

ПРОЕКТИРОВАНИЕ ДВУХДИАПАЗОННОЙ ПЕЧАТНОЙ ДИРЕКТОРНОЙ АНТЕННЫ

Л.Х. Хачатрян, А.Г. Степанян

Национальный политехнический университет Армении

Современное развитие антенн и сверхвысокочастотных (СВЧ) устройств происходит в тесном взаимодействии со многими отраслями науки и техники. Антенны являются одним из важнейших функциональных блоков различных радиотехнических систем. Усложнение радиоэлектронной аппаратуры, применяемой в системах связи, и требование ее комплексной миниатюризации выдвигают проблему уменьшения размеров антенн. Наиболее перспективными в этом отношении являются антенны, изготовленные по технологии печатных плат, которые находят широкое применение за счет ряда своих преимуществ: тонкий профиль, малый вес, легкость изготовления, интегрируемость в СВЧ цепи. Типичная конструкция изготовленных по технологии печатных плат антенн представляет собой проводящую пластину, размещенную на диэлектрической подложке.

Приводятся две конструкции печатной директорной антенны: однодиапазонная и образованная из нее двухдиапазонная антенна. Указанные антенны моделированы, и расчеты их характеристик проведены с помощью одной из самых мощных современных программ электродинамического моделирования - ФЕКО, которая представляет собой новый подход к проектированию трехмерных СВЧ устройств.

Разработана двухдиапазонная печатная директорная антенна. В качестве активного вибратора для данной антенны разработана антиподальная структура Вивальди. Описана конструкция антиподальной структуры Вивальди. Определен фазовый центр активного вибратора двухдиапазонной печатной директорной антенны. Пассивные вибраторы установлены относительно фазового центра.

Приведены визуализированные результаты расчета однодиапазонной и двухдиапазонной директорных антенн, которые выведены в виде графиков. Представлены диаграммы направленности (ДН) указанных антенн в полярной системе координат в плоскостях E и H . Вычислена величина главного лепестка ДН по половинной мощности $2\theta_{0,5}$ и $2\varphi_{0,5}$. Приведены зависимости коэффициента стоячей волны по напряжению и коэффициента усиления указанных антенн. Разработанные антенны работают на частотах 2,04...2,47 ГГц и 5,13...6,32 ГГц.

Ключевые слова: двухдиапазонная печатная директорная антенна, антиподальная структура Вивальди, программный пакет ФЕКО, диаграмма направленности, коэффициент стоячей волны по напряжению, коэффициент усиления.

Введение. Одной из основных тенденций развития современной радио-электроники СВЧ является микроминиатюризация радиоэлектронной аппаратуры. Известно, что качественные характеристики радиоэлектронной аппаратуры в значительной степени определяются свойствами и конструктивно-электрическими параметрами её антенно-фидерного устройства. Современные требования к характеристикам высоконадежных антенн (уменьшение размера, веса, стоимости) выдвигают новые задачи при их проектировании. В настоящее время активно разрабатываются и совершенствуются широкополосные и много-диапазонные антенны, а также ведется активная разработка печатных версий антенн, среди которых широкое применение получила директорная антенна [1].

Директорная антенна обладает высоким коэффициентом направленного действия, но она узкополосная. Для работы на частотах выше 3 ГГц эту антенну трудно изготовить из-за малых размеров.

Печатная директорная антенна похожа на обычную директорную антенну, однако вместо вибраторов она состоит из планарных линий передачи. Планарная линия является одним из наиболее популярных типов линий передачи. Она может быть изготовлена с использованием фотолитографических процессов и легко интегрируется как с пассивными, так и с активными микроволновыми устройствами.

Для планарных линий характерна малая высота подложки d , на которой напечатан проводник шириной W с диэлектрической проницаемостью ϵ_r .

Одной из важнейших характеристик линий передачи является волновое сопротивление Z_0 , определяемое геометрическими размерами линии и диэлектрической проницаемостью подложки [2]:

$$Z_0 = \frac{60}{\sqrt{\epsilon_{эфф}}} \ln \left(\frac{8d}{w} + \frac{W}{4d} \right) \text{ для } \frac{W}{d} \leq 1,$$

$$Z_0 = \frac{120\pi}{\sqrt{\epsilon_{эфф}} \left(\frac{W}{d} + 1.393 + 0.667 \ln \left(\frac{W}{d} + 1.444 \right) \right)} \text{ для } \frac{W}{d} \geq 1, \quad (1)$$

где $\epsilon_{эфф} = \frac{\epsilon_r + 1}{2} + \frac{\epsilon_r - 1}{2} \cdot \frac{1}{\sqrt{1 + 12d/W}}$.

Целью работы является разработка двухдиапазонной печатной директорной антенны из однодиапазонной директорной антенны и расчет ее характеристик с помощью программы ФЕКО.

Методы реализации. Как известно, директорная антенна представляет собой ряд параллельно расположенных вибраторов, длина каждого из которых приблизительно равна половине длины волны. Вибраторы находятся на расстоянии приблизительно $\lambda/4$ друг от друга. Один из вибраторов подключен к источнику питания и называется активным. Остальные

вибраторы возбуждаются электромагнитным полем активного вибратора и называются пассивными. Максимальное излучение антенны направлено вдоль оси и с увеличением количества используемых пассивных вибраторов возрастает [3].

В данной статье приводятся две конструкции директорной антенны: однодиапазонная и двухдиапазонная.

1. Однодиапазонная антенна. Конструкция однодиапазонной антенны представлена на рис.1. Данная антенна разработана для работы на частоте $f = 2,4 \text{ ГГц}$. Она состоит из двух слоев. В верхнем слое расположены пассивные вибраторы и половина активного вибратора, в нижнем слое – рефлектор и вторая половина активного вибратора. Разработанная антенна состоит из двух пассивных вибраторов. Длина активного вибратора – $0,46 \lambda_{эфф} = 42 \text{ мм}$, каждая его половина имеет длину 21 мм, длина пассивного вибратора составляет $0,37 \lambda_{эфф} = 30,4 \text{ мм}$, расстояние между пассивными элементами, а также между пассивным и активным элементами – $\frac{\lambda_{эфф}}{4} = 17,9 \text{ мм}$, а расстояние между активным элементом и рефлектором – $0,17 \lambda_{эфф} = 12,35 \text{ мм}$, где $\lambda_{эфф} = \frac{\lambda}{\sqrt{\epsilon_{эфф}}}$, $\epsilon_{эфф} = 3,4$. В качестве диэлектрика использован диэлектрик типа FR4, диэлектрическая проницаемость которого $\epsilon_r = 4,6$, толщина $d = 1,6 \text{ мм}$. Ширина активного и пассивного вибраторов составляет 2,9 мм.

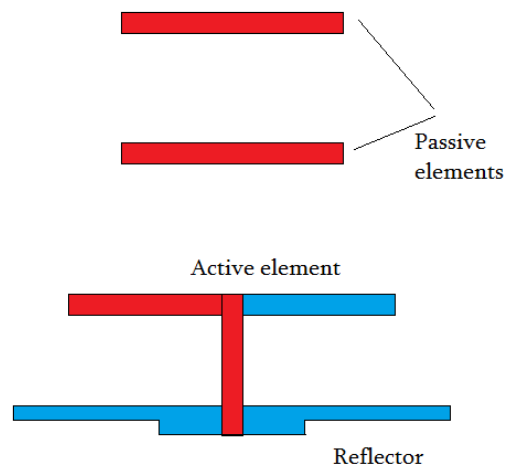


Рис.1. Конструкция однодиапазонной директорной антенны

На основе разработанной конструкции было проведено численное моделирование диаграммы направленности и коэффициента стоячей волны по напряжению (КСВН) в среде FEKO.

В диапазоне 2,113...2,45 ГГц КСВН=1,2...2 (рис. 2).

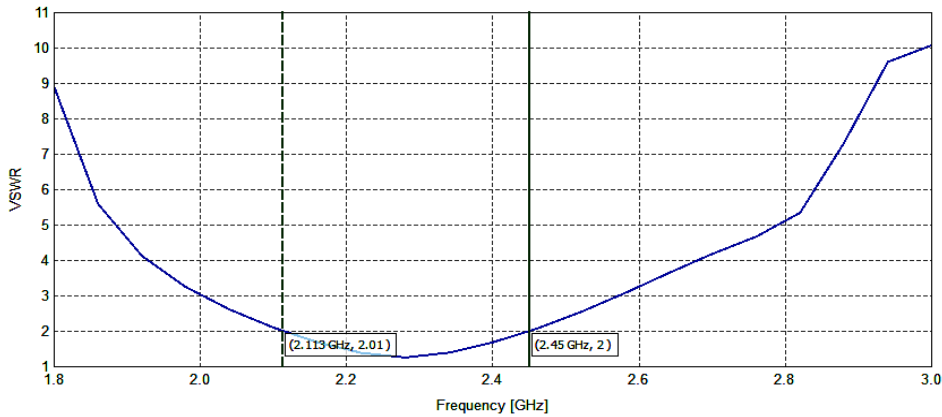
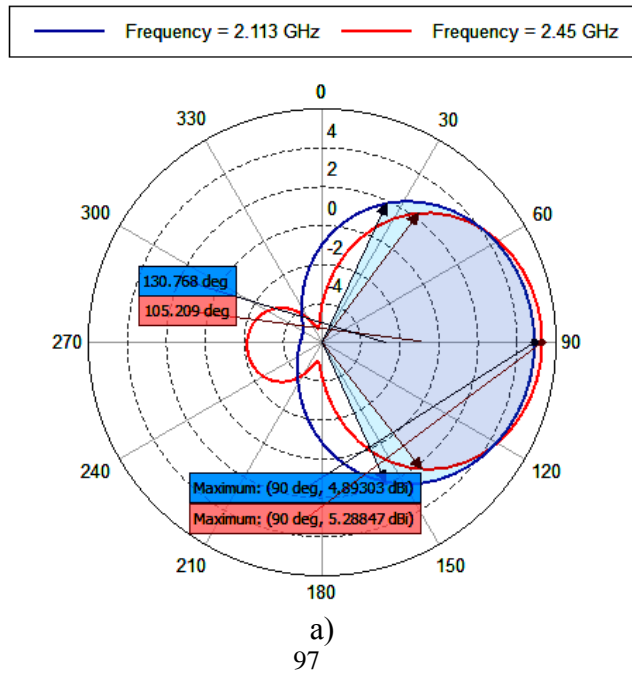


Рис.2. КСВН однодиапазонной директорной антенны

Коэффициент усиления на рабочей частоте составляет около 5 дБи (дБ относительно изотропного излучателя). Величина главного лепестка ДН по половинной мощности для вышеуказанного диапазона находится в пределах $2\theta_{0,5} = 105^{\circ} \dots 130^{\circ}$ в плоскости Е (а) и $2\varphi_{0,5} = 68^{\circ} \dots 73^{\circ}$ в плоскости Н (рис. 3).



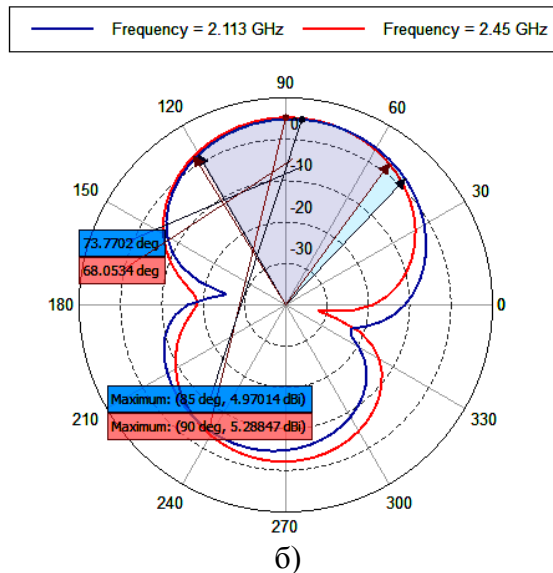


Рис.3. Диаграммы направленности однодиапазонной директорной антенны в плоскостях $E(a)$ и $H(b)$

2. Двухдиапазонная антенна. Конструкция двухдиапазонной антенны представлена на рис.4. Отличие данной антенны от однодиапазонной состоит в том, что активный вибратор представляет собой антиподальную структуру Вивальди. Антиподальная структура Вивальди - это двухэллиптически коническая антиподальная щелевая антенна (рис. 4). Обычная двухэллиптически коническая антиподальная щелевая антенна Вивальди отличается от экспоненциально сужающейся антиподальной антенны Вивальди тем, что все внутренние и внешние края проводников имеют эллиптическую коническую форму. Конусный щелевой излучатель образован двумя проводящими плечами, которые симметрично напечатаны на противоположных сторонах диэлектрической подложки [2,4,5].

Для определения расстояния между активным вибратором и директором с помощью программы FEKO был определен фазовый центр активного вибратора. Для частот 2,4 ГГц и 5,75 ГГц расстояние между пассивным директором и фазовым центром активного вибратора равно $\frac{\lambda_{эфф}}{4}$. Для указанных частот расстояние между первым пассивным вибратором и активным вибратором приблизительно одинаковое, поскольку фазовые центры активного вибратора различные.

В конструкции активного вибратора (рис. 4) изогнутая внутренняя кривая построена согласно $y_1(t) = c_1 * \ln(t)$, изогнутая внешняя кривая -

$y_2(t) = c_2 * \ln(t)$, где $c_1 = 7, c_2 = 0,9$. Длина активного вибратора выбрана равной длине активного вибратора однодиапазонной антенны и составляет 21 мм, следовательно, для данного случая переменная $t = 0 \dots 21$ [4].

Разработанная конструкция дает возможность изменять изогнутость внешней и внутренней кривых, в результате чего меняются ширина луча и коэффициент усиления антенны. Фазовый центр активного элемента находится на расстоянии 30,3 мм от источника напряжения при 2,4 ГГц и на расстоянии 41,5 мм при 5,75 ГГц. Для двух частот пассивный вибратор размещается на одинаковом расстоянии от фазового центра. Длина пассивных вибраторов составляет 25 мм. Расстояние между ними – 20 мм.

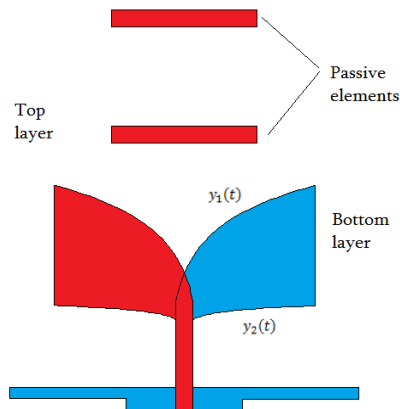


Рис. 4. Конструкция двухдиапазонной антенны

Результаты исследования. На рис. 5-9 представлены визуализированные результаты разработанной двухдиапазонной директорной антенны: КСВН от частоты и нормированная ДН антенны в плоскостях Е и Н [6,7].

В полосе частот $f=2,04 \dots 2,4$ ГГц и $f=5,13 \dots 6,32$ ГГц КСВН составляет 1,1...2 (рис.5).

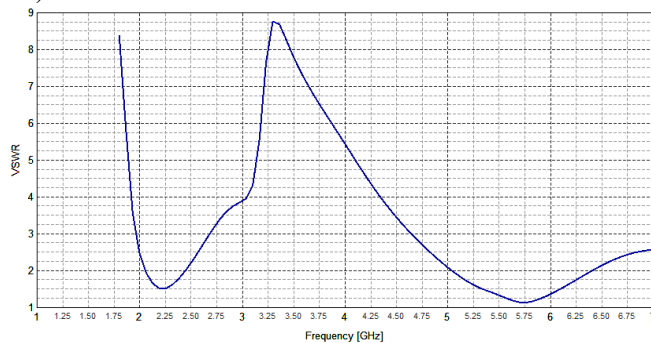


Рис 5. КСВН антенны для частот $f = 1,75 \dots 7$ ГГц

В полосе частот $f = 7,75 \dots 11$ ГГц КСВН < 2 (рис. 6).

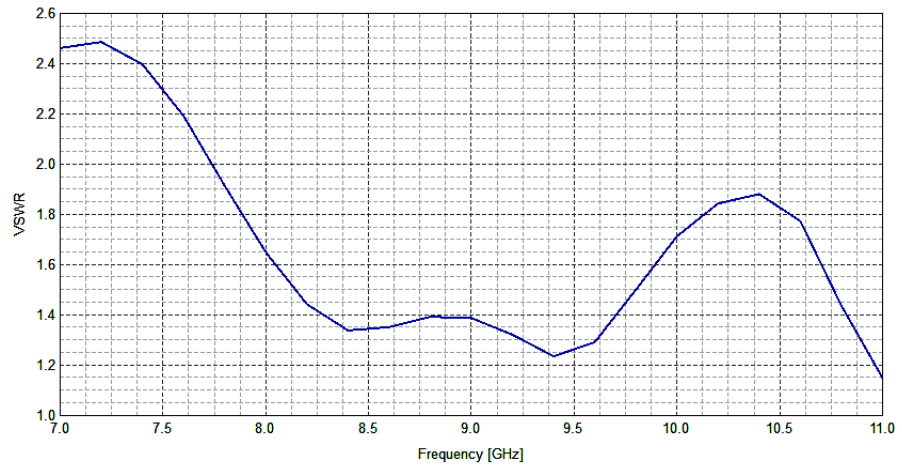
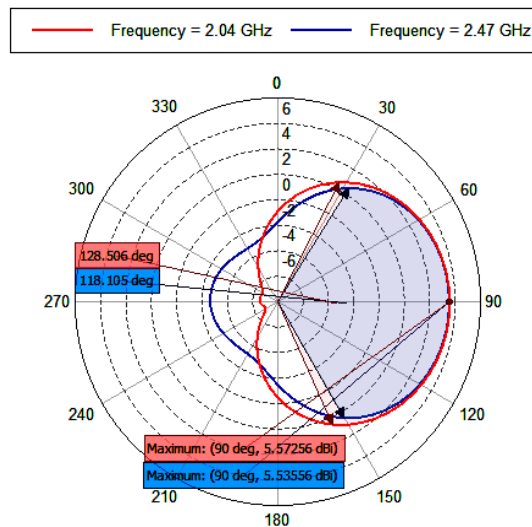
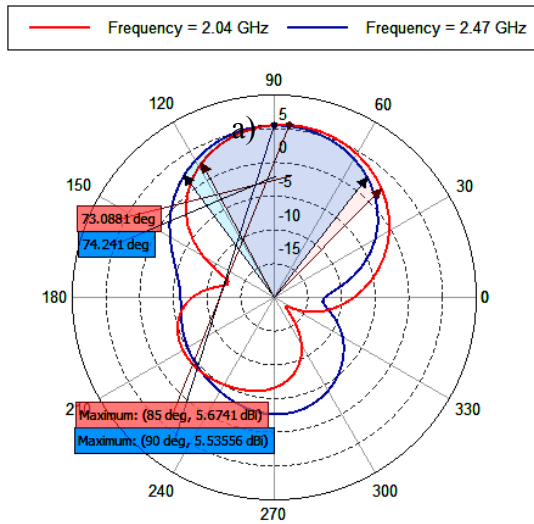


Рис. 6. КСВН двухдиапазонной антенны в полосе частот $f = 7 \dots 11$ ГГц

Величина главного лепестка ДН по половинной мощности моделированной антенны в плоскости Н равна $2\varphi_{0,5} \approx 73 \dots 74$; в плоскости Е - $2\theta_{0,5} \approx 118^{\circ} \dots 128^{\circ}$. Коэффициент усиления составляет 5,5..5,6 дБи (рис. 7).



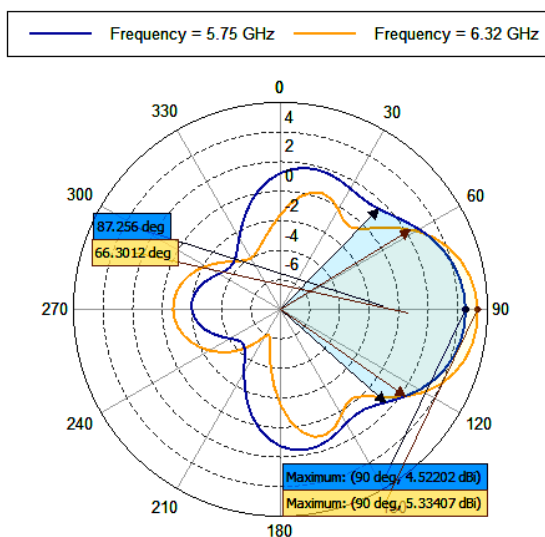
а)



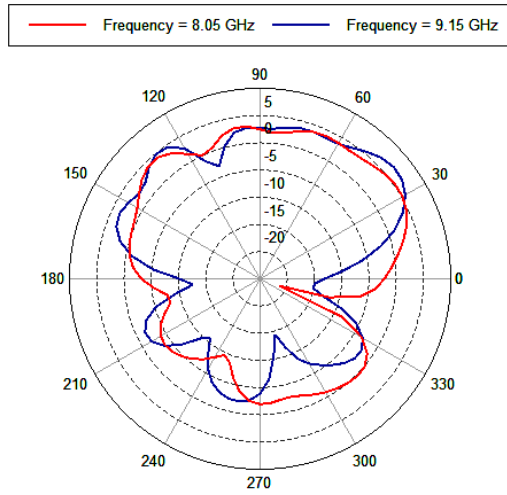
б)

Рис. 7. ДН двухдиапазонной антенны для частот $f = 2,04$ ГГц и $f = 2,47$ ГГц в плоскостях E (а) и H (б)

Величина главного лепестка ДН по половинной мощности моделированной антенны в плоскости H равна $2\varphi_{0,5} \approx 44 \dots 52$; в плоскости E - $2\theta_{0,5} \approx 66^0 \dots 87^0$. Коэффициент усиления составляет 4,5..5,4 дБи (рис. 8).



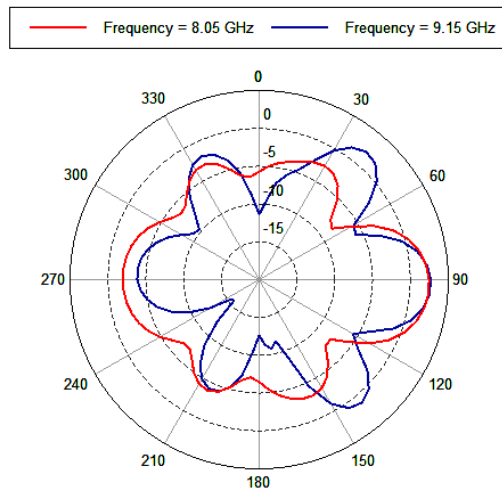
а)



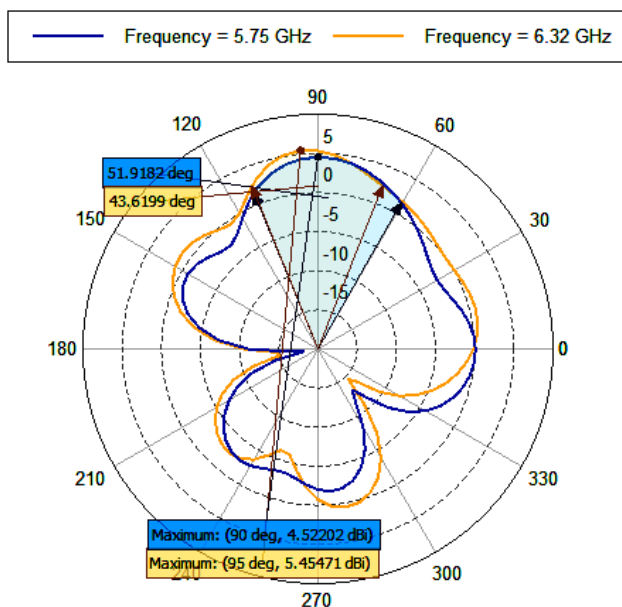
б)

Рис. 8. ДН двухдиапазонной антенны для частот $f = 5,75$ ГГц и $f = 6,32$ ГГц в плоскостях E (а) и H (б)

На рис. 9 показана ДН антенны в диапазоне частот $f = 7,75 \dots 11$ ГГц. Но в этом диапазоне ДН антенны искажена, и ее использование нежелательно.



а)



б)

Рис. 9. ДН двухдиапазонной антенны для частот $f = 7,75 \dots 11$ ГГц в плоскостях E (а) и H (б)

Выводы

1. Разработана печатная двухдиапазонная директорная антенна. В качестве активного вибратора применена антиподальная структура Вивальди.
2. Определен фазовый центр активного вибратора двухдиапазонной печатной директорной антенны. Пассивные вибраторы установлены относительно этого центра.
3. При частотах $f = 2,04 \dots 2,47$ ГГц: $2\varphi_{0,5} = 73^\circ \dots 74^\circ$ в плоскости H, $2\theta_{0,5} = 118^\circ \dots 128^\circ$ в плоскости E, коэффициент усиления $\approx 5,6$ дБи.
При частотах $f = 5,13 \dots 6,32$ ГГц: $2\varphi_{0,5} = 44^\circ \dots 52^\circ$ в плоскости H, $2\theta_{0,5} = 66 \dots 87^\circ$ в плоскости E, коэффициент усиления ≈ 5 дБи, КСВН $\approx 1,1 \dots 2$.
4. Разработанная антенна может быть использована для стандарта IEEE 802.11. Антенна такого типа найдет применение в системах мобильной радиосвязи и в системе Wi-Fi.

Литература

1. Устройства СВЧ и антенны / **Д.И. Воскресенский и др.** -М.: Радиотехника, 2016.- 500 с.
2. **Pozar David M.** Microwave Engineering.- 4th edition.- John Wiley & Sons, 2011. -756 p.
3. **Марков Г.Т., Сазонов Д.М.** Антенны. -М.: Энергия, 1975.- 528 с.
4. **De Olivera A.M., Perotoni M.B., Konfujii S.T., Justo J.F.** Tree Antipodal Vivaldi Antenna With Exponential Slot Edge for Improved Radiation Pattern // IEEE.- 2015.- V. 14.- P. 1334-1337.
5. https://www.researchgate.net/publication/328765086_Improved_characteristics_of_Antipodal_Vivaldi_Antenna_for_UWB-RADAR_applications
6. **Elsherbeni Atef Z., Payam Nayeri, Reddy C.J.** Antenna Analysis and Design Using FEKO Electromagnetic Simulation Software.- SciTech Publishing, Edison, NJ., 2014.
7. **Курушин А.А., Банков С.Е., Грибанов А.Н.** Электродинамическое моделирование антенных и СВЧ структур с использованием FEKO.- М.: Солон-пресс, 2017.- 412 с.

*Поступила в редакцию 30.01.2020.
Принята к опубликованию 15.06.2020.*

ԵՐԿՏԻՐՈՒՅԹ ՏՊԱՍԱԼ ԴԻՐԵԿՏՈՐԱՅԻՆ ԱՆՏԵՆԱՅԻ ՆԱԽԱԳԾՈՒՄԸ

Լ.Խ. Խաչատրյան, Ա.Հ. Ստեփանյան

Անտենաների և ԳԲՀ սարքավորումների ժամանակակից զարգացումը կատարվում է գիտության և տեխնիկայի շատ բնագավառների սերտ փոխգործակցությամբ: Անտենաները՝ տարբեր ռադիոտեխնիկական համակարգերի կարևորագույն ֆունկցիոնալ /գործառական/ հանգույցներից են: Կապի տեխնիկայում կիրառվող ռադիոէլեկտրոնային ապարատուրայի բարդացումը, դրա պահանջը կոմպլեքսային մանրաչափավորմանը առաջ են բերում անտենաների չափերի փոքրացման խնդիրը: Այդ տեսակետից ավելի հեռանկարային են տպասայի տեխնոլոգիայի հիման վրա պատրաստված անտենաները, որոնք լայն կիրառություն ունեն իրենց մի շարք առավելությունների շնորհիվ՝ բարակ պրոֆիլ, փոքր զանգված, հեշտ պատրաստման հնարավորություն, ինտեգրացում ԳԲՀ շրջայում: Տպասայի տեխնոլոգիայի հիման վրա պատրաստված անտենաների տիպիկ կառուցվածքը ներկայացնում է հաղորդիչ հարթակի վրա տեղադրված դիէլեկտրիկ թիթեղ:

Բերված է տպասայային դիրեկտորային անտենայի երկու կառուցվածք՝ միատիրոյթ և դրանից ստեղծված երկտիրոյթ անտենա: Նշված անտենաները մոդելավորված են, և դրանց բնութագրերի հաշվարկը կատարվել է էլեկտրադինամիկական մոդելավորման ժամանակակից ծրագրային ծրագրերից մեկի՝ FEKO-ի միջոցով, որը նոր մոտեցում է եռաչափ ԳԲՀ սարքավորումների նախագծման գործընթացում:

Մշակված է երկտիրոյթ տպասայային դիրեկտորային անտենա: Տվյալ անտենայի համար որպես ակտիվ վիբրատոր մշակված և ներկայացված է Վիվալդի անտիպոդալ կառուցվածքը: Որոշված է երկտիրոյթ տպասայային դիրեկտորային անտենայի ակտիվ վիբրատորի փուլային կենտրոնը: Պասսիվ վիբրատորները տեղադրված են փուլային կենտրոնի նկատմամբ:

Ներկայացված են միատիրոյթ և երկտիրոյթ դիրեկտորային անտենաների ակնադիտական արդյունքները: Հաշվարկների արդյունքները ներկայացված են գրաֆիկների տեսքով: Ներկայացված են նշված անտենաների ուղղվածության դիագրամները E և H հարթություններում բևեռային կոորդինատային համակարգում: Հաշվարկված են ՈւԴ-ի գլխավոր թերթիկի լայնությունը ըստ կես հզորության՝ $2\theta_{0,5}$ -ը և $2\varphi_{0,5}$ -ը: Ներկայացված են նշված անտենաների՝ ըստ լարման կանգուն ալիքի գործակցի և ուժեղացման գործակցի կախվածությունները: Նշված անտենաները աշխատում են 2.04...2.47 ԳՀց և 5.13...6.32 ԳՀց հաճախականային տիրոյթում:

Առանցքային բառեր. երկտիրոյթ տպասալային դիրեկտորային անտենա, Վիվալդի անտիպոդալ կառուցվածք, FEKO ծրագրային փաթեթ, ուղղվածության դիագրամ, կանգուն ալիքի գործակից ըստ լարվածության, ուժեղացման գործակից:

DESIGN OF A TWO-BAND PLANAR YAGI ANTENNA

L.Kh. Khachatryan, A.H. Stepanyan

Modern development of antenna and microwave devices takes place is closely interconnected with many fields of science and techniques. Antennas are most important functional components of different radioengineering systems. The complication of radio electronic apparatus applied in communication systems and its requirement of miniaturization lead to the problem of decreasing the antenna sizes. In that respect, antennas made by the technology of printed circuit boards are more perspective and find wide application owing to their numerous advantages: thin profile, small mass, easy preparation opportunity, integration in a microwave circuit. A typical structure of printed circuit board antennas is a dielectric layer placed on the conductor.

Two structures of printed yagi antennas are presented: a single-band, and created by it a two-band antenna. The mentioned antennae are modelled and the calculation of their characteristics are carried out by using one of the most powerful modern programs of electrodynamic simulation, the FEKO, which represents a new approach to the design of three-dimensional microwave devices.

A two-band printed Yagi antenna is developed. As an active element for the given antenna, the antipodal Vivaldi structure is developed. The antipodal Vivaldi structure is described. The phase center of the two-band printed Yagi antenna active element is determined. Passive elements are placed towards the phase centre.

The single-band and two-band antenna calculation results are presented in the form of graphs. The patterns of the mentioned antennas in the E and H planes in the polar form are presented. The value of the main lobe of the pattern at half power is calculated. The frequency dependences of the voltage standing wave ratio (VSWR), and the gain of these antennas in the operating frequency range 2.04...2.47GHz and 5.13...6.32 GHz are presented.

Keywords: two-band printed Yagi antenna, antipodal Vivaldi structure, Feko software package, radiating pattern, voltage standing wave ratio, gain.