

УДК 531.391

## Копирующее управление удаленными роботами с задержкой в передаче сигнала

Ф. М. Кулаков, Г. В. Алферов, П. А. Ефимова

Санкт-Петербургский государственный университет

Россия, 198504, г. Санкт-Петербург, Петергоф, Университетский проспект, 35

kufelix@yandex.ru; +7-906-244-82-16

Описывается метод копирующего управления удаленными роботами, функционирующими в недетерминированной внешней среде при запаздывании в передаче управляющих сигналов. Метод базируется на использовании паспорта выполняемой операции по взаимодействию рабочего инструмента робота с объектами внешней среды.

**Ключевые слова:** копирующее управление; дистанционное управление; билатеральное управление; адаптивное управление; устойчивость процессов управления.

DOI: 10.17072/1993-0550-2019-3-47-55

### Введение

Эффективный, экономичный и безопасный путь дальнейшего освоения космоса основан на широком использовании дистанционно управляемых с наземного центра управления удаленных космических роботов. Основным препятствием на пути создания работоспособных систем телеуправления космическими роботами является значительное запаздывание в передаче роботам управляющих сигналов с наземного центра управления и получения сигналов обратной связи.

Это существенно осложняет решение задачи управления, особенно в случаях, когда роботы-манипуляторы перемещают предметы, которые имеют механические связи, в частности, голономные.

При выполнении подобных операций необходимо использовать обратные связи по силам и моментам реакций механических связей, действующих на схват механической руки робота со стороны захваченных и перемещаемых им "связанных" объектов.

В случае осуществления роботами таких операций на Земле в недетерминированной внешней среде при отсутствии запаздывания в передаче сигналов управления обычно используют традиционное копирующее управление с отражением сил реакций связей (билатеральное управление – bilateral robot control), при котором эти силы и моменты мгновенно воспринимаются рукой человека, перемещающей так называемую задающую рукоятку, что позволяет человеку соответствующим образом мгновенно реагировать на эти силы. Только благодаря этому возможна успешная реализация таких операций при копирующем управлении. Любое запаздывание затрудняет их выполнение. А запаздывание кинестетической информации более 0.2 сек. делает решение задачи почти невозможным. Именно поэтому классическое копирующее управление для космического робота применить невозможно. Поэтому потребовалось усовершенствование метода копирующего управления в направлении преодоления проблемы запаздывания.

К настоящему времени можно выделить нижеследующие основные подходы к решению дистанционного управления космическими роботами.

© Кулаков Ф.М., Алферов Г.В., Ефимова П.А., 2019

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ, проект № 18-08-00419

*Первый подход* основан на использовании так называемых пассивных методов дистанционного управления (passivity bilateral control scheme) [1], при которых мощность, развиваемая с помощью задающей рукоятки рабочим инструментом манипулятора, не должна превышать мощности, развиваемой рукой человека, перемещающего задающую рукоятку. Это накладывает определенные ограничения на функциональные возможности системы билатерального управления, вместе с тем гарантирует выполнение устойчивости – одного из важнейших требований билатерального управления, обеспечивающего его работоспособность. Однако другое важное требование – требование транспарентности – в этом случае плохо реализуемо.

*Второй подход* предполагает использование так называемого прогнозирующего управления (prediction control) [2]. Оно базируется на применении компьютерных и полунатурных моделей космического робота и его внешней среды. С помощью этих моделей с учетом разнообразной сенсорной информации о текущем состоянии робота и его внешней среды прогнозируется их состояние. Исходя из этого прогноза, формируются соответствующие управляющие сигналы. В рамках этого подхода достигается более качественное выполнение требования транспарентности.

*Третий подход* основан на применении скользящего режима управления (sliding control) [3–4]. Сложность практической реализации этого подхода обусловлена необходимостью функционирования управляющей аппаратуры и механической части робота в режимах часто изменяемого знака управлений, имеющих максимально допустимые значения. Это приводит к появлению больших ускорений элементов конструкции, а следовательно, и больших реактивных сил.

Результаты теоретических и экспериментальных исследований этих подходов показали, что при их практическом использовании можно решить проблему запаздывания, когда оно, в лучшем случае, не превышает 1–2 сек. Кроме того, внешняя среда, в которой должен функционировать реальный робот-манипулятор, должна быть "линейной", т.е. линейные приближения "прогнозирующих" поправок должны быть достаточно хорошими.

## **1. Особенности предлагаемого подхода управления удаленными роботами**

Предлагаемый подход [5–26] предусматривает разделение процесса управления на два этапа.

Первый этап, осуществляемый на наземном центре управления, является этапом обучения робота требуемому действию.

Второй этап – этап исполнения этого действия реальным космическим роботом. На первом этапе осуществляется управление не самим роботом, а его моделью. Модель должна функционировать в среде, которая служит моделью реальной внешней среды робота. В этой "модельной" среде человек должен выполнить с помощью модели робота требуемую операцию. Для этого, в частности, допустимо использование билатерального управления моделью с использованием так называемой *задающей рукоятки*. Рука человека, перемещающего задающую рукоятку, заставляет тем самым двигаться рабочий инструмент модели робота по траектории движения рукоятки. При этом рука человека ощущает силу взаимодействия рабочего инструмента модели с моделями объектов внешней среды, перемещения которых ограничены связями. Допустимо использовать и другие способы выполнения операций, например с использованием, так называемой *задающей перчатки*. В процессе выполнения требуемой операции формируется с использованием соответствующих сенсоров ряд данных, необходимых для дальнейшего применения в процессе телеуправления космическим роботом. В их число входит траектория изменения вектора положения рабочего инструмента модели робота в координатах его корпуса, вектор изменения силы взаимодействия рабочего инструмента модели робота с моделями объектов внешней среды, а также данные, несущие информацию о положении моделей объектов внешней среды, с которыми должен взаимодействовать рабочий инструмент робота.

Следует отметить, что закон изменения во времени вектора силы взаимодействия рабочего инструмента робота с объектами внешней среды, а также закон изменения векторов положения этих объектов в системе координат рабочего инструмента являются необходимым инвариантом – паспортом требуемой операции, содержащим все данные для ее выполнения.

На втором этапе должно осуществляться управление реальным космическим роботом, локальная система управления которого должна отрабатывать программную траекторию, сформированную на первом этапе и переданную через канал связи в локальную систему управления роботом.

Таким образом, можно утверждать, что описанный метод организации дистанционного управления космическими роботами при наличии запаздывания передачи управляющих сигналов относится к классу методов, позволяющих осуществлять режим *offline* управления, предусматривающих сначала формирование плана, а потом его реализацию.

Заметим, что успешность их исполнения определяется качеством моделей внешней среды и самого робота, с помощью которых осуществляется процесс обучения. Очевидно, что программные траектории, полученные на основе неточной модели, породят ошибочное поведение робота, функционирующего в реальной внешней среде.

Предложенный подход предусматривает формирование сигнала коррекции программной траектории рабочего инструмента космического робота, который повышает вероятность успешного выполнения требуемой операции. Это выделяет его из класса традиционных подходов *offline* дистанционного управления [5].

Возможность коррекции программной траектории базируется на вышеприведенном утверждении о существовании паспорта выполняемой рабочим инструментом робота операции по взаимодействию его с объектами внешней среды. Паспорт является инвариантом операции, содержащим все необходимые данные для ее осуществления.

Таким образом, для успешной реализации рабочим инструментом операции по взаимодействию его с объектами внешней среды необходимо, чтобы взаимное положение рабочего инструмента и объекта в процессе выполнения операции, а также силы их взаимодействия были идентичны положению и силам в процессе обучения. Сигнал коррекции формируется в результате обработки дополнительной информации. Более детальный анализ получения дополнительной информации и формирования корректирующих сигналов приведен в работе [5].

Важно отметить, что модифицированный *offline*-метод дистанционного управления

сохраняет все преимущества немодифицированного метода, т.е. в значительной степени снимает ограничения по времени запаздывания, и в то же время имеет меньшую зависимость от качества модели внешней среды [5–6].

## **2. Динамический анализ процесса управления космическим роботом**

Для выяснения работоспособности предложенного подхода необходимо установить, удовлетворяет ли процесс управления требованиям устойчивости и транспарентности. Целесообразно рассмотреть случай реализации управления космическим роботом при использовании для обучения робота билатерально управляемой с помощью задающей рукоятки наземной модели робота, а также случай, когда для обучения наземная модель робота управляется с помощью оцувствленной перчатки.

Полезно также учесть особенности наземных моделей робота. Наиболее эффективна для реализации предлагаемого подхода так называемая "идеальная модель". В качестве нее может служить сам космический робот при условии компенсации действия на его подвижные элементы сил гравитации путем добавления в закон управления роботом дополнительного слагаемого, благодаря которому приводы робота формируют дополнительные силовые воздействия, уравновешивающие гравитационные.

Однако в ряде случаев использование в качестве модели реального робота невозможно, так как конструкция космического робота и его приводы не рассчитаны на функционирование в условиях гравитации. Это обычно используется для манипуляционных роботов больших размеров. Рациональным выходом из положения является создание виртуальной или, что лучше, так называемой *комбинированной модели робота*, включающей реальную и виртуальную части. В виде виртуальной части представляется исполнительный орган космического робота без рабочего инструмента на его конце. В качестве реальной части используется рабочий инструмент робота, а точнее его натурная модель.

Для приближения визуального представления комбинированной модели к представлению реального космического робота применяется технология дополненной реальности (*Augmented Reality*), когда реальный

объект – натурная модель рабочего инструмента – дополняется виртуальным объектом – частью исполнительного органа (манипулятором) без его рабочего инструмента.

### 2.1. Анализ процесса управления при использовании для обучения билатерально управляемой модели робота

Как уже было упомянуто выше, работоспособность предложенного подхода будет иметь место, если удовлетворяются требования устойчивости и транспарентности для билатерально управляемой от задающей рукоятки наземной модели робота, которую будем считать идеальной.

Что касается реального космического робота, то поскольку он непосредственно не управляется рукояткой, то достаточно установить лишь условия устойчивости его функционирования при отработке его системой управления программной траектории, переданной с наземного центра управления. Кроме того, желательно знать дополнительно качество переходного процесса, от которого зависит точность отработки программных траекторий.

Выяснение условий устойчивости [17–23] осуществляется для законов управления приводами задающей рукоятки и модели робота, при которых моделью робота, точнее, его рабочим инструментом отслеживается положение держателя задающей рукоятки с отражением на нем силы взаимодействия рабочего инструмента с моделями объектов внешней среды.

Эти законы имеют следующий вид:

– закон управления рукоятки

$$U^I = k(g^{II} - g^I) - k_V \dot{g}^I + D_g^I, \quad (1)$$

– закон управления моделью робота отличается только знаком пропорционального слагаемого:

$$U^{II} = -k(g^{II} - g^I) - k_V \dot{g}^{II} + D_g^{II}, \quad (2)$$

где  $g^I, g^{II}, \dot{g}^I$  и  $\dot{g}^{II}$  –  $n$ -мерные векторы управляемых обобщенных координат и их скорости,  $k$  – скалярная матрица,  $k_V$  – симметрическая положительно определенная матрица коэффициентов усиления,  $D_g^I, D_g^{II}$  – векторы уравновешивающих сил гравитации рукоятки и робота соответственно.

Динамическое описание системы "задающая рукоятка-модель робота" имеет вид, в котором индекс  $i=I$  соответствует описанию рукоятки, а  $i=II$  – модели робота:

$$A^i \ddot{q}^i + B^i \dot{q}^i + C^i q^i + D^i = \quad , \quad i=I, II, \quad (3)$$

$$= H^i U^i + Q^i + Q_R^i$$

$$A^i = \frac{\partial^2 T^i}{\partial (\dot{q}^i)^2},$$

$$B^i = \frac{\partial A^i}{\partial t} - \frac{1}{2} \left[ \frac{\partial (\dot{q}^i)^T A^i}{\partial q^i} \right] + k_F^i + k_V^i,$$

$$C^i q^i = -\frac{\partial \Pi^i}{\partial q^i}, \quad C^i = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & C_e^i \end{bmatrix},$$

$$H^i = \begin{bmatrix} E \\ 0 \end{bmatrix}, \quad (4)$$

где  $q^i = (g^i, e^i)$ ,  $\dot{q}^i = (\dot{g}^i, \dot{e}^i)$  –  $(n+m^i)$ -мерные векторы обобщенных координат рукоятки и модели робота, а также их скоростей,  $e^i$  –  $m^i$ -мерные векторы деформаций упругих элементов рукоятки и модели робота,  $A^i$  и  $C^i$  –  $(n+m^i) \times (n+m^i)$ -симметрические положительно определенные матрица инерции и полуопределенная матрица жесткости,  $C_e^i$  –  $(m^i \times m^i)$ -симметрические положительно определенные матрицы жесткости конструкции рукоятки и модели робота,  $D^i = (D_g^i, D_e^i)$  –  $(n+m^i)$ -мерный вектор обобщенных сил веса рукоятки и модели робота,  $Q_R^i$  –  $(n+m^i)$ -мерные векторы обобщенных реакций связей,  $Q^i$  –  $(n+m^i)$ -мерные векторы обобщенных возмущающих сил,  $H^i$  –  $(n+m^i) \times n$ -блочная матрица,  $k_{F_i}^i$  –  $(n+m^i) \times (n+m^i)$ -симметрические положительно определенные матрицы коэффициентов трения,  $E$  –  $n \times n$ -единичная матрица. При наличии голономных связей динамическое описание должно включать соответствующие уравнения связи:

$$M(X^{II}) = 0,$$

где  $X^{II} = f(q^{II})$  –  $n$ -мерный вектор положения рабочего инструмента модели робота в базовой (декартовой) системе координат,  $M(X^{II})$  –  $r$ -мерная непрерывно дифференцируемая вектор-функция  $r \leq 6$ .

Дифференциальная форма уравнений связи имеет вид  $\frac{\partial M}{\partial X^{II}} \dot{X}^{II} = 0$ , а в более удобной нормализованной форме:

$$p\dot{X}^{II} = pJ^{II}\dot{q}^{II} = 0, \quad (5)$$

где  $p = R^{-1}\partial M / \partial X^{II}$  –  $r \times n$ -нормализованная матрица связей,  $R = \text{diag}\{R_1, R_2, \dots, R_n\}$  – диагональная  $r \times r$ -матрица,  $R_j$  – эвклидова норма  $j$ -ой строки матрицы:  $\partial M / \partial q^{II}$ , –  $6 \times (n + m^{II})$  – матрица Якоби. Для малых приращений  $\Delta X^{II}, \Delta q^{II}$  уравнение, связывающее их, имеет форму, аналогичную (5):

$$p\Delta X^{II} = pJ^{II}\Delta q^{II} = 0. \quad (6)$$

Вектор  $\Delta X^{II}$  может быть представлен в виде суммы двух слагаемых:

$$\Delta X^I = \Delta X_g^{II} + \Delta X_e^{II} \quad (7)$$

где  $\Delta X_g^{II}$  –  $n$ -мерный вектор приращения, порождаемый приращением  $\Delta g^{II}$  вектора управляемых обобщенных координат, а  $\Delta X_e^{II}$  –  $m^{II}$ -мерный вектор приращения, порождаемый приращением  $\Delta e^{II}$  упругих деформаций конструкции.

С учетом (6) выражение (7) примет вид  $pJ^{II}\Delta q^{II} = pJ_g^{II}\Delta g + pJ_e^{II}\Delta e^{II} = 0$ ,

$$J^{II} = \begin{bmatrix} J_g^{II} \\ J_e^{II} \end{bmatrix} \quad (8)$$

где  $J_g^{II}$  и  $J_e^{II}$  –  $6 \times n$ -и  $6 \times m^{II}$ -блоки матрицы.

Очевидно, вектор  $Q_R^{II}$  обобщенных реакций связей, отнесенный к вектору  $q^{II}$  для модели робота, имеет следующее представление:  $Q_R^{II} = (Q_{Rg}^{II}, Q_{Re}^{II}) = (J^{II})^T p^T \lambda$ , где  $\lambda$  –  $r$ -мерный вектор – множитель Лагранжа,  $Q_{Rg}^{II}$  и  $Q_{Re}^{II}$  – векторы обобщенных реакций, отнесенные к векторам  $g^{II}$  и  $e^{II}$  соответственно. Они представляются как

$$Q_{Rg}^{II} = (J_g^{II})^T p^T \lambda \text{ и } Q_{Re}^{II} = (J_e^{II})^T p^T \lambda. \quad (9)$$

В отличие от модели манипулятора задающая рукоятка не имеет связей, поэтому у

уравнение (3) динамики для задающей рукоятки при  $i = I$  член  $Q_R^I = 0$ .

Однако вместо этого вектора сил реакции связей на рукоятку действует обобщенная возмущающая сила  $Q^I$ , создаваемая рукой человека, удерживающего рукоятку. Известно, что при удерживании рукой тела в заданных позиции и ориентации, характеризуемых вектором  $X_0^I$ , и при появлении внешнего возмущения рука развивает удерживающие усилие и момент, представляемые вектором  $G$  в системе координат тела. Этот вектор пропорционален вектору  $\Delta X$  малого отклонения вектора позиции и ориентации тела (в нашем случае конца последнего звена рукоятки) от вектора  $X_0^I$ , при котором усилия и момент нулевые, а также пропорционален вектору  $\dot{X}^I$  скорости этого отклонения.

В соответствии со сказанным  $G^I = -\bar{C}_Y \Delta X^I - \bar{K}_Y \dot{X}^I = -\bar{C}_Y J^I \Delta q^I - \bar{K}_Y J^I \dot{q}^I$ , где  $\Delta q^I = q^I - q_o^I$ , а  $\bar{C}_Y$  и  $\bar{K}_Y$  – диагональные положительно-определенные  $6 \times 6$ -матрицы "удержания",  $q_o^I$  – значение  $q^I$ , соответствующее  $X_o^I$ ,  $J^I$  – матрица Якоби связи  $\dot{X}^I$  с  $\dot{q}^I$ . Следовательно, вектор  $Q^I$  обобщенных возмущающих сил, отнесенный к вектору  $\Delta q^I$ , имеет вид

$$\begin{aligned} Q^I &= -(J^I)^T G^I = \\ &= -(J^I)^T \bar{C}_Y J^I \Delta q^I - (J^I)^T \bar{K}_Y J^I \dot{q}^I = \\ &= -C_Y \Delta q^I - K_Y \dot{q}^I, \end{aligned} \quad (10)$$

где  $C_Y = (J^I)^T \bar{C}_Y J^I$ ,  $K_Y = (J^I)^T \bar{K}_Y J^I$ .

Систему  $(n + m^{II})$  – уравнений (3) при  $i = II$  модели космического манипулятора возможно представить в более компактной форме путем исключения из нее  $r$ -мерного вектора  $\lambda$ , а также  $r$ -компонент вектора  $q^{II} = (g^{II}, e^{II})$  с помощью системы уравнений (5). Это представление имеет вид

$$\begin{aligned} W^T A^{II} W \ddot{q}^{II} + W^T B^{II} W \dot{q}^{II} + \\ + W^T C^{II} W \dot{q}^{II} = W^T H U^{II}, \end{aligned} \quad (11)$$

где  $\tilde{q}^{\text{II}} = (g^{n-r}, e^{\text{II}}) - (n + m^{\text{II}} - r)$  – вектор новых обобщенных координат,  $g^{n-r}$  – вектор последних  $(n-r)$  компонент вектора  $g^{\text{II}}$ ,  $W - (n + m^{\text{II}})(n + m^{\text{II}} - r)$ -матрица связи векторов новых  $\tilde{q}$  и старых  $\dot{q}$  обобщенных скоростей ( $\dot{q} = W\tilde{q}$ ).

## 2.2. Условия устойчивости процесса управления

Для выяснения условий устойчивости процесса, описываемого полученной системой дифференциальных уравнений (3), от которой зависит работоспособность рассматриваемого средства обучения, введем новые переменные  $\Delta^{\text{I}} = q^{\text{I}} - q_o^{\text{I}}$ ,  $\Delta^{\text{II}} = \tilde{q}^{\text{II}} - \tilde{q}_o^{\text{II}}$ , являющиеся отклонениями векторов  $q^{\text{I}}$  и  $\tilde{q}^{\text{II}}$  от равновесных состояний  $q_o^{\text{I}}$  и  $\tilde{q}_o^{\text{II}}$  при  $\dot{q}_o^{\text{I}} = 0$  и  $\dot{\tilde{q}}_o^{\text{II}} = 0$ , и линеаризируем в окрестности этих состояний систему (3), предварительно заменив в ней  $U^{\text{I}}$  и  $U^{\text{II}}$  их значениями (2.1) и (2.2) и учтя, что  $\dot{g}^i = (H^i)^{\text{T}} \dot{q}^i$ ,  $\dot{q}^i = W\tilde{q}^i$ ,  $i = \text{I}, \text{II}$ .

В результате найдем выражение, объединяющее системы для модели робота и рукоятки в одну систему:

$$A_0 \ddot{\Delta} + B_0 \dot{\Delta} + C_0 \Delta = 0, \quad (12)$$

где  $\Delta = (\Delta^{\text{I}}, \Delta^{\text{II}}) - (2n + m^{\text{I}} + m^{\text{II}} - r)$ -мерный вектор отклонений:

$$A_0 = \begin{bmatrix} A^{\text{I}} & 0 \\ 0 & W^{\text{T}} A^{\text{II}} W \end{bmatrix}, \quad B_0 = \begin{bmatrix} B^{\text{I}} & 0 \\ 0 & W^{\text{T}} B^{\text{II}} W \end{bmatrix},$$

$$C_0 = \begin{bmatrix} C_0^a & C_0^b \\ (C_0^b)^{\text{T}} & C_0^d \end{bmatrix},$$

$$C_0^a = C_k^i + N^{\text{I}} + C_Y,$$

$$C_0^b = -H^{\text{I}} k (H^{\text{II}})^{\text{T}} W, \quad C_0^d = W^{\text{T}} (C_k^{\text{II}} + N^{\text{II}}) W,$$

$$C_k^i = \begin{bmatrix} k & 0 \\ 0 & C_e^i \end{bmatrix}, \quad N^i = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & \partial D_e^i / \partial q^i \end{bmatrix},$$

где  $A_0, B_0, C_0 -$

$(2n + m^{\text{I}} + m^{\text{II}} - r) \times (2n + m^{\text{I}} + m^{\text{II}} - r)$ -симметрические положительно определенные блочные матрицы.

Симметричность этих матриц следует из их структуры. Положительная определен-

ность матриц  $A_0$  и  $B_0$  обусловлена положительной определенностью входящих в нее блоков  $A^{\text{I}}, A^{\text{II}}$ , а также  $B^{\text{I}}$  и  $B^{\text{II}}$ , которые при  $\dot{q}^{\text{I}} = 0$ ,  $\dot{q}^{\text{II}} = 0$  в соответствии с (2.4) для  $B^i$  обращаются в симметрическую положительно определенную матрицу  $k_V^i + k_F^i$ ,  $i = \text{I}, \text{II}$ ; симметричность и положительная определенность  $(n + m^{\text{I}} - r) \times (n + m^{\text{II}} - r)$ -блоков  $W^{\text{T}} A^{\text{II}} W$  и  $W^{\text{T}} B^{\text{II}} W$  вытекает из их структуры. Положительная определенность и симметричность  $C_0$  обусловлена следующим утверждением: блоки этой матрицы  $C_0^a$  и  $C_0^d$  симметричны и положительно определены из-за положительной определенности и симметричности образующих ее матриц  $C_k^i, C_Y, C_e^i, k$ , а также относительной малости симметричной матрицы  $N^i \ll C_k^i$ . Тогда определитель  $C_0$ , который можно представить в виде

$$|C_0| = |C_0^a| |C_0^d - (C_0^b)^{\text{T}} (C_0^a)^{-1} C_0^b|,$$

в случае  $C_Y \ll C_e^{\text{II}}$  положителен, как и все остальные определители главных миноров этой матрицы.

Действительно, с учетом представлений для  $C_0^a, C_0^b, C_0^d$ , полагая, что конструкция задающей рукоятки и механической руки идентичны, т.е.

$$N^{\text{I}} = N^{\text{II}} = N, \quad H^{\text{I}} = H^{\text{II}} = H, \quad D^{\text{I}} = D^{\text{II}} = D,$$

$$C_e^{\text{I}} = C_e^{\text{II}} = C_e, \quad C_k^{\text{I}} = C_k^{\text{II}} = C_k,$$

получим

$$|C_0| = |\tilde{C} + C_Y| |W^{\text{T}} \{ \tilde{C} - \tilde{K} (\tilde{C} + C_Y)^{-1} \tilde{K} \} W|,$$

где

$$\tilde{C} = C_k + N = \begin{bmatrix} k & 0 \\ 0 & C_e + \partial D_e^i / \partial q^i \end{bmatrix};$$

$$\tilde{K} = H k H^{\text{T}} = \begin{bmatrix} k & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}.$$

Принимая во внимание диагональность положительно-определенной матрицы

$$C_k^i = \begin{bmatrix} C_{Yg} & 0 \\ 0 & C_{Ye} \end{bmatrix},$$

где  $C_{Yg}$ ,  $C_{Ye}$  -  $n \times n$ ,  $m \times m$ -диагональные блоки, раскроем вышеприведенное выражение для  $|C_0|$ :

$$|C_0| = \left| \tilde{C} + C_Y \right| \times \left| W^T \begin{bmatrix} k - K(K + C_{Yg})^{-1}K & 0 \\ 0 & C_e + \frac{\partial D_e^i}{\partial q^i} \end{bmatrix} W \right|.$$

Нетрудно показать, что при положительной определенности и симметричности  $A_0$ ,  $B_0$ ,  $C_0$  и использовании в качестве функции Ляпунова положительно-определенной квадратической функции  $0,5(\dot{\Delta}^T A_0 \dot{\Delta} + \Delta^T C_0 \Delta)$  производная по времени этой величины в силу системы уравнений (12) оказывается равной  $-\dot{\Delta}^T B_0 \dot{\Delta}$ , т.е. отрицательно определенной функцией. А значит, динамический процесс, описываемый системой (3) и (11), является асимптотически устойчивым.

Для выяснения транспарентности рассмотрим первые  $n$  уравнений системы уравнений (3) при  $i = \Pi$ , описывающей динамику поведения модели робота, а также при  $i = I$ , представляющей динамическое описание рукоятки. Замена в (3) при  $i = I$  вектора  $U^{\Pi}$  его выражением (2) приводит к следующему равенству в стационарном режиме:

$$Q_{Rg}^{\Pi} = (J_g^{\Pi})^T p^T \lambda = -K(g^I - g^{\Pi}),$$

где  $Q_{Rg}^{\Pi}$  -  $n$ -мерный вектор обобщенных сил, отнесенный к вектору  $g$ , действующий на схват модели робота. Замена в (3) при  $i = I$  вектора  $U^I$  его выражением (1), приводит в стационарном режиме к равенству  $Q_{Rg}^I = -K(q^I - q^{\Pi})$ .

Таким образом, в стационарном режиме  $Q_{Rg}^{\Pi} = Q_{Rg}^I$ , а значит, условие транспарентности выполняется. В нестационарном режиме указанные величины отличаются друг от друга на величину динамической составляющей, равной  $A_g^I \ddot{q}^I + B_g^I \dot{q}^I + A_g^{\Pi} \ddot{q}^{\Pi} + B_g^{\Pi} \dot{q}^{\Pi}$ ,

где  $A_g^I, B_g^I, A_g^{\Pi}, B_g^{\Pi}$  - блоки, составленные из  $n$  первых строк матриц  $A^I, B^I, A^{\Pi}, B^{\Pi}$ .

Устойчивость поведения самого космического робота также имеет место.

Действительно, описание динамики его поведения идентично описанию динамики поведения его модели (11), при  $i = \Pi$  [ ].

### Заключение

В статье обосновывается метод копирующего управления космическим роботом с задержкой в передаче сигнала. Он позволяет решить задачу управления при больших запаздываниях в передаче управляющих сигналов с наземного центра управления роботом в его локальную систему управления. Причем величина запаздывания может меняться, что характерно, в частности, для случаев, когда передача сигналов осуществляется с помощью интернета. В отличие от известных подходов рассматриваемый подход предполагает разбиение процесса управления на два этапа:

- 1) на этапе обучения требуемому действию управление осуществляется на модели робота,
- 2) этап исполнения этого действия реальным космическим роботом.

Способ обучения с применением билатерально управляемой модели космического робота, с помощью которой осуществляется обучение, сводится к выполнению оператором требуемой операции. Показана работоспособность этого способа обучения. Однако необходимы многосторонние экспериментальные исследования, чтобы окончательно убедиться в этом. Начальная стадия этих исследований уже была проведена. Она дала положительные результаты, касающиеся экспериментального подтверждения устойчивости и транспарентности процесса обучения робота с помощью билатерально управляемой его модели. В частности, показала целесообразность использования предложенного подхода при выполнении роботом достаточно сложных действий.

Однако наиболее перспективная стратегия, которая по мере накопления опыта дистанционного управления космическим роботом будет применяться в будущем, предполагает применение специального языка взаимодействия человека с роботом.

### Список литературы

1. *Hokayem P., Spong M.* Bilateral Teleoperation: An Historical Survey // *Automatica*. 2006. Vol. 42. P. 2035–2057.
2. *Fite K., Goldfarb M., Rubio A.* Transparent Telemanipulation in the Presence of Time Delay // *Proc. IEEE/ASME Intern. Conf. on Advanced Intelligent Mechatronics 1*. Port Island, Kobe, Japan. 2003. P. 254–259.
3. *Park J., Cho H.* Sliding-mode Control of Bilateral Teleoperation Systems with Force-reflection on the Internet // *Proc. IEEE/RSJ Intern. Conf. on Intelligent Robots and System*. Takamatsu, Japan. 2000. Vol. 2. P. 1187–1192.
4. *Garcia-Valdovinos L., Parra-Vega V., Artega M.* Observer-based Higher-order Sliding Mode Impedance Control of Bilateral Teleoperation Under Constant Unknown Time Delay // *Intelligent Robots and Systems, IEEE/RSJ Intern. Conf.* Beijing, China. 2006. P. 1692–1699.
5. *Кулаков Ф.М., Соколов Б.В., Алфёров Г.В., Ефимова П.А.* Дистанционное управление космическими роботами с адаптацией к изменениям его внешней среды // *Вестник Пермского университета. Математика. Механика. Информатика*. 2018. № 4(43). С. 16–26.
6. *Кулаков Ф.М.* Методы супервизорного телеуправления космическими роботами // *Известия РАН. Теория и системы управления*. 2018. № 5. С. 161–181.
7. *Kulakov F., Alferov G.V., Efimova P., Chernakova S., Shymanchuk D.* Modeling and Control of Robot Manipulators with the Constraints at the Moving Objects // *Intern. Conf. "Stability and Control Processes" in Memory of V.I. Zubov (SCP)*, St. Petersburg, 2015. P. 102–105.
8. *Alferov G.V., Malafeyev O.A.* The Robot Control Strategy in Domain with Dynamical Obstacles // *Lecture Notes in Computer Science*. 1996. Vol. 1093. P. 211–217.
9. *Kulakov F., Alferov G., Efimova P.* Methods of Remote Control over Space Robots // *Intern. Conf. on Mechanics–Seventh Polyakhov's Reading*, St. Petersburg, 2015. P. 7106742.
10. *Kulakov F., Alferov G., Sokolov B., Gorovenko P., Sharlay A.* Dynamic analysis of space robot remote control system // *AIP Conference Proceedings*. 2018. Vol. 1959. P. 080014.
11. *Kulakov F., Sokolov B., Shalyto A., Alferov G.* Robot Master Slave and Supervisory Control with Large Time Delays of Control Signals and Feedback // *Applied Mathematical Sciences*. 2016. Vol. 10(33-36). P. 1783–1796.
12. *Kulakov F., Kadry S., Alferov G., Sharlay A.* Bilateral Remote Control over Space Manipulators (2018) // *AIP Conference Proceedings*, Vol. 2040. P. 150015.
13. *Кулаков Ф.М., Шмыров А.С., Шиманчук Д.В.* Методы управления движением космического робота в окрестности точек либрации // XII всерос. совещ. по проблемам управления ВСПУ–2014. М.: ИПУ им. В.А. Трапезникова РАН, 2014. С. 3792–3801.
14. *Кулаков Ф.М., Шмыров А.С., Шиманчук Д.В.* Управление космическим роботом с использованием неустойчивой точки либрации // *Мехатроника, автоматизация, управление*. 2014. № 7. С. 23–28.
15. *Malafeev O., Alferov G., Andreyeva M.* Group strategy of robots in game-theoretic model of interception with incomplete information // (2015) 2015 International Conference on Mechanics – Seventh Polyakhov's Reading. P. 7106751.
16. *Alferov G.V., Malafeyev O.A., Maltseva A.S.* Programming the robot in tasks of inspection and interception // (2015) 2015 International Conference on Mechanics – Seventh Polyakhov's Reading. P. 7106713.
17. *Ivanov G., Alferov G., Sharlay A., Efimova P.* Conditions of asymptotic stability for linear homogeneous switched systems // (2017) *AIP Conference Proceedings*, 1863. P. 080002.
18. *Alferov G., Ivanov G., Efimova P., Sharlay A.* Study on the structure of limit invariant sets of stationary control systems with non-linearity of hysteresis type // (2017) *AIP Conference Proceedings*, 1863. P. 080003.
19. *Alferov G.V., Ivanov G.G., Efimova P.A., Sharlay A.S.* Stability of linear system with multitask right-hand member // (2018) *Stochastic Methods for Estimation and Problem Solving in Engineering*. P. 74–112.
20. *Kadry S., Alferov G., Ivanov G., Sharlay A.* About stability of selector linear differential inclusions // (2018) *AIP Conference Proceedings*, 2040. P. 150013.
21. *Kadry S., Alferov G., Ivanov G., Sharlay A.* Stabilization of the program motion of control



- object with elastically connected elements // (2018) AIP Conference Proceedings, 2040. P. 150014.
22. *Kulakov F.M., Kadry S., Alferov G.V., Efimova P.A.* Remote Control of Space Robots Change-Adaptive in its External Environment // (2019) International Journal of Online and Biomedical Engineering, 2019. Vol. 15, № 7. P. 84–98.
23. *Alferov G.V., Ivanov G.G., Efimova P.A.* The structural study of limited invariant sets of relay stabilized systems // (2017) Mechanical systems: Research, Applications and Technology. P. 101–104.
24. *Pichugin Y., Alferov G., Malafeyev O.* Parameters estimation in mechanism design // (2016) Contemporary Engineering Sciences, 9 (1–4). P. 175–185.
25. *Malafeyev O.A., Neverova E.G., Nemnyugin S.A., Alferov G.V.* Multi-criteria model of laser radiation control // (2014) 2014 2<sup>nd</sup> International Conference or Emission Electronics, ICEE 2014, IVESC 2014, ICCTPEA 2014, BDO 2014 – Proceedings. P. 6893966.
26. *Seifedine Kadry, Alferov G., Kondratyuk A., Kurochkin V., Zhao S.* Modeling the motion of a space manipulation robot using position control // (2019) AIP Conference Proceedings.

## **Copying control of remote robots with delay in signal transmission**

**F. M. Kulakov, G. V. Alferov, P. A. Efimova**

Saint Petersburg State University; 35, Universitetsky prospekt, Peterhof, St. Petersburg, 198504, Russia  
kufelix@yandex.ru; +7-906-244-82-16

The paper describes the method of copying control over remote robots operating in non-deterministic external environment in the event of a delay in the transmission of control signals. The method is based on the use of the passport of the operation performed to provide interaction of a robot's working tool with the objects of the external environment.

**Keywords:** *copying control; remote control; bilateral control; adaptive control; stability of control processes.*