

Позиционно-траекторная система прямого адаптивного управления морскими подвижными объектами

В.Х. Пшихопов, А.А. Федотов, М.Ю. Медведев, Т.Н. Медведева,

Б.В. Гуренко

Южный федеральный университет, Таганрог

Аннотация: В работе предлагается метод прямого аддитивного управления морскими подвижными объектами. Рассматриваемый метод отличается решением задачи в нелинейной постановке. В качестве базового закона управления используется позиционно-траекторный алгоритм управления. Показано, что структура получаемого предлагаемым методом регулятора соответствует векторному ПИ-регулятору с компенсацией нелинейностей. Для заданного класса возмущений доказана асимптотическая устойчивость замкнутой системы управления

Ключевые слова: адаптивное управление, морской подвижный объект, нелинейный ПИ-регулятор.

Введение

С точки зрения построения систем управления, существенным недостатком непрямых адаптивных систем управления подвижными объектами является тот факт, что предельные свойства такой адаптивной системы определяются базовым регулятором. Иными словами, для решения задачи адаптивного управления требуется найти неадаптивный регулятор, решающий задачу управления морским подвижным объектом. В этом случае адаптивный регулятор заменяет множество регуляторов, решающих задачу управления множеством объектов в неадаптивной постановке.

Кроме того, системы непрямого адаптивного управления строятся на принципе суперпозиции – устойчивость замкнутой системы управления обеспечивается, если устойчив регулятор и алгоритм оценивания. Такой подход оказывается эффективен, если рассматриваются заданные режимы движения системы и обеспечивается высокое быстродействие подсистемы оценивания [1–5]. Так в ряде работ реализованы системы позиционно-траекторного управления нелинейными объектами с оцениванием

возмущений [4–17]. Данные алгоритмы оценивания основаны на робастном методе оценивания, использующем локальную аппроксимацию возмущений временными рядами [18–21].

В связи с отмеченными недостатками непрямых адаптивных систем для управления подвижными объектами может использоваться прямая адаптация и робастные подходы [22–27].

В данном разделе применяется структура прямой адаптивной системы управления с динамическим регулятором, включенным в контур управления, представленная на рис. 1.

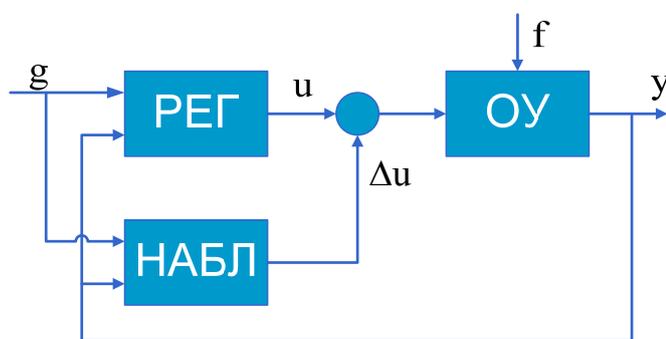


Рис. 1 – Структура позиционно-траекторной системы прямого адаптивного управления

В отличие от адаптивных систем непрямого управления, структура, представленная на рис. 1, позволяет включить алгоритм оценивания (наблюдатель) в прямой контур управления. Для этого наблюдатель вырабатывает оценку возмущения не по своей локальной ошибке, а по общей ошибке системы управления. Наблюдатель генерирует добавочное управление Δu , направленное на компенсацию действующих в системе возмущений. В данном случае структура всей адаптивной системы определяется целью управления и формируется в процессе синтеза.

Синтез адаптивной системы управления

Для синтеза прямой адаптивной системы представим уравнения динамики морского подвижного объекта в виде:

$$\begin{aligned} \dot{x} &= M^{-1}(F_u + F_d + z) \\ \dot{z} &= g(x) \end{aligned} \quad (1)$$

где z – вектор дополнительных переменных адаптивного регулятора; $g(x)$ – произвольная дифференцируемая функция, определяющая изменение вектора z под действием возмущений.

Основное отличие модели подвижного объекта (1) состоит в том, что вектор z – это дополнительные переменные, которые вычисляются непосредственно в самом регуляторе и поведение которых зависит от наличия ошибки в замкнутой системе управления подвижным объектом [16, 17, 20].

Тогда ставится задача синтезировать такое управление F_u , которое обеспечивает асимптотическую устойчивость нулевого положения первого уравнения модели морского подвижного объекта (1) и устойчивость в смысле Ляпунова [2, 3] второго уравнения модели (1).

Второе уравнение модели морского подвижного объекта (1) содержит генератор дополнительной переменной z , учитывающей ошибки замкнутой систем, обусловленные любыми факторами. Если управление F_u обеспечивает свойство асимптотической устойчивости в системе (1), то это означает, что возмущения, которые описываются вторым уравнением модели (1) и влияют на поведение переменной z , будут компенсироваться.

Параметрическая неопределенность и возмущения произвольной структуры могут подавляться приближенно, например, аппроксимацией временными рядами. При этом в случае параметрических возмущений в установившемся режиме возможно точное подавление возмущений.

Метод синтеза динамического регулятора для морского подвижного объекта (1) можно разделить на несколько основных этапов.

1. На первом этапе формируется структура функции $g(x)$. Данная функция должна отражать цель управления в виде ошибки замкнутой системы. Тогда ненулевая ошибка формирует сигнал, изменяющий дополнительную переменную z , которая стабилизируется только при нулевой ошибке.

2. На втором этапе производится синтез управления F_u , обеспечивающего асимптотическую устойчивость первого уравнения модели морского подвижного объекта (1) и устойчивость по Ляпунову второго уравнения.

Используя описанную двухэтапную методику, синтезируем адаптивное управление. Рассмотрим задачу движения подвижного объекта при постоянных скоростях. В этом случае ошибка замкнутой системы управления морским подвижным объектом может быть сформирована в виде:

$$e = x^0 - x, \quad (2)$$

где x^0 – заданный вектор желаемых скоростей подвижного объекта.

Выберем в качестве функции $g(x)$ ошибку замкнутой системы:

$$g(x) = x^0 - x, \quad (3)$$

Тогда система (1) преобразуется к виду:

$$\begin{aligned} \dot{x} &= M^{-1}(F_u + F_d + z), \\ \dot{z} &= x^0 - x \end{aligned} \quad (4)$$

Сформируем ошибку для расширенной системы (4) в виде линейной комбинации целевой функции (3) и вектора дополнительных переменных:

$$e_c = x^0 - x + Az, \quad (5)$$

где A – матрица постоянных коэффициентов.

В соответствии с методом позиционно-траекторного управления, потребуем, чтобы замкнутая система управления подчинялась уравнению:

$$\dot{e}_c + T_1 e_c = 0, \quad (6)$$

где T_1 – матрица коэффициентов настройки регулятора.

Продифференцируем выражение (5) в силу модели (4). В результате получим:

$$\dot{e}_c = -M^{-1}(F_u + F_d + z) + A(x^0 - x), \quad (7)$$

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

$$-M^{-1}(F_u + F_d + z) + A(x^0 - x) + T_1(x^0 - x + Az) = 0, \quad (8)$$

Решая уравнение (8) относительно вектора F_u , получим адаптивный закон управления морским подвижным объектом в виде:

$$F_u = -F_d - z - M(A(x^0 - x) + T_1(x^0 - x + Az)), \quad (9)$$

Учитывая второе уравнение (4) управление (9) можно представить в следующем виде

$$\begin{aligned} F_u &= -F_d - M(A + T_1)(x^0 - x) - (1 + MT_1A)z = \\ &= -F_d - M(A + T_1)(x^0 - x) - (1 + MT_1A) \int (x^0 - x) dt \end{aligned} \quad (10)$$

Таким образом, адаптивный закон управления (10) морским подвижным объектом (1) структурно представляет собой ПИ-регулятор с компенсирующей нелинейности объекта частью, что обеспечивает его адаптивные свойства.

Подставим закон управления (9) в уравнения модели (4), в результате чего получим уравнения замкнутой системы управления морскими подвижными объектами:

$$\begin{aligned} \dot{x} &= (A + T_1)(x^0 - x) - T_1Az, \\ \dot{z} &= x^0 - x \end{aligned}, \quad (11)$$

Т.к. анализ устойчивости по Ляпунову проводится относительно нулевого положения равновесия, то в (11) положим $x^0 = 0$. Тогда система (11) преобразуется к виду:

$$\begin{aligned} \dot{x} &= -(A+T_1)x - T_1Az \\ \dot{z} &= -x \end{aligned}, \quad (12)$$

Из (12) следует, что замкнутая адаптивная система управления линейна. Ее собственная матрица имеет вид:

$$A_\Sigma = \begin{bmatrix} -(A+T_1) & -T_1A \\ -I & 0 \end{bmatrix}, \quad (13)$$

где I – единичная матрица.

Тогда характеристическое уравнение замкнутой системы имеет вид:

$$s^2 + (A+T_1)s + T_1A = 0, \quad (14)$$

Из уравнения (14) следует, что условия асимптотической устойчивости замкнутой системы адаптивного управления морским подвижным объектом имеют вид:

$$T_1 > 0, A > 0, \quad (15)$$

Моделирование адаптивной системы управления

Рассмотрим пример моделирования замкнутой системы позиционно-траекторного управления, выполняющей задачу движения вдоль траекторий с заданной скоростью 2 м/с из точки A_0 в точку A_f .

Алгоритм управления (9) дополняется ограничивающими максимальные и минимальные углы дифферента неравенствами. Кроме того алгоритм управления автоматически ограничивает скорость аппарата относительно среды и угловые скорости АНПА. Если АНПА попадает в ситуацию, когда углы превышают максимально допустимые значения, система управления прекращает выполнение целевого задания и стабилизирует аппарат в режиме дрейфа вдоль течения. После этого осуществляется возобновление выполнения задания.

Результаты моделирования системы управления представлены на рис. 2, 3.

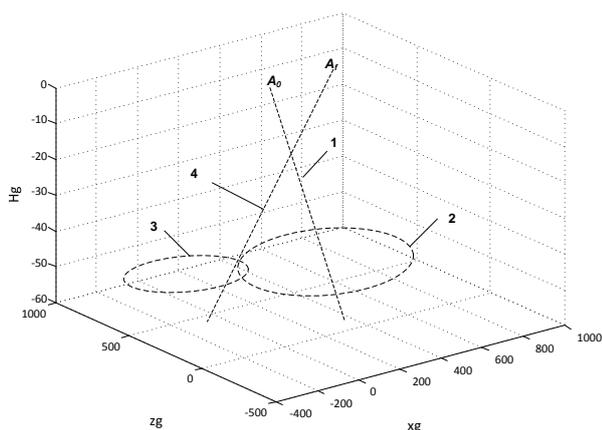


Рис. 2 – Заданная траектория движения

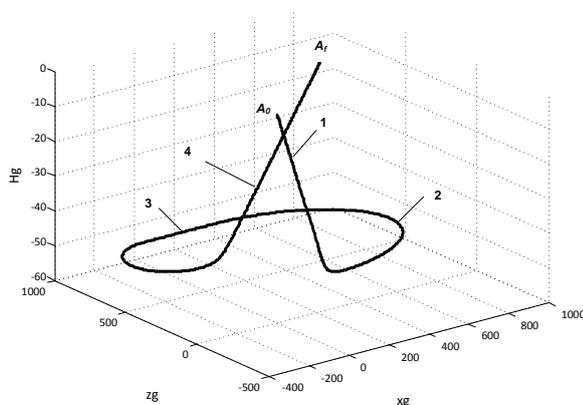


Рис. 3 – Реализованная траектория движения

На первом участке АНПА осуществляет погружение вдоль прямой линии. На втором участке АНПА движется по дуге эллипса, заданного уравнением $\frac{(x-x_0)^2}{r_x^2} + \frac{(z-z_0)^2}{r_z^2} = 1$, где $x_0 = 250, z_0 = 400$ - координаты центра, $r_x = 600, r_z = 400$ - полуоси эллипса, на глубине 50 метров. На третьем участке АНПА движется вдоль дуги окружности, заданной уравнением $(x-x_0)^2 + (z-z_0)^2 = R_0^2$, где $x_0 = -100, z_0 = 600$ - координаты центра, $R_0 = 200$ - радиус. Глубина 50 м. Далее АНПА всплывает по наклонной линии в заданную точку, этот маневр на графиках соответствует четвертому участку.

Полученные результаты моделирования подтверждают эффективность и корректность предлагаемых алгоритмов.

Заключение

Основным преимуществом предлагаемого в работе метода управления АНПА является его адаптивность, позволяющая подавить точно постоянные возмущения и приближенно – переменные возмущения. Данный эффект осуществляется за счет введения интегральной составляющей в структуру регулятора. Данный метод может быть распространен на другие классы подвижных объектов.

Благодарность за финансовую поддержку

Работа поддержана Министерством образования и науки РФ, НИР №114041540005 «Теория и методы позиционно-траекторного управления морскими роботизированными системами в экстремальных режимах и условиях неопределенности среды» по государственному заданию ВУЗам и научным организациям в сфере научной деятельности, грантами Президента Российской Федерации № НШ-3437.2014.10, МД-1098.2103.10 и грантом РФФИ 13-08-00315а.

Литература

1. Земляков С.Д., Рутковский В.Ю. О некоторых результатах развития теории и практики применения беспойсковых адаптивных систем // Автоматика и телемеханика. – 2001. – № 7. С.103-121.
2. Гайдук А.Р. Алгебраические методы анализа и синтеза систем автоматического управления. – Ростов-на-Дону, 1988. 208 с.
3. Гайдук А.Р. Теория и методы аналитического синтеза систем автоматического управления (полиномиальный подход). М.: ФИЗМАТЛИТ, 2012. 360 с.
4. Пшихопов В.Х., Медведев М.Ю. Управление подвижными объектами в определенных и неопределенных средах. М.: Наука, 2011. 350 с.



5. Пшихопов В.Х. Позиционно-траекторное управление подвижными объектами. – Таганрог: Изд-во ТТИ ЮФУ, 2009. 183 с.

6. 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 затонувших объектов // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2010. – № 3(104). С. 153 – 162.

7. 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). Pp. 700-707.

8. Пшихопов В.Х., Медведев М.Ю. Структурный синтез автопилотов подвижных объектов с оцениванием возмущений // М., Информационно-измерительные и управляющие системы. 2006. №1. С.103-109.

9. Медведев М.Ю., Борзов В.И., Пшихопов В.Х., Вершинин Г.Ф. Автономные управляемые ветроэнергетические установки. // Известия ТРТУ. 2006, № 3 (58). С. 202 – 207.

10. Пшихопов В.Х., Медведев М.Ю. Синтез адаптивных систем управления летательными аппаратами // Известия ЮФУ. Технические науки. 2010. – № 3(104). С. 187 – 196.

11. Пшихопов В.Х., Медведев М.Ю. Алгоритмы оценивания в системе управления автономного роботизированного дирижабля // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2013. – № 2(139). С. 200 – 207.

12. Пшихопов 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.

13. Пшихопов 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.

14. Pshikhopov V., Medvedev M., Kostjukov V., Fedorenko R., Gurenko B., Krukhmalev V. Airship autopilot design // SAE Technical Paper 2011-01-2736, 2011, doi:10.4271/2011-01-2736.

15. Pshichopov V.Kh., Sergeev N.E., Medvedev M.Y., Kulchenko A.E. The Design of Helicopter Autopilot // SAE Technical Paper 2012-01-2098, 2012, doi:10.4271/2012-01-2098.

16. Медведев М.Ю. Алгоритмы адаптивного управления исполнительными приводами. // Мехатроника, автоматизация и управление. 2006, № 6. С. 17-22.

17. Медведев М.Ю., Пшихопов В.Х., Сиротенко М.Ю. Алгоритмы адаптивного управления судном на воздушной подушке // Известия ЮФУ. Технические науки. 2008, № 1. С. 189 – 194.

18. Пшихопов В.Х., Медведев М.Ю. Алгоритмическое обеспечение робастных асимптотических наблюдателей производных // Инженерный вестник Дона, 2011, № 2 URL: ivdon.ru/magazine/archive/n2y2011/431.

19. Медведев М.Ю. Структура и алгоритмическое обеспечение нелинейного наблюдателя производных в условиях действия случайных шумов // Известия ЮФУ. Технические науки. № 12. 2008. С. 20 – 25.

20. Медведев М.Ю. Синтез системы управления регулирующими органами // Известия ТРТУ. 2003. N 1(30). С. 44-48.

21. Медведев М.Ю., Шевченко В.А. Оценка возмущений в процессе автоматического регулирования синхронного генератора // Инженерный вестник Дона, 2013, № 4 URL: ivdon.ru/magazine/archive/n4y2013/1930.

22. 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.

23. Pshikhopov V.Kh., Medvedev M.Yu. Block Design of Robust Control Systems by Direct Lyapunov Method // Proceedings of 18th IFAC World Congress, 2011, Volume # 18, Part# 1, Pp. 10875-10880, DOI: 10.3182/20110828-6-IT-1002.00006.

24. Medvedev M. Y., Pshikhopov V.Kh., Robust control of nonlinear dynamic systems // Proceedings of 2010 IEEE Latin-American Conference on Communications (ANDERSON). September 14 – 17, 2010, Bogota, Colombia, Pp.1-7, DOI: 10.1109/ANDESCON.2010.5633481.

25. Pshikhopov V.Kh., Medvedev M.Yu. Block Design of Robust Control for a Class of Dynamic Systems by Direct Lyapunov Method // Journal of Mechanics Engineering and Automation, N2, 2012. С. 154-162.

26. Медведев М.Ю. Синтез замкнутых оптимальных по быстродействию управлений каскадными нелинейными динамическими системами с ограничениями на координаты // Мехатроника, автоматизация и управление. 2009, № 7. С. 2 – 6.

27. Медведев М.Ю. Синтез субоптимальных управлений нелинейными многосвязными динамическими системами // Мехатроника, автоматизация и управление. 2009, № 12. С. 2 – 8.

References

1. Zemlyakov S.D., Rutkovskiy V.Yu. Avtomatika i telemekhanika. 2001. #7. pp. 103-121.

2. Gayduk A.R. Algebraicheskie metody analiza i sinteza sistem avtomaticheskogo upravleniya [Algebraic methods of the analysis and synthesis of systems of automatic control]. Rostov-na-Donu, 1988. 208 p.



3. Gayduk A.R. Teoriya i metody analiticheskogo sinteza system avtomaticheskogo upravleniya (polynomial'nyy podkhod) [Theory and methods of analytical synthesis of systems of automatic control (polynomial approach)]. M.: FIZMATLIT, 2012. 360 p.

4. Pshikhopov V.Kh., Medvedev M.Yu. Upravlenie podvizhnymi ob"ektami v opredelennykh i neopredelennykh sredakh [Management of mobile objects in certain and uncertain environments]. M.: Nauka, 2011. 350 p.

5. Pshikhopov V.Kh. Pozitsionno-traektornoe upravlenie podvizhnymi ob"ektami [Position and trajectory management of mobile objects]. Taganrog: Izdvo TTI YuFU, 2009. 183 p.

6. Pshikhopov V.Kh., Sukonkin S.Ya., Naguchev D.Sh., Strakovich V.V., Medvedev M.Yu., Gurenko B.V., Kostyukov V.A., Voloshchenko Yu.P. Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki. 2010. # 3(104). – pp. 153 – 162.

7. Pshikhopov V. Kh., Medvedev M. Y., and Gurenko B. V. Applied Mechanics and Materials Vols. 490-491 (2014). pp. 700-707.

8. Pshikhopov V.Kh., Medvedev M.Yu. Informatsionno-izmeritel'nye i upravlyayushchie sistemy. 2006. #1. pp. 103-109.

9. Medvedev M.Yu., Borzov V.I., Pshikhopov V.Kh., Vershinin G.F. Izvestiya TRTU. 2006. # 3 (58). pp. 202 – 207.

10. Pshikhopov V.Kh., Medvedev M.Yu. Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki. 2010. #3(104). pp. 187 – 196.

11. Pshikhopov V.Kh., Medvedev M.Yu. IzvestiyaYuFU. Tekhnicheskienauki. 2013. #2(139). pp. 200 – 207.

12. Pshikhopov V.Kh., Medvedev M.Yu., Gayduk A.R., Neydorf R.A., Belyaev V.E., Fedorenko R.V., Kostyukov V.A., Krukhmalev V.A. Mekhatronika, avtomatizatsiya i upravlenie. 2013. #6. pp. 14 – 21.



13. Pshikhopov V.Kh., Medvedev M.Yu., Gayduk A.R., Neydorf R.A., Belyaev V.E., Fedorenko R.V., Kostyukov V.A., Krukhmalev V.A. Mekhatronika, avtomatizatsiya i upravlenie. 2013, № 7. S. 13 – 20.
 14. Pshikhopov V., Medvedev M., Kostjukov V., Fedorenko R., Gurenko B., Krukhmalev V. SAE Technical Paper 2011-01-2736, 2011, doi:10.4271/2011-01-2736.
 15. Pshichopov V.Kh., Sergeev N.E., Medvedev M.Y., Kulchenko A.E. SAE Technical Paper SAE Technical Paper 2012-01-2098, 2012, doi:10.4271/2012-01-2098.
 16. Medvedev M.Yu. Mekhatronika, avtomatizatsiya i upravlenie. 2006. #6. pp. 17 – 22.
 17. Medvedev M.Yu., Pshikhopov V.Kh., Sirotenko M.Yu. Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki. 2008. #1. pp. 189 – 194.
 18. Pshikhopov V.Kh., Medvedev M.Yu. Inzhenernyj vestnik Dona (Rus), 2011. #2 URL: ivdon.ru/magazine/archive/n2y2011/431.
 19. Medvedev M.Yu. Izvestiya YuFU. Tekhnicheskienauki.#12. 2008. pp. 20 – 25.
 20. Medvedev M.Yu. Izvestiya TRTU. 2003. #1(30). pp. 44-48.
 21. Medvedev M.Yu., Shevchenko V.A. Inzhenernyj vestnik Dona (Rus), 2013. #4 URL: ivdon.ru/magazine/archive/n4y2013/1930.
 22. Pshikhopov V.Kh., Medvedev M.Yu. Izvesti YuFU. Tekhnicheskie auki. 2011. #3(116), pp. 147 – 156.
 23. Pshikhopov V.Kh., Medvedev M.Yu. Proceedings of 18th IFAC World Congress, 2011, Volume # 18, Part# 1, pp. 10875-10880, DOI: 10.3182/20110828-6-IT-1002.00006.
 24. Medvedev M. Y., Pshikhopov V.Kh. Proceedings of 2010 IEEE Latin-American Conference on Communications (ANDERSON). September 14 – 17, 2010, Bogota, Colombia, pp.1-7, DOI: 10.1109/ANDESCON.2010.5633481.
-



25. Pshikhopov V.Kh., Medvedev M.Yu. Journal of Mechanics Engineering and Automation, #2, 2012, pp. 154-162.
26. Medvedev M.Yu. Mekhatronika, avtomatizatsiyaiupravlenie.2009, #7. pp. 2 – 6.
27. Medvedev M.Yu. Mekhatronika, avtomatizatsiya i upravlenie. 2009. #12. pp. 2 – 8.