

**Н. Н. Тарасов**, канд. техн. наук, ст. науч. сотр., tnn53@rambler.ru,  
**С. К. Данилова**, канд. техн. наук, вед. науч. сотр., lab45\_1@ipu.rssi.ru,  
**И. М. Кусков**, мл. науч. сотр., butovokus@gmail.com,  
 Институт проблем управления им. В. А. Трапезникова РАН, Москва

## Управление подводным аппаратом при неполной информации о модели движения и внешних возмущений

*Предложен подход к управлению подводным аппаратом, основанный на использовании оценок фазовых координат и внешних возмущений. Предложены алгоритмы восстановления неизвестных возмущений, представляющих собой совокупность внешних воздействий и неточность информации о модели самого объекта управления. На примере пространственного движения подводного аппарата, описываемого сложной системой дифференциальных уравнений, проверена работоспособность предложенного в работе подхода.*

**Ключевые слова:** математические модели движения и возмущения, обитаемые и необитаемые подводные аппараты, алгоритмы фильтрации с различными способами обработки невязок, интегральные невязки, восстановление фазовых координат и внешних воздействий

### Введение

Исследование сложных технических систем, к которым относятся как обитаемые, так и автономные необитаемые подводные аппараты (АНПА) и роботы, связано с получением точной информации о параметрах движения и внешних возмущениях, которые в зависимости от режимов функционирования изменяются в достаточно широком диапазоне.

Математическое описание таких систем представляет собой трудоемкую и сложную работу, требующую огромных временных и материальных затрат, связанных с построением макетов таких систем и их исследованием в полунатурных и натуральных условиях. Предлагаемый же в данной работе подход позволяет устранить этот недостаток за счет использования более простых (линейных) моделей и восстановления оценок фазовых координат и возмущений, представляющих собой совокупность неточностей модели движения и неизвестных внешних воздействий. В основу данного подхода положен принцип исследования и обработки невязок  $\gamma_i = y_i - \hat{x}_i$ , где  $y_i$  — измеряемые координаты объекта управления, а  $\hat{x}_i$  — их оценки, получаемые с помощью предлагаемых алгоритмов фильтрации.

Для получения оценок фазовых координат  $\hat{x}_i$  используются различные алгоритмы фильтрации, среди которых наиболее распространенными являются калмановские алгоритмы фильтрации [1], для которых необходима качественная информация о математических моделях движения, измерения и возмущений, а также статистических характеристиках входных помех и шумов измерения. Сложные технические системы, функционирующие в реальных условиях, этими свойствами, как правило, не обладают. Неточность же математических моделей движения, измерения и возмущений, а также всякого рода упрощения приводят не только к ухудшению качества получаемых оценок, но и к неустойчивости самого фильтра. Кроме того, неустойчивость могут вызывать ошибки, связанные с моделированием

вероятностных характеристик шумов и неизвестных входных воздействий. А это, в свою очередь, влияет на качество и эффективность применяемых на практике законов управления, формируемых с помощью получаемых оценок. Если известны структуры моделей движения и возмущения, но неизвестны их гидродинамические характеристики, то используются расширенные калмановские алгоритмы фильтрации [2], включающие в себя как модели движения и возмущения, так и модели изменения гидродинамических характеристик. В случае неточной информации о моделях движения или возмущения рассматриваются различные адаптивные алгоритмы фильтрации [3], основанные, в основном, либо на приближенном построении моделей движения и возмущений, либо на анализе невязок  $\gamma_i = y_i - \hat{x}_i$ , где  $y_i$  — измеренное значение параметра  $x_i$ .

В работе [4] рассмотрен подход, основанный на представлении модели возмущений в виде степенного ряда со случайными скачкообразно меняющимися коэффициентами. В работе [5] представлены алгоритмы фильтрации, основанные на анализе чувствительности невязок. В работах [6, 7] предложены алгоритмы фильтрации, использующие в обратной связи не только невязки, но и интегралы этих невязок. Все перечисленные алгоритмы, как правило, сложны в реализации в реальном времени на бортовых вычислительных комплексах. Поэтому в данной работе предложен более простой алгоритм фильтрации, основанный на исследовании и обработке невязок  $\gamma_i = y_i - \hat{x}_i$ , а именно на разделении невязок на низко- и высокочастотные составляющие, и позволяющий восстанавливать не только фазовые координаты, но и неизвестные внешние возмущения.

### Модель объекта

Модель пространственного движения подводного аппарата, как правило, описывается сложной системой нелинейных дифференциальных уравнений вида  $\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{f}(\mathbf{x}, \mathbf{a}) + \mathbf{G}(\mathbf{u}) + \mathbf{F}(t) + \mathbf{w}(t)$ , где  $\mathbf{x}$  —

вектор состояния,  $\mathbf{u}$  — вектор управления,  $\mathbf{a}$  — вектор гидродинамических параметров,  $\mathbf{F}(t)$  — вектор внешних возмущений и  $\mathbf{w}(t)$  — вектор случайных помех с нулевым средним  $M[\mathbf{w}(t)] = 0$  и известной ковариационной матрицей  $\text{cov}(\mathbf{w}(t)\mathbf{w}^T(\tau)) = \mathbf{Q}(t)\delta(t - \tau)$ . Определение структур и параметров вектор-функций  $\mathbf{f}(\mathbf{x}, \mathbf{a})$  и  $\mathbf{G}(\mathbf{u})$ , как отмечалось ранее, представляет собой трудоемкий, долговременный и дорогостоящий процесс. Кроме того, получаемая модель сложна и, как правило, имеет большую размерность. Использование такой модели в реальных условиях на бортовых вычислительных комплексах нецелесообразно. Поэтому модель такого технического устройства (подводного аппарата) представляют в виде ряда более простых моделей меньшей размерности:

$$\begin{aligned}\dot{\mathbf{x}}_b &= \mathbf{f}_b(\mathbf{x}_b, \hat{\mathbf{x}}_g, a_b, a_g) + \mathbf{G}_b(\mathbf{u}_b) + \mathbf{F}_b(t) + \mathbf{w}_b(t), \\ \dot{\mathbf{x}}_g &= \mathbf{f}_g(\hat{\mathbf{x}}_b, \mathbf{x}_g, a_b, a_g) + \mathbf{G}_g(\mathbf{u}_g) + \mathbf{F}_g(t) + \mathbf{w}_g(t),\end{aligned}$$

где  $\hat{\mathbf{x}}_b, \hat{\mathbf{x}}_g$  — оценки координат  $\mathbf{x}_b = (V_y, \omega_z, \psi, \eta)^T$  и  $\mathbf{x}_g = (V_z, \omega_y, \phi, \omega_x, \theta)^T$  векторов состояния, причем  $V_y, \omega_z, V_z, \omega_y$  — линейные и угловые скорости движения в вертикальной (ВП) и горизонтальной (ГП) плоскостях соответственно;  $\psi$  — дифферент,  $\phi$  — курс,  $\theta$  — крен и  $\eta$  — глубина погружения;  $a_b, a_g$  — неизвестные гидродинамические параметры;  $\mathbf{G}_b(\mathbf{u}_b), \mathbf{G}_g(\mathbf{u}_g)$  — известные векторные функции управления;  $\mathbf{F}_b(t), \mathbf{F}_g(t)$  — векторы внешних возмущений, действующих в ВП и ГП соответственно;  $\mathbf{w}_b(t), \mathbf{w}_g(t)$  — случайные векторные процессы с нулевыми средними и известными ковариационными функциями.

Представим полученную модель в виде

$$\dot{\mathbf{x}}_b = \mathbf{A}_b \mathbf{x}_b + \mathbf{G}_b(\mathbf{u}_b) + \mathbf{F}_b(\mathbf{x}_b, \hat{\mathbf{x}}_g, a_b, t) + \mathbf{w}_b(t); \quad (1)$$

$$\dot{\mathbf{x}}_g = \mathbf{A}_g \mathbf{x}_g + \mathbf{G}_g(\mathbf{u}_g) + \mathbf{F}_g(\hat{\mathbf{x}}_b, \mathbf{x}_g, a_g, t) + \mathbf{w}_g(t), \quad (2)$$

где  $\mathbf{F}_b(\mathbf{x}_b, \hat{\mathbf{x}}_g, a_b, t) = \mathbf{f}_b(\mathbf{x}_b, \hat{\mathbf{x}}_g, a_b) + \mathbf{F}_b(t) - \mathbf{A}_b \mathbf{x}_b$  и  $\mathbf{F}_g(\hat{\mathbf{x}}_b, \mathbf{x}_g, a_g, t) = \mathbf{f}_g(\hat{\mathbf{x}}_b, \mathbf{x}_g, a_g) + \mathbf{F}_g(t) - \mathbf{A}_g \mathbf{x}_g$  — неизвестные векторные функции, характеризующие неточность математических моделей реального объекта и внешних воздействий;  $\mathbf{A}_b, \mathbf{A}_g$  — известные матрицы состояния, зависящие от скорости движения и описывающие линейную часть сложной нелинейной системы, причем

$$\mathbf{A}_b = \begin{pmatrix} a_{11b} V_x & a_{12b} V_x & 0 & 0 \\ a_{21b} V_x & a_{22b} V_x & a_{23b} & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & V & 0 \end{pmatrix},$$

$$\mathbf{A}_g = \begin{pmatrix} a_{11g} V_x & a_{12g} V_x & 0 & 0 & 0 \\ a_{21g} V_x & a_{22g} V_x & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ a_{41g} V_x & a_{42g} V_x & 0 & a_{44g} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}.$$

Непосредственному измерению доступны следующие параметры движения: дифферент  $\psi$ , глубина погружения  $\eta$ , курс  $\phi$  и угол крена  $\theta$ . С достаточной степенью точности математическая модель измерения представляется в виде [8]

$$\begin{aligned}\mathbf{y}_b &= \mathbf{C}_b \mathbf{x}_b + \xi_b; \\ \mathbf{y}_g &= \mathbf{C}_g \mathbf{x}_g + \xi_g,\end{aligned} \quad (3)$$

где  $\mathbf{y}_b = (y_\psi, y_\eta)^T, \mathbf{y}_g = (y_\phi, y_\theta)^T$  — векторы измеряемых

координат  $\mathbf{x}_b$  и  $\mathbf{x}_g$  соответственно;  $\mathbf{C}_b = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$ ,

$\mathbf{C}_g = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$  — матрицы наблюдений;  $\xi_b =$

$= (\xi_{\psi}, \xi_{\eta})^T$  и  $\xi_g = (\xi_{\phi}, \xi_{\theta})^T$  — случайные процессы с нулевыми средними  $M[\xi_b(t)] = M[\xi_g(t)] = 0$  и известными ковариационными матрицами  $\text{cov}(\xi_b(t)\xi_b^T(\tau)) = \mathbf{Q}_b(t)\delta(t - \tau), \text{cov}(\xi_g(t)\xi_g^T(\tau)) = \mathbf{Q}_g(t)\delta(t - \tau)$ .

Входящие в уравнения (1) и (2) внешние возмущения представляют собой сумму волновых и медленно меняющихся воздействий:

- *медленно меняющиеся* (постоянно действующие) *возмущения* — возмущения, возникающие при различных течениях, дрейфах и т. д. Такие возмущения описываются уравнениями вида [1]

$$\begin{aligned}\dot{\mathbf{F}}_{mb} &= \zeta_{mb}; \\ \dot{\mathbf{F}}_{mg} &= \zeta_{mg},\end{aligned} \quad (4)$$

где  $\zeta_{mb}, \zeta_{mg}$  — случайные параметры, характеризующие медленное изменение входного возмущения, причем  $M[\zeta_{mb}(t)] = M[\zeta_{mg}(t)] = 0, \text{cov}(\zeta_{mb}(t)\zeta_{mb}^T(\tau)) = \mathbf{Q}_{mb}(t)\delta(t - \tau), \text{cov}(\zeta_{mg}(t)\zeta_{mg}^T(\tau)) = \mathbf{Q}_{mg}(t)\delta(t - \tau)$ ;

- *волновые возмущения*. Модель волновых возмущений  $\mathbf{F}_{bb} = (P_{by}, M_{bz})^T, \mathbf{F}_{bg} = (P_{bz}, M_{by})^T$  задается как совокупность гармоник со своими амплитудами, частотами и случайными фазами, которые, в свою очередь, зависят от балльности, скорости хода и курсового угла и определяются, как правило, по данным натурных испытаний:

$$\begin{aligned}P_{by} &= K_b \sum_{i=1}^n \alpha_{fyi} \sin(\omega_i t + \phi_{fyi}); \\ M_{bz} &= K_b \sum_{i=1}^n \alpha_{mzi} \sin(\omega_i t + \phi_{mzi}); \\ P_{gz} &= K_g \sum_{i=1}^n \alpha_{fzi} \sin(\omega_i t + \phi_{fzi}); \\ M_{gy} &= K_g \sum_{i=1}^n \alpha_{myi} \sin(\omega_i t + \phi_{myi}),\end{aligned} \quad (5)$$

где  $P_{by}, M_{bz}, P_{gz}, M_{gy}$  — силы и моменты, действующие на объект управления;  $\alpha_{fyi}, \alpha_{mzi}, K_b, \alpha_{fzi}, \alpha_{myi}, K_g$  — постоянные параметры, получаемые, как правило, экспериментальным путем в реальных режимах плавания;  $\omega_i$  — частоты колебаний;  $\phi_{fyi}, \phi_{mzi}, \phi_{fzi}, \phi_{myi}$  — случайные начальные фазы колебаний.

## Постановка задачи

Используя уравнения моделей движения (1), (2) с неизвестными составляющими  $\mathbf{F}_b(\hat{\mathbf{x}}_b, \mathbf{x}_g, a_b, t)$ ,  $\mathbf{F}_g(\mathbf{x}_b, \hat{\mathbf{x}}_g, a_g, t)$ , измерения (3), возмущений (4), (5), а также статистические характеристики случайных возмущений, получить оценки фазовых координат  $\hat{\mathbf{x}}_b$ ,  $\hat{\mathbf{x}}_g$  и неизвестных возмущений  $\hat{\mathbf{F}}_b$ ,  $\hat{\mathbf{F}}_g$ , представляющих собой совокупность незнаний о модели движения и внешних возмущений, а также, используя полученные оценки, синтезировать законы управления, обеспечивающие требуемое качество переходных процессов.

## Алгоритмы фильтрации

Для получения оценок фазовых координат  $\hat{\mathbf{x}}_b$ ,  $\hat{\mathbf{x}}_g$  объекта (1), (2) с измерениями (3) обычно используются фильтры Калмана [1, 2]:

$$\begin{aligned} \dot{\hat{\mathbf{x}}}_b &= \mathbf{A}_b \hat{\mathbf{x}}_b + \mathbf{G}_b(\mathbf{u}_b) + \mathbf{K}_{0b}(\mathbf{y}_b - \mathbf{C}_b \hat{\mathbf{x}}_b); \\ \hat{\mathbf{x}}_b(t_0) &= \mathbf{M}[\mathbf{x}_b(t_0)]; \\ \dot{\hat{\mathbf{x}}}_g &= \mathbf{A}_g \hat{\mathbf{x}}_g + \mathbf{G}_g(\mathbf{u}_g) + \mathbf{K}_{0g}(\mathbf{y}_g - \mathbf{C}_g \hat{\mathbf{x}}_g); \\ \hat{\mathbf{x}}_g(t_0) &= \mathbf{M}[\mathbf{x}_g(t_0)]. \end{aligned} \quad (6)$$

Коэффициенты усиления обратной связи  $\mathbf{K}_{0b}$ ,  $\mathbf{K}_{0g}$  определяются из уравнения Риккати:

$$\begin{aligned} \dot{\mathbf{P}} &= \mathbf{A}\mathbf{P} + \mathbf{P}\mathbf{A}^T - \mathbf{P}\mathbf{C}^T\mathbf{R}^{-1}\mathbf{C}\mathbf{P} + \mathbf{Q}_F; \\ \mathbf{K}_0 &= (\mathbf{K}_{ij}) = \mathbf{P}\mathbf{C}^T\mathbf{R}^{-1}; \\ \mathbf{P}(t_0) &= \mathbf{M}[(\mathbf{x}(t_0) - \hat{\mathbf{x}}(t_0))(\mathbf{x}(t_0) - \hat{\mathbf{x}}(t_0))^T]. \end{aligned}$$

Данный алгоритм позволяет получать несмещенные оценки фазовых координат только в случае точной информации о параметрах моделей движения, измерения и возмущения. При этом невязки  $\mathbf{v} = \mathbf{y} - \mathbf{C}\hat{\mathbf{x}}$  представляют собой центрированные случайные процессы. При неточной же информации о параметрах модели или внешних возмущающих воздействий невязки перестают быть центрированными [6].

В работах [6, 7] были предложены алгоритмы фильтрации, позволяющие устранить данный недостаток, т. е. алгоритмы, позволяющие получать несмещенные оценки даже в случае действия неизвестных возмущений. Данные алгоритмы основаны на использовании не только невязок  $\mathbf{v}_b = \mathbf{y}_b - \mathbf{C}_b \hat{\mathbf{x}}_b$  и  $\mathbf{v}_g = \mathbf{y}_g - \mathbf{C}_g \hat{\mathbf{x}}_g$ , но и интегралов этих невязок:

$$\begin{aligned} \mathbf{v}_{b1} &= \int (\mathbf{y}_b - \mathbf{C}_b \hat{\mathbf{x}}_b) d\tau; \\ \mathbf{v}_{b2} &= \iint (\mathbf{y}_b - \mathbf{C}_b \hat{\mathbf{x}}_b) d\tau_1 d\tau_2; \\ &\dots\dots\dots \\ \mathbf{v}_{bn} &= \iiint \dots (\mathbf{y}_b - \mathbf{C}_b \hat{\mathbf{x}}_b) d\tau_1 d\tau_2 \dots d\tau_n; \\ \mathbf{v}_{g1} &= \int (\mathbf{y}_g - \mathbf{C}_g \hat{\mathbf{x}}_g) d\tau; \\ \mathbf{v}_{g2} &= \iint (\mathbf{y}_g - \mathbf{C}_g \hat{\mathbf{x}}_g) d\tau_1 d\tau_2; \\ &\dots\dots\dots \\ \mathbf{v}_{gn} &= \iiint \dots (\mathbf{y}_g - \mathbf{C}_g \hat{\mathbf{x}}_g) d\tau_1 d\tau_2 \dots d\tau_n. \end{aligned}$$

В этом случае алгоритмы фильтрации принимают вид

$$\begin{aligned} \dot{\hat{\mathbf{x}}}_b &= \mathbf{A}_b \hat{\mathbf{x}}_b + \mathbf{G}_b(\mathbf{u}_b) + \mathbf{K}_{0b}(\mathbf{y}_b - \mathbf{C}_b \hat{\mathbf{x}}_b) + \\ &+ \mathbf{K}_{1b} \int (\mathbf{y}_b - \mathbf{C}_b \hat{\mathbf{x}}_b) d\tau + \dots + \\ &+ \mathbf{K}_{nb} \underbrace{\int \dots \int}_{n} (\mathbf{y}_b - \mathbf{C}_b \hat{\mathbf{x}}_b) d\tau_1 \dots d\tau_n; \\ \dot{\hat{\mathbf{x}}}_g &= \mathbf{A}_g \hat{\mathbf{x}}_g + \mathbf{G}_g(\mathbf{u}_g) + \mathbf{K}_{0g}(\mathbf{y}_g - \mathbf{C}_g \hat{\mathbf{x}}_g) + \\ &+ \mathbf{K}_{1g} \int (\mathbf{y}_g - \mathbf{C}_g \hat{\mathbf{x}}_g) d\tau + \dots + \\ &+ \mathbf{K}_{ng} \underbrace{\int \dots \int}_{n} (\mathbf{y}_g - \mathbf{C}_g \hat{\mathbf{x}}_g) d\tau_1 \dots d\tau_n. \end{aligned} \quad (7)$$

Минимальное число интегральных невязок в выражении (7) зависит от вида возмущения, и чем возмущение более сложное, тем число слагаемых в фильтре (7) больше. Сложность данного алгоритма состоит в большом числе коэффициентов обратной связи  $\mathbf{K}_{ib}$ ,  $\mathbf{K}_{ig}$ .

Предлагаемый в данной работе алгоритм фильтрации позволяет упростить алгоритм получения оценок фазовых координат и внешних возмущений и тем самым устранить данный недостаток. Рассматриваемый алгоритм основан на разделении невязок на высокочастотные составляющие  $\mathbf{v}_b - \mathbf{v}_{bn}$ ,  $\mathbf{v}_g - \mathbf{v}_{gn}$  и низкочастотные составляющие  $\mathbf{v}_{bn}$ ,  $\mathbf{v}_{gn}$ . При этом алгоритм фильтрации примет следующий вид:

$$\begin{aligned} \dot{\hat{\mathbf{x}}}_b &= \mathbf{A}_b \hat{\mathbf{x}}_b + \mathbf{G}_b(\mathbf{u}_b) + \mathbf{K}_{0b}(\mathbf{v}_b - \mathbf{v}_{bn}) + \hat{\mathbf{F}}_b; \\ \hat{\mathbf{x}}_b(t_0) &= \mathbf{M}[\mathbf{x}_b(t_0)]; \\ \dot{\mathbf{v}}_{bn} &= (\mathbf{v}_b - \mathbf{v}_{bn})/T_b; \\ \dot{\hat{\mathbf{x}}}_g &= \mathbf{A}_g \hat{\mathbf{x}}_g + \mathbf{G}_g(\mathbf{u}_g) + \mathbf{K}_{0g}(\mathbf{v}_g - \mathbf{v}_{gn}) + \hat{\mathbf{F}}_g; \\ \hat{\mathbf{x}}_g(t_0) &= \mathbf{M}[\mathbf{x}_g(t_0)]; \\ \dot{\mathbf{v}}_{gn} &= (\mathbf{v}_g - \mathbf{v}_{gn})/T_g, \end{aligned} \quad (8)$$

где  $\hat{\mathbf{F}}_b$  и  $\hat{\mathbf{F}}_g$  — оценки неизвестных внешних возмущений, причем  $\hat{\mathbf{F}}_b = \mathbf{K}_{1b} \mathbf{v}_{bn}$ , а  $\hat{\mathbf{F}}_g = \mathbf{K}_{1g} \mathbf{v}_{gn}$ . Коэффициенты усиления  $\mathbf{K}_{0b}$ ,  $\mathbf{K}_{0g}$  при высокочастотных невязках определяются из уравнения Риккати, а коэффициенты  $\mathbf{K}_{1b}$ ,  $\mathbf{K}_{1g}$  при низкочастотных невязках — методами моделирования, причем коэффициенты  $\mathbf{K}_{1b}$ ,  $\mathbf{K}_{1g}$  могут меняться в достаточно широком диапазоне, не влияя, как показало моделирование, на устойчивость рассматриваемого фильтра;  $T_b$  и  $T_g$  — постоянные величины, определяющие точность оценок неизвестных возмущений,  $\hat{\mathbf{x}}_b = (\hat{V}_y, \hat{\omega}_z, \hat{\psi}, \hat{\eta})^T$ ,  $\hat{\mathbf{x}}_g = (\hat{V}_z, \hat{\omega}_y, \hat{\phi}, \omega_x, \theta)^T$  — оценки координат движения в вертикальной и горизонтальной плоскостях соответственно. При малых значениях величин  $T_b$  и  $T_g$  оценки возмущений достаточно точно приближаются к внешним возмущениям, а при больших —

описывают лишь осредненные значения. Однако точные значения оценок возмущения, подаваемых на регулятор, приводят управляющие органы, повторяющие эти возмущения, к быстрому износу. Менее же точные, но более гладкие оценки внешних возмущений позволяют управляющим органам работать в щадящем режиме.

Моделирование проводили на модели подводного аппарата, описываемого сложной системой нелинейных дифференциальных уравнений (1) при действии неизвестных внешних воздействий (4), (5). Для сокращения размерности решаемой задачи рассматривали алгоритмы фильтрации для вертикаль-

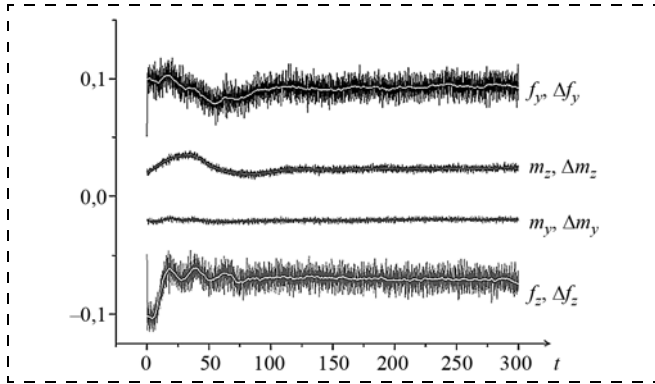


Рис. 1. Медленно меняющиеся возмущения и ошибки возмущений при  $T_b = T_g = 20$  с

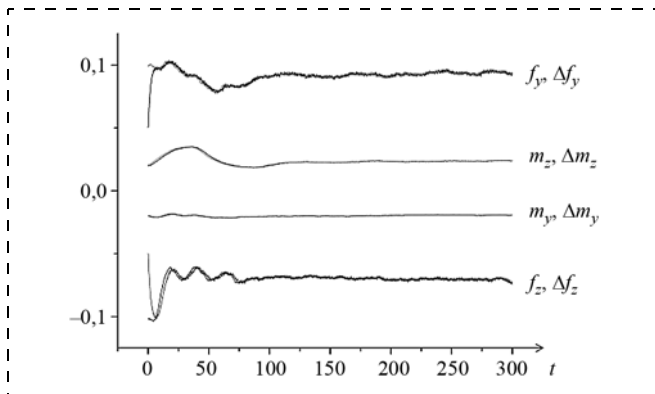


Рис. 2. Медленно меняющиеся возмущения и ошибки возмущений при  $T_b = T_g = 200$  с

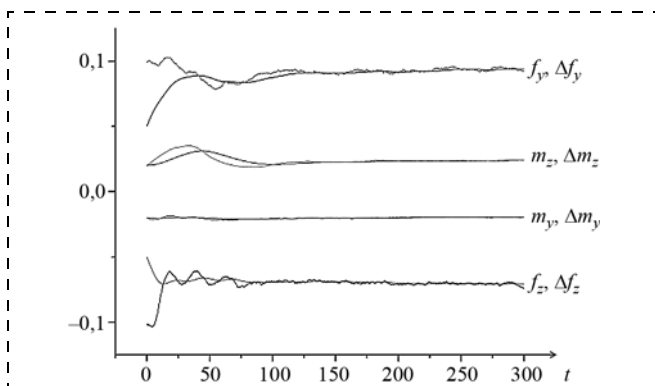


Рис. 3. Медленно меняющиеся возмущения и ошибки возмущений при  $T_b = T_g = 2000$  с

ной и горизонтальной плоскостей (8) с различными значениями величин  $T_b$  и  $T_g$ .

На рис. 1—4 представлены результаты моделирования при действии медленно меняющихся внешних возмущений и неизвестной информации о модели движения. На рис. 1—3 изображены совокупные оценки внешних возмущений и неточности модели движения  $f_y, m_z, f_z, m_y$  для различных значений постоянной времени  $T_b$ , а также ошибки оценивания внешних возмущений

$$\Delta f_y = f_y - \hat{f}_y, \Delta m_z = m_z - \hat{m}_z,$$

$$\Delta f_z = f_z - \hat{f}_z, \Delta m_y = m_y - \hat{m}_y.$$

На рис. 4 (см. третью сторону обложки) представлены оценки фазовых координат подводного аппарата, заданные значения глубины и курса, а также положение вертикальных и горизонтальных рулей.

На рис. 5—7 (см. третью сторону обложки) представлены аналогичные результаты моделирования при действии медленно меняющихся и волновых возмущений.

На рис. 5 (см. третью сторону обложки) видно, что при малых значениях  $T_b, T_g$  ошибки оценивания внешних возмущений  $\Delta f_y, \Delta m_z, \Delta f_z, \Delta m_y$  также малы. Это значит, что оценки  $\hat{f}_y, \hat{m}_z, \hat{f}_z, \hat{m}_y$  внешних возмущений достаточно хорошо приближаются к реальным возмущениям  $f_y, m_z, f_z, m_y$ . Однако использование таких оценок при синтезе регуляторов приводит исполнительные органы к быстрому износу, так как рули реагируют на высокочастотные волновые возмущения, что хорошо видно на рис. 7 (см. третью сторону обложки). Для получения осредненных значений внешних возмущений необходимо увеличить постоянные времени  $T_b$  и  $T_g$ , при этом ошибки оценивания, как показано на рис. 6, противоположны внешним возмущениям.

### Алгоритмы управления

Сложные технические системы, к которым относятся подводные аппараты и роботы, как говорилось ранее, описываются сложными нелинейными дифференциальными уравнениями, нередко с неточной и неполной правой частью. Построение оптимальных законов управления для таких систем практически невозможно. Поэтому на практике пользуются, как правило, законами управления для линейных систем с дальнейшей их коррекцией. Коррекция законов управления сводится либо к уточнению параметров математической модели движения, как показано в работе [9], либо к определению неизвестной правой части дифференциальных уравнений [6, 10], либо к построению множества дифференциальных уравнений, описывающих состояние исследуемого объекта в различных ситуациях, и использованию того или иного уравнения для формирования закона управления [11].

Кроме того, управляющие органы описываются, как правило, нелинейной функцией вида  $\dot{u} = f(a)$ ,



ных процессов при данных законах управления не соответствует требуемым значениям  $\eta_3, \phi_3$ . Для устранения данного недостатка в работе предложены законы управления (10), включающие в себя слагаемые  $\sigma_{bf}$  и  $\sigma_{gf}$ , компенсирующие получаемые смещения.

Из рис. 9, 10 (см. третью сторону обложки) видно, что введение величины  $\sigma_f$  в закон управления позволяет улучшить качество переходных процессов, но при этом качество работы самих рулевых органов практически не меняется, что приводит к их быстрому износу. Для устранения этого недостатка в работе предложено осреднение входного сигнала  $\sigma$ . Пропуская сигнал  $\sigma$  через апериодическое звено

$$\dot{\hat{\sigma}} = \left( \frac{\sigma - \hat{\sigma}}{T_1} \right), \text{ получим его усредненное значение } \hat{\sigma}.$$

Введение апериодического звена, как показано на рис. 11 (см. четвертую сторону обложки), позволяет повысить качество работы управляющих органов, что приводит к снижению их износа и увеличению продолжительности работы.

На рис. 11, 12 (см. четвертую сторону обложки) изображены оценки фазовых координат и заданные значения переходов по глубине и курсу  $\hat{\eta}_1, \eta_3, \hat{\phi}_1, \phi_3, \hat{\psi}_1, \hat{\theta}_1$ , а также значения вертикальных и горизонтальных рулей при использовании регулятора (10). Введение в закон управления дополнительных слагаемых  $\sigma_{bf}$  и  $\sigma_{gf}$ , как видно из рис. 11, 12 (см. четвертую сторону обложки), позволяет повысить качество переходных процессов. Однако данный закон управления не снижает нагрузок на рулевой привод, так как рули практически повторяют внешнее возмущение. Для устранения этого недостатка в работе предложено предварительное осреднение входного сигнала, поступающего на регулятор,

$$\hat{\sigma}_b = \left( \frac{\sigma_b - \hat{\sigma}_b}{T_1} \right) \text{ и } \hat{\sigma}_g = \left( \frac{\sigma_g - \hat{\sigma}_g}{T_1} \right).$$

На рис. (13, 14, см. четвертую сторону обложки) представлены те же режимы, что и на рис. 11, 12, из которых видно, что введение сглаживающего блока позволит существенно снизить нагрузки на рулевой привод.

На рис. 15, 16 (см. четвертую сторону обложки) представлен переход подводного аппарата по заданной траектории. При этом заданная траектория движения разбивается на участки по глубине и курсу, в которых должен находиться объект управления в заданные моменты времени.

### Заключение

Рассмотренный в статье подход, основанный на анализе и разделении невязок на высокочастотные и низкочастотные составляющие, является универсальным, так как практически не зависит от точных значений моделей движения и возмущений и позволяет:

1) расширить возможности использования калмановских алгоритмов фильтрации для объектов, модели которых известны с небольшой точностью, на которые действуют неизвестные внешние возмущения;

2) применять данный подход для различных режимов функционирования, модели которых могут изменяться в значительных пределах;

3) использовать данный подход для широкого класса технических систем, включая как необитаемые, так и обитаемые аппараты и роботы, при действии неизвестных внешних возмущений;

4) в зависимости от постоянной времени фильтра  $T$  получать оценки фазовых координат и внешних возмущений с различной степенью точности. Точность оценок внешних возмущений влияет на нагрузки управляющих органов. При точных оценках внешних возмущений, подаваемых на рули, происходят частые их перекладки, что приводит к быстрому износу рулевых органов;

5) повысить качество управления сложными техническими системами при действии неизвестных возмущений за счет получаемых оценок внешних возмущений;

6) продлить работоспособность рулевых органов за счет подачи на них сглаженных сигналов;

Проведенное моделирование подтверждает работоспособность рассмотренных в работе алгоритмов управления на примере подводного аппарата, описываемого сложной и многомерной системой нелинейных дифференциальных уравнений, при действии волновых и медленно меняющихся возмущений.

### Список литературы

1. Sage A. P., Melsa J. L. Estimation Theory with Applications to Communications and Control., McGraw-Hill, New York, 1971.
2. Sage A. P., Melsa J. L. System Identification. Academic Press Inc., New York, 1970.
3. Коуэн К. Ф. Н., Грант П. М. Адаптивные фильтры. М.: Мир, 1988.
4. Джонсон С. Теория регуляторов, приспособляющихся к возмущениям. В кн. Фильтрация и стохастическое управление в динамических системах / Под ред. Леондеса К. Т. М.: Мир, 1980. 406 с.
5. Мартин У., Стабберуд А. Процесс обновления в задачах идентификации. В кн. Фильтрация и стохастическое управление динамических системах / Под ред. Леондеса К. Т. М.: Мир, 1980. 406 с.
6. Тарасов Н. Н., Тахтамышев М. Г. Алгоритмы получения несмещенных оценок при действии неизвестных внешних возмущений // Проблемы управления. 2012. № 6.
7. Клячко Л. М., Тарасов Н. Н., Острцов Г. Э. Алгоритмы фильтрации с интегральными невязками при управлении судном в условиях развитого волнения // Морской вестник. 2014. № 1 (49).
8. Евланов Л. Г. Контроль динамических систем. М.: Наука, 1979. 430 с.
9. Сейдж Э. П. Оптимальное управление системами. М.: Радио и связь, 1982.
10. Леондес К. Т. Современная теория систем управления. М.: Наука, 1970.
11. Казаков И. Е., Артемьев В. М. Оптимизация динамических систем случайной структуры. М.: Наука, 1980.
12. Шлейер Г. Э., Борисов В. Г. Управление движением морских и речных судов. М.: ИЛУ, 1981.
13. Лукомский Ю. А., Корчанов В. М. Управление морскими подвижными объектами. СПб: Элмор, 1996.

# Control of the Underwater Vehicles with Incomplete Information about the Model of Motion of the Exogenous Disturbances

**N. N. Tarasov**, tnn53@rambler.ru✉, **S. K. Danilova**, lab45\_1@ipu.rssi.ru,  
**I. M. Kuskov**, butovokus@gmail.com,

V. A. Trapeznikov Institute of Control Sciences, RAS, Moscow, 117997, Russian Federation

Corresponding author: **Tarasov Nikolay N.**, Ph. D., Senior Researcher,  
V. A. Trapeznikov Institute of Control Sciences, RAS, Moscow, 117997, Russian Federation  
e-mail: tnn53@rambler.ru

Received on September 19, 2015

Accepted on January 19, 2016

*The authors of the paper propose an approach to the control of the underwater vehicles, the mathematical model of which is known with a certain degree of accuracy, namely, its linear part. The proposed approach is based on the use of the estimates of the phase coordinate of the control object, and the estimates of the unknown external disturbances, which represent a collection of the external influences, and incomplete information about the model of the control object. The authors of this paper propose the filtering algorithms, based on separation of the residuals of the high and low frequency components and allow us to recover not only the phase coordinates of the movement, but the unknown perturbations. The paper also offers control algorithms for the underwater vehicles based on the use of not only estimates of the movement coordinates, but also the estimates of the unknown disturbances, obtained due to the filtering algorithms. Compared with the classical control laws, these algorithms allow us to significantly improve the quality control of the modern underwater vehicles. The paper contains a smoothing algorithm of the signal applied to the controller. This can significantly reduce the load on the governing bodies and thereby improve their performance. Conducted on the example of a non-planar motion of an underwater vehicle described by a complex system of nonlinear differential equations under the action of a slowly varying wave disturbances and modeling, the experiments confirm RA-combat capability proposed in the paper algorithms for filtering and control.*

**Keywords:** mathematical model of movements and disturbances, remotely operated underwater vehicle, autonomous underwater vehicle, filtration algorithms with different processing methods of residuals, integral residuals, recovery of phase coordinates and external actions

For citation:

**Tarasov N. N., Danilova S. K., Kuskov I. M.** Control of the Underwater Vehicles with Incomplete Information about the Model of Motion of the Exogenous Disturbances, *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2015, vol. 17, no. 5, pp. 354–360.

DOI: 10.17587/mau/16.354-360

## References

1. **Sage A. P., Melsa J. L.** Estimation Theory with Applications to Communications and Control, New York, McGraw-Hill, 1971.
2. **Sage A. P., Melsa J. L.** System Identification, New York, Academic Press Inc., 1970.
3. **Cowan K. F. N., Grant P. M.** Adaptive filters, Moscow, Mir, 1988 (in Russian).
4. **Johnson C.** The Theory of regulators that can adapt to disturbances, *In proc. Filtering and stochastic control of dynamic systems*, edited by K. T. Leondes, Moscow, Mir, 1980, 406 p. (in Russian).
5. **Martin W., Stubberud A.** The update Process in identification problems, *In proc. Filtering and stochastic control of dynamic systems*, edited by K. T. Leondes, Moscow, Mir, 1980, 406 p. (in Russian).
6. **Tarasov N. N., Takhtamyshev M. G.** Algorithms for obtaining unbiased estimates under the action of unknown external disturbances, *Problems of Management*, 2012, no. 6 (in Russian).
7. **Klyachko L. M., Tarasov N. N., Ostretsov G. E.** Filter Algorithms with integrated non-bindings under the management of the vessel in terms of developed excitement, *Maritime Bulletin*, 2014, no. 1 (49) (in Russian).
8. **Evlanov L. G.** Control of dynamic systems, Moscow, Nauka, 1979, 430 p. (in Russian).
9. **Sage E. P.** Optimal control systems, Moscow, Radio and communication, 1982 (in Russian).
10. **Leondes K. T.** Modern theory of control systems. Moscow, Nauka, 1970 (in Russian).
11. **Kazakov, I. E., Artemiev V. M.** Optimization of dynamic systems with random structure, Moscow, Nauka, 1980 (in Russian).
12. **Slayer G. E., Borisov V. G.** Control of the movement of sea and river vessels, Moscow, Publishing house of IPU, 1981 (in Russian).
13. **Lukomsky Y. A., Korchanov V. M.** Control marine mobile objects, St. Petersburg Elmore, 1996 (in Russian).

Издательство «НОВЫЕ ТЕХНОЛОГИИ»

107076, Москва, Стромьинский пер., 4

Телефон редакции журнала: (499) 269-5397, тел./факс: (499) 269-5510

Технический редактор *Е. В. Конова*. Корректор *Т. В. Пчелкина*.

Сдано в набор 29.02.2016. Подписано в печать 13.04.2016. Формат 60×88 1/8. Бумага офсетная.  
Усл. печ. л. 8,86. Заказ МН516. Цена договорная.

Журнал зарегистрирован в Комитете Российской Федерации по делам печати, телерадиовещания и средств массовых коммуникаций  
Свидетельство о регистрации ПИ № 77-11648 от 21.01.02

Учредитель: Издательство "Новые технологии"

Оригинал-макет ООО "Авансед солюшнз". Отпечатано в ООО "Авансед солюшнз".  
119071, г. Москва, Ленинский пр-т, д. 19, стр. 1.