

*Ключові слова: танкер-газовіз, природні та нафтові гази, безпека бункеровки, навколишнє середовище, портові господарства, купольна система, газонебезпечні зони, підготовка екіпажів.*

*In this article we consider the safe and trouble-free operation of LNG carriers, where the main action should be directed to the field of security environment, and energy-range gas tankers should not be out of control of ship's crew, port authorities, port services and sectors.*

*Keywords: LNG carriers, oil and natural gas, security bunkering, environment, portmanagement, dome system, gas hazardous areas, training of crews.*

УДК 621.396.98

**Баранов Г.Л., Цулая А.В., Шарко В.П.**

### **ТЕХНОЛОГИЯ ПОВЫШЕНИЯ БЕЗОПАСНОСТИ СУДОВОЖДЕНИЯ В СЛОЖНЫХ УСЛОВИЯХ ПРИЕМА СИГНАЛОВ ГЛОБАЛЬНЫХ НАВИГАЦИОННЫХ СПУТНИКОВЫХ СИСТЕМ**

*В работе рассмотрена и обоснована новая технология получения навигационных параметров, состоящая в определении координат места положения мобильного объекта по известным значениям фазовых характеристик электромагнитной волны сигналов, принимаемых от глобальных навигационных спутниковых систем GPS или ГЛОНАСС*

**Анализ современного состояния проблемы.** Активное использование в современном судовождении приборов спутниковой навигации требует постоянного внимания к повышению точности и надежности определения координат с помощью этой аппаратуры. Принципы спутниковой радионавигации для определения координат места положения объекта [1,2] реализованы в действующих глобальных навигационных спутниковых системах (ГНСС) GPS/NAVSTAR (США) [6], ГЛОНАСС (Россия) [7]. Они же применяются в разрабатываемых и вводимых в эксплуатацию в настоящее время ГНСС GALILEO (Европейский Союз) [5], BeiDou (COMPASS) (Китай) [8], IRNSS (Индия).

Эти принципы основаны на измерениях псевдодальностей между объектом, чьи навигационные параметры определяются (навигационный объект - НО), и навигационными спутниками (НС) ГНСС. Навигационные параметры, включая также интервал времени рассогласования системных часов ГНСС и часов НО определяют [1] на основе решения системы базовых уравнений вида

$$\hat{R}_i = \sqrt{(X - X_i)^2 + (Y - Y_i)^2 + (Z - Z_i)^2} + c\Delta T, i = 1, \dots, M, \quad (1)$$

где  $i$  – номер навигационного спутника;

$\hat{R}_i$  – псевдодальность между НО и  $i$ -м НС;

$X, Y, Z$  и  $X_i, Y_i, Z_i$  - координаты, соответственно, навигационного объекта и  $i$ -го НС в геоцентрической декартовой системе координат (см. рис.1);

$c$  – скорость света;

$\Delta T$  – время рассогласования системных часов ГНСС и часов навигационного объекта;

$M$  – количество НС, определяющих минимальное число уравнений в системе (1), необходимых и достаточных для определения величин  $X, Y, Z, \Delta T$ .

Очевидно, что при условии  $M \geq 4$ , то есть, при наличии как минимум четырёх НС, находящихся в области «видимости» навигационного объекта, существует возможность однозначного определения координат навигационного объекта и, при необходимости, находить их производные или пересчитывать в геодезические координаты для дальнейшего практического использования. Конфигурация действующих, вводимых в эксплуатацию и проектирующихся ГНСС выбрана таким образом, что в любой точке на поверхности земли обеспечивается условие прямой видимости как минимум четырёх НС. А в большинстве случаев количество видимых НС, действующих ГНСС, находится в диапазоне от пяти до восьми и более.

**Постановка задачи.** Общим, хорошо известным [1, 5–8] недостатком любой ГНСС является ряд ситуаций, когда сигнал от НС не может быть принят приёмником, или такой сигнал приходит со значительными задержками и искажениями.

Например, практически сложно или невозможно определить своё местоположение при движении внутри тоннеля, что приводит к таким ошибочным манёврам транспортного средства, как неправильный выбор выхода из тоннеля из нескольких возможных, или некорректные манёвры транспортного средства в городских условиях большого количества высотных зданий и других радионепрозрачных объектов.

Вследствие выбранного частотного диапазона ГНСС мощность сигнала может быть серьёзно ослаблена пассивными помехами. К ним можно отнести такие, как густая листва деревьев, плотные облака, крыши и стены зданий и т.д.

Полезный сигнал может также подавляться активными помехами, создаваемыми наземными радиостанциями, работающими на близких, одинаковых или побочных частотах. В некоторых ситуациях активные помехи могут быть и преднамеренными, создаваемыми в криминальных или военных целях.

Отдельным видом помех являются переотражения от наземных объектов, в результате чего, несмотря на то, что система уравнений (1) является полной, переменные величины определяются с большими ошибками.

Также следует учитывать, что при высотах более чем, например, 2000 км для системы ГЛОНАСС [1], радионавигационное поле становится дискретным в пространстве. Космические объекты, находящиеся на таких высотах, могут «видеть» только один или два НС.

Следовательно, координаты таких навигационных объектов будут определяться из системы уравнений (1) неоднозначно или же вообще не определяться. Учитывая изложенное выше, актуальной становится возможность определения координат местоположения НО при наличии в его «поле видимости» количества НС ГНСС меньше чем четыре. В работе предлагается обосновать, что существует принципиально новая возможность определения координат навигационного объекта в реальных условиях наличия одного и только одного НС в области видимости.

**Формулирование базовых условий.** Описываемый в работе подход базируется на использовании данных о фазовом фронте (ФФ) электромагнитной волны (ЭМВ) сигнала НС, принимаемого приёмной антенной системой мобильного объекта навигации. Рассмотрим рис. 1, на котором изображены:

- навигационный спутник с номером 1 и координатами  $X_1, Y_1, Z_1$  в декартовой глобальной геоцентрической системе координат;
- навигационный объект с координатами  $X, Y, Z$  в глобальной системе координат и также находящийся в начале координат условной декартовой системы координат, в которой НС имеет координаты  $X'_1, Y'_1, Z'_1$ .

Навигационный объект также является центром сферической системы координат, в которой НС имеет координаты  $\rho_1, \gamma'_1, \alpha'_1$ , при этом  $\rho_1 = R_1$ .

Для упрощения дальнейшего анализа рассмотрим частный случай совпадения направлений осей декартовой системы координат объекта навигации с направлениями соответствующих осей глобальной системы координат.

Будем считать, что НС излучает сигнал, имеющий пространственные и временные характеристики и принимающийся антенной системой навигационного объекта, состоящей из нескольких ненаправленных приёмных элементов.

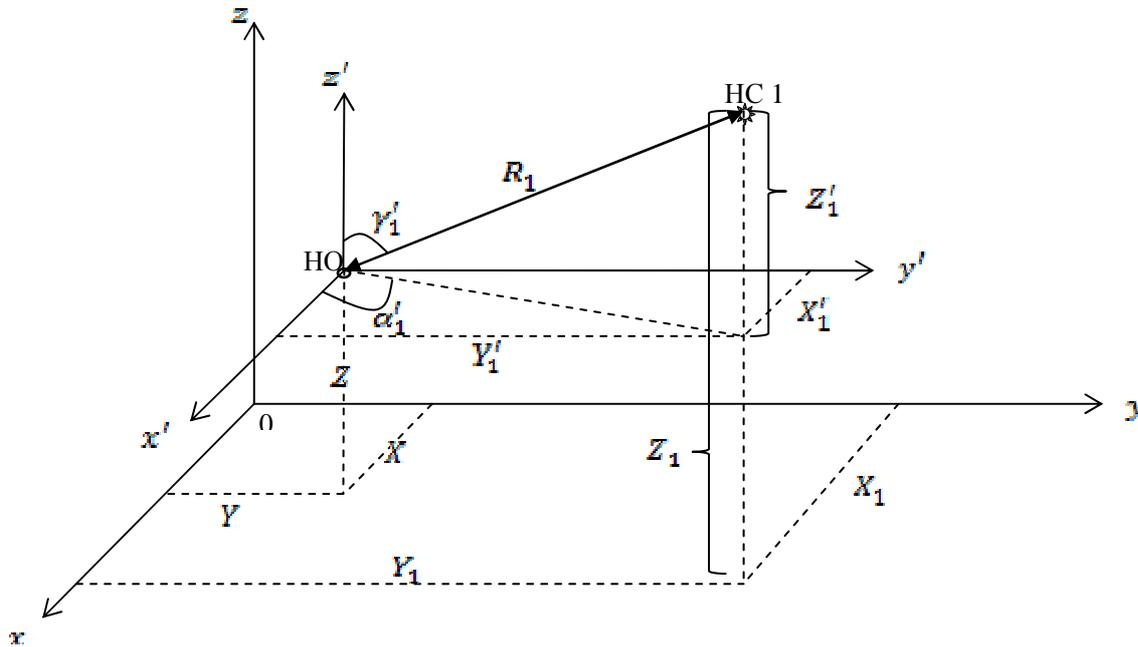


Рис. 1. Вариант взаимного размещения систем координат НО и НС1

Предположим также, что в приёмном тракте навигационного объекта присутствуют внутренние шумы, а какие-либо прочие источники пассивных или активных помех отсутствуют. Размер антенной системы примем таким, что интервал корреляции сигнала значительно превышает время задержки распространения сигнала между самыми крайними элементами антенной системы, что позволит разделить пространственную и временную обработку сигнала и проводить их в произвольном порядке [3].

Действительно, для системы ГЛОНАСС ширина спектра сигнала составляет величину, примерно равную  $\Delta f = 0,5 \text{ МГц}$ , а максимальное время задержки ЭМВ, распространяющейся по направлению к линии базы системы, при размере антенной системы  $L = 0,5 \text{ м}$  составит  $\Delta t = L/c = 1,7 \times 10^{-7} \text{ сек}$ , что значительно меньше интервала корреляции  $1/\Delta f = 2 \times 10^{-6}$ .

**Пространственная обработка.** Допустим также, что временная обработка сигнала НС произведена и такие параметры, как координаты НС в глобальной системе координат  $X_1, Y_1, Z_1$  получены и с требуемой точностью известны. Ниже в работе показано, что пространственная обработка при выполнении указанных выше условий в дискретной антенной системе будет заключаться в вычислении решающей функции вида [3]

$$Y(\mathbf{R}) = \mathbf{x}^T s(\mathbf{R}), \quad (2)$$

где  $\mathbf{x} = \mathbf{s}^{(1)}$  - комплексный вектор-столбец фазового распределения входного сигнала в приёмных каналах объекта навигации при наличии сигнала от одного НС, единичной мощности полезного сигнала и отсутствии или незначительном внутреннем шуме на выходе подсистемы оптимальной временной обработки,  $\mathbf{s}^{(1)}$  - комплексный вектор-столбец входного сигнала от 1-го НС (см. рис. 1), каждый элемент которого определяется как

$$s_i^{(1)} = e^{j\Delta\phi_i(\mathbf{R}_1)}. \quad (3)$$

Здесь и далее верхний индекс в скобках обозначает номер НС,  $\mathbf{R}_1$  - вектор координат НС в сферической системе координат, включающий в себя расстояние между объектом навигации

и НС -  $\rho_i$ , угол -  $\gamma_i$ , сопряженный углу места  $(\pi/2 - \gamma_i)$  азимут -  $\alpha_i$ ,  $\Delta\varphi_i(\cdot)$ - разность фаз между опорным (нулевым) и  $i$ -м приёмными антенными элементами,  $s(\mathbf{R})$  – комплексно-сопряжённый вектор-столбец опорного сигнала, каждый элемент которого имеет вид, аналогичный выражению (3) и в котором переменной является вектор  $\mathbf{R}(\rho, \gamma, \alpha)$  в сферической системе координат.

Рассмотрим локальную сферическую систему координат, в которой начало координат совмещено с условным 0-м приёмным элементом, каждый ненулевой элемент располагается в горизонтальной плоскости и характеризуется координатами  $O_i(\rho_i, \hat{\rho}_i, 0)$ , где  $\rho_i$  - расстояние от условного нулевого приёмного элемента до элемента с номером  $i$ ,  $\hat{\rho}_i = \alpha_0 + \theta_i'$  - угол между условным начальным направлением и направлением на  $i$ -й элемент (рис. 2).

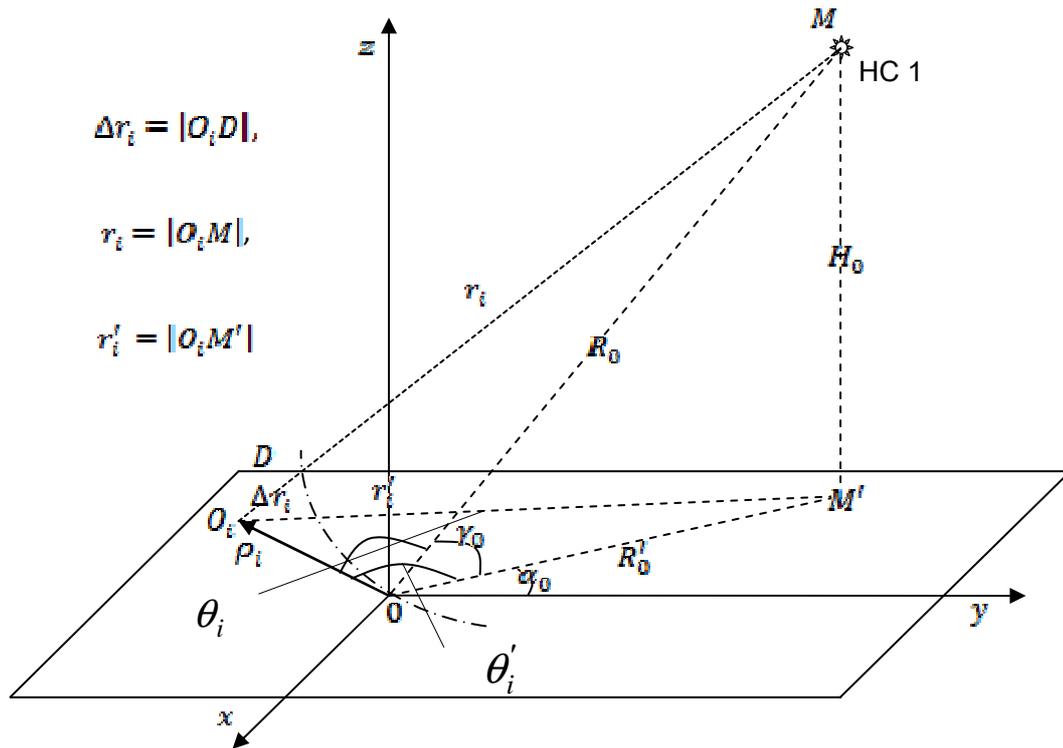


Рис. 2. Локальная сферическая система координат приёмной антенной системы

В этой системе координат любой НС имеет координаты  $M(R_0, \gamma_0, \alpha_0)$  и разность фаз  $\Delta\varphi_i(\cdot)$  между нулевым и  $i$ -м элементом определяется следующим образом

$$\Delta\varphi_i = \frac{2\pi}{\lambda} \Delta r_i, \tag{4}$$

где  $\lambda$  - длина волны принимаемого сигнала;

$\Delta r_i = R_0 - r_i$  - разность ходы ЭМВ между нулевым и  $i$ -м приёмными элементами.

Очевидно, что  $\Delta\varphi_i$  однозначно определяется тремя координатами НС, т.е.  $M(R_0, \gamma_0, \alpha_0)$ , и такая зависимость будет иметь различный вид в зависимости от типа аппроксимации волнового фронта. Действительно, из рис. 2 следует, что

$$r_i^2 = \rho_i^2 + R_0^2 - 2\rho_i R_0 \cos \theta_i, \quad (r_i')^2 = \rho_i^2 + (R_0')^2 - 2\rho_i R_0' \cos \theta_i'. \tag{5}$$

Так как  $r_i' = r_i \cos \gamma_i$  и  $R_0' = R_0 \cos \gamma_0$ , получаем

$$r_i^2 = \frac{\rho_i^2 + R_0^2 - 2\rho_i R_0 \cos \gamma_0 \cos \theta'_i}{\cos^2 \gamma_i}. \quad (6)$$

С другой стороны, так как  $r_i = \frac{H_0}{\sin \gamma_i}$  и  $H_0 = R_0 \sin \gamma_0$  и, следовательно,  $\sin \gamma_i = R_0 \frac{\sin \gamma_0}{r_i}$ , выражение для знаменателя (6) можно записать как  $\cos^2 \gamma_i = 1 - R_0^2 \frac{\sin^2 \gamma_0}{r_i^2}$ . Отсюда, подставляя полученное выражение в (6), получаем

$$r_i^2 = \rho_i^2 + R_0^2 - 2\rho_i \cos \gamma_0 \cos \theta'_i. \quad (7)$$

Таким образом, разность хода ЭМВ между нулевым и  $i$ -м приёмными элементами теперь может быть записана следующим образом

$$\begin{aligned} \Delta r_i = r_i - R_0 &= \sqrt{\rho_i^2 + R_0^2 - 2\rho_i R_0 \cos \gamma_0 \cos \theta'_i} - R_0 = \\ &= R_0 \sqrt{1 + \frac{\rho_i^2}{R_0^2} - 2 \frac{\rho_i}{R_0} \cos \gamma_0 \cos \theta'_i} - R_0. \end{aligned} \quad (8)$$

Используя частное разложением Маклорена вида

$$\sqrt{1+x} = 1 + \frac{x}{2} - \frac{x^2}{8} + \frac{x^3}{16} - \dots, \text{ при } |x| < 1, \quad (9)$$

получаем при ограничении количества слагаемых до второго порядка, что

$$\begin{aligned} \Delta r_i \approx R_0 \left( 1 + \frac{\rho_i^2}{2R_0^2} - \frac{\rho_i}{R_0} \cos \gamma_0 \cos \theta'_i - \frac{\rho_i^4}{8R_0^4} + \frac{\rho_i^3}{2R_0^3} \cos \gamma_0 \cos \theta'_i - \frac{\rho_i^2}{2R_0^2} \cos^2 \gamma_0 \cos^2 \theta'_i \right) \\ - R_0 = -\rho_i \cos \gamma_0 \cos \theta'_i + \frac{\rho_i^2}{2R_0} (1 - \cos^2 \gamma_0 \cos^2 \theta'_i) \end{aligned} \quad (10)$$

Таким образом, в выбранной системе координат при квадратичной аппроксимации волнового фронта можно записать выражение для разности фаз  $\Delta \varphi_i(\cdot)$  в виде

$$\begin{aligned} \Delta \varphi_i(R_0, \gamma_0, \alpha_0) &= \frac{2\pi}{\lambda} \left[ -\rho_i \cos \gamma_0 \cos(\hat{\rho}_i - \alpha_0) + \right. \\ &\quad \left. + \frac{\rho_i^2}{2R_0} (1 - \cos^2 \gamma_0 \cos^2(\hat{\rho}_i - \alpha_0)) \right] \end{aligned} \quad (11)$$

а при линейной аппроксимации

$$\Delta \varphi_i(R_0, \gamma_0, \alpha_0) = \frac{2\pi}{\lambda} [-\rho_i \cos \gamma_0 \cos(\hat{\rho}_i - \alpha_0)]. \quad (12)$$

Заметим, что разности фаз между приёмными элементами определяются также координатами приёмных элементов в плоскости их расположения, что следует учитывать при нахождении оптимальной конфигурации антенной системы по критерию, например, минимизации числа экстремумов решающей функции (2) в области изменения координат НС.

**Формулировка условий для определения координат НО.** Задача определения координат мобильного НО на основе использования решающей функции (2) состоит в определении таких значений угловых параметров вектора  $\mathbf{R}(\rho, \gamma, \alpha)$ , которые соответствуют максимуму функции (2). То есть, решается задача определения  $\gamma_1, \alpha_1$ , удовлетворяющих при  $\rho_1 = R_1$  равенству

$$\max_{\gamma, \alpha} Y(\mathbf{R}(\rho_1, \gamma', \alpha')) = Y(\mathbf{R}(\rho_1, \gamma'_1, \alpha'_1)). \quad (13)$$

Предположим, что конфигурация антенной системы подобрана таким образом, что (в соотношении с длиной волны сигнала НС) существует единственный максимум функции (2) в области изменяемых параметров вектора  $\mathbf{R}$ . И, следовательно, существует единственный набор сферических координат, при которых производная решающей функции (2) равна нулю, то есть

$$F(\rho_1, \gamma', \alpha')|_{\gamma'=\gamma'_1, \alpha'=\alpha'_1} = 0, \quad (14)$$

где  $F(\cdot)$  - производная функции  $Y(\mathbf{R})$  по изменяемым параметрам  $\gamma', \alpha'$  вектора  $\mathbf{R}$ .

Заметим, что при условии аппроксимации приходящей ЭМВ плоскостью, существует бесконечное количество значений  $R$ , при которых верно выражение (13).

Поэтому, пренебрегая сферичностью волнового фронта, и, измеряя только угловые координаты НС относительно объекта навигации в сферической системе координат, по известным выражениям преобразования сферических координат в декартовы координаты можем записать тождественные равенства

$$\begin{aligned} X'_1 &= \rho_1 \sin \gamma'_1 \cos \alpha'_1, \\ Y'_1 &= \rho_1 \sin \gamma'_1 \sin \alpha'_1, \\ Z'_1 &= \rho_1 \cos \gamma'_1. \end{aligned} \quad (15)$$

Условную декартову систему координат, связанную с объектом навигации, можно получить простым смещением глобальной системы координат

$$X = X_1 - X'_1; \quad Y = Y_1 - Y'_1; \quad Z = Z_1 - Z'_1. \quad (16)$$

Тогда, учитывая формулу для определения истинного расстояние между объектом навигации и навигационным спутником из (1), для одного НС без учёта возможного временного смещения между таймерами ГНСС и навигационного объекта, можем записать систему уравнений относительно искомых координат  $X, Y, Z$  объекта навигации в следующем виде

$$\begin{aligned} X &= X_1 - \rho_1 \sin \gamma'_1 \cos \alpha'_1, \\ Y &= Y_1 - \rho_1 \sin \gamma'_1 \sin \alpha'_1, \\ Z &= Z_1 - \rho_1 \cos \gamma'_1, \end{aligned} \quad (17)$$

$$\rho_1 = \sqrt{(X - X_1)^2 + (Y - Y_1)^2 + (Z - Z_1)^2}.$$

Здесь,  $\rho_1$  - искомое истинное расстояние между объектом навигации и «видимым» первым НС;  $X_1, Y_1, Z_1$  - известные координаты навигационного спутника, передаваемые в радиосигнале данного НС и извлекаемые в процессе временной обработки;  $\gamma'_1, \alpha'_1$ , - угловые сферические координаты НС относительно объекта навигации, определяемые в процессе оптимальной пространственной обработки, то есть, по решению задачи (13).

Система уравнений (17) является полной и позволяет определить координаты навигационного объекта в геоцентрической декартовой системе координат, используя сигнал одного единственного НС на основе учёта данных о волновом фронте его ЭМВ, а также производные указанных параметров для движущихся объектов навигации.

Заметим, что в случаях, когда учитывается сферичность волнового фронта, истинное расстояние между объектом навигации и НС непосредственно определяется из выражения (13), так как в этом случае экстремум данной функции соответствует единственному значению

дальности, поэтому система выражений (17) в этом случае упростится и выражение для  $R_1$  перестанет быть необходимым.

**Выводы.** Таким образом новая технология определения навигационных параметров судна только на основе данных о волновом фронте ЭМВ от одного НС позволяет существенно повысить безопасность судовождения в условиях неблагоприятной электромагнитной обстановки для приема дополнительных сигналов от еще не менее 3-х спутников ГНСС. Кроме того, проведенные исследования позволяют сделать следующие выводы:

1. Очевидно, что конкретный вид выражения (13) не позволит в явном виде получить искомые значения  $\gamma_1$  и  $\alpha_1$ , поэтому практический интерес будут представлять численные методы и оценки их эффективности, например, быстродействия, с точки зрения оптимальной реализации с помощью цифровой или аналоговой техники.

2. При проектировании средств реализации рассматриваемой системы пространственной обработки особое внимание важно уделить выбору такой конфигурации антенной решетки, которая обеспечивала бы единственный экстремум функции (2) в области изменяемого параметра  $R$ , или же минимально возможное их число. Большое число экстремумов приведёт к неоднозначному измерению угловых сферических координат и, следовательно, неэффективному функционированию системы пространственной обработки в целом.

3. Система уравнений (17) несущественно усложнится, если условная декартова и соответствующая сферическая системы координат навигационного объекта будут выбраны произвольно относительно начала координат глобальной геоцентрической декартовой системы координат.

В дальнейших исследованиях на наш взгляд необходимо будет учесть следующее:

1. Простой качественный анализ при рассмотрении выражения (2) в условиях наличия двух или трёх НС приводит к выводу, что экстремумы функции (2) при таком условии будут смещаться относительно истинных положений НС. Поэтому целесообразно будет рассмотреть и другие алгоритмы оптимальной или псевдооптимальной пространственной обработки, например алгоритмы сверхразрешения [4], которые могут позволить уменьшить величины таких систематических ошибок.

2. Наличие одного или более источников активных помех (АП) требует усложнения выражения (2) с целью учёта соответствующих помеховых сигналов и дальнейшего их вычитания в системе пространственной обработки. Это может привести к усложнению выражения (13) и, следовательно, целесообразно рассмотреть численные методы решения данного выражения, отличающихся от аналогичных для безпомеховой обстановки.

Очевидно также, что для указанных условий потребуются рассмотрение адаптивных алгоритмов и проведения анализа их эффективности с точки зрения критериев практической реализации.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Соловьёв Ю.А. Системы спутниковой навигации // – М.: Эко-Трендз, 2000. – 267 с.
2. Беляєвський Л.С. Глобальні супутникові системи навігації та зв'язку на транспорті / Беляєвський Л.С., Ткаченко А.М., Левковець П.Р., Топольськов Є.О., Сердюк А.А. // Навчальний посібник для ВУЗів транспортного профілю. – К.: В-во «ДажБог», 2009. – Іл., табл., бібліогр. – 216 с.
3. Кремер И.Я. Пространственно – временная обработка сигналов / Кремер А.И., Петров В.М. и др. // М.: Радио и связь, 1984. – 224 с.
4. Зотов С.А. Методы сверхразрешения в задачах радиопеленгации / С.А. Зотов, Е.С. Макаров, Ю.Б. Нечаев // Информационные процессы и технологии в обществе и экономике. – 2006. – №3. – С. 12-26.
5. Официальный веб сайт глобальной навигационной спутниковой системы Galileo <http://www.gsa.europa.eu/>
6. Официальный веб сайт системы NAVSTAR/GPS <http://www.navcen.uscg.gov/>
7. Бакитько Р.В. и др. ГЛОНАСС. Принципы построения и функционирования. – М.: Радиотехника, 2005. – 688 с.

8. Официальный веб-сайт спутниковой навигационной системы Бейдоу (Китай)  
<http://www.beidou.gov.cn/>.

**Баранов Г.Л., Цулая А.В., Шарко В.П.**

**ТЕХНОЛОГІЯ ПІДВИЩЕННЯ БЕЗПЕКИ СУДНОПЛАВСТВА В СКЛАДНИХ УМОВАХ ПРИЙОМУ СИГНАЛІВ ГЛОБАЛЬНИХ НАВІГАЦІЙНИХ СУПУТНИКОВИХ СИСТЕМ**

*У роботі розглянута та обґрунтована нова технологія отримання навігаційних параметрів, що полягає у визначенні координат місця знаходження мобільного об'єкту за відомими значеннями фазових характеристик електромагнітної хвилі сигналів, які приймаються від глобальних навігаційних супутникових систем GPS або ГЛОНАСС.*

***Ключові слова:** фазові характеристики, супутникова радіонавігація, навігаційний об'єкт, обробка сигналу, антенна система.*

**G.Varanov, A.Tsulaya, V.Sharko**

**A TECHNOLOGY FOR NAVIGATION SAFETY IMPROVEMENT PROVIDED THE COMPLICATED RADIOSIGNAL RECEIVING CONDITIONS IN THE GLOBAL POSITIONING SYSTEM**

*The new navigation technology for object coordinate determination based on the electromagnetic wave phase features received from navigation satellite systems like GPS or GLONASS is considered and substantiated in the article.*

***Keywords:** phase feature, satellite radio navigation, navigation object, navigation satellite, coordinate system, system of equations, spatial signal processing, antenna array.*

УДК 629.5.012.014

*Даник А. В.*

**ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЗАПАСА ПОПЕРЕЧНОЙ ДИНАМИЧЕСКОЙ ОСТОЙЧИВОСТИ СУДНА ПРИ ПЕРЕВОЗКЕ ЗЕРНА С ПОМОЩЬЮ ДИАГРАММЫ СТАТИЧЕСКОЙ ОСТОЙЧИВОСТИ РАЗЛИЧНЫМИ МЕТОДАМИ**

*Остойчивость судна при перевозке зерна регламентируется Международным кодексом по безопасной перевозке зерна насыпью, являющейся Главой VI часть «С» конвенции СОЛАС 1974. Суда, перевозящие зерновые грузы насыпью должны быть снабжены информацией об остойчивости судна при перевозке зерна. Суда, не имеющие такой информации, должны грузиться по требованиям Международным кодексом по безопасной перевозке зерна насыпью или правилам страны погрузки.*

***Ключевые слова:** запас остойчивости, статический угол крена от смещения, динамическая поперечная остойчивость, диаграмма, поперечное смещение зерна.*

Основные требования кодекса по безопасной перевозке зерна навалом к судам перевозящие зерно насыпью:

- метацентрическая высота на весь период рейса с поправками на влияние свободной поверхности жидкости в танках должна быть не менее чем 0,3 м;
- угол крена от смещения зерна не должен превышать 12°;