

УДК 62-503.51

**КИНЕМАТИЧЕСКОЕ УПРАВЛЕНИЕ ДВУХПАРАМЕТРИЧЕСКОЙ
СКАНИРУЮЩЕЙ АНТЕННОЙ**

Г.Б. Заморув, И.И. Калапышина

Рассматривается кинематическая схема двухпараметрической сканирующей антенны и характер ее движения. Предложена имитационная модель механического модуля антенного устройства в пакете SimMechanics и получено решение аналитических уравнений движения механического модуля с помощью функций пакета программ MATLAB. Проведено сравнение численных результатов, полученных при одинаковых начальных условиях с использованием имитационной модели механического модуля в пакете SimMechanics и аналитических уравнений движения в пакете программ MATLAB. Смоделирован случай с дополнительным углом поворота.

Ключевые слова: моделирование, сканирующая антенна, кинематика, система рычагов.

Введение

Сканирующей антенной называют устройство, при управляемом пространственном перемещении которого по определенному закону последовательно «просматривается» заданный сектор или другая зона обзора. Такое сканирование осуществляется за счет механического вращения антенны, обеспечивающего обзор заданной зоны. Кинематическое управление заключается в выборе и компоновке необходимых для заданного характера движения кинематических пар, обеспечивающих точное и однозначное положение антенны в пространстве. Исследования кинематики подобных устройств проводятся графоаналитически – методом планов, графически – методом кинематических диаграмм, а также аналитически. В работе предложено аналитическое моделирование кинематики двухпараметрической сканирующей антенны в пакете программ MATLAB и ее пакете SimMechanics, заключающееся в построении имитационной модели в пакете SimMechanics и создании матричных уравнений движения механического модуля антенного устройства в пакете программ MATLAB.

Метод построения моделей механизмов в среде SimMechanics рассмотрен в книге Ю.В. Лазарева [1] на примерах математического маятника и гироскопа на вибрирующем основании. Интересный пример продемонстрирован в работе В.М. Мусалимова, М.С. Петрищева, Чан Нгок Чау [2], где предложены решения дифференциальных уравнений, описывающих поведение нелинейного маятника. В приведенных выше примерах рассматриваются идеальные математические объекты, на которые накладываются внешние возмущения.

Авторами предложено применить подобный подход к более сложному устройству, каковым является механический модуль антенны. Аналитическое решение методами классической механики трудоемко и ненаглядно. Исследование кинематики графическими методами не позволяет получить требуемой точности. Предлагаемое решение позволяет средствами MATLAB создать модель, которая максимально приближена к реальной, наиболее точно симулирует кинематику системы и позволяет получить визуализацию движения, а также сравнить численные данные с аналитическим решением.

Предметом исследования является механический модуль сканирующей антенны, работающей в миллиметровом диапазоне длин волн и входящей в состав бортовой радиолокационной станции. Управление положением рабочей части антенны осуществляет система рычагов, вынесенных на периферию отражателя (рис. 1, а). Их совместная работа приводит к нелинейному характеру движения рабочего органа, что, в свою очередь, влечет нарастание ошибок в положении сканирующего луча. Сложная кинематическая схема объекта исследования и жесткие ограничения, наложенные на точность положения сканирующего луча (порядка $15'$), требуют детального исследования характера движения механического модуля и определения допустимого углового диапазона работы антенны в целом.

Описание кинематической схемы

Для работы сканирующей антенны, частью которой является описываемый механический модуль, требуется сложная с точки зрения механики система, которая способна обеспечить требуемые допустимые углы отклонения (прокачки) антенны ($\pm 15^\circ$ по азимутальной и угломестной осям) и достаточную точность ее позиционирования в пространстве ($6'$). Кинематическая схема механического модуля антенного устройства показана на рис. 1, а. Вращение твист-рефлектора (его также уместно называть отражателем) относительно осей OY и OZ осуществляется посредством жесткой дуги и осей скольжения. Дуга связана с твист-рефлектором через неподвижное кольцо, на котором установлены опоры скольжения, обеспечивающие подвижность твист-рефлектора вокруг оси OY. Для обеспечения подвижности системы вокруг оси OZ дуга устанавливается в подшипниковый узел, состоящий из четырех пар опор качения.

Передача вращения от двигателей к отражателю производится через шатуны. Каждый шатун представляет собой систему рычагов, соединенных шарниром. Ведущий рычаг совмещен с двигателем и трансформатором в едином корпусе и на одном валу (рис. 1, а). Ведомые рычаги соединены с отражателем при помощи двусосных карданов [3].

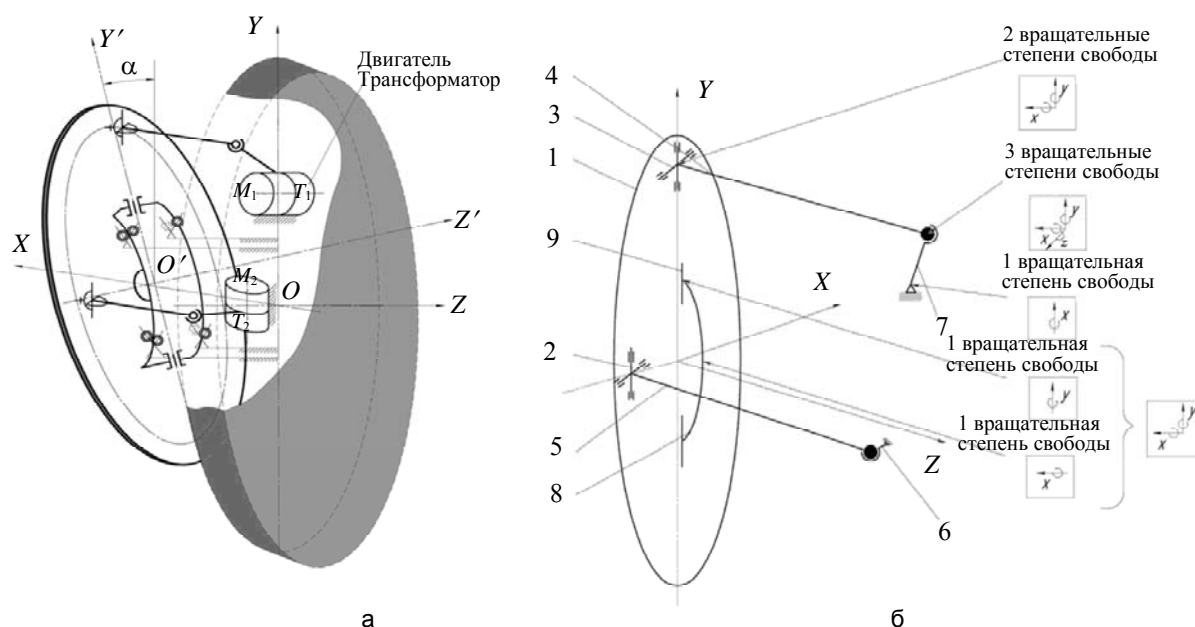


Рис. 1. Кинематические схемы механического модуля антенного устройства: развернутая (а); упрощенная (б)

Как объект механики, рассматриваемый прибор является устройством с параллельной кинематикой, имеющим два однотипных (параллельных) рычажных привода [3]. Устройство составлено из пяти звеньев, соединенных кинематическими парами, три из которых являются шарнирами: карданы (четвертого класса), два сферических шарнира (третьего класса) и два плоских шарнира (пятого класса). Такая структура механизма обеспечивает две независимые степени свободы. Возвратно-вращательное движение осуществляется за счет вертикально и горизонтально расположенных кривошипов. Возможны прямая и обратная постановка задачи кинематического управления:

- по двум заданным угловым отклонениям твист-рефлектора найти соответствующие положения двух ведущих кривошипов;
- по заданным угловым положениям кривошипов найти угловые отклонения твист-рефлектора.

Движение ведомого звена 1 (рис. 1, б) рассматривается как два вращательных движения вокруг оси OX (угломестной) и оси OY (азимутальной). Для реализации этого движения используются двусосный азимутальный кардан 2 и двусосный угломестный кардан 3, которые имеют по две вращательные степени свободы относительно осей OY и OX . Для передачи управляющего движения от двигателя к отражателю 1 используются системы рычагов 4, 7 и 5, 6, которые попарно соединены между собой сферическим шарниром, имеющим 3 вращательные степени свободы. Условно считаем двигатель закрепленным элементом, а генерируемое им движение – реверсивным вращением вокруг оси OX . Карданы 3 и 4 обеспечивают степени свободы для движения тяг 4 и 5. Движение твист-рефлектора 1 обеспечивается осями 9 (относительно OY) и опорной дугой 8 (относительно OX), которая на рис. 1, б, изображена условно. При моделировании центральная развязка преобразована в один блок с двумя соответствующими степенями свободы, расположенный в геометрическом центре элемента 1.

Имитационная модель в программе MATLAB в пакете SimMechanics – блочная модель

На рис. 2, а, представлена модель, созданная с помощью пакета SimMechanics. Каждый из блоков выполняет функции либо тела – детали, либо сочленения [4]. Для всей последующей структуры имитационной модели связка блоков Machine Environment, Ground, Universal, Zerkalo3 задает гравитационные силы, приложенные к центру координат, в котором расположен центр твист-рефлектора, а также формирует геометрию твист-рефлектора. Соединение Zerkalo3, Universa2, Tjga1 определяет положение тяги в координатной системе твист-рефлектора, их соединение с помощью двусосного кардана. Tjga1, Spherical и Shatun1 определяют положение кривошипа относительно начала координат и способ его соединения с тягой; Shatun1, Revolute, Ground1 – соединение шатуна с двигателем. Joing Actuator, Sine Weve имитируют работу двигателя. В управляющем *m*-файле для идеального варианта были вычислены моменты инер-

ции для всех элементов механической системы, а также написаны тензоры инерции [4]. Масса отражателя вычислена по формуле

$$m_1 = \pi \cdot R^2 \cdot b \cdot g_{m1},$$

где R – радиус отражателя; b – средняя толщина поля отражателя; g_{m1} – плотность материала отражателя.

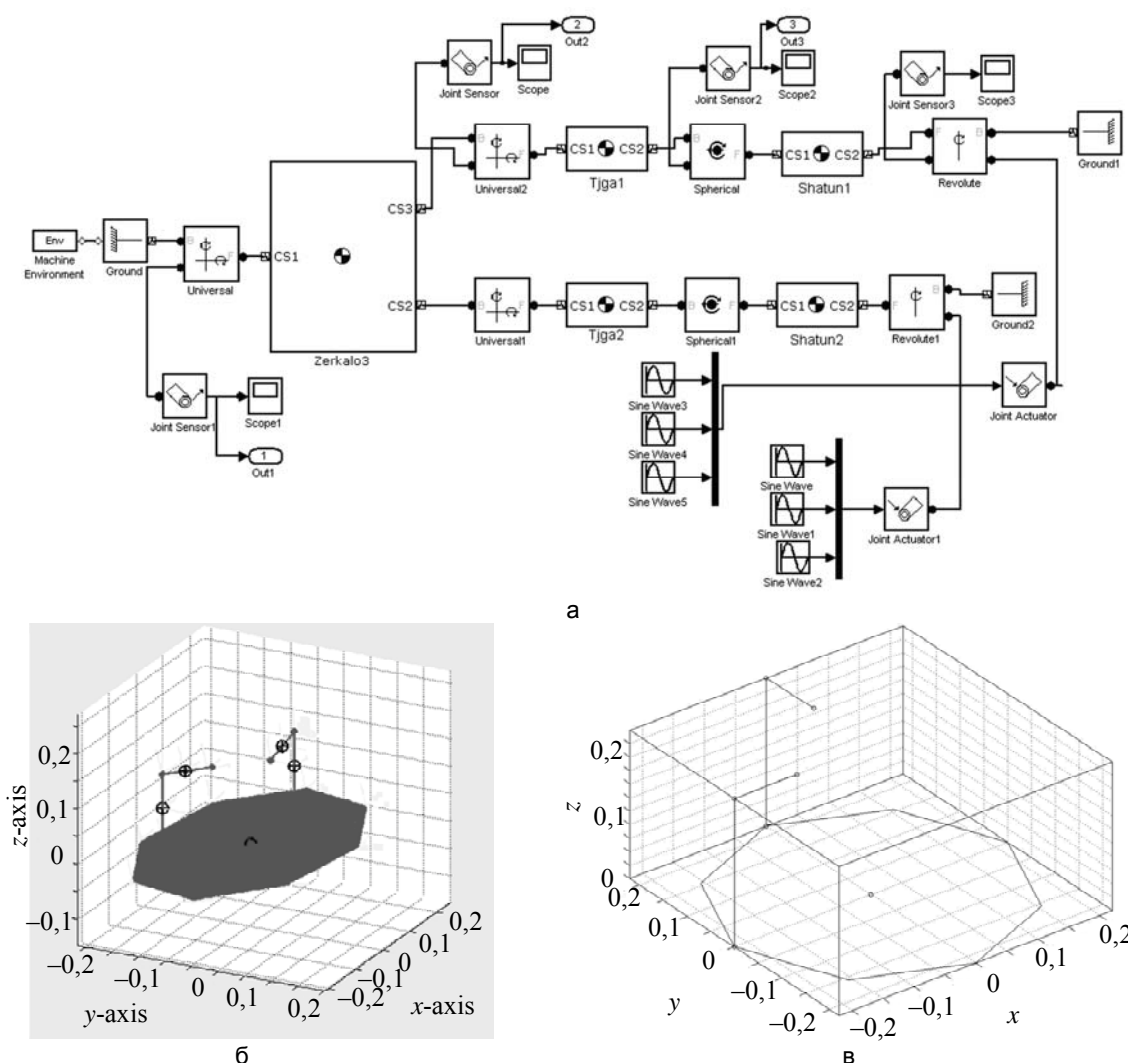


Рис. 2. Имитационное моделирование механического модуля антенного устройства в пакете SimMechanics: имитационная модель механического модуля антенного устройства в пакете SimMechanics (а); структурная схема пространственного положения механизма, результат работы имитационной модели в пакете SimMechanics (б); результат работы аналитической модели в программе MATLAB (в)

Моменты инерции отражателя по трем осям

$$I_{1z} = \frac{m_1 \cdot R^2}{2}; I_{1x} = \frac{m_1 \cdot R^2}{4}; I_{1x} = I_{1y} \Rightarrow J_1 = \begin{bmatrix} I_{1x} & 0 & 0 \\ 0 & I_{1y} & 0 \\ 0 & 0 & I_{1z} \end{bmatrix}.$$

На рис. 2, б, показан результат работы имитационной модели пакета SimMechanics, который демонстрирует взаимное расположение твист-рефлектора и кривошипов в пространстве при решении прямой или обратной задач кинематического управления. Модель предусматривает формирование видео-файла, в котором демонстрируется характер движения механической системы. Использование в схеме (рис. 2, а) блоков Joint Sensor позволяет в общем случае измерить такие характеристики относительного движения частей механизма, как угол поворота, угловую скорость, угловое ускорение [4].

Аналитическая модель в программе MATLAB

Для связывания углов отклонения твист-рефлектора φ_{1x} , φ_{1y} с соответствующими угловыми положениями кривошипов $\varphi_{3,x}$ (вертикальный кривошип) и $\varphi_{5,y}$ (горизонтальный кривошип) необходимо

составить непрерывные кинематические связи-зависимости по линиям двух рычажных приводов. Для этого целесообразно использовать математический аппарат пошагового матричного координатного перехода от системы, связанной с отражателем, к системе, связанной с кривошипами. Начало неподвижной (глобальной) координатной системы целесообразно расположить в центре отражателя в месте ее присоединения шарниром Кардана к неподвижной стойке. Шарниры кардана, соединяющие отражатель с приводными рычагами, расположены в данном случае на оси ОУ (вертикальный привод) и на оси ОХ (горизонтальный привод). По этой причине повороты координат относительно оси ОZ на указанные шарниры в данном случае можно не делать. Всего для связывания координат необходимо произвести по десять одношаговых переходов по каждой из двух линий привода. При этом каждая линия дает по пять переменных величин (все угловые) и по пять конструктивно известных (постоянных) величин, четыре из которых – поступательные смещения вдоль рычагов, а один – угол настройки плоскости монтажа шарнира кардана.

Для угломестного рычага (обеспечивает вращение вокруг оси ОХ, рис. 1, б)

$$A_x(\varphi_x)A_y(x_5)A_z(-l_3)A_x(x_4)A_y(x_3)A_z(l_2)A_x(x_2)A_x(x_1)A_z(\varphi_{z4})A_z(-l_1)r-r_v=0. \quad (1)$$

Для азимутального рычага (обеспечивает вращение вокруг оси ОУ, рис. 1, б)

$$A_y(\varphi_y)A_x(x_{11})A_z(l_5)A_z(x_{10})A_y(x_9)A_z(l_4)A_x(x_8)A_y(x_7)A_z(\varphi_{z4})A_z(-l_1)r-r_g=0, \quad (2)$$

где r – радиус-вектор центра твист-рефлектора в системе; A – матрицы пошагового перехода; x, y, z – индексы в матрицах, обозначающие ось поворота системы координат; d – поступательное смещение координат; l_n – длина n -го рычажного звена; r_v, r_g – радиус-вектор центра отражателя в системе вертикального и горизонтального кривошипа.

Два вышеуказанных уравнения могут обеспечить нахождение не более шести неизвестных, поэтому систему следует дополнить уравнениями, связанными с углами поворота отражателя φ_{1x} и φ_{1y} . Для этого выражения (1) и (2) дополняются двумя одношаговыми матрицами поворота отражателя $A_x(\varphi_{1x})$ и $A_y(\varphi_{1y})$. Заметим, что орты осей – это векторы (а не радиус-векторы точек), поэтому переходы, связанные с поступательным смещением, можно опустить (отбросить). В то же время орты – это заведомо единичные векторы, поэтому для решения задачи из матричного уравнения можно использовать не три, а только две проекции. Таким образом, два матричных уравнения для орт-вектора оси (например, ОZ) дают четыре, а не шесть добавочных уравнений. В то же время один орт, нормальный к плоскости отражателя, определяет положение этой плоскости, но не определяет ее положение в плоскости. По этой причине необходимо записать еще два матричных уравнения для любого из двух оставшихся ортов (например, ОХ), но использовать из этих матричных уравнений только по одному. Таким образом, имеем шесть уравнений проекций радиус-вектора, четыре уравнения связывания орта оси ОZ отражателя и два уравнения для орта оси ОХ (или ОУ). Всего получаются 12 уравнений, обеспечивающих нахождение 12 неизвестных.

Матричные уравнения для орта оси ОZ имеют вид

$$[A_x(-x_6)A_y(-x_{12})A_x(\varphi_x)A_y(x_5)A_x(x_4)A_y(x_3)A_x(x_2)A_x(x_1)A_z(\varphi_{z2})-I] \cdot e_z = 0; \quad (3)$$

$$[A_x(-x_6)A_y(-x_{12})A_y(\varphi_y)A_x(x_{11})A_z(x_{10})A_y(x_9)A_x(x_8)A_y(x_7)A_z(\varphi_{z4})-I] \cdot e_z = 0; \quad (4)$$

где I – единичная матрица 4×4 элемента; e_z – орт нормали по оси z .

При получении последних уравнений отброшены шаги, связанные с поступательными смещениями, хотя в вычислительной практике этого можно и не делать с целью унификации вычислительных функций.

Два оставшихся матричных уравнения (для краткости не приводим их в тексте) отличаются от (3) и (4) только ортом e_x вместо e_z . В приведенных уравнениях заданными являются угловые положения приводных кривошипов φ_{x3} и φ_{y5} , а искомыми x_6 и x_{12} – угловые положения отражателя. Можно легко изменить цель решения, заменяя в соответствующих одношаговых матрицах x_6 и x_{12} на φ_{1x} и φ_{1y} , а искомые величины x_6 и x_{12} внести в матрицы углов поворота ведущих кривошипов. Решение системы из 12 уравнений определит положение каждого элемента механической системы. На рис. 2, в, показано нулевое положение механизма.

Сравнение результатов работы имитационной модели в программе MATLAB в пакете SimMechanics и аналитической модели в программе MATLAB

Для сравнения работы моделей выбрано угловое положение элемента 1 (рис. 1, а) вдоль осей ОХ и ОУ и входной угол отклонения кривошипа. Расхождение углов отклонения по осям ОХ и ОУ для блочной модели в программе MATLAB в пакете SimMechanics при совместном действии двух приводов показано на рис. 3, а. Углы отклонения задаются равными для каждого привода в интервале от 0° до 40° . Из рис. 3, а, видно, что при больших углах отклонения кривошипов при наличии двух степеней свободы происходит «наложение» отклонений. В имитационной модели расхождение углов отклонения отража-

теля становится интенсивно нарастающим при превышении азимутального или угломестного углов 17° (рис. 3, в). Тот же результат дает аналитическая модель в программе MATLAB (рис. 3, б). Для сравнения результатов работы двух моделей было вычислено среднее значение отклонения (рис. 3, в). Допустим, что углы отклонения отражателя по двум осям имеют одинаковое значение. Величина максимального расхождения между средними значениями данных $\Delta_{\max} \approx 31'$. Наибольшее различие проявляется после достижения рычагами 6 и 7 (рис. 1, б) 25° . Далее был задан дополнительный поворот в кардане. В имитационной модели задание дополнительной степени свободы в кардане приводит к выравниванию углов отклонения по угломестной и азимутальной осям и к неуправляемости объекта. В аналитической модели задание дополнительного угла поворота в карданах было выполнено при $\varphi = 5^\circ$ и моделирует погрешность монтажа кардана.

На рис. 3, г, показан сравнительный график положения отражателя без перекоса в оси кардана и с перекосом. Максимальное различие между кривыми составляет $0,012^\circ$. Увеличение угла перекоса в кардане по оси OZ ведет к перераспределению углов отклонения отражателя.

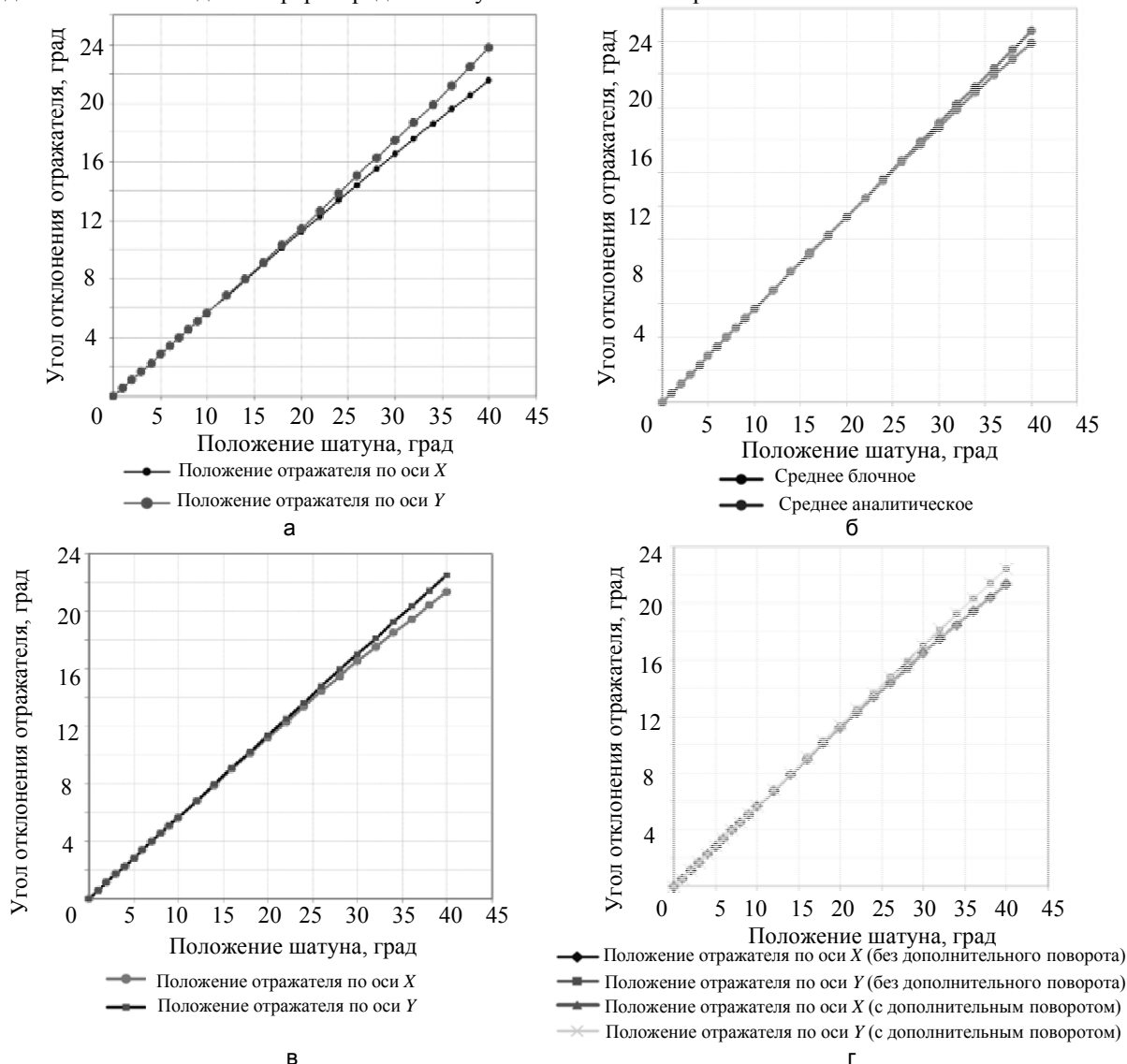


Рис. 3. Графики сравнения результатов работы имитационной (пакет SimMechanics) и аналитической (программа MATLAB) моделей: результат работы блочной модели в программе MATLAB в пакете SimMechanics (а); результат работы аналитической модели в программе MATLAB (б); усредненные значения блочной и аналитической модели (в); положение отражателя с дополнительным поворотом кардана и без него (г)

Заключение

В работе описаны два метода исследования кинематики двухпараметрической сканирующей антенны при решении задач кинематического управления: в программе MATLAB и пакете SimMechanics при помощи построения имитационной модели и решения аналитических уравнений движения. Расхож-

дение данных между аналитическим решением и результатом работы имитационной модели составило $\Delta_{\max} \approx 31'$. Имитационное моделирование позволило визуализировать движение модуля, наглядно показав характер движения и его особенности.

Сделаны выводы о допустимых углах отклонения ($\pm 15^\circ$ по азимутальной и угломестной осям), при которых величина ошибки, обусловленная кинематическими особенностями механизма, минимальна и не превышает $5'$, что удовлетворяет требованиям технического задания на точность механического модуля сканирующей антенны.

Литература

1. Лазарев Ю.В. Моделирование процессов и систем в MATLAB: Учебный курс. – СПб: Питер; Киев: Издательская группа BHV, 2005. – 512 с.
2. Мусалимов В.М., Петрищев М.С., Чан Нгюк Чау. Моделирование динамики нелинейных маятников на вибрирующем основании // Изв. вузов. Приборостроение. – 2006. – Т. 49. – № 7. – С. 48–51.
3. Заплетохин А.В. Конструирование деталей механических устройств. Справочник. – Л.: Машиностроение, 1990. – 669 с.
4. Герман–Галкин С.Г. Matlab & Simulink. Проектирование мехатронных систем на ПК. – СПб: КОРОНА-Век, 2008. – 368 с.

Заморуев Георгий Борисович

– Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, кандидат технических наук, доцент, georgyz09@gmail.com

Калапышина Ирина Ивановна

– Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, аспирант, weir521@yandex.ru