

ОЦЕНИВАНИЕ ПОЛИГАРМОНИЧЕСКИХ ВНЕШНИХ ВОЗМУЩЕНИЙ ДЛЯ АВТОНОМНОГО ПОДВОДНОГО АППАРАТА

М.В. Сотникова

(Санкт-Петербургский государственный университет)

Рассматривается задача оценивания параметров полигармонических внешних возмущений, действующих на автономный подводный аппарат. Предлагаются два подхода к оцениванию, в основе которых лежит построение асимптотических наблюдателей специального вида. Полученные результаты продемонстрированы на примерах имитационного моделирования процессов оценивания возмущений для автономного подводного аппарата, движущегося в условиях волнения.

Ключевые слова: внешние возмущения, оценивание, асимптотический наблюдатель, моделирование, подвижный объект

Введение. В работе рассматривается задача оценивания параметров полигармонических внешних возмущений, действующих на автономный подводный аппарат в горизонтальной плоскости. Существо задачи состоит в определении частот и амплитуд отдельных гармонических составляющих возмущений, позволяющих судить об интенсивности и спектральных свойствах морского волнения, по измеряемым параметрам движения, таким как угол курса или угол перекладки вертикального руля.

В работе предлагаются два подхода к получению указанных оценок на основе синтеза асимптотических наблюдателей специального вида, исследуются вопросы выбора настраиваемых элементов этих наблюдателей. Полученные оценки могут быть использованы для адаптивной перенастройки многоцелевых законов управления, обеспечивающих желаемое качество функционирования морских подвижных объектов в условиях ветроволновых возмущений [1–3].

Отметим, что существуют и иные подходы к оцениванию характеристик волнения, которые в ряде случаев позволяют получить более точные результаты, однако предполагают наличие дополнительного оборудования и не всегда могут быть использованы на практике, в частности для автономных подводных аппаратов.

Известным классическим методом оценивания возмущений является построение фильтра Калмана для расширенной математической модели объекта, включающей возмущения [4]. Формирование такой модели в рамках рассматриваемой проблемы возможно лишь в том случае, если известны частоты полигармонического возмущения. При этом оценка этих час-

тот на основе измеряемых сигналов представляет собой отдельную задачу. В частности, в работе [5] предложен метод синтеза асимптотического наблюдателя для оценивания частоты входного синусоидального сигнала. В случае полигармонического сигнала оценки частот можно получить с использованием статистических методов, таких как построение периодограммы [6].

Отметим, что фильтр Калмана предназначен, прежде всего, для оценивания случайных возмущений и требует задания в качестве исходных данных их вероятностных характеристик. Однако, эти характеристики в ряде прикладных задач априорно не заданы, а их оценивание является предметом исследования.

В связи с этим в данной работе предлагаются два подхода к оцениванию параметров полигармонических возмущений, в основе которых лежит построение асимптотических наблюдателей специального вида. Первый из них состоит в синтезе наблюдателя для расширенной модели, представляющей динамику объекта и возмущений, с обеспечением желаемых модальных свойств ошибки оценивания. Второй – в формировании нелинейного асимптотического наблюдателя, позволяющего получить оценку полигармонического сигнала внешнего возмущения с последующим применением статистических методов. Выполняется сравнительный анализ этих подходов.

Исследование выполняется для случаев, когда внешние сила и момент, действующие на объект в горизонтальной плоскости, считаются линейно связанными и независимыми друг от друга, то есть восстанавливаются по отдельности. В качестве объекта управления принят автономный подводный аппарат NPS AUV II [7]. Полученные результаты иллюстрируются примерами имитационного моделирования в среде Matlab/Simulink.

Постановка задачи. В качестве исходной математической модели подводного аппарата примем следующую систему дифференциальных уравнений [7], описывающих динамику его движения по курсу:

$$\begin{aligned} \frac{dV_z}{dt} &= a_{11}V_z + a_{12}\omega_y + b_1\delta_r + F_z, \\ \frac{d\omega_y}{dt} &= a_{21}V_z + a_{22}\omega_y + b_2\delta_r + M_y, \\ \frac{d\varphi}{dt} &= \omega_y. \end{aligned} \quad (1)$$

Здесь V_z – боковая скорость, ω_y – угловая скорость вращения по курсу, φ – угол курса, δ_r – отклонение вертикальных рулей, F_z и M_y – внешние сила и момент соответственно, $a_{11}, a_{12}, a_{21}, a_{22}, b_1, b_2$ – заданные постоянные

коэффициенты. В качестве силы F_z и момента M_y будем рассматривать полигармонические смещенные сигналы, то есть

$$F_z(t) = A_F + \sum_{i=1}^N A_{1i} \sin(\omega_i t + \varphi_{1i}),$$

$$M_y(t) = A_M + \sum_{i=1}^N A_{2i} \sin(\omega_i t + \varphi_{2i}).$$
(2)

Здесь A_F и A_M – постоянные смещения, A_{1i} и A_{2i} – амплитуды отдельных гармоник, φ_{1i} и φ_{2i} – фазовые сдвиги отдельных гармоник, $i = \overline{1, N}$. В соответствии с формулой (2), сила F_z и момент M_y представляются полигармоническими колебаниями с одинаковыми частотами ω_i , $i = \overline{1, N}$, но у них могут быть различные амплитуды и фазы.

Дополним уравнения (1) математической моделью измерений:

$$y_1 = \varphi + \xi_\varphi, \quad y_2 = V_z + \xi_v. \quad (3)$$

Здесь ξ_φ и ξ_v – гауссовские белые шумы в измерениях. Интенсивность шумов такова, что ошибка измерений угла курса находится в пределах 0.05 градуса, а боковой скорости – 0.05 м/с.

Требуется построить оценки $\hat{F}_z(t)$, $\hat{M}_y(t)$ внешних возмущений $F_z(t)$, $M_y(t)$ на основе измерений (3), а также найти параметры восстановленных сигналов $\hat{F}_z(t)$, $\hat{M}_y(t)$ (частоты и амплитуды отдельных составляющих), которые позволят вычислить физические характеристики действующих внешних сил и моментов.

Исследуются два варианта воздействия внешних возмущений на динамику подвижного объекта. В первом случае предполагается, что имеется приближенная зависимость между силой и моментом: $M_y = cF_z$, где c – известная константа, зависящая от характеристик судна. В частности, для приближенных расчетов может быть принято значение $c = 0.5L$, где L – длина судна. Во втором случае сила и момент предполагаются независимыми и восстанавливаются по отдельности.

Методы синтеза асимптотических наблюдателей для оценивания полигармонических возмущений и их параметров. Рассмотрим два подхода. Первый подход основан на построении асимптотического наблюдателя с использованием методов модального синтеза, а второй – в формировании нелинейного наблюдателя специального вида для восстановления сигнала внешнего возмущения с последующим применением статистических методов для оценивания его параметров.

В рамках первого варианта в качестве базовой примем расширенную модель динамики подвижного объекта и внешних возмущений:

$$\begin{aligned} \dot{\mathbf{x}} &= \mathbf{A}\mathbf{x} + \mathbf{B}\delta_r + \mathbf{H}\xi, \quad \mathbf{x}(0) = \mathbf{x}_0, \\ \dot{\xi} &= \mathbf{G}(\boldsymbol{\theta})\xi, \quad \xi(0) = \xi_0. \end{aligned} \quad (4)$$

Здесь $\mathbf{x} = (V_z \quad \omega_y \quad \varphi)^T$ – вектор состояния объекта, $\xi \in E^{2N+1}$ – вектор состояния подсистемы, моделирующей возмущения, \mathbf{x}_0 и ξ_0 – соответствующие векторы начальных условий, матрицы

$$\mathbf{A} = \begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} & 0 \\ a_{21} & a_{22} & 0 \\ 0 & 1 & 0 \end{pmatrix}, \quad \mathbf{B} = \begin{pmatrix} b_1 \\ b_2 \\ 0 \end{pmatrix}$$

содержат коэффициенты модели (1).

Для начала будем считать, что сила F_z и момент M_y линейно связаны: $M_y = cF_z$. Тогда матрица \mathbf{H} размерности $3 \times (2N+1)$ равна

$$\mathbf{H} = \left(\begin{array}{cc|ccc|cc|c} 1 & 0 & & \dots & \dots & 1 & 0 & 1 \\ c & 0 & & \dots & \dots & c & 0 & c \\ \hline 0 & 0 & 0 & \dots & \dots & 0 & 0 & 0 \end{array} \right),$$

а матрица $\mathbf{G}(\boldsymbol{\theta})$ является блочно-диагональной с блоками вида $\begin{pmatrix} 0 & 1 \\ -\theta_i & 0 \end{pmatrix}$,

причем $\theta_i = \omega_i^2$, $i = \overline{1, N}$, а последние строка и столбец этой матрицы нулевые. Нетрудно убедиться в том, что сигнал $y = \sum_{i=1}^{N+1} \xi_{2i-1} = \xi_1 + \xi_3 + \dots + \xi_{2N+1}$ является полигармоническим колебанием вида (2).

Система (4) полностью наблюдаема по одной измеряемой переменной – углу курса φ . Поэтому для оценивания величины внешней силы $F_z = \sum_{i=1}^{N+1} \xi_{2i-1}$ сформируем следующий асимптотический наблюдатель:

$$\begin{aligned} \dot{\mathbf{z}} &= \mathbf{A}\mathbf{z} + \mathbf{B}\delta + \mathbf{H}\mathbf{z}_\xi + \mathbf{g}_1(y - \mathbf{c}\mathbf{z}), \\ \dot{\mathbf{z}}_\xi &= \mathbf{G}(\boldsymbol{\theta})\mathbf{z}_\xi + \mathbf{g}_2(y - \mathbf{c}\mathbf{z}). \end{aligned} \quad (5)$$

Здесь $\mathbf{z} = (z_1 \quad z_2 \quad z_3)^T \in E^3$ и $\mathbf{z}_\xi \in E^{2N+1}$ – векторы оценки состояний объекта управления и подсистемы внешних возмущений соответственно, $y = \varphi$, $\mathbf{c} = (0 \ 0 \ 1)$ – вспомогательные обозначения. При этом векторы коэффициентов $\mathbf{g}_1 \in E^3$ и $\mathbf{g}_2 \in E^{2N+1}$ при невязке $\varphi - z_3$ выбираются таким образом, чтобы обеспечивалось выполнение тождества

$$A_g(s, \mathbf{g}_1, \mathbf{g}_2, \boldsymbol{\theta}) \equiv A_g^*(s),$$

где $A_g^*(s)$ – желаемый характеристический полином, а $A_g(s, \mathbf{g}_1, \mathbf{g}_2, \boldsymbol{\theta})$ – характеристический полином наблюдателя (5). В итоге, приравнявая коэффи-

циенты при одинаковых степенях, получим систему линейных уравнений для поиска векторов \mathbf{g}_1 и \mathbf{g}_2 .

Если внешние сила F_z и момент M_y невязаносвязаны и оцениваются независимо друг от друга, то полная линейная математическая модель динамики подвижного объекта в горизонтальной плоскости имеет вид (4), где вектор состояния подсистемы внешних возмущений имеет размерность $\xi \in E^{4N+2}$, матрица \mathbf{H} размерности $3 \times (4N+2)$ равна

$$\mathbf{H} = \left(\begin{array}{cc|cc|ccc|c|c} 1 & 0 & 0 & 0 & \cdots & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & \cdots & 0 & 1 \\ \hline 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{array} \right),$$

матрица \mathbf{G} является блочно-диагональной размера $4N+2 \times 4N+2$, причем каждый из ее блоков $\begin{pmatrix} 0 & 1 \\ -\theta_i & 0 \end{pmatrix}$, $i = \overline{1, N}$ на диагонали дублируется, а два последних столбца и строки этой матрицы нулевые.

Заметим, что независимые сила F_z и момент M_y моделируются в рассматриваемом случае как выходы одинаковых подсистем дифференциальных уравнений. Но эти подсистемы могут иметь различные начальные условия, что порождает различные амплитуды, фазы и смещения соответствующих полигармонических сигналов. При этом величина внешней силы равна $F_z = \sum_{i=1}^{N+1} \xi_{4i-3}$, а величина момента равна $M_y = \sum_{i=1}^{N+1} \xi_{4i-2}$.

Система (4) с введенными матрицами \mathbf{H} и \mathbf{G} наблюдаема по измерениям двух переменных – угла курса φ и боковой скорости V_z . С целью получения оценок внешней силы F_z и момента M_y сформируем на основе системы (4) асимптотический наблюдатель следующего вида

$$\dot{\mathbf{z}} = \mathbf{A}\mathbf{z} + \mathbf{B}\delta + \mathbf{H}\mathbf{z}_\xi + \mathbf{G}_1(\mathbf{y} - \mathbf{C}\mathbf{z}), \quad (6)$$

$$\dot{\mathbf{z}}_\xi = \overline{\mathbf{G}}(\boldsymbol{\theta})\mathbf{z}_\xi + \mathbf{G}_2(\mathbf{y} - \mathbf{C}\mathbf{z}).$$

Здесь $\mathbf{z} \in E^3$ и $\mathbf{z}_\xi \in E^{4N+2}$ – векторы оценки состояния объекта управления и подсистемы, представляющей внешние возмущения, соответственно. Вектор измерений содержит две компоненты $\mathbf{y} = (V_z \ \omega_y)^T$, а матрица \mathbf{C}

равна $\mathbf{C} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$. Матрицы \mathbf{G}_1 и \mathbf{G}_2 содержат коэффициенты при не-

вязках $\varphi - z_3$ и $V_z - z_1$. Воспользуемся методом модального синтеза и выберем такие матрицы \mathbf{G}_1 и \mathbf{G}_2 асимптотического наблюдателя, которые обеспечивают выполнение тождества

$$A_g(s, \mathbf{G}_1, \mathbf{G}_2, \boldsymbol{\theta}) \equiv A_g^*(s).$$

Здесь $A_g^*(s)$ – желаемый характеристический полином, $A_g(s, \mathbf{G}_1, \mathbf{G}_2, \boldsymbol{\theta})$ – характеристический полином наблюдателя (6). Тогда, приравнявая коэффициенты при одинаковых степенях, получим систему нелинейных уравнений для поиска матриц коэффициентов \mathbf{G}_1 и \mathbf{G}_2 .

Отметим, что в рамках приведенного подхода возможна фиксация такой структуры матриц \mathbf{G}_1 и \mathbf{G}_2 , при которой оценивание силы F_z и момента M_y осуществляется по измерениям только одной переменной – боковой скорости V_z и угла курса φ соответственно. Преимущество этого варианта заключается в том, что здесь шум измерений боковой скорости V_z в меньшей степени влияет на точность оценивания момента M_y .

Заметим также, что для значений $N > 3$ степень характеристического полинома наблюдателя (6) становится достаточно высокой. При этом незначительная разница в коэффициентах характеристического полинома $A_g(s, \mathbf{G}_1, \mathbf{G}_2, \boldsymbol{\theta})$ и желаемого полинома $A_g^*(s)$ может повлечь существенную разницу в расположении их корней, что существенно затрудняет поиск матриц \mathbf{G}_1 и \mathbf{G}_2 . Если структура матриц \mathbf{G}_1 и \mathbf{G}_2 не фиксирована, то для их поиска необходимо использовать известные алгебраические методы модального синтеза, а в случае, если структура фиксирована – контролировать расположение корней характеристического полинома $A_g(s, \mathbf{G}_1, \mathbf{G}_2, \boldsymbol{\theta})$.

Важной особенностью рассмотренного подхода является то, что оценки сигналов возмущений $\hat{F}_z(t)$ и $\hat{M}_y(t)$ представляются полигармоническими колебаниями, что дает возможность вычислить постоянное смещение, частоты и амплитуды отдельных гармоник. В то же время, для построения рассмотренных наблюдателей (5), (6) необходима предварительная грубая оценка частот ω_i , $i = \overline{1, N}$ внешнего возмущения, например с использованием статистических методов [6].

Рассмотрим второй подход к оцениванию возмущений. Отметим, что он применим только для скалярных возмущений, то есть для случая, когда сила F_z и момент M_y линейно связаны. В качестве базовой модели для синтеза асимптотического наблюдателя примем систему (4), при условии что $M_y = cF_z$. Введем обозначения:

$$\mathbf{f}(\mathbf{x}, \delta_r) = \begin{pmatrix} a_{11}V_z + a_{12}\omega_y + b_1\delta_r \\ a_{21}V_z + a_{22}\omega_y + b_2\delta_r \\ \omega_y \end{pmatrix},$$

$$\mathbf{g}(\mathbf{x}, \boldsymbol{\xi}, \delta_r) = \begin{pmatrix} \sum_{i=1}^N \xi_{2i-1} + \xi_{2N+1} \\ c \sum_{i=1}^N \xi_{2i-1} + c \xi_{2N+1} \\ 0 \end{pmatrix}$$

и выберем следующие значения вспомогательных векторов \mathbf{q} и \mathbf{h} :

$$\mathbf{q} = (0 \ 1 \ 0)^T,$$

$$\mathbf{h} = (c \ 0 \ c \dots \ c \ 0 \ c)^T.$$

Нетрудно проверить, что при этом выполняется условие

$$\mathbf{q}^T \mathbf{g}(\mathbf{x}, \boldsymbol{\xi}, \delta_r) \equiv \mathbf{h}^T \boldsymbol{\xi},$$

а пара $(\mathbf{G}(\boldsymbol{\theta}), \mathbf{h}^T)$ является полностью наблюдаемой. Как показано в работе [5], выполнения этих условий достаточно для построения оценки внешних возмущений с помощью асимптотического наблюдателя вида

$$\dot{\boldsymbol{\chi}} = \mathbf{G}(\hat{\boldsymbol{\theta}}) \hat{\boldsymbol{\xi}} - \mathbf{K}(\hat{\boldsymbol{\theta}}) \mathbf{h}^T \hat{\boldsymbol{\xi}} - \mathbf{K}(\hat{\boldsymbol{\theta}}) \mathbf{q}^T \mathbf{f}(\mathbf{y}, \mathbf{u}), \quad (7)$$

$$\hat{\boldsymbol{\xi}} = \boldsymbol{\chi} + \mathbf{K}(\hat{\boldsymbol{\theta}}) \mathbf{q}^T \mathbf{y}.$$

Здесь $\boldsymbol{\chi} \in E^1$ – вектор состояния наблюдателя, $\hat{\boldsymbol{\theta}}$ – оценка частот полигармонического сигнала внешнего возмущения, $\hat{\boldsymbol{\xi}}$ – оценка внешних возмущений, $\mathbf{K}(\hat{\boldsymbol{\theta}})$ – некоторая матрица, такая, что матрица $\mathbf{L}(\hat{\boldsymbol{\theta}}) = \mathbf{G}(\hat{\boldsymbol{\theta}}) - \mathbf{K}(\hat{\boldsymbol{\theta}}) \mathbf{h}^T$ является гурвицевой для всех значений параметра $\hat{\boldsymbol{\theta}}$. С учетом (4) уравнения (7) в рассматриваемом случае приводятся к форме:

$$\begin{aligned} \dot{\chi}_{2i-1} &= \hat{\xi}_{2i} - k_{2i-1}(\hat{\boldsymbol{\theta}}) c \left(\sum_{i=1}^N \hat{\xi}_{2i-1} + \hat{\xi}_{2N+1} \right) \\ &\quad - k_{2i-1}(\hat{\boldsymbol{\theta}}) (a_{21} V_z + a_{22} \omega_y + b_2 \delta_r), \\ \dot{\chi}_{2i} &= -\hat{\theta}_i \hat{\xi}_{2i-1} - k_{2i}(\hat{\boldsymbol{\theta}}) c \left(\sum_{i=1}^N \hat{\xi}_{2i-1} + \hat{\xi}_{2N+1} \right) \\ &\quad - k_{2i}(\hat{\boldsymbol{\theta}}) (a_{21} V_z + a_{22} \omega_y + b_2 \delta_r), \quad i = \overline{1, N}, \\ \dot{\chi}_{2N+1} &= -k_{2N+1}(\hat{\boldsymbol{\theta}}) c \left(\sum_{i=1}^N \hat{\xi}_{2i-1} + \hat{\xi}_{2N+1} \right) \\ &\quad - k_{2N+1}(\hat{\boldsymbol{\theta}}) (a_{21} V_z + a_{22} \omega_y + b_2 \delta_r), \\ \hat{\xi}_{2i-1} &= \chi_{2i-1} + k_{2i-1}(\hat{\boldsymbol{\theta}}) \omega_y, \\ \hat{\xi}_{2i} &= \chi_{2i} + k_{2i}(\hat{\boldsymbol{\theta}}) \omega_y, \quad i = \overline{1, N}, \\ \hat{\xi}_{2N+1} &= \chi_{2N+1} + k_{2N+1}(\hat{\boldsymbol{\theta}}) \omega_y. \end{aligned} \quad (8)$$

Здесь коэффициенты $k_1(\hat{\theta}), k_2(\hat{\theta}), \dots, k_{2N+1}(\hat{\theta})$ выберем таким образом, чтобы обеспечить выполнение тождества $\Delta(s) = \det(sE - L(\hat{\theta})) \equiv \Delta^*(s)$. В результате получим систему линейных уравнений $P(\hat{\theta})K = t$ относительно искомым коэффициентов.

Важно отметить, что в уравнениях (8) используются неизмеряемые компоненты вектора состояния V_z и ω_y . В связи с этим приведенные выше уравнения (8) необходимо дополнить, добавив асимптотический наблюдатель вида (5).

Построенный наблюдатель (8) позволяет получить оценку сигнала внешнего возмущения, а последующее применение статистических методов дает возможность уточнить частоты и амплитуды отдельных составляющих полигармонического возмущения, а также постоянное смещение. Важной особенностью данного подхода является его применимость для исходной нелинейной математической модели объекта управления, однако только для случая скалярного возмущения.

Пример. Рассмотрим примеры имитационного моделирования процессов оценивания внешних возмущений на основе двух рассмотренных подходов. Будем считать, что AUV движется в режиме стабилизации с постоянной скоростью хода $V = 5$ м/с, а внешние сила и момент линейно связаны: $M_y = 0.5LF_z$. Рассмотрим полигармонический сигнал внешней силы F_z , состоящий из трех гармоник с частотами $\omega_1 = 0.37$, $\omega_2 = 0.59$, $\omega_3 = 0.73$ и амплитудами $A_1 = 0.0033$, $A_2 = 0.0089$, $A_3 = 0.0177$.

Зададим параметр биномиального распределения корней $\rho_0 = 1$ и найдем соответствующие коэффициенты g_1 и g_2 асимптотического наблюдателя (5). Отметим, что в данном случае порядок наблюдателя (5) равен $2N + 4 = 10$. Аналогично вычислим коэффициенты K наблюдателя (8) для заданного параметра ρ_0 .

На рис. 1 показаны истинное значение величины силы F_z и ее оценки, полученные с помощью асимптотических наблюдателей (5) и (8). Графики для первого и второго подходов обозначены Est. 1 и Est. 2 соответственно. Как видно из рисунка, величина внешнего возмущения восстанавливается практически точно примерно за 20 с. При проведении экспериментов учитывался шум в измерениях угла курса. Заметим также, что наблюдатель (5) позволяет восстановить величину момента M_y в том случае, если сила F_z и момент M_y линейно не связаны.

На рис. 2 и 3 показаны примеры оценки амплитуд A_i и частот ω_i , $i = \overline{1,3}$ для отдельных гармонических составляющих внешней силы F_z , восстановленной с помощью асимптотического наблюдателя (5).

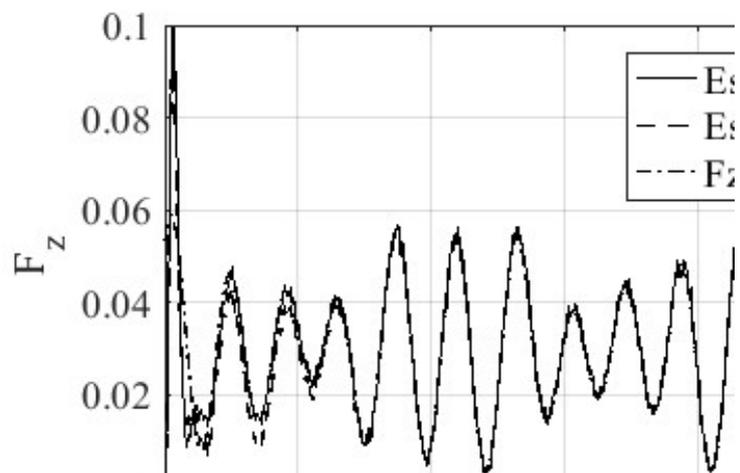


Рис. 1. Оценивание внешней силы F_z .

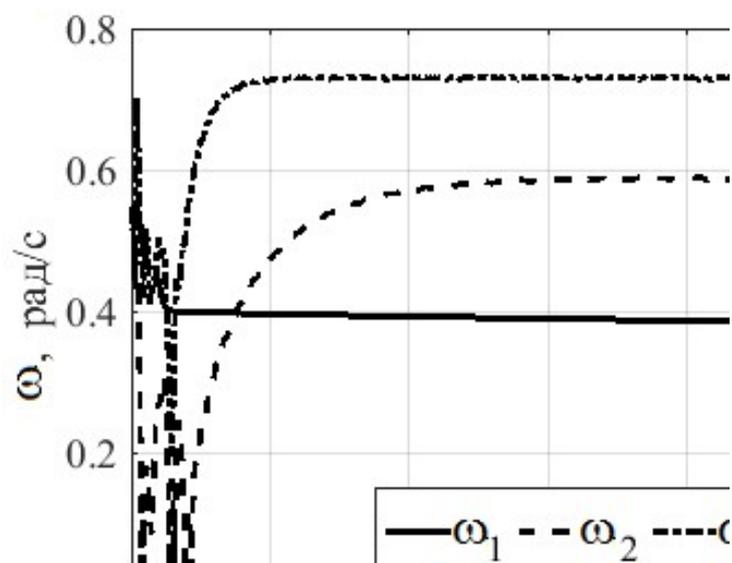


Рис. 2. Оценивание частот отдельных гармоник.

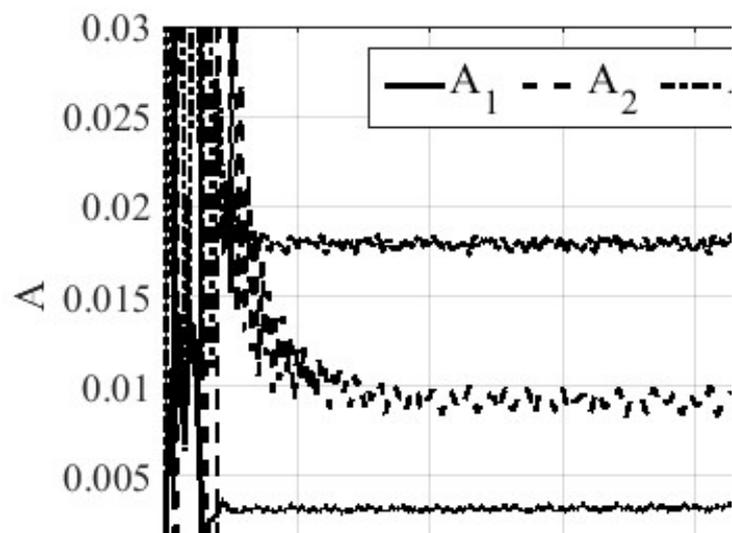


Рис. 3. Оценивание амплитуд отдельных гармоник.

Из рисунка видно, что частоты и амплитуды отдельных гармоник возмущения восстанавливаются практически точно, с ошибкой не более 15%, примерно за 200 с. Отметим, что аналогичные оценки для наблюдателя (8) могут быть получены при помощи статистических методов оценивания спектра восстановленного сигнала внешнего возмущения.

Заключение. Рассмотрена задача оценивания параметров полигармонических внешних возмущений, действующих на автономный подводный аппарат в горизонтальной плоскости. Сформированы асимптотические наблюдатели на основе двух различных подходов, выполнен их сравнительный анализ. Полученные результаты проиллюстрированы примерами.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 17-07-00361а.

Список литературы

1. Веремей Е.И. Среднеквадратичная многоцелевая оптимизация. Учебное пособие. – СПб.: Издательство Санкт-Петербургского государственного университета, 2016. – 408 с.
2. Veremey E.I. Separate filtering correction of observer-based marine positioning control laws // International Journal of Control, 2017. - Vol. 90, Issue 8. - Pages 1561-1575.
3. Veremey E.I. Optimization of filtering correctors for autopilot control laws with special structures // Optimal Control Applications and Methods. 2016. – Т. 37, № 2. – Р. 323-339.
4. Пелевин А.Е. Идентификация параметров модели объекта в условиях внешних возмущений // Гироскопия и навигация, 2014. – № 4(87). – С. 111-120.
5. Арановский С.В., Бобцов А.А., Кремлев А.С. Идентификация частоты смещенного синусоидального сигнала // Автоматика и телемеханика, 2008. № 9, С. 3–9.
6. Сергиенко А. Б. Цифровая обработка сигналов. – 2-е. – СПб.: Питер, 2006. – 751 с.
7. Fossen T.I. Guidance and Control of Ocean Vehicles. John Wiley & Sons. New York, 1994.

ESTIMATION OF POLYGARMONIC EXTERNAL
DISTURBANCES FOR AUTONOMOUS UNDERWATER VEHICLE
M.V. Sotnikova (St. Petersburg State University)

The problem of estimating the parameters of polyharmonic external disturbances acting on an autonomous underwater vehicle is considered. Two approaches for

estimation are proposed. They are based on the construction of asymptotic observers of a special form. The obtained results are illustrated by examples of simulation modeling of the processes of disturbances estimation for an autonomous underwater vehicle moving in wave conditions.

Keywords: external disturbances, estimation, asymptotic observer, modeling, dynamic object