

Министерство образования Республики Беларусь
Учреждение образования
Белорусский государственный университет
информатики и радиоэлектроники

УДК 621.396

Пъае Пъио Вай

**Методика и специальное программное обеспечение для расчета
микрополосковых антенных элементов широкополосных антенных
решеток**

АВТОРЕФЕРАТ

на соискание степени магистра по специальности 7-06-0713-03

«Радиосистемы и радиотехнологии»

(профилизация <<Радиотехника, в том числе системы и устройства
радионавигации, радиолокации и телевидения>>)

Пъае Пъио Вай

Научный руководитель
Козлов Сергей Вячеславович
доктор технических наук, профессор

Минск 2025

ВВЕДЕНИЕ

Одним из главных направлений развития систем радиосвязи, радиолокации и радиомониторинга является повышение их информационных возможностей за счет излучения, приема и обработки широкополосных и многочастотных сигналов. Полоса частот сигналов перспективных средств радиосвязи может достигать сотен МГц, а радиолокации и радионавигации – единиц ГГц. Это требует использования широкополосных антенн и антенных решеток (АР) на их основе. Использование антенн специальной конструкции с широкой полосой частот не всегда оправданно из-за ограничений по габаритам и стоимости, и на практике возникает необходимость реализации широкой полосы частот с использование известных конструкций антенн.

Наиболее популярными являются микрополосковые антенны (МПА), имеющие малые массу, габариты и высокую механическую прочность. Реализация широкой полосы частот в МПА связана с использованием схем на связанных колебательных контурах (КК) за счет дополнительных пассивных резонаторов, решеток из таких резонаторов и резонаторов специальной формы. Это требует проведения электродинамического моделирования, разработки специального программного обеспечения и рекомендаций по его использованию, что и определяет актуальность темы диссертации.

В работе были поставлены задачи по:

- обобщению литературных источников по конструкции и проектированию широкополосных и микрополосковых антенн;
- анализу известных методов обеспечения широкополосности МПА и программного обеспечения для оптимизации параметров широкополосных МПА;
- разработке методики и специального программного обеспечения для оптимизации параметров широкополосных МПА в *MatLab*;
- оптимизацию параметров и исследование характеристик широкополосных микрополосковых антенн, обобщение результатов исследований и формирование рекомендаций по разработке широкополосных МПА.

Разработанное специальное программное обеспечение и методика оптимизации параметров широкополосных МПА в *MatLab*, могут быть полезны для специалистов, разрабатывающих широкополосные антенны и радиоэлектронные средства с повышенными информационными возможностями в целом.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Связь работы с научными программами, темами

Работа выполнена на кафедре информационных радиотехнологий учреждения образования «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники» в рамках развития на предприятиях радиотехнического профиля Республики «Союз Мьянма» и Республики Беларусь промышленного производства радиолокационных средств с техническими, конструктивными и эксплуатационными характеристиками, соответствующие мировым функциональным требованиям, стандартам и технологическим нормам построения радиоаппаратуры XXI века.

Тема соответствует Перечню приоритетных направлений научной, научно-технической и инновационной деятельности в Республике Беларусь на 2023-2025 гг. в области приборостроения и инновационных материалов (п. 4), обеспечения безопасности человека, общества и государства (п. 6).

Результаты диссертационных исследований могут быть использованы при оптимизации технических решений по построению широкополосных средств радиосвязи, радионавигации и радиолокации с повышенными информационными возможностями.

Цель, задачи, объект и предмет исследования

Цель работы – разработка методики и специального программного обеспечения для оптимизации конструкции и параметров широкополосных микрополосковых антенн.

Задачи исследования:

1. Обобщение литературных источников по конструкции и проектированию широкополосных и микрополосковых антенн.
2. Анализ известных методов обеспечения широкополосности МПА и программного обеспечения для оптимизации параметров МПА.
3. Разработка методики и специального программного обеспечения для оптимизации параметров широкополосных МПА в *MatLab*.
4. Оптимизация параметров и исследование характеристик широкополосных МПА. Обобщение результатов исследований и формирование рекомендаций по разработке широкополосных МПА.

Объект – микрополосковые антенны.

Предмет – методика оптимизации параметров широкополосных микрополосковых антенн.

Научная новизна полученных результатов заключается в следующем:

1. На примере радиолокатора с непрерывным частотно-модулированным излучением (*FMCW*) для средней частоты излучения 5500 МГц определены оптимальные параметры двухслойной конструкции широкополосной МПА с активным и одним пассивным резонаторами и показано, что ее максимальная широкополосность по уровню коэффициента отражения минус 10 дБ составляет $\Delta f = 850$ МГц или широкополосность $\gamma_{\Delta f}$

=15,4% при коэффициенте усиления на центральной частоте 7,4 дБ.

2. Для варианта двухслойной конструкции широкополосной МПА с активным и решеткой из двух (четырех) пассивных резонаторов показано, что ее максимальная широкополосность по уровню коэффициента отражения минус 10 дБ составляет $\Delta f = 800$ МГц или широкополосность $\gamma_{\Delta f} = 14,5\%$ при коэффициенте усиления на центральной частоте 9,1 дБ.

3. Для варианта однослойной конструкции широкополосной МПА с активным и двумя пассивными резонаторами у излучающей кромки активного резонатора показано, что максимальная широкополосность составляет $\Delta f = 420$ МГц или широкополосность $\gamma_{\Delta f} = 7,6\%$ при коэффициенте усиления на центральной частоте 6,6 дБ.

Положения, выносимые на защиту

1. Специальное программное обеспечение для оптимизации параметров широкополосных микрополосковых антенн, *отличающееся* использованием встроенных процедур полноволнового электродинамического моделирования *MatLab* и заданием четырех вариантов конструкции широкополосных микрополосковых антенн, что *позволяет* проводить исследования эффективности и выбирать рациональные параметры антенн указанного типа при заданных требованиях к диапазону рабочих частот и качеству согласования.

2. Методика оптимизации параметров широкополосных микрополосковых антенн, *отличающаяся* процедурами выбора начальных параметров конструкции микрополосковой антенны и варьированием параметров связи между активным и пассивными резонаторами, что с использованием разработанного специального программного обеспечения *позволяет* определить оптимальные конструктивные параметры широкополосных микрополосковых антенн.

3. Результаты определения конструктивных параметров широкополосных микрополосковых антенн для диапазона частот 5...6 ГГц.

Личный вклад соискателя ученой степени в результаты диссертации с ограничением их от соавторов совместных исследований и публикаций

Представленные в диссертационной работе научные результаты, а также положения, выносимые на защиту, получены соискателем самостоятельно.

Апробация диссертации и информация об использовании ее результатов

Результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на республиканской научно-технической конференции «Информационные радиосистемы и радиотехнологии» (г. Минск 2024 г.); 61-й научной конференции аспирантов, магистрантов и студентов БГУИР (г. Минск 2025 г.).

Опубликованность результатов диссертации

По результатам исследований, представленных в диссертации, опубликовано 2 статьи в сборниках материалов научных конференций. Общий объем публикаций составляет 0,5 авторских листа.

Структура и объем диссертации

Диссертационная работа состоит из перечня сокращений и условных обозначений, введения, общей характеристики работы, четырех глав, заключения, библиографического списка и приложений.

Общий объем диссертации составляет 95 страниц, из них 71 страница основного текста, библиографический список из 24 наименований на 2 страницах, список собственных публикаций из 2 наименований на 1 странице, и одно приложение на 21 странице, включающее листинг специального программного обеспечения для оптимизации параметров широкополосных микрополосковых антенн в среде компьютерного моделирования *Matlab*.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** обосновывается актуальность работы, отмечается новизна и кратко излагается содержание диссертации, а также назначение, задачи, структура разрабатываемого специального программного обеспечения и основные научные результаты исследований.

В **первой главе** рассматриваются тенденции развития систем связи, радионавигации и радиолокации с позиций обеспечения широкополосности приемных и передающих антенн, приводится конструкция, основные характеристики и расчетные соотношения для резонансных МПА.

Показано, что системы радиосвязи, радиолокации и радионавигации развиваются в условиях растущих требований к производительности и надежности. Основными тенденциями развития указанных систем являются: одновременная работа в нескольких частотных диапазонах, что повышает гибкость систем связи и радиолокации; создание многоканальных антенных систем – современные технологии позволяют создавать массивы антенн, состоящие из большого числа независимых элементов, что улучшает характеристики направленности и увеличивает коэффициент усиления; разработка адаптивных антенн, которые могут автоматически изменять свои характеристики в зависимости от условий работы; повышение спектральной эффективности – разработка новых методов модуляции и кодирования, а также использование технологий, таких как Multiple Input - Multiple Output; интеграция с новыми технологиями, такими как 5G и другие будущие стандарты связи, что предполагает необходимость широкополосных антенн; миниатюризация – сокращение размеров антенн без потери их функциональности и производительности; поддержка гигагерцовых диапазонов - увеличение частот, используемых для связи и радиолокации,

требует разработки антенн, способных работать на гигагерцовых диапазонах.

Классическая МПА (рисунок 1), состоит из очень тонкой металлической полоски (пластины, патча), размещенной на небольшой части длины волны над плоскостью заземления. Главный лепесток диаграммы направленности МПА перпендикулярен пластине.

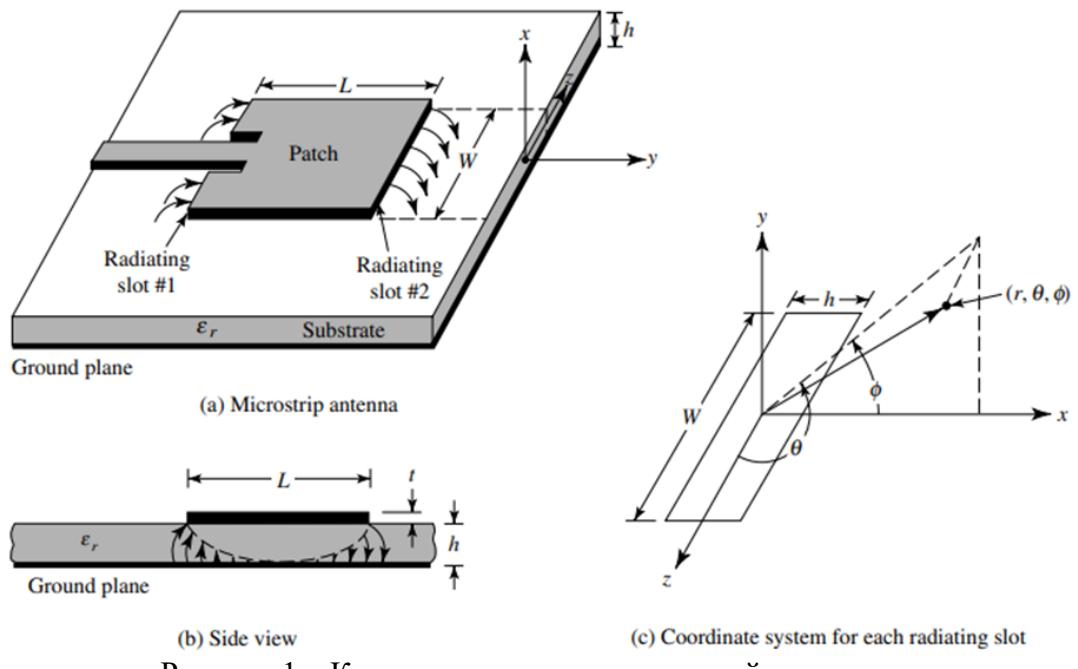


Рисунок 1 – Конструкция микрополосковой антенны

Патч и плоскость заземления разделяются диэлектрической подложкой. Широкополосность МПА обычно составляет 3...5%. При увеличении толщины диэлектрической подложки и использовании диэлектриков с небольшим 1...2,5 значением диэлектрической проницаемости широкополосность МПА несколько увеличивается.

Во второй главе проводится анализ известных методов обеспечения широкополосности МПА и описываются конструкции антенн.

Основой для увеличения широкополосности МПА является теория связанных колебательных контуров (СКК). Графики амплитудно-частотной характеристики (АЧХ) СКК приведены на рисунке 2, где A – фактор связи КК. Пунктирной кривой приведена АЧХ одиночного контура. Видно, что АЧХ при малых значениях фактора связи A имеют вид одногорбых резонансных кривых, а при величине фактора связи $A > 1$ АЧХ становятся двугорбыми. С увеличением фактора связи резонансные частоты удаляются от центральной частоты, а минимум на центральной частоте углубляется. Таким образом, широкополосность увеличивается.

Нормированную АЧХ связанных КК можно представить в виде

$$\frac{|U_{2m}(A, \xi)|}{|U_{2\max}|} = \frac{2A}{\sqrt{(1 + A^2 - \xi^2)^2 + \xi^4}}.$$

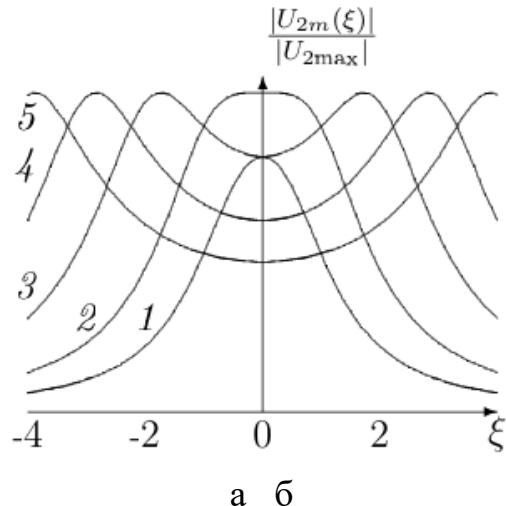


Рисунок 2 – Нормированные АЧХ контуров для различных значений фактора связи: 1 – $A=0,5$; 2 – $A=1$; 3 – $A=2$; 4 – $A=3$; 5 – $A=4$

Полный резонанс достигается при $A=1$, когда имеет место полная передача тока из первичного контура во вторичный. Реактивная часть входной проводимости обращается в нуль на центральной частоте и близка к нулю в окрестности этой частоты. АЧХ принимает П-образную форму, а полоса частот на уровне минус 3 дБ шире, чем у парциальных контуров и составит

$$2\Delta\omega = 2(\omega - \omega_0) = \sqrt{2}\omega_0/Q.$$

При закритической связи АЧХ связанных КК двугорбая, на частоте ω_0 – минимум. С увеличением фактора связи резонансные частоты симметрично расходятся, причем амплитуды выходного напряжения в них равна величине при полном резонансе. Минимум соответствует уровню минус 3 дБ, полоса частот максимальна, что достигается при граничной расстройке $\xi_{rp} = Qv \approx 3.103$, когда $A \approx 2,41$ и полоса пропускаемых на уровне –3 дБ частот при в 3,1 раза превышает полосы пропускания парциальных контуров.

Проведен анализ программных пакетов для электродинамического моделирования и показано, что наиболее доступной является матричная лаборатория *MatLab* со специализированными приложениями пакета *Signal Processing and Communication : Antenna Designer; Antenna Array Designer; PCB Antenna Designer*. Эти приложения позволяет проектировать, визуализировать и анализировать основные типы антенн в библиотеке *MATLAB Antenna Toolbox* в интерактивном режиме, в том числе выбирать антенны на основе общих свойств или производительности антенн; визуализировать конструкцию антенн; анализировать свойства антенн на основе диаграммы направленности, поляризации и полосы пропускания; добавлять к антенне окружающие элементы, такие как близкорасположенные металлические объекты, рефлекторы и т.д.; экспортовать выбранные и спроектированные антенны как переменные в рабочее пространство *MATLAB* и экспортовать скрипт с командами.

В третьей главе описываются основные блоки специального программного обеспечения (компьютерной модели) для оптимизации параметров широкополосных МПА в *MatLab*. Логика функционирования специального программного обеспечения (СПО) приведена на рисунке 3.

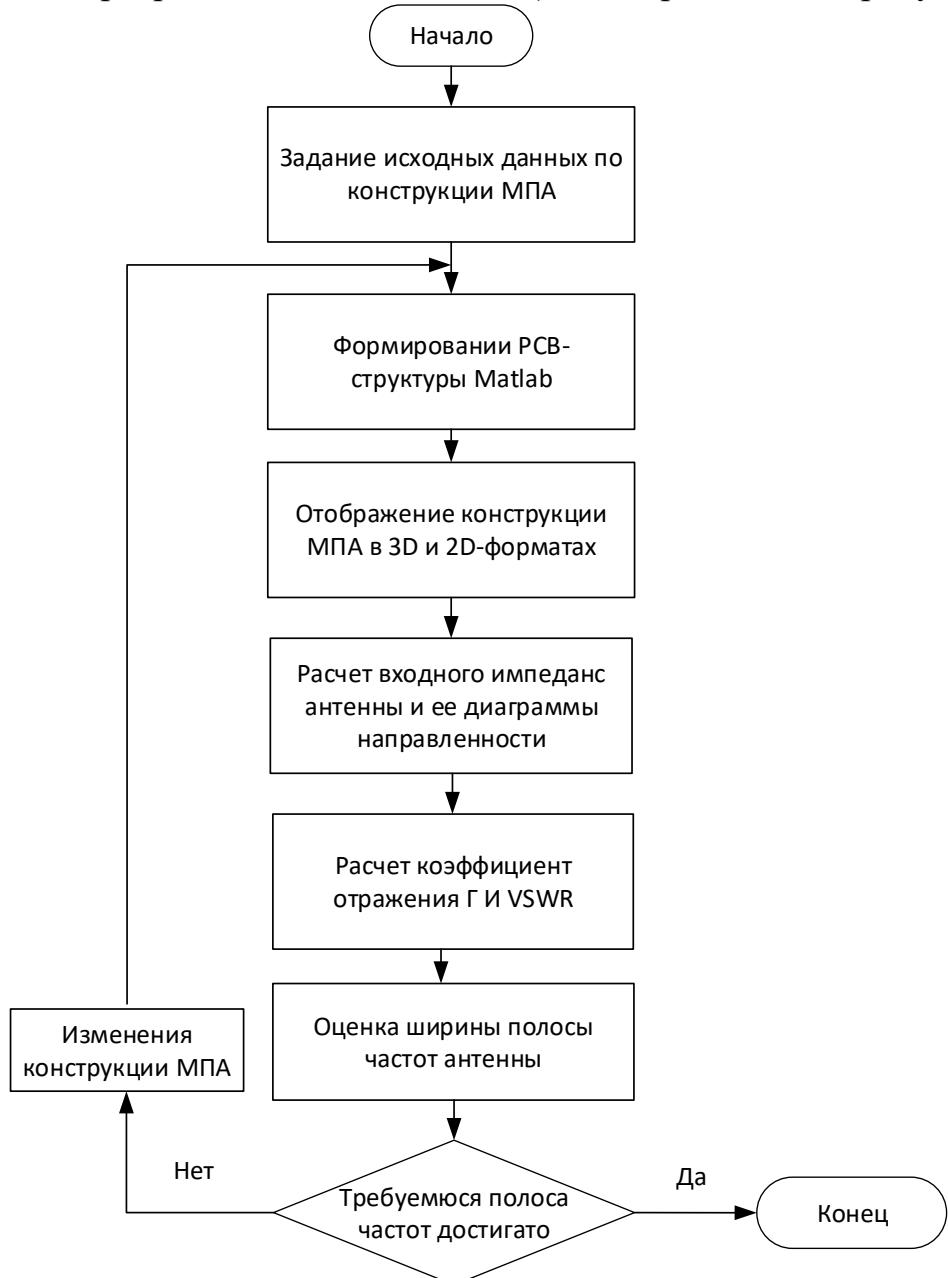


Рисунок 3– Основные блоки и последовательность вычислений для компьютерной модели

Компьютерная модель включает следующие составные части: блок задания исходных данных и расчета основных параметров микрополосковых структур; блок формирования многослойной металло-диэлектрической структуры *pcbobj* из состава системных объектов *PCB Designer*; блок расчета коэффициента отражения, коэффициента стоячей волны (КСВ, VSWR) и параметров широкополосности антенны; блок визуализации.

Основой для построения специального программного обеспечения является системный *MatLab*-объект *pcbobj*. Объект *pcbobj* относится

к объекту, который представляет печатную плату (*PCB*) в программном обеспечении для проектирования или моделирования. Этот объект может быть 2D-геометрией, изображением, или 3D-моделью, в зависимости от программного обеспечения. Он содержит информацию о размерах, расположении компонентов, трассировке дорожек, и других параметрах печатной платы, в том числе МПА.

Компьютерная модель реализована в *MatLab* и имеет удобный пользовательский интерфейс (рисунок 4) на основе *App Designer*.

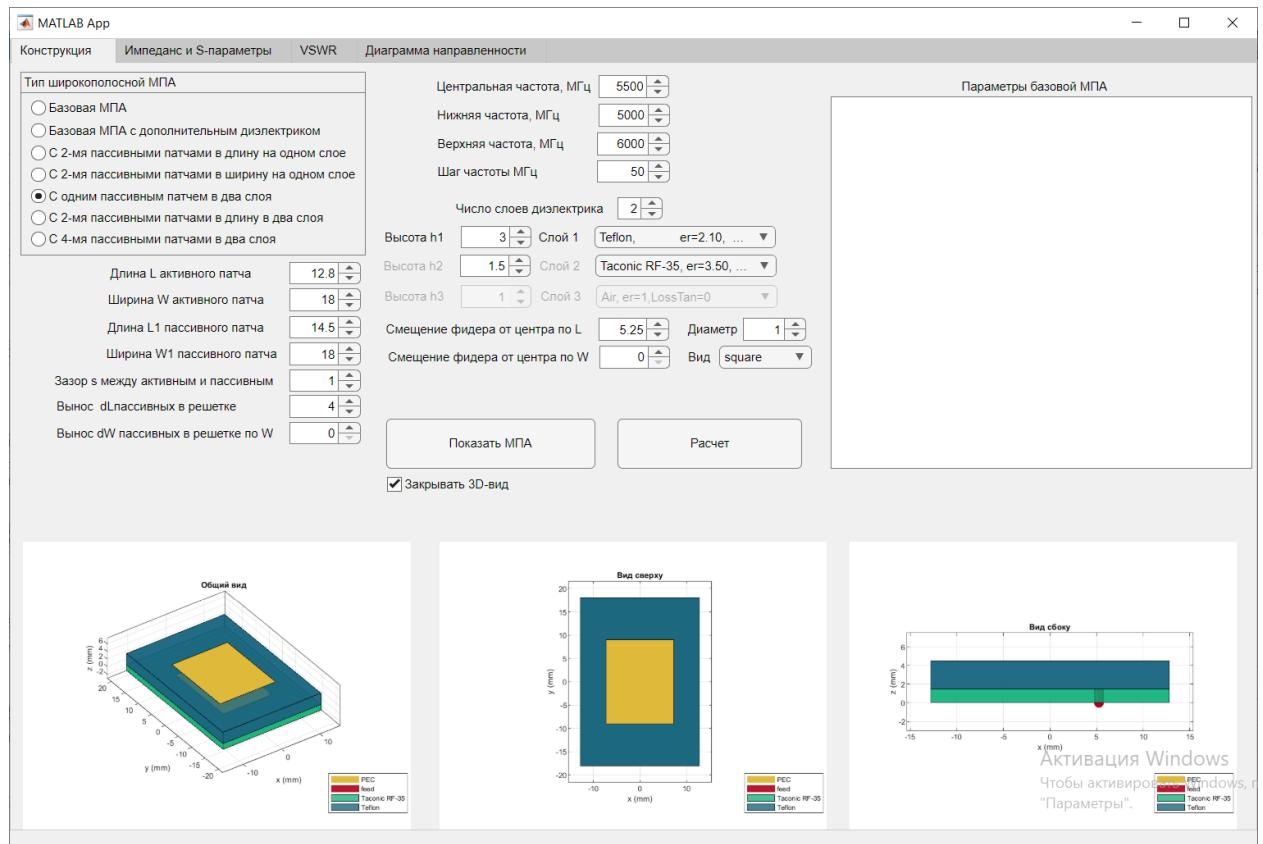


Рисунок 4 – Интерфейс компьютерной модели, выполненный с использованием *App Designer*

Предусмотрено 4 вкладки: конструкция; импеданс и S-параметры; VSWR (КСВН); диаграмма направленности. На вкладке «Конструкция» задаются тип и параметры широкополосной МПА. Предусмотрены 4 типа широкополосных МПА (рисунок 4), конструкции которых приведены на рисунке 5, а также базовая МПА и базовая МПА с дополнительным слоем диэлектрика.

При нажатии на кнопку «Показать МПА» происходит отображение МПА (общий вид, вид сверху и вид сбоку), на основе чего оператор может проверить правильность задания геометрии МПА. Кроме того, в область «Параметры базовой МПА» выводятся резонансная частота базовой МПА и ее импеданс.

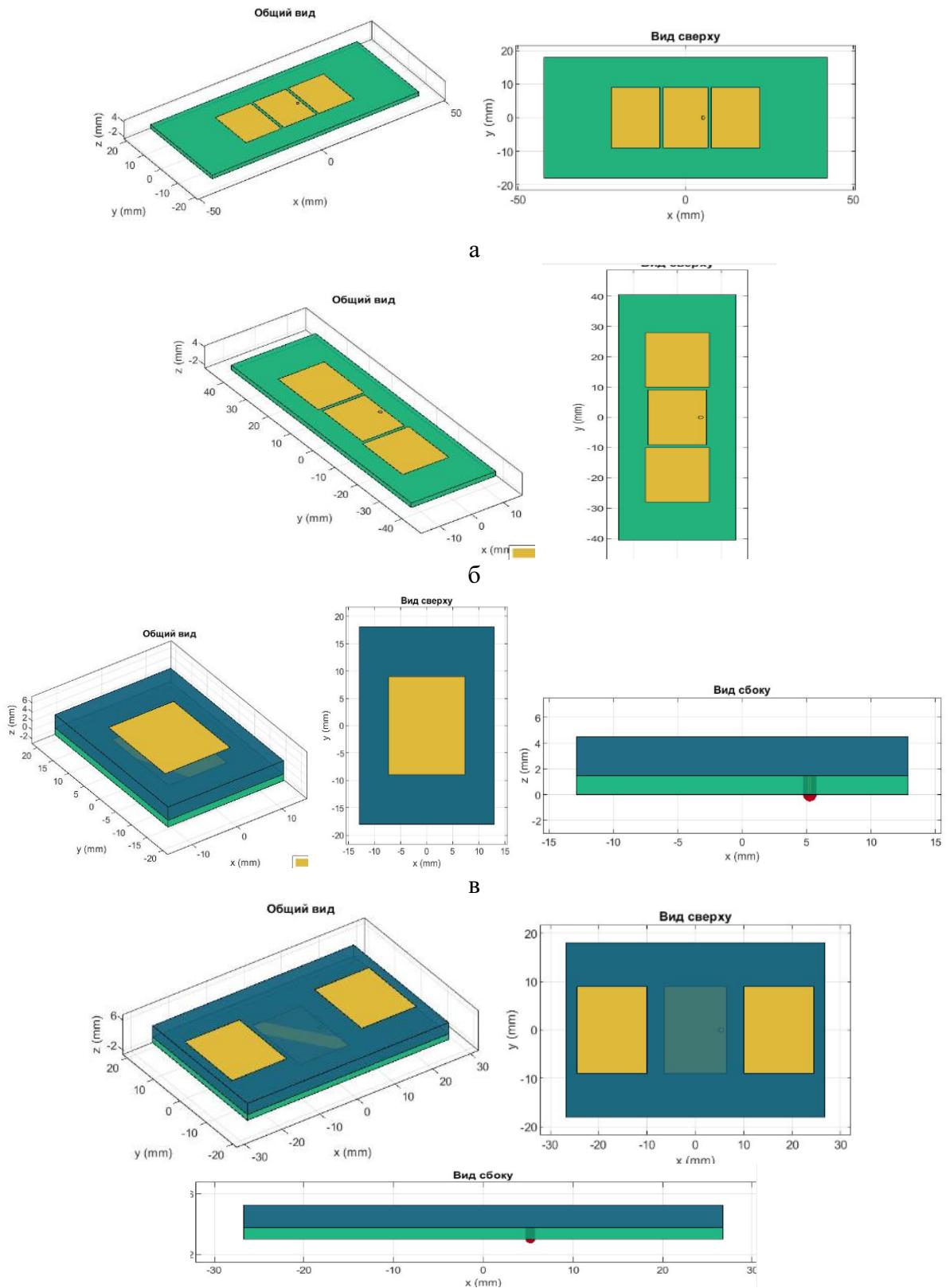


Рисунок 5 – Моделируемые конструкции МПА: а – однослоная МПА с двумя пассивными резонаторами у излучающих кромок; б – однослоная МПА с двумя пассивными резонаторами у неизлучающих кромок; в – двухслойная МПА с одним пассивным резонатором; г – двухслойная МПА с решеткой пассивных резонаторов

На вкладке «Импеданс и S-параметры» выводятся результаты расчета импеданса и VSWR в заданном диапазоне частот. Расчет модуля

коэффициента отражения выполняется по формуле

$$|\dot{\Gamma}(f)| = \left| \frac{Z(f) - Z(f_0)}{Z(f) + Z(f_0)} \right|, \quad (1)$$

где $Z(f) = R(f) + jX(f)$ – комплексное входное сопротивление антенны на частоте f ; $R(f)$, $X(f)$ – активное и реактивное сопротивление антенны на частоте f . Предполагается, что предыдущий/последующий каскад для заданной МПА согласуется с антенной на центральной частоте f_0 .

Расчет коэффициента стоячей волны по напряжению проводится по формуле

$$VSWR(f) = \frac{1+|\dot{\Gamma}(f)|}{1-|\dot{\Gamma}(f)|}. \quad (2)$$

На вкладке «Диаграмма направленности» отображается результат расчета диаграммы направленности в трехмерном виде и в главном сечении и отображаются коэффициент усиления антенны и минимальное значение относительного уровня бокового лепестка.

При нажатии на кнопку «Расчет» происходит считывание исходных данных, задаются параметры системного объекта *pcblobj* и вызываются соответствующие процедуры расчета импеданса антенны в диапазоне частот, модуля коэффициента отражения, КСВ и диаграммы направленности.

Описана методика оптимизации параметров широкополосной МПА, основные шаги которой заключаются в следующем.

На первом шаге выбираются параметры $W_a, h_a, \epsilon_a, \operatorname{tg} \delta_a$ - ширина активного патча, высота диэлектрика, его проницаемость и тангенс угла диэлектрических потерь. Учитывается, что чем больше величина ϵ_a , тем меньше широкополосность антенны, но меньше ее габариты, а чем больше h_a – тем больше широкополосность. Поэтому тип первого диэлектрика берется с $\epsilon_a = 3\dots 5$ при достаточно большой высоте h_a .

На втором шаге выбираем параметры второго слоя диэлектрика при $\epsilon_p < \epsilon_a$ и $h_p > h_a$. Ширина пассивного патча может быть выбрана $W_p = W_a$.

На третьем задаем в компьютерной модели типа антенны «Базовая МПА с дополнительным слоем диэлектрика» и подбираем базовое значение длины активного патча по заданной резонансной частоте.

На четвертом шаге устанавливаем тип широкополосной МПА, например, «С одним пассивным патчем в два слоя», длину активного и пассивного патча берем одинаковую и путем последовательных запусков модели корректируем эту длину таким образом, чтобы достичь заданной резонансной частоты. Эта ситуация, когда мы будем иметь два связанных колебательных контура с одинаковыми резонансными частотами.

На пятом шаге длину пассивного патча увеличиваем, а длину активного патча уменьшаем на каждом шаге на 0,5...1%. Наблюдая изменение параметров широкополосной МПА, добиваемся требуемой

широкополосности. Одновременно контролируем другие параметры широкополосной МПА – коэффициент усиления и форму диаграммы направленности, величину импеданса, которые выступают как ограничения.

В четвертой главе приводятся результаты оптимизации параметров и исследования характеристик широкополосных МПА, обобщаются результаты исследований и формируются рекомендации.

Оптимизация параметров МПА проводилась для FMCW-радиолокатора при центральной частоте 5500 МГц; широкополосности не менее 16% и коэффициенте усиления не менее 6 дБ. Базовая узкополосная МПА имела диэлектрик Taconic RF-35 высотой 1,5 мм с диэлектрической проницаемостью 3,5; длину активного патча 13,28 мм; ширину активного патча 18 мм; фидер квадратного сечения с длиной/шириной 1 мм смешен на расстояние 5,25 мм от центра патча. Характеристики МПА приведены на рисунке 5.

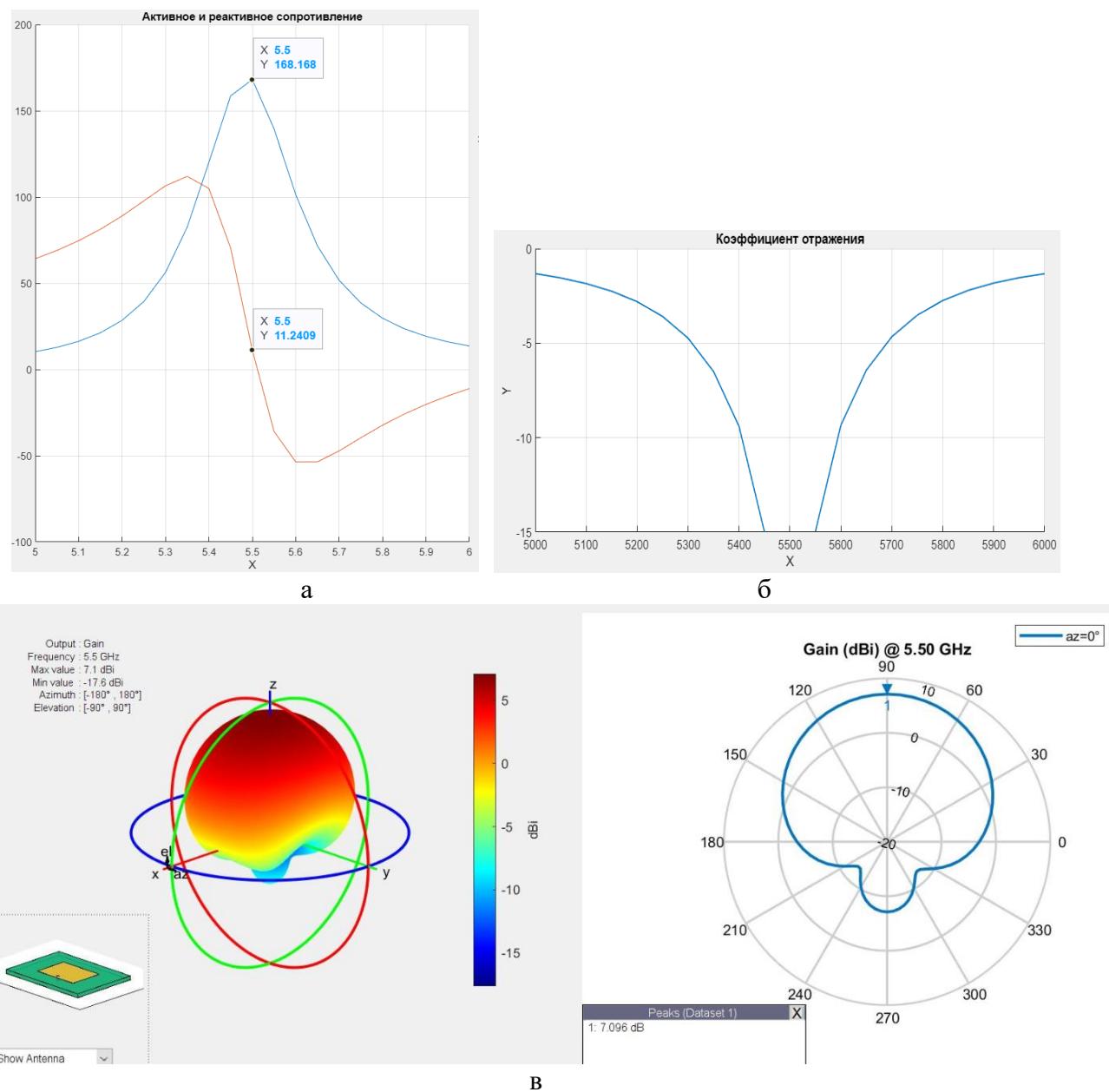


Рисунок 6 – Характеристики базовой узкополосной МПА: а – импеданс; б – модуль коэффициента отражения; в – диаграмма направленности на центральной частоте

Для узкополосной МПА максимум активного сопротивления составляет 168 Ом; полоса составляет $\Delta f = 180$ МГц или широкополосность $\gamma_{\Delta f} = 3,3\%$; диаграмма направленности симметричная с коэффициентом усиления 7 дБ. Результаты совпадают с известными теоретическими данными.

Результаты оптимизации параметров для варианта В1 однослоиной МПА с двумя пассивными резонаторами в длину приведены на рисунке 6 с параметрами $L_a = 13,2$ мм; $L_p = 12,7$ мм; $s = 0,6$ мм. Полоса составила 420 МГц при широкополосности 7,6%. Коэффициент усиления незначительно снизился и составил 6,6 дБ.

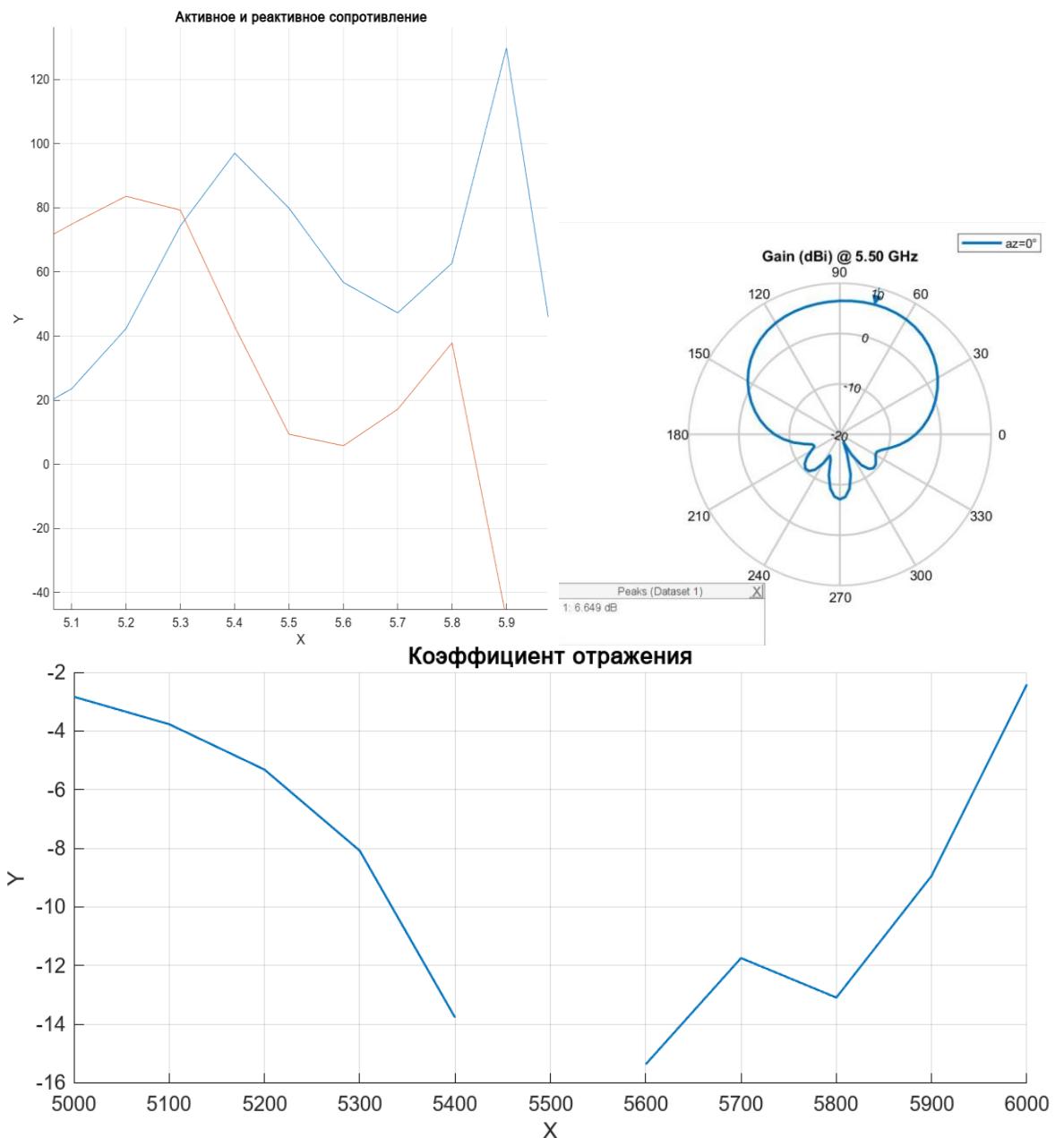


Рисунок 7 – Характеристики МПА по варианту В1 для $L_a = 13,2$ мм; $L_p = 12,7$ мм; $s = 0,6$ мм: а – импеданс; б – диаграмма направленности; в – модуль коэффициента отражения

Аналогичные результаты получены для однослойной МПА с двумя пассивными резонаторами в ширину, но при $L_a = 13,4$ мм; $L_p = 12,7$ мм; $s = 0,5 \dots 1,0$ мм удалось достичь полосы 540 МГц при широкополосности 9,8%. Коэффициент усиления также улучшился на 1...1,3 дБ и составил около 8,3 дБ. Варианты В1 и В2 могут быть использованы для линейных АР при умеренных требованиях по широкополосности.

Характеристики МПА по вариантам В3 и В4 при оптимальных параметрах конструкции приведены на рисунках 8 и 9.

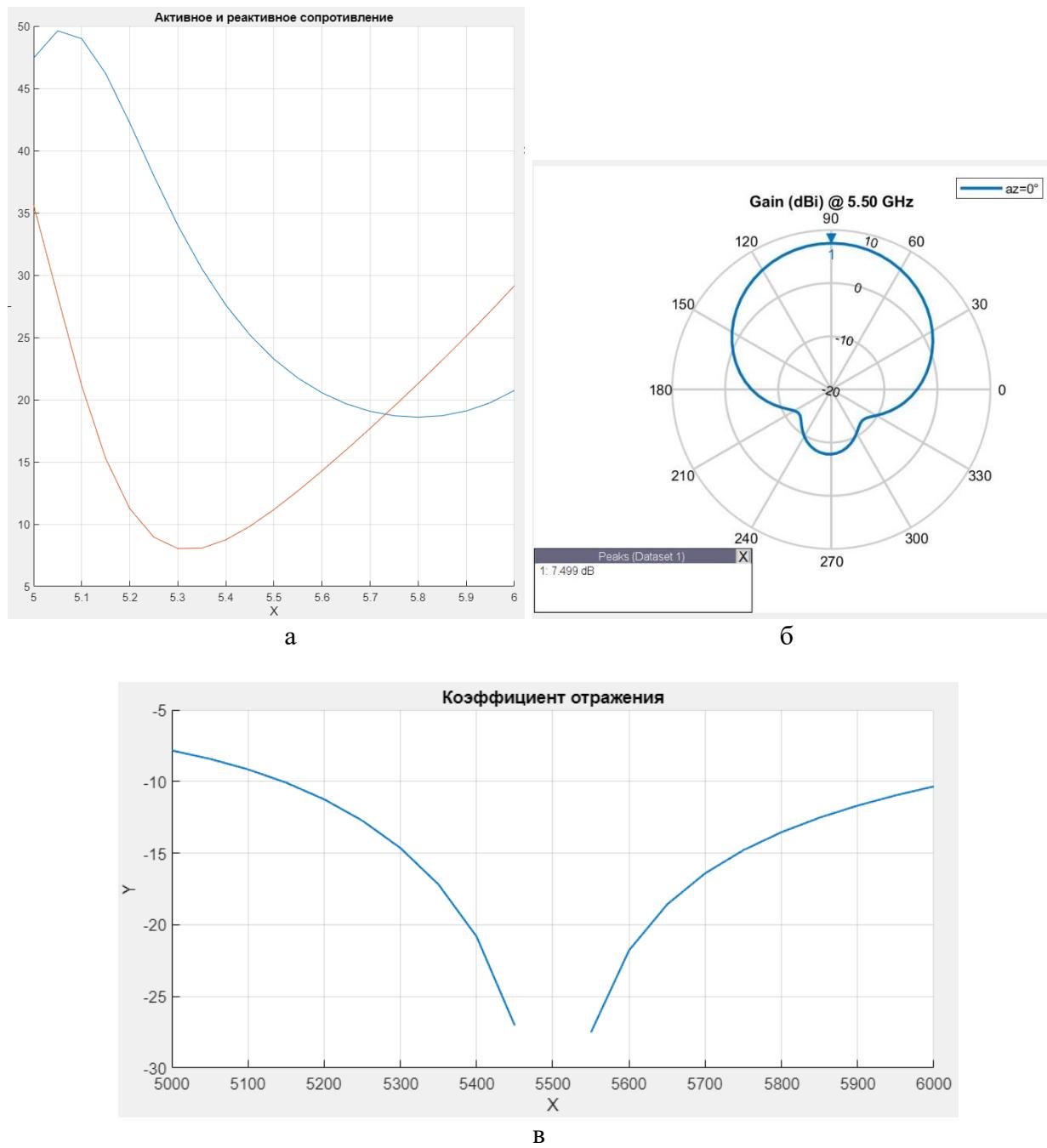


Рисунок 8 – Характеристики МПА по варианту В3 при $L_a = 12,8$ мм; $L_p = 14,5$ мм: а – импеданс; б – диаграмма направленности; в – модуль коэффициента отражения

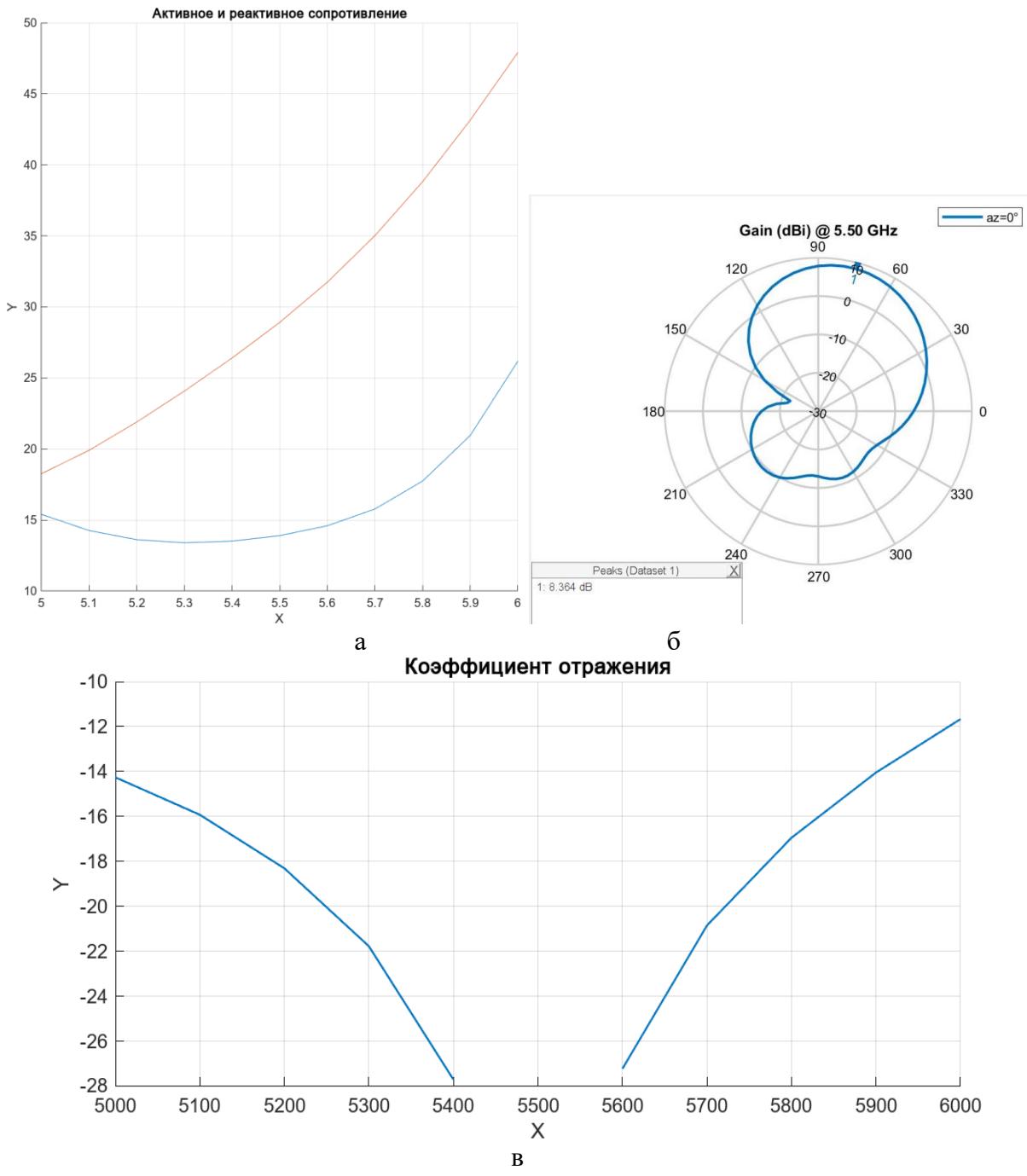


Рисунок 9 – Характеристики МПА по варианту В4 при длине пассивного патча 14,0 мм, высоте второго слоя диэлектрика 4,0 мм и смещении фидера 5,25 мм: а – импеданс; б – диаграмма направленности; в – модуль коэффициента отражения

Оптимальные параметры двухслойной МПА с одним пассивным резонатором (вариант В3) при использовании во втором слое диэлектрика материала с меньшей диэлектрической проницаемостью Teflon с высотой 3 мм следующие: $L_p = 14,5$ мм (на 1,7 мм больше, чем у активного); резонансные частоты (когда реактивное сопротивление равно 0) отсутствуют; частота псевдорезонанса, когда адmittанс минимален, составила 5320 МГц; максимум активного сопротивления находится слева (на частоте 5050 МГц) от частоты

псевдорезонса; полоса частот по уровню коэффициента отражения минус 10 дБ составляет $\Delta f = 850$ МГц, или $\gamma_{\Delta f} = 15,5\%$ (рисунок 8).

Еще лучше результаты оптимизации для варианта В4 двухслойной МПА с двумя пассивными резонаторами в длину (рисунок 9). Варьируемыми параметрами для варианта являются длина активного и пассивного патча и вынос пассивных патчей относительно активного по длине. Вынос по длине определяет фактор связи активных и пассивных патчей. Высота второго слоя диэлектрика по результатам моделирования для варианта В3 была увеличена и взята равной 4 мм.

МПА, выполненные по вариантам В3 и В4, по своим габаритам и широкополосности могут быть рекомендованы для использования в качестве элементов антенных решеток с двумерным сканированием.

Заключение

Разработаны методика и специальное программное обеспечение для расчёта широкополосных МПА. Проведённый анализ современных методов моделирования и оптимизации антенных структур позволил создать простой в использовании и эффективный инструмент, сочетающий точность электродинамических расчётов с высокой скоростью работы.

Разработанное МПО обеспечивает автоматизированный расчёт геометрических параметров микрополосковых элементов, учитывая требования к широкополосности, согласованию и направленным свойствам. Использование численных методов, таких как метод моментов (МоМ), в сочетании с предложенной методикой оптимизации параметров широкополосных антенн, позволяют находить оптимальные решения по конструкции широкополосных МПА в заданных диапазонах рабочих частот и при заданных ограничениях на диаграмму направленности и входное сопротивление антенны.

Проведённые численные и экспериментальные исследования подтвердили корректность методики и эффективность разработанной компьютерной модели. Полученные результаты демонстрируют хорошее соответствие между расчётными и измеренными характеристиками антенных элементов, что свидетельствует о высокой точности моделирования.

Внедрение предложенного инструмента в процесс проектирования широкополосных МПА позволяет сократить временные затраты на разработку и улучшить эксплуатационные характеристики антенн. Дальнейшее развитие проекта может быть связано с интеграцией машинного обучения для ускорения оптимизационных процессов и расширением библиотеки антенных элементов для различных применений.

СПИСОК СОБСТВЕННЫХ ПУБЛИКАЦИЙ

1. Пъае Пъио Вай. Моделирование и оптимизация параметров широкополосных печатных антенн в МАТЛАБ / Пъае Пъио Вай // материалы открытой республиканской научно-практической интернет-конференции (Республика Беларусь, Минск, 21–22 ноября 2024 года), Минск: БГУИР, 2024. – С. 52-57.
2. Пъае Пъио Вай. Результаты оптимизации параметров широкополосных печатных антенн в matlab / Пъае Пъио Вай // сборник материалов 61-й научной конференции аспирантов, магистрантов и студентов БГУИР (Респ. Беларусь, Минск, 22–23 апр. 2025 г.), Минск, БГУИР, 2025.