

Авиационная и ракетно-космическая техника

УДК 539.4; 539.37.001.8

doi: 10.18698/0536-1044-2021-2-41-55

Анализ современного состояния и перспективы развития методов контроля натяжения радиоотражающего сетеполотна на развертываемый каркас крупногабаритной зеркальной антенны

С.Н. Саяпин^{1,2}¹ МГТУ им. Н.Э. Баумана² Институт машиноведения им. А.А. Благонравова РАН

Analysis of Current State and Prospects for Development of Methods for Monitoring Tension of Radio-Reflecting Mesh on Deployable Frame of Large Mirror Antenna

S.N. Sayarin^{1,2}¹ Bauman Moscow State Technical University² Blagonravov Mechanical Engineering Research Institute of the Russian Academy of Sciences

Рассмотрены проблемы разработки оперативного автоматизированного метода контроля усилия и равномерности натяжения радиоотражающего сетеполотна на развертываемый каркас крупногабаритной зеркальной антенны. Проведен анализ известных методов контроля, на основе которого они подразделены на контактные механические и бесконтактные оптические. Показано, что лишь оптические методы обеспечивают автоматизированный контроль усилия натяжения радиоотражающего сетеполотна на каркас. Среди оптических только метод муаровых полос позволяет создавать непосредственную картину равномерности натяжения радиоотражающего сетеполотна на всей поверхности. Метод основан на выявленной связи муаровых картин с равномерностью и усилием натяжения радиоотражающего сетеполотна. Показаны достоинства этого метода, основным из которых является возможность установки радиоотражающего сетеполотна на каркас зеркала антенны в режиме реального времени. Благодаря универсальности предложенный метод может быть использован в любых других конструкциях, где проверяемый элемент является сеткой, независимо от материала, из которого он изготовлен.

Ключевые слова: развертываемые зеркальные антенны, натяжение радиоотражающего сетеполотна, муаровые картины

The article considers the problems of developing an operating automated method for monitoring the force and uniformity of tension of a radio-reflecting mesh on the deployable

frame of large mirror antennas. Based on the performed analysis of known control methods they are classified as contact mechanical methods and non-contact optical ones. It is shown that only optical monitoring methods provide automated control of the tension force of the radio-reflecting mesh on the frame. Among the known optical methods for monitoring, only the moire band method allows creating an immediate picture of the uniformity of the tension of the radio-reflecting mesh over the entire surface under consideration. The method is based on the revealed relationship of moire patterns with the uniformity and tension force of the radio-reflecting mesh. The advantages of the described method are shown; the main advantage is the possibility of installing a radio-reflecting mesh on the deployable frame of the large mirror antenna in real time. Due to its versatility, the proposed method can be used in any other structures where the element being tested is a grid, regardless of the material from which it is made.

Keywords: deployable large mirror antenna, tension of radio-reflecting mesh, moire bands

На протяжении около полувека в нашей стране и за рубежом активно ведутся работы по созданию автоматически раскрываемых на орбите крупногабаритных зеркальных антенн с жестким ферменным каркасом [1–3] или зонтичного типа со сворачиваемыми или раскрываемыми профилированными радиальными ребрами, между которыми натянуто радиоотражающее сетеполотно (РС) [4–6].

Диаметр зеркал антенн с ферменным складным каркасом может достигать 100 м и более, а зонтичного типа — нескольких десятков мет-

ров. В сложенном положении конструкции разворачиваемых зеркальных космических антенн (РЗКА) ограничены габаритными размерами полезной зоны под обтекателем ракеты-носителя. Таким образом, конструкция крупногабаритного разворачиваемого каркаса зеркала антенны с РС должна обладать большим коэффициентом трансформации (1/10...1/50) и высокой надежностью раскрытия.

Общий вид офсетной РЗКА с ферменным каркасом диаметром 100 м (одного из первых проектов такого типа), разработанный в США фирмами Langley Research Center и Lockheed Missiles and Space Company (LMSC) [1], приведен на рис. 1. В раскрытом положении РЗКА представляет собой космический аппарат 1 с облучателями, выставленными после раскрытия сложенных ферменных опор 2 в фокусе зеркала антенны 3 (рис. 1, а).

После раскрытия зеркало РЗКА имеет жесткую ферменную конструкцию, состоящую из шарнирно соединенных друг с другом тетраэдральных ячеек 4. Последние выполнены в виде трех диагональных 6 и трех складывающихся 5 стержней (рис. 1, б–г), шарнирно связанных центральными узлами 7. Схемы тетраэдральной ячейки в сложенном, промежуточном и раскрытом положениях изображены на рис. 1, б–г.

В качестве РС применено эластичное металлическое сетеполотно 8, прикрепленное к складывающимся стержням тетраэдральных ячеек с рабочей стороны ферменного каркаса рефлектора. Автоматическое раскрытие всех тетраэдральных ячеек происходит синхронно под действием упругих сил пружинных механизмов. После раскрытия каркаса и фиксации складывающихся стержней эластичное металлическое РС оказывается натянутым с заданным усилием

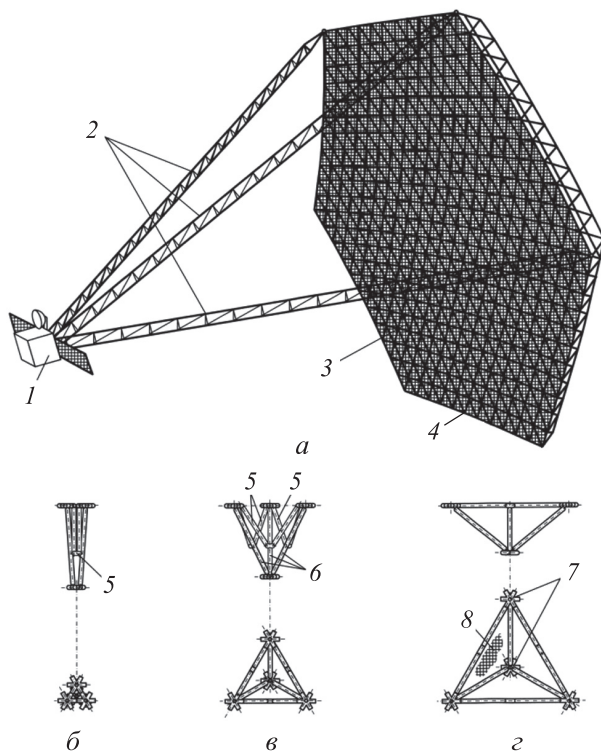


Рис. 1. Внешний вид офсетной РЗКА с ферменным каркасом (а) и схемы его тетраэдральной ячейки в сложенном (б), промежуточном (в) и раскрытом (г) положениях

на жестком ферменном каркасе рефлектора антенны.

Внешний вид зонтичной РЗКА телекоммуникационного спутника ATS-6 (Applications Technology Satellite-6) производства компании LMSC диаметром 30 футов (9,144 м) с 48 сворачиваемыми профилированными ребрами [4] приведен на рис. 2, а.

Спутник-ретранслятор «Луч-15» разработки АО «Информационные спутниковые системы им. академика М.Ф. Решетнёва» (АО «ИСС» им. М.Ф. Решетнёва) с тремя РЗКА диаметром 4,5; 3,0 и 1,6 м [6] приведен на рис. 2, б. Механизмы раскрытия таких конструкций (на рис. 1, 2 не показаны) могут быть выполнены на основе пружин кручения, сжатия (растяжения) и электромеханических приводов [1–6].

При необходимости обеспечения высокой жесткости конструкции крупногабаритного развертываемого зеркала РЗКА предпочтение отдают складному ферменному каркасу двойной кривизны, состоящему из шарнирно связанных между собой подпружиненных на раскрытие складных и цельных стержней. При этом наибольшей удельной жесткостью обладают ферменные каркасы, построенные из ячеек тетраэдральной формы [1] (см. рис. 1).

Рабочая поверхность таких зеркал аппроксимирована треугольными плоскими ячейками (фацетами) с натянутым на них трикотажным сетчатым материалом из металлических монокристаллов и комплексных нитей, так как они в наибольшей степени отвечают требованиям [7–11].

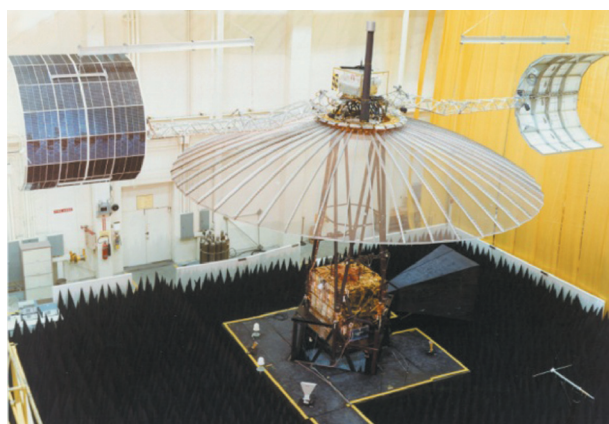
Среди большого разнообразия структур трикотажа основными являются переплетения, являющиеся наиболее предпочтительными для произ-

водства РС крупногабаритных РЗКА с точки зрения надежности их раскрытия при отсутствии складок и других дефектов [12, 13]. При изготовлении РС, предназначенного для эксплуатации на низких частотах, используют никелированную проволоку из нержавеющей стали, а для РС, функционирующего на высоких частотах, — позолоченную молибденовую или вольфрамовую проволоку.

В настоящее время РС большей части РЗКА выполняют из одножильной позолоченной молибденовой проволоки диаметром 25,4 мкм, как это сделано в проекте AstroMesh американской компании Northrop Grumman Aerospace Systems — NGAS (рис. 3, а), а также из одно- или многожильной позолоченной вольфрамовой проволоки (рис. 3, б) [12, 13]. При этом в работе [14] отмечено, что одножильную вольфрамовую проволоку используют реже, чем многожильную, так как в процессе вязания она часто рвется. Наиболее предпочтительным типом плетения РС по механическим и радиотехническим характеристикам является атлас — атлас [13, 15].

Образец японского РС из позолоченной молибденовой проволоки диаметром 30 мкм, установленного на офсетном развертываемом космическом рефлекторе диаметром 9,2 м, показан на рис. 3, в [16].

К самым передовым европейским типам РС для крупногабаритных РЗКА следует отнести позолоченный металлтрикотаж разработки немецких компаний ITA RWTH (Institut für Textiltechnik Aachen of Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule) [17] (рис. 3, г), High Performance Space Structure Systems GmbH (HPS



а



б

Рис. 2. Внешний вид зонтичных РЗКА телекоммуникационного спутника ATS (а) и спутника-ретранслятора «Луч-15» (б)

GmbH) [18] (рис. 3, *д*) и High Performance Textiles GmbH (HPTEX GmbH) [19] (рис. 3, *е*).

Работы по созданию отечественных металлтрикотажных РС для крупногабаритных РЗКА ведутся с начала 70-х годов прошлого века по настоящее время в РГУ им. А.Н. Косыгина совместно с АО «ИСС» им. М.Ф. Решетнёва [11, 20, 21]. Варианты структур отечественных металлтрикотажных РС основаны на переплетениях приведены на рис. 4. Все они не уступают зарубежным аналогам, а при использовании комплексных нитей диаметром 15 мкм в несколько сложений (рис. 4, *з*) превосходят их по удельной массе и другим параметрам. При этом АО «ИСС» им. М.Ф. Решетнёва — единственное предприятие космической отрасли России, обладающее уникальной технологией изготовления позолоченного металлтрикотажа (см. рис. 4, *з*) [20].

Обезвесить РС при наземной обработке развешиваемого зеркала РЗКА крайне сложно.

Поэтому, несмотря на отсутствие силы тяжести в космических условиях, при наземной обработке РС должно быть равномерно натянуто на раскрытый каркас рефлектора с усилиями, исключающими его прогиб под действием собственного веса, превышающего допустимое значение.

Если усилие натяжения РС недостаточное, то ухудшается контакт между позолоченными или никелированными металлическими нитями, а следовательно, и радиоотражающие свойства. Кроме того, в процессе эксплуатации РЗКА возможны случаи солнечного нагрева РС, способные привести к снижению усилия его натяжения и, как следствие, не только к усилению указанного недостатка, но и к нарушению плоскостности поверхности facets вследствие ее вспучивания.

Также на поверхности РС, раскрытого после длительного хранения рефлектора, могут образовываться складки, нарушающие геометриче-

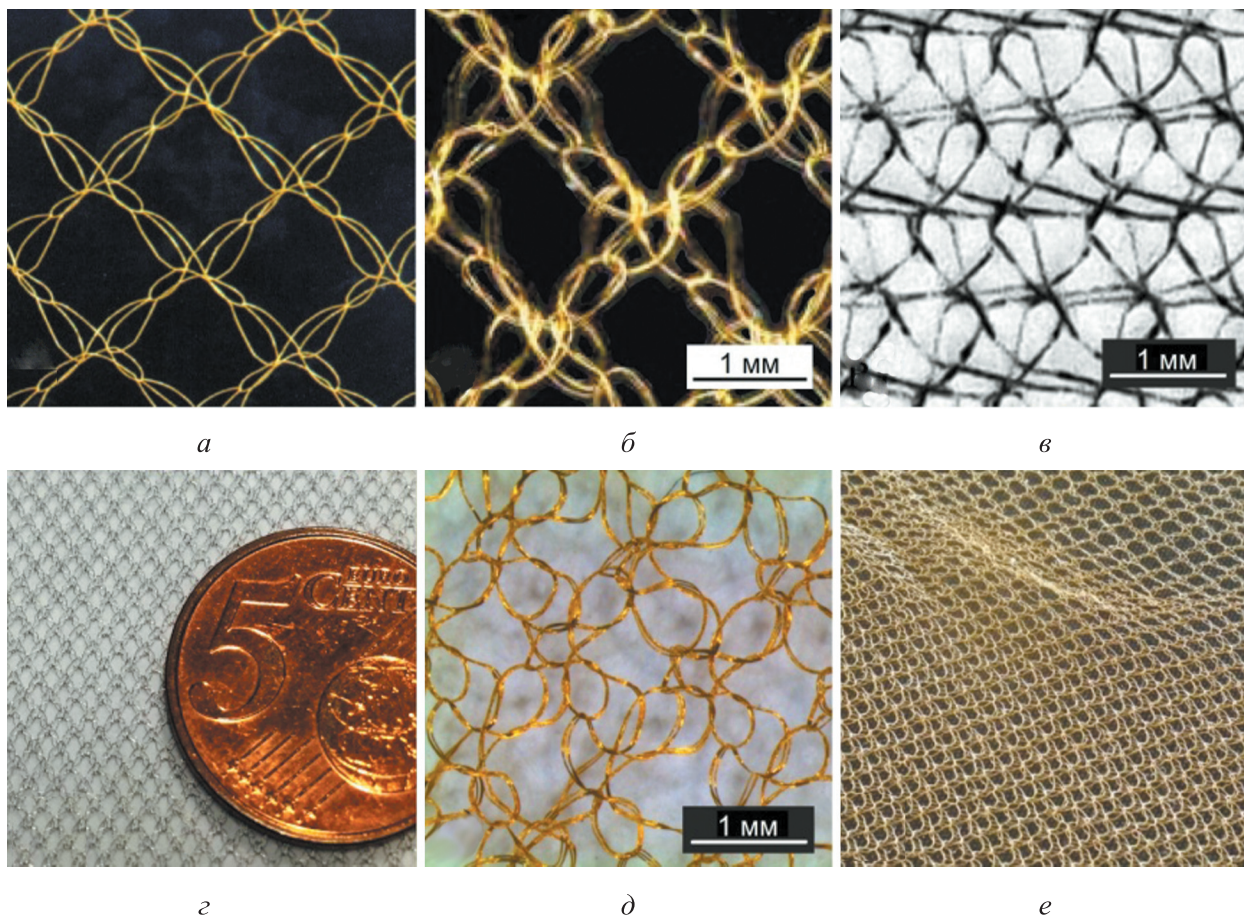


Рис. 3. Варианты структур зарубежных металлтрикотажных РС:

- а* — из одножильной позолоченной молибденовой проволоки диаметром 25,4 мкм (NGAS);
- б* — из многожильной позолоченной вольфрамовой проволоки (NGAS);
- в* — из позолоченной молибденовой проволоки диаметром 30 мкм японского производства;
- г-е* — позолоченный металлтрикотаж разработки немецких компаний ITA RWTH, HPS GmbH и HPTEX GmbH

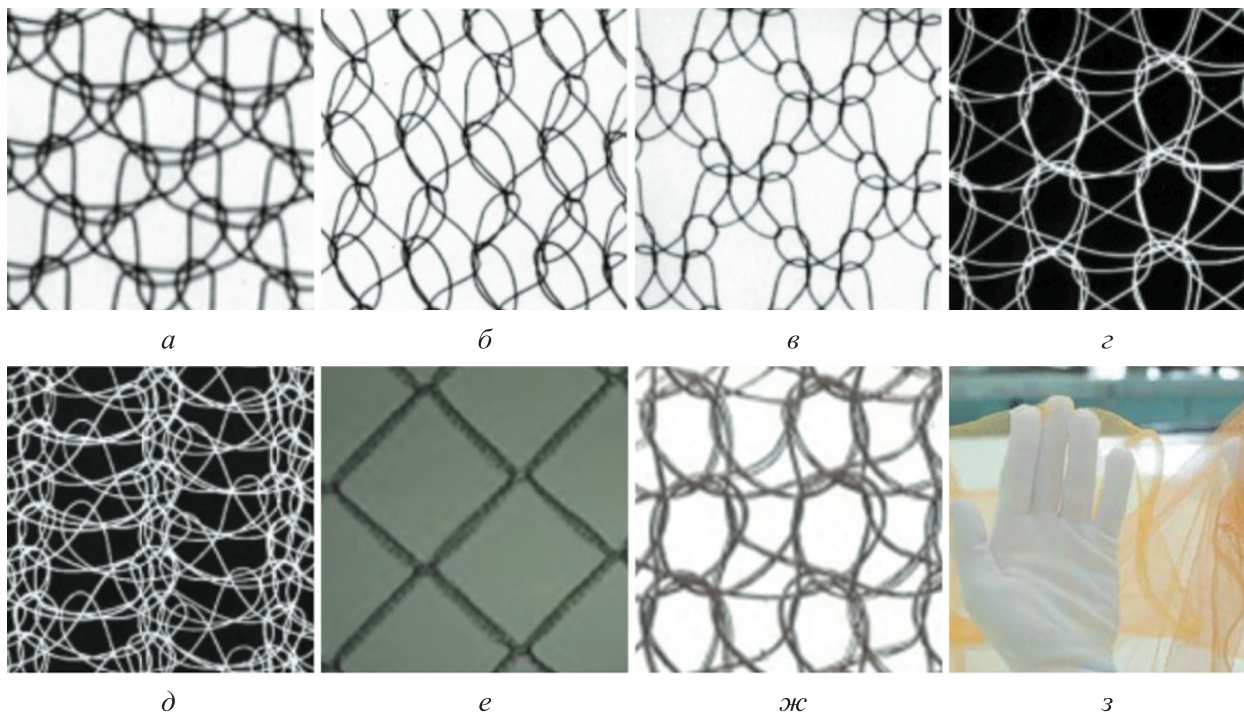


Рис. 4. Варианты структур отечественных металлотрикотажных РС:

a, б и в — из стальной проволоки диаметром 50 и 20 мкм соответственно; *z* — из вольфрамовой проволоки диаметром 15 мкм; *д* — из стальной проволоки диаметром 20 мкм с повышенным застилом поверхности; *е* — из стальной микропроволоки диаметром 50 мкм (размер стороны ячейки 40×40 мм); *ж* — из вольфрамовой микропроволоки диаметром 15 мкм в три сложения; *з* — позолоченный металлотрикотаж из комплексных нитей диаметром 15 мкм в несколько сложений

скую точность радиоотражающей поверхности. И, наоборот, сильное и неравномерное натяжение РС на каркасе приводит к несимметричному демпфирующему действию на раскрывающийся каркас рефлектора.

В результате надежность раскрытия снижается, и возникает необходимость либо увеличения жесткости пружин в механизмах раскрытия стержней развертываемого ферменного каркаса или радиальных ребер в зонтичной антенне, либо введения дополнительного механизма для их принудительного раскрытия [3, 4, 22]. Экспериментально получены значения усилий натяжения металлотрикотажных РС на развертываемых каркасах современных крупногабаритных РЗКА. В зависимости от типа РС они составляют 5...12 г/см [3, 7].

Таким образом, возникает противоречивая задача. С одной стороны, РС необходимо натянуть с усилием, обеспечивающим требуемые радиотехнические характеристики и геометрическую точность радиоотражающей поверхности антенны, с другой — натяжение РС должно быть равномерным по поверхности и с минимально допустимыми усилиями.

При этом процесс равномерного натяжения РС с заданным минимальным усилием, особенно на крупногабаритный каркас РЗКА, является весьма трудоемким и длительным [3, 22].

Цель работы — создание эффективных методов оперативного контроля усилия и равномерности натяжения РС на каркасе рефлектора РЗКА, позволяющих автоматизировать процесс.

Описание методов контроля натяжения РС на крупногабаритных конструкциях РЗКА. Рассмотрим методы контроля натяжения металлотрикотажного или металлизированного трикотажного РС на примере двух характерных типов крупногабаритных РЗКА.

Как уже указывалось, к первому типу относятся антенны, развертываемый каркас зеркала которых в раскрытом положении представляет собой ферменную купольную конструкцию, составленную из складывающихся тетраэдральных ячеек (см. рис. 1). Вторым типом являются зеркальные конструкции зонтичных антенн, где между раскрытыми или развернутыми профилированными радиальными ребрами натянуто РС (см. рис. 2).

Процесс установки РС на зонтичную РЗКА, показанный на рис. 5, включает в себя следующие этапы [23, 24]:

- изготовление контршаблона в виде радиальных ребер, наружные профили которых соответствуют внутренним профилям таковых для зонтичной антенны в раскрытом положении;
- раскрой и сшивка смежных участков металлотрикожного РС: равномерное натяже-

ние с требуемым усилием РС на рабочую поверхность контршаблона малого (рис. 5, а) [23, 24] или большого (рис. 5, б) [23, 24] диаметра и его закрепление;

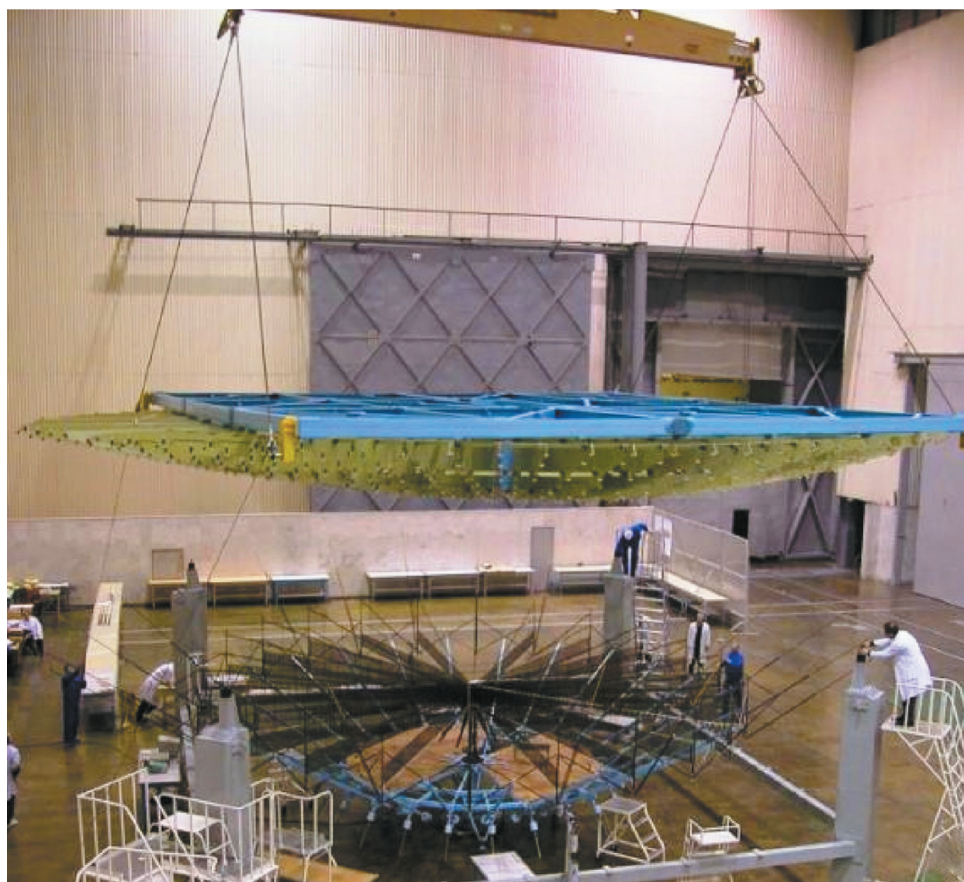
- перенос РС с контршаблона большого диаметра на рабочую поверхность разворачиваемого рефлектора в раскрытом положении и его закрепление на нем (рис. 5, в) [23, 24].

Установку РС на раскрытую ферменную купольную конструкцию из складывающихся тет-



а

б



в

Рис. 5. Этапы процесса установки РС на зонтичную РЗКА:
а и б — натяжение РС на контршаблон малого и большого диаметра соответственно;
в — перенос РС с контршаблона большого диаметра на разворачиваемый каркас в раскрытом положении

раздральных ячеек осуществляют либо с помощью описанного контршаблона, либо путем установки РС на факету тетраэдральной ячейки каркаса методом переноса, который включал в себя следующие технологические операции.

На треугольную технологическую рамку 1 с шипами по периметру, надевали растянутое РС 2 с равномерно распределенным усилием q , равным 5 г/см, вдоль каждой из медиан треугольника (рис. 6, а). При этом размеры сторон технологической рамки были несколько больше, чем у сторон факеты. Расстояние между шипами составляло 50 мм.

После завершения контроля усилия и равномерности натяжения РС на технологическую рамку, осуществляемого с помощью блока регистрации (рис. 6, б), выполняли перенос растянутого РС на треугольную факету каркаса путем пришивки РС к складывающимся стержням 4 рабочей поверхности каркаса (рис. 6, в). Далее технологическую рамку удаляли и обрезали излишки РС. Как вариант, к равномерно растянутому на технологической рамке РС по треугольному периметру, соответствующему размерам факеты каркаса, пришивали не растягивающуюся тесьму (например, из арамидного волокна) и обрезали излишки РС.

Полученный треугольный участок РС крепили через тесьму к складывающимся стержням с рабочей стороны каркаса рефлектора.

Складывающиеся стержни 4 и 6 соответственно с рабочей и тыльной стороны подпружинены на раскрытие и шарнирно связаны диагональными стержнями 5 подобно конструкции, показанной на рис. 1. После установки РС смежных факет их края сшивали металлической нитью.

В настоящее время известны контактные (механические) и бесконтактные (оптические) методы контроля усилия и равномерности натяжения РС на разворачиваемые каркасы РЗКА.

Механические методы контроля. Известен механический метод контроля усилия и равномерности натяжения РС на технологической рамке с помощью тензометрических скоб, расположенных в ортогональных плоскостях (см. рис. 6, б) [3, 22]. Суть метода заключается в замерах и регистрации усилий натяжения РС в контрольных точках.

После обработки результатов в случае установления недопустимой неравномерности натяжения РС с усилиями, отличающимися от требуемых, оператор выдает рекомендации по корректировке натяжения РС. При этом РС в указанных местах снимают с шипов, упруго деформируют и надевают снова.

Однако регулировочное смещение любой контролируемой точки РС неизбежно приводит к индуцированному смещению соседних точек

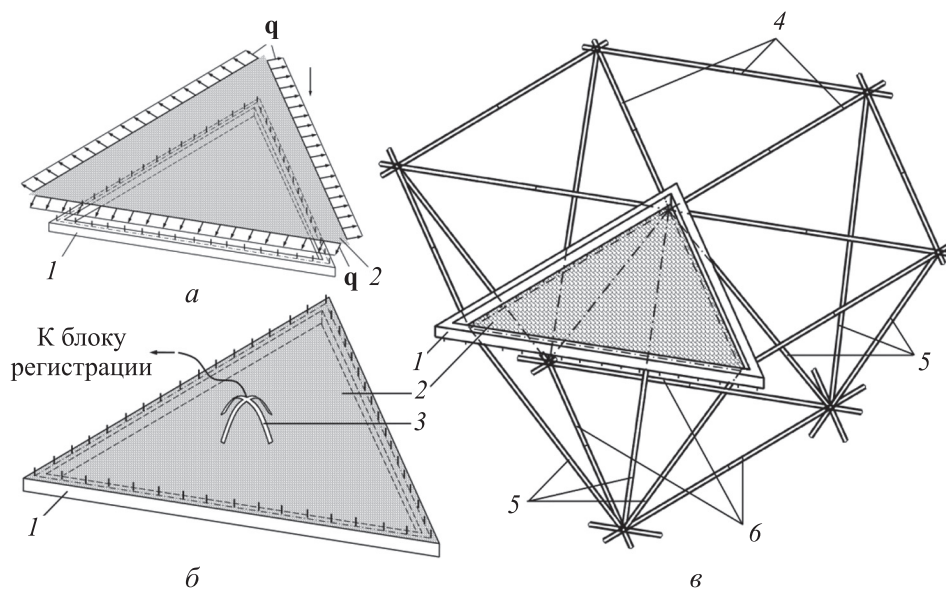


Рис. 6. Технологические операции процесса установки РС на разворачиваемый каркас зеркала РЗКА с треугольными факетами методом переноса:

а — надевание растянутого РС на технологическую рамку; б — контроль усилия и равномерности натяжения РС после установки на технологическую рамку; в — перенос растянутого РС на треугольную факету каркаса путем пришивки РС к складывающимся стержням рабочей поверхности каркаса

и, как следствие, к нарушению ранее достигнутого состояния сил упругости и равномерности натяжения РС на рассматриваемом участке поверхности. В результате требуются новые итерации в процессе уточнения положения одних и тех же точек.

Большое количество контролируемых точек на фасете (от нескольких десятков до нескольких сотен) и необходимость алгоритмической обработки данных делает процесс контроля натяжения РС с помощью ортогональных тензометрических скоб крайне трудоемкой технологической операцией, особенно при большом количестве фасет (см. рис. 1).

Кроме того, после каждого раскрытия РЗКА в процессе ее отработки необходимо проводить выборочный повторный контроль натяжения РС на каркасе рефлектора. С учетом того, что количество треугольных фасет с РС в крупногабаритных РЗКА ферменного типа (см. рис. 1) может составлять от нескольких сотен до нескольких тысяч, контроль натяжения РС с помощью ортогональных тензометрических скоб малоэффективен вследствие высокой трудоемкости. К тому же этот метод не позволяет дать общую картину равномерности натяжения РС на фасете или между ребрами зеркала антенны.

Другим известным контактным механическим методом контроля усилия и равномерности натяжения РС является *инденторный метод* (рис. 7) [25]. Он основан на вдавливании индентора I с тарированным усилием в контролируемую натянутую поверхность РС 3 и на измерении значения полученного прогиба

сетки между контактным кольцом 2 и контактной поверхностью индентора.

Использование в конструкции измерителя контактного кольца позволяет упростить процесс контроля прогиба РС относительно плоскости натяжения. В этом случае глубина вдавливания H определяется расстоянием Δ между индентором и контактным кольцом, а также натяжением РС. Индентор может быть выполнен в виде пластины со скругленными торцами [25] (как показано на рис. 7) или диска [26].

Натяжение РС измеряли инденторами со следующими геометрическими размерами ($l \times h$): 10×5 мм, 25×1 мм и 50×1 мм (см. рис. 7). При этом расстояние Δ задавали равным 2, 4 и 6 мм. Очевидно, что при одних и тех же параметрах Δ , H и l усилия натяжения РС, показываемые датчиком силы 4 , в центре фасеты или между радиальными ребрами и на периферии будут различными, что необходимо учитывать в процессе контроля. Остальные недостатки инденторного метода те же, что и при измерении РС с помощью ортогональных тензометрических скоб [3, 22].

Таким образом, разработка автоматизированных методов контроля усилия и равномерности натяжения РС является актуальной задачей. К наиболее перспективным методам, способным решить такую задачу, относятся бесконтактные оптические методы контроля [3, 22].

Оптические методы контроля. В работе [27] описан метод определения натяжения металлотрикотажного РС, основанный на применении способов обработки, анализа и нейросетевой классификации текстурных фотоизображений РС. Этот метод включает в себя три основных этапа: калибровку классификаторов для заданного типа РС, фотографирование РС, расчет усилий натяжения и построение топограмм натяжения по фотографии с помощью разработанного авторами программного обеспечения.

В отличие от проведения измерений с помощью ортогональных тензометрических скоб (см. рис. 6, б) или путем вдавливания в натянутое РС индентора (см. рис. 7), данный метод является бесконтактным и позволяет повысить точность измерений. Однако он, как и описанные механические методы, является дискретным и не позволяет осуществлять установку РС с равномерным натяжением и заданными растягивающими усилиями непосредственно на каркас зеркала РЗКА в режиме реального времени.

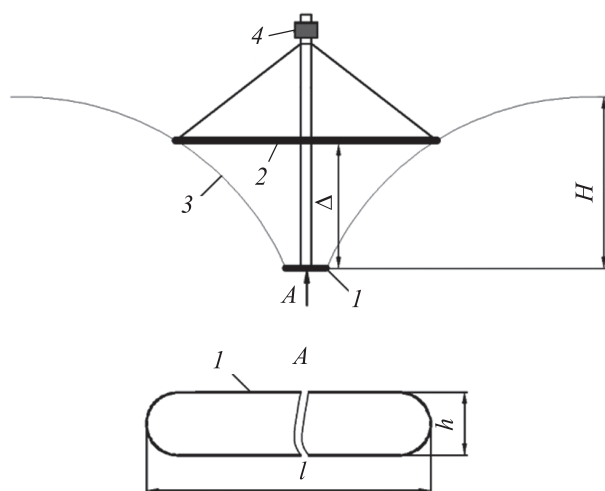


Рис. 7. Схема измерителя с контактным кольцом и индентором

Оперативный контроль равномерности натяжения РС с заданными усилиями при его установке на каркас развертываемого зеркала антенны в режиме реального времени позволит не только существенно снизить трудоемкость такого технологического процесса, но и повысить степень его автоматизации.

Для контроля усилия и равномерности натяжения РС предлагается использовать *оптический бесконтактный онлайн-метод на основе муарового эффекта* [3, 22]. Как известно, при наложении сеток (двух и более), состоящих из линий, точек или иных геометрических элементов, возникают муаровые картины, представляющие собой чередующиеся темные и светлые полосы [28, 29]. Достоинства предлагаемого метода заключаются в следующем [3, 22]:

- не требуется нанесение каких-либо сеток на измеряемый объект, так как он сам является сеткой;
- муаровый эффект обеспечивает наглядную картину деформаций по всей исследуемой поверхности, поэтому возникающие при наложении эталонной сетки на измеряемый объект (натягиваемое на каркас РС) муаровые картины полностью отражают равномерность натяжения РС и усилий натяжения;
- физические свойства материала сетки не влияют на результат измерения, так как муаровый эффект имеет чисто геометрический характер;

• эталонная сетка может быть виртуальной.

Предлагаемый метод реализуется в следующей последовательности. Предварительно необходимо создать виртуальные образы эталонной сетки конкретного типа и эталонных муаровых картин, полученных при наложении на нее такой же, но деформированной сетки. При этом вид и размеры муаровых картин зависят от угла ориентации, степени и направления деформации второй эталонной сетки относительно первой (базовой).

Для этого реальное РС равномерно растягивают на каком-либо технологическом каркасе усилием, заведомо меньшим требуемого значения, которое определяют одним из описанных методов. Затем фиксируют полученное изображение с помощью какой-либо графической программы, (например, Paint операционной системы Windows 7 или более поздней версии). Далее на изображение полученной базовой эталонной сетки накладывают такую же вторую секту в прозрачном режиме.

После этого вторую сетку поворачивают и деформируют относительно первой. В результате будет создан виртуальный набор графических образцов эталонных муаровых картин для различных значений угла поворота (рис. 8) и степени деформирования (рис. 9).

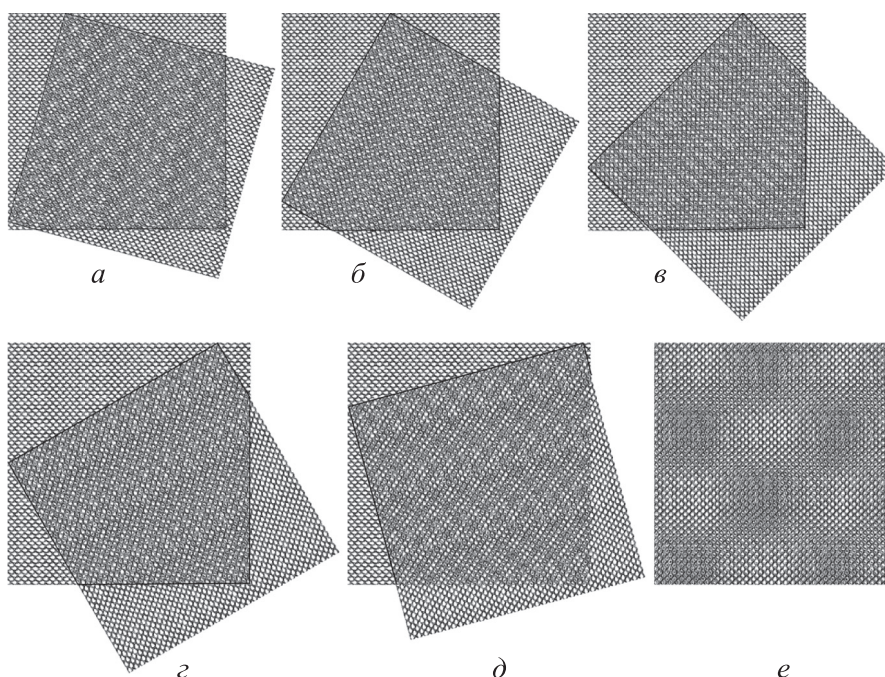


Рис. 8. Муаровые картины, образованные наложением двух идентичных эталонных сеток друг на друга и поворотом одной из них относительно другой на угол, равный 15 (а), 30 (б), 45 (в), 60 (г), 75 (д) и 90° (е)

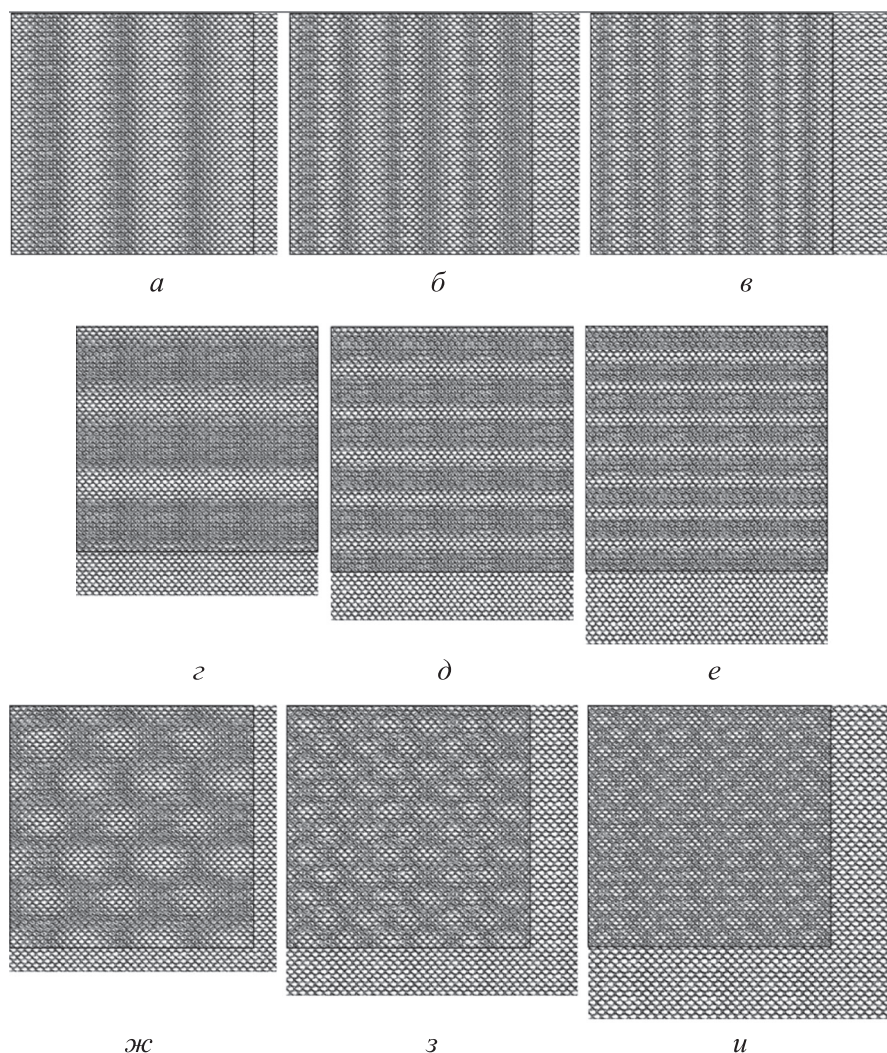


Рис. 9. Муаровые картины, образованные наложением двух идентичных эталонных сеток друг на друга при горизонтальном (*а–в*), вертикальном (*г–е*) и горизонтально-вертикальном (*ж–и*) растяжениях одной из них относительно другой на 10 (*а, г, ж*), 20 (*б, д, з*) и 30 % (*в, е, и*)

Муаровые картины, образованные наложением двух идентичных эталонных сеток друг на друга и поворотом одной из них относительно другой на угол, равный 15, 30, 45, 60, 75 и 90° приведены на рис. 8. Здесь видно, что размеры муаровых картин достигают максимальных значений при повороте на углы 90° и до $\pm 15^\circ$. Эти положения могут быть приняты за исходные. Также за исходное положение можно принять угол поворота 0°, когда муаровые картины отсутствуют.

Муаровые картины, образованные наложением двух идентичных эталонных сеток друг на друга при горизонтальном, вертикальном и горизонтально-вертикальном растяжениях одной из них относительно другой на 10, 20 и 30 % показаны на рис. 9.

Как видно из рис. 9, размеры муаровых картин убывают с увеличением деформации растягиваемого РС. Таким образом, усилие натяжения РС связано с геометрическими размерами муаровых картин и может быть определено измерением их линейных размеров.

Для этого экспериментально устанавливают зависимость усилия натяжения выбранного типа РС от степени деформирования. В результате получают виртуальный набор графических образцов эталонных муаровых картин, готовый к применению.

Этапы установки РС 2 на развертываемый каркас зеркала РЗКА с использованием бесконтактного онлайн-метода контроля натяжения РС на основе муарового эффекта показаны на рис. 10.

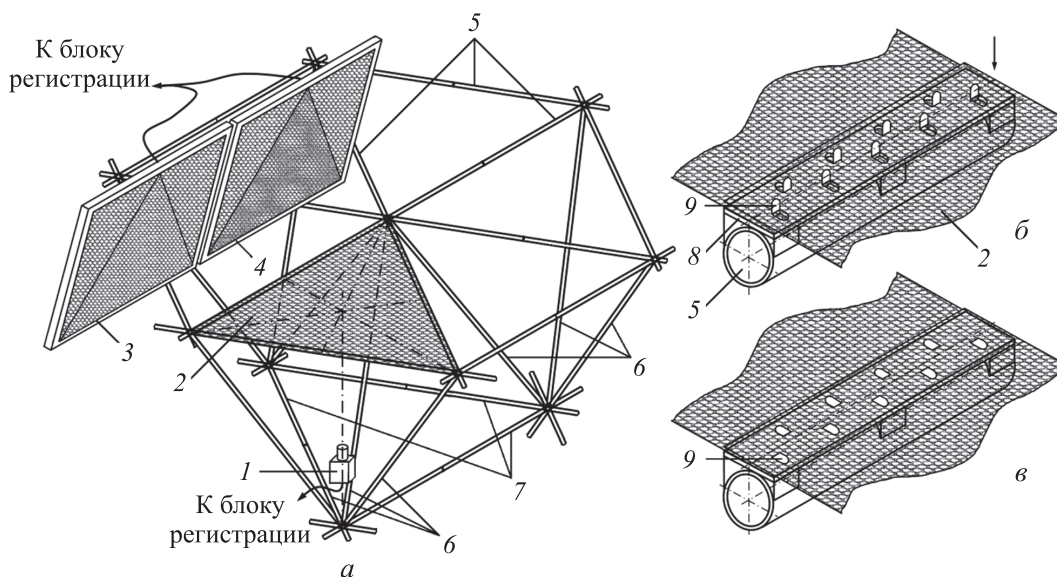


Рис. 10. Этапы установки РС на развертываемый каркас зеркала РЗКА с использованием бесконтактного онлайн-метода контроля натяжения РС на основе муарового эффекта:
а и б — растягивание и надевание участков РС на отогнутые язычки соответственно;
в — крепление РС к ломающимся стержням рабочей поверхности

Развертываемый каркас подобен конструкциям, показанным на рис. 1 и включает в себя подпружиненные на раскрытие ломающиеся стержни 5 и 7 рабочей и тыльной поверхностей соответственно, шарнирно соединенные диагональными стержнями 6. В нижней части каркаса устанавливают видеокамеру 1 (кронштейн крепления условно не показан), связанную кабелем или по радиолнии с блоком регистрации.

В непосредственной близости от операторов размещен монитор 4 с изображением эталонной муаровой картины, соответствующей требуемым равномерности натяжения конкретного типа РС и усилию, и монитор 3 с текущим онлайн-видеоизображением устанавливаемого РС на каркасе.

Мониторы 3 и 4 связаны кабелем или по радиолнии с блоком регистрации. На рабочей поверхности каждого из ломающихся стержней расположены кронштейны 8 с отогнутыми язычками 9 для крепления РС к каркасу.

Натяжение РС и его крепление к каркасу осуществляется следующим образом. Участок РС операторы растягивают и надевают на отогнутые язычки (рис. 10, *а, б*). При этом на мониторе 3 возникнет соответствующая муаровая картина. После этого путем перестановки РС на отогнутых язычках добиваются на мониторе 3 муаровой картины, подобной таковой на мониторе 4 с приемлемыми равномерностью и усилиями растяжения РС на каркасе.

Измерения геометрических размеров полученных муаровых картин осуществляют непосредственно на экране монитора 3, поэтому их точность можно повысить путем фрагментарного увеличения рассматриваемого участка изображений.

Далее операцию повторяют для смежных участков (фацетов), и установленные участки РС окончательно крепят к кронштейнам путем загибания язычков и вдавливания их в соответствующие углубления кронштейна (рис. 10, *в*). Образующиеся при этом излишки РС обрезают или подворачивают. Благодаря перехлесту участков РС на кронштейнах между ними обеспечивается надежный электрический контакт.

Выводы

1. Решена задача создания эффективного автоматизированного оптического метода оперативного контроля усилия и равномерности натяжения РС непосредственно на развертываемом каркасе зеркала РЗКА.

2. Разработанный метод позволяет:

- обеспечить возможность высокопроизводительного и мобильного контроля натяжения РС по поверхности ячейки в процессе его установки на развертываемый каркас зеркала РЗКА;
- повысить точность измерения благодаря свойству муаровых полос увеличивать изобра-

жения и перемещения, а также за счет исключения необходимости метрологической обработки результатов технических измерений и снижения приборной погрешности;

- упростить до минимума (по сравнению с известными способами) измерительную систему, не требующую нанесения каких-либо сеток или датчиков непосредственно на объект и обладающую малой чувствительностью к колебаниям температуры и запыленности окружающей среды;

- дистанционно осуществлять онлайн-приемку данной технологической операции одновременно на нескольких удаленных друг от друга изделиях с помощью телемоста.

3. Предложенный метод универсален и может быть использован для любого типа крупногабаритных РЗКА с рабочей поверхностью в виде РС, а также в любых других инженерных конструкциях, где контролируемым элементом является сетка, независимо от материала, из которого она изготовлена.

Литература

- [1] Freeland R.E. Survey of deployable antenna concept. *Large Space Antenna Systems Technology 1982. Proceedings of a conference held in Hampton, Virginia, 30 November–3 December 1982*, NASA Conference Publication 2269, Hampton, 1983, pp. 381–422.
- [2] Семенов Ю.П., ред. *Ракетно-космическая корпорация «Энергия» имени С.П. Королева (1946–1996)*. Москва, РКК «Энергия», 1996. 672 с.
- [3] Саяпин С.Н. *Анализ и синтез раскрываемых на орбите прецизионных крупногабаритных механизмов и конструкций космических радиотелескопов лепесткового типа*. Дис. ... д-ра техн. наук. Москва, 2003. 446 с.
- [4] Love A.W. Some highlights in reflector antenna development. *Radio Science*, 1976, vol. 11, no. 8–9, pp. 671–684.
- [5] Гряник М.В., Ломан В.И. *Развертываемые зеркальные антенны зонтичного типа*. Москва, Радио и связь, 1987. 72 с.
- [6] *Спутник-ретранслятор «Луч-15»*. URL: <https://rustelecom-museum.ru/visit/plan/atrium-1> (дата обращения 17 августа 2020).
- [7] Котович О.С. *Проектирование структур, свойств и технологии металлических основывязанных сетеполотен для гибких отражательных поверхностей антенн*. Дис. ... канд. техн. наук. Москва, 2008. 166 с.
- [8] Заваруев В.А., Беляев О.Ф., Халиманович В.И. Использование текстильных технологий для создания отражающей поверхности трансформируемых космических антенн. *Первые международные Косыгинские чтения. Сб. науч. тр. междунар. науч.-техн. форума*, 11–12 октября 2017, Москва, Изд-во РГУ им. А.Н. Косыгина, 2017, т. 1, с. 201–205.
- [9] Zhang Y., Zhang H., Yang D. Form-Finding Design of Cable-Mesh Deployable Reflector Antennas Considering Wire Mesh Properties. *AIAA Journal*, 2019, vol. 57, no. 11, pp. 5027–5041, doi: 10.2514/1.J058213
- [10] Terekhov V.Y., Zolotarev I.D., Teminovskiy I.V. Development of Experimental Prototypes of Large Deployable Spacecraft Reflector Antenna Structures Applying New Radio-Technical Metal Mesh Materials. *International Journal of Applied Engineering Research*, 2017, vol. 12, no. 10, pp. 2422–2429.
- [11] Беляев О.Ф., Заваруев В.А., Кудрявин Л.А., Подшивалов С.Ф., Халиманович В.И. Трикотажные металлические сетеполотна для отражающей поверхности трансформируемых наземных и космических антенн. *Технический текстиль*, 2007, № 16, с. 59–64.
- [12] Rao S., Shafai L., Sharma S. *Handbook of Reflector Antennas and Feed Systems. Vol. III. Applications of Reflectors*. Boston/London, Artech Hous, 2013. 462 p.
- [13] Scialino G.L., Salvini P., Migliorelli M., Pennestri E., Valentini P.P., Klooster K., Prowald J.S., Rodrigues G., Gloy Y. Structural characterization and modeling of metallic mesh material for large deployable reflectors. *Proceedings of the 2nd International Conference on Advanced Lightweight Structures and Reflector Antennas*, Tbilisi, Georgia, 2014, pp. 182–192.
- [14] Беляев О.Ф., Заваруев В.А. Выбор материала микропроволоки для вязания отражающей поверхности крупногабаритных трансформируемых антенн. *Дизайн, технологии и инновации в текстильной промышленности Сб. матер. междунар. науч.-техн. конф.*, Москва, 18–19 ноября 2014, Москва, Изд-во МГУДТ, 2014, ч. 1, с. 56–58.

- [15] Ploeckl M., Lori M., Endler S., Pfeiffer E.K., Sinn T., Fluss T., Becker M., Ihle A. Reflective metallic mesh for large deployable reflector. *Proceedings of the 3rd International Conference Advanced Lightweight Structures and Reflector Antennas*, Tbilisi, Georgia, 2018, pp. 285–295.
- [16] Kamegai K., Tsuboi M. Measurements of an Antenna Surface for a Millimeter-Wave Space Radio Telescope. II. Metal Mesh Surface for Large Deployable Reflector. *Publications–Astronomical Society of Japan*, 2013, vol. 65, no. 1, pp. 21.1–21.7, doi: 10.1093/pasj/65.1.21
- [17] Pfeiffer E.K. *Metal mesh on large reflector*. URL: https://www.esa.int/ESA_Multimedia/Images/2016/11/Metal_mesh_on_large_reflector (дата обращения 17 августа 2020).
- [18] Schlomski I. *Textile in space*. URL: <https://textile-network.com/en/Technical-Textiles/Textile-Flaechen/Textile-in-space> (дата обращения 17 августа 2020).
- [19] *MESH Made in Germany: Technical Textiles from Bavaria for the Worldmarket Space*. URL: <http://www.hps-gmbh.com/en/news/hps-space-news> (дата обращения 14 ноября 2020).
- [20] Подшивалов С.Ф. «Текстиль» на службе космосу. *Информационные спутниковые системы*, 2012, № 13, с. 18–19. URL: <https://www.iss-reshetnev.ru/media/journal/journal-13-2012.pdf> (дата обращения 17 августа 2020).
- [21] Бабкова Е.С. *Разработка технологии изготовления отражающих поверхностей трансформируемых антенн из металлотрикожных сетеполотен с увеличенными размерами ячеек*. Дис. ... канд. техн. наук, Москва, 2020. 160 с.
- [22] Саяпин С.Н. Бесконтактный on-line метод контроля натяжения сетеполотна радиотражающей поверхности складной крупногабаритной зеркальной антенны. *Проблемы машиностроения и надежности машин*, 2017, № 6, с. 1–9.
- [23] Полухин Н.В., Бычков В.И., Шитиков А.А., Романенков В.А., Поликарпов Е.Ю., Ермаков Н.И. *Способ изготовления крупногабаритных разворачиваемых рефлекторов и устройство для формирования криволинейной поверхности рефлектора*. Патент РФ № 2276823, бюл. № 14, 2008.
- [24] Полухин Н.В. *Повышение производительности и точности деформационного регулирования геометрических параметров космических антенн*. Автореф. дис. ... канд. техн. наук. Москва, 2008. 16 с.
- [25] Жуков А.П., Павлов М.С., Подшивалов С.Ф., Пономарев С.В., Халиманович В.И. Вдавливание индентора в поверхность натянутого сетеполотна. *Вестник Томского государственного университета. Математика и механика*, 2010, № 4(12), с. 96–101.
- [26] Пономарев С.В., Павлов М.С., Подшивалов С.Ф., Жуков А.П., Халиманович В.И. *Способ определения равномерного натяжения мембраны из изотропного материала*. Патент РФ № 2497088 С2, бюл. № 21, 2013.
- [27] Сухарев Е.Н., Коловский Ю.В. Метод определения натяжения сетеполотна антенн на основе распознавания образов. *Вестник Сибирского государственного аэрокосмического университета им. академика М.Ф. Решетнева*, 2006, № 1, с. 96–100.
- [28] Феодосьев В.И. *Соппротивление материалов*. Москва, Наука, 1986. 512 с.
- [29] Сухарев И.П., Ушаков Б.Н. *Исследование деформаций и напряжений методом муаровых полос*. Москва, Машиностроение, 1969. 208 с.

References

- [1] Freeland R.E. Survey of deployable antenna concept. *Large Space Antenna Systems Technology 1982. Proceedings of a conference held in Hampton, Virginia, 30 November–3 December 1982*, NASA Conference Publication 2269, Hampton, 1983, pp. 381–422.
- [2] *Raketno-kosmicheskaya korporatsiya “Energiya” imeni S.P. Koroleva (1946–1996)* [Korolev rocket and space Corporation Energia (1946–1996)]. Ed. Semenov Yu.P. Moscow, Energiya publ., 1996. 672 p.
- [3] Sayapin S.N. *Analiz i sintez raskryvayemykh na orbite pretsizionnykh krupnogabaritnykh mekhanizmov i konstruksiy kosmicheskikh radioteleskopov lepestkovogo tipa*. Dokt. Diss. [Analysis and synthesis of large-size precision mechanisms and structures of space radio telescopes of the petal type deployed in orbit. Doct. Diss.]. Moscow, 2003. 446 p.
- [4] Love A.W. Some highlights in reflector antenna development. *Radio Science*, 1976, vol. 11, no. 8–9, pp. 671–684.

- [5] Gryanik M.V., Loman V.I. *Razvertvyayemyye zerkal'nyye anteny zontichnogo tipa* [Umbrella-type deployable reflector antennas]. Moscow, Radio i svyaz' publ., 1987. 72 p.
- [6] *Sputnik-retranslyator «Luch-15»* [Luch-15 satellite repeater]. Available at: <https://rustelecom-museum.ru/visit/plan/atrium-1> (accessed 17 August 2020).
- [7] Kotovich O.S. *Proyektirovaniye struktur, svoystv i tekhnologii metallicheskikh osnovovoyaznykh setepoloten dlya gibkikh otrazhatel'nykh poverkhnostey antenn*. Kand. Diss. [Design of structures, properties and technology of metal warp-knitted fabrics for flexible reflective antenna surfaces. Cand. Dis.]. Moscow, 2008. 166 p.
- [8] Zavaruyev V.A., Belyayev O.F., Khalimanovich V.I. Using textile technologies to create a reflective surface of transformable space antennas. *Pervyye mezhdunarodnyye Kosygin'skiye chteniya. Sb. nauch. tr. mezhdunar. nauch.-tekhn. foruma* [The first international Kosygin readings. Collection of scientific papers of the international scientific and technical forum]. Moscow, 2017, vol. 1, pp. 201–205.
- [9] Zhang Y., Zhang H., Yang D. Form-Finding Design of Cable–Mesh Deployable Reflector Antennas Considering Wire Mesh Properties. *AIAA Journal*, 2019, vol. 57, no. 11, pp. 5027–5041, doi: 10.2514/1.J058213
- [10] Terekhov V.Y., Zolotarev I.D., Teminovskiy I.V. Development of Experimental Prototypes of Large Deployable Spacecraft Reflector Antenna Structures Applying New Radio-Technical Metal Mesh Materials. *International Journal of Applied Engineering Research*, 2017, vol. 12, no. 10, pp. 2422–2429.
- [11] Belyayev O.F., Zavaruyev V.A., Kudryavin L.A., Podshivalov S.F., Khalimanovich V.I. Knitted metal fabrics for the reflective surface of transformable ground and space antennas. *Technical Textile*, 2007, no. 16, pp. 59–64 (in Russ.).
- [12] Rao S., Shafai L., Sharma S. *Handbook of Reflector Antennas and Feed Systems. Vol. III. Applications of Reflectors*. Boston/London, Artech Hous, 2013. 462 p.
- [13] Scialino G.L., Salvini P., Migliorelli M., Pennestri E., Valentini P.P., Klooster K., Prowald J.S., Rodrigues G., Gloy Y. Structural characterization and modeling of metallic mesh material for large deployable reflectors. *Proceedings of the 2nd International Conference on Advanced Lightweight Structures and Reflector Antennas*, Tbilisi, Georgia, 2014, pp. 182–192.
- [14] Belyayev O.F., Zavaruyev V.A. Selection of microwire material for knitting the reflective surface of large-sized transformable antennas. *Dizayn, tekhnologii i innovatsii v tekstil'noy promyshlennosti Sb. mater. mezhdunar. nauch.-tekhn. konf.* [Design, technologies and innovations in the textile industry proceedings of the international scientific and technical conference]. Moscow, 2014, pt. 1, pp. 56–58.
- [15] Ploekel M., Lori M., Endler S., Pfeiffer E.K., Sinn T., Fluss T., Becker M., Ihle A. Reflective metallic mesh for large deployable reflector. *Proceedings of the 3rd International Conference Advanced Lightweight Structures and Reflector Antennas*, Tbilisi, Georgia, 2018, pp. 285–295.
- [16] Kamegai K., Tsuboi M. Measurements of an Antenna Surface for a Millimeter-Wave Space Radio Telescope. II. Metal Mesh Surface for Large Deployable Reflector. *Publications–Astronomical Society of Japan*, 2013, vol. 65, no. 1, pp. 21.1–21.7, doi: 10.1093/pasj/65.1.21
- [17] Pfeiffer E.K. *Metal mesh on large reflector*. Available at: https://www.esa.int/ESA_Multimedia/Images/2016/11/Metal_mesh_on_large_reflector (accessed 17 August 2020).
- [18] Schlomski I. *Textile in space*. Available at: <https://textile-network.com/en/Technical-Textiles/Textile-Flaechen/Textile-in-space> (accessed 17 August 2020).
- [19] *MESH Made in Germany: Technical Textiles from Bavaria for the Worldmarket Space*. Available at: <http://www.hps-gmbh.com/en/news/hps-space-news> (accessed 14 November 2020).
- [20] Podshivalov S.F. “Textile” in the service of space. *Informatsionnyye sputnikovyye sistemy*, 2012, no. 13, pp. 18–19 (in Russ.). Available at: <https://www.iss-reshetnev.ru/media/journal/journal-13-2012.pdf> (accessed 17 August 2020).
- [21] Babkova E.S. *Razrabotka tekhnologii izgotovleniya otrazhayushchikh poverkhnostey transformiruyemykh antenn iz metallotrikotazhnykh setepoloten s uvelichennymi razmerami yacheyek*. Kand. Diss. [Development of technology for manufacturing reflective surfaces of transformable antennas made of metal-coated mesh panels with increased cell sizes. Cand. Diss.]. Moscow, 2020. 160 p.

- [22] Sayapin S.N. Contactless online method for checking-up a net-shaped curtain's tension of a radio-reflecting surface of large umbrella reflector antenna. *Journal of Machinery Manufacture and Reliability*, 2017, vol. 46, no. 6, pp. 519–526, doi: 10.3103/S1052618817060139
- [23] Polukhin N.V., Bychkov V.I., Shitikov A.A., Romanenkov V.A., Polikarpov E.Yu., Ermakov N.I. *Sposob izgotovleniya krupnogabaritnykh razvertvyayemykh reflektorov i ustroystvo dlya formirovaniya krivolinyeynoy poverkhnosti reflektora* [A method for manufacturing large-sized deployable reflectors and a device for forming a curved surface of the reflector]. Patent RF no. 2276823, 2008.
- [24] Polukhin N.V. *Povysheniye proizvoditel'nosti i tochnosti deformatsionnogo regulirovaniya geometricheskikh parametrov kosmicheskikh antenn*. Avtoref. Kand. Diss. [Improving the performance and accuracy of deformation control of geometric parameters of space antennas. Cand. Diss.]. Moscow, 2008. 16 p.
- [25] Zhukov A.P., Pavlov M.S., Podshivalov S.F., Ponomarev S.V., Khalimanovich V.I. Indentation of an indenter into the surface of a stret-shed meshed linen. *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo universiteta. Matematika i mekhanika*, 2010, no. 4(12), pp. 96–101 (in Russ.).
- [26] Ponomarev S.V., Pavlov M.S., Podshivalov S.F., Zhukov A.P., Khalimanovich V.I. *Sposob opredeleniya ravnomernogo natyazheniya membrany iz izotropnogo materiala* [Method for determining the uniform tension of a membrane made of an isotropic material]. Patent RF no. 2497088 C2, 2013.
- [27] Sukharev E.N., Kolovskiy Yu.V. The mesh tension control technique. *Vestnik Sibirskogo gosudarstvennogo aerokosmicheskogo universiteta im. akademika M.F. Reshetneva*, 2006, no. 1, pp. 96–100 (in Russ.).
- [28] Feodos'yev V.I. *Soprotivleniye materialov* [Strength of materials]. Moscow, Nauka publ., 1986. 512 p.
- [29] Sukharev I.P., Ushakov B.N. *Issledovaniye deformatsiy i napryazheniy metodom muarovykh polos* [Investigation of deformations and stresses by the moire strip method]. Moscow, Mashinostroyeniye publ., 1969. 208 p.

Статья поступила в редакцию 20.10.2020

Информация об авторе

САЯПИН Сергей Николаевич — доктор технических наук, профессор кафедры «Теоретическая механика». МГТУ им. Н.Э. Баумана; главный научный сотрудник. Институт машиноведения им. А.А. Благонравова РАН (101990, Москва, Российская Федерация, М. Харитоньевский пер., д. 4, e-mail: S.Sayapin@rambler.ru).

Information about the author

SAYAPIN Sergey Nikolaevich — Doctor of Science (Eng.), Professor, Department of Theoretical Mechanics. Bauman Moscow State Technical University; Chief Research Worker. Blagonravov Mechanical Engineering Research Institute of the Russian Academy of Sciences (101990, Moscow, Russian Federation, Malyy Kharitonyevskiy Pereulok, Bldg. 4, e-mail: S.Sayapin@rambler.ru).

Просьба ссылаться на эту статью следующим образом:

Саяпин С.Н. Анализ современного состояния и перспективы развития методов контроля натяжения радиоотражающего сетеполотна на разvertываемый каркас крупногабаритной зеркальной антенны. *Известия высших учебных заведений. Машиностроение*, 2021, № 2, с. 41–55, doi: 10.18698/0536-1044-2021-2-41-55

Please cite this article in English as:

Sayapin S.N. Analysis of Current State and Prospects for Development of Methods for Monitoring Tension of Radio-Reflecting Mesh on Deployable Frame of Large Mirror Antenna. *BMSTU Journal of Mechanical Engineering*, 2021, no. 2, pp. 41–55, doi: 10.18698/0536-1044-2021-2-41-55