

Д. Н. Шишулин, А. Н. Якимов

МЕТОДИКА МОДЕЛИРОВАНИЯ ИЗЛУЧЕНИЯ ПАРАБОЛИЧЕСКОЙ АНТЕННЫ С УЧЕТОМ ВИБРАЦИОННЫХ ВОЗДЕЙСТВИЙ

Аннотация.

Актуальность и цели. Антенны, закрепленные на борту подвижных средств, подвергаются вибрационным воздействиям. Это приводит к изменению фазового фронта электромагнитной волны, формируемой антенной, и изменению ее диаграммы направленности. Появляется необходимость оценки не только расчетных характеристик проектируемых антенн, но и изменений, возникающих в результате деформаций их излучающих поверхностей. Оценка результатов внешних вибрационных воздействий представляет собой задачу, строгое аналитическое решение которой в силу сложности конструкции антенны в большинстве случаев оказывается невозможным.

Материалы и методы. Перспективным направлением в исследовании такого рода процессов в антеннах является использование метода математического моделирования, основанного на дискретном представлении этих антенн, позволяющем описать векторы электромагнитного поля совокупностью компонент, формируемых отдельными элементами дискретизации антенны. Зная геометрические характеристики излучающей поверхности антенны, можно определить центры излучающих элементов и оценить их новое пространственное положение в результате воздействия вибраций.

Результаты. Предложенная методика моделирования позволила установить связь между возникающими при вибрационных воздействиях деформациями излучающей поверхности антенны и изменениями ее диаграммы направленности. Адекватность используемой дискретной математической модели подтверждается экспериментальными данными.

Выводы. Вибрационные воздействия оказывают существенное влияние на характеристики излучения зеркальной параболической антенны, работающей в составе радиолучевой охранной системы. Их необходимо учитывать при проектировании.

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

D. N. Shishulin, A. N. Yakimov

METHOD OF MODELLING PARABOLIC ANTENNA RADIATION SUBJECT TO VIBRATION INFLUENCES

Abstract.

Background. The antennas, fixed onboard of vehicles, are exposed to vibrating actions. It leads to changes of the phase front of the electromagnetic wave formed by the antenna and changes of radiation pattern thereof. There is a necessity of estimation of not just settlement characteristics of the projected antennas, but also the changes, resulting from deformations of antennas' radiating surfaces. Estimation of results of external vibrating actions represents a problem, strict analytical solution of which owing to complexity of the antenna's design in most cases appears to be impossible.

Materials and methods. A perspective direction in research of such processes in antennas is the method of mathematical modelling based on discrete representation

of these antennas, allowing to describe vectors of an electromagnetic field by a set of component, formed by separate elements of digitization of the antenna. Knowing geometrical characteristics of the radiating surface of the antenna it is possible to define the centres of radiating elements and to estimate their new spatial position as a result of vibrations.

Results. The offered method of modelling allowed to establish connection between deformations of the radiating surface of the antenna as a result of vibrations and the changes of its radiation pattern. Adequacy of the used discrete mathematical model is proved by the experimental data.

Conclusions. Vibrations essentially influence characteristics of radiation of the mirror parabolic antenna, working as a part of radio beam security system. They must be considered at designing.

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

Введение

Неотъемлемой частью радиолучевой охранной системы является антенна, выступающая в роли промежуточного звена между приемником и передатчиком. Антенны, закрепленные на борту подвижных средств, подвергаются неблагоприятному воздействию. В результате таких внешних воздействий антенны охранных устройств деформируются, что приводит к изменению фазового фронта, изменению диаграммы направленности. В связи с этим возникает необходимость оценки не только расчетных характеристик проектируемых антенн, но и их изменений в результате возникающих деформаций [1, 2].

Оценка результатов внешних воздействий представляет собой сложную задачу, строгое аналитическое решение которой в силу сложности конструкции антенны в большинстве случаев оказывается невозможным. Поэтому при решении таких задач часто прибегают к использованию приближенных методов, включая приближенное математическое описание форм колебаний антенны, полученных экспериментально [2].

1. Постановка задачи

Перспективным направлением в исследовании такого рода процессов в антеннах является их дискретное представление, позволяющее описать векторы электромагнитного поля $\mathbf{E}$ и $\mathbf{H}$, создаваемого ею, совокупностью компонент, формируемых отдельными элементами этой антенны. Зная геометрические и электрические характеристики, можно определить центры излучающих элементов и оценить их новое пространственное положение в результате воздействия вибраций [1].

Рассмотрим предлагаемую методику на примере зеркальной параболической антенны. Пусть антенна закреплена вертикально с помощью недеформируемого дискового «держателя» в центре зеркала. В таком положении зеркала при вибрационных воздействиях основной формой колебания являются асимметричные колебания (рис. 1), причем определяющее влияние на форму колебания зеркала оказывает конструкция держателя [2].

2. Методика моделирования

Как известно [3], неискаженное зеркало параболической антенны при его облучении из фокуса создает в раскрыве синфазное распределение поля,

по которому с высокой точностью с использованием лямбда-функций можно рассчитать диаграмму направленности (ДН) параболической антенны. Однако такой метод расчета в его классической постановке не позволяет учесть возникающие при деформации зеркала фазовые искажения.

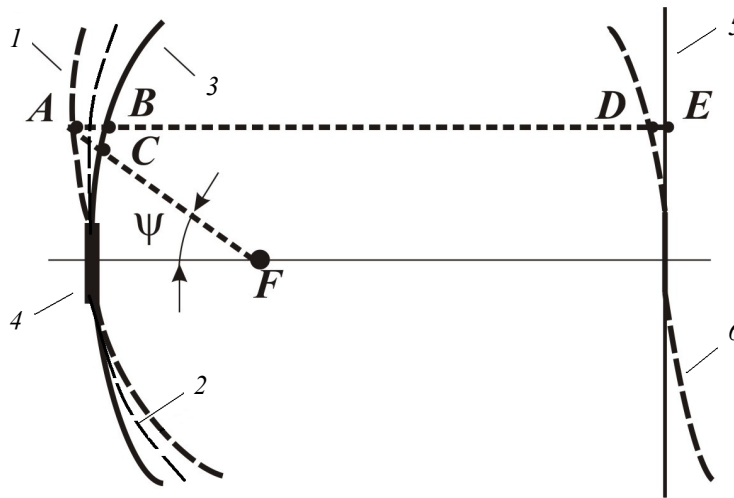


Рис. 1. Деформации профиля параболического зеркала при вибрационных воздействиях: 1 – искаженный профиль зеркала (большие вибрации); 2 – искаженный профиль зеркала (малые вибрации); 3 – неискаженный профиль зеркала; 4 – держатель зеркала; 5 – плоский фронт волны; 6 – искаженный фронт волны; F – фокус параболического зеркала; ψ – направление парциального луча электромагнитной волны; A, B, C, D, E – информативные точки, характеризующие удлинение пути волны в верхней половине и его укорочение в нижней половине зеркала (A, B и C), а также искажение фронта волны (D и E)

Дискретное представление непрерывной излучающей поверхности целесообразно в виде системы элементарных излучателей, расположенных в главных (горизонтальном и вертикальном) сечениях, так как для остроуправленных антенн пространственные ДН $F(\varphi, \theta)$ могут быть описаны произведением функций ДН в главных сечениях [4, 5]:

$$F(\varphi, \theta) = F(\varphi) \cdot F(\theta), \quad (1)$$

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

Рассмотрим главное сечение апертуры параболического зеркала, расположенное вдоль оси Oy декартовой системы координат (рис. 2).

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

С учетом принятых обозначений координаты y_p и z_p точки наблюдения P имеют следующие значения:

$$y_p = R \sin \theta, \quad (2)$$

$$z_p = R \cos \theta. \quad (3)$$

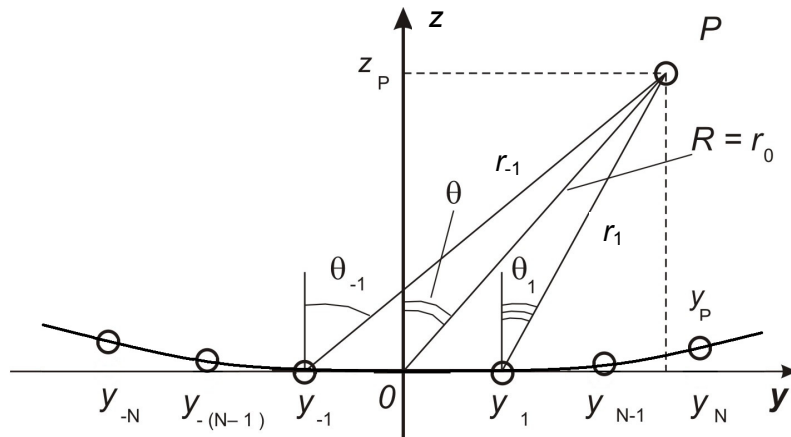


Рис. 2. Дискретное представление излучающей апертуры антенны: P – точка наблюдения; $y_1, y_2, \dots, y_n$ – координаты фазовых центров излучателей, расположенных вдоль оси Oy ; $r_1, r_2, \dots, r_n$ – расстояния от фазовых центров излучателей до точки наблюдения P ; R – расстояния геометрического центра излучающей апертуры O до точки наблюдения P ; $\theta_i = \theta_1, \theta_2, \dots, \theta_N$ – угол в направлении точки наблюдения P относительно оси симметрии для i -го излучателя; N – максимальный порядковый номер элементарного излучателя относительно оси симметрии антенны

В свою очередь расстояние до точки наблюдения P от произвольного i -го излучателя r_i может быть определено как

$$r_i = \sqrt{(y_p - y_i)^2 + (z_p - z_i)^2}, \quad (4)$$

где r_i – расстояния до точки P относительно фазового центра i -го излучателя; y_i, z_i – координаты i -го излучателя.

Угол θ_i наблюдения точки P относительно нормали к оси Oy из фазового центра i -го излучателя при этом определится как

$$\theta_i = \arccos \left[(z_p - z_i) / r_i \right]. \quad (5)$$

Нахождение поля антенны, создаваемого системой элементарных излучателей в точке наблюдения P , сводится в результате к суммированию полей всех составляющих ее источников с учетом амплитуд и фаз.

В соответствии этим напряженность электрического поля E_Σ , создаваемого такой антенной, примет следующий вид [1, 4, 5]:

$$E_\Sigma = \sum_{i=0}^n E_{\theta_i}, \quad (6)$$

где i – номер излучателя; E_{θ_i} – составляющая электрического поля, создаваемая элементарных излучателем с индексом i ; $n = 2N$ – четное число излучателей.

Составляющая электрического поля E_{θ_i} , создаваемая i -м излучателем в направлении точки наблюдения P , может быть определена как

$$E_{\theta_i} = E_{0i} \cdot F(\theta_i) \cdot \frac{e^{-jk(r_i + \Delta r_i)}}{r_i + \Delta r_i}, \quad (7)$$

где E_{0i} – амплитуда напряженности электрического поля i -го излучателя у поверхности антенны; $F(\theta_i)$ – уровень ДН i -го излучателя в направлении θ_i ; θ_i – угол наблюдения точки P относительно нормали к i -му элементарному излучателю в его центре; $j = \sqrt{-1}$ – мнимая единица; $k = \frac{2\pi}{\lambda}$ – волновое число электромагнитной волны; λ – длина электромагнитной волны; r_i – расстояние от центра i -го излучателя до точки наблюдения P ; Δr_i – изменение пути парциального луча электромагнитной волны к i -му элементарному излучателю вследствие деформации зеркала, приводящее к фазовому сдвигу распределения поля в его апертуре [4, 5].

В качестве излучателей могут быть выбраны элементарные источники электромагнитных волн, например такие, как вибратор Герца, симметричный полуволновый вибратор и др. Выберем элементарные линейные излучатели с равномерным возбуждением и продольными размерами, равными половине длины волны, для которых $F(\theta_i)$ могут быть определены по формуле

$$F(\theta_i) = \frac{\sin u_i}{u_i}, \quad (8)$$

где $u = \frac{kl_i}{2} \sin \theta_i$; l_i – длина i -го элементарного излучателя.

Диаграмма направленности антенны в вертикальной плоскости $F(\theta)$ с учетом полученных выражений может быть определена как

$$F(\theta) = E_{\Sigma}(\theta) / E_{\max}, \quad (9)$$

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

Для определения влияния внешних воздействий на амплитудные ДН расчеты по формулам (1)–(9) проводились при $\lambda = 0,03$ м, $R = 1000$ м для зеркальной параболической антенны с вертикальным размером раскрыва зеркала 0,71 м, закрепленного в центре вертикально с помощью дискового «держателя» (см. рис. 1). Кроме того, антенна испытывает вибрационные колебания с различными амплитудами на частоте 48 Гц [2].

Исходная ДН антенны после деформации (см. рис. 1), рассчитанная с использованием рассмотренного дискретного представления, показана на рис. 3,а (кривая 1) – для малых деформаций, и на рис. 3,б (кривая 1) – для

больших деформаций. Однако практическое использование показывает, что характеристики излучения, рассчитанные с использованием этой методики, существенно отличаются от экспериментальных [2, 4, 5]. В связи с этим возникает необходимость калибровки математической модели излучения параболической антенны в условиях механических воздействий с учетом результатов экспериментальных исследований.

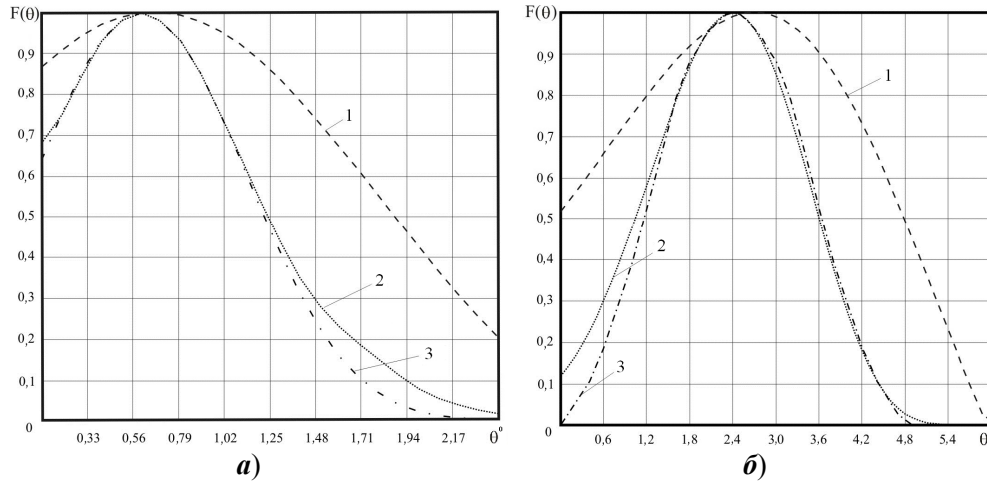


Рис. 3. Калибровка амплитудной диаграммы направленности антенны

Рассмотрим возможности такой калибровки для учета влияния вибрационных воздействий на характеристики излучения антенны. В соответствии с рис. 1 эти деформации Δr_i могут быть найдены как сумма отрезков пути волны AC и AB , причем можно считать, что $AC = AB \cdot \cos \psi$, где ψ – угол наблюдения точки A из фокуса зеркала [2], $\cos n$ – коэффициент поправки приращения при деформации. Таким образом, по отклонению информативной точки B неискаженного зеркала в положение A на искаженном зеркале (см. рис. 1) получим

$$\Delta r_i = (AB \cdot (1 + \cos \psi)) \cos n. \quad (10)$$

Амплитуда напряженности электрического поля i -го излучателя у поверхности антенны E_{0i} может быть определена по распределению поля $f(y)$ в сечении антенны, исходя из его положения y_i вдоль оси Oy . Само же распределение поля $f(y)$ находится по традиционной для апертурного метода расчета методике по ДН облучателя [3].

Наиболее простым способом калибровки математической модели излучения антенны при превышении ее ширины является возведение математического выражения, описывающего ДН, в степень, превышающую единицу. То есть выражение (9) математической модели для калибровки должно быть преобразовано к виду

$$F(\theta) = (E_{\Sigma}(\theta) / E_{\max})^m, \quad (11)$$

где $m > 1$.

5. Анализ результатов

Результаты расчетов ДН антенны по предложенной модели без калибровки при малых и больших вибрациях приведены на рис. 3,а (кривая 1) и рис. 3,б (кривая 1) соответственно.

Использование выражения (11) при малых вибрациях с $m = 9$, $n = 22,45^\circ$ (рис. 3,а, кривая 2) и при больших вибрациях с $m = 4$, $n = 22,415^\circ$ (рис. 3,б, кривая 2) позволяет значительно приблизиться к экспериментальным ДН (см. рис. 3, кривая 2) в области главного лепестка. Эти результаты подтверждают адекватность предложенной математической модели.

Заключение

Таким образом, полученные результаты подтверждают существенное влияние внешних воздействий на излучение параболической антенны и целесообразность использования предложенной дискретной модели с последующей ее калибровкой при проектировании радиолучевых охранных систем для повышения помехоустойчивости в интеллектуальной радиолокационной системе [6] или решения других задач излучения и рассеяния электромагнитных волн [7].

Список литературы

1. **Якимов, А. Н.** Проектирование микроволновых антенн с учетом внешних воздействий : моногр. / А. Н. Якимов. – Пенза : Изд-во Пенз. гос. ун-та, 2004. – 206 с.
2. **Абжирко, Н. Н.** Влияние вибраций на характеристики радиолокационных антенн / Н. Н. Абжирко. – М. : Сов. радио, 1974. – 168 с.
3. **Драбкин, А. Л.** Антенно-фидерные устройства / А. Л. Драбкин, В. Л. Зузенко, А. Г. Кислов. – М. : Сов. радио, 1974. – 536 с.
4. **Шишулин, Д. Н.** Методика оценки влияния деформации зеркала на характеристики излучения параболической антенны / Д. Н. Шишулин, А. Н. Якимов // Надежность и качество – 2010 : тр. Междунар. симпозиума : в 2 т. / под ред. Н. К. Юркова. – Пенза : Изд-во ПГУ, 2010. – Т. 1. – С. 398–399.
5. **Шишулин, Д. Н.** Оценка влияния деформации зеркала на излучение параболической антенны / Д. Н. Шишулин, А. Н. Якимов // Надежность и качество – 2011 : тр. Междунар. симпозиума : в 2 т. / под ред. Н. К. Юркова. – Пенза : Изд-во ПГУ, 2011. – Т. 1 – С. 343–345.
6. **Якимов, А. Н.** Обеспечение помехоустойчивости информационных коммуникаций в интеллектуальной радиолокационной системе / А. Н. Якимов, В. Б. Лебедев // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. – 2012. – № 1 (21). – С. 124–132.
7. **Бойков, И. В.** Приближенное решение задачи рассеяния излучений на малых телах произвольной формы / И. В. Бойков // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. – 2012. – № 3 (23). – С. 71–84.

References

1. Yakimov A. N. *Proektirovanie mikrovolnovykh anten s uchetom vneshnikh vozdeystviy: monogr.* [Modeling of microwave antennas subject to external influences: monograph]. Penza: Izd-vo Penz. gos. un-ta, 2004, 206 p.
2. Abzhirko N. N. *Vliyanie vibratsiy na kharakteristiki radiolokatsionnykh anten* [Vibration influence on radar antenna characteristics]. Moscow: Sov. radio, 1974, 168 p.
3. Drabkin A. L., Zuzenko V. L., Kislov A. G. *Antenno-fidernye ustroystva* [Antenna-feeder devices]. Moscow: Sov. radio, 1974, 536 p.

4. Shishulin D. N., Yakimov A. N. *Nadezhnost' i kachestvo – 2010: tr. Mezhdunar. simpoziuma: v 2 t.* [Reliability and quality – 2010: proceedings of the International symposium: in 2 volumes]. Penza: Izd-vo PGU, 2010, vol. 1, pp. 398–399.
5. Shishulin D. N., Yakimov A. N. *Nadezhnost' i kachestvo – 2011: tr. Mezhdunar. simpoziuma: v 2 t.* [Reliability and quality – 2011: proceedings of the International symposium: in 2 volumes]. Penza: Izd-vo PGU, 2011, vol. 1, pp. 343–345.
6. Yakimov A. N., Lebedev V. B. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Povolzhskiy region. Tekhnicheskie nauki* [University proceedings. Volga region. Engineering sciences]. 2012, no. 1 (21), pp. 124–132.
7. Boykov I. V. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Povolzhskiy region. Tekhnicheskie nauki* [University proceedings. Volga region. Engineering sciences]. 2012, no. 3 (23), pp. 71–84.

Шишулин Денис Николаевич

аспирант, Пензенский государственный университет (Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)

E-mail: dwolf87@mail.ru

Shishulin Denis Nikolaevich

Postgraduate student, Penza State University (40 Krasnaya street, Penza, Russia)

Якимов Александр Николаевич

доктор технических наук, профессор, кафедра конструирования и производства радиоаппаратуры, Пензенский государственный университет (Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)

E-mail: yakimov@pnzgu.ru

Yakimov Aleksandr Nikolaevich

Doctor of engineering sciences, professor, sub-department of radio equipment design and production, Penza State University (40 Krasnaya street, Penza, Russia)

УДК 004.8: 004.71: 519.711.3

Шишулин, Д. Н.

Методика моделирования излучения параболической антенны с учетом вибрационных воздействий / Д. Н. Шишулин, А. Н. Якимов // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. – 2014. – № 2 (30). – С. 33–40.