

ОБЕСПЕЧЕНИЕ ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ КОНЕЧНО-ЭЛЕМЕНТНЫХ МОДЕЛЕЙ МИКРОВОЛНОВЫХ АНТЕНН К ВНЕШНИМ ДЕФОРМИРУЮЩИМ ВОЗДЕЙСТВИЯМ

А. Н. Якимов

Санкт-Петербургский государственный университет
аэрокосмического приборостроения, Санкт-Петербург, Россия
y_alder@mail.ru

Аннотация. *Актуальность и цели.* При внешних тепловых и механических воздействиях конструкции микроволновых антенн деформируются, что приводит к невозможности строгого аналитического описания их излучения и оценки влияния этих воздействий на характеристики излучения. Перспективным направлением решения этой проблемы является построение конечно-элементных математических моделей микроволновых антенн с заданной степенью точности, обеспечивающей их чувствительность к внешним деформирующим воздействиям. *Материалы и методы.* Предложен подход к обеспечению чувствительности математической модели микроволновой зеркальной параболической антенны к внешним деформирующим воздействиям при конечно-элементном описании ее излучения. Дано электродинамическое обоснование требуемой точности построения геометрической модели микроволновой антенны. Показано, что при построении конечно-элементной геометрической модели параболической антенны с плоскими треугольными гранями в процессе дискретизации необходимо проводить разбиение излучающей поверхности зеркала с равномерным шагом. Полученные расчетные формулы позволяют контролировать погрешность конечно-элементной геометрической модели микроволновой зеркальной антенны и обеспечить ее чувствительность к внешним деформирующим воздействиям. *Результаты и выводы.* Приведены результаты модельного исследования влияния деформирующих вибрационных и тепловых воздействий на диаграмму направленности микроволновой параболической антенны, полученные с использованием построенной конечно-элементной модели. Они подтверждают приемлемую точность построенной модели и возможность ее использования при проектировании микроволновых антенн устойчивых к внешним деформирующим воздействиям.

Ключевые слова: микроволновая антенна, внешние воздействия, модель, конечный элемент, чувствительность, диаграмма направленности

Для цитирования: Якимов А. Н. Обеспечение чувствительности конечно-элементных моделей микроволновых антенн к внешним деформирующим воздействиям // Надежность и качество сложных систем. 2023. № 1. С. 46–54. doi:10.21685/2307-4205-2023-1-6

ENSURING THE SENSITIVITY OF FINITE ELEMENT MODELS OF MICROWAVE ANTENNAS TO EXTERNAL DEFORMING ACTIONS

A.N. Yakimov

Saint Petersburg State University of Aerospace Instrumentation, Saint Petersburg, Russia
y_alder@mail.ru

Abstract. *Background.* Under external thermal and mechanical actions, the structure of microwave antennas is deformed, which leads to the impossibility of a strict analytical description of their radiation and an assessment of the impact of these actions on the radiation characteristics. A promising direction for solving this problem is the construction of finite element mathematical models of microwave antennas with a given degree of accuracy, ensuring their sensitivity to external deforming actions. *Materials and methods.* An approach is proposed to ensure the sensitivity of a mathematical model of a microwave mirror parabolic antenna to external deforming actions with a finite element description of its radiation. The electrodynamics justification of the required accuracy of constructing a geometric model of a microwave antenna is given. It is shown that when constructing a finite element geometric model of a parabolic antenna with flat triangular faces in the process of discretization, it is necessary to split the radiating surface of the mirror with a uniform pitch. The obtained calculation formulas allow controlling the error of the finite element geometric model of the microwave mirror antenna and ensuring its sensitivity to external deforming actions. *Results and conclusions.* The results of a model study of the influence of vibration and thermal actions on the radiation pattern of a

microwave parabolic antenna, obtained using the constructed finite element model, are presented. They confirm the acceptable accuracy of the constructed model and the possibility of its use in the design of microwave antennas resistant to external deforming actions.

Keywords: microwave antenna, external actions, model, finite element, sensitivity, radiation pattern

For citation: Yakimov A.N. Ensuring the sensitivity of finite element models of microwave antennas to external deforming actions. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh sistem = Reliability and quality of complex systems*. 2023;(1):46–54. (In Russ.). doi:10.21685/2307-4205-2023-1-6

Введение

При внешних тепловых и механических воздействиях конструкции микроволновых антенн деформируются, причем величина возникающих деформаций оказывается соизмеримой с длиной используемых электромагнитных волн, а следствием этого является существенное изменение характеристик излучения таких антенн. Из-за сложности пространственной конфигурации излучающей поверхности деформированной антенны становятся невозможными строгое аналитического описание ее излучения и оценка влияния внешних деформирующих воздействий на характеристики излучения. Перспективным направлением решения этой проблемы является построение конечно-элементных математических моделей микроволновых антенн с заданной степенью точности, обеспечивающей ее чувствительность к внешним деформирующим воздействиям.

При проектировании микроволновых зеркальных антенн методом конечных элементов (КЭ) одной из основных проблем является построение геометрической модели ее излучающей поверхности с приемлемой степенью точности. Существует ограничение на размеры КЭ поверхности, вызванное необходимостью обеспечения синфазности электромагнитного поля в раскрытии такой антенны. Отклонение от идеальной формы излучающей поверхности зеркала при этом не должно превосходить $\lambda/32$, где λ – длина электромагнитной волны [1].

При построении чувствительной к внешним воздействиям КЭ модели микроволновой антенны допустимой погрешности необходимо уделить особое внимание. Получим решение задачи оценки допустимой погрешности геометрической модели на примере зеркальной параболической антенны. Пусть имеется точное математическое описание излучающей поверхности антенны выпуклой функцией $z = (x^2 + y^2)/4f$, где z, x, y – координаты точек этой поверхности в правой прямоугольной декартовой системе координат; f – фокусное расстояние параболоида. Требуется найти кусочно-линейную аппроксимацию заданной функции, оценить ее погрешность и найти условия дискретизации излучающей поверхности, обеспечивающие заданную точность геометрической модели.

Постановка задачи

При многогранной аппроксимации излучающей поверхности параболоида точность модели в значительной мере определяется шагами дискретизации, определяемыми количеством точек дискретизации поверхности вдоль осей координат Oy и Ox соответственно и формой граней многогранника. Выберем аппроксимацию излучающей поверхности параболической антенны многогранной поверхностью с плоскими треугольными гранями (рис. 1), широко используемую для моделирования рассеяния электромагнитных волн радиолокационными объектами сложной формы [2–4].

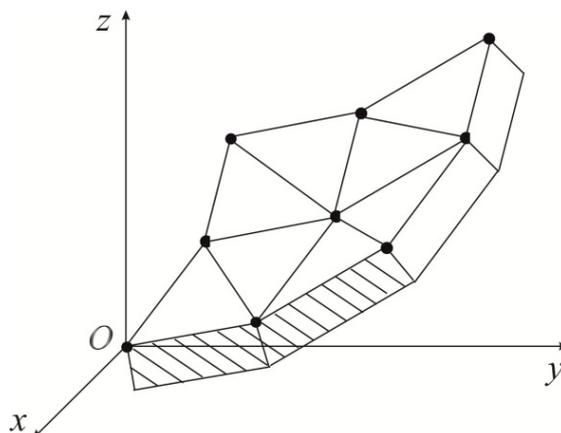


Рис. 1. Фрагмент многогранной излучающей поверхности микроволновой антенны

Традиционный подход к дискретизации поверхности с равномерным шагом разбиения вдоль осей координат здесь не подходит, так как данный способ разбиения излучающей поверхности параболоида вызывает резкий рост величины элементов разбиения в периферийной части и, соответственно, нарушение условий корректности дискретизации. Более перспективной оказывается дискретизация с равномерным шагом разбиения самой излучающей поверхности параболоида, что позволяет контролировать величину элементов ее разбиения и возникающую при этом фазовую ошибку, а также добиться большей точности аппроксимации при тех же вычислительных затратах и обеспечить при этом чувствительность математической модели к внешним деформирующим воздействиям.

Построение конечно-элементной модели антенны

Двумерная аппроксимация излучающей поверхности сводится при таком подходе к одномерной кусочно-линейной аппроксимации функций, описывающих эту излучающую поверхность. При этом узлы криволинейной сетки, принадлежащие излучающей поверхности, остаются неизменными, а криволинейные отрезки, соединяющие их, заменяются отрезками прямых. В результате гладкая излучающая поверхность заменяется многогранной поверхностью аппроксимации с плоскими треугольными гранями [5].

Выполнить эту процедуру поможет равномерное разбиение годографа векторной функции сечения параболической поверхности. Например, одномерное сечение поверхности зеркала с параболическим профилем в случае $y = 0$ (главное сечение) опишется одномерной функцией $z(x)$ в плоскости Ozx :

$$z = \frac{x^2}{4f}. \tag{1}$$

В векторной интерпретации параболическая кривая представляет собой годограф векторной функции \mathbf{r} скалярных аргументов x и z . Учитывая, что параболическое зеркало относится к осесимметричным излучателям, осуществлять равномерное разбиение относительно центра параболы, совмещенного с центром декартовой системы координат (рис. 2).

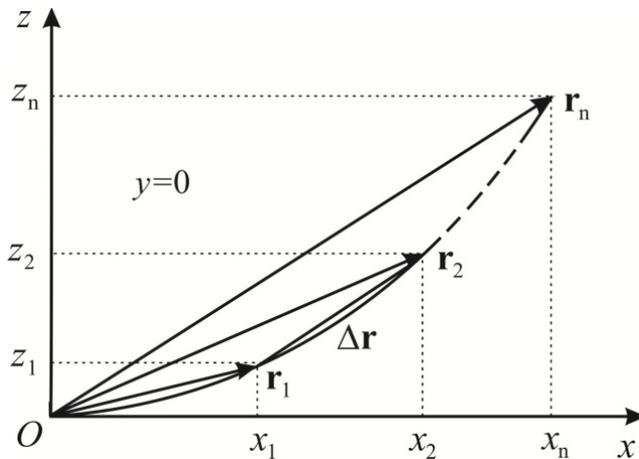


Рис. 2. Равномерное разбиение годографа векторной функции сечения параболической поверхности

Интервал равномерного разбиения сечения параболоида при этом определяется как разность $\Delta \mathbf{r}$ радиусов-векторов узловых точек

$$\Delta \mathbf{r} = \mathbf{r}_k - \mathbf{r}_{k-1}, \tag{2}$$

где $k = 1, 2, \dots, K$; K – максимальный порядковый номер индекса радиуса-вектора узловой точки сечения параболоида в плоскости Ozx с положительной координатой x . При этом индекс $k - 1 = 0$ соответствует координатам $x = 0, z = 0$ [5].

Шаг дискретизации параболического профиля ΔL при этом может быть определен по формуле

$$\Delta L = |\Delta \mathbf{r}| = \sqrt{(x_k - x_{k-1})^2 + (z_k - z_{k-1})^2}, \tag{3}$$

где $x_k, x_{k-1}, z_k, z_{k-1}$ – индексированные координаты узловых точек излучающей поверхности.

Задав координату начальной узловой точки $x_{k-1} = x_0 = 0$, будем с малым интервалом Δx увеличивать текущую координату x , что приведет к плавному приращению радиуса-вектора \mathbf{r} . Эта процедура позволяет с заданной точностью, определяемой интервалом Δx приращения x , добиться близости разности векторов $\mathbf{r} - \mathbf{r}_{k-1}$ к заданному интервалу ΔL разбиения годографа векторной функции сечения параболической поверхности и текущего значения аргумента x к значению координаты x_k следующей узловой точки дискретизации, определяемой радиусом-вектором \mathbf{r}_k .

Записав функционал вида

$$f(x) = \left| \Delta L - \sqrt{(x - x_{k-1})^2 + (z - z_{k-1})^2} \right|, \quad (4)$$

мы можем, определив его минимум, найти координату x_k и по формуле (2) определить соответствующую координату z_k .

Точность построения геометрической модели излучающей поверхности антенны оценим по максимальному отклонению многогранной модели от гладкой расчетной поверхности параболоида. При этом во взаимно перпендикулярных сечениях, образующих дискретную модель, отклонения многогранного профиля зеркала от расчетной поверхности хорошо иллюстрирует рис. 3.

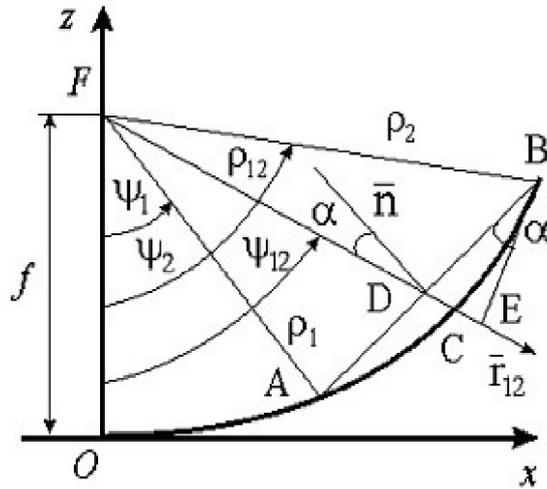


Рис. 3. Иллюстрация к оценке точности построения геометрической модели

Здесь Ozx – плоскость сечения параболоида в декартовой системе координат в горизонтальной плоскости; f – фокусное расстояние параболического профиля; F – точка фокуса; $\psi_1, \psi_2, \psi_{12}$ – полярные углы, отсчитываемые от отрицательного направления оси z ; $\rho_1 = FA$, $\rho_2 = FB$, $\rho_{12} = FC$ – расстояния от фокуса до точек сечения гладкого профиля зеркала; $\bar{\mathbf{r}}_{12}$ – единичный вектор, совпадающий с ρ_{12} ; $AB = L_0$ – линейный шаг дискретизации; $\bar{\mathbf{n}}$ – нормаль к отрезку AB в его центре D в плоскости сечения Ozx ; BE – отрезок, расположенный вдоль нормали к оси, совпадающей с $\bar{\mathbf{r}}_{12}$.

В соответствии с этими обозначениями отклонение $\Delta \rho_x$ геометрической модели в направлении наблюдения из фокуса F опишется выражением

$$\Delta \rho_x = \rho_{12} - \rho_2 \cos(\Delta \psi) + (L_0 / 2) \sin \alpha, \quad (5)$$

где $\rho_{12} = f / \cos^2(\psi_{12} / 2)$; $\rho_2 = \sqrt{x_B^2 + y_B^2 + (f - z_B)^2}$; x_B, y_B, z_B – координаты точки B ; $\psi_{12} = \psi_2 - \Delta \psi$; $\psi_2 = 2 \arccos(\sqrt{f / \rho_2})$; $\Delta \psi = \arcsin[L_0 \cos \alpha / (2\rho_2)]$; $\alpha = \arccos(\bar{\mathbf{n}}, -\bar{\mathbf{r}}_{12})$ – угол между нормалью $\bar{\mathbf{n}}$ и отрицательным направлением $\bar{\mathbf{r}}_{12}$. Так как погрешность модели в направлении ρ необходимо оценивать с учетом погрешности плоскости Ozy , то для параболоида вращения получим результирующую погрешность как $\Delta \rho = \sqrt{2} \Delta \rho_x$.

В соответствии с электродинамической постановкой задачи об излучении микроволновой антенны излучающую поверхность микроволновой антенны S в этом случае представляется как сово-

купность N независимых элементарных участков S_i , причем $S = \bigcup_{i=1}^N S_i$. При этом компоненты общего поля получаются простым суммированием сферических компонентов поля E_{φ_i} и E_{θ_i} каждого конечного элемента, E_{φ_j} и E_{θ_j} каждого краевого ребра кромки излучающей поверхности антенны относительно глобальной системы координат [6]:

$$E_{\varphi} = \sum_i E_{\varphi_i} + \sum_j E_{\varphi_j}, \quad E_{\theta} = \sum_i E_{\theta_i} + \sum_j E_{\theta_j}. \quad (6)$$

С учетом полученных выражений диаграмма направленности (ДН) антенны в горизонтальной плоскости $F(\varphi)$ может быть определена как

$$F(\varphi) = E_{\Sigma}(\varphi) / E_{\max}, \quad (7)$$

где $E_{\max} = E_{\Sigma}(0)$ – максимальный уровень напряженности электрического поля, равный для симметричных антенн его значению в направлении оси симметрии.

Результаты моделирования

Расчеты по приведенным формулам показали, что для зеркала с диаметром $D_m = 1$ м и фокусным расстоянием $f = 0,35$ м при дискретизации параболического профиля от его центра с равномерным шагом разбиения L_0 максимальная погрешность синтеза $\Delta\rho$ зависит от величины L_0 в соответствии к кривой, приведенной на рис. 4.

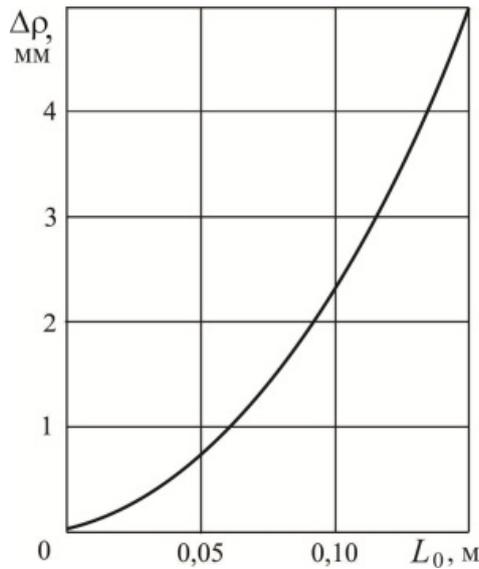


Рис. 4. Зависимость погрешности модели от шага дискретизации

По этой кривой видно, что при $L_0 = 0,03$ м максимальная погрешность составляет $\Delta\rho = 0,226$ мм, при $L_0 = 0,05$ м – $\Delta\rho = 0,625$ мм, при $L_0 = 0,1$ м – $\Delta\rho = 2,4$ мм. Для волн с $\lambda = 0,1$ м и $\lambda = 0,03$ м они составляют $\Delta\rho_{\max} = 3,12$ мм и $0,94$ мм соответственно. Эти погрешности меньше максимально допустимых $\Delta\rho_{\max} \leq \lambda/32$ и не нарушают синфазность поля в раскрыве зеркала антенны.

Расчет нормированных ДН зеркальной параболической антенны в горизонтальной плоскости с использованием предложенной геометрической модели антенны при $\lambda = 0,1$ м и различных шагах дискретизации: $L_0 = 1,5\lambda$ (рис. 5, кривая 1), $L_0 = \lambda$ (рис. 5, кривая 2) и $L_0 = 0,5\lambda$ (рис. 5, кривая 3) показал, что с уменьшением L_0 они приближаются к тестовой ДН (рис. 5, кривая 4), рассчитанной для той же антенны, но методом аппроксимации интерполяционным полиномом с использованием лямбда-функций и погрешностью, не превышающей 1–2 % [7].

Характеристики излучения КЭ оценивались по методу Гордона [8], а краевые эффекты моделировались в форме А. Михаэли [9]. Результаты расчета ДН антенны соответствуют облучению отражателя электромагнитной волной рупора с вертикальной поляризацией и уровню поля на краю зеркала –10 дБ относительно максимума.

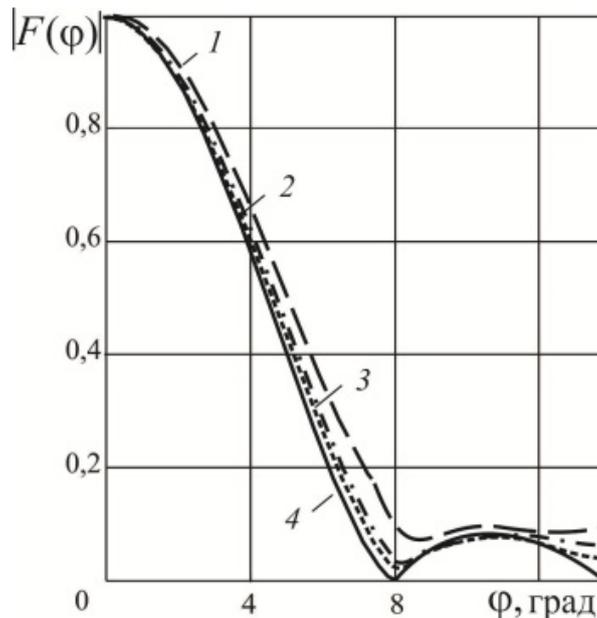


Рис. 5. Диаграммы направленности параболической антенны:
 $1 - L_0 = 1,5\lambda$; $2 - L_0 = \lambda$; $3 - L_0 = 0,5\lambda$; $4 -$ рассчитанная использованием лямбда-функций

Наибольшее отклонение от тестовой имеет ДН антенны при недопустимо большом $L_0 = 1,5\lambda$. Это приводит к погрешности $\Delta\rho = 5,1$ мм, превышающей максимально допустимую $\Delta\rho_{\max} = 3,12$ мм для заданной $\lambda = 0,1$ м. Таким образом, рекомендуемым шагом L_0 можно считать $0,5\lambda$, приемлемым – λ .

Математическая конечно-элементная модель микроволновой антенны чувствительна к внешним деформирующим воздействиям, когда величина деформаций излучающей поверхности антенны существенно превосходит погрешность модели.

К типичным внешним деформирующим воздействиям можно отнести, например, вибрационные воздействия на микроволновые антенны, возникающие при их расположении на летательных аппаратах (диапазон частот – $5 \dots 2000$ Гц). При полете самолета вследствие колебаний искажения поверхности зеркала величиной $1 \dots 3$ мм могут присутствовать постоянно. Результаты экспериментальных исследований влияния искажений зеркала вследствие вибраций в диапазоне $20 \dots 200$ Гц при вертикальном и горизонтальном положении зеркала на вибростенде при амплитудах колебаний $5 \dots 10$ мм и более ведут к недопустимым изменениям амплитудных ДН антенн в диапазоне волн $2 \dots 3$ см: расширению ДН, росту уровня боковых лепестков (УБЛ) и при вертикальном положении – к отклонению направления главного лепестка ДН. Статические искажения поверхности зеркала в сантиметровом диапазоне недопустимы уже на величину $0,5 \dots 0,8$ мм [10, 11].

Вычислительный эксперимент, проведенный для исследования влияния вибрационных воздействий на амплитудные ДН с использованием предложенной КЭ математической модели зеркальной параболической антенны, показал следующее. Конструкция параболического зеркала диаметром $0,71$ м, закрепленная в центре вертикально с помощью дискового «держателя», испытывала вибрационные воздействия с амплитудами $1 \dots 3$ мм на частоте 48 Гц. При длине электромагнитной волны $\lambda = 3$ см исходная ДН зеркальной параболической антенны в вертикальной плоскости, полученная с использованием КЭ электродинамической модели, до деформации зеркала имеет на уровне половинной мощности ширину $2\theta_{0,5} = 2,64^\circ$ и вид, показанный на рис. 6 (кривая 1). Эта ДН близка к результатам расчета с использованием лямбда-функций (рис. 6, кривая 2) [7, 12].

В результате деформации параболического зеркала максимум ДН антенны смещается на угол $\theta_1 = 0,67^\circ$ (рис. 6, кривая 3), а ее ширина немного увеличивается ($2\theta_{0,5} = 2,66^\circ$). Таким образом, вибрационные воздействия привели к росту ширины ДН и смещению ее максимума относительно расчетных значений в отсутствие вибраций, что хорошо согласуется с приведенными экспериментальными результатами с использованием вибростенда [11].

При использовании предложенного подхода к дискретизации параболического отражателя зеркальной антенны тепловая КЭ модель антенны, представляющая отражатель как совокупность ограниченных стержней и являющаяся частью ее обобщенной модели, демонстрирует чувствительность к внешним воздействиям [6].

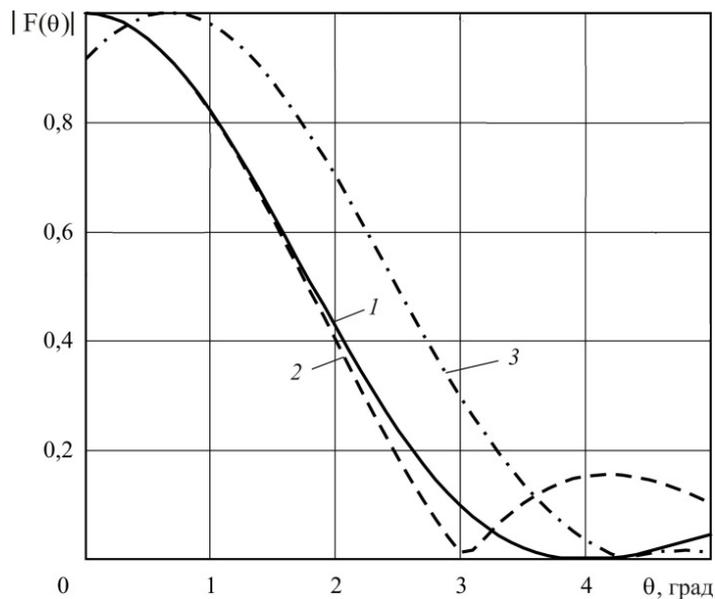


Рис. 6. Амплитудные ДН зеркальной параболической антенны

Вычислительный эксперимент был проведен для КЭ математической модели антенны с зеркалом в виде параболоида вращения диаметром $D = 2$ м толщиной 3 мм с фокусным расстоянием 0,7 м, выполненного из алюминия, при облучении зеркала электромагнитной волной длиной $\lambda = 3$ см и вертикальной поляризацией, создаваемой рупором с размерами излучающего раскрытия в горизонтальной и вертикальной плоскостях соответственно $0,65\lambda$ и $0,48\lambda$ без учета производственных погрешностей.

Результаты следующие: по сравнению с исходной ДН (рис. 7, кривая 1), у которой ширина ДН на уровне половинной мощности $2\varphi_{0,5} = 1,04$ град и УБЛ равен $-19,8$ дБ, при повышении температуры окружающей среды с 20 до 40 °С и нагреве солнечным излучением с интенсивностью $q_s = 950$ Вт/м² антенна сформирует ДН (рис. 7, кривая 2), у которой $2\varphi_{0,5} = 1,14$ град, причем УБЛ изменяется мало.

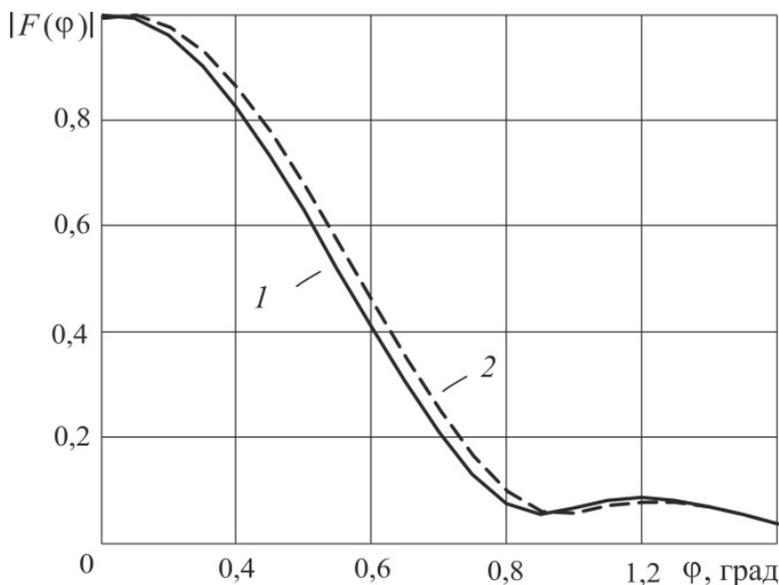


Рис. 7. Изменение ДН антенны при повышении температуры окружающей среды с 20 до 40 °С и $q_s = 950$ Вт/м²

Таким образом, результаты модельного исследования влияния деформирующих вибрационных и тепловых воздействий на диаграмму направленности микроволновой параболической антенны, полученные с использованием построенной конечно-элементной модели, подтверждают приемлемую точность построенной модели и возможность ее использования при проектировании микроволновых антенн устойчивых к внешним деформирующим воздействиям.

Заключение

Предложенный подход к построению конечно-элементных математических моделей микроволновых антенн с заданной степенью точности обеспечивает их чувствительность к внешним деформирующим воздействиям. Построенная математическая модель антенны позволяет оценивать результаты внешних воздействий на этапе проектирования и создавать оптимальные в заданных условиях эксплуатации конструкции микроволновых антенн.

Список литературы

1. Антенны УКВ / под ред. Г. З. Айзенберга : в 2 ч. Ч. 1. М. : Связь, 1977. 384 с.
2. Борзов А. Б., Соколов А. В., Сучков В. Б. Методы цифрового моделирования радиолокационных характеристик сложных объектов на фоне природных и антропогенных образований // Журнал радиоэлектроники. 2000. № 3. URL: <http://jre.cplire.ru/koi/mar00/3/text.html> (дата обращения: 03.11.2022).
3. Якимов А. Н. К проблеме дискретного представления излучения параболической антенны // Надежность и качество сложных систем. 2015. № 3. С. 17–22.
4. Якимов А. Н. Оценка допустимой погрешности конечно-элементной геометрической модели микроволновой антенны // Труды Международного симпозиума Надежность и качество. 2022. Т. 1. С. 69–71.
5. Якимов А. Н. Дискретизация излучающей поверхности параболической антенны в MATLAB // Труды Международного симпозиума Надежность и качество. 2015. Т. 1. С. 168–170.
6. Якимов А. Н. Системный подход к построению обобщенной математической модели микроволновой антенны // Надежность и качество сложных систем. 2022. № 3. С. 16–23.
7. Дрaбкин А. Л., Зузенко В. Л., Кислов А. Г. Антенно-фидерные устройства. М. : Сов. радио, 1974. 536 с.
8. Gordon W. B. Far-Field Approximations to the Kirchhoff-Helmholtz Representations of Scattered Fields // IEEE Trans. on Antennas and Propagat. 1975. Vol. AP-23, № 4. P. 590–592.
9. Michaeli A. Equivalent Edge Currents for Arbitrary Aspects of Observation // IEEE Trans. on Antennas and Propagat. 1984. Vol. AP-32, № 3. P. 252–258.
10. Муромцев Д. Ю., Белоусов О. А. Компьютерные технологии для расчета тепловых режимов и механических воздействий : учеб. пособие. Тамбов : Изд-во ТГТУ, 2012. 88 с.
11. Абжирко Н. Н. Влияние вибраций на характеристики радиолокационных антенн. М. : Сов. радио, 1974. 168 с.
12. Шишулин Д. Н., Юрков Н. К., Якимов А. Н. Моделирование излучения зеркальной антенны с учетом вибрационных деформаций // Измерительная техника. 2013. № 11. С. 54–56.

References

1. Ayzenberg G.Z. (ed.). *Antenny UKV: v 2 ch. Ch. 1 = VHF antennas: in 2 parts. Part 1.* Moscow: Svyaz', 1977:384. (In Russ.)
2. Borzov A.B., Sokolov A.V., Suchkov V.B. Methods of digital modeling of radar characteristics of complex objects against the background of natural and anthropogenic formations. *Zhurnal radioelektroniki = Journal of Radioelectronics*. 2000;(3). (In Russ.). Available at: <http://jre.cplire.ru/koi/mar00/3/text.html> (accessed 03.11.2022).
3. Yakimov A.N. On the problem of discrete representation of parabolic antenna radiation. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh system = Reliability and quality of complex systems*. 2015;(3):17–22. (In Russ.)
4. Yakimov A.N. Estimation of the permissible error of a finite element geometric model of a microwave antenna. *Trudy Mezhdunarodnogo simpoziuma Nadezhnost' i kachestvo = Proceedings of the International Symposium Reliability and Quality*. 2022;1:69–71. (In Russ.)
5. Yakimov A.N. Sampling of the radiating surface of a parabolic antenna in MATLAB. *Trudy Mezhdunarodnogo simpoziuma Nadezhnost' i kachestvo = Proceedings of the International Symposium Reliability and Quality*. 2015;1:168–170. (In Russ.)
6. Yakimov A.N. A systematic approach to the construction of a generalized mathematical model of a microwave antenna. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh system = Reliability and quality of complex systems*. 2022;(3):16–23. (In Russ.)
7. Drabkin A.L., Zuzenko V.L., Kislov A.G. *Antenno-fidernye ustroystva = Antenna-feeder devices*. Moscow: Sov. radio, 1974:536. (In Russ.)
8. Gordon W.B. Far-Field Approximations to the Kirchhoff-Helmholtz Representations of Scattered Fields. *IEEE Trans. on Antennas and Propagat*. 1975;AP-23(4):590–592.
9. Michaeli A. Equivalent Edge Currents for Arbitrary Aspects of Observation. *IEEE Trans. on Antennas and Propagat*. 1984;AP-32(3):252–258.
10. Muromtsev D.Yu., Belousov O.A. *Komp'yuternye tekhnologii dlya rascheta teplovykh rezhimov i mekhanicheskikh vozdeystviy: ucheb. posobie = Computer technologies for calculating thermal regimes and mechanical impacts : textbook*. Tambov: Izd-vo TGTU, 2012:88. (In Russ.)

11. Abzhirko N.N. *Vliyaniye vibratsiy na kharakteristiki radiolokatsionnykh antenn = The effect of vibrations on the characteristics of radar antennas*. Moscow: Sov. radio, 1974:168. (In Russ.)
12. Shishulin D.N., Yurkov N.K., Yakimov A.N. Modeling of the radiation of a mirror antenna taking into account vibration deformations. *Izmeritel'naya tekhnika = Measuring technique*. 2013;(11):54–56. (In Russ.)

Информация об авторах / Information about the authors

Александр Николаевич Якимов

доктор технических наук, профессор,
профессор кафедры конструирования и технологий
электронных и лазерных средств,
Санкт-Петербургский государственный университет
аэрокосмического приборостроения
(Россия, г. Санкт-Петербург, ул. Большая Морская, 67)
E-mail: y_alder@mail.ru

Aleksandr N. Yakimov

Doctor of technical sciences, professor,
professor of the sub-department of construction
and technology of electronic and laser equipment,
Saint Petersburg State University
of Aerospace Instrumentation
(67 Bolshaya Morskaya street, Saint Petersburg, Russia)

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов /

The authors declare no conflicts of interests.

Поступила в редакцию/Received 25.12.2022

Поступила после рецензирования/Revised 17.01.2023

Принята к публикации/Accepted 25.01.2023