

УДК 621.396

А. С. Раев, магистрант

П. М. Касимов, А. А. Зайцева, студенты

А. Н. Копысов, канд. техн. наук, доц., зав. кафедрой «Радиотехника»

В. В. Хворенков, д-р техн. наук, проф.

E-mail: pavel_kasimov5@list.ru

Ижевский государственный технический университет имени М. Т. Калашникова

Сравнение и оценка диаграмм направленности излучателей для работы с поляризационно-модулированными сигналами в прототипе и в модели

Данная статья посвящается оценке и сравнению диаграмм направленности излучателей для работы с поляризационно-модулированными сигналами в прототипе и в модели. Описана структура двухкомпонентной антенны для работы с поляризационно-модулированными сигналами. Создана модель данного излучателя и измерена диаграмма направленности в модели. Разработана методика и проведены испытания излучателей, выполнена оценка характеристик прототипа. В результате было выявлено, что характеристики реальных прототипов не соответствуют характеристикам модели. Замечено, что ширина диаграммы направленности прототипа меньше, чем в модели, примерно на 200, а уровень усиления упал на 2,5 дБ.

Ключевые слова: двухкомпонентная антенна, диаграмма направленности, Rohde & Schwarz SMA 100B, Rohde & Schwarz FSW8, MATLAB.

Введение

Внедрение компьютерного моделирования при разработке радиосистем часто используется компьютерное моделирование, однако характеристики реальных прототипов в большинстве случаев имеют отклонения. Особенно ярко данная проблема проявляется при разработке цифровых систем, в частности цифровых антенных решеток. С данной проблемой сталкиваются при конструировании излучателей, входящих в их состав.

Согласно вышесказанному целью работы является сравнение и оценка результатов измерения диаграммы направленности прототипа излучателя и компьютерной модели.

В ходе данного исследования было необходимо выполнить следующие задачи:

1. Описание структуры и разработка модели двухкомпонентной антенны.
2. Измерение характеристики полученной модели и разработка реального прототипа.
3. Разработка методики проверочных испытаний излучателей, входящих в состав цифровой антенной решетки.
4. Выполнение испытаний согласно методике и измерение диаграммы направленности прототипа.
5. Сравнение результатов проведенных испытаний и результатов моделирования.

Теоретические сведения

Поляризацию электромагнитных волн чаще всего характеризуют двумя основными параметрами: углом ориентации одной из полуосей эллипса поляризации и отношением малой полуоси эллипса (θ) поляризации к большой (коэффициент эллиптичности K). При этом направление вращения вектора поля задается знаком коэффициента эллиптичности. Иногда используют параметр угла эллиптичности $\varphi = \arctg(K)$ [0].

Все описанные параметры можно пронаблюдать на рис. 1.

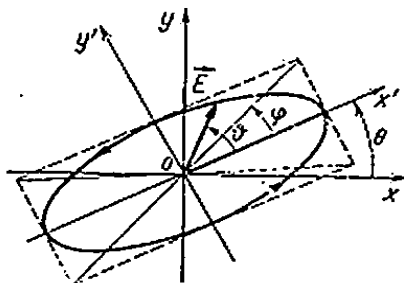


Рис. 1. Поляризационная диаграмма электромагнитного излучения

Для обеспечения приема электромагнитной волны (ЭМВ) любой поляризации без потерь необходимо обеспечить преобразование в электрический сигнал сразу двух компонент ЭМВ: горизонтальной $e_{\xi}(t)$ и вертикальной $e_{\eta}(t)$. Антенна, которая соответствует данному описанию, называется двухкомпонентной [3].

Структурная схема такой антенны представлена рис. 2.

Параметры поляризации такой антенны, как в режиме приема, так и в режиме передачи, будут одни и те же: θ , φ . Антенна состоит из уст-

ройств 1, 2 компенсации углов ориентации и эллиптичности поляризационной диаграммы приемного сигнала.

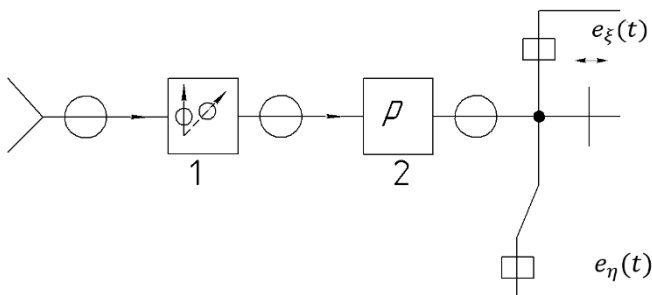


Рис. 2. Структурная схема двухкомпонентной антенны

Разработка модели

Пользуясь теоретическими сведениями, разработана модель двухкомпонентной антенны. Модель построена в программе High Frequency Structural Simulator [4]. Разработанная модель представлена на рис. 3.

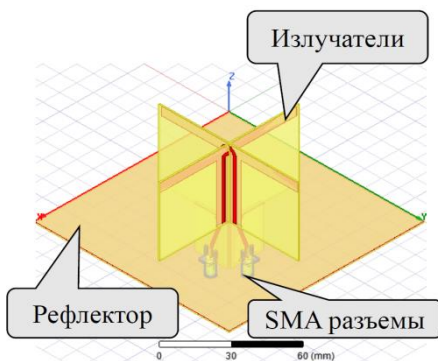


Рис. 3. Модель излучателя для работы с поляризационно-модулированными сигналами

Отличие модели от теоретической структурной схемы заключается в отсутствии устройств компенсации углов φ и θ и наличии двух отдельных излучателей (диполей) на каждую плоскость поляризации: горизонтальную и вертикальную.

Излучатели крепятся к рефлектору путем пайки. Допустимо использование дополнительного пластикового крепежа. Предлагаемый материал печатных плат – Taconic RF-30, толщина диэлектрика – 0,762 мм, толщина медных проводников – 0,035 мм [5].

На основе данной модели произведен анализ технических характеристик. Основными из рассматриваемых характеристик являлись диаграммы направленности для каждой плоскости поляризации. Для качественного разбора построены графики значений в зависимости от частоты.

Далее проведен разбор диаграммы направленности излучателя. ДН были построены при активизации излучателя в плоскости OX и OY . Далее представлена ДН при активизации излучателя в плоскости OX (рис. 4).

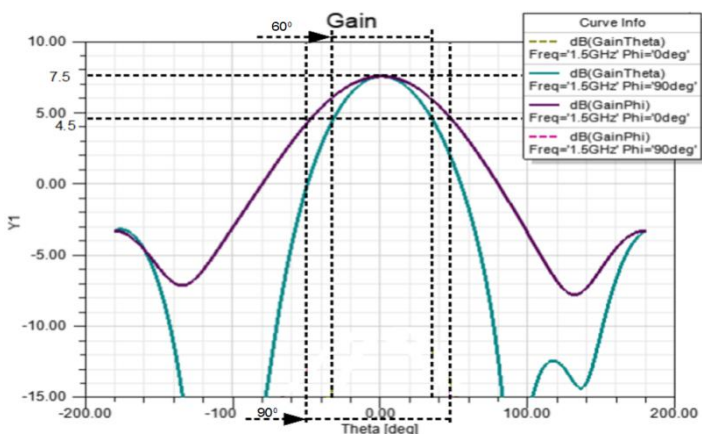


Рис. 4. Коэффициент усиления модели излучателя при активизации излучателя в плоскости OX

На графике отмечены основные характеристики:

- уровень максимума главного лепестка $\varphi = 0^\circ$ 7,5 дБ;
- уровень максимума главного лепестка $\varphi = 90^\circ$ 7,5 дБ;
- ширина главного лепестка $\varphi = 0^\circ$ 60° ;
- ширина главного лепестка $\varphi = 90^\circ$ 90° .

Также представлена ДН при активизации излучателя в плоскости OY (рис. 5).

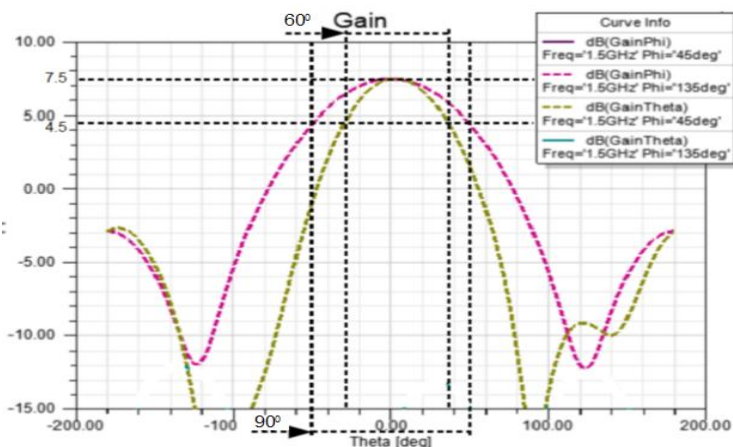


Рис. 5. Коэффициент усиления модели излучателя при активизации излучателя в плоскости OY

На графике отмечены основные характеристики:

- уровень максимума главного лепестка $\phi = 0^\circ$ 7,5 дБ;
- уровень максимума главного лепестка $\phi = 90^\circ$ 7,5 дБ;
- ширина главного лепестка $\phi = 0^\circ$ 90° ;
- ширина главного лепестка $\phi = 90^\circ$ 60° .

Пользуясь данной моделью, построен прототип излучателей. Структура данного прототипа представлена на рис. 6.

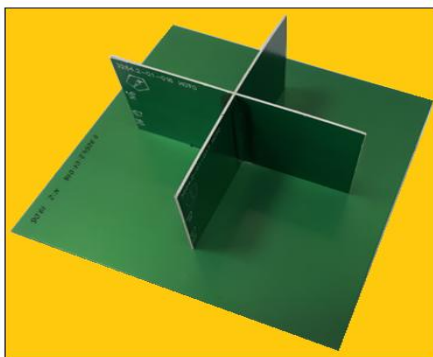


Рис. 6. Прототип излучателя для работы с поляризационно-модулированными сигналами

Как было описано в модели, данный прототип имеет два диполя, отвечающие за свою плоскость поляризации.

Разработка методики проверочных испытаний излучателей, входящих в состав цифровой антенной решетки

Для анализа и оценки диаграммы направленности необходимо произвести испытания, в рамках которых выполняется прием гармонического сигнала и производится измерение его уровня. Сигнал формируется с генератора сигналов Rohde & Schwarz SMA 100B [6]. Прием осуществляется анализатором спектра и сигналов Rohde & Schwarz FSW8 [7].

Материально-техническое обеспечение испытаний:

- Rohde & Schwarz SMA 100B 1 шт.;
- Rohde & Schwarz FSW8 1 шт.;
- излучатели..... 2 шт.

Эталонный сигнал представляет собой гармонический сигнал:

- частота несущей 1,5 ГГц;
- шаг перестройки частоты 1 МГц;
- уровень сигнала 0 дБм.

В испытаниях участвовало два прототипа излучателей: один в качестве передающего, второй в качестве приемного. Подключив один диполь первого излучателя к генератору, а другой диполь к 50 Ом, выполняется передача гармонического сигнала. Далее подключить один диполь второго излучателя к анализатору спектра и сигналов, другой диполь этого излучателя подключить к 50 Ом и произвести прием гармонического сигнала. Разместить излучатели на расстоянии 2 м друг от друга, передающий и приемный диполи – параллельно друг другу, направление основного излучения – друг на друга; выполнить анализ коэффициента передачи в полосе ± 3 МГц от несущей частоты 1,5 ГГц. Далее, поворачивая передающий излучатель с шагом 100 в горизонтальной плоскости относительно исходного направления, измерить зависимость коэффициента передачи от направления [8]. Далее повторяются испытания для второго диполя.

Проведенные испытания и их результаты

Согласно описанной методике проведены испытания. Структурная схема подключения аппаратуры представлена на рис. 7.

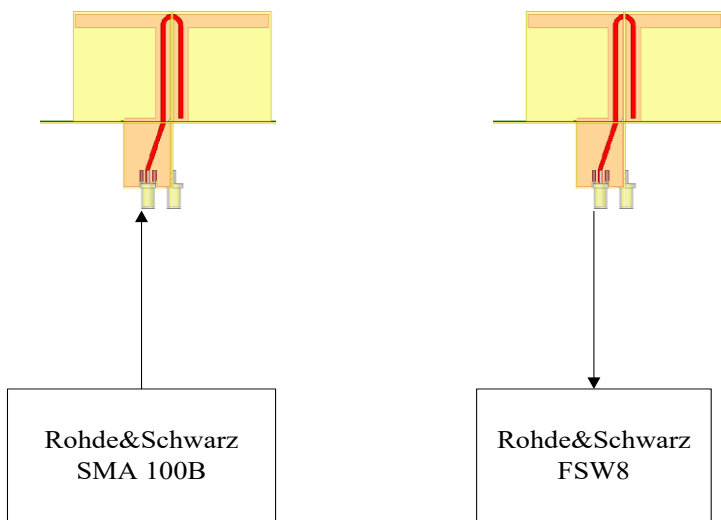


Рис. 7. Схема подключения измерительной аппаратуры

Испытания проводились в лабораторных условиях при нормальных значениях окружающей среды (температура, влажность, давление, и т. д.).

На первом этапе испытаний необходимо определить зависимость коэффициента передачи в полосе ± 3 МГц от несущей частоты 1,5 ГГц для четырех комбинаций подключения.

Результаты измерения представлены в таблице.

Изменение коэффициента передачи от частоты

Перестройка частоты, МГц	-3	-2	-1	0	1	2	3
Коэф. пер. 1/1, дБм	-32	-32	-32	-32	-32	-32	-32
Коэф. пер. 2/2, дБм	-32	-32	-32	-32	-32	-32	-32

На втором этапе выполняется оценка зависимости коэффициента передачи от направления. При повороте передающего излучателя с шагом 10° оценивался коэффициент передачи для всех четырех комбинаций подключения диполей. Поскольку от частоты коэффициент передачи не имел искажений, согласно таблице, измерения производятся лишь на несущей частоте.

Далее необходимо перевести значения коэффициента передачи в соответствующий им коэффициент усиления антенны [8]. При направле-

нии излучателей строго друг на друга коэффициенты усиления являются идентичными и вычисляются по формуле

$$G = \frac{4 \cdot \pi \cdot r}{\lambda} \sqrt{\frac{P_R}{P_T}}, \quad (1)$$

где P_R/P_T – коэффициент передачи; r – расстояние между антеннами; λ – длина волны.

При повороте передающего излучателя на определенный угол ее коэффициент усиления изменяется, тогда как коэффициент усиления приемного излучателя сохраняется и равен коэффициенту усиления при нулевом направлении.

Исходя из этого, коэффициент усиления излучателя для определенного угла вычисляется по формуле:

$$G_2 = \frac{(4 \cdot \pi \cdot r)}{\lambda^2 \cdot G} \cdot \left(\frac{P_R}{P_T} \right), \quad (2)$$

где P_R/P_T – коэффициент передачи; r – расстояние между антеннами; λ – длина волны; G – коэффициент усиления антенны для нулевого направления.

Сравнение результатов исследования

Согласно результатам в программе MATLAB [9] построены графики диаграммы направленности при активизации излучателя в плоскости OX (рис. 8) и в плоскости OY (рис. 9).

На графике (рис. 8) отмечены основные характеристики:

- уровень максимума главного лепестка $\varphi = 0^\circ$ 5 дБ;
- уровень максимума главного лепестка $\varphi = 90^\circ$ 5 дБ;
- ширина главного лепестка $\varphi = 0^\circ$ 40°;
- ширина главного лепестка $\varphi = 90^\circ$ 70°.

На графике (рис. 9) отмечены основные характеристики:

- уровень максимума главного лепестка $\varphi = 0^\circ$ 5 дБ;
- уровень максимума главного лепестка $\varphi = 90^\circ$ 5 дБ;
- ширина главного лепестка $\varphi = 0^\circ$ 70°;
- ширина главного лепестка $\varphi = 90^\circ$ 55°.

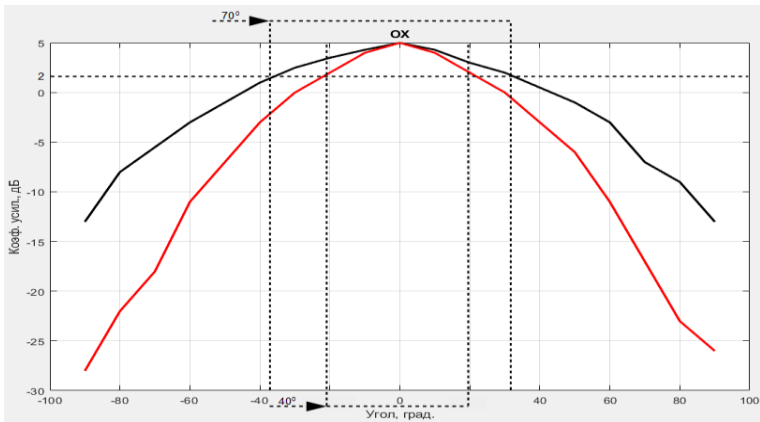


Рис. 8. Коэффициент усиления прототипа излучателя при активизации излучателя в плоскости OX

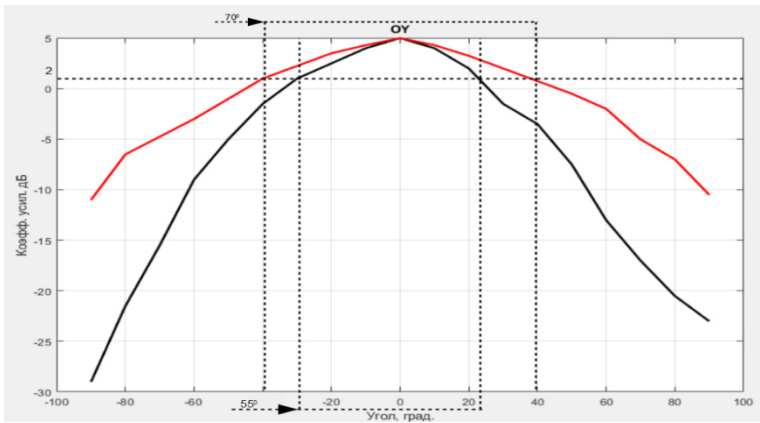


Рис. 9. Коэффициент усиления прототипа излучателя при активизации излучателя в плоскости OY

Пользуясь результатами моделирования излучателей и результатами испытания прототипов, необходимо сравнить основные характеристики оценки диаграммы направленности излучателя. Можно заметить, что коэффициент усиления излучателя в прототипе меньше на 2,5 дБ относительно модели. Однако ширина диаграммы направленности прототипа для диполя в плоскости OX меньше на 20° , как при $\varphi = 0^\circ$ и $\varphi = 90^\circ$

относительно результатов модели. Так же для диполя в плоскости OY ширина диаграммы направленности прототипа меньше на 20° при $\varphi = 0^\circ$ и на 15° при $\varphi = 90^\circ$ относительно результатов модели.

Выводы

В результате работы согласно описанному теоретическому материалу для разработки двухкомпонентной антенны разработана ее компьютерная модель. Измерена диаграмма направленности в модели, согласно которой коэффициент усиления в максимуме равняется 7,5 дБ. Ширина же диаграммы направленности равняется 60° при $\varphi = 0^\circ$ для диполя в плоскости OX и при $\varphi = 90^\circ$ для диполя в плоскости OY в модели. Так же ширина диаграммы направленности равна 90° при $\varphi = 90^\circ$ для диполя в плоскости OX и при $\varphi = 0^\circ$ для диполя в плоскости OY в модели. На основе данной модели разработан прототип излучателя. Для оценки и сравнения диаграммы направленности прототипа разработана методика измерения и согласно ей проведены испытания. Выявлено, что в полосе ± 3 МГц от несущей частоты 1,5 ГГц уровень сигнала не имеет значительных отклонений, поэтому было решено измерять диаграмму направленности лишь на несущей частоте. Исходя из результатов испытаний, диаграмма направленности прототипа имеет основные характеристики: коэффициент усиления главного лепестка, равный 5 дБ, что меньше на 2,5 дБ относительно результатов моделирования. Ширина диаграммы направленности составляет: 40° ($\varphi = 0^\circ$) и 70° ($\varphi = 90^\circ$) для диполя в плоскости OX и 55° ($\varphi = 90^\circ$) и 70° ($\varphi = 0^\circ$) для диполя в плоскости OY . Можно сделать вывод, что ширина диаграммы направленности прототипа меньше чем в модели примерно на 20° , а уровень усиления упал на 2,5 дБ.

Список используемой литературы

1. Гусев, К. Г. Поляризация модуляция / К. Г. Гусев, А. Д. Филатов, А. П. Сополев. – Москва : Сов. радио, 1974. – 288 с.
2. Татаринев, В. Н. Введение в современную теорию поляризации радиолокационных сигналов. Т. 1. Поляризация плоских электромагнитных волн и её преобразования / В. Н. Татаринев, С. В. Татаринев, Л. П. Лигтхарт. – Томск : Изд-во Томского ун-та, 2012. – 380 с.
3. Лавров, А. С. Антенно-фидерные устройства / А. С. Лавров, Г. Б. Резников. – Москва : Сов. радио, 1974. – 360 с.
4. Банков, С. Е. Расчет антенн и СВЧ-структур с помощью HFSS Ansoft / С. Е. Банков, А. А. Курушин. – Москва : НПП «Родник», 2009. – 256 с.
5. Раев, А. С. Разработка макета цифровой антенной решетки для исследования поляризационно-модулированных сигналов / А. С. Раев // Информационные технологии в науке, промышленности и образовании : сб. тр. Всерос. науч.-

техн. конф. (Ижевск, 31 мая 2019 г.) / отв. ред. К. Ю. Петухов. – Ижевск : Изд-во ИЖГТУ имени М. Т. Калашникова, 2019. – С. 319–329.

6. R&S SMA 100B. RF and Microwave Signal Generator. Specifications. – Текст : электронный // Rohde & Schwarz [сайт]. – URL: https://www.rohde-schwarz.com/ru/manual/-r-s-sma100b-manuals-gb1_78701-434880.html (дата обращения: 08.06.2020).

7. R&S FSH Signal and Spectrum Analyzer. User Manual [Электронный ресурс] // Rohde&Schwarz [сайт]. – URL: https://www.rohde-schwarz.com/ru/manual/-r-s-fsw-manuals-gb1_78701-29088.html (дата обращения 08.06.2020).

8. Фрадин, А. З. Измерение параметров антенно-фидерных устройств / А. З. Фрадин, Е. В. Рьжиков. – Москва : Гос. изд-во лит. по вопросам связи и радио, 1962. – 317 с.

9. Черных, И. В. Моделирование электротехнических устройств в MATLAB, SimPowerSystems и Simulink / И. В. Черных. – Москва : ДМК Пресс, 2008. – 288 с.

A. S. Raev, master student

P. M. Kasimov, A. A. Zaitseva, students

A. N. Kopysov, CSc in engineering, associate professor,
head of the “Radio Engineering” department

V. V. Khvorenkov, DSc in engineering, professor

E-mail: pavel_kasimov5@list.ru

Kalashnikov Izhevsk State Technical University, Izhevsk, Russian Federation

Development and Evaluation of Radiation Patterns of Emitters Included in the Model of a Digital Antenna Array

This article is devoted to the assessment of the radiation patterns of the emitters included in the model of the digital antenna array. A technique was developed and the test bench was tested, and the characteristics of the prototype were assessed. As a result, it was revealed that the characteristics of real prototypes do not correspond to the characteristics of the model.

Keywords: radiation pattern, two-component antenna, Rohde & Schwarz SMA 100B, Rohde & Schwarz FSW8, MATLAB.