

УДК 520.27

НОВАЯ КОНЦЕПЦИЯ ТОЧНОГО ЛЕПЕСТКОВОГО ЗЕРКАЛА ДЛЯ КОСМИЧЕСКОЙ РАДИОАСТРОНОМИИ

В. И. Буякас

Предлагаются новая конструкция и новая схема раскрытия лепесткового зеркала, которые позволят повысить точность отражающей поверхности антенны космического радиотелескопа на орбите и улучшить качество работы инструмента в коротковолновой области спектра.

Ключевые слова: космический рефлектор, кинематика раскрытия, ненапряженная структура, математическая модель, компьютерное и физическое моделирование.

Введение. Разработке и исследованию твердотельных лепестковых космических зеркальных антенн посвящено значительное количество работ [1–4]. Классическая схема раскрывающегося лепесткового зеркала была предложена корпорацией Дорнье в рамках работ по проекту FIRST (FarInfraredSpaceTelescope) [5, 6]. Схожая конструкция позднее использовалась в проекте “Радиоастрон” [7] для создания 10-метровой антенны космического телескопа, работавшего в сантиметровой области спектра.

Классическая конструкция лепесткового зеркала и ее недостатки. Классическая конструкция лепесткового зеркала представляет собой трансформируемую структуру, которая включает в себя центральное зеркало и набор лепестков. У основания каждого лепестка расположен цилиндрический шарнир, связывающий лепесток с центральным зеркалом. В транспортном положении лепестки находятся в вертикальном положении над центральным зеркалом. После доставки конструкции на орбиту зеркало раскрывается – переводится в рабочее состояние. Раскрытие осуществляется синхронным вращением лепестков вокруг осей цилиндрических шарниров. В раскрытом, рабочем состоянии лепестки и центральное зеркало образуют большой параболический рефлектор. На рис. 1 представлены этапы раскрытия зеркала.

Классическая конструкция обладает, однако, двумя существенными недостатками. Во-первых, в рабочем состоянии длинные лепестки консольно закреплены на центральном зеркале, что приводит к невысокой жесткости раскрытого рефлектора. Во-вторых,

ФИАН, 119991 Россия, Москва, Ленинский пр-т, 53; e-mail: bujakas@yandex.ru.

цилиндрические шарниры и исполнительные механизмы находятся у основания длинных лепестков, и малые ошибки в установке осей шарниров и в работе исполнительных механизмов приводят к значительным отклонениям положения внешней кромки лепестка от расчетного состояния. Требования к точности положения точек на внешней кромке очень высокие, при рабочей длине волны $\lambda = 1.35$ см вершины соседних лепестков необходимо совместить с точностью $\Delta = \lambda/16 = 0.084$ мм. Причем совмещение осуществляется без обратной связи. В миллиметровой области спектра эта точность на порядок выше. При длине лепестков 3.5 – 5 метров возникает технически сложная задача. По этой причине КИП (коэффициент использования поверхности) антенны “Радиоастрона” на длине волны 1.35 см на орбите оказался равным 0.1 [8]. Это означает, что в коротковолновой области спектра 10-метровый рефлектор работал как точное 3-метровое зеркало. Ранее нами были предложены [9, 10] технические решения, направленные на улучшение качества лепесткового зеркала в коротковолновой области спектра. Настоящая работа является продолжением этих исследований.

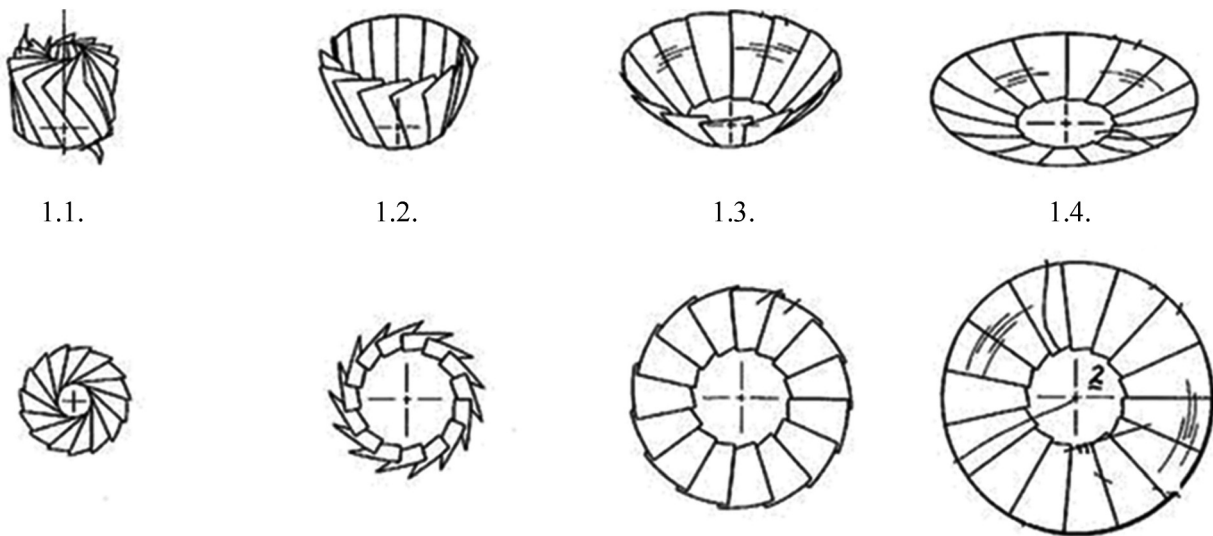


Рис. 1: Последовательность разворачивания классического лепесткового зеркала. Каждый лепесток связан с центральным зеркалом цилиндрическим шарниром.

Новая конструкция лепесткового зеркала. Для того чтобы устранить названные недостатки в рамках нового технического решения, предлагается изменить схему раскрытия зеркала – совместить левую вершину одного лепестка с верхней кромкой соседнего лепестка и осуществлять раскрытие синхронным перемещением вершин по кромкам (рис. 2(с), 3(а)). Такой подход позволит обеспечить высокую точность совмещения

вершин соседних лепестков в конечный момент раскрытия, а связи между лепестками по внешнему контуру раскрытого зеркала повысят жесткость конструкции в рабочем состоянии.

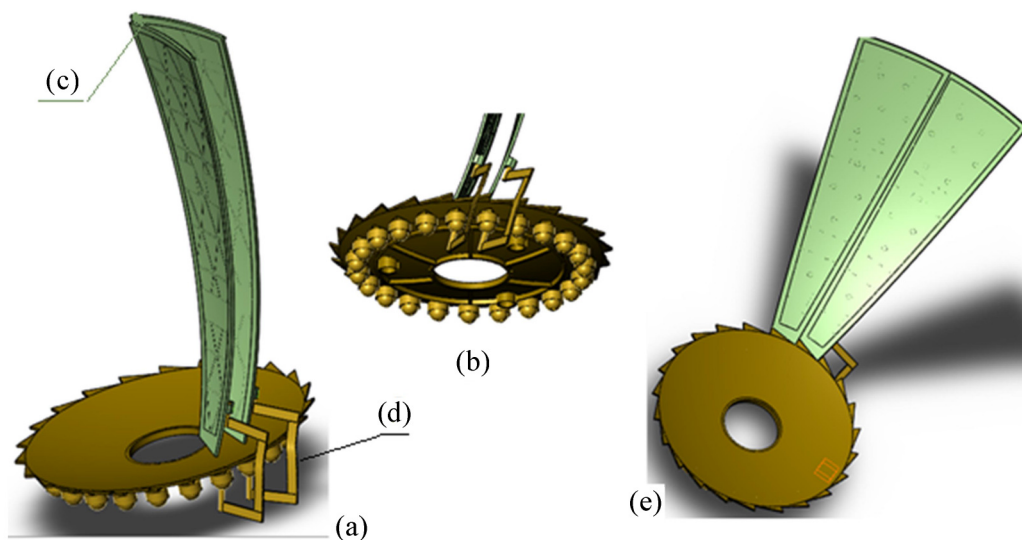


Рис. 2: Новая конструкция лепесткового зеркала. Центральное зеркало, лепестки, кронштейны и сферические шарниры. (а) Лепестки в транспортном положении. (б) Сферические шарниры на обратной стороне центрального зеркала. (с) Сферический шарнир, связывающий вершину одного лепестка с кромкой соседнего лепестка. (д) Кронштейн, связывающий лепесток с центральным зеркалом, кронштейн жестко связан с лепестком. (е) Лепестки в рабочем (раскрытом) состоянии.

Однако прямо использовать эту идею не удастся – цилиндрические шарниры, связывающие лепестки с центральным зеркалом в классической схеме раскрытия, препятствуют требуемому взаимному перемещению лепестков. Для того чтобы такое перемещение оказалось возможным, в конструкцию вводятся следующие изменения. Каждый лепесток связывается с центральным зеркалом кронштейном (рис. 2(а)). Один конец кронштейна жестко закреплен на лепестке, второй – с помощью сферического шарнира соединен с центральным зеркалом. Сферические шарниры расположены на обратной стороне центрального зеркала (рис. 2(б)). Кроме этого, в точке соединения вершины одного лепестка и кромки соседнего лепестка также устанавливается сферический шарнир (рис. 2(с)), который перемещается по кромке лепестка в процессе раскрытия. Для осуществления этого технического решения предлагается использовать малогабаритные исполнительные механизмы и разместить их в точках совмещения вершин и

крайков соседних лепестков. В каждый момент раскрытия конструкция трансформируемого зеркала должна оставаться: а) геометрически неизменяемой и б) ненапряженной (статически определимой).

Легко проверить, что *необходимое условие* геометрической неизменяемости и статической определимости в конструкции выполнено. Действительно, с одной стороны, каждый лепесток, связанный с центральным зеркалом сферическим шарниром, обладает относительно центрального зеркала тремя степенями свободы. С другой стороны, каждый сферический шарнир, связывающий соседние лепестки, вносит в конструкцию три кинематических ограничения. Таким образом, общее количество степеней свободы равно количеству кинематических ограничений и *необходимое условие* статической определимости и геометрической неизменяемости в каждый момент раскрытия в конструкции *выполнено*.

Для проверки выполнения *достаточного* условия геометрической неизменяемости конструкции построена математическая модель, описывающая кинематику раскрытия, найдена матрица совместности деформаций конструкции и показано, что в каждый момент раскрытия определитель матрицы совместности деформаций отличен от нуля (условия геометрической неизменяемости). Тем самым доказана возможность ненапряженного раскрытия новой конструкции трансформируемого зеркала.

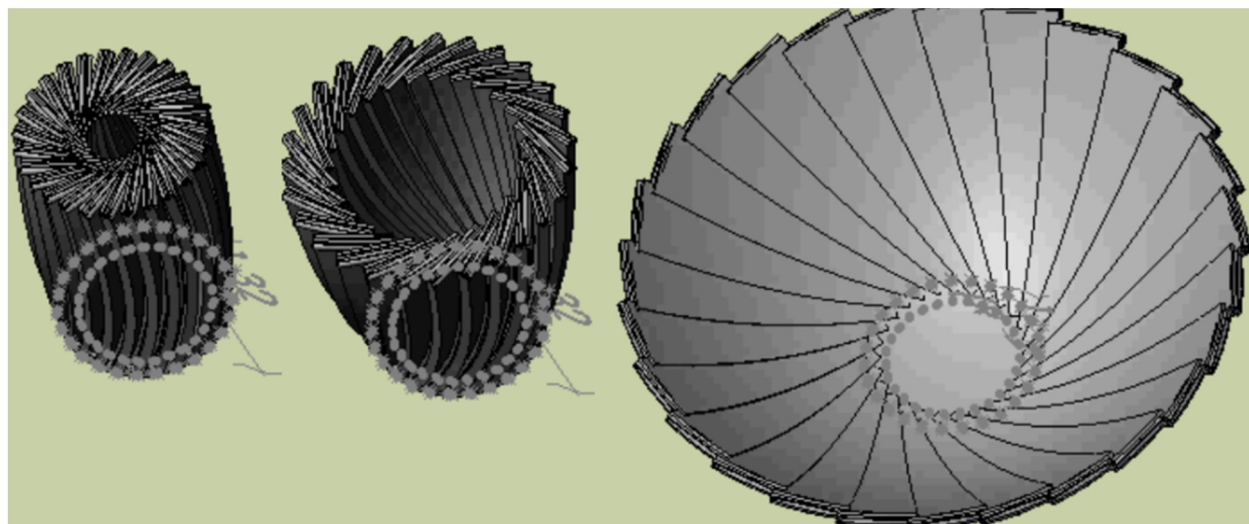


Рис. 3: Компьютерное моделирование раскрытия лепесткового зеркала.

Компьютерное и физическое моделирование новой системы раскрытия. Для проверки предложенного технического решения в пакете SolidWorks была построена компьютерная модель новой конструкции трансформируемого зеркала. Моделирование

подтвердило возможность ненапряженного раскрытия составного рефлектора. Фрагменты моделирования представлены на рис. 3.

Предварительные результаты физического моделирования представлены на рис. 4, 5. Физическая модель включает в себя центральное зеркало, набор лепестков, блок сферических шарниров, размещаемых на обратной стороне центрального зеркала (рис. 4(a), 4(c)), набор малогабаритных исполнительных механизмов, используемых для раскрытия зеркала (рис. 5). Сферические шарниры центрального зеркала используются для присоединения лепестков к центральному зеркалу (рис. 4(b), (c)).

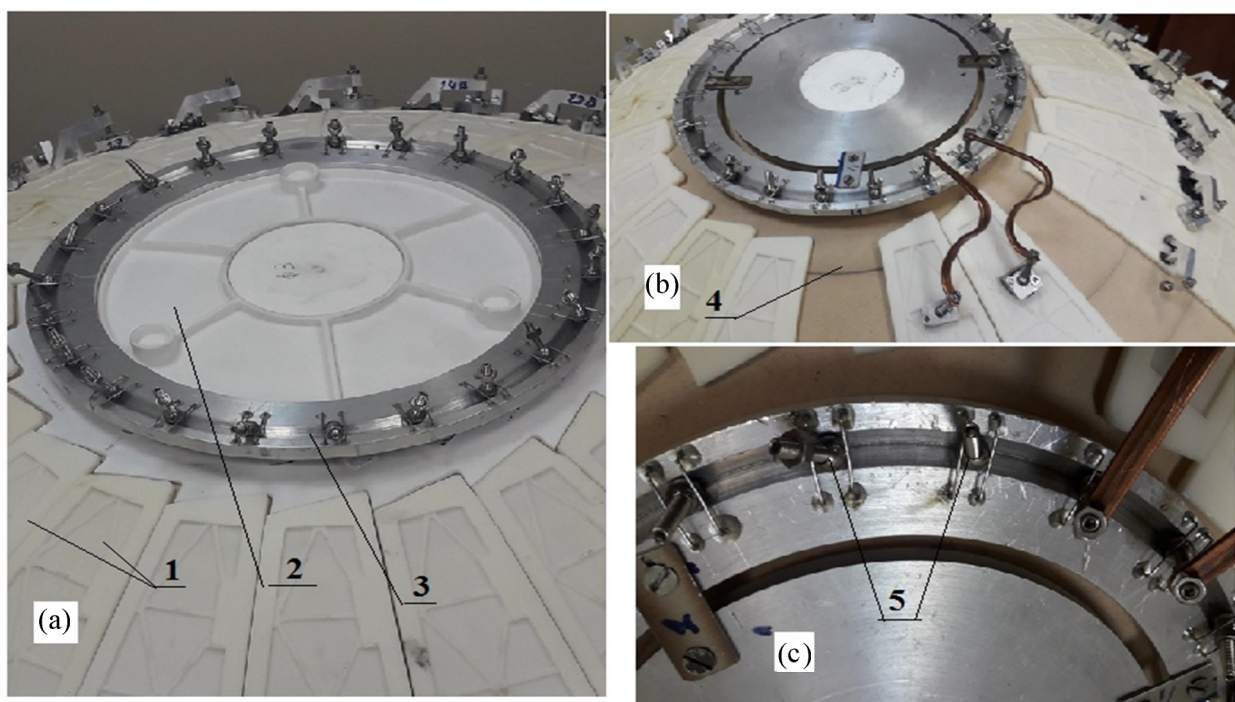


Рис. 4: Сборка составного зеркала на шаблоне. (a) Лепестки (1), центральное зеркало (2), блок сферических шарниров центрального зеркала (3) на параболическом шаблоне (4). (b) Связи, соединяющие лепестки и центральное зеркало на шаблоне (4). (c) Сферические шарниры (5) на обратной стороне центрального зеркала.

Физическое моделирование осуществляется в два этапа. Вначале лепестки и центральное зеркало размещаются на параболическом шаблоне (рис. 4). На обратной стороне центрального зеркала закрепляется блок сферических шарниров, и осуществляется точное вклеивание элементов, соединяющих лепестки и центральное зеркало. Затем собранное на шаблоне раскрытое зеркало разбирается и вновь собирается в транспортном состоянии (рис. 5). После этого проводится отладка системы раскрытия.

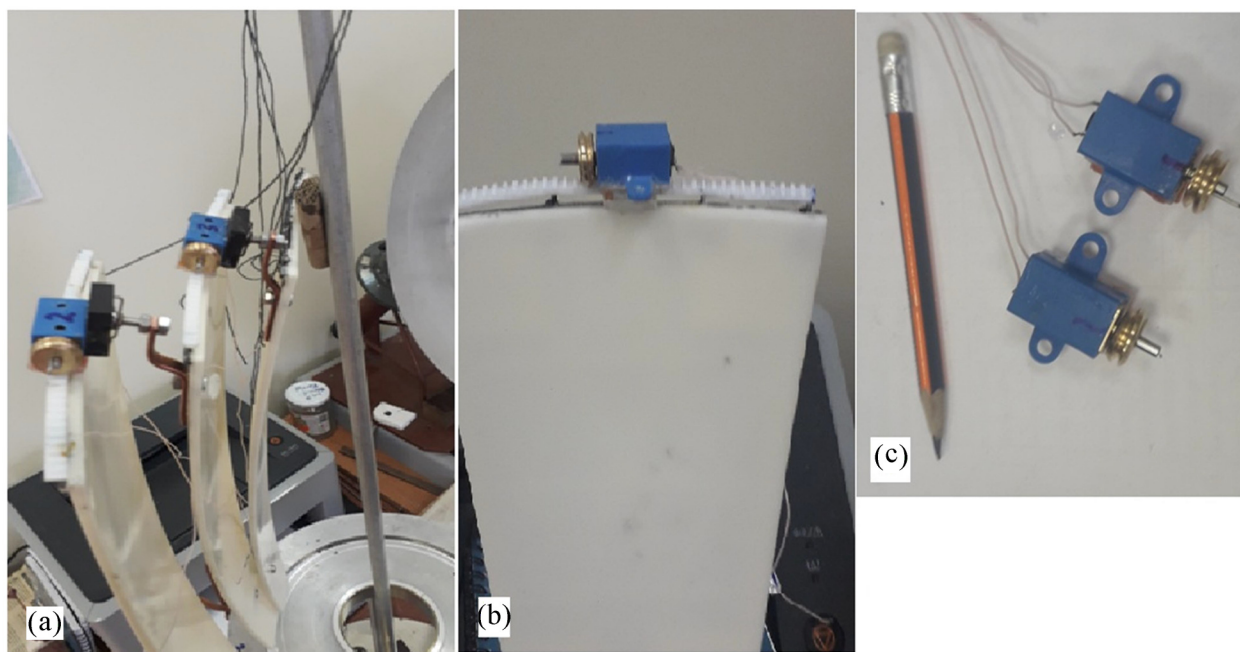


Рис. 5: Линейные исполнительные механизмы на кромке лепестка. (а) Лепестки в транспортном положении. (б) Исполнительный механизм на кромке лепестка. (с) Вид исполнительных механизмов.

Заключение. Рассмотрены новая конструкция и новая схема раскрытия точного лепесткового зеркала. Предложенные решения позволят создавать космические радиотелескопы, эффективно работающие в коротковолновой области спектра.

Л И Т Е Р А Т У Р А

- [1] N. S. Kardashev and V. I. Slysh. Proceedings of the 129th Symposium of the International Astronomical Union **129**, 433 (1988).
- [2] <http://www.asc.rssi.ru/millimetron>.
- [3] Tao An et al., Advances in Space Research **65**(2), 850 (2020). DOI: 10.1016/j.asr.2019.03.030.
- [4] He Huang et al., Acta Astronautica **148**, 99 (2018). DOI: 10.1016/j.actaastro.2018.04.042.
- [5] Dornier Dornier, FIRST Technology study: multisurface control mechanism for a deployable antenna. Final report. Dornier Report RP-FA-D003 (1987).

- [6] M. Westphal, United States Patent **4.899**, 167 (1990).
- [7] <http://www.asc.rssi.ru/radioastron>.
- [8] Н. С. Кардашев и др., *Астрономический журнал* **90**(3), 179 (2013). DOI: 10.1134/S1063772913030025.
- [9] V. I. Вуякас, *Multibody Mechatronic Systems* **25**(2), 391 (2015). DOI: <https://doi.org/10.1007/978-3-319-09858-6>.
- [10] В. И. Буякас, *Журн. техн. физ.* **88**(11), 1698 (2018). DOI: 10.21883/JTF.2018.11.46633.2547.

Поступила в редакцию 24 августа 2020 г.

После доработки 25 января 2021 г.

Принята к публикации 26 января 2021 г.