

найденных в допредельной ситуации и при $\delta \leq 0,0001$ оно составляет менее 1 %. Также следует отметить, что полученное распределение является многомодальным.

Библиографические ссылки

1. Лопухова С. В. Асимптотические и численные методы исследования специальных потоков однородных событий : дис. ... канд. физ.-мат. наук. Томск, 2008.

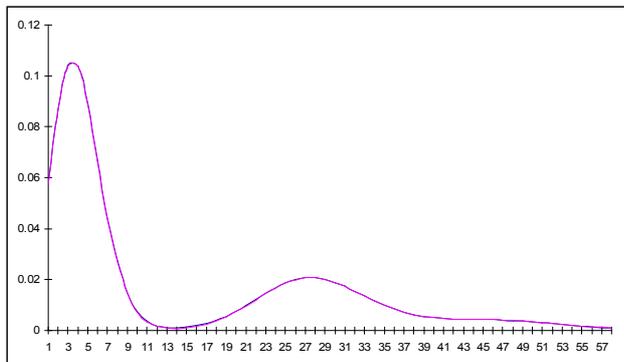


Рис. 2. Распределения вероятностей числа событий SM-потока при $\delta = 0,0001$

2. Назаров А. А., Терпугов А. Ф. Теория вероятностей и случайных процессов : учеб. пособие. Томск : НТЛ, 2006.

3. Назаров А. А., Моисеева С. П. Методы асимптотического анализа в теории массового обслуживания. Томск : НТЛ, 2006.

4. Горбатенко А. Е. Исследование квазиразложимого поумарковского потока // Теория вероятностей, математическая статистика и приложения : сб. материалов Международ. науч. конф. Минск, 2010. С. 53–59.

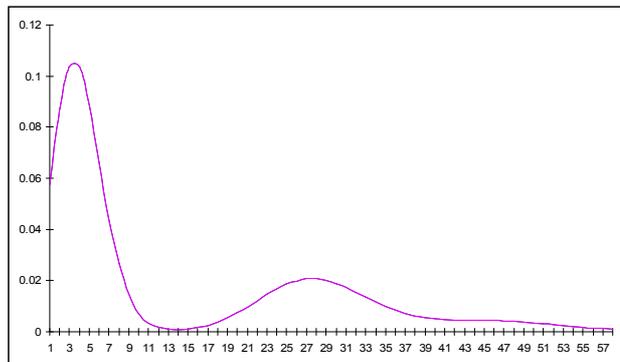


Рис. 3. Распределения вероятностей числа событий SM-потока при $\delta = 0,0001$

A. E. Gorbatenko, A. A. Nazarov

RESEARCH OF SEMIMARKOVIAN PROCESS IN CONDITIONS OF LIMIT RARE CHANGES OF ITS STATES

In this work the SM process in condition of limit rare changes of states of the process is considered. The offered asymptotic condition contains distribution of probabilities of number of events occurred in SM process for time t . It is demonstrated that this distribution can be multimodal.

Keywords: SM process, states of a flow, limit rare changes of flow states, method of additional variable, method of asymptotic analysis.

© Горбатенко А. Е., Назаров А. А., 2010

УДК 539.3:621.396.67

А. С. Евдокимов, Ю. И. Буянов, С. В. Пономарев, Г. В. Шипилов, В. И. Халиманович

СОВМЕСТНЫЙ РАСЧЕТ МЕХАНИЧЕСКИХ И ЭЛЕКТРОДИНАМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ЗОНТИЧНЫХ РЕФЛЕКТОРОВ

Рассмотрен вариант комплексной методики компьютерного моделирования трансформируемых рефлекторов космических аппаратов, позволяющий достичь лучших характеристик антенн.

Ключевые слова: компьютерное моделирование, рефлектор, метод конечных элементов, напряженно-деформированное состояние, диаграмма направленности.

В настоящее время антенные системы широко используются в различных областях науки и техники, особенно в современной спутниковой связи, для которой требуются антенны с высокой точностью формы зеркала. Экспериментальная отработка таких изделий в наземных условиях требует больших материальных и временных затрат.

Поэтому разработка компьютерного моделирования антенных конструкций приобретает все большую актуальность.

В работе М. В. Гряника и В. И. Ломана [1] были рассмотрены классификация разворачиваемых антенн и расчет характеристик излучения зеркальных антенн зонтич-

ного типа. В диссертации Г. Тиберта [2] разрабатывались варианты конструкции крупногабаритных космических рефлекторов. Методы моделирования напряженно-деформированного состояния мембранных конструкций, в том числе и рефлекторов ободного и зонтичного типов, представлены в [3; 4], а также в ряде других зарубежных изданий. Однако в доступных публикациях не исследовалось влияние выраженного напряженного состояния отражающей поверхности из металлического сетеполотна на электродинамические характеристики зеркальных антенн.

В данной статье рассматривается параболический рефлектор зонтичного типа диаметром 4 м, силовая схема которого представляет собой конструкцию, состоящую из силовых и точностных спиц (рис. 1).

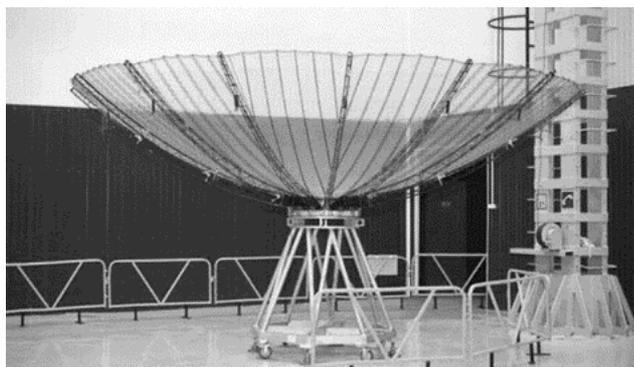


Рис. 1. Рефлектор для спутника «Луч»

Для получения численного решения задачи о напряженно-деформированном состоянии рефлектора использовался метод конечных элементов [5], реализованный в программном комплексе ANSYS. Конечно-элементная модель (КЭМ) конструкции (рис. 2) строилась исходя из следующих принципов:

- сетеполотно моделируется оболочечными мембранными элементами;
- веревочные элементы (шпангоут, оттяжки) моделируются линейными элементами, работающими только на растяжение;
- спицы (силовые, точностные) моделируются балочными элементами с заданным сечением.



Рис. 2. Конечно-элементная модель рефлектора без сетеполотна

Данная модель была использована для проведения расчета напряженно-деформированного состояния рефлектора. Начальная форма спиц и отражающей поверхности задавалась в соответствии с формой теоретического параболоида. В точках, где силовые спицы крепятся к ступице, заданы следующие граничные условия: перемещения и вращения равны нулю; шпангоут и оттяжки нагружены растягивающим усилием, равным 2 кгс и 0,1...0,2 кгс соответственно.

В ходе расчета отмечались отклонения силовых спиц от параболического профиля (рис. 3). Эти отклонения обусловлены изгибающим моментом, который создается растянутым сетеполотном и натянутыми оттяжками. Максимальные отклонения достигали 0,7 мм.

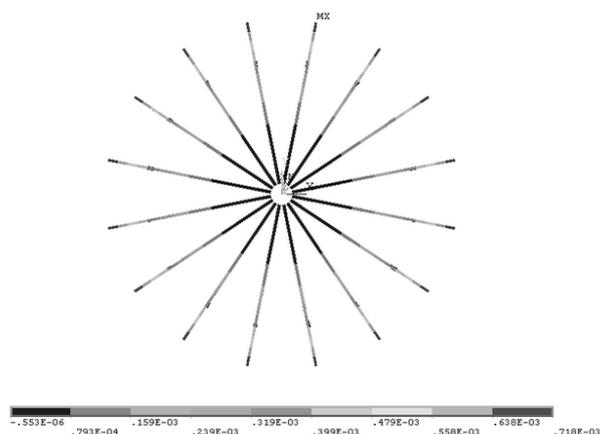


Рис. 3. Отклонения спиц по оси Z, м

Максимальные перемещения отражающей поверхности, не считая периферии, доходили до 0,8 мм (рис. 4). Натяжение сетеполотна, за исключением края, соответствовало номинальному (рис. 5). При этом среднеквадратичное отклонение (СКО) поверхности составило 0,56 мм.

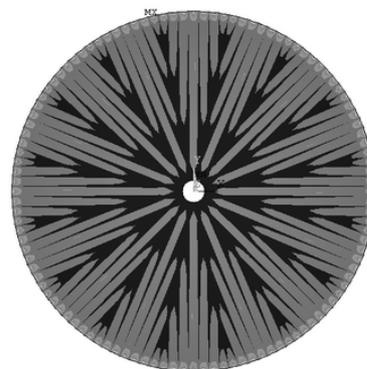


Рис. 4. Изолинии суммарных перемещений сетеполотна, м

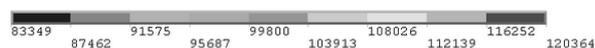
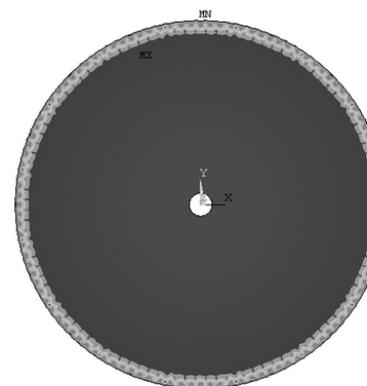


Рис. 5. Интенсивность напряжений, Па

Использование трикотажного металлического сетеполотна для отражающей поверхности трансформируемых космических антенн позволяет получить улучшенные удельные массовые характеристики для рефлекторов. Однако при этом начинает проявляться зависимость коэффициента отражения от напряженного состояния растянутого сетеполотна, изменяется размер ячеек сетеполотна, профиль зеркала отклоняется от параболического, что приводит к изменению электродинамических характеристик зеркала: коэффициента отражения поля от поверхности сетеполотна и формы диаграммы направленности (ДН). Таким образом, возникает необходимость в совместном моделировании напряженно-деформированного состояния и радиотехнических характеристик рефлектора.

Определение основных радиотехнических характеристик антенн связано с получением выражения для электромагнитного поля в дальней зоне, когда источниками поля являются заданные сторонние токи j на отражающей поверхности рефлектора. Вектор плотности тока с учетом коэффициента отражения в данной точке поверхности зеркала можно определить с учетом ориентации векторов \mathbf{H} в падающей и отраженной волнах по формуле

$$\mathbf{j}_s = 2[\mathbf{n}_0 \mathbf{H}] R(\sigma),$$

где \mathbf{j}_s – вектор плотности поверхностного тока в данной точке зеркала; \mathbf{H} – вектор напряженности магнитного поля, создаваемого падающей волной облучателя в данной точке на поверхности зеркала; \mathbf{n}_0 – орт нормали к поверхности зеркала в этой же точке; $R(\sigma)$ – коэффициент отражения, зависящий в основном от размера ячейки сетеполотна и отношения размера ячейки к диаметру нити при одинаковой величине натяжении s вдоль рядов и вдоль столбцов плетения сетеполотна.

Полученная в результате моделирования равновесная форма отражающей поверхности рефлектора использована для расчета диаграмм направленности космического рефлектора методом физической оптики. Расчет проводился с помощью программного пакета для 3D-электромагнитного моделирования FEKO. Главной особенностью программы FEKO является удачное сочетание базового метода моментов с аналитическим методом физической оптики. В рамках метода физической оптики ток приближенно вычисляется через магнитное поле падающей на объект волны. Именно его полагают равным удвоенному касательному магнитному полю падающей волны. Далее рассеянное поле определяется с помощью аппарата функций Грина через заданное распределение токов.

В качестве облучателя рефлектора использовался рупор, фазовый центр которого располагался в фокусе параболеида. При вычислении ДН рефлектора в программе FEKO ДН рупора вводилась в виде массива данных, полученных экспериментально. Отклонения расчетной диаграммы направленности (рис. 6) от экспериментальной диаграммы направленности (рис. 7) составляло не более 10%.

В настоящее время на телекоммуникационных спутниках широко используются многлучевые зеркальные антенны с вынесенной облучающей системой с развертываемым крупногабаритным рефлектором диаметром более 10 м (рис. 8). Методика расчета напряженно-де-

формированного состояния для такого 12-метрового рефлектора рассмотрена в [4; 7].

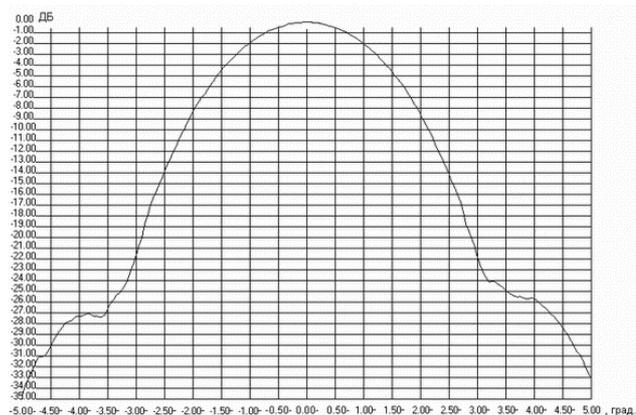


Рис. 6. Экспериментальная диаграмма направленности рефлектора

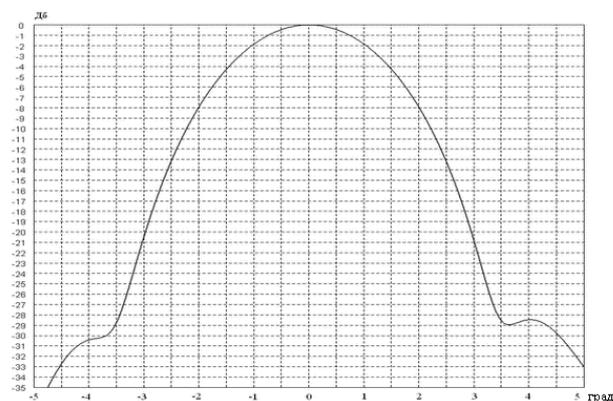


Рис. 7. Расчетная диаграмма направленности рефлектора

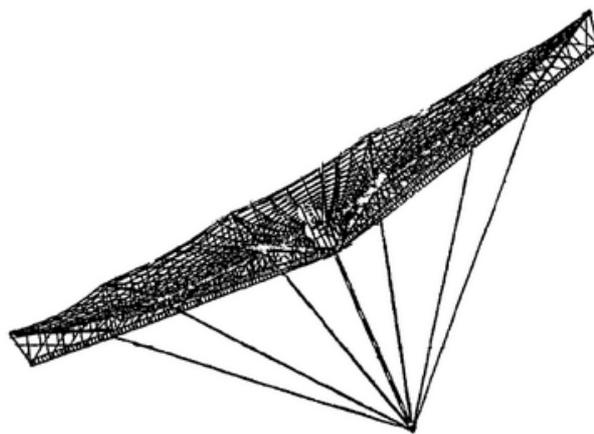


Рис. 8. Общий вид развертываемого рефлектора антенны космического аппарата

Для рефлекторов большего диаметра измерение диаграммы направленности является очень трудоемким процессом. Поэтому рассматриваемая методика позволяет облегчить решение задачи определения электродинамических характеристик таких рефлекторов. В качестве иллюстрации на рис. 9 представлены ДН 12-метрового рефлектора на частоте 8 ГГц при различных значениях СКО, полученных расчетным путем для равновесной формы рефлектора.

При проведении вычислений можно сделать вывод, что при увеличении СКО равновесной формы отражающей поверхности от параболической диаграмма направленности также имеет отличия от идеальной диаграммы 1: возрастают боковые лепестки, смещается главный лепесток и падает коэффициент усиления антенны.

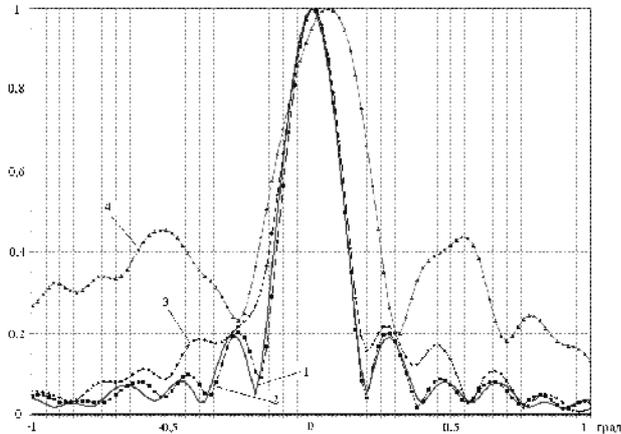


Рис. 9. Диаграмма направленности для расчетной равновесной формы 12-метрового рефлектора, линейный масштаб: 1 – идеальный параболоид; 2 – СКО = 0,5 мм; 3 – СКО = 2,0 мм; 4 – СКО = 6,5 мм

Таким образом, представленные в данной статье результаты показывают, что использование методики совместного компьютерного моделирования с позиций механики деформируемого твердого тела и электродинамики позволяет получить диаграммы направленности

крупногабаритных рефлекторов без проведения технически сложных и затратных физических измерений.

Библиографические ссылки

1. Гряник М. В., Ломан В. И. Развертываемые зеркальные антенны зонтичного типа. М.: Радио и связь, 1987.
2. Tibert G. A. Deployable Tensegrity Structures for Space Applications: PhD. thesis. Stockholm, 2002.
3. Усманов Д. Б. Моделирование напряженно-деформированного состояния крупногабаритного трансформируемого рефлектора: дис. ... канд. физ.-мат. наук: 01.02.04. Томск, 2006.
4. Моделирование температурных деформаций рефлекторов космических аппаратов / В. Г. Бутов, С. В. Пономарев, В. А. Солоненко, А. А. Ящук // Физика. 2004. № 10. С. 15–18.
5. Зенкевич О., Победря Б. Е. Метод конечных элементов в технике. М.: Мир, 1975.
6. Пат. 2350519 Российская Федерация, МПК В 64 G 1/22, Н 01 Q 15/16. Развертываемый крупногабаритный рефлектор космического рефлектора / Тестоедов Н. А., Халиманович В. И. и др.; заявитель и патентообладатель ОАО «Информационные спутниковые системы» имени академика М. Ф. Решетнева». № 2007122219/11; заявл. 13.06.2007; опубл. 27.03.2009, Бюл. № 9.
7. Компьютерное моделирование трансформируемых космических рефлекторов / А. В. Бельков, В. Г. Бутов, А. С. Евдокимов и др. // Вестник КазНУ им. Аль-Фараби. Серия: Математика, механика, информатика. 2008. № 3 (58). С. 284–293.

A. S. Evdokimov, Y. I. Buyanov, S. V. Ponomarev, G. V. Shipilov, V. I. Khalimanovich

JOINT CALCULATION OF MECHANICAL AND ELECTRODYNAMIC CHARACTERISTICS OF UMBRELLA ANTENNA

This article considers a variant of complex technique of computer modeling of the transformable reflectors for spacecrafts which allows to gain the best characteristics of aerial.

Keywords: computer modeling, reflector, finite element method, mode of deformation, antenna pattern.

© Евдокимов А. С., Буянов Ю. И., Пономарев С. В., Шипилов Г. В., Халиманович В. И., 2010