

ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ И АВТОМАТИЗАЦИЯ НА ТРАНСПОРТЕ

DOI: 10.21821/2309-5180-2017-9-1-211-220

REDUCED-ORDER OBSERVER ALGORITHM COURSE MANAGEMENT SYSTEM OF THE SHIP TO ASSESS DISTURBANCE AND NOISE MEASUREMENTS

V. V. Saharov, A. A. Chertkov, S. V. Saburov

Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping,
St. Petersburg, Russian Federation.

To increase reliability and ensure the required quality indicators of the automatic control system course ship need reliable information on the dynamic model of the State vector, adequate to the real object. When exposed to ship outside disturbances, resulting in noise in the measured signals are required to ensure that lowering noise by filtering and sensor application of mathematical information. Sensors can be synthesized using dynamic observers and evaluators. Since the conditions of use of autopilots vector state is always available for the dimension, you must manage the process on the vector output. For optimal control requires data recovery on vector output. When moving a ship in the midst of the excitement of external perturbations cause additional components of error in assessing the vector state. This significantly deteriorate the qualitative indices of ship autopilots complexes and their increasing need to use methods and computational procedures stochastic filtering.

The method and algorithm of dynamic observers reduced dimensionality (Observer David Luenberger), notable for the fact that it reduces the error estimation of the vector of state variables of the channel object, functioning in the face of changing external Wednesday, by constructing a model of the extended status object system Wednesday. Score is based on algorithms of linearization of nonlinear state-space models using optimal filtration, laboratory matrix instrumentation and computer technology. An example of the calculation of the three-dimensional dynamic observer to evaluate the perturbation vectors and noise measurements made on the basis of the proposed algorithm. The results of the evaluation of state variables and perturbations produced using canonical forms of State equations correspond to the best (performance) the transitional processes in these dynamic models when translating from a given initial state in the settled condition in minimal time.

Keywords: dynamic model of a ship, the observer reduced dimension vector output, algorithm, modal synthesis method of systems.

For citation:

Saharov, Vladimir V., Alexandr A. Chertkov, and Sergei V. Saburov. "Reduced-order observer algorithm course management system of the ship to assess disturbance and noise measurements." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S.O. Makarova* 9.1 (2017): 211–220. DOI: 10.21821/2309-5180-2017-9-1-211-220.

УДК. 621.398.04

АЛГОРИТМ НАБЛЮДАТЕЛЯ ПОНИЖЕННОГО ПОРЯДКА СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ КУРСОМ СУДНА ДЛЯ ОЦЕНКИ ВОЗМУЩЕНИЙ И ШУМОВ ИЗМЕРЕНИЙ

В. В. Сахаров, А. А. Чертков, С. В. Сабуров

ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала С. О. Макарова»,
Санкт-Петербург, Российская Федерация.

Для повышения надежности и обеспечения требуемых качественных показателей системы автоматического управления курсом судна необходима достоверная информация о векторе состояния динамической модели, адекватной реальному объекту. При воздействии на судно внешних возмущений, приводящих к появлению помех в измеряемых сигналах, требуется обеспечить понижение уровня шумов путем фильтрации и примене-

ния математических датчиков информации. Датчики могут быть синтезированы с использованием динамических наблюдателей и оценщиков. Поскольку в условиях эксплуатации авторулевых вектор состояния не всегда доступен для измерения, необходимо управлять процессом по вектору выхода. Для оптимального управления требуется восстановление информации по вектору выхода. При движении судна в условиях волнения внешние возмущения приводят к возникновению дополнительных составляющих погрешности в оценке вектора состояния. При этом значительно ухудшаются качественные показатели судовых авторулевых комплексов, и для их повышения требуется использовать методы и вычислительные процедуры стохастической фильтрации.

Рассматривается метод и алгоритм динамического наблюдателя пониженной размерности (наблюдателя Давида Луенбергера), отличающийся тем, что он позволяет уменьшить погрешность оценки вектора переменных состояния судового объекта, функционирующего в условиях изменяющейся внешней среды, путем построения модели состояния расширенной системы «объект – среда». Оценка производится на основе алгоритмов линеаризации нелинейных моделей в пространстве состояния с использованием оптимальной фильтрации, инструментария матричной лаборатории и компьютерных технологий. Приведен пример расчета трехмерного динамического наблюдателя для оценки векторов возмущений и шумов измерений, выполненный на основе предложенного алгоритма. Результаты оценки переменных состояния и возмущений, полученные с использованием канонических форм уравнений состояния, соответствуют оптимальным (по быстрдействию) переходным процессам в рассматриваемых динамических моделях при переводе из заданного начального состояния в установившееся состояние за минимальное время.

Ключевые слова: динамическая модель судна, наблюдатель пониженной размерности, вектор выхода, алгоритм, модальный метод синтеза систем.

Для цитирования:

Сахаров В. В. Алгоритм наблюдателя пониженного порядка системы управления курсом судна для оценки возмущений и шумов измерений / В. В. Сахаров, А. А. Чертков, С. В. Сабуров // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2017. — Т. 9. — № 1. — С. 11–220. DOI: 10.21821/2309-5180-2017-9-1-211-220.

Введение

Системы автоматизации и управления технологическими процессами на современных водоизмещающих судах характеризуются высокой размерностью и сложностью. Для обеспечения оптимального управления судовыми динамическими системами требуется получение достоверной информации о переменных состояния. Обеспечение заданной точности и надежности управления объектом при воздействии возмущений на измерения углов курса и крена, а также угловой скорости вращения судна требует компромиссных решений, связанных с выбором быстрдействия системы и точности оценки переменных состояния. Вектор состояния не всегда доступен для измерений. Если измерение вектора состояния затруднено по каким-либо причинам, можно воспользоваться математическими датчиками, выполненными на основе наблюдателей неполной размерности. Измерения возмущений связаны с появлением дополнительных составляющих ошибки оценки переменных состояния. Наряду с инструментальными датчиками информации, применение математических датчиков позволяет идентифицировать параметры и структуру управляемых систем средствами и методами теории идентификации с оценками на основе аналоговых и цифровых фильтров. В системах реального времени оценки должны производиться с использованием методов и вычислительных процедур стохастической и, в частности, биномиальной фильтрации.

Развитие и совершенствование способов конструирования динамических наблюдателей, предложенных в [1] – [7], а также их практическое применение на судах позволяют значительно повысить эффективность и надежность эксплуатации объектов водного транспорта средствами автоматизации, создать механизм алгоритмизации процессов энергосбережения. С учетом специфики воздействия на объект внешних сил и моментов в допустимой области вариации параметров нелинейные модели, как показано в [5], [6] и [10] – [12], приводятся к линейным моделям. Вместе с тем практическое использование наблюдателей для оценки векторов возмущений и шумов измерений на конкретных объектах также имеет свою специфику, которая должна учитываться в процессе синтеза [13] – [14].

Кроме наблюдателей полного порядка, или наблюдателей Калмана, у которых размерность вектора состояния равна размерности вектора состояния объекта, могут быть предложены также наблюдатели Давида Луенбергера пониженного порядка [4]. Такие наблюдатели используют информацию о состоянии объекта, непосредственно содержащуюся в измерениях вектора выхода. Это позволяет построить алгоритм оценки с помощью модели порядка $(n - p)$, где $p = \text{rank}(C)$. Обычно $p = 1$.

Основная часть

Покажем возможность построения наблюдателя пониженного порядка на примере стационарного полностью наблюдаемого объекта, уравнения состояния которого имеют вид:

$$\begin{aligned}\dot{x}(t) &= Ax(t) + Bu(t); \\ y(t) &= Cx(t),\end{aligned}\tag{1}$$

где A — $(n \times n)$ -матрица; B — $(n \times k)$ -матрица и C — $(p \times n)$ -матрица постоянных коэффициентов; $x(t)$ — $(n \times 1)$ -мерный вектор состояния; $u(t)$ и $y(t)$ — векторы управления и выхода соответствующей размерности. Измерения производятся для части переменных состояния, если $p < n$. Для системы управления с одним входом матрица B для системы с одним входом имеет размерность $(n \times 1)$.

Пусть ранг матрицы C равен p . Для упрощения уравнения выхода выполним преобразование базиса в уравнении (1). Выберем произвольную $(n - p) \times n$ -матрицу F так, чтобы матрица

$$T = \begin{bmatrix} F \\ C \end{bmatrix}$$

была невырожденной. Это всегда возможно выполнить, так как $\text{rank } C = p$. Введем новый вектор состояния $z(t) = T \cdot x(t)$ и представим его в данном виде:

$$z(t) = \begin{bmatrix} w(t) \\ y(t) \end{bmatrix} \quad \left\{ \begin{array}{l} n - p; \\ p, \end{array} \right.$$

где $w(t) \in R^{n-p}$, $y(t) \in R^p$, т. е. выходы объекта совпадают в выбранном базисе с последними p компонентами его вектора состояния. Выполнив преобразование базиса с матрицей T , перейдем к уравнениям состояния:

$$\begin{bmatrix} \dot{w}(t) \\ \dot{y}(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} \\ A_{21} & A_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} w(t) \\ y(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} B_1 \\ B_2 \end{bmatrix} u(t).\tag{2}$$

Из системы (2) можно выделить структуру (подсистему) порядка $(n - p)$ с известными (доступными измерению) входами $u(t)$, $y(t)$. Заметим, для нее всегда можно выбрать требуемые коэффициенты характеристического уравнения.

Рассмотрим алгоритм синтеза наблюдателя пониженного порядка на примере наблюдателя $(n - 1)$ порядка для системы со скалярным выходом ($\text{rank } C = 1$). Алгоритм синтеза наблюдателя пониженной размерности состоит из следующих шагов [4], [9].

1. Путем линейного преобразования уравнения состояния объекта (матрицы A , B , C) приведем преобразования к форме идентификационного канонического представления (ИКП), или наблюдаемой форме Давида Луенбергера [4], при которой матрица A является транспонированной матрицей Фробениуса:

$$A_F = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 0 & 1 & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & 0 & \dots & 1 \\ -\alpha_n & -\alpha_{n-1} & -\alpha_{n-2} & \dots & -\alpha_1 \end{bmatrix},\tag{3}$$

где $\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_n$ — коэффициенты характеристического многочлена объекта; матрица C равна

$$C = [0, \dots, 0 \ 1].\tag{4}$$

2. Выберем желаемые коэффициенты β_i характеристического полинома наблюдателя:

$$(\det I_{n-1} - A_n) = s^{n-1} + \beta_1 s^{n-2} + \dots + \beta_{n-1}.$$

3. Строим матрицу преобразования P вида:

$$P = \begin{bmatrix} & & & -\beta_{n-1} \\ & I_{n-1} & & -\beta_{n-2} \\ & & \dots & \\ & & & -\beta_1 \\ 0 & \dots & 0 & 1 \end{bmatrix}; \quad P^{-1} = \begin{bmatrix} & & & \beta_{n-1} \\ & I_{n-1} & & \beta_{n-2} \\ & & \dots & \\ & & & \beta_1 \\ 0 & \dots & 0 & 1 \end{bmatrix}. \quad (5)$$

Нетрудно заметить, что если матрица приведена к виду ИКП, то в результате преобразования получим

$$\tilde{A} = PAP^{-1} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & \dots & 0 & -\beta_{n-1} & (\alpha_1 - \beta_1)\beta_{n-1} - \alpha_n \\ 1 & 0 & \dots & 0 & -\beta_{n-2} & (\alpha_1 - \beta_1)\beta_{n-2} - \alpha_{n-1} + \beta_{n-1} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & \dots & 1 & -\beta_1 & (\alpha_1 - \beta_1)\beta_1 - \alpha_2 + \beta_2 \\ 0 & 0 & \dots & 0 & 1 & -\alpha_1 + \beta_1 \end{bmatrix}, \quad (6)$$

а также

$$\tilde{B} = \begin{bmatrix} b_1 - \beta_{n-1}b_n \\ b_2 - \beta_{n-2}b_n \\ \dots \\ b_{n-1} - \beta_1b_n \\ b_n \end{bmatrix}. \quad (7)$$

Выделим из матрицы $\tilde{A}$ верхнюю треугольную подматрицу $\bar{A}$ порядка $(n-1)$ и расположим ее в верхнем левом углу матрицы $\tilde{A}$. образуем первые $(n-1)$ -строк матрицы $\tilde{B}$, из которых сформируем матрицу (вектор-столбец) $\bar{B}$. Введем обозначение верхних $(n-1)$ -строк последнего столбца матрицы $\tilde{A}$ символом $\bar{a}_n$. Тогда уравнение наблюдателя Луенбергера примет вид

$$\dot{\tilde{x}}(t) = \bar{A}\tilde{x}(t) + \bar{a}_n y(t) + \bar{B}u(t).$$

Для оценки вектора состояния в исходном базисе, представленном в форме ИКП, образуем вектор $\tilde{x}(t) = \text{col}\{\tilde{x}(t), y(t)\}$. Оценку состояния в базисе ИКП получим по формуле

$$\hat{x}(t) = P^{-1}\tilde{x}(t).$$

Рассмотрим процедуру синтеза наблюдателя $(n-1)$ -порядка для оценки возмущений и шумов измерений. Сначала выберем модель управляемого объекта с возмущениями, которые интерпретируются решениями дифференциальных уравнений с изменяющимися начальными условиями, что позволяет косвенно оценить влияние внешних воздействий. С учетом полученных оценок будем иметь модель внешних воздействий, которую введем в состав расширенной динамической системы (объект, внешние возмущения) и получим наблюдатель. В результате оценки будут содержать как оценки вектора состояния объекта, так и внешних воздействий.

В тех случаях, когда внешние воздействия моделируются рядами, состоящими из многочленов вида

$$\sum_{i=1}^N e^{\lambda_i t} P_i(t),$$

процедура синтеза наблюдателя значительно упрощается. Здесь $\lambda_i \in \Lambda$ — постоянные; $P_i(t)$ — многочлены с заданными коэффициентами. Упрощение обеспечивается за счет того, что такие модели представляют собой систему линейных дифференциальных уравнений с постоянными

коэффициентами, для которых, например, в системе MATLAB содержатся функции, предназначенные для исследования инвариантных во времени систем с помощью LTI (Linear Time Invariant) объектов. LTI-объекты можно исследовать во временной и частотной областях с помощью специальных функций практически в режимах прямых вычислений.

Рассмотрим алгоритм оценки внешних воздействий для модели объекта, заданной уравнениями состояния:

$$\begin{cases} \dot{x}(t) = A(t)x(t) + B(t)u(t) + f(t); \\ y(t) = C(t)x(t) + v(t), \end{cases} \quad (8)$$

при начальных условиях $x(t_0) = x_0$, $t \geq t_0$. Здесь $x(t) \in R^n$ — вектор состояния объекта; $u(t) \in R^m$, $y(t) \in R^l$ — векторы управления и выхода; $A(t)$, $B(t)$, $C(t)$ — матрицы линейной нестационарной системы; $f(t)$, $v(t)$ — воздействующие на объект, соответственно, внешние возмущения и шум (погрешность) измерений. В процессе синтеза наблюдателя выполняются измерения $u(t)$, $y(t)$, неизмеряемыми переменными являются $x(t)$, $f(t)$, $v(t)$.

Представим внешние воздействия $f(t)$, $v(t)$ в виде выходных процессов линейной системы, заданной в пространстве состояний уравнениями:

$$\begin{aligned} \dot{x}_c(t) &= A_c(t)x_c(t); \\ y_c(t) &= C_c(t)x_c(t); \quad x_c(t_0) = x_{c0}; \quad t \geq t_0, \end{aligned} \quad (9)$$

где $x_c(t)$ — вектор состояния среды размерности $(n_c \times 1)$; $y_c(t)$ — вектор выхода модели внешних возмущений размерности $((n_c + l) \times 1)$.

Заметим, что $y_c(t) = \text{col}\{f(t), v(t)\}$. A_c , C_c — известные матрицы. Составная матрица C_c

$$C_c = \begin{bmatrix} C_f \\ C_v \end{bmatrix}$$

содержит подматрицу C_f размерности $(n \times n_c)$ и подматрицу C_v размерности $(l \times n_c)$, которые определяют связь $x_c(t)$ и $f(t)$ с помехами $v(t)$ в (1). В системе (9) вектор начальных состояний x_{c0} также неизвестен.

Введем расширенный («совокупный») вектор состояния системы «объект – среда»:

$$\bar{x}(t) = (x(t), x_c(t)) \in R^{n \times n_c}.$$

Объединив уравнения (8) и (9), получим уравнения расширенной системы в виде:

$$\begin{aligned} \dot{\bar{x}}(t) &= \bar{A}(t)\bar{x}(t) + \bar{B}u(t); \\ \bar{y}(t) &= \bar{C}(t)\bar{x}(t); \quad \bar{x}(t_0) = \bar{x}_0; \quad t \geq t_0. \end{aligned} \quad (10)$$

Матрицы состояния, управления и выхода этой системы имеют вид:

$$\bar{A} = \begin{bmatrix} A & C_f \\ 0_{n_c \times n} & A_c \end{bmatrix}; \quad \bar{B} = \begin{bmatrix} B \\ 0_{n_c \times m} \end{bmatrix}; \quad \bar{C} = [C \quad C_v].$$

Видно, что для динамической системы (10) размерности $\bar{n} = n + n_c$ может быть предложен наблюдатель со следующей структурой:

$$\begin{cases} \dot{\hat{x}}(t) = \bar{A}(t)\hat{x}(t) + \bar{B}(t)u(t) + L(t)(y(t) - \hat{y}(t)); \\ \hat{y}(t) = \bar{C}(t)\hat{x}(t), \quad \hat{x}(t_0) = \hat{x}_0, \quad t \geq t_0. \end{cases} \quad (11)$$

где $\hat{x}(t) \in R^n$ — вектор состояния наблюдателя, служащий оценкой состояния модели «объект – среда»; $\hat{y}(t) \in R^l$ — вектор выхода наблюдателя, служащий оценкой выхода расширенной системы объекта и среды; $L(t)$ — матрица (размерности $(n \times l)$) коэффициентов обратной связи по невязке между выходами расширенной системы и наблюдателя.

Рассмотрим процедуру оценки влияния возмущений и шумов измерений на примере упрощенной модели судна:

$$I_x \frac{d^2\theta}{dt^2} = u(t) + M(t), \quad (12)$$

где I_x — момент инерции судна относительно продольной оси; $\theta(t)$ — угол крена судна; $u(t)$, $M(t)$ — управляющий и возмущающий моменты.

Если вектор $u(t)$ известен и угловая скорость крена $\omega_x(t) = \frac{d\theta}{dt}(t)$ доступна для измерений, то оценке подлежит возмущающий момент $M(t)$.

Для переменной $M(t)$, моделируемой линейной функцией $M(t) = M_0 + vt$ с неизвестными M_0 и v , предлагается модель

$$\begin{cases} \dot{M}(t) = v(t); \\ \dot{v}(t) = 0 \end{cases} \quad (13)$$

с неизвестными начальными условиями $M(0)$ и $v(0)$, на основе которой в работе получено уравнение состояния вида (10) с матрицами $\bar{A}, \bar{B}, \bar{C}$:

$$\bar{A} = \begin{bmatrix} 0 & 1/I_x & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}; \quad \bar{B} = \begin{bmatrix} 1/I_x \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}; \quad \bar{C} = [1 \quad 0 \quad 0]. \quad (14)$$

Построим модель наблюдателя $(n-1)$ -порядка для оценки возмущений и шумов измерений. Исходной моделью объекта будут служить уравнения расширенной системы (12), (13) с матрицами (14). На основе изложенного алгоритма уравнения состояния системы сначала приводятся к виду ИКП. С помощью формул (3) и (4) построим матрицы $\tilde{A}, \tilde{C}$ канонического вида:

$$\tilde{A} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}; \quad \tilde{C} = [0 \quad 0 \quad 1].$$

Затем определяются матрицы наблюдаемости Q исходной системы и $\tilde{Q}$ — системы вида ИКП. В результате находятся матрицы преобразования T :

$$Q = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & I_x^{-1} & 0 \\ 0 & 0 & I_x^{-1} \end{bmatrix}; \quad \tilde{Q} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \end{bmatrix};$$

$$T = Q^{-1}Q = \begin{bmatrix} 0 & 0 & I_x^{-1} \\ 0 & I_x^{-1} & 0 \\ 1 & 0 & 0 \end{bmatrix}.$$

Выберем желаемый порядок характеристического многочлена наблюдателя в форме многочлена Баттерворта, для которого известны переходные процессы и корни характеристического уравнения:

$$A_n(s) = s^2 + \sqrt{2}\Omega_0 s + \Omega_0^2,$$

где с помощью параметра Ω_0 задается быстродействие наблюдателя. Тогда $\beta_1 = \sqrt{2}\Omega_0$, $\beta_2 = \Omega_0^2$.

Матрицу преобразования P приведем к каноническому виду (5):

$$P = \begin{bmatrix} 1 & 0 & -\Omega_0^2 \\ 0 & 1 & -\sqrt{2}\Omega_0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}; \quad P^{-1} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & \Omega_0^2 \\ 0 & 1 & \sqrt{2}\Omega_0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}.$$

Теперь нетрудно с помощью (6) – (7) сформировать матрицы:

$$\tilde{A} = P\tilde{A}P^{-1} = \begin{bmatrix} 0 & -\Omega_0^2 & -\sqrt{2}\Omega_0^3 \\ 1 & -\sqrt{2}\Omega_0 & -\Omega_0^2 \\ 0 & 1 & \sqrt{2}\Omega_0 \end{bmatrix}; \quad \tilde{B} = \begin{bmatrix} -\Omega_0 I_x^{-1} \\ -\sqrt{2}\Omega_0 I_x^{-1} \\ J_x^{-1} \end{bmatrix}.$$

Матрица $\tilde{A}$ содержит подматрицу $\bar{A}$ второго порядка и верхние две строки матрицы $\tilde{B}$, из которых образуем вектор-столбец $\bar{B}$. Тогда имеем:

$$\bar{A} = \begin{bmatrix} 0 & -\Omega_0^2 \\ 1 & -\sqrt{2}\Omega_0 \end{bmatrix}; \quad \bar{a}_3 = \begin{bmatrix} -\sqrt{2}\Omega_0^3 \\ -\Omega_0^2 \end{bmatrix}; \quad \bar{B} = \begin{bmatrix} -\Omega_0^2 I_x^{-1} \\ -\sqrt{2}\Omega_0 I_x^{-1} \end{bmatrix}.$$

Приходим к уравнениям наблюдателя второго порядка:

$$\begin{cases} \dot{\hat{x}}_1(t) = -\Omega_0^2 \hat{x}_1(t) - \sqrt{2}\Omega_0^3 \omega_x(t) - \Omega_0^2 I_x^{-1} u(t); \\ \dot{\hat{x}}_2(t) = \hat{x}_1(t) - \sqrt{2}\Omega_0 \hat{x}_2(t) - \Omega_0^2 \omega_x(t) - \sqrt{2}\Omega_0 I_x^{-1} u(t). \end{cases} \quad (15)$$

Далее сформируем вектор $x(t) = \text{col}\{x(t), \omega_x(t)\}$. Для получения оценки состояния в исходном базисе (12), (13) найдем матрицу обратного перехода T_b — сначала от $\tilde{x}$ к $\tilde{x}$, затем — к $\hat{x}$:

$$T_b = T^{-1}P^{-1} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 \\ 0 & I_x & I_x \sqrt{2}\Omega_0 \\ I_x & 0 & I_x \Omega_0^2 \end{bmatrix}.$$

Вектор $\hat{x}(t) = T_b \tilde{x}(t)$ содержит оценки $\hat{\omega}_x(t)$, $\hat{M}(t)$ и $\hat{v}(t)$. В явном виде оценка возмущений моделируется соотношениями:

$$\begin{cases} \hat{M}(t) = I_x \hat{x}_1(t) + I_x \sqrt{2}\Omega_0 \hat{x}_2(t); \\ \hat{v}(t) = I_x \omega_x(t) + I_x \Omega_0^2 \hat{x}_2(t). \end{cases} \quad (16)$$

Видно, что с помощью уравнений (15), (16) конструируется наблюдатель Луенбергера для рассматриваемой задачи.

Вычисления для рассматриваемого примера выполнены с помощью программы, составленной в кодах MATLAB с использованием инструментария Symbolic Toolbox.

Результаты моделирования системы (16) в среде MATLAB представлены на рис. 1 и 2, где M — возмущающий момент, изменяющийся во времени; $\hat{M}$ — момент, восстановленный с помощью динамического наблюдателя; v и $\hat{v}$ — соответственно исходное и восстановленное значения шумов измерений.

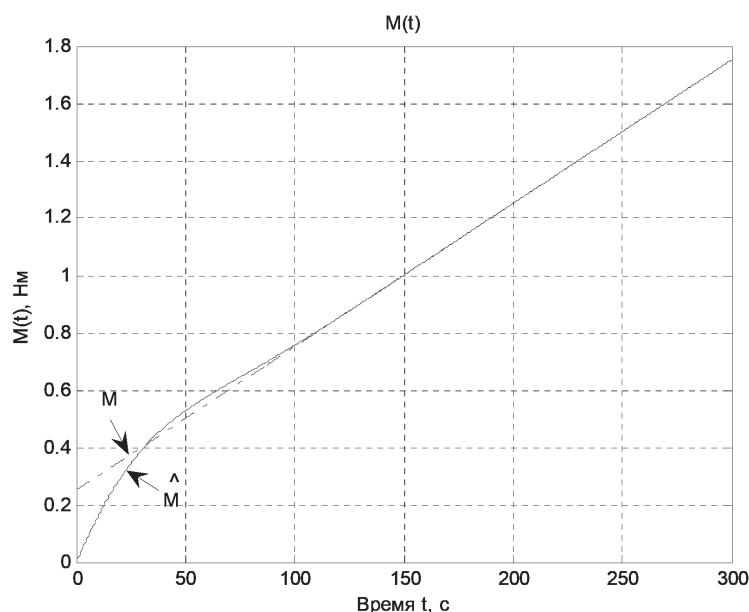


Рис. 1. Переходный процесс оценивания возмущений в обобщенной системе

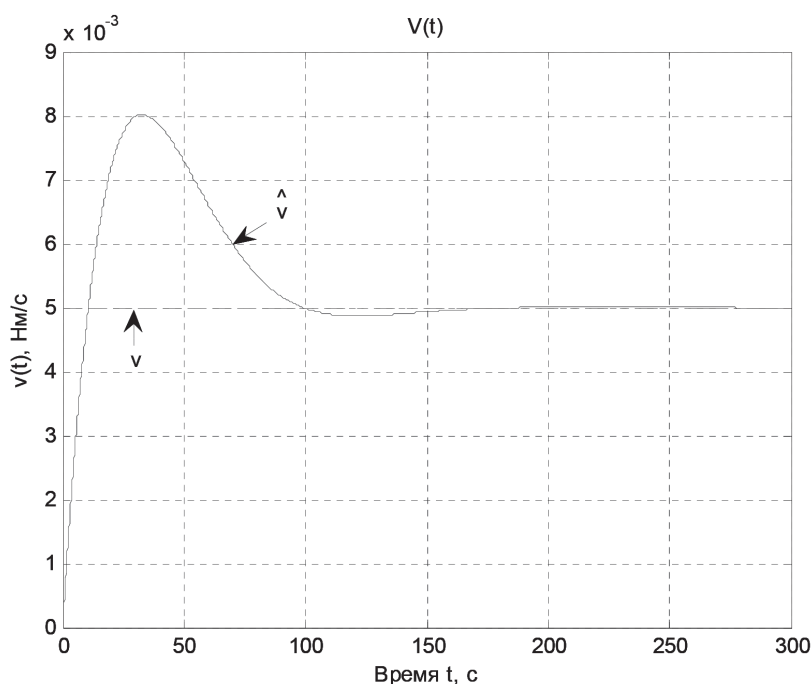


Рис. 2. Переходный процесс оценивания шумов измерений

Из графиков видно, что время переходного процесса в наблюдателе составляет не более 100 с. Параметры моделируемой системы: $I_x = 1000 \text{ кг} \cdot \text{м}^2$; $M(0) = 0,25 \text{ Н} \cdot \text{м}$; $v(0) = 5 \cdot 10^{-3} \text{ Н} \cdot \text{м/с}$; $\Omega_0 = 0,05 \text{ 1/с}$.

Выводы

В работе приводятся результаты исследований авторов, связанные с построением алгоритма наблюдателя пониженной размерности с использованием модели расширенной системы «объект – среда», что позволяет получить оценки векторов возмущений и шумов измерений по доступным измерениям вектору выхода — угловой скорости крена. Корректность предлагаемых технических решений подтверждается путем расчета оптимальных траекторий динамических объектов.

Для линейной модели наблюдателя устойчивость гарантируется обоснованным выбором характеристического многочлена наблюдателя — многочлена Баттерворта второго порядка, корни которого мало отличаются от корней характеристического уравнения замкнутой системы управления судном. Выбор обобщенной модели наблюдателя путем введения векторов $\bar{x}_1(t)$, $\bar{x}_2(t)$, $\bar{x}_3(t)$ позволяет предложить способ мониторинга датчиков угловой скорости и угла дрейфа, являющихся переменными состояния объекта. Наблюдатели фактически являются математическими датчиками информации и могут использоваться как для восстановления недоступных измерению переменных состояния, так и переменных, измерение которых в реальных условиях затруднено.

Предложенный алгоритм численной оценки вектора состояний средствами математического программирования может эффективно применяться на судах для управления технологическими процессами, плохо формализуемыми в математической форме.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Сазонов А. Е. Модальный метод синтеза наблюдателя для системы управления курсом судна / А. Е. Сазонов, В. В. Сахаров, А. А. Чертков // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2016. — № 4 (38). — С. 211–223. DOI: 10.21821/2309-5180-2016-8-4-211-223.

2. Сахаров В. В. Синтез оптимального оценивателя для системы управления судовым динамическим объектом / В. В. Сахаров, О. В. Шергина, А. А. Чертков // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2013. — № 1 (20). — С. 26–31.
3. Ramdani N. Computing reachable sets for uncertain nonlinear monotone systems. / N. Ramdani, N. Meslem, Y. Candau // Nonlinear Analysis: Hybrid Systems. — 2010. — Vol. 4. — Is. 2. — Pp. 263–278. DOI: 10.1016/j.nahs.2009.10.002.
4. Luenberger D. G. Introduction to Dynamic Systems, Theory, Models, and Applications / D. G. Luenberger. — New York: John Wiley & Sons, 1979. — 446 p. DOI: 10.1002/bs.3830260412.
5. Андриевский Б. Р. Избранные главы теории автоматического управления с примерами на языке MatLab / Б. Р. Андриевский, А. Л. Фрадков. — СПб.: Наука, 2000. — 475 с.
6. Yang J. A complete solution to a simple case of dynamic observer error linearization: New approach to observer error linearization / J. Yang, J. Back, J. H. Seo // IEICE transactions on fundamentals of electronics, communications and computer sciences. — 2011. — Vol. 94. — No. 1. — Pp. 424–429.
7. Митряшкин Ю. В. Линейные модели управляемых динамических систем. Ч. 1. Уравнения «вход – выход» и «вход – состояние – выход»: учеб. пособие / Ю. В. Митряшкин. — М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2008. — 222 с.
8. Hui S. Observer design for systems with unknown inputs / S. Hui, S. H. Zak // International Journal of Applied Mathematics and Computer Science. — 2005. — Vol. 15. — Is. 4. — Pp. 431–446.
9. Chen X. State observer for a class of nonlinear systems and its application to machine vision / X. Chen and H. Kano // IEEE Transactions on Automatic Control. — 2004. — Vol. 49. — Is. 11. — Pp. 2085–2091. DOI: 10.1109/TAC.2004.837529.
10. Boutat D. On the transformation of nonlinear dynamical systems into the Extended Nonlinear Observable Canonical Form / D. Boutat, K. Busawon // International Journal of Control. — 2011. — Vol. 84. — Is. 1. — Pp. 94–106. DOI: 10.1080/00207179.2010.541285.
11. Zheng G. A single output dependent observability normal form / G. Zheng, D. Boutat, and J. P. Barbot // SIAM Journal on Control and Optimization. — 2007. — Vol. 46. — Is. 6. — Pp. 2242–2255. DOI: 10.1137/050627137.
12. Tomera M. Nonlinear controller design of a ship autopilot / M. Tomera // International Journal of Applied Mathematics and Computer Science. — 2010. — Vol. 20. — Is. 2. — Pp. 271–280. DOI: 10.2478/v10006-010-0020-8.
13. Wang Y. Observer design using a generalized time-scaled block triangular observer form / Y. Wang, A. F. Lynch // Systems & Control Letters. — 2009. — Vol. 58. — Is. 5. — Pp. 346–352. DOI: 10.1016/j.sysconle.2008.12.005.
14. McGookin E. W. Ship steering control system optimisation using genetic algorithms / E. W. McGookin, D. J. Murray-Smith, Y. Li, T. I. Fossen // Control Engineering Practice. — 2000. — Vol. 8. — Is. 4. — Pp. 429–443. DOI: 10.1016/S0967-0661(99)00159-8.

REFERENCES

1. Sazonov, Anatoliy Efimovich, Vladimir Vasilevich Saharov, and Alexandr Alexandrovich Chertkov. “A modal method for the synthesis of an observer for heading control.” *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 4(38) (2016): 211–223. DOI: 10.21821/2309-5180-2016-8-4-211-223.
2. Saharov, V. V., O. V. Shergina, and A. A. Chertkov. “Optimal estimator synthesis for ship dynamic object control.” *Vestnik gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 1(20) (2013): 26–31.
3. Ramdani, Nacim, Nacim Meslem, and Yves Candau. “Computing reachable sets for uncertain nonlinear monotone systems.” *Nonlinear Analysis: Hybrid Systems* 4.2 (2010): 263–278. DOI: 10.1016/j.nahs.2009.10.002.
4. Luenberger D. G. *Introduction to Dynamic Systems, Theory, Models, and Applications*. New York: John Wiley & Sons, 1979. DOI: 10.1002/bs.3830260412.
5. Andrievskij, B. R., and A. L. Fradkov. *Izbrannye glavy teorii avtomaticheskogo upravleniya s primerami na jazyke MatLab*. SPb.: Nauka, 2000.
6. Yang, J., J. Back, and J. H. Seo. “A complete solution to a simple case of dynamic observer error linearization: New approach to observer error linearization.” *IEICE transactions on fundamentals of electronics, communications and computer sciences* 94.1 (2011): 424–429.

7. Mitrajshkin, Ju. V. *Linejnye modeli upravljajemyh dinamicheskikh sistem. Chast 1. Uravnenija «vhod — vyhod» i «vhod — sostojanie — vyhod»: uchebnoe posobie*. M.: izd-vo MGTU im. N. Je. Baumana, 2008.
8. Hui, Stefen, and Stanislaw H. Zak. "Observer design for systems with unknown inputs." *International Journal of Applied Mathematics and Computer Science* 15.4 (2005): 431–446.
9. Chen, Xinkai, and Hiroyuki Kano. "State observer for a class of nonlinear systems and its application to machine vision." *IEEE Transactions on Automatic Control* 49.11 (2004): 2085–2091. DOI: 10.1109/TAC.2004.837529.
10. Boutat, Driss, and Krishna Busawon. "On the transformation of nonlinear dynamical systems into the extended nonlinear observable canonical form." *International Journal of Control* 84.1 (2011): 94–106. DOI: 10.1080/00207179.2010.541285.
11. Zheng, Gang, Driss Boutat, and Jean-Pierre Barbot. "Single output-dependent observability normal form." *SIAM Journal on Control and Optimization* 46.6 (2007): 2242–2255. DOI:10.1137/050627137.
12. Tomera, M. "Nonlinear controller design of a ship autopilot." *International Journal of Applied Mathematics and Computer Science* 20.2 (2010): 271–280. DOI: 10.2478/v10006-010-0020-8.
13. Wang, Yebin, and Alan F. Lynch. "Observer design using a generalized time-scaled block triangular observer form." *Systems & Control Letters* 58.5 (2009): 346–352. DOI: 10.1016/j.sysconle.2008.12.005.
14. McGookin, Euan W., David J. Murray-Smith, Yun Li, and Thor I. Fossen. "Ship steering control system optimisation using genetic algorithms." *Control Engineering Practice* 8.4 (2000): 429–443. DOI: 10.1016/S0967-0661(99)00159-8.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Сахаров Владимир Васильевич —
 доктор технических наук, профессор
 ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени
 адмирала С.О. Макарова»
 198035, Российская Федерация, Санкт-Петербург,
 ул. Двинская 5/7
 e-mail: _saharov@rambler.ru

Чертков Александр Александрович —
 кандидат технических наук, доцент
 ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени
 адмирала С.О. Макарова»
 198035, Российская Федерация, Санкт-Петербург,
 ул. Двинская 5/7
 e-mail: chertkov51@mail.ru

Сабуров Сергей Валерьевич — аспирант
Научный руководитель:
 Сахаров Владимир Васильевич
 ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени
 адмирала С. О. Макарова»
 198035, Российская Федерация, Санкт-Петербург,
 ул. Двинская 5/7
 e-mail: kaf_osnivr@gumrf.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Saharov, Vladimir V. —
 Dr. of Technical Sciences, professor
 Admiral Makarov State University
 of Maritime and Inland Shipping
 5/7 Dvinskaya Str., St. Petersburg 198035,
 Russian Federation
 e-mail: _saharov@rambler.ru

Chertkov, Alexandr A. —
 PhD, associate professor
 Admiral Makarov State University
 of Maritime and Inland Shipping
 5/7 Dvinskaya Str., St. Petersburg 198035,
 Russian Federation
 e-mail: chertkov51@mail.ru

Saburov, Sergei V. — Postgraduate
Supervisor:
 Saharov, Vladimir V.
 Admiral Makarov State University
 of Maritime and Inland Shipping
 5/7 Dvinskaya Str., St. Petersburg 198035,
 Russian Federation
 e-mail: kaf_osnivr@gumrf.ru

Статья поступила в редакцию 9 ноября 2016 г.
 Received: November 9, 2016.