International Electronic Scientific Journal "Science Online" http://nauka-online.com/

Технические науки

Батырханов Мәділхан

студент магистратуры Казахского национального университета **Batyrkhanov Madilkhan** Master's degree Student of the Kazakh National University named al-Farabi

ПРОЕКТИРОВАНИЕ И РАСЧЕТ ФЕРМЕННОГО РАЗВЕРТЫВАЕМОГО АНТЕННОГО МЕХАНИЗМА НА БАЗЕ БЛОКА 3UU-3URU DESIGN AND ANALYSIS OF A TRUSS DEPLOYABLE ANTENNA MECHANISM BASED ON A 3UU-3URU UNIT

Аннотация. Космические развертываемые конструкции с большим высокой точностью и большой степенью складывания калибром, являются незаменимым оборудованием в аэрокосмической области. Учитывая, что развертываемый блок 3RR-3RRR с одной степенью свободы не может быть полностью сложен, в этом исследовании предлагается развертываемый блок 3UU-3URU с двумя видами глубины резкости: перемещение складывания и регулировка ориентации. Сначала по формуле G-К анализируется глубина резкости блока 3UU-3URU. Затем блок 3UU-3URU используется для создания развертываемой ферменной антенны с изогнутой поверхностью, и вычисляется глубина резкости всей развертываемой антенны, содержащей несколько блоков 3UU-3URU. Конструктивное проектирование развертываемой антенны с двумя шлейфами выполняется с конкретными параметрами и геометрическими соотношениями. Затем выполняется моделирование степени резкости базового комбинированного блока, состоящего из трех блоков 3UU-3URU.

Наконец, изготовлен прототип базового комбинированного блока, и степень свободы механизма проверена экспериментально.

Ключевые слова: базовый комбинированный блок, степень свободы (DOF), развертываемая ферменная антенна, анализ моделирования, структурное проектирование.

Summary. Space deployable structures with large calibers, high accuracy, and large folding ratios are indispensable equipment in the aerospace field. Given that the single-DOF 3RR-3RRR deployable unit cannot be fully folded, this study proposes a 3UU-3URU deployable unit with two kinds of DOF: folding movement and orientation adjustment. First, based on the G-K formula, the DOF of the 3UU-3URU unit is analyzed. Then, the 3UU-3URU unit is used to construct a deployable truss antenna with a curved surface, and the DOF of the structural design of a deployable antenna with two loops is carried out with specific parameters and geometric relations. Next, a DOF simulation of a basic combination unit composed of three 3UU-3URU units is performed. Finally, a prototype of the basic combination unit is manufactured, and the DOF of the mechanism is experimentally verified.

Key words: Basic combination unit, degree of freedom (DOF), deployable truss antenna, simulation analysis, structural design.

Введение. В настоящее время космические развертываемые механизмы широко используются в спутниковой связи, исследовании дальнего космоса и строительстве космических станций. Из-за ограниченного пространства в ракетах-носителях необходимо складывать развертываемые механизмы при хранении и транспортировке; они полностью развернуты после установки [1-2]. Соответственно, поиск новых типов развертываемых механизмов с высокой точностью и большой

скоростью складывания является целью исследователей в аэрокосмической области.

Большинство развертываемых антенн состоят из нескольких базовых блоков, совместно использующих режим подключения. Как в стране, так и за рубежом было предложено множество развертываемых блочных механизмов, и были изучены характеристики единичных механизмов и их применение в больших развертываемых антеннах. Лу и др. [3] сконструировали планарный развертываемый антенный механизм, используя блок Хукенса с линейным выходом. Янг и Дин [4] предложили новый тип шестигранного механизма, основанный на пространственном многогранном центростремительном механизме, который может быть объединен в большие плоские развертываемые механизмы и вытянутые руки. Новый раскрывающийся механизм с тремя призмами был также разработан Дингом и др. [5], который имеет потенциальное применение в области авиации. Ву и др. [6] выдвинули своего рода пространственно развертываемую единичную структуру. Более того, Такамацу и Онода [7] предложили единичный механизм с пространственно-диагональной структурой для создания большой плоской развертываемой антенны. Сюй и Гуань [8] выдвинули ферменный развертываемый антенный механизм, состоящий четырехгранных развертываемых блоков. В ИЗ трех исследованиях [9; 10; 11] рассматривалось применение механизмов связывания Беннета, Брикарда и Майарда в развертываемых механизмах соответственно. Ван и др. [12] и Варнаар и Чу [13] предложили двухэтапный метод анализа топологии и теорию графов, соответственно, для разработки множества развертываемых структур пирамидальных блоков. Чу и др. [14] и Ван и др. [15] предложили новый тип плоской развертываемой конструкции блока, который может быть применен к большим развертываемым антеннам. Кроме того, Чернявский и др. [16] сконструировали плоский развертываемый антенный механизм, используя

механизм масштабирования многоугольника. Ли [17] изучал кинематику, динамику и методы управления развертываемыми кольцевыми антеннами. Компания Хи [18] успешно разработала развертываемую антенну с двойной кольцевой фермой, завершила анализ ее сетевой формы и движения при развертывании, структурного проектирования И оптимизации, динамики и тепловых характеристик, а затем проверила конструкцию, построив принципиальный прототип. Ши и др. [19] всесторонне исследовали развертываемые механизмы, и прогресс в разработке механизмов для больших развертываемых антенн был достигнут в таких областях, как инновационный дизайн, динамика развертывания и экспериментальные методы наземной разгрузки.

Хотя было предложено множество развертываемых блоков, было разработано относительно немного механизмов для развертываемых антенн на космических фермах. Тетраэдрические развертываемые блоки наиболее широко используемыми блоками являются В антеннах, развертываемых в космосе, но тетраэдрические развертываемые блоки только с поворотными шарнирами [8; 20] и соединениями из специальных материалов (таких как полимерные материалы с памятью формы) [21] полагаются на зазор в суставах или упругую деформацию звеньев для достичь складывающегося Идеальное идеального состояния. складывающееся состояние относится к состоянию, в котором все части рефлектора фермы разворачиваемого антенного И задней рамы расположены близко друг к другу. В этом исследовании предлагается пространственный развертываемый блок 3UU-3URU (R и U представляют соответственно), поворотные И универсальные шарниры, который применяется к развертываемой антенне на четырехгранной ферме, чтобы преодолеть ограничения, наложенные на исходный механизм из-за ограничений совместного зазора. и упругая деформация.

Пространственно развертываемый блок довольно сложен, а его анализ глубины резкости, динамика и структурное проектирование затруднены. В настоящее время в литературе имеется немного анализов таких механизмов, а метод систематического исследования не разработан. Таким образом, в этом исследовании исследуется базовый развертываемый блок 3UU-3URU и его применение в развертываемых антеннах. Основываясь на предыдущих исследованиях, Раздел 2 указывает на проблемы развертываемых антенн, состоящих из блоков 3RR-3RRR с одной степенью свободы, и предлагает решения. В разделе 3 предлагается базовый развертываемый блок ЗУУ-ЗУРУ, анализируются его свободы. Базовый конструктивные характеристики И степень комбинированный блок состоит из трех основных блоков. В этом разделе анализируются различных комбинирования больших три режима базового блока развертываемых механизмов с использованием комбинирования и правила о глубине резкости развертываемых антенн. Раздел 4 знакомит с конструкцией И расчетом моделирования развертываемой антенны на основе механизма блока 3UU-3URU. Наконец, выводы представлены в разделе 5.

ПРОБЛЕМЫ С ФЕРМЕННОЙ АНТЕННОЙ НА БАЗЕ РАЗВЕРТЫВАЕМЫХ БЛОКОВ 3RR-3RRR

Ферменная антенна на базе развертываемых блоков 3RR-3RRR состоит из нескольких базовых развертываемых блоков типа тетраэдр 3RR-3RRR, расположенных по определенному сетевому принципу. Схема механизма блока 3RR-3RRR показана на рис. 1. Согласно [20], механизм развертывания тетраэдрического блока 3RR-3RRR, показанный на рис. 1, имеет только одну степень свободы. Если верхний узел L фиксирован и любое из сочленений R выбрано в качестве задействованного сочленения, нижние узлы, A, B и C, находятся близко или от нормали P1P2 тетраэдрической единицы под действием срабатывания. По мере движения

International Electronic Scientific Journal "Science Online" http://nauka-online.com/

юнита перемещаются только три нижних узла, а ориентация остается неизменной. Небольшая изогнутая развертываемая антенна, состоящая из трех тетраэдрических развертываемых блоков 3RR-3RRR, обозначенных как (1), (2) и (3), показана на рис. 2. В состоянии полного развертывания узлы A, B, C, D, E, F и G на отражающей поверхности расположены на одной поверхности, а узлы L, M и N на опорной поверхности расположены на другой поверхности. Для увеличения жесткости всей конструкции и учета симметрии конструкции цепи SRS (S, обозначающие сферическое соединение) добавляются между двумя соседними узлами на опорной поверхности. Цепочка SRS является неограниченной цепочкой, поэтому она не влияет на глубину резкости всего механизма.



Нижний цветочный диск В

Рис. 1. Схема механизма выдвижного блока 3RR-3RRR



Рис. 2. Развертываемый антенный механизм, состоящий из трех блоков 3RR-3RRR со сферической поверхностью

Поскольку отражатель антенны обычно представляет собой сферическую поверхность или параболоид, нижние грани отдельных тетраэдрических блоков, составляющих развертываемую антенну, не расположены в одной плоскости (см. Рис. 3), и, следовательно, ориентация узлов должно быть иначе. R₀ и r₀ представляют собой радиус петли огибающей узлов на отражающей поверхности и опорной поверхности соответственно, h₀ представляет собой максимальное расстояние между опорной и отражающей поверхностями. Более того, ориентация узлов остается неизменной во время процесса складывания. Таким образом, ориентация узлов различна, а поворотные звенья и узлы на задней поверхности не полностью сложены, как показано на рис. 4, что серьезно влияет на скорость складывания. R_u и r_u представляют радиус огибающей

International Electronic Scientific Journal "Science Online" http://nauka-online.com/

петли узлов на отражающей поверхности и опорной поверхности соответственно, h_u представляет собой максимальное расстояние между опорной и отражающей поверхностями. Следовательно, необходимо улучшить структуру предыдущего тетраэдрического блока с одной степенью свободы, чтобы реализовать одинаковые ориентации всех узлов в состоянии складывания. Что касается плоского отражателя, то грани блоков, составляющих разворачиваемую антенну, при складывании или раскладывании расположены в одной плоскости. Сравнение плоского механизма и механизма криволинейной поверхности показывает, что их существенное различие заключается во влиянии ориентации узлов.



Рис. 3. Раскладывающийся антенный механизм на базе блока 3RR-3RRR



Рис. 4. Развертываемый антенный механизм на базе блока 3RR-3RRR в сложенном состоянии

Следовательно, если глубина резкости регулировки ориентации узлов увеличивается, перевернутый тетраэдрический блок, LMN-A, может продолжать складываться, когда узлы перемещаются в крайние положения. Затем ориентация узлов на отражающей поверхности также изменится, так что все узлы будут ориентированы вдоль одной плоскости. Таким образом, может быть решена проблема невозможности полностью сложить выдвижной механизм с изогнутой поверхностью.

3. Ферменный антенный механизм на базе развертываемого блока 3UU-3URU

Для преодоления вышеуказанных проблем предлагается новый выдвижной антенный механизм на основе 3UU-3URU, который может обеспечивать как складывание, так и регулировку ориентации.

3.1. Анализ глубины резкости развертываемого блока 3UU-3URU

Развертываемый блок 3UU-3URU состоит из верхнего узла, трех нижних узлов, трех качающихся звеньев, шести соединительных звеньев, трех поворотных шарниров (R) и 12 универсальных шарниров (U), как показано на рис. 5. На рисунке U-образные шарниры представлены двумя R-шарнирами, оси которых пересекаются. Длины трех качающихся рычагов равны, их верхние концы соединены с верхним узлом Р универсальными шарнирами U_1 , U_3 и U_5 соответственно, а оси U_1 , U_3 и U_5 вблизи верхнего узла копланарны. . Нижний конец поворотного рычага 1 соединен с нижним узлом А шарниром U₂; узел А соединен с соединениями U_{11} и U_{32} звеньями 11 32 соединительными И соответственно. Нижний конец поворотного рычага 2 соединен с нижним узлом В шарниром U_4 ; узел В соединен с соединительными звеньями 12 и 21 шарнирами U_{12} и U_{21} соответственно. Нижний конец поворотного рычага 3 соединен с нижним узлом С шарниром U₆; узел С соединен с соединительными звеньями 31 и 22 соединениями U_{31} и U_{22} соответственно. Длины соединительных звеньев 11 и 12, соединенных шарниром R_1 , равны; длины соединительных звеньев 21 и 22, соединенных шарниром R_2 , равны; и длины соединительных звеньев 31 и 32, соединенных соединением R_3 , также равны.



Рис. 5. Схема механизма выдвижной установки 3UU-3URU

Оси трех поворотных звеньев пересекаются в точке, обозначенной как Н, а нижние концы поворотных звеньев пересекаются с центральными точками трех нижних узлов, А, В и С, соответственно. Точка О - центр описанной окружности треугольника ABC. Тогда три оси шарниров U_1, U_3 и U_5 возле верхнего узла перпендикулярны плоскостям АОН, ВОН и СОН соответственно, а другие оси этих трех шарниров U перпендикулярны соответствующим поворотным рычагам И предыдущие оси соответственно. Оси шарниров U₂, U₄ и U₆ около нижнего узла параллельны осям шарниров U_1 , U_3 и U_5 возле верхнего узла, соответственно, в то время как другие оси этих трех U-образных соединений U_2 , U_4 и U_6 проходят вдоль оси соответствующих качающихся звеньев. Оси R_1 , R_2 и R_3 перпендикулярны осям соединительных звеньев 11 и 12, соединительных звеньев 21 и 22 и соединительных звеньев 31 и 32 соответственно. Ось соединения U_{ij} (i = 1, 2, 3, j = 1, 2) рядом с

International Electronic Scientific Journal "Science Online" http://nauka-online.com/

соединительным звеном проходит вдоль оси соответствующего соединительного звена, а другая ось параллельна оси соединения R_i . Без ограничения общности оси шарниров R_1 , R_2 и R_3 не параллельны плоскости ABC.

Отличие 3UU-3URU от 3RR-3RRR заключается в увеличенных суставах. Как описано в разделе 2, механизм 3RR-3RRR имеет только одну глубину резкости и не может реализовать регулировку ориентации, поэтому добавляются соединения для уменьшения нескольких ограничений с помощью теории взаимного винта. Таким образом, для исследования предлагается агрегатный механизм 3UU-3URU.

Поскольку три соединения R, оси которых пересекаются в точке, могут быть эквивалентны сферическому соединению (S), оси U_{i1} и U_{i2} рядом с соединительными звеньями и R_i могут быть заменены шарниром S на основе геометрических соотношений осей механизма развертывания 3UU-3URU. Одна ось U-образного шарнира, соединяющего поворотный рычаг и нижний узел, и U-образный шарнир, соединенный с верхним узлом, также может быть заменена S-образным шарниром; затем получается механизм 3RS-3RSR, эквивалентный механизму 3UU-3URU, как показано на рис. 6. International Electronic Scientific Journal "Science Online" http://nauka-online.com/



Рис. 6. Механизм 3RS-3RSR, эквивалентный механизму 3UU-3URU

Для механизма развертываемых модулей 3UU-3URU нет общих или виртуальных ограничений. Согласно формуле G-K, степень свободы установки 3UU-3URU может быть получена как

$$M = 6(n-1) - \sum_{q=1}^{15} u_q = 6 \times 12 - (5 \times 3 + 4 \times 12) = 9$$
(1)

где п представляет количество компонентов, включая основание, $u_q(q = 1, 2, ..., 15)$ представляет количество ограничений, вводимых q-м соединением.

Уравнение (1) показывает, что блок 3UU-3URU имеет девять степеней свободы; то есть, когда верхний узел зафиксирован, узлы A, B и C могут перемещаться в центр O независимо и поддерживать свои соответствующие степени свободы вращения. Таким образом, они также могут выполнять регулировку ориентации.

3.2. Базовые комбинированные агрегаты и способ их сборки

Три базовых развертываемых блока 3UU-3URU могут быть собраны в базовый механизм комбинированного блока, как показано на рис. 7. Эти блоки имеют общий центральный узел и связаны друг с другом через цепочки URU. Три верхних узла базовых блоков также связаны цепочками URU. Поверхность, на которой расположены все нижние узлы, является отражающей поверхностью, а поверхность, на которой расположены все верхние узлы, является опорной поверхностью. Согласно анализу степеней свободы параллельных механизмов, 22, 23, 24 каждая цепочка URU обеспечивает силу ограничения, которая ограничивает независимость двух поступательных степеней свободы двух соседних узлов, а шесть цепочек URU ограничивают шесть степеней свободы базового блока комбинации. В результате степени свободы основного комбинированного блока равны $3 \times 9 - 6 = 21$.



Рис. 7. Базовый механизм комбинированного агрегата, состоящий из трех агрегатных механизмов 3UU-3URU

Большой развертываемый антенный механизм с любой апертурой можно рассматривать как группу связанных между собой базовых механизмов комбинированного блока. Когда два базовых комбинированных блока соединяются цепочками URU, как показано на

рис. 8, цепочка URU вводит ограничивающую силу. Следовательно, степени свободы механизма, показанного на рис. 8, равны 21 × 2 – 2 = 40.



Рис. 8. Соединения базовых комбинационных блоков цепями URU

Когда два базовых комбинированных элемента соединяются тетраэдром, необходимо учитывать непротиворечивость механизма базовых элементов. В этом исследовании выбран тетраэдр 3UU-3URU, как показано на рис. 9. В дополнение к сдерживающей силе, создаваемой цепью URU, вводятся верхний узел и три цепи UU (включая три поворотных звена и шесть U-образных шарниров). по связи. Количество ограничений, вводимых верхним узлом и цепочками UU, равно $3 \times 2 - 6 = 0$. Другими словами, этот режим соединения эквивалентен режиму соединения, показанному на рис. 8. Следовательно, степеней свободы механизма, показанного на рис. 9, также 40.



Рис. 9. Связь между базовыми комбинированными узлами через тетраэдрический узел

Когда три основных комбинированных блока подключаются через второй режим, показанный на рис. 9, образуется замкнутый контур, как показано в пустой средней области на рис. 10. Замкнутый контур эквивалентен ситуации, в которой концевой эффектор последовательная цепь закреплена на основании, и никакие компоненты или кинематические соединения не вводятся в механизм замкнутого контура, образованный этим способом соединения. Следовательно, механизм теряет шесть степеней свободы из-за введения замкнутого контура. Кроме того, узлы на опорной и отражающей поверхностях соединены цепями URU, поэтому к поддерживающей и отражающей цепям добавляются 15 и 3 цепочки URU соответственно. Следовательно, степени свободы механизма, показанного на рис. 10, равны $21 \times 3 - 6 - 1 \times (3 + 15) = 39$.



Рис. 10. Три основных комбинированных блока, соединенных в замкнутый контур

Согласно вышеприведенному анализу трех режимов соединения, развертываемый антенный механизм может быть образован любым количеством базовых блоков комбинации, а также могут быть получены соответствующие степени свободы. Первые два режима подключения имеют одинаковое количество степеней свободы, но во втором режиме используется гораздо больше компонентов. Общая жесткость первых двух режимов ниже, чем у третьего режима. Третий режим соединения имеет относительно меньшее количество степеней свободы, и его узлы на опорной поверхности соединены. Более того, три соседних верхних узла и нижний узел могут образовывать перевернутый механизм блока тетраэдра 3UU-3URU общая В третьем режиме. Следовательно, жесткость развертываемого антенного механизма, подключенного третьим режимом, значительно увеличивается.

3.3. Закон степеней свободы разворачиваемых антенных механизмов с большими отверстиями

Развертываемый механизм поддержки антенны, содержащий $n(n \ge 1)$ петли, может быть получен на основе режимов соединения между базовыми комбинированными блоками, как показано на фиг. 11, фиг. 12, фиг. 13. Степени свободы движений механизмов, показанных на

фиг. 11, фиг. 12, фиг. 13 вычисляются с использованием базового блока комбинирования в качестве базового блока вычисления; это позволяет получить закон степеней свободы антенных механизмов с большими отверстиями.



Рис. 11. Антенный механизм, содержащий одну петлю



Рис. 12. Антенный механизм, содержащий две петли



Рис. 13. Антенный механизм, содержащий три петли

На рис. 14 показано относительное количество деталей в механизме одноконтурной антенны и в механизме двухконтурной антенны. Дополнительные детали в трехконтурном антенном механизме показаны на рис. 15. Согласно расчетам в разделе 3.2, в базовом комбинированном блоке (одноконтурный антенный механизм) имеется 21 степень свободы. Из рисунка 14 видно, что по сравнению с одноконтурным антенным механизмом, двухконтурный антенный механизм имеет на шесть дополнительных базовых комбинированных блоков (с 21 степенью свободы для каждого блока), шесть дополнительных цепей, состоящих из трех поворотных звеньев и верхней части. узел (без ограничений), шесть граничных цепочек URU (каждая из которых обеспечивает ограничение), шесть механизмов замкнутого цикла (каждый из которых обеспечивает шесть ограничений) и 42 цепочки URU, добавленных на поддерживающую поверхность. Следовательно, по сравнению с механизмом с одной рамкой антенны механизм с двумя петлями имеет следующее количество дополнительных степеней свободы:

 $6 \times 21 - 6 \times 0 - 6 \times 1 - 6 \times 6 - 42 \times 1 = 42.$

International Electronic Scientific Journal "Science Online" http://nauka-online.com/



Рис. 14. Дополнительные детали двухконтурного антенного механизма по

сравнению с одноконтурным антенным механизмом



Рис. 15. Дополнительные детали трехконтурного антенного механизма по сравнению с двухконтурным антенным механизмом

Точно так же на рис.15 показано, что по сравнению с двухконтурным антенным механизмом трехконтурный антенный механизм имеет следующие дополнительные части: 12 базовых комбинированных блоков, 12 дополнительных цепей, состоящих из трех качающихся звеньев и верхнего узла, 12 граничных цепей URU, 12 замкнутых механизмов, шесть увеличенных цепей URU из шести базовых блоков комбинации (с пятью степенями свободы для каждого блока) и 96 цепей URU, добавленных на опорную поверхность. Таким образом, по сравнению с двухконтурным

антенным механизмом, трехконтурный антенный механизм имеет следующее количество дополнительных степеней свободы:

 $12 \times 21 - 12 \times 0 - 12 \times 1 - 12 \times 6 - 6 \times 5 - 96 \times 1 = 42$

Точно так же количество дополнительных степеней свободы в четырехконтурном антенном механизме по сравнению с трехконтурным антенным механизмом составляет

 $18 \times 21 - 18 \times 0 - 18 \times 1 - 18 \times 6 - 12 \times 5 - 150 \times 1 = 42$

В целом, количество дополнительных степеней свободы в механизме рамочной антенны і по сравнению с механизмом рамочной антенны і-1 составляет

$$\Delta M = (i - 1) \times 6 \times (21 - 0 - 1 - 6) - (i - 2) \times 6 \times 5 - (9i - 11) \times 6 \times 1 = 42 \ i \ge 2$$

Следовательно, степени свободы развертываемого антенного механизма, состоящего из основных блоков комбинации, показанных на рис. 11, образуют арифметический ряд; то есть количество степеней свободы в антенном механизме, содержащем п петель, равно

 $M = 21 + 42(n-1) \ n \ge 1 \tag{2}$

4. РАСЧЕТ КОНСТРУКЦИИ И МОДЕЛИРОВАНИЕ ФЕРМЕННОЙ АНТЕННЫ НА БАЗЕ РАЗВЕРТЫВАЕМОГО БЛОКА 3UU-3URU

4.1. Структурный дизайн

4.1.1. Масштабная конструкция развертываемого опорного механизма с криволинейной поверхностью

Существует лишь небольшая разница в размерах между блоками 3UU-3URU, составляющими развертываемый антенный механизм, и геометрическое соотношение между основными комбинированными блоками остается неизменным.

В данном исследовании в качестве отражающей поверхности выбран симметричный параболоид с апертурой 4 метра. Он разработан с соотношением фокусных диаметров 0,5 и мелкой фракцией 8. Параболоид

разделен на ряд треугольных единиц; затем получаются центральные точки узлов на отражающей поверхности, а начальная длина синхронных звеньев получается путем соединения двух соседних узлов, как показано на рисунке 16.



Рис. 16. Положение узлов и начальная длина синхронных звеньев на отражающей поверхности

Длина качающихся звеньев установлена на 600 мм, и затем может быть получена начальная длина синхронных звеньев и узлов на задней поверхности, как показано на рис.17.



Рис. 17. Положение узлов и начальная длина синхронных звеньев на задней

поверхности

Наконец, в соответствии с геометрическими ограничениями развертываемых антенных механизмов определяются оси узлов, поворотных звеньев и синхронных звеньев.

4.1.2. Масштабная конструкция развертываемого опорного механизма с криволинейной поверхностью

На основе подробных масштабных параметров, полученных выше, спроектированы ключевые части антенного механизма, включая узлы, поворотные звенья, синхронные звенья и шарниры, как показано на рисунках 18, 19, 20.



Рис. 18. Строение узлов



Рис. 19. Конструкции поворотных звеньев



Рис. 20. Структуры синхронных связей

На рис. 21 показана окончательная конструкция трехмерной модели развертываемой антенны с криволинейной поверхностью.



Рис. 21. Модель трехмерной модели развертываемой антенны с изогнутой поверхностью

4.2. Анализ симуляции

4.2.1. Моделирование движения базового комбинированного блока

Для объяснения закона движения развертываемого антенного механизма, основанного на механизме блока 3UU-URU, в качестве примера в анализе моделирования используется базовый комбинированный блок, т. е. механизм с одной петлей антенны. Имитационная модель базового комбинированного блока устанавливается с помощью программного обеспечения Adams, как показано на рис. 22. Для обеспечения того, чтобы механизм мог реализовать определенное

движение, в имитационную модель необходимо включить не менее 21 драйвера.



Рис. 22. Модель моделирования базового комбинированного блока

Чтобы убедиться, что новый развертываемый механизм может достичь как механизма движения складной, так и ориентации, мы устанавливаем входные смещения драйверов, чтобы обеспечить, чтобы механизм мог достичь складного состояния. Перед переходом в состояние, показанное на фиг. 4, складное движение и регулировка ориентации происходит синхронно. Затем возникает только регулировка ориентации. В состоянии, показанном на фиг. 4, узлы имеют разные ориентации, а узлы на задней поверхности не сложен плотно. Затем мы блокируем драйверы (Motion_7-motion_21) и отрегулируйте входные смещения драйверов (Motion_1-Motion_6), как показано на рис. 22, чтобы продолжать реализовать регулировку ориентации узлов. В конце концов узлы на поверхности отражения и задней поверхности все плотно сложены, и у узлов все имеют одинаковую ориентацию. Все ссылки сложены на месте, и

достигается наименьший общий объем, как показано на рис. 23. . R_v и r_v представляют собой радиус петли конверта узлов на поверхности отражения и опорной поверхности соответственно, h_v представляет собой максимальное расстояние между опорными и отражающими поверхностями.



Рис. 23. Состояние полного складывания

Углы Эйлера ZYX используются для описания ориентации каждого узла относительно базового узла A, показанного на рис. 7 во время движения базового блока 3UU3 URU. Возьмем в качестве примера узел C. Матрица вращения центроидной системы координат, прикрепленной в узле C относительно узла A, равна

$$\begin{aligned} & \stackrel{A}{_{C}}\boldsymbol{R} = \boldsymbol{R}(\boldsymbol{Z},\gamma)\boldsymbol{R}(\boldsymbol{Y},\beta)\boldsymbol{R}(\boldsymbol{X},\alpha) \\ & = \begin{bmatrix} \cos\beta\cos\gamma & \sin\alpha\sin\beta\cos\gamma - \cos\alpha\sin\gamma & \cos\alpha\sin\beta\cos\gamma + \sin\alpha\sin\gamma \\ \cos\beta\sin\gamma & \sin\alpha\sin\beta\sin\gamma + \cos\alpha\cos\gamma & \cos\alpha\sin\gamma\sin\beta - \sin\alpha\cos\gamma \\ -\sin\beta & \cos\beta\sin\alpha & \cos\alpha\cos\beta \end{bmatrix}, \end{aligned}$$
(3)

где α, β и γ представляют собой углы Эйлера.

Матрица вращения ^{*A*}_{*C*}*R* также может быть представлена в следующей форме, связанной с входами драйверов:

$${}^{A}_{C}\boldsymbol{R} = \begin{bmatrix} r_{11}(\theta) & r_{12}(\theta) & r_{13}(\theta) \\ r_{21}(\theta) & r_{22}(\theta) & r_{23}(\theta) \\ r_{31}(\theta) & r_{32}(\theta) & r_{33}(\theta) \end{bmatrix}$$
(4)

где-функция $r_{ij}(\theta)$ - θ , i, j = 1, 2, 3, $\theta = \theta_2 - \theta_1$ и θ_1 , θ_2 представляют собой входы вращения вокруг двух осей, прикрепленных к поворотному звену CL.

Объединение уравнения (3), (4), мы получаем

$$\begin{cases} \alpha = \arctan \frac{r_{32}(\theta)}{r_{33}(\theta)} \\ \beta = -\arcsin r_{31}(\theta) \\ \gamma = \arctan \frac{r_{21}(\theta)}{r_{11}(\theta)} \end{cases}$$
(5)

Кривые изменения во времени α, β и γ получены, как показано на рис. 24.



Рис. 24. Углы Эйлера узла С относительно узла А

Согласно результатам моделирования, начальные значения α, β и γ остаются неизменными в течение 0-34,5с, что указывает на то, что процесс складывания механизма происходит в течение 0-34,5с. В течение этого периода узел С перемещается только и его ориентация остается

неизменным. После 34,5, нелинейные изменения в α, β и γ показывают, что начало ориентации узлов началась. В процессе регулировки ориентации ссылки на качелях продолжают плотно качаться, а узлы на задней поверхности продолжают сложить. Далее подтверждается, что базовый комбинационный блок, состоящий из основных блоков 3UU-3URU, может достичь необходимых движений для регулировки складывания и ориентации.

4.2.2. Анализ скорости складывания базового комбинированного блока

Чтобы лучше проиллюстрировать, что развертываемый механизм, предложенный в этом исследовании, обладает высокой развертывающейся производительностью, скорость складывания определяется как отношение занимаемого пространства в полностью развернутых и сложенных сферического состояниях. Полностью развернутое состояние развертываемого механизма, состоящего из трех основных единиц 3RRRRR, показано на рис. 3. Радиус петли конверты узлов составляет $R_0 =$ 0,5259 м на поверхности отражения, и составляет $r_0 = 0,3845$ м на опорную поверхность с максимальным расстоянием между опорными И отражающими поверхностями $h_0 = 0,5517$ м. Последнее складное состояние сферического развертывающего механизма, состоящего из трех основных единиц 3RRRR, показана на рис. 4. Радиус петли конверта узлов составляет $R_{\mu} = 0.0717$ м на поверхности отражения, а также $r_{\mu} =$ 0,1353 м. Опорная поверхность с максимальным расстоянием между опорным поверхностью и поверхностью отражения является $h_{\mu} = 0,6102$ м. Таким образом, скорость складывания может быть рассчитана как

$$\lambda_1 = rac{V_0}{V_1} = rac{rac{1}{3}\pi R_0^2 \left(h_0 + rac{h_0 r_0}{R_0 - r_0}
ight) - rac{1}{3}\pi r_0^2 rac{h_0 r_0}{R_0 - r_0}}{rac{1}{3}\pi r_u^2 \left(h_u + rac{h_u R_u}{r_u - R_u}
ight) - rac{1}{3}\pi R_u^2 rac{h_u R_u}{r_u - R_u}} = 17.095$$

где V₀ и V₁ обозначают объем развертываемого антенного механизма в полностью развернутых и сложенных состояниях соответственно.

Объем базового механизма комбинированного блока на основе базового блока 3UU-3URU, все еще V_0 в полностью развернутом состоянии. Как показано на рис. 23, в сложенном состоянии радиус петли конверты узлов составляет $R_v = 0,0733$ м на поверхности отражения, и представляет собой $r_v = 0,0564$ м на опорной поверхности, с максимальным расстоянием между опорным и Поверхности отражения являются $h_v = 0,6209$ м. Таким образом, скорость складывания может быть получена как

$$\lambda_{2} = \frac{V_{0}}{V_{2}} = \frac{\frac{1}{3}\pi R_{0}^{2} \left(h_{0} + \frac{h_{0}r_{0}}{R_{0} - r_{0}}\right) - \frac{1}{3}\pi r_{0}^{2}\frac{h_{0}r_{0}}{R_{0} - r_{0}}}{\frac{1}{3}\pi R_{v}^{2} \left(h_{v} + \frac{h_{v}r_{v}}{R_{v} - r_{v}}\right) - \frac{1}{3}\pi r_{v}^{2}\frac{h_{v}r_{v}}{R_{v} - r_{v}}} = 43.8827$$

Согласно результатам приведенных выше расчетов, скорость сворачивания развертываемого механизма, состоящего из базовых блоков 3UU-3URU, очевидно, выше, чем у предлагаемого механизма, состоящего из базовых блоков 3RR-3RRR, что свидетельствует о том, что новый развертываемый механизм имеет хорошую производительность при развертывании.

4.2.3. Моделирование движения нескольких базовых комбинированных блоков

Большой ферменный развертываемый механизм может состоять из нескольких основных комбинированных блоков. На рис. 25 показан такой механизм, состоящий из семи основных комбинационных блоков. Основной комбинированный блок А в центральном положении-это первая петля. Окружающие шесть базовых комбинационных блоков, В-G, являются вторым контуром, а соседние базовые комбинационные блоки соединены цепями URU, образуя замкнутые контуры. На отражающей поверхности может быть построена большая параболическая поверхность.



Рис. 25. Большой ферменный развертываемый механизм, состоящий из семи основных комбинированных блоков

Согласно приведенному выше анализу, механизм базового комбинированного блока, состоящий из базовых блоков 3UU-3URU, может выполнять как складные, так и регулировочные движения ориентации. Когда большой развертываемый механизм собран из семи основных комбинированных блоков, движения складывания и регулировки ориентации также могут быть реализованы путем добавления разумных драйверов, как показано на рис. 26, рис. 27. В конце движения складывания каждый отражающей поверхности узел на плотно складывается, плоскости этих узлов образуют параболическую И поверхность. В конце движения регулировки ориентации узлы на отражающей поверхности и задней поверхности настраиваются так, чтобы они находились в одной плоскости. Это дополнительно подтверждает, что 3UU-3URU комбинированный базовый блок И его блок могут осуществлять не только движение складывания, но и независимую регулировку ориентации, которая, как ожидается, будет применяться к

большим ферменным развертываемым антенным механизмам с криволинейными поверхностями.



Рис. 26. Конец складного движения большого ферменного развертываемого механизма с семью основными комбинированными блоками



Рис. 27. Окончание регулировочного движения ориентации большого ферменного развертываемого механизма с семью базовыми комбинированными блоками

5. ПРЕДСТАВЛЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Учитывая, что механизмы антенны Truss, образованные 3RR-3RRR тетраэдрическими развертывами, нельзя полностью сложить, это исследование предлагает пространственный механизм развертывающего блока с 3UU-3URU для построения развертываемого механизма антенны с изогнутой поверхностью. Предлагаемая антенна имеет два вида DOF, складной перемещения и регулировки ориентации, поэтому недостатки исходного механизма могут быть преодолены.

После того, как DOF-анализ тетраэдраэдрической единицы 3UU-3URU и его основного комбинированного блока предлагается три режима соединения для объединения основных комбинированных блоков в большой механизм антенны и универсальной формулы для расчета DOF развертывающего механизма антенны с N петлей получается.

Шкала и структуры ключевых частей крупного механизма развертываемых ферментируемых антенны на основе блока 3UU-3URU, разработаны и моделирующие модели базового комбинированного блока и развертывания антенны, состоящий ИЗ механизм семи основных комбинированных блоков. Кроме базового прототип того, комбинированного блока изготовлен и собран. Изумилирование и экспериментальные результаты показывают, что механизм развертываемого антенны Truss, основанный на единице 3UU-3URU, имеет два вида DOF, складной перемещения и регулировки ориентации, позволяя антенну быть сложенной полностью. Кроме того, скорость складывания намного выше, чем у антенного механизма, состоящего из единиц 3RR-3RRR.

Литература

- 1. Duan B.Y. "Flexible antenna structure analysis", Optimization and control, Science Press, Beijing (2005).
- Tibert G, "Deployable tensegrity structures for space applications", Royal Institute of Technology (2002).
- Lu S.N., Zlatanov D., Ding X., Molfinoa R. "A new family of deployable mechanisms based on the Hoekens linkage", Mech Mach Theory, 73 (2014), 130-153 6.
- Yang Y., Ding X.L., "Design and analysis of mast based on spatial polyhedral linkages mechanism along radial axes", J Mech Eng, 47 (5) (2011), 26-34 6.

- 5. Ding X.L., Yang Y., Dai J.S., "Design and kinematic analysis of a novel prism deployable mechanism", Mech Mach Theory, 63 (2013), 35-49 6.
- Vu K.K., Richard J.Y., Anandasivam K. "Deployable tension-strut structures: from concept to implementation", Constr Steel Res, 62 (3) (2006), 195-209 6.
- Takamatsu K.A., Onoda J. "New deployable truss concepts for large antenna structures or solar concentrators", J. Spacecr Rockets, 28 (3) (1991), 330-338 6.
- 8. Xu Y., Guan F.L. "Structure-electronic synthesis design of deployable truss antenna", Aerosp Sci Technol, 26 (1) (2013), 259-267 6.
- Chen Y., You Z. "On mobile assemblies of Bennett linkages", Proc R Soc A Math Phys Eng Sci, 464 (2093) (2008), 1275-1293 6.
- 10.Chen Y., You Z., Tarnai T., "Three fold-symmetric Bricard linkages for deployable structures", Int J Solids Struct, 42 (8) (2005), 2287-2301 6.
- 11.Qi X.Z., Li B., Deng Z.Q., Liu R.Q., Guo H.W., "Design and optimization of large deployable mechanism constructed by Myard linkages", CEAS Space J, 5 (3–4) (2013), 147-155 6.
- 12. Wang Y., Deng Z.Q., Liu R.Q., Yang H., Guo H.W. "Topology structure synthesis and analysis of spatial pyramid deployable truss structures for satellite SAR antenna", Chin J Mech Eng, 27 (4) (2014), 683-692 6.
- 13.Warnaar D.B., Chew M. "Kinematic synthesis of deployable-foldable truss structures using graph theory, Part 1: graph generation", ASME J Mech Des, 117 (1) (1995), 112-116 6.
- 14.Chu Z.R., Deng Z.Q., Qi X.Z., Li B. "Modeling and analysis of a large deployable antenna structure", Acta Astronaut, 95 (1) (2014), 51-60 6.
- 15.Wang Y., Liu R.Q., Yang H., Cong Q., Guo H.W. "Design and deployment analysis of modular deployable structure for large antennas", J Spacecr Rockets, 52 (4) (2015), 1101-1111 6.

- 16.Cherniavsky A.G., Gulyayev V.I., Gaidaichuk V.V., Fedoseev A.I.,"Large deployable space antennas based on usage of polygonal pantograph", J Aerospace Eng, 18 (3) (2005), 139-145 6.
- 17.Li T.J. "Deployment analysis and control of deployable space antenna", Aerosp Sci Technol, 18 (1) (2012), 42-47 6.
- 18.Xu Y., Guan F.L., Chen J.J., Zheng Y. "Structural design and static analysis of a double-ring deployable truss for mesh antennas", Acta Astronaut, 81 (2) (2012), 545-554 6.
- 19.Shi C., Guo H.W., Liu R.Q., Deng Z.Q. "Configuration optimization and structural design of double circular deployable antenna mechanism", Acta Astronaut Sin, 37 (7) (2016), 869-878 6.
- 20.Liu W.L., Xu Y.D., Zhao Y.S., Yao J.T., Han B., Chen L.L. "DOF and kinematic analysis of a deployable truss antenna assembled by tetrahedral units", Lect Notes Electr Eng, 408 (2017), 855-868 6.
- 21.Fang H., Shook L., Lin J., Pearson J., Moore J. A large and high radio frequency deployable reflector", 53rdAIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Struct Struct Dyn and Mater Conf; 2012 April 23-26; Honolulu, HI, United states (2012)
- 22.Song Y.M., Qi Y., Dong G., Sun T. "Type synthesis of 2-DoF rotational parallel mechanisms actuating the inter-satellite link antenna", Chinese J Aeronaut, 29 (6) (2016), 1795-1805 6.
- 23.Huo X.M., Sun T., Song Y.M. "A geometric algebra approach to determine motion/constraint, mobility and singularity of parallel mechanism", Mech Mach Theory, 116 (2017), 273-293 6.
- 24.Dong G., Sun T., Song Y.M., Gao H., Lian B.B. "Mobility analysis and kinematic synthesis of a novel 4-DoF parallel manipulator", Robotica, 34 (5) (2016), 1010-1025 6.