

УДК 621.396.67

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК СХЕМЫ ЗАПИТКИ НЕСБАЛАНСИРОВАННОГО ЭЛЕМЕНТА ВИВАЛЬДИ НА ЕГО ЧАСТОТНЫЕ И НАПРАВЛЕННЫЕ СВОЙСТВА

А. С. Гвоздарев, Т. К. Артёмова, А. В. Петров

Ярославский государственный университет им. П.Г. Демидова

Статья поступила в редакцию 5 декабря 2016 г.

Аннотация. В работе приведены результаты проведённого электродинамического моделирования несбалансированного элемента Вивальди. Представлен анализ влияния геометрических характеристик схемы запитки, выполненной в форме возбуждающего "веера", на его частотные и направленные свойства: резонансные частоты, частоты наилучшего согласования, полосы частот согласования, уровень боковых лепестков, ширину главного лепестка, коэффициент усиления. Было обнаружено, что коэффициент усиления, обеспечиваемый исследуемой геометрией, слабо чувствителен к изменению угла поворота от 0° до 100° и угла раскрыва от 30° до 120° и равен 10 дБ. В диапазоне перестройки обоих углов от 0° до 110° достигается наиболее низкий и практически постоянный уровень боковых лепестков равный -10 дБ. При повороте запитывающего "веера" вплоть до 110° или увеличении его угла раскрыва до 120° ширина главного лепестка диаграммы направленности по уровню -3 дБ остается практически постоянной и равной своему минимальному значению 70° . Отмечено, что базовая схема запитки обеспечивает наилучшие характеристики направленности, однако далека от наилучших частотных характеристик и согласования антенного элемента с источником сигнала. Так в частности, антенна является эффективно согласованной для любого рассматриваемого диапазона раскрывов возбуждающего веера. При этом уменьшение (по сравнению с базовой геометрией) угла раскрыва на 10° обеспечивает увеличение согласования на

19 дБ, а поворот на ту же величину - на 11 дБ. Было показано, что исследованная геометрия может быть эффективно использована для построения широкополосной антенны с механической перестройкой геометрических параметров "веера" запитки, обеспечивающей коэффициент усиления до 10 дБ, уровень боковых лепестков до -10 дБ, с высоким уровнем согласования в различных частотных поддиапазонах.

Ключевые слова: антенна Вивальди, схема запитки, согласование, уровень боковых лепестков, коэффициент усиления, исследование, моделирование.

Abstract. The results of a numerical electromagnetic simulation of an unbalanced Vivaldi element are presented. The study is devoted to the analysis of a feeding scheme geometry (designed in the form of a radial stripline stub) influence upon the directivity and frequency parameters: resonant frequencies, best input impedance matching frequencies, input impedance matching frequency bands, sidelobe levels, mainlobe beamwidths, antenna gain. It was found that the antenna gain, provided by the geometry under consideration, is weakly sensitive to the deviations of a radial stub flare angle from 0° to 100° and angular displacement from 30° to 120° and equals to 10 dB. In the tuning range of both angles from 0° to 110° the lowest possible, almost constant and equal to -10 dB sidelobe level is achieved. For an angular displacement of a radial stub up to 110° and flare angle deviations up to 120° the mainlobe half-power beamwidths stays practically constant and equal to its minimum value of 70° . It was observed that the initial feeding geometry provides the best possible directivity characteristics but is far from optimal for frequency characteristics and matching the antenna with the input signal source. In particular the antenna is effectively matched with the input source for almost all radial stub flare angles under consideration. Nevertheless the radial stub flare angle diminishing by 10° can possibly yield input source matching improvement up to 19 dB and angular displacement diminishing by the same value delivers up to 11 dB. Hereby it was demonstrated that such a feeding geometry can be effectively utilized to synthesize an ultra-wideband antenna with mechanical steering of the feeding radial stripline

stub parameters yielding 10 dB gain, -10 dB sidelobe level and high input signal source matching for different frequency subbands.

Key words: Vivaldi antenna, feeding geometry, input matching, side-lobe level, gain, analysis, simulation.

Введение

Существующая тенденция к конвергенции приемопередающих элементов различных частотных диапазонов в рамках единого функционального устройства существенно актуализирует задачи разработки и исследования характеристик широкополосных антенных элементов. Одним из популярных на данный момент решений является использование излучающих элементов типа Вивальди. Антенный элемент Вивальди (ЭВ), относящийся к классу микрополосковых антенн бегущей волны с непрерывно изменяющимся раскрывом, помимо эффективности и компактности обладает привлекательной особенностью – способностью работать в очень широком диапазоне частот и создавать симметричные диаграммы направленности с высоким коэффициентом усиления и малыми боковыми лепестками [1]-[6].

Хорошо известно, что характеристики микрополосковых антенн существенным образом зависят от параметров схемы запитки. Существующие аналитические методы исследования характеристик излучения ЭВ, как правило, ограничиваются приближённым анализом, основанным на аппроксимации формы раскрыва антенны, и не касаются элементов запитки антенны. Как следствие, ввиду невозможности нахождения аналитического решения все исследования, посвящённые данному вопросу, носят либо экспериментальный характер, либо характер численного моделирования [7] – [8].

Электродинамическая модель элемента Вивальди

В работе за основу был взят несбалансированный ЭВ со схемой запитки, включающей возбуждающий веер [9] – [12], геометрия которого представлена на рисунке 1 (размеры приведены в миллиметрах).

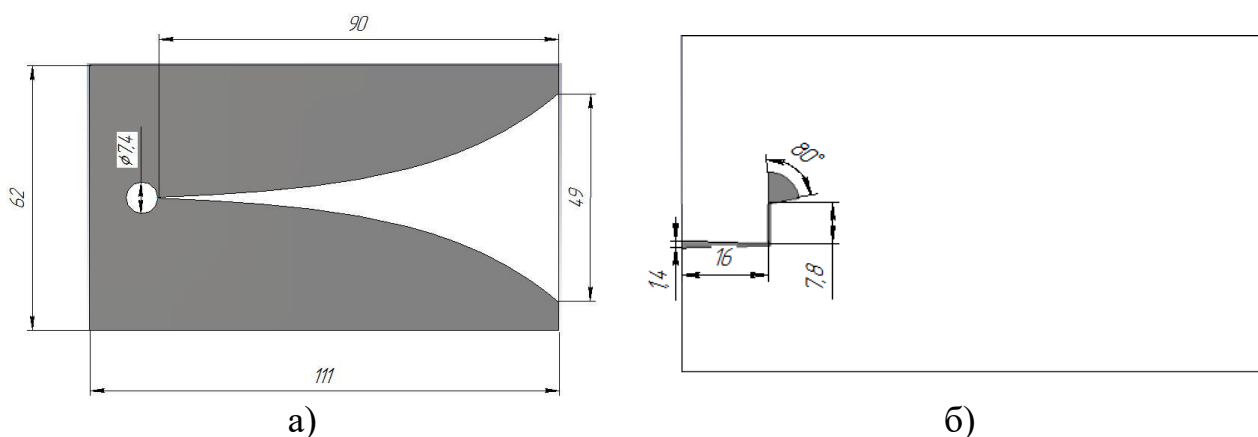


Рис. 1 Геометрия раскрыва (а) и схемы запитки (б) рассматриваемого ЭВ

Для анализа характеристик ЭВ было проведено электродинамическое моделирование в среде CST Microwave Studio, позволяющей проводить численный анализ излучающих структур. Для решения в диапазоне частот 0 – 6 ГГц был использован метод конечных интегралов на гексагональной сетке в среде с количеством ячеек на длину волны равным 10. Толщины проводящего слоя и подложки составляли 0,0074 мм и 0,46 мм соответственно.

Чтобы удерживать диэлектрические потери на низком уровне, для подложки был выбран широко используемый на практике материал Rogers 4003С с диэлектрической постоянной $\epsilon = 3,55 \text{ Ф}\cdot\text{м}^{-1}$ и тангенсом угла диэлектрических потерь $\text{tg}\delta = 0,0027 \text{ рад}$.

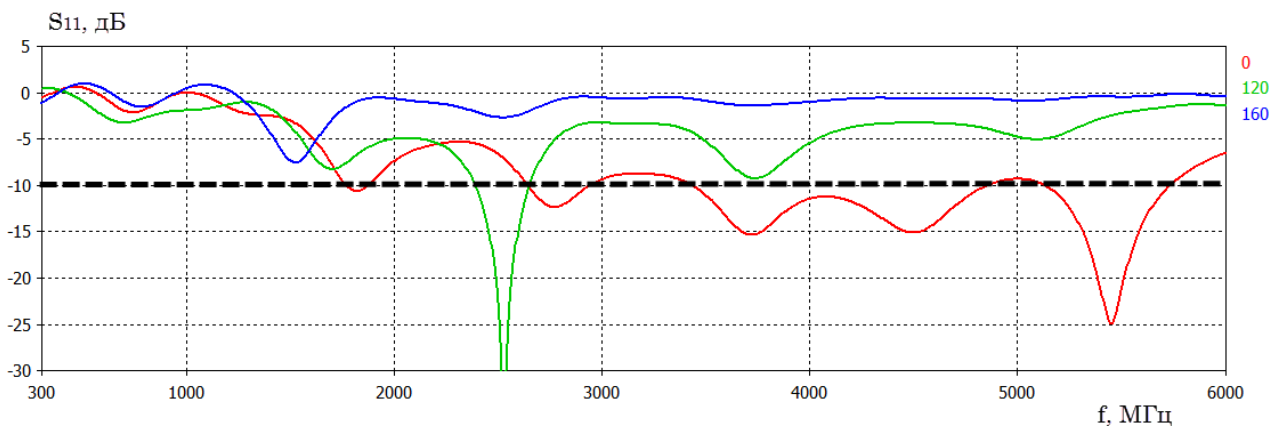
Целью работы являлось исследование влияние угла поворота (φ) и раскрыва (α) возбуждающего веера на частотные и направленные свойства антенны. Поворот возбуждающего веера осуществлялся против часовой стрелки с шагом в 10° в диапазоне от 0° до 170° относительно точки его соприкосновения с микрополосковой линией. Угол раскрыва возбуждающего веера изменялся от 10° до 180° с шагом в 10° .

Результаты электродинамического моделирования

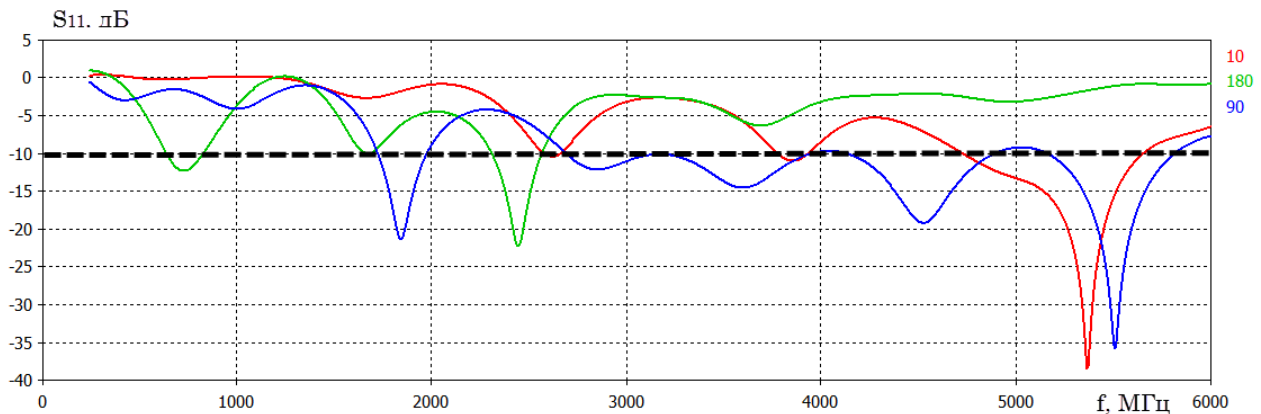
Результаты моделирования позволяют сделать заключение, что изменение угла раскрыва и поворота возбуждающего веера существенным образом сказываются как на частотных свойствах (см., например, рис. 2), так и на

характеристиках направленности антенны (см., например, рис. 3). Для анализа характеристик были произведены следующие этапы.

Для определения диапазонов частот, в которых антенна эффективно согласована с источником сигнала, была проанализирована частотная зависимость коэффициента отражения по входу антенны, при этом полоса частот работы антенны (эффективного согласования) находилась как диапазон частот, для которого величина коэффициента отражения опускалась ниже уровня -10 дБ.



а



б

Рис. 2 Частотная зависимость коэффициента отражения по входу (S_{11}) для: а) значений: угла поворота возбуждающего веера 0° , 120° и 160° ; б) значений угла раскрыва возбуждающего веера 10° , 90° и 180°

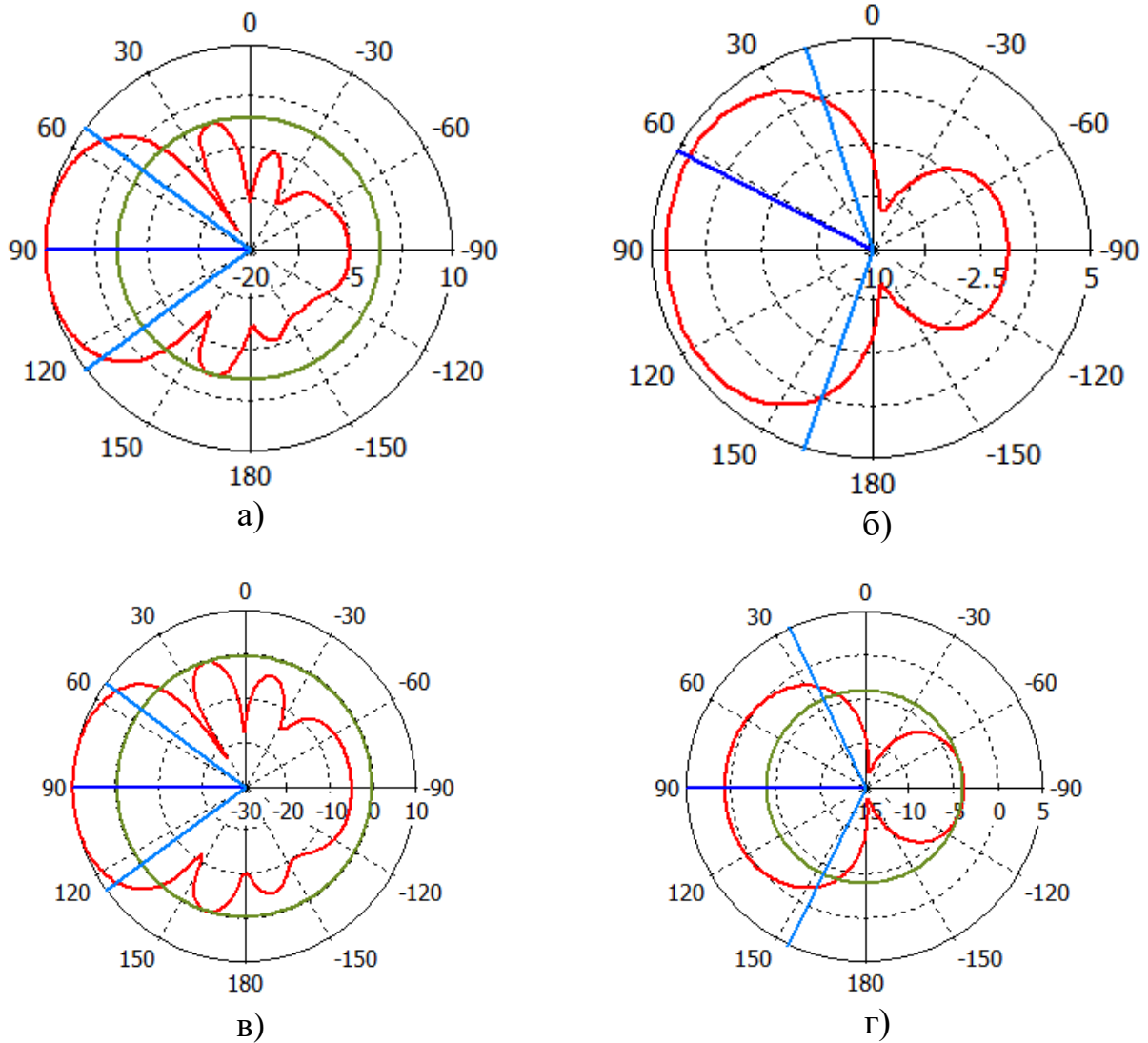


Рис. 3 Вертикальная диаграмма направленности при:
 угле раскрытия возбуждающего веера 10° (а) и 130° (б),
 угле поворота возбуждающего веера 0° (в) и 160° (г)

Для найденных диапазонов были определены резонансные частоты антенны, а также значения, соответствующие наилучшему возможному согласованию антенны со входом.

На найденных резонансных частотах анализировались следующие характеристики направленности антенны: коэффициент усиления, уровень боковых лепестков, ширина диаграммы направленности (определяемая по уровню -3 дБ).

Для удобства анализа результаты, полученные при варьировании φ и α , совмещались на одном графике (см. рисунки 4, 7-9).

На рисунках 5 и 6 представлены зависимости частотных характеристик исследуемого антенного элемента. На них нанесены найденные резонансные частоты (центральная точка) и отложены полосы частот, как диапазон, в котором S_{11} опускается ниже уровня -10 дБ.

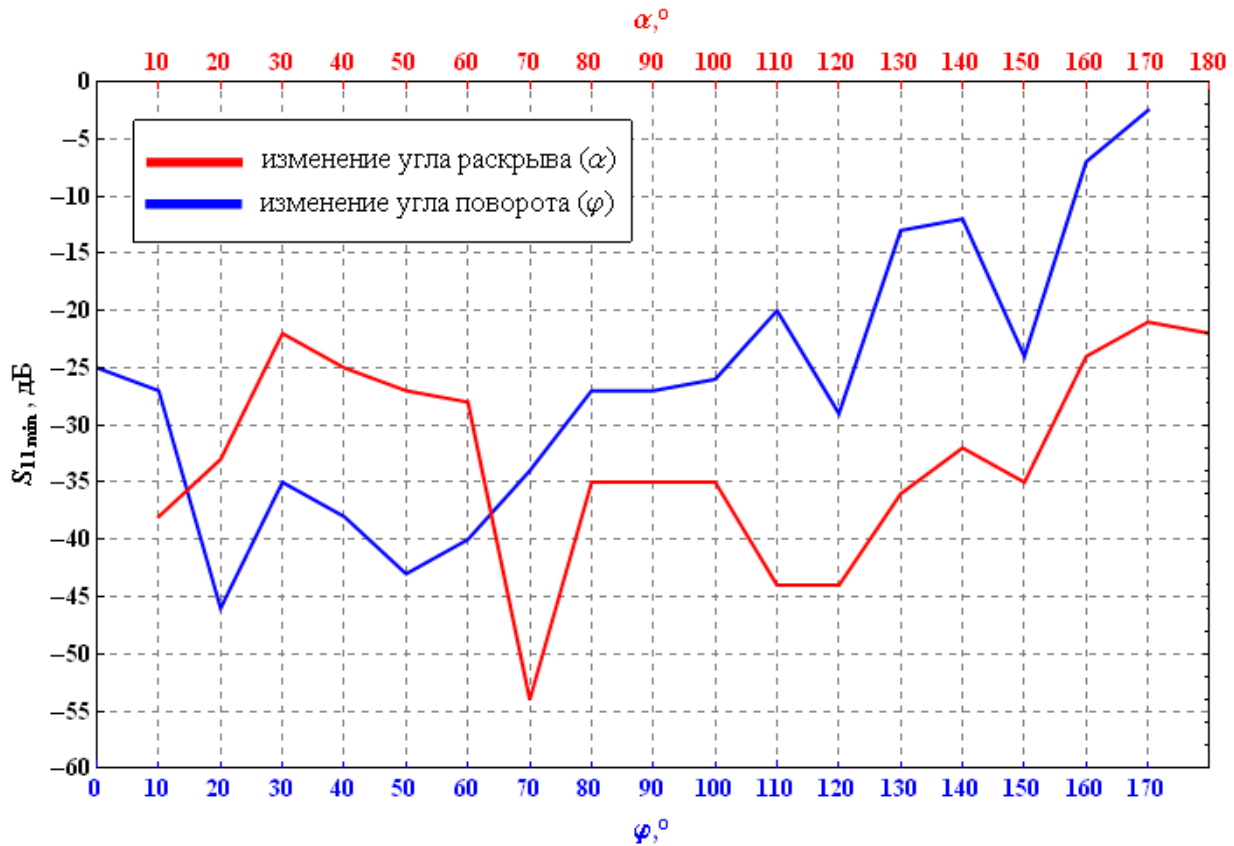


Рис. 4 Зависимость минимального значения коэффициента S_{11} от величины варьируемых параметров схемы запитки

Анализ зависимостей наилучшего достижимого согласования (см. рисунок 4) показывает, что антенна является эффективно согласованной для любого рассматриваемого диапазона раскрытов возбуждающего веера. Однако эффективность согласования существенно ухудшается вплоть до полного рассогласования для больших углов поворота (более 130°), что соответствует развороту «веера» практически против направления излучения. Минимальное значение коэффициента S_{11} , равное -54 дБ, достигается при $\alpha=70^\circ$. Видно, что с

точки зрения согласования антенны с источником сигнала базовая геометрия не обеспечивает наилучших характеристик. В частности, при сохранении φ на исходном уровне за счёт уменьшения раскрыва «веера» относительно базового значения на 10° можно добиться выигрыша по величине S_{11} в 19 дБ или при сохранении α на исходном уровне за счёт уменьшения угла поворота «веера» относительно базового значения на 10° можно добиться в 11 дБ.

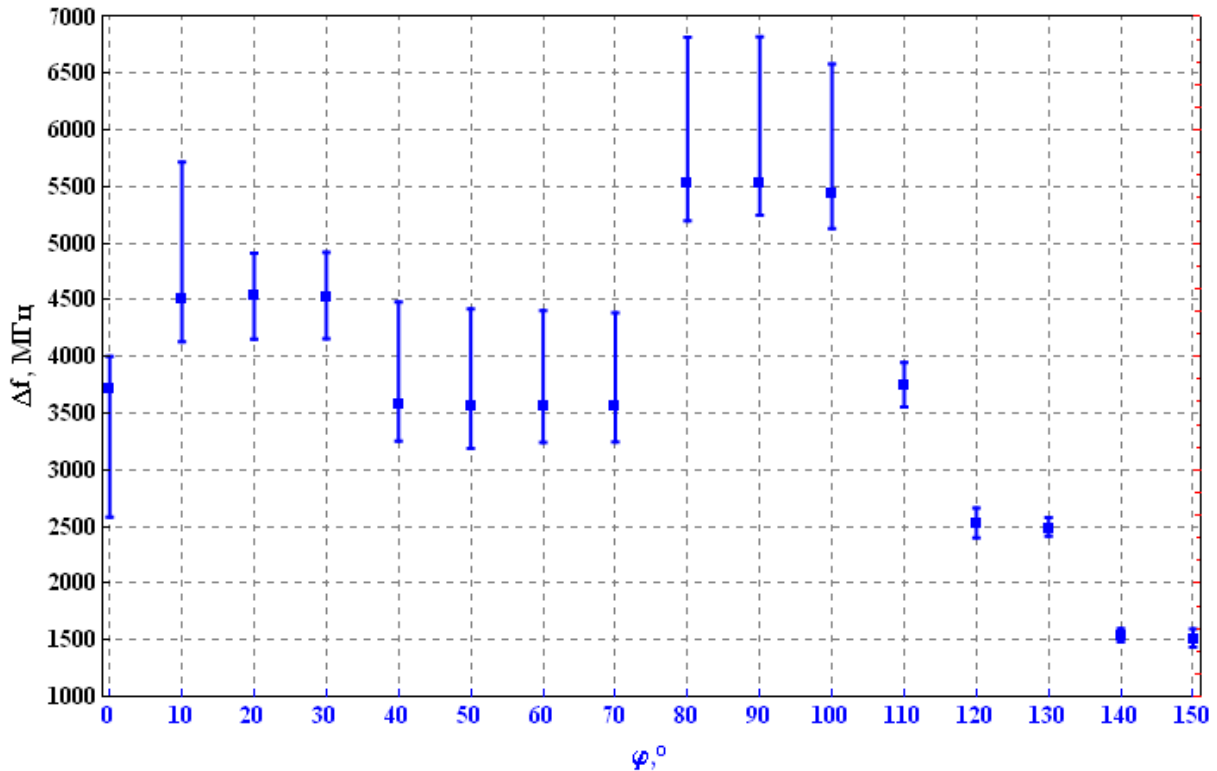


Рис. 5 Зависимость максимально достижимой полосы частот от величины угла поворота возбуждающего веера

Стоит отметить, что при этих же углах поворота (начиная с 110°) антенна теряет свои широкополосные свойства (см. рисунок 5) и становится сначала узкополосной с высокой степенью согласования (при $\varphi = 110^\circ$ - 120°), после чего согласование теряется полностью. Однако при углах поворота до 110° она может быть эффективно использована как широкополосный излучающий элемент. При этом изменение угла поворота от 40° до 70° и от 80° до 100° практически не меняет ни резонансной частоты, ни полосы пропускания антенны.

Схожая зависимость наблюдается при изменении угла раскрытия веера (см. рисунок 6). Так в диапазоне значений α от 90° до 150° частотные свойства сохраняются практически постоянными, однако отличительной от влияния параметра φ особенностью является то, что широкополосные свойства теряются не только при больших (более 150°), но и при малых (менее 30°) углах раскрытия.

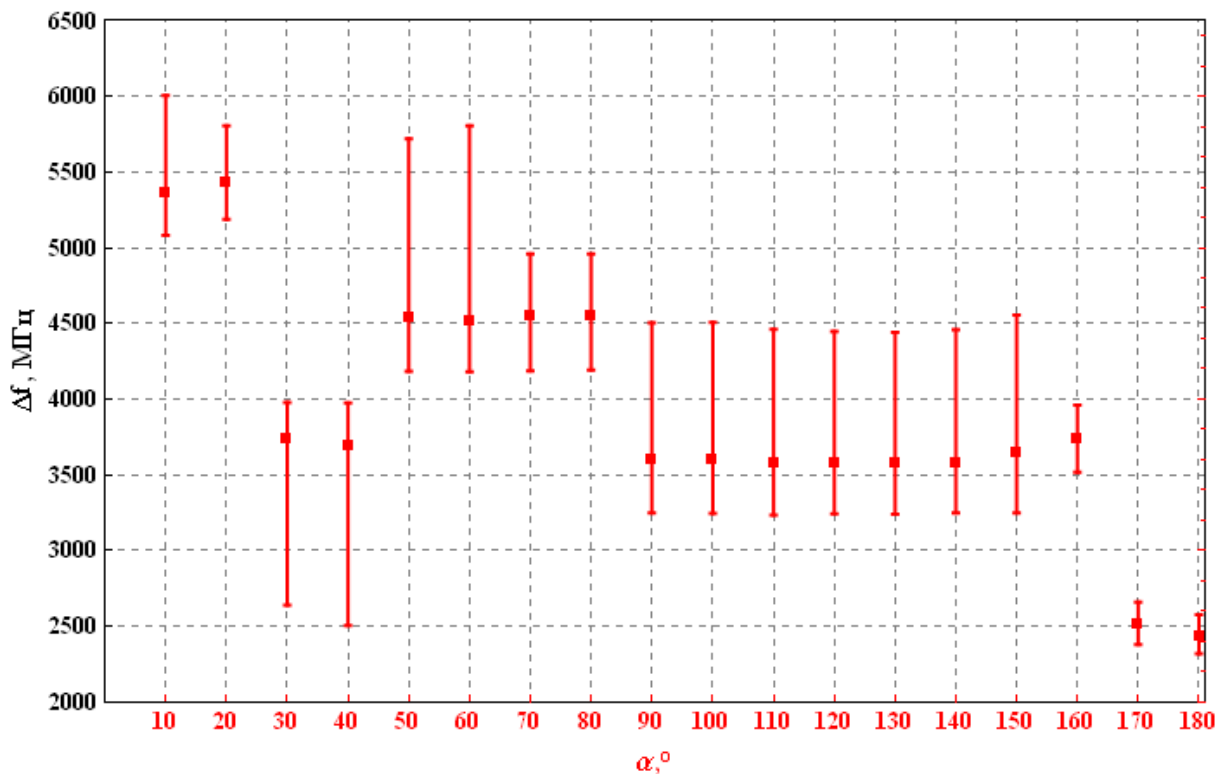


Рис. 6 Зависимость максимально достижимой полосы частот от величины угла раскрытия возбуждающего веера

Анализ коэффициента усиления (см. рисунок 7) показывает, что он является слабо чувствительным к изменению угла поворота в диапазоне от 0° до 100° и угла раскрытия в пределах от 30° до 120° - значения близки к 10 дБ. Это означает, что изменение геометрии возбуждающего веера антенны позволяет добиваться желаемой полосы пропускания, резонансных частот и степени согласования без потери усиления. С увеличением угла поворота более 110°

градусов коэффициент усиления существенно падает, что, как уже указывалось, объясняется ухудшением согласования антенны с источником.

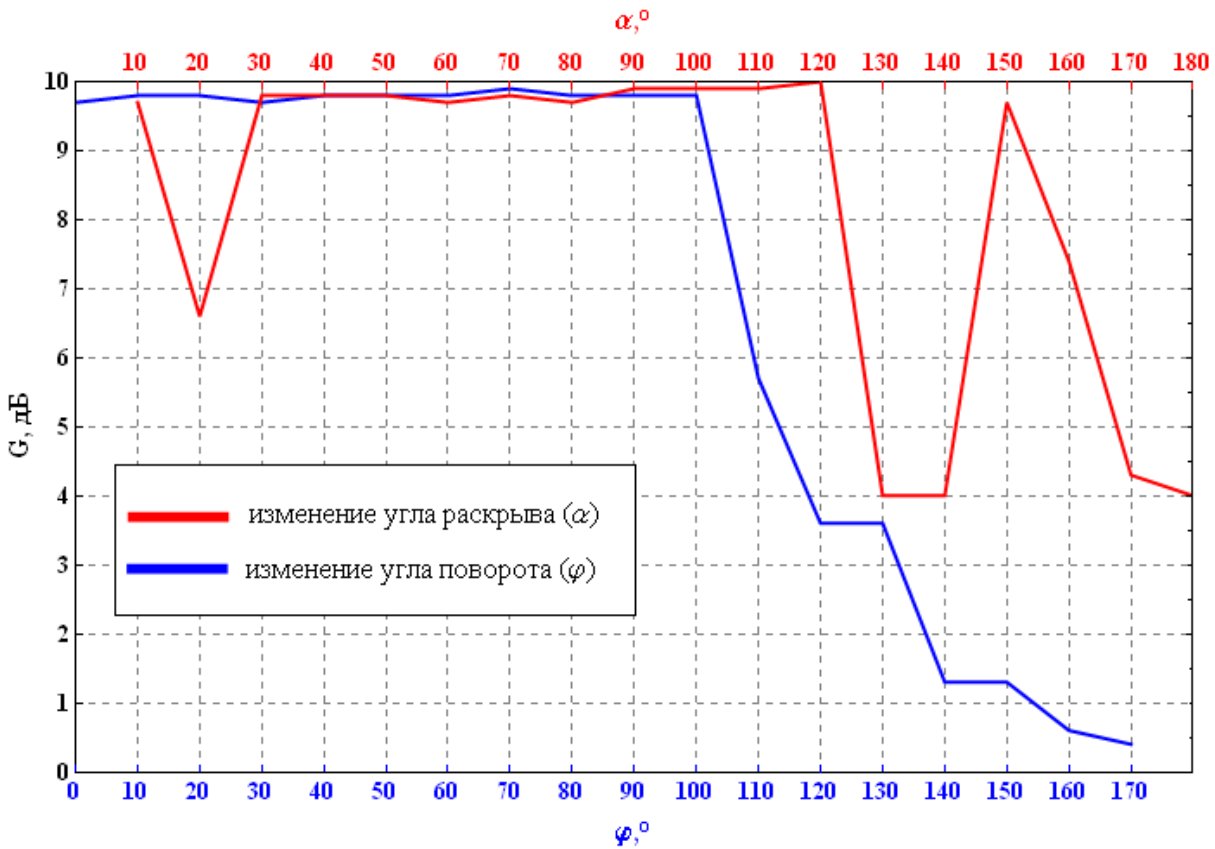


Рис. 7 Зависимость коэффициента усиления от величины варьируемых параметров схемы запитки

Значения как угла поворота, так и угла раскрытия в диапазоне от 0 до 110° обеспечивают наиболее низкий и практически постоянный уровень боковых лепестков (УБЛ) равный -10 дБ (см. рисунок 8). При величинах параметров φ и α более 110° уровень боковых лепестков существенно поднимается (вплоть до -4 дБ), что объясняется изменением формы диаграммы направленности: главный лепесток расширяется, диаграмма принимает двухлепестковый характер с передним и задним лепестком.

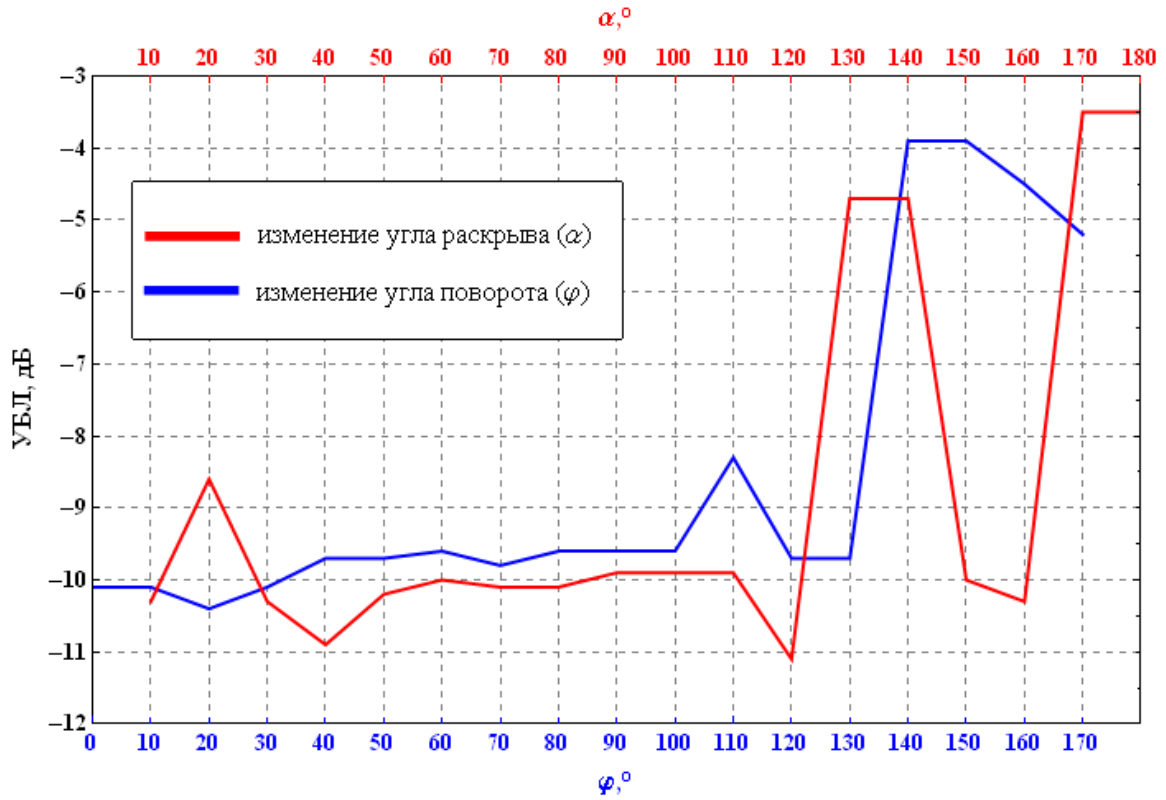


Рис. 8 Зависимость уровня боковых лепестков от величины варьируемых параметров схемы запитки

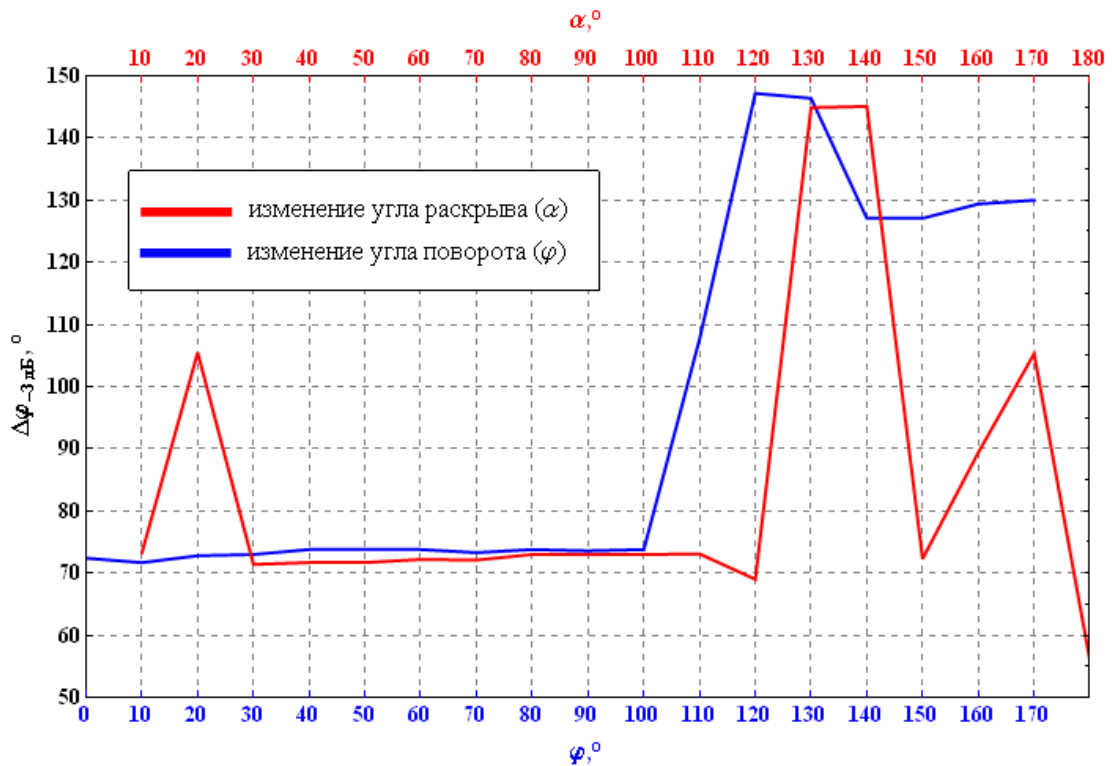


Рис. 9 Зависимость ширины главного лепестка от величины варьируемых параметров схемы запитки

Стоит отметить, что управление шириной диаграммы направленности в диапазоне эффективного функционирования антенны (см. рисунок 9) возможно лишь за счет изменения раскрыва возбуждающего веера в диапазоне от 10° до 30° , при этом диаграмму направленности можно расширить не более чем в полтора раза, как следствие, теряя по усилению порядка 3,5 дБ.

Заключение

Анализ результатов моделирования позволяет сделать следующие выводы относительно функционирования построенной модели ЭВ:

- антенна является эффективно согласованной для любого рассматриваемого диапазона раскрывов возбуждающего веера, достигая коэффициента согласования в -55 дБ;
- эффективность согласования для больших углов поворота существенно ухудшается вплоть до полной потери согласования;
- антенна может эффективно использоваться в качестве широкополосного излучающего элемента в диапазоне углов поворота возбуждающего веера до 110° (обеспечивая ширину полосы до 1,6 ГГц), и в диапазоне варьирования угла раскрыва веера не менее 30° , но не более 150° ;
- изменение же как угла поворота, так и угла раскрыва до 110° обеспечивает наиболее низкий и практически постоянный уровень боковых лепестков равный -10 дБ, в то время как при значениях α и φ более 110° уровень боковых лепестков ухудшается существенно: с -10 до -4 дБ.

В результате проведенного исследования можно предложить создание широкополосной антенны типа Вивальди с механической перестройкой геометрических параметров веера запитки, которая бы обеспечивала коэффициент усиления до 10 дБ, уровень боковых лепестков до -10 дБ, с высоким уровнем согласования на различных частотных поддиапазонах.

Литература

1. Yngvesson The tapered slot antenna – a new integrated element for millimeter-wave applications // IEEE Transactions on microwave theory and techniques, Vol. 37, No. 2, February 1989, pp. 365-374.
2. Gibson P.J. The Vivaldi aerial // Proc. 9th European Microwave Conference, 1979, Brighton, 17-20 September 1979. Pp. 103-105.
3. Wang H.Y. Rigorous analysis of tapered slot antennas on dielectric substrates // 10th International conference on antennas and propagation, 1997. Edinburgh, UK, 14-17 April, 1997.
4. Lee R.Q., Simons R.N. Advances in microstrip and printed antennas / John Wiley and Sons, 1997.
5. Банков С. Е., Дупленкова М. Д., Калошин В. А. Сверхширокополосная облучающая система на основе линейной решетки из антенн Вивальди для многолучевых гибридных антенн // Журнал радиоэлектроники [электронный журнал]. 2015. № 12. URL: <http://jre.cplire.ru/jre/dec15/18/text.html>.
6. Банков С.Е., Давыдов А.Г., Курушин А.А. Оценка параметров сверхширокополосной многолучевой гибридной линзовой антенны // Журнал радиоэлектроники [электронный журнал]. 2016. № 1. URL: <http://jre.cplire.ru/jre/jan16/2/text.html>.
7. Устройства СВЧ и антенны. Проектирование фазированных антенных решеток /Под ред. Д.И. Воскресенского. М: Издательство «Радиотехника», 2003. – 632 с.
8. Банков С.Е., Курушин А.А. Расчет антенн и СВЧ структур с помощью HFSS Ansoft v. 10 // М.: ООО «Оркада». 2009. – 250 с.
9. He X.X., Chen T., Wang X. A novel low RCS design method for X-band Vivaldi antenna // International journal of antennas and propagation, vol. 2012, article ID 218681, 6 pages, 2012.

10. Shin J. and Schaubert D. H. A parameter study of stripline-fed Vivaldi notch-antenna arrays // IEEE Transactions on antennas and propagation, vol. 47, no. 5, pp. 879-886, May 1999.
11. Shafieha J. H., Nourinia J., Ghobadi C. Probing the feed line parameters in vivaldi notch antennas // Progress in electromagnetics research B, Vol. 1, 2008, pp. 237-252.
12. Yang Y., Wang Y., Fathy A. E. Design of compact vivaldi antenna arrays for UWB see through wall applications // Progress in electromagnetics research, Vol. 82, 2008, pp. 401-418.