



6. Lockett D. J. Statistical Inference Based on Upper Record Values. PhD thesis. The College of William and Mary, 2013.
7. Nevzorov V. B., Stepanov A. Records with confirmation // Statistics & Probability Letters. 2014. № 95. P. 39–47.
8. Ross S. M. Simulation. Elsevier, 2006.
9. Stepanov A., Berred A., Nevzorov V. B. Concomitants of records: Limit results, generation techniques, correlation // Statistics & Probability Letters. 2016. № 109. P. 184–188.

#### Об авторах

Артем Игоревич Пахтеев – асп., Балтийский федеральный университет им. И. Канта, Калининград.  
E-mail: mir123i3@gmail.com

Алексей Васильевич Степанов – д-р физ.-мат. наук, проф., Балтийский федеральный университет им. И. Канта, Калининград.  
E-mail: alexeistep45@mail.ru

#### About the authors

Artem Pakhteev – PhD Student, I. Kant Baltic Federal University, Kaliningrad.  
E-mail: mir123i3@gmail.com

Prof. Alexei Stepanov – I. Kant Baltic Federal University, Kaliningrad.  
E-mail: alexeistep45@mail.ru

УДК 681.587.73, 62-523.8

### С. А. Норсеев

#### ЭЛЕМЕНТЫ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ РОБОТОМ АНТРОПОМОРФНОГО ТИПА ДЛЯ РАБОТЫ НА МКС

*Разрабатываются и улучшаются алгоритмы и методы управления роботами, занимающимися выполнением штатных технологических операций на борту международной космической станции.*

*The article is devoted to the development and improvement of algorithms and robot control methods, staff involved in the implementation of technological operations on board the International Space Station.*

**Ключевые слова:** робот антропоморфного типа, групповое управление роботами, международная космическая станция, назначение, столкновение.

**Keywords:** anthropomorphic robot type, robot group control, the International Space Station, destination, collision.



## Введение

Для выполнения различных технологических операций в открытом космосе в районе международной космической станции (МКС) (или иных космических объектов на иных орбитах) и на поверхности Луны разрабатывается робот антропоморфного типа (РАТ) [1]. Система управления этим роботом предполагает супервизорное управление в копирующем режиме с элементами самостоятельного автономного управления при выполнении типовых сценариев и действий по предотвращению столкновений с элементами МКС и другими РАТ. Для этих целей РАТ оснащен видеодатчиком [2]. Для реализации взаимодействия с другими РАТ, участвующими в работах и меняющими свое местоположение, разрабатывается соответствующий фрагмент системы управления. Ниже представляются некоторые результаты разработки элементов математической модели системы управления РАТ в части учета взаимодействия с другими РАТ.

### Задача группового управления в общем виде

Задача группового управления роботами в общем виде формулируется следующим образом [3]. Пусть некоторая группа  $\mathfrak{R}$ , состоящая из  $N$  РАТ  $R_j$ ,  $j = \overline{1, N}$ , функционирует в некоторой среде  $E$ . Состояние каждого РАТ  $R_j \in \mathfrak{R}$ ,  $j = \overline{1, N}$ , в момент времени  $t$  описывается вектор-функцией

$$r_j(t) = [r_{j,1}(t), r_{j,2}(t), \dots, r_{j,h}(t)]^T.$$

Состояние группы РАТ  $\mathfrak{R}$  задается вектором

$$\mathfrak{R}(t) = [r_1(t), r_2(t), \dots, r_N(t)]^m.$$

Состояние среды вокруг  $j$ -го РАТ  $e_j$  в момент времени  $t$  описывается вектором

$$e_j = [e_{1,j}(t), e_{2,j}(t), \dots, e_{w,j}(t)]^m.$$

Тогда состояние среды, в которой функционируют РАТ рассматриваемой группы в момент времени  $t$ , описывается вектором

$$e(t) = [e_1(t), e_2(t), \dots, e_N(t)]^m.$$

Под *переменными состояниями*  $r_j(t)$ ,  $j = \overline{1, h}$ , РАТ обычно понимают, например, координаты его положения в среде  $E$ , линейные и угловые скорости, ориентация в пространстве и т. д. в момент времени  $t$ . Под *переменными состояниями*  $e_{i,j}(t)$ ,  $i = \overline{1, w}$ , среды вокруг  $j$ -го РАТ, в свою очередь, подразумевают, например, координаты расположения объектов среды (элементы МКС, комический мусор, используемый инструментарий и др.), а также другие переменные, характеризующие состояние этих объектов в момент времени  $t$ .



РАТ и среда, взаимодействуя друг с другом, образуют систему «группа РАТ – среда», под *состоянием* которой в момент времени  $t$  понимается состояние описываемой парой  $s_c = \langle \mathfrak{R}, e \rangle$ . Множество различных состояний системы «группа РАТ – среда» описывается точками  $N(h+w)$ -мерного пространства состояний  $\{s_c\}$ . Под *начальным* и *конечным (целевым) состоянием* системы «группа РАТ – среда» имеются в виду состояния

$$s_c^0 = \langle \mathfrak{R}^0, e^0 \rangle, \quad s_c^f = \langle \mathfrak{R}^f, e^f \rangle$$

соответственно.

Состояние системы «группа роботов – среда»  $s_c^i = \langle \mathfrak{R}^i, e^i \rangle$  в текущий момент времени называется *текущим*.

Каждый РАТ  $R_j, j = \overline{1, N}$ , может выполнять действия, описываемые вектором

$$a_j(t) = [a_{1,j}(t), a_{2,j}(t), \dots, a_{m,j}(t)]^m,$$

причем множество действий, которые может выполнять РАТ,  $R_j \in \mathfrak{R} - \{a\}_j$ . Множество действий, которые может выполнять группа РАТ, есть объединение множеств действий отдельных РАТ:

$$\{a_c\} = \{a\}_1 \cup \{a\}_2 \cup \dots \cup \{a\}_N.$$

Действия, выполняемые группой РАТ в момент времени  $t$ , могут быть описаны с помощью вектор-функции

$$a_c(t) = [a_1(t), a_2(t), \dots, a_N(t)]^m.$$

Изменения состояния системы «группа роботов – среда» описываются системой дифференциальных уравнений вида

$$\dot{s}_c = f_c(s_c(t), a_c(t)). \quad (1)$$

При этом на ситуации, а также на действия РАТ группы могут накладываться некоторые ограничения:

$$S_c(t) \in \{s_c^p(t)\} \subset \{s_c\}, \quad a_c(t) \in \{a_c^p(t)\} \subset \{a_c\}, \quad (2)$$

где  $\{s_c^p(t)\}$  – множество допустимых в момент времени  $t$  состояний системы «группа РАТ – среда»;  $\{a_c^p(t)\}$  – множество допустимых в момент времени  $t$  действий группы РАТ.

С учетом введенных выше обозначений задача группового управления РАТ заключается в определении на интервале  $[t_0, t_f]$  таких оптимальных действий  $a_j(t)$  для каждого РАТ  $R_j \in \mathfrak{R}$ , которые переводят систему «группа РАТ – среда» из начального состояния в конечное (целевое) и при которых удовлетворяются система связей (1), ограничения (2), а также обеспечивается экстремум функционала

$$Y_c = \int_{t_0}^{t_f} F(s_c(t), a_c(t), t) dt = \int_{t_0}^{t_f} F(r_1(t), r_2(t), \dots, r_N(t), e(t), a_1(t), a_2(t), \dots, a_N(t), t) dt, \quad (3)$$

задающего цель функционирования группы РАТ и оценивающего качество процесса управления.



Задача выбора действий, наиболее эффективных в контексте решения общей задачи  $A$ , сводится к поиску экстремума функционала (3) на множестве допустимых в момент времени  $t$  действий. Следует понимать, что данная задача оптимизации является многокритериальной. При принятии решения РАТ нужно учитывать такие факторы, как свое текущее положение, положение других РАТ группы, положение объектов среды и многие другие факторы.

Помимо этого множество допустимых действий далеко не всегда является конечным множеством. Например, при выборе действий РАТ должен принимать решение о том, в каком направлении двигаться (поворачиваться) и с какой скоростью. Поэтому имеет место задача многокритериальной оптимизации функционала (3) по всем переменным состояниям  $r_i(t)$  каждого РАТ группы  $\square$ .

### Задача о назначениях

Пусть имеется множество задач  $W$ . Каждая задача описывается вектором

$$w_i = [x, y, z, a_1, a_2, a_3, \dots, a_m, p, tr],$$

где  $x, y, z$  – координаты необходимого размещения РАТ для решения задачи;  $a_1, a_2, a_3, \dots, a_m$  – порядок действий, которые нужно выполнить для решения задачи;  $p$  – относительная важность задачи;  $tr$  – сложность задачи.

Для того чтобы отдельный РАТ мог выполнить данную задачу, он, во-первых, должен иметь возможность достичь точки  $(x, y, z)$ , во-вторых, множество допустимых для него действий  $a_j$  должно включать все действия, входящие в вектор описания задачи.

В силу различного текущего положения и функциональных возможностей различные РАТ группы имеют различную способность выполнить эту задачу в ее полном объеме. Способность  $i$ -го РАТ выполнить задачу  $w_j, w_j \in W$ , описывается функцией  $\omega(r_i, w_j, t)$ .

Множество РАТ группы, множество задач  $W$  и функция  $\omega(r_i, w_j, t)$  образуют задачу о назначениях. Для ее решения известно несколько алгоритмов (например, алгоритм последовательного выбора, аукциона).

### Идентификация столкновений

При выполнении задачи каждый РАТ должен следить за положением других участников группы и внешних объектов. Это необходимо для предотвращения столкновений между ними. Для своевременного обнаружения возможных столкновений предлагается метод, основанный на решении системы неравенств

$$\begin{cases} \min |x_i(t) - x_j(t)| < X_{\min}, \\ \min |y_i(t) - y_j(t)| < Y_{\min}, \\ \min |z_i(t) - z_j(t)| < Z_{\min}, \end{cases}$$

где  $x_i(t), y_i(t), z_i(t), x_j(t), y_j(t)$  и  $z_j(t)$  – функции, задающие пространственные координаты  $i$ -го и  $j$ -го объекта в момент  $t$ ;  $X_{\min}, Y_{\min}$  и  $Z_{\min}$  – мини-



мальное предельно допустимое расстояние между двумя объектами по осям координат  $X$ ,  $Y$  и  $Z$  соответственно; функция  $\min$  вычисляет минимальное расстояние между объектами с учетом их габаритов.

В роли объектов могут выступать РАТ, вспомогательное оборудование, инструментарий и др. Поскольку размеры МКС много больше размеров любого РАТ предлагается рассматривать ее в виде множества связанных объектов (таких, как противометеоритная панель, модуль «Звезда», малые исследовательские модули и др.). Если система неравенств имеет хотя бы одно решение, значит, велика вероятность столкновения между объектами. На основе этого каждый РАТ группы должен проверять ее решаемость для всех объектов, участвующих в работе помимо него самого. Если имеется решение, то он должен предпринять соответствующие действия для недопущения столкновения.

### Заключение

Предлагаемые математические модели позволяют реализовать управление одиночным РАТ в условиях его взаимодействия с другими членами группы. Они не дают полной математической модели всего РАТ, поскольку не учитывают таких факторов, как терморегулирование, реализация схвата, технические аспекты перемещения в условиях невесомости и т. д.

Тем не менее они прокладывают путь к групповому применению РАТ для выполнения различных технологических операций в открытом космосе в районе МКС (или иных космических объектов на иных орбитах) и на поверхности Луны.

*Данная работа выполняется за счет средств субсидии федерального бюджета по теме «Разработка основных функциональных и мехатронных систем роботов для космического и напланетного использования», уникальный идентификатор ПНИЭР RFMEFI57815X0141.*

### Список литературы

1. Saprykin O., Baksheeva E., Safronov V., Tolstel O. About the concept of using anthropomorphic robots during human exploration of the Moon // ARPJ Journal of Engineering and Applied Sciences. 2016. Vol. 11, № 16.
2. Богданов А. А., Кутлубаев И. М., Новосельцев Н. В. и др. Разработка систем робота для космического использования // Космонавтика XXI века : тр. науч.-практ. конф. М., 2016 (в печати).
3. Каляев И. А., Гайдук А. Р., Капустян С. Г. Модели и алгоритмы коллективного управления в группах роботов. М., 2009.

### Об авторе

Сергей Александрович Норсеев — инженер-программист, АО «ВНИИ «Сигнал», Ковров.

E-mail: norseev@gmail.com

### About the author

Sergey Norseev — Software Engineer, joint-stock company AO "VNII "Signal", Kovrov.

E-mail: norseev@gmail.com