

ВЛИЯНИЕ ДЕФОРМАЦИИ РЕФЛЕКТОРА АНТЕННЫ НА ДИАГРАММУ НАПРАВЛЕННОСТИ

Аннотация.

Актуальность и цели. Объектами исследования являются диаграммы направленности параболических антенн. Параболические антенны широко используются в задачах определения местоположения источника радиоизлучения. Одним из распространенных методов пассивной пеленгации является моноимпульсный метод, требующий достаточно точного знания формы и ориентации многолучевой диаграммы направленности антенны. В ходе длительной эксплуатации антенных систем происходит искажение диаграммы направленности, в частности, для космических систем пассивной пеленгации характерны периодические изменения формы рефлектора и, соответственно, диаграммы направленности антенны вследствие неравномерного прогрева. Смещение отдельных точек рефлектора антенны во многих случаях может быть измерено с высокой точностью и аппроксимировано поверхностью, которая представляет собой модель деформированного рефлектора. Однако полный пересчет многолучевой диаграммы направленности для антенны с деформированным рефлектором является вычислительно сложной задачей. Основной целью работы является повышение вычислительной эффективности метода определения параметров диаграммы направленности параболической антенны с учетом влияния деформации рефлектора. Рассмотрен и исследован метод оценки диаграммы направленности по данным о деформации антенны вдоль произвольного направления.

Материалы и методы. Результаты, представленные в работе, получены путем компьютерного моделирования на основе проведения расчетов диаграмм направленности методом блестящих точек. Основное внимание уделено учету линейной деформации рефлектора в двух соседних квадрантах, а также рассмотрены сложные деформации, состоящие из нескольких простых деформаций.

Результаты. Предложен и протестирован метод расчета смещения электрической оси и ширины главного лепестка диаграммы направленности антенны при сложной деформации рефлектора на основе моделей простых деформаций рефлектора антенны. Показана применимость предложенного метода.

Выводы. Влияние малых деформаций антенны в произвольных направлениях можно рассматривать как суперпозицию деформаций во взаимно перпендикулярных направлениях, что позволяет оценить смещение электрической оси и изменение ширины главного лепестка диаграммы направленности при деформации вдоль произвольного направления без перерасчета диаграммы направленности.

Ключевые слова: параболическая антенна, диаграмма направленности, электрическая ось антенны, ширина главного лепестка, деформация рефлектора.

THE IMPACT OF ANTENNA REFLECTOR DEFORMATION ON DIRECTION DIAGRAM

Abstract.

Background. The objects of study are the radiation patterns of parabolic antennas. Parabolic antennas are widely used in the passive direction finding problem. The monopulse method is one of the most common methods of passive direction finding. It requires accurate knowledge of the shape and orientation of the multi-beam antenna pattern. Space antenna systems are characterized by periodic changes in the shape of the reflector due to uneven heating, which leads to the distortion of the antenna radiation pattern. In many cases the displacement of individual points of the antenna reflector can be measured with high accuracy and approximated by surface representing a model of deformed reflector. However, the complete recalculation of the multipath radiation pattern is a computationally complex task. The main purpose of the article is to increase the computational efficiency of determining the parameters of the antenna directional pattern, considering the reflector deformation.

Materials and methods. The results were obtained by computer simulation based on the calculation of radiation patterns using the brilliant point method. The article focuses on considering the linear deformation of the reflector in two adjacent quadrants and complex deformation, which consists of several simple deformations.

Results. The computational efficient method of radiation pattern parameters evaluating was proposed and investigated. The applicability of the proposed method is shown.

Conclusions. The effect of small deformations of the antenna reflector in arbitrary directions can be considered as a superposition of deformations in mutually perpendicular directions. This allows to estimate the displacement of the electric axis and the change of the main lobe width considering deformation along an arbitrary direction without recalculating the radiation pattern.

Keywords: parabolic antenna, radiation pattern, electric axis of the antenna, main lobe width, reflector deformation.

Введение

В настоящее время широкое практическое применение имеет решение задач как активной, так и пассивной пеленгации источников радиоизлучения. Методы пеленгации широко применяются в навигации для определения местоположения и параметров траектории различного рода наземных, морских, воздушных и космических объектов. Одним из распространенных методов пассивной пеленгации является однопозиционный (моноимпульсный) метод [1], требующий достаточно точного знания формы и ориентации многолучевой диаграммы направленности (ДН) антенной системы. В ходе длительной эксплуатации антенных систем происходят различные искажения ДН антенны, в частности, для космических систем пассивной пеленгации характерны периодические изменения формы рефлектора и, соответственно, диаграммы направленности антенны вследствие неравномерного прогрева. Для повышения точности измерений необходимо знать ДН рефлекторной антенны в реальном масштабе времени.

Для учета искажений рефлектора ДН антенны может быть вычислена с использованием методов, учитывающих электромагнитные взаимодействия

элементов антенны (метод моментов, метод физической оптики), но для больших отражателей подобные расчеты часто приводят к неприемлемым вычислительным затратам для заданного уровня точности. Для повышения вычислительной эффективности алгоритмов учета изменений параметров ДН параболической антенны вследствие влияния деформации рефлектора возникает необходимость в разработке методов, позволяющих по известной деформации рефлектора рассчитывать в реальном масштабе времени поправки к известной диаграмме направленности.

1. Расчет диаграммы направленности методом блестящих точек

Диаграмма направленности – это зависимость амплитуды напряженности, фазы и поляризации электрического поля от углов наблюдения (угла места θ и азимутального угла ϕ) при условии, что расстояние от точки наблюдения до антенны одно и то же [2]. Выбор расстояния ограничен требованием нахождения измерителя в дальней зоне антенны:

$$r \geq \frac{2L_A}{\lambda}, \quad (1)$$

где L_A – наибольший габаритный размер антенны; λ – длина волны; r – расстояние от антенны до точки наблюдения.

Расчет диаграмм направленности в работе производится методом блестящих точек [3, 4]. Предварительные исследования и сравнительный анализ результатов расчетов ДН параболических антенн данным методом и ДН, рассчитанных с использованием программного пакета GRASP (программное обеспечение разработано компанией TICRA, в качестве метода решения задачи пакет использует метод физической оптики, дополненный методом физической теории дифракции [5, 6]), показывают возможность проведения расчетов ДН рефлекторной антенны методом блестящих точек с приемлемой для исследований точностью.

Напряженность суммарного электрического поля, отраженного от всех точек поверхности рефлектора, в точке наблюдения P (рис. 1) находится по формуле

$$\mathbf{E}_P = \sum_{i=0}^N \frac{\mathbf{E}_i \exp(-jkr_i)}{r_i}; \quad r_i = a_i + b_i, \quad (2)$$

где \mathbf{E}_i – амплитуда напряженности электрического поля в i -й точке; $k = 2\pi/\lambda$ – волновое число; λ – длина волны в свободном пространстве; a_i – расстояние от облучателя до A_i -й точки на антенне; b_i – расстояние от A_i -й точки на антенне до точки наблюдения P ; N – количество узлов антенны.

На рис. 1 изображены рефлектор антенны и сфера наблюдения диаграммы направленности параболической антенны: P – точка наблюдения; a_i – расстояние от облучателя F до i -й точки на антенне; b_i – расстояние от i -й точки на антенне A до точки наблюдения P ; F – место расположения облучателя. Система координат $Oxuz$ связана с электрической осью антенны, начало координат расположено в фокусе антенны (месте расположения облучателя).

Наглядное представление о распределении энергии волн передающей антенны дает амплитудная характеристика направленности. Амплитудная

ДН – это зависимость амплитуды поля от угловых координат, которая задается выражением

$$E_p(\theta, \varphi) = \sqrt{\mathbf{E}_p(\theta, \varphi) \mathbf{E}_p^*(\theta, \varphi)} .$$

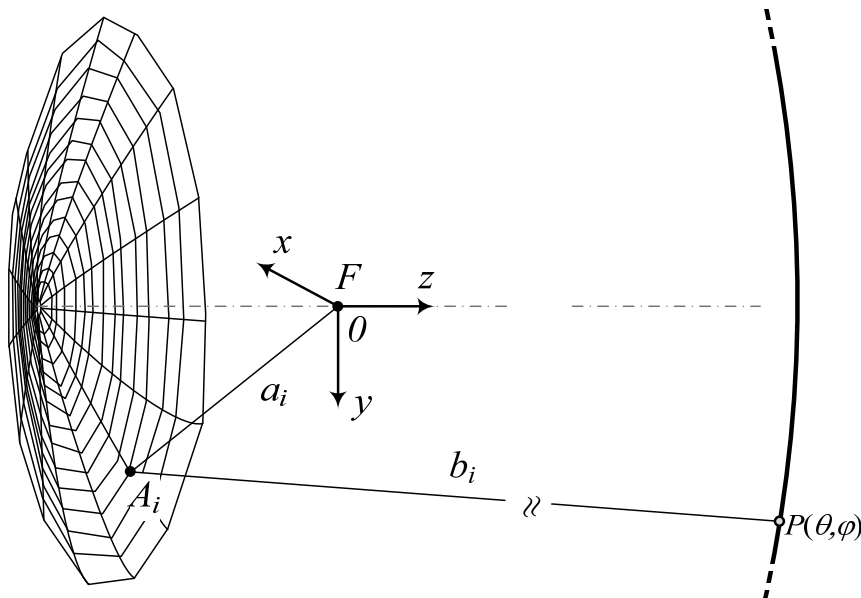


Рис. 1. Рефлектор антенны и сфера наблюдения

Метод блестящих точек обладает рядом преимуществ: прост в реализации, позволяет легко учитывать деформацию рефлектора и смещение облучателя из фокуса параболоида. Кроме того, вычислительная эффективность алгоритма расчета ДН на основе метода блестящих точек может быть существенно повышена на основе применения методики параллельного вычисления.

2. Деформация рефлектора

Идеальная параболическая антенна подвержена различным деформациям, возникающим при изготовлении и эксплуатации антенны. На практике изготовить антенну с рефлектором в форме идеального параболоида практически невозможно, что приводит к нарушению синфазности поля в раскрытии антенны [7]. Искажение формы рефлектора происходит и в процессе эксплуатации антенны: под воздействием силы тяжести, неравномерного прогрева поверхности рефлектора Солнцем, температурных перепадов. Большинство наземных антенных систем эксплуатируются на открытом воздухе и подвергаются воздействию солнечной радиации и других климатических факторов. Антенные системы на космической орбите периодически переходят со светлой на теневую сторону Земли и в результате этого подвергаются резким и значительным изменениям температуры поверхности рефлектора. В результате для космических систем пассивной пеленгации характерны периодиче-

ские изменения формы рефлектора вследствие неравномерного прогрева и, соответственно, искажения диаграммы направленности антенны.

Важной характеристикой параболической антенны является погрешность отклонения формы рефлектора от идеального параболоида. Вследствие деформации рефлектора антенны происходит искажение ДН, рост боковых лепестков, наблюдается угловое смещение направления главного максимума. Точность соблюдения формы рефлектора определяет также отклонение коэффициента усиления антенны от расчетного значения. С учетом влияния перечисленных выше факторов определяется допустимое суммарное отклонение профиля рефлектора антенны от идеального.

Исследования показывают [8], что характерная деформация, возникающая при одностороннем нагреве рефлектора антенны, может быть описана с помощью следующей модели: точки на поверхности рефлектора сдвигаются в α раз от своего истинного положения. Подобный тип деформации математически может быть представлен следующим образом:

$$F' = F(\alpha_x x, \alpha_y y, z);$$

$$x \rightarrow \alpha_{x>0} x, \quad x > 0; \quad x \rightarrow \alpha_{x<0} x, \quad x < 0;$$

$$y \rightarrow \alpha_{y>0} y, \quad y > 0; \quad y \rightarrow \alpha_{y<0} y, \quad y < 0; \quad z \rightarrow z, \quad (3)$$

где $\alpha_{x>0}$, $\alpha_{y>0}$, $\alpha_{x<0}$, $\alpha_{y<0}$ – параметры, отвечающие за степень вытянутости антенны в каждом из двух соседних квадрантах; F – поверхность идеального рефлектора; F' – поверхность деформированного рефлектора. Оси $0x$ и $0y$ расположены в плоскости раскрыва рефлектора, ось $0z$ совпадает с осью симметрии параболоида (рис. 1).

На рис. 2, *а, б* изображены случаи, когда деформация рефлектора происходит только в положительной области оси $0y$ или оси $0x$. Также на рис. 2, *в* изображена сложная деформация, которую можно представить как совокупность деформаций в положительной области оси $0x$ и в положительной области оси $0y$ (пропорциональный сдвиг точек в $\alpha_{x>0}$ и $\alpha_{y>0}$ раз от своего первоначального положения соответственно).

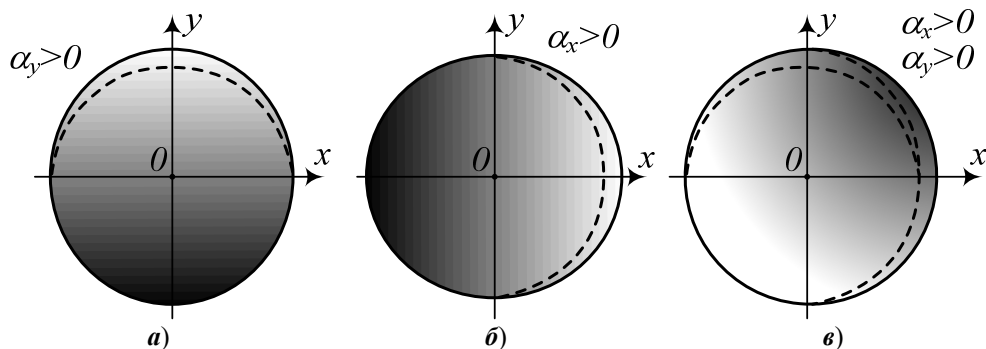


Рис. 2. Модель деформации рефлектора

При подобных деформациях рефлектора антенны происходит смещение электрической оси антенны и уширение главного лепестка луча без зна-

чительного изменения формы ДН [9], кроме того, несинфазность приходящих на облучатель волн приводит в том числе к эффекту деполяризации. Деполяризация излучения деформированной антенны при моделировании также может быть учтена на основе принципа суперпозиции [10]. Поскольку в работе рассматривается влияние малых деформаций на амплитудные ДН, вклад деполяризации предполагается пренебрежимо малым. Обозначим смещение электрической оси при деформации рефлектора (рис. 2), обусловленное деформацией вдоль оси Oy в положительной области как s^{y+} , а в отрицательной области как s^{y-} , соответственно для ширины главного лепестка w^{y+} и w^{y-} . Здесь и далее под шириной главного лепестка подразумевается ширина главного лепестка на уровне -3 дБ относительно максимума. Подобные обозначения введены для смещения электрической оси и ширины главного лепестка вдоль оси Ox .

В работе рассматриваются малые деформации поверхности антенны, когда величина деформации не превышает 5 % от радиуса рефлектора. В реальных системах величина деформации не превышает 1 %, но в работе максимальная величина деформации завышена, чтобы показать, что предельные величины реальных деформаций находятся не на границе рассматриваемой теории.

В линейном приближении деформацию рефлектора антенны можно представить следующим образом:

$$\Delta F \approx \frac{\partial F}{\partial x} \Delta x + \frac{\partial F}{\partial y} \Delta y.$$

Поскольку амплитудная диаграмма направленности в дальней зоне, вообще говоря, представляет собой модуль преобразования Фурье от распределения токов по апертуре рефлектора (если не учитывать ДН облучателя), основываясь на свойствах преобразования Фурье, можно принять следующие приближения. В связи с тем, что сложную деформацию рефлектора можно представить как совокупность простых деформаций, примем, что и для расчета ДН антенны можно применить принцип суперпозиции, по крайней мере в области малых деформаций рефлектора. Зная смещение электрической оси s^{x-} , s^{x+} , s^{y-} , s^{y+} , можно найти смещение электрической оси ДН при сложной деформации рефлектора как сумму смещений электрической оси ДН при простых деформациях. Ширину главного лепестка при произвольной деформации также можно представить как сумму изменения ширины главного лепестка ДН при простых деформациях и ширины главного лепестка идеальной ДН:

$$\begin{aligned} s^{\text{деф}} &= s^{x+} + s^{y+} + s^{x-} + s^{y-}, \\ w^{\text{деф}} &= \Delta w^{x+} + \Delta w^{y+} + \Delta w^{x-} + \Delta w^{y-} + w^{\text{ид}}, \end{aligned} \quad (4)$$

где $s^{\text{деф}}$ – смещение электрической оси; $w^{\text{деф}}$ и $w^{\text{ид}}$ – ширина главного лепестка ДН антенны с деформированным и антенны с недеформированным рефлектором соответственно.

Зная значения смещения электрической оси и ширины главного лепестка ДН при простых деформациях рефлектора вдоль оси Ox и Oy , можно рас-

считать на основе выражения (4) смещение и ширину главного лепестка при произвольных малых деформациях рефлектора антенны. Применимость данной модели подтверждена далее в работе расчетами диаграмм направленности при простых деформациях методом блестящих точек и сравнением рассчитанных значений смещения электрической оси и ширины главного лепестка по выражению (4) с результатами, полученными при расчете ДН для заданной сложной деформации методом блестящих точек. При моделировании деформации рефлектора на его поверхности выделялись опорные точки, которые сдвигались от своего первоначального положения согласно выражению (3). Восстановление формы рефлектора по заданным опорным точкам с последующей равномерной дискретизацией проводилось с использованием интерполяционных кривых Эрмита [5].

3. Результаты моделирования

Реальные антенны, используемые в космических пеленгационных системах, имеют радиус раскрыва порядка 10 м. Рассмотрение антенн таких размеров связано со значительными вычислительными затратами, поэтому для установления общих зависимостей размер антенны и величина деформации были пропорционально уменьшены до приемлемых величин. В данной работе рассматривается расчет ДН осесимметричной однозеркальной длиннофокусной антенны со следующими параметрами: диаметр раскрыва $D = 1$ м, фокусное расстояние $F = 1,5$ м. Полный угол раскрыва составляет $37,85^\circ$. Облучатель находится в фокусе параболоида, длина волны $\lambda = 0,1$ м.

В качестве входных данных для расчета ДН методом блестящих точек использовались координаты точек на поверхности рефлектора с интервалом пространственной дискретизации $\lambda / 4$. При моделировании антенны оси Ox и Oy декартовой системы координат располагались параллельно плоскости раскрыва рефлектора, ось Oz совпадает с осью симметрии параболоида, начало координат находится в фокусе параболоида (см. рис. 1).

На рис. 3 представлены результаты исследования зависимости ширины и направления электрической оси антенны от величины деформации рефлектора антенны для простых деформаций. Расчеты осуществлялись в двух взаимно-перпендикулярных плоскостях при фиксированном азимутальном угле (рис. 3,а,б) и угле места (рис. 3,в,г) по положению электрической оси антенны. Из графиков видно, что при деформации рефлектора в разных парах соседних квадрантов смещение электрической оси ДН и изменение ширины главного лепестка происходит только в одной плоскости, оставаясь неизменной в другой.

В табл. 1 приведены дисперсии смещения электрической оси и ширины главного лепестка при простых деформациях рефлектора антенны в различных областях. При проведении исследования производился расчет сечений ДН по положению максимума относительной амплитуды при фиксированном значении $\theta = \text{const}$ (либо $\varphi = \text{const}$) и определение положения максимума в другом сечении ДН. Можно отметить, что при малых деформациях по оси Oy (либо оси Ox) на интервале изменения коэффициента деформации $\alpha \in [0,95; 1,03]$ параметры ДН меняются более значительно по сравнению с изменениями ДН в перпендикулярном сечении.

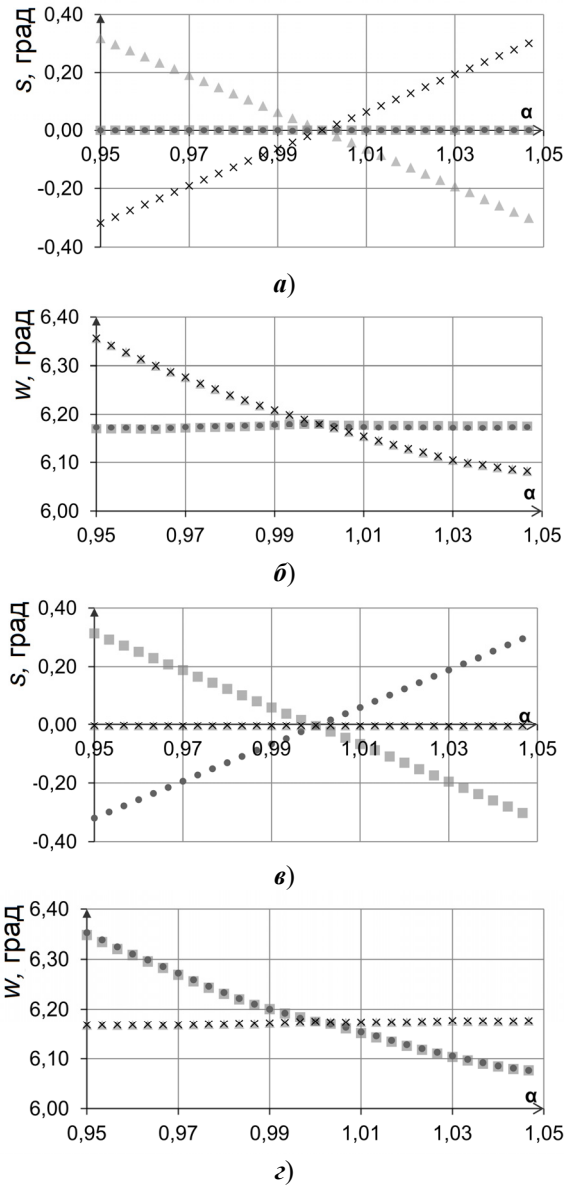
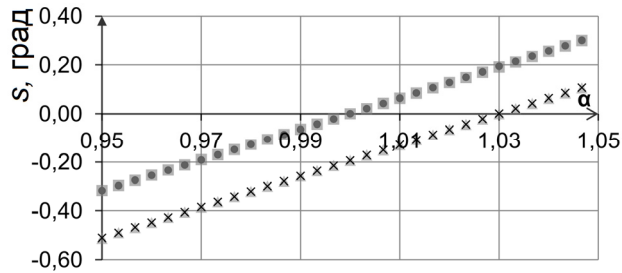


Рис. 3. Зависимость характеристик ДН от величины коэффициента деформации при простых деформациях рефлектора в различных областях ($0x < 0, 0x > 0, 0y < 0, 0y > 0$) при фиксированном азимутальном угле (а, б) и фиксированном угле места (в, г)

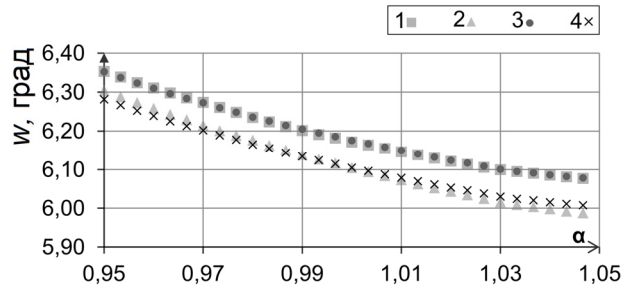
На рис. 4 представлены результаты исследований зависимости ширины главного лепестка и смещения электрической оси ДН при деформации рефлектора антенны вдоль нескольких осей. Расчеты проводились для деформации рефлектора вдоль оси $0y$ в положительной области оси $0y$ при изменении в диапазоне $\alpha_{y+} \in [0,95; 1,05]$, при фиксированном значении деформации в одной из следующих областей:

- 1) в положительной области оси $0x$ при $\alpha_{x+} = 1,03$;
- 2) в отрицательной области оси $0y$ при $\alpha_{y-} = 1,03$.

Область деформации	Дисперсия			
	Смещение электрической оси (град.) по положению максимума при		Ширина главного лепестка (град.) по положению максимума при	
	$\theta = \text{const}$	$\varphi = \text{const}$	$\varphi = \text{const}$	$\theta = \text{const}$
$\partial x > 0$	$2,07 \cdot 10^{-7}$	$3,48 \cdot 10^{-2}$	$6,49 \cdot 10^{-6}$	$7,01 \cdot 10^{-3}$
$\partial x < 0$	$5,3 \cdot 10^{-8}$	$3,49 \cdot 10^{-2}$	$9,31 \cdot 10^{-6}$	$6,89 \cdot 10^{-3}$
$\partial y > 0$	$3,53 \cdot 10^{-2}$	$1,16 \cdot 10^{-7}$	$7,13 \cdot 10^{-3}$	$9,10 \cdot 10^{-6}$
$\partial y < 0$	$3,53 \cdot 10^{-2}$	$1,76 \cdot 10^{-7}$	$7,12 \cdot 10^{-3}$	$9,52 \cdot 10^{-6}$



а)



б)

Рис. 4. Смещение электрической оси и ширина главного лепестка от величины деформации рефлектора по оси Oy при фиксированном коэффициенте деформации $\alpha_{x+} = 1,03$ (кривые 1, 3), $\alpha_{y-} = 1,03$ (кривые 2, 4)

Аналогичные результаты получаются при исследовании зависимости ширины главного лепестка и смещения электрической оси ДН при деформации рефлектора антенны вдоль положительного направления оси Ox при других фиксированных значениях деформации рефлектора. Полученные зависимости позволяют провести вычисление среднего квадрата ошибки между данными, полученными из численного моделирования методом блестящих точек и данными, полученными посредством расчетов по выражению (4), результаты расчета представлены в табл. 2.

Видно, что средние квадраты ошибок для данных, полученных с использованием выражения (4) и с использованием метода блестящих точек при одновременной деформации рефлектора в различных областях, имеют малые значения, что говорит о применимости принятых в работе приближений (см. выражение (4)).

Таблица 2

Области деформации рефлектора антенны		Средний квадрат ошибки данных, рассчитанных по формуле (4) и методом блестящих точек	
		Смещение электрической оси (град.)	Изменение ширины главного лепестка (град.)
$\alpha_{y+} \in [0,95; 1,05]$	$\alpha_{y-} = 0,95$	$7,29 \cdot 10^{-6}$	$21,07 \cdot 10^{-6}$
$\alpha_{y+} \in [0,95; 1,05]$	$\alpha_{y-} = 1,03$	$5,07 \cdot 10^{-6}$	$9,21 \cdot 10^{-6}$
$\alpha_{y+} \in [0,95; 1,05]$	$\alpha_{x-} = 0,95$	$6,91 \cdot 10^{-6}$	$1,19 \cdot 10^{-6}$
$\alpha_{y+} \in [0,95; 1,05]$	$\alpha_{x-} = 1,03$	$5,66 \cdot 10^{-6}$	$1,18 \cdot 10^{-6}$

Заключение

В работе предложен вычислительно эффективный метод для определения параметров ДН параболической антенны с учетом влияния деформации рефлектора антенны. В связи с тем что сложную деформацию рефлектора можно представить как совокупность простых деформаций, показано, что в области малых деформаций рефлектора антенны можно применить принцип суперпозиции и для расчета ДН. Смещение электрической оси ДН при сложной деформации рефлектора антенны может быть найдено как смещение электрической оси ДН при простых деформациях. Ширина главного лепестка при произвольной деформации также может быть представлена как сумма изменения ширины главного лепестка ДН при простых деформациях и ширины главного лепестка идеальной ДН. Для сравнения результатов в качестве «эталонного» метода моделирования и расчета смещения электрической оси и ширины главного лепестка ДН при сложной деформации рефлектора антенны использован метод блестящих точек. Сравнение результатов расчетов параметров ДН предложенным в статье методом, базирующимся на модели простых деформациях рефлектора антенны, с «эталонным» методом дал средний квадрат ошибки для смещения электрической оси и изменения ширины главного лепестка порядка 10^{-6} град.

Библиографический список

1. **Леонов, А. И.** Моноимпульсная радиолокация / А. И. Леонов, К. И. Фомичев. – Москва : Радио и связь, 1984. – 312 с.
2. Антенны : учеб. пособие / Ю. Т. Зырянов, П. А. Федюнин, О. А. Белоусов и др. – Тамбов : Изд-во ТГТУ, 2014. – 128 с.
3. **Горбалысов, М. С.** Моделирование влияния тепловых воздействий на антенны и характеристики радиолучевой системы / М. С. Горбалысов, А. Н. Якимов // Труды Международного симпозиума Надежность и качество. – 2011. – Т. 1. – С. 287–289.
4. **Якимов, А. Н.** Проектирование микроволновых антенн с учетом внешних воздействий / А. Н. Якимов. – Пенза : Изд-во ПГУ, 2004. – 258 с.
5. **Лаврентьева, А. С.** Расчет диаграммы направленности зеркальной антенны на основе данных о смещениях выделенных точек на поверхности рефлектора / А. С. Лаврентьева, О. А. Морозов, В. Р. Фидельман, Ю. Е. Чуманкин // Труды XXII научной Конференции по радиофизике, посвящ. 100-летию Нижегород. радиолaborатории. – Нижний Новгород : Нижегородский государственный ун-т, 2018. – С. 369–372.
6. **Курушин, А. А.** Расчет зеркальных параболических антенн с помощью современных САПР СВЧ / А. А. Курушин, Е. И. Лаврецкий, С. Е. Чадов // Электроника: Наука, технология, бизнес. – Москва : ТЕХНОСФЕРА, 2014. – С. 126–131.

7. **Драбкин, А. Л.** Антенно-фидерные устройства / А. Л. Драбкин, В. Л. Зузенко, А. Г. Кислов. – Москва : Советское радио, 1974. – 536 с.
8. **Гурбаниязов, М. А.** Тепловые воздействия окружающей среды на зеркальные антенны / М. А. Гурбаниязов. – URL: <http://www.iki.rssi.ru/oct4/2011/ppt/s5/gurbanniyazov.pdf>
9. **Шишулин, Д. Н.** Оценка влияния деформации зеркала на излучение параболической антенны / Д. Н. Шишулин, А. Н. Якимов // Труды Международного симпозиума Надежность и качество. – 2011. – Т. 1. – С. 342–345.
10. **Якимов, А. Н.** Технология оценки деполяризации, возникающей при деформации микроволновых антенн / А. Н. Якимов // Труды Международного симпозиума Надежность и качество. – 2018. – Т. 2. – С. 226–229.

References

1. Leonov A. I., Fomichev K. I. *Monoimpul'snaya radiolokatsiya* [Monopulse radar]. Moscow: Radio i svyaz', 1984, 312 p. [In Russian]
2. Zyryanov Yu. T., Fedyunin P. A., Belousov O. A. et al. *Antenny: ucheb. posobie* [Antenna: teaching aid]. Tambov: Izd-vo TGTU, 2014, 128 p. [In Russian]
3. Gorbalysov M. S., Yakimov A. N. *Trudy Mezhdunarodnogo simpoziuma Nadezhnost' i kachestvo* [Proceedings of the International symposium Reliability and quality]. 2011, vol. 1, pp. 287–289. [In Russian]
4. Yakimov A. N. *Proektirovanie mikrovolnovykh antenn s uchetom vneshnikh vozdeystviy* [Microwave antenna design taking into account external actions]. Penza: Izd-vo PGU, 2004, 258 p. [In Russian]
5. Lavrent'eva A. S., Morozov O. A., Fidel'man V. R., Chumankin Yu. E. *Trudy XXII nauchnoy Konferentsii po radiofizike, posvyashch. 100-letiyu Nizhegor. radio-laboratorii* [Proceedings of XXII scientific Conference on radiophysics devoted to the 100th anniversary of Nizhny Novgorod radio laboratory]. Nizhniy Novgorod Nizhegorodskiy gosudarstvennyy un-t, 2018, pp. 369–372. [In Russian]
6. Kurushin A. A., Lavretskiy E. I., Chadov S. E. *Elektronika: Nauka, tekhnologiya, biznes* [Electronics: science, technology, business]. Moscow: TEKhNOSFERA, 2014, pp. 126–131. [In Russian]
7. Drabkin A. L., Zuzenko V. L., Kislov A. G. *Antenno-fidernye ustroystva* [Antenna feeder devices]. Moscow: Sovetskoe radio, 1974, 536 p. [In Russian]
8. Gurbanniyazov M. A. *Teplovye vozdeystviya okruzhayushchey sredy na zerkal'nye anteny* [Thermal environmental influences on mirror antennas]. Available at: <http://www.iki.rssi.ru/oct4/2011/ppt/s5/gurbanniyazov.pdf> [In Russian]
9. Shishulin D. N., Yakimov A. N. *Trudy Mezhdunarodnogo simpoziuma Nadezhnost' i kachestvo* [Proceedings of the International symposium Reliability and quality]. 2011, vol. 1, pp. 342–345. [In Russian]
10. Yakimov A. N. *Trudy Mezhdunarodnogo simpoziuma Nadezhnost' i kachestvo* [Proceedings of the International symposium Reliability and quality]. 2018, vol. 2, pp. 226–229. [In Russian]

Лаврентьева Анна Сергеевна
студентка, Нижегородский
государственный университет имени
Н. И. Лобачевского (Россия, г. Нижний
Новгород, пр. Гагарина, 23)

E-mail: anyuta.lavrentyeva@gmail.com

Lavrent'eva Anna Sergeevna
Student, Lobachevsky State University
of Nizhny Novgorod (23, Gagarina
avenue, Nizhny Novgorod, Russia)

Морозов Олег Александрович

доктор физико-математических наук,
профессор, кафедра информационных
технологий в физических исследованиях,
Нижегородский государственный
университет имени Н. И. Лобачевского
(Россия, г. Нижний Новгород,
пр. Гагарина, 23)

E-mail: oa_morozov@nifti.unn.ru

Morozov Oleg Aleksandrovich

Doctor of physical and mathematical
sciences, professor, sub-department
of information technology in physical
research, Lobachevsky State University
of Nizhny Novgorod (23, Gagarina avenue,
Nizhny Novgorod, Russia)

Чуманкин Юрий Евгеньевич

аспирант, Нижегородский
государственный университет имени
Н. И. Лобачевского (Россия, г. Нижний
Новгород, пр. Гагарина, 23)

E-mail: chumankinyuriy@nifti.unn.ru

Chumankin Yuriy Evgen'evich

Postgraduate student, Lobachevsky
State University of Nizhny Novgorod
(23, Gagarina avenue, Nizhny
Novgorod, Russia)

Образец цитирования:

Лаврентьева, А. С. Влияние деформации рефлектора антенны на диаграмму направленности / А. С. Лаврентьева, О. А. Морозов, Ю. Е. Чуманкин // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. – 2020. – № 1 (53). – С. 78–89. – DOI 10.21685/2072-3059-2020-1-8.