

Пересыпкин К.В.

ЧИСЛЕННАЯ ОПТИМИЗАЦИЯ ПАРАМЕТРОВ КРУПНОГАБАРИТНОЙ КОСМИЧЕСКОЙ КОНСТРУКЦИИ

Введение

В работе рассматривается перспективный проект космического аппарата наблюдения с дифракционной оптической системой. Решается задача обеспечения стабильного положения элементов оптической системы. Для этого используется предложенная авторами ранее силовая схема крепления дифракционной линзы. Выполняется исследование влияния геометрических параметров конструкции на ее жесткостные характеристики. С помощью численной оптимизации находятся оптимальные значения параметров конструкции с точки зрения минимизации ее массы.

В статье [1] обсуждалось формирование силовой схемы конструкции космического аппарата наблюдения (КАН), использующего для фокусировки входного светового потока дифракционную линзу вместо зеркала. Конфигурации дифракционной оптической системы КАН взяты из проекта MOIRE [2-4]. В данном проекте разрабатывается КАН с линзой Френеля диаметром 10 м. Эта линза должна располагаться от корпуса КАН на расстоянии 60 м. Предварительная конфигурация КАН показана на рис. 1.



Рис. 1. Проект геостационарного КАН с мембранной оптической системой (MOIRE – Membrane Optical Imager for Real-Time Exploitation)

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 развертываться до рабочего состояния. Сделать развертываемую 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 $1 \div 2.5$ Гц. Таких же величин собственных колебаний необходимо добиться и для рассматриваемой конструкции.

Силовая схема крепления дифракционной линзы

В [1] предложена силовая схема конструкции, позволяющая удовлетворить 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 силовой схеме фермы сделаны дугообразной формы и их концы связаны продольными тросом (рис. 2,3).

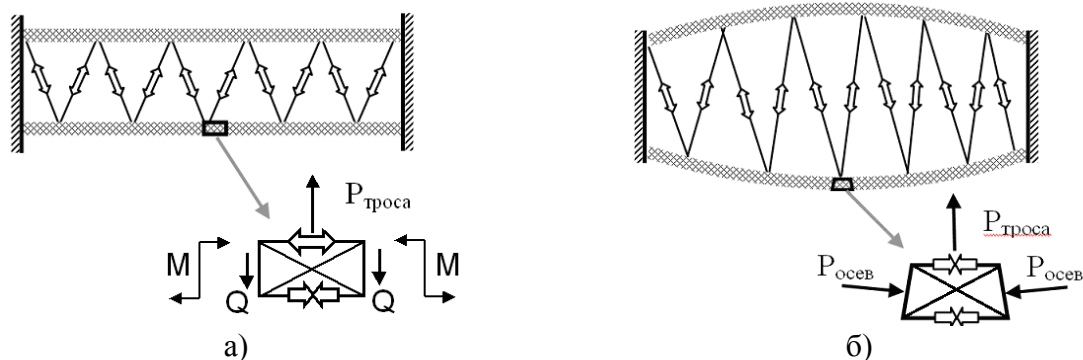


Рис. 2. Силовая работа прямых и арочных ферм при стяжке их тросами. Фигурными стрелками показаны внутренние силы в элементе конструкции, тонкими – воздействия на рассматриваемый элемент конструкции со стороны других элементов

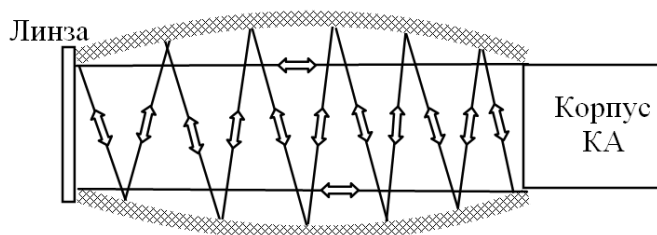


Рис. 3. Обеспечение постоянства расстояния между концами арочных ферм с помощью продольных тросов

Такие фермы работают как арки и способны воспринимать поперечные нагрузки.

Вид конструкции КАН с дифракционной оптической системой, соответствующей этой силовой схеме, показан на рис. 4.

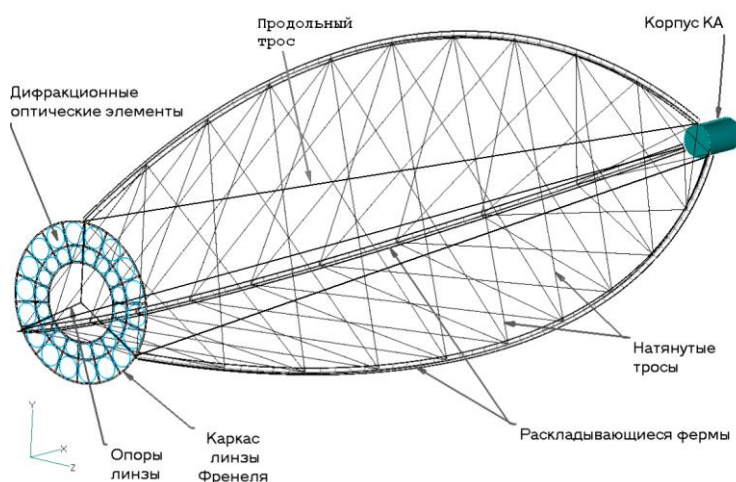


Рис. 4. Конструкция крепления дифракционной линзы к корпусу КАН
Определение параметров

Необходимой частью формирования силовой схемы рассматриваемой конструкции является метод выбора оптимальных значений ее параметров. Параметры рассматриваемой силовой схемы можно условно разделить на параметры сечений силовых элементов и параметры, определяющие общую геометрию конструкции (геометрические параметры). Параметрами сечений силовых элементов являются площади поперечных сечений стержней ферм и площади поперечных сечений тросов. Основными геометрическими параметрами рассматриваемой схемы являются: диаметр корпуса КА; диаметр дифракционной линзы; расстояние между линзой и корпусом; геометрическая конфигурация ферменных арок. Все эти параметры, кроме геометрической конфигурации ферменных арок, определяются из соображений, не относящихся к силовой работе.

В работе выполняется поиск наилучшего сочетания параметров с точки зрения минимума массы конструкции. В ходе поиска изменяются параметры сечений

конструкции. Геометрическую конфигурацию ферменных принимаем в виде дуг радиусом 60 м. Поиск оптимальной конструкции выполняется следующим образом.

Создаются нескольких конечно-элементных моделей конструкции с разными радиусами ферменных арок. Для всех моделей проводится процедура численной оптимизации в следующей постановке:

- критерий оптимизации – минимум массы конструкции;
- проектные параметры – площади поперечных сечений тросов и стержней ферменных дуг, s ;
- ограничения: прочность и устойчивость конструкции при натяжении тросов и при инерционных нагрузках при ориентации КАН, частоты собственных колебаний не должны быть ниже заданного значения $[f]$.

Моделирование поведения конструкции выполняется в конечно-элементной системе MSC.Nastran. Используется градиентный метод численной оптимизации:

$$\bar{s}_k = \arg \min \left\{ M(\bar{s}, r_k) \left| \begin{array}{l} s_i^{\min} \leq s_i \leq s_i^{\max}, \\ f_j(\bar{s}, r_k) > [f], j = 7..12, \\ \sigma_i^{\min} \leq \sigma_i(\bar{s}, r_k) \leq \sigma_i^{\max} \end{array} \right. \right\},$$

где M – масса рассматриваемого КА, кг; s – вектор проектных параметров (площади поперечного сечения трубок и тросов, кв.м.); s_k – оптимальное значение вектора проектных параметров при значении радиуса ферменных арок r_k ; f_j – собственная частота КА, Гц; $[f]$ – минимальная частота упругих форм собственных колебаний (равна 1,4 Гц); σ_i – напряжения, возникающие в трубках и тросах; n – число рассматриваемых значений радиуса ферменных арок.

Результаты оптимизационного расчета

Оптимизационный расчет закончился жесткой сходимостью к оптимальному решению, удовлетворяющему ограничениям. Масса оптимальной конструкции крепления линзы составила 213 кг, что вдвое ниже массы конструкции с начальными параметрами (рис. 5).

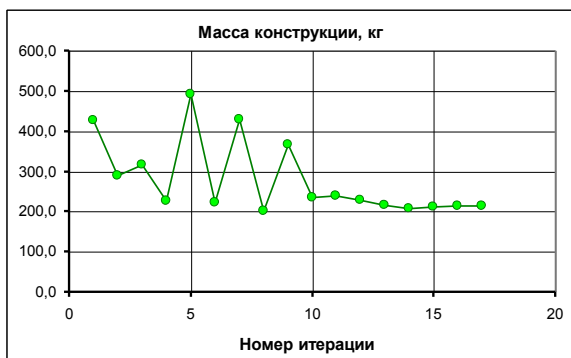


Рис. 5. Изменение значения массы конструкции в ходе итерационного процесса



Рис. 6. Изменение площадей поперечных сечений тросов и стержней арочных ферм в ходе итерационного процесса

Из рис. 6 видно, что снижение массы оптимальной конструкции по сравнению с исходной произошло в большей степени благодаря уменьшению площади поперечного сечения продольных стержней ферменных арок. В начальной конструкции площадь поперечного сечения продольных стержней ферменных арок F_1 более чем вдвое превышала площадь поперечного сечения поперечных стержней и раскосов F_2 . В оптимальной конструкции F_1 более чем втрое меньше чем F_2 . На рис. 7, 8 показаны некоторые отклики для оптимизированной конструкции.

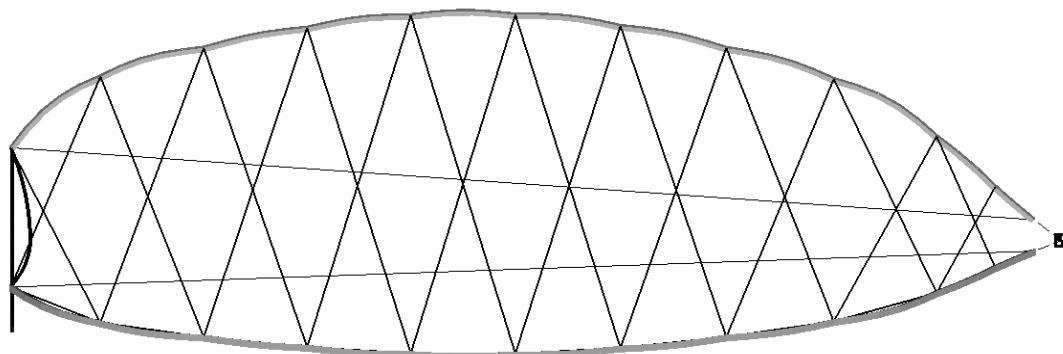
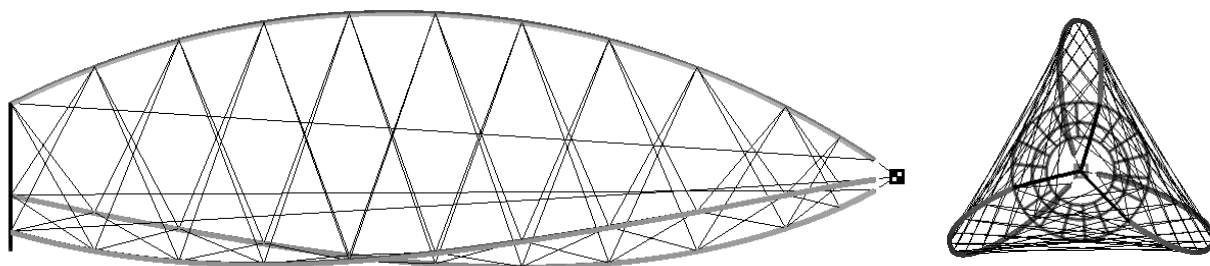


Рис.7. Перемещения конструкции при натяжении тросов, продольное перемещение линзы относительно корпуса 9,2 мм



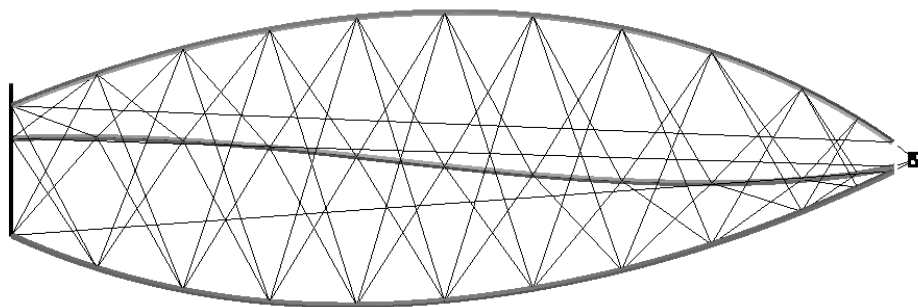


Рис.8. Форма седьмого тона собственных колебаний,
собственная частота 1,04 Гц

Заключение

Выполнена численная оптимизация крупногабаритной космической конструкции. Проведен поиск оптимальных параметров рассматриваемой конструкции градиентным методом численной оптимизации с учетом прочности, жесткости и устойчивости.

Библиографический список

1. Салмин, В.В., Моделирование управления крупногабаритной конструкцией на геостационарной орбите [Текст]: Труды Международной конференции Информационных Технологий и Нанотехнологий. Самара, Россия, Май 2017 / В.В. Салмин, А.С. Четвериков, К.В. Пересыпкин, И.С. Ткаченко.– Самарский Научный Центр Российской Академии Наук, 2017.
2. 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. – ISSN: 0277786X.
3. 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, Article number 844221. - ISBN: 978-081949143-5.
4. 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, Article number 91431W. – ISBN: 978-081949611-9.