

Для цитирования: 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. DOI:10.21822/2073-6185-2018-45-3-76-84

For citation: Aslanov T.G., Ibragimov S.A. Study of the topology of the Vivaldi antenna with a mirror arrangement of the petals. Herald of Daghestan State Technical University. Technical Sciences. 2018; 45 (3):76-84. (In Russ.) DOI:10.21822/2073-6185-2018-45-3-76-84

ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ

ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ

УДК 001.57

DOI:10.21822/2073-6185-2018-45-3-76-84

ИССЛЕДОВАНИЕ ТОПОЛОГИИ АНТЕННЫ ВИВАЛЬДИ С ЗЕРКАЛЬНЫМ РАСПОЛОЖЕНИЕМ ЛЕПЕСТКОВ

Асланов Т.Г.¹, Ибрагимов С.А.²

^{1,2}Дагестанский государственный технический университет,

^{1,2}367026, г. Махачкала, пр. Имама Шамиля, 70, Россия,

¹e-mail:tabasik@gmail.com,²e-mail:syltansaid@mail.ru

Резюме. Цель. В работе рассмотрены вопросы исследования топологии антенны Вивальди с зеркальным расположением лепестков. **Метод.** Путем моделирования в программной среде CST MicroWave Studio проведен сбор необходимых данных, в частности, зависимости ширины диаграммы направленности от кривизны и раскрыва (расстояние от середины верхней части антенны до самого лепестка) лепестков антенны. **Результат.** Построены графики зависимости кривизны лепестков и величины раскрыва от ширины диаграммы направленности в двух плоскостях для различных частот. Проведена аппроксимация полученных зависимостей для двух плоскостей $\theta = 90^\circ$ (плоскость антенны) и $\varphi = 0^\circ$ (плоскость, перпендикулярная плоскости антенны). Путем аппроксимации получены аналитические описания зависимостей ширины диаграммы направленности от кривизны и раскрыва лепестков антенны. Проведен анализ поведения кривых зависимостей кривизны и раскрыва лепестков антенны от ширины диаграммы направленности при переходе от одной частоты к другой. Исследована зависимость коэффициента стоячей волны (КСВ) антенны от толщины подложки антенны – тефлона. Исследована зависимость полосы рабочих частот от размеров самой антенны. **Вывод.** Составлена математическая модель, позволяющая в зависимости от заданной частоты и ширины диаграммы направленности, получить необходимую топологию лепестков антенны. Решены задачи построения и оптимизации модели по заданным характеристикам. Выявлены зависимости топологии антенны от ширины диаграммы направленности и от диапазона частот.

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

TECHNICAL SCIENCE
COMPUTER SCIENCE, COMPUTER ENGINEERING AND MANAGEMENT

STUDY OF THE TOPOLOGY OF THE VIVALDI ANTENNA WITH
A MIRROR ARRANGEMENT OF THE PETALS

Tagirbek G. Aslanov¹, Syltansaid A. Ibragimov²

¹⁻²Daghestan State Technical University,

¹⁻²70 I. Shamilya Ave., Makhachkala 367026, Russia,

¹e-mail:tabasik@gmail.com,²e-mail:syltansaid@mail.ru

Abstract. Objectives In work questions of a research of topology of the antenna of Vivaldi with a mirror arrangement of petals are considered. **Method.** By modeling in the program CST MicroWave Studio environment collecting necessary data, in particular dependence of width of the directional pattern on curvature and a distance from the middle of the top part of the antenna to the petal antenna petals is carried out. **Result.** Graphic dependences of curvature of petals and size of a distance from the middle of the top part of the antenna to the petal on directional pattern width in two planes for various frequencies are constructed. Approximation of the received dependences for two planes $\theta = 90^\circ$ (the antenna plane) and $\varphi = 0^\circ$ is carried out (the plane perpendicular the antenna planes). The equations of the approximating curves for various frequencies are received. The analysis of change of curve dependences of curvature of petals and width of a distance from the middle of the top part of the antenna to the petal from directional pattern width upon transition from one frequency is carried out to another. The dependence of the standing wave ratio (VSWR) of the antenna on teflon thickness is investigated. The dependence of a strip of working frequencies on the sizes of the antenna is investigated. **Conclusion.** Dependences of topology of the antenna on directional pattern width on the range of frequencies of the antenna are revealed. Problems of construction and optimization of model of the set characteristics are solved. The mathematical model allowing depending on the set frequency and width of the directional pattern is received to receive necessary topology of petals of the antenna.

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

Введение. В настоящее время антенны с расширяющейся щелью (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 есть недостатки, самым основным из них является отсутствие как таковой методики расчета.

Есть множество работ, которые так или иначе затрагивают данную проблему, но в них отсутствует конкретика и итоговое решение данной проблемы. [3-5, 7-15] 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. При исследовании топологии антенны Вивальди необходимо решить ряд задач:

1. Построить и оптимизировать модель антенны Вивальди с помощью программных комплексов электродинамического моделирования;
2. Определить от каких параметров антенны зависит ее ширина диаграммы направленности и в каком диапазоне частот КСВ не превышает заданного значения;
3. Собрать статистический материал;
4. Проанализировать полученные данные и выявить зависимости;
5. Формализовать полученные 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 – кривизна 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.

Предполагается, что антенна реализована в виде полоски, с толщиной диэлектрического материала (тефлона), равной 0,5 мм, на которую нанесен проводящий слой в виде лепестков с экспоненциально зависимыми кривыми.

Зададимся перекрытием лепестков $2y_1 = 1,2$ мм. Будем считать, что начало лепестка размещена в нижней части полоска, что соответствует значению $x_1 = 0$.

Подставив полученные значения в уравнение (1), определяющее топологию лепестка y , получим:

$$y = \left(\frac{e^{Rx} (y_2 + 0,6) - 0,6e^{Rx_2} - y_2}{e^{Rx_2} - 1} \right), \quad (2)$$

Модель реализована в программной среде CST MicroWave Studio.

На рис.1 приведена оптимизированная антенна Вивальди со следующими параметрами $x_2 = 120$ мм; $y_2 = 20$ мм; $R = 0,08$. Следует отметить, что оба лепестка антенны симметричны друг другу относительно оси абсцисс.

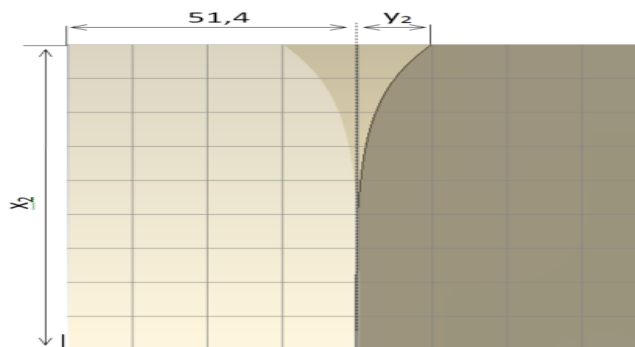


Рис.1. Топология антенны Вивальди
Fig.1. Vivaldi antenna topology

Толщина тефлона была выбрана в результате проведенных исследований зависимости КСВ антенны от ее толщины. В качестве примера на рис. 2 показана зависимость КСВ от толщины тефлона, где цифры 1, 2, 3 соответствуют толщине 0,22 мм, 0,5 мм, 0,7 мм.

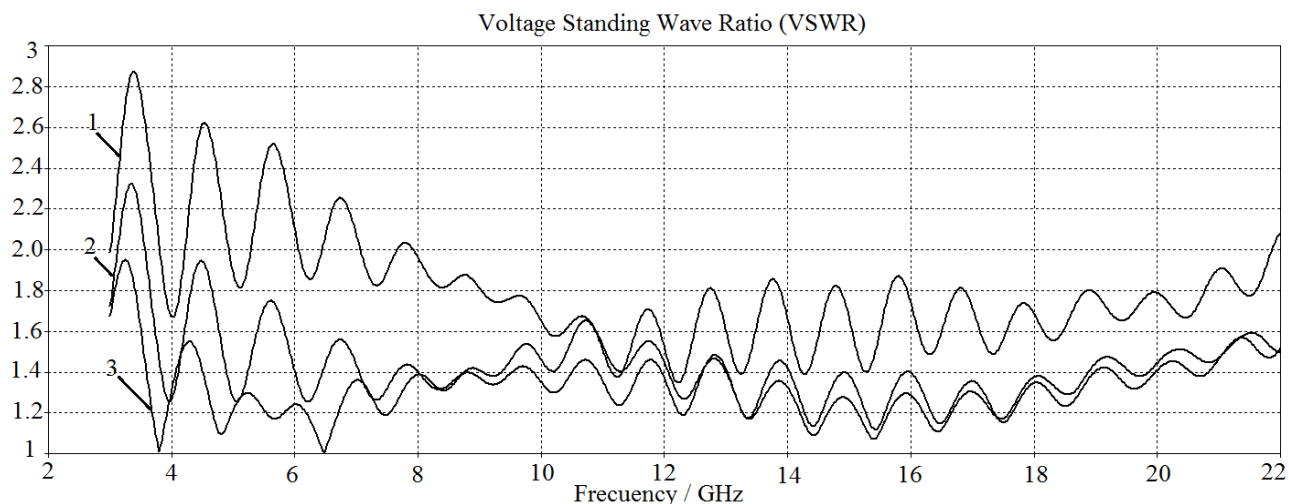


Рис.2. Зависимость коэффициента стоячей волны (КСВ) антенны от толщины тефлона
Fig. 2 The dependence of the standing wave ratio of the antenna on the thickness of Teflon

Из рис.2 видно, что при увеличении толщины, КСВ на нижних частотах уменьшается, но растет на высоких, при уменьшении толщины происходит обратное. В результате оптимизации была получена нужная толщина тефлона 0,5 мм.

Была исследована зависимость диапазона рабочих частот от размеров антенны. Методом моделирования были получены данные значения КСВ при изменении ширины и высоты антенны, а так же пропорционального изменения ширины и высоты антенны.

Так, при изменении ширины антенны КСВ уменьшалось в области низких частот до определенного уровня, в области высоких частот как такового изменения не наблюдалось. При изменении высоты антенны, изменения КСВ происходили как в области низких частот, так и в области высоких. Наибольший эффект был получен при пропорциональном изменении ширины и высоты антенны. На рис. 3 показано изменение КСВ в зависимости от размеров антенны, где кривой 1 соответствует в полтора раза увеличенная по сравнению с рис. 1 антенна, кривой 2 – исходная антенны, а кривой 3 – в полтора раза уменьшенная по сравнению с рис. 1 антенна. Из рис. 3 видно, что при увеличении размеров антенны диапазон частот смещается в сторону низких частот, а при уменьшении – обратное.

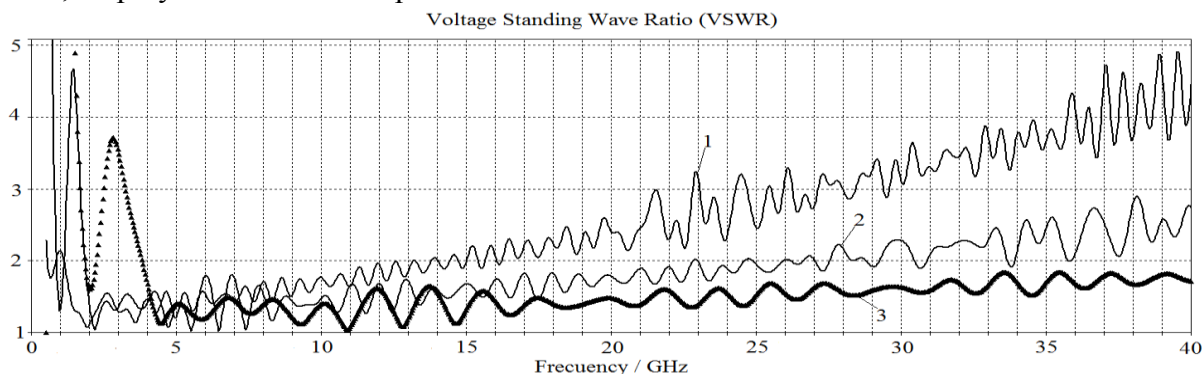


Рис.3. Изменение значения КСВ в зависимости от размеров антенны
Fig.3. Change in the value of the standing wave ratio depending on the size of the antenna

Для того чтобы привязать зависимость диапазона рабочих частот от размеров антенны был введен коэффициент d . Для диапазона частот от 3 до 24 ГГц $d = 1$, при $d < 1$ диапазон смещается в сторону высоких частот, а когда $d > 1$ – диапазон смещается в сторону низких частот. Таким образом уравнение (2) примет вид:

$$y = \left(\frac{e^{Rx} (y_2 + 0,6) - 0,6e^{Rx_2} - y_2}{e^{Rx_2} - 1} \right) d. \quad (3)$$

В процессе моделирования было установлено, что диаграмма направленности антенны зависит от кривизны лепестков R и их раскрыва y_2 . Был осуществлен сбор данных зависимости диаграммы направленности от кривизны лепестков антенны и раскрыва в двух плоскостях $\theta = 90^\circ$ (плоскость антенны) и $\varphi = 0^\circ$ (плоскость перпендикулярная плоскости антенны), в диапазоне частот от 3 до 24 ГГц, при этом значения y_2 менялись от 10 до 50, а значения R от 0,01 до 0,16, при этих значениях КСВ не превышало 2.

После обработки данных были получены отсчеты кривой зависимостей ширины диаграммы направленности от кривизны лепестка R и ее раскрыва y_2 , для частот 3, 8, 14, 19 и 24 ГГц в плоскости $\theta = 90^\circ$ и для частот 3, 4, 5,5, 6, 6,5, 7, 8, 14, 19 и 24 ГГц в плоскости $\varphi = 0^\circ$. Полученные выборки были аппроксимированы соответствующими кривыми. При аппроксимации обеих зависимостей коэффициент детерминации был выше 0,98.

На рис. 4 для плоскости $\theta = 90^\circ$ и рис. 5 для плоскости $\varphi = 0$, представлены кривые зависимости ширины диаграммы направленности Q от кривизны лепестка антенны R (рисунок 4а и рисунок 5а) и раскрыва антенны y_2 (рис.4б и рис.5б) для диапазона частот от 3 до 24 ГГц. На рис. 4, кривой 1 соответствует частота 3 ГГц, кривой 2 – 8 ГГц, кривой 3 – 14 ГГц, кривой 4 – 19 ГГц и кривой 5 – 24 ГГц.

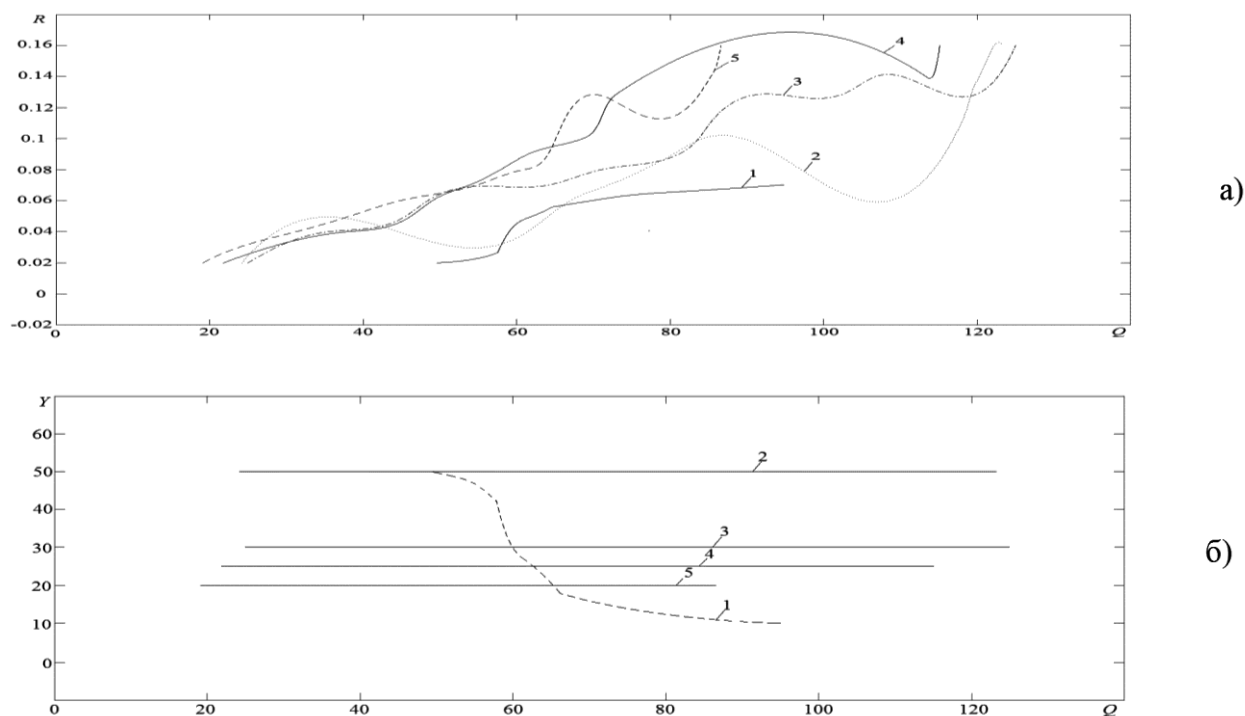


Рис.4. Кривые зависимости ширины диаграммы направленности Q от кривизны R и раскрыва y_2 для плоскости $\theta = 90^\circ$

Fig. 4. Curves of the width of the Q pattern from the curvature R and opening y_2 for the plane $\theta = 90^\circ$

На рис. 5, кривой 1 соответствует частота 3 ГГц, кривой 2 – 4 ГГц, кривой 3 – 5,5 ГГц, кривой 4 – 6 ГГц, кривой 5 – 6,5 ГГц, кривой 6 – 7 ГГц, кривой 7 – 8 ГГц, кривой 8 – 14 ГГц, кривой 9 – 19 ГГц и кривой 10 – 24 ГГц.

Из рис. 4а видно, что для всех частот с увеличением значения кривизны лепестков увеличивается ширина диаграммы направленности. А из рис. 5а видно, что данная зависимость не соблюдается, в связи с чем, пришлось провести дополнительный сбор статистического материала для диапазона частот от 3 до 8 ГГц и исследовать зависимости еще для 5 частот. Так на частотах 3, 4 ГГц с ростом кривизны падает значение ширины диаграммы направленности, а при частоте 5,5 ГГц сохраняя кривизну постоянной, диаграмма направленности зависит только от раскрыва лепестков антенны. Начиная с частоты 6 ГГц и выше, с ростом кривизны растет и значение ширины диаграммы направленности.

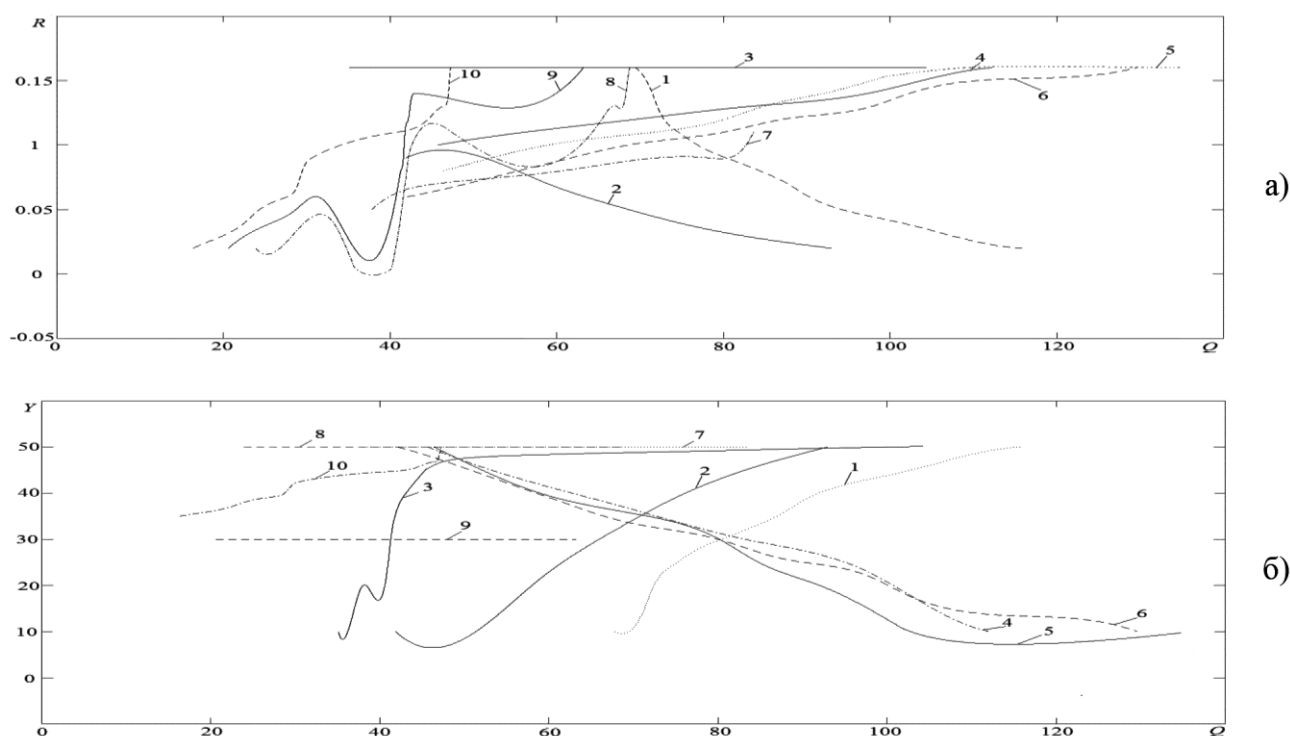


Рис.5. Кривые зависимости ширины диаграммы направленности Q от кривизны R и раскрыва y_2 для плоскости $\varphi = 0^\circ$

Fig.5. Curves of the width of the Q pattern from the curvature R and opening y_2 for the plane $\varphi = 0^\circ$

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

Полученные уравнения дают возможность вычислить значения кривизны и раскрыва антенны для заданной ширины диаграммы направленности не только для рассмотренных выше частот, но и для всего диапазона.

Для этого необходимо использовать весовые коэффициенты, с помощью которых можно будет учитывать влияние соседних частот на, искомую.

Например, если необходимо узнать значения R и y_2 с заданной Q на частоте 11 ГГц в плоскости $\theta = 90^\circ$, необходимо определить уравнения каких соседних частот нам известны, в данном случае это частоты 8 и 14 ГГц. Так как 11 ГГц расположена в равной отдаленности от этих частот весовые коэффициенты будут равны 0.5.

Необходимо подставить в уравнения этих частот значение Q после чего полученные значения R и y_2 умножить на весовой коэффициент 0,5 и сложить друг с другом, в результате чего мы получим значения R и y_2 для искомой частоты. Если бы в качестве искомой частоты была задана 12 ГГц то весовой коэффициент для 8 ГГц равен 0,4, а для 14 ГГц – 0,6.

Опишем все это уравнениями:

$$k_1 = 1/(F_2 - F_1) * (F_2 - F_x);$$

$$k_2 = 1/(F_2 - F_1) * (F_x - F_1);$$

$$R_x = k_1 R_1 + k_2 R_2.$$

где: k_1, k_2 – весовые коэффициенты верхней и нижней частоты соответственно;
 F_1, F_2 – верхняя и нижняя частоты соответственно, между которыми находится искомая частота;
 F_x – искомая частота;
 R_1, R_2 – уравнения зависимости кривизны лепестков антенны от ширины диаграммы направленности для верхней и нижней частот, соответственно;
 R_x – кривизна антенны, которую необходимо найти для искомой частоты.

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

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

Частота, ГГц Frequency, GHz	Плоскость plane	Регулируемый параметр Adjustable parameter	Уравнения зависимости регулируемого параметра от ширины диаграммы направленности Q Equations of dependence of adjustable parameter on width Q pattern
3	$\theta = 90^\circ$	R	$2.022/(39.26 + e^{-0.3205 \cdot Q + 22.88}) + 0.01734$
		y_2	$-11.5/(0.28 + e^{-0.35 \cdot Q + 20}) + 51$
	$\varphi = 0^\circ$	R	$4.2 * e^{-0.049 \cdot Q} + 0.0085$
		y_2	$47.29/(13.22 + e^{-0.1643 \cdot Q + 13.11}) * Q^{0.6452} - 26.23$
4	$\theta = 90^\circ$	R	Зависимость не исследовалась Equations of dependence of adjustable parameter on width
		y_2	Зависимость не исследовалась Equations of dependence of adjustable parameter on width
	$\varphi = 0^\circ$	R	$-e^{0.05022 \cdot Q - 5.61} * \cos(0.01422 * Q) + 0.1167$
		y_2	$0.46/(0.01 + e^{-0.1068 \cdot Q + 2.422}) + \cos(0.01 * Q) + 5.255$
5,5	$\theta = 90^\circ$	R	Зависимость не исследовалась Equations of dependence of adjustable parameter on width
		y_2	Зависимость не исследовалась Equations of dependence of adjustable parameter on width
	$\varphi = 0^\circ$	R	принимает постоянное значение на всем диапазоне Q и равен 0,16 Takes a constant value over the entire Q range and is equal to 0,16
		y_2	$0.4043/(0.009123 + e^{-0.4043 \cdot Q + 11.61}) + 5.854$
6	$\theta = 90^\circ$	R	Зависимость не исследовалась Equations of dependence of adjustable parameter on width
		y_2	Зависимость не исследовалась Equations of dependence of adjustable parameter on width
	$\varphi = 0^\circ$	R	$e^{0.01007 \cdot Q - 1.176} + \cos(0.009273 * Q) - 1.3$
		y_2	$-e^{0.007152 \cdot Q + 3.865} + \cos(0.06194 * Q) + 116.3$
6,5	$\theta = 90^\circ$	R	Зависимость не исследовалась Equations of dependence of adjustable parameter on width
		y_2	Зависимость не исследовалась Equations of dependence of adjustable parameter on width
	$\varphi = 0^\circ$	R	$e^{0.0131 \cdot Q - 2.575} * \cos(0.008 * Q) - 0.05$
		y_2	$-e^{0.0129 \cdot Q + 3.7} * \cos(0.008 * Q) + 118.5$
7	$\theta = 90^\circ$	R	Зависимость не исследовалась Equations of dependence of adjustable parameter on width
		y_2	Зависимость не исследовалась Equations of dependence of adjustable parameter on width
	$\varphi = 0^\circ$	R	$e^{-0.003346 \cdot Q - 6.138} * Q - 0.01929$
		y_2	$-e^{-0.003346 \cdot Q - 0.1466} * Q + 81.72$
8	$\theta = 90^\circ$	R	$e^{0.1668 \cdot Q - 22.86} - 0.1747 * \cos(0.02666 * Q + 0.425) + 5.61/Q - 0.128$
		y_2	принимает постоянное значение на всем диапазоне Q и равен 50 Takes a constant value over the entire Q range and is equal to 50
	$\varphi = 0^\circ$	R	$6.634/(1.165 + e^{-0.02 \cdot Q + 1}) + \cos(0.028 * Q) - 3.158$
		y_2	принимает постоянное значение на всем диапазоне Q и равен 50 Takes a constant value over the entire Q range and is equal to 50
14	$\theta = 90^\circ$	R	$e^{0.02318 \cdot Q - 2.462} + 1.147 * \cos(0.00347 * Q + 2.002) * e^{0.02318 \cdot Q - 2.462} - 0.04$
		y_2	принимает постоянное значение на всем диапазоне Q и равен 30 Takes a constant value over the entire Q range and is equal to 30
	$\varphi = 0^\circ$	R	$-0.001395/(0.02634 + 16.11 * e^{3.703 \cdot Q - 161.1}) + e^{0.009877 \cdot Q} * 0.06274 - 0.03668/(Q - 70)$
		y_2	принимает постоянное значение на всем диапазоне Q и равен 50 Takes a constant value over the entire Q range and is equal to 50
19	$\theta = 90^\circ$	R	$e^{0.001817 \cdot Q - 0.2168} - 0.0002511 * \cos(0.09155 * Q + 2.568) * e^{0.001817 \cdot Q - 0.2168} * Q - 0.8153$
		y_2	принимает постоянное значение на всем диапазоне Q и равен 25 Takes a constant value over the entire Q range and is equal to 25
	$\varphi = 0^\circ$	R	$-0.098/(1.42 + 0.06001 * e^{3.24 \cdot Q - 132}) + 0.0014 * Q + 0.07274$
		y_2	принимает постоянное значение на всем диапазоне Q и равен 30 Takes a constant value over the entire Q range and is equal to 30
24	$\theta = 90^\circ$	R	$e^{0.2497 \cdot Q - 23.18} + 0.01427 * \cos(0.02 * Q - 0.4038) * e^{0.06199 \cdot Q} + \cos(0.02 * Q - 0.4038) - 1.028$
		y_2	принимает постоянное значение на всем диапазоне Q и равен 20 Takes a constant value over the entire Q range and is equal to 20
	$\varphi = 0^\circ$	R	$-0.00083 * \sin(0.16 * Q + 0.42) * e^{0.116 \cdot Q} + 0.000018 * Q + 0.0116 + 0.0014 * e^{0.1159 \cdot Q} - 0.0007$
		y_2	$-0.0887 * \sin(0.16 * Q + 0.4168) * e^{0.116 \cdot Q} + 34.1 + 0.0028 * Q - 0.083 - 0.001 + 0.15 * e^{0.1159 \cdot Q}$

Аналогичным способом можно найти значение раскрыва лепестков антенны u_2 для искомой частоты, достаточно вместо R подставить соответствующие значения u_2 .

Обсуждение результатов. В результате выполненной работы были изучены зависимости для антенны Вивальди с зеркальным расположением лепестков. Исследование показало, что полоса рабочих частот антенны зависит, как от размеров антенны, так и от толщины тефлона между лепестками, данная особенность несвойственна для другого вида антенны Вивальди, где оба лепестка расположены на одной стороне полоска.

Получена база данных зависимости ширины диаграммы направленности от кривизны и раскрыва антенны, где наглядно видно пошаговое изменение параметров и реакцию ширины диаграммы направленности на эти изменения. Получены уравнения для всех исследуемых частот и так же выведены формулы для нахождения промежуточных частот. Из полученных уравнений видно, что в каждой из них присутствует экспоненциальная зависимость, что так же характерно и для уравнения (3), которое определяет топологию лепестков антенны.

Вывод. Таким образом, мы получили математическую модель, описанную для всего диапазона частот, что позволяет нам, задав необходимую ширину диаграммы направленности и частоту, получить соответствующую топологию антенны Вивальди без каких либо оптимизаций и настроек. При проверке модели на адекватность средняя относительная погрешность не превышала 3%. Полученная математическая модель дает возможность, подставляя в уравнения заданное значение ширины диаграммы направленности Q , получить значения кривизны и раскрыва антенны для различных частот. В итоге, подставив эти значения в уравнение (3) 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. Банков С.Е., Курушин А.А. Расчет антенн и СВЧ структур с помощью HFSS Ansoft– M, ЗАО «НПП «РОДНИК», 2009, 256 с.
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. Maaskant R., Analytical and Numerical Modeling of Currents on Vivaldi Antennas for Radio Astronomy, ASTRON Eindhoven University of Technology - 100p. 2003
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. P. J. Gibson, —*The Vivaldi Aerial*, Proc. 9th Europe Microwave. Conference., 1979, pp. 101–105.
15. James Joseph Fisher, "*Vivaldi Antenna*", World Intellectual Property Organization, Aug.8, 2006.

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, ili antenna Vival'di [Elektronnyy resurs]. 2014 g. Rezhim dostupa: <http://dl2kq.de/ant/3-90.htm>. Data obrashcheniya 13.04.2018. [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. Bankov S.Ye., Kurushin A.A. Raschet antenn i SVCH struktur s pomoshch'yu HFSS Ansoft– M, ZAO «NPP «RODNIK», 2009, 256 s. [Banks S.E, Kurushin AA Calculation of antennas and microwave structures using HFSS Ansoft– M, ZAO NPP "RODNIK", 2009, 256 p].
4. Chernyshev S.L., Vilenskiy A.R., Syu S., Lyuy S., Lyu YU. Razrabotka i issledovaniye modifitsi-rovannoy anteny Vival'di v sostave ploskoy shirokopolosnoy antennoy reshotki KH-diapazona [Elektronnyy resurs]. 2011 g. Rezhim dostupa: <http://technomag.edu.ru/doc/247762.html>. Data obrashcheniya 03.04.2018. [Chernyshev S.L., Vilenskiy 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.]
5. Vilenskiy A.R. Metod analiza prostranstvenno-vremennykh kharakteristik ishchzlucheniya pechat-nykh shchelevykh antenn begushchey volny // Nauka i obrazovaniye. MGTU im. N.E. Baumana. Elektron. Zhurn. 2014. № 5. S. 139-154. Rezhim dostupa : <http://technomag.bmstu.ru/doc/710740.html> [Vilenskiy A.R. A method for analyzing the space-time characteristics of propagation of printed slit antennas of a traveling wave // Science and Education. MSTU them. N.E. Bauman. Electron. Jour. 2014. No. 5. pp. 139-154. Access mode: <http://technomag.bmstu.ru/doc/710740.html>].
6. Maaskant R., Analytical and Numerical Modeling of Currents on Vivaldi Antennas for Radio Astronomy, AS-TRON Eindhoven University of Technology - 100p. 2003
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, 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. P. J. Gibson, The Vivaldi Aerial, Proc. 9th Europe Microwave. Conference., 1979, pp. 101-105.
15. James Joseph Fisher, "Vivaldi Antenna", World Intellectual Property Organization, Aug.8, 2006. dostupa: <https://www.comsol.ru/blogs/vivaldi-antenna-design-analysis/>. Data obrashcheniya 11.04.2018.

Сведения об авторах:

Асланов Тагирбек Гайдарбекович – кандидат технических наук, докторант.

Ибрагимов Султансаид Абдуллагаджиевич – аспирант.

Information about the authors.

Tagirbek G. Aslanov – Cand. Sci. (Technical), Doctoral cand., Department «Management and Informatics in Technical Systems and Computer Engineering».

Syltansaid A. Ibragimov – Postgraduate student.

Конфликт интересов.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Поступила в редакцию 28.05.2018.

Принята в печать 29.08.2018.

Conflict of interest.

The authors declare no conflict of interest.

Received 28.05.2018.

Accepted for publication 29.08.2018.