

ФИЗИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ СИСТЕМЫ РАСКРЫТИЯ НОВОГО ЛЕПЕСТКОВОГО ЗЕРКАЛА ДЛЯ КОСМИЧЕСКОЙ РАДИОАСТРОНОМИИ

В. И. Бужакас, М. Д. Готов

Для создания больших космических радиотелескопов следующего поколения, работающих в коротковолновой области спектра, необходимо существенно повысить точность отражающей поверхности главного зеркала радиотелескопа. Ранее для решения этой задачи нами была предложена [1] новая концепция твердотельного трансформируемого лепесткового зеркала. В настоящей работе приводятся результаты физического моделирования новой схемы раскрытия лепесткового зеркала. Цель работы – улучшить качество классической лепестковой конструкции в коротковолновой области спектра.

Ключевые слова: трансформируемый космический рефлектор, новая схема раскрытия, физическое моделирование, сборка на шаблоне, результаты моделирования.

Введение. Классическая схема раскрывающегося лепесткового зеркала была предложена корпорацией Дорнье в рамках работ по проекту FIRST (Far Infrared Space Telescope) [2, 3]. Схожая конструкция позднее использовалась в проекте Радиоастрон [4] для создания 10 метровой антенны космического телескопа, работавшего в сантиметровый области спектра. В телескопах следующего поколения [5, 6] также планируется использовать различные варианты лепестковых зеркал. 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.

Недостаток классической схемы раскрытия лепесткового зеркала. Классическая конструкция обладает, однако, существенным недостатком. 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 высокие, при рабочей длине волны $\lambda = 1.35$ см вершины соседних лепестков необходимо совместить с точностью $\Delta = \lambda/16 = 0.84$ 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 [7]. Это означает, что в коротковолновой области спектра 10 метровый рефлектор работал как точное 3-х метровое зеркало.

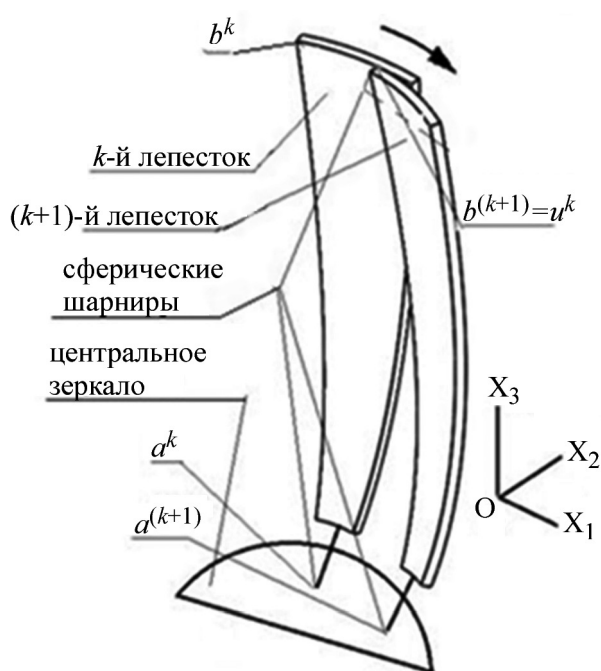


Рис. 1: Кинематика новой системы раскрытия. Левая вершина $(k + 1)$ -го лепестка связана с кромкой k -го лепестка и перемещается в процессе раскрытия по кромке лепестка исполнительным механизмом.

Новая конструкция лепесткового зеркала. Для того чтобы устранить названный недостаток 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. 1). 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.

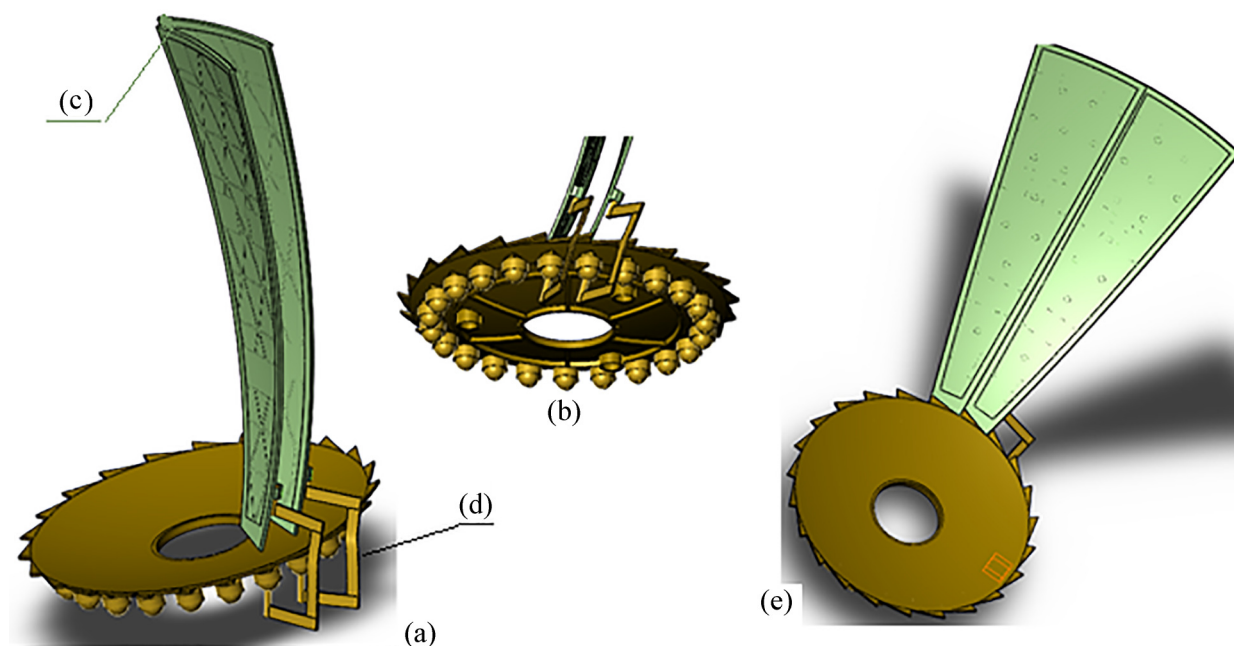


Рис. 2: Новая конструкция лепесткового зеркала. Центральное зеркало, лепестки, кронштейны и сферические шарниры. (а) Лепестки в транспортном положении. (б) Сферические шарниры на обратной стороне центрального зеркала. (с) Сферический шарнир, связывающий вершину одного лепестка с кромкой соседнего лепестка. (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 желаемое 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(в)). 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 нового технического решения предлагается использовать малогабаритные исполнительные механизмы и разместить их в точках совмещения вершин и кромок соседних лепестков. В каждый момент раскрытия конструкция трансформируемого зеркала должна оставаться а) геометрически неизменяемой и б) ненапряженной (статически определимой).

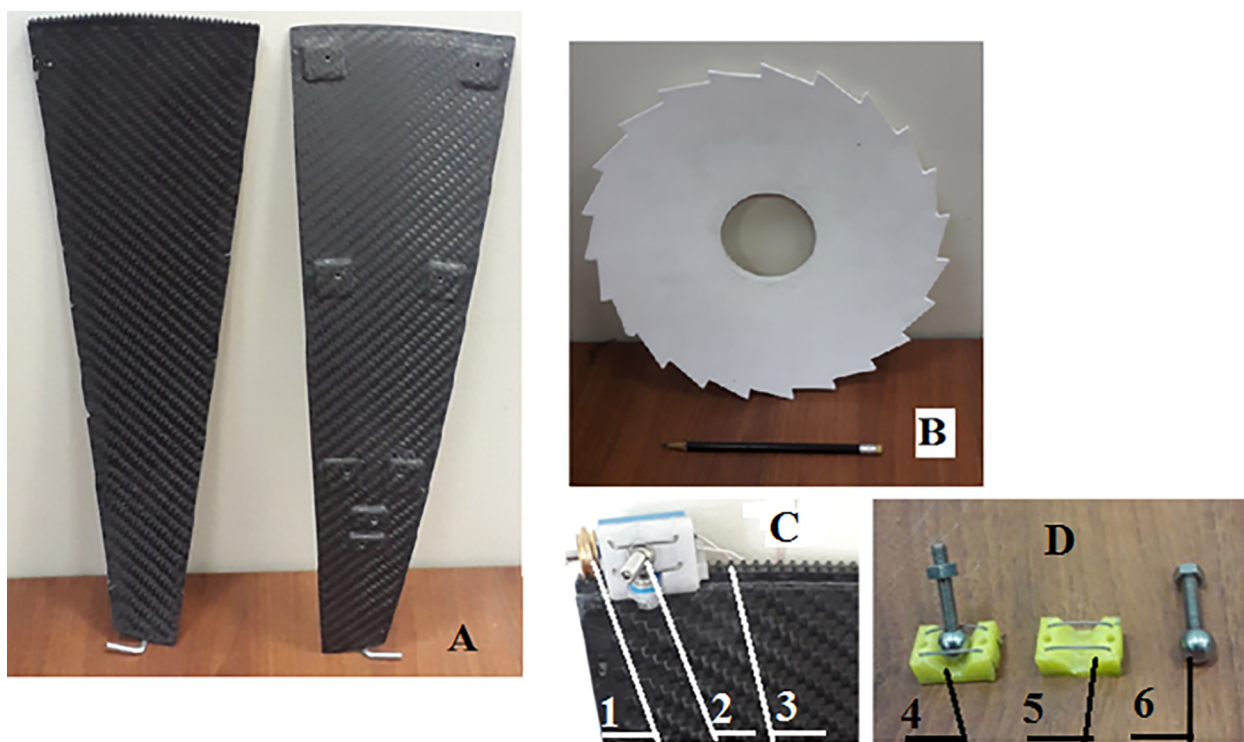


Рис. 3: Элементы макета: А – углепластиковые лепестки, В – центральное зеркало, С – линейный исполнительный механизм на кромке лепестка, 1 – линейный исполнительный механизм, 2 – сферический шарнир, 3 – зубчатая рейка червячной пары, D – самоустанавливающийся сферический шарнир; 4 – шарнир в сборе, 5 – V-образный паз, снабженный пружинным захватом, 6 – сферическая опора.

Физическое моделирование новой системы раскрытия. Для проверки задуманного была построена физическая модель новой конструкции лепесткового зеркала. Модели-

ровалось раскрытие 10 метрового параболического рефлектора в масштабе 1:10. Лепестки макета выполнены из углепластика (рис. 3А), центральное зеркало изготовлено на ЧПУ из АБС пластика (рис. 3В).

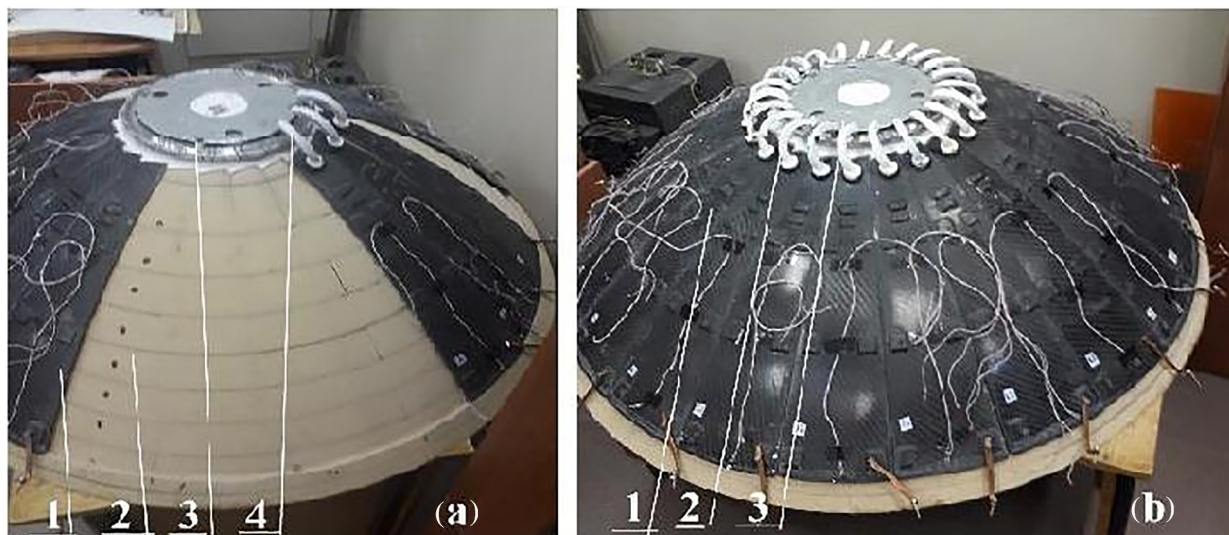


Рис. 4: Сборка макета составного зеркала на параболическом шаблоне: (а) 1 – лепесток, 2 – параболический шаблон, 3 – блок сферических шарниров центрального зеркала, 4 – кронштейн, соединяющий лепесток с центральным зеркалом; (б) 1 – лепесток, 2 – кронштейн, соединяющая лепесток с центральным зеркалом, 3 – блок сферических шарниров центрального зеркала.

Сборка зеркала проводилась на параболическом шаблоне, форма поверхности которого совпадает с формой отражающей поверхности раскрытого рефлектора (рис. 4). На шаблон последовательно устанавливались центральное зеркало и лепестки.

Сферические шарниры, используемые для соединения лепестков с центральным зеркалом, выполнены в виде блока, который закреплен на обратной стороне центрального зеркала. Лепестки связаны с центральным зеркалом кронштейнами. Один конец кронштейна соединяется со сферическим шарниром центрального зеркала, второй – жестко закрепляется (вклеивается на шаблоне) на нижнем основании лепестка (рис. 4(б)) .

Сферические шарниры макета выполнены в виде самоустанавливающихся замков, которые ограничивают три степени свободы во взаимном перемещении соединяемых элементов. Замок (рис. 3Д, 4) состоит из двух частей: сферической опоры и V-образного паза с пружинным захватом (“папы” и “мамы”, male and female). В рабочем состоянии сфера (первая часть замка) удерживается на дне V-образного паза (вторая часть замка).

В этом состоянии положение центра сферы однозначно определено и является состоянием равновесия конструкции. Поэтому конструкция допускает, во-первых, простую разборку и простую повторную сборку, во-вторых, поверхность раскрытого зеркала с высокой степенью точности повторяет форму поверхности шаблона.

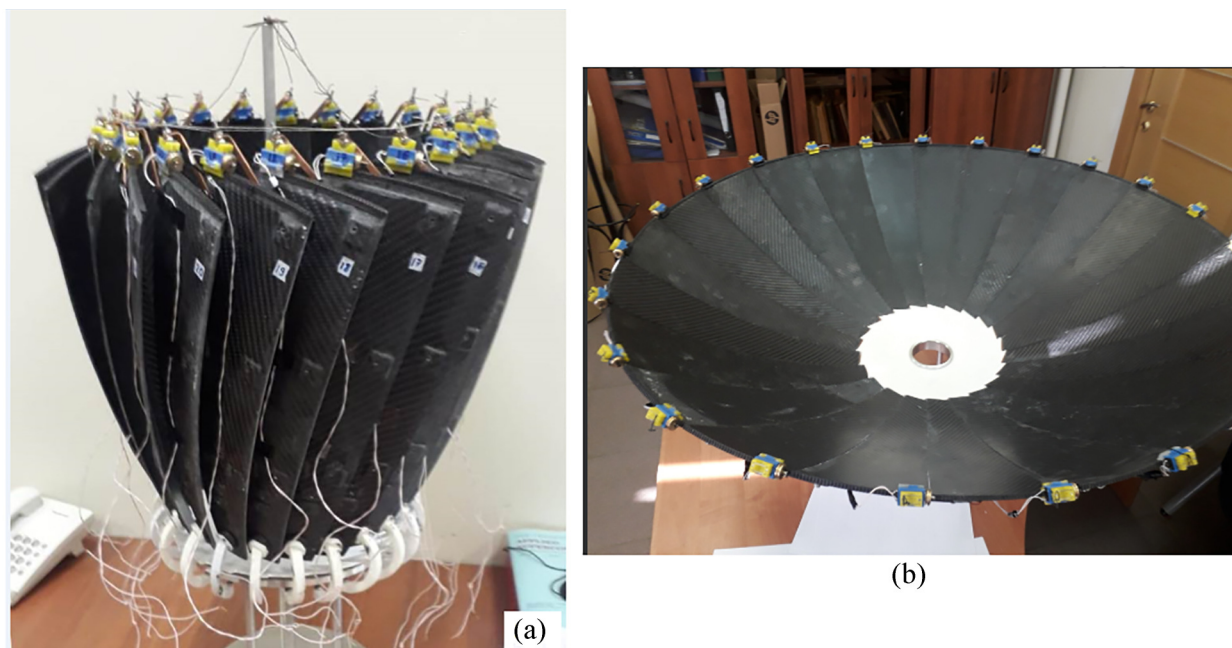


Рис. 5: Трансформируемое зеркало в сложенном (a) и раскрытом (b) состоянии.

Раскрытие составного рефлектора осуществляется линейными исполнительными механизмами (рис. 3(c)). Каждый механизм перемещает вершину одного лепестка по кромке соседнего лепестка. В точке соединения соседних лепестков расположен сферический шарнир. Конструкция остается статически определимой в каждый момент раскрытия, поэтому высокая синхронизация работы исполнительных механизмов не требуется. Физическое моделирование осуществляется в два этапа. На первом этапе происходит монтаж модели составного зеркала на шаблоне (рис. 4). На втором этапе собранное зеркало снимается с шаблона и устанавливается на испытательной стойке (рис. 5(a)). После этого осуществляются испытания системы раскрытия (рис. 5(b)).

Заключение. Испытания макета подтвердили возможность ненапряженного раскрытия нового лепесткового зеркала. Следующий этап физического моделирования будет посвящен исследованию точности и повторяемости раскрытия нового трансформируемого рефлектора.

Л И Т Е Р А Т У Р А

- [1] В. И. Буюкас, Краткие сообщения по физике ФИАН **48**(3), 22 (2021). DOI: 10.3103/S1068335621030039.
- [2] Dornier, FIRST Technology study. Final report. RP-FA-D003, (1987).
- [3] M. Westphal, United States Patent 4.899,167, (1990).
- [4] N. S. Kardashev, V.I. Slysh, The RADIOASTRON Project. Proceedings of Symposium of International Astronomical Union: The Impact of VLBI on Astrophysics and Geophysics **129**, 433 (1988). DOI: <https://doi.org/10.1017/S0074180900135211>.
- [5] <http://www.asc.rssi.ru/millimetron>.
- [6] Tao An et al., Advances in Space Research **65**(2), 850 (2020). DOI: 10.1016/j.asr.2019.03.030.
- [7] Н. С. Кардашев и др., Астрономический журнал **90**(3), 179 (2013). DOI: 10.1134/S1063772913030025.

Поступила в редакцию 14 мая 2021 г.

После доработки 22 июля 2021 г.

Принята к публикации 23 июля 2021 г.

Публикуется по рекомендации оргкомитета 1-ой “Московской Международной конференции по миллиметровой и субмиллиметровой астрономии”, 12–16 апреля 2021, АКЦ ФИАН.