

ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ И ТЕЛЕКОММУНИКАЦИИ
INFORMATION TECHNOLOGY AND TELECOMMUNICATIONS

УДК 001.57



DOI: 10.21822/2073-6185-2024-51-1-31-39

Оригинальная статья/ Original article

Исследование зависимостей антенны Вивальди с резонатором в программном комплексе электродинамического моделирования

Т.Г. Асланов^{1,2}, С.А. Ибрагимов²

¹Институт конструкторско-технологической информатики РАН,

¹127055, г. Москва, Вадковский пер., д.18, стр. 1А, Россия,

²Дагестанский государственный технический университет,

²367026, г. Махачкала, пр. И. Шамиля, 70, Россия

Резюме. Цель. Целью исследования является оптимизация компьютерной модели антенны Вивальди с токопроводящими пластинами на одной стороне с резонатором. **Метод.** Исследование основано на методах электродинамического моделирования. **Результат.** Проведен сравнительный анализ двух типов антенн Вивальди зависимости ширины диаграммы направленности в двух плоскостях $\theta = 90^\circ$ (плоскость раскрыва антенны) и $\varphi = 0^\circ$ (плоскость перпендикулярная плоскости раскрыва антенны) и коэффициента стоячей волны от радиуса кривой токопроводящих пластин в виде лепестков и величин раскрыва. Исследование проводится в частотном диапазоне от 3 до 24 ГГц. Определено влияние формы, размеров и положения резонатора на значение КСВ и ширину диаграммы направленности антенны. Проведен сравнительный анализ значений КСВ для разных форм и размеров резонатора. Выявлены основные параметры резонатора, которые влияют на характеристики антенны. **Вывод.** Электродинамическое моделирование позволяет получить антенну Вивальди с необходимой шириной диаграммы направленности с улучшенным коэффициентом стоячей волны.

Ключевые слова: антенна Вивальди, радиус кривой, токопроводящие пластины, полюс, математическая модель, резонатор, диаграмма направленности, коэффициент стоячей волны

Для цитирования: Т.Г. Асланов, С.А. Ибрагимов. Исследование зависимостей антенны Вивальди с резонатором в программном комплексе электродинамического моделирования. Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2024; 51(1):31-39. DOI:10.21822/2073-6185-2024-51-1-31-39

Investigation of the dependencies of the Vivaldi antenna with a resonator in the electrodynamic modeling software complex

T.G. Aslanov^{1,2}, S.A. Ibragimov²

¹Institute of Design and Technological Informatics, Russian Academy of Sciences,

¹18 Vadkovsky lane, build. 1A, Moscow 127055, Russia,

²Daghestan State Technical University,

²70 I. Shamilya Ave., Makhachkala 367026, Russia

Abstract. Objective. The goal of the study is to optimize a computer model of a Vivaldi antenna with conductive plates on the same side as the resonator. **Method.** The study is based on electrodynamic modeling methods. **Result.** The paper presents a computer model of a Vivaldi antenna with conductive plates on one side with a resonator. A comparative analysis of two types of Vivaldi antennas was carried out of the dependence of the beam width and the voltage standing wave ratio on the radius of the current-conducting plate curve in the form of lobes and the values of the opening in two planes $\theta = 90^\circ$ (the plane of the antenna's opening) and $\varphi = 0^\circ$ (the plane perpendicular to the antenna's opening plane) in the frequency range from 3 to 24 GHz. The influence of the shape, size and position of the resonator on the SWR value and the width of the antenna radiation pattern was determined. VSWR values are given for different shapes and sizes of the resona-

tor. The main parameters of the resonator have been identified, which affect the characteristics of the antenna. **Conclusion.** Electrodynamics modeling allows us to obtain a Vivaldi antenna with the required radiation pattern width with an improved standing wave ratio.

Keywords: Vivaldi antenna, curve radius, conductive plates, strips, mathematical model, resonator, radiation pattern, voltage standing wave ratio

For citation: T.G. Aslanov, S.A. Ibragimov. Investigation of the dependencies of the Vivaldi antenna with a resonator in the electrodynamics modeling software complex. Herald of the Daghestan State Technical University. Technical Sciences. 2024; 51(1):31-39. DOI:10.21822/2073-6185-2024-51-1-31-39

Введение. В настоящее время антенны с расширяющейся щелью (антенны Вивальди) широко используются в различных устройствах, в таких как станция помех, устройства 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 вышеперечисленные преимущества у такой антенны имеются и недостатки, самым основным из них является отсутствие как таковой методики расчета диаграммы направленности антенны Вивальди в заданном диапазоне частот. Существует множество работ, которые в определённой степени затрагивают данную проблему, но в них в основном рассматривается реализация антенн применительно к конкретным техническим задачам, что не позволяет их успешно применять в других задачах [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].

В ранее опубликованных работах [14-19] была исследована антенна Вивальди с расположением токопроводящих пластин в виде лепестков с экспоненциально зависящими кривыми на разных сторонах тефлона, получена база данных [20]. В такие типы антенн невозможно встроить резонатор, в связи с чем возникла необходимость построения компьютерной модели с расположением проводящего слоя в виде лепестков на одной стороне полоска и его исследование на наличие отличительных особенностей от предыдущего типа антенны Вивальди.

Постановка задачи. Для исследования влияния резонатора антенны Вивальди на ее характеристики необходимо построить и оптимизировать компьютерную модель антенны с помощью программных комплексов электродинамического моделирования. По результатам моделирования антенны необходимо определить влияние формы, размеров и положения резонатора на ширину диаграммы направленности и коэффициента стоячей волны (КСВ). Для этих целей необходимо провести сбор статистических данных которые необходимо проанализировать и выявить зависимости ширины диаграммы направленности и значения КСВ от формы, размеров и положения резонатора.

Методы исследования. Для описания геометрии токопроводящих пластин антенны Вивальди, расположенных на одной стороне полоска, воспользуемся системой уравнений [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 токопроводящей пластины антенны;

y_1 – щель между токопроводящими пластинами антенны относительно оси абсцисс;

y_2 – раскрыв антенны, определяемый расстоянием от середины верхней части антенны до токопроводящих пластин;

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

x_1 – переменная, задающая нижнюю точку начала токопроводящих пластин;
 x_2 – высота токопроводящих пластин 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 нанесены токопроводящие пластины в виде лепестков с экспоненциально зависими кривыми.

В отличие от рассмотренных в предыдущих работах антенн [14-19] у которой токопроводящие пластины были расположены по разные стороны полоска, где с помощью переменной y_1 задавалось перекрытие лепестков в этот раз будем задаваться щелью между токопроводящими пластинами антенны $y_1 = 0,1$ мм и определим нижнюю точку начала токопроводящих пластин в нижней части полоска, что соответствует значению $x_1 = 0$. Подставим заданные значения в уравнение (1), определяющее топологию лепестка y , получим:

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

Подставив в формулу значения остальных переменных получаем необходимую компьютерную модель антенны Вивальди с токопроводящими пластинами, расположенными на одной стороне полоска.

На рис. 1 приведена оптимизированная по КСВ не превышающего значения 2 в диапазоне частот от 3 до 24 ГГц, компьютерная модель антенны Вивальди с токопроводящими пластинами в виде лепестка расположенными на одной стороне полоска со следующими параметрами $x_2 = 120$ мм; $y_2 = 40$ мм; $R = 0,08$ мм. Следует отметить, что оба лепестка антенны симметричны друг другу относительно оси абсцисс.

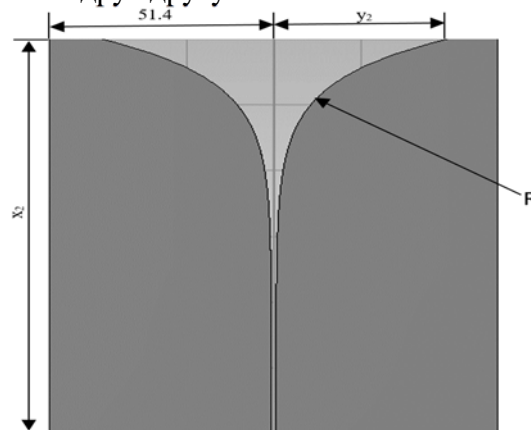


Рис. 1. Компьютерная модель антенны Вивальди с расположением токопроводящих пластин на одной стороне полоска

Fig. 1. Computer model of a Vivaldi antenna with conductive plates located on one side of the strip

При динамическом моделировании компьютерной модели антенны Вивальди было замечено, что величина щели между токопроводящими пластинами антенны значительно влияет на значение КСВ, что не было свойственно для типа антенны с расположением токопроводящих пластин на разных сторонах полоска. Так же отличием является то, что сигнал между токопроводящими пластинами в этом типе антенны распространяется в пространстве, в отличие от предыдущего типа, где сигналу проходил через тефлон, что как известно сказывается на его скорости (она уменьшается) и соответственно на длину волны сигнала, т. к. у тефлона выше диэлектрическая проницаемость.

В результате обнаруженных отличий в конструкции возникла необходимость исследовать на сколько данная антенна отличается от ранее рассмотренной по значениям ширины диаграммы направленности и КСВ антенны в зависимости от ее топологии. Для этого были собраны данные зависимости ширины диаграммы направленности и КСВ от раскрыва антенны y_2 при значении радиуса кривой антенны $R=0,08$ при этом значения y_2 менялись от 10 мм до 50 мм с шагом 10 мм в двух плоскостях $\theta = 90^\circ$ (плоскость раскрыва антенны) и $\varphi = 0^\circ$

(плоскость перпендикулярная плоскости раскрыва антенны), в диапазоне частот от 3 до 24 ГГц.

Обсуждение результатов. Полученные результаты зависимостей показали, что для всех значений раскрыва антенны y_2 значение КСВ было лучше у антенны Вивальди с расположением токопроводящих пластин на одной стороне. Для наглядности полученные результаты приведены на рисунке 2 для антенны с расположением токопроводящих пластин на одной стороне полоска и на рис. 3 с расположением токопроводящих пластин на разных сторонах полоска, где 1 – это значение КСВ при $y_2=20$ мм, а 2 – значение КСВ при $y_2=40$ мм.

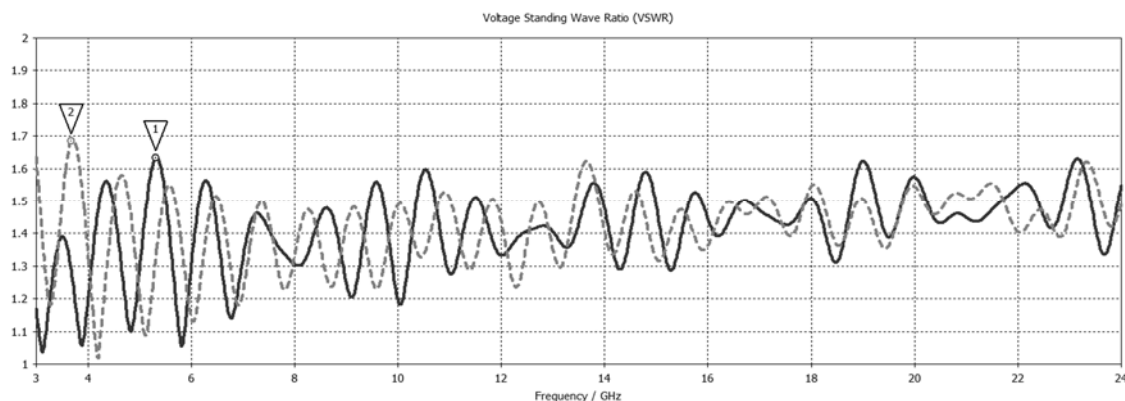


Рис. 2. Изменение значения КСВ для антенны Вивальди с расположением токопроводящих пластин на одной стороне полоска

Fig. 2. Changing the SWR value for a Vivaldi antenna with conductive plates located on one side of the strip

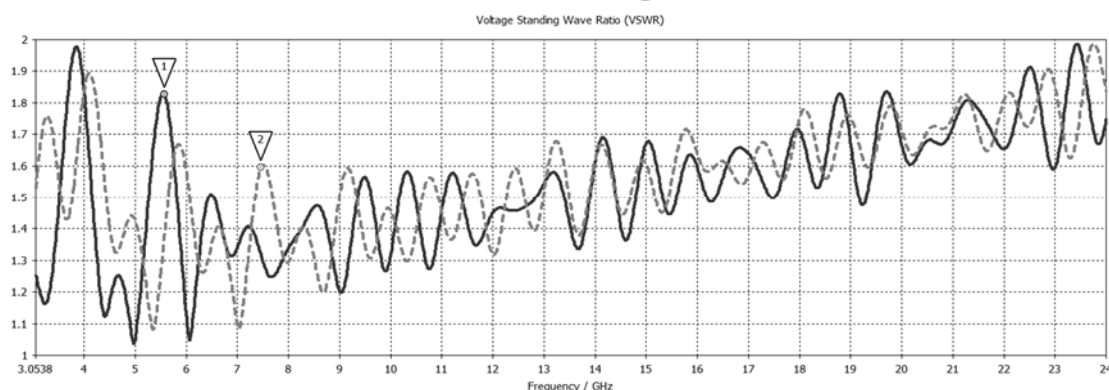


Рис. 3. Изменение значения КСВ для антенны Вивальди с расположением токопроводящих пластин на разных сторонах полоска

Fig. 3. Changing the SWR value for a Vivaldi antenna with conductive plates located on different sides of the strip

Для ширины диаграммы направленности результаты отличаются от ранее проведенных исследований, когда токопроводящие пластины располагались по разные стороны от диэлектрической подложки.

В случае, когда токопроводящие пластины в виде лепестков расположены с одной стороны полоска в плоскости перпендикулярной плоскости антенны для нижней частоты диапазона $F=3$ ГГц ширина диаграммы направленности больше, для верхней частоты диапазона $F=24$ ГГц наоборот меньше. В плоскости антенны для нижней частоты диапазона $F=3$ ГГц происходит обратная ситуация, но для верхней частоты диапазона $F=24$ ГГц ширина диаграммы направленности все так же меньше чем в предыдущем типе антенны Вивальди. Полученные результаты представлены в табл. 1, где 1 сторона – антенна в которой токопроводящие пластины в виде лепестков расположены по одну сторону полоска, а 2 стороны – антенна в которой токопроводящие пластины в виде лепестков расположены по разные стороны полоска. После сравнения двух типов антенн и выявления преимуществ антенны с расположением токопроводящих пластин на одной стороне полоска, была поставлена задача

построения компьютерной модели антенны Вивальди с резонатором, для дальнейшего исследования влияния формы и размеров резонатора на КСВ и ширину диаграммы направленности антенны.

Таблица 1. Зависимость ширины диаграммы направленности Q от значения раскрыва антенны y_2 .

Table 1. Dependence of the radiation pattern width Q on the antenna aperture value y_2 .

Частота, Frequency ГГц	Плоскость Plane	Регулируемый параметр Adjustable Parameter	Значения раскрыва y_2 Opening values				
			10 мм	20 мм	30 мм	40 мм	50 мм
3	$\theta = 90^\circ$	1 сторона	50.9	57.1	53.9	52.0	50.9
		2 стороны	94,4	77,9	67,1	60,7	56,6
	$\varphi = 0^\circ$	1 сторона	80.1	86.0	89.1	90.9	92
		2 стороны	70,1	78,9	85,4	88,8	90,0
8	$\theta = 90^\circ$	1 сторона	93.0	66.0	65.2	69.3	66.2
		2 стороны	113.0	78,5	81,5	80,7	77,0
	$\varphi = 0^\circ$	1 сторона	40.1	41.1	39.0	36.1	35.9
		2 стороны	76,2	77,2	72,9	62,4	59,3
14	$\theta = 90^\circ$	1 сторона	55.3	44.2	56.4	61.2	58.0
		2 стороны	60.4	42.6	71.1	83.8	71.8
	$\varphi = 0^\circ$	1 сторона	57.8	51.9	41.7	40.0	38.3
		2 стороны	68.8	40.1	36.8	38.9	39.9
19	$\theta = 90^\circ$	1 сторона	38.6	41.3	46.3	44.6	50.8
		2 стороны	51.0	56.4	57.8	49.7	56.8
	$\varphi = 0^\circ$	1 сторона	38.2	36.8	39.8	40.3	40.1
		2 стороны	40.1	38.8	43.4	44.0	44.4
24	$\theta = 90^\circ$	1 сторона	35.3	54.8	44.9	43.5	45.9
		2 стороны	41.0	61.8	59.9	50.6	54.9
	$\varphi = 0^\circ$	1 сторона	28.0	26.8	28.4	27.2	28.5
		2 стороны	40.6	32.1	31.4	28.4	28.9

Самым распространённой формой резонатора в антенне Вивальди является круг, который является частным случаем эллипса. Так как стоит задача исследовать влияние различных форм резонатора на характеристики антенны, было принято решение промоделировать резонатор в форме эллипса, что даст возможность вытягивать его как по вертикали, так и по горизонтали. Для построения резонатора воспользуемся уравнением:

$$\frac{x^2}{a^2} + \frac{y^2}{b^2} = 1 \quad (3)$$

где: a – большая полуось эллипса;

b – малая полуось эллипса;

x – переменная, изменяемая в пределах от 0 до 100, определяющую функцию y , задающую изменение кривой эллипса;

На рис. 4 приведена компьютерная модель антенны Вивальди с токопроводящими пластинами в виде лепестков расположенными по одну сторону полоска с добавлением резонатора. Необходимо отметить, что резонатор добавлен к антенне с нижней стороны так, чтобы он являлся продолжением щели в обртаном направлении от направления излучения. Первоначально было рассмотрено расположение резонатора на плоскости антенны без изменения ее размеров, по отношению к антенне исследуемой до добавления резонатора.

Полученная модель антенны показала, что диапазон частот сместился в сторону высоких частот. После выставленной оптимизации антенны по уровню КСВ не превышающего значения 2 в диапазоне частот от 3 до 24 ГГц была получена антенна с размерами превышающими антенну без резонатора, что свидетельствует о том, что резонатор необходимо разместить дополнительно к антенне представленной на рис. 1. Добавление резонатора к антенне, представленной на рис. 1, увеличивает размер антенны на величину

равной сумме значения малой полуоси резонатора b и отступ от нижнего края резонатора. Значение отступа было определено в процессе исследования и так как его размер минимально влияет на характеристики антенны размер был задан равный 5 мм, чтобы не увеличивать размеры антенны с одной стороны и с другой стороны, чтобы переход под резонатором не был слишком узким.

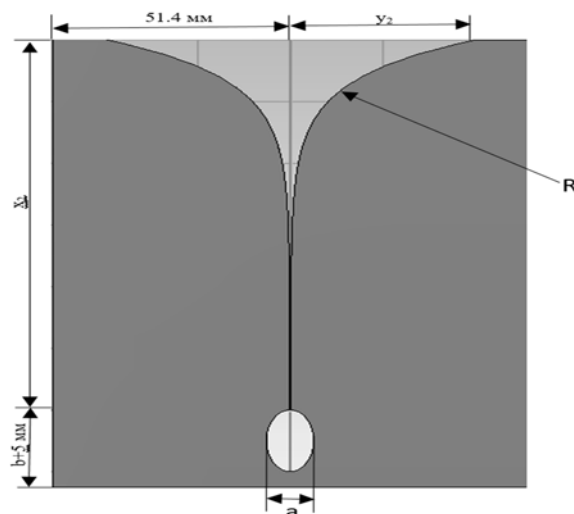


Рис. 4. Компьютерная модель антенны Вивальди с резонатором
Fig. 4. Computer model of a Vivaldi antenna with a resonator

В процессе моделирования были получены значения КСВ в диапазоне частот от 3 до 24 ГГц при изменении формы резонатора. Были исследованы три разные формы резонатора, когда малая a и большая b полуоси резонатора принимали разные значения, а именно в случаях при которых a больше b эллипс вытянут по горизонтали, a меньше b эллипс вытянут по вертикали и a равно b это круг.

Так было установлено, что при разных формах в значениях КСВ происходят всплески на разных частотах, например, когда эллипс вытянут по вертикали КСВ лучше практически во всем диапазоне всплеск наблюдается только на частотах от 7 до 9 ГГц, а в случае, когда эллипс вытянут по горизонтали, наблюдается обратная ситуация.

На рис. 5 показано изменение значения КСВ в зависимости от формы резонатора, где кривой 1 соответствует случай, когда резонатор представлен в форме круга (a равен 10 мм, b равен 10 мм), кривой 2 – когда резонатор вытянут по горизонтали (a равен 25 мм, b равен 10 мм), кривой 3 – когда резонатор вытянут по вертикали (a равен 2 мм, b равен 10 мм).

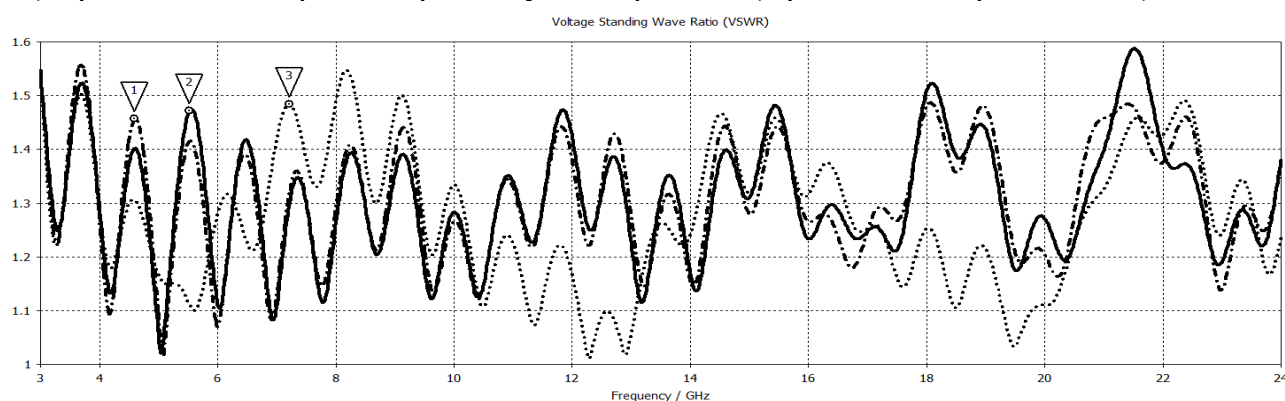


Рис. 5. Изменение значения КСВ в зависимости от формы резонатора
Fig. 5. Changing the SWR value depending on the shape of the resonator

При дальнейшем изменении формы и размеров резонатора было замечено, что на КСВ влияет значение периметра резонатора что соотносится с теорией о том, что сигнал идет вдоль периметра резонатора и возвращается обратно в точку подключения источника питания и от того вернется ли сигнал в фазе или противофазе для определенной частоты из частотного диапазона, зависит улучшиться КСВ на этой частоте или ухудшиться.

В процессе исследования было замечено, что при равных значениях периметра резонатора для вытянутой по вертикали формы значения КСВ лучше, чем в других случаях, это связано с тем, что источник питания лучше согласован при такой форме, так как угол перехода из щели в резонатор в этом случае меньше, чем в случае, когда резонатор вытянут по горизонтали.

Так же выполнена задача по определению влияния формы резонатора и ее размеров на ширину диаграммы направленности и КСВ. Как показали результаты исследования на КСВ и диаграмму направленности влияет как значение периметра резонатора, так и его форма. При вытянутом вертикально резонаторе сигнал полностью проходит по резонатору и возвращается обратно, а в других случаях переход из щели вместе соединения источника питания в резонатор оказывается слишком резким и часть сигнала рассеивается в связи с высоким сопротивлением. Применение формы резонатора в виде эллипса дает возможность уменьшить высоту антенны Вивальди, чем в случае если формой резонатора будет круг.

Вывод. В результате выполненной работы выявлена связь между разными типами антенн Вивальди, экспериментально подтверждено, что зависимости КСВ и ширины диаграммы направленности от топологии антенны остались те же, изменились только их значения. Это позволяет нам использовать единую математическую модель с определенной корректировкой коэффициентов. Так же построена компьютерная модель антенны Вивальди с резонатором, из которой видно, что общая высота антенны увеличилась относительно предыдущих антенн в диапазоне частот от 3 до 24 ГГц.

Определено влияние формы и размеров резонатора антенны Вивальди на формирование диаграммы направленности и значение КСВ. Несмотря на увеличение размеров антенны добавление резонатора улучшило значение КСВ.

В итоге, имея математическую модель и результаты влияния резонатора на характеристики антенны можно получить антенну Вивальди с необходимой шириной диаграммы направленности и с улучшенным КСВ относительно предыдущих типов антенны. Исследование различных типов антенн Вивальди и их сравнительный анализ дает возможность применения различных типов антенн Вивальди для конкретных задач с учетом их особенностей.

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. Mehdi-pour, 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. Исследование топологии антенны Вивальди с зеркальным расположением лепестков / Т. Г. Асланов, С. А. Ибрагимов // Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2018. – Т. 45, № 3. – С. 76-84. DOI 10.21822/2073-6185-2018-45-3-76-84.
15. Ибрагимов, С. А. Исследование топологии антенны Вивальди / С. А. Ибрагимов // Компьютерные технологии и моделирование в науке, технике, экономике, образовании и управлении: тенденции и развитие: Материалы международной научно-технической конференции, Махачкала, 16–18 октября 2019 года. – Махачкала: Дагестанский государственный технический университет, 2019. – С. 292-295.
16. Асланов, Т. Г. Исследование топологии антенны Вивальди / Т. Г. Асланов, С. А. Ибрагимов // Научные исследования: итоги и перспективы. – 2020. – Т. 1, № 4. – С. 28-35. – DOI 10.21822/2713-220X-2020-1-4-28-35.
17. Асланов, Т. Г. Исследование зависимости ширины диаграммы направленности от основных параметров топологии антенны с расширяющейся щелью / Т. Г. Асланов, С. А. Ибрагимов // Использование цифровых образовательных платформ в образовательном процессе : Сборник научных трудов Международной научно-практической конференции, VI Всероссийской научно-практической конференции, Махачкала, 25 июня 2021 года. – Махачкала: Типография "Rizo press" (РИЗО ПРЕСС ИП Гаджиев С.С.), 2021. – С. 5-12.
18. Ибрагимов, С. А. Формирование топологии антенны Вивальди с применением искусственной нейронной сети / С. А. Ибрагимов // Неделя науки - 2021 : Сборник материалов 42 итоговой научно-технической конференции преподавателей, сотрудников, аспирантов и студентов ДГТУ, Махачкала, 17–22 мая 2021 года. – Махачкала: Типография ФОРМАТ, 2021. – С. 83-85.
19. Ибрагимов, С. А. Исследование зависимостей антенны Вивальди с двумя радиусами кривых в программном комплексе электродинамического моделирования / С. А. Ибрагимов // Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. – 2022. – Т. 49, № 1. – С. 49-58. – DOI 10.21822/2073-6185-2022-49-1-49-58.
20. Свидетельство о государственной регистрации базы данных № 2022620747 Российская Федерация. База данных автоматизации разработки топологии антенны Вивальди с экспоненциальной кривой по данным ширины диаграммы направленности и параметрам ее топологии : № 2022620623 : заявл. 29.03.2022 : опубл. 05.04.2022 / С. А. Ибрагимов, Т. Г. Асланов ; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Дагестанский государственный технический университет».

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 // 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> (In Russ)
6. Maaskant R., Analytical and Numerical Modeling of Currents on Vivaldi Antennas for Radio Astronomy, ASTRON Eindhoven University of Technology - 100p. 2003.
7. 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., Pt.H, 1988; 135 (2): 89-92,
10. S. Zhong, X. Yan, X. Liang, "UWB planar antenna technology" Front. Electr. Electron. Eng. China, 2008; 3 (2): 136-144, 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, 2012: 6 . 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, June 2004; 3: 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; II WCE 2011, July 6 - 8, 2011, London, U.K.
14. Aslanov, T. G. Research of the topology of the Vivaldi antenna with a mirror arrangement of petals/ T. G. Aslanov, S. A. Ibragimov. *Herald of Daghestan State Technical University. Technical Sciences.* 2018; 45(3):76-84. – DOI 10.21822/2073-6185-2018-45-3-76-84. (In Russ)
15. Ibragimov, S. A. Research of the antenna topology Vivaldi/S. A. Ibragimov. Computer technologies and modeling in science, technology, economics, education and management: trends and development: Materials of the international scientific and technical conference, Makhachkala, October 16-18, 2019. Makhachkala: Daghestan State Technical University, 2019; 292-295. (In Russ)
16. Aslanov, T. G. Research of the antenna topology Vivaldi/T. G. Aslanov, S. A. Ibragimov. *Scientific research: results and prospects.* 2020; 1(4): 28-35. – DOI 10.21822/2713-220X-2020-1-4-28-35. (In Russ)
17. Aslanov, T. G. Study of the dependence of the beam width on the main parameters of the topology of an antenna with an expanding gap/T. G. Aslanov, S. A. Ibragimov//Use of digital educational platforms in the educational process: Collection of scientific works of the International Scientific and Practical Conference, VI All-Russian Scientific and Practical Conference, Makhachkala, June 25, 2021. - Makhachkala: Rizo Press Printing House (RIZO PRESS IP Hajiyev S.S.), 2021: 5-12. (In Russ)
18. Ibragimov, S. A. Formation of the topology of the Vivaldi antenna using an artificial neural network/S. A. Ibragimov//Science Week - 2021: Collection of materials 42 of the final scientific and technical conference of teachers, employees, graduate students and students of DSTU, Makhachkala, May 17-22, 2021. - Makhachkala: Printing house FORMAT, 2021: 83-85. (In Russ)
19. Ibragimov, S. A. Research of dependencies of the Vivaldi antenna with two radii of curves in the program complex of electrodynamic modeling. S. A. Ibragimov. *Herald of Daghestan State Technical University. Technical Sciences.* 2022; 49(1): 49-58. – DOI 10.21822/2073-6185-2022-49-1-49-58. (In Russ)
20. Certificate of State Registration of Database No. 2022620747 of the Russian Federation. Database of automation of development of Vivaldi antenna topology with exponential curve according to beam width data and parameters of its topology: No. 2022620623: declared. 29.03.2022: publ. 05.04.2022 /S. A. Ibragimov, T. G. Aslanov; applicant Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education "Daghestan State Technical University." (In Russ)

Сведения об авторах:

Асланов Тагирбек Гайдарбекович, кандидат технических наук, доцент, старший научный сотрудник лаборатории №3 «Информационные процессы в автоматизированных машиностроительных системах»¹, кафедра программного обеспечения, вычислительной техники и автоматизированных систем²; tabasik@gmail.com; ORCID: 0000-0002-5594-3554

Ибрагимов Султансаид Абдуллагаджиевич, аспирант, кафедра программного обеспечения, вычислительной техники и автоматизированных систем ; Sult_992@mail.ru

Information about authors:

Tagirbek G. Aslanov, Cand. Sci. (Eng.), Assoc. Prof., Senior Researcher at laboratory N3 "Information processes in automated engineering systems"¹, Department of Software, Computer Engineering and Automated Systems²; tabasik@gmail.com; ORCID: 0000-0002-5594-3555

Sultansaid A. Ibragimov, Postgraduate Student, Department of Software, Computer Engineering and Automated Systems; Sult_992@mail.ru

Конфликт интересов/Conflict of interest.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов/The authors declare no conflict of interest.

Поступила в редакцию/Received 07.11.2023.

Одобрена после/рецензирования Revised 02.12.2023.

Принята в печать/ Accepted for publication 02.12.2023.