

УДК 681.513

В.Х. Пшихопов, Б.В. Гуренко, М.Ю. Медведев, А.М. Маевский, С.П. Голосов**ОЦЕНИВАНИЕ АДДИТИВНЫХ ВОЗМУЩЕНИЙ АНПА РОБАСТНЫМ НАБЛЮДАТЕЛЕМ С НЕЛИНЕЙНЫМИ ОБРАТНЫМИ СВЯЗЯМИ***

Предлагаются алгоритмы оценивания аддитивных возмущений, действующих на АНПА в процессе его движения. Рассматриваемые алгоритмы отличаются нелинейным изменением коэффициентов усиления наблюдателя в зависимости от ошибки оценивания. В связи с тем, что ошибка не измеряется, предлагаются алгоритмы ее оценивания, основанные на асимптотическом вычислении производных. Разрабатываемый метод позволяет снизить интегральную погрешность оценивания возмущения при заданном качестве подавления случайного шума. Представлены результаты анализа работы наблюдателей возмущений в рамках непрямого адаптивного позиционно-траекторного управления. Показано, что наблюдатель возмущений обеспечивает асимптотическую сходимость оценки. Также показано, что постоянная интегрирования не влияет на свойства оценок, поэтому она может выбираться равной нулю. Приводятся результаты моделирования, подтверждающие улучшение критерия оценивания до 40 % по сравнению с наблюдателем, использующим постоянные коэффициенты усиления. Также приводятся результаты моделирования адаптивной системы АНПА при действии на него возмущения, обусловленного постоянным течением.

Управление; АНПА; оценивание возмущений; робастный наблюдатель.

V.Kh. Pshikhopov, B.V. Gurenko, M.Yu. Medvedev, A.M. Maevsky, S.P. Golosov**ESTIMATION OF ADDITIVE DISTURBANCES FOR AUTONOMOUS UNDERWATER VEHICLES BY ROBUST ESTIMATOR WITH NONLINEAR FEEDBACKS**

The paper presents estimation algorithms of additive disturbances for autonomous underwater vehicles control systems. Peculiarity of the algorithms is nonlinear dependence of the estimator gains from estimation error. New algorithm of non-measurable error estimation is suggested. Developed method allows decrease integral error of disturbance estimation. In this paper computer experiment results are presented. Asymptotical stability of the suggested estimation method is proved. In addition it is proved that integrating constant may be equal to zero. Simulation results are presented for both estimation as well as adaptive closed-loop system of UAV. Nonlinear coefficients of the estimator increases performance of estimations. The profits is about 40 %. Simulation results for AUV with a constant underset is presented. The indirect adaptive control system avoids influence of the disturbance.

Control of airship; estimation of disturbances; estimation of parameters.

Введение. Для управления АНПА успешно применяются системы позиционно-траекторного управления, которые строятся в классе не прямых адаптивных систем [1–5]. В таких системах на качество замкнутой системы существенно влияют алгоритмы оценивания [6, 7]. В данной работе развивается метод робастного оценивания внешних, параметрических и структурных возмущений, представленных в аддитивной форме [8–22].

На рис.1 представлена структура позиционно-траекторной непрямого адаптивного системы управления АНПА с наблюдателем.

На рис. 1 используются следующие обозначения: РЕГ – регулятор; ОУ – объект управления; НАБЛ – наблюдатель; g – вектор задающих воздействий; u – вектор управляющих воздействий; y – вектор измеряемых координат; x – вектор оценок, получаемых наблюдателем; f – вектор внешних возмущений, действующих на объект.

* Работа поддержана грантами Президента Российской Федерации № НШ-3437.2014.10, МД-1098.2103.10 и грантом РФФИ 13-08-00315а.

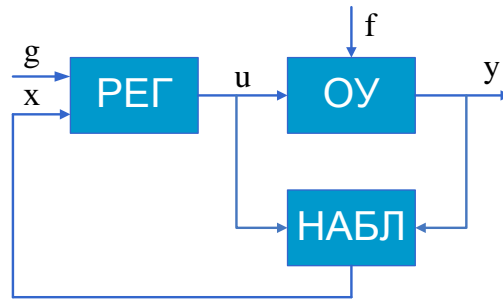


Рис. 1. Структура позиционно-траекторной системы непрямого адаптивного управления

Достоинством такой адаптивной системы управления является независимость функционирования контура наблюдения от контура управления. Недостатком системы, показанной на рис. 1, является требование по выполнению теоремы разделения. Область устойчивости замкнутой системы в некоторых случаях может зависеть от скорости оценивания возмущений в наблюдателе.

Синтез наблюдателя возмущений. Рассмотрим уравнения динамики АНПА, в которых присутствуют наиболее существенные неопределенности:

$$\dot{x} = M^{-1}(F_u + F_d). \quad (1)$$

Согласно методу синтеза робастных наблюдателей возмущений [8, 12–14], введем в модель (1) возмущение

$$\begin{aligned} \dot{x} &= M^{-1}(F_u + F_d + F_{est}) \\ \dot{F}_{est} &= g(F_{est}), \end{aligned} \quad (2)$$

где F_{est} – возмущение; $g(F_{est})$ – функция, аппроксимирующая модель возмущения, действующего на объект.

Введем вектор ошибок оценивания:

$$e_n = F_{est} - \hat{F}_{est}, \quad (3)$$

где \hat{F}_{est} – оценка возмущения.

Согласно процедуре синтеза редуцированных наблюдателей, введем следующую замену переменных:

$$\hat{F}_{est} = \hat{z} + s(x), \quad (4)$$

где \hat{z} – вектор новых переменных; $s(x)$ – функция, подлежащая определению в ходе синтеза наблюдателя.

Тогда выражение (3) с учетом (4) принимает вид

$$e_n = F_{est} - \hat{z} - s(x). \quad (5)$$

Потребуем, чтобы оценка возмущения подчинялась следующему уравнению, обеспечивающему экспоненциальную асимптотическую устойчивость:

$$\dot{e}_n + L(x)e_n = 0, \quad (6)$$

где $L(x)$ – матрица коэффициентов наблюдателя, определяющая время и характер переходных процессов.

Продифференцируем выражение (5) в силу уравнений объекта (2):

$$\dot{e}_n = \dot{F}_{est} - \dot{\hat{z}} - \frac{\partial s(x)}{\partial x} \dot{x} = g(F_{est}) - \dot{\hat{z}} - \frac{\partial s(x)}{\partial x} M^{-1}(F_u + F_d + F_{est}). \quad (7)$$

Подставим выражения (5) и (7) в уравнение (6):

$$g(F_{est}) - \dot{\hat{z}} - \frac{\partial s(x)}{\partial x} M^{-1}(F_u + F_d + F_{est}) + L(x)(F_{est} - \hat{z} - s(x)) = 0, \quad (8)$$

Условие независимости уравнения (8) от возмущений F_{est} имеют вид

$$g(F_{est}) - \frac{\partial s(x)}{\partial x} M^{-1} F_{est} + L(x) F_{est} = 0. \quad (9)$$

Выберем функцию в $g(F_{est})$ виде

$$g(F_{est}) = G_{est} F_{est}, \quad (10)$$

где G_{est} – матрица постоянных коэффициентов.

Тогда уравнение (9) с учетом (10) принимает вид

$$G_{est} F_{est} - \frac{\partial s(x)}{\partial x} M^{-1} F_{est} + L(x) F_{est} = 0. \quad (11)$$

Из (11) находим

$$\frac{\partial s(x)}{\partial x} = (L(x) + G_{est}) M. \quad (12)$$

В общем случае решение уравнения (12) имеет вид

$$s(x) = G_{est} Mx + \int L(x) M dx + f_0, \quad (13)$$

где f_0 – константа, независящая от вектора x .

Тогда уравнения наблюдателя возмущений (4), (8) принимают вид:

$$\dot{\hat{z}} = -L(x)\hat{z} - (L(x) + G_{est})(F_u + F_d) - L(x) \left(G_{est} Mx + \int L(x) M dx + f_0 \right), \quad (14)$$

$$\dot{\hat{F}}_{est} = \hat{z} + G_{est} Mx + \int L(x) M dx + f_0. \quad (15)$$

Рассмотрим пример реализации алгоритма оценивания возмущений (14), (15).

Будем полагать матрицу $L(x) = L$ постоянной. Выберем матрицу $G_{est} = 0$ нулевой матрицей, что соответствует локальной аппроксимации аддитивных возмущений рядом Тейлора нулевого порядка. В этом случае уравнения (14), (15) принимают вид:

$$\dot{\hat{z}} = -L\hat{z} - L(F_u + F_d) - L(LMx + f_0), \quad (16)$$

$$\dot{\hat{F}}_{est} = \hat{z} + LMx + f_0. \quad (17)$$

С целью анализа уравнений (16), (17), продифференцируем выражение (17) с учетом уравнений объекта (2) и уравнений наблюдателя (16):

$$\begin{aligned} \dot{\hat{F}}_{est} &= \dot{\hat{z}} + LM\dot{x} = -L\hat{z} - L(F_u + F_d) - L(LMx + f_0) + LMM^{-1}(F_u + F_d + F_{est}) = \\ &= -L\hat{z} - L(LMx + f_0) + LF_{est}. \end{aligned} \quad (18)$$

Выразим из (17) переменную \hat{z} подставим ее в (18):

$$\begin{aligned}\dot{\hat{F}}_{est} &= -L(\hat{F}_{est} - LMx - f_0) - L(LMx + f_0) + LF_{est} = \\ &= -L(\hat{F}_{est} - F_{est}).\end{aligned}\quad (19)$$

Из (19) следует, что алгоритм (16), (17) обладает экспоненциальной асимптотической устойчивостью в соответствии с уравнением (6). Кроме того, из (19) видно, что свойства наблюдателя возмущений не зависят от константы $\hat{F}_{est} = \hat{z} + LMx + f_0$, поэтому она может быть принята, равной нулю. В этом случае уравнения наблюдателя возмущений (16), (17) принимают вид:

$$\dot{\hat{z}} = -L\hat{z} - L(F_u + F_d) - L^2Mx, \quad (20)$$

$$\hat{F}_{est} = \hat{z} + LMx. \quad (21)$$

Повышение точности наблюдателя. Непрямое адаптивное управление широко распространено в системах управления подвижными объектами в силу того, что структура и параметры регулятора не зависят от структуры и параметров наблюдателя. Это позволяет использовать известные законы управления и адаптировать их за счет контура оценивания, который может строиться на произвольном базисе. При этом данная структура удобна в том случае, когда необходимо модернизировать или адаптировать существующую систему управления. В случае достаточно высокого быстродействия алгоритма оценивания качество адаптивной системы, как минимум, не уступает неадаптивной системе. Однако во время переходных процессов в наблюдателе качество замкнутой системы может ухудшаться вплоть до потери асимптотической устойчивости.

Непрямое адаптивное управление имеет существенный недостаток, заключающийся в том, что, в общем случае, в нелинейных системах не выполняется теорема разделения, что требует включать наблюдатель возмущений в контур управления. Этот недостаток может быть устранен путем повышения быстродействия алгоритмов оценивания в области больших отклонений.

Однако повышение быстродействия наблюдателя (20), (21) за счет увеличения матрицы коэффициентов усиления L приводит к увеличению влияния случайных шумов, действующих в канал измерения. В этой связи ставится задача повышения быстродействия наблюдателя (20), (21) в области больших отклонений без увеличения этих коэффициентов в установившемся режиме. Данная задача может быть решена за счет нелинейного изменения коэффициентов усиления наблюдателя, который может быть записан в виде:

$$\dot{\hat{z}} = -L(e_n)\hat{z} - L(e_n)(F_u + F_d) - L(e_n)L(e_n)Mx, \quad (22)$$

$$\hat{F}_{est} = \hat{z} + L(e_n)Mx, \quad (23)$$

Аналогичный подход использован в работах [10, 11, 15–17] для повышения быстродействия наблюдателя производных. Однако метод оценивания производных, представленный в [10, 11, 15–17], опирается на информацию об ошибке по величине, от которой вычисляются производные по времени. В данном случае нет возможности прямо вычислить ошибку (3), так как в нее входит вектор неизменяемых возмущений F_{est} .

В этой связи в данной статье разрабатывается метод, основанный на изменении матрицы коэффициентов усиления наблюдателя в зависимости от результатов косвенных измерений.

Для решения поставленной задачи наряду с уравнениями АНПА (2) введем его модель вида

$$\dot{x}_m = M^{-1} \left(F_u + F_d + \hat{F}_{est} \right). \quad (24)$$

Вычтем из первого уравнения (2) уравнение (24), в результате чего придем к выражению:

$$M \left(\dot{x} - \dot{x}_m \right) = F_{est} - \hat{F}_{est} = e_n. \quad (25)$$

Таким образом, ошибку оценивания возмущений наблюдателем (22), (23) можно вычислить, измеряя ускорения АНПА и его модели (24).

Для оценивания ускорений применим алгоритмы асимптотического оценивания, использованные в [10, 16, 22]. В матричном виде уравнения оценивания величин \dot{x} и \dot{x}_m имеют вид:

$$\begin{aligned} \dot{\omega}_1^x &= \omega_2^x + k_1^x \left(x - \omega_1^x \right), \\ \omega_2^x &= k_2^x \left(x - \omega_1^x \right), \\ \dot{\hat{x}} &= \omega_2^x, \\ \dot{\omega}_1^{xm} &= \omega_2^{xm} + k_1^{xm} \left(x_m - \omega_1^{xm} \right), \\ \omega_2^{xm} &= k_2^{xm} \left(x_m - \omega_1^{xm} \right), \\ \dot{\hat{x}}_m &= \omega_2^{xm}, \end{aligned} \quad (26)$$

$$\quad (27)$$

где ω_1^x , ω_2^x , ω_1^{xm} , ω_2^{xm} – векторы переменных состояния наблюдателей производных; k_1^x , k_2^x , k_1^{xm} , k_2^{xm} – матрицы коэффициентов усиления.

Тогда матрица коэффициентов усиления наблюдателя возмущений (22), (23) принимается в виде

$$L(e_n) = L_0 + K_L \left\| M \left(\dot{\hat{x}} - \dot{\hat{x}}_m \right) \right\|, \quad (28)$$

где L_0 – матрица коэффициентов усиления в установившемся режиме; K_L – матрица постоянных коэффициентов; $\|*\|$ – операция взятия нормы.

Моделирование алгоритмов оценивания. Рассмотрим пример оценивания возмущения, действующего на АНПА, динамика которого описывается уравнением (1). Выберем следующие параметры наблюдателя возмущений:

$$L_0 = \text{diag} \left([2; 2; 2; 2; 2; 2] \right), \quad K_L = \text{diag} \left([2; 2; 2; 2; 2; 2] \right), \quad (29)$$

где $\text{diag}(x)$ – оператор вычисления диагональной матрицы, на главной диагонали которой находятся элементы вектора x . В качестве нормы выбрана евклидова норма.

Коэффициенты усиления наблюдателей производных (26), (27) равны:

$$k_1^x = \text{diag} \left([20; 20; 20; 20; 20; 20] \right), \quad k_2^x = \text{diag} \left([100; 100; 100; 100; 100; 100] \right), \quad (30)$$

$$k_1^{xm} = \text{diag} \left([20; 20; 20; 20; 20; 20] \right), \quad k_2^{xm} = \text{diag} \left([100; 100; 100; 100; 100; 100] \right). \quad (31)$$

Результаты моделирования наблюдателя (22), (23) при постоянных и переменных коэффициентах усиления представлены на рис. 2 и 3.

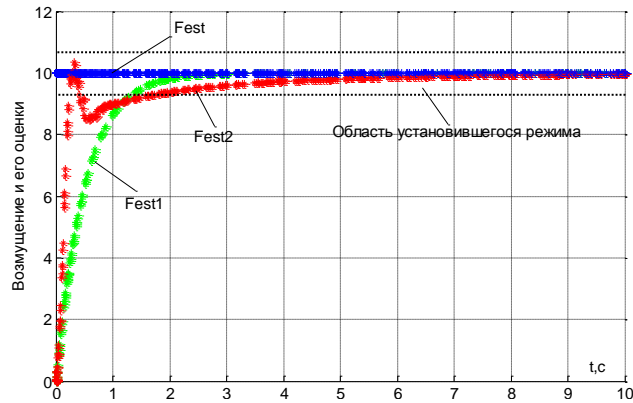


Рис. 2. Оценки возмущения

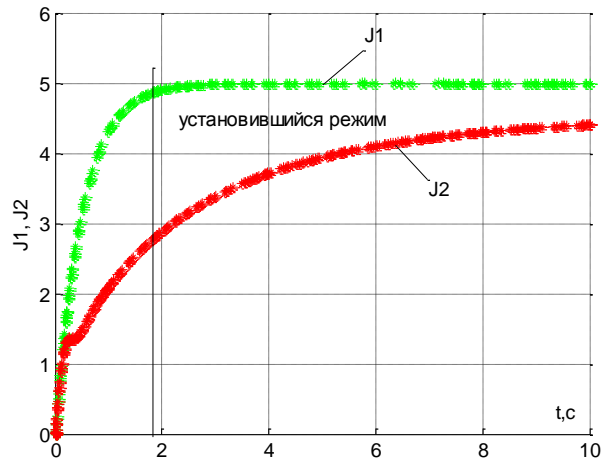


Рис. 3. Интегральная ошибка оценивания

На рис. 2 представлены: оцениваемое постоянное возмущение Fest; его оценка Fest1, полученная при постоянных коэффициентах усиления $L(e_n) = L_0$; его оценка Fest2, полученная при нелинейном изменении коэффициентов усиления в соответствии с (28). Также на рис. 2 представлена область установившегося режима. Из рис. 2 видно, что в области переходного режима оценка возмущения, полученная при переменных коэффициентах усиления, обеспечивает более высокое быстродействие. В области малых отклонений оценка при постоянных коэффициентах сходится быстрее. Однако в области малых отклонений применима теорема разделения, поэтому там существенна только асимптотическая сходимость процесса оценивания.

На рис. 3 представлены интегральные ошибки оценивания при постоянных J1 и переменных J2 коэффициентах усиления наблюдателя возмущений:

$$M(\dot{x} - \dot{x}_m) = F_{est} - \hat{F}_{est} = e_n. \quad (32)$$

Видим, что области переходного режима нелинейного алгоритма оценивания дает выигрыш по интегральной ошибке около 40 %. На всем интервале оценивания выигрыш по интегральной ошибке (32) составляет около 12 %.

Отметим, что в обоих случаях в установившемся режиме коэффициенты усиления одинаковые, поэтому, с точки зрения соотношения «сигнал-шум», на выходе алгоритмы эквивалентны.

В силу того, что в области малых отклонений постоянные коэффициенты усиления обеспечивают большую сходимость оценок, можно использовать комбинированный алгоритм оценивания. При этом переход к постоянным коэффициентам усиления можно выполнять в соответствии с критерием:

$$\frac{L(e_n)}{L_0} < L_{cp},$$

где L_{cp} – граничное значение коэффициента усиления.

На рис. 4 представлены результаты работы одного из каналов оценивания производных в соответствии с алгоритмами (26), (27). На рис. 4: \dot{x} – оцениваемая производная; \hat{x} – оценка производной.

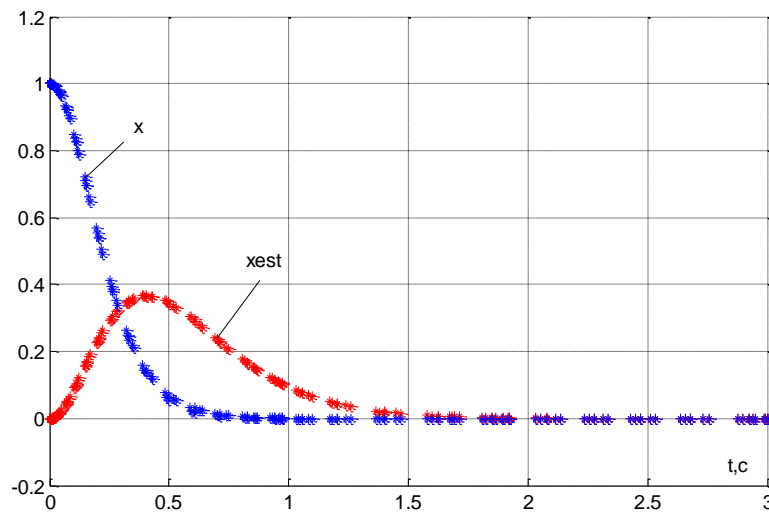


Рис. 4. Оценка производной

В силу универсальности ряда Тейлора предложенный алгоритм может быть использован для приближенной оценки возмущений произвольной формы. Например, на рис. 5 и 6 представлены результаты работы наблюдателя возмущений (22), (23) при непостоянном возмущении.

На рис. 5 представлены: оцениваемое переменное возмущение $Fest$; его оценка $Fest1$, полученная при постоянных коэффициентах усиления $L(e_n) = L_0$; его оценка $Fest2$, полученная при нелинейном изменении коэффициентов усиления в соответствии с (28).

На рис. 6 представлены интегральные ошибки оценивания для случая постоянных коэффициентов $J1$ и при нелинейном изменении коэффициентов усиления $J2$. Из рис. 6 видно, что нелинейное изменение коэффициентов усиления позволяет устранить ошибку оценивания в установившемся режиме. В переходном режиме выигрыш по интегральной оценке качества (32) составляет около 30 %.

Результаты, представленные на рис. 4 и 5, получены при значении матрицы $K_L = \text{diag}([20; 20; 20; 20; 20; 20])$.

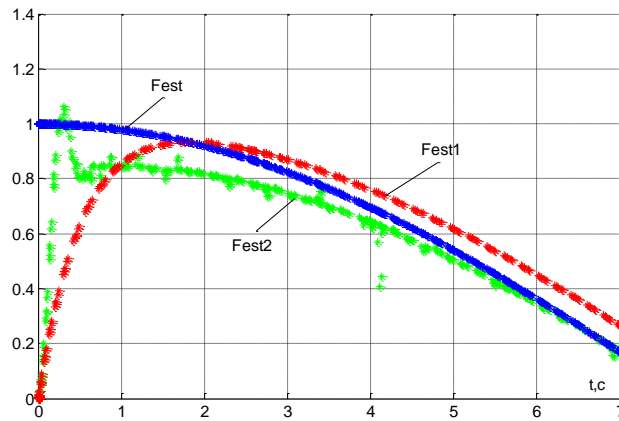


Рис. 5. Оценки переменного возмущения

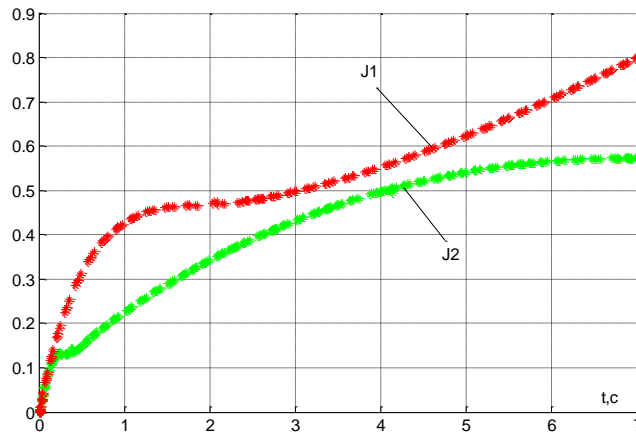


Рис. 6. Интегральные ошибки оценивания переменного возмущения

На рис. 7 и 8 представлены результаты моделирования движения АНПА, на который, в промежутке времени от 50 с до 60 с, действует течение. Из результатов моделирования видно, что в случае отсутствия наблюдателя, возникает ошибка по скорости и координатам, а при его использовании возмущения эффективно парируются.

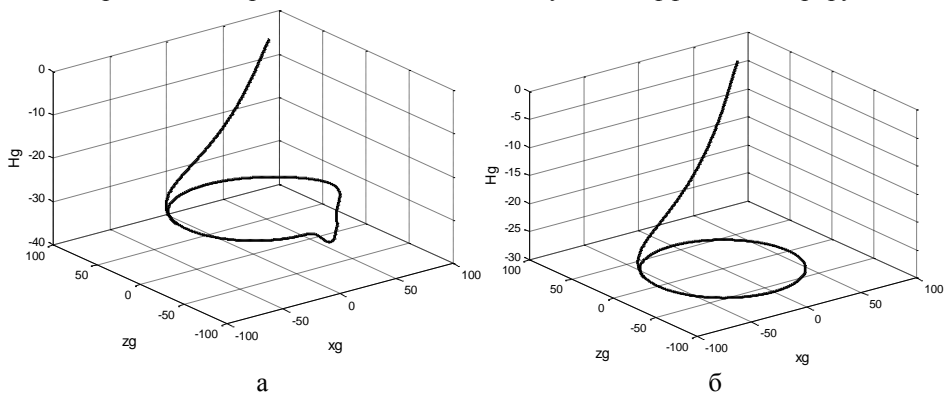


Рис. 7. Траектория движения АНПА: а – без наблюдателя; б – с наблюдателем

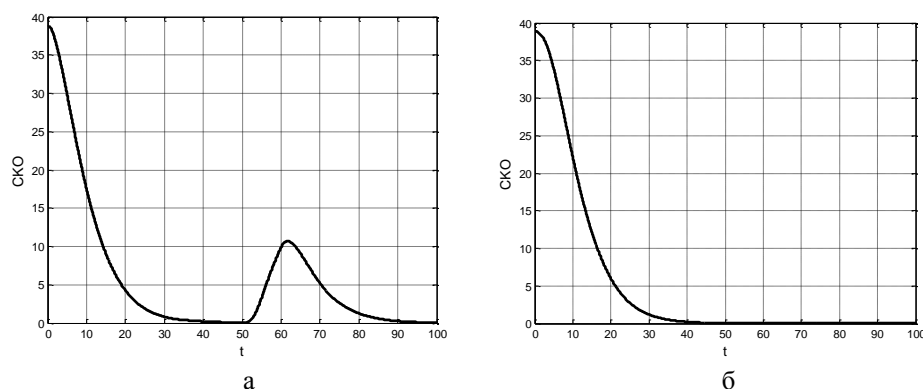


Рис. 8. CKO по траектории АНПА: а – без наблюдателя; б – с наблюдателем

Заключение. В работе предложен метод оценивания аддитивных возмущений, действующих на АНПА при его движении. Метод позволяет строить адаптивные системы управления АНПА на основе непрямого адаптивного управления. Метод может применяться для других типов подвижных объектов – дирижаблей [18–21], вертолетов [22] и т.д.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Пшихопов В.Х., Медведев М.Ю. Управление подвижными объектами в определенных и неопределенных средах. – М.: Наука, 2011. – 350 с.
2. Пшихопов В.Х. Позиционно-траекторное управление подвижными объектами. – Таганрог: Изд-во ТТИ ЮФУ, 2009. – 183 с.
3. Пшихопов В.Х., Суконкин С.Я., Нагучев Д.Ш., Стракович В.В., Медведев М.Ю., Гуренко Б.В., Костюков В.А., Волощенко Ю.П. Автономный подводный аппарат «Скат» для решения задач поиска и обнаружения заиленных объектов // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2010. – № 3 (104). – С. 153-162.
4. Пшихопов В.Х., Медведев М.Ю. Синтез систем управления подводными аппаратами с нелинейными характеристиками исполнительных органов // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2011. – № 3 (116). – С. 147-156.
5. Pshikhopov V.Kh., Medvedev M.Y., and Gurenko B.V. Homing and Docking Autopilot Design for Autonomous Underwater Vehicle // Applied Mechanics and Materials Vols. 490-491 (2014). – P. 700-707. Trans Tech Publications, Switzerland. doi:10.4028/www.scientific.net/AMM.490-491.700.
6. Земляков С.Д., Рутковский В.Ю. О некоторых результатах развития теории и практики применения беспойсковых адаптивных систем // Автоматика и телемеханика. – 2001. – № 7.
7. Гайдук А.Р. Алгебраические методы анализа и синтеза систем автоматического управления. – Ростов-на-Дону, 1988. – 208 с.
8. Медведев М.Ю. Алгоритмы адаптивного управления исполнительными приводами // Мехатроника, автоматизация и управление. – 2006. – № 6. – С. 17-22.
9. Медведев М.Ю., Пшихопов В.Х., Сиротенко М.Ю. Алгоритмы адаптивного управления судном на воздушной подушке // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2008. – № 1 (78). – С. 189-194.
10. Пшихопов В.Х., Медведев М.Ю. Алгоритмическое обеспечение робастных асимптотических наблюдателей производных // Инженерный вестник Дона. – 2011. – № 6 (16). – С. 169-175.
11. Медведев М.Ю. Структура и алгоритмическое обеспечение нелинейного наблюдателя производных в условиях действия случайных шумов // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2008. – № 12 (89). – С. 20-25.
12. Медведев М.Ю. Синтез системы управления регулирующими органами // Известия ТРТУ. – 2003. – № 1 (30). – С. 44-48.

13. *Пишихов В.Х., Медведев М.Ю.* Структурный синтез автопилотов подвижных объектов с оценением возмущений // Информационно-измерительные и управляющие системы. – 2006. – № 1. – С. 103-109.
14. *Медведев М.Ю., Борзов В.И., Пишихов В.Х., Вершинин Г.Ф.* Автономные управляемые ветроэнергетические установки // Известия ТРТУ. – 2006. – № 3 (58). – С. 202-207.
15. *Пишихов В.Х., Медведев М.Ю.* Синтез адаптивных систем управления летательными аппаратами // Известия ЮФУ. Технические науки. 2010. – № 3(104). – С. 187-196.
16. *Пишихов В.Х., Медведев М.Ю.* Алгоритмы оценивания в системе управления автономного роботизированного дирижабля // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2013. – № 2 (139). – С. 200-207.
17. *Медведев М.Ю., Шевченко В.А.* Оценка возмущений в процессе автоматического регулирования синхронного генератора // Инженерный вестник Дона. – 2013. – № 4.
18. *Пишихов В.Х., Медведев М.Ю., Гайдук А.Р., Нейдорф Р.А., Беляев В.Е., Федоренко Р.В., Костюков В.А., Крухмалев В.А.* Система позиционно-траекторного управления роботизированной воздухоплавательной платформой: математическая модель // Мехатроника, автоматизация и управление. – 2013. – № 6. – С. 14-21.
19. *Пишихов В.Х., Медведев М.Ю., Гайдук А.Р., Нейдорф Р.А., Беляев В.Е., Федоренко Р.В., Костюков В.А., Крухмалев В.А.* Система позиционно-траекторного управления роботизированной воздухоплавательной платформой: алгоритмы управления // Мехатроника, автоматизация и управление. – 2013. – № 7. – С. 13-20.
20. *Pshikhov V.Kh., Medvedev M.Yu.* Block Design of Robust Control Systems by Direct Lyapunov Method // IFAC Papers Online. – 2012.
21. *Pshikhov V., Medvedev M., Kostjukov V., Fedorenko R., Gurenko B., Krukhmalev V.* Airship autopilot design // SAE Technical Paper. – 2011.
22. *Pshikhov V.Kh., Sergeev N.E., Medvedev M.Y., Kulchenko A.E.* Helicopter autopilot design // SAE Technical Paper. – 2012.

Статью рекомендовал к опубликованию д.т.н., профессор А.В. Павленко.

Пишихов Вячеслав Хасанович – Южный федеральный университет; e-mail: pshichop@rambler.ru; 347928, г. Таганрог, пер. Некрасовский, 44; тел.: 88634371694; кафедра электротехники и мехатроники; зав. кафедрой; д.т.н.

Медведев Михаил Юрьевич – e-mail: medvmihal@gmail.com; кафедра электротехники и мехатроники; д.т.н.; профессор.

Гуренко Борис Викторович – e-mail: boris.gurenko@gmail.com; кафедра электротехники и мехатроники; ассистент.

Маевский Андрей Михайлович – e-mail: maevskiy_andrey@mail.ru; кафедра электротехники и мехатроники; ассистент.

Голосов Сергей Петрович – e-mail: golosov.serg@yandex.ru; кафедра физики; доцент.

Pshikhov Vyacheslav Khasanovich – Southern Federal University; e-mail: pshichop@rambler.ru; 44, Nekrasovskiy, Taganrog, 347928, Russia; phone: +78634371694; the department of electrical engineering and mechatronics; head the department; dr. of eng. sc.

Medvedev Mixail Yur'evich – e-mail: medvmihal@gmail.com; the department of electrical engineering and mechatronics; dr. of eng. sc.; professor.

Gurenko Boris Viktorovich – e-mail: boris.gurenko@gmail.com; the department of electrical engineering and mechatronics; assistant.

Maevsky Andrey Mikhaylovich – e-mail: maevskiy_andrey@mail.ru; the department of electrical engineering and mechatronics; assistant.

Golosov Sergey Petrovich – e-mail: golosov.serg@yandex.ru; the department of physics; associate professor.