

ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ И ТЕЛЕКОММУНИКАЦИИ
INFORMATION TECHNOLOGY AND TELECOMMUNICATIONS

УДК 001.57

DOI:10.21822/2073-6185-2022-49-1-49-58

Оригинальная статья/Original Paper

**Исследование зависимостей антенны Вивальди с двумя радиусами
кривых в программном комплексе электродинамического моделирования**

С.А. Ибрагимов

Дагестанский государственный технический университет,
367026, г. Махачкала, пр. И.Шамиля,70, Россия

Резюме. Цель. Целью исследования является построение и оптимизация компьютерной модели антенны с помощью программных комплексов электродинамического моделирования. **Метод.** Исследование основано на методах динамического моделирования. **Результат.** В работе получены зависимости ширины диаграммы направленности от кривой антенны Вивальди с зеркальным расположением лепестков. Построены графики зависимости радиусов кривых лепестков и величин раскрыва от ширины диаграммы направленности в двух плоскостях для частот 3 и 24 ГГц. Построены графики зависимости радиуса кривой, раскрыва антенны и нижней высоты антенны от максимального значения ширины диаграммы направленности для частоты 24 ГГц и минимального значения ширины диаграммы направленности для частоты 3 ГГц. Проведена аппроксимация полученных зависимостей для двух плоскостей $\theta = 90^\circ$ (плоскость раскрыва антенны) и $\varphi = 0^\circ$ (плоскость перпендикулярная плоскости раскрыва антенны). Путем регрессионного анализа получены аналитические описания и графики зависимостей максимальной ширины диаграммы направленности для 24 ГГц и минимальной ширины диаграммы направленности для 3 ГГц, от радиусов кривых, раскрыва и высоты расположения нижней кривой лепестка антенны. **Вывод.** Полученная математическая модель дает возможность получить значения радиуса кривой, раскрыва и нижней высоты лепестков антенны для различных частот, в итоге, построить антенну Вивальди с нужной топологией.

Ключевые слова: антенна Вивальди, радиус кривой, лепесток, аппроксимация, математическая модель, уравнение, диаграмма направленности

Для цитирования: С.А. Ибрагимов. Исследование зависимостей антенны Вивальди с двумя радиусами кривых в программном комплексе электродинамического моделирования. Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2022; 49(1): 49-58. DOI:10.21822/2073-6185-2022-49-1-49-58

Investigation of the dependences of the Vivaldi antenna with two curve radii in the electrodynamic modeling software package

S.A. Ibragimov

Daghestan State Technical University,
70 I. Shamilya Ave., Makhachkala 367026, Russia

Abstract. Objective. The aim of the study is to build and optimize a computer model of the antenna using software packages for electrodynamic modeling. **Method.** The study is based on dynamic modeling methods. **Result.** In this paper, the dependences of the width of the radiation pattern on the curved Vivaldi antenna with a mirror arrangement of the petals are obtained. Graphs of the dependence of the radii of curved petals and aperture values on the width of the radiation pattern in two planes for frequencies of 3 and 24 GHz are plotted. Curve radius, antenna aperture and lower antenna height are plotted as functions of the maximum beamwidth for 24 GHz and the minimum beamwidth for 3 GHz. The obtained dependencies were approximated for two planes $\theta = 90^\circ$ (antenna aperture plane) and $\varphi = 0^\circ$ (plane perpendicular to the antenna aperture plane). By means of regression analy-

sis, analytical descriptions and graphs of dependences of the maximum beamwidth for 24 GHz and the minimum beamwidth for 3 GHz, on the radii of the curves, aperture and the height of the lower curve of the antenna lobe were obtained. **Conclusion.** The resulting mathematical model makes it possible to obtain the values of the radius of the curve, the opening and the lower height of the antenna lobes for different frequencies, as a result, to build a Vivaldi antenna with the desired topology.

Keywords: Vivaldi antenna, curvature, petal, approximation, mathematical model, equation, radiation pattern

For citation: S.A. Ibragimov. Investigation of the dependences of the Vivaldi antenna with two curve radii in the electrodynamic modeling software package. Herald of the Daghestan State Technical University. Technical Science. 2022; 49 (1): 49-58. DOI: 10.21822 /2073-6185-2022-49-1-49-58

Введение. В настоящее время антенны с расширяющейся щелью (антенны Вивальди) широко используются в различных устройствах, в таких как станция помех, устройствах радиоразведки, медицинской технике и т.д. Ее популярность вызвана наличием преимуществ относительно других антенн, основными из которых являются: широкий диапазон рабочих частот, несложная конструкция, простые требования к изготовлению, высокий коэффициент усиления [1].

Несмотря на все вышеперечисленные преимущества, у такой антенны так же имеются и недостатки. Самым основным из них является отсутствие как таковой методики расчета. Есть множество работ, которые в определенной степени затрагивают данную проблему, но в них отсутствует конкретика и итоговое решение данной проблемы [3-5, 7-13]. На данный момент параметры подобных антенн подбираются эмпирически с помощью программных комплексов электродинамического моделирования таких, как CST Microwave Studio и HFSS Microwave Office [2].

Постановка задачи. Для исследования топологии антенны Вивальди необходимо построить и оптимизировать компьютерную модель антенны с помощью программных комплексов электродинамического моделирования. По результатам моделирования антенны необходимо определить влияния параметров антенны на ширину ее диаграммы направленности, а также определить в каком диапазоне частот коэффициент стоячей волны (КСВ) не превышает значения 2. Для этих целей необходимо провести сбор статистического материала. Полученные данные необходимо проанализировать, выявить и формализовать зависимости.

Методы исследования. Для описания кривых лепестков антенны Вивальди воспользуемся уравнением [6]:

$$\begin{cases} x = x_1 + k(x_2 - x_1); \\ y = \left(\frac{e^{R(x_1+k(x_2-x_1))} (y_2 - y_1) + y_1 e^{Rx_2} - y_2 e^{Rx_1}}{e^{Rx_2} - e^{Rx_1}} \right). \end{cases} \quad (1)$$

где: R – радиус кривой лепестков антенны;

y_1 – перекрытие лепестков антенны относительно оси абсцисс;

y_2 – раскрыв антенны, определяемый расстоянием от середины верхней части антенны до самого лепестка;

x – переменная, изменяемая в пределах от 0 до x_2 , определяющую функцию y , задающую изменение кривой лепестка от перекрытия до раскрыва антенны;

x_1 – переменная, задающая нижнюю точку начала лепестка;

x_2 – высота лепестка и высота всей антенны;

k – коэффициент.

Антенна реализована в виде компьютерной модели полоска в программной среде CST MicroWave Studio, с толщиной диэлектрического материала (тефлона) равной 0,5 мм, на которую нанесен проводящий слой в виде лепестков с экспоненциально зависимыми кривыми.

Зададимся перекрытием лепестков $y_1 = 0,6$ мм и будем считать, что нижняя точка начала лепестка находится в нижней части полоска, что соответствует значению $x_1 = 0$.

С учетом того, что каждый лепесток описывается двумя кривыми и подставив исходные значения в уравнение (1), определяющее топологию лепестка y , получим:

$$y = \left(\frac{e^{Rx} (y_2 + 0,6) - 0,6e^{Rx_2} - y_2}{e^{Rx_2} - 1} \right),$$

$$y^* = \left(\frac{e^{R^*x^*} (y^*_2 - 0,6) + 0,6e^{R^*x^*_2} - y^*_2}{e^{R^*x^*_2} - 1} \right) \quad (2)$$

На рис. 1 приведена оптимизированная по КСВ не превышающего значения 2 в диапазоне частот от 3 до 24 ГГц, компьютерная модель антенны Вивальди со следующими параметрами $x_2 = 120$ мм; $y_2 = 20$ мм; $R = 0,08$; $x^*_2 = 50$; $R^* = 0,05$. Следует отметить, что оба лепестка антенны симметричны друг другу относительно оси абсцисс.

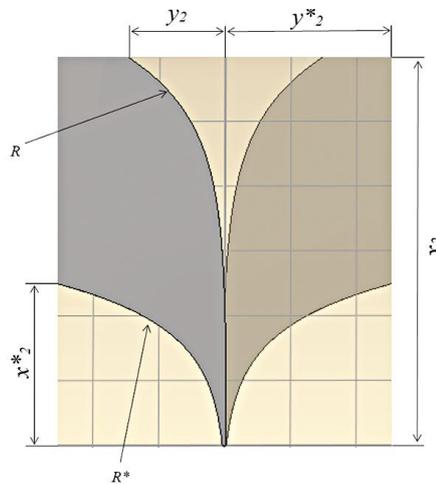


Рис. 1. Компьютерная модель антенны Вивальди
Fig. 1. Computer model of the Vivaldi antenna

При динамическом моделировании компьютерной модели антенны Вивальди было установлено, что диаграмма направленности антенны зависит от радиусов кривых лепестков R и R^* , раскрыва y_2 и нижней высоты лепестков x^*_2 антенны.

Для выявления зависимостей был произведен сбор данных зависимости ширины диаграммы направленности от радиусов кривых лепестков антенны, раскрыва и нижней высоты лепестков антенны в двух плоскостях $\theta = 90^0$ (плоскость раскрыва антенны) и $\varphi = 0^0$ (плоскость перпендикулярная плоскости раскрыва антенны), в диапазоне частот от 3 до 24 ГГц, при этом значения y_2 менялись в диапазоне от 10 до 50 мм, значения R от 0,01 до 0,16, значения R^* от -0,02 до 0,07 и значения x^*_2 от 10 до 60 мм, при этих значениях КСВ не превышало 2.

Собранные данные были сгруппированы в таблицы, где по строкам были указаны данные нижней высоты и раскрыва антенны, а по столбцам значения радиусов кривых лепестков антенны, в ячейках соответствующие значения ширины диаграммы направленности. В результате анализа полученных зависимостей было замечено, что зависимость ширины диаграммы направленности от радиуса кривой R^* незначительная, в связи с чем было решено пренебречь этим показателем при построении итоговых графиков.

На рис. 2 представлены графики зависимостей в двух плоскостях для частоты $F = 3$ ГГц. Для возможности отображения плоскостей в одной системе координат к каждому следующему слою, к исходному значению ширины диаграммы направленности прибавлялось значение 200.

Каждому слою на рис. 2 соответствует определенное значение раскрыва y_2 антенны. В каждом слое есть максимальные и минимальные значения ширины диаграммы направленности,

так для рис. 2а при $y_2 = 10$ мм ширина диаграммы меняется в диапазоне от 62,1 до 132,4 градусов, $y_2 = 20$ мм – от 64,8 до 196,3 градусов, $y_2 = 30$ мм – от 66,6 до 184,3 градусов, $y_2 = 40$ мм – от 67,6 до 180,8 градусов, $y_2 = 50$ мм – от 68,2 до 174,4 градусов, для рис. 2б при $y_2 = 10$ мм – от 49,2 до 133,0 градусов, $y_2 = 20$ мм – от 45,4 до 126,9 градусов, $y_2 = 30$ мм – от 43,6 до 120,8 градусов, $y_2 = 40$ мм – от 41,8 до 114,7 градусов, $y_2 = 50$ мм – от 40,4 до 111,0 градусов.

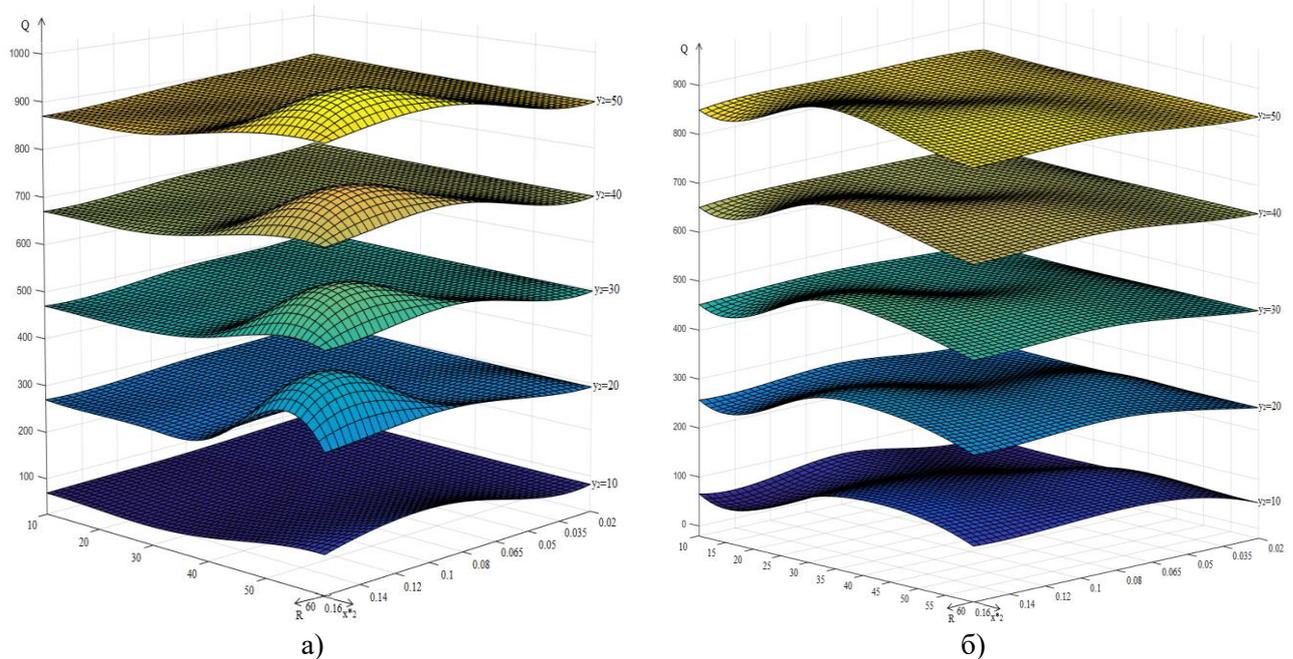


Рис. 2. Зависимость ширины диаграммы направленности Q от радиуса кривой R , раскрыва y_2 и нижней высоты x^*2 для частоты $F = 3$ ГГц, а) в плоскости $\varphi = 0^\circ$, б) в плоскости $\theta = 90^\circ$

Fig. 2. Dependence of the width of the directivity pattern Q on the radius of the curve R , the opening y_2 and the lower height x^*2 for the frequency $F = 3$ GHz, а) in the plane $\varphi = 0^\circ$, б) in the plane $\theta = 90^\circ$

На рис. 3 представлены графики полученных зависимостей в двух плоскостях для частоты $F = 24$ ГГц. Для возможности отображения плоскостей в одной системе координат к каждому следующему слою к исходному значению ширины диаграммы направленности прибавлялось значение: для рис. 3а – 100, для рис. 3б – 40.

На рис. 3, аналогично рис. 2 каждому слою соответствуют максимальные и минимальные значения ширины диаграммы направленности, так для рис. 3а при $y_2 = 10$ мм ширина диаграммы меняется от 22,4 до 56,1 градусов, $y_2 = 20$ мм – от 19,3 до 55,2 градусов, $y_2 = 30$ мм – от 16,6 до 52,5 градусов, $y_2 = 40$ мм – от 17,1 до 55,7 градусов, $y_2 = 50$ мм – от 18,6 до 57,8 градусов, для рис. 3б при $y_2 = 10$ мм – от 23,1 до 56,2 градусов, $y_2 = 20$ мм – от 16,1 до 89,1 градусов, $y_2 = 30$ мм – от 33,8 до 94,7 градусов, $y_2 = 40$ мм – от 35,2 до 131,1 градусов, $y_2 = 50$ мм – от 38,6 до 76,9 градусов.

В результате обработки данных выделены области наименьших значений ширины диаграммы направленности для частоты $F = 3$ ГГц, так как на данной частоте ширина диаграммы направленности, как правило, принимает большие значения и область наибольших значения ширины диаграммы направленности для частоты $F = 24$ ГГц, по причине того, что на данной частоте ширина диаграммы направленности, как правило, принимает маленькие значения.

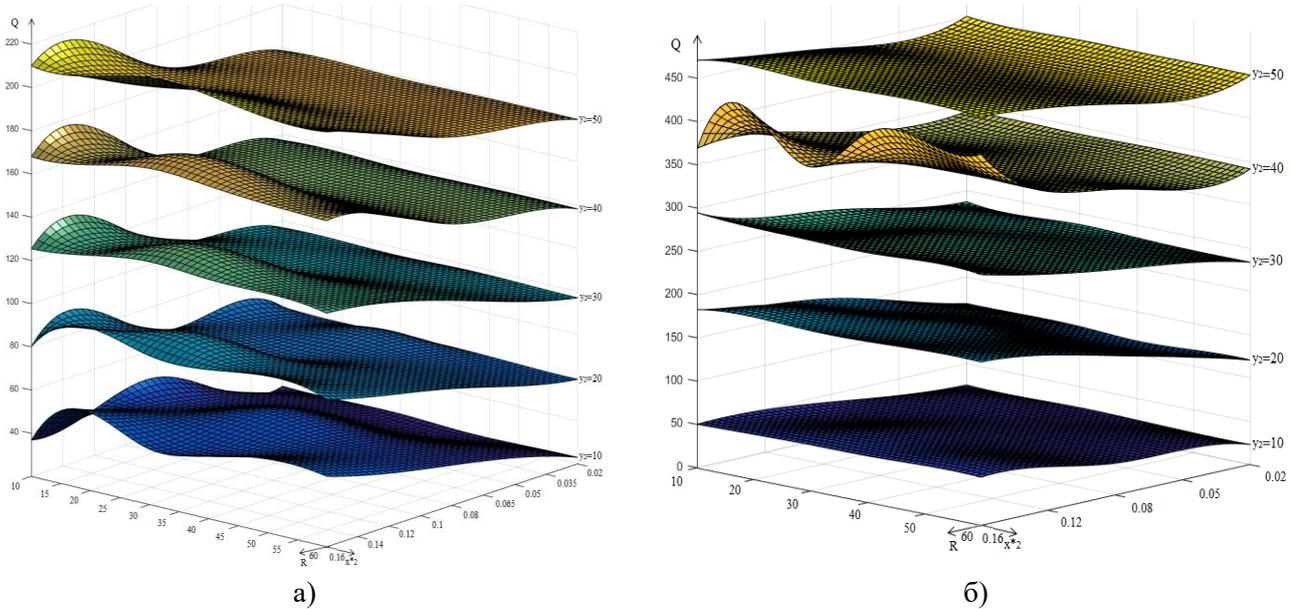


Рис. 3. Плоскости зависимости ширины диаграммы направленности Q от радиуса кривой R , раскрыва y_2 и нижней высоты x^*_2 для частоты $F=24$ ГГц, а) в плоскости $\varphi = 0^0$, б) в плоскости $\theta = 90^0$
Fig. 3. Planes of dependence of the width of the radiation pattern Q on the radius of the curve R , aperture y_2 and lower height x^*_2 for the frequency $F = 24$ GHz, а) in the plane $\varphi = 0^0$, б) in the plane $\theta = 90^0$

На рис. 4 и 5 представлены три ломаные кривые, которые показывают зависимость при наименьших для частоты 3 ГГц и наибольших для частоты 24 ГГц значений ширины диаграммы направленности от параметров топологии антенны x^*_2 , y_2 и R .

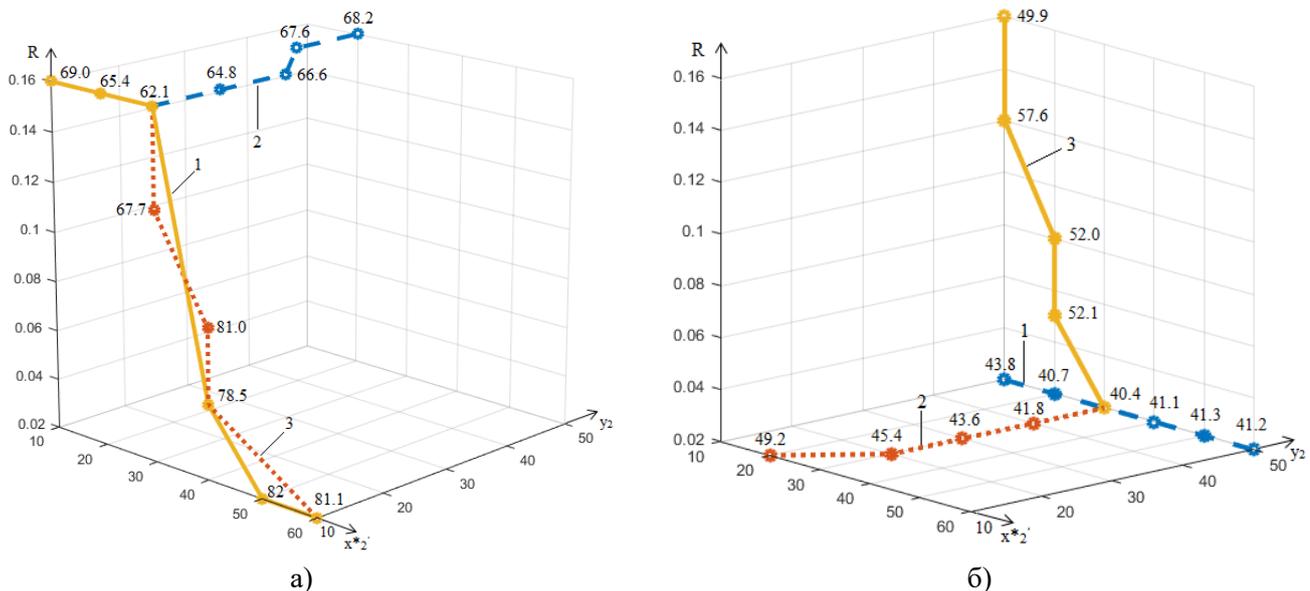


Рис. 4. График зависимости ширины диаграммы направленности Q от радиуса кривой R , раскрыва y_2 и нижней высоты x^*_2 при наименьших значениях для частоты $F=3$ ГГц, а) в плоскости $\varphi = 0^0$, б) в плоскости $\theta = 90^0$
Fig. 4. Graph of the dependence of the width of the radiation pattern Q on the radius of the curve R , aperture y_2 and lower height x^*_2 at the lowest values for the frequency $F = 3$ GHz, а) in the plane $\varphi = 0^0$, б) in the plane $\theta = 90^0$

Траектории 1 соответствует зависимость ширины диаграммы направленности при изменении параметра x^*_2 от 10 до 60 мм с шагом 10 мм, траектории 2 соответствует зависимость ширины диаграммы направленности при изменении параметра y_2 от 10 до 50 мм с шагом 10 мм

и траектории 3 соответствует зависимость при изменении параметра R от 0,02 до 0,16 с шагом 0,04, при этом значения двух оставшихся параметров принимали значения соответствующие наименьшим при $F=3$ ГГц или наибольшим при $F=24$ ГГц значениям ширины диаграммы направленности.

На рис. 4 представлены три траектории движения в области наименьших значений, проведённый сравнительный анализ траекторий показал, что наиболее оптимальной из них является для рис. 4а траектория 2 от 62,1 до 68,2 градусов, а для рис. 4б траектория 1 от 43,8 до 41,2 градусов. Выбор обусловлен тем что при этих траекториях ширина диаграммы направленности для частоты $F=3$ ГГц остается в области наименьших значений. Необходимо отметить, что при обеих траекториях R принимает постоянные значения.

На рис. 5 так же три траектории движения области наибольших значений, проведённый сравнительный анализ так же показал, что самой оптимальной траекторией для рис. 5а будет траектория 2 от 57,8 до 56,1 градусов, а для рис. 5б траектория 1 от 94,7 до 129,1 градусов. Выбор обусловлен тем что при этих траекториях ширина диаграммы направленности для частоты $F=24$ ГГц остается в области наибольших значений. Необходимо отметить, что при обеих траекториях R как и в первом случае принимает постоянные значения.

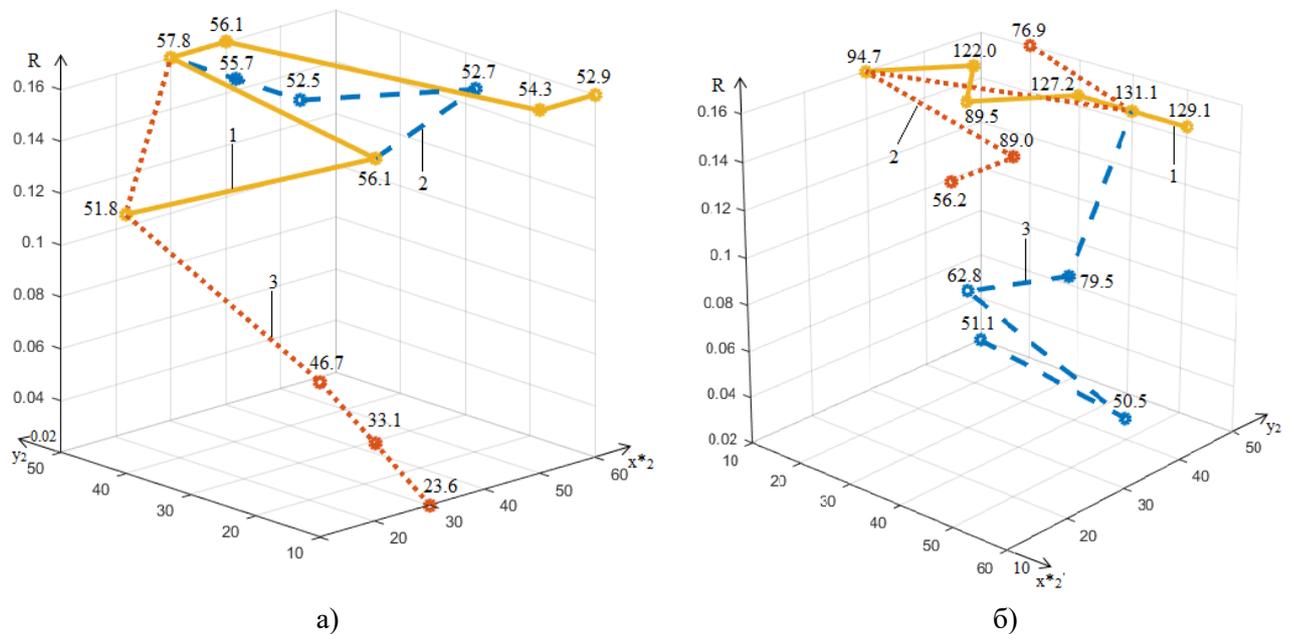


Рис. 5. График зависимости ширины диаграммы направленности Q от радиуса кривой R , раскрыва y_2 и нижней высоты x^*_2 при наибольших значениях для частоты $F=24$ ГГц, а) в плоскости $\varphi = 0^\circ$, б) в плоскости $\theta = 90^\circ$

Fig. 5. Graph of the dependence of the width of the radiation pattern Q on the radius of the curve R , aperture y_2 and lower height x^*_2 at the highest values for the frequency $F = 24$ GHz, a) in the plane $\varphi = 0^\circ$, b) in the plane $\theta = 90^\circ$

В результате анализа собранных данных были получены значения зависимостей ширины диаграммы направленности от радиуса кривой лепестка R , ее раскрыва y_2 и нижней высоты лепестков x^*_2 для частот 3, 8, 14, 19 и 24 ГГц в плоскости $\theta = 90^\circ$ и для частот 3, 8, 14, 19 и 24 ГГц в плоскости $\varphi = 0^\circ$. Полученные выборки были аппроксимированы соответствующими кривыми. При аппроксимации коэффициент детерминации превышал значение 0,97.

На рис. 6 для плоскости $\varphi = 0$ и рис. 7 для плоскости $\theta = 90^\circ$, представлены кривые зависимости ширины диаграммы направленности Q от радиуса кривой лепестка R (рис. 6а и рис. 7а), раскрыва y_2 (рис. 6б и рис. 7б) и нижней высоты лепестков x^*_2 (рис. 6в и рис. 7в) для частот 3 и 24 ГГц. На рис. 6 и 7, кривой 1 соответствует частота 3 ГГц, кривой 2 – 24 ГГц.

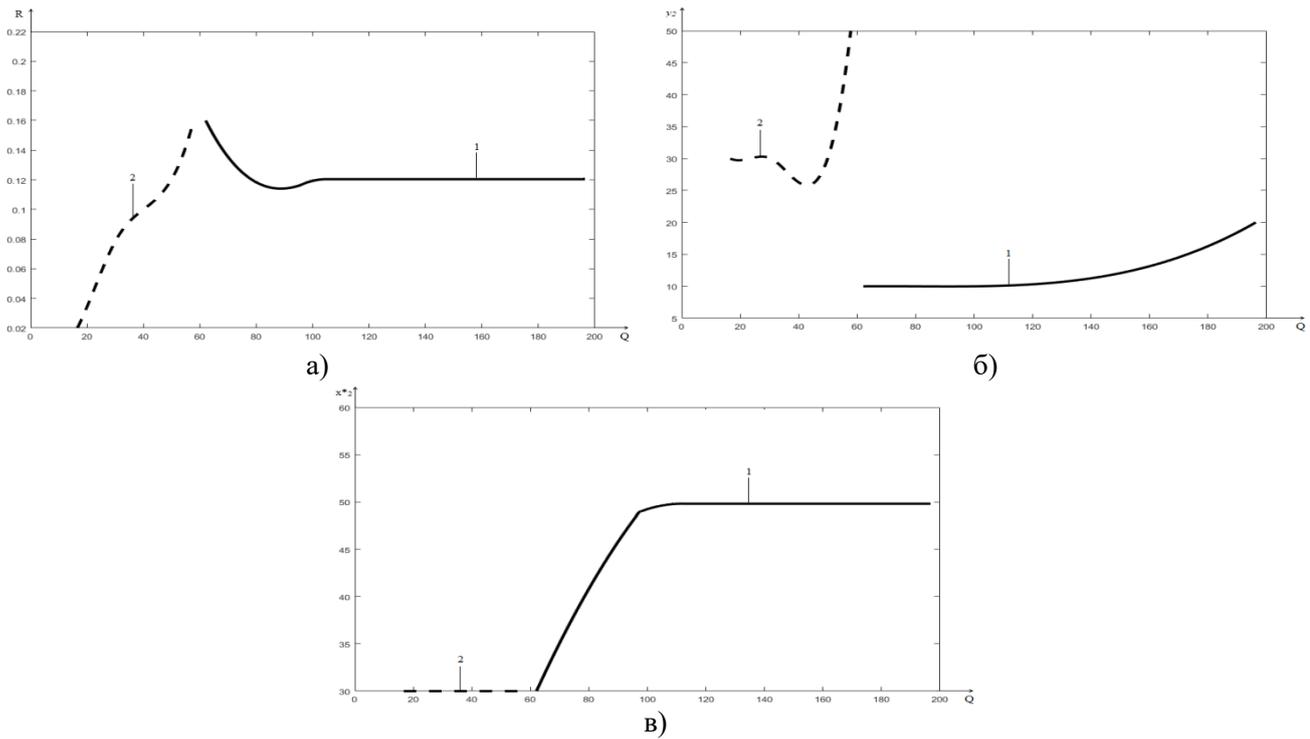


Рис. 6. Кривые зависимости ширины диаграммы направленности Q от радиуса кривой лепестка R , раскрыва y_2 и нижней высоты лепестков x^*_2 для плоскости $\varphi = 0$
Fig. 6. Curves of the dependence of the width of the directivity pattern Q on the radius of the lobe curve R , aperture y_2 and the lower height of the petals x^*_2 for the plane $\varphi = 0$

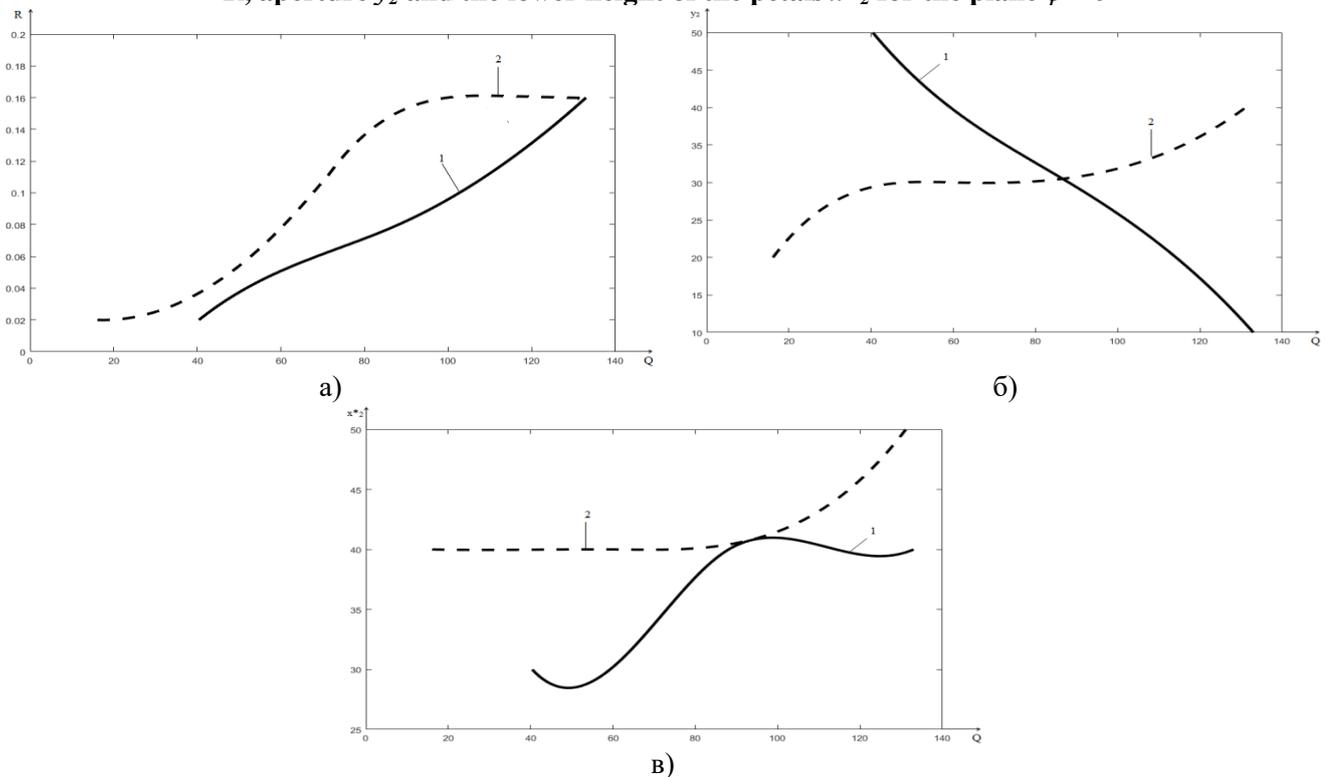


Рис.7. Кривые зависимости ширины диаграммы направленности Q от радиуса кривой лепестка R , раскрыва y_2 и нижней высоты лепестков x^*_2 для плоскости $\theta = 90^0$
Fig.7. Curves of the dependence of the width of the radiation pattern Q on the radius of the curve of the lobe R , opening y_2 and the lower height of the lobe x^*_2 for the plane $\theta = 90^0$

На рис. представлены графики зависимостей только для частот 3 и 24 ГГц. Из рис. 6 и 7 видно, что на одних графиках для обеих частот зависимость ширины диаграммы направленно-

сти от одного из параметров топологии антенны прямая, а на других для одной частоты прямая, а для другой обратная, данный вопрос более подробно рассматривается в статьях [14, 15].

Полученные кривые описываются соответствующими уравнениями, коэффициенты в которых подобраны с помощью программы MATLAB и приведены в табл.1.

Таблица 1. Уравнения зависимости регулируемого параметра от ширины диаграммы направленности Q

Table 1. Equations for the dependence of the controlled parameter on the width of the radiation pattern Q

Частота, ГГц/ Frequency, GHz	Плоскость/ Plane	Регулируемый параметр/ Adjustable parameter	Уравнения зависимости регулируемого параметра от ширины диаграммы направленности Q / Equations for the dependence of the controlled parameter on beamwidth Q
3	$\theta = 90^0$	R	$-0.18 * \cos(0.01 * Q + 0.1) + 0.18$
		y_2	$38.8 * \cos(0.02 * Q + 3) - 1.1 * Q + 125.1$
		x^*_2	$2 / (0.2 + e^{-0.737 * Q + 52.7}) + 30$
	$\varphi = 0^0$	R	$8.92 / (0.22 + e^{0.2 * Q - 7}) + 0.12$
		y_2	$167 * e^{0.09 * Q - 22.36} + 10$
		x^*_2	$12.19 / (0.44 + e^{-0.1 * Q + 6.5}) + 23.34$
24	$\theta = 90^0$	R	$-0.08 * \cos(0.035 * Q - 0.79) + 0.098$
		y_2	$-47.1 * \cos(0.02 * Q - 10) + e^{0.014 * Q + 2.79} - 46.29$
		x^*_2	$e^{0.23 * Q - 28.41} + 40$
	$\varphi = 0^0$	R	$e^{0.004 * Q - 0.46} + 0.01 * \cos(0.2 * Q) - 0.64$
		y_2	$e^{1.44 * Q - 80.48} + 30$
		x^*_2	принимает постоянное значение на всем диапазоне Q и равен 30/ takes a constant value over the entire Q range and is 30

Обсуждение результатов. В результате получены графики, демонстрирующие основные зависимости ширины диаграммы направленности антенны Вивальди от ее параметров топологии в диапазоне частот от 3 до 24 ГГц в двух плоскостях.

По полученным результатам, можно наблюдать некоторые скачкообразные отклонения одной плоскости графика от другой, так из рис. 2а видно, что в слое $y_2=10$ мм распределение значений ширины диаграммы направленности равномерное, но в слое $y_2=20$ мм появляется резкий скачок при больших значениях параметров x^*_2 и R , который в дальнейшем уменьшается. Это связано с тем, что при этих значениях параметров топологии на частоте $F=3$ ГГц происходит объединение боковых лепестков с основным, за счет чего резко меняется значение ширина диаграммы направленности.

На рис.2б аномалий не наблюдается, как и на рис.3а. На рис. 3б при $y_2=40$ мм наблюдается скачкообразное изменение значений ширины диаграммы направленности, чего не наблюдается в остальных плоскостях. Для понимания этих изменений необходимо провести дополнительные исследования в окрестностях данного слоя для значений $y_2=35$ и $y_2=45$ мм.

При анализе областей наименьших и наибольших значений ширины диаграммы направленности следует отметить, что в плоскости $\varphi = 0^0$ наибольшее влияние оказывает параметр y_2 , а в плоскости $\theta = 90^0$ наибольшее влияние оказывает параметр x^*_2 при этом параметр R принимал постоянные значения на всей траектории, как в области наименьших значений, так и в области наибольших значений, что можно наблюдать на рис. 4 и 5.

Из представленных на рис. 6 и 7 кривых зависимостей ширины диаграммы направленности и уравнений из табл.1 видно, что экспоненциальная зависимость ширины диаграммы направленности от параметров топологии антенны сохраняется за исключением некоторых случаев, когда параметр принимает постоянное значение на одной из частот (рис. 6в), но так же наблюдается случай, когда зависимость из прямой на частоте 3 ГГц переходит в обратную на частоте 24 ГГц, как видно из рис.7б, этот вопрос подробно раскрыт в предыдущих статьях [14, 15].

Следует отметить, что параметр топологии, отвечающий за изменение радиуса кривой лепестка антенны Вивальди R^* , можно выбирать произвольно в диапазоне от $-0,02$ до $0,07$.

Вывод. В результате получена общая графическая зависимость распределения значений ширины диаграммы направленности для различных параметров R , y_2 и x^*_2 .

Среди всего перечня данных выделена область наименьших значений ширины диаграммы направленности для частоты 3 ГГц и область наибольших значений ширины диаграммы направленности для частоты 24 ГГц.

Исследован переход от низких значений ширины диаграммы направленности к высоким и продемонстрирован один из возможных путей перехода для частот 3 и 24 ГГц.

Получены уравнения описывающие кривые зависимости ширины диаграммы направленности от параметров топологии антенны Вивальди. При проверке модели на адекватность средняя относительная погрешность не превышала 3%.

Полученная математическая модель дает возможность, подставляя в уравнения необходимое значение ширины диаграммы направленности Q , получить значения радиуса кривой, раскрыва и нижней высоты лепестков антенны для различных частот. В итоге подставив эти значения в уравнение (2) можно построить антенну Вивальди с нужной топологией.

Библиографический список:

1. C. Fairclough. Анализ конструкции антенны Вивальди [Электронный ресурс]. 2015 г. Режим доступа: <https://www.comsol.ru/blogs/vivaldi-antenna-design-analysis/>. Дата обращения 11.04.2018.
2. TSA, или антенна Вивальди [Электронный ресурс]. 2014 г. Режим доступа: <http://dl2kq.de/ant/3-90.htm>. Дата обращения 13.04.2018.
3. Maaskant R., Analytical and Numerical Modeling of Currents on Vivaldi Antennas for Radio Astronomy, ASTRON Eindhoven University of Technology - 100p. 2003
4. Чернышев С.Л., Виленский А.Р., Сю С., Люй С., Лю Ю. Разработка и исследование модифицированной антенны Вивальди в составе плоской широкополосной антенной решётки X-диапазона [Электронный ресурс]. 2011 г. Режим доступа: <http://technomag.edu.ru/doc/247762.html>. Дата обращения 03.04.2018.
5. Виленский А.Р. Метод анализа пространственно-временных характеристик излучения печатных щелевых антенн бегущей волны // Наука и образование. МГТУ им. Н.Э. Баумана. Электрон. Журн. 2014. № 5. С. 139-154. Режим доступа: <http://technomag.bmstu.ru/doc/710740.html>
6. T. G. Aslanov and A. N. Zhukov, "Choice of geometry of directional lobes of Vivaldi, depending on the base width of the radiation pattern and a frequency band," 2013 IX International Conference on Antenna Theory and Techniques, Odessa, 2013, pp. 352-354, doi: 10.1109/ICATT.2013.6650775.
7. A. Mehdipour, K. Mohammadpour-Aghdam and R. Faraji-Dana, "Complete dispersion analysis of vivaldi antenna for ultra wideband applications" Progress In Electromagnetics Research, PIER 77, 85–96, 2007.
8. S. Lin, S. Yang, A. E. Fath, "Development of a novel uwb vivaldi antenna array using siw technology" Progress In Electromagnetics Research, PIER 90, 369–384, 2009.
9. E. Gazit, "Improved design of the Vivaldi antenna", IEE Proc., Vol.135, Pt.H, No.2, pp. 89-92, 1988
10. S. Zhong, X. Yan, X. Liang, "UWB planar antenna technology" Front. Electr. Electron. Eng. China, 3(2): 136–144, 2008. DOI: 10.1007/s11460-008-0036-0
11. XiaoXiang He, Teng Chen, and XinWang, "A Novel Low RCS Design Method for X-Band Vivaldi Antenna" Front. Electr. Hindawi Publishing Corporation International Journal of Antennas and Propagation Volume, Article ID 218681, 6 pages, 2012. DOI: 10.1155/2012/218681
12. Sang-Gyu Kim, Kai Chang, "A low cross-polarized antipodal Vivaldi antenna array for wideband operation," Antennas and Propagation Society International Symposium, Volume 3, June 2004, pp. 2269-2272.
13. N. Hamzah, K.A. Othman "Designing Vivaldi Antenna with Various Sizes using CST Software" Proceedings of the World Congress on Engineering 2011 Vol II WCE 2011, July 6 - 8, 2011, London, U.K.
14. Асланов Т.Г., Ибрагимов С.А. Исследование топологии антенны вивальди с зеркальным расположением лепестков. Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2018;45(3):76-84. <https://doi.org/10.21822/2073-6185-2018-45-3-76-84>
15. Асланов Т.Г., Ибрагимов С.А. Исследование топологии антенны Вивальди. Научные исследования: итоги и перспективы. 2020. Т. 1. № 4. С. 28-35.

References:

1. C. Fairclough. Analysis of the design of the antenna Vivaldi [Electronic resource]. 2015 Access mode: <https://www.comsol.ru/blogs/vivaldi-antenna-design-analysis/>. Date of circulation 04/11/2018.
2. TSA, or Vivaldi's antenna [Electronic resource]. 2014 г. Access mode: <http://dl2kq.de/ant/3-90.htm>. Date of circulation 04/13/2018.
3. T. G. Aslanov and A. N. Zhukov, "Choice of geometry of directional lobes of Vivaldi, depending on the base width of the radiation pattern and a frequency band," 2013 IX International Conference on Antenna Theory and Techniques, Odessa, 2013, pp. 352-354, doi: 10.1109/ICATT.2013.6650775.

4. Chernyshev S.L., Vilensky A.R., Syu S., Liu S., Liu Yu. Development and investigation of the modified Vivaldi antenna in the flat broadband X-band antenna array [Electronic resource]. 2011 Access mode: <http://technomag.edu.ru/doc/247762.html>. Date of circulation 04/03/2018. (In Russ)
5. Vilensky A.R. A method for analyzing the space-time characteristics of propagation of printed slit antennas of a traveling wave. [Nauka i obrazovaniye] *Science and Education. MSTU them. N.E. Bauman. Electron. Jour.* 2014; 5:139-154. Access mode: <http://technomag.bmstu.ru/doc/710740.html> (In Russ)
6. Maaskant R., Analytical and Numerical Modeling of Currents on Vivaldi Antennas for Radio Astronomy, ASTRON Eindhoven University of Technology. 2003; 100.
7. A. Mehdipour, K. Mohammadpour-Aghdam and R. Faraji-Dana, "Comprehensive dispersion analysis of vivaldi antennas for ultra wideband applications". *Progress in Electromagnetics Research, PIER 77*, 2007; 85-96.
8. S. Lin, S. Yang, A. E. Fath, "Development of a novel uwb vivaldi antenna array using siw technology". *Progress in Electromagnetics Research, PIER 90*, 2009: 369-384.
9. E.Gazit, "Improved design of the Vivaldi antenna", *IEE Proc.*, 1988; 135 (2): 89-92.
10. S. Zhong, X. Yan, X. Liang, "UWB planar antenna technology" *Front. Electr. Electron. Eng. China*, 3 (2): 136-144, 2008. DOI: 10.1007 / s11460-008-0036-0
11. XiaoXiang He, Teng Chen, and XinWang, "A Novel Low RCS DesignMethod for X-Band Vivaldi Antenna" *Front. Electr. Hindawi Publishing Corporation International Journal of Antennas and Propagation Volume*, Article ID 218681, 6 pages, 2012. DOI: 10.1155 / 2012/218681
12. Sang-Gyu Kim, Kai Chang, "A low cross-polarized antipodal Vivaldi antenna array for wideband operation," *Antennas and Propagation Society International Symposium*, 2004; 3(June): 2269-2272.
13. N. Hamzah, K.A. Othman "Designing Vivaldi Antenna with Various Sizes using CST Software" *Proceedings of the World Congress on Engineering 2011 Vol II WCE 2011; July 6 - 8, 2011, London, U.K.*
14. Aslanov T.G., Ibragimov S.A. Study of the topology of the Vivaldi antenna with a mirror arrangement of the petals. [Vestnik Dagestanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Tekhnicheskkiye nauki] *Herald of Dagestan State Technical University. Technical Sciences.* 2018;45(3):76-84. <https://doi.org/10.21822/2073-6185-2018-45-3-76-84> (In Russ)
15. Aslanov T.G., Ibragimov S.A. Investigation of Vivaldi antenna topology. [Nauchnyye issledovaniya: itogi i perspektivy] *Scientific researches: results and prospects.* 2020; 1(4): 28-35. (In Russ)

Сведения об авторе:

Ибрагимов Султансаид Абдуллагаджиевич, аспирант, кафедра программного обеспечения вычислительной техники и автоматизированных систем; sult_992@mail.ru

Information about the author.

Syltansaid A. Ibragimov, Postgraduate student, Department of Software for Computer Engineering and Automated Systems; sult_992@mail.ru

Конфликт интересов/ Conflict of interest.

Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов/The author declare no conflict of interest.

Поступила в редакцию/Received 23.01.2022.

Одобрена после/рецензирования Revised 14.02.2022.

Принята в печать/ Accepted for publication 14.02.2022.