

УДК 621.396.67

## **Анализ формы отражающей поверхности параболической антенны деформированной под действием весовой нагрузки**

Н.А. Сгадова, И.М. Струлев

### **Аннотация**

Рассматривается конструкция антенного устройства, рефлектор которого обладает свойством гомологичности в широком диапазоне углов места. В процессе проектирования силовой конструкции антенны использован метод количественной оценки неидеальности рефлектора, основанный на анализе отклонения деформированной поверхности рефлектора от аппроксимирующей поверхности.

### **Ключевые слова**

параболическая антенна; аппроксимирующая поверхность; гомологичность; астигматизм.

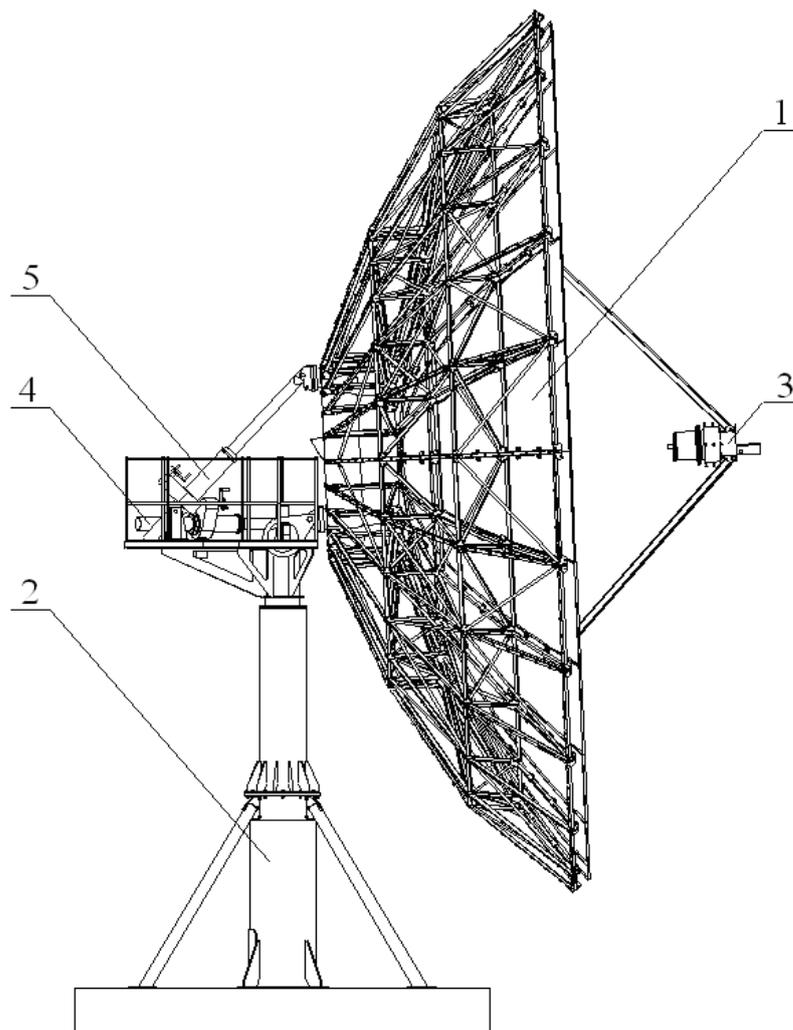
### **Введение**

В 50-х годах XX века был разработан метод проектирования крупных зеркальных антенн для радиоастрономии, космических исследований и радиолокации. Впоследствии он был назван методом гомологических деформаций. Конструктивная схема по методу гомологических деформаций строится таким образом, чтобы при изменении гравитационных нагрузок при наклонах рефлектора обеспечить его минимальное отклонение от параболической формы. Для реализации этого метода использовались специальные, часто очень сложные, конструктивные решения.

Современные методы моделирования и анализа конструкций позволяют проектировать антенны с малыми отклонениями формы отражающей поверхности только за счет правильного подбора соотношений жесткости структурных элементов.

### Анализ формы отражающей поверхности параболической антенны

Антенна диаметром 9,3 м представляет собой однозеркальную систему, установленную на азимутально-угломестном опорно-поворотном устройстве (ОПУ). Конструкция антенного устройства состоит из рефлектора, ОПУ, блока облучателя и системы наведения в составе двух приводов азимутального и угломестного соответственно (рис. 1).



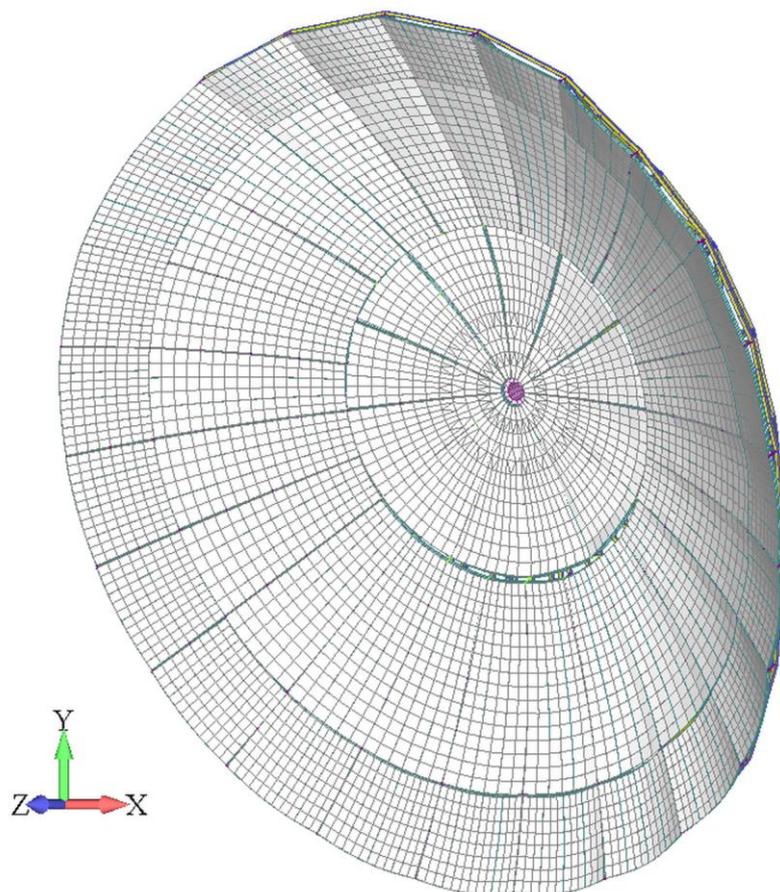
**Рис. 1. Общий вид антенного устройства: 1 – рефлектор; 2 – ОПУ; 3 – блок облучателя; 4 – азимутальный привод; 5 – угломестный привод**

Рабочая поверхность рефлектора антенны представляет собой осесимметричную вырезку из параболоида вращения и состоит из трех ярусов алюминиевых отражающих панелей. Отражающие панели рефлектора установлены на стальном каркасе, выполненном в виде пространственной фермы. Основным силовым элементом конструкции рефлектора антенны является жесткая центральная часть, состоящая из трубчатых сегментов, усиленных

ребрами. Центральная часть воспринимает изгибные и крутильные нагрузки от периферийных ферм и эффективно передает их на опорно-поворотное устройство антенны. К ребрам центральной части присоединяются 24 радиальные фермы, которые соединяются между собой в средней части двумя кольцевыми поясами и по периферии специальными балками. Каркас рефлектора имеет также систему диагональных элементов.

В конструкции ОПУ можно выделить три основные конструктивные составляющие: колонну с подкосами, закрепленную на бетонном основании, вращающуюся трубу, которая имеет два опорных узла, и подвижную площадку, состоящую из двух взаимно ортогональных труб, плоской рамы, ребер жесткости, настила, ограждения и элементов крепления угломестного и азимутального приводов.

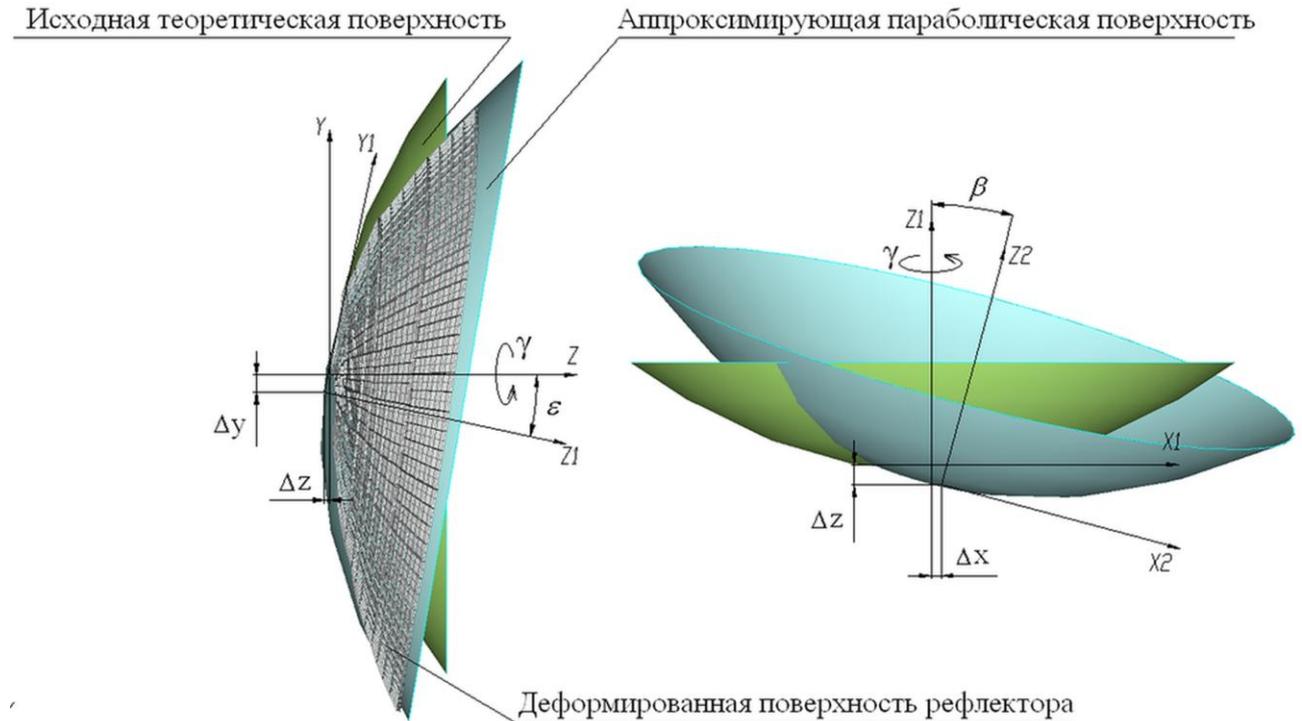
При проектировании конструкции антенны, деформации поверхности рефлектора и блока облучателя под действием весовой нагрузки определяются из расчета конечно-элементной модели (рис. 2). На этом этапе осуществляется подбор соотношений жесткости структурных элементов силового каркаса рефлектора.



**Рис. 2**

Отклонения профиля зеркала определяются относительно аппроксимирующей поверхности. Аппроксимирующая поверхность, в общем случае, не совпадает с исходной

теоретической поверхностью рефлектора. Она является поверхностью второго порядка и наилучшим образом приближена к деформированной отражающей поверхности. Деформированная поверхность аппроксимируется эллиптическим параболоидом и параболоидом вращения (рис. 3).



**Рис. 3**

Поверхность второго порядка описывается общим уравнением второй степени [1]

$$a_{11}x^2 + a_{22}y^2 + a_{33}z^2 + 2a_{12}xy + 2a_{13}xz + 2a_{23}yz + 2a_{14}x + 2a_{24}y + 2a_{34}z + a_{44} = 0 \quad (1)$$

где  $x, y, z$  – переменные величины;

$a_{ik}$  – коэффициенты поверхности, определяющие ее положение в пространстве.

Аппроксимирующая поверхность строится по облаку точек деформированной поверхности рефлектора, полученных из расчета конечно-элементной модели. Построение аппроксимирующей поверхности произвольно расположенной в пространстве производится из условия, что сумма квадратов расстояний от известных точек деформированной поверхности рефлектора до искомой поверхности минимальна. Расстояния определяются по нормали к параболической поверхности [2 - 3].

$$\delta^2 = \sum_{i=1}^N \left[ (x_i^1 - x_i^0)^2 + (y_i^1 - y_i^0)^2 + (z_i^1 - z_i^0)^2 \right] \rightarrow \min \quad (2)$$

где  $N$  – количество расчетных точек, принадлежащих деформированной поверхности;

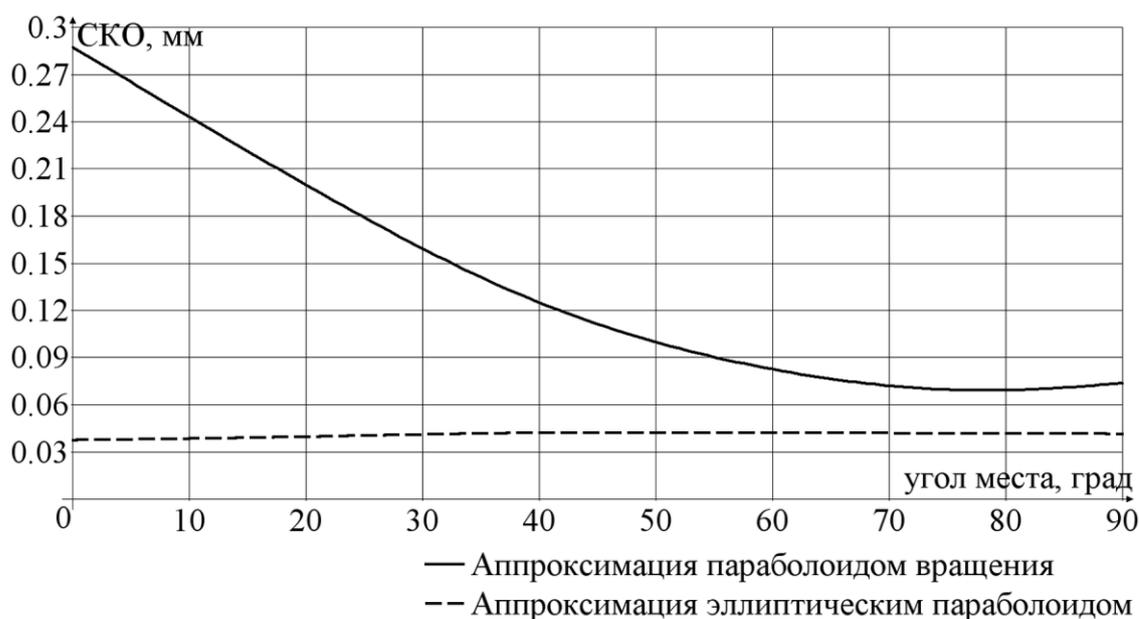
$x_i^0, y_i^0, z_i^0$  –  $i$ -ая точка деформированной поверхности;

$x_i^1, y_i^1, z_i^1$  –  $i$ -ая точка аппроксимирующей поверхности.

В процессе аппроксимации находятся параметры поверхности и максимальное и среднеквадратическое отклонения (СКО) деформированной поверхности от аппроксимирующей поверхности. Для эллиптического параболоида параметрами поверхности являются: смещение вершины параболоида  $\Delta x, \Delta y, \Delta z$ , повороты параболоида относительно осей на углы  $\gamma, \varepsilon, \beta$  и фокусные расстояния в двух главных плоскостях  $f_1, f_2$ . Для параболоида вращения –  $\Delta x, \Delta y, \Delta z, f, \varepsilon, \beta$ .

Расчет деформации рефлектора проводился под действием весовой нагрузки для диапазона углов места от  $0^\circ$  до  $90^\circ$ .

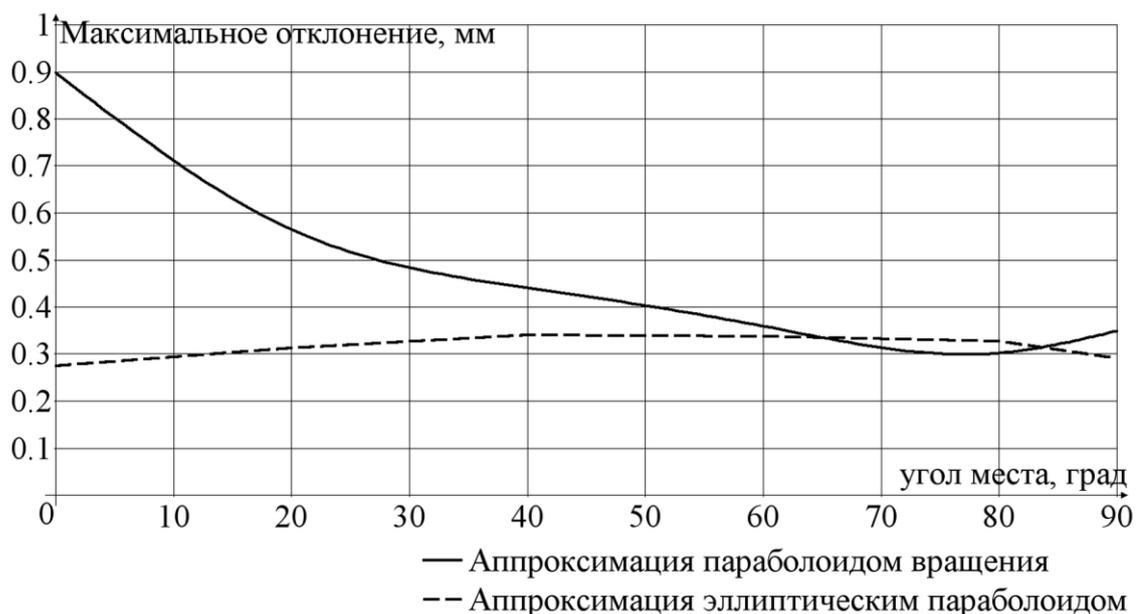
На рис. 4 и 5 представлена графическая зависимость величины максимального и среднеквадратического отклонения от угла места. На графиках сплошной линией показана зависимость отклонений от угла места для аппроксимации параболоидом вращения, а пунктирной линией – эллиптическим параболоидом.



**Рис. 4**

Величина СКО, полученная аппроксимацией эллиптическим параболоидом, во всем диапазоне углов места на порядок меньше, чем СКО для случая аппроксимации параболоидом вращения. Для угла места  $\varepsilon = 0^\circ$  величина СКО, полученная аппроксимацией эллиптическим параболоидом, составляет 0,037 мм, а для случая аппроксимации параболоидом вращения 0,29 мм. Деформированная поверхность рефлектора лучше аппроксимируется эллиптическим параболоидом. Как видно на рис. 4 поверхность рефлектора антенны, деформированная под действием весовой нагрузки, практически

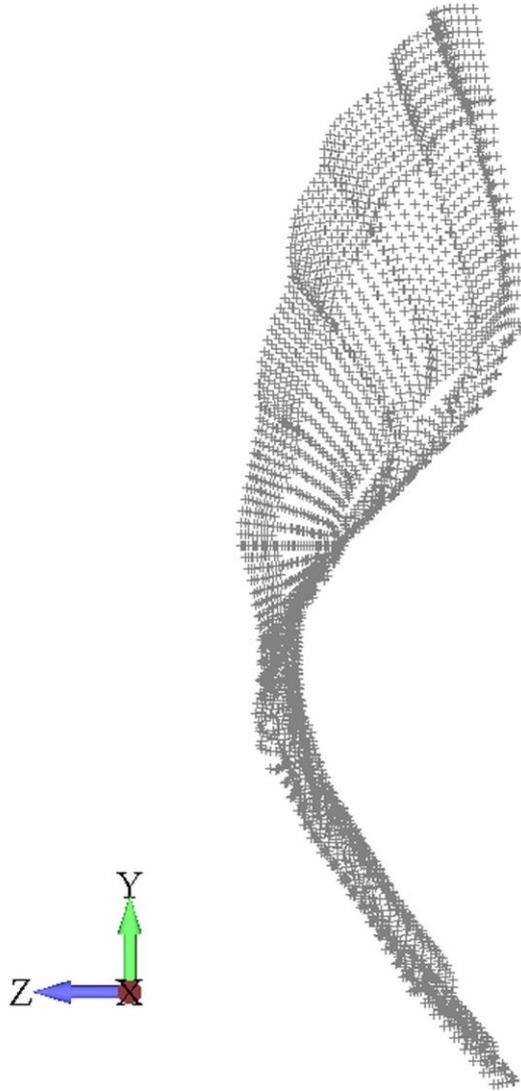
остается параболоидом при разных углах места. Можно утверждать, что рефлектор антенны обладает высокой степенью гомологичности.



**Рис. 5**

Значения коэффициентов аналитического выражения (1), полученных в процессе аппроксимации эллиптическим параболоидом и параболоидом вращения, используются для построения нормалей к поверхностям при расчете длины хода луча от фазового центра облучателя до плоскости раскрыва рефлектора. В качестве раскрыва выбран раскрыв недеформированного рефлектора. Длина луча определяется для точек деформированного рефлектора и состоит из длины падающего луча и длины отраженного луча. Точка пересечения отраженного луча с плоскостью раскрыва находится при совместном решении системы уравнений. Система уравнений состоит из уравнения аппроксимирующего параболоида, условия равенства углов, образуемых падающим лучом, отраженным лучом и нормалью к поверхности в точке падения луча и условия компланарности падающего луча, нормали и отраженного луча.

Нахождение фазового распределения в раскрыве рефлектора сводится к вычислению разности длин хода лучей по всей поверхности раскрыва и последующей нормировкой к длине волны. При угле места  $\varepsilon = 0^\circ$  характер фазового распределения для рефлектора, деформированного под действием собственного веса, показан на рис. 6. Фазовый центр деформированного облучателя смещен вниз в поперечном направлении на величину 5,24 мм и вдоль фокальной оси от вершины рефлектора на 0,1 мм.



**Рис. 6**

На рис. 6 видно, что в фазовом распределении имеются искажения, преимущественно связанные со смещением фазового центра облучателя в поперечном направлении. Также в фазовом распределении присутствуют периодические искажения, определяемые деформациями отдельных отражающих панелей, образующих рабочую поверхность рефлектора. Наличие некоторой эллиптичности в деформационной картине рефлектора приводит к появлению искажений, связанных с несовпадением точки наилучшей фокусировки в двух главных плоскостях. Максимальная разность хода лучей в пределах раскрытия рефлектора составляет 2,6 мм, угол поворота фазовой плоскости - 0,19 угл.мин. При таком фазовом распределении антенна может работать на частотах не более 14,4 ГГц без существенных искажений диаграммы направленности (ДН).

Сделано несколько расчетов с целью определить минимальную величину разности хода лучей при поперечном и продольном смещении фазового центра облучателя от

деформированного положения. При смещении облучателя вверх в поперечном направлении на 3,25 мм и на 0,18 мм в продольном направлении к вершине рефлектора максимальная разность хода лучей составляет 2,17 мм, угол поворота фазовой плоскости 2,47 угл.мин. Возможность подстройки положения облучателя позволяет использовать антенну на частотах до 17,3 ГГц.

Результаты расчета длины хода лучей, полученные для точек деформированного рефлектора, аппроксимированного эллиптическим параболоидом и параболоидом вращения, отличаются между собой незначительно, на 0,2%. Поэтому для снижения объема вычисления целесообразно использовать в процессе построения хода лучей аппроксимирующую поверхность параболоида вращения.

Аппроксимация эллиптическим параболоидом позволяет количественно оценить астигматизм рефлектора ( $\Delta f_a$ ) – разность наибольшего и наименьшего фокусных расстояний. Астигматизм рефлектора приводит к появлению искажений в фазовом распределении из-за несовпадения точки наилучшей фокусировки в двух главных плоскостях. Для идеального эллиптического параболоида с облучателем расположенным на фокальной оси внутри области  $(f_1; f_2)$  допустимая величина астигматизма рефлектора при условии, что максимальная разность фаз на раскрыве рефлектора не должна превышать  $\frac{\pi}{4}$ , определяется [4]

$$\Delta f_a \leq \frac{\lambda}{8} \cdot \left( \frac{5f_1^2 + 8f_1f_2 + 3f_2^2 + D^2}{2D^2} \right) \quad (3)$$

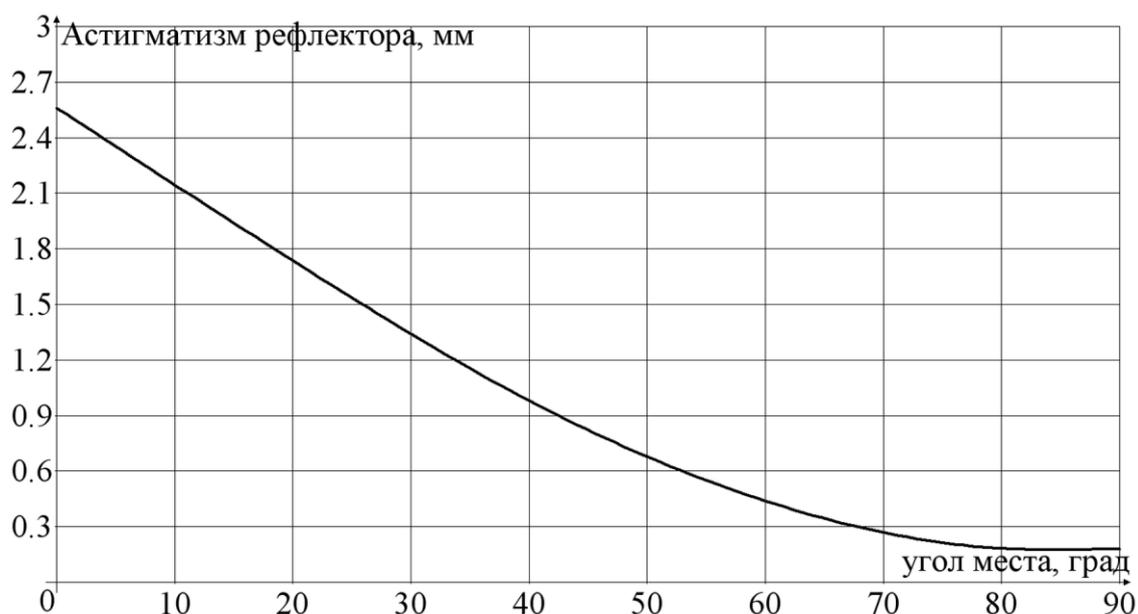
где  $\lambda$  – рабочая длина волны;

$f_1, f_2$  – фокусные расстояния эллиптического параболоида в двух главных плоскостях;

$D$  – диаметр исходного теоретического параболоида.

Выражение (3) позволяет предварительно оценить верхнюю рабочую частоту деформированной антенны, зная астигматизм рефлектора.

На рис. 7 показана зависимость величины астигматизма рефлектора от положения антенны по углу места. Расчет проводился для антенны диаметром 9,3 м. Максимальная величина астигматизма рефлектора соответствует углу места  $\varepsilon = 0^\circ$  и составляет 2,56 мм.



**Рис. 7**

Верхняя рабочая частота идеального эллиптического параболоида с разностью фокусных расстояний 2,56 мм составляет 19,19 ГГц. Искажения в фазовом распределении обуславливаются не только деформациями отражающей поверхности, но и смещением облучателя, поэтому верхней рабочей частотой исследуемого рефлектора является 17,3 ГГц.

### **Заключение**

Отражающая поверхность рефлектора антенны диаметром 9,3 м обладает высокой формостабильностью. Фазовые искажения, вызванные деформациями рефлектора и блока облучателя, при действии весовой нагрузки, не приводят к существенным искажениям ДН в широком диапазоне частот, включая *Ки*-диапазон. На частотах выше 14,4 ГГц до 17,3 ГГц требуется дополнительная подстройка положения облучателя.

## **Библиографический список**

1. Корн Г., Корн Т., Справочник по математике (для научных работников и инженеров), М., Наука 1974г.
2. Сгадова Н.А., Крахин О.И., Венценосцев Д.Л. Оценка деформативности рефлектора крупноапертурной параболической антенны //Радиотехника (Журнал в журнале). 2007, №10, с.47-50.
3. Сгадова Н.А., Венценосцев Д.Л. Аппроксимация деформированной поверхности рефлектора крупноапертурных параболических антенн //Радиотехника (Журнал в журнале). 2009, №4, с. 90-96.
4. Сгадова Н.А., Оценка фазовых искажений в раскрыве рефлектора крупноапертурной параболической антенны //Радиотехника (Журнал в журнале). 2009, №11, с. 122-127.

## **Сведения об авторах**

Сгадова Надежда Александровна, инженер ОАО «Радиофизика», e-mail: [sgadova@gmail.com](mailto:sgadova@gmail.com)

Струлев Илья Михайлович, инженер-конструктор ОАО «Радиофизика»,  
e-mail: [ilya\\_strulev@mail.ru](mailto:ilya_strulev@mail.ru)