

2. Harada S., Meguro A., Watanabe M. A High Precision Surface Shape Design for Large Deployable Mesh Antenna [Электронный ресурс] // meeting paper AIAA 2003 of 44th AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics, and Materials Conference. Norfolk, VA, 2003–1497. Access via AIAA Electronic Library. URL: <http://www.aiaa.org>.

3. Голдобин Н. Н. Обоснование методики оценки формы радиотражающей поверхности крупногабаритных трансформируемых рефлекторов космических аппаратов с применением алгоритма Левенберга–Марквардта // Инновационные технологии и технические средства специального назначения : Тр. V Общерос. науч.-практ. конф. СПб., 2012. С. 93–98.

4. Marquardt D. An algorithm for Least-Squares Estimation of the Nonlinear Parameters // *SIAM Journal on Applied Mathematics*. 1963. 11 (2). С. 431–441.

5. Голдобин Н. Н. Методика оценки формы радиотражающей поверхности крупногабаритного трансформируемого рефлектора космического аппарата // Вестник СибГАУ. 2013. Вып. 1(47). С. 106–111.

6. Голдобин Н. Н., Шендалев Д. О. Математические методы, используемые для оценки точности положения и формы крупногабаритного рефлектора космического аппарата // Решетневские чтения : материалы XVII Междунар. науч. конф. (12–14 нояб. 2013, г. Красноярск). Красноярск, 2013. С. 65–66.

References

1. Tibert G. Deployable tensegrity structures for space applications. Doctoral thesis. Stockholm: Royal Institute of Technology, 2002. Available at: http://www.mech.kth.se/thesis/2002/phd/phd_2002_gunnar_tibert.pdf (accessed 05.02.2014)

2. Harada S., Meguro A., Watanabe M. A High Precision Surface Shape Design for Large Deployable Mesh Antenna: meeting paper AIAA 2003-1497 of 44th AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics, and Materials Conference. Norfolk, VA, 2003. Access via AIAA Electronic Library. Available at: <http://www.aiaa.org>. (accessed 03.03.2014)

3. Goldobin N. N. [Objectives of the assessment methodology forms of the radar-reflection surface of the large transformable spacecraft using the Levenberg-Marquardt]. *Trudi V obsherossiyskoy naychno-prakticheskoy konferentsii "Innovatsionnye tekhnologii I tekhnicheskoe sredstva spetsialnogo naznacheniya"* [Proc. V obsheros. scientific-practical. conf. "Innovative technologies and facilities for special purposes"]. St. Petersburg, 2012, p. 93–98. (In Russ.)

4. Marquardt D. An algorithm for Least-Squares Estimation of the Nonlinear Parameters. *SIAM Journal on Applied Mathematics*. Vol. 11 (2), 1963, p. 431–441.

5. Goldobin N. N. [The estimation of the form of a large-sized transformed radar-reflection for a spacecraft]. *Vestnik SibGAU*, 2013, vol. 47, no. 1, p. 106–111. (In Russ.)

6. Goldobin N. N., Shendalv D. O. [Mathematical methods used to assess the position and form accuracy of a large-sized spacecraft reflector]. *Materiali XVII Mezhdynarodnoy naychnoy konferentsii "Reshetnevskie chteniya"* [Proceedings of the XVII Intern. scientific. conf. "Reshetnev reading"]. Krasnoyarsk, 2013, p. 65–66. (In Russ.)

© Голдобин Н. Н., 2014

УДК 629.76/78.001.63

АЛГОРИТМ ПОСТРОЕНИЯ ПЕРИФЕРИЙНОГО ШНУРА ФРОНТАЛЬНОЙ СЕТИ ДЛЯ ТРАНСФОРМИРУЕМОГО СЕТЧАТОГО РЕФЛЕКТОРА КОСМИЧЕСКОГО АППАРАТА

Н. Н. Голдобин, Н. А. Тестоедов

ОАО «Информационные спутниковые системы» имени академика М. Ф. Решетнёва»
Российская Федерация, 662972, г. Железногорск Красноярского края, ул. Ленина, 52
E-mail: goldobin@iss-reshetnev.ru, testoedov@iss-reshetnev.ru

Периферийные шнуры входят в состав фронтальной и тыльной сетей формообразующей структуры трансформируемого сетчатого рефлектора. Периферийный шнур выполняет функцию растяжения формообразующей структуры в процессе раскрытия рефлектора, а также обеспечивает равномерное распределение усилий натяжения во внутренних шнурах фронтальной и тыльной сетей. Вследствие сложности конструктивно-силовой схемы рассматриваемого космического рефлектора выбор геометрической формы и усилия натяжения в периферийном шнуре является нетривиальной задачей. Для решения этой задачи был разработан алгоритм построения периферийного шнура.

Ключевые слова: космический аппарат, отражающая поверхность, рефлектор, периферийный шнур, формообразующая структура.

**A CONSTRUCTION ALGORITHM OF THE PERIPHERAL CORD
OF THE FRONTAL NETWORK FOR THE SPACE REFLECTOR
WITH THE CABLE-MESH DEPLOYABLE STRUCTURE**

N. N. Goldobin, N. A. Testoedov

JSC "Information satellite systems" named after academician M. F. Reshetnev"
52, Lenin str., Jeleznogorsk, Krasnoyarsk region, 662972, Russian Federation
E-mail: goldobin@iss-reshetnev.ru, testoedov@iss-reshetnev.ru

Peripheral cords are included in the front and back structures of the networks of the space reflector with the cable-mesh deployable structure. Functions of peripheral cord is tensile of cords of network structure during the reflector deployment, and providing the uniform tension distribution of the cords in the inside front and back structure. Because of the complexity of the construction scheme of the considered space reflector, the choice of geometric shapes and the tensile force in the peripheral cord is not trivial. To solve this problem, the authors have developed an algorithm for constructing a peripheral cord.

Keywords: spacecraft, reflecting surface, reflector, peripheral cord, network structure.

ОАО «Информационные спутниковые системы» имени академика М. Ф. Решетнева» активно занимается созданием крупногабаритных трансформируемых рефлекторов, используемых в качестве целевой аппаратуры на телекоммуникационных космических аппаратах. В настоящее время ведется разработка трансформируемого сетчатого рефлектора с апертурой диаметром до 40 м. В состав такого рефлектора входят следующие основные конструктивные элементы (рис. 1):

- силовой каркас, состоящий из основания, спиц и силовых шнуров;
- формообразующая структура (ФОС), обеспечивающая придание и поддержание заданной формы отражающей поверхности;
- отражающая поверхность (на рис. 1 не показана), представляющая собой растянутое сетеполотно и выполняющее функцию передачи электромагнитной волны между источником (приемником) сигнала и облучателем антенной системы.

Ранее, одним из авторов статьи [1] был проведен анализ вариантов исполнения ФОС трансформируемого сетчатого рефлектора. Выбранная по результатам данного анализа ФОС имеет в своем составе следующие конструктивные элементы:

- фронтальная сеть (ФС) – система натянутых шнуров, в которую входят радиальные и внутренние шнуры, а также периферийный шнур и его оттяжки (рис. 2); формирует разбиение отражающей поверхности на facets, обеспечивая требуемую форму рабочей поверхности рефлектора;
- тыльная сеть (ТС) – система натянутых шнуров для поддержания фронтальной сети в заданном положении; имеет структуру, аналогичную фронтальной сети, симметрично отраженную относительно срединной плоскости основания рефлектора;
- вантовая система – конструктивный элемент формообразующей структуры, соединяющий каждый узел фронтальной сети с соответствующим узлом тыльной сети.

Натяжение внутренних шнуров ФС обеспечивается растяжением периферийного шнура (ПШ). ПШ должен иметь геометрическую форму и усилие натяжения, обеспечивающее равномерное натяжение всех внутренних шнуров ФС. Максимальная величина прогиба ПШ, с одной стороны, зависит от положения концов звеньев А (для ФС) или звеньев Б (для ТС) соседних спиц, с другой стороны, от границ апертуры рефлектора (рис. 2).

На этапе проектирования сетчатых рефлекторов с целью оценки усилий, возникающих в напряженной конструкции, ранее применялись методы построения периферийного шнура, которые вносили погрешность в определение равновесного напряженного состояния конечно-элементной модели ФОС. Использование приближенных методов при создании конечно-элементной модели рассматриваемого рефлектора обусловлено тем, что узлы фронтальной сети должны находиться на поверхности офсетной цилиндрической вырезки из параболоида вращения. Однако применение ряда допущений, упрощающих процесс расчета геометрической формы и усилий в ПШ, привели к появлению отрицательных значений усилий в некоторых зонах ФС. Это подтолкнуло авторов статьи к разработке наиболее подробного алгоритма построения периферийного шнура, учитывающего пространственное расположение натянутых шнуров.

Фронтальная (тыльная) сеть имеет n секторов (где $n = 8$ – количество спиц рефлектора) и образована facets треугольной формы, как показано на рис. 2. Треугольная форма facets выбрана на основании анализа результатов расчета среднеквадратического отклонения формы отражающей поверхности рефлектора [1]. Количество facets, расположенных вдоль радиального направления, m штук (в рассматриваемом рефлекторе $m = 8$).

Построение оттяжек периферийного шнура. Оттяжки периферийного шнура обеспечивают связь между внутренними шнурами ФС (ТС) и периферийным шнуром. Направление оттяжек периферийного шнура

и величина натяжения в них определяется из условия обеспечения равенства натяжений во внутренних шнурах ФС (ТС). Дальнейшее описание построений ведется для фронтальной сети. Тыльная сеть строится аналогично.

В каждый узел ФС, расположенный на последнем поясе внутренних шнуров, входит по четыре шнура (рис. 3), образуя пространственную систему сходя-

щихся сил. Уравновешивающая реакция \vec{R} со стороны оттяжки ПШ равна по модулю и обратна по направлению равнодействующей. Определим равнодействующую данной системы сил [2]. Ниже приведено более подробное описание построения на примере одной оттяжки ПШ.

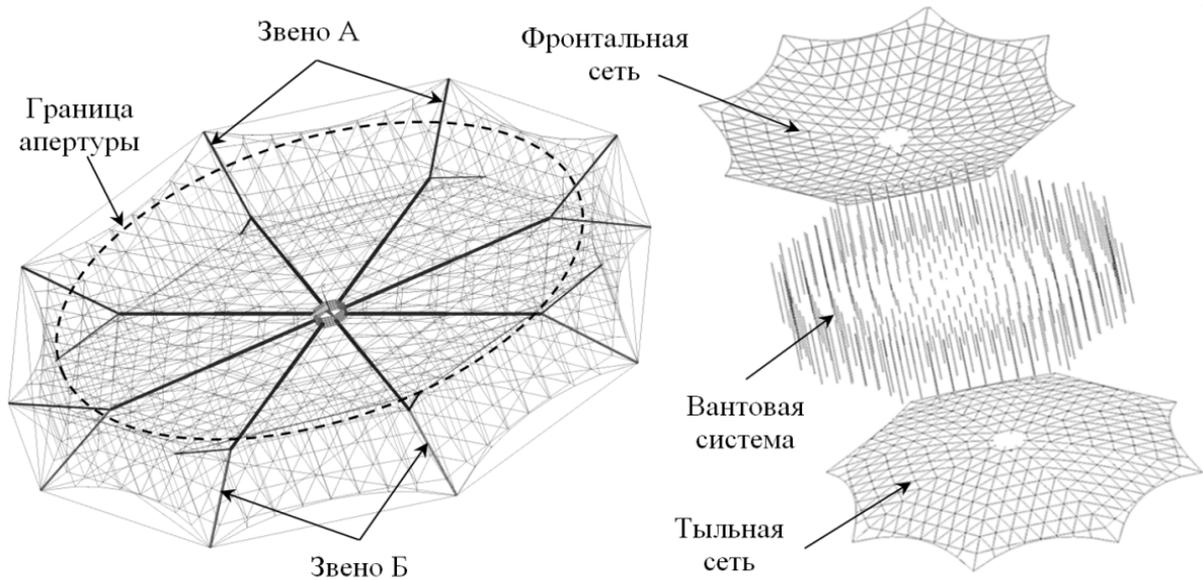


Рис. 1. Состав конструкции трансформируемого сетчатого рефлектора

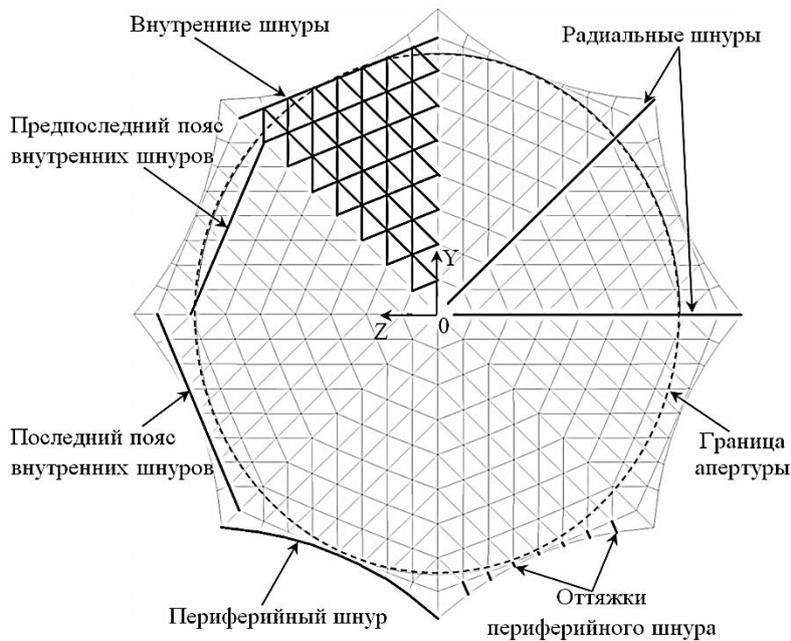


Рис. 2. Схема фронтальной (тыльной) сети

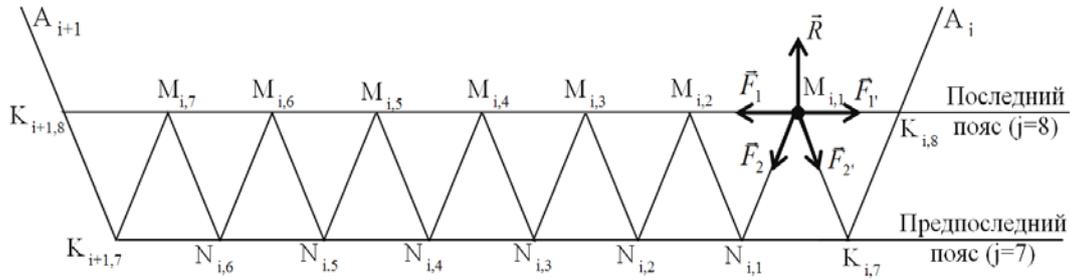


Рис. 3. Схема построения оттяжки периферийного шнура:

i – номер сектора (спицы); $j = 1, \dots, m$, где $m = 8$ – количество facets вдоль радиального направления;
 A_i – точки крепления ФС к силовому каркасу; $K_{i,j}$ – узлы радиальных шнуров; $M_{i,(1...m-1)}$ – узлы последнего пояса внутренних шнуров; $N_{i,(1...m-2)}$ – узлы предпоследнего пояса внутренних шнуров;

$\vec{F}_1, \vec{F}_2, \vec{F}_1', \vec{F}_2'$ – векторы натяжений внутренних шнуров; \vec{R} – вектор натяжения оттяжки ПШ

Шнур в натянутом состоянии представляет собой отрезок прямой. Как известно, уравнение прямой в пространстве, проходящей, к примеру, через две данные точки $M_1(x_1; y_1; z_1)$ и $M_2(x_2; y_2; z_2)$, имеет вид

$$\frac{x-x_1}{x_2-x_1} = \frac{y-y_1}{y_2-y_1} = \frac{z-z_1}{z_2-z_1}, \text{ или в каноническом виде}$$

$$\frac{x-x_1}{l} = \frac{y-y_1}{m} = \frac{z-z_1}{n}, \text{ где } \vec{V} = \begin{bmatrix} l_{\vec{V}} \\ m_{\vec{V}} \\ n_{\vec{V}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_2-x_1 \\ y_2-y_1 \\ z_2-z_1 \end{bmatrix} -$$

направляющий вектор.

Все вычисления ведутся в системе координат рефлектора, где начало координат находится в центре рефлектора, оси Y и Z лежат в срединной плоскости рефлектора и направлены, как показано на рис. 2, ось X – достраивает систему координат до правой.

Определим орт направляющего вектора по формуле

$$\vec{e}_V = \begin{bmatrix} l_{\vec{e}_V} \\ m_{\vec{e}_V} \\ n_{\vec{e}_V} \end{bmatrix} = \frac{\vec{V}}{|\vec{V}|}.$$

Затем определим углы между ортом и осями X , Y и Z соответственно:

$$\alpha = \arccos(l_{\vec{e}_V}), \beta = \arccos(m_{\vec{e}_V}), \gamma = \arccos(n_{\vec{e}_V}).$$

Зная величину усилия $|\vec{F}_t|$ в шнуре и его направление в пространстве, найдем модуль проекций вектора на оси X , Y и Z соответственно:

$$l_{\vec{F}_t} = |\vec{F}_t| \cdot \cos(\alpha), m_{\vec{F}_t} = |\vec{F}_t| \cdot \cos(\beta), n_{\vec{F}_t} = |\vec{F}_t| \cdot \cos(\gamma).$$

Определим координаты вектора \vec{R} на оси X , Y и Z , суммируя проекции всех сил на каждую из осей:

$$\vec{R} = \begin{bmatrix} l_{\vec{R}} \\ m_{\vec{R}} \\ n_{\vec{R}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} l_{\vec{F}_1} + l_{\vec{F}_2} + l_{\vec{F}_1'} + l_{\vec{F}_2'} \\ m_{\vec{F}_1} + m_{\vec{F}_2} + m_{\vec{F}_1'} + m_{\vec{F}_2'} \\ n_{\vec{F}_1} + n_{\vec{F}_2} + n_{\vec{F}_1'} + n_{\vec{F}_2'} \end{bmatrix}, \vec{e}_R = \begin{bmatrix} l_{\vec{e}_R} \\ m_{\vec{e}_R} \\ n_{\vec{e}_R} \end{bmatrix} = \frac{\vec{R}}{|\vec{R}|}. \quad (1)$$

Модуль вектора \vec{R} есть величина усилия натяжения в оттяжке периферийного шнура; оттяжка лежит на прямой, параллельной орту \vec{e}_R .

Построение периферийного шнура. Ниже пошагово описан алгоритм построения периферийного шнура, блок-схема которого представлена на рис. 4.

Отражающая поверхность и конструкция рефлектора обладают свойством симметрии относительно плоскости OXY . Рассматриваемый рефлектор имеет 8 спиц, расположенных симметрично относительно плоскости OXY , поэтому достаточно построить половину периферийного шнура, расположенную по одну сторону от плоскости симметрии.

Шаг 1. В соответствии с блок-схемой, показанной на рис. 4, построение периферийного шнура ведется последовательно от сектора к сектору. Внутри каждого сектора построение ПШ начинается от точки крепления ПШ к спице силового каркаса $A(x_A; y_A; z_A)_i$. Конечная форма и распределение усилий в участках ПШ зависят от двух параметров, задаваемых в начале работы алгоритма:

- $(t_0)_i$ – длина первой оттяжки ПШ в секторе i ;
- $T_{i,1}$ – величина натяжения первой в секторе i оттяжки ПШ.

Шаг 2, 3. Дальнейшее выполнение алгоритма заключается в работе цикла построения ПШ по секторам (шаг 2) и вложенного в него цикла построения ПШ по участкам внутри секторов (шаг 3). Построение ПШ разбивается на несколько шагов в зависимости от количества секторов (спиц) и количества facets, расположенных вдоль радиальных шнуров. На каждом шаге выбираются три точки (рис. 5):

$$(P_1)_{i,j} = \begin{bmatrix} x_1 \\ y_1 \\ z_1 \end{bmatrix}_{i,j}, (P_2)_{i,j} = \begin{bmatrix} x_2 \\ y_2 \\ z_2 \end{bmatrix}_{i,j}, (P_3)_{i,j} = \begin{bmatrix} x_3 \\ y_3 \\ z_3 \end{bmatrix}_{i,j}. \quad (2)$$

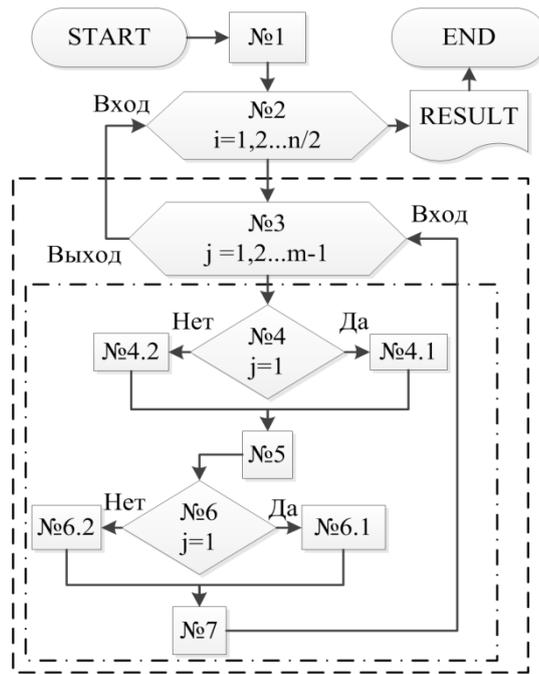


Рис. 4. Блок-схема алгоритма построения периферийного шнура:
 i – номер сектора (или спицы); j – номер участка ПШ;
 n – количество секторов (спиц); m – количество фазет вдоль радиального направления

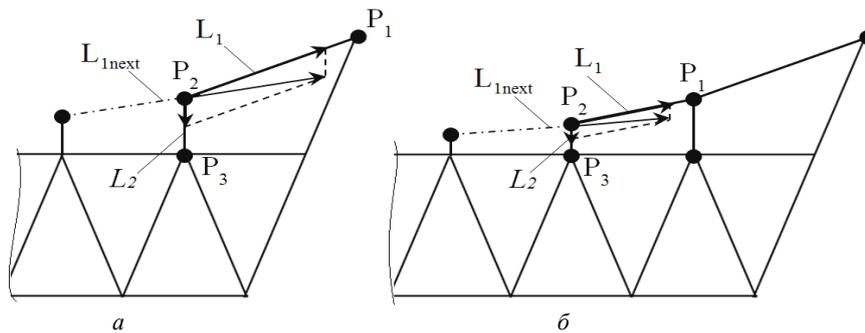


Рис. 5. Схема построения участка периферийного шнура в первом секторе

Шаг 4. Шаг 4.1. выполняется в случае построения первого участка ПШ ($j = 1$) в рассматриваемом секторе, как показано на рис. 5, а:

$$(P_1)_{i,1} = \begin{bmatrix} x_1 \\ y_1 \\ z_1 \end{bmatrix}_{i,1} = \begin{bmatrix} x_f \\ y_f \\ z_f \end{bmatrix}_i, (P_3)_{i,1} = \begin{bmatrix} x_3 \\ y_3 \\ z_3 \end{bmatrix}_{i,1} = \begin{bmatrix} x_M \\ y_M \\ z_M \end{bmatrix}_{i,1},$$

$$(P_2)_{i,1} = \begin{bmatrix} x_2 \\ y_2 \\ z_2 \end{bmatrix}_{i,1} = (\vec{e}_R)_{i,j} \cdot (t_0)_i + \begin{bmatrix} x_3 \\ y_3 \\ z_3 \end{bmatrix}_{i,1}. \quad (3)$$

Иначе выполняется шаг 4.2 ($j > 1$), как показано на рис. 5, б:

$$(P_1)_{i,j} = \begin{bmatrix} x_1 \\ y_1 \\ z_1 \end{bmatrix}_{i,j} = \begin{bmatrix} x_2 \\ y_2 \\ z_2 \end{bmatrix}_{i,j-1}, (P_3)_{i,j} = \begin{bmatrix} x_3 \\ y_3 \\ z_3 \end{bmatrix}_{i,j} = \begin{bmatrix} x_{last-1} \\ y_{last-1} \\ z_{last-1} \end{bmatrix}_{i,j},$$

$$(P_2)_{i,j} = \begin{bmatrix} x_2 \\ y_2 \\ z_2 \end{bmatrix}_{i,j} = (\vec{e}_R)_{i,j} \cdot s_0 + \begin{bmatrix} x_3 \\ y_3 \\ z_3 \end{bmatrix}_{i,j}, \quad (4)$$

где $s_0 = \frac{l_{\vec{e}_{LR1}} \cdot (y_3 - y_1)_{i,j} - m_{\vec{e}_{LR1}} \cdot (x_3 - x_1)_{i,j}}{m_{\vec{e}_{LR1}} \cdot l_{\vec{e}_R} - l_{\vec{e}_{LR1}} \cdot m_{\vec{e}_R}}$. Коэффициенты $l_{\vec{e}_{LR1}}$, $m_{\vec{e}_{LR1}}$, $n_{\vec{e}_{LR1}}$ определяются по формуле (12).

Шаг 5. Орт $\vec{e}_{L2} = (\vec{e}_R)_{i,j}$ направляющего вектора прямой L_2 , на которой лежит оттяжка ПШ, найден ранее по формуле (1). Далее определяем орт \vec{e}_{L1} направляющего вектора прямой L_1 , на которой лежит участок ПШ:

$$\vec{L}_1 = \begin{bmatrix} l_{\vec{L}_1} \\ m_{\vec{L}_1} \\ n_{\vec{L}_1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_1 - x_2 \\ y_1 - y_2 \\ z_1 - z_2 \end{bmatrix}_{i,j}, \vec{e}_{L1} = \frac{\vec{L}_1}{|\vec{L}_1|}. \quad (5)$$

Определим угол между участком ПШ и оттяжкой ПШ по формуле $\zeta_{i,j} = \arccos(\vec{e}_{L1} \cdot \vec{e}_{L2})$.

Далее по правилу параллелограмма найдем модуль равнодействующей системы сил, действующих на точку $(P_2)_{i,j}$ [2].

Шаг 6. Шаг 6.1. выполняется в случае построения первого участка ПШ в секторе, как показано на рис. 5, а:

$$T_{i,j+1} = T_{i,2} = (R_{i,1}^2 + T_{i,1}^2 + 2 \cdot R_{i,1} \cdot T_{i,1} \cdot \cos(\zeta_{i,1}))^{1/2}. \quad (6)$$

Иначе выполняется шаг 6.2 ($j > 1$), как показано на рис 5, б:

$$T_{i,j} = T'_{i,j} \text{ (см. формулу (13)),}$$

$$T_{i,j+1} = (R_{i,j}^2 + T_{i,j}^2 + 2 \cdot R_{i,j} \cdot T_{i,j} \cdot \cos(\zeta_{i,j}))^{1/2}. \quad (7)$$

Полученная величина $T_{i,j+1}$ есть усилие натяжения в следующем участке ПШ.

Шаг 7. Теперь необходимо определить направление следующего участка ПШ. Для этого определим направляющий вектор следующего участка ПШ, а также его орт:

$$\vec{L}_{Lnext} = \begin{bmatrix} l_{Lnext} \\ m_{Lnext} \\ n_{Lnext} \end{bmatrix} = \vec{e}_{L1} \cdot T_{i,j} + e_{L2} \cdot R_{i,j}, \quad \vec{e}_{Lnext} = \frac{\vec{L}_{Lnext}}{|\vec{L}_{Lnext}|}. \quad (8)$$

Рассмотрим три вектора: \vec{e}_{Lnext} – орт направляющего вектора следующего участка ПШ; $(\vec{e}_R)_{i,j+1}$ – орт направляющего вектора следующей оттяжки ПШ,

$$\vec{V}_c = \begin{bmatrix} l_{\vec{V}_c} \\ m_{\vec{V}_c} \\ n_{\vec{V}_c} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} (x_2)_{i,j} - (x_3)_{i,j+1} \\ (y_2)_{i,j} - (y_3)_{i,j+1} \\ (z_2)_{i,j} - (z_3)_{i,j+1} \end{bmatrix} - \text{направляющий вектор}$$

прямой, проходящей через точки $(P_2)_{i,j}$ и $(P_3)_{i,j+1}$. Найдем смешанное произведение этих векторов:

$(\vec{e}_{Lnext}, (\vec{e}_R)_{i,j+1}, \vec{V}_c) \neq 0$. Смешанное произведение не равно нулю. Следовательно, прямые являются скрещивающимися, т. е. соседние участки ПШ не лежат в одной плоскости [3].

Для того чтобы определить координаты точки $(P_2)_{i,j+1}$, необходимо разложить реакцию со стороны

следующего участка ПШ $\vec{R}_{Lnext} = T_{i,j+1} \cdot \vec{e}_{Lnext}$ на две составляющие.

Первая компонента \vec{R}_{Lnext} лежит на прямой, полученной пересечением плоскостей $Plane_1$ и $Plane_2$. $Plane_1$ задается прямой следующей оттяжки ПШ и точкой $(P_2)_{i,j}$. $Plane_2$ задается вектором \vec{L}_{Lnext} и точкой P_{guy} на ванте ФОС, соединяющей узел ФС $(P_2)_{i,j}$ с соответствующим узлом ТС. Вторая компонента

\vec{R}_{Lnext} направлена вдоль рассматриваемой ванта ФОС.

Плоскости $Plane_1$ и $Plane_2$ описываются уравнениями:

$$A_{plane1} \cdot x + B_{plane1} \cdot y + C_{plane1} \cdot z + D_{plane1} = 0$$

и

$$A_{plane2} \cdot x + B_{plane2} \cdot y + C_{plane2} \cdot z + D_{plane2} = 0. \quad (9)$$

Найдем коэффициенты при уравнениях плоскости $Plane_1$:

$$\begin{aligned} A_{plane1} &= ((y_M)_{i,j+1} - (y_2)_{i,j}) \times \\ &\times (n_{\vec{e}R})_{i,j+1} - ((z_M)_{i,j+1} - (z_2)_{i,j}) \cdot (m_{\vec{e}R})_{i,j+1}, \\ B_{plane1} &= ((z_M)_{i,j+1} - (z_2)_{i,j}) \times \\ &\times (l_{\vec{e}R})_{i,j+1} - ((x_M)_{i,j+1} - (x_2)_{i,j}) \cdot (n_{\vec{e}R})_{i,j+1}, \\ C_{plane1} &= ((x_M)_{i,j+1} - (x_2)_{i,j}) \times \\ &\times (m_{\vec{e}R})_{i,j+1} - ((y_M)_{i,j+1} - (y_2)_{i,j}) \cdot (l_{\vec{e}R})_{i,j+1} \end{aligned} \quad (10)$$

и $Plane_2$:

$$\begin{aligned} A_{plane2} &= ((y_2)_{i,j} - y_{guy}) \cdot n_{\vec{e}R} - ((z_2)_{i,j} - z_{guy}) \cdot m_{\vec{e}R}, \\ B_{plane2} &= ((z_2)_{i,j} - z_{guy}) \cdot l_{\vec{e}R} - ((x_2)_{i,j} - x_{guy}) \cdot n_{\vec{e}R}, \\ C_{plane2} &= ((x_2)_{i,j} - x_{guy}) \cdot m_{\vec{e}R} - ((y_2)_{i,j} - y_{guy}) \cdot l_{\vec{e}R}, \end{aligned} \quad (11)$$

$$\text{где } P_{guy} = \begin{bmatrix} x_{guy} \\ y_{guy} \\ z_{guy} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -(x_2)_{i,j} \\ (y_2)_{i,j} \\ (z_2)_{i,j} \end{bmatrix} - \text{точка, принадлежащая}$$

прямой, на которой лежит ванта, соединяющая соответствующие узлы фронтальной и тыльной сетей. Данная ванта ориентирована параллельно оси X в системе координат рефлектора.

Определим направление вектора участка ПШ через уравнение прямой, образованной пересечением плоскостей $Plane_1$ и $Plane_2$ [3]:

$$\begin{aligned} \vec{L}_{R1} &= \begin{bmatrix} l_{\vec{L}_{R1}} \\ m_{\vec{L}_{R1}} \\ n_{\vec{L}_{R1}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} B_{plane1} \cdot C_{plane2} - C_{plane1} \cdot B_{plane2} \\ C_{plane1} \cdot A_{plane2} - A_{plane1} \cdot C_{plane2} \\ A_{plane1} \cdot B_{plane2} - B_{plane1} \cdot A_{plane2} \end{bmatrix}, \\ \vec{e}_{LR1} &= \begin{bmatrix} l_{\vec{e}_{LR1}} \\ m_{\vec{e}_{LR1}} \\ n_{\vec{e}_{LR1}} \end{bmatrix} = \frac{\vec{L}_{R1}}{|\vec{L}_{R1}|}. \end{aligned} \quad (12)$$

Найдем угол между вектором \vec{R}_{Lnext} и его компонентой \vec{R}_{Lnext} по формуле $\cos(\varphi_1) = \vec{e}_{Lnext} \cdot \vec{e}_{LR1}$, а затем определим величину натяжения $T'_{i,j+1}$ в следующем участке ПШ, лежащим на прямой с направляющим вектором \vec{R}_{Lnext} :

$$T_{R1} = T_{i,j+1} \cdot \cos(\varphi_1), \quad T'_{i,j+1} = T_{R1}. \quad (13)$$

Далее найдем угол между векторами $\overline{R1}_{L1next}$ и $\overline{R2}_{L1next}$ по формуле $\cos(\varphi_2) = l_{\overline{R1}} [3]$.

Составим квадратное уравнение по правилу параллелограмма относительно T_{R2} :

$$(T_{i,j+1})^2 = (T_{R1})^2 + (T_{R2})^2 + 2 \cdot (T_{R1}) \cdot (T_{R2}) \cdot \cos(\varphi_2) \quad (14)$$

и, решив его для положительного значения T_{R2} , найдем величину натяжения в ванте:

$$T_{R2} = -T_{R1} \cdot \cos(\varphi_2) + \left((T_{R1} \cdot \cos(\varphi_2))^2 - T_{R1}^2 + (T_{i,j+1})^2 \right)^{1/2}. \quad (15)$$

После выполнения шага 7 следует переход на новый круг (если $j < m - 1$, то $j = j + 1$; если $j = m - 1$, то $i = i + 1$ и $j = 1$).

В конце работы алгоритма на выходе получаем массивы данных:

- $[P_2]$ – координаты узлов периферийного шнура;
- $[T]$ – величины натяжений в участках периферийного шнура.

В результате построения получим геометрическое место узлов периферийного шнура, а также величины натяжений в каждом участке периферийного шнура.

Данный алгоритм был использован при написании макросов на процедурном языке APDL конечно-элементного комплекса ANSYS. Построенная конечно-элементная модель фронтальной сети рассматриваемого сеччатого рефлектора получила предварительное натяжение в соответствии с заданными и расчетными требованиями. Затем был проведен поиск равновесного состояния, в результате которого путем варьирования параметров была получена напряженная модель фронтальной сети, оптимизированная с необходимой точностью усилий натяжения в шнурах.

Применение разработанного авторами статьи алгоритма позволяет с использованием простых методов оптимизации (например метод Хука–Дживса) получить конечные величины усилий в шнурах формообразующей структуры рефлектора. Рассмотрение алгоритма оптимизации построения периферийного шнура будет проведено в следующих работах авторов.

Библиографические ссылки

1. Голдобин Н. Н. Особенности проектирования формообразующей структуры крупногабаритного трансформируемого рефлектора космического аппарата // Молодежь. Техника. Космос : Тр. VI Общерос. молодежной науч.-практ. конф. / БГТУ «Военмех». СПб., 2014.
2. Яблонский А. А. Курс теоретической механики. М. : Высш. шк., 1966.
3. Бронштейн И. Н., Семендяев К. А. Справочник по математике для инженеров и учащихся втузов. М. : Наука, 1986.

References

1. Goldobin N. N. [Features of designing of network structure of a large transformed reflector of a spacecraft]. *Trudy VI Obshcheros. molodezhnoy nauch.-praktich. konfer. "Molodezh'. Tekhnika. Kosmos"* [Proc. VI National Youth Scientific-practical. Conf. BGTU "Voyenmekh" "Youth. Tech. Space"]. St. Petersburg, 2014. (In Russ.)
2. Yablonskiy A. A. *Kurs teoreticheskoy mekhaniki* [Theoretical mechanics course]. Moscow, *Visshaya shkola Publ.*, 1966.
3. Bronshtein I. N., Semendyaev K. A. *Spravochnik po matematike dlya inzhenerov i uchashikhsya VTYZov* [Handbook of mathematics for engineers and students of technical colleges]. Moscow, *Nauka Publ.*, 1986.

© Голдобин Н. Н., Тестоедов Н. А., 2014

УДК 658.512.001.56

К ВОПРОСУ ПОВЫШЕНИЯ ТОЧНОСТИ И НАДЕЖНОСТИ СИСТЕМЫ ИСПЫТАНИЯ И ИМИТАЦИИ НЕВЕСОМОСТИ ДЛЯ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ

И. В. Ковалев¹, Ю. О. Кикоть²

¹Сибирский государственный аэрокосмический университет имени академика М. Ф. Решетнева
Российская Федерация, 660014, г. Красноярск, просп. им. газ. «Красноярский рабочий», 31
E-mail: kovalev.fsu@mail.ru

²Сибирский государственный технологический университет
Российская Федерация, 660049, г. Красноярск, пр. Мира, 82
E-mail: awa@yandex.ru

Представлен обзор основных технических решений по улучшению точности и надежности системы контроля испытаний и имитации невесомости для космических аппаратов. Рассмотрен ряд проблем на этапе проектирования системы имитации невесомости, связанных как со сложностью конструкции, так и с тем, что система должна работать с дорогостоящими космическими аппаратами. Показано, что с этой целью