

УДК 621.391.677: 519.711.3

ДИСКРЕТНОЕ ПРЕДСТАВЛЕНИЕ – ОСНОВА МОДЕЛИРОВАНИЯ АНТЕНН СЛОЖНОЙ КОНФИГУРАЦИИ

© 2014 А.Н. Якимов, Э.В. Лапшин, Н.К. Юрков

Пензенский государственный университет

Поступила в редакцию 17.12.2013

В данной статье рассмотрен конечно-элементный подход к математическому моделированию антенн сложной пространственной конфигурации. Предлагаемая модель позволяет оценить поле излучения антенны с учетом внешних деформирующих воздействий

Ключевые слова: математическая модель, антенна, внешние воздействия, излучение.

В основе реализации системного подхода к проектированию микроволновых антенн сложной конфигурации лежат следующие принципы: целостность изучаемой системы, структурность, иерархичность, множественность описания, взаимозависимость системы и среды (свойства системы проявляются при взаимодействии с окружающей ее средой) [1].

При этом математическое описание проектируемой антенны в векторной форме может быть представлено функциональной зависимостью вида [2]:

$$\mathbf{Y} = \mathbf{Y}(\mathbf{X}, \mathbf{Q}, \mathbf{R}), \quad (1)$$

где $\mathbf{Y} = \{Y_1, Y_2, \dots, Y_m\}$ – вектор выходных параметров (характеристик) антенны, определяющих ее функциональное назначение, к которым можно отнести, например, напряженности электрического \mathbf{E} и магнитного \mathbf{H} поля в точке наблюдения, диаграмму направленности (ДН), коэффициент направленного действия (КНД) и помехозащищенность антенны; $\mathbf{X} = \{X_1, X_2, \dots, X_n\}$ – вектор входных параметров, к которым можно отнести данные технического задания, а также априорную информацию о проектируемой антенне; $\mathbf{Q} = \{Q_1, Q_2, \dots, Q_p\}$ – вектор внутренних параметров (или переменных состояния), характеризующих конструктивно-технологические и электрофизические свойства отдельных компонентов проектируемой антенны (к внутренним параметрам отнесем геометрические размеры и форму излучающей поверхности, а также ее электрофизические свойства); $\mathbf{R} = \{R_1, R_2, \dots, R_l\}$ –

вектор внешних параметров воздействия, характеризующих влияние внешних условий на функционирование проектируемой антенны, например, таких как тепловые и механические воздействия на излучающую поверхность антенны, а также воздействие влаги на эту поверхность. На характеристики излучения также влияют местные предметы, которые отражают электромагнитную волну антенны в направлении ее поверхности и наводят там вторичное поле. Однако это влияние не изменяет формы и свойств излучающей поверхности, поэтому его следует рассматривать отдельно.

Излучающая поверхность антенны, вследствие тепловых и механических воздействий деформируется и приобретает сложную пространственную конфигурацию, аналитическое описание которой возможно лишь с определенной степенью приближения. Для решения задачи об излучении такой антенны целесообразно воспользоваться численными методами.

Так как для описания процесса деформаций в сплошных средах вследствие механических и тепловых воздействий хорошо зарекомендовал себя метод конечных элементов [2], то целесообразно применить этот же метод и для описания излучения антенны с деформируемой гладкой излучающей поверхностью, чтобы сохранить единство описания всех процессов, происходящих в проектируемой антенне. Метод конечных элементов оказывается предпочтительным также в силу геометрической гибкости для описания трехмерной границы криволинейной излучающей поверхности антенны (например, параболоида).

Проектирование антенн основывается на теории электромагнитного поля. В соответствии с этой теорией, электромагнитное поле, создаваемое антенной в заданной точке пространства, является суперпозицией полей, создаваемых в этой точке токами различных элементов излучающей поверхности с учетом их амплитуд и фаз.

Якимов Александр Николаевич, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры конструирования и производства радиоаппаратуры. E-mail: kipro@pnzgu.ru

Лапшин Эдуард Владимирович, доктор технических наук, профессор кафедры конструирования и производства радиоаппаратуры. E-mail: kipro@pnzgu.ru

Юрков Николай Кондратьевич, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой конструирования и производства радиоаппаратуры. E-mail: kipro@pnzgu.ru

Каждый элемент излучающей поверхности, при этом, возбуждается либо непосредственно (в антенных решетках), либо посредством электромагнитного излучения других элементов (в зеркальных антеннах). Изменяя размеры и форму излучающей поверхности антенны, а также распределение по ней токов возбуждения, можно обеспечить заданные характеристики излучения антенны, т.е. решить задачу проектирования.

Микроволновую зеркальную антенну в наиболее общем виде можно представить следующим образом: есть источник электромагнитных волн (облучатель) и гладкая криволинейная излучающая поверхность, возбуждаемая этим излучателем, при этом излучающая поверхность находится в дальней зоне облучателя. Микроволновые антенны обычно имеют размер излучающей поверхности значительно больше длины волны, поэтому из множества методов теории дифракции для математического моделирования процесса излучения целесообразно использовать сочетание лучевых методов представления полей рассеяния, законов физической оптики, основанных на принципе Гюйгенса-Френеля, а также методов физической теории дифракции, учитывающих краевые эффекты [2].

Так как излучающая поверхность антенны находится в дальней зоне электромагнитной волны, то на ограниченном участке этой поверхности токи можно принять неизменными по амплитуде и фазе. Таким образом, появляется возможность численного решения задачи излучения антенны путем деления (декомпозиции) ее поверхности на конечные элементы, в пределах каждого из которых поверхностный ток $I(x, y, z)$, являющийся функцией ее координат x, y и z декартовой системы, принимает постоянное значение.

Качество дискретизации излучающей поверхности в значительной мере зависит от формы элементов дискретизации, причем наилучшие результаты получаются, когда форма этих элементов не слишком отличается от идеальных равносторонних треугольников, квадратов, кубов и т. д., ввиду опасности вырождения решения [3].

Двумерная аппроксимация излучающей поверхности сводится при этом к одномерной кусочно-линейной аппроксимации функций, образующих эту излучающую поверхность. При этом совокупность одномерных сечений этой поверхности во взаимно перпендикулярных плоскостях, параллельных плоскостям Oxz и Oyz правой декартовой системы координат, образует криволинейную сетку с узлами в точках пересечения одномерных сечений. Узлы криволинейной сетки, принадлежащие излучающей поверхности, при кусочно-линейной аппроксимации остаются

неизменными, а криволинейные отрезки, соединяющие их, заменяются отрезками прямых. В результате, гладкая излучающая поверхность заменяется многогранной поверхностью аппроксимации, с плоскими прямоугольными или квадратными гранями (в зависимости от шага дискретизации), а при дополнительном разбиении и многогранной поверхностью с плоскими треугольными гранями.

Применение такого метода позволяет обеспечить непрерывность искомой функции на границах между треугольниками, которая гарантируется равенством значений функции в совпадающих вершинах треугольников, а также сохранить независимость аппроксимации от расположения треугольников по отношению к глобальной системе координат $Oxyz$. При этом поверхность локально определяется значениями функции в вершинах треугольника и поэтому не изменяется при переопределении осей x, y и z .

В соответствии с электродинамической постановкой задачи об излучении антенны со сложной пространственной конфигурацией, излучающую поверхность антенны S может быть представлена как совокупность N независимых

$$\text{элементарных участков } S_i, \text{ причем } S = \bigcup_{i=1}^N S_i.$$

Приближение дальней зоны позволяет считать, что все направления от начала локальных систем координат конечных элементов на точку наблюдения параллельны. Угловые же координаты точки наблюдения в локальных системах координат конечных элементов вследствие нелинейности излучающей поверхности оказываются различными. В связи с этим, для определения электрических составляющих электромагнитного поля, создаваемого в точке наблюдения гладкой криволинейной излучающей поверхностью, особое значение следует придавать оценке характеристик рассеяния конечных элементов и ребер внешних конечных элементов, образующих кромку излучающей поверхности при их возбуждении плоской электромагнитной волной, падающей под произвольным углом. Следует также обратить внимание и на необходимость оценки пространственной ориентации электрических составляющих поля, создаваемых на идеально проводящих конечных элементах и ребрах кромки излучающей поверхности тангенциальной H_τ составляющей магнитного поля в глобальной системе координат, чтобы обеспечить их векторное сложение в точке наблюдения.

Компоненты общего поля получаются простым суммированием сферических компонентов поля $E_{\phi i}$ и $E_{\theta i}$ каждого конечного элемента,

$E_{\varphi j}$ и $E_{\theta j}$ каждого краевого ребра кромки излучающей поверхности антенны относительно глобальной системы координат [2]:

$$E_{\varphi} = \sum_i E_{\varphi i} + \sum_j E_{\varphi j},$$

$$E_{\theta} = \sum_i E_{\theta i} + \sum_j E_{\theta j}. \quad (2)$$

Для оценки компонентов $E_{\varphi i}$ и $E_{\theta i}$ наилучшим образом подходит метод Гордона [4], чувствительный к пространственному положению узловых точек и позволяющий оценить характеристику рассеяния треугольного элемента поверхности по его контуру. Компоненты $E_{\varphi j}$ и $E_{\theta j}$ наиболее адекватно моделируются как формируемые неравномерной частью возбуждающего тока в форме А. Михаэли [5], являющейся уточнением решения П.Я. Уфимцева [6]. Правильность векторного сложения отдельных составляющих поля обеспечивается введением локальных систем координат с началами в центрах конечных элементов и учетом их ориентации относительно глобальной системы координат $Oxyz$.

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

$$F(\varphi) = E_{\Sigma}(\varphi) / E_{\max}, \quad (3)$$

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

Сложность геометрической модели криволинейной излучающей поверхности антенны диктует необходимость совместной обработки геометрической, логической и аналитической информации при решении краевых задач излучения. В связи с этим перспективным оказывается использование в численных расчетах предикатной алгебры выбора [7].

Расчет ДН в ее горизонтальном сечении для зеркальной параболической антенны с $\lambda = 0,03$ м и вертикальной поляризацией, создаваемой рупором с размерами $a_p = 0,65 \lambda$ м и $b_p = 0,48 \lambda$ м, показал следующее [8]. При температуре окружающей среды $T_0 = 20^\circ\text{C}$ и идеально гладкой излучающей поверхности параболоида формируется ДН с шириной на уровне половинной мощности $2\varphi_{05} = 1,04$ град (рис. 1, кривая 1).

Производственные погрешности, описываемые нормальным законом с максимальным отклонением Δ_{\max} , равным при обычном серий-

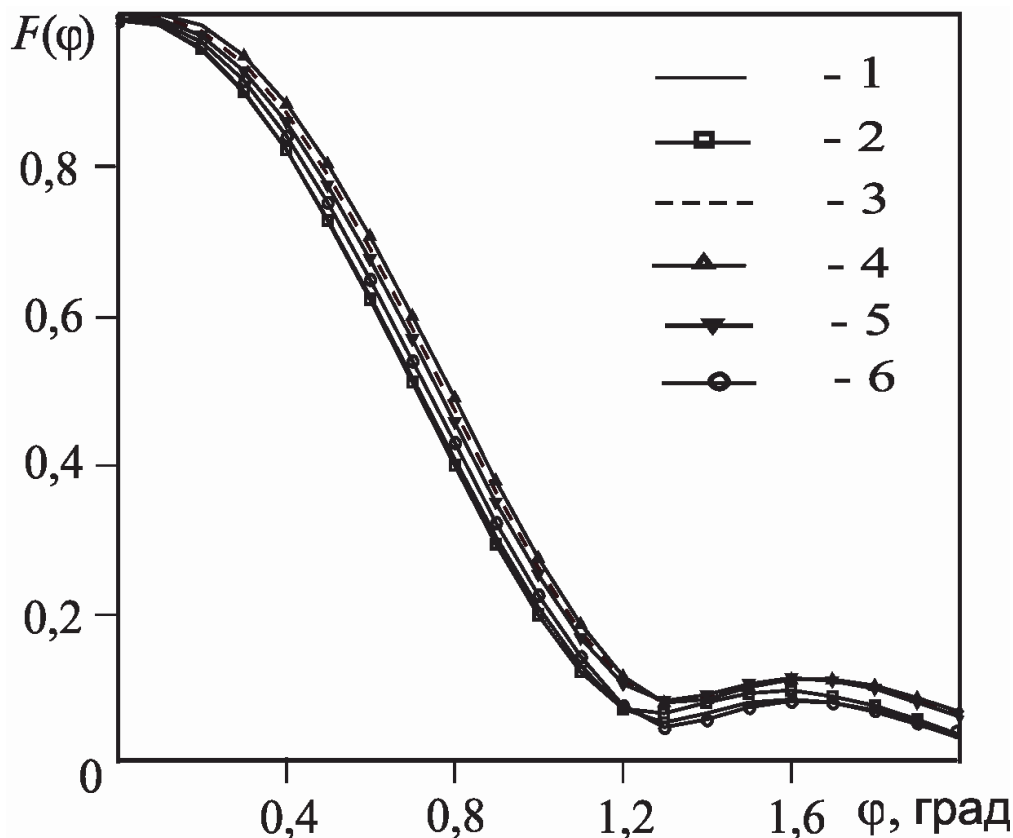


Рис. 1. Диаграммы направленности антенны в горизонтальной плоскости при различных температурных полях ее отражателя

ном производстве [9] 0,1% от диаметра раскрыва зеркала D_A , вызывают рост максимального уровня боковых лепестков (УБЛ) при практически неизменной ширине ДН (рис. 1, кривая 2), что вызывает потери $\Delta G = 0,32$ дБ коэффициента усиления исходной антенны G_0 (см. рис. 1, кривая 1). Учет дополнительно к производственным погрешностям и деформации поверхности ее перегревом солнечным излучением с заданной ранее интенсивностью q_s (рис. 1, кривая 3) вызывает значительное расширение ДН ($2\varphi_{05} = 1,18$ град) и рост УБЛ, что приводит к общим потерям $\Delta G = 1,65$ дБ. Дополнительный рост температуры T_0 с 20°C до 40°C приводит к тому (рис. 1, кривая 4), что $2\varphi_{05} = 1,2$ град и общие потери составляют $\Delta G = 1,92$ дБ, а снижение T_0 с 20°C до 0°C к $2\varphi_{05} = 1,14$ град, росту УБЛ и потерям $\Delta G = 1,37$ дБ (рис. 1, кривая 5). Если же предположить наличие исходной идеально гладкой поверхности отражателя (отсутствие производственных погрешностей), то при повышении температуры T_0 с 20°C до 40°C и перегреве поверхности солнечным излучением (см. рис. 1, кривая 3) отклонение ДН и общие потери ΔG не будут столь значительными (рис. 1, кривая 6): $2\varphi_{05} = 1,1$ град, $\Delta G = 0,28$ дБ.

Таким образом, изменение температуры окружающей среды и перегрев поверхности реальной параболической антенны солнечным излучением существенно изменяют ее характеристики. Предложенный подход к математическому моделированию этого влияния позволяет оценить негативные результаты температурных воз-

действий еще на этапе проектирования, что дает возможность создавать оптимальные в заданных условиях эксплуатации конструкции антенн и адекватно оценивать изменение их характеристик при изменении этих условий

По предложенной математической модели были также проведены расчеты влияния тепловых воздействий на микрополосковую антенну (МПА) в пакете Delphi при следующих исходных данных [9]: число излучающих элементов $I \times K = 25 \times 25$; длина электромагнитной волны $\lambda = 16$ мм; размеры излучающих элементов $a = b = 0,48\lambda$; относительная диэлектрическая проницаемость подложки $\epsilon = 2,3$; толщина подложки $d = 0,158$ мм. Расчеты без учета взаимного влияния излучателей, показали, что диаграмма направленности антенны в плоскости вектора и магнитного поля \mathbf{H} при нормальной ($+20^\circ\text{C}$) температуре (рис. 2, кривая 1) существенно отличается от диаграммы, рассчитанной при увеличении температуры на 20°C (рис. 2, кривая 2).

Как видно из рис. 2, при изменении температуры окружающей среды прослеживается расширение диаграммы направленности и смещение боковых лепестков. Этот известный из практики результат также подтверждает адекватность предложенной математической модели реальным физическим процессам, протекающим в полосковых антеннах при тепловых воздействиях.

Таким образом, предложенный подход позволяет оценить поле излучения антенны с учетом внешних деформирующих воздействий методом конечных элементов и выбрать оптимальное конструк-

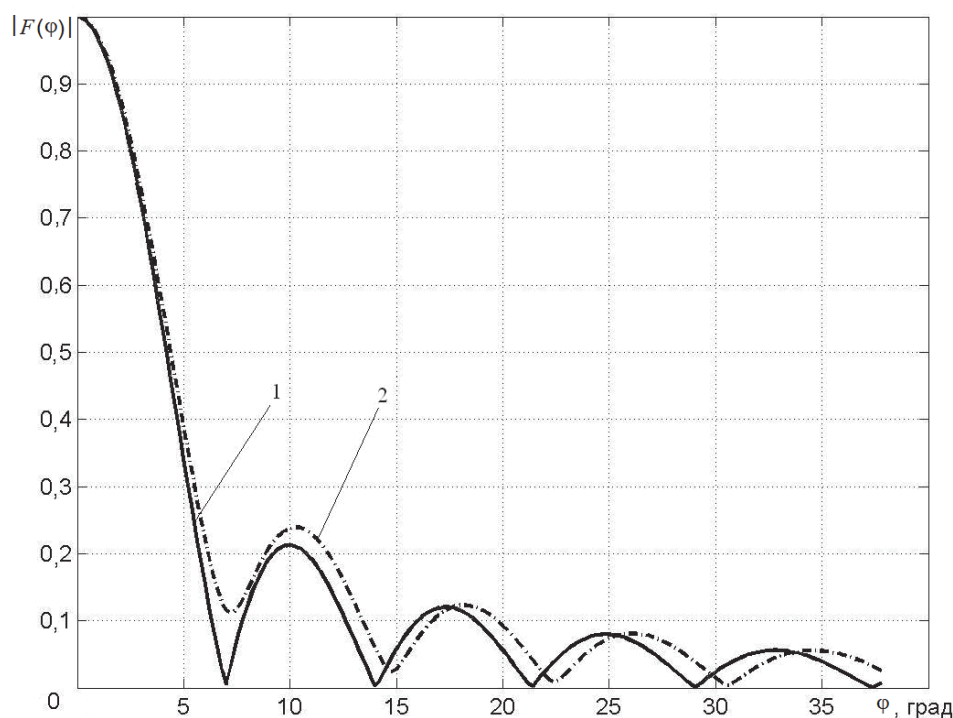


Рис. 2. Диаграммы направленности МПА в плоскости \mathbf{H}

торское решение, исходя из требований технического задания и критерия оптимизации, обеспечивающего устойчивость к указанным воздействиям.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Яншин А.А. Теоретические основы конструирования, технологии и надежности ЭВА. М.: Радио и связь, 1983. 312 с.
2. Якимов А.Н. Проектирование микроволновых антенн с учетом внешних воздействий: монография. Пенза: Изд-во Пенз. гос. ун-та, 2004. 260 с.
3. Сабоннадьер Ж.К., Кулон Ж.Л. Метод конечных элементов и САПР [пер. с фр.]. М.: Мир, 1989. 190 с.
4. Gordon W.B. Far-Field Approximations to the Kirchhoff-Helmholtz Representations of Scattered Fields // IEEE Trans. on Antennas and Propagat. 1975. Vol. AP-23. No. 4. P. 590- 592.
5. Michaeli A. Equivalent Edge Currents for Arbitrary Aspects of Observation // IEEE Trans. on Antennas and Propagat. 1984. Vol. AP-32. No. 3. P. 252-258.
6. Уфимцев П.Я. Метод краевых волн в физической теории дифракции. М.: Сов. радио, 1962. 244 с.
7. Якимов А.Н. Использование предикатной алгебры выбора в моделировании микроволновых антенн // Труды Международного симпозиума "Надежность и качество" [под ред. Н.К. Юркова]. Пенза: Изд-во ПГУ, 2012. Т. 1. С. 277-280.
8. Якимов А.Н. Оценка температурного поля криволинейного отражателя антенны в нестационарном режиме // Измерительная техника. 2004. №3. С. 38-41.
9. Сазонов Д.М. Антенны и устройства СВЧ. М.: Высш. шк., 1988. 432 с.
10. Конечно-элементная модель тепловых воздействий на микрополосковую антенну / Е.Ю. Максимов, Н.К. Юрков, А.Н. Якимов // Измерительная техника. 2011. №2. С. 65- 68.

DISCRETE REPRESENTATION – THE MODELLING BASIS ANTENNAS OF THE DIFFICULT CONFIGURATION

© 2014 A.N. Yakimov, Ed.V. Lapshin, N.K. Yurkov

Penza State University

In this article the final-element approach to mathematical modelling of antennas of a difficult spatial configuration is considered. The offered model allows to estimate a field of radiation of the antenna taking into account external deforming actions.

Ключевые слова: mathematic model, antenna, external actions, radiation.

Alexander Yakimov, Doctor of Technics, Professor at the Designing and Radio Equipment Manufacture Department.

E-mail: kipra@pnzgu.ru

Eduard Lapshin, Doctor of Technics, Professor at the Designing and Radio Equipment Manufacture Department.

E-mail: kipra@pnzgu.ru

Nikolay Yurkov, Doctor of Technics, Professor, Head at the Designing and Radio Equipment Manufacture Department.

E-mail: kipra@pnzgu.ru