

ОЦЕНИВАНИЕ СОСТОЯНИЯ МНОГОМАЯТНИКОВОЙ СИСТЕМЫ ПРИ КОММУНИКАЦИОННЫХ ОГРАНИЧЕНИЯХ

Б. Р. Андриевский¹, А. Л. Фрадков¹, А. Б. Андриевский²

¹ *Университет ИТМО, 197101, Санкт-Петербург, Россия*
E-mail: bandri@yandex.ru

² *Институт проблем машиноведения РАН, 199178, Санкт-Петербург, Россия*

Для мехатронного комплекса — многомаятникового стенда — продемонстрировано применение процедуры кодирования-декодирования данных, основанной на использовании модели динамики объекта и встроенного наблюдающего устройства с малой загрузкой канала связи. Результаты экспериментальных исследований на стенде показали эффективность предложенного метода передачи информации для реальной системы с неопределенностью модели объекта при ошибках измерений и потере данных в канале связи.

Ключевые слова: *многомаятниковая установка, математическая модель, передача данных, канал связи, оценивание состояния, эксперимент.*

Введение. В последнее десятилетие большой интерес вызывают сетевые системы управления. Идея их построения заключается в использовании последовательных сетей связи для обмена информацией и сигналов управления между различными физическими компонентами систем, которые могут быть физически распределенными. Сетевые системы управления представляют собой системы реального времени, в которых данные между чувствительными и исполнительными элементами, а также между элементами и регулятором передаются через общую или переключаемую сеть связи (см., например, [1—3]). Включение сети связи в систему управления может привести к снижению общей производительности системы из-за ошибок квантования, задержки сигнала во времени и утрате отдельных результатов измерений. В связи с цифровым характером канала связи каждый передаваемый сигнал квантуется конечным набором символов [1]. Таким образом, конечно-множественный характер циркулирующих в системе данных должен быть явно принят во внимание при проектировании сетевых систем управления.

Важной проблемой является снижение скорости передачи потока данных по цифровому каналу связи. Алгоритмическому решению этой проблемы посвящено множество исследований [4—7], где, в частности, показано, что управление линейными системами и наблюдение за ними возможно тогда и только тогда, когда пропускная способность канала связи превышает скорость производства системой энтропии в окрестности состояния равновесия (так называемая „теорема о скорости передачи данных“) [8—12]. Предложены различные схемы кодирования-декодирования данных, позволяющие приблизиться к минимально возможной скорости их передачи. Известны два способа решения этой задачи: применение интеллектуальных датчиков, в алгоритмах работы которых используются модели динамики объекта,

и масштабирование (*zooming*), т.е. обновление диапазона кодирования данных во время управления процессом или наблюдения за ним [13—16].

Синхронизация нелинейных систем при коммуникационных ограничениях исследована в работах [17—21]. Показано, что для схемы с кодером-декодером первого порядка верхняя предельная граница ошибки синхронизации пропорциональна максимальной скорости изменения передаваемого по каналу связи сигнала и обратно пропорциональна скорости передачи информации (пропускной способности канала). Установлено, что при идеальном канале связи и неискаженных измерениях алгоритмы синхронизации с парой кодер/декодер полного порядка обеспечивают экспоненциальное затухание ошибки синхронизации, если пропускная способность канала связи превышает определенный порог. Подход, предложенный в работе [20], был впоследствии применен при наблюдении нелинейных систем по каналу связи с ограниченной пропускной способностью [21—24].

Метод оценивания состояния системы. Следуя работам [23—24], опишем метод оценивания состояния по каналу связи. Рассмотрим модель объекта в следующей *форме Лурье* (линейная часть и нелинейность в обратной связи по выходу):

$$\dot{x}(t) = Ax(t) + B\psi(y), \quad y(t) = Cx(t), \quad (1)$$

где $x(t) \in R^n$ — вектор переменных состояния объекта; $y(t)$ — скалярная выходная переменная; A — $n \times n$ -матрица; B — $n \times 1$ -матрица; C — $1 \times n$ -матрица; $\psi(y)$ — непрерывная нелинейная функция.

Считаем, что измеряется только выходная переменная $y(t)$ объекта. Задача состоит в оценивании неизмеряемого вектора состояния $x(t)$ с помощью удаленного наблюдающего устройства на основе доступных измерений с учетом ограниченности скорости передачи данных по каналу связи. С этой целью вводится следующий *нелинейный наблюдатель полного порядка*:

$$\dot{\hat{x}}(t) = A\hat{x}(t) + B\psi(\hat{y}) + L\varepsilon(t), \quad \hat{y}(t) = C\hat{x}(t), \quad (2)$$

где $\hat{x}(t) \in R^n$ — вектор оценок состояния объекта; $\hat{y}(t)$ — скалярная выходная переменная наблюдателя; $\varepsilon(t) = y(t) - \hat{y}(t)$ — сигнал ошибки между выходами объекта и наблюдателя; L — $n \times 1$ -матрица, подлежащая выбору при синтезе наблюдателя.

Предполагается, что оценки состояния, вырабатываемые на стороне передатчика, формируются интеллектуальным сенсором на основе полной информации о выходе объекта (с учетом погрешности измерений) и по каналу передается только скалярная переменная, причем вместо значений $y(t)$ передается $\varepsilon(t)$. Согласно „*условию равноосведомленности*“ [4, 6] ошибка оценивания $\varepsilon(t)$ должна кодироваться в наблюдателе на стороне источника сигнала символами из конечного алфавита в дискретные моменты времени $t_k = kT$, где $k = 0, 1, 2, \dots$ — дискретное время, T — интервал квантования. Полученная в результате кодирования величина $\bar{\varepsilon}[k] = \bar{\varepsilon}(t_k)$ должна использоваться вместо $\varepsilon(t)$ в наблюдателе (2), таким образом, наблюдатель принимает следующий вид:

$$\begin{aligned} \dot{\hat{x}}(t) &= A\hat{x}(t) + B\psi(\hat{y}) + L\bar{\varepsilon}(t), \quad \hat{y}(t) = C\hat{x}(t), \\ \bar{\varepsilon}(t) &= \bar{\varepsilon}[k] \quad \text{при } t \in [t_k, t_{k+1}), \quad t_k = kT. \end{aligned} \quad (3)$$

Значение $\bar{\varepsilon}[k]$ передается через канал связи приемнику, где воспроизводится процедура оценивания состояния, а именно — в декодере выполняется алгоритм

$$\dot{\hat{x}}_d(t) = A\hat{x}_d(t) + B\psi(\hat{y}_d) + L\bar{\varepsilon}(t), \quad \hat{y}_d(t) = C\hat{x}_d(t), \quad (4)$$

где $\hat{x}_d(t) \in R^n$ — вектор оценки состояния объекта, генерируемый в декодере, причем $\hat{x}_d(0) = \hat{x}(0)$.*

При преобразовании дискретной последовательности $\bar{e}[k]$ в непрерывный сигнал $\bar{e}(t)$, входящий в формулу (4), используется экстраполятор нулевого порядка, так что $\bar{e}(t) = \bar{e}[k]$ при $kT \leq t < (k+1)T$.

Процедуры кодирования. Рассмотрим статический кодер (кодер без памяти) с равномерной дискретизацией и фиксированным диапазоном преобразования. Зададим вещественное $M > 0$ и целое $v \geq 0$. Построим процедуру кодирования на основе отображения $q_{v,M} : \mathfrak{R} \rightarrow \mathfrak{R}$, задающего равномерное по уровню квантование в интервале $I = [-M, M]$.

Введем шаг квантования $\delta = 2^{1-v} M$ и определим функцию квантования (кодирования) как

$$q_{v,M}(y) = \begin{cases} \delta \cdot \langle \delta^{-1} y \rangle, & \text{если } |y| \leq M; \\ M \operatorname{sgn} y, & \text{иначе,} \end{cases} \quad (5)$$

где $\langle \cdot \rangle$ — функция округления до ближайшего целого.

Очевидно, что $|y - q_{v,M}(y)| \leq \delta/2$ для всех y , таких что $|y| \leq M + \frac{\delta}{2}$, и все значения $q_{v,M}(y)$ принадлежат диапазону преобразования I . Заметим, что передаваемое по каналу кодовое слово содержит $R = \log_2(2^v + 1)$ бит информации.

Известна [12—16] более совершенная схема кодирования, в основе которой лежит идея изменения параметра M вместе с заменой симметричного интервала I на интервал Y_{k+1} , охватывающий некоторую окрестность предсказанного по данным предыдущих измерений на $(k+1)$ -м шаге значения выходного сигнала $y_{k+1} \in Y_{k+1}$. Если интервал Y_{k+1} мал по сравнению с возможным отклонением значения y от предсказанного, то можно уменьшить величину M , шаг квантования δ и, следовательно, точность воспроизведения сигнала, не увеличивая при этом информационную нагрузку канала связи. Для реализации этой идеи используются *кодирующие устройства с памятью*. Изменение параметра M во времени на каждом такте (шаге) k передачи данных аналогично масштабированию изображения в оптических системах. Такой подход позволяет повысить точность кодирования данных в установившемся режиме, предотвращая, в то же время, насыщение кодирующего устройства в начале процесса.

Последовательность M_k может быть рассчитана заранее и может вводиться программно (так называемое „изменение масштаба, управляемое временем“), либо значения M_k могут быть вычислены рекуррентно на основе текущих измерений („изменение масштаба, управляемое событиями“) [15, 22].

Опишем процедуру кодирования подробнее [19—24]. Кодирование данных и их передача через канал связи осуществляется в дискретные моменты времени $t_k = kT_0$, где $k = 0, 1, 2, \dots$ — номер шага, T_0 — *интервал квантования по времени (интервал выборки)*. Выходной сигнал $y(t)$ объекта измеряется датчиком и преобразуется в дискретную последовательность значений $y_k = y(kT_0)$. Введем последовательность *смещений* c_k с нулевым начальным значением $c_0 = 0$. На k -м шаге работы кодера сравниваются текущее значение y_k

* Считаем, что получаемые результаты измерений — без искажений, запаздывание и искажение в канале связи отсутствуют.

со смещением c_k , выработанным на предыдущем шаге, и формируется сигнал рассогласования $\delta y_k = y_k - c_k$. Этот сигнал затем подвергается квантованию по уровню с заданной разрядностью v и текущим значением масштаба $M = M_k$ в соответствии с выражением (5). Выходной сигнал кодера

$$\bar{\delta y}_k = q_{v, M_k}(\delta y_k) \quad (6)$$

передается через канал связи в виде символа, содержащего до r бит информации из выбранного алфавита. Смещение c_{k+1} и масштаб M_k пересчитываются по следующему алгоритму:

$$c_{k+1} = c_k + \bar{\delta y}_k, \quad c_0 = 0, \quad k = 0, 1, \dots; \quad (7)$$

$$M_k = (M_0 - M_\infty)\rho^k + M_\infty, \quad (8)$$

где $\rho \in (0, 1)$ — параметр затухания сигнала, M_∞ — асимптотически предельное значение M_k ; начальное значение M_0 должно быть достаточно большим, чтобы охватывалась вся область начальных значений выходного сигнала y_0 .

Уравнения (3), (6) — (8) описывают алгоритм работы кодирующего устройства. Аналогичные соотношения рассчитываются декодером, который вычисляет значения \tilde{c}_k , \tilde{M}_k по переданным через канал связи в виде кодов значениям $\bar{\delta y}_k$. Декодирующее устройство формирует на выходе сигнал

$$\tilde{y}_k = \tilde{c}_k + \bar{\delta y}_k, \quad (9)$$

который совпадает с квантованным сигналом \bar{y}_k . Далее, значение \bar{y}_k „расширяется“ экстраполятором нулевого порядка на весь интервал квантования по времени $[kT_0, (k+1)T_0)$, и на выходе декодирующего устройства формируется процесс непрерывного времени $\bar{y}(t)$.

Экспериментальная установка. Экспериментальное исследование представленных в работах [19—24] схем передачи данных проводилось для сложной механической системы — цепи маятников, входящей в состав многомаятникового мехатронного стенда Института проблем машиноведения РАН (Санкт-Петербург) [25—27].

Многомаятниковый мехатронный стенд содержит модульную многосекционную механическую колебательную систему, электронное оборудование (включая средства связи с центральным компьютером), электрический двигатель с компьютерным управлением, персональный компьютер для обработки данных и представления результатов управления в режиме реального времени.

Установка состоит из набора взаимосвязанных маятниковых секций, диффузно соединенных пружинами. В основании каждой секции имеется платформа для размещения электронного оборудования и датчиков угла поворота. На оси вращения маятника установлен диск оптического датчика, служащего для измерения угла поворота и определения направления вращения маятника. Диск имеет 90 прорезей, которые при вращении перекрывают щель датчика на опоре маятника. Датчик состоит из излучателя (светоизлучающего диода) и приемника (фотодиода). Полученные последовательности сигналов позволяют измерять угол (фазу) и скорость вращения маятника.

Оси соседних маятниковых секций связаны торсионными пружинами, осуществляющими взаимодействие между маятниками, что обеспечивает обмен энергией между соседними секциями. В принципе может быть подключено любое количество секций. В настоящее

время изготовлены механические части 50 секций. Фотография цепи из 12 секций представлена на рис. 1.



Рис. 1

Система обмена данными предназначена для их передачи от центрального компьютера к интерфейсным платам маятниковых секций. Каждая плата представляет собой интеллектуальное электронное устройство хранения и обработки результатов измерений, предназначенное для разгрузки процессора управляющего компьютера. Центральный управляющий компьютер содержит процессор Intel Celeron и служит для высокоуровневого управления локальными контроллерами модульных секций, а также для обработки и визуализации результатов экспериментов. Компьютер работает под управлением операционной системы GNU/Linux. Результаты экспериментов могут обрабатываться в программных средах MatLab или Scilab [28].

Результаты экспериментов. Экспериментальные данные, полученные на стенде, были использованы для исследования описанного выше метода передачи данных с малой загрузкой канала связи [23—25].

В экспериментах использовалась цепь из четырех маятниковых секций и двигателя, присоединенного к секции № 1 через торсионную пружину. В ходе экспериментов на двигатель подавалось управляющее напряжение в виде гармонического сигнала или нерегулярных колебаний. Углы поворота приводного вала и маятников измерялись посредством оптических датчиков с частотой дискретизации 500 Гц с погрешностью $3,5 \cdot 10^{-2}$ рад. Затем результаты измерений обрабатывались алгоритмами кодирования для передачи по каналу связи. Изменение угла φ , соответствующего крайнему „левому“ положению маятника (угол вала двигателя), может рассматриваться как экзогенное воздействие, приложенное к установке (цепи маятников). Для передачи значения угла φ использовался кодер первого порядка.

При построении кодеров полного порядка на основе наблюдателей для маятниковых секций использована следующая модель динамики цепочки, нормализованная относительно моментов инерции маятников [24, 25]:

$$\left. \begin{aligned} \ddot{\varphi}_1 + \mu \dot{\varphi}_1 + \omega_0^2 \sin \varphi_1 - k_{\text{тр}} (\varphi_2 - 2\varphi_1) &= k_{\text{тр}} u(t); \\ &\dots \\ \ddot{\varphi}_i + \mu \dot{\varphi}_i + \omega_0^2 \sin \varphi_i - k_{\text{тр}} (\varphi_{i+1} - 2\varphi_i + \varphi_{i-1}) &= 0, \quad i = 2, \dots, N-1; \\ &\dots \\ \ddot{\varphi}_N + \mu \dot{\varphi}_N + \omega_0^2 \sin \varphi_N - k_{\text{тр}} (\varphi_N - \varphi_{N-1}) &= 0, \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

где N — число маятников в цепи; φ_i — угол отклонения i -го маятника от вертикального положения; μ , ω_0 , $k_{\text{тр}}$ — коэффициент вязкого трения, собственная частота колебаний маятника при малой амплитуде и жесткость торсионной пружины соответственно; $u(t)$ — угол поворота ротора двигателя.

Рассмотрим решение задачи снижения объема передаваемых по шине данных на основе описанного метода кодирования. Пусть значения углов отклонения некоторых маятников измеряются с минимально возможной ошибкой и передаются с требуемой частотой по каналу связи, тогда как значения углов отклонения остальных маятников передаются через процедуру кодирования на основе кодера полного порядка.

Модель (10) использована для синтеза алгоритма оценивания состояния (3), применяемого в кодере полного порядка. На основе процедуры идентификации были получены следующие значения: $\mu=0,95 \text{ с}^{-1}$, $\omega_0=5,5 \text{ с}^{-1}$, $k_{\text{тр}}=5,8 \text{ с}^{-2}$. Выбор матрицы L выполнен методом расположения полюсов наблюдателя, так чтобы получить многочлен Баттерворта [29]: $\det(\lambda I - A + LC) = \lambda^2 + 1,4\Omega\lambda + \Omega^2$, где параметр $\Omega = 5 \text{ с}^{-1}$. В выражении (8) выбраны следующие значения: $M_0 = 0,5$, $M_\infty = -0,01$, $\rho = 0,829$. Время выборки для каждого канала (один двигатель и четыре маятника) определено из интервала [10; 100] мс.

Количество двоичных разрядов кодирования варьировалось от $\nu = 1$ (двоичный кодер) до $\nu = 9$. Для передачи и оценки значений углов отклонения маятника были реализованы две схемы кодирования [19—22]: кодер первого порядка с наблюдателем на стороне приемника (для передачи значения угла поворота двигателя) и кодер полного порядка с наблюдателем на стороне кодера и декодера (для передачи значений углов отклонения маятников). Результаты измерений обрабатывались с помощью процедур передачи данных и рассчитывались ошибки оценивания. Следует отметить, что „точные“ значения углов отклонения маятников из-за погрешности оптических датчиков не известны, что сказывается на оценке точности по результатам экспериментов. Скорость передачи данных для соответствующего канала рассчитывалась как $R = \nu/T_0$.

Результаты экспериментов показаны на рис. 2—5. Примеры процессов изменения угловых положений маятников № 1, 2 и переданных по каналу связи значений φ_i для различных скоростей передачи данных по каналу двигателя (R_m) и каналу маятника (R_φ) приведены на рис. 2, 3.

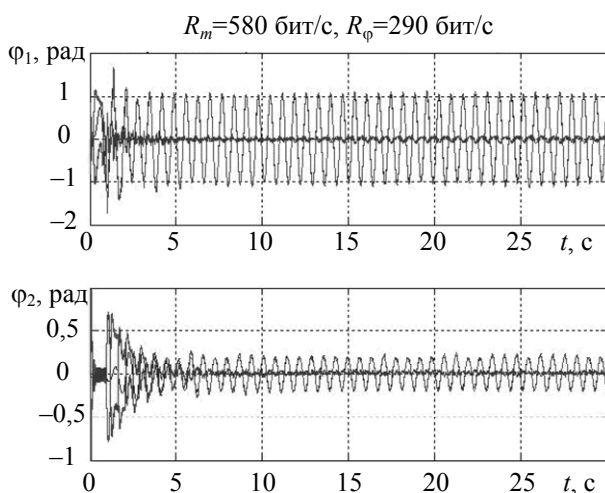


Рис. 2

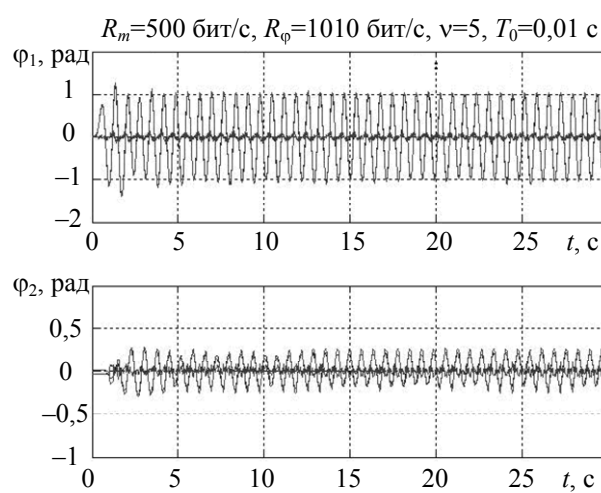


Рис. 3

Зависимости обобщенного показателя точности — среднеквадратической относительной ошибки передачи данных (Q) в установившемся режиме — от параметров процедуры кодирования при $\nu = 2, \dots, 9$ представлены на рис. 4, 5.

Полученные результаты соответствуют теоретическим положениям работ [17—22], согласно которым двоичный кодер оптимален относительно загрузки канала связи, необходимой для обеспечения требуемой точности, а для кодера полного порядка существует

определенный порог, ограничивающий минимально допустимую загрузку канала для передачи данных.

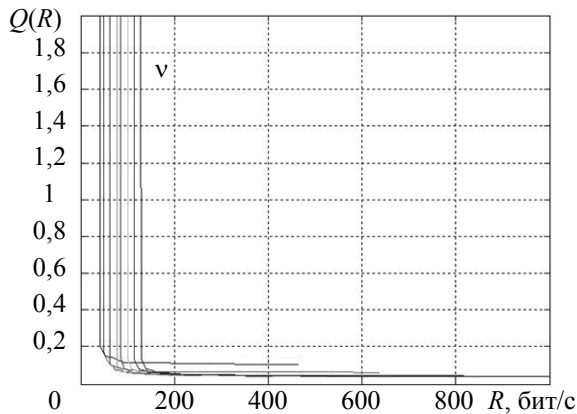


Рис. 4

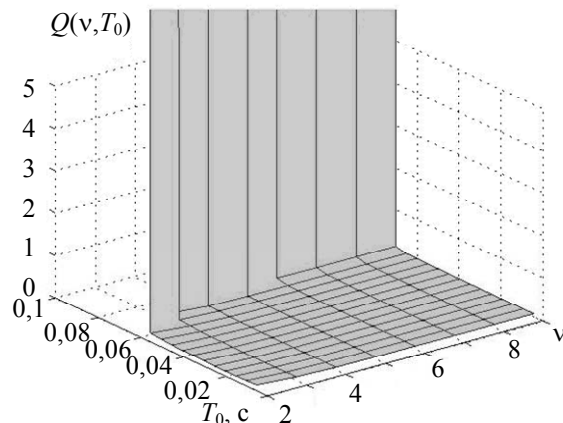


Рис. 5

Заключение. Рассмотрен метод удаленного оценивания состояния колебательной системы посредством передачи данных по цифровому каналу связи с использованием модели динамики объекта при реализации встроенного наблюдателя для сложной механической системы — многомаятниковой установки. Экспериментально определено, что скорость передачи данных может быть принята равной 200 бит/с, — это обеспечивает приемлемую точность передачи данных о состоянии объекта по цифровому каналу связи. Согласно результатам экспериментов в случае кодера полного порядка существует порог, ограничивающий снизу допустимую загрузку канала связи для надежной передачи данных, что подтверждает теоретические результаты работ [17—22].

Статья подготовлена по результатам работы, выполненной при поддержке Российского научного фонда (грант 14-29-00142) в ИПМаш РАН.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ishii H., Francis B. A. Stabilizing a linear system by switching control with dwell time // IEEE Trans. on Automatic Control. 2002. Vol. 47, N 12. P. 1962—1973.
2. Goodwin G., Haimovich H., Quevedo Q., Welsh J. A moving horizon approach to networked control system design // IEEE Trans. on Automatic Control. 2004. Vol. 49, N 9. P. 1427—1445.
3. Abdallah C. T., Tanner H. G. Complex networked control systems: Introduction to the special section // IEEE Control Systems Magazine. 2007. Vol. 27, N 4. P. 3—32.
4. Nair G. N., Fagnani F., Zampieri S., Evans R. Feedback control under data rate constraints: An overview // Proc. IEEE. 2007. Vol. 95, N 1. P. 108—137.
5. Андриевский Б. Р., Фрадков А. Л. Управление и наблюдение через каналы связи с ограниченной пропускной способностью // Гирокоспия и навигация. 2009. № 4 (67). С. 103—114.
6. Андриевский Б. Р., Матвеев А. С., Фрадков А. Л. Управление и оценивание при информационных ограничениях: к единой теории управления, вычислений и связи // Автоматика и телемеханика. 2010. № 4. С. 34—99.
7. Matveev A. S., Savkin A. V. Estimation and Control over Communication Networks. Boston: Birkhauser, 2009.
8. Nair G. N., Evans R. J. State estimation via a capacity-limited communication channel // Proc. of the 36th IEEE Conf. on Decision and Control, San Diego, California, USA, Dec. 1997. P. 866—871.
9. Nair G. N., Evans R. J. Communication-limited stabilization of linear systems // Proc. of the 39th IEEE Conf. on Decision and Control, Sydney, Australia, Dec. 2000. P. 1005—1010.
10. Nair G. N., Evans R. J. Mean square stabilisability of stochastic linear systems with data rate constraints // Proc. of the 41st IEEE Conf. on Decision and Control, Las Vegas, Nevada. USA, Dec. 2002. Vol. WeM02. P. 1632—1637.

11. *Nair G. N., Evans R. J.* Stability of model-based networked control systems with time-varying transmission times // *Systems & Control Letters*. 2000. Vol. 41. P. 49—56.
12. *Nair G. N., Evans R. J.* Exponential stabilisability of finite-dimensional linear systems with limited data rates // *Automatica*. 2003. Vol. 39. P. 585—593.
13. *Liberzon D.* Nonlinear stabilization by hybrid quantized feedback / Eds.: *N. Lynch, B. Krogh*. Berlin — Heidelberg: Springer-Verlag, 2000. P. 243—257.
14. *Brockett R. W., Liberzon D.* Quantized feedback stabilization of linear systems // *IEEE Trans. on Automatic Control*. 2000. Vol. 45, N 7. P. 1279—1289.
15. *Liberzon D.* Hybrid feedback stabilization of systems with quantized signals // *Automatica*. 2003. Vol. 39. P. 1543—1554.
16. *Tatikonda S., Mitter S.* Control under communication constraints // *IEEE Trans. on Automatic Control*. 2004. Vol. 49, N 7. P. 1056—1068.
17. *Fradkov A. L., Andrievsky B., Evans R. J.* Chaotic observer-based synchronization under information constraints // *Physical Rev. E*. 2006. Vol. 73. P. 066209.
18. *Андреевский Б. Р., Фрадков А. Л.* Метод пассивации в задачах адаптивного управления, оценивания и синхронизации // *Автоматика и телемеханика*. 2006. № 11. С. 3—37.
19. *Фрадков А. Л., Андреевский Б. Р.* Адаптивная синхронизация нелинейных систем // *Изв. вузов. Приборостроение*. 2007. Т. 50, № 10. С. 17—23.
20. *Fradkov A. L., Andrievsky B., Evans R. J.* Synchronization of passifiable Lurie systems via limited-capacity communication channel // *IEEE Trans. Circuits Syst. I*. 2009. Vol. 56, N 2. P. 430—439.
21. *Fradkov A. L., Andrievsky B., Evans R. J.* Hybrid quantised observer for multi-input-multi-output nonlinear systems // *Proc. of the 17th IEEE Intern. Conf. Control Applications (CCA 2008)*, San Antonio, Texas, USA, 3—5 Sept., 2008. P. 1195—1200.
22. *Fradkov A. L., Andrievsky B., Peaucelle D.* Estimation and control under information constraints for LAAS helicopter benchmark // *IEEE Trans. on Control Systems Technology*. 2010. Vol. 18, N 5. P. 1180—1187.
23. *Андреевский Б. Р., Фрадков А. Л.* Метод пассивации в задачах синхронизации и оценивания состояния нелинейных систем по цифровому каналу связи // *Управление большими системами: Сб. тр.* 2011. № 35. С. 20—58.
24. *Фрадков А. Л., Андреевский Б. Р., Андреевский А. Б.* Оценивание состояния пассивируемых нелинейных систем при коммуникационных ограничениях // *Информационно-управляющие системы*. 2011. № 1. С. 28—33.
25. *Fradkov A. L., Andrievsky B., Boykov K. B.* Multipendulum mechatronic setup: Design and experiments // *Mechatronics*. 2012. Vol. 22, N 1. P. 76—82.
26. *Fradkov A. L., Andrievskiy B., Boykov K. B., Lavrov B. P.* Multipendulum mechatronic setup for studying control and synchronization // *Dynamics and Control of Hybrid Mechanical Systems: World Scientific Series on Nonlinear Science* / Eds.: *G. Leonov, H. Nijmeijer, A. Pogromsky, A. Fradkov*. Singapore: World Scientific, 2010. Ser. B, Vol. 14. P. 211—222.
27. *Фрадков А. Л., Андреевский Б. Р., Бойков К. Б., Андреевский А. Б.* Многомаятниковый мехатронный комплекс // *Мехатроника, автоматизация, управление*. 2011. № 1. С. 41—54.
28. *Андреевский А. Б., Андреевский Б. Р., Капитонов А. А., Фрадков А. Л.* Решение инженерных задач в среде Scilab: Учеб. пособие. СПб: НИУ ИТМО, 2013.
29. *Кузовков Н. Т.* Модальное управление и наблюдающие устройства. М.: Машиностроение, 1976. 184 с.

Сведения об авторах

- Борис Ростиславич Андреевский** — д-р техн. наук, профессор; Университет ИТМО; кафедра управления сложными системами; E-mail: bandri@yandex.ru
- Александр Львович Фрадков** — д-р техн. наук, профессор; Университет ИТМО; кафедра управления сложными системами; E-mail: fradkov@mail.ru
- Алексей Борисович Андреевский** — аспирант; ИПМаш РАН, E-mail: andrievskyalexey@gmail.com

Ссылка для цитирования: Андриевский Б. Р., Фрадков А. Л., Андриевский А. Б. Оценивание состояния много-маятниковой системы при коммуникационных ограничениях // Изв. вузов. Приборостроение. 2015. Т. 58, № 9. С. 742—750.

**STATE ESTIMATION
OF THE MULTIPENDULUM SETUP UNDER COMMUNICATION CONSTRAINTS**

B. R. Andrievsky¹, A. L. Fradkov¹, A. B. Andrievsky²

¹ ITMO University, 197101, Saint Petersburg, Russia
E-mail: bandri@yandex.ru

² Institute of Problems of Mechanical Engineering of the Russian Academy of Sciences,
199178, Saint Petersburg, Russia

Application of the coding-decoding procedure based on a plant dynamics model for implementation of embedded observer with low-bitrate data transmission channel is demonstrated for computer-controlled mechanical system — a multipendulum setup. Experimental results show efficiency of the proposed method in the case of corrupted measurements and plant model uncertainty.

Keywords: multipendulum setup, mathematical model, data transmission, communication channel, state estimation, experiment.

Data on authors

- Boris R. Andrievsky** — Dr. Sci., Professor; ITMO University; Department of Complex Systems Control; E-mail: bandri@yandex.ru
- Alexander A. Fradkov** — Dr. Sci., Professor; ITMO University; Department of Complex Systems Control; E-mail: fradkov@mail.ru
- Alexey B. Andrievsky** — Post-Graduate Student; IPME RAS; E-mail: andrievskyalexey@gmail.com

For citation: Andrievsky B. R., Fradkov A. L., Andrievsky A. B. State estimation of the multipendulum setup under communication constraints // Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedeniy. Priborostroenie. 2015. Vol. 58, N 9. P. 742—750 (in Russian).

DOI: 10.17586/0021-3454-2015-58-9-742-750