

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ВИБРАЦИОННЫХ ВОЗДЕЙСТВИЙ НА ВОЛНОВОДНО-ЩЕЛЕВУЮ АНТЕННУ

Аннотация. Проводится модельное исследование влияния вибрационных воздействий на линейную волноводно-щелевую антенну и её диаграмму направленности. Возникающие деформации антенны оцениваются на трехмерной модели с использованием пакета SolidWorks. Предложена математическая модель, позволяющая учесть влияние деформаций на диаграмму направленности антенны.

Ключевые слова: антенна, модель, деформация, диаграмма.

Abstract. Modelling research of vibrating effects influence on linear waveguide-slot antenna and its a trend diagramme is carried out. Arising deformations of the antenna are estimated on three-dimensional model with usage of package SolidWorks. The mathematical model, allowing to consider influence of deformations on the trend diagramme of antenna is offered.

Keywords: antenna, model, deformation, diagramme.

Введение

Микроволновые антенны, закрепленные на борту подвижных средств, например автомобилей, самолетов или ракет, подвергаются неблагоприятному воздействию вибраций и ударов. В результате таких воздействий антенны деформируются, что приводит к отклонению относительно расчетных как их электрических характеристик, так и характеристик радиотехнической системы, в составе которой они используются [1, 2]. В связи с этим возникает необходимость оценки не только расчетных характеристик проектируемых антенн, но и их изменений в результате возникающих деформаций.

1. Постановка задачи

Оценка результатов вибрационного воздействия представляет собой сложную задачу, строгое аналитическое решение которой в силу сложности конструкции антенны в большинстве случаев оказывается невозможным. Поэтому при решении такой задачи часто прибегают к использованию приближенных методов, включая приближенное математическое описание форм колебаний антенны, полученных экспериментально [3].

Перспективным направлением в исследовании такого рода процессов в антенне 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 элементов антенны, можно определить их центры и оценить новое пространственное положение в результате воздействия вибраций. В этом случае при построении математической модели и оценке результатов таких воздействий может быть использована классическая теория колебаний и волн в упругих телах [4, 5].

2. Построение модели

В качестве объекта исследования выберем линейную волноводно-щелевую антенну (рис. 1) длиной L с продольными щелями, смещенными

относительно продольной оси на x_i . Предположим, что источник механических гармонических колебаний соединен с краем антенны, а ее центральная часть жестко закреплена. При этом будем учитывать только поперечные колебания, полагая, что продольные колебания отсутствуют.

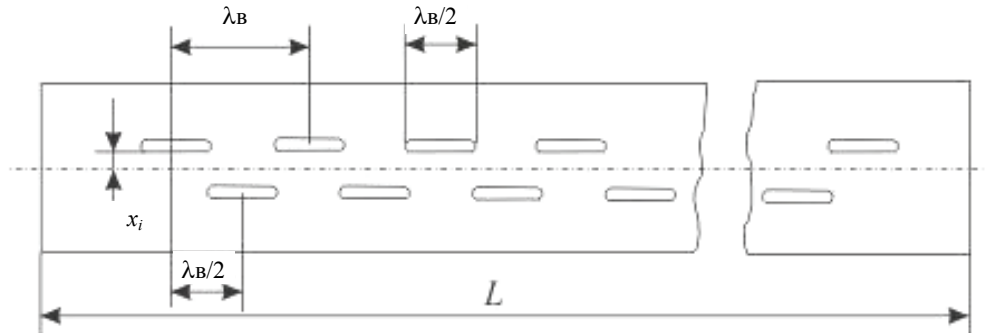


Рис. 1. Линейная волноводно-щелевая антенна

Исследуем такую антенну с использованием пакета SolidWorks 2009, где геометрическая модель антенны (рис. 2) строится в основном пакете, а исследование проводится в приложении Simulink.

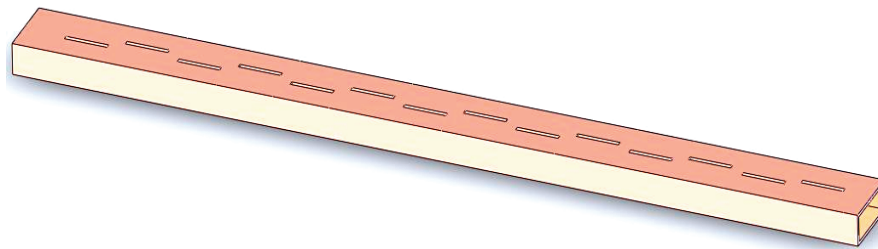


Рис. 2. Фрагмент линейной волноводно-щелевой антенны в пакете SolidWorks

При построении трехмерной модели линейной волноводно-щелевой антенны в программном пакете SolidWorks использовались следующие геометрические параметры антенны: толщина стенок, длина излучателей и их пространственное положение. В процессе построения модели учитывалось, что антенна является полой внутри, а на излучающей поверхности присутствуют сквозные щели.

К антенне с синфазным и равноамплитудным возбуждением приложено следующее механическое воздействие: гармоническое колебание вида

$$F = F_m \cos \omega t ,$$

где F_m – амплитуда гармонического воздействия; $\omega = 2\pi\nu$ – круговая частота; ν – циклическая частота механических колебаний; t – текущее время.

Определим влияние вибрации на диаграмму направленности волноводно-щелевой антенны при следующих условиях: длина антенны $L = 60$ см; возбуждение антенны синфазное и равноамплитудное; длина электромагнитной волны $\lambda = 3$ см; точка наблюдения P удалена на расстояние $R = 1000$ м.

В качестве материала для изготовления волноводно-щелевых антенн выберем латунь, плотность которой $\rho = 8500 \text{ кг/м}^3$, а модуль сдвига $G = 36 \text{ ГПа}$. Пусть на антенну действует механическое гармоническое колебание с амплитудой $F_m = 5 \text{ Н}$ и частотой $\nu = 150 \text{ Гц}$.

Приложим к плоскости излучающей поверхности антенны заданные механические воздействия, предварительно жестко закрепив антенну в ее центральной части и задав координатную сетку.

В результате приложения указанных воздействий к волноводно-щелевой антенне, закрепленной в центральной части, возникают деформации, вызывающие изменение пространственного положения ее излучающих щелей. Это может быть проиллюстрировано с помощью рис. 3 (φ – угловое положение точки наблюдения P относительно оси излучения антенны Oz ; R – расстояние от центра излучающей поверхности антенны до точки наблюдения P ; x_p и z_p – координаты точки наблюдения P ; r_i – расстояние от центра i -го излучателя до точки наблюдения P).

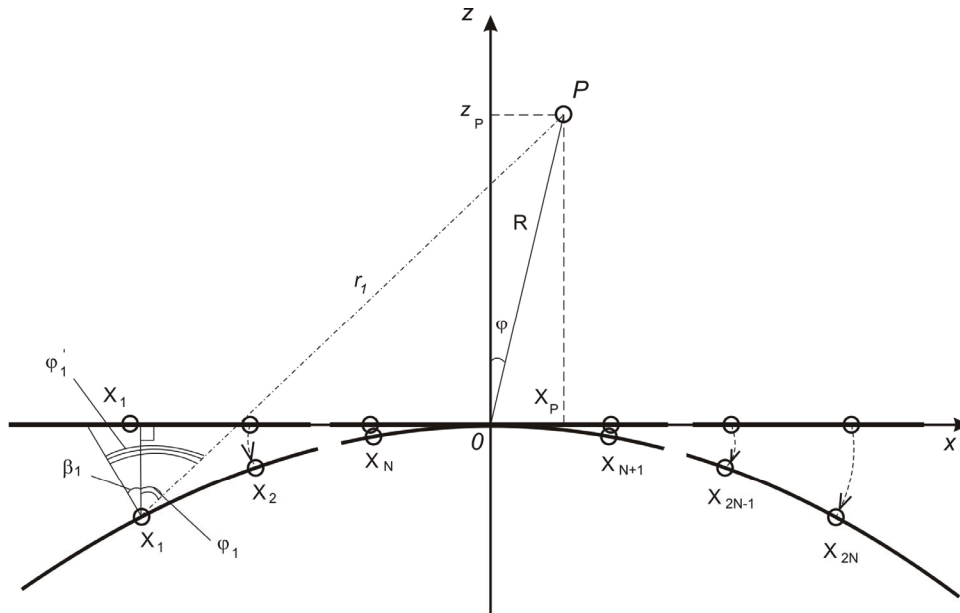


Рис. 3. Расположение излучателей в антенной решетке после деформации

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

В соответствии с этим напряженность электрического поля E_Σ , создаваемого деформированной антенной, примет следующий вид [1, 3]:

$$E_\Sigma = \sum_{i=1}^n E_{\varphi i}, \quad (1)$$

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

Составляющая электрического поля $E_{\varphi i}$, создаваемая i -м излучателем деформированной антенны в направлении точки наблюдения P может быть определена как [4]

$$E_{\varphi i} = E_{0i} \cdot F(\varphi'_i) \frac{e^{-jkr_i}}{r_i}, \quad (2)$$

где E_{0i} – амплитуда напряженности электрического поля, создаваемого i -м излучателем у поверхности антенны; $F(\varphi'_i)$ – уровень диаграммы направленности (ДН) i -го излучателя в направлении φ'_i ; φ'_i – угол наблюдения точки P относительно нормали к i -му элементарному излучателю деформированной антенны 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 .

Диаграмма направленности $F(\varphi'_i)$ продольного щелевого излучателя деформированной антенны в плоскости \mathbf{H} может быть описана формулой [2]

$$F(\varphi'_i) = \frac{\cos[(\pi/2)\sin\varphi'_i]}{\cos\varphi'_i}. \quad (3)$$

В предлагаемой модели излучатели считаем идентичными, пренебрегаем их взаимным влиянием и полагаем распределение токов неизменным во времени. На рассматриваемом рис. 3 центр излучающей поверхности антенны O совмещен с центром окружности, имеющей радиус, равный расстоянию R от этого центра до точки наблюдения P . Такую окружность опишет конец радиуса-вектора расстояния R при повороте антенны в горизонтальной плоскости относительно направления на P на угол, равный 360° , что соответствует условиям оценки ее характеристики направленности.

Так как угол наблюдения точки P для каждого излучателя различный, то при равноамплитудном и синфазном возбуждении и идентичности характеристик направленности излучателей амплитуды и фазы отдельных составляющих электрического поля в точке P будут различными. С учетом принятых обозначений, пространственного размещения излучателей и точки наблюдения P получим следующие расчетные соотношения.

Координаты x_p и z_p точки наблюдения P имеют следующие значения:

$$x_p = R \cdot \sin \varphi; \quad (4)$$

$$z_p = R \cdot \cos \varphi. \quad (5)$$

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

$$r_i = \sqrt{(x_p - x_i)^2 + z_p^2} . \quad (6)$$

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

$$\varphi_i = \arccos (z_p / r_i) . \quad (7)$$

Угол наблюдения φ'_i точки P из фазового центра i -го излучателя деформированной решетки относительно нормали к его плоскости определится как

$$\varphi'_i = \varphi_i + \beta_i , \quad (8)$$

где β_i – дополнительное угловое отклонение нормали к фрагменту антенной решетки с i -м излучателем в плоскости xOz при деформации.

Для антенной решетки с четным числом излучателей $2N$, учитывая, что антенна закреплена в ее центре и деформации центральных излучателей N и $(N+1)$ пренебрежимо малы, величина β_i может быть определена следующим образом. Для излучателей с индексами i от 1 до N справедлива формула

$$\beta_i = \arctg [(\Delta z_{i+1} - \Delta z_i) / d] , \quad (9)$$

а для излучателей с индексами i от $(N+1)$ до $2N$ справедлива формула

$$\beta_i = \arctg [(\Delta z_i - \Delta z_{i-1}) / d] , \quad (10)$$

где Δz_i , Δz_{i+1} – расстояния от фазовых центров излучателей недеформированной антенной решетки с индексами i и $(i+1)$ соответственно до деформированной излучающей поверхности по оси Oz ; $d = \lambda_B / 2$ – шаг расположения излучателей в недеформированной антенне; λ_B – длина волны в прямоугольном волноводе.

С использованием полученных выражений было проведено исследование влияния деформаций рассматриваемой антенной решетки на ее диаграмму направленности (ДН), описываемую выражением

$$F(\varphi) = E_\Sigma(\varphi) / E_{\max} , \quad (11)$$

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

3. Анализ результатов

Для заданных гармонических воздействий, приложенных к излучающей поверхности антенной решетки с числом излучателей $n = 28$, получены следующие отклонения излучающей поверхности Δz в направлении воздействия (табл. 1).

В табл. 1 Δt – время прохождения механической волны от края антенны до ее центра. Учитывая симметрию антенны относительно оси излучения и плоскости закрепления, аналогичные результаты получим и для щелей с номерами от 14 до 1.

№ щели	Δz , мм							
	Δt	$2\Delta t$	$3\Delta t$	$4\Delta t$	$5\Delta t$	$6\Delta t$	$7\Delta t$	$8\Delta t$
15	0,0	0,0	0,1	0,2	0,1	0,0	0,0	0,0
16	0,9	1,3	1,9	2,6	1,9	1,3	0,9	1,3
17	1,2	1,8	3,8	4,7	3,8	1,8	1,2	1,8
18	2,3	4,1	6,2	7,4	6,4	4,1	2,3	4,1
19	3,1	8,3	10,1	10,8	10,3	8,3	3,1	8,3
20	4,7	9,2	11,7	14,2	12,1	9,4	4,7	9,1
21	6,5	10,7	14,2	16,4	14,6	10,9	6,2	10,6
22	8,1	13,8	16,2	18,9	16,5	14,1	7,8	13,6
23	11,3	16,4	17,8	20,6	18,2	16,7	11,1	16,3
24	12,8	18,7	20,7	24,2	20,1	19,1	12,6	18,5
25	14,2	19,8	23,6	26,6	23,9	20,2	13,8	19,6
26	15,9	24,4	29,2	34,2	29,7	24,8	15,6	24,1
27	17,8	26,8	31,8	36,8	32,2	27,4	16,5	26,6
28	20,8	29,3	35,3	41,3	35,7	29,8	20,3	28,8

В соответствии с предложенной математической моделью проведены расчеты с использованием формул (1)–(11) в оболочке MathCad. В результате расчетов установлено, что модель антенны с заданными параметрами в отсутствие вибрационных воздействий имеет ДН с шириной на уровне половинной мощности $2\varphi_{0,5} = 2,6^\circ$ (рис. 4, кривая 1), что соответствует результатам расчета по известным формулам для ДН линейной волноводно-щелевой антенной решетки [2].

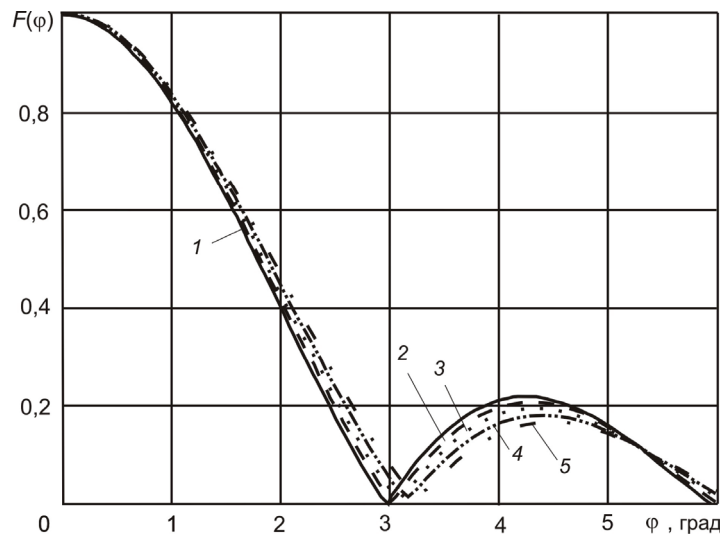


Рис. 4. Изменение ДН антенной решетки вследствие деформации

При механических гармонических воздействиях с начальной фазой, равной нулю, возникающая деформация профиля антенны приводит к следующим изменениям ДН (рис. 4, кривая 2): ширина ДН изменяется незначительно, но уже исчезают нулевые уровни в области боковых лепестков и изменяется уровень боковых лепестков.

При исследовании результатов деформации для каждого следующего временного интервала Δt воздействие поперечных механических колебаний оценивалось для нового пространственного положения щелей профиля антенны, полученного в предыдущий момент.

Расчеты деформации профиля антенны для моментов времени t , соответствующих его дальнейшему приращению с интервалом Δt , дали следующие результаты.

С увеличением t наблюдается периодическое изменение профиля антенны и соответствующее изменение ее ДН. Так, например, при $t = \Delta t$ и $t = 7\Delta t$ практически совпадают профили антенны и ее ДН (рис. 4, кривая 2), при $t = 2\Delta t$, $t = 6\Delta t$ и $t = 8\Delta t$ – ДН (рис. 4, кривая 3), при $t = 3\Delta t$ и $t = 5\Delta t$ – ДН (рис. 4, кривая 4). При $t = 4\Delta t$ (рис. 4, кривая 5) ДН имеет наибольшую ширину.

Таким образом, в результате указанных вибрационных воздействий ширина ДН антенны $2\varphi_{0,5}$ изменяется от $2,6^\circ$ до $2,9^\circ$, а ее максимальный уровень боковых лепестков – от $0,208$ ($-13,6$ дБ) до $0,168$ ($-15,5$ дБ).

Заключение

Отмеченные тенденции характерны для данного типа антенн, что указывает на адекватность предложенной математической модели, возможность ее использования для исследования влияния гармонических механических воздействий на характеристики излучения волноводно-щелевой антенны и оптимизации ее конструкции по минимуму этого влияния. Таким образом, полученные результаты могут оказаться полезными при проектировании виброустойчивых волноводно-щелевых антенн.

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. – 260 с.
2. Антенны и устройства СВЧ. Проектирование фазированных антенных решеток: учеб. пособие для вузов / под ред. Д. И. Воскресенского. – М. : Радио и связь, 1981. – 432 с.
3. **Абжирко, Н. Н.** Влияние вибраций на характеристики радио-локационных антенн / Н. Н. Абжирко. – М. : Сов. радио, 1974. – 168 с.
4. **Яковлев, С. А.** Моделирование влияния вибраций на характеристики направленности криволинейной антенны / С. А. Яковлев, А. Н. Якимов // Надежность и качество : труды Междунар. симпозиума. – Пенза : Инф.-изд. центр ПГУ, 2007. – Т. 1. – С. 278–280.
5. **Кабисов, К. С.** Колебания и волновые процессы: Теория. Задачи с решениями / К. С. Кабисов, Т. Ф. Камалов, В. А. Лурье. – М. : КомКнига, 2005. – 360 с.

Талибов Николай Алексеевич
аспирант, Пензенский
государственный университет

Talibov Nikolay Alexeevich
Postgraduate student,
Penza State University

E-mail: kipra@pnzgu.ru

Якимов Александр Николаевич

доктор технических наук, профессор,
кафедра конструирования
и производства радиоаппаратуры,
Пензенский государственный
университет

E-mail: yakimov@pnzgu.ru

Yakimov Alexander Nikolaevich

Doctor of engineering sciences, professor,
sub-department of radio devices engineering
and production, Penza State University

УДК 621.396.677: 519.711.3

Талибов, Н. А.

Исследование влияния вибрационных воздействий на волноводно-щелевую антенну / Н. А. Талибов, А. Н. Якимов // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. – 2010. – № 4 (16). – С. 89–96.