

АДАПТИВНЫЙ АЛГОРИТМ КОДИРОВАНИЯ ИНФОРМАЦИИ В АВТОНОМНОЙ СИСТЕМЕ

С. И. ТОМАШЕВИЧ

*Институт проблем машиноведения РАН, 199178, Санкт-Петербург, Россия
E-mail: tomashevich.stanislav@gmail.com*

Университет ИТМО, 197101, Санкт-Петербург, Россия

Представлена процедура адаптивного кодирования сигналов динамических систем для последующей передачи другой системе. Предложен алгоритм настройки уровня квантования сигнала, основанный на вычислении модуля скользящего среднего. Алгоритм численно и экспериментально исследован, описан процесс его работы. В качестве кодируемого сигнала использовано изменение положения реального квадрокоптера при движении в вертикальной плоскости. Результаты численного моделирования демонстрируют применимость предложенного алгоритма для кодирования сигналов в реальной динамической системе. Алгоритм адаптивного кодирования реализован программно для использования с радиомодемами с целью последующего переноса на реальный квадрокоптер. Описана логика работы программы, описан метод формирования информационных пакетов на основе результатов кодирования. Численно исследовано качество кодирования гармонических сигналов различных частот; влияние скорости изменения сигналов на качество полученного сигнала характеризуется среднеквадратичным отклонением. Даны рекомендации по улучшению качества кодирования при известном характере исходного сигнала.

Ключевые слова: *адаптивное кодирование, передача данных, пропускная способность, динамические системы, квадрокоптер*

Введение. В последнее время наблюдается значительный рост числа систем, состоящих из автономных агентов, позволяющих решать задачи распределенно, независимо от координирующего центра. Основным способом взаимодействия между агентами в таких системах является обмен информацией по каналу связи. Очевидно, что одними из ключевых факторов при выборе приемопередающих устройств автономных систем являются низкое энергопотребление и высокая скорость, обеспечивающая передачу данных в полном объеме. Таким образом, наиболее остро встает задача выбора оптимального решения, позволяющего достигать необходимого качества передачи данных с минимальными затратами.

Многие алгоритмы, позволяющие с минимальными потерями кодировать данные, работая с заранее известным сигналом, имеют возможность анализировать особенности кодируемого сигнала. Такими сигналами могут быть значения, получаемые с датчиков автономными системами, а соответствующие задачи решаются с помощью удаленного управления этими системами. Такой подход позволяет эффективно сжимать данные, в связи с чем подобные алгоритмы широко распространены в кодировании, например, аудио- и видеосигналов [1—7].

Алгоритмам кодирования в режиме реального времени доступны только текущее и предыдущие значения сигнала, они хорошо подходят для задач, требующих быстрой реакции на изменение сигнала.

Предлагаемый в работе адаптивный алгоритм кодирования информации относится к числу алгоритмов, работающих в реальном времени. В алгоритме используется квантование с памятью [8, 9]. Алгоритм, основанный на методе, предложенном для статического кодера [10], может использоваться, например, в задачах кодирования и передачи семейств всех сигналов таких динамических систем, как мобильные подвижные роботы и летательные аппараты [11, 12].

Постановка задачи. Рассмотрим дискретный процесс, описываемый следующей линейной моделью:

$$\mathbf{x}[k+1] = \mathbf{A}\mathbf{x}[k] + \mathbf{E}\varphi[k], y[k] = \mathbf{C}\mathbf{x}[k], \quad (1)$$

где $\mathbf{x}[k] \in \mathbf{R}^n$ — вектор состояния процесса, $y[k] \in R$ — скалярный сигнал, измеряемый датчиками, $k = 0, 1, \dots$ — номер такта. Матрицы $\mathbf{A}, \mathbf{C}, \mathbf{E}$ считаются известными на стороне как кодера, так и декодера. Пара матриц (\mathbf{A}, \mathbf{C}) также предполагается наблюдаемой. Уровень внешнего воздействия $\varphi[k] \in R$ не может быть измерен. Сигнал $y[k]$ необходимо передать через канал связи с ограниченной пропускной способностью.

Подобное представление модели процесса позволяет трактовать процедуру адаптивного кодирования как оценку траектории движения динамической системы, описываемой моделью (1). В реальных системах требуется передать эту информацию пользователю или другой системе. При совместном полете в группе беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) требуется передавать данные о пространственном и угловом положении БПЛА. Изменение этих величин может быть описано моделью (1) второго порядка по каждому из каналов в предположении, что их динамика постоянна.

Для обработки информации предложим следующий алгоритм адаптивного кодирования. Пусть сигнал $y[k]$ подлежит передаче по цифровому каналу связи в дискретные моменты времени $t_k = kT$, T — интервал дискретности. При двоичном кодировании $R = T^{-1}$, где R — скорость передачи данных, выраженная в битах в секунду. Воспользуемся бинарным статическим квантователем

$$q[k] = M[k]\sigma[k], \quad (2)$$

где $M[k]$ — уровень квантования, а $\sigma[k] = \text{sign}(y[k] - \hat{y}[k])$, $\hat{y}[k]$ — оценка значения $y[k]$. Значение σ представляется однобитовым символом выходного алфавита и передается по каналу связи. Расчеты выполняются в предположении, что кодер и декодер работают синхронно, передача данных в канале связей осуществляется без потерь (подразумевается, что факт потери пакета известен на стороне как кодера, так и декодера [13—17]).

В [11, 18] описан алгоритм настройки диапазона квантования $M[k]$ с использованием подхода адаптивного зуминга на основе вычисления скользящего среднего. В отличие от него предложим алгоритм настройки уровня квантования в алгоритме адаптивного кодирования:

$$\begin{cases} \lambda[k] = (\sigma[k] + \sigma[k-1] + \sigma[k-2]) / 3, \\ M[k+1] = m + (|\lambda[k]| + 0,5)M[k], \\ \lambda[0] = 0, M[0] = M_0. \end{cases} \quad (3)$$

Для оценивания изменения кодируемого сигнала введем в кодер и декодер наблюдатель:

$$\begin{cases} \hat{y}[k+1] = \hat{y}[k] + T\hat{V}[k] + l_1\sigma[k], \\ \hat{V}[k+1] = \hat{V}[k] + l_2\sigma[k], \end{cases} \quad (4)$$

где $\hat{V}[k]$ — оценка скорости сигнала $y[k]$ и l_1, l_2 — параметры наблюдателя.

Параметр $\lambda[k]$ характеризует разброс изменений кодируемого сигнала, что дает возможность определить требуемое направление изменения параметра $M[k]$. Диапазон квантования увеличивается, если кодируемый сигнал изменяется быстро, и уменьшается при медленном изменении. Такой подход позволяет „захватить“ новое кодируемое значение и в дальнейшем получить его на декодере. Параметр m определяет минимальный уровень квантования. Декодер, получая значение $\sigma[k]$, настраивает уровень квантования по алгоритму (3).

Вычислив текущее значение (2), которое кодер считает как $q[k] = y[k] - \hat{y}[k]$, декодер использует восстановленное значение $y[k]$ для оценивания с помощью наблюдателя (4).

Численное моделирование. Рассмотрим задачу передачи информации с одного квадрокоптера на другой. Такая постановка актуальна в связи с широким распространением многоагентных систем [19—21], например групп БПЛА, обменивающихся информацией через канал связи [22—24]. Рассмотрим движение летательного аппарата только в вертикальной плоскости, используя экспериментальные данные о высоте полета. Модель такого движения для реального квадрокоптера была представлена в работе [25]. Также пусть в рассматриваемой системе имеется канал передачи данных между квадрокоптерами с пропускной способностью $R = 10$ бит/с. Приведем результаты моделирования с рассмотренным выше алгоритмом адаптивного кодирования для отрезка времени в 30 с.

На рис. 1 приведены кодируемый сигнал (сплошная кривая) и оценки, полученные на декодере (точки). Близость полученных кривых подтверждает применимость предложенного алгоритма для кодирования динамических сигналов.

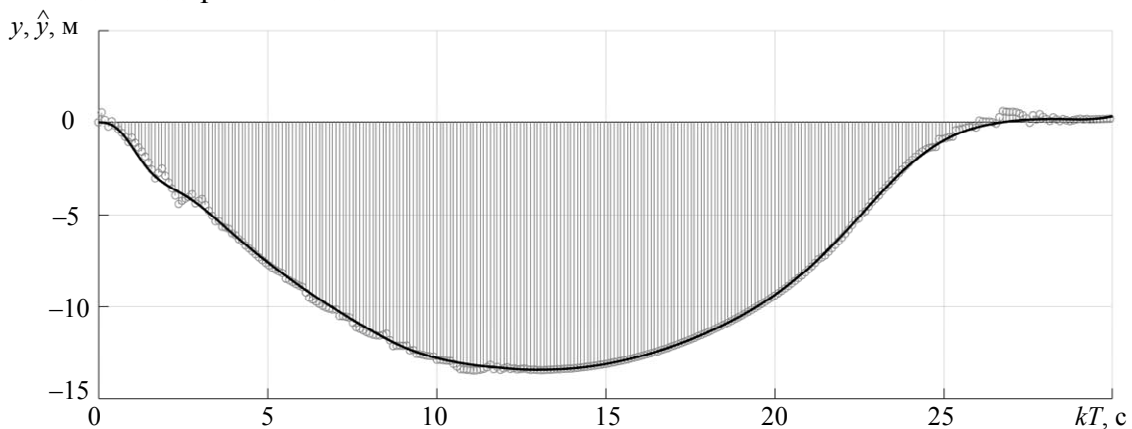


Рис. 1

Аппаратно-программная реализация алгоритма. Предложенный алгоритм был реализован на приемопередатчиках, и полученные результаты сравнивались с результатами моделирования. Между приемником и передатчиком налажен универсальный цифровой канал передачи данных [26]. В качестве приемника и передатчика были выбраны модемы Xbee Pro S1, позволяющие реализовать канал, который впоследствии можно использовать для связи квадрокоптеров друг с другом. Беспроводной протокол *IEEE802.15.4* обеспечивает работу модемов на частоте 2,4 Гц. Скорость передачи данных ограничена — 250 кбит/с. Подключение к компьютеру осуществляется по USB-интерфейсу с рабочей скоростью до 115 200 бит/с.

На языке Python для кодера и декодера написаны две программы, которые запускаются отдельно. Для сравнения экспериментальных данных с результатами моделирования была выбрана скорость передачи данных $R=10$ бит/с. Основной цикл программы кодера выполняется с частотой 10 Гц.

Данные кодируются одним байтом формата $M; D; B; N$, где M — два бита, отвечающие за сообщение режима работы декодеру; D — два бита, обозначающие номер устройства, передающего команду; B — передаваемый бит; N — три бита номера переданного пакета. В приемнике осуществляется обновление внутреннего счетчика номеров сообщений на каждом 8-м шаге. Предполагается, что все пакеты передаются последовательно без потерь. Полученный байт обрабатывается драйвером серийного порта, информационный бит передается декодеру. Фактически происходит эмуляция передачи только одного бита с помощью одного байта, т.е. скорость искусственно занижена. Стоит отметить, что используемый формат сообщений предполагает использование нескольких устройств в одной сети и несколько режимов работы, что позволяет использовать рассматриваемые алгоритмы в реальной

многоагентной системе. Размер полного сообщения может быть уменьшен, однако размер пакета в один байт является стандартным для множества протоколов передачи данных.

Программа декодера работает на частоте 100 Гц, за счет этого чаще проверяется наличие новых сообщений (отражается в увеличении номера N в формате сообщения). Декодер обрабатывает новое обнаруженное сообщение, производит весь цикл вычислений, после чего включает режим ожидания нового сообщения. После запуска программы декодер переходит в режим ожидания до того момента, как от кодера не придет сообщение с нужным символом режима работы. Этот символ обозначает начало процесса функционирования кодера, и обе программы запускают алгоритмы кодирования-декодирования.

Результаты эксперимента с использованием данных моделирования приведены на рис. 2. Небольшое расхождение результатов эксперимента (кривая) и моделирования (точки) объясняется использованием различных языков программирования: сказывается разный подход к точности выполнения алгоритмических операций и округлению их результата.

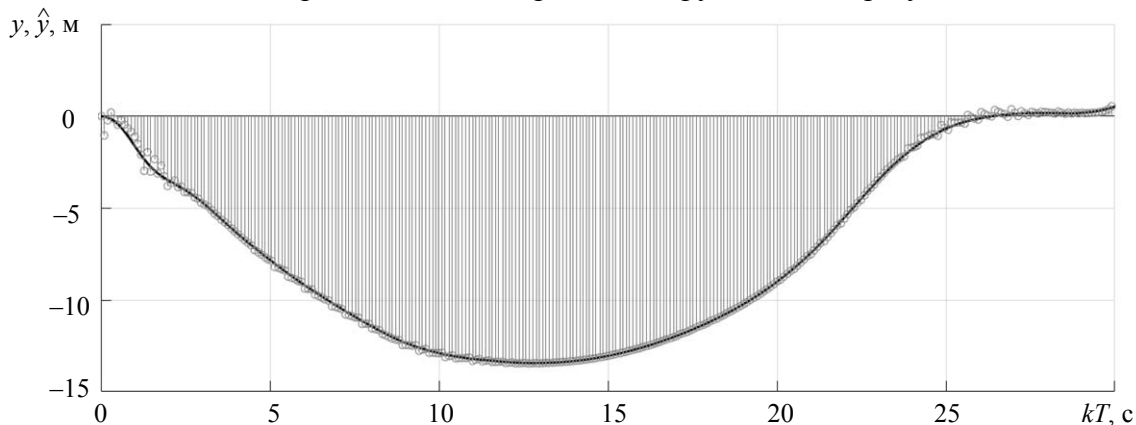


Рис. 2

Выберем в качестве критерия качества кодирования среднеквадратичное отклонение

$$e[n] = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{k=0}^n (\hat{y}[k] - y[k])^2} \quad (5)$$

и проведем эксперименты с кодированием сигнала вида $y[k] = 30 \sin \omega k$ для различных $\omega = 0,05 \text{—} 1$ рад/с с шагом 0,05 рад/с. Параметры кодера и декодера остаются теми же, что при моделировании и в предыдущем эксперименте. Результаты экспериментальных исследований показаны на рис. 3.

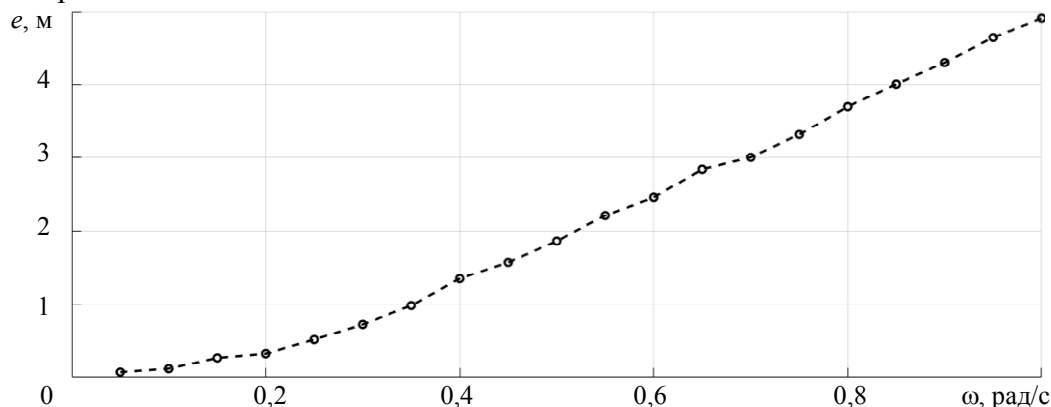


Рис. 3

При большой частоте колебаний синусоиды предложенный алгоритм кодирования не успевает адаптироваться под сигнал, в связи с этим происходит накопление ошибки. При уменьшении частоты колебаний сигнал становится более плавным и изменяется так, что его оценка, полученная на кодере, успевает адаптироваться к последующим значениям синусоиды. Если

заранее известен характер кодируемого сигнала, то выбор соответствующего наблюдателя (4) может уменьшить среднеквадратичное отклонение.

Заключение. В работе предложен алгоритм кодирования данных с использованием адаптивного метода настройки уровня квантования: она происходит в зависимости от последних изменений кодируемого сигнала. В алгоритме не используется переключающий элемент, присутствующий в алгоритме на основе скользящего среднего. Также в работе впервые описана физическая реализация алгоритма адаптивного кодирования с гибким методом настройки уровня квантования и показаны результаты проведенных экспериментов. Результаты моделирования и эксперимента подтверждают возможность использования алгоритма в реальных технических системах. Предлагаемый адаптивный алгоритм кодирования позволяет не передавать значения параметров системы полностью, а обходиться только информацией, сообщающей направление изменения этих параметров. Такой подход дает возможность снизить требования к пропускной способности канала связи.

Экспериментальная часть работы выполнена в ИПМаш РАН и поддержана РФФИ (грант 17-08-01728).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Jayant N., Johnston J., Safranek R. Signal compression based on models of human perception // Proc. of the IEEE. 1993. Vol. 81, N 10. P. 1385—1422.
2. Chen Z., Guillemot C. Perceptually-friendly H.264/AVC video Coding // 16th IEEE Intern. Conf. on Image Processing (ICIP). 2009. P. 3417—3420.
3. Chen Z., Guillemot C. Perceptually-Friendly H.264/AVC Video Coding Based on Foveated Just-Noticeable-Distortion Model // IEEE Transact. on Circuits and Systems for Video Technology. 2010. Vol. 20, N 6. P. 806—819.
4. Noll P. MPEG digital audio coding // IEEE Signal Processing Magazine. 1997. Vol. 14, N 5. P. 59—81.
5. Кулешов С. В. Временной анализ кодеков H.264 // Изв. вузов. Приборостроение. 2017. Т. 60, № 11. С. 1092—1095.
6. Рубина И. С., Тропченко А. Ю. Исследование алгоритмов кодирования преобразованием в задачах сжатия кадров видеопоследовательности // Изв. вузов. Приборостроение. 2012. Т. 55, № 10. С. 26—30.
7. Юрков К. В., Петров С. Е. О двух подходах к параметрическому кодированию стереосигнала // Изв. вузов. Приборостроение. 2012. Т. 55, № 1. С. 57—62.
8. Andrievsky B., Fradkov A., Peaucelle D. State estimation over the limited-band communication channel for pitch motion control of LAAS Helicopter benchmark // Proc. 17th IFAC Symp. Aut. Contr. Aerospace (ACA'2007). Toulouse, France. 2007.
9. Fradkov A., Andrievskiy B., Evans R. Hybrid quantized observer for multi-input-multi-output nonlinear systems // Dynamics and control of hybrid mechanical systems. World Scientific Series on Nonlinear Science, Ser. B. Singapore: World Scientific, 2010. Vol. 14. P. 89—102.
10. Goodman D., Gersho A. Theory of an adaptive quantizer // IEEE Trans. Commun. 1974. Vol. COM-22, N 8. P. 1037—1045.
11. Andrievsky B., Fradkov A. Adaptive coding for position estimation in formation flight control // Proc. IFAC Workshop Adaptation and Learning in Control and Signal Processing (ALCOSP 2010). 2010. P. 72—76.
12. Andrievsky B., Fradkov A. L. Adaptive coding for maneuvering UAV tracking over the digital communication channel // 6th Intern. Congress on Ultra Modern Telecommunications and Control Systems and Workshops, ICUMT 2014. St. Petersburg, Russia, 2014. P. 236—241.
13. Tatikonda S., Mitter S. Control Over Noisy Channels // IEEE Transact. on Automatic Control. 2004. Vol. 49, N 7. P. 1196—1201.
14. Wang J., Yan Z. Coding scheme based on spherical polar coordinate for control over packet erasure channel // Intern. J. Robust and Nonlinear Control. 2014. Vol. 24, N 7. P. 1159—1176.

15. *Quevedo D., Silva E., Goodwin G.* Control over Unreliable Networks Affected by Packet Erasures and Variable Transmission Delays // *IEEE J. on Selected Areas in Communications*. 2008. Vol. 26, N 4. P. 672—685.
16. *Quevedo D., Silva E., Nešić D.* Design of Multiple Actuator-Link Control Systems with Packet Dropouts // *IFAC Proc.* 2008. Vol. 41, N 2. P. 6642—6647.
17. *Andrievskiy B.* Numerical evaluation of controlled synchronization for chaotic Chua systems over the limited-band data erasure channel // *Cybernetics and physics*. 2016. Vol. 5, N 2. P. 43—51.
18. *Андреевский Б. П., Фрадков А. Л.* Управление и наблюдение через каналы связи с ограниченной пропускной способностью // *Гирроскопия и навигация*. 2009. № 4 (67). С. 103—114.
19. *Fax J., Murray R.* Information flow and cooperative control of vehicle formations // *IEEE Transact. Automat. Contr.* 2004. Vol. 49, N 9. P. 1465—1476.
20. *Proskurnikov A., Fradkov A. L.* Problems and methods of network control // *Automation and Remote Control*. 2016. Vol. 77, N 10. P. 1711—1740.
21. *Бушуев А. Б., Томашевич С. И., Кульчицкий А. А., Воробьев В. С., Мансурова О. К.* Поведение агента, заданное логистическим отображением // *Изв. вузов. Приборостроение*. 2015. Т. 58, № 8. С. 600—605.
22. *Tomashevich S. I., Belyavsky A. O.* Navigation data transfer in a quadrotor formation via a binary communication channel with adaptive coding and data erasure // *24th St. Petersburg Intern. Conf. on Integrated Navigation Systems (ICINS)*. 2017. P 1—3. DOI:10.23919/icins.2017.7995569.
23. *Andrievskiy B., Tomashevich S., Fradkov A. L., Amelin K.* Quadcopters Formation Control over the Limited-band Communication Network // *IFAC-PapersOnLine*. 2015. Vol. 48, N 9. P. 85—90.
24. *Fradkov A. L., Tomashevich S., Andrievskiy B., Amelin K., Kaliteevskiy I.* Adaptive Coding For Data Exchange Between Quadrotors In The Formation // *IFAC-PapersOnLine*. 2016. Vol. 49, N 13. P. 275—280.
25. *Amelin K., Tomashevich S., Andrievskiy B.* Recursive Identification of Motion Model Parameters for ultralight UAV // *IFAC-PapersOnLine*. 2015. Vol. 48, N 11. P. 233—237.
26. *Кулешов С. В.* Потенциальные свойства цифровых каналов передачи данных // *Изв. вузов. Приборостроение*. 2010. Т. 53, № 11. С. 17—20.

Сведения об авторе

Станислав Игоревич Томашевич — ИПМаш РАН, лаборатория управления сложными системами; инженер-исследователь; аспирант; Университет ИТМО, кафедра управления сложными системами; E-mail: tomashevich.stanislav@gmail.com

Поступила в редакцию
19.03.18 г.

Ссылка для цитирования: *Томашевич С. И.* Адаптивный алгоритм кодирования информации в автономной системе // *Изв. вузов. Приборостроение*. 2018. Т. 61, № 12. С. 1045—1051.

ADAPTIVE ALGORITHM OF INFORMATION CODING IN AUTONOMOUS SYSTEM

S. I. Tomashevich

*Institute for Problems in Mechanical Engineering of the RAS, 199178, St. Petersburg, Russia
E-mail: tomashevich.stanislav@gmail.com*

ITMO University, 197101, St. Petersburg, Russia

A procedure of adaptive coding of signals in dynamic systems for subsequent data transfer to another system is presented. An algorithm for the signal quantization level adjusting is proposed based on calculation of moving average norm. A numerical and experimental investigation of the proposed algorithm is carried out, the process of its operation is described. As the encoded signal, the data obtained from a real quadcopter moving in vertical plane is used. Results of numerical simulation demonstrate the applicability of the proposed algorithm for coding signals in a real dynamic system. The adaptive coding algorithm is implemented in software for use with radio modems for subsequent transfer to a real quadcopter. The logic of the program and method of formation of information packages based on the results of coding are described. The quality of encoding of harmonic signals of different

frequencies is numerically investigated; the influence of the rate of change of signals on the quality of the received signal is characterized by the standard deviation. Recommendations are given to improve the quality of coding with a known character of the original signal.

Keywords: adaptive coding, data transfer, bandwidth, dynamic systems, quadcopter

REFERENCES

1. Jayant N., Johnston J., Safranek R. *Proc. of the IEEE*, 1993, no. 10(81), pp. 1385–1422.
2. Chen Z., Guillemot C. *16th IEEE Intern. Conf. on Image Processing (ICIP)*, 2009, pp. 3417–3420.
3. Chen Z., Guillemot C. *IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology*, 2010, no. 6(20), pp. 806–819.
4. Noll P. *IEEE Signal Processing Magazine*, 1997, no. 5(14), pp. 59–81.
5. Kuleshov S.V. *Journal of Instrument Engineering*, 2017, no. 11(60), pp. 1092–1095. (in Russ.)
6. Rubina I.S., Tropchenko A.Yu. *Journal of Instrument Engineering*, 2012, no. 10(55), pp. 26–30. (in Russ.)
7. Yurkov K.V., Petrov S.E. *Journal of Instrument Engineering*, 2012, no. 1(55), pp. 57–62. (in Russ.)
8. Andrievsky B., Fradkov A., Peaucelle D. *Proc. 17th IFAC Symp. Aut. Contr. Aerospace (ACA2007)*, Toulouse, France, 2007.
9. Fradkov A., Andrievskiy B., Evans R. *Dynamics and control of hybrid mechanical systems. World Scientific Series on Nonlinear Science, Series B*, Singapore, World Scientific, 2010, vol. 14, pp. 89–102.
10. Goodman D., Gersho A. *IEEE Trans. Commun.*, 1974, no. 8(COM-22), pp. 1037–1045.
11. Andrievsky B., Fradkov A. *Proc. IFAC Workshop Adaptation and Learning in Control and Signal Processing (ALCOSP 2010)*, 2010, pp. 72–76.
12. Andrievsky B., Fradkov A.L. *6th Intern. Congress on Ultra Modern Telecommunications and Control Systems and Workshops, ICUMT 2014*, St. Petersburg, Russia, 2014, pp. 236–241.
13. Tatikonda S., Mitter S. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 2004, no. 7(49), pp. 1196–1201.
14. Wang J., Yan Z. *Intern. J. Robust and Nonlinear Control*, 2014, no. 7(24), pp. 1159–1176.
15. Quevedo D., Silva E., Goodwin G. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 2008, no. 4(26), pp. 672–685.
16. Quevedo D., Silva E., Nešić D. *IFAC Proc. Volumes*, 2008, no. 2(41), pp. 6642–6647.
17. Andrievskiy B. *Cybernetics and physics*, 2016, no. 2(5), pp. 43–51.
18. Andrievsky B.R., Fradkov A.L. *Gyroscopy and Navigation*, 2009, no. 4(67), pp. 103–114. (in Russ.)
19. Fax J., Murray R. *IEEE Trans. Automat. Contr.*, 2004, no. 9(49), pp. 1465–1476.
20. Proskurnikov A., Fradkov A.L. *Automation and Remote Control*, 2016, no. 10(77), pp. 1711–1740.
21. Bushuev A.B., Tomashevich S.I., Kul'chitskiy A.A., Vorob'yev V.S., Mansurova O.K. *Journal of Instrument Engineering*, 2015, no. 8(58), pp. 600–605. (in Russ.)
22. Tomashevich S.I., Belyavsky A.O. *24th Saint Petersburg Intern. Conf. on Integrated Navigation Systems (ICINS)*, 2017, pp 1–3. DOI:10.23919/icins.2017.7995569.
23. Andrievskiy B., Tomashevich S., Fradkov A.L., Amelin K. *IFAC-PapersOnLine*, 2015, no. 9(48), pp. 85–90.
24. Fradkov A.L., Tomashevich S., Andrievskiy B., Amelin K., Kaliteevskiy I. *IFAC-PapersOnLine*, 2016, no. 13(49), pp. 275–280.
25. Amelin K., Tomashevich S., Andrievskiy B. *IFAC-PapersOnLine*, 2015, no. 11(48), pp. 233–237.
26. Kuleshov S.V. *Journal of Instrument Engineering*, 2010, no. 11(53), pp. 17–20. (in Russ.)

Data on author

Stanislav I. Tomashevich — Institute of Problems of Mechanical Engineering of the RAS, Laboratory of Control of Complex Systems; Engineer-Researcher; Post-Graduate Student; ITMO University, Department of Control of Complex Systems; E-mail: tomashevich.stanislav@gmail.com

For citation: Tomashevich S. I. Adaptive algorithm of information coding in autonomous system. *Journal of Instrument Engineering*. 2018. Vol. 61, N 12. P. 1045–1051 (in Russian).

DOI: 10.17586/0021-3454-2018-61-12-1045-1051