УДК 004.43:621.396.677

ПОСТРОЕНИЕ И ИССЛЕДОВАНИЕ ДИАГРАММ НАПРАВЛЕННОСТИ АНТЕННЫХ РЕШЁТОК СРЕДСТВАМИ ЯЗЫКА PYTHON

Гридчин Н.В., Ильичев В.Ю.

Калужский филиал ФГОУ ВО «Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет)», Калуга, e-mail: patrol8@yandex.ru

Для получения необходимой диаграммы направленности используют антенны в виде нескольких (часто большого количества) одинаковых симметричных вибраторов, объединённых в так называемые антенные решётки. Такие конструкции отличаются простотой изготовления и позволяют осуществлять острую направленность излучаемого электромагнитного сигнала. Однако для этого антенну необходимо правильно спроектировать, то есть практически осуществить определённые зависимости между размерными параметрами решётки, частотой и фазой сигнала, излучаемого каждым вибратором. Целью данной работы является разработка программного продукта, позволяющего исследовать указанные зависимости путём визуализации зависимости формы диаграммы направленности решётки от исходных данных. По результатам многовариантных расчётов необходимо выработать рекомендации, позволяющие получить нужную диаграмму направленности и добиться наибольшей эффективности работы антенны. Для создания расчётной программы был использован современный свободно распространяемый язык программирования Python и подключаемые к нему программные модули, расширяющие возможности языка с помощью наборов специальных функций. В частности, для разрабатываемой программы использованы: модуль для работы с массивами данных Numpy и модуль для построения графиков Matplotlib. На выходе программы в результате расчёта формируется диаграмма направленности антенной решётки в полярной системе координат, по которой исследователь может убедиться, имеет ли она необходимую форму и угол раскрыва. С помощью программы было исследовано достаточное количество антенн с разными параметрами для того, чтобы выработать рекомендации для получения оптимальной диаграммы направленности. Также даны и другие рекомендации, которые следует соблюдать при проектировании антенных решёток. Разработанная программа также может являться базой для исследования антенных решёток с динамическим изменением фазовых углов и антенн, работающих одновременно на разных частотах.

Ключевые слова: симметричный вибратор, антенная решётка, диаграмма направленности, язык Python, модуль Numpy, модуль Matplotlib

CONSTRUCTION AND STUDY OF DIRECTIONAL DIAGRAMS OF ANTENNA ARRAYS BY MEANS OF PYTHON LANGUAGE

Gridchin N.V., Ilichev V.Yu.

Kaluga Branch of Bauman Moscow State Technical University, Kaluga, e-mail: patrol8@yandex.ru

To obtain necessary beam pattern, antennas are used in form of several identical symmetrical vibrators combined into antenna arrays. Such designs are easy to manufacture and allow for sharp directionality of emitted electromagnetic signal. However, it is necessary to design antenna to make certain dependencies between dimensional parameters of lattice, frequency and phase of signal emitted by each vibrator. Purpose of work is to develop software product that allows to investigate these dependencies by visualizing dependence of shape of grating pattern on original data. Based on results of multivariable calculations, it is necessary to develop recommendations to obtain directional pattern and achieve greatest efficiency of antenna. To create calculation program, modern freely distributed Python programming language and program modules were used, expanding capabilities of the language using sets of special functions. In particular, for the developed program, following are used: module for working with data arrays Numpy and module for plotting Matplotlib. At output of the program, as result of calculations, directional pattern of antenna array is formed in polar coordinate system, according to which researcher can verify whether it has necessary shape and opening angle. With the program, sufficient number of antennas with different parameters were investigated in order to make recommendations for obtaining optimal beam pattern. Other recommendations are also given that should be followed when designing antenna arrays. The program can also be basis for studying antenna arrays with dynamic change in phase angles and antennas operating simultaneously at different frequencies.

Keywords: symmetrical vibrator, antenna array, beam pattern, Python language, Numpy module, Matplotlib module

Одной из самых простых направленных антенн является одиночный симметричный вибратор. Однако его направленность крайне низка и чаще всего не соответствует потребностям современной техники. Поэтому для повышения направленности применяют систему из нескольких излучающих элементов – симметричных вибраторов, называемую антенной решёткой.

В настоящее время такие антенные решетки широко используются в навигационных, радиолокационных и беспроводных системах связи [1]. В зоне, достаточно удалённой от решётки, напряженность электромагнитного поля равна сумме электромагнитных полей, создаваемых каждым излучателем антенного полотна, с учётом их фазы. При изменении амплитуды и фазы электромагнитных полей, излучаемых каждым вибратором решётки, появляется возможность создания необходимой диаграммы направленности [2]. При проекти-

ровании антенной решётки для этого можно варьировать, например, количество излучателей, их размеры, расстояние между ними.

В современных конструкциях некоторые из параметров решётки и излучаемых волн можно изменять динамически в процессе эксплуатации антенны, тем самым меняя вид диаграммы направленности (такие антенные решётки называют фазированными – ФАР). За счёт этого главный лепесток диаграммы направленности можно даже перемещать в пространстве (такой процесс называется электрическим сканированием луча и не требует механического перемещения всей антенны).

В данной работе рассматривается антенная решётка с эквидистантным (на одинаковом расстоянии друг от друга *d*) расположением излучателей (рис. 1), размещённая в системе координат *X*, *Y*, *Z*.

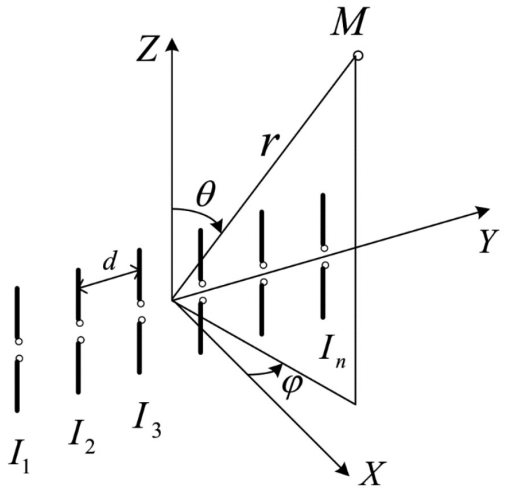

Рис. 1. Расчётная схема антенной решётки

При этом принято, что фаза тока в каждом последующем вибраторе увеличивается на некоторую задаваемую величину ψ, рад. Амплитуды токов во всех вибраторах приняты одинаковыми $I_1 = I_2 = \ldots = I_n$.

Целью данной работы являлась разработка метода вычисления и построения диаграмм направленности в полярной системе координат в горизонтальной плоскости *H*, с использованием библиотек языка программирования Python. Разрабатываемый метод должен быть простым и удобным в использовании.

Для исследования изменения формы и углов расположения главных (имеющих наибольшую интенсивность электромагнитного излучения) и боковых лучей диаграммы направленности необходимо выполнить вариантные расчеты при разных исходных данных. По результатам исследований должны быть сформулированы рекомендации по выбору исходных данных с целью получения необходимой формы и направления диаграммы направленности.

При этом не ставится задача рассмотрения вариантов обеспечения нужного значения фазы ψ, для чего уже разработано множество способов, использующих различные технические приёмы [3, 4].

Материалы и методы исследования

Согласно методике, изложенной в [5], в горизонтальной плоскости нормированная суммарная амплитуда *F* в заданной углами φ и θ точке M (рис. 1) может быть рассчитана по формуле

$$F(\varphi) = \left| \frac{\dfrac{1}{n\left[\sin\left[n\left(kd\sin\varphi - \psi\right)/2\right]\right]}}{\sin\left[\left(kd\sin\varphi - \psi\right)/2\right]} \right|,$$

где $\lambda = 3\cdot10^8/f$ – длина излучаемой волны, м (*f* – частота волны, Гц);
$k = 2\pi/\lambda$ – коэффициент фазы электромагнитной волны в свободном пространстве;
n – число вибраторов.

Величина (kd – $\sin\psi$) характеризует сдвиг фаз между полями двух соседних вибраторов в точке *M*. Если в полярной системе координат рассматривать направление = 90° (что соответствует оси координат Y в декартовой системе), то максимальное значение *F* получится при $kd = \psi$, так как sin 90° = 1 и сдвиг фаз от всех вибраторов в точке *M* будет равен нулю, то есть в точку наблюдения *M* волны приходят синфазно, возникает их интерференция, и они складываются по амплитуде [6].

Алгоритм разработанной на основе указанных принципов программы состоит из следующих блоков:

1. Импорт необходимых модулей языка программирования Python: Numpy для создания массивов и заполнения их данными, необходимыми для визуализации результатов расчёта [7]; Matplotlib.pyplot для создания полярных диаграмм направленности [8].

2. Задание исходных данных: расстояния между вибраторами *d*, числа вибраторов *n* и значения фазового сдвига ψ.

3. Расчёт характеристик диаграммы направленности для заданной частоты *f*, Гц в порядке, описанном в [5].

4. Расчёт диаграммы направленности (функции *F*(φ)) антенной решётки в предположении, что электромагнитные поля отдельных вибраторов являются синфазными.

При данном расчёте принят очень небольшой шаг изменения угла φ в горизонтальной плоскости (для плавности получаемых графиков); диапазон угла φ изменяется от 0 до 2π рад.

Рассчитанные значения нормированной суммарной амплитуды тока F при разных углах φ (радиусы на плоскостной диаграмме направленности в полярных системах координат), так же как и соответствующие им углы φ, заносятся в массив Numpy.

5. С помощью функций модуля Matplotlib.pyplot изображаются диаграммы направленности антенны в полярных координатах (значение функции F в зависимости от угла φ) в горизонтальной плоскости H (в которой мы обеспечиваем необходимые направленные свойства антенны).

Результаты исследования и их обсуждение

Для демонстрации результатов работы разработанной программы в качестве примера была рассчитана антенная решётка конструкции, изображённой на рис. 1, работающая с частотой излучаемой волны $f = 3 \cdot 10^9$ Гц (длина волны λ = 10 см, диапазон СВЧ [9]), с расстоянием между вибраторами $d = 0{,}25\lambda$.

Вначале было принято условие $kd = \psi$ для выполнения условия синфазного сложения волн (получаем так называемую синфазную антенную решётку).

Для исследования влияния количества симметричных вибраторов n на форму диаграммы направленности антенной решётки, число n варьировалось от 1 до 100.

Графики полученных с помощью программы диаграмм направленности электромагнитного излучения в горизонтальной плоскости H (плоскости X–Y декартовой системы координат) изображены на рис. 2.

Из представленных диаграмм можно сделать вывод, что для синфазной антенной решётки направление главного лепестка диаграммы всегда равно 90° (строго в направлении оси Y), что является одним из достоинств рассматриваемого типа антенн. Ширина главного лепестка уменьшается с увеличением числа симметричных вибраторов n. Ширина боковых лепестков является небольшой и уменьшается при увеличении n. Кроме того, с увеличением n боковые лепестки по направлению всё более приближаются к главному лепестку. Таким образом, увеличивая число n, можно добиться очень малого угла раскрыва диаграммы.

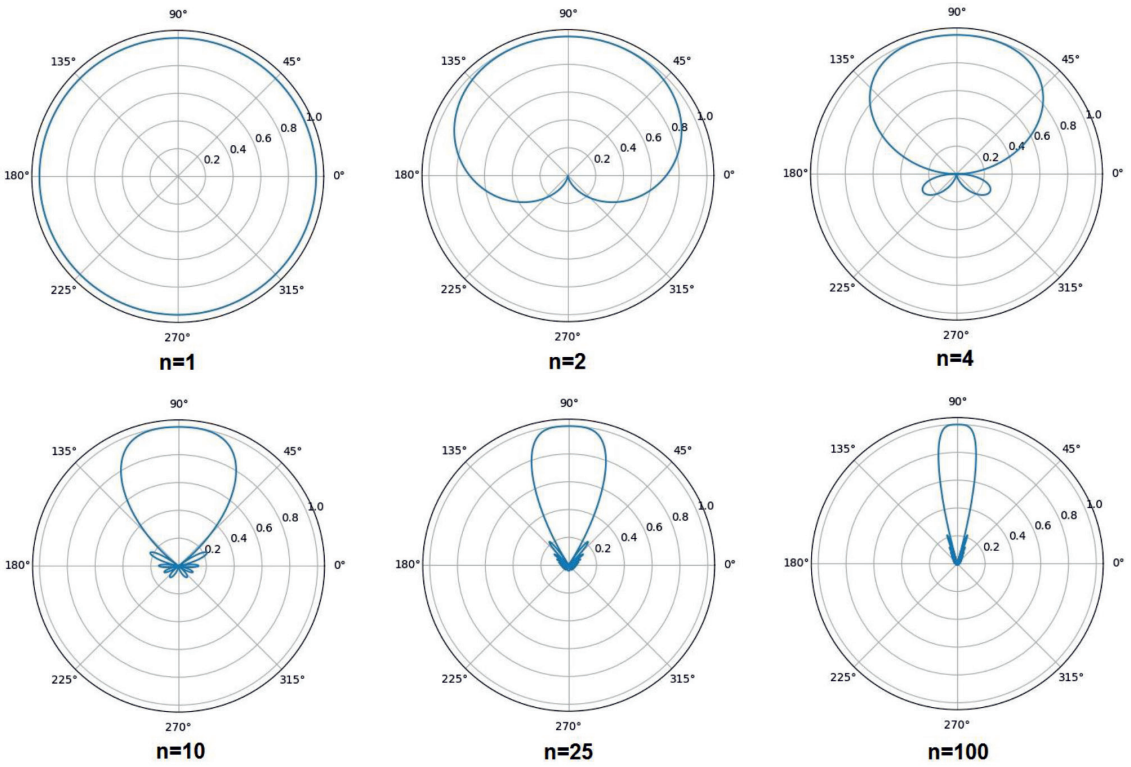

Рис. 2. Диаграммы направленности рассчитанных антенных решёток в горизонтальной плоскости H в зависимости от количества симметричных вибраторов n

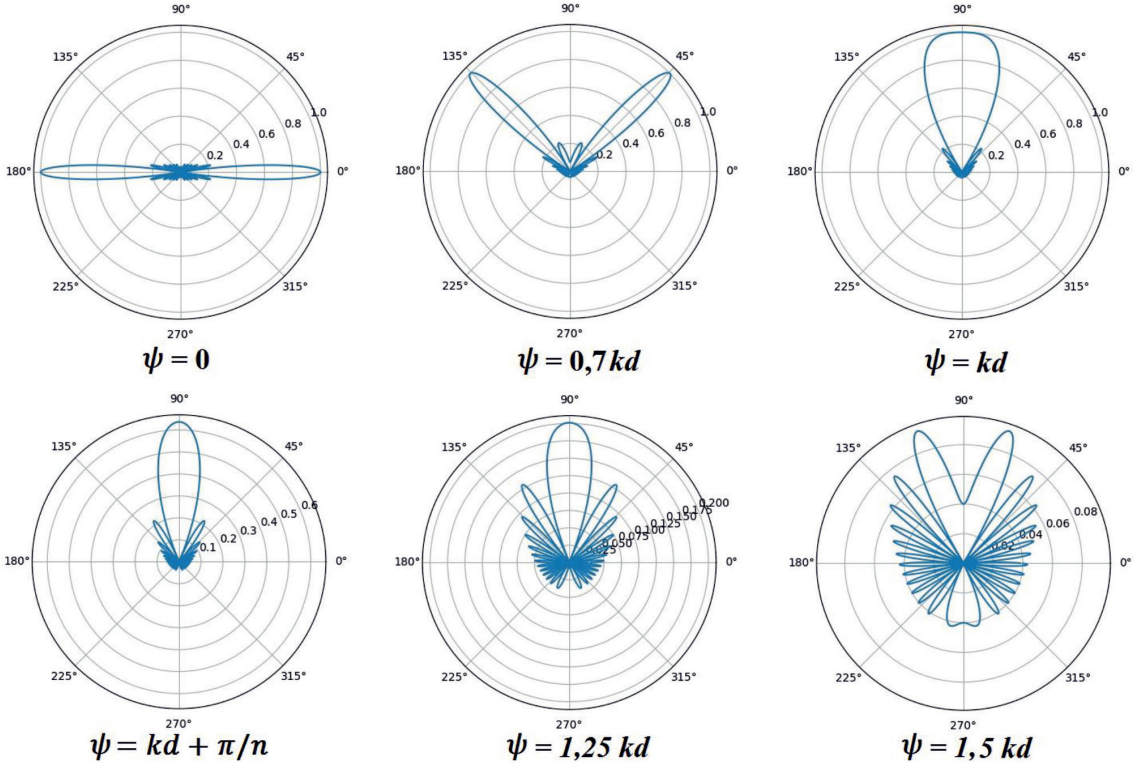

Рис. 3. Диаграммы направленности рассчитанных антенных решёток в горизонтальной плоскости H в зависимости от взаимного фазирования симметричных вибраторов ψ

Далее был выбран промежуточный случай диаграммы с хорошей направленностью при $n = 25$ и изменялось отклонение фаз вибраторов друг от друга ψ от нуля до величины kd (как на рис. 2) и больше. Результаты расчёта и построения диаграмм направленности с помощью разработанной программы показаны на рис. 3.

При относительной фазе $\psi = 0$ антенна вообще не проявляет направленных свойств по оси Y. С постепенным увеличением фазы до значения $\psi = kd$ главные лепестки вначале сближаются, а затем сливаются. При фазовом угле ψ, равном kd, наблюдается не только строгая направленность главного лепестка по оси Y, но и максимальная амплитуда сигнала в данном направлении. При дальнейшем увеличении фазового угла до значения ($\psi = kd + \pi/n$) направленность продолжает увеличиваться, однако из-за возрастания амплитуды боковых лепестков амплитуда главного лепестка уменьшается. Если и дальше увеличивать угол ψ, величина боковых лепестков всё увеличивается, а направленные свойства антенной решётки начинают ухудшаться. При ($\psi > kd + \pi/n$) главный лепесток диаграммы начинает раздваиваться, и направленность ухудшается всё более значительно.

Расчёты, подобные вышеприведённому, проводились и для других частот электромагнитных волн, излучаемых антенной, – диаграммы направленности при этом имеют похожую форму.

Заключение

Полученные результаты позволяют сделать выводы и выработать рекомендации по проектированию антенных решёток, не нуждающихся в динамическом изменении диаграммы направленности:

1) наилучшей разницей фаз волн, излучаемых отдельными вибраторами решётки, с точки зрения наибольшей амплитуды сигнала в направлении оси Y, следует считать $\psi = kd$;

2) хотя направленные свойства антенны несколько повышаются при увеличении фазового угла до значения ($\psi = kd + \pi/n$), это ведёт к уменьшению амплитуды сигнала. Поэтому рекомендуется улучшать направленность антенны при сохранении $\psi = kd$ путём увеличения числа вибраторов – таким способом можно достичь очень узкого угла раскрыва диаграммы направленности;

3) не рекомендуется чрезмерно увеличивать направленность антенны, так как увеличение числа вибраторов приводит

к увеличению габаритов, массы и стоимости антенны. Поэтому при проектировании необходимо обязательно производить технико-экономическое обоснование, при котором можно использовать разработанную программу;

4) при технико-экономическом обосновании следует выбирать материал для изготовления антенны, оптимальный с точки зрения обеспечения максимальных излучающих свойств при минимальной массе и стоимости конструкции;

5) сформулированные выше выводы справедливы только для конструкции антенной решётки, изображённой на рис. 1;

6) антенные решётки подходят для применения практически в любом диапазоне волн, однако, как показали вышеприведённые исследования, для каждой частоты существует лишь одно оптимальное соотношение размеров. Поэтому в случае необходимости работы одной антенны на разных частотах эффективно излучаемых волн, конструкция антенны должна представлять из себя массив из нескольких антенных решёток указанной конструкции (рис. 1), имеющих разные размеры элементов.

Подводя итог, можно констатировать выполнение следующих задач:

– проведено обоснование эффективности антенных решёток с точки зрения простоты создания практически любой требуемой диаграммы направленности;

– составлен алгоритм и написан код программы для расчёта антенны, с использованием необходимых для этого модулей и функций языка Python;

– проведён сравнительный анализ результатов построения диаграмм направленности при варьировании исходных характеристик антенной решётки;

– даны рекомендации по оптимальному выбору конструкции антенной решётки, не требующей смены диаграммы направленности в процессе эксплуатации.

Проведённая работа доказывает простоту и наглядность применения языка программирования Python при исследовании диаграмм направленности антенных решёток. Описанный в статье подход целесообразно применять также для оптимальной разработки прочих типов антенн и других технических устройств.

С помощью языка Python возможно дальнейшее совершенствование разработанного программного продукта. В частности, можно использовать его в качестве базы для разработки антенных решёток с динамическим изменением диаграммы направленности или с применением широкополосных излучателей [10], при этом понадобятся описанные в статьях [11, 12] дополнительные модули для Python.

Список литературы

1. Гибалина З.С., Фадеев В.А. Концепция формирования диаграммы направленности фазовых антенных решеток на основе применения голограммных дифракционных решеток // Журнал радиоэлектроники. 2017. № 12. С. 14.

2. Конов К.И. Двукратное расширение главного лепестка диаграммы направленности линейной антенной решетки фазовым методом // Инновационные, информационные и коммуникационные технологии. 2016. № 1. С. 523–526.

3. Балагуровский В.А., Кондратьев А.С., Маничев А.О., Полищук Н.П. Фазовый синтез диаграммы направленности фазированной антенной решетки измерителя координат // Вестник воздушно-космической обороны. 2016. № 4 (12). С. 35–41.

4. Дмитриев Д.Д., Карцан И.Н. Адаптивные антенные решетки с цифровым формированием луча // Решетневские чтения. 2016. Т. 1. С. 263–265.

5. Кубанов В.П. Направленные свойства антенных решеток. Самара: ПГУТИ, 2011. 56 с.

6. Корытников М.Ю. Расчет и исследование направленных характеристик синфазной антенной решетки // Студенческая наука для развития информационного общества: сборник материалов IV Всероссийской научно-технической конференции: в 2-х т. 2016. С. 99–102.

7. Пылов П.А., Протодьяконов А.В. Использование и представление массивов в библиотеке Numpy // Инновации. Наука. Образование. 2020. № 23. С. 258–266.

8. Ильичев В.Ю., Гридчин Н.В. Визуализация масштабируемых 3D-моделей с помощью модуля Matplotlib для Python // Системный администратор. 2020. № 12 (217). С. 86–89.

9. Воскресенский Д.И., Гостюхин В.Л., Максимов В.М., Пономарев Л.И. Устройства СВЧ и антенны. 2 изд., доп. и перераб. М.: Радиотехника, 2006. 376 с.

10. Драч В.Е., Родионов А.В., Чухраев И.В., Кузнецова Д.А. Моделирование антенной решетки на широкополосных излучателях // Электромагнитные волны и электронные системы. 2016. Т. 21. № 1. С. 74–77.

11. Ильичев В.Ю., Юрик Е.А. Создание программы расчёта упорных подшипников скольжения на языке Python // Научное обозрение. Технические науки. 2020. № 3. С. 14–18.

12. Ильичев В.Ю., Юрик Е.А. Анализ массивов данных с использованием библиотеки Pandas для Python // Научное обозрение. Технические науки. 2020. № 4. С. 41–45.