

УДК 621.396.969

## ОЦЕНКА РАБОЧИХ ЗОН ИМПУЛЬСНО-ФАЗОВЫХ РАДИОНАВИГАЦИОННЫХ СИСТЕМ ПРИ СОВМЕСТНОМ ИСПОЛЬЗОВАНИИ СИГНАЛОВ ОТ ДВУХ ЦЕПЕЙ

*Грунин А.П., ведущий инженер, Дальневосточный филиал Всероссийского научно-исследовательского института физико-технических и радиотехнических измерений, e-mail: grunin@dfvniiftri.ru*

*Сай С.В., д.т.н., профессор, заведующий кафедрой вычислительной техники Тихоокеанского Государственного университета, e-mail: sai1111@rambler.ru*

## WORKING AREAS ESTIMATION OF PULSE-PHASE RADIO NAVIGATION SYSTEMS WHEN USING SIGNALS FROM TWO CHAINS TOGETHER

*Grunin A.P., Sai S.V.*

*In this paper, an iterative position search algorithm is considered, based on the use of the differences in the arrival times of radio pulses from all radio navigation stations operating at the receiving point. The error in determining the location by the proposed algorithm is compared with the existing hyperbolic method at 8178 points in the Asia-Pacific region. The data obtained made it possible to simulate and evaluate the working zones of two jointly used chains of pulse-phase radio navigation systems according to both algorithms. It is shown that the use of the iterative position search method significantly expands the working area of chains when they are used together. Also, in most areas, the position determination error is significantly lower than in the hyperbolic method. A method is introduced for quantitative assessment of the effectiveness of the iterative position search method in comparison with the hyperbolic method. Modeling the working area of several chains allows you to improve the efficiency of determining the deployment locations and formats of new systems.*

**Key words:** navigation, positioning, accuracy, coordinates, working zones, iterative algorithm, minimization.

**Ключевые слова** навигация, позиционирование, погрешность, координаты, рабочие области, итерационный алгоритм, минимизация.

### Введение

Для выполнения задачи резервирования глобальных навигационных спутниковых систем используются импульсно-фазовые радионавигационные системы (ИФРНС), работающие в диапазоне длинных волн [1]. Согласно Радионавигационному плану Российской Федерации от 4 сентября 2019 года, одним из приоритетных направлений развития национальных систем навигационно-временного обеспечения России является модернизация ИФРНС до уровня полноценной дублирующей (дополняющей) радионавигационной системы. Также отмечается, что дальнейшее повышение точностных параметров навигационных измерений сопряжено с совершенствованием алгоритмов определения местоположения.

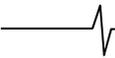
В докладе [2] указывается, что совместное использование eLoran передатчиков в Англии, Франции, Германии и Дании позволяет обеспечить погрешность позиционирования менее 10 метров. Авторы производят теоретическую оценку рабочей зоны нескольких станций eLoran в виде тепловой карты.

В [3] предложен алгоритм определения навигационных параметров сразу от нескольких цепочек ИФРНС, действующих в регионе Южной Кореи и ее акватории. Метод основывается на грубом первичном определении позиции приемника на основе сигналов одной цепочки ИФРНС, после чего становится возможным использование сигналов других цепочек.

*Рассмотрен алгоритм итеративного поиска позиции приемника, основанный на использовании разностей времен прихода радиоимпульсов от всех радионавигационных станций, работающих в точке приема. Произведено сравнение погрешности определения местоположения предложенного алгоритма с существующим гиперболическим методом в 8178 точках Азиатско-Тихоокеанского региона. Полученные данные позволили смоделировать и оценить рабочие зоны двух, совместно используемых цепочек импульсно-фазовых радионавигационных систем по обоим алгоритмам. Показано, что использование метода итеративного поиска позиции значительно расширяет рабочую область цепочек при их совместном использовании. Также в большинстве областей погрешность определения местоположения значительно меньше, чем в гиперболическом методе. Введен способ количественной оценки эффективности применения метода итеративного поиска позиции по сравнению с гиперболическим методом. Моделирование рабочей зоны нескольких цепочек позволяет повысить эффективность определения мест развертывания и форматов работы новых систем.*

На основе метода [3] авторы [4] проводят оценку погрешности позиционирования по сигналам планируемой к развертыванию системы eLoran на территории Южной Кореи. Из-за отсутствия реально действующих станций eLoran авторам приходится производить оценку теоретически.

В [5] приводятся результаты исследования влияния различных значений проводимости земной поверхности на затухание сигналов в ДВ диапазоне на территории Южной Кореи. Подобные исследования с построением рабочих зон мощности и оценкой погрешности позицио-



нирования проводились в [6] на Египетском побережье.

Целью работы является сравнение погрешности определения местоположения предложенного алгоритма итеративного поиска позиции с алгоритмом, основанным на гиперболическом методе. Сравнение производится на большой территории Азиатско-Тихоокеанского региона. Полученные данные позволяют смоделировать рабочую зону двух, совместно использующихся цепочек ИФРНС по обоим алгоритмам и сравнить их эффективность.

### Методы определения местоположения

Стандартная цепочка ИФРНС включает от трех до пяти передающих станций. Схематический вид излучаемых двумя цепочками пакетов импульсов представлен на рис. 1. Первая станция является ведущей ( $M$ ), остальные ведомыми ( $W, X, Y$ ). Станции излучают группы импульсов с определенным интервалом, называемым GRI (Group Repetition Interval).

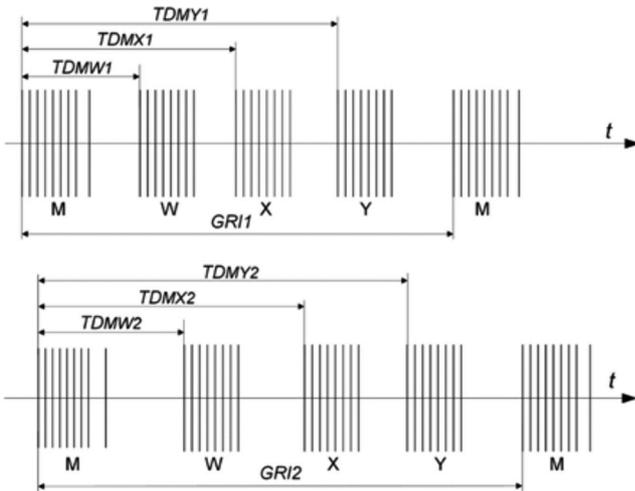


Рис. 1. Схематический вид излучаемых двумя цепочками пакетов импульсов

На рис. 1 GRI1 и GRI2 – периоды повторения групп радиоимпульсов каждой цепочки.  $TD_{Mij}$  – разность времени прихода первого импульса  $i$ -й станции ( $i = W, X, Y, Z$ )  $j$ -й цепочки и первого импульса ведущей станции  $M_j$ . Для обеспечения условия отсутствия совпадения сигналов ведомых станций по времени в любой точке рабочей зоны применяются фиксированные кодовые задержки по времени излучения радиоимпульсов каждой ведомой станцией.

Приемник измеряет время прихода импульсов станций относительно собственной шкалы времени. При условии, что все принимаемые станции синхронизированы со шкалой единого времени возможно применение ГНСС-подобного метода расчета координат [7], но на данный момент в реальных местах применения не все принимаемые цепочки ИФРНС имеют подобную синхронизацию.

Гиперболический метод [8] подразумевает, что пользователь получает свои координаты путем измерения разности времен прихода импульса ведущей станции и ведомой. Входными данными гиперболического метода являются значения  $TD_{Mi}$ , а также параметры цепочки ИФРНС. Классический гиперболический метод

позиционирования производит вычисление координат в 3 этапа:

- преобразование координат передающих станций из системы референц-эллипсоида в систему координат сферы, имеющей одну точку касания с референц-эллипсоидом;
- решение уравнений сферической тригонометрии с устранением неоднозначностей;
- преобразование полученных координат в географические.

Алгоритм применяется только для двух TD одной цепочки. В случае, если цепочка ИФРНС содержит 4-5 станций или в регионе действуют несколько цепочек, необходимо применение алгоритмов совмещения нескольких оценок местоположения.

В [9] представлен итерационный алгоритм, основанный на использовании разностей времен прихода радиоимпульсов от всех принимаемых радионавигационных станций. В работе промоделированы сигналы станций  $M, X, Y$  для цепочек с GRI 5950 и GRI 7950.

Кратко рассмотрим принцип действия предложенного алгоритма. Примем, что в каждой из цепочек имеется по 4 станции ( $M, W, X, Y$ ). В общем случае приемник может принять сигналы от  $N$  цепочек. Примем, что координаты станций  $M, W, X, Y$  каждой цепочки при этом будут обозначены как  $(x_{Mk}, y_{Mk}), (x_{Wk}, y_{Wk}), (x_{Xk}, y_{Xk}), (x_{Yk}, y_{Yk})$  для  $k = 1 \dots N$ .

Исходными данными для алгоритма являются значения  $TD_{MWk}, TD_{MXk}$  и  $TD_{MYk}$  для  $k = 1 \dots N$ . Зная координаты передающих станций и скорость распространения радиоволн для любой точки с координатами  $\{x, y\}$ , мы можем рассчитать теоретические значения  $TD$ , соответствующие этой точке. Обозначим эти значения как

$$\rho TD_{MWk} = \frac{L(\{x, y\}, \{x_{Wk}, y_{Wk}\}) - L(\{x, y\}, \{x_{Mk}, y_{Mk}\})}{c}, \quad (1)$$

$$\rho TD_{MXk} = \frac{L(\{x, y\}, \{x_{Xk}, y_{Xk}\}) - L(\{x, y\}, \{x_{Mk}, y_{Mk}\})}{c}, \quad (2)$$

$$\rho TD_{MYk} = \frac{L(\{x, y\}, \{x_{Yk}, y_{Yk}\}) - L(\{x, y\}, \{x_{Mk}, y_{Mk}\})}{c}, \quad (3)$$

где  $L(\{x_0, y_0\}, \{x_1, y_1\})$  – функция определения расстояния между двумя точками с координатами  $\{x_0, y_0\}, \{x_1, y_1\}$  по поверхности эллипсоида, аппроксимирующей поверхность Земли,  $c$  – скорость распространения радиоволн.

Для нахождения координат  $\{x, y\}$ , максимально близких к истинным, необходимо найти минимум следующего выражения:

$$\sum_{k=1}^N ((\rho TD_{MWk} - TD_{MWk})^2 + (\rho TD_{MXk} - TD_{MXk})^2 + (\rho TD_{MYk} - TD_{MYk})^2). \quad (4)$$

В качестве функции вычисления расстояния между двумя точками с координатами  $\{x_0, y_0\}$  и  $\{x_1, y_1\}$  по поверхности эллипсоида, аппроксимирующей поверхность Земли, используется итерационный алгоритм Vincenty. Из-за этого дифференцирование выражения (4) будет затруднено. В настоящей работе предлагается альтернативный алгоритм итеративного поиска позиции:

Задается начальная сетка координат  $N \times N$  точек с шагом широты и долготы выбранным таким образом, чтобы полностью покрыть предполагаемую рабочую зону цепочек ИФРНС, участвующих в расчетах.

На указанной сетке вычисляется точка, в которой выражение (4) принимает минимальное значение.

При необходимости применяется один из известных методов [10], [11] компенсации влияния разной скорости распространения радиоволн над сушей или морской поверхностью, а также различий в проводимости отдельных типов суши на систематическую погрешность определения  $TD$ , после чего проводится корректировка  $TD$ . В [10] приводятся данные о том, что на расстояниях между приемником и передающей станцией от 100 до 400 км поправка к  $TD$  из-за разной скорости сигнала над сушей и морем может составлять от 100 до 550 нс. В [11] приводятся данные, что на при смене позиции приемника на 10 км, неоднородности в скорости прохождения сигнала над сушей могут потребовать внесения поправки в  $TD$  до 20 нс.

Сетка координат задается заново, так чтобы центр сетки находился в точке, полученной в предыдущем шаге, а шаг широты и долготы делится в  $M$  раз.

Переход к шагу 2 до тех пор, пока значение выражения (4) не достигнет заданной точности.

В [9] показано, что представленный алгоритм позиционирования позволяет снизить погрешность определения местоположения по двум навигационным цепям на 50 % по сравнению с использованием гиперболического метода вместе с усреднением результатов.

### Результаты моделирования рабочих зон

Выбор Азиатско-Тихоокеанского региона для исследования обусловлен тем, что на этой территории не все цепочки ИФРНС модернизированы до eLoran, а значит к ним не может применяться ГНСС-подобный метод расчета координат. Дальнейшие исследования могут быть направлены на исследование рабочих зон цепочек eLoran в Евро-Атлантическом регионе.

Для построения тестового набора данных выбраны 2 цепочки ИФРНС GRI7950 и GRI9930. В [9] показано, что итерационный алгоритм также применим к паре цепочек с GRI7950 и GRI5950. На рис. 2 представлено расположение передающих станций указанных цепочек.

Для построения изолиний рабочих зон смоделирован тестовый набор данных. Исследование проводилось для области, ограниченной  $25^\circ - 68^\circ$  северной широты и  $105^\circ - 180^\circ$  восточной долготы. Всего исследовалось 8178 точек. Для каждой из указанных точек получены теоретические значения  $TD_{MW1}$ ,  $TD_{MX1}$ ,  $TD_{MY1}$  и  $TD_{MW2}$ ,  $TD_{MX2}$ ,  $TD_{MY2}$  для реально действующих в регионе цепочек GRI7950 и GRI9930 соответственно. Далее были смоделированы наборы данных, представляющие собой нормально распределенные случайные величины с математическим ожиданием  $TD_{MW1}$ ,  $TD_{MX1}$ ,  $TD_{MY1}$  и  $TD_{MW2}$ ,  $TD_{MX2}$ ,  $TD_{MY2}$ .

Среднеквадратическое отклонение всех наборов данных составило 30 нс. В геометрическом смысле каждое значение  $TD_{Mij}$ , в которое вносится случайная составляющая определяет гиперболическую линию, на

которой находится объект. Фокусами этой линии являются координаты станций в индексе  $TD$ , а само значение  $TD$  при его переводе в расстояние определяет удвоенное значение большой полуоси гиперболы.

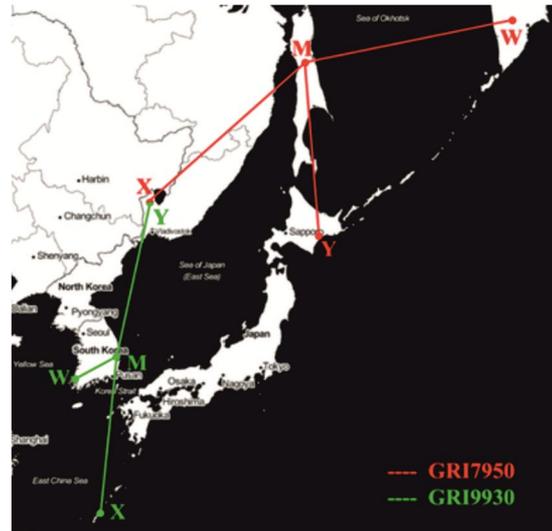


Рис. 2. Расположение передающих станций цепочек GRI7950 и GRI9930

Выбор СКО 30 нс обусловлен реальными показателями случайной погрешности измерения положения радиоимпульсов ИФРНС станцией контроля в Дальневосточном регионе. Случайная составляющая погрешности определения положения радиоимпульсов при времени измерения менее 1 минуты обусловлена в основном алгоритмом приема импульсов и внутренними шумами приемного оборудования. Систематическая погрешность измерения положения радиоимпульсов определяется различием скорости распространения радиоволн над сушей и морской поверхностью, а также различиями в проводимости отдельных типов суши. Методы компенсации систематической погрешности измерения положения радиоимпульсов представлены в работах [10] и [11]. Полное устранение систематической погрешности представляется недостижимым, однако в данной работе предполагается, что систематическая погрешность компенсируется одним из известных алгоритмов до пренебрежимо малого уровня по сравнению со случайной погрешностью.

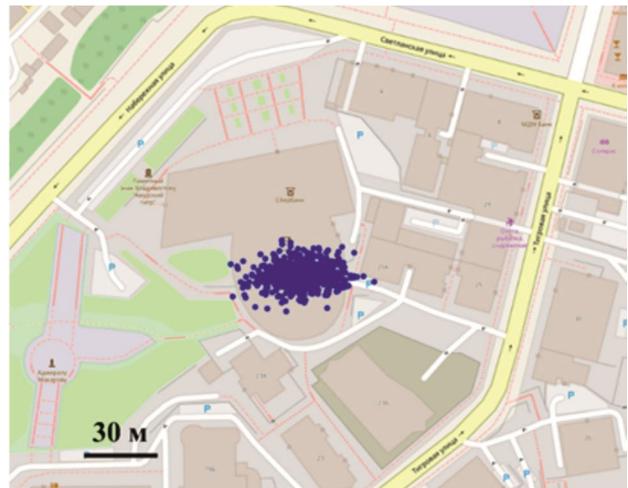
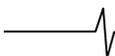


Рис. 3. Распределение координат для тестовой точки



В процессе экспериментов проведено вычисление погрешности определения местоположения по гиперболическому методу для каждой цепочки и предложенного метода итеративного поиска позиции. В качестве критерия оценки погрешности принят радиус окружности, внутрь которой попадают 95 % координат, вычисленных по смоделированным наборам данных в каждой точке. На рис. 3 представлено распределение координат, вычисленных по смоделированному набору данных для точки с координатами 43,1163612 северной широты и 131,878143 восточной долготы. Различные распределения координат для гиперболического алгоритма и алгоритма итеративного поиска позиции представлены в [9] вместе с функциями распределения.

Результаты обработки полученных данных представлены на рис. 4 и рис. 5. Для удобства сравнения эффективности методов на рисунках приведены области, где погрешность определения местоположения составляет меньше 50 метров. На рис. 4 представлены области покрытия цепочек GRI7950 и GRI9930 при использовании гиперболического метода. Различными цветами обозначены области, где погрешность определения местоположения находится в диапазоне 40-50 м, 30-40 м, 20-30 м и 16-20 м. Следует отметить, что минимальная погрешность для гиперболического метода составила 16,7 метров.

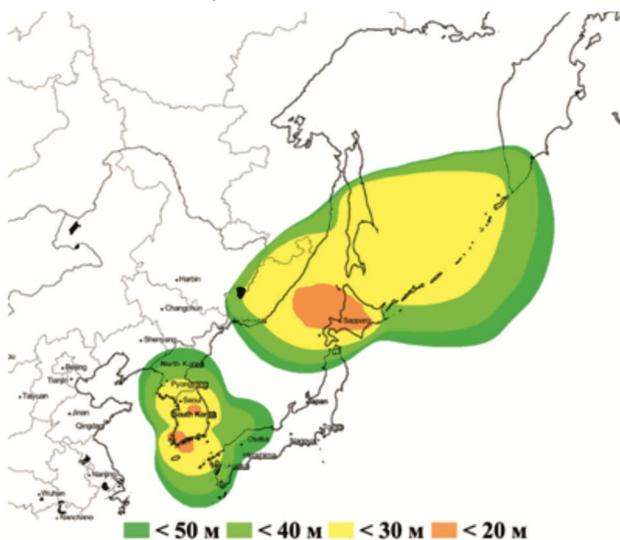


Рис. 4. Области покрытия цепочек GRI7950 и GRI9930 при использовании гиперболического метода

На рис. 5 представлены области покрытия цепочек GRI7950 и GRI9930 при использовании метода итеративного поиска позиции. Цветами обозначены области, где погрешность определения местоположения находится в диапазоне 40-50 м, 30-40 м, 20-30 м, 15-20 м и 9-15 м. Минимальная погрешность для метода итеративного поиска позиции составила 9,5 метров.

Из рис. 4 и рис. 5 видно, что использование метода итеративного поиска позиции значительно расширяет рабочую область цепочек GRI7950 и GRI9930 при их совместном использовании. Также в большинстве областей погрешность определения местоположения значительно ниже, чем в гиперболическом методе.

Для количественной оценки эффективности применения метода итеративного поиска позиции по сравнению с гиперболическим методом необходимо оценить

погрешность какого процента из тестового набора данных 8178 точек находится ниже определенной планки. На рис. 6 приведена указанная оценка. Ось ординат указывает какой процент из 8178 точек имеет погрешность определения положения ниже, чем значение на оси абсцисс.

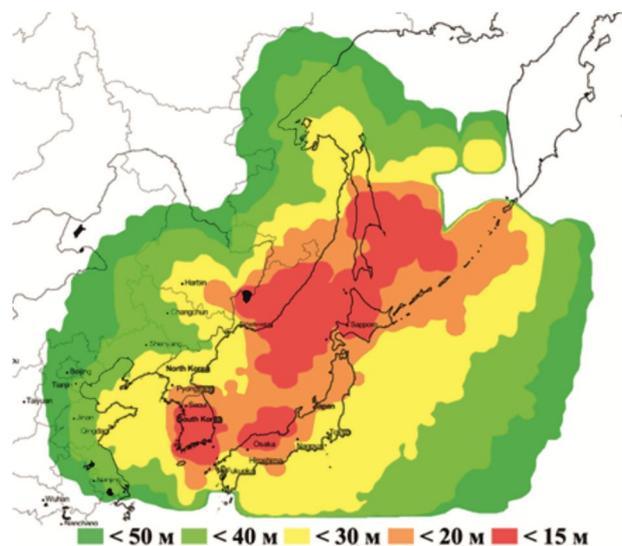


Рис. 5. Области покрытия цепочек GRI7950 и GRI9930 при использовании метода итеративного поиска позиции

Следует отметить, что полученные методом итеративного поиска позиции оценки координат могут быть улучшены путем фильтрации. Возможно применение алгоритма обработки навигационной информации с использованием различных методов и параметров фильтрации, основанных на характере движения объекта [12].

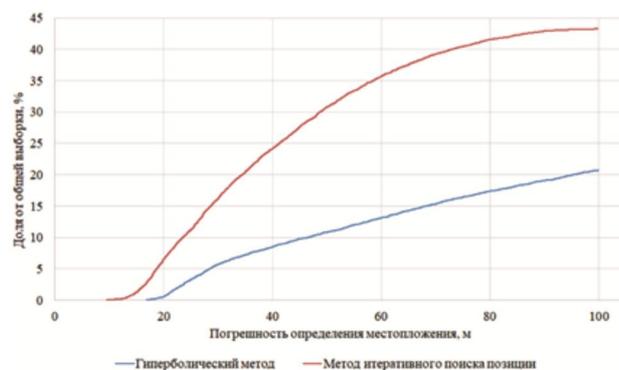


Рис. 6. Оценка эффективности применения методов

## Заключение

На основе разработанного итерационного алгоритма позиционирования произведено моделирование областей перекрывающихся зон покрытия радионавигационных цепочек разных стран. Результат сравнения алгоритма с гиперболическим методом позиционирования показал значительное увеличение рабочей зоны, обеспечивающей необходимую погрешность позиционирования.

Количественный анализ эффективности предложенного метода позволяет сделать вывод, что при использовании алгоритма итеративного поиска позиции размер зоны, в которой погрешность определения местоположения ниже 20 метров, приблизительно в 11 раз больше зоны, в которой такую же погрешность обеспечивает гиперболический метод. Для погрешности ниже 40 метров размер рабочей зоны увеличивается в 2,86 раза.

Для погрешности ниже 60 метров в 2,7 раза.

Алгоритм итеративного поиска позиции способен работать с сигналами от двух и более радионавигационных цепей. Использование результатов исследования позволит определять оптимальные места развертывания и форматы работы новых комбинированных радионавигационных систем.

### Литература

1. Offermans G., Bartlett S., Schue C. Providing a Resilient Timing and UTC Service Using eLoran in the United States: Resilient timing using eLoran. *Navigation – Journal of The Institute of Navigation*, June 2017. DOI:10.1002/na-vi.197.
2. Offermans G., Johannessen E., Bartlett S., Schue C., Grebnev A., Bransby M., Williams P., Hargreaves C. eLoran Initial Operational Capability in the United Kingdom – First Results. *Proceedings of the 2015 International Technical Meeting of The Institute of Navigation*, Dana Point, California, January 2015, pp. 27-39.
3. Son P., Rhee J. H., Seo J. Novel Multichain-Based Loran Positioning Algorithm for Resilient Navigation. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*. April 2018, vol. 54, no. 2, pp. 666-679. DOI: 10.1109/TAES.2017.2762438.
4. Son P. W., Park S. H., Seo K., Han Y., Seo J. Development of the Korean eLoran Testbed and Analysis of its Expected Positioning Accuracy. *19<sup>th</sup> IALA Conference*, 2018. URL: [https://rntfnd.org/wp-content/uploads/Korea-eLoran-2018.IALA\\_.pdf](https://rntfnd.org/wp-content/uploads/Korea-eLoran-2018.IALA_.pdf) (дата обращения: 28.09.2021).
5. Rhee J. H., Seo J. eLoran Signal Strength and Atmospheric Noise Simulation over Korea. *Journal of Positioning, Navigation and Timing*, vol. 2, no. 2, Oct. 2013, pp. 101-108. DOI:10.11003/JKGS.2013.2.2.101.
6. Bahr F.M., Abdelkawy E.E., Shedied S.A. e-Loran Navigation System for Egyptian Coasts & Maritime. *17<sup>th</sup> ASAT International Conference.*, Apr. 2017. DOI:10.21608/asat.2017.22478.
7. Hargreaves C. ASF Measurement and Processing Techniques, to allow Harbour Navigation at High Accuracy with eLoran. M.S. thesis, Navigation Tech, University of Nottingham, Nottingham, U.K., Sept. 2010.
8. Williams P., Last D. On Loran-C Time-Difference to Coordinate Converters. *University of Wales, Bangor, U.K.*, 2003.
9. Grunin A.P., Sai S.V., Zakirov B.P. All-in-View Time Difference Solution for eLoran. *2021 Wave Electronics and its Application in Information and Telecommunication Systems (WECONF)*, 2021, pp. 1-4. DOI: 10.1109/WECONF51603.2021.9470709.
10. Lo S., Leathem M., Offermans G., Gunther G.T., Peterson B., Johnson G., Enge P. Defining primary, secondary, additional secondary factors for RTCM minimum performance specifications. *Proceedings of 38<sup>th</sup> Annual Convention and Technical Symposium of the International Loran Association*, 2009, Portland, ME, USA.
11. Pyo-Woong S., Joon H.R., Jaehui H., Jiwon S. Universal Kriging for Loran ASF Map Generation. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, vol. 55, 2019, pp. 1828-1841. DOI:10.1109/TAES.2018.2876587.
12. Grunin A.P., Kalinov G.A., Bolokhovtsev A.V., Sai S.V. Method to improve accuracy of positioning object by eLoran system with applying standard Kalman filter. *Journal of Physics: Conference Series*, vol. 1015, 2018, pp. 032050-1–032050-7. DOI:10.1088/1742-6596/1015/3/032050.

### Уважаемые коллеги!

*Приглашаем Вас принять участие в формировании тематических выпусков журнала «Цифровая обработка сигналов» и размещению рекламы продукции (услуг) Вашей организации на его страницах. В случае положительного решения просим представить в редакцию журнала Ваши предложения по плановому размещению информационных материалов и макет рекламы продукции (услуг) с указанием желаемого её месторасположения: обложка (2-я, 3-я или 4-я стр.), цветная внутренняя полоса (объем полосы).*

Журнал «Цифровая обработка сигналов» издается с 1999 года. Выходит ежеквартально, тиражом 200 экз.

Научно-технический журнал «Цифровая обработка сигналов» включен в Перечень изданий, рекомендуемый ВАК РФ для публикации результатов научных исследований соискателями ученой степени доктора и кандидата технических наук в области радиотехники, связи, вычислительной техники, электроники, приборостроения, информационных технологий, информационно-измерительных и управляющих систем. Журнал «Цифровая обработка сигналов» включен в базу данных Web of Science – Russian Science Citation Index (287-я позиция)

#### Планируемые сроки издания отдельных номеров журнала:

- № 3 сентябрь 2022 г. Тематический выпуск: «Цифровая обработка изображений».
- № 4 декабрь 2022 г. Тематический выпуск: «ЦОС в радиотехнике и системах телекоммуникаций».
- № 1 март 2023 г. Тематический выпуск: «ЦОС в инфокоммуникационных системах».
- № 2 июль 2023 г. Тематический выпуск по материалам 25-й Международной научно-технической конференции «Цифровая обработка сигналов и ее применение-DSPA».

#### Ориентировочная стоимость рекламных услуг:

- 4-я (внешняя) страница цветной обложки – 25 тысяч рублей.
- 2-я и 3-я (внутренние) страницы цветной обложки – 15 тысяч рублей.
- 1\2 цветной внутренней полосы – 8 тысяч рублей.

Ждем Ваших предложений.

С наилучшими пожеланиями, зам. главного редактора

д.т.н., профессор Витязев Владимир Викторович, телефон 8-903-834-81-81.

Предложения прошу направлять по адресу: E-mail: [vityazev.v.v@rsreu.ru](mailto:vityazev.v.v@rsreu.ru) или [info@dspa.ru](mailto:info@dspa.ru)