

the predicted minimal approach distance is approximately equal to the threshold value. The algorithm, which gives greater value to the probability level, is chosen. The method is fully analytical, so it does not need step-by-step simulation. The appropriate computer program is used as a part of the Air Traffic Control system in the airport of Minsk, Belarus, providing to the controllers a considerable amount of information on the predicted air situations.

Keywords: air traffic control, medium term conflict detection (MTCD), flight safety, aircraft conflict probability, real-time mode

For citation:

Losev S. N., Makarenko V. I., Podolskaya N. N. Probabilistic-Geometric Method for a Medium Term Conflict Detection in Air Traffic Control, *Mekhatronika, avtomatizatsiya, upravlenie*, 2015, vol. 16, no. 4, pp. 277–282.

DOI: 10.17587/mau.16.277-282

References

1. Wang J., Wang B., Zhao Y. A probabilistic algorithm to Medium-Term Conflict Detection with multi-waypoints, *Applied Mechanics and Materials*, 2013, vol. 411–414, pp. 2763–2769.

2. Prandini M., Watkins O. J. Probabilistic aircraft conflict detection, *Distributed Control and Stochastic Analysis of Hybrid Systems Supporting. Safety Critical Real-Time Systems Design (HYBRIDGE)*, May 2005, available at: <http://web.maths.unsw.edu.au/~peterdelmoral/aircraft-conflict.pdf> (date of access 19.01.2015).

3. Alam S., Abbass H. A., Lokan C. J., Ellejmi M., Kirby S. Computational red teaming to investigate failure patterns in Medium Term Conflict Detection, *Proc. of 8th Eurocontrol Innovative Research Workshop* (Bretigny-sur-Orge, France, December 2009), available at: <http://www.eurocontrol.int/eec/gallery/content/public/documents/InnovativeStudies/grants/Computational%20Red%20Teaming%20to%20Investigate%20Failure%20Patterns%20in%20Medium%20Term%20Conflict%20Detection.pdf> (date of access 19.01.2015).

4. GRAFFICA eDEP Development Project. DETAILED DESIGN DOCUMENT. 26 March 2010, available at: http://www.eurocontrol.fr/projects/edep/documents/9.1/eDEP_GRD_DDD.pdf (date of access 19.01.2015).

5. Bakker G. J., Kremer H. J., Blom H. A. P. Probabilistic Approaches Toward Conflict Prediction. NLR-TP-2001-634. National

Aerospace Laboratory, NLR. 2001, available at: <http://reports.nlr.nl:8080/xmlui/bitstream/handle/10921/804/TP-2001-634.pdf?sequence=1> (date of access 19.01.2015).

6. Wentzel E. S. *Teoriya veroyatnosti* (Probability theory), Moscow, Nauka, 1969 (in Russian).

7. Eurocontrol Specification for Medium-Term Conflict Detection, EUROCONTROL-SPEC-0139. Edition Number: 1.0. Edition Date: 15.07.2010, available at: <http://www.eurocontrol.int/sites/default/files/publication/files/20100715-mtcd-spec-v1.0.pdf> (date of access 19.01.2015).

8. Podolskaya N. N. Metod obnaruzheniya srednesrochnykh konfliktov mezhdru vozdushnymi sudami na osnove planov poleta (A medium term conflict detection method using flight plans), *Problems of quality, safety and diagnostics in the of information society environment, materials of sci.-pract. conference KBD-Info—2004* (Sochi, Russia, 1–10 Oct. 2004), Moscow, published by MIEM, 2004, p. 114 (in Russian).

9. Pember S. J., Roberts A. L. U. Air traffic control, EP 2372672 A2. EUROPEAN PATENT APPLICATION. Date of publication: 05.10.2011. Bulletin 2011/40.

10. Irvine R. A Geometrical approach to conflict probability estimation, *Air Traffic Control Quarterly*, 2002, vol. 10, no. 2, pp. 85–113.

11. Irvine R. Target miss distance to achieve a required probability of conflict, *ATM 2003 R & D Conference* (Budapest, June 2003), available at: http://www.atm-seminar.org/past-seminars/5th-seminar-budapest-hungary-june-2003/papers/paper_075 (date of access 19.01.2015).

Corresponding author:

Nonna Podolskaya, specialist, "VNIIRA-OVD" JSC, St. Petersburg, 199106, Russian Federation, e-mail: podolsky47@inbox.ru

УДК 626.02.008

В. Ф. Филаретов^{1, 2}, д-р техн. аук., проф., зав. лаб., filaret@pma.ru,

А. В. Зуев^{1, 2}, канд. техн. наук, мл. науч. сотр., zuev@iacp.dvo.ru,

А. Н. Жирабок^{2, 3}, д-р техн. аук., проф., zhirabok@mail.ru,

А. А. Проценко², инженер, pro293133@gmail.com, В. Subudhi⁴, Professor, bidyadharnitrkl@gmail.com

¹ Институт автоматизации и процессов управления ДВО РАН, 690041, г. Владивосток

² Дальневосточный федеральный университет, Владивосток,

³ Институт прикладной математики ДВО РАН, Владивосток,

⁴ National Institute of Technology Rourkela, India

Метод синтеза систем непрерывной аккомодации к дефектам в навигационно-пилотажных датчиках автономных подводных роботов

Обсуждается метод синтеза высококачественных систем непрерывной аккомодации к дефектам, возникающим в навигационно-пилотажных датчиках движущихся автономных подводных роботов. Предложенный метод основан на использовании кинематических моделей этих роботов и специального комплексирования данных, получаемых от их бортовых датчиков. Достоинством метода является простота реализации и высокая точность компенсации выявляемых дефектов в условиях неопределенности и существенной переменности параметров окружающей среды.

Представлены результаты моделирования, подтверждающие высокую эффективность функционирования синтезированной системы аккомодации.

Ключевые слова: автономный подводный робот, дефект, навигационно-пилотажные датчики, диагностирование, аккомодация

Введение

В настоящее время автономные подводные роботы (АПР) являются самым эффективным инструментом исследования и освоения Мирового океана, а также выполнения различных подводно-технических работ. Важными компонентами АПР, во многом определяющими их способность выполнять поставленные задачи, являются навигационно-пилотажные датчики, показания которых используются для формирования траекторий их движения. Отказ или сбой в работе любого датчика приводит к ошибкам в выполнении поставленных задач или даже к потере робота. Поэтому задача своевременного выявления дефектов в этих датчиках является весьма актуальной. Важной задачей, направленной на повышение работоспособности АПР при появлении незначительных дефектов, при которых еще можно выполнить и успешно завершить операции (миссии), является формирование управляющих воздействий, которые позволяют автоматически сохранить важнейшие характеристики АПР в течение всего времени их работы. Решение последней задачи называют *аккомодацией к дефектам* [1].

Известно несколько подходов к решению задач диагностирования и аккомодации датчиков АПР [2–6]. Эти подходы и методы построены на основе диагностических наблюдателей, использующих нелинейные динамические модели АПР. На каждый наблюдатель подаются управляющие сигналы и измеряемые компоненты вектора состояния АПР. При этом диагностирование осуществляется с использованием анализа сигналов рассогласования (невязок), возникающих между выходами датчиков и выходами соответствующих наблюдателей.

Проведенный анализ показал, что большинство известных подходов и методов обеспечивают качественное решение задач диагностирования и аккомодации только при движениях АПР в плоскости с малой скоростью. Это связано с использованием при синтезе диагностических наблюдателей нелинейных динамических моделей АПР, которые имеют неопределенные и существенно переменные параметры. Но это приводит к появлению отличных от нуля невязок, формируемых наблюдателями, даже при отсутствии дефектов.

В целях эффективного устранения указанного недостатка применяются различные методы робастного диагностирования подсистем АПР, основанные на использовании скользящих наблюдателей [7], нейронных сетей [8], нечеткой логики [10] и др. Известны и различные методы решения задач аккомодации, в основе которых лежат методы оптимального управления [11], H_∞ -оптимизации [12], слежения за эталонной моделью [13], адаптивного управления [14]. Но использование этих средств снижает чувствительность синтезированных наблюдателей к неизвестным (в основном медленно меняющимся) параметрам диагностируемых объектов. При этом большой проблемой в практическом применении многих систем диагностирования и

аккомодации остается большая сложность их практической реализации применительно к АПР.

Таким образом, проблема разработки легко реализуемых систем диагностирования и аккомодации к дефектам, часто появляющимся в навигационно-пилотажных датчиках АПР, без использования громоздких нелинейных уравнений их динамики, содержащих переменные и часто вообще неопределенные параметры, по-прежнему остается важной и актуальной.

1. Состав навигационно-пилотажных датчиков АПР и постановка задачи исследования

В процессе разработки метода аккомодации прежде всего необходимо определить состав навигационно-пилотажных датчиков АПР и взаимосвязь между поступающими от них сигналами. Эту взаимосвязь следует использовать для синтеза диагностических наблюдателей, выявляющих и локализуемых возникающие дефекты.

Состав датчиков бортовой навигационной системы АПР зависит от его типа и назначения. Большинство АПР, выполняющих различные подводные миссии, имеют [15]:

1) доплеровский лаг для измерения его линейных скоростей $[v_x, v_y, v_z]$ относительно окружающей среды по всем трем осям жестко связанной с ним системы координат (ССК);

2) акселерометры, измеряющие линейные ускорения $[a_x, a_y, a_z]$ по всем трем осям ССК;

3) датчик ориентации АПР, измеряющий углы крена, дифферента и курса $[\varphi, \theta, \psi]$ в абсолютной системе координат (АСК);

4) гидроакустическую навигационную систему, измеряющую линейные координаты $[x, y]$ АПР в АСК;

5) датчик глубины для измерения координаты z в АСК;

6) датчики угловых скоростей $[\omega_x, \omega_y, \omega_z]$ относительно трех осей ССК.

Все эти датчики будут использованы при разработке создаваемого метода аккомодации.

Связь между соответствующими сигналами в ССК и в АСК описывается следующим выражением [15]:

$$\dot{\eta} = J(\eta)v, \quad (1)$$

где $v = [v_x, v_y, v_z, \omega_x, \omega_y, \omega_z]^T$ — вектор проекций линейной и угловой скоростей движения АПР на оси ССК; $\eta = [x, y, z, \varphi, \theta, \psi]^T$ — вектор положения и ориентации АПР в АСК; $J(\eta)$ — блочная матрица перевода соответствующих величин из ССК в АСК, имеющая вид [15]

$$J(\eta) = \begin{bmatrix} J_1(\eta) & 0 \\ 0 & J_2(\eta) \end{bmatrix}, \quad (2)$$

где

$$J_1(\eta) = \begin{bmatrix} \cos\psi\cos\theta & -\sin\psi\cos\varphi - \sin\psi\sin\varphi + \cos\psi\cos\varphi\sin\theta & \sin\psi\sin\varphi + \cos\psi\cos\varphi\sin\theta \\ \sin\psi\cos\theta & \cos\psi\cos\varphi + \sin\psi\sin\varphi\sin\theta & -\cos\psi\sin\varphi + \sin\theta\sin\psi\cos\varphi \\ -\sin\theta & \cos\theta\sin\varphi & \cos\theta\cos\varphi \end{bmatrix},$$

$$J_2(\eta) = \begin{bmatrix} 1 & \sin\varphi\tan\theta & \cos\varphi\tan\theta \\ 0 & \cos\varphi & -\sin\varphi \\ 0 & \frac{\sin\varphi}{\cos\theta} & \frac{\cos\varphi}{\cos\theta} \end{bmatrix}.$$

Уравнения (1) и (2) устанавливают связь всех параметров движения АПР и переменных, измеряемых его навигационно-пилотажными датчиками. Эти уравнения не содержат переменных или неопределенных коэффициентов, что удобно для решения задачи аккомодации к возможным дефектам в этих датчиках. Задачу диагностирования можно решить на основе анализа выходных сигналов с рассматриваемых датчиков. При этом требуется не только установить факт возникновения дефекта в конкретном датчике, но и определить значение вносимого им искажения (ошибки), которое должно использоваться системой аккомодации при коррекции программных сигналов управления АПР.

Исходя из сказанного в рассматриваемой работе ставится и решается задача разработки метода синтеза высокоточной, но при этом легко реализуемой системы непрерывной аккомодации к дефектам, обнаруживаемым в реальном времени в навигационно-пилотажных датчиках АПР на основе их кинематических уравнений, описываемых выражениями (1) и (2).

2. Разработка метода синтеза системы точной аккомодации к дефектам в навигационно-пилотажных датчиках АПР

Разрабатываемый метод синтеза системы непрерывной аккомодации к дефектам, возникающим в навигационно-пилотажных датчиках АПР, содержит три основных этапа. На первом с использованием уравнений кинематики АПР и специального комплексирования данных, получаемых от их навигационно-пилотажных датчиков, строится банк диагностических наблюдателей, позволяющий решить задачу обнаружения и локализации дефектов. На втором этапе за счет введения дополнительных наблюдателей с обратной связью по сигналу невязки решается задача идентификации величин возникающих дефектов, а на третьем происходит формирование дополнительных сигналов в соответствующих каналах управления АПР, парирующих возникающие дефекты.

Рассмотрим все три этапа предложенного подхода более детально.

В целях диагностирования и локализации возникающих дефектов в датчиках АПР введем в рассмотрение банк наблюдателей H_1, \dots, H_9 , оценивающих

показания датчиков, измеряющих величины $x, y, z, \varphi, \theta, \psi, v_x, v_y$ и v_z :

$$H_1: \dot{\bar{x}} = J_{11}(\tilde{\theta}, \tilde{\psi})\tilde{v}_x + J_{12}(\tilde{\varphi}, \tilde{\theta}, \tilde{\psi})\tilde{v}_y + J_{13}(\tilde{\varphi}, \tilde{\theta}, \tilde{\psi})\tilde{v}_z,$$

$$H_2: \dot{\bar{y}} = J_{21}(\tilde{\theta}, \tilde{\psi})\tilde{v}_x + J_{22}(\tilde{\varphi}, \tilde{\theta}, \tilde{\psi})\tilde{v}_y + J_{23}(\tilde{\varphi}, \tilde{\theta}, \tilde{\psi})\tilde{v}_z,$$

$$H_3: \dot{\bar{z}} = J_{31}(\tilde{\theta})\tilde{v}_x + J_{32}(\tilde{\varphi}, \tilde{\theta}, \tilde{\psi})\tilde{v}_y + J_{33}(\tilde{\varphi}, \tilde{\theta}, \tilde{\psi})\tilde{v}_z,$$

$$H_4: \dot{\bar{\varphi}} = \tilde{\omega}_x + J_{45}(\tilde{\varphi}, \tilde{\theta})\tilde{\omega}_y + J_{46}(\tilde{\varphi}, \tilde{\theta})\tilde{\omega}_z,$$

$$H_5: \dot{\bar{\theta}} = J_{55}(\tilde{\varphi})\tilde{\omega}_y + J_{56}(\tilde{\varphi})\tilde{\omega}_z,$$

$$H_6: \dot{\bar{\psi}} = J_{65}(\tilde{\varphi}, \tilde{\theta})\tilde{\omega}_y + J_{66}(\tilde{\varphi}, \tilde{\theta})\tilde{\omega}_z,$$

$$H_7: \dot{\bar{v}}_x = \tilde{a}_x,$$

$$H_8: \dot{\bar{v}}_y = \tilde{a}_y,$$

$$H_9: \dot{\bar{v}}_z = \tilde{a}_z, \quad (3)$$

где $\bar{\eta} = [\bar{x}, \bar{y}, \bar{z}, \bar{\varphi}, \bar{\theta}, \bar{\psi}, \bar{v}_x, \bar{v}_y, \bar{v}_z]^T$ — вектор состояния введенного банка наблюдателей; J_{ij} — соответствующие элементы матрицы $J(\eta)$ ($i, j = \overline{1, 6}$); символом "tilde" обозначены сигналы, получаемые от датчиков АПР, содержащих дефекты. Отметим, что первые шесть уравнений модели (3) подобны уравнениям модели (1), три последних очевидны.

Используя выражения (3), вектор невязок $r = [r_1, \dots, r_9]^T$ между выходами банка наблюдателей и сигналами, поступающими от соответствующих датчиков, представленными векторами ошибок в этих сигналах $dv = [dv_x, dv_y, dv_z]^T$ и $d\eta = [dx, dy, dz, d\varphi, d\theta, d\psi]^T$, можно задать в следующем виде:

$$r = \bar{\eta}^* - \bar{\eta},$$

где $\bar{\eta}^* = [\eta + d\eta, v + dv]^T$.

При выявлении дефекта в датчике АПР требуется, учитывая банк наблюдателей (3), определить соотношения между значениями полученных невязок r и отклонениями (ошибками), возникающими в сигналах (в показаниях), поступающих от конкретных датчиков. Такие соотношения задаются с помощью матрицы дефектов, значениями которой являются нули и единицы. Если конкретная невязка чувствительна к определенному дефекту, то на пересечении строки, соответствующей этой невязке, и столбца, соответствующего выявленному дефекту, ставится 1, а в противном случае — 0. Для введенного банка наблюдателей (3) матрица дефектов D принимает вид, показанный в табл. 1, где da_x, da_y и da_z — ошибки в сигналах, поступающих от акселерометра АПР.

Таблица 1

Невязка	Ошибки														
	dx	dy	dz	$d\varphi$	$d\theta$	$d\psi$	dv_x	dv_y	dv_z	$d\omega_x$	$d\omega_y$	$d\omega_z$	da_x	da_y	da_z
r_1	1	0	0	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0
r_2	0	1	0	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0
r_3	0	0	1	1	1	0	1	1	1	0	0	0	0	0	0
r_4	0	0	0	1	1	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0
r_5	0	0	0	1	0	1	0	0	0	1	1	1	0	0	0
r_6	0	0	0	1	1	0	0	0	0	1	1	1	0	0	0
r_7	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	1	0	0
r_8	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	1	0
r_9	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	1

Таблица 2

Невязка	Ошибки														
	dx	dy	dz	$d\varphi$	$d\theta$	$d\psi$	dv_x	dv_y	dv_z	$d\omega_x$	$d\omega_y$	$d\omega_z$	da_x	da_y	da_z
r_1	1	0	0	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0
r_2	0	1	0	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0
r_3	0	0	1	1	1	0	1	1	1	0	0	0	0	0	0
r_4	0	0	0	1	1	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0
r_5	0	0	0	1	0	1	0	0	0	1	1	1	0	0	0
r_6	0	0	0	1	1	0	0	0	0	1	1	1	0	0	0
r_7	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	1	0	0
r_8	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	1	0
r_9	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	1
r_{10}	0	0	0	1	1	1	0	0	0	1	0	1	0	0	0

Анализ элементов матрицы (4) показывает, что по выходным сигналам датчиков, измеряющих переменные ω_y и ω_z , дефекты в них различить не представляется возможным, так как нельзя однозначно определить, какой конкретно сигнал содержит выявленный дефект. В целях устранения этой неоднозначности соотношения банка наблюдателей (3) необходимо скорректировать. Для этого из шестого уравнения системы (3) необходимо выразить переменную $\tilde{\omega}_y$ и подставить полученное выражение в H_4 . В результате удастся получить дополнительный наблюдатель

$$H_{10}: \dot{\tilde{\varphi}} = \frac{J_{45}(\tilde{\varphi}, \tilde{\theta})J_{65}(\tilde{\varphi}, \tilde{\theta})\tilde{\psi} + (J_{65}(\tilde{\varphi}, \tilde{\theta}) - J_{45}(\tilde{\varphi}, \tilde{\theta}))J_{66}(\tilde{\varphi}, \tilde{\theta})\tilde{\omega}_z + J_{65}(\tilde{\varphi}, \tilde{\theta})\tilde{\omega}_x}{J_{65}(\tilde{\varphi}, \tilde{\theta})},$$

невязка которого уже не будет зависеть от дефекта, определяющего значение $d\omega_y$.

В результате скорректированная матрица дефектов, позволяющая успешно решить поставленную задачу, будет иметь вид, показанный в табл. 2.

Таким образом, новая матрица D_1 , построенная на основе сигналов, получаемых от всех навигационных датчиков АПР, будет позволять однозначно определять наличие дефекта в каждом из диагностируемых датчиков.

В целях дальнейшей локализации выявляемых дефектов введем в рассмотрение вектор I

$$I = [I_1 \ I_2 \ \dots \ I_{10}]^T; \quad I_k = \begin{cases} 1, & \text{если } |r_k| > r_{k0}, \\ 0, & \text{если } |r_k| \leq r_{k0}, \end{cases}$$

где r_{k0} — величина, определяющая порог чувствительности k -го наблюдателя ($k = \overline{1, 10}$).

Иными словами, указанный k -й элемент вектора I будет равен 1, если невязка k -го наблюдателя превысит пороговое значение, и нулю — в противном случае. Сравнивая вектор I со столбцами матрицы D_1 , можно получить вектор L :

$$L = [L_1 \ L_2 \ \dots \ L_{15}]^T; \quad L_l = \begin{cases} 1, & \text{если } I = D_1^l, \\ 0, & \text{если } I \neq D_1^l, \end{cases}$$

где D_1^l — l -й столбец матрицы D_1 ($l = \overline{1, 15}$).

При отсутствии дефектов все элементы вектора L будут равны нулю. При возникновении k -го дефекта l -й элемент вектора L станет равным 1, а остальные останутся нулевыми. Таким образом, задачу диагностирования и локализации дефектов в сигналах, получаемых от навигационных датчиков АПР, можно считать решенной. Однако после обнаружения и локализации дефектов для реализации системы аккомодации необходимо в реальном масштабе времени точно оценить значения ошибок, обусловленных этими дефектами. При этом значения ошибок dx , dy , dz , $d\theta$ и $d\psi$ можно определить сразу путем интегрирования сигналов невязок, получаемых соответственно от наблюдателей H_1 , H_2 , H_3 , H_5 и H_6 системы (3). Для определения дефектов по сигналам, получаемым от остальных датчиков АПР, необходимы дополнительные процедуры, которые будут рассмотрены далее.

Следует отметить, что описание наблюдателя H_4 содержит коэффициенты, зависящие от φ . Поэтому простым интегрированием не удастся определить значение ошибки $d\varphi$, и следует ввести в рассмотрение новый наблюдатель H_1^* , который должен быть построен при совместном решении 5-го и 6-го уравнений системы (3) (при условии действия только одного этого дефекта):

$$\dot{\hat{\varphi}} = \arcsin \frac{\omega_y \dot{\psi} \cos \theta - \dot{\theta} \omega_z}{\omega_y^2 + \omega_z^2}, \quad (4)$$

где $\hat{\varphi}$ — переменная состояния наблюдателя H_1^* . Тогда значение этой ошибки будет равно: $d\varphi = \tilde{\varphi} - \hat{\varphi}$.

Для определения величин ошибок dv_x , dv_y , dv_z , $d\omega_x$, $d\omega_y$, $d\omega_z$, da_x , da_y , da_z необходимо ввести в рассмотрение новые наблюдатели H_2^* , ..., H_{10}^* , которые совпадают по виду с наблюдателями H_1 , ..., H_9 , но при этом содержат обратную связь, построенную с использованием сигнала невязки [16]. В частности, при возникновении ошибки dv_x , когда дефекты в остальных датчиках отсутствуют, наблюдатель H_2^* можно описывать уравнением

$$\dot{\hat{x}} = J_{11}(v_x + dv_x) + J_{12}v_y + J_{13}v_z + k_2 \hat{r}_2, \quad (5)$$

где \hat{x} — переменная состояния этого наблюдателя, k_2 — коэффициент усиления обратной связи, $\hat{r}_2 = x - \hat{x}$ — невязка наблюдателя H_2^* .

Учитывая выражения (1) и (5), можно записать:

$$\dot{\hat{r}}_2 = \dot{x} - \dot{\hat{x}} = J_{11}v_x + J_{12}v_y + J_{13}v_z - J_{11}(v_x + dv_x) - J_{12}v_y - J_{13}v_z - k_2r_2 = J_{11}dv_x - k_2\hat{r}_2. \quad (6)$$

В общем виде поведение сигнала $dv_x(t)$ во времени можно описать зависимостью:

$$dv_x(t) = ae^{j\omega t},$$

где a — амплитуда изменения ошибки; ω — частота изменения ошибки; j — мнимая единица. С учетом этого описания решение уравнения (6) имеет вид

$$\hat{r}_2(t) = C_1 e^{-k_2 t} + \frac{-J_{11}a}{\sqrt{k_2^2 + \omega^2}} e^{j\omega t + \phi}, \quad (7)$$

где $\phi = \arctg(\omega/k_2)$, C_1 — некоторая константа.

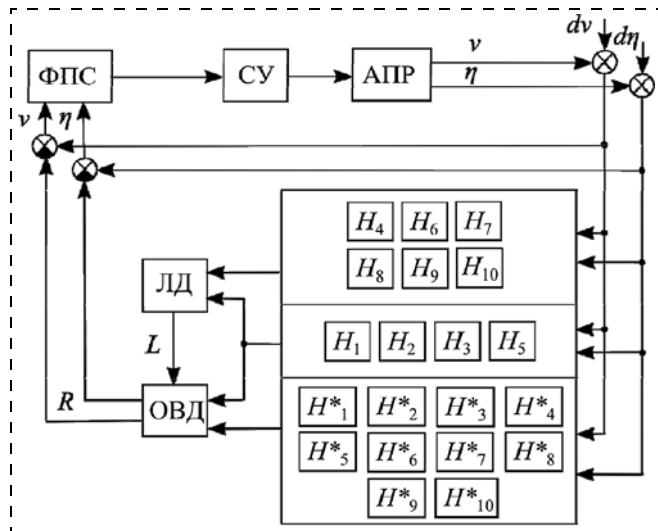


Рис. 1. Обобщенная структурная схема системы адаптации к дефектам в навигационно-пилотажных датчиках АПР: ЛД — блок локализации дефектов; ОВД — блок определения значений ошибок (дефектов); СУ — система управления АПР; ФПС — блок формирования программных сигналов

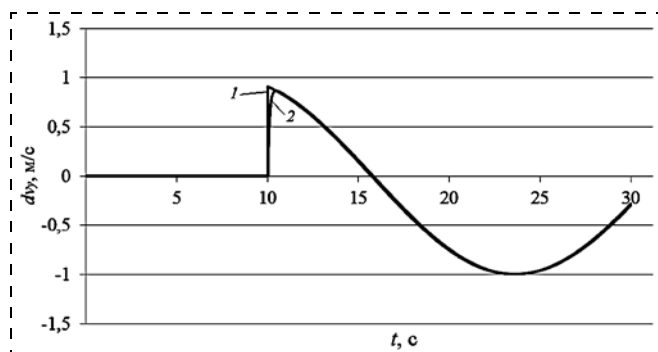


Рис. 2. Значение дефекта dv_y , определенного алгоритмом диагностики, когда $dv_y = 0,75\sin(0,2t)$

Если $k_2 \gg \omega$ (это справедливо в большинстве реальных систем), то выражение (7) можно переписать в виде

$$\hat{r}_2(t) = C_1 e^{-k_2 t} - \frac{J_{11}dv_x}{k_2}.$$

Исследования показали, что при синтезе систем адаптации к дефектам в датчиках АПР желательно выбирать $k = 3/T_C$, где T_C — время, за которое сигналы невязки входят в 5 %-ю зону от искомой величины. В этом случае в установившемся режиме значение возникающей ошибки определяется в виде

$$dv_x = -\frac{\hat{r}_2(t)k_2}{J_{11}}.$$

Подобным же образом определяются остальные ошибки.

Таким образом, после введения новых наблюдателей H_2^* , ..., H_{10}^* удалось полностью решить задачу оценки значений ошибок, возникающих во всех навигационных датчиках АПР.

На третьем этапе синтеза систем адаптации значения возникающих ошибок используются для формирования дополнительных сигналов в системах управления АПР, устраняющих эти дефекты. Для решения этой задачи использован вектор вычисленных ошибок R в виде

$$R = [L_1 dx \dots L_{15} da_z]^T. \quad (8)$$

Если обнаружена ошибка d_k , то на выходе системы наблюдателей формируется вектор R , l -й элемент которого равен значению ошибки, а остальные равны нулю. При отсутствии дефектов все элементы вектора будут нулевыми. Далее исходя из уравнения невязки и выражения (8), отнимая полученные значения ошибок от реальных сигналов датчиков, можно получить корректные значения измеряемых величин, необходимые для формирования программных сигналов управления АПР:

$$\eta = [\tilde{x} - R_1, \tilde{y} - R_2, \tilde{z} - R_3, \tilde{\varphi} - R_4, \tilde{\theta} - R_5, \tilde{\psi} - R_6]^T,$$

$$v = [\tilde{v}_x - R_7, \tilde{v}_y - R_8, \tilde{v}_z - R_9, \tilde{\omega}_x - R_{10}, \tilde{\omega}_y - R_{11}, \tilde{\omega}_z - R_{12}]^T,$$

$$a = [\tilde{a}_x - R_{13}, \tilde{a}_y - R_{14}, \tilde{a}_z - R_{15}]^T.$$

Обобщенная структурная схема синтезированной системы адаптации представлена на рис. 1. Эта система позволяет определить, локализовать и оценить значения ошибок, возникающих в навигационных датчиках АПР.

3. Исследование работы синтезированной системы адаптации

В целях проверки работоспособности и эффективности синтезированной системы адаптации было проведено численное моделирование, в процессе которого использовалась модель реального АПР с адаптивной системой управления [17]. Мо-

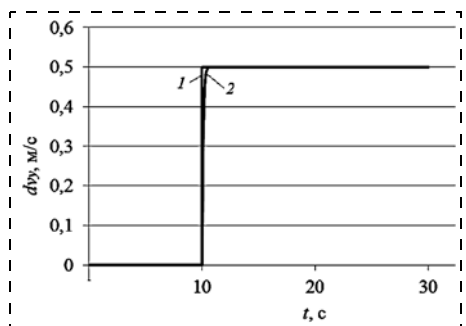


Рис. 3. Значение дефекта dv_y , определенного алгоритмом диагностирования, когда $dv_y = 1(t)$

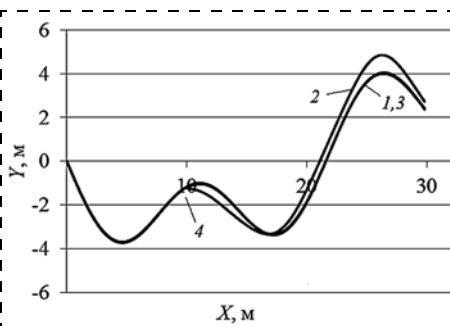
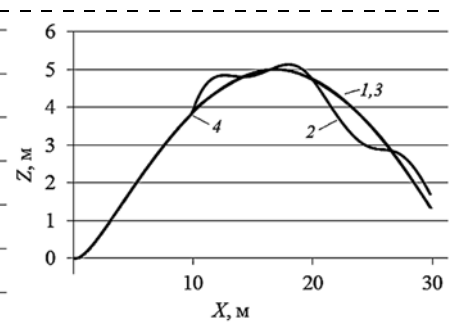


Рис. 4. Траектория движения АПР в плоскостях XU и XZ :

1 — заданная траектория движения АПР; 2 — траектория движения АПР при наличии дефекта; 3 — траектория движения АПР при работе предложенной системы аккомодации; 4 — момент появления дефекта



делирование проводили при нулевых начальных состояниях АПР и наблюдателей. Возникновение дефекта имитировалось изменением величины dv_y по законам $dv_y = 0,75\sin(0,2t)$ и $dv_y = 1(t)$, начиная с момента времени $t = 10$ с.

На рис. 2 и 3 представлены результаты работы системы диагностирования, позволяющей в реальном масштабе времени осуществлять процедуру диагностирования неисправных датчиков АПР, а также точно определять значение возникающих в них ошибок. На этих рисунках кривая 1 обозначает заданную ошибку dv_y , а кривая 2 — значение этой ошибки, полученной с помощью системы диагностирования, рассмотренной в статье.

На рис. 4 представлены траектории движения АПР в вертикальной и горизонтальной плоскостях при отсутствии и наличии дефектов в датчике скорости. На этом рисунке показана эффективность работы системы аккомодации при компенсации дефектов (когда они являются переменными). Из рис. 4 видно, что синтезированная система позволила не только определить и точно оценить появившийся дефект, но и, обнаружив его, сохранить требуемую точность работы АПР. Аналогичные результаты получены и при возникновении различных по величине ошибок в других датчиках.

Полученные результаты математического моделирования полностью подтвердили работоспособность и высокую эффективность предложенного метода синтеза системы аккомодации к типовым дефектам, появляющимся в навигационно-пилотажных датчиках АПР.

Заключение

В данной работе предложен метод синтеза высококачественной системы непрерывной аккомодации к дефектам, возникающим в навигационно-пилотажных датчиках АПР. К достоинствам метода относится тот факт, что он использует не динамическую, а только кинематическую модель робота. Синтезированные с помощью этого метода системы имеют простую практическую реализацию, но при этом обеспечивают высокую точность компенсации выявляемых дефектов. Этот метод, однако, работает при появлении любого, но только одного дефекта.

Работа проводилась при финансовой поддержке Научного фонда ДВФУ (соглашение № 13-06-0112-м а), Минобрнауки РФ (государственное задание 1141), а также РФФИ.

Список литературы

1. Blanke M., Kinnaert M., Lunze J., Staroswiecki M. *Diagnosis and Fault Tolerant Control*. Springer-Verlag. 2003. P. 571.
2. Жирабок А. Н., Писарец А. М. Диагностирование датчиков подводных роботов // Мехатроника, автоматизация, управление. 2004. № 9. С. 15—21.
3. Жирабок А. Н., Писарец А. М. Об одном подходе к диагностированию двигателей подводных аппаратов // Труды между. НТК "Технические проблемы освоения мирового океана", Владивосток: ИПМТ ДВО РАН. 2005. С. 71—77.
4. Antonelli G., Caccavale F., Sansone C., Villani L. Fault diagnosis for AUVs using support vector machines // Proceedings of IEEE International Conference on Robotics and Automation. 2004. Vol. 5. P. 4486—4491.
5. Alessandri A., Caccia M., Verruggio G. A Model-Based Approach to Fault Diagnosis in Unmanned Underwater Vehicles // Proceedings of Oceans. 1998. Nice, France. P. 825—829.
6. Antonelli G. A Survey of Fault Detection/Tolerance Strategies for AUVs and ROVs // Springer Tracts in Advanced Robotics. 2003. Vol. 1. P. 109—127.
7. Alessandri A., Hawkinson T., Healey A. J., Verruggio G. Robust Model-Based Fault Diagnosis for Unmanned Underwater Vehicles Using Sliding Mode Observers // Proc. Int. Symposium Unmanned Untethered Submersible Technology, August 1999. P. 1—8.
8. Deuker B., Perrier M., Amy B. Fault-Diagnosis of Subsea Robots Using Neuro-Symbolic Hybrid Systems // Oceans. Nice, F. 1998. P. 830—834.
9. Dhahri S., Ben Hmida F., Sellami A. LMI-based sliding-mode observer design method for reconstruction of actuator and sensor faults // Int. Journal on Sciences and Techniques of Automatic control. V. 1. N. 1. 2007. P. 91—107.
10. Wang J. Wan L. Jiang C., Sun Y. Wavelet neural network applied to fault diagnosis of underwater vehicle // Proceedings of Control Conference (CCC). 2011. P. 4301—4306.
11. Staroswiecki M., Yang H., Jiang B. Progressive accommodation of aircraft actuator faults // Proc. IFAC Symp. Safeprocess'2006. Beijing, China, 2006. P. 877—882.
12. Weng Z., Patton R. Cui P. Active fault-tolerant control of a double inverted pendulum // Proc. IFAC Symp. Safeprocess'2006. Beijing, PR China, 2006. P. 1591—1596.
13. Staroswiecki M. Fault tolerant control: the pseudo inverse method revisited // Proc. 16th IFAC Congr. Prague, Czech. Republic, 2005.
14. Jang B., Staroswiecki M., Cocquempot V. Active fault tolerant control for a class nonlinear systems // Proc. IFAC Symp. Safeprocess'03. Washington, USA, 2003. P. 127—132.
15. Fossen T.I. *Guidance and control of ocean vehicles*. John Wiley & Sons Ltd. 1994. P. 494.
16. Филаретов В. Ф., Жирабок А. Н., Зуев А. В., Проценко А. А. Разработка метода синтеза системы аккомодации к дефектам в электроприводах манипуляционных роботов // Информационно-измерительные и управляющие системы. 2013. № 4, т. 11. С. 26—33.
17. Филаретов В. Ф., Лебедев А. В., Юхимец Д. А. Устройства и системы управления подводных роботов. М.: Наука. 2005. 270 с.

Method of Synthesis of Continuous Systems of Accommodation to the Faults in Navigation Sensors of Autonomous Underwater Robots

V. F. Filareto^{a, b}, filaret@pma.ru, A. V. Zuev^{a, b}, zuev@iacp.dvo.ru, A. N. Zhirabok^{b, c}, zhirabok@mail.ru, A. A. Procenko^b, pro293133@gmail.com, B. Subudhi^d, bidyadharnitrkl@gmail.com,
^aInstitute for Automation and Control Processes, Far Eastern Branch of RAS, Vladivostok, 690041, Russia
^bFar Eastern Federal University, 8, Sukhanova St., Vladivostok, 690950, Russia
^cInstitute of Applied Mathematics, Far Eastern Branch of RAS, Vladivostok, 690041, Russia
^dNational Institute of Technology, Rourkela, India

Received on December, 2014

Today, the problem of timely detection and accommodation to the arising faults in navigation sensors of autonomous underwater robots (AUR) is very topical. Analysis shows that the existing approaches and methods provide a qualitative solution to the accommodation problems of faults only in case of a slow speed motion of AUR. In this paper, a new synthesis method of high-quality continuous accommodation systems to faults arising in the navigation sensors of AUR is proposed and investigated. This method consists of three main stages. At the first stage, the problem of detection and localization of faults based on the use of a robot's kinematic model and special data fusion from its sensors is solved. It ensures high quality diagnostics data, because the kinematic model connects all the motion parameters of AUR and variables measured by its navigation sensors. At the second stage, the problem of the faults' size identification is solved due to introduction of special feedback in each observer. At the third stage, the additional control signals for AUR guaranteeing expeditious parrying of the arising faults are formed. The advantage of the proposed method is simplicity of its realization and high precision of compensation of the revealed faults in the conditions of uncertainty and essential variability of the environmental parameters. The modeling results prove high efficiency of operation of the synthesized system of accommodation.

Keywords: underwater robot, diagnosis, faults, accommodation to faults, navigation sensors

Acknowledgements: This work was financially supported by the Science Foundation FEFU (agreement no. 13-06-0112-m a), Ministry of Education of the Russian Federation (public job in 1141), as well as RFBR.

For citation:

Filareto V. F., Zuev A. V., Zhirabok A. N., Procenko A. A., Subudhi B. Method of Synthesis of Continuous Systems of Accommodation to the Faults in Navigation Sensors of Autonomous Underwater Robots, *Mekhatronika, avtomatizatsiya, upravlenie*, 2015, vol. 16, no. 4, pp. 282–288.

DOI: 10.17587/mau.16.282-288

References

1. Blanke M., Kinnaert M., Lunze J., Staroswiecki M. *Diagnosis and Fault Tolerant Control*, Springer-Verlag, 2003, 571 p.
2. Zhirabok A. N., Pisaretc A. M. Diagnostirovanie datchikov podvodnykh robotov (Diagnosing of sensors of underwater robots), *Mekhatronika, avtomatizatsiya, upravlenie*, 2004, no. 9, pp. 15–21. (in Russian)
3. Zhirabok A. N., Pisaretc A. M. Ob odnom podkhode k diagnostirovaniyu dvizhitelei podvodnykh apparatov (An approach to the diagnosis of propulsion underwater vehicles), *Proc. of the International Scientific and Technical Conference "Technical problems of the world's oceans"*, Vladivostok, 2005, pp. 71–77. (in Russian)
4. Antonelli G., Caccavale F., Sansone C., Villani L. Fault diagnosis for AUVs using support vector machines, *Proc. of IEEE International Conference on Robotics and Automation*, 2004, vol. 5, pp. 4486–4491.
5. Alessandri A., Caccia M., Verruggio G. A Model-Based Approach to Fault Diagnosis in Unmanned Underwater Vehicles, *Proc. of Oceans, Nice, France*, 1998, pp. 825–829.
6. Antonelli G. A Survey of Fault Detection/Tolerance Strategies for AUVs and ROVs, *Springer Tracts in Advanced Robotics*, 2003, vol. 1, pp. 109–127.
7. Alessandri A., Hawkinson T., Healey A. J., Verruggio G. Robust Model-Based Fault Diagnosis for Unmanned Underwater Vehicles Using Sliding Mode Observers, *Proc. International Symposium Unmanned Untethered Submersible Technology*, 1999, pp. 1–8.
8. Deuker B., Perrier M., Amy B. Fault-Diagnosis of Subsea Robots Using Neuro-Symbolic Hybrid Systems, *Proc. of Oceans, Nice, France*, 1998, pp. 830–834.
9. Dhahri S., Ben Hmida F., Sellami A. LMI-based sliding-mode observer design method for reconstruction of actuator and sensor faults, *International Journal on Sciences and Techniques of Automatic control*, vol. 1, no. 1, 2007, pp. 91–107.
10. Wang J., Wan L., Jiang C., Sun Y. Wavelet neural network applied to fault diagnosis of underwater vehicle, *Proc. of Control Conference (CCC)*, 2011, pp. 4301–4306.
11. Staroswiecki M., Yang H., Jiang B. Progressive accommodation of aircraft actuator faults, *Proc. IFAC Symp. Safeprocess'2006. Beijing, China*, 2006, pp. 877–882.
12. Weng Z., Patton R., Cui P. Active fault-tolerant control of a double inverted pendulum, *Proc. IFAC Symp. Safeprocess'2006. Beijing, PR China*, 2006, pp. 1591–1596.
13. Staroswiecki M. Fault tolerant control: the pseudo inverse method revisited, *Proc. 16th IFAC Congr. Prague, Czech Republic*, 2005.
14. Jang B., Staroswiecki M., Cocquemot V. Active fault tolerant control for a class nonlinear systems, *Proc. IFAC Symp. Safeprocess'03. Washington, USA*, 2003, pp. 127–132.
15. Fossen T. I. *Guidance and control of ocean vehicles*, John Wiley & Sons Ltd., 1994, 494 p.
16. Filareto V. F., Zhirabok A. N., Zuev A. V., Procenko A. A. Razrabotka metoda sinteza sistemy akkomodatsii k defektam v elektroprivodakh manipulyatsionnykh robotov (Development of a method of synthesis of accommodation to defects in electric robotic manipulator), *Informacionno-Izmeritel'nye i Upravljajushhie Sistemy*, 2013, no. 4 (11), pp. 26–33. (in Russian).
17. Filareto V. F., Lebedev A. V., Yukhimets D. A. *Ustroistva i sistemy upravleniya podvodnykh robotov* (Devices and control systems of underwater robots), Moscow, Nauka, 2005, 270 p. (in Russian).

Corresponding author:

Zuev Aleksandr V., PhD, Junior Researcher, Institute for automation and control processes Far Eastern Branch of RAS, 690041, Vladivostok, Russia, Far Eastern Federal University, Vladivostok, 690950, Russia, e-mail: zuev@iacp.dvo.ru

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 З. В. Наумова.

Сдано в набор 02.02.2015. Подписано в печать 13.03.2015. Формат 60×88 1/8. Бумага офсетная. Усл. печ. л. 8,86. Заказ МН415. 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.