

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации

Томский государственный университет
систем управления и радиоэлектроники

В.Ю. Куприц
В.И. Вебер

**ИССЛЕДОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК НАПРАВЛЕННОСТИ ФАЗИРОВАННОЙ
АНТЕННОЙ РЕШЁТКИ**

Методические указания к лабораторным работам для студентов радиотехнических
специальностей

Томск
2023

УДК 621.396.677

ББК 32.845

Рецензент:

Мещеряков А.А., заведующий кафедрой радиотехнических систем ТУСУР, кандидат технических наук

Куприц Владимир Юрьевич, Вебер Владислав Игоревич

Исследование характеристик направленности фазированной антенной решётки: методические указания к лабораторным работам для студентов радиотехнических специальностей / В.Ю. Куприц, В.И. Вебер — Томск: Томск. гос. ун-т систем упр. и радиоэлектроники, 2023. – 26 с.

В методических указаниях кратко изложены теоретические сведения о характеристиках направленности фазированных антенных решётках, описание программного обеспечения, порядок выполнения лабораторных работ, контрольные вопросы и список рекомендуемой литературы.

Лабораторные работы предназначены для студентов радиотехнических специальностей.

Одобрено на заседании каф. РТС, протокол № __от_____

УДК 621.396.677
ББК 32.845

© Куприц В.Ю., 2023
© Вебер В.И., 2023
© Томск. гос. ун-т систем упр. и радиоэлектроники, 2023

ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение	3
1 Краткие теоретические сведения	4
1.1 Характеристики направленности антенных решеток	4
1.1.1 Диаграмма направленности антенной решетки	4
1.1.2 Коэффициент направленного действия антенной	9
2 Описание программного обеспечения «FAZAR»	10
3 Лабораторная работа №1 «Исследование характеристик направленности линейной фазированной антенной решётки»	13
3.1 Задание	13
3.2 Порядок выполнения лабораторной работы	14
4 Лабораторная работа №2 «Исследование влияния амплитудно-фазового распределения на характеристики диаграммы направленности в антенных решетках с различной апертурой». 14	
4.1 Задание	14
4.2 Порядок выполнения лабораторной работы	14
5 Лабораторная работа №3 «Исследование характеристик направленности фазированной антенной решетки с расположением антенных элементов в узлах прямоугольной и гексагональной сетки»	15
5.1 Задание	15
5.2 Порядок выполнения лабораторной работы	15
6 Контрольные вопросы	16
7 Список рекомендуемой литературы	16

Введение

Фазированные антенные решетки (ФАР) – наиболее эффективные и перспективные антенные системы, позволяющие осуществлять быстрый обзор пространства путем формирования заданного количества лучей, многофункциональный режим работы, комплексирование радиосредств, использовать адаптивные алгоритмы обработки сигналов и т.п. [1].

Активный интерес в области теоретических и экспериментальных исследований антенных решеток возник в два предвоенных десятилетия прошлого века (1920 – 1940) и возобновился в 1960-х. В дальнейшем интерес к антенным решеткам постоянно возрастал. Антенные решетки широко применяют в различных областях радиоэлектроники – радиолокации, связи, радионавигации и т.п. Широкое распространение фазированных антенных решеток в основном связано с возможностями формирования остронаправленных сканирующих лучей, что позволяет значительно увеличить энергетический выигрыш в радиотехнических системах, реализовать высокую скорость обзора пространства, ослабить влияние одновременно работающих систем, то есть обеспечить их электромагнитную совместимость.

Сигналы, принятые элементами антенной решетки, подвергаются обработке. Наиболее широкое распространение получила линейная обработка сигналов, которая заключается в суммировании принятых сигналов с комплексными весовыми коэффициентами. С помощью комплексных весовых коэффициентов формируется диаграмма направленности антенной решетки и осуществляется сканирование луча. Диаграмма направленности является основной характеристикой направленности антенной решетки и отражает зависимость модуля комплексной амплитуды вектора напряженности электрической компоненты электромагнитного поля, создаваемого антенной в дальней зоне, от угловых координат [2].

Данное методическое указание содержит три лабораторные работы:

I. Лабораторная работа № 1 «Исследование характеристик направленности линейной фазированной антенной решётки»

II. Лабораторная работа № 2 «Исследование влияния амплитудно-фазового распределения на характеристики диаграммы направленности в антенных решетках с различной апертурой».

III. Лабораторная работа № 3 «Исследование характеристик направленности фазированной антенной решетки с расположением антенных элементов в узлах прямоугольной и гексагональной сетки».

Целью выполнения данных лабораторных работ являются:

- исследование характеристик направленности антенных решеток с линейной, квадратной и круглой апертурой;
- исследование влияния параметров антенной решетки на формирование диаграммы направленности;
- освоение программного обеспечения для расчета диаграммы направленности антенной решетки.

1 Краткие теоретические сведения

1.1 Характеристики направленности антенных решеток

1.1.1 Диаграмма направленности антенной решетки

Антенная решетка – сложная антенна, содержащая совокупность излучающих элементов (одиночных антенн или групп антенн), расположенных в пространстве в определенном порядке, ориентированных и возбуждаемых так, чтобы получить заданную диаграмму направленности. Антенная решетка называется эквидистантной, если излучатели расположены на одинаковых расстояниях друг от друга [2].

Предположим, что плоская монохроматическая волна единичной амплитуды падает АР под углом φ по отношению к оси y (см. Рисунок 1.1) [3]. Волна возбуждает гармоническое электрическое колебание в каждом (изотропном) элементе АР.



Рисунок 1.1 Геометрия N -линейной эквидистантной АР и плоской падающей волны

Можно принять, что при $t=0$ фаза колебания равна нулю в первом элементе. Сигнал, принятый первым элементом, можно представить в виде [3]:

$$s_1(t) = \exp(j\omega_0 t), \quad (1.1)$$

где $\omega_0 = 2\pi f_0$, $f_0 = c/\lambda_0$ – частота сигнала; t – текущее время.

Колебание во втором элементе АР опережает колебание в первом на время τ которое можно определить, используя 1.1. Из геометрических соображений находим, что:

$$\tau = \frac{d \sin \varphi}{c}, \quad (1.2)$$

где c - скорость распространения электромагнитных волн, которую мы принимаем равной скорости света, так как не рассматриваем влияние среды.

За время t фаза колебания второго элемента АР увеличивается на величину $\omega_0 \tau$ по отношению к фазе в первом элементе по отношению к фазе колебания в первом элементе. Поэтому сигнал, принятый вторым элементом, можно записать

$$s_2(t) = \exp(j\omega_0(t + \tau)) = \exp(j2\pi f_0 \tau) \exp(j\omega_0(t)). \quad (1.3)$$

Подставляя (1.1) в (1.3) и учитывая, что длина волны $\lambda = c/f_0$, находим колебание, возбуждаемое волной во втором элементе, в следующем виде

$$s_2(t) = \exp(j\frac{2\pi}{\lambda} d \sin \varphi) \exp(j\omega_0(t)). \quad (1.4)$$

Теперь легко понять, что колебания, возбуждаемые волной в разных элементах АР, отличаются только разностью фаз Δ_n , которая зависит от номера элемента $n = (1 \div N)$ следующим образом

$$\Delta_n = \frac{2\pi}{\lambda} (n-1) d \sin \varphi. \quad (1.5)$$

Обобщая (1.3) с помощью (1.5), получим выражение, описывающее колебания во всех элементах АР

$$s_n(t) = \exp(j\frac{2\pi}{\lambda} (n-1) d \sin \varphi) \exp(j\omega_0(t)). \quad (1.6)$$

Второй множитель в этом выражении зависит только от частоты колебания. Он одинаков для всех элементов АР и поэтому не несет информации о геометрии АР и направлении прихода волны. Во многих задачах этот множитель опускают из рассмотрения. Первый множитель называют комплексной амплитудой сигнала.

Выражение (1.6) можно обобщить на случай АР произвольной конфигурации. На 1.2 изображен элемент АР с номером 1, помещенным в начало системы координат (x, y, z) , элемент решетки с номером n , положение которого в пространстве определяется вектором \vec{r}_n , углы α и β , определяющие направление вектора \vec{r}_n и плоская волна, направление распространения которой характеризуется волновым вектором \vec{k} . Другие элементы АР не показаны.

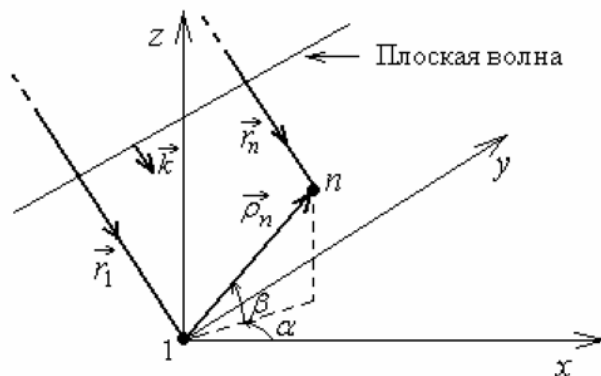


Рисунок 1.2 – Геометрические пояснения для АР произвольной конфигурации

Сигнал в элементе с номером n запишем в виде [3]:

$$s_n(t) = \exp[j\omega_0 t - j(\vec{k} \vec{r}_n)], \quad (1.7)$$

где $(\vec{k} \vec{r}_n)$ - скалярное произведение векторов \vec{k} и \vec{r}_n .

Учтем, что $\vec{r}_n = \vec{r}_1 + \vec{p}_n$. Кроме того, фазу колебания в первом элементе, обусловленную вектором \vec{r}_1 , примем равной 0, поскольку имеет значение только разность фаз колебаний в элементах АР. Тогда формула (1.7) преобразуется к следующему виду

$$s_n(t) = \exp[-j(\vec{k}\vec{p}_n)] \exp(j\omega_0 t). \quad (1.8)$$

Сравнивая (1.6) и (1.8), находим, что компоненты вектора комплексных амплитуд сигналов определяются первым сомножителем в (1.8), т.е.

$$s_n(t) = \exp[-j(\vec{k}\vec{p}_n)]. \quad (1.9)$$

Выражение (1.9) определяет комплексные амплитуды сигналов, наводимых в элементах АР произвольной конфигурации, волной произвольного направления прихода и единичной амплитуды.

Сигналы, принятые элементами АР, далее подвергаются обработке. Наиболее широкое распространение получила линейная обработка сигналов, которая заключается в суммировании принятых сигналов с комплексными весовыми коэффициентами. Если комплексные весовые коэффициенты \dot{w}_n фиксированы, можно найти выходной сигнал и диаграмму направленности АР. ДН антенной решетки называется зависимость комплексной амплитуды выходного сигнала от направления прихода плоской волны единичной амплитуды. ДН является комплексной функцией и её можно представить в виде

$$F(\vec{k}) = \sum_{n=1}^N \dot{w}_n \exp[-j(\vec{k}\vec{p}_n)]. \quad (1.10)$$

Функция модульного значения $|F(\vec{k})|$ называется амплитудной ДН АР, а функция аргумента $\Phi(\vec{k}) = \arg[F(\vec{k})]$ фазовой ДН АР [1, 2]. Выражение (1.10) не учитывает поляризацию электромагнитной волны, для её учета необходимо добавить соответствующий множитель [1]. Весовые коэффициенты в (1.10) обычно нормируются так, что:

$$\sum_{n=1}^N |\dot{w}_n|^2 = 1, \quad (1.11)$$

ДН линейной эквидистантной АР из изотропных элементов является функцией угла прихода радиоволны φ и определяется следующим выражением

$$F(\varphi) = \sum_{n=1}^N \dot{w}_n \exp\left[j \frac{2\pi}{\lambda} (n-1)d \sin\varphi\right]. \quad (1.12)$$

Для формирования комплексных весовых коэффициентов \dot{w}_n используются различные СВЧ устройства (фазовращатели, аттенюаторы) или, если речь идёт о цифровой обработке сигналов, вначале аналоговые сигналы преобразуются в цифровую форму, и затем выполняется весовая обработка [4]. В данном случае весовые коэффициенты выберем следующим образом

$$\dot{w}_n = \frac{1}{\sqrt{N}} \exp\left[j \frac{2\pi}{\lambda} (n-1)d \sin\xi\right], \quad (1.13)$$

где единственный параметр ξ определяет все значения весовых коэффициентов.

Другое выражение для ДН линейной АР из изотропных элементов можно получить, применяя формулу суммы геометрической прогрессии [1]:

$$F(\varphi) = \sum_{n=1}^N \dot{w}_n \frac{\sin\left[\pi \frac{d}{\lambda} N(\sin\varphi - \xi)\right]}{\sin\left[\pi \frac{d}{\lambda} (\sin\varphi - \xi)\right]} \exp\left[j \pi \frac{d}{\lambda} (N-1)(\sin\varphi - \xi)\right]. \quad (1.14)$$

Амплитудная ДН АР определяется выражением

$$F(\varphi) = \sum_{n=1}^N \dot{w}_n \frac{\sin \left[\pi \frac{d}{\lambda} N (\sin \varphi - \xi) \right]}{\sin \left[\pi \frac{d}{\lambda} (\sin \varphi - \xi) \right]}. \quad (1.15)$$

Для анализа этого выражения удобно ввести вместо переменной φ обобщенную угловую переменную $\psi = \pi \frac{d}{\lambda} N (\sin \varphi - \xi)$ [1]. Тогда выражение (1.15) будет иметь вид

$$|F(\psi)| = \sqrt{N} \frac{|\sin \psi|}{\left| \sin \frac{\psi}{N} \right|}. \quad (1.16)$$

На 1.3 представлены графически три функции. Функция $|\sin \psi|$ представлена кривой 1, функция $\left| \sin \frac{\psi}{N} \right|$ изображена кривой 2, и ДН $|F(\psi)|$, деленная на \sqrt{N} , показана в виде кривой 3. Расчеты сделаны для 5-ти элементной АР ($N=5$).

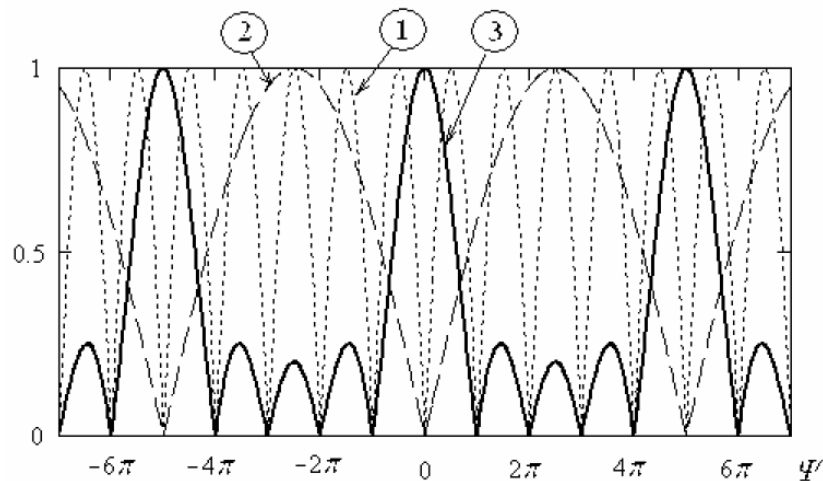


Рисунок 1.3 – Функция $|\sin \psi|$, $\left| \sin \frac{\psi}{N} \right|$ и нормированная амплитудная ДН $|F(\psi)|$ АР (кривые 1,2,3 соответственно) для $N=5$

Функция $|\sin \psi|$ имеет нули в точках $\psi = \pm \pi m$, где m - целое число, в то время как функция $\left| \sin \frac{\psi}{N} \right|$ имеет нули только в точках $\psi = \pm \pi m$. Поскольку в этих точках числитель и знаменатель формулы (1.16) обращаются в нуль, необходимо раскрыть неопределенность. В результате в точках $\psi = \pm \pi N m$ мы наблюдаем максимумы ДН.

Максимум в точке $\psi=0$ принято называть главным. Другие максимумы ДН того же уровня называются побочными или дифракционными. Наблюдаются также максимумы меньшего уровня, которые называют боковыми лепестками. Видно, что ДН является периодической функцией относительно обобщенной угловой переменной ψ .

Учитывая, что $\sin \varphi_0 = \xi$, направление главного луча будет определяться ξ . Главный луч будет направлен по нормали к АР, если $\xi=0$. Луч будет изменять свое направление

(сканировать), если $|\xi| \leq 0$. Первые нули ДН вблизи главного луча находятся в точках $\psi = \pm \pi m$, таким образом ширина ДН (по нулям) определяется следующим выражением [3]:

$$\Delta\varphi = 2\arcsin\left(\frac{\lambda}{dN\cos\varphi_0}\right). \quad (1.17)$$

Ширина ДН АР по уровню равному минус 3 дБ относительно максимума ДН определяется выражением

$$\Delta\varphi_{0,5} = 2\arcsin\left(\frac{\lambda}{dN\cos\varphi_0}\right). \quad (1.18)$$

Большинство современных АР конструируют таким образом, чтобы дифракционные лепестки ДН не попадали в область видимости. Обычно это условие должно выполняться при изменении угловой переменной φ в области переднего полукруга ($-(\pi/2) \leq \varphi \leq (\pi/2)$), т.е. обобщенная угловая переменная меняется в соответствии с выражением

$$-\pi \frac{d}{\lambda} N(1+\xi) \leq \psi \leq \pi \frac{d}{\lambda} N(1+\xi). \quad (1.19)$$

Выполнив некоторые преобразования, можно получить следующее выражение

$$\frac{d}{\lambda} \leq \frac{N-1}{N} \frac{1}{1+\xi}. \quad (1.20)$$

Если АР не предназначена для сканирования, и ее главный луч направлен по нормали, то в этом случае для АР с большим числом элементов условие отсутствия дифракционных (побочных) максимумов сводится к $d \leq \lambda$. Если предполагается сканирование лучом, то необходимое соотношение d/λ находится из выражения (1.20).

Уровень боковых лепестков ДН АР зависит от выбранного типа амплитудно-фазового распределения [1, 2]. Известны многочисленные способы уменьшения уровня боковых лепестков ДН АР, которые широко описаны в литературе [1-6].

Необходимо отметить, что при отклонении луча от нормали уменьшается $L_{ЭКВ}$ – эквивалентная длина АР (см. рисунок 1.4), которая рассчитывается по формуле [5]:

$$L_{ЭКВ} = Nd \cos(\theta_{ГЛ}). \quad (1.21)$$

При увеличении $\theta_{ГЛ}$ угла отклонения луча от нормали к АР эквивалентная длина уменьшается, а ширина ДН увеличивается.

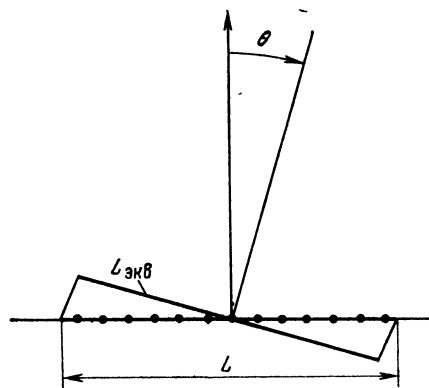


Рисунок 1.4 Эквивалентная длина антенной решетки

При проектировании характеристика направленности АР должна рассчитываться с учетом характеристики направленности отдельного антенного элемента, которая значительно отличается от изотропного излучателя. Поэтому характеристику направленности АР представляют в виде произведения [5]:

$$F(\theta, \varphi) = F_{AЭ}(\theta, \varphi) F_{\Sigma}(\theta, \varphi), \quad (1.22)$$

где $F_{AЭ}(\theta, \varphi)$ – характеристики направленности отдельного антенного элемента;
 $F_{\Sigma}(\theta, \varphi)$ – множитель антенной решетки, который можно рассматривать как характеристику направленности АР, состоящей из изотропных излучателей;
 θ, φ – угол места и азимутальный угол в сферической системе координат (см. рисунок 1.5).

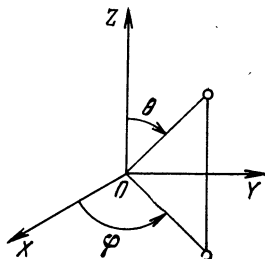


Рисунок 1.5 Система координат для расчета ДН АР

1.1.2 Коэффициент направленного действия антенной

Коэффициент направленного действия (КНД) антенной решетки представляет собой отношение плотности потока энергии в направлении заданного угла к средней проинтегрированной по сфере ДН АР [2]. Углы, отсчитываемом от нормали к апертуре АР, КНД имеет вид [2]:

$$G = \frac{4\pi |F|^2}{\int_0^{\frac{\pi}{2}} \int_{-\frac{\pi}{2}}^{\frac{\pi}{2}} |F(\theta, \varphi)| \cos\theta d\theta d\varphi}, \quad (1.23)$$

где $4\pi |F|^2$ – плотность потока энергии в направлении заданного угла.

Для изотропных элементов множитель антенной решетки осесимметричен, что сразу же приводит к упрощению

$$G = \frac{2|F|^2}{\int_{-\frac{\pi}{2}}^{\frac{\pi}{2}} |F(\theta)| \cos\theta d\theta}, \quad (1.24)$$

Для ДН эквидистантной антенной решетки при нормальном излучении выражение для расчета КНД имеет следующий вид

$$G = \frac{N^2}{N + 2 \sum_{n=1}^{N-1} (N-1) \text{sinc}(nkd)}, \quad (1.25)$$

где $\text{sinc}(x)$ – обозначает $\sin(x)/x$.

На 1.6 изображена зависимость КНД АР от шага расположения излучателей для различных решеток, содержащих от 2 до 24 элементов [2].

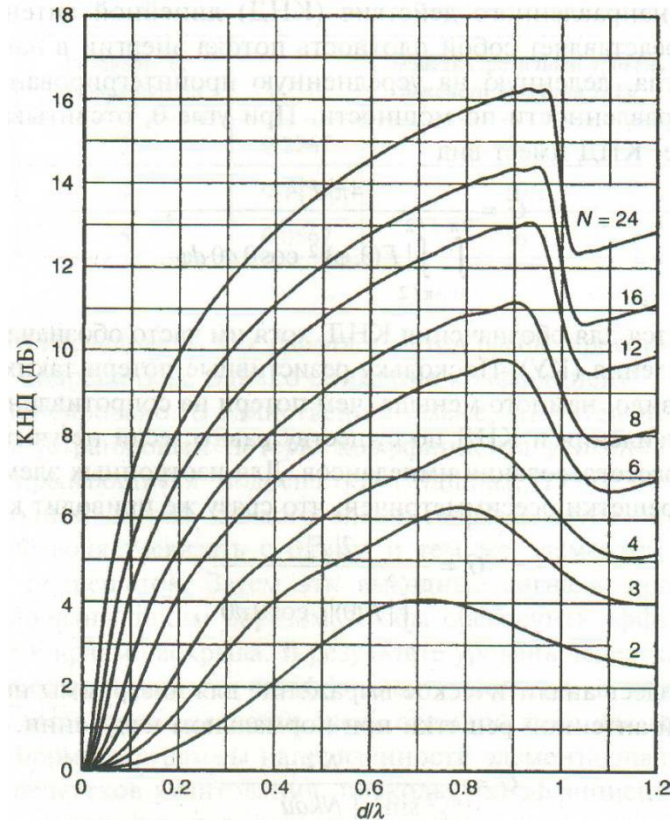


Рисунок 1.6 КНД АР, состоящей из изотропных элементов

Из 1.6 видно, что при появлении первого дифракционного лепестка направленность резко уменьшается до значения, приблизительно равного значению при полуволновом шаге. Аналогичные зависимости для АР, состоящих из коротких диполей и из резонансных антенных элементов приведены в литературе [2].

Для углов сканирования, удаленных от направления, перпендикулярного раскрытию АР, коэффициент направленного действия имеет вид

$$G = \frac{N^2}{N + 2 \sum_{n=1}^{N-1} (N-1) \text{sinc}(nkd) \cos(nkd \sin \theta_0)} \quad (1.26)$$

2 Описание программного обеспечения «FAZAR»

Лабораторные работы выполняются на ЭВМ с помощью программы «FAZAR» - программа для расчета антенных решеток. Лабораторные работы №1 и 2 выполняются в Fazar 4.1, лабораторная работа №3 выполняется в Fazar 5.0. Далее приведено описание этих версий программы.

Программное обеспечение «FAZAR» предназначено для расчета диаграммы направленности и коэффициента направленного действия ФАР.

Программа Fazar 4.1 имеет понятный интерфейс, выполненный в виде окон. Начальное окно показано на рисунке 2.1 [7]

Fazar v.4.1 Расчет фазированных антенных решеток

Входные данные Расчет токов Расчет ДН Выходные данные Выход Опции печати

Помощь

Ввод исходных данных Диаграмма направленности Численные данные

Вводимые данные

Рабочая частота f , ГГц: 10.000

Длина волны $=300/f$, мм: 30.000

Кол-во излучателей по X: 10

Кол-во излучателя по Y: 1

Размер излучателя по X, мм: 5.0

Размер излучателя по Y, мм: 5.0

Шаг решетки по X, мм: 15.0

Шаг решетки по Y, мм: 15.0

Наклон ДН по X, град: 0.0

Наклон ДН по Y, град: 0.0

Экран: нет есть

Расстояние до экрана, мм: 1.0

Расчетные данные

Количество излучателей N = 10

Форма распределения:

- равномерное
- парабола на пьедестале
- косинус на пьедестале
- Дольф-Чебышева
- ручной ввод в таблицу

Параметр распределения: $k = 0.4$

Форма решетки:

- прямоугольная
- круглая

Заполнение таблицы токов

Распределение токов по излучателям

x, мм	y, мм	z, мм	Ампл	Фаза
0.00	0.00	0.00	0.400	360
15.00	0.00	0.00	0.637	360
30.00	0.00	0.00	0.815	360
45.00	0.00	0.00	0.933	360
60.00	0.00	0.00	0.993	360
75.00	0.00	0.00	0.993	360
90.00	0.00	0.00	0.933	360
105.00	0.00	0.00	0.815	360
120.00	0.00	0.00	0.637	360
135.00	0.00	0.00	0.400	360

Рисунок 2.1 — Окно ввода данных Fazar 4.1

После задания данных и нажатия в верхней строке «Расчет ДН» на закладке «Диаграмма направленности» отражаются сечения объемной диаграммы направленности, а также параметры диаграммы направленности: ширина главного лепестка в плоскостях; величина коэффициента направленного действия.

Вид диаграммы направленности показан на рисунке 2.2.

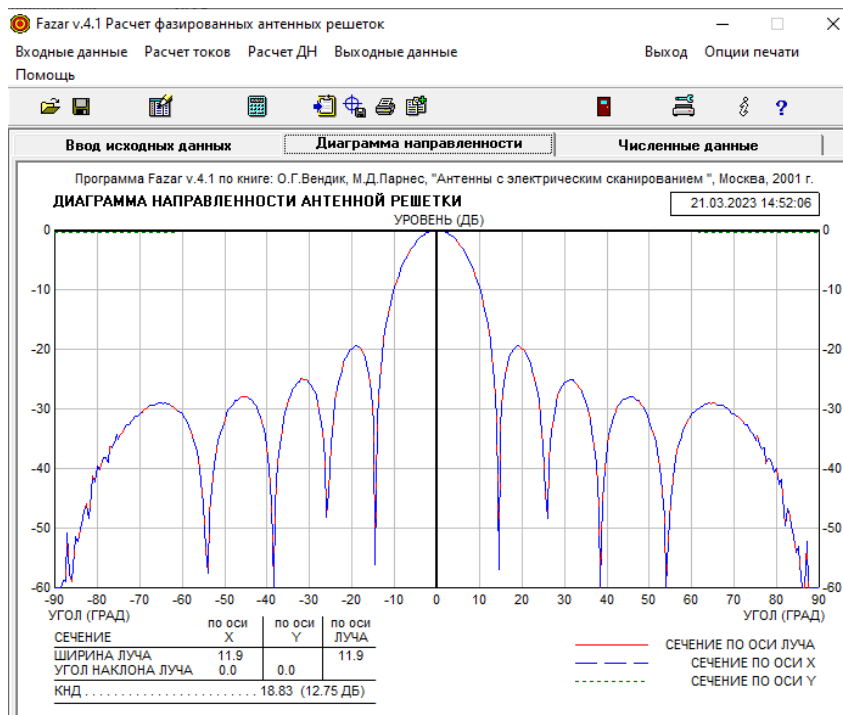


Рисунок 2.2 — Окно диаграммы направленности Fazar 4.1

Вычисленную диаграмму направленности, а также распределение токов в излучателях можно сохранить в файл из закладки «Численные результаты» в виде текстового файла («Выходные данные – в TXT файл»).

Окно старта программы Fazar 5.0 показано на рисунке 2.3

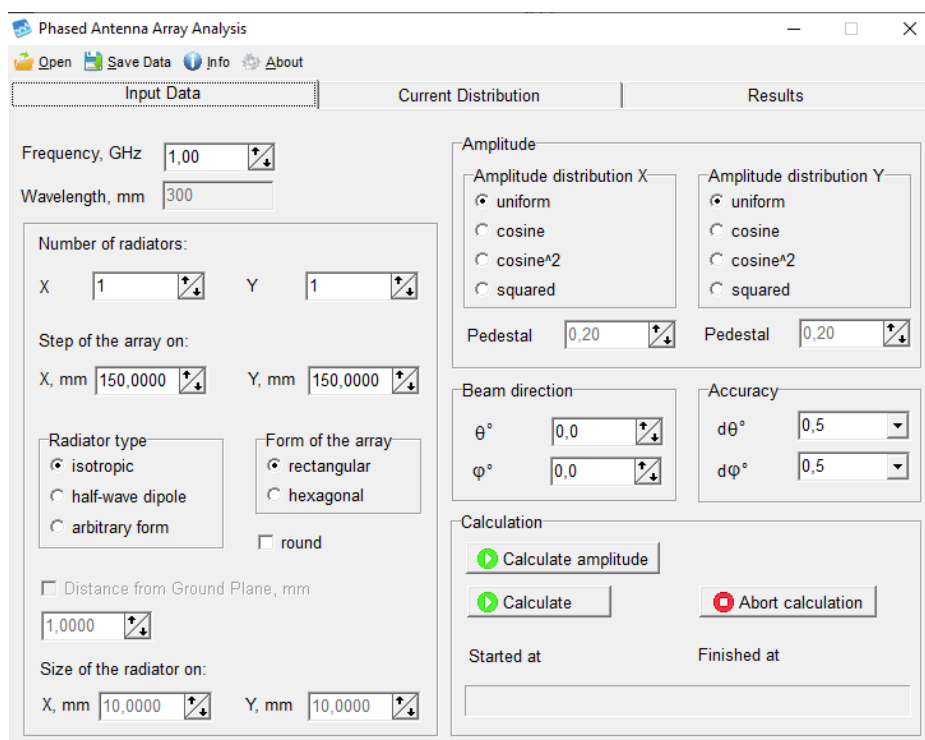


Рисунок 2.3 – Окно ввода данных Fazar 5.0

Окно разделено на несколько отдельных блоков. Левая часть определяет параметры решетки, в правой можно задать токовое распределение и параметры расчета распределения. При задании рабочей частоты, длина волны рассчитывается автоматически. Пользователь имеет возможность выбора типа излучателя. Полуволновый диполь – горизонтально расположенный над проводящей поверхностью вибратор с точкой возбуждения в центре.

Амплитудное распределение задается отдельно X и Y осям. Результирующее распределение высчитывается их перемножением. При задании параметров антенной решетки с круглой апертурой крайние элементы исключаются из расчета.

Все заданные значения можно сохранить в текстовом формате, и впоследствии загрузить сохраненные параметры или изменить их, получив, таким образом, антенную решетку произвольной формы с произвольным амплитудным и фазовым распределением.

Окно «токовое распределение» содержит таблицу с координатами элементов и токовое распределение. На вкладке результаты представлены ДН в 3 плоскостях – в плоскости луча, на X оси и Y оси. Также программа выводит значения коэффициента направленного действия и ширину главного луча [8].

На начальном окне можно открыть окно справки, кликнув на кнопку «info» (см. рисунок 2.4).

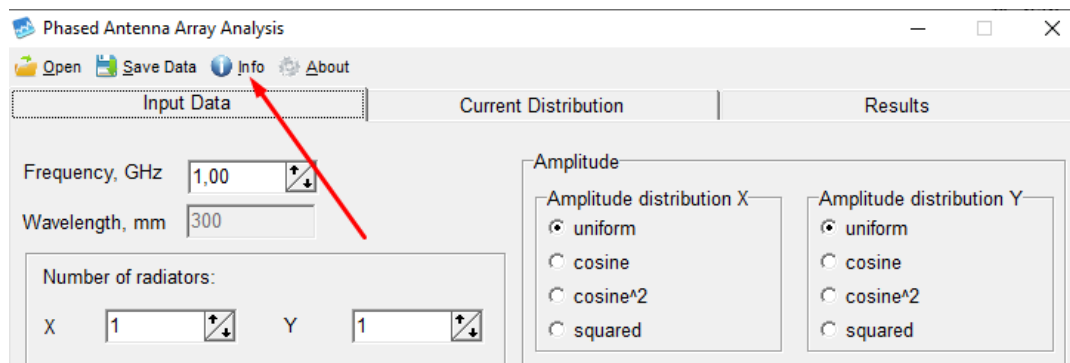


Рисунок 2.4 – Указание на кнопку справки для Fazar 5.0

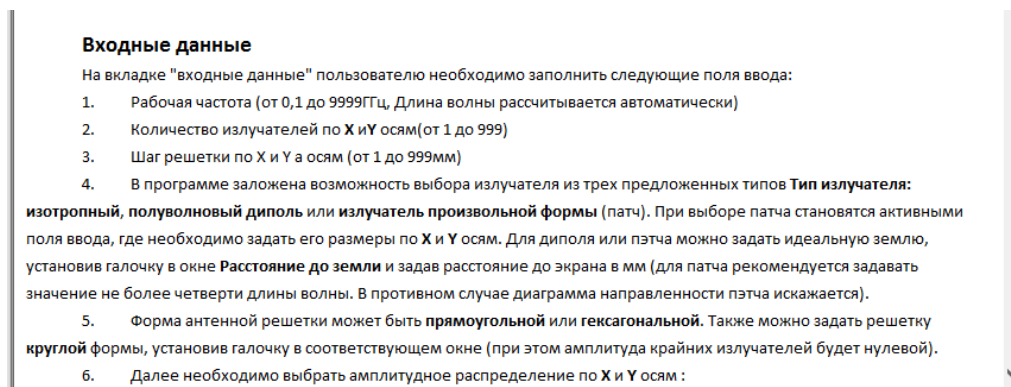


Рисунок 2.5 – Справочные данные для Fazar 5.0

Справочные данные для Fazar 5.0 показаны на рисунке 2.5. Здесь отображено полное пояснение всех блоков программы. Всех окон ввода данных, а также теорию и формулы, необходимые для понимания работы антенной решетки.

3 Лабораторная работа №1 «Исследование характеристик направленности линейной фазированной антенной решётки»

3.1 Задание

1. Рассчитать значения для десяти выбранных значений и построить графики следующих зависимостей при равномерном амплитудном распределении:
 - ширины диаграммы направленности (ДН) от количества элементов линейной фазированной антенной решетки (в диапазоне от 1 до 100 элементов);
 - коэффициента направленного действия (КНД) от количества элементов линейной фазированной антенной решетки (в диапазоне от 1 до 100 элементов);
 - ширины ДН от количества элементов фазированной антенной решетки (в диапазоне от 4 до 100 элементов) с квадратной плоской апертурой;
 - КНД от количества элементов фазированной антенной решетки (в диапазоне от 4 до 100 элементов) с квадратной плоской апертурой;
2. Рассчитать значения и построить графики зависимостей ширины ДН от угла ее наклона по оси X (диапазон углов $\pm 45^0$) для линейной 30 элементной ФАР при равномерном амплитудном распределении.
3. Рассчитать значения и построить графики зависимостей КНД для различных значений шага (от 0,3 до 1,5 длин волн) линейной 30 элементной ФАР при равномерном амплитудном распределении.

4. Рассчитать значения и построить графики ДН, распределения амплитуды и фазы (по элементам) для линейных ФАР со следующими видами распределения:

- косинус на пьедестале;
- Дольф-Чебышева.

3.2 Порядок выполнения лабораторной работы

1. Запустите программу Fazar 4.1, которая находится на рабочем столе (если её нет - попросите у преподавателя). Ознакомьтесь с интерфейсом программы и её возможностями.

2. Выставить необходимые параметры цифровой антенной решетки: частота, шаг решетки по X и Y, форма решетки. Изменяя количество антенных элементов фиксировать значения ширины диаграммы направленности для линейной антенной решетки. Для того, чтобы АР стала линейной необходимо по одной из осей задать количество излучателей равное единице. Постройте несколько ДН.

3. Выполнить 1-ое задание для антенной решетки с плоской квадратной апертурой. Постройте несколько ДН.

4. Задать количество излучателей по оси X, равное 30. Изменяя наклон ДН линейной антенной решетки фиксировать значения ширины диаграммы направленности. Постройте несколько ДН.

5. Вернуть наклон ДН в изначальное состояние. Изменяя шаг линейной антенной решетки фиксировать значения КНД, обращая внимание на вид ДН. Постройте несколько ДН.

6. Вернуть шаг ДН в изначальное состояние. Снять фазовое и амплитудное распределения:

- а) Распределение косинус на пьедестале;
- б) Распределение Дольф-Чебышева.

7. Полученные результаты лабораторной работы сведите в отчёт. Подготовьтесь к вопросам по данной лабораторной работе и контрольным вопросам.

4 Лабораторная работа №2 «Исследование влияния амплитудно-фазового распределения на характеристики диаграммы направленности в антенных решетках с различной апертурой»

4.1 Задание

1. Рассчитать значения и построить графики следующих зависимостей от k при амплитудных распределениях парабола на пьедестале, косинус на пьедестале:

- а) ширины диаграммы направленности;
- б) уровня боковых лепестков (УБЛ);

2. Рассчитать значения и построить зависимость ширины диаграммы направленности от уровня боковых лепестков при Дольф-Чебышевском распределении.

3. Построить и сравнить графики ДН для антенных решеток с плоской квадратной и круглой апертурой для следующих распределений:

- равномерное;
- парабола на пьедестале;
- косинус на пьедестале;

4.2 Порядок выполнения лабораторной работы

1. Запустите программу Fazar 4.1, которая находится на рабочем столе (если её нет - попросите у преподавателя).

2. Задайте исходные параметры для линейной антенной решетки: 10 элементов, шаг решетки: $\lambda/2$, частота 10 ГГц. Постройте ДН.
3. Установить распределение параболы на пьедестале. Изменяя параметр распределения $k=(0\div 1)$ построить график зависимости ширины ДН от параметра распределения. Построить график зависимости уровня боковых лепестков от параметра распределения. Прodelать то же самое для косинуса на пьедестале. Постройте несколько ДН.
4. Установить распределение Дольф-Чебышева. Построить зависимость ширины ДН от уровня боковых лепестков $k=(10\div 40)$. Постройте несколько ДН.
5. Установить равномерное распределение. Построить графики ДН для антенных решеток с плоской квадратной и круглой апертурой, исследовать характеристики ДН для этих АР. Прodelать то же самое для параболы на пьедестале и косинуса на пьедестале.
6. Полученные результаты лабораторной работы сведите в отчет. Подготовьтесь к вопросам по данной лабораторной работе и контрольным вопросам.

5 Лабораторная работа №3 «Исследование характеристик направленности фазированной антенной решетки с расположением антенных элементов в узлах прямоугольной и гексагональной сетки»

5.1 Задание

1. На частоте 10 ГГц рассчитать значения и построить график зависимости ширины ДН и КНД от шага расположения антенных элементов ($0,3-2$ длины волны).
2. Определить при каком шаге расположения антенных элементов достигается максимум КНД.
3. Определить при каком шаге расположения антенных элементов дифракционные максимумы ДН достигают значения минус 10 дБ по отношению к главному максимуму.
4. Сравнить максимальный КНД для АР с прямоугольным и гексагональным шагом расположения антенных элементов при условии, что дифракционные максимумы ДН не превышают значение минус 10 дБ по отношению к главному максимуму ДН.

5.2 Порядок выполнения лабораторной работы

1. Запустите программу Fazar 5.0, которая находится на рабочем столе (если её нет - попросите у преподавателя). Ознакомьтесь с интерфейсом программы и её возможностями.
2. Задайте исходные параметры для линейной антенной решетки: частота 10 ГГц 100 элементов.
3. Построить зависимость шага решетки от КНД. Выставить шаг, с максимальным КНД. Постройте итоговую ДН.
4. Построить зависимость шага решетки от уровня дифракционных максимумов. Постройте несколько ДН. Определить при каком шаге расположения антенных элементов дифракционные максимумы ДН достигают значения минус 10 дБ по отношению к главному максимуму.
6. Повторите пункт 3 для гексагональной антенной решетки. При условии, что уровень дифракционных максимумов не превысит минус 10 дБ.
7. Сравните результаты КНД для прямоугольной и гексагональной антенных решеток.

6 Контрольные вопросы

1. Что такое Антенна? Что такое ФАР?
2. Чем определяется количество элементов в ФАР?
3. Как формируется ДН в ФАР?
4. Что такое фазовое распределение в ФАР? На что оно влияет?
5. Что такое амплитудное распределение в ФАР? На что оно влияет?
6. Какие основные характеристики антенной решетки вы можете назвать?
7. Как количество антенных элементов влияет на характеристики антенной решетки? Почему?
8. Как отклонение луча влияет на КНД, ширину ДН, УБЛ?
9. Что такое дифракционные максимумы? Из-за чего они возникают?
10. Что такое параметр распределения? На что он влияет?
11. В чем её отличия ДН антенных решеток с различной апертурой?
12. Чем отличается ДН ФАР с расположением антенных элементов в узлах гексагональной и прямоугольной сетки?
13. Что такое КНД?
14. В чем преимущества/недостатки ФАР с расположением антенных элементов в узлах гексагональной сетки?

7 Список рекомендуемой литературы

1. Устройства СВЧ и антенны. Проектирование фазированных антенных решеток: Учеб. пособие для вузов / под редакцией Д.И. Воскресенского. Изд. 4-е, перераб. и доп. – М.: Радиотехника, 2012.– 744 с.
2. Хансен Р.С. Фазированные антенные решетки. Второе издание. Москва: Техносфера, 2012.– 560 с.
3. Ермолаев В.Т., Флакман А.Г. Методы оценивания параметров источников сигналов и помех, принимаемых антенной решеткой. Учебно-методический материал по программе повышения квалификации «Новые подходы к проблемам генерации, обработки, передачи, хранения, защиты информации и их применение». Нижний Новгород, 2007, 98 с.
4. Григорьев Л.Н. Цифровое формирование диаграммы направленности в фазированных антенных решетках Москва: Радиотехника, 2010. – 144 с.
5. Устройства СВЧ и антенны. Проектирование фазированных антенных решеток: Учеб. пособие для вузов / под редакцией Д.И. Воскресенского. Изд. 4-е, перераб. и доп. – М.: Радио и связь, 1981.– 432 с.
6. Сазонов Д.М. Антенны и устройства СВЧ. М.: Высшая школа. 1988. 432 с.
7. Звездина М.Ю., Шокова Ю.А. Моделирование характеристик направленности и согласования антенн: Лабораторный практикум. – М.: Издательский дом Академии Естествознания, 2016. – 90 с.
8. Драк О.Т., Задорожный А.И., Парнес М.Д. Программное обеспечение для расчета диаграмм направленности ФАР: Описание ПО.4 с.