

# МАШИНОСТРОЕНИЕ И МАШИНОВЕДЕНИЕ

DOI: 10.34031/2071-7318-2020-5-10-63-71

\*Вирабян Л.Г., Демин В.Д.

Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова

\*E-mail: rl\_bgtu@intbel.ru

## ПОСТРОЕНИЕ МУЛЬТИРОБОТИЗИРОВАННОЙ СИСТЕМЫ НА ОСНОВЕ СТОХАСТИЧЕСКОГО СОБЫТИЙНОГО «СУПЕР-ТВИСТ» УПРАВЛЕНИЯ

**Аннотация.** В данной статье представлена разработка “Супер-Твист” контроллера, основанного на стохастических событиях для решения проблемы управления построением в сетевой много-агентной системе при наличии внешнего возмущения. Стохастичность в системе вводится случайностью сетевых неопределенностей, то есть потерь и задержек пакетов данных. Предлагаемая структура контроллера состоит из двух частей. Первая часть выводит условие запуска события для обновлений входных управляющих данных каждого агента в системе. Вторая часть гарантирует желаемое построение за конечное время путем определения верхнего предела времени достижения заданной поверхности скольжения каждого агента. Предложенная стохастическая структура была протестирована на мобильных роботах. Результаты показывают тройную эффективность стохастической структуры. Они: а) сохраняют преимущества стратегии запуска событий, б) сохраняют преимущества контроллера скользящего “Супер-Твист” режима, в) устойчивы к сетевым неопределенностям.

**Ключевые слова:** стохастический, потеря пакетов, задержка, событие-триггер, скользящая поверхность, стабильность.

**Введение.** Консенсус в мультироботизированной системе (МС) привлек большое внимание исследователей в разных областях из-за её применения в различных областях. Подход, основанный на событиях, является эффективным решением для задачи управления МС. К настоящему времени выполнено несколько работ по событийному управлению МС на основе неориентированной топологии [1], коммутационной топологии [2], последовательно связной топологии [3], направленной топологии [4]. Различные схемы управления на основе событий, относящиеся к консенсусу в МС, включают протокол консенсуса [1], кооперативное управление [5], адаптивное управление [6], децентрализованное управление [2], пиннинг-управление (pinning-управление) [7], управление на основе выборочных данных [4], распределенное управление [8] и так далее. Для всех вышеперечисленных работ требуется идеальная связь между агентами, что не всегда возможно в режиме реального времени. Обмен информацией между агентами может быть подвержен сетевым неопределенностям. Методы управления, запускаемые событиями, позволяют обрабатывать сетевые неопределенности индивидуально [9], или одновременно несколькими агентами [10]. Результаты в [9] основаны только на предположении, что задержки в сети передачи короче временных интервалов между каждым

набором триггеров событий. На практике это может быть нереально.

Управление скользящим режимом (SMC) улучшает работу системы при наличии неопределенностей. Это хорошо известный надежный и эффективный метод регулирования. SMC второго порядка (SOSMC) и SMC высшего порядка (HOSMC) очень эффективно выполняют эту задачу. Одним из таких контроллеров является «Супер-твист» SMC (STSMC) [11]. Подходы к построению, инициируемые событиями, основанные на консенсусе, для МС первого порядка, подверженного возмущениям, с использованием обычных SMC и интегральных SMC были предложены в [12]. Обе эти работы рассматривали только возмущения. Для обработки изменяющихся во времени задержек и структурных неопределенностей в системе, Вонг и др. [13] предложили интегральный SMC с синхронизацией по времени. Ю и др. [14] предложили управление по событию для многоагентных систем «лидер-последователь» с проблемой потери пакетов и изменяющихся во времени задержек на основе информации о соседях второго порядка с использованием распределенного контроллера динамического отслеживания на основе наблюдателя. Задача событийного управления стохастическими нелинейными системами с запаздыванием экзогенных возмущений и событийный контроллер с

обратной связью исследованы в [15]. Новая проблема  $\infty$  управления для стохастической системы с дискретным временем и событийной схемой при наличии потерь пакетов решается в [16]. Сейчас хорошо известно, что в результате конечной частоты дискретизации в системах с дискретным временем траектории состояний не могли оставаться на заранее спроектированной идеальной поверхности скольжения. Вместо этого траектории оставались бы в пограничном слое вокруг заданной поверхности скольжения, называемой полосой квази-скольжения [17]. Та и Ха [18] предложили SMC с дискретным временем для линейной системы с задержкой по времени и помехами детерминированным образом. В [19] рассматривается надежный SMC для дискретной стохастической системы со смешанными временными задержками, неопределенностями и нелинейностью. В [20] было разработано надежное управление в дискретном скользящем режиме (DSMC) для стабилизации сетевой системы с изменяющейся во времени задержкой связи. Ху и др. [21] исследовали проблему робастного SMC для смешанной задержки и потерь пакетов при неопределенной вероятности пропуска. SMC, запускаемый по событию, на основе наблюдателя и SMC с обратной связью по событию, рассматриваются для модели системы с дискретным временем в [22]. Эти методы существенно развиты в данной статье для управления мультироботизированной системой, рассмотренной в [23].

**Разработка математической модели.**

Неголономные мобильные роботы в рамках мультироботизированной системы движутся в плоскости X-Y. Каждый агент в группе имеет одинаковый строй и динамику. Кинематическая модель агента  $i$  на рис. 1 аналогична [24] и задана формулой

$$\dot{x}_i = v_i \cos(\theta_i), \dot{y}_i = v_i \sin(\theta_i), \dot{\theta}_i = \omega_i \quad (1)$$

где  $\bar{x}_i = [\bar{x}_i, \bar{y}_i]^T$  и  $\theta_i$  представляют вектор положения и угол поворота соответственно,  $v_i$  и  $\omega_i$  - линейная и угловая скорости соответственно.



Рис. 1. Схема модели робота

Внеосевая точка Q считается рабочей точкой

для робота  $i$ . Кинематическая модель (1) сначала преобразуется в форму с одним интегратором. Внеосевая точка расположена в точке  $(x_i, y_i)$ , где  $x_i = \bar{x}_i + l \cos(\theta_i)$  и  $y_i = \bar{y}_i + l \sin(\theta_i)$  с расстоянием  $l$  между центром тяжести (с) и Q. Динамика агента на основе внеосевой точки определяется выражением

$$\begin{aligned} \dot{x}_i &= v_i \cos \theta_i - l \omega_i \sin \theta_i \\ \dot{y}_i &= v_i \sin \theta_i + l \omega_i \cos \theta_i \end{aligned} \quad (2)$$

Линейная и угловая скорости определяются как

$$\begin{aligned} v_i &= u_{ix} \cos \theta_i + u_{iy} \sin \theta_i \\ \omega_i &= (-\frac{1}{l})(u_{ix} \sin \theta_i - u_{iy} \cos \theta_i) \end{aligned} \quad (3)$$

где  $u_i = [u_{ix} u_{iy}]^T$  - управляющий входной вектор, генерирующий эти скорости. Используя (3), (2) можно упростить как

$$\dot{x}_i = u_{ix}, \dot{y}_i = u_{iy} \quad (4)$$

На движение робота влияют внешние возмущения  $(d_{ix}, d_{iy})$ . Следовательно, динамика (4) после учета возмущения принимает вид

$$\dot{x}_i = u_{ix} + d_{ix}, \dot{y}_i = u_{iy} + d_{iy} \quad (5)$$

Динамику (5) можно компактно записать в виде модели с одним интегратором как

$$\dot{x}_i = u_i + d_i \quad (6)$$

где  $x_i = [x_i, y_i]^T$  и  $d_i = [d_{ix}, d_{iy}]^T$  представляют вектор положения и сосредоточенную неопределенность для внешних возмущений и немоделированной динамики соответственно.

Распределенная структура MC рассматривается для роботов в качестве агентов. Эти агенты имеют динамику с одним интегратором. Они могут взаимодействовать и передавать данные друг другу. Предполагается, что топология связи между ними - ориентированный и взвешенный граф, лишенный петель,  $G = (V, E, A)$ .  $V, E$  и  $A$  - это набор узлов, набор ребер и матрица смежности соответственно.  $a_{ij}$  - это компонента  $A$ , имеющая значение 1, если  $(V_i, V_j) \in E$ , в противном случае - 0.  $L$  и  $B$  - матрица лапласовской и взвешенной связи между лидером и последователями соответственно.

Обозначения: Для любого вектора  $\varepsilon = [\varepsilon_1, \varepsilon_2, \dots, \varepsilon_n]^T$ , а)  $\text{sgn}(\varepsilon) = [\text{sign}(\varepsilon_1), \text{sign}(\varepsilon_2), \dots, \text{sign}(\varepsilon_n)]^T$ , б)  $|\varepsilon|^\eta = [|\varepsilon_1|^\eta, \dots, |\varepsilon_n|^\eta]^T$ , и в)  $|\varepsilon|^\eta \text{sgn}(\varepsilon) = [|\varepsilon_1|^\eta \text{sgn}(\varepsilon_1), \dots, |\varepsilon_n|^\eta \text{sgn}(\varepsilon_n)]^T$ , где параметр  $\eta \in R$ . В статье используется норма, которая определяется как  $\|\varepsilon\| = \sqrt{\varepsilon^T \varepsilon}$ .

Системная динамика и управление. Динамика ведущего и ведомого роботов, подвержен-

ных сетевой неопределенности и внешним возмущениям в рамках МС определяются как

$$\begin{aligned} \text{Последователь: } \dot{x}_i(t) &= \rho_i^u u_i(t - \delta_i^u) + d_i(t), i = 1 \dots p \\ \text{Лидер: } \dot{x}_0(t) &= \rho_0^u u_0(t - \delta_0^u) \end{aligned} \quad (7)$$

где  $x_i(t) \in R^n, u_i(t) \in R^n$  и  $d_i(t) \in R^n$  представляют положение, управляющий вход и вход ограниченного возмущения соответственно для  $i$ -го ведомого робота,  $x_0(t) \in R^n$  и  $u_0(t) \in R^n$  – вектор положения и управляющий вход соответственно робота-лидера,  $\rho_i^u$  и  $\rho_0^u$  – случайные коэффициенты потери пакетов для управляющего входа ведомого и ведущего роботов соответственно,  $\delta_i^u$  и  $\delta_0^u$  – случайные задержки ведомого

и ведущего робота соответственно. Аналогично  $\rho_i^x$  и  $\rho_0^x$  являются коэффициентами случайной потери пакетов, а  $\delta_i^x$  и  $\delta_0^x$  – это случайные задержки состояний ведомого и ведущего роботов соответственно.

Простая дискретная форма динамики лидер-последователь (7) имеет вид

$$\begin{aligned} \text{Последователь: } x_i(k+1) &= x_{i(\delta_i, \rho_i)}(k) + \Delta T u_i(k) + d_i(k) \\ \text{Лидер: } x_0(k+1) &= x_{0(\delta_0, \rho_0)}(k) + \Delta T u_0(k) \end{aligned} \quad (8)$$

где состояния  $x_{i(\delta_i, \rho_i)}$  и  $x_{0(\delta_0, \rho_0)}$  являются резуль-

татами их предыдущих состояний и входных данных управления. Они представлены как

$$\begin{aligned} x_{i(\delta_i, \rho_i)}(k) &= \{\rho_i^x x_i(k), \rho_i^x x_i(k-1), \dots, \rho_i^x x_i(k - \delta_i^x), \rho_i^u u_i(k-1), \rho_i^u u_i(k-2), \dots, \rho_i^u u_i(k - \delta_i^u)\} \\ x_{0(\delta_0, \rho_0)}(k) &= \{\rho_0^x x_0(k), \rho_0^x x_0(k-1), \dots, \rho_0^x x_0(k - \delta_0^x), \rho_0^u u_0(k-1), \rho_0^u u_0(k-2), \dots, \rho_0^u u_0(k - \delta_0^u)\} \end{aligned} \quad (9)$$

Ниже приводится определение стохастической модели для (8) с учетом ожидаемого значения состояний из-за сетевых неопределенностей.

$$\begin{aligned} \mathcal{E}_{\delta_i, \rho_i} \{x_{i,k+1}\} &= \mathcal{E}_{\delta_i, \rho_i} \{x_{i,k}\} + \Delta T u_{i,k} + d_{i,k} \\ \mathcal{E}_{\delta_0, \rho_0} \{x_{0,k+1}\} &= \mathcal{E}_{\delta_0, \rho_0} \{x_{0,k}\} + \Delta T u_{0,k} \end{aligned} \quad (10)$$

где  $\mathcal{E}\{x_{i,k}\}$  представляет ожидаемое значение  $x_i$ ,  $\Delta T$  – интервал выборки системы. Пусть  $\mathcal{E}_{\delta_i, \rho_i} \{\tilde{x}_{i,k}\} = \mathcal{E}_{\delta_i, \rho_i} \{x_{i,k}\} - \mathcal{E}_{\delta_0, \rho_0} \{x_{0,k}\} + \Gamma_i$  и  $\tilde{u}_{i,k} = u_{i,k} - u_{0,k}$  – отклонение в позиции и вход управления робота-последователя от робота-ли-

дера,  $\Gamma_i$  – желаемое отклонение позиции ведомого от лидера. Относительную динамику с использованием (10) можно записать как

$$\mathcal{E}_{\delta_i, \rho_i} \{\tilde{x}_{i,k+1}\} = \mathcal{E}_{\delta_i, \rho_i} \{\tilde{x}_{i,k}\} + \Delta T \tilde{u}_{i,k} + d_{i,k} \quad (11)$$

Следующая поверхность скользящего режима определена для ведомого агента  $i$  в структуре МС.

$$S_{i,k} = \mathcal{E}_{\delta_i, \rho_i} \{\tilde{x}_{i,k}\} - \mathcal{E}_{\delta_i, \rho_i} \{q_{i,k}^a\}, i = 1 \dots n \quad (12)$$

где  $S_{i,k} = [s_{1,k}, s_{2,k} \dots s_{n,k}]^T$  с началом фазы скольжения  $S_{i,k} = 0$ . Для достижения желаемого консенсуса мы рассмотрели закон управления сверхкручением, приведенный ниже

$$\begin{aligned} \tilde{u}_{i,k} &= \mathcal{E}_{\delta_i, \rho_i} \{q_{i,k}^a\} - K_1 \mathcal{E}_{\delta_i, \rho_i} \left\{ |S_{i,k}|^{\frac{1}{2}} \text{sgn}(S_{i,k}) \right\} + \mathcal{E}_{\delta_i, \rho_i} \{e_{i,k}\} \\ \mathcal{E}_{\delta_i, \rho_i} \{e_{i,k+1}\} &= \mathcal{E}_{\delta_i, \rho_i} \{e_{i,k}\} - \Delta T K_2 \mathcal{E}_{\delta_i, \rho_i} \{ \text{sgn}(S_{i,k}) \} \end{aligned} \quad (13)$$

$$\begin{aligned} \text{где } \mathcal{E}_{\delta_i, \rho_i} \{q_{i,k}\} &= -\frac{\gamma_i}{p_i+1} \sum_{j \in p} a_{ij} \left\{ \left( \mathcal{E}_{\delta_i, \rho_i} \{x_{i,k}\} - \mathcal{E}_{\delta_0, \rho_0} \{x_{0,k}\} + \Gamma_i \right) - \left( \mathcal{E}_{\delta_j, \rho_j} \{x_{j,k}\} - \mathcal{E}_{\delta_0, \rho_0} \{x_{0,k}\} + \Gamma_j \right) \right\} + \\ b_i \left( \mathcal{E}_{\delta_i, \rho_i} \{x_{i,k}\} - \mathcal{E}_{\delta_0, \rho_0} \{x_{0,k}\} + \Gamma_i \right) &= -\frac{\gamma_i}{p_i+1} \sum_{j \in p} a_{ij} \left( \mathcal{E}_{\delta_i, \rho_i} \{\tilde{x}_{i,k}\} - \mathcal{E}_{\delta_j, \rho_j} \{\tilde{x}_{j,k}\} \right) + b_i \mathcal{E}_{\delta_i, \rho_i} \{\tilde{x}_{i,k}\} \end{aligned} \quad (14)$$

$q_i$  – консенсусный компонент, определенный на основе ошибки отслеживания  $i$ -го ведомого и соседних агентов.

В (14)  $\gamma_i > 0, \alpha \in (0,1)$  и  $p_i(1 \leq p_i < p)$  –

количество агентов, соседних с  $i$ -м членом. Матрицы усиления  $K_1 = \text{diag}\{k_{11}, k_{12}, \dots, k_{1n}\}$  и  $K_2 = \text{diag}\{k_{21}, k_{22}, \dots, k_{2n}\}$  и с каждым из их элементов – положительные выигрыши.

**Экспериментальные исследования.** Эксперименты в реальном времени проводились с использованием трех мобильных роботов. Они оснащены датчиком сонара и датчиком положения.

Коммуникационный оргграф  $G$  показан на рис. 2. Предполагается, что вес коммуникации между агентами равен 1. Консенсусные параметры графа:  $L = [0 \ 0; -1 \ 1]$  и  $B = [1 \ 0; 0 \ 1]$ .

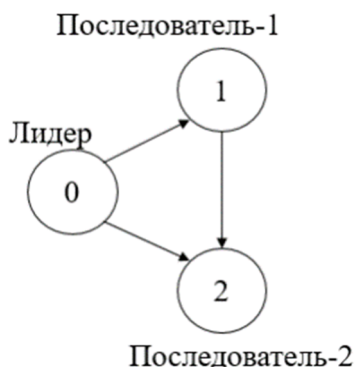


Рис. 2. Оргграф МС для трех роботов

Робот-лидер может свободно перемещаться в любом направлении. Для достижения консенсуса при построении последователи должны следовать траектории лидера.

Начальная позиция лидера  $x_0 = [0; 0]$ , тогда как последователи изначально находятся в  $x_1 = [-2; 0,5]$  и  $x_2 = [-2; -0,5]$ . Параметры системы следующие:  $l = 0,21 \text{ m}$ ,  $K_1 = \text{diag}\{21, 21\}$ ,  $K_2 = \text{diag}\{7, 7\}$ ,  $\Gamma_1 = (0,75 \text{ m}, -0,75 \text{ m})$ ,  $\Gamma_2 = (0,75 \text{ m}, 0,75 \text{ m})$ , а  $\alpha = 5/7$ . Время выборки, учитываемое для экспериментов, составляет 0,01 с. Значение границы помехи  $\Omega$  равно 1. Данные, передаваемые от роботов, подвержены задержкам и потерям пакетов. Во время реализации, предположим, что изменяющаяся во времени задержка  $\delta_i^x$  удовлетворяет условию  $0 \leq \delta_i^x \leq 2$ . Потери пакетов смоделированы с использованием распределения Бернулли с вероятностью  $p = 0,15$ .

Анализ без потерь пакетов и задержек показан на рис. 3–4. Траектории лидера и ведомого показаны на рис. 3а, а относительное расстояние показано на рис. 3б. Из рисунков видно, что расстояние между агентами остается неизменным с течением времени. Это означает, что агенты могут достичь желаемого построения за конечное время. Линейная ( $v$ ) и угловая ( $\omega$ ) скорости показаны на рис. 4.

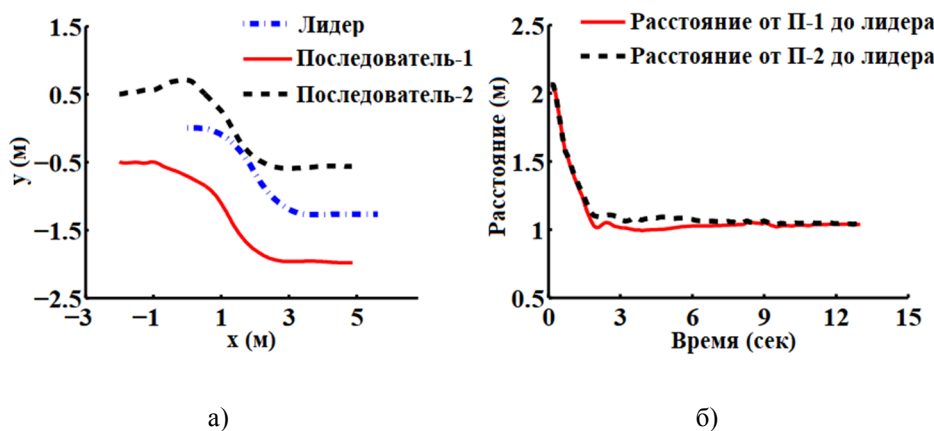


Рис. 3. (а) Траектория роботов во время желаемого построения и (б) Относительное расстояние последователей от лидера

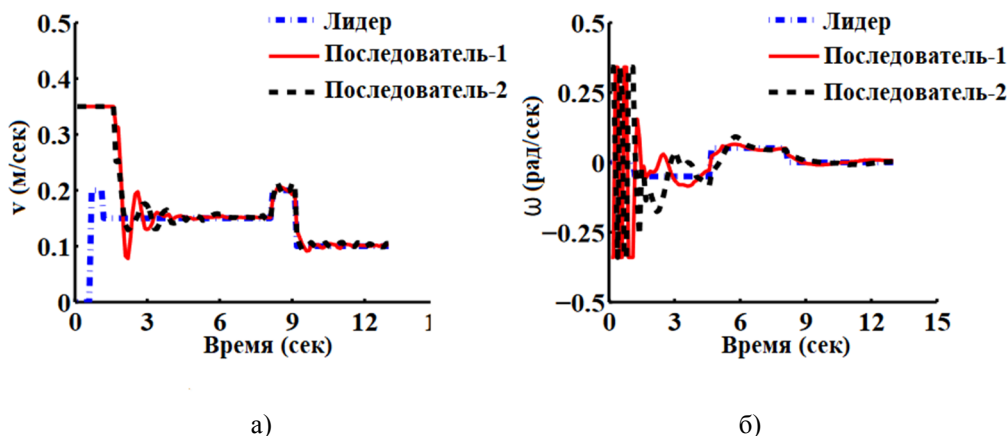


Рис. 4. (а) Линейная скорость и (б) Угловая скорость роботов

Устойчивость предложенного подхода была проверена для случая, когда учитываются потери пакетов и задержки для входных данных состояния и управления ведущего и ведомого роботов. Рис. 7 гарантирует построение даже при наличии

сетевых неопределенностей. Их влияние может быть визуализировано с помощью графиков линейной и угловой скоростей на рис. 7. Скорости робота изменяются, когда происходят потери пакетов, задержки или и то, и другое.

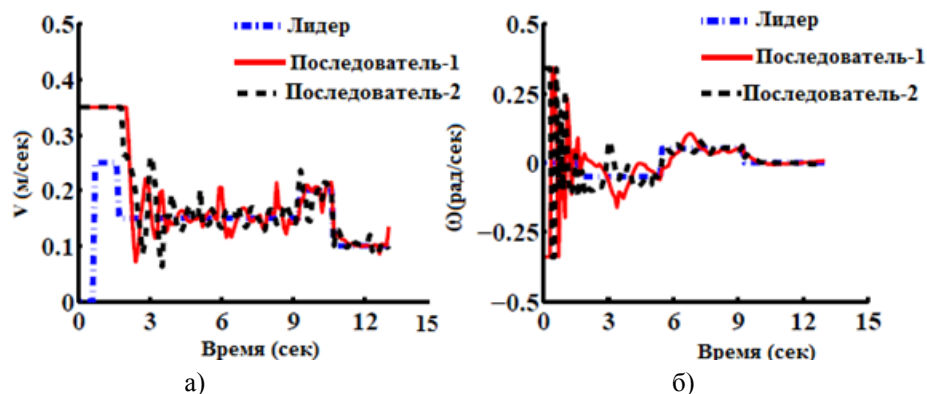


Рис. 5. а) линейная скорость и б) угловая скорость роботов

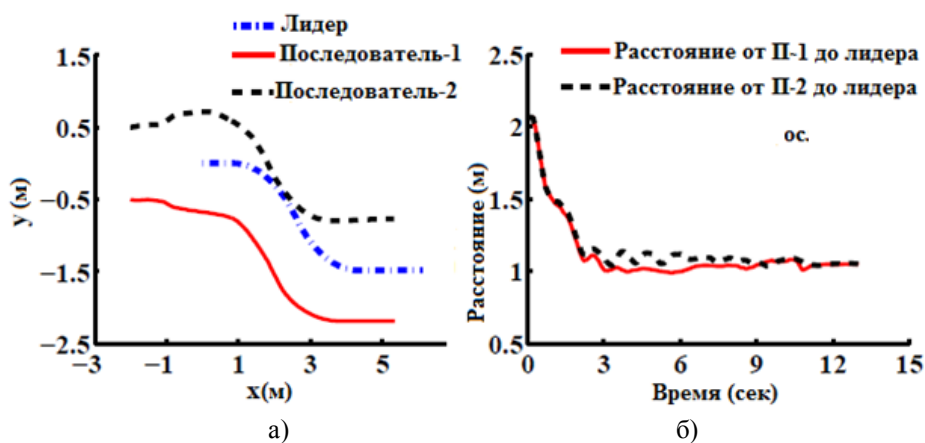


Рис. 6. а) траектория роботов во время желаемого построения и б) относительное расстояние ведомых роботов от ведущего робота.

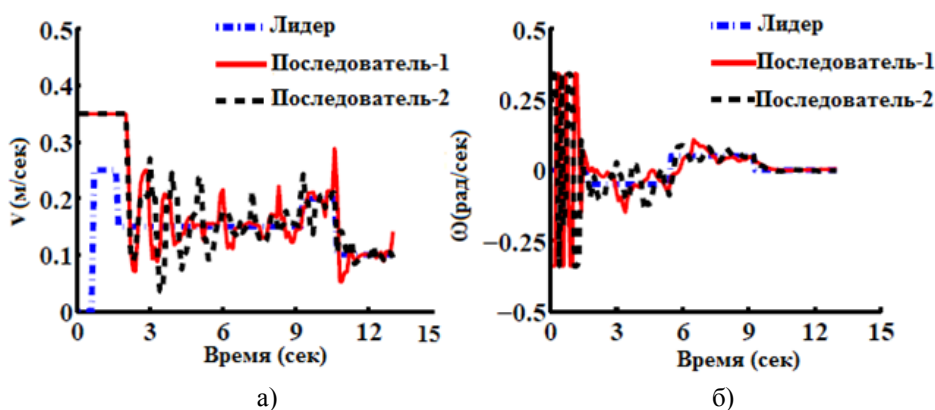


Рис. 7. а) линейная скорость и б) угловая скорость роботов.

Приведенные выше эксперименты подтверждают эффективность предложенного подхода. Консенсус достигается примерно за 3–4 секунды. Предлагаемый подход является достойным выбором для решения проблемы построения на основе консенсуса при наличии помех и сетевых неопределенностей, то есть потерь пакетов и задержек.

**Выводы.** В этой статье разработано STSMC управление, запускаемое стохастическими событиями, с конечным временем для достижения консенсусного построения для МС при наличии сетевых неопределенностей (потеря и задержка пакетов) и внешних возмущений. Поверхность

скольжения с дискретным временем была разработана для получения условия запуска события для каждого агента. Закон управления на основе событий, устойчивый к сетевым неопределенностям и возмущениям, гарантирует временную стабильность каждого агента во время желаемого построения. Критерии допустимости, удовлетворяемые обновлением управления каждым агентом, позволяют избежать эффекта Зенона во время построения. Эксперименты в реальном времени с использованием трех роботов для желаемого построения подтверждают теоретические разработки, изложенные в статье. Полученные результаты подтверждают, что эффективность предлагаемого подхода не уступает традиционным подходам, запускаемым по времени, и лучше, чем другие существующие подходы, основанные на событиях. Меньшее количество событий значительно уменьшает количество обновлений управления, что еще больше снижает действия исполнительного механизма, необходимые для достижения построения на основе консенсуса. Это обеспечивает экономию вычислительных и коммуникационных ресурсов, доступных во время работы.

**Источник финансирования.** Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ и ДНТ в рамках научного проекта № 18-57-45014 ИИД\_а.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

- Zhu Y., Guan X., Luo X., Li S. Finite-Time Consensus of Multi-Agent System via Nonlinear Event-Triggered Control Strategy // IET Control Theory Applications. 2015. Vol. 9. No. 17. Pp. 2548–2552.
- Cheng T.-H., Kan Z., Klotz J. R., Shea J. M., Dixon W. E. Event-Triggered Control of Multiagent Systems for Fixed and Time-Varying Network Topologies // IEEE Transactions on Automatic Control. 2017. Vol. 62. No. 10, Pp. 5365–5371.
- Cui Y., Liu Y., Zhang W., Alsaadi F. E. Event-Based Consensus for a Class of Nonlinear Multi-Agent Systems With Sequentially Connected Topology // IEEE Transactions on Circuits and Systems I: Regular Papers. 2018. Vol. 65. No. 10. Pp. 3506–3518.
- Peng C., Zhang J., Han Q.-L. Consensus of Multiagent Systems With Nonlinear Dynamics Using an Integrated Sampled-Data-Based Event-Triggered Communication Scheme // IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems. 2019. Vol. 49. No. 3. Pp. 589–599.
- Chen X., Hao F., Ma B. Periodic event-triggered cooperative control of multiple non-holonomic wheeled mobile robots // IET Control Theory Applications. 2017. Vol. 11. No. 6. Pp. 890–899.
- Qian Y.-Y., Liu L., Feng G. Output Consensus of Heterogeneous Linear Multi-Agent Systems with Adaptive Event-Triggered Control // IEEE Transactions on Automatic Control. 2018. Vol. 64. No. 6. Pp. 2606–2613.
- Adaldo A., Alderisio F., Liuzza D., Shi G., Dimarogonas D. V., Di Bernardo M., Johansson K. H. Event-Triggered Pinning Control of Switching Networks // IEEE Transactions on Neural Networks and Learning Systems. 2015. Vol. 2. No. 2. Pp. 204–213.
- Du C., Liu X., Ren W., Lu P., Liu H. Finite-Time Consensus for Linear Multi-Agent Systems via Event-Triggered Strategy // IEEE Transactions on Neural Networks and Learning Systems. 2019. Vol. 35. No. 3. Pp. 1338–1350.
- Dolk V., Borgers D.P., Heemels W. Output-Based and Decentralized Dynamic Event-Triggered Control With Guaranteed Lp-Gain Performance and Zeno-Freeness // IEEE Transactions on Automatic Control. 2017. Vol. 62. No. 1. Pp. 34–49.
- Dolk V., Heemels M. Event-triggered control systems under packet losses // Automatica. 2017. Vol. 80. Pp. 143–155.
- Кешткар С., Позняк А. С., Хернандез Э., Оропеса А. Адаптивный регулятор на скользящих режимах, основанный на “Супер-Твист” наблюдателе состояний с применением к регулированию платформы Стюарта // Автоматика и телемеханика. 2017. № 7. С. 57–75.
- Sinha A., Mishra R. K. Consensus in First Order Nonlinear Heterogeneous Multi-Agent Systems with Event-Based Sliding Mode Control // International Journal of Control. 2018. Pp. 1–14.
- Wang S.-G., Bai L., Chen M. Robust sliding mode control of general time-varying delay stochastic systems with structural uncertainties // Control Theory and Technology. 2014. Vol. 12. No. 4. Pp. 357–367.
- Yu M., Yan C., Xie D., Xie G. Event-triggered Tracking Consensus with Packet Losses and Time-varying Delays // IEEE/CAA Journal of Automatica Sinica. 2016. Vol. 3. No. 2. Pp. 165–173.
- Zhu Q. Stabilization of Stochastic Nonlinear Delay Systems With Exogenous Disturbances and the Event-Triggered Feedback Control // IEEE Transactions on Automatic Control. 2018. Vol. 64. No. 9. Pp. 3764–3771.
- Hu Z., Shi P., Zhang J., Deng F. Control of Discrete-Time Stochastic Systems With Packet Loss by Event-Triggered Approach // IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems. 2018. Pp. 1–10.
- Gao W., Wang Y., Homaifa A. Discrete-Time Variable Structure Control Systems // IEEE

Transactions on Industrial Electronics. 1995. Vol. 42. No. 2. Pp. 117–122.

18. That N. D., Ha Q. P. Discrete-time sliding mode control with state bounding for linear systems with time-varying delay and unmatched disturbances // IET Control Theory Applications. 2015. Vol. 9. No. 11. Pp. 1700–1708.

19. Hu J., Wang Z., Gao H., Stergioulas L. K. Robust Sliding Mode Control for Discrete Stochastic Systems With Mixed Time Delays, Randomly Occurring Uncertainties, and Randomly Occurring Nonlinearities // IEEE Transactions on Industrial Electronics. 2012. Vol. 59. No. 7. Pp. 3008–3015.

20. Argha A., Li L., Su S. W., Nguyen H. Discrete-time sliding mode control for networked systems with random communication delays // American Control Conference. 2015. Pp. 6016–6021.

21. Hu J., Zhang H., Yu X., Liu H., Chen D., Design of Sliding-Mode-Based Control for Nonlinear

Systems With Mixed-Delays and Packet Losses Under Uncertain Missing Probability // IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems. 2019. Pp. 1–12.

22. Yao D., Zhang B., Li P., Li H. Event-Triggered Sliding Mode Control of Discrete-Time Markov Jump Systems // IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems. 2018. Vol. 49. No. 10. Pp. 2016–2015.

23. Рыбак Л.А., Бехера Л., Мальшев Д.И., Виравян Л.Г. Аппроксимация рабочей области манипуляторов параллельной и последовательной структуры в составе мультироботизированной системы // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2019. № 8. С. 121–128.

24. Ren W., Sorensen N. Distributed coordination architecture for multi-robot formation control // Robotics and Autonomous Systems. 2008. Vol. 56. No. 4. Pp. 324–333.

#### Информация об авторах

**Виравян Лусине Гарниковна**, аспирант кафедры технологии машиностроения. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. E-mail: lvg181992@mail.ru. Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

**Демин Вячеслав Денисович**, аспирант кафедры технологии машиностроения. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. E-mail: rl\_bgtu@intbel.ru. Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

Поступила 30.09.2020 г.

© Виравян Л.Г., Демин В.Д., 2020

**\*Virabyan L.G., Demin V.D.**

*Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov*

*\*E-mail: rl\_bgtu@intbel.ru*

## BUILDING A MULTI-ROBOT SYSTEM BASED ON STOCHASTIC SUPER-TWIST EVENT MODE CONTROLLER

**Abstract.** This article presents the development of a "Super-Twist" controller based on stochastic events to solve the problem of building control in a network multi-agent system in the presence of an external disturbance. The stochasticity in the system is introduced by randomness of network uncertainties i.e. losses and delays of data packets. The proposed controller structure consists of two parts. The first part outputs an event trigger condition for updates to the input control data of each agent in the system. The second part guarantees the desired construction in a finite time by determining the upper limit of the time to reach the specified sliding surface of each agent. The proposed stochastic design is tested on mobile robots. The results show a triple efficiency of the stochastic structure. They are a) retaining the advantages of event-triggering strategy, b) retaining the advantages of super-twisting sliding mode controller, and c) robust towards network uncertainties.

**Keywords:** stochastic, packet loss, delay, event-trigger, sliding surface, stability.

#### REFERENCES

1. Zhu Y., Guan X., Luo X., Li S. Finite-Time Consensus of Multi-Agent System via Nonlinear Event-Triggered Control Strategy. IET Control Theory Applications. 2015. Vol. 9. No. 17. Pp. 2548–2552.

2. Cheng T.-H., Kan Z., Klotz J. R., Shea J. M., Dixon W. E. Event-Triggered Control of Multiagent Systems for Fixed and Time-Varying Network Topologies. IEEE Transactions on Automatic Control. 2017. Vol. 62. No. 10, Pp. 5365–5371.

3. Cui Y., Liu Y., Zhang W., Alsaadi F. E. Event-Based Consensus for a Class of Nonlinear



Multi-Agent Systems With Sequentially Connected Topology. *IEEE Transactions on Circuits and Systems I: Regular Papers*. 2018. Vol. 65. No. 10. Pp. 3506–3518.

4. Peng C., Zhang J., Han Q.-L. Consensus of Multiagent Systems With Nonlinear Dynamics Using an Integrated Sampled-Data-Based Event-Triggered Communication Scheme. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems*. 2019. Vol. 49. No. 3. Pp. 589–599.

5. Chen X., Hao F., Ma B. Periodic event-triggered cooperative control of multiple non-holonomic wheeled mobile robots. *IET Control Theory Applications*. 2017. Vol. 11. No. 6. Pp. 890–899.

6. Qian Y.-Y., Liu L., Feng G. Output Consensus of Heterogeneous Linear Multi-Agent Systems with Adaptive Event-Triggered Control. *IEEE Transactions on Automatic Control*. 2018. Vol. 64. No. 6. Pp. 2606–2613.

7. Adaldo A., Alderisio F., Liuzza D., Shi G., Dimarogonas D. V., Di Bernardo M., Johansson K. H. Event-Triggered Pinning Control of Switching Networks. *IEEE Transactions on Neural Networks and Learning Systems*. 2015. Vol. 2. No. 2. Pp. 204–213.

8. Du C., Liu X., Ren W., Lu P., Liu H. Finite-Time Consensus for Linear Multi-Agent Systems via Event-Triggered Strategy. *IEEE Transactions on Neural Networks and Learning Systems*. 2019. Vol. 30. No. 3. Pp. 1338–1350.

9. Dolk V., Borgers D.P., Heemels W. Output-Based and Decentralized Dynamic Event-Triggered Control With Guaranteed Lp-Gain Performance and Zeno-Freeness. *IEEE Transactions on Automatic Control*. 2017. Vol. 62. No. 1. Pp. 34–49.

10. Dolk V., Heemels M. Event-triggered control systems under packet losses. *Automatica*. 2017. Vol. 80. Pp. 143–155.

11. Keshtkar, S., Poznyak, A.S., Hernandez, E., Oropeza, A. Adaptive sliding-mode controller based on the super-twist state observer for control of the Stewart platform [Adaptivnyj regulyator na skol'zyashchih rezhimah, osnovannyj na "Super-Tvist" nablyudatele sostoyanij s primeneniem k regulirovaniyu platformy Styuarta]. *Automation and Remote Control*, Vol. 78 No. 7. Pp. 1218–1233.

12. Sinha A., Mishra R. K. Consensus in First Order Nonlinear Heterogeneous Multi-Agent Systems with Event-Based Sliding Mode Control. *International Journal of Control*. 2018. Pp. 1–14.

13. Wang S.-G., Bai L., Chen M. Robust sliding mode control of general time-varying delay stochastic systems with structural uncertainties. *Control Theory and Technology*. 2014. Vol. 12. No. 4. Pp. 357–367.

14. Yu M., Yan C., Xie D., Xie G. Event-triggered Tracking Consensus with Packet Losses and Time-varying Delays. *IEEE/CAA Journal of Automatica Sinica*. 2016. Vol. 3. No. 2. Pp. 165–173.

15. Zhu Q. Stabilization of Stochastic Nonlinear Delay Systems With Exogenous Disturbances and the Event-Triggered Feedback Control. *IEEE Transactions on Automatic Control*. 2018. Vol. 64. No. 9. Pp. 3764–3771.

16. Hu Z., Shi P., Zhang J., Deng F. Control of Discrete-Time Stochastic Systems With Packet Loss by Event-Triggered Approach. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems*. 2018. Pp. 1–10.

17. Gao W., Wang Y., Homaifa A. Discrete-Time Variable Structure Control Systems. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*. 1995. Vol. 42. No. 2. Pp. 117–122.

18. That N. D., Ha Q. P. Discrete-time sliding mode control with state bounding for linear systems with time-varying delay and unmatched disturbances. *IET Control Theory Applications*. 2015. Vol. 9. No. 11. Pp. 1700–1708.

19. Hu J., Wang Z., Gao H., Stergioulas L. K. Robust Sliding Mode Control for Discrete Stochastic Systems With Mixed Time Delays, Randomly Occurring Uncertainties, and Randomly Occurring Nonlinearities. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*. 2012. Vol. 59. No. 7. Pp. 3008–3015.

20. Argha A., Li L., Su S. W., Nguyen H. Discrete-time sliding mode control for networked systems with random communication delays. *American Control Conference*. 2015. Pp. 6016–6021.

21. Hu J., Zhang H., Yu X., Liu H., Chen D., Design of Sliding-Mode-Based Control for Nonlinear Systems With Mixed-Delays and Packet Losses Under Uncertain Missing Probability. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems*. 2019. Pp. 1–12.

22. Yao D., Zhang B., Li P., Li H. Event-Triggered Sliding Mode Control of Discrete-Time Markov Jump Systems. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems*. 2018. Vol. 49. No. 10. Pp. 2016–2015.

23. Rybak L.A., Behera L., Malyshev D.I., Virabyan L.G. Approximation of the workspace of parallel and serial structure manipulators as part of the multi-robot system [Approksimaciya rabochej oblasti manipulyatorov parallel'noj i posledovatel'noj struktury v sostave mul'tirobotizirovannoj sistemy]. *Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov*. 2019. No. 8. Pp. 121–128.

24. Ren W., Sorensen N. Distributed coordination architecture for multi-robot formation control. *Robotics and Autonomous Systems*. 2008. Vol. 56. No. 4. Pp. 324–333.



*Information about the authors*

**Virabyan, Lusine G.** Postgraduate student. E-mail: lvg181992@mail.ru. Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. Russia, 308012, Belgorod, st. Kostyukova, 46.

**Demin, Vyacheslav D.** Postgraduate student. E-mail: rl\_bgtu@intbel.ru. Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. Russia, 308012, Belgorod, st. Kostyukova, 46.

---

*Received 30.09.2020*

**Для цитирования:**

Вирабян Л.Г., Демин В.Д. Построение мультироботизированной системы на основе стохастического событийного «Супер-твист» управления // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2020. № 10. С. 63–71. DOI: 10.34031/2071-7318-2020-5-10-63-71

**For citation:**

Virabyan L.G., Demin V.D. Building a multi-robot system based on stochastic super-twist event mode controller. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2020. No. 10. Pp. 63–71. DOI: 10.34031/2071-7318-2020-5-10-63-71