

А. С. Девятисильный, д-р техн. наук, проф., devyatis@iacp.dvo.ru,
А. В. Шурыгин, мл. науч. сотр., artem.shurygin@bunjlabs.com,
Институт автоматики и процессов управления ДВО РАН

Модели бортовой реконструкции параметров морского течения как навигационного фактора по данным ГЛОНАСС

Предлагается методология исследования поверхностных морских течений, рассматриваемых в качестве природных явлений, мониторинг которых актуален в контексте обеспечения безопасности и целенаправленности разнообразной деятельности человека на море. Особенность этой методологии, отличающая ее от других, состоит в том, что она отождествляет течение с переносным движением управляемого морского объекта, рассматривает его в качестве изменяющегося во времени и географическом пространстве навигационного фактора, требующего бортовой оперативной оценки текущего состояния. Представлены математические модели обратных траекторных задач вида "состояние — измерение", целью и главной составляющей решений которых является оценка вектора скорости морского течения, следующая за реконструкцией вектора абсолютной (относительно твердой Земли) скорости движения объекта по данным его позиционирования ГЛОНАСС; эти модели ассоциированы с моделью задачи оценки производных непрерывной функции времени по ее темпорально измеряемым значениям, имеющей жорданову форму матрицы с индексом нильпотентности, совпадающим с размерностью системы линейных дифференциальных уравнений состояния, что обуславливает дискретизацию задачи по времени без методологических погрешностей и реализацию вычислительных алгоритмов динамического обращения. Приведены результаты вычислительных экспериментов.

Ключевые слова: навигация, морские течения, кинематические параметры, относительное движение, переносное движение, морской объект, скорость, ускорение, обратная задача, алгоритм динамического обращения, ГЛОНАСС

Введение

В течение последних десятилетий повышенное внимание мировой общественности привлекают проблемы изменчивости состояния морей и океанов в связи с заметно меняющимся климатом на Земле. Актуальны прямые угрозы со стороны водной среды тем из государств, для которых граница между сушей и морем является реальностью; усложняется хозяйственная деятельность на шельфах и водных транспортных путях морей и океанов; повышается геополитическая активность государств в связи с появлением новых противоречий между ними, обусловленных природными факторами, нарушающими сложившиеся условия функционирования и взаимодействия их экономик и т. п.

Своевременные и удовлетворительные решения всей совокупности возникающих проблем возможны только при доступности достаточно полной и качественной информации о различных природных и техногенных процессах, влияющих на состояние морей и океанов. К сложным, темпоральным и информативным проявлениям этих процессов, непосредственно характеризующим динамику водной среды, относятся морские и океанические течения.

Предлагаемое здесь исследование ориентировано на развитие методологии получения

оценок параметров, характеризующих поверхностные морские течения; 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 допускает "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], изменяющегося 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 работе [2] интерпретации результатов позиционирования

ния 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]; φ и λ — широта и долгота (от Гринвича) местоположения объекта, а 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, и осями $O\xi_1$ и $O\xi_2$, ориентированными соответственно на географические Восток (E) и Север (N); ось $O\xi_3$, очевидно, ортогональна плоскости $O\xi_1\xi_2$.

Обозначим $\mathbf{V} = (V_1, V_2, V_3)^T$ вектор линейной скорости объекта относительно твердой Земли, отождествляя его с абсолютной скоростью. Вместе с этим $\boldsymbol{\omega} = (\omega_1, \omega_2, \omega_3)^T$ обозначим вектор угловой скорости вращения трехгранника $O\xi$, обусловленной движением объекта по поверхности эллипсоида. Оба вектора — $\mathbf{V}$ и $\boldsymbol{\omega}$ — рассматриваются в проекциях на оси $O\xi$. Тогда $\omega_1 = -\dot{\varphi}$, $\omega_2 = \dot{\lambda} \cos \varphi$, $\omega_3 = \dot{\lambda} \sin \varphi$, где $\dot{\varphi} = V_2/r_2$, $\dot{\lambda} = V_1/r_1 \cos \varphi$, 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]

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

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

где a и e — значения большой полуоси и эксцентриситета эллипсоида. В рассматриваемом нами случае движения по водной поверхности можно принять $h = 0$ и $\dot{h} = V_3 = 0$. Таким образом, вектор $\mathbf{V}$ 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 $\mathbf{V}$, то радиус кривизны r_ψ этого сечения

в точке O определяется из формулы Эйлера [4] следующим образом:

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

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 $V_1 = |\mathbf{V}| \sin \psi$, $V_2 = |\mathbf{V}| \cos \psi$, $V_3 = 0$ и принимая во внимание изложенное выше, получаем $\omega_1 = -|\mathbf{V}| \cos \psi / r_2$, $\omega_2 = |\mathbf{V}| \sin \psi / r_1$, $\omega_3 = (|\mathbf{V}| \sin \psi / r_1) \tan \varphi$. Углубляя теперь полученные представления о "геометрии движения" по поверхности эллипсоида, имеем $|\boldsymbol{\omega}| = \sqrt{\boldsymbol{\omega}^T \boldsymbol{\omega}}$, или $|\boldsymbol{\omega}| = |\mathbf{V}| q_1$, 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 $\boldsymbol{\omega}$ на два вектора, так что $\boldsymbol{\omega} = \boldsymbol{\omega}_\parallel + \boldsymbol{\omega}_\perp$, где $\boldsymbol{\omega}_\parallel$ коллинеарен, а $\boldsymbol{\omega}_\perp$ — ортогонален вектору $\mathbf{V}$; тогда

$$\boldsymbol{\omega}^T \mathbf{V} = \boldsymbol{\omega}_\parallel^T \mathbf{V} = -|\mathbf{V}|^2 q_2; \quad |\boldsymbol{\omega}_\parallel| = \frac{|\boldsymbol{\omega}^T \mathbf{V}|}{|\mathbf{V}|} = |\mathbf{V}| q_2;$$

$$|\boldsymbol{\omega}_\perp| = \sqrt{|\boldsymbol{\omega}|^2 - |\boldsymbol{\omega}_\parallel|^2} = |\mathbf{V}| q_3,$$

где $q_2 = (\rho_2 - \rho_1) \sin \psi \cos \psi$, $q_3 = (q_1^2 - q_2^2)^{1/2}$. Кроме того, имеют место следующие соотношения:

$$\omega_1^2 + \omega_2^2 = |\mathbf{V}|^2 q_4^2; \quad \omega_1^2 + \omega_3^2 = |\mathbf{V}|^2 q_5^2;$$

$$\omega_2^2 + \omega_3^2 = |\mathbf{V}|^2 q_6^2 \quad \text{и} \quad \omega_1 V_2 - \omega_2 V_1 = |\mathbf{V}|^2 \rho_\psi,$$

где $q_4 = (\rho_1^2 \sin^2 \psi + \rho_2^2 \cos^2 \psi)^{1/2}$;

$q_5 = (\rho_1^2 \sin^2 \psi \tan^2 \varphi + \rho_2^2 \cos^2 \psi)^{1/2}$; $q_6 = \frac{\rho_1 \sin \psi}{\cos \varphi}$ и $q_\psi = \rho_1 \sin^2 \psi + \rho_2 \cos^2 \psi = \rho_\psi$ (уже приводимая выше формула Эйлера).

Кортеж параметров $\{q_1, \dots, q_6\}$ или $\left\{ \frac{1}{R_1}, \dots, \frac{1}{R_6} \right\}$, где R_i , $i = \overline{1, 6}$, — радиусы кривизны движения по поверхности эллипсоида, расширяют геометрический образ, связанный с моделью формы Земли и представленный при введении эллипсоидальной координатной системы и подвижного координатного трехгранника $O\xi$ (для примера — в частном случае модели шарообразной

Земли имеем $q_1 = \frac{1}{r} \left(\frac{\sin^2 \psi}{\cos^2 \varphi} + \cos^2 \psi \right)^{1/2}$, $q_2 = 0$, $q_3 = q_1$. 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 — "состояние — 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 работе [2] решение проблемы оценки абсолютной скорости (вектора $\mathbf{V}$) состоялось, можно полагать, что бортовая навигационная аппаратура потребителя (НАП) пополнилась абсолютным лагом (АЛ). При этом существенно, что вектор $\mathbf{V}$ 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 которого относительно трехгранника $O\xi$ требуется еще решать дополнительно.

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

$$\mathbf{V} = \mathbf{v} + \mathbf{w}, \quad (1)$$

где $\mathbf{v} = (v_1, v_2)^T$ — относительная скорость, или скорость движения относительно среды; $\mathbf{w} = (w_1, w_2)^T$ — переносная скорость, или скорость морского течения. В последнем случае, очевидно, требуется уточнить, что речь идет о поверхностном течении и надводных мор-

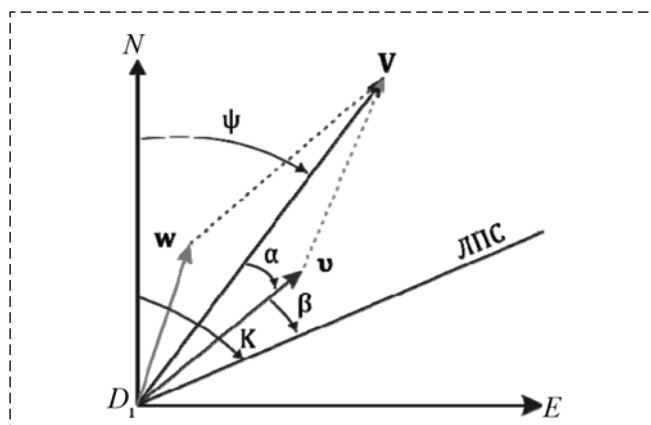


Рис. 1. Эпюра скоростей

ских объектах, которые только и способны непосредственно принимать информационные сигналы от радионавигационных систем, каковыми и 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 $\mathbf{V}$ и $\mathbf{v}$; β — угол между вектором $\mathbf{v}$ 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 $\mathbf{V} = (V_1, V_2)^T$ 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 компоненты 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 $\mathbf{H}$:

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

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 вектора $\mathbf{x}$ ($i = \overline{1, m}$, где $m = 4$ для моделей М1, М2, М2.2, М2.1 и $m = 3$ для моделей М3, М3.1) 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 компоненты вектора $\mathbf{x}$ следующим образом: $\dot{x}_{i,j} = x_{i,j+1}$, $i = \overline{1, m}$, $j = \overline{1, n_i}$, $x_{i,1} = x_i$, $\dot{x}_{i,n_i} = 0$, или в виде $\dot{\mathbf{X}}_i = \mathbf{J}_i \mathbf{X}_i$, 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 $n_i = 5 \forall i = \overline{1, m}$, систему уравнений "состояние — измерение" запишем в следующем виде:

$$\begin{aligned} \dot{\mathbf{X}} &= \mathbf{J}\mathbf{X}, \\ \mathbf{z} &= \tilde{\mathbf{H}}\mathbf{X} + \boldsymbol{\varepsilon}, \end{aligned} \quad (2)$$

где $\mathbf{X} = (\mathbf{X}_1^T, \dots, \mathbf{X}_m^T)^T$, $\dim \mathbf{X} = 5m$; $\mathbf{J} = \text{block} - \text{diag}(\mathbf{J}_1, \dots, \mathbf{J}_m)$ — жорданова матрица [7], $\dim \mathbf{J} = 5m \times 5m$; $\mathbf{J}_i = \mathbf{J}_j \forall i, j = \overline{1, m}$; $\tilde{\mathbf{H}}$ — 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), а именно:

$$\begin{aligned} \mathbf{X}_{k+1} &= \tilde{\Phi}(\tau) \mathbf{X}_k; \\ \mathbf{z}_{k+1} &= \tilde{\mathbf{H}}_{k+1} \mathbf{X}_{k+1} + \boldsymbol{\varepsilon}_{k+1}, k = 0, 1, \dots, \end{aligned} \quad (3)$$

где $\tilde{\Phi}(\tau) = \text{block} - \text{diag}(\Phi, \dots, \Phi)$, $\Phi = \Phi_i = \Phi_j = \exp(\mathbf{J}_i \tau) = \mathbf{E} + \mathbf{J}_i \tau + \frac{\mathbf{J}_i^2 \tau^2}{2} + \frac{\mathbf{J}_i^3 \tau^3}{3!} + \frac{\mathbf{J}_i^4 \tau^4}{4!}$; $\tau = t_{k+1} - t_k = \text{const}$, $\mathbf{E}$ — единичная матрица, $\dim \mathbf{E} = \dim \Phi = 5 \times 5$, $\dim \tilde{\Phi} = 5m \times 5m$.

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 теперь к алгоритму динамического обращения (АДО), примем его нейросетевую модель следующего вида:

$$\mathbf{Y}_{k+1} = \mathbf{C}_k \mathbf{Y}_k + \mathbf{K}_k \mathbf{z}_{k+1};$$

$$\mathbf{Y}(0) = \mathbf{Y}_0,$$

где $\mathbf{Y}_k$ — оценка вектора $\mathbf{X}_k$; $\mathbf{C}_k = \Phi_k - \mathbf{K}_k \mathbf{H}$; $\mathbf{K}_k$ — матрица (вектор) синаптических коэффициентов, настраиваемых так, чтобы достигался минимум формируемого с учетом образа траектории и измерений квадратического критерия $\mathcal{F}$ при обращении к механизму настройки ядерного типа [8], базирующегося на калмановской модели фильтрации [9], а именно:

$$\mathbf{K}_{k+1} = \tilde{\mathbf{P}}_{k+1} \tilde{\mathbf{H}}_{k+1}^T [\tilde{\mathbf{H}}_{k+1} \tilde{\mathbf{P}}_{k+1} \tilde{\mathbf{H}}_{k+1}^T + \Sigma_{k+1}]^{-1};$$

$$\tilde{\mathbf{P}}_{k+1} = \tilde{\Phi}_k \mathbf{P}_k \tilde{\Phi}_k^T + \mathbf{Q}^*;$$

$$\mathbf{P}_{k+1} = [\mathbf{E}_{20} - \mathbf{K}_{k+1} \tilde{\mathbf{H}}_{k+1}] \tilde{\mathbf{P}}_{k+1};$$

$$\mathbf{P}(0) = \mathbf{P}_0,$$

где $\mathbf{E}_{20}$ — единичная матрица; $(\mathbf{P}_k, \tilde{\mathbf{P}}_k)$ — матрицы, отождествляемые с дисперсионными (но, строго говоря, не являющиеся таковыми); Σ_k — положительно определенная матрица, отождествляемая с известной интенсивностью шумов измерения; $\mathbf{Q}_{k+1}^* = \arg \min_{\mathbf{Q}} \mathcal{F}_{k+1}$; $\mathbf{Q}$ — положительная диагональная матрица.

Так как вектор $\mathbf{Y}_k$ с неизбежностью содержит шумовую компоненту $\sigma \mathbf{Y}_k$, для ее подавления задействована процедура вейвлет-обработки реального времени, сопутствующая работе АДО.

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 работе [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 практика "дрифтерных технологий" [1].

Вычислительные эксперименты, выполненные с моделями М2, М2.1, М3 и М3.1, выявили, что они могут быть актуальны только в рамках гипотезы (как-то: $\beta = 0$, $\mathbf{w} = \text{const}$, $|\mathbf{v}| = \text{const}$), далеко не всегда совместимой с физической реальностью. Вместе с тем ГНС на базе модели М2.2 обладает достаточно высоким потенциалом эффективности, о чем свидетельствуют и результаты численного эксперимента (представленные на рис. 2—7), выполненного на данных измерений спутникового АЛ и бортового ОЛ со 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

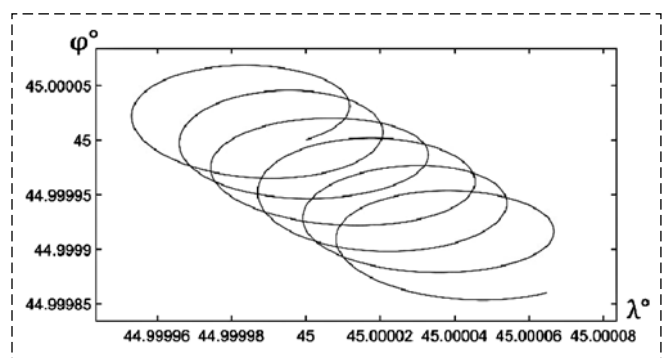


Рис. 2. Траектория движения объекта (λ° — широта, ϕ° — долгота)

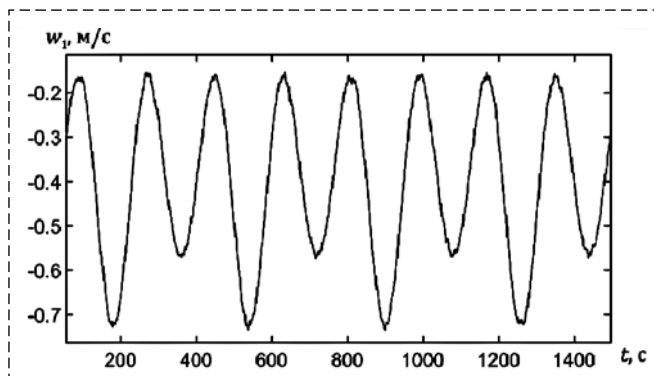


Рис. 3. АДО-оценка параметра w_1 ($\sigma_{w_1} = 5 \cdot 10^{-3}$ м/с)

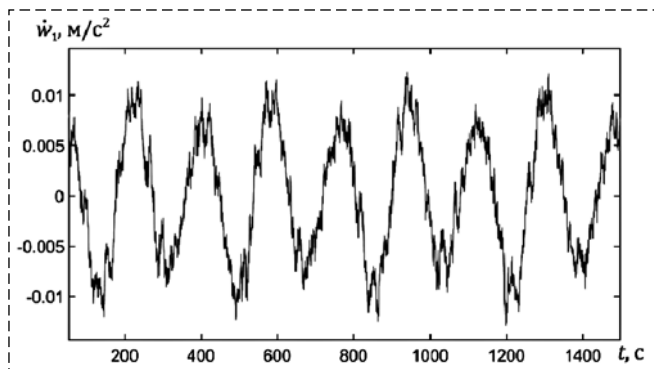


Рис. 4. АДО-оценка параметра $\dot{w}_1$ ($\sigma_{\dot{w}_1} = 2 \cdot 10^{-3}$ м/с²)

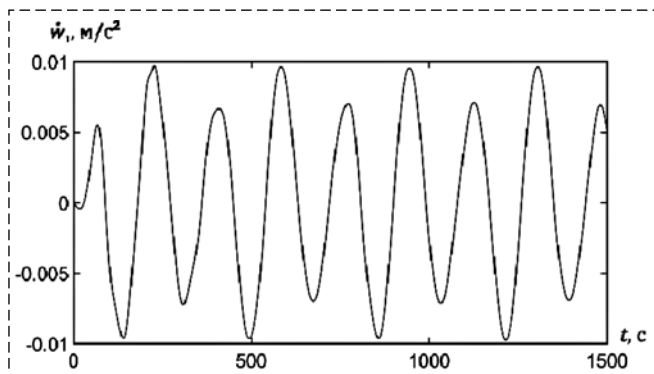


Рис. 5. Вейвлет-оценка параметра $\dot{w}_1$ ($\tilde{\sigma}_{\dot{w}_1} = 2 \cdot 10^{-5}$ м/с²)

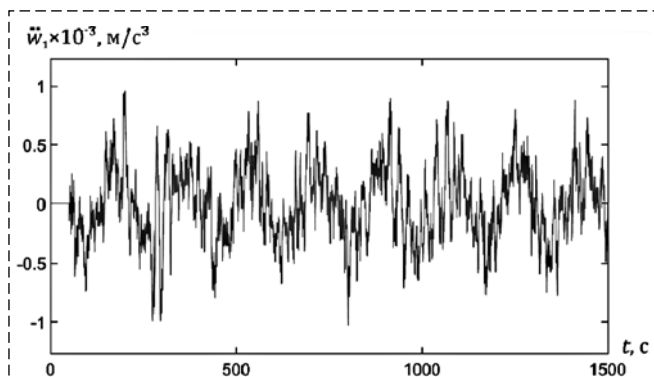


Рис. 6. АДО-оценка параметра $\ddot{w}_1$ ($\sigma_{\ddot{w}_1} = 4 \cdot 10^{-4}$ м/с³)

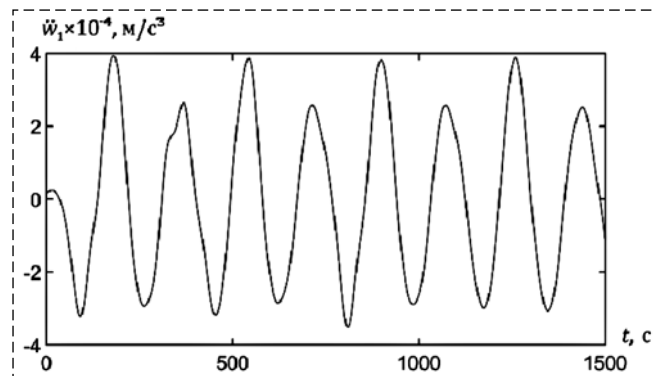


Рис. 7. Вейвлет-оценка параметра $\ddot{w}_1$ ($\tilde{\sigma}_{\ddot{w}_1} = 5 \cdot 10^{-7}$ м/с³)

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 ($w_1, \dot{w}_1, \ddot{w}_1$) с указанием значений СКП σ (результат оценки АДО) и $\tilde{\sigma}$ (результат онлайн вейвлет-оценки).

Заключение

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

Список литературы

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. Сер. 5. География. 2014. № 6. С. 73—80.
2. Девятисильный А. С., Шурыгин А. В., Стоценко А. К. Аналитическое конструирование и численное исследование моделей определения движения на данных ГЛОНАСС // Мехатроника, автоматизация, управление. 2017. № 11, Т. 18. С. 782—787.
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. 580 с.
5. Ишлинский А. Ю. Классическая механика и силы инерции. М.: Едиториал УРСС, 2018. 320 с.
6. Калман Р., Фалб Л., Арbib М. Очерки по математической теории систем. М.: Мир, 1971. 400 с.
7. Хорн Р., Джонсон Ч. Матричный анализ. М.: Мир, 1989. 656 с.

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. Медич Дж. Статистические оптимальные линейные оценки и управление. М.: Энергия, 1972. С. 440.
10. Техническая документация. URL: <http://www.link-quest.com/html/NavQuest600M.pdf>. Дата обращения: 24.05.2018.

Models of Onboard Reconstruction of Sea Current Parameters as a Navigation Factor According to GLONASS Data

A. S. Devyatisilny, devyatis@iacp.dvo.ru, A. V. Shurygin, ashurygin@iacp.dvo.ru
Institute of Automation and Control Processes, Far Eastern Branch of RAS,
Vladivostok, 690041, Russian Federation

Corresponding author: Devyatisilny Aleksandr S., Ph. D., Professor,
Head of the Navigation and Control Department, Institute of Automation and Control Processes,
Far eastern Branch of RAS, Vladivostok, 690041, Russian Federation, e-mail: devyatis@iacp.dvo.ru

Accepted on June 08, 2018

A methodology is proposed for investigating surface sea currents that considered as natural phenomena. Monitoring of sea currents is relevant in the context of ensuring the safety and purposefulness of a variety of human activities at the sea. The peculiarity of this methodology, which distinguishes it from others, is that it identifies the current with the portable movement of a controlled marine object. It considered as a navigational factor that changes in time and geographical space and requires an on-board operational assessment of the current state. Mathematical models of inverse trajectory problems of the "state — measurement" form are presented, the aim and main component of the solutions is the velocity vector estimation of the sea current, following the reconstruction of the object absolute velocity (relatively to solid Earth) according to its GLONASS positioning data. These models are associated with the model of the estimating the derivatives problem of a continuous time function from its temporally measurable values having the Jordan form of a matrix with a nilpotency index that coincides with the dimension of the system of linear differential equations of state, which causes the discretization of the problem in time without methodological errors and the implementation of computational algorithms for dynamic circulation. The results of computational experiments are presented.

Keywords: navigation, sea currents, kinematic parameters, relative motion, portable motion, marine object, speed, acceleration, inverse problem, dynamic handling algorithm, GLONASS

For citation:

Devyatisilny A. S., Shurygin A. V. Models of Onboard Reconstruction of Sea Current Parameters as a Navigation Factor According to GLONASS Data, *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2018, vol. 19, no. 9, pp. 601–607.

DOI: 10.17587/mau.19.601-607

References

1. Myslenkov S. A., Zatsepin A. G., Silvestrov K. P., Baranov V. I. *Ispol'zovanie dreyfuyushchih buev i buksiruemogo profilografa dlya issledovaniya techenij na shel'fe chernogo morya* (The use of drifting buoys and a towed profiler to study currents on the Black Sea shelf), *Bulletin of Moscow University. Series 5. Geography*, 2014, no. 6, pp. 73–80 (in Russian).
2. Devyatisilny A. S., Shurygin A. V., Stotsenko A. K. *Analiticheskoe konstruirovaniye i chislennoye issledovanie modelej opredeleniya dvizheniya na dannyh GLONASS* (Analytical design and numerical study of models of motion determination on GLONASS data), *Mekhatronika, avtomatizatsia, upravlenie*, 2017, vol. 18, no. 11, pp. 782–787 (in Russian).
3. Kryukov N. D., Shmatkov V. A. *Uchyot techenij, generiruemym vetrom, pri plavanii sudov* (The accounting of the currents

generated by a wind, at navigation of courts), *Bulletin of the State University of Marine and River Fleet them Admiral S. O. Makarov*, 2015, vol. 18, no. 3, pp. 23–29 (in Russian).

4. Андреев В. Д. *Teoriya inercial'noj navigacii* (The theory of inertial navigation), *Autonomous Systems*, Moscow, Nauka, 1966, p. 580 (in Russian).
5. Ishlinsky A. Yu. *Klassicheskaya mekhanika i sily inercii* (Classical mechanics and inertia forces), Moscow, Editorial URSS, 2018, p. 320 (in Russian).
6. Kalman R., Falb L., Arbib M. *Ocherki po matematicheskoy teorii sistem* (Essays on the mathematical theory of systems), Moscow, Mir, 1971, p. 400 (in Russian).
7. Horn R., Johnson C. *Matrichnyy analiz* (Matrix analysis), Moscow, Mir, 1989, p. 656 (in Russian).
8. Devyatisilny A. S. *Model' nejrosetevoj inercial'no-sputnikovoj navigacionnoj sistemy s funkciej ocenki gradienta napryazhennosti gravitacionnogo polya Zemli* (Model of the neural network inertial-satellite navigation system with the function of estimating the gradient of the Earth's gravitational field strength), *Zhurnal Tekhnicheskoy Nauki*, 2016, vol. 86, no. 9, pp. 20–23 (in Russian).
9. Medich J. *Statisticheskie optimal'nye linejnye ocenki i upravlenie* (Statistical optimal linear estimates and control), Moscow, EHnergia, 1972, p. 440 (in Russian).
10. **Technical specification.** <http://www.link-quest.com/html/NavQuest600M.pdf>.