

3. Zola D. e. a. Magnetic relaxation of type-II superconductors in a mixed state of entrapped and shielded flux // Phys. Rev. B. 2004. V. 70. P. 224504—9.

4. Забенкин В. Н. и др. Распределение магнитного потока в сверхпроводниках II рода с большим размагничиванием и высоким краевым барьером // Письма в ЖЭТФ. 1999. Т. 70. С. 771—775.

5. Ростами Х. Р. Холловский микроскоп для визуализации магнитного состояния объектов // ПТЭ. 2004. № 6. С. 95—102.

6. Ростами Х. Р. Поля размагничивания кристаллитов и способ измерения термодинамического поля квазимонокристаллических и поликристаллических тонких дисков $YBa_2Cu_3O_{7-x}$ // ЖЭТФ. 2008. Т. 134. С. 716—725.

7. Bean C. P. Magnetization of high-field superconductors // Rev. Mod. Phys. 1964. V. 36. P. 31—39.

8. Афанасьев М. С. и др. Монокристаллические пленки высокотемпературных сверхпроводников для СВЧ-электроники // Радиотехника. 2005. № 10. С. 88—90.

9. Можаяев П. Б. и др. Получение высококачественных тонких пленок $YBa_2Cu_3O_x$ на подложке $NdGaO_3$ (110) методом лазерного распыления // СФХТ. 1995. Т. 8. С. 288—294.

10. Scherer T. e. a. Anisotropy on the a,b plane of c-axis oriented almost twinfree YBCO films on $NdGaO_3$ // Physica C. 1992. V. 197. P. 79—83.

Дата принятия 12.08.2013 г.

РАДИОТЕХНИЧЕСКИЕ ИЗМЕРЕНИЯ

621.396.677:519.711.3

Моделирование излучения зеркальной антенны с учетом вибрационных деформаций

Д. Н. ШИШУЛИН, Н. К. ЮРКОВ, А. Н. ЯКИМОВ

Пензенский государственный университет, Пенза, Россия,
e-mail: yurchuk@vniiftri.org

Предложен подход к моделированию излучения зеркальной антенны при вибрационных воздействиях. Установлена связь между возникающими деформациями излучающей поверхности и изменениями диаграммы направленности антенны. Дан анализ полученных результатов.

Ключевые слова: антенна, вибрации, деформации, характеристики излучения.

An approach to modeling of the mirror antenna radiation with taking into account the vibration deformation is suggested. The connection between the incipient radiating surface deformations and the changes of radiation direction diagram is established. The received results analysis is carried out.

Key words: antenna, vibrations, deformations, radiation characteristics.

Зеркальные антенны, закрепленные на борту подвижных средств, подвергаются неблагоприятному воздействию вибраций и деформируются. Это приводит к отклонению от расчетных как их электрических характеристик, так и характеристик радиотехнических систем, в составе которых они используются. В связи с этим возникает необходимость оценки изменений расчетных характеристик, возникающих из-за вибрационных деформаций проектируемых антенн [1, 2].

Строгая аналитическая оценка результатов вибрационного воздействия затруднена в силу сложности конструкции антенны и в большинстве случаев оказывается невозможной. Поэтому при решении таких задач прибегают, в частности, к приближенному математическому описанию формы колебаний антенны, полученных экспериментально [2]. На этапе проектирования антенн перспективно при исследова-

нии таких процессов представлять их дискретно, что позволяет выразить векторы электромагнитного поля \mathbf{E} и \mathbf{H} совокупностью составляющих, формируемых отдельными элементами антенны с учетом их амплитуд и фаз. Зная геометрические и электрические характеристики, можно определить центры излучающих элементов и оценить их новое пространственное положение в результате воздействия вибраций [1].

Постановка задачи. Пусть зеркальная параболическая антенна закреплена вертикально в центре зеркала при помощи недеформируемого дискового держателя. В таком положении зеркала при вибрационных воздействиях основными являются асимметричные колебания, причем определяющее влияние на их форму оказывает конструкция держателя [2]. При этом облучатель закреплен в центральной

недеформируемой части зеркала. В предлагаемой модели исключаем дополнительные фазовые искажения, вызванные смещением облучателя при воздействии вибраций.

Как известно [3], неискаженное зеркало параболической антенны при его облучении из фокуса создает в раскрыве синфазное амплитудное распределение поля. Однако при деформации зеркала возникают фазовые искажения, распределение поля в раскрыве перестает быть синфазным и возникает необходимость оценки влияния этих деформаций на характеристики зеркальной антенны. Чтобы учесть влияние деформаций, излучающую поверхность зеркальной антенны целесообразно представить в виде системы элементарных излучателей, расположенных в главных (горизонтальном и вертикальном) сечениях, так как для остронаправленных антенн пространственные диаграммы направленности (ДН) $F(\varphi, \theta)$ можно описать произведением функций в главных сечениях [4, 5]:

$$F(\varphi, \theta) = F(\varphi) F(\theta),$$

где $F(\varphi)$, $F(\theta)$ — ДН в горизонтальной и вертикальной плоскостях; φ , θ — углы в этих плоскостях в направлении точки наблюдения относительно оси излучения, совпадающей с осью OZ декартовой системы координат.

Построение модели. Рассмотрим главное сечение параболического зеркала, расположенное вдоль оси OY декартовой системы координат (рис. 1). Введем следующие обозначения: P — точка наблюдения; y_1, y_2, \dots, y_N — координаты фазовых центров излучателей, расположенных вдоль оси OY ; r_1, r_2, \dots, r_N — расстояния от этих центров излучателей до точки P ; R — расстояние от геометрического центра излучающей поверхности O до точки P ; $\theta_i = \theta_1, \theta_2, \dots, \theta_N$ — угол в направлении точки P относительно оси симметрии для i -го излучателя; N — максимальный порядковый номер элементарного излучателя относительно оси симметрии антенны.

Нахождение поля антенны, создаваемого системой элементарных излучателей, в точке наблюдения P сводится к суперпозиции полей всех составляющих ее источников с учетом амплитуд и фаз. В соответствии с этим напряженность электрического поля E_Σ , создаваемого такой антенной, примет вид [1, 4, 5]:

$$E_\Sigma = \sum_{i=0}^n E_{\theta_i},$$

где $n = 2N$, E_{θ_i} — составляющая электрического поля, создаваемая i -м излучателем,

$$E_{\theta_i} = E_{0i} F(\theta_i) e^{-jk(r_i + \Delta r_i)} / (r_i + \Delta r_i),$$

E_{0i} — амплитуда напряженности электрического поля i -го излучателя у поверхности антенны; $F(\theta_i)$ — уровень ДН i -го излучателя в направлении θ_i ; $k = 2\pi/\lambda$, λ — волновое число и длина электромагнитной волны; Δr_i — изменение пути частичного луча электромагнитной волны к i -му элементарному излучателю вследствие деформации зеркала (рис. 2), приводящее к фазовому сдвигу распределения поля в его апертуре [4, 5].

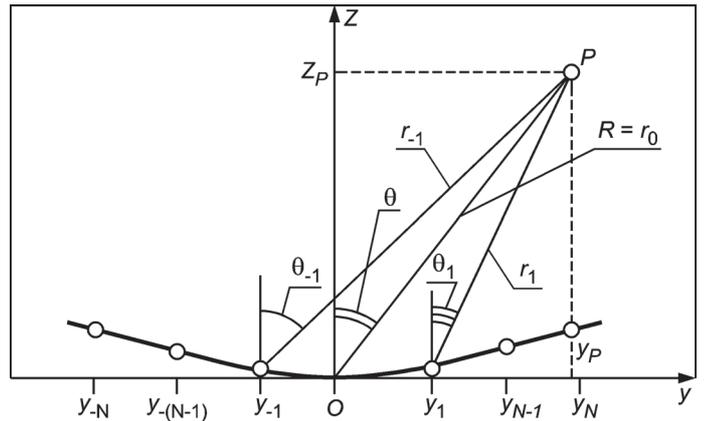


Рис. 1. Дискретное представление сечения зеркала антенны

В соответствии с рис. 2 отрезки Δr_i можно найти как сумму отрезков пути волны AC и AB , причем можно считать, что $AC = AB \cos \psi$, где ψ — угол наблюдения точки A из фокуса F_1 зеркала [2]. Таким образом, по отклонению информативной точки B неискаженного зеркала в положение A на искаженном зеркале получим

$$\Delta r_i = AB (1 + \cos \psi).$$

В качестве излучателей можно использовать элементарные источники электромагнитных волн, например вибратор Герца, симметричный полуволновый вибратор и др. Выберем элементарные линейные излучатели с равномерным возбуждением и продольными размерами, равными половине длины волны, для которых [5]:

$$F(\theta_i) = \sin u_i / u_i,$$

где $u_i = 0,5 kl_i \sin \theta_i$; l_i — длина i -го элементарного излучателя.

В исследуемой модели принимаем излучатели идентичными, пренебрегаем их взаимным влиянием и полагаем распределение токов неизменным во времени.

С учетом принятых обозначений координаты точки P выражаются формулами $y_P = R \sin \theta$; $z_P = R \cos \theta$; расстояние до нее от фазового центра произвольного i -го излучателя $r_i =$

$$= \sqrt{(y_P - y_i)^2 + (z_P - z_i)^2}.$$

Угол наблюдения точки P относительно нормали к оси OY из фазового центра i -го излучателя $\theta_i = \arccos [(z_P - z_i) / r_i]$. Диаграмма направленности антенны

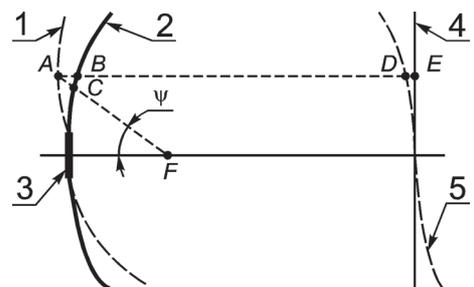


Рис. 2. Деформация зеркала антенны при вибрационном воздействии

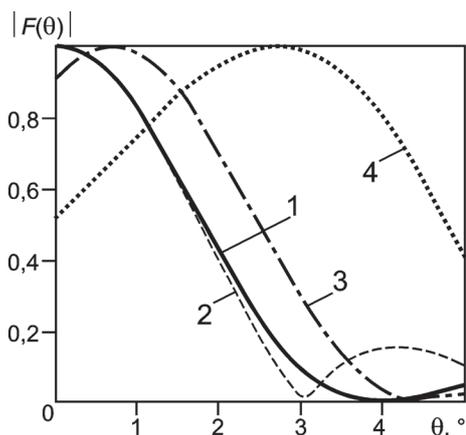


Рис. 3. Амплитудные диаграммы направленности зеркальной антенны

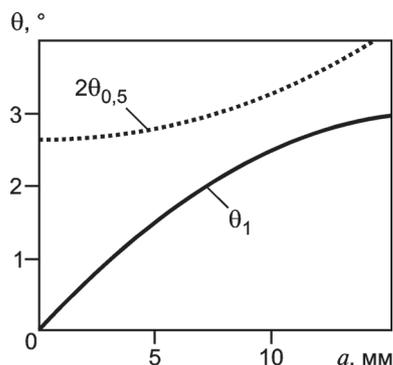


Рис. 4. Зависимости параметров $2\theta_{0,5}$, θ_1 от амплитуды вибрационных воздействий a на частоте 48 Гц

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

Анализ результатов. Для определения влияния вибрационных воздействий на амплитудные ДН расчеты по приведенным формулам выполняли при $\lambda = 0,03$ м, $R = 1000$ м для зеркальной параболической антенны с вертикальным раскрытием зеркала 0,71 м, закрепленного, как было указано выше, и испытывающего вибрационные колебания с различными амплитудами на частоте 48 Гц [2].

Исходная ДН антенны в вертикальной плоскости до деформации зеркала, рассчитанная с использованием рассмотренного дискретного представления, имеет на уровне половинной мощности ширину $2\theta_{0,5} = 2,64^\circ$ (рис. 3, кривая 1). Адекватность предложенной дискретной математической модели подтверждается близостью полученной ДН (рис. 3, кривая 2) к результатам расчета с использованием лямбда-функций.

При малых деформациях параболического зеркала от вибрационных воздействий амплитудами 1—3 мм на частоте 48 Гц (например, от пролетающего самолета или ракеты [2]) максимум ДН смещается на $\theta_1 = 0,67^\circ$ (рис. 3, кривая 3), но ее ширина меняется мало ($2\theta_{0,5} = 2,66^\circ$). При больших деформациях параболического зеркала от вибрационных воздействий с амплитудами 10—13 мм на частоте 48 Гц максимум ДН смещается уже на $\theta_1 = 2,7^\circ$ (рис. 3, кривая 4), а ее ширина значительно увеличивается ($2\theta_{0,5} = 3,51^\circ$) относительно расчетных значений для недеформированного зеркала.

Как следует из рис. 3, увеличение амплитуды вибрационных воздействий приводит к росту ширины ДН антенны и смещению ее максимума относительно расчетных значений

в отсутствие вибраций, причем эта зависимость оказывается нелинейной. Эти тенденции можно аппроксимировать следующими полиномиальными выражениями:

$$(2\theta_{0,5})_в = 2\theta_{0,5}(0,0026a^2 - 0,00141a + 1);$$

$$\theta_1 = -0,0105492a^2 + 0,3560984a + 1,1611507 \cdot 10^{-17};$$

где $(2\theta_{0,5})_в$ — ширина ДН антенны в вертикальной плоскости на уровне половинной мощности при вибрационных воздействиях; a — амплитуда вибрационных воздействий на частоте 48 Гц; θ_1 — смещение максимума ДН антенны в вертикальной плоскости при вибрационных воздействиях.

Графическая иллюстрация этих зависимостей приведена на рис. 4.

Заключение. Полученные результаты подтверждают существенное влияние вибраций на характеристики излучения зеркальной параболической антенны. Отмеченные тенденции характерны для данного типа антенн, что указывает на адекватность предложенной математической модели, возможность ее использования для исследования влияния вибрационных воздействий на характеристики излучения зеркальной антенны и оптимизации ее конструкции по минимуму этого влияния. Результаты исследований соответствуют известным теоретическим и экспериментальным данным.

Л и т е р а т у р а

1. **Якимов А. Н.** Проектирование микроволновых антенн с учетом внешних воздействий: монография. Пенза: Изд-во Пенз. гос. ун-та, 2004.
2. **Абжирко Н. Н.** Влияние вибраций на характеристики радиолокационных антенн. М.: Сов. радио, 1974.
3. **Драбкин А. Л., Зузенко В. Л., Кислов А. Г.** Антенно-фидерные устройства. М.: Сов. радио, 1974.
4. **Шишулин Д. Н., Якимов А. Н.** Методика оценки влияния деформации зеркала на характеристики излучения параболической антенны // Надежность и качество—2010: Труды Междунар. симп. В 2 т. / Под ред. Н. К. Юркова. Пенза: Изд-во ПГУ, 2010. Т. 1. С. 398—399.
5. **Шишулин Д. Н., Якимов А. Н.** Оценка влияния деформации зеркала на излучение параболической антенны // Надежность и качество—2011: Тр. Междунар. симп. В 2 т. / Под ред. Н. К. Юркова. Пенза: Изд-во ПГУ, 2011. Т. 1. С. 343—345.

Дата принятия 22.08.2013 г.