

ПРОЕКТИРОВАНИЕ ЗЕРКАЛЬНОЙ АНТЕННЫ В ВИДЕ УСЕЧЕННОГО ПАРАБОЛОИДА

Л.Х. Хачатрян¹, С.Г. Эйрамджян², К.А. Тер-Минасян¹

¹Национальный политехнический университет Армении

²ООО “СИ Тек”

Одной из наиболее быстро развивающихся областей радиоэлектроники является техника антенн и сверхвысокочастотных (СВЧ) устройств. Антенны являются одним из важнейших функциональных блоков различных радиотехнических систем. Зеркальные антенны – это наиболее распространенные остронаправленные СВЧ антенны в радиолокации, радиосвязи и радиоастрономии.

Разработана зеркальная антенна в виде усеченного параболоида. Антенна моделирована, расчеты ее характеристик проведены с помощью одной из самых мощных современных программ электродинамического моделирования - FEKO, которая представляет собой новый подход к проектированию трехмерных СВЧ устройств.

Приведены визуализированные результаты расчета зеркальной антенны в виде усеченного параболоида, которые выведены в виде графиков. Для проектируемой антенны в качестве облучателя была выбрана антенна - открытый конец круглого волновода, которая состоит из двух частей — прямоугольного и круглого волноводов. Представлены диаграммы направленности указанной антенны в полярной системе координат в плоскостях E и H , коэффициент усиления и коэффициент стоячей волны по напряжению от частоты, моделированные в программной среде FEKO. Вычислена величина главного лепестка диаграммы направленности антенны по половинной мощности $2\theta_{0,5}$ и $2\varphi_{0,5}$. Показана конструкция реальной антенны. Представлены результаты сравнения значений зависимости коэффициента стоячей волны от частоты и диаграммы направленности реальной и моделированной антенн. Параметры разработанной антенны измерены с помощью векторного анализатора цепей NI PXIe-5630 и радиоустройства NI USRP-2901. Результаты экспериментальных исследований показали их соответствие с результатами моделирования. Разработанная антенна работает в рабочем диапазоне частот 4,6...6 ГГц.

Ключевые слова: зеркальная антенна, диаграмма направленности, коэффициент усиления, коэффициент стоячей волны по напряжению, программный пакет FEKO, радиоустройство NI USRP-2953R, векторный анализатор цепей NI PXIe-5630.

Введение. Антенные устройства современных радиотехнических систем, как наиболее сложная и дорогостоящая их часть, в значительной степени определяют эффективность радиотехнической системы в целом. Совершенствование радиотехнических систем и расширение областей их применения часто возможно лишь при соответствующем совершенствовании их антенных устройств. Ввиду своих конструктивных особенностей и возможности оптимальной реализации значений электрических параметров зеркальная параболическая антенна получила наибольшее распространение, как один из основных элементов радиотехнических систем различного назначения.

Зеркальные антенны являются наиболее распространенным типом направленных антенн в сантиметровом, дециметровом и, отчасти, в метровом диапазонах длин волн. Объясняется это тем, что зеркальные антенны обладают большой направленностью, высоким КПД, хорошими диапазонными свойствами. Наибольшее распространение получили однозеркальные антенны с параболической формой зеркала (параболоида вращения, усеченного параболоида вращения и параболического цилиндра). Для уменьшения веса и “парусности” антенн зеркала обычно выполняют на основе параллельных проводов или металлических сеток, расстояния между которыми должны быть меньше половины длины волны [1,2].

Цель работы и методы реализации. В программной среде FEKO спроектирована зеркальная антенна в виде усеченного параболоида в диапазоне частот 4,6...6 ГГц (рис. 1).

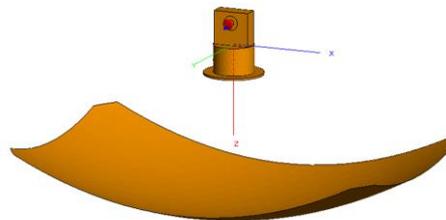


Рис.1. Зеркальная антенна, спроектированная в программной среде Feko

Зеркало антенны представляет собой усеченный параболоид, полученный из параболоида вращения с радиусом 220 мм и глубиной 180 мм путем отрезания прямоугольного параллелепипеда с размерами 390x250x100 мм (рис.2). Антенны этого типа имеют наилучшие характеристики, когда усечение параболоида вращения производится по криволинейной границе, вдоль которого поле, облучающее зеркало, ослабевает по сравнению с полем в центре зеркала на постоянную величину 10...14 дБ [1]. Зеркальные антенны в виде

усеченного параболоида имеют высокий коэффициент усиления и низкий уровень боковых лепестков диаграммы направленности (ДН).

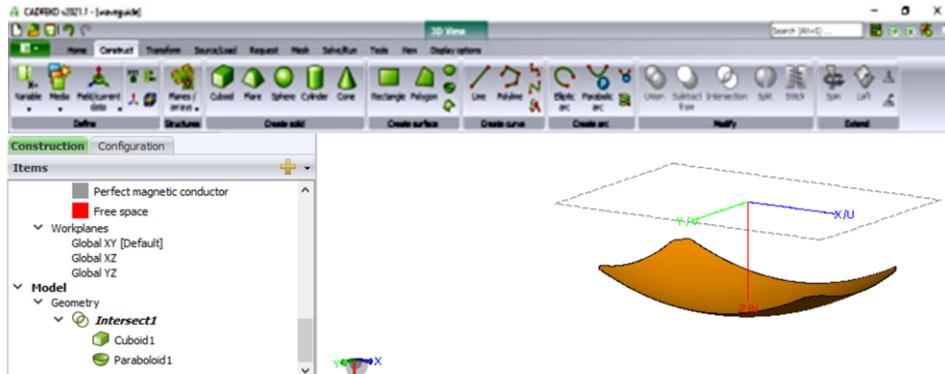


Рис.2. Вид усеченного параболоида, спроектированного в программной среде Feko

Для проектируемой антенны в качестве облучателя была выбрана антенна - открытый конец круглого волновода, которая состоит из двух частей - прямоугольного и круглого волноводов (рис. 3).

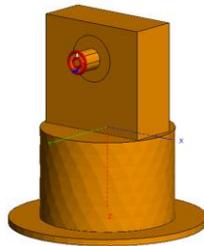


Рис. 3. Облучатель антенны, состоящей из круглого и прямоугольного волноводов

Длина широкой стенки прямоугольного волновода определяется в виде [3]

$$a = \frac{c}{2 \cdot f_c} = \frac{3 \cdot 10^8}{2 \cdot 5.65 \cdot 10^9} = 0.027 \text{ м},$$

где a - размер широкой стенки волновода; f_c - центральная частота; c - скорость света.

Это означает, что минимальная длина прямоугольного волновода должна составлять 27 мм. Размеры прямоугольного волновода выбраны 36x15x34 мм. Радиус круглого волновода облучателя определяется в виде [4]

$$r = \frac{1.8412 \cdot c}{2 \cdot \pi \cdot f_c} = \frac{1.8412 \cdot 3 \cdot 10^8}{2 \cdot \pi \cdot 5.65 \cdot 10^9} = 0.016 \text{ м},$$

где r - радиус круглого волновода; f_c - центральная частота; c - скорость света.

Другими словами, минимальный радиус круглого волновода должен составлять 16 мм.

Круглый волновод получается из цилиндра радиусом 20,5 мм и высотой 30 мм, а конечная часть — из цилиндра радиусом 30 мм и высотой 2 мм.

Для проектируемой антенны был выбран коаксиальный кабель типа RG-62 [5], длина наружной части которого равна 6,68 мм, внешний диаметр - 6,68 мм, длина внутренней части - 17,68 мм, внутренний диаметр - 2,9 мм.

Результаты исследования. На основе расчетов антенны в виде усеченного параболоида (рис. 4), моделированной в программной среде FEKO [6], произведен расчет параметров ДН антенны и коэффициента стоячей волны по напряжению (КСВН).

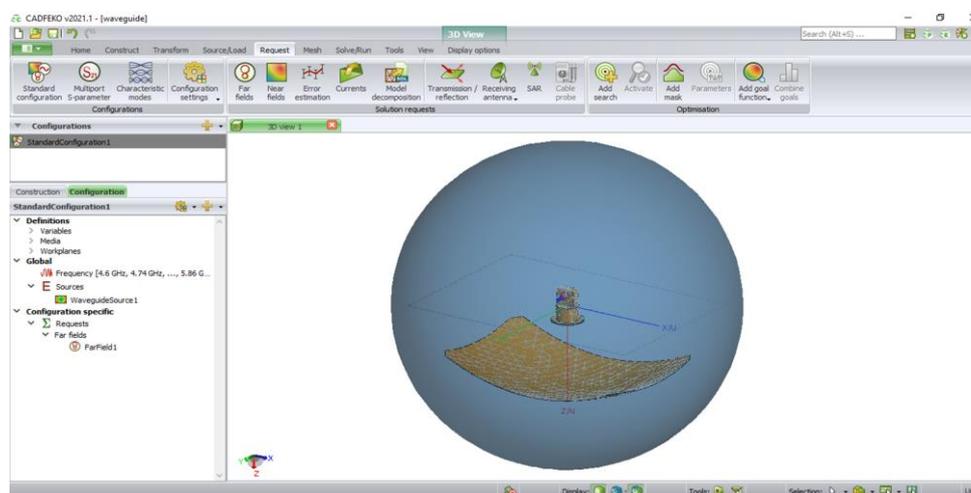


Рис 4. Вид моделированной антенны

На рис. 5-7 представлены результаты расчета моделированной антенны в виде графиков для диапазона частот 4,6...6 ГГц: нормированные диаграммы направленности в плоскостях Е и Н, коэффициента усиления и коэффициента стоячей волны по напряжению от частоты (рис. 8).

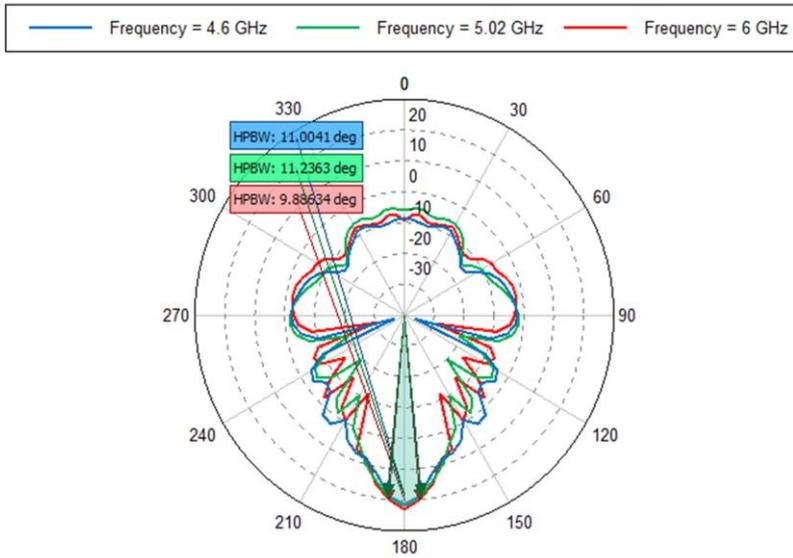


Рис 5. Диаграмма направленности антенны в плоскости H

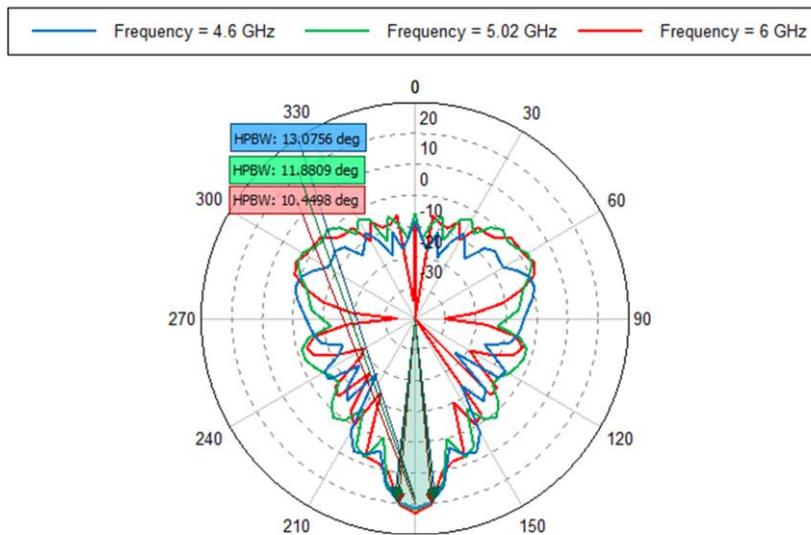


Рис 6. Диаграмма направленности антенны в плоскости E

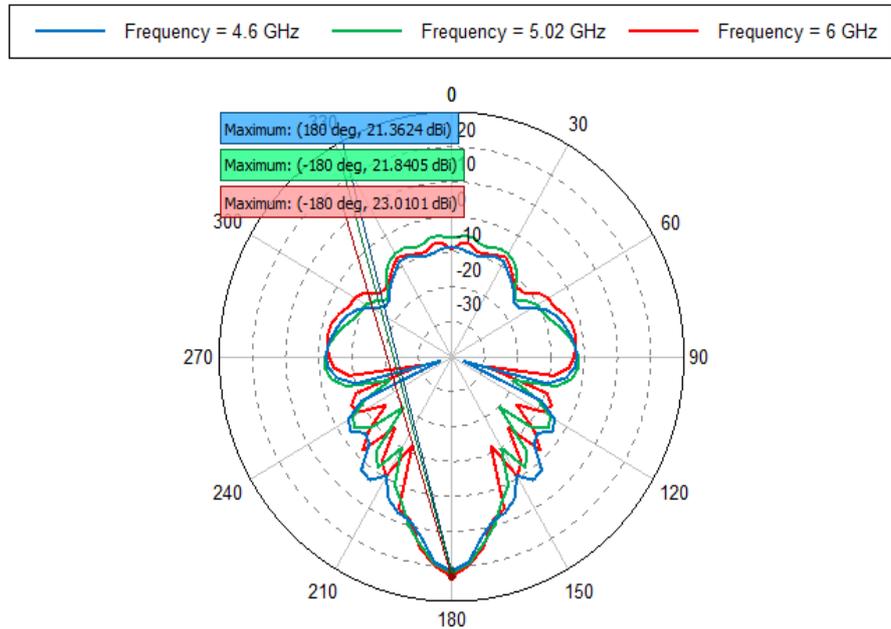


Рис.7. Коэффициент усиления антенны для частот $f = 4.6 \dots 6$ ГГц

Величина главного лепестка ДН по половинной мощности моделированной антенны в плоскости Е для частоты $f = 4.6$ ГГц равна $2\theta_{0,5} = 13.0756^\circ$, для частоты $f = 5$ ГГц - $2\theta_{0,5} = 11.8809^\circ$, для $f = 6$ ГГц - $2\theta_{0,5} = 10.4498^\circ$.

Величина главного лепестка ДН по половинной мощности моделированной антенны в плоскости Н для частоты $f = 4.6$ ГГц равна $2\varphi_{0,5} = 11.0041^\circ$, для частоты $f = 5$ ГГц - $2\varphi_{0,5} = 11.2363^\circ$, для $f = 6$ ГГц - $2\varphi_{0,5} = 9.88634^\circ$. Коэффициент усиления антенны для частоты $f = 4.6$ ГГц равен КУ = 21.3624 дБ, для частоты $f = 5$ ГГц - КУ = 21.8405 дБ, для $f = 6$ ГГц - КУ = 23.0101 дБ.

КСВН в диапазоне частот $f = 4.987 \dots 5.33$ ГГц не превышает 2 (КСВН < 2).

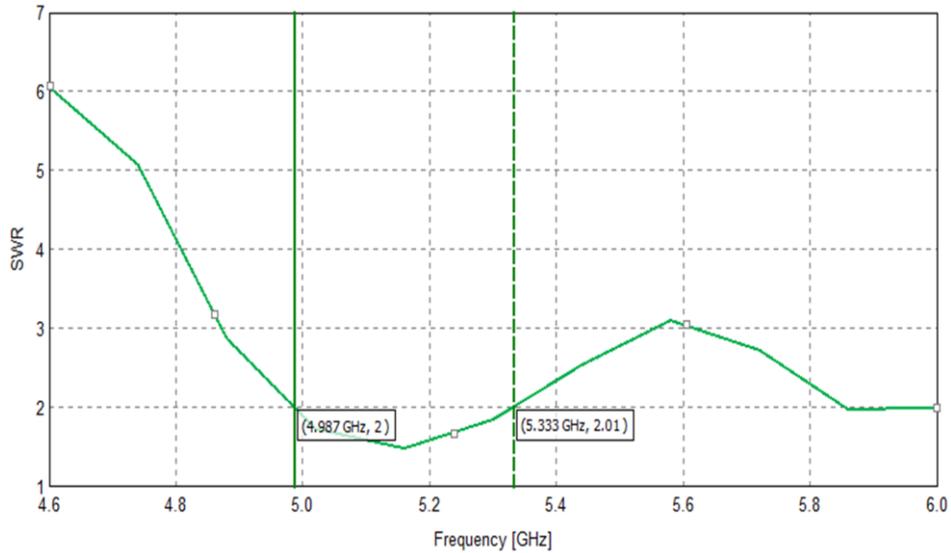


Рис.8. Коэффициент стоячей волны по напряжению в диапазоне частот $f = 4,6 \dots 6$ ГГц

Измерение параметров реальной зеркальной антенны в виде усеченного параболоида с использованием оборудования NI USRP-2901 и NI PXIe-5630. На основе моделированной антенны была изготовлена ее реальная модель (рис.9), затем с помощью векторного анализатора цепей NI PXIe-5630 были измерены ее характеристики [7].

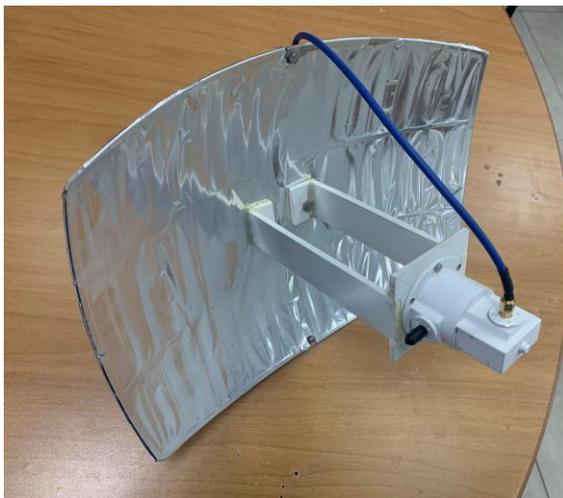


Рис.9. Реальная модель зеркальной антенны в виде усеченного параболоида

Измерения параметров антенны проводились в Инженерном городе. Измерения проводились для частоты 5 ГГц с использованием радиоустройства NI USRP-2901 [8]. Зависимость стоячей волны от частоты реальной модели антенны представлена на рис. 10. В рабочем диапазоне частот $f = 4,6 \dots 5,6$ ГГц КСВН не превышает 2.

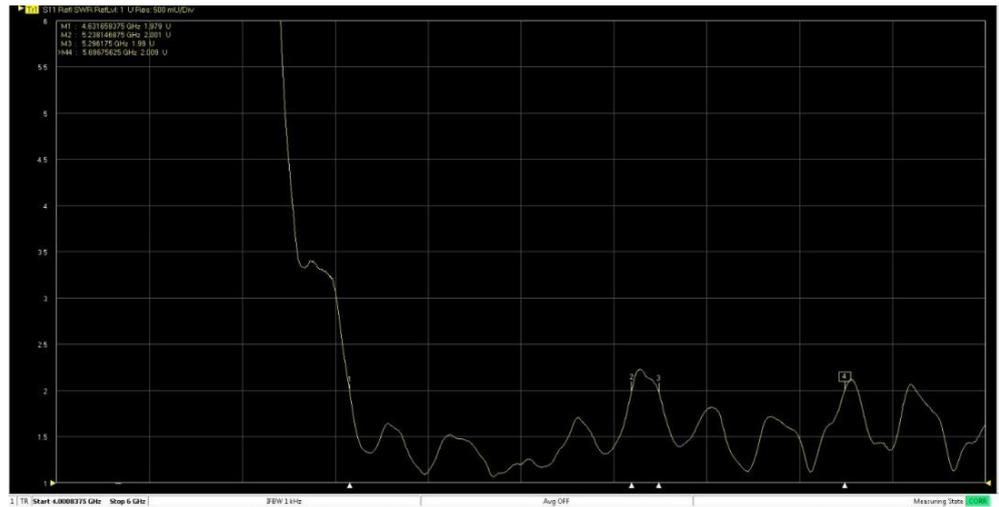


Рис.10. Зависимость коэффициента стоячей волны от частоты реальной модели зеркальной антенны в виде усеченного параболоида

Диаграммы направленности реальной модели антенны показаны на рис. 11 (в плоскости H) и рис. 12 (в плоскости E).

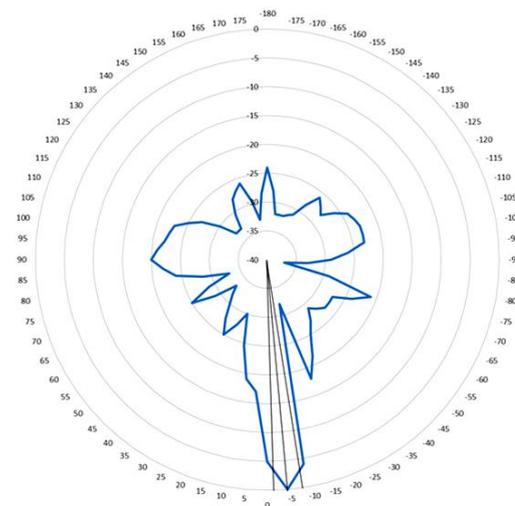


Рис.11. ДН реальной антенны в плоскости H

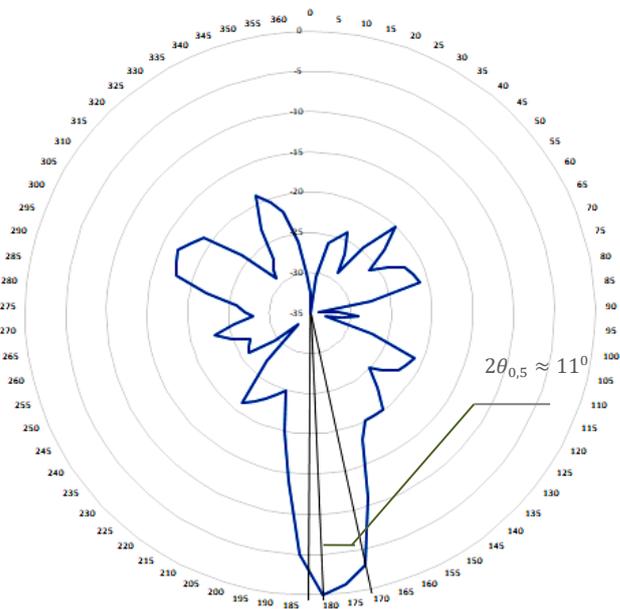


Рис.12. ДН реальной антенны в плоскости E

Заклучение

1. Моделирована зеркальная антенна в виде усеченного параболоида в программной среде FEKO в диапазоне частот $f = 4,6 \dots 6$ ГГц .

2. Для моделированной антенны получены следующие параметры: в плоскости E для частоты $f = 4,6$ ГГц - $2\theta_{0,5} = 13,0756^\circ$, для частоты $f = 5$ ГГц - $2\theta_{0,5} = 11,8809^\circ$, для $f = 6$ ГГц - $2\theta_{0,5} = 10,4498^\circ$; в плоскости H для частоты $f = 4,6$ ГГц - $2\varphi_{0,5} = 11,0041^\circ$, для частоты $f = 5$ ГГц - $2\varphi_{0,5} = 11,2363^\circ$, для $f = 6$ ГГц - $2\varphi_{0,5} = 9,88634^\circ$. Коэффициент усиления антенны в плоскостях E и H для частоты $f = 4,6$ ГГц - КУ = 21,3624 дБ, для частоты $f = 5$ ГГц - КУ = 21,8405 дБ, для частоты $f = 6$ ГГц - КУ = 23,0101 дБ. Коэффициент стоячей волны по напряжению в диапазоне частот $f = 4,987 \dots 5,33$ ГГц не превышает 2 (КСВ < 2).

3. С помощью векторного анализатора цепей NIPXIe-5630 измерен КСВН реальной антенны.

4. Для реальной антенны при $f = 5$ ГГц в плоскости E - $2\theta_{0,5} \approx 11^\circ$, в плоскости H - $2\varphi_{0,5} \approx 9^\circ$.

5. Полученные результаты КСВН ($2\theta_{0,5}$ и $2\varphi_{0,5}$) смоделированной в программной среде FEKO антенны и реальной модели совпадают.

6. Разработанная антенна может быть использована в гражданских и военных системах связи, а также в учебном процессе Национального

политехнического университета Армении в рамках лабораторных и научно-исследовательских работ по предметам “Антенны” и “Радиолокационные и радионавигационные системы”.

Литература

1. Основы теории антенн и распространения радиоволн / **В.П. Кубанов., В.А Ружников и др.** –М.: Горячая линия, 2021.-276с.
2. **Баранов С.А.** Устройства СВЧ и антенны. –М.: Горячая линия - Телеком, 2018.- 344с.
3. <https://www.everythingrf.com/rf-calculators/waveguide-calculator>
4. <https://www.everythingrf.com/rf-calculators/circular-waveguide-calculator>
5. <https://firstsourcewireless.com/blogs/blog/how-to-identify-the-right-coax-cables-connectors>
6. **Курушин А.А, Банков С.Е, Грибанов А.Н.** Электродинамическое моделирование антенных и СВЧ структур с использованием FEKO.- М.: Солон-пресс, 2017.-412с.
7. <https://www.ni.com/ru-ru/support/model.pxie-5630.html>
8. <https://www.ni.com/ru-ru/shop/model/usrp-2901.html>

Поступила в редакцию 09.02.2024.

Принята к опубликованию 19.06.2024.

ԿՏՐՎԱԾ ՊԱՐԱԲՈՒՄԻՆԻՑԻ ՏԵՍՔՈՎ ՀԱՅԵԼԱՅԻՆ ԱՆՏԵՆԱՅԻ ՆԱԽԱԳԾՈՒՄԸ

Լ.Խ. Խաչատրյան, Ս.Գ. Էյրամջյան, Կ.Ա. Տեր-Մինասյան

Ռադիոէլեկտրոնիկայի ամենաարագ զարգացող ոլորտներից մեկը անտենաների և ԳԲՀ սարքավորումների տեխնիկան է: Անտենաները տարբեր ռադիոտեխնիկական համակարգերի կարևորագույն ֆունկցիոնալ բլոկներից են: Հայելային անտենաները ռադիոլոկացիայի, ռադիոկապի և ռադիոաստղագիտության ամենատարածված սուր ուղղված ԳԲՀ անտենաներից են:

Նախագծված է կտրված պարաբոլիդի տեսքով հայելային անտենա: Անտենան մոդելավորվել է, և դրա բնութագրերը հաշվարկվել են ժամանակակից էլեկտրադինամիկայի մոդելավորման ամենահզոր ծրագրերից մեկի՝ FEKO-ի միջոցով, որը եռաչափ միկրոալիքային սարքերի նախագծման նոր մոտեցում է:

Ներկայացված են կտրված պարաբոլիդի տեսքով հայելային անտենայի հաշվարկման ակնադիտական արդյունքները գրաֆիկների տեսքով: Նախագծված անտենայի համար որպես սնուցում ընտրվել է կլոր ալիքատարի բաց ծայրով անտենան, որը բաղկացած է երկու մասից՝ ուղղանկյուն և կլոր ալիքատարներից: Ներկայացված են նշված անտենայի ուղղվածության դիագրամները բևեռային կոորդինատային համակարգում E և H հարթություններում, ուժեղացման գործակցի և ըստ լարման կանգուն ալիքի գործակցի կախվածությունը հաճախականությունից մոդելավորված FEKO ծրագրային միջավայրում: Հաշվարկված է անտենայի ուղղվածության դիագրամի գլխավոր

թերթիկի լայնությունը ըստ կես հզորության՝ $2\theta_{0,5}$ և $2\varphi_{0,5}$: Ներկայացված են իրական անտենայի կառուցվածքը, իրական և մոդելավորված անտենաների ուղղվածության դիագրամների և կանգուն ալիքի գործակցի համեմատական արդյունքները: Նախագծված անտենայի բնութագրերը չափվել են NI PXIe-5630 շղթաների վեկտորային անալիզատորով և NI USRP-2901 ռադիոսարքավորման միջոցով: Ներկայացված են փորձարկման հետազոտման արդյունքները և դրանց համապատասխանության հաստատումը մոդելավորման արդյունքներին: Նախագծված անտենան աշխատում է 4,6...6 *ԳՀց* հաճախականային տիրություն:

Առանցքային բառեր. հայելային անտենա, ուղղվածության դիագրամ, ուժեղացման գործակից, ըստ լարման կանգուն ալիքի գործակից, FEKO ծրագրային փաթեթ, NI USRP-2953R ռադիոսարքավորում, NI PXIe-5630 շղթաների վեկտորային անալիզատոր:

DESIGN OF A REFLECTOR ANTENNA IN THE FORM OF A TRUNCATED PARABOLOID

L.Kh. Khachatryan, S.G. Eyrarmjyan, K.A. Ter-Minasyan

One of the fastest developing areas of radioelectronics are antennas and microwave devices. Antennas are one of the most important functional blocks of different radio engineering systems. Parabolic antennas are the most common unidirectional microwave antennas in radar systems, radio communication and radio astronomy.

A parabolic antenna in the form of truncated paraboloid is developed. The antenna is designed, and its characteristics are calculated using one of the most modern software for electrostatics modeling, FEKO, which represents a new approach to the design of three-dimensional microwave devices.

The visualized results of calculations of a parabolic antenna in the form of a truncated paraboloid, which are displayed in the form of graphs. As a radiator for the designed antenna a circular open-ended waveguide is chosen, which consists of two parts – the rectangular and the circular waveguides. For the developed antenna, the radiation patterns in the polar system in E and H planes, and the gain and voltage standing wave ratio (VSWR) are presented, designed in FEKO software. The value of the main lobe of the pattern at half power $2\theta_{0,5}$ and $2\varphi_{0,5}$ is calculated. The structure of the real antenna is shown. The results of comparisons of the values of dependency of VSWR on the frequency and radiation patterns of real and designed antennas are introduced. The parameters of the developed antenna were measured using the NI PXI-5630 network vector analyzer and the NI USRP-2901 radio device. The results of experimental studies have shown their compliance with the results of modeling. The developed antenna operates in the 4.6...6 *GHz* frequency range.

Keywords: mirror antenna, pattern, gain, voltage standing wave ratio, FEKO software package, NI USRP-2901 radio device, NI PXIe-5630 vector network analyzer.