

УДК 629.783

doi: 10.53816/23061456_2025_7-8_23

**ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДА НЕРАВНОТОЧНЫХ ИЗМЕРЕНИЙ ПРИ
ПОЗИЦИОНИРОВАНИИ МОРСКИХ СУДОВ В БУХТАХ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ
ЛОКАЛЬНЫХ МНОГОПОЗИЦИОННЫХ РАДИОНАВИГАЦИОННЫХ СИСТЕМ**

**APPLICATION OF THE METHOD OF NON-PRECISION MEASUREMENTS
IN THE POSITIONING OF SHIPS IN BAYS USING LOCAL MULTI-POSITION
RADIO NAVIGATION SYSTEMS**

Д-р техн. наук А.А. Филиппов¹, А.В. Гаврилова¹, Н.А. Корельский², д-р воен. наук В.П. Андрийчук³

D.Sc. A.A. Filippov, A.V. Gavrilova, N.A. Karelsky, D.Sc. V.P. Andriyчук

¹*Военно-космическая академия им. А.Ф. Можайского,*

²*Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения,*

³*Михайловская военная артиллерийская академия*

Возможность применения локальной радионавигационной системы (ЛРНС) для обеспечения позиционирования морского судна (МС) по маршруту с необходимой точностью в местах, где сигналы глобальной спутниковой РНС могут содержать естественные помехи, а геометрия движения элементов Спутниковой радионавигационной системы (СРНС) может быть недостаточной предъявляемым требованиям для определения местоположения с требуемой точностью, является актуальной и в настоящее время. В представленной работе рассматривается принцип построения локальной радионавигационной системы для позиционирования маломерных морских судов на дальности до 100 км с СКО (среднеквадратическим отклонением) не превышающем 1 метр. Предлагаются рациональные варианты размещения опорных станций ЛРНС для обеспечения требуемой точности, а также решается задача оценки точности путем обработки измерений предложенным в работе методом с использованием как равноточных, так и неравноточных измерений.

Ключевые слова: локальная радионавигационная система, точность местоположения, равноточные и неравноточные измерения.

The possibility of using a local radio navigation system (LRNS) to ensure the positioning of a marine vessel (MS) along the route with the necessary accuracy in places where global satellite RNC signals may contain natural interference, and the geometry of movement of the elements of the Satellite Radio Navigation System (SRNS) may not be sufficient to meet the requirements for determining the location with the required accuracy, is relevant in the present tense. The presented paper discusses the principle of constructing a local radio navigation system for positioning small-sized naval vessels at a range of up to 100 km with a standard deviation of no more than 1 meter. Rational options for the placement of the reference stations of the LRNS are proposed to ensure the required accuracy, and the problem of estimating accuracy is solved by processing measurements using the method proposed in the work using both equal-precision and non-precision measurements.

Keywords: local radio navigation system, location accuracy, equal-precision and non-precision measurements.

Варианты размещения опорных станций ЛРНС для обеспечения требуемой точности позиционирования

Первоначально рассматриваются варианты размещения опорных станций ЛРНС. Для определения местоположения (МП) морских судов с использованием ЛРНС выбран дальномерный метод [1].

Значение СКО ошибки определения МП МС в разрабатываемой ЛРНС допустимо рассматривать на уровне 1 метра.

Геометрический фактор для линий положения при таких условиях составит

$$\Gamma = \frac{\sigma_{\text{м.п.}}}{\sigma_{\text{л.п.}}} = \frac{1}{0,5} = 2. \quad (1)$$

В таком случае, при геометрическом факторе не больше 2 угол пересечения линий положения должен составлять не более 45° .

$$\alpha_{\text{л.п.}} = \arcsin\left(\frac{\sqrt{2}}{\Gamma}\right) = \left(\frac{\sqrt{2}}{2}\right) = 45^\circ. \quad (2)$$

Из проведенного анализа для обеспечения заданной дальности (100 км) и при достижении минимальной ошибки МП, размещать опорные станции предлагается на расстоянии 50 км друг от друга. Расположение опорных станций (ОС) ЛРНС системы с дальномерным методом определения МП представлено на рис. 1.

В данной системе установлено по три пары ОС на расстоянии 30 км друг от друга. Такая установка обеспечивает взаимное покрытие мертвых зон, показанных штриховыми линиями. Таким образом, рабочая зона принимает вид, представленный на рис. 2.

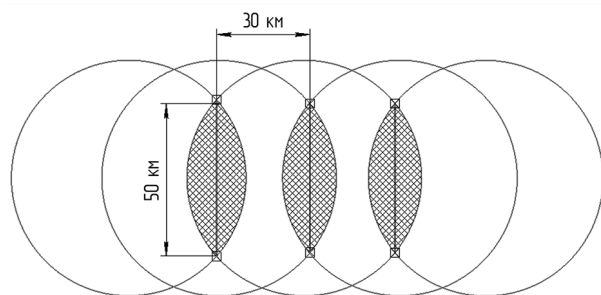


Рис. 1. Расположение ОС системы с использованием дальномерного метода

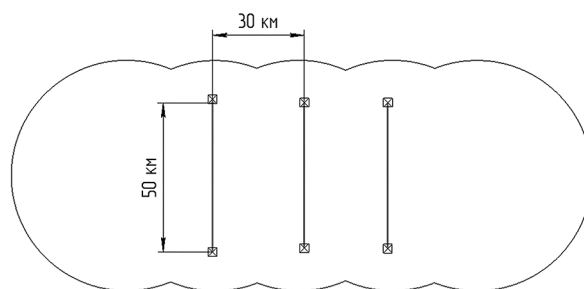


Рис. 2. Вид рабочей зоны ЛРНС с использованием дальномерного метода

Помимо основных методов определения местоположения, возможны комбинации методов согласно [2, 7–9], то есть использование возможности измерения дальности двумя и более методами.

Так, в дальномерной системе для повышения точности МП и увеличения дальности действия системы, предпочтительно добавить в цепочки дополнительные ОС. В результате оценки положений на плоскости существующих опорных станций возможно добавление еще трех опорных станций в состав локальной РНС [6, 8].

В результате, измерения навигационных параметров может осуществляться методами [1, 4, 6, 8, 10]: дальномерным и разностно-дальномерным. Рабочая зона при измерении местоположения с помощью комбинации методов будет выглядеть в соответствии с рис. 3.

При таком рациональном размещении опорных станций будет обеспечено определение точности местоположения не ниже 1 метра при дальности действия системы до 100 км, что соответствует целевой установке.

Для размещения многопозиционной локальной радионавигационной системы предлагается Кандалакшский залив. На рис. 4 и 5 показано рациональное размещение опорных станций и ра-

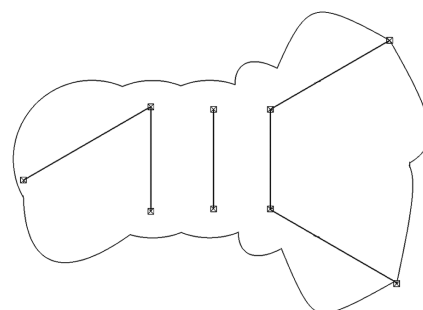


Рис. 3. Вид рабочей зоны системы с использованием комбинации методов



Рис. 4. Рабочая зона системы при измерении дальномерным методом



Рис. 5. Рабочая зона системы при измерении комбинацией методов

бочие зоны системы при измерении дальномерным и комбинированным методами [11–13].

В таком случае, размеры рабочей зоны будет находиться в пределах 100...150 км при обеспечении значений СКО на уровне 1 м, что соответствует поставленной задаче.

Оценка точности местоположения морских судов с использованием разработанной многопозиционной комбинированной ЛРНС из неравноточных цепей ЛРНС

При оценке точности местоположения морского судна, полученные значения можно считать равноточными, и возможно оценить случайные ошибки измерений и установить, насколько точно и повторяемо выполняется процесс [1, 3]. Но для этого необходимо выполнять условия:

- точность измерительной аппаратуры должна всегда оставаться неизменной;
- параметры среды для всех измерений должны быть постоянными.

В реальных условиях определения местоположения (МП) выполнение вышеупомянутых условий маловероятно по следующим причинам [4].

1. Навигационная аппаратура, необходимая для проведения измерений, включает в свой состав системы, параметры которых зависят от внешних факторов, например, температуры, влажности и загрязнения.

2. Выполнять измерения могут разные операторы, что может привести к нарушению калибровки оборудования.

3. Проведение измерений в разное время суток.

В данной системе местоположение определяется комбинацией методов, как уже было отмечено ранее применяемые методы обладают разной оценкой точности [5].

Таким образом, измерения местоположения целесообразно считать, как неравноточные и производить их оценку следующим способом.

Оценка точности местоположения морского судна, включает в себя следующие этапы:

1. Вычисление результатов измерений в серии осуществляется по выражению

$$x_j = \frac{\sum_{i=1}^{n_{ji}} x_{ji}}{n_{ji}}, \quad (3)$$

где x_{ji} — результат i -го измерения точности местоположения x_j -й серии измерений;

n_{ji} — число проводимых i -х измерений в j -й серии измерений.

2. Вычисление погрешности i -го результата измерения в каждой серии.

$$\Delta_{ji} = x_{ji} - x_j. \quad (4)$$

3. Вычисление среднеквадратического отклонения.

$$\sigma_j = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n_{ji}} \Delta_{ji}^2}{n_{ji}}}. \quad (5)$$

4. Оценка точности измерений СКО.

$$\delta_j = \frac{\sigma_j}{\sqrt{2n_{ji}}}. \quad (6)$$

5. Оценка веса результатов измерений по выражению

$$p_j = \frac{k}{\delta_j}, \quad (7)$$

где k — некое число, полученное по предварительным результатам от навигационной аппаратуры, которая осуществляет более точные измерения по сравнению с другими, то есть эталона.

В качестве такой аппаратуры рекомендуется использовать приборы с максимальным классом точности.

6. Вычисление оценки точности местоположения по результатам обработки измерений.

$$X_{\text{точн.}} = \frac{x_1 \cdot p_1 + x_2 \cdot p_2 + x_j \cdot p_j + \dots + x_{n_j} \cdot p_{n_j}}{p_1 + p_2 + \dots + p_{n_j}}. \quad (8)$$

7. Вычисление погрешности оценки точности местоположения по результатам исходя из выражения

$$M_{\text{точн.}} = \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^{n_j} (X_{\text{точн.}} - x_j)^2 \cdot p_j}{(p_1 + p_2 + \dots + p_{n_j}) \cdot (n_j - 1)}}. \quad (9)$$

Апробация данного метода выполнялась на основе имитационного моделирования. В ходе моделирования было получено шесть векторов серий измерений, распределенных по нормальному закону. Данные вектора (табл. 1) представляют собой результаты измерений ошибки определения местоположения, полученные при разных методах определения местоположения.

Обработка данных векторов осуществлялась на основе обработки результатов методом равноточных измерений и предложенным методом, в качестве эталонной аппаратуры был выбран вектор 6, поскольку он обладает наименьшим СКО. Результаты обработки представлены в табл. 2.

Исходя из результатов моделирования, можно отметить, что при обработке измерений предложенным методом, результаты показывают необходимую точность определения местоположения с погрешностью на 19,2 % меньшей, чем при обработке результатов методом равноточных измерений, как наглядно это демонстрирует рис. 6.

Заключение

Задача обеспечения необходимой точности позиционирования малоразмерных судов до сих пор остается актуальной. Предложенный в работе вариант построения ЛРНС позволяет определять местоположение с точностью не ниже одного метра в зоне прибрежного плавания малоразмерных судов на дальностях до 100 км от опорных станций локальных многопозиционных РНС.

Системы управления МС с использованием локальных РНС не уступают по точности бортовым системам навигации. В условиях непреднамеренных и преднамеренных помех могут использоваться для управления МС с точностью не ниже спутниковых РНС. Применение пространственно-временной обработки и доплеровской фильтрации навигационных сигналов в НАП ЛРНС позволяет повысить соотношение сигнал/помеха на 35–40 дБ в зависимости от взаимного расположения постановщика помех, МС, избирательности фильтров доплеровской частоты (ФДЧ) и обеспечить более точное слежение за навигационным сигналом. Дополнительное повышение помехоустойчивости навигационного комплекса обеспечивает «мерцающий» режим работы опорных станций ЛРНС, согласованный по частоте с контуром управления МС.

Таблица 1

Вектора, представляющие результаты измерений

Номер серии измерений, j	Метод определения местоположения	Число измерений в серии, n_{ij}	Результаты измерений в серии, x_j	СКО серии, σ_j	Вес серии измерений, p_j
1	Дальномерный	5	1,029	0,054	0,889
2	Дальномерный	3	1,083	0,089	0,539
3	Разностно-дальномерный	6	1,285	0,076	0,632
4	Дальномерный	4	1,013	0,083	0,578
5	Разностно-дальномерный	4	1,370	0,187	0,257
6	Дальномерный	2	1,046	0,048	1,000

Таблица 2

Результаты обработки измерений

	Обработка результатов методом равноточных измерений	Обработка результатов предложенным методом
Оценка точности местоположения	1,13767	1,09492
Погрешность оценки точности местоположения	0,06176	0,05182

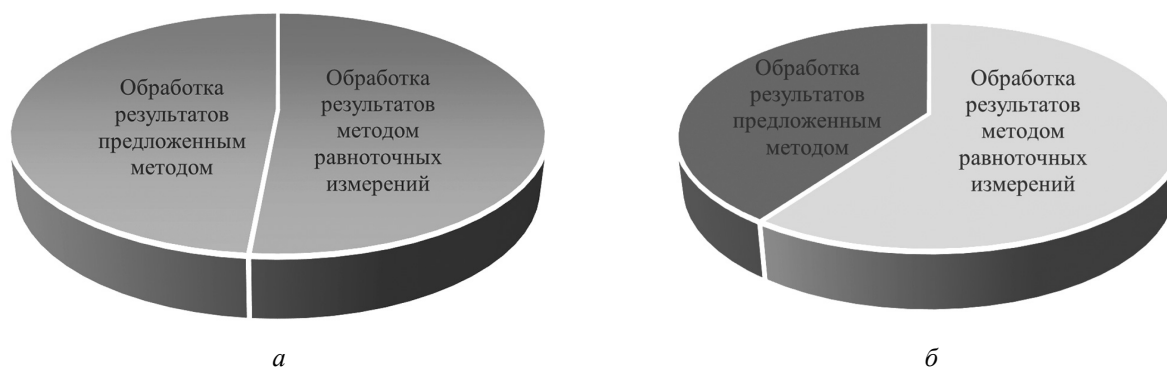


Рис. 7. Сравнительные диаграммы результатов: а — измерений оценки точности местоположения; б — погрешности оценки точности местоположения

Список источников

1. Корельский Н.А. Анализ мешающих факторов и методов определения местоположения в локальной радионавигационной системе и сравнительный анализ их показателей // Актуальные проблемы защиты и безопасности: Труды XXVI Всероссийской научно-практической конференции. 2023. С. 260–268.
2. Тяпкин В.Н., Гарин Е.Н. Методы определения навигационных параметров подвижных средств с использованием спутниковой радионавигационной системы ГЛОНАСС: монография. Красноярск: Изд-во СФУ, 2012. 260 с.
3. Мишура Т.П., Епифанцев К.В. Метрология и радиоизмерения: учеб. пособие. Санкт-Петербург: Изд-во ГУАП, 2023. 79 с.
4. Новицкий П.В., Зограф И.А. Оценка погрешностей результатов измерений: учеб. пособие. Ленинград: Энергоатомиздат, 1991. 304 с.
5. Сысуев С.Ю., Филиппов А.А., Пономарев А.Л. и др. Способ когерентной обработки информации многопозиционной РЛС при обнаружении наземных объектов бортовыми радиотехническими системами // Вопросы оборонной техники. Серия 16. Технические средства противодействия терроризму. 2017. № 9–10. С. 42–47.

6. Большаков В.Д., Маркузе Ю.В., Голубев В.В. Уравнивание геодезических построений: справочное пособие. Москва: Недра, 1989. 412 с.

7. Мухин А.И., Пучкова И.А., Коптев Д.С. Альтернативный способ мониторинга судов для обеспечения безопасного мореплавания при отсутствии радиоизлучений от AIS-Транспондеров // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Управление, вычислительная техника, информатика. Медицинское приборостроение. 2019. Т. 9. № 2 (31). С. 22–34.

8. Новицкий П.В. Оценка погрешностей результатов измерений. Л.: Энергоатомиздат, Ленинградское отделение, 1991. 304 с.

9. Кузнецов Б.Ф. Стохастические модели и методы анализа информационно-измерительных систем АСУ ТП. Ангарск, Ангарская государственная техническая академия. 2007. 180 с.

10. Жилин С.И., Байкалова Т.В. Обработка неравноточных инженерно-геодезических измерений нестатистическими методами // Известия Алтайского государственного университета. 2011. № 1. С. 94–97.

11. Елисеев А.В., Крылова А.А., Остапенко А.В. Алгоритмы обработки измерений параметров движения маневрирующего объекта в условиях неравноточных измерений // Радиотехника. 2014. № 8. С. 29–38.

12. Баженов А.В., Захаренко Г.И., Бережнов А.Н., Савченко К.Ю. Радионавигационные системы: учеб. пособие. Ставрополь: СВВАИУ(ВИ), 2007. 202 с.

13. Вагущенко Л.Л. Современные информационные технологии в судовождении. Одесса: ОНМА, 2013. 135 с.

References

1. Korelskiy N.A. Analysis of interfering factors and methods of location determination in the local radio navigation system and comparative analysis of their indicators // Actual problems of protection and safety: Proceedings of the XXVI All-Russian Scientific and Practical Conference. 2023. Pp. 260–268.

2. Tyapkin V.N., Garin E.N. Methods for determining navigation parameters of mobile vehicles using the GLONASS satellite radio navigation

system: monograph. Krasnoyarsk: SFU Publishing House, 2012. 260 p.

3. Mishura T.P., Epifantsev K.V. Metrology and radio measurements: textbook. stipend. Saint-Petersburg: GUAP Publishing House, 2023. 79 p.

4. Novitsky P.V., Zograf I.A. Estimation of measurement errors: textbook. Leningrad: Energoatomizdat, 1991. 304 p.

5. Sysuev S.Yu., Filippov A.A., Ponomarev A.L. et al. A method of coherent information processing of a multi-position radar when detecting ground objects by on-board radio engineering systems // Issues of defense technology. Episode 16. Technical means of countering terrorism. 2017. No 9–10. Pp. 42–47.

6. Bolshakov V.D., Markuse Yu.V., Golubev V.V. Equalization of geodetic constructions: a reference manual. Moscow: Nedra Publ., 1989. 412 p.

7. Mukhin A.I., Puchkova I.A., Koptev D.S. An alternative method of vessel monitoring to ensure safe navigation in the absence of radio emissions from AIS transponders // Proceedings of the Southwestern State University. Series: Management, computer engineering, computer science. Medical instrumentation. 2019. Vol. 9. No 2 (31). Pp. 22–34.

8. Novitsky P.V. Estimation of measurement errors. Leningrad: Energoatomizdat, Leningrad branch, 1991. 304 p.

9. Kuznetsov B.F. Stochastic models and methods of analysis of information and measurement systems of automated process control systems. Angarsk, Angarsk State Technical Academy. 2007. 180 p.

10. Zhilin S.I., Baykalova T.V. Processing of non-precision engineering and geodetic measurements by non-statistical methods // Proceedings of the Altai State University. 2011. No 1. Pp. 94–97.

11. Eliseev A.V., Krylova A.A., Ostapenko A.V. Algorithms for processing measurements of motion parameters of a maneuvering object in conditions of non-precision measurements // Radio Engineering. 2014. No 8. Pp. 29–38.

12. Bazhenov A.V., Zakharenko G.I., Berezhnov A.N., Savchenko K.Y. Radio navigation systems: textbook. Stavropol: SVVAIU(VI), 2007. 202 p.

13. Vagushchenko L.L. Modern information technologies in navigation. Odessa: ONMA, 2013. 135 p.