

Численная оптимизация геометрической конфигурации крупногабаритной космической конструкции

В.В. Салмин¹, К.В. Пересыпкин¹, А.С. Четвериков¹, И.С. Ткаченко¹

¹Самарский национальный исследовательский университет им. академика С.П. Королева, Московское шоссе 34А, Самара, Россия, 443086

Аннотация. В работе рассматривается перспективный проект космического аппарата наблюдения с дифракционной оптической системой. Проводится исследование предложенной авторами ранее силовой схемы крепления дифракционной линзы. В этой работе с помощью численной оптимизации находятся оптимальные значения геометрических параметров конструкции с учетом ее жесткостных характеристик.

1. Введение

В предыдущих работах авторов [4-6] обсуждалось формирование силовой схемы конструкции космического аппарата наблюдения (КАН) использующего для фокусировки входного светового потока вместо зеркала дифракционную линзу. Конфигурация дифракционной оптической системы КАН взяты из проекта MOIRE [1-3]. В этом проекте разрабатывается КАН с линзой Френеля диаметром 10 м. Эта линза должна располагаться от корпуса КА на расстоянии 60 м. Предварительная конфигурация этого КАН показана на рисунке 1.



Рисунок 1. Проект геостационарного космического аппарата с мембранной оптической системой (MOIRE - Membrane Optical Imager for Real-Time Exploitation)[1-3].

2. Требования к конструкции крепления дифракционной линзы

Элементы оптической системы должны располагаться друг относительно друга на четко определенных расстояниях и быть соосными с большой точностью. Следовательно,

конструкция крепления линзы к корпусу КА должна обладать свойством размерностабильности. Очевидно, что эта конструкция должна в процессе выведения быть сложенной, а на орбите разворачиваться до рабочего состояния. Сделать разворачиваемую конструкцию таких размеров размерностабильной – сложная инженерная задача. Размерностабильность конструкции может быть нарушена по ряду причин: пластические деформации, возникшие на этапе выведения; температурные деформации, колебания конструкции. Первые две причины исключаются выбором подходящего материала. Колебания конструкции, возникнут из-за инерционных нагрузок в процессе ориентации КА на объект наблюдения. Эти колебания в такой крупногабаритной системе могут менять положение линзы относительно других элементов оптической системы. Если амплитуда этих колебаний будет достаточно велика, для того чтобы исказить изображение, и время затухания этих колебаний будет велико, то получить изображение объекта наблюдения не удастся. Для предотвращения возникновения длительных колебаний линзы с большой амплитудой конструкция должна обладать достаточно большой жесткостью. Требования по жесткости формулируем в виде ограничения на значение частот собственных колебаний. Традиционные КА наблюдения выполняют свои функции при наличии солнечных батарей, частота собственных колебаний которых обычно составляет от 1 до 2.5 Гц. Таких же величин собственных колебаний мы должны добиться и для рассматриваемой конструкции.

3. Силовая схема крепления дифракционной линзы

В работе [4] предложена силовая схема конструкции, позволяющая удовлетворить ранее приведенным требованиям. Высокая жесткость в этой схеме достигается объединением трех ферм в одну целую конструкцию посредством натянутых между ними тросов. Натянутые тросы нагружают фермы поперечными силами, что может привести к их большим деформациям. Чтобы избежать этого, в этой силовой схеме фермы сделаны дугообразной формы и их концы связаны продольными тросом (рисунки 2-4). Такие фермы работают как арки и способны воспринимать поперечные нагрузки. Вид конструкции КАН с дифракционной оптической системой, соответствующей этой силовой схеме показан на рисунке 5.

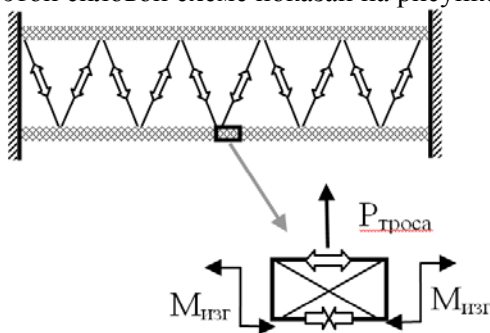


Рисунок 2. Силовая работа прямых ферм при стяжке их тросами. Фигурными стрелками показаны внутренние силы в элементе конструкции, а тонкими – воздействия на рассматриваемый элемент конструкции со стороны других элементов.

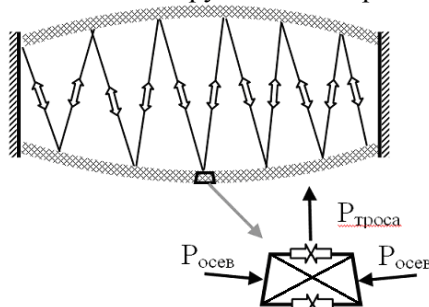


Рисунок 3. Силовая работа прямых ферм в виде арок при стяжке их тросами. Фигурными стрелками показаны внутренние силы в элементе конструкции, а тонкими – воздействия на рассматриваемый элемент конструкции со стороны других элементов.

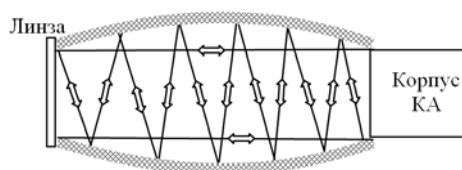


Рисунок 4. Обеспечение постоянства расстояния между концами арочных ферм с помощью продольных тросов.

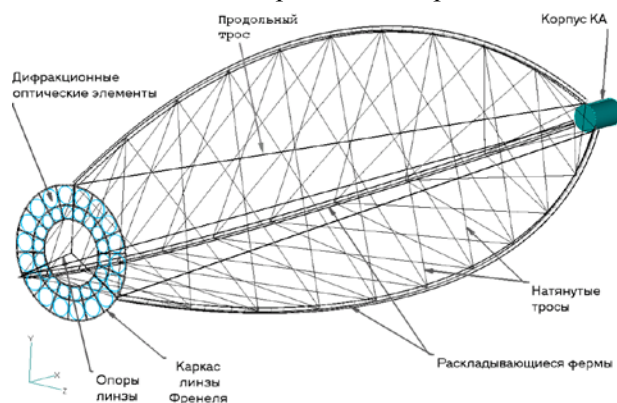


Рисунок 5. Конструкция крепления дифракционной линзы к корпусу КА наблюдения.

Необходимой частью формирования силовой схемы рассматриваемой конструкции является метод выбора оптимальных значений ее параметров. В работе [5] предложен метод поиска наилучшего сочетания параметров с точки зрения массы конструкции. Параметрами рассматриваемой силовой схемы являются: радиус арочных ферм, R ; площади поперечных сечений стержней ферм; площади поперечных сечений тросов. Этот метод заключается в создании нескольких конечно-элементных моделей конструкции с разными радиусами, и проведение на этих моделях оптимизационных расчетов. В этих расчетах проектными параметрами являются все перечисленные параметры кроме R . Далее среди найденной серии оптимальных решений находим наилучшее решение (с минимальной массой) и соответствующее этому решению значение R считаем оптимальным. Недостатками такого подхода являются:

- Высокая трудоемкость – необходимо создавать не одну конечно-элементную модель, а несколько;
- Неточное оптимальное значение R из-за конечного количества рассмотренных значений R ;
- Такой подход пригоден только для конструкций с геометрией, описываемой одним параметром. Иначе получится большое количество сочетаний значений геометрических параметров и для каждого сочетания придется строить свою конечно-элементную модель делать свой оптимизационный расчет.

Отметим, что геометрия рассматриваемой конструкции описывается одним параметром, R , только если принять форму ферменных арок в виде дуг. То, что дуга является оптимальной формой в этом случае не очевидно.

В этой работе исследуются подходы к проведению оптимизационных расчетов этой конструкции с включением геометрических параметров в число переменных, варьируемых процедурой численной оптимизации.

4. Используемые методы моделирования

Моделирование поведения конструкции выполняется в конечно-элементной системе MSC.Nastran. В ходе оптимизации рассматриваемой конструкции для оценки ее прочности отыскиваются следующие отклики:

- силы, действующие в элементах конструкции при управлении ориентацией КАН на орбите;
- критическая нагрузка потери устойчивости конструкции КАН при управлении ориентацией КАН на орбите.

При этом допустимые силы определяются прочностными характеристиками материалов элементов конструкции. Кроме того, для тросов требуется, чтобы сила натяжения была положительной (тросы натянуты, а не провисли).

Для оценки жесткости конструкции крепления отыскивались собственные колебания конструкции КАН.

Методы отыскания этих откликов уже приводились авторами в работах [4,5].

5. Геометрические проектные переменные

Система MSC. Nastran позволяет связывать координаты узловых точек с проектными переменными при решении задачи численной оптимизации. Конечно-элементная модель рассматриваемой конструкции содержит ряд узловых точек вдоль осей ферменных арок. Примем изменения расстояний между осью оптической системы КАН и этими узловыми точками в качестве проектных переменных ΔR_i (рисунок 6). Значения ΔR_i для узловых точек разных ферменных арок с одинаковыми номерами определяются одной проектной переменной и всегда равны для сохранения симметрии конструкции. Такие проектные переменные позволяют описать произвольное положение оси ферменных арок.



Рисунок 6. Геометрия конструкции крепления дифракционной линзы КАН до оптимизации (а) и после незавершенной процедуры оптимизации (б).

6. Результаты численной оптимизации

Расчет проводился процедурой численной оптимизации системы MSC. Nastran, реализующей градиентный метод (процедура описана авторами ранее в [6]).

Расчет в приведенной постановке не удалось довести до решения, удовлетворяющего требованиям к конструкции. Причиной этого является медленная сходимость итерационного процесса (после большого количества итераций не удалось приблизиться к решению). Однако по промежуточным результатам можно судить как о характере оптимального решения, так и о причинах расхождения процесса. Геометрия конструкции, полученная в результате не доведенной до конца численной оптимизации, показана на рисунке 7.

Из рисунка 7 видно, что оптимальное решение процедура оптимизации ищет в виде дуги. Также можно отметить, что радиус дуги в результате неоконченного процесса оптимизации увеличивается.

Причины расхождения можно понять, проанализировав следующую ситуацию. Представим, что арочные фермы имеют оси в виде дуг. Одна узловая точка отклоняется от оси ферменной арки в сторону увеличения ее расстоянию до оптической оси. Тогда кривизна ферменной арки резко уменьшается, что приводит к изменению характера ее силовой работы. Арка постоянного радиуса при натяжении тросов работает на сжатие, а арка с местным увеличением кривизны оси работает на изгиб. При этом падает жесткость не только этого искривленного места арки, а и всей арки в целом (в нее как будто вставили податливую пружину). Видим, что отклонение

значения одной проектной переменной сильно меняет жесткость всей системы. Для того чтобы этого не происходило, все геометрические переменные должны меняться вместе, равномерно увеличивая радиус всей дуги. Видимо, необходимо задать такие проектные переменные, чтобы исключить независимые друг от друга изменения положения соседних узловых точек.

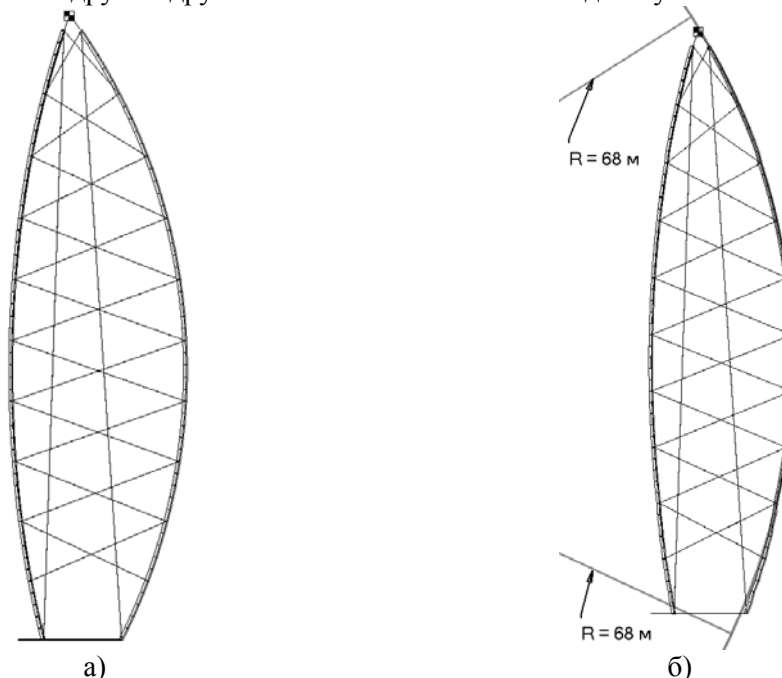


Рисунок 7. Геометрия конструкции крепления дифракционной линзы КАН до оптимизации (а) с радиусом осей ферменных арок 60 метров и после незавершенной процедуры оптимизации (б).

7. Заключение

Постановка численной оптимизации геометрической формы силовых конструкций успешно выполнена только для ограниченного ряда конструкций. Решение этой задачи для силовой конструкции КАН представляет интерес как с точки зрения проектирования этой конструкции, так и с точки зрения получения опыта применения численной оптимизации в этой области.

8. Литература

- [1] Early, J. Twenty meter space telescope based on diffractive Fresnel lens / J. Early, R. Hyde, R. Baron // Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering. – 2004. – Vol. 5166. – P. 148-156.
- [2] Atcheson, P. MOIRE - Initial demonstration of a transmissive diffractive membrane optic for large lightweight optical telescopes / P. Atcheson, C. Stewart, J. Domber, K. Whiteaker, J. Cole, P. Spuhler, A. Seltzer, L. Smith // Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering. – 2012. – Vol. 8442. – P. 844221.
- [3] Atcheson, P. MOIRE - Ground demonstration of a large aperture diffractive transmissive telescope / P. Atcheson, J. Domber, K. Whiteaker, J.A. Britten, S.N. Dixit, B. Farmer // Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering. – 2014. – Vol. 9143. – P. 91431W.
- [4] Salmin, V.V. Feasibility study and modeling of components for an informational space system based on a large diffractive membrane/ V.V. Salmin, S.V. Karpeev, K.V. Peresypkin, A.S. Chetverikov, I.S. Tkachenko // CEUR Workshop Proceedings. – 2016. – Vol. 1638. – P. 132-148.
- [5] Салмин, В.В. Моделирование управления крупногабаритной конструкцией на геостационарной орбите / В.В. Салмин, А.С. Четвериков, К.В. Пересыпкин, И.С. Ткаченко

- // Труды Международной конференции «Информационные технологии и нанотехнологии». – Самара: Новая техника, 2017.
- [6] Аншаков, Г.П. Проектирование и управление дифракционной оптической системой для перспективного проекта космического аппарата наблюдения / Г.П. Аншаков, В.В. Салмин, А.С. Четвериков, К.В. Пересыпкин, И.С.Ткаченко // Труды Международной конференции «Информационные технологии и нанотехнологии». – Самара: Новая техника, 2018.

Numerical optimization of geometric configuration of large space structure

V.V. Salmin¹, K.V. Peresyppkin¹, A.S. Chetverikov¹, I.S. Tkachenko¹

¹Samara National Research University, Moskovskoe Shosse 34A, Samara, Russia, 443086

Abstract. The paper considers a promising project of a spacecraft with a diffraction optical system. The study of the previously proposed power scheme of the diffraction lens attachment is carried out. In this work, the optimal values of the geometric parameters of the structure with regard to its stiffness characteristics are found by means of numerical optimization.