

А.Е.ПЕЛЕВИН

ИДЕНТИФИКАЦИЯ ПАРАМЕТРОВ МОДЕЛИ ОБЪЕКТА В УСЛОВИЯХ ВНЕШНИХ ВОЗМУЩЕНИЙ

Предложен подход к идентификации параметров модели подвижного объекта в условиях воздействия на него внешних возмущений. Оценки параметров вырабатываются с использованием итерационной процедуры, состоящей из оценки вектора состояния объекта, включающего в свой состав возмущения, и оценки параметров модели объекта с применением метода наименьших квадратов. Идентифицированные параметры достаточно устойчивы к различным внешним возмущениям. Приведены результаты моделирования предложенного подхода, который был опробован при натурных испытаниях.

Ключевые слова: идентификация параметров модели, фильтр Калмана, метод наименьших квадратов, итерационный алгоритм, моделирование

Введение

Математическая модель подвижного объекта используется при построении фильтра для оценки его вектора состояния при неинвариантном подходе (учете динамики объекта) и при синтезе закона управления. Обычно математическую модель в пространстве состояния удается построить на основе сил и моментов физической природы, действующих на объект (или систему), с точностью до некоторых параметров, которые уточняются или определяются по результатам натурных испытаний путем решения задачи идентификации. При этом к методам идентификации предъявляются определенные требования, а именно они должны:

- иметь достаточную точность;
- быть независимыми от начальных условий;
- обладать нечувствительностью к внешним возмущениям;
- учитывать погрешности измерений аппаратуры, установленной на объекте.

В настоящее время на практике наиболее широкое распространение получили методы идентификации параметров модели объекта [1-3]:

- ошибки прогноза;
- подпространства;
- многоальтернативной фильтрации.

В работах [4, 5], ставших классическими по идентификации параметров модели надводного судна, гидродинамические коэффициенты модели определялись по методу ошибки прогноза с использованием градиентной процедуры. Прогноз осуществлялся по разности вектора измерений и прогноза движения судна по оценкам вектора состояния на основе фильтра Калмана (ФК), умно-

Пелевин Александр Евгеньевич. Доктор технических наук, зам. главного конструктора по направлению ОАО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор» (С.-Петербург). Действительный член международной общественной организации «Академия навигации и управления движением».

женного на матрицу наблюдения. В модели динамики ФК не учитывались внешние возмущения, что приводило к значительной чувствительности идентифицируемых параметров к возмущениям.

В работе [6] рассмотрен алгоритм идентификации гидродинамических коэффициентов модели автоматического подводного аппарата с настройкой коэффициентов по градиентной процедуре Гаусса – Ньютона. При этом навигационные и динамические параметры движения и ориентации оценивались ФК. При этом в ФК в качестве модели задавалась инвариантная модель движения и ориентации подводного аппарата, позволяющая определять параметры по данным чувствительных элементов инерциального модуля и корректировать их по данным гидроакустического приемопередатчика.

Подход, изложенный в работе [7], использует метод ошибки прогноза с определением параметров модели методом наименьших квадратов (МНК). Измерения проводились на специальной модели, подвешенной на канате, при различных движениях, задаваемых на специальной установке, которая также измеряет характеристики движения модели. Силы, действующие на модель, измерялись динамометрами.

В работе [8] описывается определение параметров линейной модели динамики судна, описанной в пространстве состояния. Рассмотрены особенности применения МНК, но при этом не учитывались внешние воздействия, такие как ветер, волнение и течение.

Подход к идентификации с использованием метода подпространств (subspace identification) рассматривался в последнее время во многих работах (см., например, [9]). Идентификация в [9] проводится два этапа: 1) строится матрица Ганкеля с использованием входных и выходных сигналов, по этой матрице определяется порядок модели, затем производится SVD-разложение матрицы Ганкеля, на основании которого строятся расширенная матрица наблюдения, а также матрицы динамики объекта и наблюдения; 2) с помощью МНК определяются матрицы B и D . При таком подходе модель изначально имеет аппроксимирующий характер. Вопросы построения аппроксимирующих динамических моделей освещены в работах [10, 11]. Пример использования подхода многоальтернативной фильтрации изложен, например, в работе [12].

Отметим, что серьезным недостатком описанных методов является существенная зависимость оценок параметров модели от внешних возмущений. Достоинства и недостатки этих методов подробно проанализированы в статье [13] и недостатки приведены в таблице.

Метод	Недостатки
Ошибки предсказания	Значения идентифицированных параметров зависят от внешних возмущений. Необходимость решать задачу нелинейной фильтрации с учетом уравнения чувствительности при использовании расширенного ФК
Подпространства состояния	Значения идентифицированных параметров зависят от внешних возмущений. Компонентам вектора состояния трудно приписать физический смысл
Многоальтернативной фильтрации	Необходимость построения набора моделей с учетом внешних возмущений; значительный временной интервал фиксации данных для выбора наиболее достоверной гипотезы; для обеспечения достаточной точности необходим большой набор моделей; мало отличающиеся друг от друга модели не различаются идентификационной процедурой

При наличии внешних возмущений решение задачи идентификации параметров модели значительно усложняется. При этом, как указывалось в вышеприведенных работах, идентифицируемые параметры модели объекта существенно зависят от уровня внешних возмущений, что приводит к ухудшению оценок параметров модели, если вклад возмущений не учитывается при идентификации.

В статье рассматриваются приемы, позволяющие уменьшить влияние внешних возмущений на точность определения параметров при решении задачи идентификации параметров модели на основе метода ошибки предсказания. Приведены результаты моделирования, показывающие эффективность предлагаемых приемов. Данный подход использовался при решении задачи идентификации параметров модели гидрографического судна.

Основные положения задачи идентификации

Успех применения тех или иных методов идентификации обусловлен в первую очередь пониманием исследователем тех ограничений, которые накладываются при использовании метода, поэтому приведем постановку задачи идентификации.

Пусть динамическая модель подвижного объекта описывается уравнением

$$X_{K+1} = A(\alpha)X_K + B(\beta)u_K + W + W_K, \quad (1)$$

где X_K – вектор состояния модели объекта на момент времени K , u_K – вектор управления (входной сигнал); A – матрица динамики, зависящая от вектора параметров α линейно, B – матрица управления, линейно зависящая от вектора параметров β , W и W_K – векторы, характеризующие низкочастотные (постоянные и медленно меняющиеся) и высокочастотные составляющие внешних возмущений.

Вектор измерений (выходной сигнала) имеет вид

$$Y_K = HX_K + V_K, \quad (2)$$

где V_K – вектор ошибок измерения.

Для учета возмущений при решении задачи идентификации параметров включим их в состав вектора состояния и опишем их моделями: для постоянных возмущений W_i – выражением $\dot{W}_i = 0$, а для медленно меняющихся составляющих возмущений – марковским процессом, например, первого порядка.

На основании модели (1) и введенных дополнительных компонент вектора состояния можно предсказывать значения выходного сигнала. Предсказание выходного сигнала $\tilde{Y}_{K+1}$ на один шаг вперед описывается соотношениями:

$$\begin{aligned} \tilde{X}_{K+1} &= A\hat{X}_K + Bu_K, \\ \tilde{Y}_{K+1} &= H\tilde{X}_{K+1}, \end{aligned} \quad (3)$$

где $\tilde{X}_K$ – прогнозное значение вектора состояния; $\hat{X}_K$ – оценка вектора состояния для предыдущего шага – определяется выражением

$$\hat{X}_K = \tilde{X}_K + K_K(Y_{K-1} - H\hat{X}_{K-1}). \quad (4)$$

В выражении (3) вектор $\hat{X}_K$ – расширенный вектор, включающий в свой состав постоянные и медленно меняющиеся возмущения; матрицы A и B расширенной системы обозначены греческими буквами и имеют вид:

$$A = \begin{bmatrix} A(\alpha) & 0 \\ 0 & A_W \end{bmatrix}, B = \begin{bmatrix} B(\beta) \\ 0 \end{bmatrix},$$

где A_W – матрица динамических моделей возмущений W , «0» – соответствующие нулевые матрицы.

Коэффициент усиления K и матрица ковариаций P ФК имеют следующий вид:

$$\begin{aligned} K_K &= AP_K H^T (HP_K H^T + R)^{-1}; \\ P_{K+1} &= AP_K A^T + GG^T - AP_K H^T (HP_K H^T + R)^{-1} HP_K A^T. \end{aligned} \quad (5)$$

Здесь P_0 – начальная ковариационная матрица компонент вектора состояния, R – матрица ковариаций вектора V , G – матрицы интенсивностей порождающих шумов, входящих в модели возмущений.

Сделаем два замечания по поводу формирования фильтра (4), (5).

Во-первых, ФК должен рассчитываться с учетом матрицы A , элементы которой необходимо определить. Далее будем считать, что элементы матрицы A известны, но достаточно грубо и фильтр должен обладать свойством робастности к неопределенности параметров модели. Такой фильтр можно построить, исследуя чувствительность к элементам матрицы динамики. Построение робастных фильтров приведено, например, в [14]. Если параметры модели объекта неизвестны, то построить такой фильтр проблематично.

Во-вторых, матрицы A и H должны быть такими, чтобы выполнялось условие наблюдаемости, т.е. по измерениям можно было бы оценить все компоненты вектора состояния.

Задача идентификации параметров модели объекта

В нашем распоряжении имеется группа данных

$$Z^N = \{Y_1, u_1, Y_2, u_2, \dots, Y_N, u_N\} \quad (6)$$

Структура матриц динамики и управления задана с точностью до неизвестных параметров. Необходимо по информации, содержащейся в Z^N , определить параметры модели (1), т.е. идентифицировать неизвестные параметры матриц $A(\alpha)$ и $B(\beta)$.

Критерием определения параметров модели в рассматриваемой нами задаче будет служить ошибка предсказания [2, 3]. Таким образом, ту модель будем называть «хорошей», которая хорошо предсказывает, т.е. порождает малые ошибки предсказания для имеющихся данных наблюдения. Ошибка предсказания на один шаг определяется выражением

$$\varepsilon_K = Y_K - H\hat{X}_K. \quad (7)$$

Параметры модели объекта определяем на основании критерия минимизации ошибок предсказания

$$J(\alpha, \beta, Z^N) = \frac{1}{N} \sum_{K=1}^N \varepsilon_K^2. \quad (8)$$

Тогда оценка параметров модели объекта определяется выражением

$$(\hat{\alpha}, \hat{\beta}) = \arg \min_{\alpha, \beta} J(\alpha, \beta, Z^N). \quad (9)$$

После введения критерия задача идентификации сводится к проблеме отыскания его экстремума. Вычислительные методы определения параметров достаточно полно изложены в работах [2, 3].

Предлагаемый подход к идентификации параметров модели объекта

Здесь рассматривается случай, когда параметры матриц динамики и управления неизвестны. В этом случае для построения фильтра и оценки вектора состояния нет необходимых данных.

Сделаем следующие допущения: 1) матрица наблюдения такова, что наблюдаются все компоненты вектора состояния динамической модели объекта (1), часть из которых – в совокупности с возмущениями; непосредственно возмущения не наблюдаются; 2) выполняются условия наблюдаемости вектора состояния объекта, т.е. могут быть оценены и возмущения, входящие в состав вектора состояния.

При введенных допущениях матрицу наблюдения H можно представить в виде

$$H = [E \quad H_1], \quad (10)$$

где E – единичная матрица соответствующей размерности, матрица H_1 имеет хотя бы один ненулевой элемент.

Для оценки параметров модели объекта в первом приближении воспользуемся только теми данными, которые у нас имеются: набором данных Z^N в соответствии с (6) и структурой расширенных матриц динамики и управления.

Будем использовать в качестве оценки вектора состояния по первой формуле (3) измерение на предыдущем шаге $\hat{X}_{K-1} \approx Y_{K-1}$ и соответствующее управление u_{K-1} , полагая значения возмущений равными нулю. Суммируя ошибки предсказания (7), приходим к критерию (8). Минимизируя этот критерий по неизвестным параметрам модели, получим уравнение для определения первого приближения значений этих параметров. Минимизацию проведем на основе МНК.

Образуем матрицу

$$Y^N = [Y_1 \quad Y_2 \quad \dots \quad Y_N] \quad (11)$$

и матрицу

$$Z_0^N = \begin{bmatrix} Y_0^0 & Y_1^0 & \dots & Y_{N-1}^0 \\ u_0 & u_1 & \dots & u_{N-1} \end{bmatrix}. \quad (12)$$

Тогда матричное уравнение для определения первого приближения значений параметров модели объекта по наблюдениям пар «вход – выход» будет иметь вид

$$[A \quad B] Z_0^N = Y^N. \quad (13)$$

Уравнение (13) имеет единственное решение относительно блочной матрицы $[A \quad B]$

$$[A \quad B] = Y^N (Z_0^N)^T \left[Z_0^N (Z_0^N)^T \right]^{-1}, \quad (14)$$

если среди столбцов матрицы $Z_0^N (Z_0^N)^T$ нет линейно зависимых (в противном случае уравнение (13) имеет бесконечно много решений, среди них выбираем решение с минимальной нормой).

Первое приближение значений параметров используем для построения ФК в соответствии с (4) и (5). Оценки компонент вектора состояния, в том числе возмущающих воздействий, полученные с использованием этого ФК и набора данных (11) и (12), используем для определения приближения параметров модели следующим образом. Сформируем обновленные измерения

$$Y_i^1 = Y_i - H_1 W_i^1, \quad (15)$$

вычитая из имеющихся измерений оценки возмущений, полученные на каждом шаге фильтрации. Формируем матрицу Z_1^N (12) с обновленными измерениями Y_i^1 . На основании соотношения (14) с заменой Z_0^N на Z_1^N получаем следующее приближение параметров модели. Повторяем процедуру расчета так же, как и с первым приближением параметров с обновлением измерений Y_i^2 , определяем следующее приближение и т.д.

Описанная итерационная процедура определения параметров позволяет с каждым разом проводить уточнение возмущений и соответственно оценку параметров модели.

П р и м е р. Приведем пример использования предлагаемого подхода идентификации для модели бокового движения гидрографического судна:

$$\begin{aligned} \dot{V}_y &= a_{11} V V_y + a_{12} V \omega + b_1 V^2 \delta + F, \\ \dot{\omega} &= a_{21} V V_y + a_{22} V \omega + b_2 V^2 \delta + l F, \\ \dot{F} &= -\mu_F F + \sigma_F \sqrt{2\mu_F} w_1; \\ \dot{V}_{Ty} &= -\mu_V V_{Ty} + \sigma_V \sqrt{2\mu_V} w_2, \end{aligned} \quad (16)$$

где V_y – боковая скорость судна относительно воды; ω – угловая скорость рыскания; F – нормализованная медленно меняющаяся боковая составляющая силы ветрового воздействия (сила, деленная на сумму массы судна и присоединенную массу); V_{Ty} – неучтенная медленно меняющаяся составляющая течения, представляющая систематическую ошибку измерения; μ_F и μ_V – величины, обратные интервалу корреляции; σ_F и σ_V – среднеквадратические значения соответствующих возмущений; w_i – независимые порождающие белые шумы единичной интенсивности; V – скорость судна относительно воды (измеряется относительным лагом, считаем известной с достаточной степенью точности); δ – управление (перекладка руля); a_{ij} и b_i – параметры модели; l – известное нормализованное плечо боковой составляющей силы ветрового воздействия (плечо, умноженное на сумму массы судна и присоединенную массу и деленное на сумму момента инерции судна и присоединенного момента инерции относительно вертикальной оси; формулы для их расчета приводятся во всех справочниках по теории управления судами).

На основании непрерывной модели (16) формируем дискретную модель:

$$\begin{aligned} V_{yK+1} &= a_{11} V_{yK} + a_{12} \omega_K + b_1 \delta_K + F_K, \\ \omega_{K+1} &= a_{21} V_{yK} + a_{22} \omega_K + b_2 \delta_K + l F_K, \\ F_{K+1} &= \mu_F F_K + \sigma_F w_{1K}, \\ V_{TyK+1} &= \mu_V V_{TyK} + \sigma_V w_{2K}, \end{aligned} \quad (17)$$

оставляя для параметров модели прежнее обозначение, именно эти параметры a_{ij} и b_i подлежат идентификации.

Уравнения измерений имеют вид:

$$\begin{aligned} y_{VK} &= V_{GPSK} \sin(\Pi U_{GPSK} - K_K) + v_{VK}; \\ y_{\omega K} &= \omega_K + v_{\omega K}, \end{aligned} \quad (18)$$

где V_{GPS} , ΠU_{GPS} – скорость относительно грунта и путевой угол, измеряемые навигационной аппаратурой потребителя спутниковой навигационной системой (СНС); v_{ω} , v_V – белозумные процессы.

Для целей идентификации объект производит маневр типа «зигзаг», задаваемый следующим управлением руля. В начальный момент времени фиксируется курс движения судна K_0 . Угол рыскания ψ рассчитывается по формуле $\psi = K - K_0$, где K – текущий курс. В начальный момент времени руль с максимальной скоростью переключается на правый борт на угол $\delta = \delta_0$. В таком положении руль выдерживается до момента, пока значение угла рыскания ψ не превысит заданного значения ψ_0 . Затем руль переключается на левый борт на угол $\delta = -\delta_0$ и находится в таком положении до момента, пока угол рыскания не достигнет значения $(-\psi_0)$ и т.д. Такой маневр будем обозначать (ψ_0/δ_0) .

В методических целях в уравнении (17) не учтена зависимость параметров дискретной модели a_{ij} и b_i от скорости движения (эта зависимость известна, и всегда можно пересчитать параметры дискретной модели в параметры непрерывной с учетом значений относительной скорости, измеряемой относительным лагом, или оценить относительную скорость по предлагаемой методике с использованием уравнений продольного движения судна). Практикой подтверждается, что при маневре «зигзаг» скорость относительно воды практически постоянна после второй переключки руля.

Связь первого измерения (18) с компонентами вектора состояния имеет вид $y_{VK} = V_{GPSK} \sin(\Pi U_{GPSK} - K_K) + v_{V_T K} = V_0 \sin \alpha_{DK} + V_T \sin(K_T - K_0 - \psi_K) + v_{V_T K}$, (19) где V_0 – относительная скорость движения (скорость относительно воды), α_D – угол дрейфа; V_T – скорость течения, K_T – курс течения.

Первое слагаемое в выражении (19) есть V_y , а второе слагаемое, после раскрытия синуса разности углов, с учетом малых первого порядка по углу ψ представимо, как $V_T \sin(K_T - K_0) + V_T \cos(K_T - K_0) \psi_K$. При этом $V_T \sin(K_T - K_0) = V_{Ty}$, а вторым слагаемым можно пренебречь, если выбрать курс K_0 пересекающим основной поток течения.

Матрица измерения приобретает вид $H = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \end{bmatrix}$.

Компоненты вектора состояния наблюдаемы в соответствии с критерием наблюдаемости.

Ошибка прогноза измерения y_{VK+1} с использованием первого уравнения модели (17) в соответствии с предложенным подходом формируется по предыдущим измерениям

$$\varepsilon_{K+1} = y_{VK+1} - \hat{y}_{VK+1} = y_{VK+1} - (a_{11} y_{VK} + a_{12} \omega_K + b_1 \delta_K).$$

Используя все измерения от первого до N -го, суммируя ошибки прогноза и минимизируя критерий (8), определим первое приближение параметров модели для первого уравнения. Аналогично определяем параметры модели во втором уравнении системы (17). Оценив вектор состояния системы (17) на основании первого приближения параметров модели, имеем оценки компонент вектора состояния, приведенные на рис. 1.

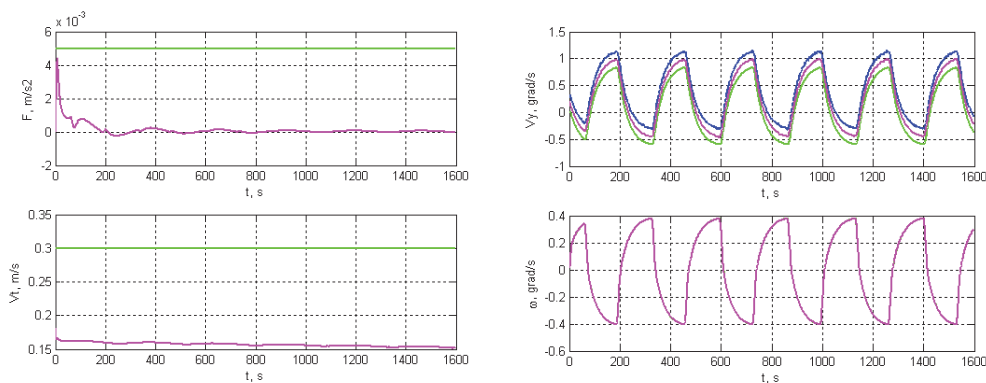


Рис. 1. Оценка компонент вектора состояния системы (16) на основании первого приближения параметров модели

Из приведенных графиков видно, что угловая скорость оценивается достаточно точно (совпадают кривые истинных значений и оценок); для компоненты V_y оценка находится между кривыми измерения и истинных значений; возмущающая сила практически не оценивается (истинное значение нормализованной силы $5 \cdot 10^{-3} \text{ м/с}^2$); составляющая течения оценивается в половину значения (истинное значение $0,3 \text{ м/с}$).

Формируем ошибку прогноза с использованием параметров первого приближения для второго с учетом оцененных значений ветрового воздействия и течения

$$\varepsilon_{K+1} = y_{VK+1} - \hat{y}_{VK+1} = y_{VK+1} - \left\{ \left[\tilde{a}_{11} (y_{VK} - \hat{V}_{TK}) + \tilde{a}_{12} \omega_K + \tilde{b}_1 \delta_K + \hat{F}_K \right] - \hat{V}_{TK+1} \right\}.$$

Для следующих итераций определения параметров поступаем аналогично.

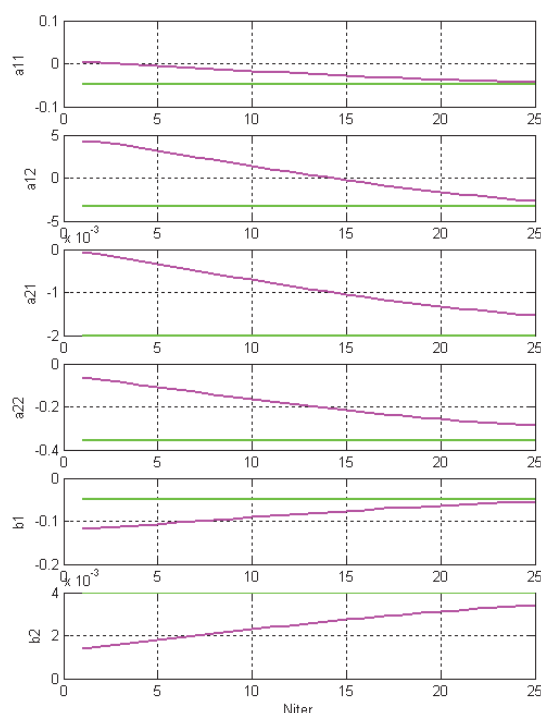


Рис. 2. Результаты моделирования процесса уточнения параметров модели при последовательности 25 итераций

На основании совокупности ошибок прогноза оцениваем второе приближение параметров. Аналогично поступаем и для второго уравнения системы (17). Проводя несколько итераций, получаем каждый раз уточнение параметров модели (рис. 2) и оценок параметров (рис. 3). Горизонтальные прямые на рис. 2 соответствуют истинным значениям параметров.

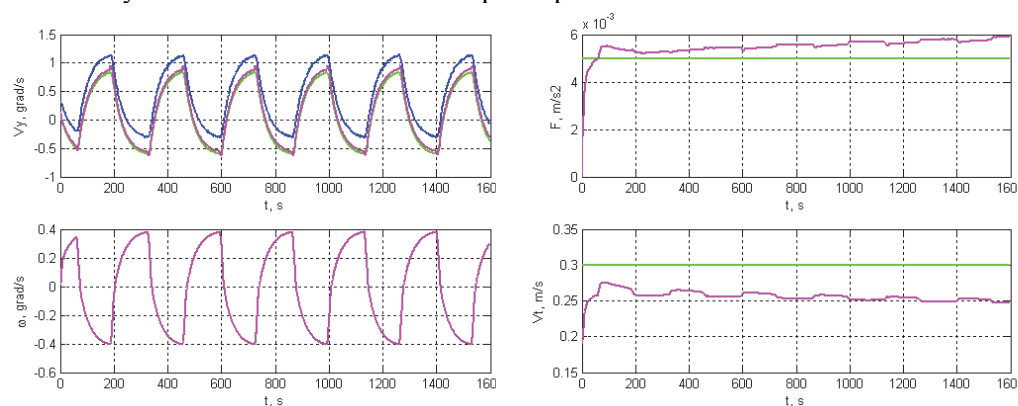


Рис. 3. Оценка вектора состояния на основании 25-го приближения параметров модели

Из рис. 3 видно, что оценка возмущений производится с достаточной степенью точности, оценки боковой составляющей скорости практически совпадают с истинными значениями.

На 25-й итерации были получены следующие погрешности оценки параметров модели: для a_{11} – 10%, для a_{12} – 10%, для a_{21} – 25%, для a_{22} – 20%, для v_1 – 20%, для v_2 – 15% от истинных значений.

Результаты моделирования показывают, что процесс уточнения параметров модели при проведении итераций сходится, при этом погрешность оценки параметров модели составляет 10-15 % от истинного значения.

Описанная методика была апробирована при испытаниях канала управления в навигационно-управляющем комплексе на гидрографическом судне. Идентифицированные параметры модели использовались для синтеза закона управления, качество которого подтверждено высокой точностью стабилизации на системе галсов [15].

Заключение

Анализ традиционно используемых методов идентификации параметров модели подвижных объектов в пространстве состояния показал, что их недостатки связаны с высокой чувствительностью параметров к уровню воздействующих возмущений.

Предложен подход идентификации параметров модели морских подвижных объектов в условиях воздействия на них внешних медленноменяющихся возмущений (в пренебрежении высокочастотными составляющими) и начального незнания параметров модели, обеспечивающий малую зависимость идентифицируемых параметров от внешних возмущений.

Предлагаемый подход был реализован в программном обеспечении навигационно-управляющей системы для стабилизации гидрографического судна. Результаты мореходных испытаний показали достаточно высокое качество стаби-

лизации судна при использовании закона управления, синтезированного на основе идентифицированных параметров модели в условиях ветро-волновых возмущений.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Fossen, T.I.** Guidance and Control of Ocean Vehicles. John Wiley & Sons. New York, 1999, 480 p.
2. **Ljung, L.** System Identification. Theory for the user: Second Edition, New Jersey, Prentice-Hall, 1999, 610p.
3. **Ljung, L., Soderstrom, T.** Theory and Practice of Recursive Identification. : MIT Press, London, 1985, 530p.
4. **Astrom, K.J., Kallstrom, C.G.** Identification of ship steering dynamics. // *Automatica*. 1976, v. 12, № 1, pp. 9-22
5. **Astrom, K.J., Kallstrom, C.G.** Experiences of System Identification Applied of Ship Steering. *Automatica*. 1981, V.17, No.1, pp.187-198.
6. **Pereira, J., Duncan, A.** System identification of underwater vehicles //Proceedings of the Underwater Technology 2000 conference 23-26 May 2000, Tokyo, Japan
7. **Tiano, A., Carreras, M., Ridao, P., Zirilli, A.** On the identification of non linear models of unmanned underwater vehicles //Proceedings of the 10th Mediterranean Conference on Control and Automation - MED2002 Lisbon, Portugal, July 9-12, 2002.
8. **Сотникова, М.В.** Особенности идентификации параметров линейной модели бокового движения судна //Гирскопия и навигация, № 4, 2011. - С. 84-91.
9. **Van Overschee, P., De Moor, B.** Subspace identification for linear systems theory: implementation – applications, Kluwer Academic Publishers, Boston/London/Dordrecht, 1996, 254 p.
10. **Mercure, G., Bako, L.** Parameterization and identification of multivariable state-space systems: a canonical approach // *Automatica*, № 47, 2011, pp. 1547–1555.
11. **Dohler, M., Mevel, L.** Fast Multi-Order Stochastic Subspace Identification Proceedings of the 18th IFAC World Congress Milano (Italy) August 28 - September 2, 2011
12. **Дмитриев, С.П.** Задачи навигации и управления при стабилизации судна на траектории / С.П. Дмитриев, А.Е. Пелевин. – СПб.:ЦНИИ «Электронприбор», 2004, 160 с.
13. **Пелевин, А.Е.** Идентификация параметров модели морского подвижного объекта при периодическом движении с активным управлением // Гирскопия и навигация. - 2008. - № 4. С. 29-39. (**Pelevin A.E.** Parameter Identification for a Model of a Marine Vehicle Moving Periodically Under Active Control// *Gyroscopy and Navigation*, 2010, Vol. 1, No. 1, pp. 37–42. Pleiades Publishing, Ltd.)
14. **Petersen, I.R., Savkin, A.V.** Robust Kalman filtering for signals and systems with large uncertainties. Birkhauser, Boston, 1999, 200p.
15. **Dmitriev, S.P., Pelevin, A.E.** Optimization of the Ship's Navigation and Controlling System and the Results of the Sea Trials. //IEEE A&E Systems Magazine, January, 2005. – P. 25-27.

Abstract. The problem of identifying parameters of a model for a moving vehicle under external disturbances is considered. The latter are known to significantly affect the accuracy of model parameters. An approach to identification of model parameters under external disturbances is proposed. Estimates of the parameters are generated using an iterative procedure involving estimation of the vehicle state vector, which includes disturbance, and estimation of the vehicle model parameters using the method of least squares. The identified parameters are sufficiently stable to various external disturbances. The simulation results of the proposed approach are given. The approach was tested at full-scale tests.

Keywords: identification of model parameters, Kalman filter, least-squares method, iterative algorithm, simulation

Материал поступил 30.10.14