

## Графическая трехмерная интерпретация телеметрии манипуляторов

© Н.В. Котюженко, Л.А. Савин

РКК «Энергия» им. академика С.П. Королёва, г. Королёв, 141070, Россия

*Предложен вариант использования телеметрической информации, поступающей в ЦУП в режиме реального времени, для определения пространственной формы манипуляторов и положения их относительно конструкции Международной космической станции и для отображения полученных данных в виде трехмерной картинки, соответствующей текущему состоянию реальных манипуляторов и станции. Данная идея отвечает современной тенденции замены или дополнения графическими образами традиционного символьного представления обработанной телеметрии. В основу приведенного в статье алгоритма положен метод преобразования координат Денавита — Хартенберга. Даны основные геометрические и алгебраические выкладки, необходимые для реализации указанного метода в описываемом приложении, и рассмотрены конструктивные особенности манипуляторов Международной космической станции, без учета которых графическая интерпретация телеметрии не будет соответствовать реальному состоянию контролируемых изделий.*

**Ключевые слова:** Международная космическая станция, манипулятор, телеметрическая информация, трехмерная визуализация.

**Введение.** Поступающая с борта космического аппарата телеметрическая информация подвергается в Центре управления полетом (ЦУП) многоэтапному технологическому процессу, включающему такие операции, как селекция полезного сигнала, отсекаание избыточной информации, интерпретация и тарировка данных и др. На выходе получают сортированные, систематизированные и формализованные данные, которые структурированы в виде таблиц и выведены на экраны операторов в буквенно-цифровом формате. Это наиболее распространенное представление обработанной телеметрической информации. Оценка и анализ данных, представленных в таком виде, требуют от оператора должного уровня сосредоточенности и внимательности. Очевидно, что чем больше отображаемых на экране параметров и, соответственно, отображаемых цифр, букв и символов, тем выше вероятность неполного или ошибочного восприятия информации. Снизить эту вероятность позволяет замена или дополнение символов *графическими образами*.

Самый простой вариант — окрашивание различных буквенно-цифровых значений телеметрических параметров в разные цвета (или изменение их яркости). Другой вариант — дополнение или замена

цифровых величин графическими фигурами различного вида. На рис. 1 приведен пример использования обоих указанных вариантов.

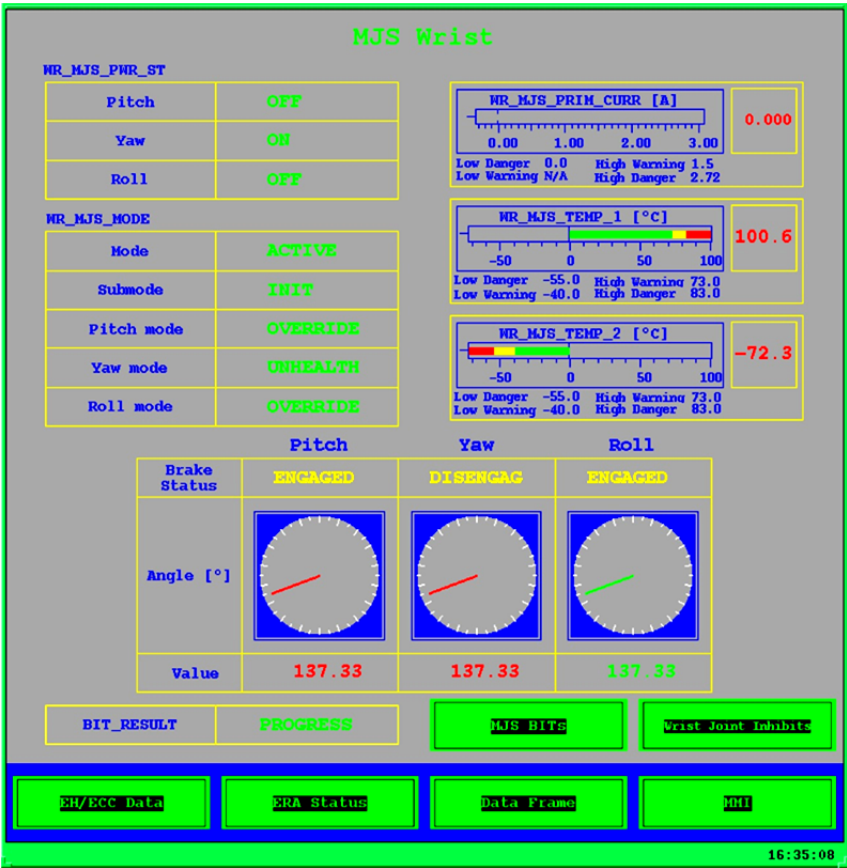


Рис. 1. Пример дополнения телеметрической информации графическими элементами

Показан экран, содержащий телеметрическую информацию о состоянии блока шарниров кисти манипулятора ERA (European Robotic Arm — европейский роботизированный манипулятор) [1]. Значения силы тока и температур в приводах представлены в цифровом виде и в виде полос, изменяющих свои длину и направление в соответствии со значением и знаком контролируемого параметра. Цифры изменяют свой цвет в зависимости от достижения критических лимитов: зеленый — в пределах нормы, желтый — выше нормы, но ниже предельно допустимого, красный — выход за допустимый предел. Аналогично и полосы имеют участки разного цвета, определяющие допустимые и опасные пределы. Углы поворота в шарнирах приведены в цифровом виде и в виде круговых шкал. Углы поворота также имеют цветовую окраску в соответствии с заданными эксплуатационными лимитами.

Следует обратить внимание на то, что в описанном примере оператору выдаются не только телеметрические данные, но и дополнительная информация, необходимая для оценки и анализа телеметрии. Оператору не нужно помнить или искать в эксплуатационных инструкциях значения критических лимитов, они заложены в цветовой окраске цифр/букв и графических элементов.

Аналогичный дополнительный информационный сервис предоставляют оператору *мнемосхемы*. На мнемосхеме выводится, как правило, статичная схема контролируемого изделия, а на схеме — телеметрические данные, информирующие о функционировании изделия в реальном масштабе времени. При этом данные размещают на мнемосхеме приблизительно в тех местах, где на реальном изделии расположены телеметрические датчики или блоки (узлы) изделия, содержащие наборы датчиков. Пример подобной мнемосхемы приведен на рис. 2. Показан экран, содержащий обобщенную информацию о состоянии подсистем манипулятора ERA [1]. Общие для всего манипулятора телеметрические данные вынесены в верхнюю и нижнюю части экрана, а данные, относящиеся к отдельным подсистемам, расположены на схеме рядом с изображением соответствующих подсистем.

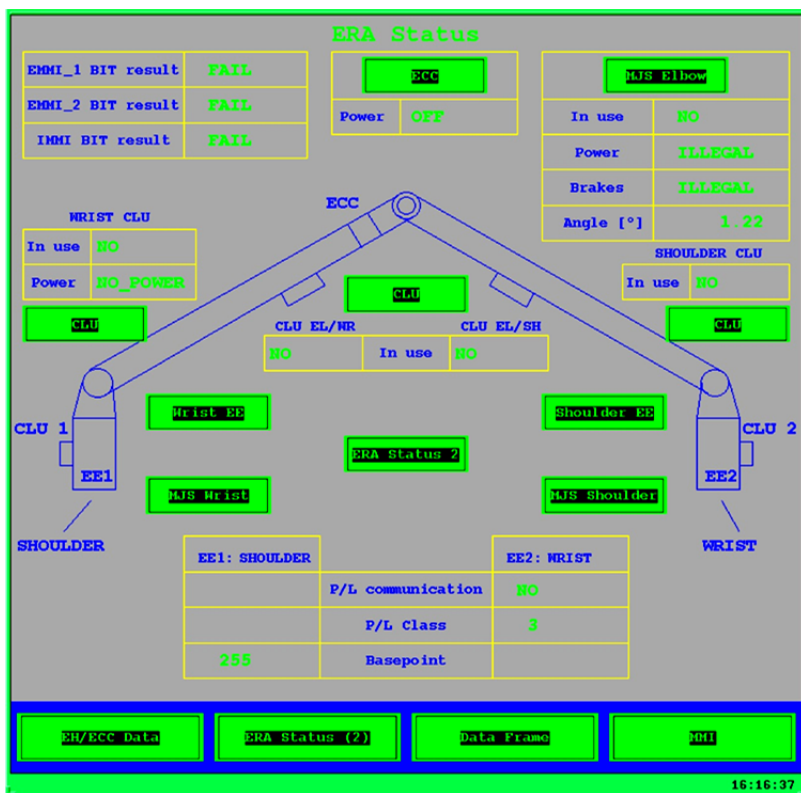


Рис. 2. Пример отображения телеметрической информации в формате мнемосхемы

Последнее время внедряются мнемосхемы, содержащие «нестатичные» рисунки. Для примера можно предложить мнемосхему шлюзовой камеры. На схеме подвижные элементы камеры могут изображаться в одном из возможных положений, например: внешняя крышка — открыта или закрыта; платформа перемещения полезного груза — втянута внутрь станции, в промежуточном положении или выдвинута в открытый космос. При этом положение подвижных элементов на схеме определяется на основании телеметрических данных.

**Предлагаемый вариант графической интерпретации телеметрии.** Переход мнемосхем от статичной к динамически изменяемой графике подтолкнул авторов статьи к мысли о создании более сложного варианта графической интерпретации телеметрии. В предлагаемом варианте информацией, выводимой на экран, является *трехмерное изображение манипулятора и станции*, а исходными данными для построения изображения — модели станции и манипулятора в формате 3D и телеметрическая информация о функционировании манипулятора. По информации датчиков углового положения, расположенных в шарнирах манипулятора, определяют координаты звеньев манипулятора в базовой системе координат станции. Модели звеньев в формате 3D располагают относительно 3D-модели станции в соответствии с вычисленными координатами. В итоге пространственная форма виртуального манипулятора и его положение по отношению к поверхности виртуальной станции в идеальном случае будут в точности соответствовать пространственной форме и положению реального изделия относительно реальной станции. Однако на практике на точность виртуальной модели оказывают влияние следующие факторы:

- погрешности измерений датчиков углового положения в шарнирах;
- аналогово-цифровое преобразование сигнала датчика для передачи данного сигнала в составе кодовой телеметрии;
- помехи в радиоканале тракта передачи телеметрических данных;
- тарифовка и сглаживание телеметрических данных при обработке в ЦУПе;
- закругление вычислений, обусловленное необходимостью выполнять расчеты в реальном масштабе времени.

Для учета влияния указанных факторов на точность трехмерной модели требуется проведение отдельного объемного исследования, что выходит за рамки данной статьи. Здесь только следует отметить, что выполнить подобное исследование исключительно аналитическим путем не представляется возможным, так как некоторые факторы носят случайный характер и степень их влияния может быть оценена только экспериментальным путем, например сравнением вирту-

альной картинке с телевизионным изображением манипулятора при выборе одинаковых ракурсов 3D-модели и телекамеры. Необходимо добавить, что упомянуты только факторы, связанные с телеметрией, но на расхождения между моделью и реальным изделием влияют также конструктивные факторы:

- тепловые и динамические деформации звеньев манипулятора и корпуса станции в точке крепления манипулятора;
- точность измерения координат точек крепления в базовой системе координат станции.

Эти факторы также являются предметом отдельного исследования. Далее рассматривается только идеальный случай, так как цель статьи — предложить вариант графической интерпретации телеметрии, а не оценить соответствие получаемой трехмерной модели реальному изделию.

Предлагаемый вариант графической интерпретации телеметрии применим для оценки пространственного положения и геометрической формы космических манипуляторов, эксплуатируемых в составе Международной космической станции (МКС). Манипулятор ERA еще не находится в стадии летной эксплуатации, однако он присутствует в планах дооснащения Российского сегмента МКС. Предлагаемый вариант представляет собой алгоритм, входными данными которого являются показания телеметрических датчиков, выходными — координаты звеньев манипулятора в системе координат МКС. Фактически требуется решить прямую задачу кинематики: определить закон изменения абсолютных координат звеньев по заданным законам изменения относительных (одна относительно другой) координат звеньев.

**Использование представления Денавита — Хартенберга.** Для пространственных механизмов наиболее эффективными методами решения этой задачи являются векторный метод и метод преобразования координат. В теории манипуляторов дается решение прямой задачи по определению абсолютных координат захвата манипулятора. При ее решении обычно используют метод преобразования координат. Для определения абсолютных координат всех звеньев манипулятора (не только захвата) необходимо решить подобную прямую задачу последовательно для каждого звена. Из множества методов преобразования координат, которые отличаются один от другого правилами выбора осей локальных систем координат, для манипуляторов обычно используют *метод Денавита и Хартенберга* [2, 3]. В рассматриваемом приложении этот метод наиболее удобен, так как представляет собой матричный метод последовательного построения систем координат, связанных с каждым звеном кинематической цепи. Смысл представления Денавита — Хартенберга (ДН-представление) состоит в формировании однородной матрицы преобразования, имеющей размерность  $4 \times 4$  и описывающей положение системы координат каждого звена относительно системы координат предыдущего звена. Это дает возможность последовательно преобразовать координаты каждого звена манипулятора, включая захват, из системы отсчета, связанной с

предыдущим звеном, в абсолютную (базовую) систему отсчета, являющуюся инерциальной системой координат для рассматриваемой динамической системы, в данном случае манипулятора.

Каждая относительная система координат формируется на основе следующих трех правил:

- 1) ось  $z_{i-1}$  направлена вдоль оси  $i$ -го сочленения (кинематической пары);
- 2) ось  $x_i$  перпендикулярна оси  $z_{i-1}$  и направлена от нее;
- 3) ось  $y_i$  дополняет оси  $x_i$  и  $z_i$  до правой декартовой системы координат.

На рис. 3 приведен пример построения относительных систем координат для манипулятора SSRMS (Space Station Remote Manipulator System — дистанционный манипулятор космической станции).

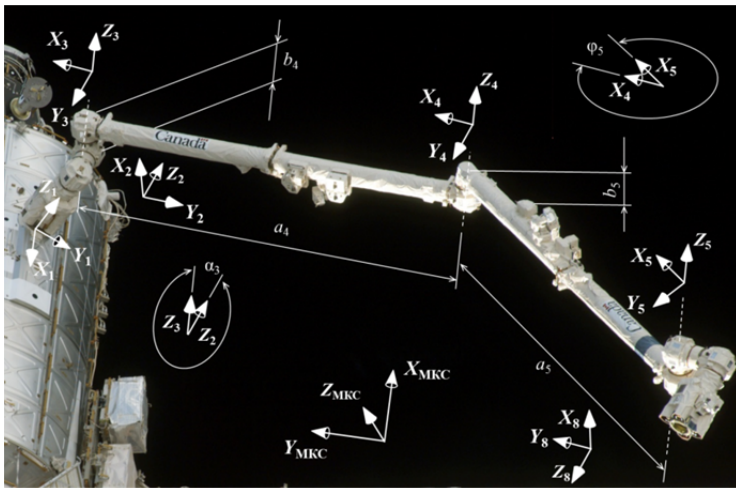


Рис. 3. Система координат Денавита — Хартенберга для манипулятора SSRMS

Системы координат нумеруют в порядке возрастания от основания к захвату манипулятора. Представление Денавита — Хартенберга твердых звеньев зависит от четырех геометрических параметров, соответствующих каждому звену. Эти четыре геометрических параметра полностью описывают любое вращательное или поступательное движение и определяются в соответствии с рис. 3 следующим образом:

- $\phi_i$  — присоединенный угол, на который надо повернуть вокруг оси  $z_{i-1}$  ось  $x_{i-1}$ , чтобы она стала сонаправлена с осью  $x_i$  (знак определяется в соответствии с правилом правой руки);
- $b_i$  — расстояние между пересечением оси  $z_{i-1}$  с осью  $x_i$  и началом  $(i - 1)$ -й системы координат, отсчитываемое вдоль оси  $z_{i-1}$ ;
- $a_i$  — линейное смещение — расстояние между пересечением оси  $z_{i-1}$  с осью  $x_i$  и началом  $i$ -й системы координат, отсчитываемое вдоль оси  $x_i$ , т. е. кратчайшее расстояние между осями  $z_{i-1}$  и  $z_i$ ;
- $\alpha_i$  — угловое смещение — угол, на который надо повернуть вокруг оси  $x_i$  ось  $z_{i-1}$ , чтобы она стала сонаправленной с осью  $z_i$  (знак определяется в соответствии с правилом правой руки).

В манипуляторах, применяемых на МКС, используют только вращательные одностепенные кинематические пары [1, 4]. Для вращательных сочленений параметры  $b_i$ ,  $a_i$  и  $\alpha_i$  являются характеристиками сочленения, постоянными для данных типов манипуляторов. В то же время  $\varphi_i$  — переменная величина, изменяющаяся при вращении  $i$ -го звена относительно  $(i - 1)$ -го. Таким образом, в рассматриваемом приложении угол  $\varphi_i$  есть показания датчика углового положения в  $i$ -м шарнире манипулятора. Чтобы не перегружать изображение похожими элементами, на рис. 3 показаны не все относительные системы координат и геометрические параметры, соответствующие каждому звену.

На рис. 3 видно, что у манипулятора SSRMS  $\alpha_2 = \alpha_3 = \alpha_6 = \alpha_7 = 270^\circ$ ,  $\alpha_4 = \alpha_5 = 0^\circ$  [4]. Угловые смещения  $\alpha$  у манипулятора ERA имеют точно такие же значения в силу подобия конструкций обоих манипуляторов, однако шарниры у ERA иной конструкции, поэтому все параметры  $b$  равны нулю. Конструкция манипулятора ERA приведена на рис. 4 [1].

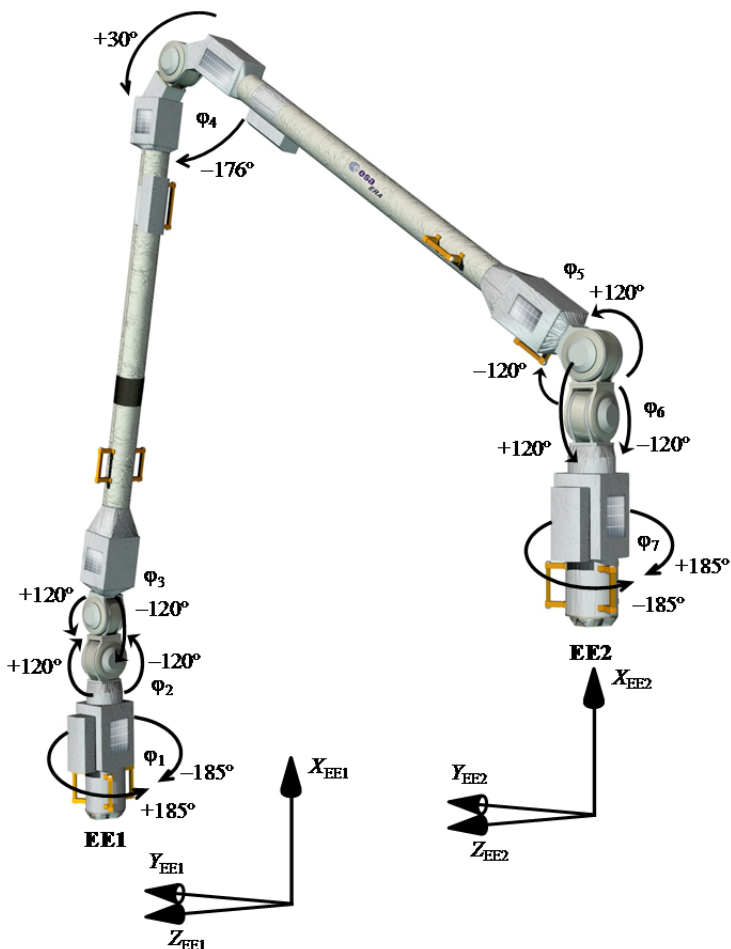


Рис. 4. Манипулятор ERA

**Матрицы однородного преобразования координат звеньев манипуляторов.** После построения ДН-координат для всех звеньев манипулятора можно построить упомянутые ранее однородные матрицы преобразования, имеющие размерность  $4 \times 4$  и связывающие  $i$ -ю и  $(i - 1)$ -ю системы координат [2, 3]. Построение матриц преобразования можно продемонстрировать на следующем примере. На рис. 5 изображены две системы координат  $C_1$  и  $C_2$ . При этом система  $C_2$  отличается от системы  $C_1$  поворотом вокруг оси  $X_2$  на угол  $\varphi_2$  и смещением начала координат на величину отрезков  $a$ ,  $b$  и  $c$ . Рассмотрим переход от системы  $C_2$  к системе  $C_1$  с помощью матриц.

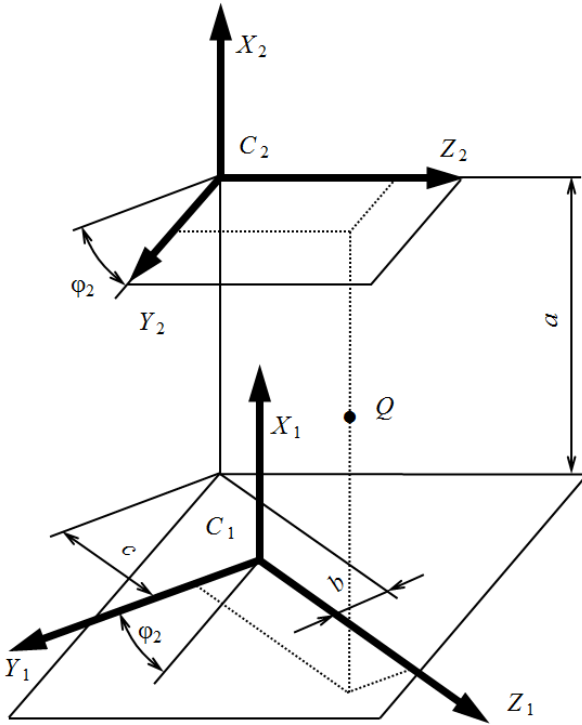


Рис. 5. Пример перехода от системы координат  $C_2$  к  $C_1$

В однородных координатах положение некоторой точки  $Q$  в соответствующих системах запишется в виде  $Q(X_1, Y_1, Z_1, t_1)$  и  $Q(X_2, Y_2, Z_2, t_2)$ .

Однородными координатами точки в трехмерном пространстве называются любые четыре числа  $X_1, Y_1, Z_1, t$ , связанные с ее декартовыми координатами  $(X, Y, Z)$  равенствами

$$X = X_1/t; \quad Y = Y_1/t; \quad Z = Z_1/t,$$

где  $t$  — коэффициент масштабирования.

Коэффициенты масштабирования примем равными единице:  $t_1 = t_2 = 1$ . Такое масштабирование соответствует принятым допущениям о неизменности геометрических размеров между осями шарни-



ров рассматриваемых манипуляторов. В этом случае формулы перехода от системы  $C_2$  к  $C_1$  имеют вид

$$\begin{aligned} X_1 &= X_2 + t_2 a; \\ Y_1 &= Y_2 \cos \varphi_2 - Z_2 \sin \varphi_2 - t_2 b; \\ Z_1 &= Y_2 \sin \varphi_2 + Z_2 \cos \varphi_2 - t_2 c; \\ t_1 &= t_2 = 1. \end{aligned} \quad (1)$$

Коэффициенты, стоящие перед  $X_2$ ,  $Y_2$ ,  $Z_2$  и  $t_2$ , можно представить в виде элементов матрицы:

$$\mathbf{M}_{12} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & a \\ 0 & \cos \varphi_2 & -\sin \varphi_2 & -b \\ 0 & \sin \varphi_2 & \cos \varphi_2 & -c \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}. \quad (2)$$

Индексы 12 в обозначении матрицы  $\mathbf{M}_{12}$  указывают, что совершается переход от системы координат  $C_2$  к системе  $C_1$ . Формулы (1) можно представить как результат умножения этой матрицы на матрицу-столбец  $\mathbf{r}_2$ , состоящую из координат точки  $Q$  в системе координат  $C_2$ :

$$\begin{pmatrix} X_1 \\ Y_1 \\ Z_1 \\ t_1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & a \\ 0 & \cos \varphi_2 & -\sin \varphi_2 & -b \\ 0 & \sin \varphi_2 & \cos \varphi_2 & -c \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} X_2 \\ Y_2 \\ Z_2 \\ t_2 \end{pmatrix}. \quad (3)$$

В сокращенной записи выражение (3) имеет следующий вид:

$$\mathbf{r}_1 = \mathbf{M}_{12} \times \mathbf{r}_2,$$

где  $\mathbf{r}_1$  — матрица-столбец, представляющая собой однородные координаты точки  $Q$  в системе координат  $C_1$ .

При переходе от некоторой следующей системы  $C_3$  к системе координат  $C_2$  координаты точки  $Q$  определяются выражением

$$\mathbf{r}_2 = \mathbf{M}_{23} \times \mathbf{r}_3.$$

Следовательно, координаты точки  $Q$  при переходе от системы координат  $C_3$  к системе  $C_1$  определяются выражением

$$\mathbf{r}_1 = \mathbf{M}_{12} \times \mathbf{M}_{23} \times \mathbf{r}_3.$$

Матрицы  $\mathbf{M}$  из приведенного примера называются *матрицами однородного преобразования* [3]. Используя систему координат Дена-вита — Хартенберга (см. рис. 3), можно построить матрицы преобразования для каждого звена манипулятора. Элементами матриц будут  $b_i$  и  $a_i$  и тригонометрические функции от  $\alpha_i$  и  $\varphi_i$ . Произведение матриц преобразования также представляет собой матрицу однород-

ного преобразования размерностью  $4 \times 4$ . Перемножая последовательно матрицы  $\mathbf{M}_i$ , для каждого звена можно получить матрицу  $\mathbf{T}$  однородного преобразования координат данного звена в базовой системе координат:

$$\mathbf{T}_i = \mathbf{M}_{12} \times \mathbf{M}_{23} \times \dots \times \mathbf{M}_{(i-1)i}. \quad (4)$$

В статье не приводится результат произведения матриц, так как результирующая матрица  $\mathbf{T}_i$  представляет собой довольно громоздкое выражение. Например, матрица однородного преобразования для захвата манипулятора SSRMS ( $i = 8$ ) содержит элементы, которые являются произведением тригонометрических функций углов от  $\varphi_2$  до  $\varphi_8$ . При практической реализации рассматриваемого алгоритма потребуются подробное и тщательное прописывание всех расчетных формул, однако, чтобы передать суть алгоритма, достаточно, по мнению авторов, описать структуру матриц  $\mathbf{T}_i$ .

Рассмотрим матрицу  $\mathbf{M}_{12}$  из выражения (2). В матрице можно выделить четыре составляющие:

$$\mathbf{M}_{12} = \left\| \begin{array}{ccc|c} 1 & 0 & 0 & a \\ 0 & \cos\varphi_2 & -\sin\varphi_2 & -b \\ 0 & \sin\varphi_2 & \cos\varphi_2 & -c \\ \hline 0 & 0 & 0 & 1 \end{array} \right\| = \left\| \begin{array}{c|c} \mathbf{S} & \mathbf{p} \\ \mathbf{f}^T & t \end{array} \right\|,$$

где  $\mathbf{S}$  — матрица поворота размерностью  $3 \times 3$ ;  $\mathbf{p}$  — вектор переноса;  $\mathbf{f}$  — вектор, связанный с вектором центрального проектирования;  $t$  — коэффициент масштабирования.

Матрица  $\mathbf{f}$  имеет нулевые значения, это означает, что точка центрального проектирования находится бесконечно далеко, и, соответственно, вектор  $\mathbf{p}$  есть вектор параллельного переноса. Матрица  $\mathbf{p}$  — трехмерный вектор, определяющий положение начала системы координат  $C_2$  в системе координат  $C_1$  (см. рис. 5):

$$\mathbf{p} = \left\| \begin{array}{c} a \\ -b \\ -c \end{array} \right\|.$$

Элементами матрицы  $\mathbf{S}$  являются направляющие косинусы осей системы координат  $C_2$  в системе координат  $C_1$ :

$$\mathbf{x}_2 = \left\| \begin{array}{c} 1 \\ 0 \\ 0 \end{array} \right\|; \quad \mathbf{y}_2 = \left\| \begin{array}{c} 0 \\ \cos\varphi_2 \\ \sin\varphi_2 \end{array} \right\|; \quad \mathbf{z}_2 = \left\| \begin{array}{c} 0 \\ -\sin\varphi_2 \\ \cos\varphi_2 \end{array} \right\|.$$

Структуру, аналогичную описанной, имеют и матрицы  $\mathbf{T}$  однородного преобразования координат, являющиеся произведением матриц  $\mathbf{M}$  [2, 3]:

$$\mathbf{T}_i = \begin{vmatrix} \mathbf{S}_i & \mathbf{p}_i \\ \mathbf{f}^T & t \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} x_{xi} & y_{xi} & z_{xi} & p_{xi} \\ x_{yi} & y_{yi} & z_{yi} & p_{yi} \\ x_{zi} & y_{zi} & z_{zi} & p_{zi} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{vmatrix},$$

где  $\mathbf{S}_i = \begin{vmatrix} x_{xi} & y_{xi} & z_{xi} \\ x_{yi} & y_{yi} & z_{yi} \\ x_{zi} & y_{zi} & z_{zi} \end{vmatrix}$  — матрица направляющих косинусов системы

координат  $i$ -го звена манипулятора в базовой системе координат

МКС;  $\mathbf{p}_i = \begin{vmatrix} p_{xi} \\ p_{yi} \\ p_{zi} \end{vmatrix}$  — матрица-вектор координат начала системы коор-

динат  $i$ -го звена манипулятора в базовой системе координат МКС.

Матрицы  $\mathbf{S}_i$  и  $\mathbf{p}_i$  являются искомыми выходными данными описываемого алгоритма геометрической интерпретации телеметрии. Этих данных достаточно для определения начала и ориентации системы координат, связанной с отдельно взятым звеном манипулятора, в базовой системе координат МКС.

**Нюансы практической реализации алгоритма.** Утверждение, приведенное в конце предыдущего раздела, не совсем корректно по следующей причине. Все вышеприведенные построения локальных систем координат и матриц однородного преобразования были выполнены от точки крепления манипулятора к корпусу станции (см. рис. 3), от так называемой базовой точки. Однако на МКС начало координат и ориентация ни одной из базовых точек не совпадают полностью с началом и ориентацией базовой системы координат станции. Для вычисления значений элементов матриц  $\mathbf{S}_i$  и  $\mathbf{p}_i$   $i$ -го звена манипулятора именно в базовой системе координат МКС необходимо в выражение (4) добавить еще один множитель. Этот множитель — матрица однородного преобразования координат базовой точки в системе координат МКС. Например, для базовой точки БТЛ1 — базовой точки 1 лабораторного модуля (рис. 6) — эта матрица имеет следующий вид:

$$\mathbf{M}_{PC\ БТЛ1} = \begin{vmatrix} \cos \varphi_{УБТЛ1} & 0 & \sin \varphi_{УБТЛ1} & x_{БТЛ1} \\ 0 & 1 & 0 & y_{БТЛ1} \\ \sin \varphi_{УБТЛ1} & 0 & -\cos \varphi_{УБТЛ1} & z_{БТЛ1} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{vmatrix}.$$

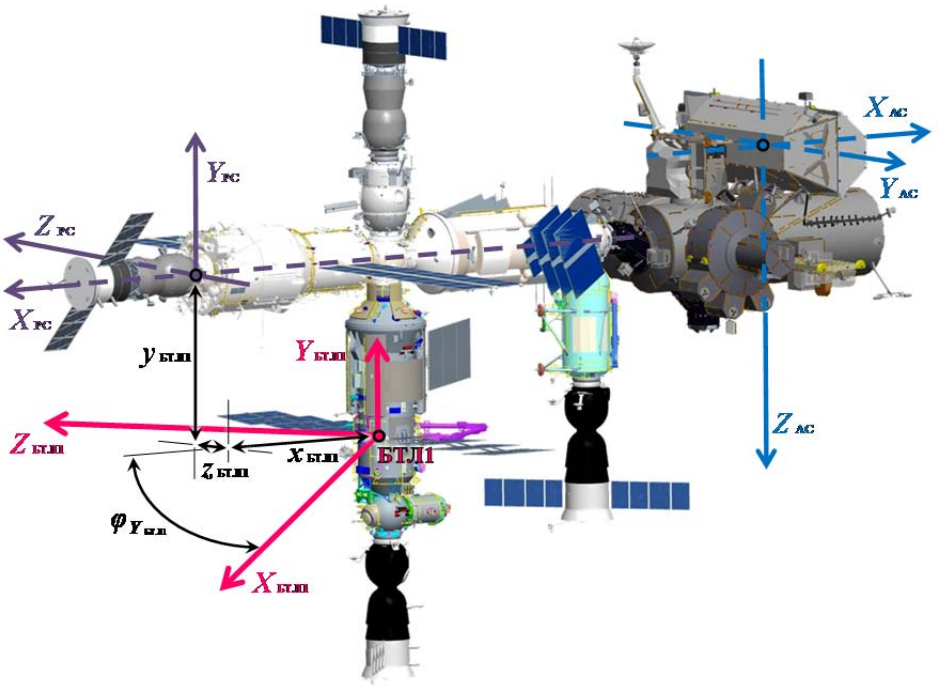


Рис. 6. Координаты БТЛ1 в системе координат МКС

В примере значения элементов матрицы  $\mathbf{M}_{РС}$  БТЛ1 приведены для привязки к системе координат Российского сегмента (РС). Поскольку базовые точки закреплены на поверхности МКС неподвижно (об исключении для MBS будет сказано далее), а тепловые и динамические деформации корпуса не учитываются, все элементы матриц  $\mathbf{M}$  однородного преобразования координат для базовых точек являются постоянными величинами, которые должны быть вычислены и добавлены в алгоритм заранее.

Определить, какая именно базовая точка задействована в текущий момент, можно по телеметрической информации. При стыковке манипулятора с базовой точкой происходит стыковка соответствующих электрических разъемов обоих изделий между собой. В разъемы введены электрические переключки, которые замыкают определенные контакты в ответном разьеме, и, поскольку расположение переключек в каждой базовой точке уникально, по телеметрии однозначно определяется активная в данный момент базовая точка. Однако при перепахивании манипуляторов SSRMS или ERA с одной точки на другую в определенный момент времени оказываются замкнутыми переключки сразу двух точек. Это отдельный случай, он рассмотрен далее вместе со случаем перемены ролей захватов манипуляторов.

Блок основания подвижной системы обслуживания (MBS — Mobile Remote Servicer Base System) [4] установлен на мобильном транспортёре и способен перемещаться вдоль фермы Американского сегмента (АС), т. е. параллельно оси  $Y_{АС}$  (см. рис. 6 и 7).

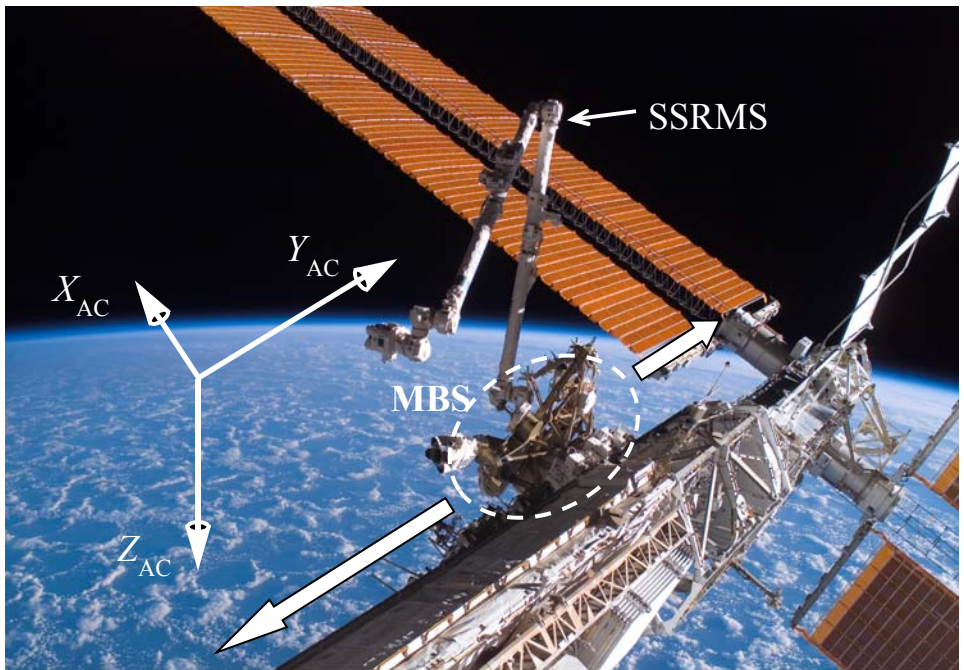


Рис. 7. Блок основания подвижной системы обслуживания

Для базовых точек, установленных на MBS, матрицы преобразования координат имеют один переменный элемент — координату начала отсчета по базовой оси  $Y_{AC}$ :

$$\mathbf{M}_{AC\ MBS} = \begin{pmatrix} \text{const} & \text{const} & \text{const} & \text{const} \\ \text{const} & \text{const} & \text{const} & y_{MBS} \\ \text{const} & \text{const} & \text{const} & \text{const} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}.$$

Для использования в алгоритме графической интерпретации необходимо к указанной координате привязать показания телеметрического датчика перемещения транспортера MBS.

В предлагаемом алгоритме должен быть учтен еще один важный нюанс, который существенным образом влияет на корректность графической интерпретации телеметрии манипуляторов. Суть его в том, как манипулятор крепится к основанию (корпусу станции, подвижной платформе или другому манипулятору). Из всех манипуляторов МКС только JEMRMS (Japanese Experiment Module Remote Manipulator System — дистанционный манипулятор японского экспериментального модуля) имеет фиксированное крепление к корпусу станции (рис. 8). Это означает, что крайние звенья этого манипулятора играют фиксированные роли: за станцию крепится «плечо», свободный конец манипулятора — «кисть» [4].

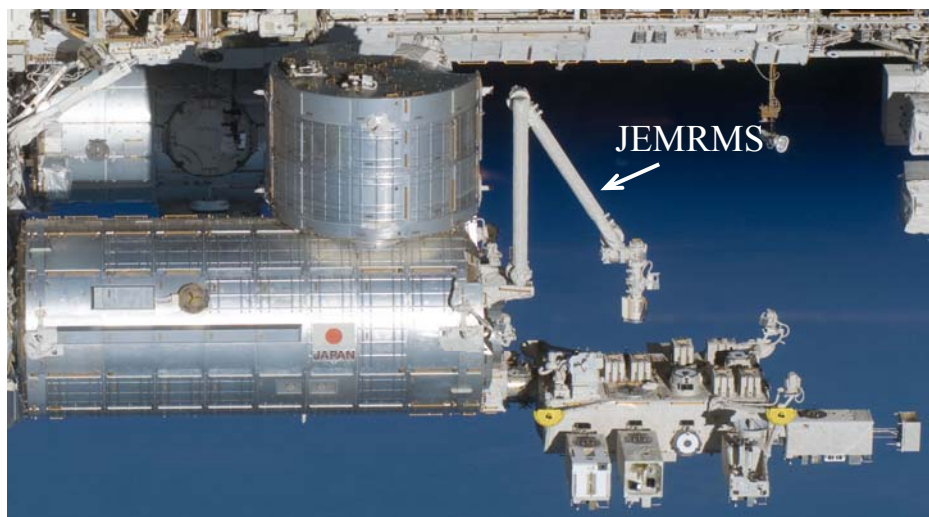


Рис. 8. Манипулятор JEMRMS

Более сложный случай — манипулятор SPDM (Special Purpose Dexterous Manipulator — высокоподвижный манипулятор специального назначения), «руки» его не меняют своего крепления к «телу», но само «тело» может быть закреплено одной стороной к МКС или МБС, а другой («вверх ногами») — к манипулятору SSRMS (рис. 9) [4].

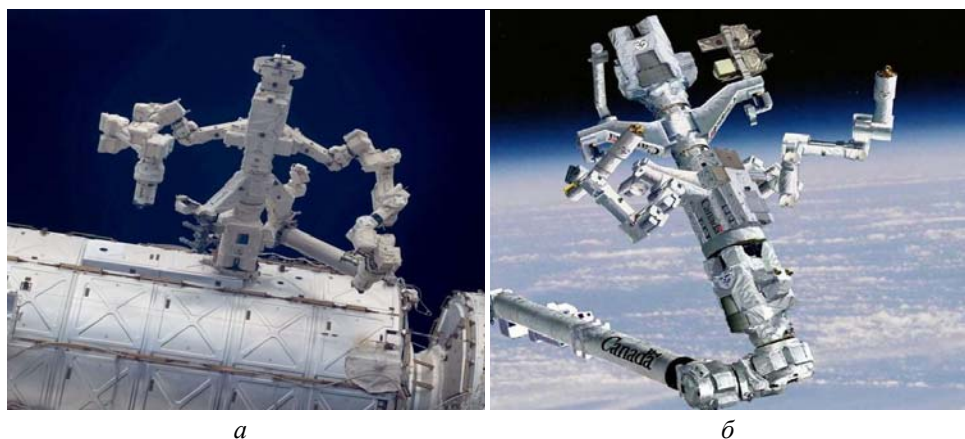


Рис. 9. Манипулятор SPDM на модуле LAB (а) и на манипуляторе SSRMS (б)

Наиболее сложный случай — «шагающие» манипуляторы SSRMS и ERA [1, 4]. Они могут захватить базовую точку любым из своих захватов. Этот захват принимает роль «плеча», другой становится «кистью». После перешагивания на другую базовую точку роли захватов меняются. Меняются только роли, конструктивно каждый захват манипуля-

торов SSRMS и ERA имеет свой четко определенный и неизменный идентификатор. У манипулятора SSRMS захваты носят названия LEE A и LEE B (Latching End Effectors — концевой захват), у манипулятора ERA — EE1 и EE2 (End Effectors — концевой эффектор). Какой именно захват состыкован с базовой точкой, также определяется по замыканию переключателей; комбинация замкнутых контактов для каждого концевых эффекторов уникальна.

В описываемом алгоритме необходимо использовать телеметрические данные не от электрических переключателей, а от управляющего компьютера манипулятора. Для пояснения этого отдельно рассмотрим случай перешагивания манипуляторов SSRMS и ERA с одной базовой точки на другую, а точнее — момент времени, когда оба концевых эффектора захвачены за две базовые точки. Причем такое время может быть довольно продолжительным. В этом положении может возникнуть неоднозначность в определении, от какой именно базовой точки выполнять вычисления координат звеньев и какой из концевых эффекторов считать «плечом». Сигналы с электрических переключателей концевых эффекторов и сопряженной с ним базовой точки поступают в общий телеметрический поток станции и отдельно в управляющий компьютер манипулятора. Телеметрическая информация, поступающая уже от управляющего компьютера, избавлена от упомянутой неоднозначности. В циклограмме перешагивания, заложенной в компьютер, есть четко определенная метка, по которой управляющий компьютер меняет роли «кисти» и «плеча» между захватами. И невзирая на то, что оба концевых эффектора захвачены, в телеметрии, поступающей с управляющего компьютера, активная на текущий момент базовая точка и захват, выполняющий роль «плеча», определены однозначно.

Конструктивно положение угловых датчиков в шарнирах манипуляторов зафиксировано определенным образом [1]. Направления измерения углов не могут измениться от того, какой из концевых эффекторов в данный момент является «плечом», а какой «кистью». Конструктивно заложен отсчет углов от LEE A (EE1) к LEE B (EE2). Соответственно и знаки значений углов задаются в системе координат первого концевых эффектора (LEE A или EE1). В системе координат другого концевых эффектора часть углов примут противоположные по знаку значения. По этой причине в приложении к манипуляторам МКС, меняющим свое крепление к опоре, принято определять конструктивные и операционные углы.

*Конструктивные* углы измеряются в шарнирах манипуляторов телеметрическими датчиками, *операционные* — отсчитываются от опоры независимо от того, какой из концевых эффекторов (для манипулятора SPDM — какая точка «тела») состыкован с опорой. Оче-



видно, что конструктивный и операционный углы, относящиеся к одному шарниру, равны по модулю, но могут различаться по знаку. В приведенных выкладках по нахождению координат звеньев манипулятора методом Денавита и Хартенберга рассматривались углы в расчете от первого звена, закрепленного на опоре, т. е. операционные углы. Чтобы в расчетном алгоритме использовать показания телеметрических датчиков, т. е. конструктивные углы, необходимо ввести в алгоритм пересчет знаков углов по следующему условию: идентификатору состыкованного с базовой точкой концевого эффектора. Наглядно это можно пояснить по рис. 4, где все  $\varphi$  — конструктивные углы в шарнирах. Когда с базовой точкой состыкован концевой эффектор  $EE1$ , знаки конструктивных и операционных углов в соответствующих шарнирах совпадают, а когда на базовой точке находится эффектор  $EE2$ , в качестве операционных должны быть взяты углы  $\varphi_1, \varphi_2, \varphi_6, \varphi_7$  с отрицательным знаком и углы  $\varphi_3, \varphi_4, \varphi_5$  без изменения знака [1].

**Заключение.** Следует отметить, что не только модель манипулятора может быть «подвижной». Можно, точнее даже нужно, «оживить» модель самой станции. Все ограничивается только вычислительными способностями компьютера, на котором будет реализована система графической интерпретации. Кроме манипуляторов МКС имеет еще несколько подвижных внешних конструкций, таких как солнечные батареи, радиаторы системы терморегулирования, остронаправленные антенны, крышки иллюминаторов, крышка и выдвижная платформа шлюзовой камеры. Для вычисления координат элементов этих конструкций вполне применим тот же метод Денавита — Хартенберга, что и для манипуляторов. Например, солнечные батареи Американского сегмента можно представить как манипулятор с фиксированной точкой опоры и двумя степенями подвижности, так как эти батареи имеют два привода по двум ортогональным осям. Соответственно остронаправленная антенна Российского сегмента представляется как манипулятор с тремя степенями подвижности.

Резюмируя вышесказанное, получаем следующий алгоритм построения системы трехмерной графической интерпретации телеметрии манипулятора:

*предварительные операции* — создание новых или обновление/верификация действующих 3D-моделей манипулятора, МКС, полезного груза и внешних подвижных элементов;

*шаг 1* — определение по телеметрии активной базовой точки (включая переменную координату для точек на MBS);

*шаг 2* — выбор из архива матрицы однородного преобразования координат, соответствующей активной базовой точке;

*шаг 3* — определение по телеметрии концевого эффектора, играющего роль «плеча»;



шаг 4 — определение по телеметрии значений конструктивных углов в шарнирах манипулятора;

шаг 5 — пересчет конструктивных углов в операционные;

шаг 6: вычисление с использованием матриц однородного преобразования координат звеньев манипулятора в системе координат МКС;

шаг 7 — определение по телеметрии значений углов и линейных перемещений в кинематических парах элементов конструкции (солнечные батареи, остронаправленные антенны и т. п.);

шаг 8 — вычисление с использованием матриц однородного преобразования координат звеньев подвижных элементов в системе координат МКС;

шаг 9 — дополнение 3D-модели МКС 3D-моделями манипулятора, полезного груза и внешних элементов конструкции в соответствии с вычисленными координатами.

Все девять шагов алгоритма повторяются циклически по мере поступления телеметрических данных в реальном масштабе времени. В результате на экран оператора выводится аналогичная приведенной на рис. 10 картинка.

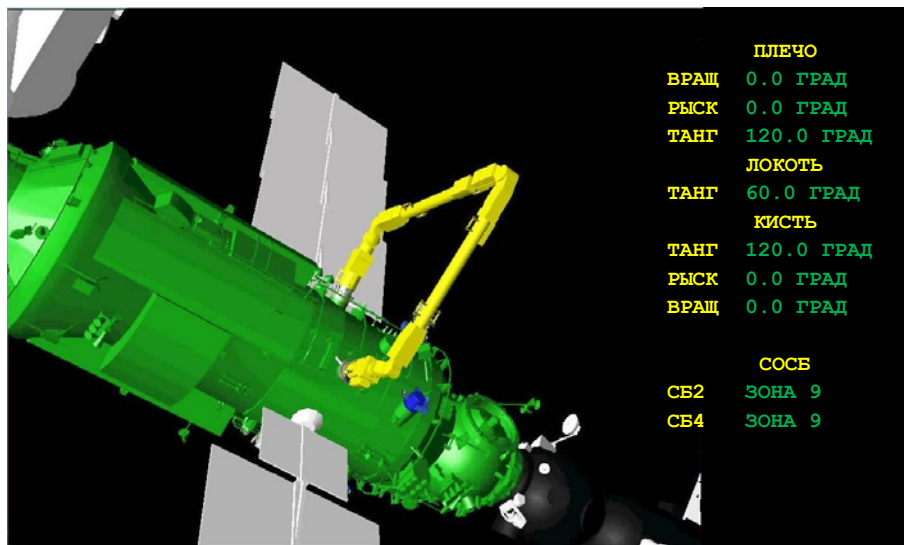


Рис. 10. Предлагаемый телеметрический экран с графической интерпретацией в формате 3D

На экране показаны телеметрические данные об углах в шарнирах манипулятора ERA и о положении солнечных батарей. Телеметрическая информация выведена не только в буквенно-цифровом формате, но и в виде трехмерной графики. Сравним данный экран с экраном, представленным на рис. 1, где также приведена графическая

интерпретация показаний угловых датчиков. Оператору надо обладать фантастическим пространственным воображением, чтобы, используя экран, подобный приведенному на рис. 1, на основе цифр или круговых шкал представить себе текущую объемную форму манипулятора и, главное, текущее положение отдельных его звеньев относительно поверхности станции (тем более относительно подвижных элементов).

## ЛИТЕРАТУРА

- [1] *ERA Flight Operations Manual and Procedures*. Leiden, 2011, 1553 p.
- [2] Angeles J. *Fundamentals of Robotic Mechanical Systems. Theory, Methods and Algorithms*. 3rd ed. Springer, 2007, 550 p.
- [3] Зенкевич С.Л., Ющенко А.С. *Управление роботами. Основы управления манипуляционными роботами*. Москва, Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2000, 400 с.
- [4] *ISS Robotics Systems Overview. ROBOTIC OV C 21002*. Houston, Texas: NASA L. B. Johnson Space Center, 2001, 46 p.

Статья поступила в редакцию 08.02.2016

Ссылку на эту статью просим оформлять следующим образом:

Котюженко Н.В., Савин Л.А. Графическая трехмерная интерпретация телеметрии манипуляторов. *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2016, вып. 2. URL: <http://engjournal.ru/catalog/mesc/rmrs/1465.html>

DOI 10.18698/2308-6033-2016-02-1465

*Статья подготовлена по материалам доклада, представленного на XL Академических чтениях по космонавтике, посвященных памяти академика С.П. Королёва и других выдающихся отечественных ученых — пионеров освоения космического пространства, Москва, МГТУ им. Н.Э. Баумана, 26–29 января 2016 г.*

**Котюженко Никита Вадимович** родился в 1989 г., окончил Московский авиационный институт (Национальный исследовательский университет) в 2012 г. Инженер 1-й категории РКК «Энергия» им. С. П. Королёва, сотрудник Главной оперативной группы управления. Область научных интересов: эксплуатация электромеханических и робототехнических систем в составе пилотируемых космических комплексов. e-mail: [nikita.kotyuzhenko@gmail.com](mailto:nikita.kotyuzhenko@gmail.com)

**Савин Леонид Анатольевич** родился в 1970 г., окончил МГТУ им. Н. Э. Баумана в 1994 г. Начальник сектора РКК «Энергия» им. С. П. Королёва, сотрудник Главной оперативной группы управления. Автор двух публикаций в области управления космическими полетами. Область научных интересов: эксплуатация робототехнических систем в составе пилотируемых космических комплексов. e-mail: [leonid.savin@sfc.ru](mailto:leonid.savin@sfc.ru)

## Three-dimensional graphic interpretation of manipulator telemetry data

© N.V. Kotuzhenko, L.A. Savin

S.P. Korolev Rocket and Space Corporation “Energia”,  
Korolev town, 141070, Russia

*The article describes a variant of using telemetric information coming in real time at MCC to determine the spatial forms of manipulators and their position with respect to the International Space Station structure and to display the obtained data as a three-dimensional picture corresponding to the current condition of the real manipulators and the station. This idea corresponds to the current trends of replacing or supplementing the traditional symbolic representation of the processed telemetry data by graphic images. The proposed algorithm is based on the Denavita—Hartenberg method of coordinate transformation. The basic geometric and algebraic calculations required for the implementation of this method in the described application are presented and the design features of the International Space Station manipulators are considered. Without taking them into account the interpretation of graphical telemetry data will not reflect the real state of controlled products.*

**Keywords:** *International Space Station, manipulators, telemetry data, three-dimensional visualization.*

### REFERENCES

- [1] *ERA Flight Operations Manual and Procedures*. Leiden, 2011, 1553 p.
- [2] Angeles J. *Fundamentals of Robotic Mechanical Systems. Theory, Methods, and Algorithms*. 3rd ed. Springer Publ., 2007, 550 p.
- [3] Zenkevich S.L., Yushchenko A.S. *Upravlenie robotami. Osnovy upravleniya manipulyatsonnymi robotami* [Robot Control. Fundamentals of Programmable Manipulator Control]. Moscow, BMSTU Publ., 2000, 400 p.
- [4] *ISS Robotics Systems Overview. ROBOTIC OVC 21002*. Houston, Texas, NASA L. B. Johnson Space Center Publ., 2001, 46 p.

**Kotuzhenko N.V.** (b. 1989) graduated from Moscow Aviation Institute (National Research University) in 2012. Engineer of the 1st category, S. P. Korolev Rocket and Space Corporation “Energia”, member of the Main Control Group (Russian Segment of ISS). Research interests: electromechanical and robotic systems in manned space systems. e-mail: nikita.kotyuzhenko@gmail.com

**Savin L.A.** (b. 1970) graduated from Bauman Moscow State Technical University in 1994. The Head of Sector, S.P. Korolev Rocket and Space Corporation “Energia”, member of the Main Control Group (Russian Segment of ISS). Author of 2 research publications in the field of space flight control. Research interests: robotic systems in manned space systems. e-mail: leonid.savin@sfoc.ru