

А. Е. ПЕЛЕВИН

ИДЕНТИФИКАЦИЯ ПАРАМЕТРОВ МОДЕЛИ ДВИЖЕНИЯ НАДВОДНОГО МОРСКОГО ОБЪЕКТА В УСЛОВИЯХ ВОЗМУЩЕНИЙ

Предложен подход, позволяющий определить параметры модели движения надводного морского объекта в условиях воздействия на него внешних возмущений с использованием измерений курса, скорости рыскания, скорости относительно воды и данных спутниковой навигационной системы (СНС). Структура модели задается в пространстве состояний.

Задействуется критерий близости реакций на заданное управление реального объекта и модели его движения при одних и тех же внешних возмущениях. Предлагается применить фильтр Калмана, в вектор состояния которого включено описание возмущений, и итерационную процедуру оценки параметров при минимизации критерия. Показано, что в этом случае обеспечивается устойчивость идентификации параметров модели при различных внешних возмущениях. Приводятся результаты моделирования, позволяющие оценить качество этой идентификации. Подход опробован в ходе натурных испытаний высокоскоростного катера.

Ключевые слова: идентификация параметров, модель объекта, пространство состояния, внешние возмущения, фильтр Калмана, итерационная процедура.

Введение

При решении задачи управления движением надводного морского объекта (далее – судна) современные технологии предполагают включение математической модели его движения в состав программного обеспечения навигационно-управляющей системы (НУС). Кроме того, такая модель необходима при неинвариантном оценивании параметров движения объекта (включение ее модели в фильтр как дополнительных компонент вектора состояния), для прогнозирования траекторий безопасного расхождения судна с наблюдаемыми подвижными и неподвижными объектами, при создании тренажеров, а также для отладки бортового оборудования на стенде завода-изготовителя при серийном производстве.

Для уточнения предварительно рассчитанных (обычно по аналогу) параметров модели проводят натурные испытания с фиксацией данных о движении судна при его маневрировании и заданном управлении. Таким образом, задача идентификации параметров модели заключается в следующем [1]: по зафиксированным данным оценить их таким образом, чтобы обеспечить схожесть реакций реального объекта и модели его движения при одном и том же входном воздействии.

Пелевин Александр Евгеньевич. Доктор технических наук, ведущий научный сотрудник. АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор», Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения (С.-Петербург). Действительный член международной общественной организации «Академия навигации и управления движением».

Отметим некоторые особенности задачи идентификации параметров модели судна в пространстве состояния.

1. Основной проблемой при идентификации параметров динамических систем, описываемых в переменных состояния, является множество представлений их в пространстве состояния. В связи с этим динамику судна описываем системой уравнений, определяемых законами механики движения твердого тела в пространстве в условиях жидкой среды, что задает структуру системы, состав вектора состояния и соответствующую ему матрицу динамики. На основании этого только элементы матрицы динамики, которые рассчитываются по эмпирическим формулам или на основе аналогов и достоверность знания которых невелика, будут уточнены при идентификации.
2. Ограничен набор измеряемых данных (измеряются не все компоненты вектора состояния), поскольку обусловлен перечнем датчиков, установленных на объекте.
3. Для полноценного решения задачи идентификации входной сигнал должен возбуждать все формы динамики системы с учетом задаваемых начальных условий. К таким сигналам традиционно относятся классические импульсные и ступенчатые воздействия.
4. Выбранная модель должна удовлетворять условиям идентифицируемости системы $((A, B, C), x_0)$, где A – матрица динамики, B – матрица управления, C – матрица измерений, x_0 – начальные значения компонент [1].
5. Если не учитывать внешние возмущения, которые всегда сопровождают натурные испытания, то это может привести к ошибочным значениям идентифицируемых параметров.

Число и разнообразие методов идентификации, описанных в многочисленных публикациях, делают практически невозможным достаточно полный их анализ. Одним из рациональных подходов в этих условиях является отбор методов параметрической идентификации по их целевой направленности.

Существуют два основных общепринятых способа получения модели движения при маневрировании судна. Наиболее распространенный из них – определение действующих на судно гидродинамических коэффициентов, сил и моментов и соответствующих элементов матрицы динамики. Второй способ заключается в применении методов искусственного интеллекта для получения неявной модели (или так называемого «черного ящика»), описывающей входные и выходные характеристики.

Для расчета гидродинамических коэффициентов используются эмпирические формулы, база данных, испытания автономной модели или полномасштабные натурные испытания. Исторически было разработано множество подходов для получения модели движения: регрессия с оценкой параметров методом наименьших квадратов (LS) [2], метод эталонной модели (MRM) [3, 4], расширенный фильтр Калмана (EKF) [5, 6], оценка максимального правдоподобия (ML) [7], метод рекурсивной ошибки прогнозирования (RPE) [8] и др.

В последних зарубежных работах параметры модели [9, 10] определяются методом регрессии. Для уменьшения влияния дрейфа параметров математическая модель маневренного движения судна упрощается по результатам регрессионного анализа, что позволяет повысить устойчивость найденных параметров в различных экспериментах и в условиях возмущений.

Применение искусственного интеллекта описывается в статье [11].

В отечественной литературе [12, 13] в условиях действия возмущений предлагается использовать разложение в ряд Фурье правой части дифференциального уравнения для угловой скорости поворота судна с последующим уравниванием коэффициентов и с привлечением методов, в основе которых лежит минимизация погрешности предсказания и применение эталонной модели.

Задача определения нестационарных аэродинамических коэффициентов самолета рассматривалась в работе [14]. Предложенный подход базируется на параметризации и последующем выявлении аэродинамических переходных функций частотно-временным методом. Вместе с тем неопределенность при задании параметризации аэродинамических функций для конкретного самолета в ходе маневра является главной трудностью применения этого подхода. При этом фиксируются и подбираются нелинейные функции по углу атаки и угловой скорости тангажа, являющимися входными сигналами для аэродинамических переходных функций.

В [15] рассматривается проблема математического и компьютерного моделирования нелинейных динамических систем при недостаточности знаний об объекте моделирования и условиях его функционирования. Описываемый подход основан на объединении возможностей теоретического и нейросетевого моделирования. Предложено использовать теоретическую модель объекта, дополнив неопределенности полуэмпирическим формированием нейросетевой части модели, что приводит к получению динамической нейронной сети с модульной архитектурой. При этом нейросетевые части обучаются и компенсируют неопределенность построения модели в целом.

В [16] для линейной стационарной модели разработан метод совместного решения задачи наблюдения и идентификации в процессе управления движением. Рассматривается задача синтеза наблюдателя Люенбергера для расширенного вектора состояния, содержащего и идентифицируемые параметры. Выбор матрицы коэффициентов наблюдателя осуществляется таким образом, чтобы корни его характеристического полинома лежали в определенной области комплексной плоскости и левее результирующих корней замкнутой системы «объект – наблюдатель – регулятор».

Методы многоальтернативной идентификации с минимизацией набора альтернатив описаны в работе [17].

В [18] рассмотрена наблюдаемая и идентифицируемая стохастическая линейная дискретная система в пространстве состояний. Для оценивания параметров предлагается использовать на основании модифицированного метода максимального правдоподобия оценки вектора состояния (модифицированного фильтра Калмана – ФК) и градиентную процедуру, итерационно определяющую параметры матрицы динамики. Работа алгоритма в условиях возмущений и погрешностей измерений не обсуждается.

Алгоритм идентификации параметров модели движения судна, основанный на методе расширения и смешивания динамического регрессора (Dynamic Regressor Extension and Mixing – DREM) предложен в [19]. Метод DREM делится на два этапа: сначала определяется регрессионная модель, в которой регрессор и регрессия зависят от измеряемых сигналов с преобразованием стабильных фильтров и задержек, после чего параметры оцениваются методом градиентного спуска. Работа алгоритма в условиях возмущений и погрешностей измерений, когда не удастся получить достаточно точные значения производных высших порядков, не рассматривается.

Вопросу идентификации передаточной функции от частоты вращения двигателя судна к угловой скорости рыскания и линейной скорости горизонтального движения АНПА посвящено исследование [20].

Для решения задачи определения параметров модели движения традиционно измеряются составляющие вектора состояния. Например, для модели Номото [21], описывающей зависимость изменения угловой скорости судна от угла перекаладки руля, измеряется угловая скорость рыскания и фиксируется угол перекаладки руля. Однако если требуется найти параметры полной модели бокового движения судна, которая состоит из связанных уравнений боковой скорости и угловой скорости рыскания с углом перекаладки руля, то в связи с частым отсутствием на судне измерителя боковой скорости возникает необходимость ее оценки.

В настоящей статье рассматривается минимальный набор навигационного оборудования: лаг, измеряющий продольную скорость относительно воды, гирокомпас и навигационная аппаратура потребителя СНС, определяющая географические координаты, модуль скорости относительно грунта и путевой угол. Развивается метод идентификации параметров модели движения судна в части использования дополнительной информации от СНС для оценки неизмеряемых компонент вектора состояния и возмущений [22], что позволяет отфильтровать возмущения, воздействующие на судно, и получить вследствие этого устойчивую оценку параметров модели. Для идентификации параметров модели движения судна в пространстве состояний предложены оригинальные критерии (не встречающийся в известных автору работах по идентификации модели параметров судна) и итерационный алгоритм на основе градиентной процедуры.

Постановка задачи

Рассмотрим динамическую модель движения судна в связанной с ним системе координат. Опишем его движение дифференциальными уравнениями для следующих переменных: V_x и V_y – продольная и боковая составляющие скорости судна относительно воды; ω – угловая скорость рыскания; ψ – угол рыскания; F – боковая составляющая силы ветрового воздействия; ξ , η – координаты (продольная и боковая) в системе координат $O\xi\eta$, начало которой расположено в исходной путевой точке локсодромического участка заданной траектории, ось $O\xi$ направлена вдоль курсового угла этого участка, а ось $O\eta$ – в правую сторону при движении по курсовому углу вдоль участка; $V_{T\xi}$ и $V_{T\eta}$ – составляющие течения по осям $O\xi$ и $O\eta$. Эти компоненты образуют вектор состояния динамической системы $X = (V_y, \omega, \psi, F, V_{T\eta}, \eta, V_x, \xi, V_{T\xi})^T$, в котором учтены динамические и кинематические параметры движения, а также возмущения (течение и ветер), действующие на судно. Волновое возмущение аппроксимируется белым шумными процессами.

Для общности постановки задачи идентификации рассмотрим систему уравнений движения судна в виде

$$\dot{X} = A_n X + B_n u + W_n, \quad (1)$$

где A_n – матрица динамики, содержащая идентифицируемые параметры; B_n – матрица управления, которая может включать идентифицируемые параметры; W_n – порождающие белым шумными процессами. Приведя систему уравнений (1) к дискретному виду, получим

$$X_{K+1} = AX_K + Bu_K + W_K \tag{2}$$

Измерения опишем в виде

$$Y_K = HX_K + v_K \tag{3}$$

Здесь $Y_K = (\xi_K, \eta_K, \psi_K, V_\xi, V_\eta)^T$, где V_ξ и V_η – составляющие скорости движения по соответствующим осям (см. далее (10)), H – матрица измерений, v_K – вектор погрешностей измерения.

В процессе испытаний зафиксируем на один момент времени измерения Y_K и задаваемые управления $u_K = \delta_K$ и сформируем последовательности $Y^N = \{Y_1; Y_2; \dots; Y_N\}$ и $U^N = \{u_1; u_2; \dots; u_N\}$, которые и будут задействованы при идентификации.

Критерий. Традиционно используется подход, заключающийся во введении невязки e_K модели в экспериментально полученные данные:

$$e_K = Y_K - H\hat{X}_K(A, B, u_K),$$

где $\hat{X}_K(A, B, u_K)$ – оценка вектора X_K . При этом параметры A и B определяются из условия минимума функционала

$$J(A, B, Y^N) = \frac{1}{N} \sum_{K=1}^N e_K^T Q e_K, \tag{4}$$

где Q – диагональная весовая матрица.

В критерии минимизируется суммарная разность измерений Y_K и произведения матрицы измерений на одношаговый прогноз. При этом полагается эквивалентность принятой математической модели реальному объекту с точностью до искомым параметров. В результате получаемые в ходе идентификации параметры модели движения не соответствовали при прогнозе измерениям лишь в силу их погрешностей и случайных возмущений.

Когда же модель носит приближенный характер, например когда движение реального объекта, описываемое нелинейным уравнением, аппроксимируется линейной моделью, указанный выше критерий может привести к существенно большей погрешности, поэтому оправданным является определение параметров модели из условия минимума следующего критерия:

$$J(A, B, Y^N) = \frac{1}{N} \sum_{K=1}^N \tilde{e}_K^T Q \tilde{e}_K, \tag{5}$$

где $\tilde{e}_K = Y_K - \tilde{Y}_K$ – отклонение измерений Y_K от расчетных $\tilde{Y}_K = H\tilde{X}_K$, представляющих K -шаговый прогноз ($K = 1, \dots, N$). При этом расчетные значения вектора состояния \tilde{X}_K определяются путем интегрирования уравнений модели

$$\tilde{X}_{K+1} = A_i \tilde{X}_K + Bu_K + \hat{\Phi}. \tag{6}$$

В указанную модель подставляется зафиксированная последовательность управлений $U^N = \{u_1; u_2; \dots; u_N\}$, а также оцененные ФК значения возмущений, которые представляют собой часть компонент вектора состояния и описываются вектором $\hat{\Phi} = (\dots \dots \hat{F} \dots \hat{V}_{T\eta} \hat{V}_{T\xi})^T$. Кроме того, подставляются начальные значения вектора \tilde{X}_0 , равного оценкам вектора состояния на момент начала интегрирования $\tilde{X}_0 = \hat{X}_0$ и, следовательно, на момент начала решения задачи идентификации.

Оценка вектора состояния с включенными в его состав возмущениями производится с использованием фильтра Калмана, настроенного на модель с учетом зафиксированных управлений.

Истоки данного подхода можно найти в работе [23]. Критерий (5) характеризует степень близости расчетной траектории и измеренной («истинной»), поэтому определение параметров A и B из условия его минимума позволяет построить модель, реакция которой на входной сигнал u_K максимально приближается к истинной, зафиксированной в ходе испытаний при движении объекта. При этом отметим, что в вектор состояния введены возмущения, которые существенным образом влияют на точность определения параметров модели движения объекта [22].

Заметим, что критерий (5) имеет более сложную зависимость от параметров модели, чем (4). Так, в случае линейной модели с минимизацией квадратичного критерия (4) оптимальные значения параметров находятся из соответствующей системы линейных уравнений. Критерий же (5) и в случае линейной модели приводит к нелинейной системе уравнений. Следовательно, минимизация критерия (5) оказывается более сложной проблемой, чем минимизация (4).

Далее для решения задачи идентификации параметров модели движения судна и минимизации критерия (5) с привлечением зафиксированных данных предложен оригинальный эвристический алгоритм, в основе которого лежит оценка компонентов вектора состояния на основе ФК и градиентная процедура с выбором на каждом этапе только одного параметра, обеспечивающего наибольшее приближение к минимуму.

Алгоритм. Предлагается следующий итерационный алгоритм решения задачи идентификации.

1. На начальном шаге процедуры ($i = 0$) ищем последовательность оценок вектора состояния $\hat{X}_K(A_0, B_0, u_K)$ на основе ФК, построенного по грубым исходным значениям параметров, определенным эвристически или по аналогии, с помощью зафиксированного набора Y^N (измерений и управлений) и модели (2).

Затем интегрируем (6) при A_0, B_0, u_K , начальных условиях запуска ФК и оцененных возмущениях, получая $\tilde{X}_K(A_0, B_0, u_K)$ на каждый момент времени K от 1 до N , что позволяет найти траекторию движения модели и вычислить значение J_0 критерия (5).

2. Определяем следующее приближение параметров модели A_1, B_1 . Для этого выполняются пробные шаги $\pm h_{K\alpha}$ по каждому идентифицируемому параметру матрицы динамики α_K , т.е. изменяется матрица динамики

$$A(\alpha_{K+}) = A(\alpha_{K-1} + h_{K\alpha}) \text{ и } A(\alpha_{K-}) = A(\alpha_{K-1} - h_{K\alpha}),$$

где α – вектор параметров матрицы A , $h_{K\alpha}$ – пробный шаг по параметру α , представляющий собой долю от значения параметра, и по каждому идентифицируемому параметру матрицы управления

$$B(\beta_{K+}) = B(\beta_{K-1} + h_{K\beta}) \text{ и } B(\beta_{K-}) = B(\beta_{K-1} - h_{K\beta}),$$

где β – вектор параметров матрицы B , $h_{K\beta}$ – пробный шаг по параметру β . Получаем таким образом $2M$ моделей, где M – общее число идентифицируемых параметров.

Величина шага изменения параметров выбирается равной, например, 10% от тех значений, с которых начинаются итерации по идентификации, с незначительным уменьшением от шага к шагу.

Для каждой такой модели движения объекта с использованием ФК оцениваем вектор состояния с учетом оценки компонент возмущений с их фиксацией в виде

последовательности $\Xi^N = \{\Xi_1; \Xi_2; \dots \Xi_N\}$, где $\Xi_i = (\hat{F}_i, \hat{V}_{T\eta_i}, \hat{V}_{T\xi_i})^T$. Далее аналогично интегрируем систему (6) при известных управлениях из U^N и оцененных значениях возмущений из Ξ^N . Рассчитываем значение критерия $J_m, m \in 2M$, суммируя слагаемые $\tilde{\epsilon}_K = Y_K - \tilde{Y}_K$, где $\tilde{Y}_K = H\tilde{X}_K$, а Y_K берем из Y^N для каждой модели.

Выбираем единственную модель с матрицей динамики с тем пробным шагом по параметру, при котором значение критерия (5) было минимально:

$$m^*(A_m, B_m) = \arg \min_m \{J_1, J_2, \dots, J_M\}.$$

Именно эта модель с номером m^* и представляет следующее приближение параметров (заметим, что при этом изменялся только один параметр модели от итерации к итерации).

- Повторяем итерации по оценке параметров в соответствии с п. 2 до тех пор, пока не выполнится условие

$$\left| J(A_{i+1}, B_{i+1}, Z^N) - J(A_i, B_i, Z^N) \right| \leq \epsilon. \tag{7}$$

По результатам большого числа моделирований этой задачи указанная градиентная процедура сходилась, при этом скорость сходимости зависела от значений задаваемых пробных шагов $h_{K\alpha}$ и $h_{K\beta}$ а также от погрешности знания начальных значений идентифицируемых параметров матриц A_0, B_0 .

Отметим, что данная процедура приводит к увеличению числа итераций по сравнению с учетом шагов одновременно по нескольким параметрам, зато обеспечивает сходимость на большем диапазоне неопределенности параметров. Описанная итерационная процедура на каждом шаге корректировки матрицы динамики уточняет оценку параметров модели и повышает точность оценки возмущений.

Результаты

Моделирование. Приведем результаты моделирования решения задачи идентификации параметров нелинейной модели гидрографического судна ГС-439. Эта модель описывается уравнениями, содержащими силы и моменты различной природы в связанной с судном системе координат в виде [22, 24]:

$$\begin{aligned} m(1+k_{11})\dot{V}_x &= T - X_H - X_R + m(1+k_{22})V_{y0}\omega + F_{XAW}; \\ m(1+k_{22})\dot{V}_y &= Y_H + Y_R + F_{YAW}; \\ J_{zz}(1+k_{66})\dot{\omega} &= M_{zH} + M_{zR} + M_{ZAW}, \end{aligned} \tag{8}$$

где V_x, V_y – составляющие скорости относительно воды; ω – угловая скорость рыскания; X_H, Y_H и M_{zH} – вязкостные гидродинамические силы и момент; X_R, Y_R и M_{zR} – силы и момент от руля; T – тяга гребного винта; $F_{XAW}, F_{YAW}, M_{ZAW}$ – составляющие силы и момент возмущения от ветра и волнения.

Система уравнений (8) с достаточной степенью точности описывает движение гидрографического судна, что было проверено в ходе испытаний, результаты которых приведены в [22].

Линеаризуем модель (8), включающую уравнения для боковой скорости V_{y0} и угловой скорости рыскания ω . Система уравнений в этом случае будет иметь вид [17, 24]:

$$\begin{aligned}
\dot{\xi} &= V_x + V_{T\xi}; \\
\dot{\eta} &= V_y + V_x \psi + V_{T\eta}; \\
\dot{\psi} &= \omega, \\
\dot{V}_x &= -\mu_{V_x} V_x + \sigma_{V_x} \sqrt{2\mu_{V_x}} w_1, \\
\dot{V}_y &= a_{11} V_x V_y + a_{12} V_x \omega + b_1 V_0^2 \delta + F, \\
\dot{\omega} &= a_{21} V_x V_y + a_{22} V_x \omega + b_2 V_0^2 \delta + lF, \\
\dot{F} &= -\mu_F F + \sigma_F \sqrt{2\mu_F} w_2; \\
\dot{V}_{T\xi} &= -\mu_V V_{T\xi} + \sigma_V \sqrt{2\mu_V} w_3, \\
\dot{V}_{T\eta} &= -\mu_V V_{T\eta} + \sigma_V \sqrt{2\mu_V} w_4,
\end{aligned} \tag{9}$$

где a_{ij} и b_i – параметры модели, подлежащие идентификации; V_x – скорость объекта относительно воды; δ – угол перекладки руля; l – известное нормализованное значение плеча боковой составляющей силы ветрового воздействия (эмпирические формулы их расчета приводятся, например, в справочниках по теории управления судами [24]).

В (9) приняты следующие допущения: динамика судна аппроксимируется линейной моделью с учетом малых значений первого порядка, изменчивость средних значений силы и направления ветра, балльности, угла набега волны, скорости и курса течения на временном интервале набора натуральных данных незначительна. Модель продольного движения принимается в упрощенном виде с учетом того, что при небольших маневрах изменение продольной скорости будет с достаточной точностью аппроксимироваться марковским процессом первого порядка.

Последние три компоненты вектора состояния представляют собой медленно меняющиеся возмущения: силу ветра и составляющие течения, они описываются марковскими процессами первого порядка с параметрами σ_i и μ_i , w_i – белозумными процессами.

Параметры модели (9) по данным системы уравнений (8) следующие (см. (1)): $a_{11} = -0,020$, $a_{12} = -0,001$, $a_{21} = -0,0054$, $a_{22} = -0,098$, $b_1 = -0,011$, $b_2 = 0,001$.

Набор данных для решения задачи производился с использованием модели (8). При этом на первом участке задавалось управление П-регулятором, а на втором – управление для реализации режима «зигзаг $10^\circ/10^\circ$ », т.е. перекладка руля на 10° и слежение за отклонением курса от первоначального на 10° . В этот момент руль переключался на 10° в другую сторону до начала следующего отклонения курса на 10° в другую сторону от первоначального и т.д.

Измерения. В соответствии с имеющимся на судне набором навигационных средств (приемник СНС, гирокомпас, лаг) в целях идентификации параметров модели имеем следующие измерения в дискретные моменты времени:

$$\begin{aligned}
y_{\xi K} &= \xi_K + v_{\xi K}, \\
y_{\eta K} &= \eta_K + v_{\eta K}, \\
y_{V\xi K} &= V_{GPSK} \cos(IV_{GPSK} - K_0) + v_{VK}, \\
y_{V\eta K} &= V_{GPSK} \sin(IV_{GPSK} - K_0) + v_{VK}, \\
y_{VxK} &= V_{xK} + v_{VxK}, \\
y_{\psi K} &= \psi_K + v_{\psi K}.
\end{aligned} \tag{10}$$

Измерения с первого по четвертое формируются по информации от СНС о текущих географических координатах – широте φ и долготе λ , преобразование которых в траекторные координаты ξ и η приведено ниже и в [17], а также о V_{GPS} , $ПУ_{GPS}$ – скорости движения относительно грунта и путевом угле, передаваемых в предложениях международного стандарта IEC 61162-1. Пятое измерение формируется по данным лага, последнее – по данным гирокомпаса.

Переменные $v_\xi, v_\eta, v_{V\xi}, v_{V\eta}, v_{V\psi}$ – бел шумные процессы, представляют собой высокочастотные погрешности измерений.

Для идентификации и расчета траекторных координат фиксируем начало координат в точке φ_0, λ_0 и начальное направление движения курсом от гирокомпаса K_0 .

С учетом малости расстояний при наборе данных для идентификации траекторные координаты и рыскание ψ рассчитываются по формулам:

$$\begin{aligned} \xi_K &= R_3 [(\lambda_K - \lambda_0) \cos \varphi \cos K_0 - (\varphi_K - \varphi_0) \sin K_0], \\ \eta_K &= R_3 [(\lambda_K - \lambda_0) \cos \varphi \sin K_0 + (\varphi_K - \varphi_0) \cos K_0], \\ \psi_K &= K_K - K_0. \end{aligned}$$

Покажем связь последних двух измерений в (10) с компонентами вектора состояния в (9) (см. рис.1). Для этого раскроем тригонометрические функции и учтем члены до первого порядка малости. Заметим при этом, что величины ψ и V_y при симметричности тестового маневра по курсу относительно начального курса K_0 и отклонениях от него не более чем на 20° будут малыми, поэтому их произведением пренебрегаем. Тогда измерения можно представить в виде

$$\begin{aligned} V_{GPS} \sin(ПУ_{GPS} - K_0) &= V_x \sin \psi + V_y \cos \psi + V_{T\eta} \cong V_x \psi + V_y + V_{T\eta}, \\ V_{GPS} \cos(ПУ_{GPS} - K_0) &= V_x \cos \psi - V_y \sin \psi + V_{T\xi} \cong V_x + V_{T\xi}. \end{aligned}$$

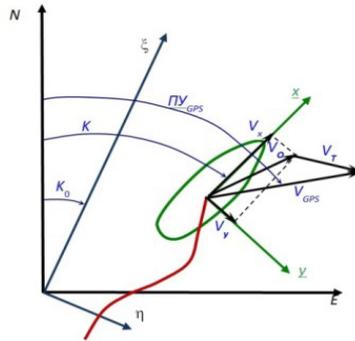


Рис. 1. Связь измерений скорости и путевого угла с компонентами вектора состояния

Критерий. Рассматривалась задача определения параметров для модели бокового движения судна. При взвешивании измерений в критерии (5) веса задавались равными 100 для угла рыскания, приводимого дополнительно к градусным значениям, 10 – по оценке боковой скорости (компонента вводилась для оценки возможности ее использования) и 1 – по координатам, т.е. при

$$\tilde{e}_K = Y_K - \tilde{Y}_K = (e_{y\eta}, e_{y\psi}, e_{yV\eta})$$

весовая матрица в (5) задавалась в виде

$$Q = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 100 & 0 \\ 0 & 0 & 10 \end{pmatrix}$$

В процессе идентификации используется следующий алгоритм управления.

1. На первом участке с управлением П-регулятором по курсу при заданном значении курса оцениваем возмущения.
2. На втором участке выполняем маневрирование типа «зигзаг» и по данным, полученным на этом участке, решаем задачу идентификации динамических параметров. При этом найденные на предыдущем участке значения оцененных возмущений (нормализованных силы и момента, составляющей течения поперек траектории, заданной начальными координатами и курсом) принимаются за постоянные.

При моделировании задавались характеристики движения судна: $V_x = 4$ м/с, $K = 0^\circ$, скорость ветра $V_{wind} = 4$ м/с с углом $wind_angle = 270^\circ$; скорость течения $V_T = 0,5$ м/с и курс $K_T = 45^\circ$.

Приведем (см. рис. 2 и 3) оценку компонент вектора состояния при описанном движении судна и оценки идентифицируемых параметров a_{ij} в зависимости от числа итераций. На рис. 2 черной линией обозначено расчетное движение по формулам (6), красной – оценки компонент ФК (V_y, ω – на рис. 2, а; ψ, δ – на рис. 2, б; $F, V_{T\eta}$ – на рис. 2, в). На рис. 3 синей линией отмечено эталонное значение параметра, красной – оценки параметров модели. На рис. 2, в резкое отклонение вверх черной линии в момент времени около 500 с отражает начало использования оцененных значений возмущений – когда производится их учет при прогнозировании и вычисление значения критерия. При этом значения компонент вектора прогноза на этот момент приравняются к компонентам вектора оценки. На первом участке происходит обработка ветрового возмущения рулем и оценка возмущений. Параметры модели совпадают с параметрами модели фильтра.

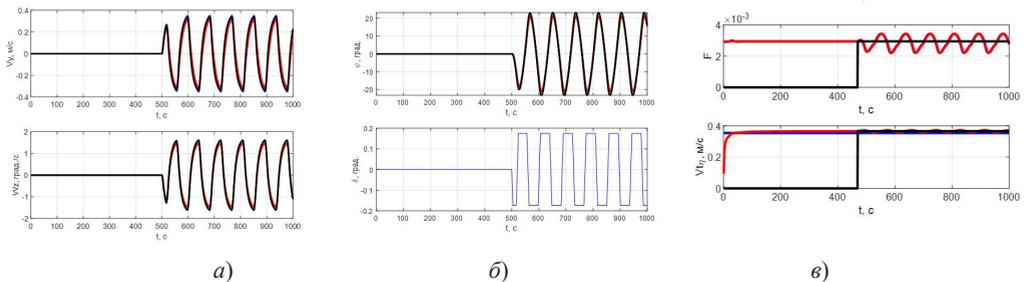


Рис. 2. Оценка компонент вектора состояния

Приведем значения идентифицированных параметров на момент итерации с номером 27, когда значение критерия стало минимальным, причем погрешность оценки параметров Δa_{11} составляла 3,5%, $\Delta a_{21} - 5,0\%$, $\Delta a_{22} - 4,0\%$. Параметр a_{12} практически не оценивался, что связано с его малым влиянием на движение судна в этом режиме. Его оценку удастся получить в режиме циркуляции. Отметим, что погрешность оценки параметров Δa_{ij} соизмерима с величиной пробного шага, выраженного в процентах от значения параметра, и на каждой итерации величина шага по каждому параметру умножалась на коэффициент, меньший, но близкий к 1.

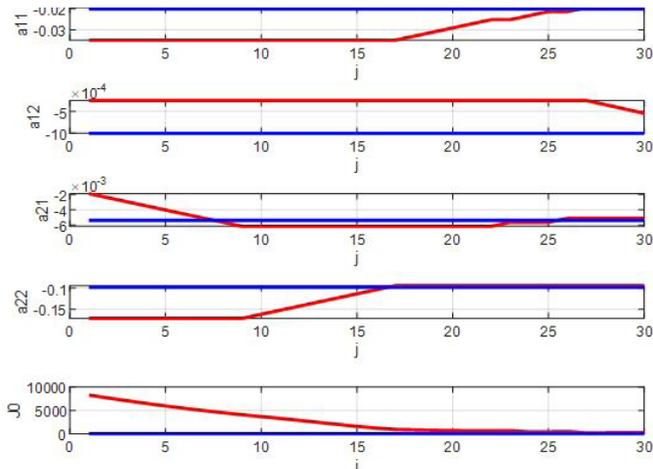


Рис. 3. Оценки идентифицируемых параметров a_{ij} в зависимости от числа итераций

Обсуждение. Из приведенных графиков следует, что возмущения (нормализованная сила F и составляющая течения поперек траектории V_{Tn}) оцениваются с достаточной степенью точности на участке стабилизации П-регулятором (см. рис. 2, в) и их значения при интегрировании уравнений динамики в режиме «зигзаг» принимались постоянными на момент его начала.

Параметры модели в продольном движении не идентифицируются, а оценивается только продольная относительная скорость и составляющая течения вдоль траектории, которая полагается в уравнениях бокового движения известной. Графики их оценки не приведены, отметим только, что оценки указанных параметров достаточно точные, поэтому значения оценок продольной относительной скорости используются при идентификации параметров модели бокового движения.

Заметим, что применение матрицы динамики с изменением сразу по всем параметрам, пробные шаги по которым уменьшали значение критерия, не приводило к устойчивому процессу минимизации критерия, как отмечалось ранее.

Апробация подхода на нелинейной модели. Описанный подход использовался для идентификации параметров модели движения реального катера, а именно системы уравнений, характеризующих угловое движение. Управлением в рассматриваемом случае является поворот сопел водометных движителей, а измеряемыми выходными переменными – угловая скорость поворота катера и его линейная продольная скорость.

Зависимость значений угловой скорости циркуляции ω от параметра управления δ (угла поворота сопел водомета) представляет собой диаграмму управляемости катера, для исследования которой были проведены натурные испытания. В ходе экспериментов плавно изменялась перекладка сопел δ водометного движителя от 0 до максимального положительного, потом от максимального положительного до максимального отрицательного и так далее. При этом регистрировались с различными частотами данные управления и движения катера: углы поворота сопел водометного движителя δ_p ; угловая скорость рыскания ω_p , вырабатываемая имевшейся на катере инерциальной навигационной системой (ИНС); путевая скорость V_i по данным приемника СНС. По результатам обработки полученных результатов была построена диаграмма управляемости катера (рис. 4). На рис. 4 видна гистерезисная петля, в связи с этим оказалось необходимым учесть указанную особенность в математической модели.

Воспользуемся при решении задачи идентификации упрощенной динамической моделью, рекомендуемой Международной конференцией опытовых бассейнов [24], с уточнением в части зависимости коэффициентов от скорости:

$$\begin{aligned}\dot{\omega} &= -\mu V \omega - \mu_{\omega} |\omega| \omega + \mu k V^2 \delta + m_d, \\ \dot{\delta} &= -\mu_{\delta} \delta + \mu_{\delta} u, \\ \dot{m}_d &= -\mu_d m_d + g w.\end{aligned}$$

При этом переменными состояния являются: ω – угловая скорость рыскания; δ – угол поворота сопел водометов (углы поворота сопел водометного движителя одинаковы); m_d – медленноменяющееся ветровое возмущение (марковский процесс 1-го порядка); u – управление скоростью изменения углов; V – скорость движения катера; μ_i – величины, обратные соответствующим постоянным времени (μ_{δ} и μ_d считаются известными); k – коэффициент усиления; g – уровень интенсивности белозумного процесса w соответственно.

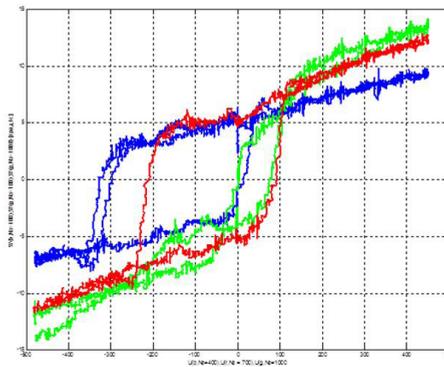


Рис. 4. Значения угловой скорости циркуляции в зависимости от угла перекладки сопел в режиме, близком к установившемуся (натурные данные)

Значения зафиксированных переменных программным образом синхронизировались по времени и приводились к частоте фиксации углов поворота сопел водомета как наиболее низкой, при этом для каждого измерения задавался индекс i , изменяющийся от 1 до N . В итоге при идентификации использовались зафиксированные массивы входных $\Delta = \{\delta_i; i \in [1, N]\}$ и выходных $W = \{\omega_i; V_i; i \in [1, N]\}$ данных.

В результате применения описанной процедуры были определены параметры модели катера (рис. 5, а). Итерационная процедура сходится за 2-3 шага (рис. 5, б), что говорит о достаточно точном начальном приближении.

На рис. 5, а приведены значения угловой скорости. Сплошной кривой зеленого цвета обозначены величины, полученные при оценке ФК; красной пунктирной – расчетные значения на основе идентифицированной модели, найденные путем интегрирования системы дифференциальных уравнений; синей пунктирной – скорости циркуляции ω по формулам ветвей парабол от угла поворота δ принятой нелинейной модели движения.

Результаты показывают достаточно хорошее совпадение с натурными данными. Принятая модель учитывает характер реального движения катера. Описанная итерационная процедура позволяет идентифицировать параметры модели и исключить при этом влияние возмущений на их выработку, что обеспечивает устойчивость процедуры оценки параметров.

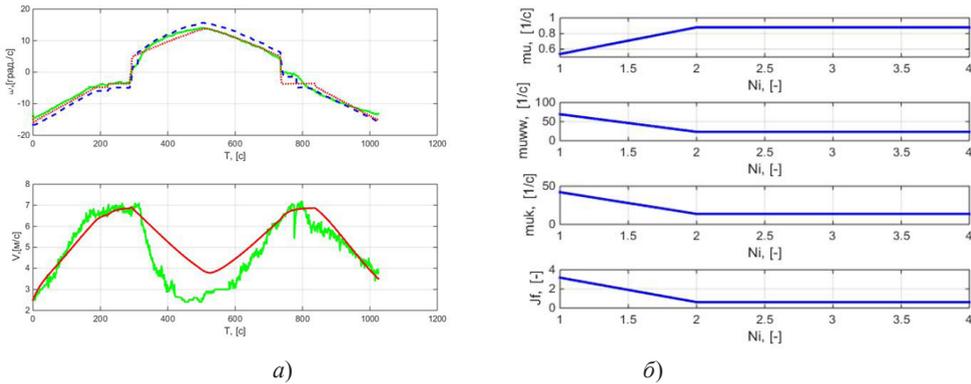


Рис. 5. Сравнение натуральных данных и данных при интегрировании уравнений модели (а), итерации значений параметров модели (б)

Заключение

1. Предложен подход к идентификации параметров модели судна в пространстве состояний в условиях внешних возмущений с учетом измерения координат местоположения.
2. Описанный алгоритм позволяет получить достаточно точные для практических применений оценки возмущений за счет привлечения позиционных измерений.
3. Оценки параметров модели, полученные на основе интегрирования уравнений модели с управлением, применяемым к реальному объекту, достаточно близки к параметрам движения реального объекта в условиях внешних возмущений.
4. Подход обеспечивает устойчивость выработки параметров при различном уровне внешних возмущений, что подтверждено в ходе моделирования и при обработке данных натуральных испытаний.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Льюинг Л.** Идентификация систем. Теория для пользователя / пер. с англ. под ред. Я.З. Цыпкина. М.: Наука, 1991. 432 с.
2. **Holzhueter, T.**, Robust identification in an adaptive track controller for ships, *Proceedings of the 3rd IFAC Symposium on Adaptive Systems in Control and Signal Processing*, Glasgow, UK, 1989, pp. 275–280.
3. **Тумашик А.П.** Расчет гидродинамических характеристик судна при маневрировании / А.П. Тумашик // Судостроение. 1978. № 5. С.13–15.
4. **Van Amerongen, J.**, Adaptive steering of ships—a model reference approach, *Automatica*, 1984, vol. 20, no. 1, pp. 3–14.
5. **Perera, L.P., Oliveira, P., Soares, C.G.**, System identification of nonlinear vessel steering, *Journal of Offshore Mechanics and Arctic Engineering*, 2015, vol. 137, no. 3, Article ID 031302, pp. 1–7.
6. **Julier, S., Uhlmann, J.**, A New Extension of the Kalman Filter to Nonlinear Systems, *Proceedings of SPIE: The International Society for Optical Engineering*, 1997, vol. 3068, pp. 182–193.
7. **Källström, C.G. and Åström, K.J.**, Experiences of system identification applied to ship steering, *Automatica*, 1981, vol. 17, no. 1, pp. 187–198.
8. **Herrero, E.R., Velasco, F.J.**, Two-step identification of non-linear manoeuvring models of marine vessels, *Ocean Engineering*, 2012, vol. 53, pp. 72–82.
9. **Luo, W.**, Parameter Identifiability of Ship Manoeuvring Modeling Using System Identification, *Mathematical Problems in Engineering*, 2016, vol. 11, no. 17, pp. 1–10.
10. **Xu, H., Hassani, V., Soares, C.G.**, Uncertainty analysis of the hydrodynamic coefficients estimation of a nonlinear manoeuvring model based on planar motion mechanism tests, *Ocean Engineering*, 2019, vol. 173, pp. 450–459.

11. Dai, Y.T., Liu, L.Q., Feng, S.S., On the identification of coupled pitch and heave motions using opposition-based particle swarm optimization, *Mathematical Problems in Engineering*, 2014, vol. 2014, 10 p.
12. Пашенцев С.В. Параметрическая идентификация маневренных характеристик по результатам натурных испытаний вида «Зигзаг» в нелинейной модели управляемости судна // Вестник МГТУ. 2010. Т. 13. №4/1. С. 730–735.
13. Жабко Н.А. Параметрическая идентификация динамических моделей морских судов // Вестник ВГТУ. 2012. №1.
14. Овчаренко В.Н., Поплавский Б. К. Идентификация нестационарных аэродинамических характеристик самолета по полетным данным // Изв. РАН. ТиСУ. 2021. №6. С. 24–34.
15. Егорчев М.В., Козлов Д.С., Тюменцев Ю.В. Моделирование продольного углового движения самолета: сопоставление теоретического, эмпирического и полумэмпирического подходов // Научный вестник МГТУ ГА. 2015. №211. С. 116–123.
16. Зубов Н.Е., Микрин Е.А., Мисриханов М.Ш. и др. Применение алгоритма точного размещения полюсов при решении задач наблюдения и идентификации в процессе управления движением космического аппарата // Изв. РАН. ТиСУ. 2013. №1. С. 135–151
17. Дмитриев С.П., Пелевин А.Е. Задачи навигации и управления при стабилизации судна на траектории. СПб.: ЦНИИ «Электроприбор», 2004. 160 с.
18. Денисов В.И., Чубич В.М., Черникова О.С. Активная параметрическая идентификация стохастических линейных систем. Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2009. 192 с.
19. Нгуен Х.Т., Власов С.М., Скобелева А.В. Математическое моделирование и идентификация параметров модели надводного судна // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2021. Том 21. № 3. С. 418–425.
20. Lipko, I., Identification of the horizontal movement of the underwater vehicle MiddleAUV, *International Russian Automation Conference (RusAutoCon)*, IEEE, September 2022, pp. 820–825.
21. Nomoto, K., Taguchi, T., Honda, K., On the steering qualities of ships, *International Shipbuilding Progress*, 1957, vol. 4, pp. 354–370.
22. Пелевин А.Е. Идентификация параметров модели объекта в условиях внешних возмущений // Гироскопия и навигация. 2014. № 4. С. 111–120.
23. Методы исследования нелинейных систем автоматического управления / под ред. Р.А. Нелепина. М.: Наука, 1975. 448 с.
24. Справочник по теории корабля. Т.3. Управляемость водоизмещающих судов. Гидродинамика судов с динамическими принципами поддержания / под ред. Я.И. Войткунского. Л.: Судостроение, 1985. 768 с.

Pelevin, A.E. (Concern CSRI Elektropribor, JSC; St. Petersburg, Russia).

Identification of motion model parameters for a surface ship under disturbances. *Гироскопия и Навигация*, 2023, vol. 31, no. 4 (123), pp. 192–205.

Abstract. *The proposed approach to identifying the parameters of the motion model for a surface ship subject to external disturbances uses the measurements of heading, yaw rate, speed through the water, and global satellite navigation system (GNSS) data. The model structure is set in the state space.*

We use the criterion of how close is the real vehicle response to a given control input to its motion model response under the same disturbances. It is proposed to apply the Kalman filter with the state vector including the disturbances, and an iterated procedure for estimating parameters by minimizing the criterion. It is shown that this ensures stable identification of model parameters under different disturbances. Simulation results are presented to evaluate the quality of identification. The approach was validated in full-scale tests of a high-speed boat.

Key words: parameters identification, vehicle model, state space, external disturbances, Kalman filter, iterated procedure.

Материал поступил 13.11.2023