Jacek Rudnicki. "A method for the assessing of reliability characteristics relevant to an assumed position-fixing accuracy in navigational positioning systems." *Polish Maritime Research* 23.3 (2016): 20–27. DOI: 10.1515/pomr-2016-0028.

16. Resolution A.915 (22). Revised maritime policy and requirements for a future global navigation satellite system (GNSS). Web. 30 Apr. 2024 <[https://www.wcdn.imo.org/localresources/en/KnowledgeCentre/IndexofIMOResolutions/AssemblyDocuments/A.915\(22\).pdf](https://www.wcdn.imo.org/localresources/en/KnowledgeCentre/IndexofIMOResolutions/AssemblyDocuments/A.915(22).pdf)>.

17. Resolution A.1046(27). Worldwide radionavigation system. Web. 30 Apr. 2024 <[https://www.wcdn.imo.org/localresources/en/KnowledgeCentre/IndexofIMOResolutions/AssemblyDocuments/A.1046\(27\).pdf](https://www.wcdn.imo.org/localresources/en/KnowledgeCentre/IndexofIMOResolutions/AssemblyDocuments/A.1046(27).pdf)>.

18. Ploshchad' figury, ogranichennaya liniyami online. Web. 30 Apr. 2024 <<https://mrexam.ru/graph/area>>.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

Логиновский Владимир Александрович —
доктор технических наук, профессор
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала
С. О. Макарова»
198035, Российская Федерация,
г. Санкт-Петербург, ул. Двинская, 5/7
e-mail: loginovskijVA@gumrf.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

Loginovsky, Vladimir A. —
Dr. of Technical Sciences, professor
Admiral Makarov State University of Maritime
and Inland Shipping
5/7 Dvinskaya Str., St. Petersburg, 198035,
Russian Federation
e-mail: loginovskijVA@gumrf.ru

Статья поступила в редакцию 14 апреля 2024 г.

Received: April 14, 2024.