



УДК 629.05

© 2018 г. **А.С. Девятисильный**, д-р техн. наук,
А.В. Шурыгин

(Институт автоматизации и процессов управления ДВО РАН, Владивосток)

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОЦЕНОК КИНЕМАТИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ОТНОСИТЕЛЬНОГО И ПЕРЕНОСНОГО ДВИЖЕНИЙ МОРСКОГО ОБЪЕКТА

Статья посвящена проблеме разделимости относительного и переносного движений морского объекта по оценкам абсолютной линейной скорости, доставляемым бортовой навигационной системой, интерпретирующей результаты его позиционирования ГЛОНАСС. Представлены математические модели обратных задач, преобладающей целью решения которых являются оценки реального времени параметров скорости поверхностного морского течения, представляющего переносное движение. Задачи решаются методом наименьших квадратов в скользящем окне и вейвлет-обработкой оценок МНК. Приводятся результаты вычислительных экспериментов.

Ключевые слова: поверхностное морское течение, скорость, ускорение, ГЛОНАСС, относительное и переносное движение, метод наименьших квадратов, гибридные навигационные системы.

DOI: 10.22250/isu.2018.58.25-33

Введение

Предлагаемое исследование ориентировано на развитие методологии получения оценок параметров, характеризующих поверхностные морские течения как природные явления, мониторинг которых актуален в контексте прогнозирования географического облика Земли и обеспечения навигационной безопасности и целенаправленности разнообразной деятельности человека в море. По своим целям оно близко к тому, что может быть достигнуто и с помощью так называемых «дрифтерных технологий», нашедших широкое применение при изучении течений на шельфах [1]. Здесь уместно обратить внимание на то, что исследование, выполненное ранее и представленное в работе [2], в котором рассматривалось абсолютное по отношению к твердой Земле движение морского объекта, также до-

пускает «дрифтерную» интерпретацию, когда оценивается траектория «дрифтера», т.е. дрейфующего буя с подводным парусом. Отличительная же особенность настоящего исследования состоит в том, что в нем морское течение отождествляется с переносным (как части абсолютного) движением морского объекта и рассматривается, таким образом, в качестве навигационного фактора [3], меняющегося во времени и пространстве и требующего ответа о его свойствах «здесь и сейчас», т.е. оперативной оценки таких векторных параметров как скорость, ускорение, рывок и т.п.

Основные модельные представления

Учитывая, что на фоне начатой в [2] интерпретации результатов позиционирования подвижного объекта системой ГЛОНАСС/GPS в центре внимания в настоящей статье находится проблема оценки параметров морского течения, в качестве базовой координатной системы отсчета целесообразно принять эллипсоидальную систему с координатами (φ, λ, h) , комплементарную опорной модели Земли, отождествляемой с эллипсоидом Клеро с поверхностью, ортогональной направлению силы тяжести на спокойной водной поверхности Океана [4], здесь φ и λ – широта и долгота (от Гринвича) местоположения объекта; h – расстояние объекта по нормали от поверхности эллипсоида.

В точке O , отождествляемой с подвижным морским объектом, разместим начало правого прямоугольного координатного трехгранника $O\xi = O\xi_1\xi_2\xi_3$ с плоскостью $O\xi_1\xi_2$, касательной к поверхности эллипсоида с осями $O\xi_1$ и $O\xi_2$, ориентированных соответственно на географические Восток (E) и Север (N); ось $O\xi_3$, очевидно, ортогональна плоскости $O\xi_1\xi_2$.

Обозначим через $V = (V_1, V_2, V_3)^T$ вектор линейной скорости объекта относительно твердой Земли, отождествляя его с абсолютной скоростью. Вместе с этим через $\omega = (\omega_1, \omega_2, \omega_3)^T$ обозначим вектор угловой скорости вращения трехгранника $O\xi$, обусловленной движением объекта по поверхности эллипсоида. Оба вектора – V и ω – рассматриваются в проекциях на оси $O\xi$. Тогда

$$\omega_1 = -d\varphi/dt, \quad \omega_2 = \cos\varphi d\lambda/dt, \quad \omega_3 = \sin\varphi d\lambda/dt,$$

где $d\varphi/dt = V_2/r_2$; $d\lambda/dt = V_1/(r_1 \cos\varphi)$; r_1 и r_2 – радиусы кривизны двух взаимно перпендикулярных главных нормальных сечений поверхности $h = \text{const}$, проходящих через оси $O\xi_1$ (сечение, касательное к параллели) и $O\xi_2$ (меридиональное сечение), причем [4]:

$$r_1 = \frac{a(1-e^2)}{(1-e^2 \sin^2 \varphi)^{3/2}} + h, \quad r_2 = \frac{a}{(1-e^2 \sin^2 \varphi)^{1/2}} + h,$$

где a и e – значения большой полуоси и эксцентриситета эллипсоида. В рассматриваемом нами случае движения по водной поверхности можно принять $h = 0$ и

$dh/dt = V_3 = 0$. Таким образом, вектор V лежит в плоскости $O\xi_1\xi_2$, в общем случае образуя с осью $O\xi_2$ угол ψ – путевой угол движения объекта; здесь к месту заметим, что если провести нормальное сечение эллипсоида так, чтобы оно проходило через вектор V , то радиус кривизны r_ψ этого сечения в точке O определяется из формулы Эйлера [4]:

$$\frac{1}{r_\psi} = \rho_\psi = \rho_1 \sin^2 \psi + \rho_2 \cos^2 \psi,$$

где $\rho_i = 1/r_i$, $i=1,2$ – кривизна соответствующего сечения.

Обратимся к кинематике – «геометрии движения», как определил ее суть академик А.Ю. Ишлинский [5].

Учитывая, что $V_1 = |V|\sin\psi$, $V_2 = |V|\cos\psi$, $V_3 = 0$ и принимая во внимание изложенное выше, получаем $\omega_1 = -(|V|\cos\psi)/r_2$, $\omega_2 = (|V|\sin\psi)/r_1$, $\omega_3 = ((|V|\sin\psi)/r_1) \operatorname{tg}\varphi$. Углубляя теперь полученные представления о «геометрии движения» по поверхности эллипсоида, имеем

$$|\omega| = \sqrt{(\omega^T \omega)}, \text{ или } |\omega| = |V|q_1,$$

$$\text{где } q_1 = \left(\rho_1^2 \frac{\sin^2 \psi}{\cos^2 \varphi} + \rho_2^2 \cos^2 \psi \right)^{1/2}.$$

Продолжая далее, разложим вектор ω на два вектора, так что $\omega = \omega_{\parallel} + \omega_{\perp}$, где ω_{\parallel} – коллинеарен, а ω_{\perp} – ортогонален вектору V ; тогда

$$\omega^T V = \omega_{\parallel}^T V = -|V|^2 q_2, \quad |\omega_{\parallel}| = |\omega^T V|/|V| = |V|q_2, \quad |\omega_{\perp}| = \sqrt{(|\omega|^2 - |\omega_{\parallel}|^2)} = |V|q_3,$$

где $q_2 = (\rho_2 - \rho_1)\sin\psi \cos\psi$, $q_3 = (q_1^2 - q_2^2)^{1/2}$. Кроме этого, имеют место следующие соотношения: $\omega_1^2 + \omega_2^2 = |V|^2 q_4^2$, $\omega_1^2 + \omega_3^2 = |V|^2 q_5^2$; $\omega_2^2 + \omega_3^2 = |V|^2 q_6^2$ и $\omega_1 V_2 - \omega_2 V_1 = |V|^2 \rho_\psi$, где $q_4 = (\rho_1^2 \sin^2 \psi + \rho_2^2 \cos^2 \psi)^{1/2}$; $q_5 = (\rho_1^2 \sin^2 \psi \operatorname{tg}^2 \varphi + \rho_2^2 \cos^2 \psi)^{1/2}$; $q_6 = (\rho_1 \sin \psi)/(\cos \varphi)$; $q_\psi = \rho_1 \sin^2 \psi + \rho_2 \cos^2 \psi = \rho_\psi$.

Кортеж параметров $\{q_1, \dots, q_6\}$ или $\{1/R_1, \dots, 1/R_6\}$, где $R_{i,i} = (1, \dots, 6)$ – радиусы кривизны движения по поверхности эллипсоида, расширяет геометрический образ, связанный с моделью формы Земли и представленный при введении эллипсоидальной координатной системы и подвижного координатного трехгранника $O\zeta$ (для примера – в частном случае модели шарообразной Земли) имеем

$$q_1 = 1/r (\sin^2 \psi / \cos^2 \varphi + \cos^2 \psi)^{1/2}, \quad q_2 = 0, \quad q_3 = q_1.$$

Этот образ создается при планировании маршрутного задания и поддерживается при его выполнении, т.е. в процессе мониторинга и управления целенаправленным движением объекта.

Перейдем к математической модели решаемой здесь задачи и прежде всего отметим, что в работе [2], предшествующей настоящей, рассматривалась задача оценки параметров (местоположения, скорости, ускорения, рывка и т.д.) траектории объекта по данным его позиционирования ГЛОНАСС/GPS, т.е. задача по содержанию и методологии решения обратная траекторная, а по форме – «состоя-

ние – измерение» [6], где уравнения состояния описывают эволюцию кинематических элементов движения математической точки, отождествляемой с подвижным материальным объектом. По сути же, в обеих работах (и в настоящей, и в упомянутой [2]) существенно обращение к классической некорректной математической проблеме численной оценки производных по времени темпорально измеряемой функции времени.

Итак, полагая, что изложенное в [2] решение проблемы оценки абсолютной скорости (вектора V) состоялось, можно считать, что бортовая навигационная аппаратура потребителя (НАП) пополнилась абсолютным лагом (АЛ). При этом существенно, что вектор V оценивается в проекциях на оси географически ориентированного координатного трехгранника $O\xi$. Последнее обстоятельство существенно отличает такой лаг от традиционного (например, многолучевого) АЛ, измерения которого выполняются в приборном координатном трехграннике, ориентацию последнего относительно трехгранника $O\xi$ требуется решать дополнительно.

Согласно известным теоретико-механическим представлениям вектор $V = (V_1, V_2)^T$ абсолютной скорости движения объекта по поверхности морской среды складывается из двух векторов:

$$V = v + w, \tag{1}$$

где $v = (v_1, v_2)^T$ – относительная скорость, или скорость движения относительно среды; $w = (w_1, w_2)^T$ – переносная скорость, или скорость морского течения. В последнем случае, очевидно, требуется уточнить, что речь идет о поверхностном течении и надводных морских объектах, которые только и способны непосредственно принимать информационные сигналы от радионавигационных систем, каковыми являются системы ГЛОНАСС/GPS.

В плоскости $O\xi_1\xi_2$ рассмотрим эпюру скоростей с обозначенной на ней линией продольной симметрии (ЛПС) объекта и определим следующие углы (рис. 1): ψ – путевой угол; K – курсовой угол (курс); α – угол между векторами V

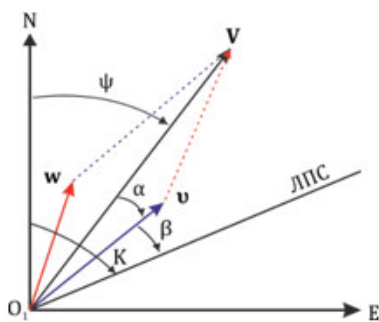


Рис. 1. Эпюра скоростей.

и v ; β – угол между вектором v и ЛПС. Все углы отсчитываются по ходу часовой стрелки так, что $K = \psi + \alpha + \beta$, причем K и ψ по традициям морской практики отсчитываются от направления на Север, т.е. вправо от оси $O\xi_2$; в отношении угла β необходимо сделать следующее уточнение: β – это, в общем случае, суммарный результат присутствия в измерениях курса инструментальной погрешности и действия на корпус объекта аэро- и гидродинамических сил, в том числе, например,

при циркуляции объекта, а также погрешности в оценке магнитного склонения.

С учетом изложенного рассмотрим две модели (М1 и М2) измерений спутникового АЛ, имеющие единый общий вид:

$$\mathbf{z} = \mathbf{H}\mathbf{x} + \boldsymbol{\varepsilon},$$

где $\mathbf{z} = (z_1, z_2)^T$; $z_1 = V_1 + \varepsilon$, $z_2 = V_2 + \varepsilon$; вектор $V = (V_1, V_2)^T$ и вектор погрешностей измерений $\boldsymbol{\varepsilon} = (\varepsilon_1, \varepsilon_2)^T$ представлены в проекциях на оси $O\xi_1$ и $O\xi_2$ трехгранника $O\xi$, а матрица \mathbf{H} и вектор \mathbf{x} семантически различимы, а именно:

в модели М1 – $\mathbf{x} = (x_1, x_2, x_3, x_4)^T = (v_1, v_2, w_1, w_2)^T$, $v_1 = |\mathbf{v}| \cos\alpha$, $v_2 = |\mathbf{v}| \sin\alpha$, $\mathbf{z} = (z_1, z_2)^T$,

$$\mathbf{H} = \begin{pmatrix} \sin\psi & \cos\psi & 1 & 0 \\ \cos\psi & -\sin\psi & 0 & 1 \end{pmatrix};$$

в модели М2 – $\mathbf{x} = (x_1, x_2, x_3, x_4)^T = (v_1, v_2, w_1, w_2)^T$, $v_1 = |\mathbf{v}| \cos\beta$, $v_2 = |\mathbf{v}| \sin\beta$, $\mathbf{z} = (z_1, z_2)^T$,

$$\mathbf{H} = \begin{pmatrix} \sin K & -\cos K & 1 & 0 \\ \cos K & \sin K & 0 & 1 \end{pmatrix}.$$

Если на борту объекта имеется относительный лаг (ОЛ) и, таким образом, доступны измерения компонент v_1 и v_2 вектора относительной скорости, то модель М2 может быть преобразована в еще одну модель – М2.2. Тогда вектор \mathbf{z} (соответственно и вектор $\boldsymbol{\varepsilon}$) расширяется за счет включения в него измерений $z_3 = v_1 + \varepsilon_3$ и $z_4 = v_2 + \varepsilon_4$, где ε_3 и ε_4 – инструментальные погрешности ОЛ. Соответствующий вид принимает и матрица

$$\mathbf{H} = \begin{pmatrix} \sin K & -\cos K & 1 & 0 \\ \cos K & \sin K & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \end{pmatrix}.$$

Очевидно, что информационный ресурс модели М2.2 существенно более значим, чем моделей М1 и М2. Несколько сокращая его, т.е. исключая измерение поперечной (v_2) компоненты относительной скорости, приходим к модели М2.1:

$$\mathbf{H} = \begin{pmatrix} \sin K & -\cos K & 1 & 0 \\ \cos K & \sin K & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}.$$

При актуальности предположения о малости угла β , апеллируя к моделям М2 и М2.1 как к исходным, можно в качестве оцениваемого рассматривать вектор $\mathbf{x} = (x_1, x_2, x_3)^T = (|\mathbf{v}|, w_1, w_2)^T$ и, таким образом, обратиться к моделям измерений М3 и М3.1 с соответствующими матрицами \mathbf{H} , а именно:

в модели М3

$$\mathbf{H} = \begin{pmatrix} \sin K & 1 & 0 \\ \cos K & 0 & 1 \end{pmatrix};$$

в модели М3.1

$$\mathbf{H} = \begin{pmatrix} \sin K & 1 & 0 \\ \cos K & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 0 \end{pmatrix};$$

измерения z_1, z_2, z_3 в таком случае будут содержать методологические погрешности, равные соответственно $-|\mathbf{v}|\beta\cos K, |\mathbf{v}|\beta\sin K, (|\mathbf{v}|\beta^2)2$.

Далее, рассматривая компоненту x_i ($i = (1, \dots, m)$, где $m = 4$ для моделей М1, М2, М2.2, М2.1 и $m = 3$ для моделей М3, М3.1), вектора \mathbf{x} как непрерывную функцию времени, в каждой точке которой существует n_i производных, последняя из которых – n_i -я равна нулю, можем представить эволюцию состояний каждой i -й переменной вектора \mathbf{x} следующим образом: $dx_{i,j}/dt = x_{i,j+1}$, $i = (1, \dots, m)$, $j = (1, \dots, n_i)$, $x_{i,1} = x_i$, $dx_{i,n_i}/dt = 0$, или в виде $\mathbf{X}_i = \mathbf{J}_i \mathbf{X}_i$, где вектор состояний $\mathbf{X}_i = (x_{i,1}, \dots, x_{i,n_i})^T$, а \mathbf{J}_i – жорданова клетка [7] размерности $(n_i \times n_i)$, т.е.

$$\mathbf{J}_i = \begin{pmatrix} 0 & 1 & 0 & \dots & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & \dots & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & \dots & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 \end{pmatrix}.$$

Полагая для определенности $n_i = 5 \forall i = (1, \dots, m)$, систему уравнений «состояние – измерение» запишем в следующем виде:

$$\frac{d\mathbf{X}}{dt} = \mathbf{J}\mathbf{X}, \quad (2)$$

$$\mathbf{z} = \mathbf{H}^s \mathbf{X} + \boldsymbol{\varepsilon};$$

где $\mathbf{X} = (\mathbf{X}_1^T, \dots, \mathbf{X}_m^T)^T$; $\dim \mathbf{X} = 5m$; $\mathbf{J} = \text{block-diag}(\mathbf{J}_1, \dots, \mathbf{J}_m)$ – жорданова матрица [7]; $\dim \mathbf{J} = 5m \times 5m$; $\mathbf{J}_i = \mathbf{J}_j \forall i, j = (1, \dots, m)$; \mathbf{H}^s – матрица, формируемая из матриц \mathbf{H} , соответствующих моделям измерений М1, М2, М2.2, М2.1, М3 и М3.1 с учетом размерности вектора \mathbf{X} .

Учитывая нильпотентность с индексом $q = n_i = 5$ жордановой клетки \mathbf{J}_i , (а, следовательно, и матрицы \mathbf{J}), достаточно просто перейти к дискретной форме уравнений (2):

$$\mathbf{X}_{k+1} = \boldsymbol{\Phi}^s(\tau) \mathbf{x}_k, \quad (3)$$

$$\mathbf{z}_{k+1} = \mathbf{H}_{k+1}^s \mathbf{X}_{k+1} + \boldsymbol{\varepsilon}_{k+1}, k = 0,$$

где $\boldsymbol{\Phi}^s(\tau) = \text{block-diag}(\boldsymbol{\Phi}, \dots, \boldsymbol{\Phi})$; $\boldsymbol{\Phi} = \boldsymbol{\Phi}_i = \boldsymbol{\Phi}_j = \exp(\mathbf{J}_1, \tau) = \mathbf{E} + \mathbf{J}_1 \tau + \frac{\mathbf{J}_1^2 \tau^2}{2} + \frac{\mathbf{J}_1^3 \tau^3}{3!} + \frac{\mathbf{J}_1^4 \tau^4}{4!}$;

$\tau = t_{k+1} - t_k = \text{const}$; \mathbf{E} – единичная матрица; $\dim \mathbf{E} = \dim \boldsymbol{\Phi} = 5 \times 5$, $\dim \boldsymbol{\Phi}^s = 5m \times 5m$.

Существенно отметить, что дискретная система (3) при $\boldsymbol{\varepsilon} = 0$ потенциально

абсолютно точно воспроизводит значения состояний и измерений, характерные для непрерывной системы (2) в момент времени $t_{k,k} = (0, 1, 2, \dots)$. Это означает, что нильпотентность матрицы \mathbf{J} (в данном случае – жордановой) обуславливает возможность перехода к дискретным системам вида (3) без методологических погрешностей.

Далее имена моделей измерений присвоены обратным задачам (ОЗ) вида (2), (3) для которых эти модели являются главным отличительным образующим фактором. Заметим также, что модель ОЗ М1, ориентированная на использование только одного вида информации – спутниковой, – может рассматриваться в качестве гипотетической модели автономной навигационной системы (АНС), остальные же модели – это модели гибридных (интегрированных) навигационных систем (ГНС), так как их структуры дополнительно предполагают измерения истинного курса (необходимый элемент системы) и бортовых измерений вектора относительной скорости \mathbf{v} . Переходя к способу динамического обращения, заметим, что в отличие от работы [2], где в качестве инструмента его реализации предлагался нейросетевой алгоритм калмановской фильтрации с механизмом настройки синаптических коэффициентов ядерного типа [8], здесь эта роль отведена методу наименьших квадратов (МНК) со скользящим окном и моделью линейной алгебраической задачи следующего вида:

$$\mathbf{Z}_{k+s} = \mathbf{H}_{k+p} \Phi^{1-p} \mathbf{X}_{k+p} + \boldsymbol{\varepsilon}_{k+p}; k = 1, 2, \dots; p = 1, \dots, S, S = \ln S^2;$$

$$\Phi^S = \text{block-diag}(\Phi, \dots, \Phi);$$

$$\Phi_{i,j}^{-1} = -\Phi_{i,j}, \text{ если } j = 2m,$$

$$\Phi_{i,j}^{-1} = \Phi_{i,j}, \text{ если } j = 2m - 2; i = 1, \dots, n; m = 1, \dots, n; n = \dim \mathbf{X}.$$

Так как МНК оценка содержит шумы, то для их подавления целесообразно задействовать технологию вейвлет-обработки реального времени.

Вычислительные эксперименты

Прежде всего отметим, что сам принцип представления абсолютного движения как суммы двух независимых движений – относительного и переносного, формализованный уравнением (1), указывает, что при любых адекватных физической реальности моделях эволюции \mathbf{v} и \mathbf{w} обратная задача М1 (как модель АНС) является математически некорректно поставленной и неразрешимой ввиду неполноты спутниковой информации, что верифицируется предложенными в [2] процедурами и при ее численном исследовании. По сути, это означает алгоритмическую неразделимость относительного и переносного движений. Вместе с тем не отменяется и возможность получения приближенных значений \mathbf{v} или \mathbf{w} в случаях, когда-либо $|\mathbf{v}| \gg |\mathbf{w}|$, либо $|\mathbf{w}| \gg |\mathbf{v}|$, о чем, например, свидетельствует и прак-

тика «дрифтерных технологий» [1].

Вычислительные эксперименты (представленные на рис. 2 – 7), выполненные с моделями М2, М2.1, М3 и М3.1, выявили, что они могут быть актуальны только в рамках гипотезы (как-то: $\beta = 0$, $w = \text{const}$, $|v| = \text{const}$), далеко не всегда совместимой с физической реальностью.

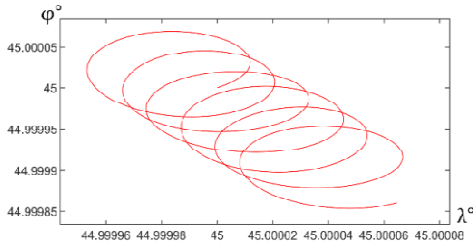


Рис. 2. Траектория движения объекта (λ° – широта, φ° – долгота).

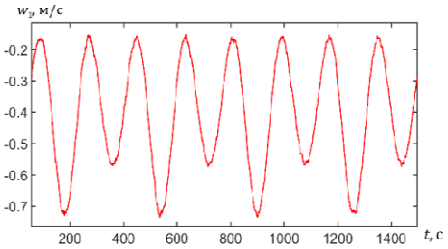


Рис. 3. АДО-оценка параметра w_1 ($\sigma_1 = 5 \times 10^{-3}$ м/с).

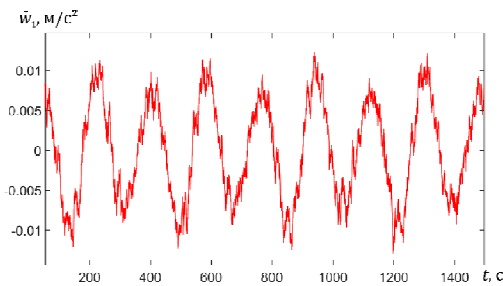


Рис. 4. АДО-оценка параметра dw_1/dt ($\sigma_2 = 2 \times 10^{-3}$ м/с²).

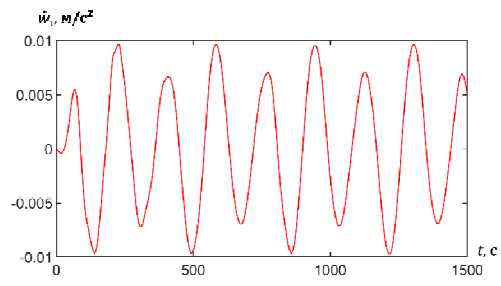


Рис. 5. Вейвлет-оценка параметра dw_1/dt ($\sigma_2^s = 2 \times 10^{-5}$ м/с²).

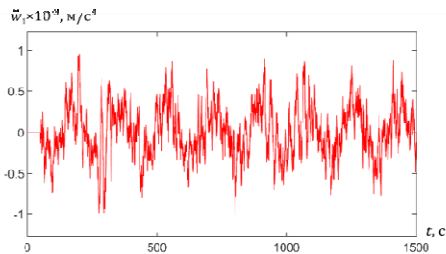


Рис. 6. АДО-оценка параметра d^2w_1/dt^2 ($\sigma_3 = 4 \times 10^{-4}$ м/с³).

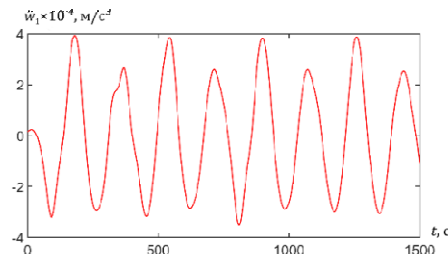


Рис. 7. Вейвлет-оценка параметра d^2w_1/dt^2 ($\sigma_3^s = 5 \times 10^{-7}$ м/с³).

Вместе с тем ГНС на базе модели М2.2 обладает достаточно высоким потенциалом эффективности, о чем свидетельствуют и результаты численного эксперимента, выполненного на данных измерений спутникового АЛ и бортового ОЛ с среднеквадратическими погрешностями (СКП), равными $\sigma_v = 0,03$ м [2, 10].

На рис. 2 представлена циркуляция объекта в условиях течения. Подобное движение объекта является неотъемлемой частью его ходовых испытаний, в ходе которых определяется важнейший параметр, зависящий от радиуса циркуляции – курсовой дрейф β , при установившейся циркуляции принимающий постоянное значение. В эксперименте положено, что $\beta = 3^\circ$. Оценка АДО выполнена с СКП $\sigma_\beta = 0,1^\circ$. На рис. 3 – 7 на примере восточных компонент представлены графики

оценок параметров течения (w_1 , d^2w_1/dt^2 , d^3w_1/dt^3) с указанием значений СКП σ (результат оценки АДО) и σ^s (результат онлайн вейвлет-оценки).

Заключение

В статье представлена методология аналитического и численного моделирования гибридных (интегрированных) навигационных систем, способных алгоритмически с высокой точностью разделять параметры относительного и переносного движения морского объекта, при отождествлении последнего с морским течением; выполнена серия вычислительных экспериментов с целью верификации возможностей каждой из систем. Исследование ориентировано на применение в задачах высокоточного управления морскими объектами.

ЛИТЕРАТУРА

1. Мысленков С.А., Зацепин А.Г., Сильвестрова К.П., Баранов В.И. Использование дрейфующих буев и буксируемого профилографа для исследования течений на шельфе Черного моря // Вестник Московского университета. Серия 5. "География". – 2014. – №6. – С.73-80.
2. Девятисильный А.С., Шурыгин А.В. Математические модели реконструкции параметров траекторий подвижных объектов для встраиваемых систем ГЛОНАСС // Информатика и системы управления. – 2018. – №1(55). – С. 42-50.
3. Крюков Н.Д., Шматков В.А. Учет течений, генерируемых ветром, при плавании судов. // Вестник государственного университета морского и речного флота им. адмирала С.О. Макарова. – 2015. – №3 (31). – С. 23-29
4. Андреев В.Д. Теория инерциальной навигации. Автономные системы. – М.: Наука, 1966.
5. Ишлинский А.Ю. Классическая механика и силы инерции. – М.: Едиториал УРСС, 2018.
6. Калман Р., Фалб Л., Арбиб М. Очерки по математической теории систем. – М.: Мир, 1971.
7. Хорн Р., Джонсон Ч. Матричный анализ. – М.: Мир, 1989.
8. Девятисильный А.С. Модель нейросетевой инерциально-спутниковой навигационной системы с функцией оценки градиента напряженности гравитационного поля Земли // Журнал технической науки. – 2016. – Т. 86, № 9. – С. 20-23.
9. Техническая документация [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://www.linkquest.com/html/NavQuest600M.pdf>. Дата обращения: 24.05.2018.

Статья представлена к публикации членом редколлегии А.Д. Плутенко.

E-mail:

Девятисильный Александр Сергеевич – devyatits@dvo.ru;

Шурыгин Артем Владимирович – artem.shurygin@bunjlabs.com