

АНАЛИЗ И СИНТЕЗ ШИРОКОПОЛОСНОЙ ПЛАНАРНОЙ ЩЕЛЕВОЙ АНТЕННЫ С ЭКСПОНЕНЦИАЛЬНЫМ ИЗМЕНЕНИЕМ ШИРИНЫ ЩЕЛИ ДЛЯ СИСТЕМ ШИРОКОПОЛОСНОГО ДОСТУПА

И.Г. Рязанов, А.А. Бякин, О.А. Белоусов

ФГБОУ ВПО «Тамбовский государственный технический университет»

Рецензент д-р техн. наук, профессор А.В. Иванов

Ключевые слова и фразы: анализ и синтез планарно-щелевых антенн; антенны с экспоненциальным изменением ширины щели; излучатели Вивальди; системы беспроводного широкополосного доступа.

Аннотация: Рассмотрены основные аспекты анализа и синтеза широкополосной планарной щелевой антенны с экспоненциальным изменением ширины щели, приведены результаты работы полученной антенны для беспроводных систем широкополосного доступа.

Современная беспроводная сеть должна обладать высокой скоростью передачи информации, широкополосностью, помехозащищенностью, быть недорогой в изготовлении и эксплуатации. Высокая скорость обмена данными и помехозащищенность были достигнуты за счет схемотехнических решений в устройствах обработки сигналов благодаря применению современных микропроцессорных элементов. Широкополосность достигается за счет использования современных типов антенн, полоса пропускания которых может составлять десятки гигагерц.

Основным типом антенны, применяемой в сетях с рабочей полосой частот в несколько гигагерц, является микрополосковые печатные антенны (**МПА**) (рис. 1).

Данный тип антенн имеет следующие достоинства:

- малые габариты;
- малая стоимость и технологичность производства;
- линейная и круговая типы поляризации;

Рязанов Илья Георгиевич – магистрант кафедры «Конструирование радиоэлектронных и микропроцессорных систем»; Бякин Алексей Алексеевич – магистрант кафедры «Конструирование радиоэлектронных и микропроцессорных систем», e-mail: byakinalex@gambler.ru; Белоусов Олег Андреевич – кандидат технических наук, доцент кафедры «Конструирование радиоэлектронных и микропроцессорных систем», ТамбГТУ, г. Тамбов.

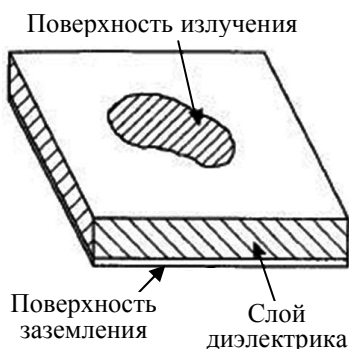


Рис.1. Структура МПА

- легкость в производстве двухчастотных и двухполяризационных антенн;
- не требует резонансной поддержки;
- легко сопрягается с микроволновыми интегральными схемами;
- питающие линии могут быть изготовлены вместе с антенной.

К недостаткам МПА можно отнести:

- узкую полосу пропускания;
- малое усиление (порядка 6 дБ);
- большие резистивные потери в питающих линиях антенных решеток (АР);

– большинство МПА производят излучение только в половину пространства;

– антенные решетки из МПА требуют сложную структуру питающих линий.

Существуют способы, чтобы свести к минимуму влияние некоторых из этих ограничений. Например, пропускная способность может быть увеличена более чем на 60 % с помощью специальных методов; низкое усиление и ограниченную мощность можно преодолеть с помощью конфигурации АР [1, 5].

За исследуемый объект взята микрополосковая щелевая антенна с экспоненциальным раскрытием щели, также известная как антенна Вивальди.

Антенна Вивальди представляет собой диэлектрическую подложку, на одну сторону которой нанесен слой металлизации в форме раскрытия антенны. Весь излучатель Вивальди можно разделить на три зоны, имеющие определенные функции в процессе преобразования и излучения сигнала:

– раскрыв – зона, сформированная металлизацией, выполняющая функцию излучения сигнала;

– преобразователь – зона, в которой несбалансированная полосковая, микрополосковая или коаксиальная линия переходит в сбалансированную щелевую линию, подключенную к раскрытию;

– резонатор – зона, расположенная в начале щелевой линии; данная зона рассматривается отдельно от двух других зон, так как ее основная функция – это согласование электрических характеристик излучателя и питающей линии.

На рисунке 2 представлен вид антенны Вивальди с нанесенными функциональными зонами [2].

На практике встречаются различные формы раскрытий излучателя Вивальди. Основными из них являются раскрытия, показанные на рис. 3.

Конический раскрыв антенны Вивальди играет роль преобразователя импеданса апертуры антенны к значению, приблизительно равному импедансу щели, лежащей в основе раскрытия (50 Ом). На практике встречаются различные формы раскрытий излучателя Вивальди. Наилучшие характеристики демонстрирует экспоненциальный раскрыв.

Области, покрытые металлом, могут выполняться печатным методом с одной стороны (микрополосковая линия) или с двух сторон (полосковая линия) диэлектрической подложки, либо покрываются обработанным металлом.

Антенны Вивальди имеют симметрирующее устройство (СУ), интегрированное в антенну, позволяющее легко подключать ее к стандартным радиочастотным интерфейсам, таким как коаксиальный кабель или несбалансированная линия (например, микрополосковая линия). Это существенное преимущество, поскольку внешние широкополосные СУ могут быть однонаправленными (например, активные СУ) или занимать большой объем (например, пассивные СУ), добавляющий вес всей системе. Кроме того, интегрирование СУ в антенну Вивальди обеспечивает дополнительную степень свободы, которая в конечном итоге приводит к более высокой производительности по сравнению с независимой оптимизацией импеданса до 50 Ом и подключению его к отдельному СУ.

Три наиболее часто используемых вида СУ антенны Вивальди изображены на рис. 4, где области темного цвета с пунктирным контуром означают нижний слой микрополосковой структуры, в то время как светло-серый цвет представляет собой металлизацию на верхней стороне диэлектрика с вытравленной щелевой линией. Несмотря на то что изображенные СУ являются переходом от микрополосковой линии к щелевой, их согласование с полосковой или коаксиальной линией может быть легко достигнуто. На рисунке 4, а, б изображены две версии СУ Маршана. Эти варианты были введены и изучены Кнорром и широко используются в антенных

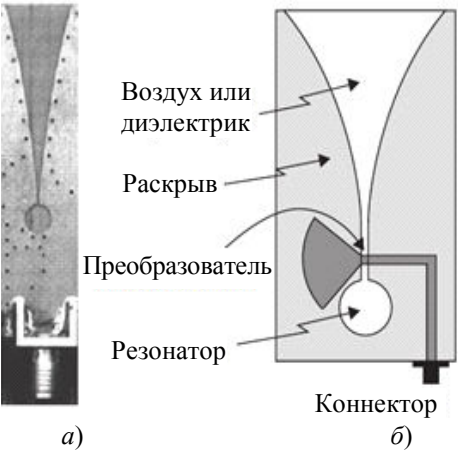


Рис. 2. Излучатель Вивальди:
а – фотография излучателя;
б – схематический вид излучателя:
■ – внутренний слой; □ – внешний слой

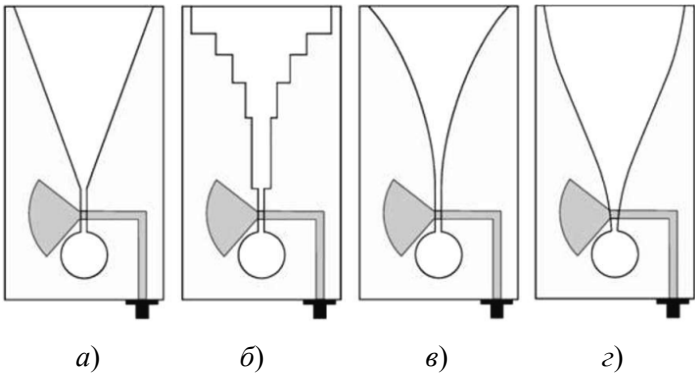


Рис. 3. Формы щелевых раскрывов антенны Вивальди:
а – линейного; б – ступенчатого; в – экспоненциального; г – Клоппфестена

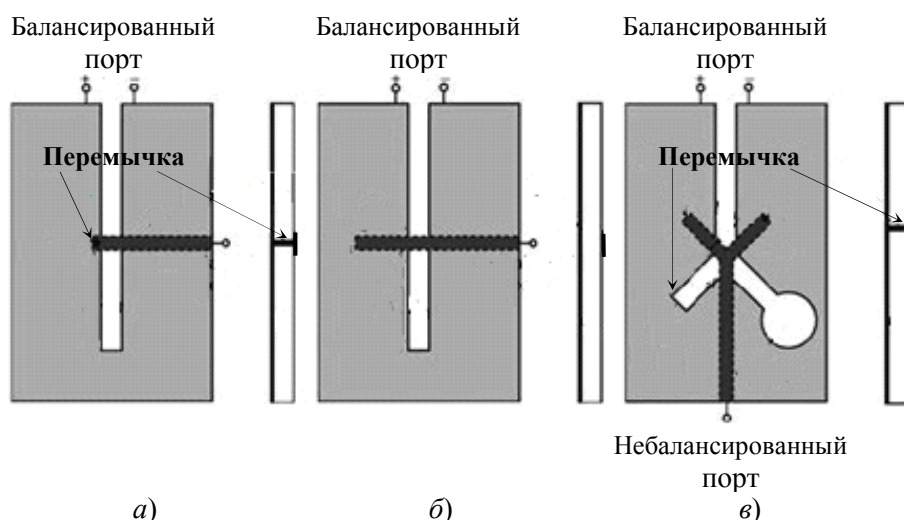


Рис. 4. Общие виды (сверху и сбоку) СУ антенны Вивальди:
а – некомпенсированное СУ Маршана;
б – компенсированное СУ Маршана; *в* – двойной Y СУ

решетках Вивальди. Симметричное устройство является некомпенсированным СУ Маршана, которое, как известно, обеспечивает пропускную способность до 3:1 или больше в зависимости от допустимого рассогласования (см. рис. 4, *б*). Дополнительная пропускная способность с меньшими вносимыми потерями может быть получена с помощью компенсации СУ Маршана (см. рис. 4, *б*).

Другим популярным видом СУ антенны Вивальди является двойной Y-переход (см. рис. 4, *в*), введенный Шейком и использованный в антенной решетке Крагаллота [2].

Геометрические размеры раскрыва антенны будут определяться исходя из следующих формул:

$$W^{\max} = \frac{c}{2f_{\min} \sqrt{\epsilon_r}}; \quad (1)$$

$$W^{\min} = \frac{c}{2f_{\max} \sqrt{\epsilon_r}}, \quad (2)$$

где c – скорость распространения электромагнитной волны в вакууме; $f_{\min}$ и $f_{\max}$ – минимальная и максимальная рабочие частоты антенны; ϵ_r – электрическая проницаемость подложки.

Раскрыв щели антенны Вивальди является важной характеристикой, влияющей на сопротивление антенны. Форму раскрыва можно описать следующей формулой

$$y = C_1 e^{Rz} + C_2, \quad (3)$$

где постоянные C_1 и C_2 выбираются таким образом, чтобы экспоненциальный раскрыв проходил через точки с координатами (y_1, z_1) и (y_2, z_2) (рис. 5), находящиеся в начале и конце раскрыва соответственно (см. рис. 4), и определяются по формулам:

$$C_1 = \frac{y_2 - y_1}{e^{Rz_2} - e^{Rz_1}}; \quad (4)$$

$$C_2 = \frac{y_1 e^{Rz_2} - y_2 e^{Rz_1}}{e^{Rz_2} - e^{Rz_1}}, \quad (5)$$

где Rz – коэффициент раскрыва щели [2].

Построим антенну Вивальди для полосы частот 2...6 ГГц, используя выражения (1) – (5). Ее размеры показаны на рис. 6.

Для описания характеристик антенны используем метод, приведенный в [3], в основе которого лежит аппроксимация раскрыва антенны на регулярные участки и их последующий расчет (рис. 7).

Предлагается разбить экспоненциальный раскрыв антенны на несколько регулярных участков, для которых существуют расчетные модельные представления. Диаграмма направленности (ДН) всей антенны будет рассчитываться как суммарный вклад каждого регулярного участка излучателя.

Представим расширяющуюся щелевую антенну типа антенны Вивальди в виде участков регулярных щелевых антенн с постоянной шириной раскрыва (см. рис. 4). Подобного рода аппроксимация была предложена в [4]. Для такой ступенчатой аппроксимации нерегулярной структуры предполагается, что шаг увеличения ширины щели много меньше четверти длины волны

$$w_n - w_{n-1} = w_{n+1} - w_n = \Delta w \ll \frac{\lambda_0}{8}, \quad (6)$$

где w_n – ширина щели n -го регулярного участка направляющей структуры антенны; λ_0 – длина волны электромагнитных колебаний на входе антенны [3].

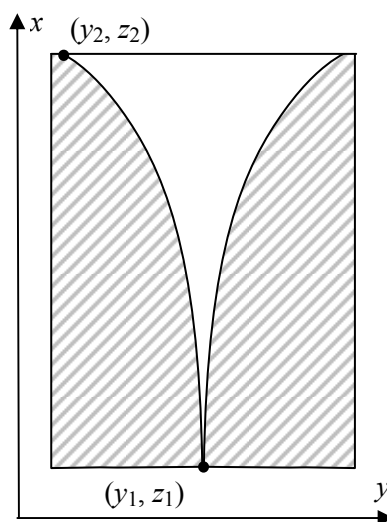


Рис. 5. Схема раскрыва антенны

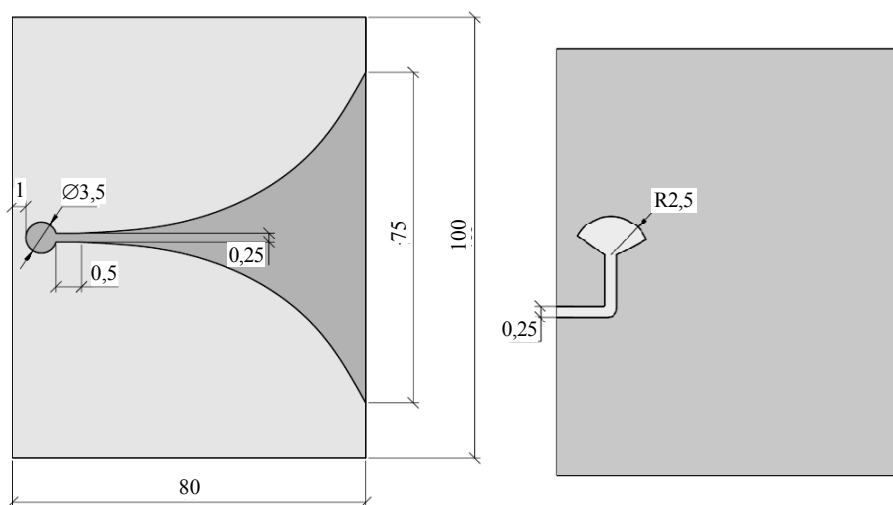


Рис. 6. Геометрические размеры антенны

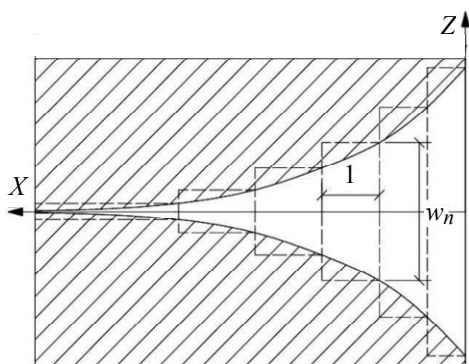


Рис. 7. Аппроксимация структуры раскрыва антенны Вивальди регулярными участками

Из [4] известно, что результирующее поле в дальней зоне будет определяться суммарным вкладом в излучение, вносимым каждым регулярным участком,

$$E(\theta, \varphi) = \sum_{n=1}^N E_n(\theta, \varphi), \quad (7)$$

где $E_n(\theta, \varphi)$ – вклад n -го регулярно участка направляющей структуры антенны в поле дальней зоны.

Расчетные формулы для нахождения электрической составляющей напряженности электромагнитного поля в E - и H -плоскостях в данном случае будут иметь вид, соответственно:

$$E_{\theta}^i(\theta) = E_a^i(k_0 W^i \cos \theta) \sqrt{\frac{2}{\sin \theta}} \left[e^{-jk_0 c^i L} \left\{ \frac{F^*(u_h^i) - F^*(u_l^i)}{\sqrt{c^i - \cos \theta}} \right\} + \right. \\ \left. + \Gamma e^{jk_0 c^i L} \left\{ \frac{F^*(\bar{u}_h^i) - F^*(\bar{u}_l^i)}{\sqrt{c^i + \sin \theta}} \right\} \right], \quad (8)$$

$$E_{\theta}^i(\varphi) = E_a^i(0) \left[\frac{e^{-jk_0 c^i L}}{(c^i + \cos \varphi)} \left\{ \sin \varphi \left[F(p_h^i) e^{jv_h^i} - F(p_l^i) e^{jv_l^i} \right] + \sin \left(\frac{\varphi}{2} \right) \cdot \right. \right. \\ \left. \sqrt{2(c^i - 1)} [F(q_h^i) - F(q_l^i)] \right\} - \Gamma \frac{e^{jk_0 c^i L}}{(c^i - \cos \varphi)} \left\{ \sin \varphi \left[F(p_h^i) e^{j\bar{v}_h^i} - F(p_l^i) e^{j\bar{v}_l^i} \right] - \right. \\ \left. \left. - \sin \left(\frac{\varphi}{2} \right) \sqrt{2(c^i - 1)} [F(\bar{q}_h^i) - F(\bar{q}_l^i)] \right\} \right], \quad (9)$$

где Γ – гамма-функция; x_l^i и x_h^i – нижняя и верхняя координаты i -го участка; $F(\bullet)$ – интеграл Френеля, определяемый из соотношения

$$F(v) = \int_0^v \frac{e^{-jt}}{\sqrt{2\pi t}} dt, \quad (10)$$

$F^*(\bullet)$ – комплексное сопряженное.

Множителем $E_a^i(\bullet)$ является функция вида

$$E_a^i(\bullet) = \sqrt{Z_0^i} J_0(\bullet), \quad (11)$$

где J_0 – функция Бесселя; Z_0^i – сопротивление i -го участка.

Остальные составляющие, необходимые для вычислений, представлены ниже:

$$\begin{aligned}
 c^i &= (\lambda_0/\lambda')_i; & k_0 &= 2\pi/\lambda_0; \\
 u_{h,l}^i &= k_0 x_{h,l}^i (c^i - \sin \theta); & \bar{u}_{h,l}^i &= k_0 x_{h,l}^i (c^i + \sin \theta); \\
 v_{h,l}^i &= k_0 x_{h,l}^i (c^i + \cos \varphi); & \bar{v}_{h,l}^i &= k_0 x_{h,l}^i (c^i - \cos \varphi); \\
 q_{h,l}^i &= k_0 x_{h,l}^i (c^i - 1); & \bar{q}_{h,l}^i &= k_0 x_{h,l}^i (c^i + 1); \\
 p_{h,l}^i &= k_0 x_{h,l}^i (1 + \cos \varphi),
 \end{aligned}$$

где λ' – длина волны в пределах i -го регулярного участка антенны.

Результаты расчетов характеристик антенны приведены на рис. 8.

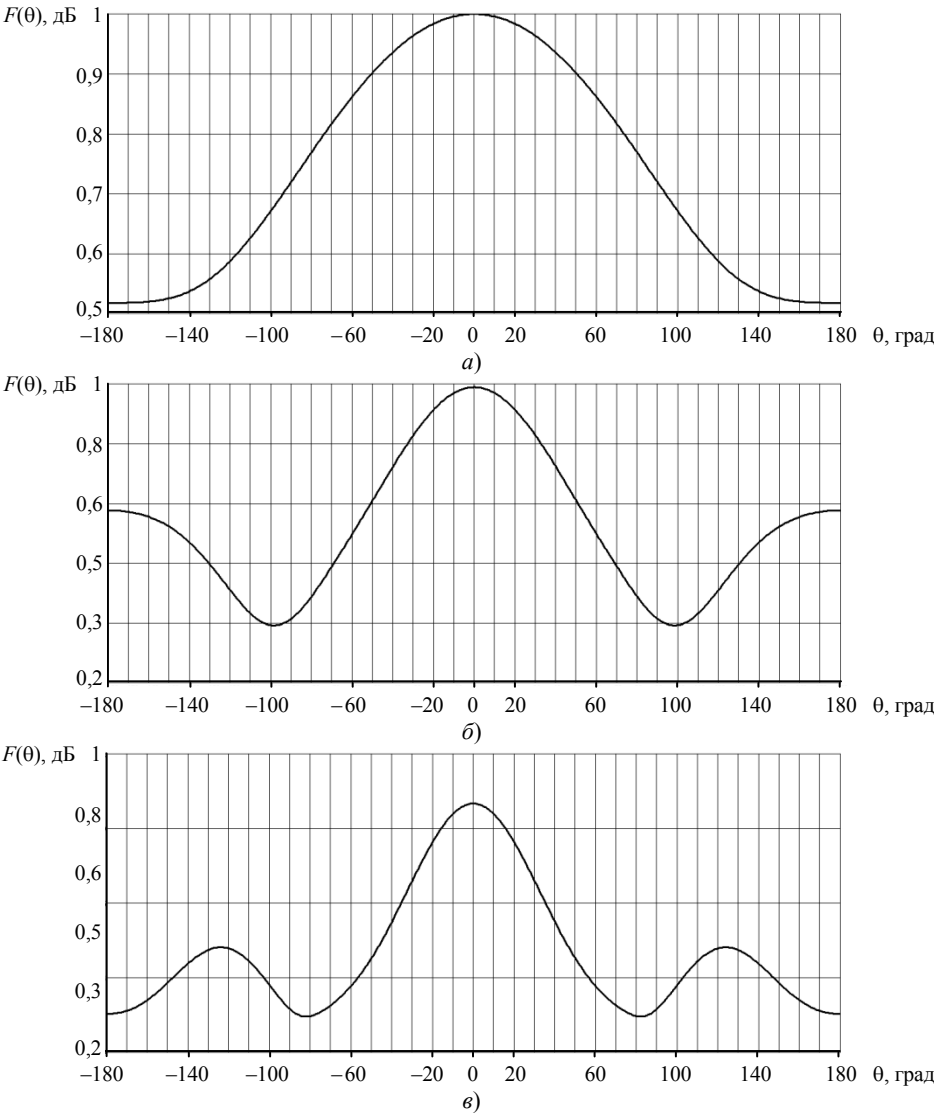


Рис. 8. Диаграммы направленности антенны Вивальди, полученные методом математического моделирования, на различных частотах, ГГц:
 $a - 2$; $б - 4$; $в - 6$

Построим исследуемую антенну в программном пакете CST Studio Suite, который позволяет произвести моделирование характеристик излучения антенны (рис. 9).

Исследования антенны будем проводить в полосе частот от 2 до 6 ГГц. В результате моделирования получены графики ДН антенны и коэффициента усиления (КУ) (рис. 10, 11).

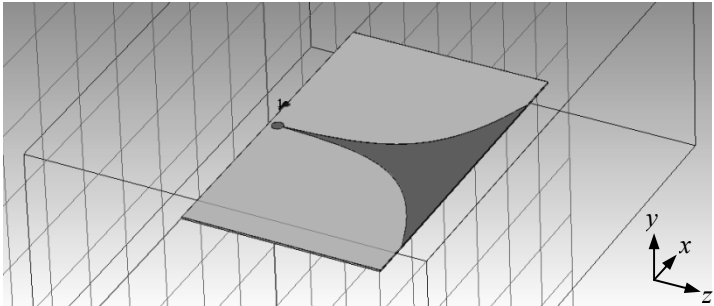


Рис. 9. Модель антенны, созданная в CST Studio Suite

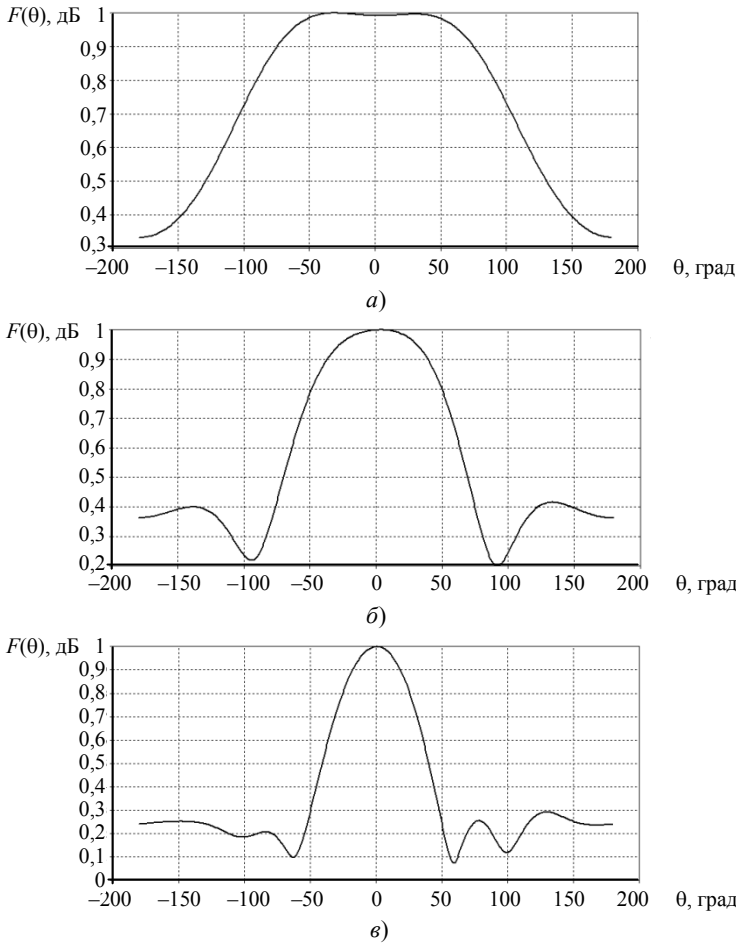


Рис. 10. Диаграммы направленности антенны Вивальди, полученные методом компьютерного моделирования, на различных частотах, ГГц:
а – 2; б – 4; в – 6

По результатам моделирования можно сделать вывод, что антенна Вивальди обладает неплохой направленностью для МПА и коэффициентом усиления от 3 до 7 дБ.

Также в CST Studio Suite рассчитаны значения коэффициентов стоячей волны (**КСВ**) антенны для рабочего диапазона частот (рис. 12).

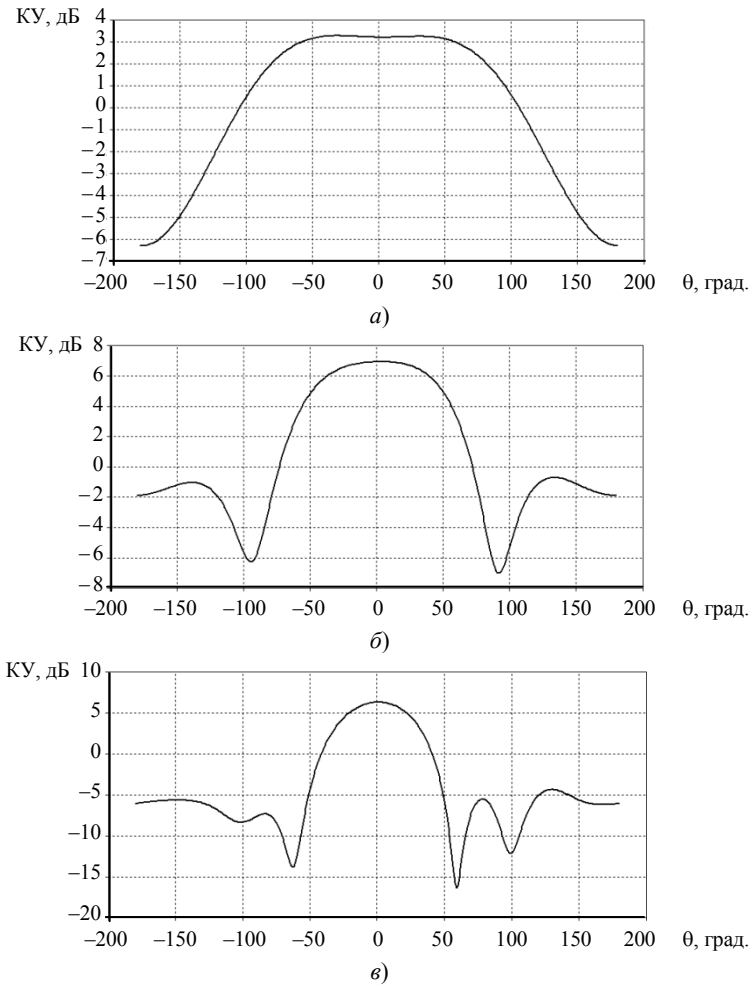


Рис. 11. Графики коэффициента усиления антенны на различных частотах, ГГц:
a – 2; б – 4; в – 6

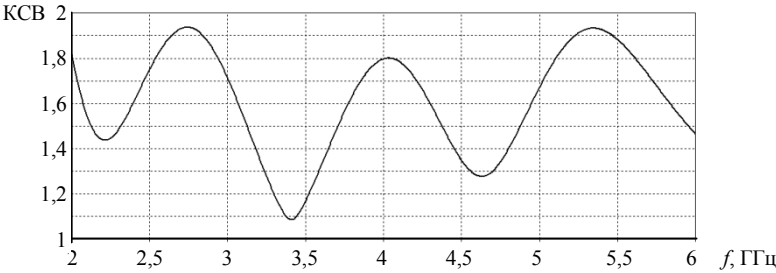


Рис. 12. График зависимости значений КСВ от частоты f

По полученным данным можно сказать, что во всей полосе частот (2...6 ГГц) уровень КСВ не превышает значения 2, что является приемлемым значением степени согласования фидера и антенны (см. рис. 2).

Анализируя данные, полученные в ходе математического расчета и программного моделирования, можно сделать вывод о том, что антенна Вивальди является подходящим выбором для создания на его основе антенной решетки, используемой в широкополосных системах передачи информации.

Список литературы

1. Janaswamy, R. Analysis of the Tapered Slot Antenna / R. Janaswamy, D. Schaubert // IEEE Trans. AP. – 1987. – V. 35. – P. 1058–1065.
2. Gross, Frank G. Frontiers in Antennas: Next Generation Design & Engineering / Frank B. Gross. – The McGraw-Hill Companies, 2011. – 526 с.
3. Microstrip Antenna Design Handbook / R. Garg [et al.]. – Artech House, 2000. – 845 с.
4. Фролов, А.А. Моделирование характеристик антенн СВЧ-диапазона / А.А. Фролов, С.В. Гирич, В.П. Заярный // Изв. Волгоград. гос. ун-та. – 2008. – № 4. – С. 112–114.
5. Сысоев, А.Н. Математическая модель передающей КФАР / А.Н. Сысоев // Антенны. – 2002. – № 11. – С. 28–29.

Analysis and Synthesis of Broadband Planar Slot Antenna with an Exponential Change in Width of the Gap for Broadband Access Systems

I.G. Ryazanov, A.A. Byakin, O.A. Belousov

Tambov State Technical University, Tambov

Key words and phrases: analysis and synthesis of planar-slot antennas; antenna with exponential change of the gap width; emitters of Vivaldi; wireless broadband systems.

Abstract: The basic aspects of the analysis and synthesis of wideband planar slot antenna with exponential change of the slot width are considered; also, the results of the received antenna for wireless broadband are analyzed.

© И.Г. Рязанов, А.А. Бякин, О.А. Белоусов, 2013