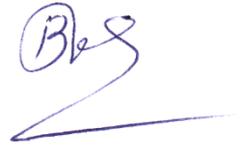


На правах рукописи



Буй Као Нинь

**МАЛОГАБАРИТНЫЕ ДИАПАЗОННЫЕ ПЕЧАТНЫЕ АНТЕННЫ
СОТОВЫХ ТЕЛЕФОНОВ**

Специальность 05.12.07 – «Антенны, СВЧ-устройства и их технологии»

Автореферат

диссертации на соискание учёной степени

кандидата технических наук

Москва – 2015

Работа выполнена на кафедре радиофизики, антенн и микроволновой техники Московского авиационного института (национального исследовательского университета).

Научный руководитель:

Воскресенский Дмитрий Иванович

доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Радиофизика, антенны и микроволновая техника» Московского авиационного института (Национального исследовательского университета).

Официальные оппоненты:

Нечаев Евгений Евгеньевич

доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой управления воздушным движением (УВД) Московского государственного технического университета гражданской авиации (МГТУ ГА).

Ганицев Алексей Юрьевич

кандидат технических наук, директор по услугам ООО «НСН».

Ведущая организация:

Московский научно-исследовательский институт радиосвязи (МНИИРС).

Защита состоится «01» декабря 2015 г. в 14 часов на заседании диссертационного совета Д 212.125.03 при Московском авиационном институте по адресу: 125993, г. Москва, А-80, ГСП-3, Волоколамское шоссе, д. 4.

С диссертацией можно ознакомиться в научно-технической библиотеке Московского авиационного института (125993, г. Москва, А-80, ГСП-3, Волоколамское шоссе, д. 4) и на сайте <http://www.mai.ru>.

Автореферат разослан «___» _____ 2015 г.

Учёный секретарь
диссертационного совета
Д. 212.125.03, д.т.н.



Сычѳв М.И.

I. Общая характеристика работы

Актуальность темы диссертации

В течение последнего десятилетия резко возросла популярность систем мобильной связи. В соответствии с рыночными требованиями, она продолжает расти. Важнейшую роль в большей части систем мобильной связи играет антенна, которая является одним из наиболее сложных объектов проектирования в современных мобильных устройствах связи. Поскольку параметры антенн систем мобильной связи зависят от частоты, они проектируются таким образом, чтобы работать в определённых полосах. Перспективным направлением является разработка широкополосных и многодиапазонных антенных систем. Область применения антенн систем мобильной связи также определяет целый ряд требований к параметрам и характеристикам антенн.

Быстрый рост систем мобильной связи стимулирует разработку, изготовление и применение новых типов антенн для базовых и мобильных станций. Ранее мобильные системы проектировались для работы в одном частотном диапазоне стандарта 2G систем мобильной связи. Позже появились и другие системы, такие как Цифровая сотовая система (Digital Cellular System - DCS), Служба персональной связи (Personal Communications Service - PCS) и Глобальная система мобильной связи (Global System for Mobile Communications - GSM).

В настоящее время многие системы мобильной связи используют несколько частотных диапазонов, например GSM 900/1800/1900 полосы (890-960 МГц и 1710-1990 МГц); Универсальная система мобильной связи (Universal Mobile Telecommunication Systems - UMTS) полосы (1885-2200 МГц); Беспроводной доступ (Wireless Fidelity - Wi-Fi) / Беспроводная локальная сеть (Wireless Local Area Networks - WLAN) полосы (2400-2484 МГц и 5150-5825 МГц); Международное взаимодействие для микроволнового доступа (Worldwide Interoperability for Microwave Access - WiMAX) полос: 2.3 - 13.6 ГГц (чаще 2.3-2.5 ГГц, 2.5-2.69 ГГц, 3.3-3.5 ГГц и т.д.), был разработан для организации единых беспроводных сетей масштаба города WMAN (Wireless Metropolitan Area Network).

На начальных этапах развития сотовой телефонии широкое распространение получили спиральные антенны, совмещенные с несимметричным вибратором. Однако внешние антенны имеют целый ряд недостатков по сравнению с микрополосковыми невыступающими антеннами. Поэтому разработчики современных сотовых телефонов используют только печатную технологию изготовления антенн.

Одной из важнейших задач, возникающих при проектировании широкополосных антенн сотовых телефонов, является разработка формы антенны, которая бы удачно вписывалась в корпус сотового телефона, обеспечивая при этом требуемый коэффициент усиления. Жесткие требования предъявляются и к форме ДН сотового телефона. Она должна обеспечивать устойчивый прием с любого ракурса в условиях городской застройки, а также удовлетворять требованиям безопасности при использовании сотового телефона.

Как правило, последнее требование к форме ДН обеспечивается применением отражающих поверхностей, которые существенно влияют на согласование в рабочей полосе частот.

Расширение функциональных возможностей сотового телефона приводит к необходимости увеличения числа рабочих диапазонов частот. При этом усложняется конструкция и используются многослойные печатные структуры. Моделирование таких структур целесообразно проводить с помощью программных продуктов, применяемых для расчета двумерных и трехмерных антенн и устройств СВЧ. Системное моделирование сложной многослойной структуры позволяет провести оптимизацию параметров и численный эксперимент, исключающий в ряде случаев необходимость проведения натурного эксперимента.

В настоящее время имеются различные методы расчета широкополосных антенн. Однако большая часть этих методов не позволяет провести оценку характеристик направленности широкополосных или многодиапазонных антенн из-за математической сложности.

Поэтому возникает необходимость разработки приближенных методик расчета, применимых для широкого класса антенн и позволяющих при минимальных временных затратах и с достаточной степенью точности оценить основные характеристики.

Многие телекоммуникационные компании делают большие ставки на использование WiMAX для предоставления услуг высокоскоростной связи. Во-первых, технологии семейства 802.16 позволяют экономически более эффективно (по сравнению с проводными технологиями) не только предоставлять доступ в сеть новым клиентам, но и расширять спектр услуг и охватывать новые труднодоступные территории. Во-вторых, беспроводные технологии более просты в использовании, чем традиционные проводные каналы.

Поэтому возникает необходимость создания двух- и трёхчастотных антенн сотовых телефонов. Из литературы известны двух- и трёхчастотные печатные антенны, изготовленные в виде многослойных структур. Для расширения рабочей полосы целесообразно применять широкополосные антенны типа «бабочка». Эти антенны могут хорошо работать в двух и трёх полосах частот: GSM и WiMAX.

Степень разработанности диссертации

Степень разработанности диссертации полностью соответствует названию диссертации и поставленной цели работы.

Цель и задачи работы

Целью диссертационной работы является разработка и проектирование широкополосных и многодиапазонных печатных антенн сотовых телефонов.

В соответствии с поставленной целью в диссертационной работе решены следующие задачи:

- предложены и разработаны широкополосные печатные антенны сотовых телефонов, работающие одновременно в нескольких частотных диапазонах: GSM 1800 и UMTS;

- предложены и разработаны двух- и трёхдиапазонные печатные антенны сотовых телефонов, работающие одновременно в двух и трёх диапазонах частот: GSM и WiMAX;

- разработана методика приближенного расчёта характеристик направленности широкополосной микрополосковой антенны сотовой связи;

- исследованы характеристики направленности и согласование в широкополосных и многодиапазонных печатных антеннах сотовых телефонов;

- определены направленные свойства и частотные характеристики широкополосных и многодиапазонных печатных антенн сотовых телефонов;

- экспериментально исследованы характеристики печатного излучателя типа «бабочка» и показано сравнение этих результатов с вычисленными.

Научная новизна работы заключается в следующем:

1. Разработано 5 конструкций широкополосных микрополосковых антенн типа «бабочка» с различными возбуждениями для сотовой связи. Эти антенны одновременно работают в нескольких частотных диапазонах: GSM 1800 (1710 - 1885 МГц), GSM 1900 (1850 - 1990 МГц) и UMTS (1885 - 2200 МГц).

2. Разработаны 4 конструкции двухдиапазонных микрополосковых антенн типа «бабочка» с коаксиальным питанием для сотовой связи. Эти антенны одновременно работают в нескольких частотных диапазонах: GSM 1900 (1850 - 1990 МГц) и WiMAX (2.5 - 2.69 ГГц).

3. Разработаны 4 конструкции трёхдиапазонных микрополосковых антенн типа «бабочка» с коаксиальным питанием для сотовой связи. Эти антенны одновременно работают в нескольких частотных диапазонах: GSM 1900 (1850 - 1990 МГц), WiMAX (2.5 - 2.69 ГГц) и WiMAX (3.3 - 3.5 ГГц).

4. Составлена методика приближенного расчёта характеристик направленности широкополосной микрополосковой антенны сотовой связи.

5. Сформирована требуемая диаграмма направленности, близкий к полусфере с использованием микрополосковых антенн типа «бабочка» над экраном, существенно уменьшающем поле облучения оператора.

6. Разработана модель микрополоскового печатного излучателя типа «бабочка», работающего в полосах частот WiMAX.

Теоретическая и практическая значимость работы

1. Разработаны конструкции широкополосных многочастотных антенн сотовых телефонов. Предложены широкополосные антенны, двух- и трёхчастотные антенны с различными возбуждениями для сотовых телефонов.

2. Предложены и разработаны малогабаритные компактные массогабаритные слабонаправленные микрополосковые антенны, имеющие требуемую диаграмму направленности и хорошее согласование для сотовых телефонов.

3. Составлены методика и программа приближенного расчёта характеристик направленности широкополосной микрополосковой антенны сотовой связи.

4. Исследованы результаты эксперимента печатной антенны частотных диапазонов WiMAX и сравнение их с вычисленными результатами.

Реализация и внедрение результатов работы

Результаты диссертационной работы использованы при решении задач проектирования, разработки и моделирования широкополосных

многодиапазонных антенн сотовых телефонов, работающих одновременно в нескольких частотных диапазонах: GSM, WiMAX.

В диссертационной работе научные и практические результаты внедрены в учебный процесс на кафедре «Радиофизика, антенны и микроволновая техника» МАИ. Они использованы при чтении лекций и проведении практических занятий по дисциплине «Теория и техника моделирования ФАР».

Акт о внедрении представлен в приложении.

Методология и методы исследования

При исследовании использовались вычислительные методы электродинамики, теории антенн, численные методы математического анализа, численное моделирование характеристик антенн сотовой связи на ЭВМ.

Основные положения, выносимые на защиту

- Предложены модели широкополосных микрополосковых антенн с различными возбуждениями, одновременно работающие в нескольких частотных диапазонах сотовой связи: GSM и UMTS, позволяющие расширить рабочую полосу частот;

- Предложены модели двух- и трёхдиапазонных микрополосковых антенн с различными возбуждениями, одновременно работающие в нескольких частотных диапазонах сотовой связи: GSM и WiMAX, позволяющие расширить в разы полосы частот рабочих диапазонов;

- Сформирована требуемая диаграмма направленности типа близко к полусфере при двух- и трёхчастотном режиме работы;

- Экспериментально исследованы характеристики микрополоскового печатного излучателя типа «бабочка», работающего в полосах частот WiMAX и показано сравнение их с вычисленными результатами.

Достоверности полученных результатов

Достоверность обуславливается использованием общей теории антенн и численных электродинамических методов расчёта, апробированного адекватного математического и статистического аппарата, специализированных компьютерных программ. Полученные результаты многократно подтверждены вычислительными и натурными экспериментами.

Апробация результатов работы

Основные положения диссертационной работы докладывались, обсуждались и получили положительные оценки на 07 конференциях, из них: 03 международных и 04 молодёжных научно-технических конференциях.

Публикации

По основным результатам выполненных исследований опубликовано 14 печатных работ, из них: 05 - научные статьи в периодических изданиях, включенных в перечень ВАК РФ; 02 - заявки на получение патентов; 07 - тезисы докладов и материалы научных конференций.

Личный вклад

Все представленные результаты исследований, расчёта, моделирования в диссертации получены при непосредственном участии автора. Также автором проведены конкретные моделирование, расчёт и оптимизация характеристик направленности широкополосных и многополосных антенн для сотовой связи.

Объём и структура работы

Диссертационная работа состоит из введения, 5-х глав, заключения, списка сокращений, списка литературы. Работа изложена на 107 страницах машинописного текста. Список литературы включает 73 наименований на 07 страницах. Работа содержит 71 рисунок и 10 таблиц.

II. Краткое содержание работы

Введение

Во введении показано обоснование актуальности темы диссертационной работы. Сформулирована цель работы, научная новизна работы, теоретическая и практическая значимость работы. Предложены методология и методы исследования. Перечислены основные положения, выносимые на защиту. Приведена структура диссертации, форма апробации и внедрения результатов.

Глава 1. Тенденции развития антенн сотовых телефонов

В первой главе проведен обзор развития сотовой телефонии, который идёт по пути расширения используемых частот. Показаны типы используемых антенн сотовых телефонов и их характеристики. Выявлена необходимость создания антенн нового поколения сотовой связи, одновременно работающих в нескольких рабочих диапазонах частот, и отличающихся более широкой полосой частот и ослабленным облучением абонента.

Главе 2. Широкополосные печатные антенны сотовых телефонов

Во второй главе предложены и разработаны широкополосные печатные антенны типа «бабочка», размещенные в свободном пространстве, и печатные антенны типа «бабочка» над экраном сотовых телефонов и их характеристики.

В настоящее время широкое распространение получили телефоны многорежимного действия, работающие одновременно в нескольких частотных диапазонах, поэтому одной из задач является создание широкополосных антенн.

С этой целью были исследованы несколько вариантов конструкций антенн, размещенных в свободном пространстве, а далее эти антенны размещались на диэлектрической подложке.

При электродинамическом моделировании антенн и устройств СВЧ использовались программы численного моделирования. Для оценки достоверности результатов были проведены решения тестовых задач. На рис.2.1,*a-d* показаны различные формы печатных параметры моделей широкополосных печатных вибраторов. На рис.2.2 приведены широкополосных вибраторов и различные варианты их возбуждения. В табл.2.1 представлены зависимости коэффициента стоячей волны (КСВ) от частоты, рассчитанные для моделей 2.1,*a-d*. Эти антенны одновременно работают в нескольких частотных полосах: GSM 1800, GSM 1900 и UMTS. ДН излучателей рис.2.1,*a-d* в плоскостях E и H показана на рис.2.3-2.7.

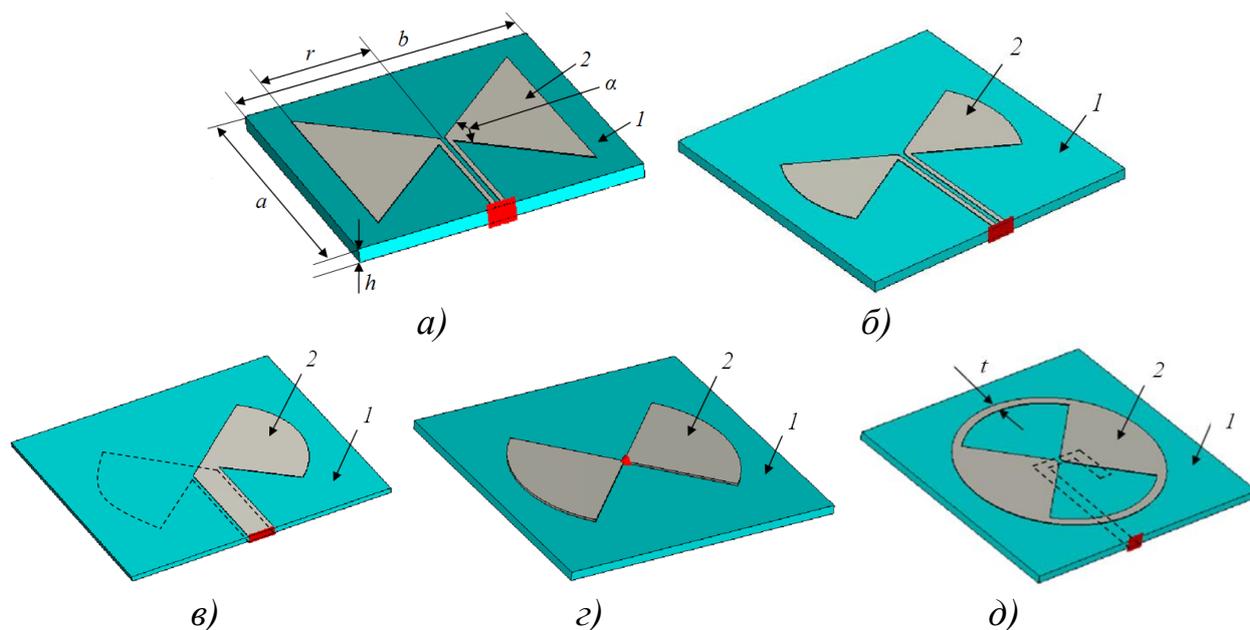


Рис.2.1. Широкополосные печатные вибраторы: *a* - треугольный печатный вибратор, *б* - треугольный печатный вибратор с закругленными плечами, *в* - двусторонний вибратор, *г* - односторонний вибратор, возбуждаемый с помощью дискретного порта, *д* - антенна «бабочка» с возбуждением несимметричной полосковой линией. 1 - диэлектрик, 2 - бабочка.

Табл.2.1. Типы антенн и их параметры.

Типы антенн	Параметры						
	Бабочка			Диэлектрик			
	r , мм	α , град	t , мм	a , мм	b , мм	h , мм	ϵ
Рис.2.1, <i>a</i>	23	90	-	60	60	3	3
Рис.2.1, <i>б</i>	23	60	-	60	60	3	3
Рис.2.1, <i>в</i>	23	90	-	60	60	1.5	3
Рис.2.1, <i>г</i>	23	90	-	60	60	2	3
Рис.2.1, <i>д</i>	23	90	2	60	60	2	3

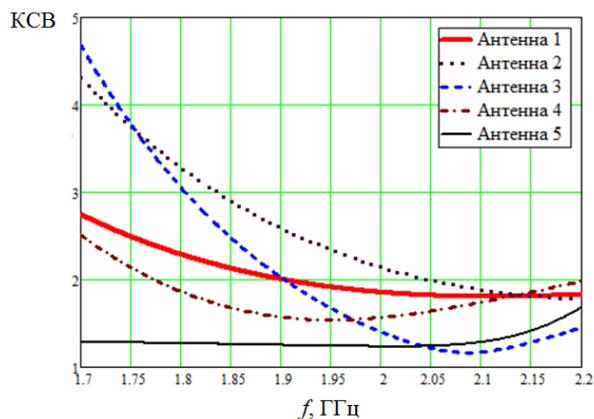


Рис.2.2. Зависимости КСВ от частоты в полосе частот (1710-2200) МГц: антенна 1 (рис.2.1,*a*), антенна 2 (рис.2.1,*б*), антенна 3 (рис.2.1,*в*), антенна 4 (рис.2.1,*г*), антенна 5 (рис.2.1,*д*).

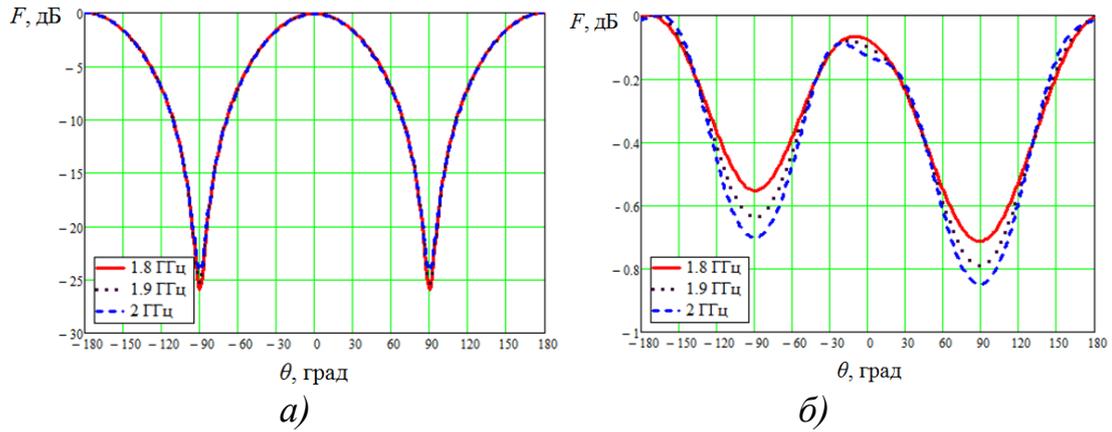


Рис.2.3. ДН антенны 1: *a* - в плоскости Е, *б* - в плоскости Н.

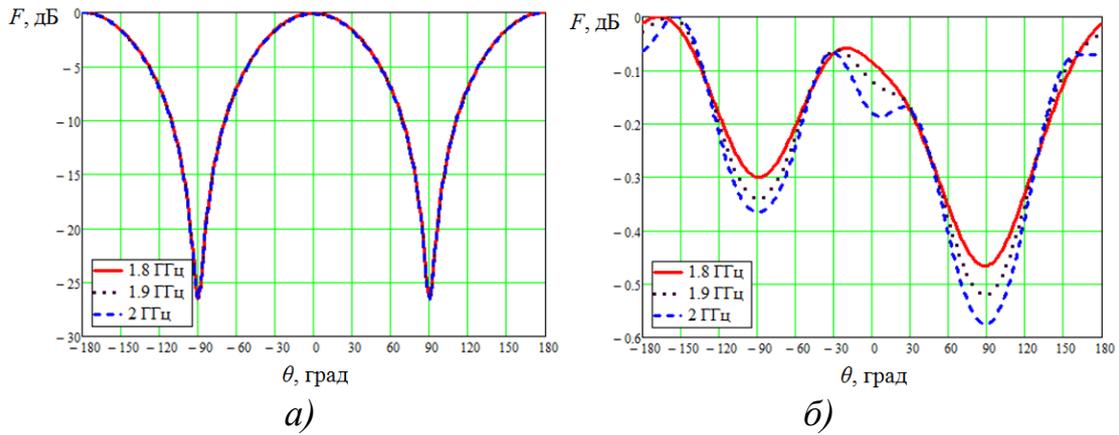


Рис.2.4. ДН антенны 2: *a* - в плоскости Е, *б* - в плоскости Н.

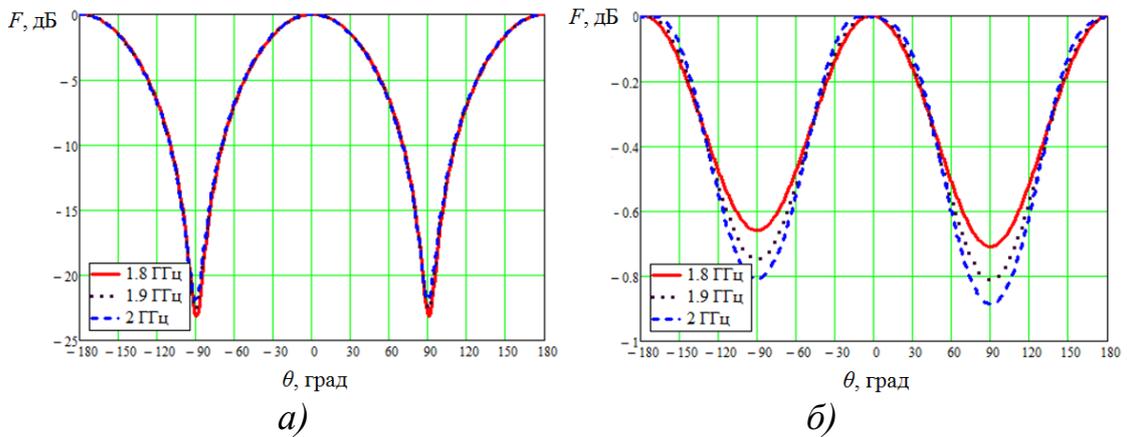


Рис.2.5. ДН антенны 3: *a* - в плоскости Е, *б* - в плоскости Н.

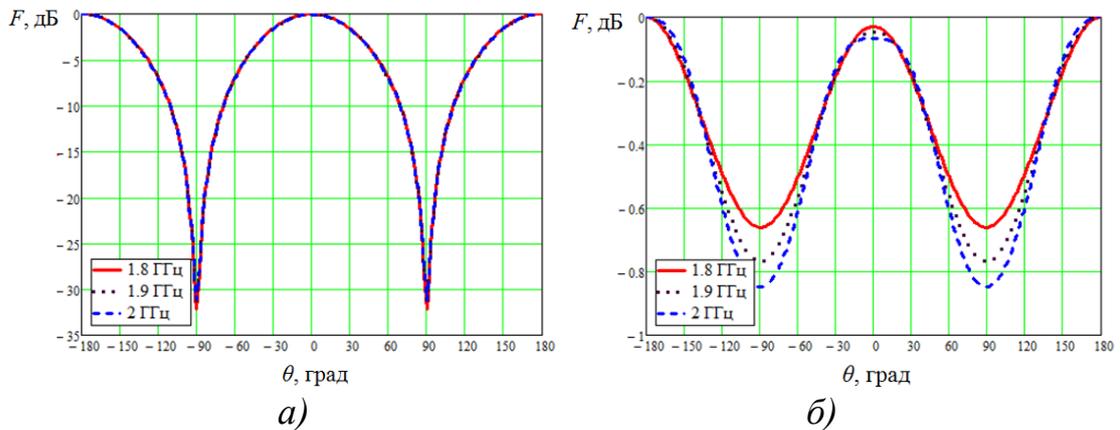


Рис.2.6. ДН антенны 4: *a* - в плоскости Е, *б* - в плоскости Н.

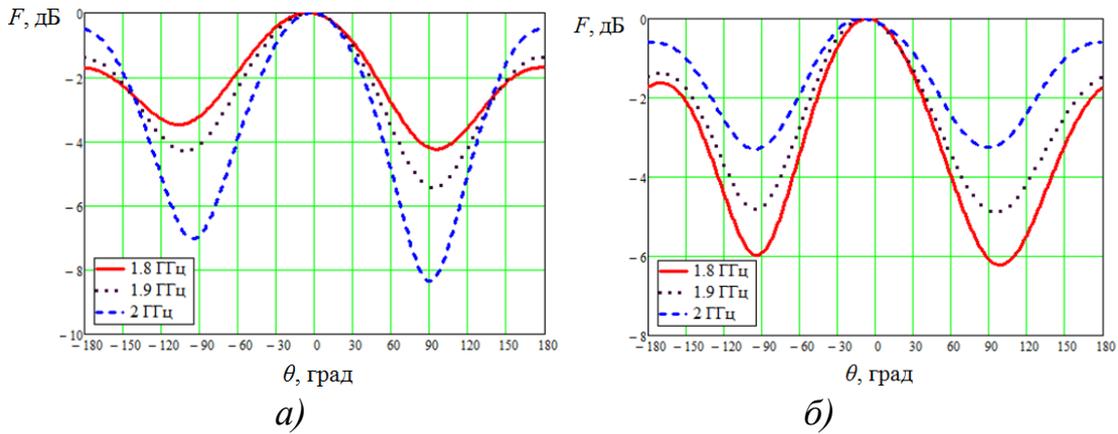


Рис.2.7. ДН антенны 5: *а* - в плоскости Е, *б* - в плоскости Н.

Таким образом для построения широкополосного печатного излучателя целесообразно использовать излучатель типа «бабочка». Применение такого излучателя в качестве антенн возможно лишь для аппаратов сотовой телефонии, в которых отсутствует металлическая центральная плата - основа крепления всех частей аппаратов. В этом случае предлагаемая антенна размещается над диэлектрической крепежной платой аппарата и одна антенна позволяет работать на всех системах связи от GSM 1800 до UMTS. Недостаток такой антенны - облучение оператора телефона сотовой связи из-за отсутствие экрана. Поэтому, дальнейшим этапом разработки антенн являлось конструктивные решения построения печатных антенн, размещенных над экраном (рис.2.8).

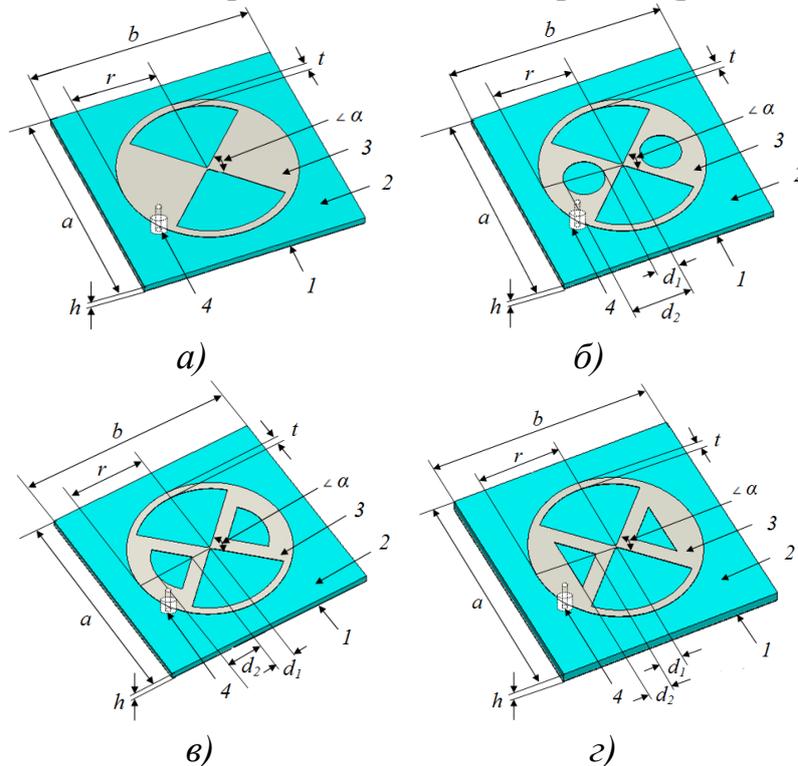


Рис.2.8. Антенны, работающие в полосе GSM 1900 (1850 - 1990 МГц):

1 - экран; 2 - диэлектрик; 3 - бабочка; 4 - коаксиальное питание.

Ниже рассматриваются различные модификации антенны типа «бабочка», для анализа характеристик которых применялась программа электромагнитного моделирования. Электродинамические модели антенн приведены на рис.2.8. На этом же рисунке отмечены параметры моделей, по которым проводилась

оптимизация, а также их габаритные размеры. Значения параметров указаны в табл.2.2. На рис.2.9 приведены зависимости КСВ от частоты для четырех вариантов микрополосковых антенн, работающих в полосе GSM 1900 (1850 - 1990 МГц). На рис.2.10-13 показаны ДН в плоскости Е и в плоскости Н для микрополосковых антенн, представленных на рис.2.8.

Табл.2.2. Значения параметров антенн, показанных на рис.2.8.

Типы антенны	Экран		Диэлектрик				Бабочка				
	a , мм	b , мм	a , мм	b , мм	h , мм	ϵ	r , мм	d_1 , мм	d_2 , мм	α , град	t , мм
Рис.2.8, <i>а</i>	60	60	60	60	2	3	22.7	-	-	90	2.3
Рис.2.8, <i>б</i>	60	60	60	60	2	3	21.8	5.45	10.9	90	2.2
Рис.2.8, <i>в</i>	60	60	60	60	2	3	21.85	5.46	7.73	90	2.15
Рис.2.8, <i>г</i>	60	60	60	60	3	3	21.7	5.43	7.67	90	2.2

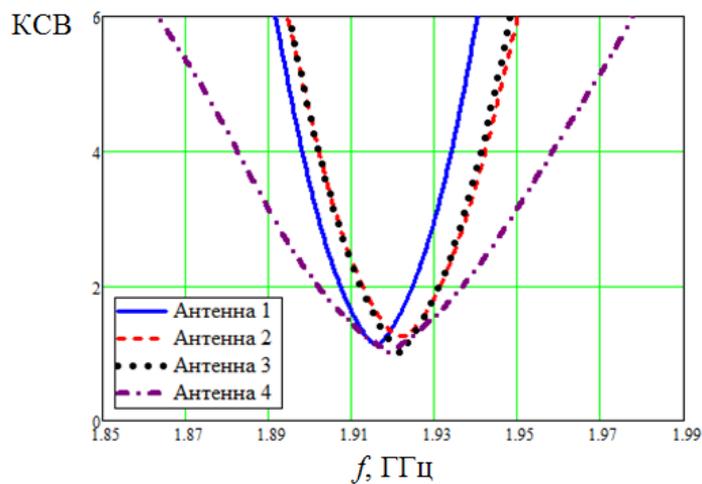


Рис.2.9. Графики зависимости КСВ от частоты в полосе GSM 1900 (1850 - 1990 МГц): антенна 1 (рис.2.8,*а*), антенна 2 (рис.2.8,*б*), антенна 3 (рис.2.8,*в*), антенна 4 (рис.2.8,*г*).

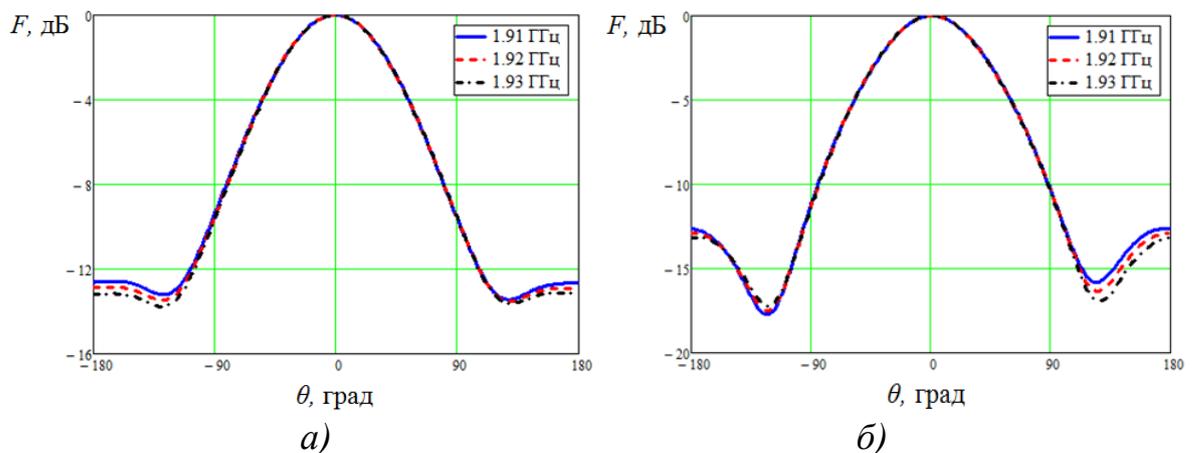


Рис.2.10. ДН антенны 1 в плоскостях Е (*а*) и Н (*б*).

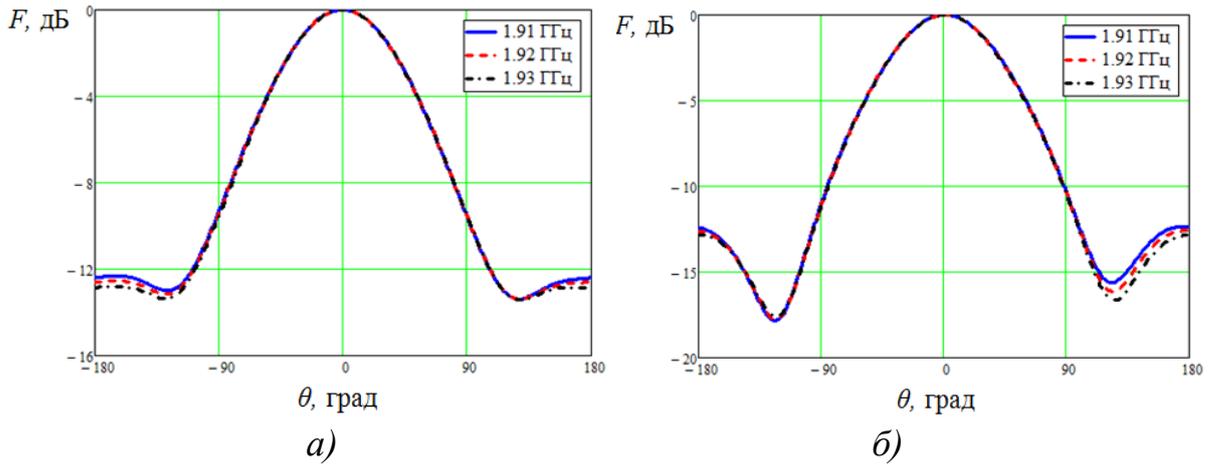


Рис.2.11. ДН антенны 2 в плоскостях Е (а) и Н (б).

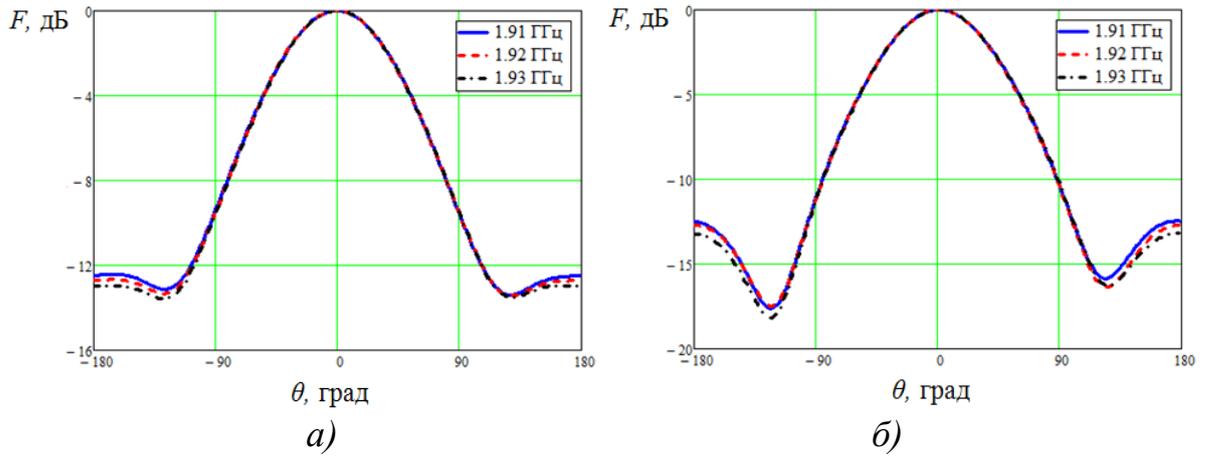


Рис.2.12. ДН антенны 3 в плоскостях Е (а) и Н (б).

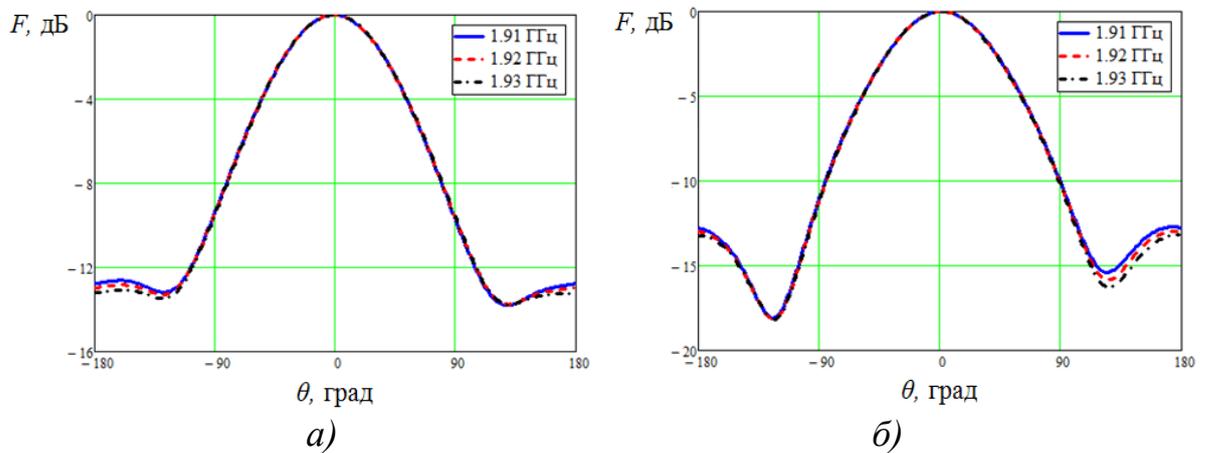


Рис.2.13. ДН антенны 4 в плоскостях Е (а) и Н (б).

Результаты моделирования показывают, что все рассмотренные варианты обеспечивают работу в полосе, соответствующей диапазону GSM 1900 (1850 - 1990 МГц), а также требуемую форму ДН. Обратное излучение антенн не превышает -12 дБ.

В этой главе исследованы характеристики направленности и согласования широкополосных антенн в печатном исполнении типа «бабочка». Выявлена возможность использования одной такой антенны для широкополосной работы от 1710 МГц до UMTS (2200 МГц) при отсутствии металлической центральной платы в корпусе аппарата связи. В таком варианте конструкции антенны

отсутствует экранирующая проводящая поверхность. Ослабление вредного влияния получается путем поглощения СВЧ излучения радиопоглощающим материалом.

Глава 3. Методика приближенного расчета характеристик направленности широкополосной микрополосковой антенны сотовой связи

В третьей главе разработана методика приближенного расчёта характеристик направленности широкополосной микрополосковой антенны сотовой связи. При этом решается задача определения характеристик неоднородной линии, разомкнутой на конце без потерь и с потерями.

Для определения характеристик удобно произвольную неоднородную линию представить в виде эквивалентной двухпроводной линии с переменным расстоянием между проводниками (рис.3.1). В данном случае закон изменения волнового сопротивления вдоль линии определяется функцией изгиба проводников.

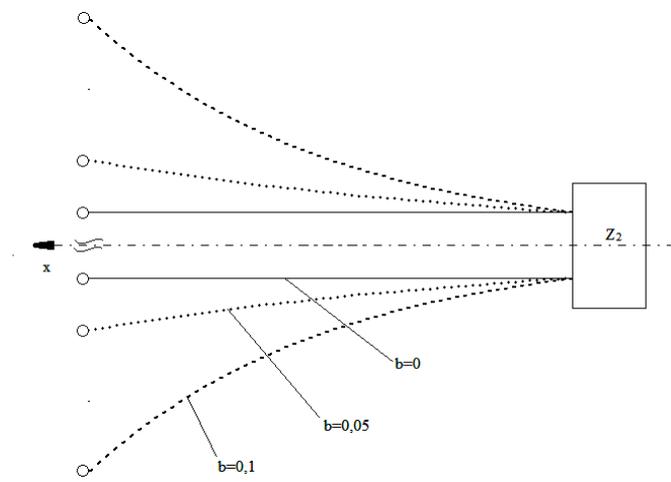


Рис.3.1. Эквивалентная двухпроводная экспоненциальная линия $\rho = \rho_0 e^{bx}$:

сплошная линия - однородная линия, пунктирная и штриховая линии - неоднородная линия с различным законом изменения волнового сопротивления соответственно.

Для неоднородной линии с потерями, разомкнутой на конце, входное сопротивление в произвольном сечении линии определяется выражением (3.1).

$$Z_{вх} = \frac{-j2\rho_0 \left(-\frac{b}{2} + \alpha' + jm\sqrt{1 + \left(\frac{b}{2\gamma}\right)^2} \right) e^{bx} \left(e^{-x \left(\alpha' + jm\sqrt{1 + \left(\frac{b}{2\gamma}\right)^2} \right)} + e^{x \left(\alpha' + jm\sqrt{1 + \left(\frac{b}{2\gamma}\right)^2} \right)} \right)}{m \left(e^{x \left(\alpha' + jm\sqrt{1 + \left(\frac{b}{2\gamma}\right)^2} \right)} - e^{-x \left(\alpha' + jm\sqrt{1 + \left(\frac{b}{2\gamma}\right)^2} \right)} \right)} \quad (3.1)$$

где $m = \frac{2\pi}{\lambda}$ - волновое число, ρ_0 - волновое сопротивление на конце линии, α - постоянная затухания, $\gamma \approx \alpha + jm$ - постоянная распространения, $\alpha' = \alpha \sqrt{1 + \left(\frac{b}{2\gamma}\right)^2}$ - постоянная затухания в экспоненциальной линии.

Зависимость активной и реактивной составляющей входного сопротивления от пространственной координаты x показана на рис.3.2.

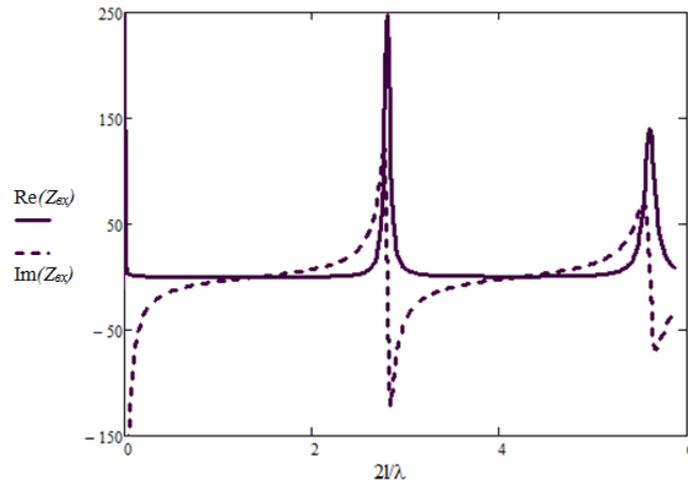


Рис.3.2. Распределение входного сопротивления в линии с потерями при $b = 0.05$ и $\alpha' = 0.05$.

где l - ширина полоски.

Для применения приближенной теории неоднородных линий к анализу двухдиапазонных антенн, целесообразно определить характеристики неоднородной линии, нагруженной на индуктивную нагрузку.

Длина эквивалентной микрополосковой линии, на которую нагружена неоднородная линия, равна четверти длины окружности, радиуса r рис.3.3.

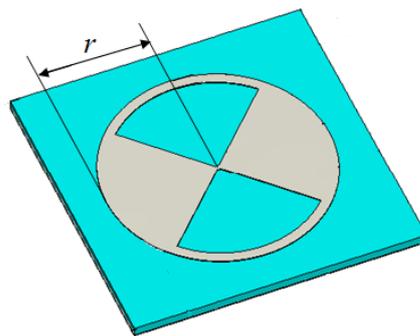


Рис.3.3. Общий вид антенны «бабочка».

Так как эквивалентная линия является однородной, то её реактивное сопротивление может быть определено:

$$X_L = jWtg\left(\frac{2\pi mr}{4}\right) \quad (3.2)$$

где W - волновое сопротивление линии.

А распределения тока и напряжения принимают вид:

$$\begin{aligned}
 \dot{U} &= \frac{U_2 \left(-\frac{b}{2} + \alpha' + jm \sqrt{1 + \left(\frac{b}{2m} \right)^2} \right)}{2 \left(\alpha' + jm \sqrt{1 + \left(\frac{b}{2m} \right)^2} \right)} e^{\frac{b}{2}x} \left(e^{-\left(x - \frac{2\pi r}{4} \right) \left(\alpha' + jm \sqrt{1 + \left(\frac{b}{2m} \right)^2} \right)} + e^{\left(x - \frac{2\pi r}{4} \right) \left(\alpha' + jm \sqrt{1 + \left(\frac{b}{2m} \right)^2} \right)} \right) \\
 \dot{J} &= \frac{jU_2 m}{2\rho_0 \left(\alpha' + jm \sqrt{1 + \left(\frac{b}{2m} \right)^2} \right)} e^{-\frac{b}{2}x} \left(e^{\left(x - \frac{2\pi r}{4} \right) \left(\alpha' + jm \sqrt{1 + \left(\frac{b}{2m} \right)^2} \right)} - e^{-\left(x - \frac{2\pi r}{4} \right) \left(\alpha' + jm \sqrt{1 + \left(\frac{b}{2m} \right)^2} \right)} \right)
 \end{aligned} \quad (3.3)$$

Распределения напряжения и тока при $r = 23$ мм, $b = 0.15$ и $\alpha' = 0.05$ показаны на рис.3.4.

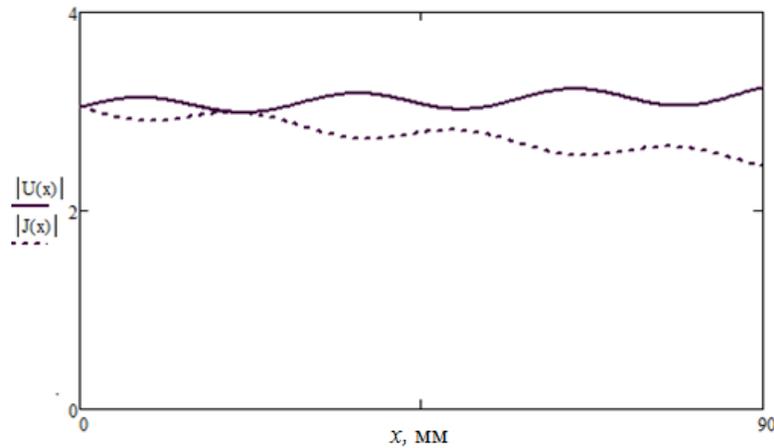


Рис.3.4. Распределение тока и напряжения в линии, нагруженной на индуктивную нагрузку.

В этой главе разработана методика приближенного расчета частотных характеристик широкополосных микрополосковых антенн типа «бабочка». Определены характеристики разомкнутой неоднородной линии и неоднородной линии, нагруженной на индуктивную нагрузку. Рассчитаны распределения напряжения и тока, разомкнутой неоднородной линии, нагруженной на индуктивную нагрузку. Определены зависимости активной и реактивной составляющей входного сопротивления от относительной длины антенны.

Глава 4. Многочастотные печатные антенны сотовых телефонов

Развитие сотовой телефонии систем требует создание аппаратов сотовой связи новых поколений создание антенн и новых дополнительных диапазонов частот ($f \sim 2200$ МГц и выше). Поэтому в рассматриваемом классе антенн необходимо предусмотреть возможность расширения рабочих частот путем дополнением и изменением конструкции ранее рассмотренных. Такими антеннами могут быть отнесены печатные ранее рассмотренные антенны, дополнительные этажами для новых рабочих частот. Поскольку новые рабочие частоты более высокие, чем частоты второго поколения, то новые этажи многослойной антенны могут размещаться над ранее разработанными системами.

Может дать общие рекомендации по проектированию с последовательными операциями:

- разработка одиночного печатного излучателя для новых частот;
- размещение на существующей антенне двух и трёх частотах нового этажа излучателя;
- расчёт полученной конструкции и согласование на всех рабочих частотах;
- изменение параметров элементов антенны для достижения необходимо согласование на заданных частотах. Выше приведенные операции представляют итерационный процесс для получения требуемых характеристик направленности и согласования создаваемой антенны на всех рабочих частотах.

Применение технологии WiMAX требует разработки аппаратуры, работающей в одном из трёх поддиапазонов этой технологии. Из приведенного выше подробного обзора путей развития современных информационных технологий с применением сотовой телефонии следует необходимость разработки алгоритма широкополосных антенн, работающих в гигагерцовом диапазоне на 2 и 3 выделенных частотах. В отличие от существующих стандартов, где выделенные части жёстко фиксированы, в новом поколении эти частоты изменяются от одного проекта к другому. Эти изменения рабочих частот достигают единицу гигагерц. Вторым важным обстоятельством является широкая рабочая полоса не менее 0.2 ГГц, которая определяет класс применяемых антенн как широкополосные. Поэтому разработанная антенна в главе 2 работы печатной антенны может быть использована как базовой элемент многочастотной антенны.

Поэтому возникает необходимость создания двухдиапазонных антенн сотовых телефонов. Из литературы известны двухдиапазонные печатные антенны, изготовленные в виде многослойных структур. Для расширения рабочей полосы целесообразно применять широкополосные антенны типа «бабочка».

На рис.4.1-4.4 приведены конструкции двухдиапазонных печатных антенн. Они отличаются формой реактивного элемента с емкостным характером реактивности, применяемым для расширения рабочей полосы по согласованию. На рис.4.5 приведены зависимости КСВ от частоты для четырех вариантов микрополосковых антенн, работающих в двух диапазонах частот стандартов GSM 1900 (1850 - 1990 МГц) и WiMAX (2.5 - 2.69 ГГц). На рис.4.6-4.9 показаны ДН в плоскости Е и в плоскости Н для микрополосковых антенн, представленных на рис.4.1-4.4.

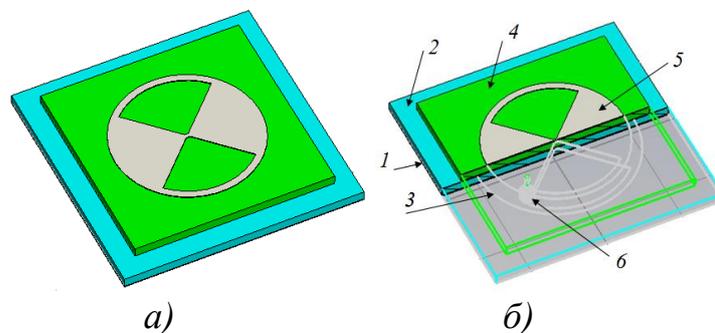


Рис.4.1. Антенна 1: *а* - общий вид, *б* - продольный разрез структуры, 1 - экран, 2 - первый диэлектрик, 3 - первая бабочка, 4 - второй диэлектрик, 5 - вторая бабочка, 6 - коаксиальное питание.

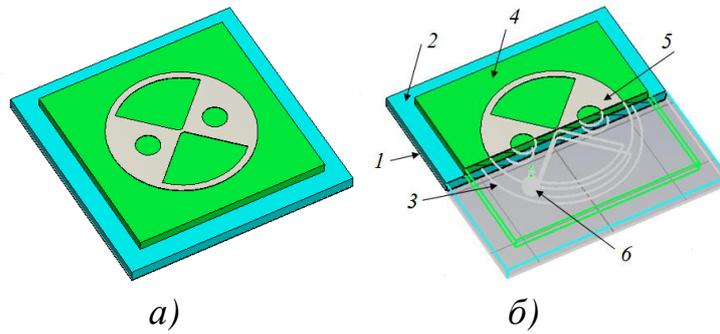


Рис.4.2. Антенна 2: *a* - общий вид, *б* - продольный разрез структуры, 1 - экран, 2 - первый диэлектрик, 3 - первая бабочка, 4 - второй диэлектрик, 5 - вторая бабочка, 6 - коаксиальное питание.

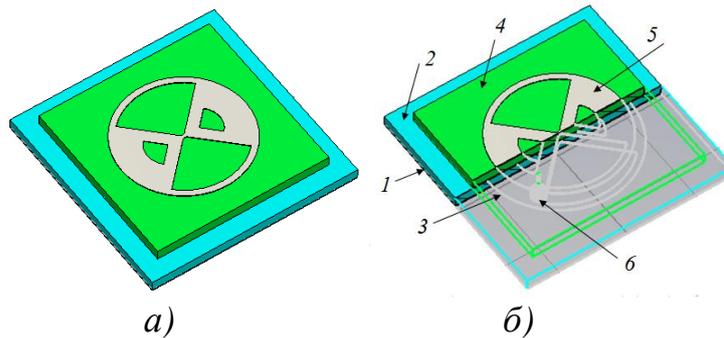


Рис.4.3. Антенна 3: *a* - общий вид, *б* - продольный разрез структуры, 1 - экран, 2 - первый диэлектрик, 3 - первая бабочка, 4 - второй диэлектрик, 5 - вторая бабочка, 6 - коаксиальное питание.

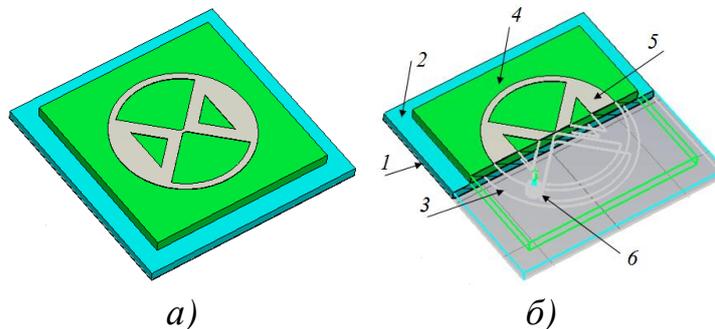


Рис.4.4. Антенна 4: *a* - общий вид, *б* - продольный разрез структуры, 1 - экран, 2 - первый диэлектрик, 3 - первая бабочка, 4 - второй диэлектрик, 5 - вторая бабочка, 6 - коаксиальное питание.

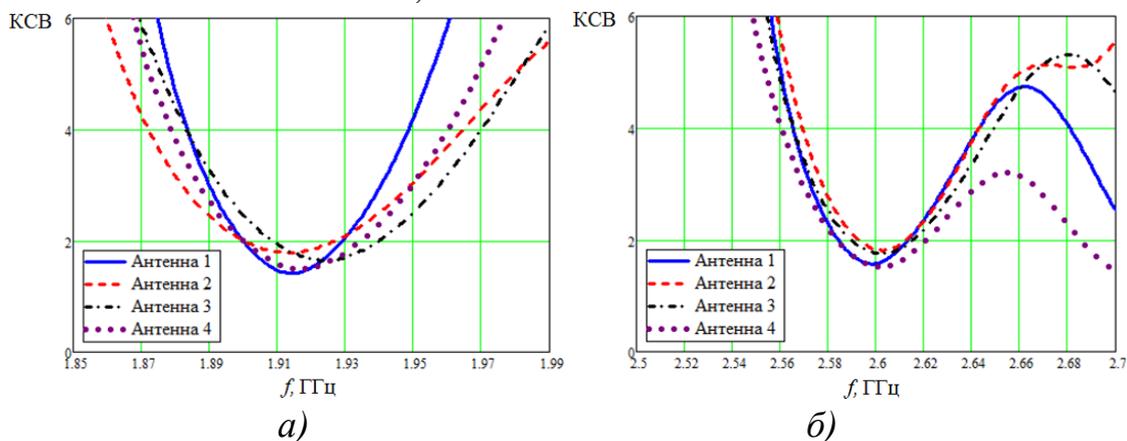


Рис.4.5. Графики зависимости КСВ от частоты в полосах: GSM 1900 (1850 - 1990 МГц) (*a*) и WiMAX (2.5 - 2.69 ГГц) (*б*).

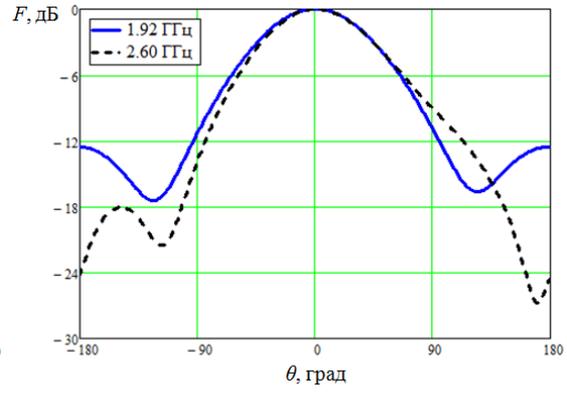
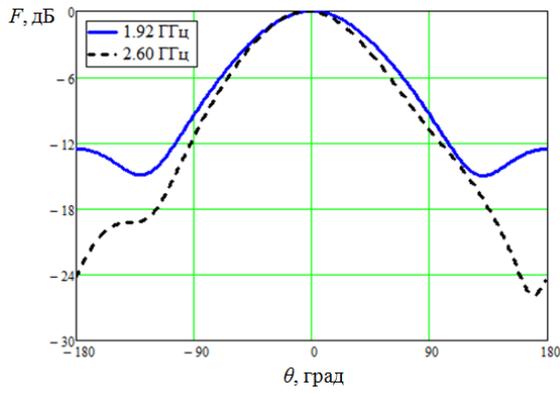


Рис.4.6. ДН антенны 1 в плоскостях E (а) и H (б).

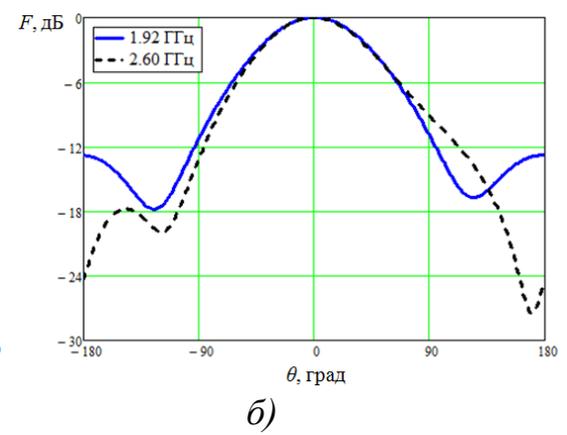
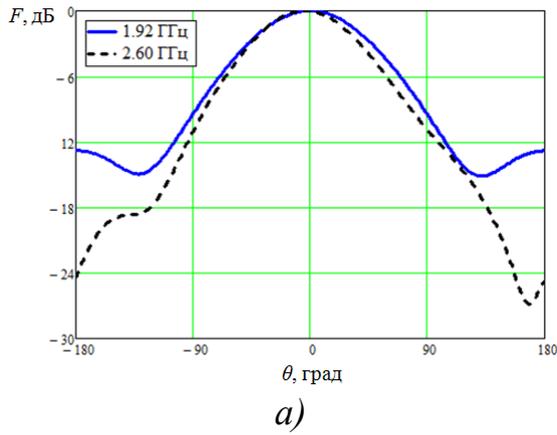


Рис.4.7. ДН антенны 2 в плоскостях E (а) и H (б).

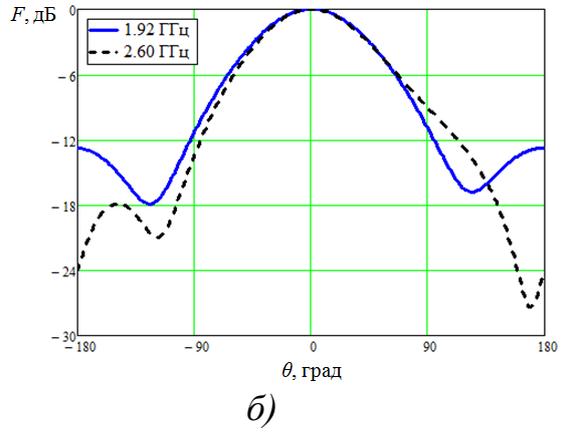
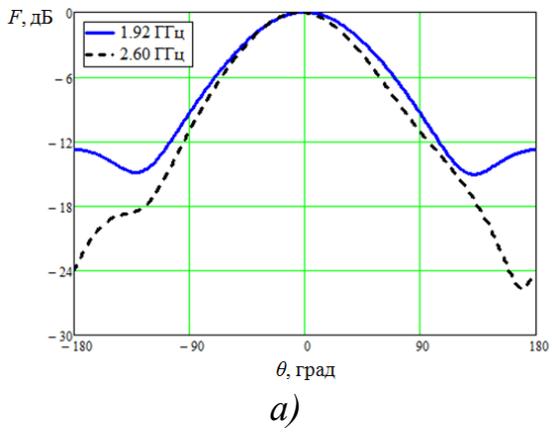


Рис.4.8. ДН антенны 3 в плоскостях E (а) и H (б).

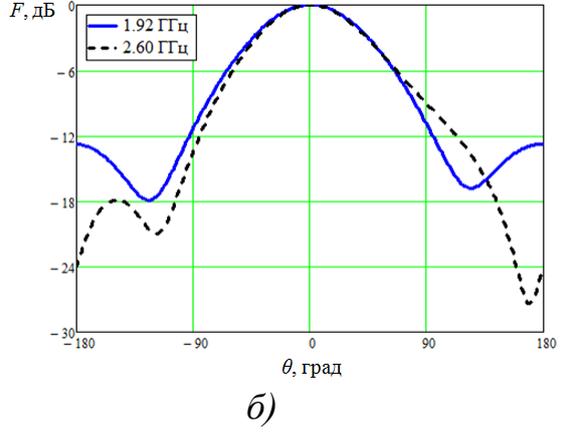
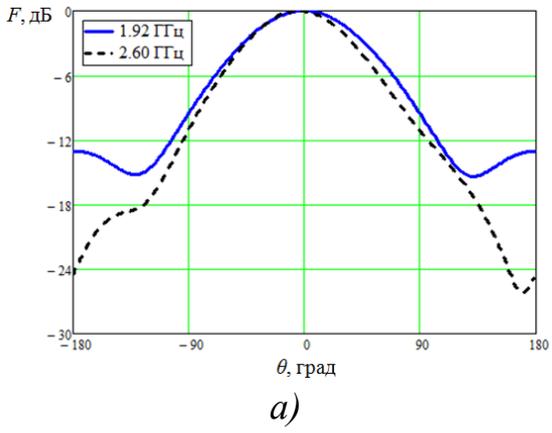


Рис.4.9. ДН антенны 4 в плоскостях E (а) и H (б).

Результаты моделирования показывают, что все рассмотренные варианты обеспечивают работу в полосе, соответствующей диапазонам GSM 1900 (1850-1990 МГц) и WiMAX (2.5-2.69 ГГц), а также требуемую форму ДН.

Как известно, трёхдиапазонные печатные антенны, изготовленные в виде многослойных структур. На рис.4.10-4.13 приведены конструкции таких антенн. Они отличаются формой реактивного элемента с емкостным характером реактивности, применяемым для расширения рабочей полосы по согласованию. На рис.4.14-4.15 приведены зависимости КСВ от частоты для четырёх вариантов микрополосковых антенн, работающих в трёх диапазонах частот стандартов GSM 1900 (1850 - 1990 МГц), WiMAX (2.5 - 2.69 ГГц) и WiMAX (3.3 - 3.5 ГГц). На рис.4.16-4.19 показаны ДН в плоскости Е и в плоскости Н для микрополосковых антенн, представленных на рис.4.10-4.13. Результаты моделирования показывают, что все рассмотренные варианты обеспечивают работу в полосе, соответствующей диапазонам GSM 1900 (1850 - 1990 МГц), WiMAX (2.5 - 2.69 ГГц) и WiMAX (3.3 - 3.5 ГГц), а также требуемую форму ДН.

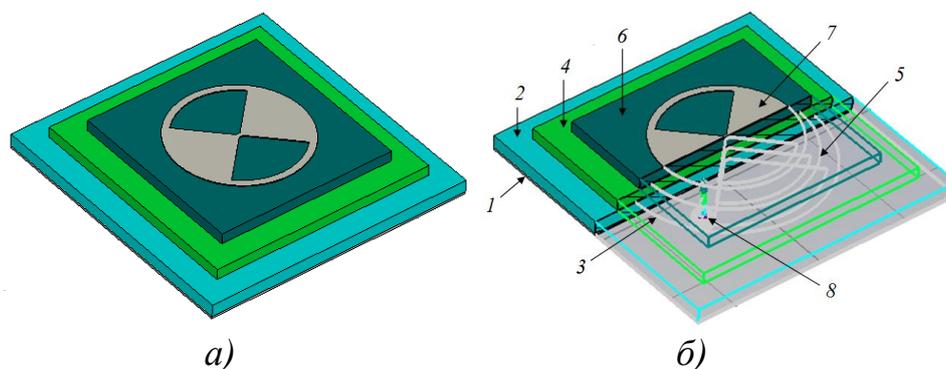


Рис.4.10. Антенна 5: *а* - общий вид, *б* - продольный разрез структуры, 1 - экран, 2 - первый диэлектрик, 3 - первая бабочка, 4 - второй диэлектрик, 5 - вторая бабочка, 6 - третий диэлектрик, 7 - третья бабочка, 8 - коаксиальное питание.

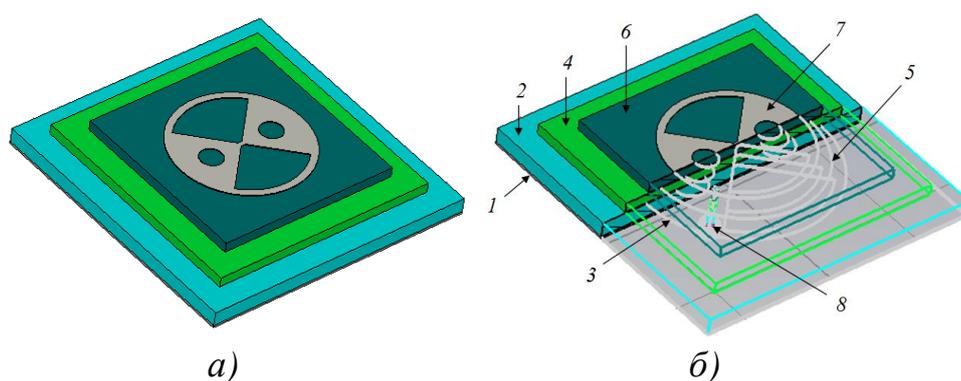


Рис.4.11. Антенна 6: *а* - общий вид, *б* - продольный разрез структуры, 1 - экран, 2 - первый диэлектрик, 3 - первая бабочка, 4 - второй диэлектрик, 5 - вторая бабочка, 6 - третий диэлектрик, 7 - третья бабочка, 8 - коаксиальное питание.

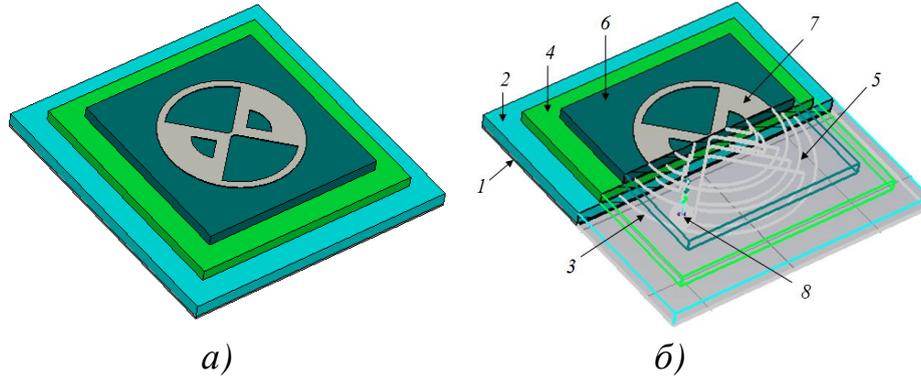


Рис.4.12. Антенна 7: *а* - общий вид, *б* - продольный разрез структуры, 1 - экран, 2 - первый диэлектрик, 3 - первая бабочка, 4 - второй диэлектрик, 5 - вторая бабочка, 6 - третий диэлектрик, 7 - третья бабочка, 8 - коаксиальное питание.

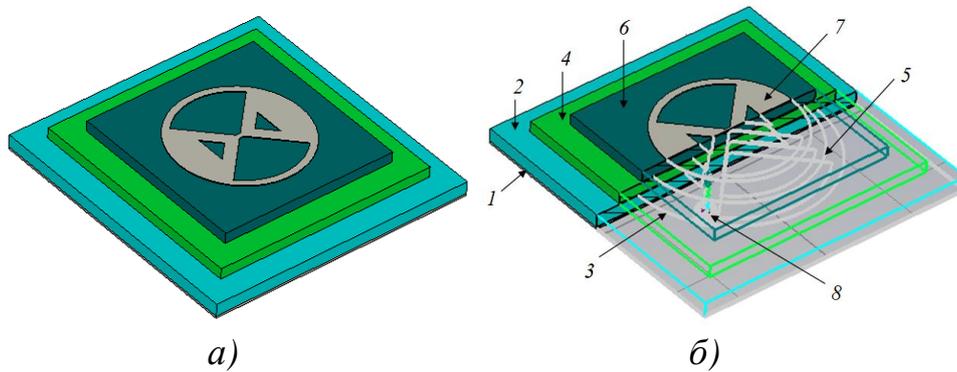


Рис.4.13. Антенна 8: *а* - общий вид, *б* - продольный разрез структуры, 1 - экран, 2 - первый диэлектрик, 3 - первая бабочка, 4 - второй диэлектрик, 5 - вторая бабочка, 6 - третий диэлектрик, 7 - третья бабочка, 8 - коаксиальное питание.

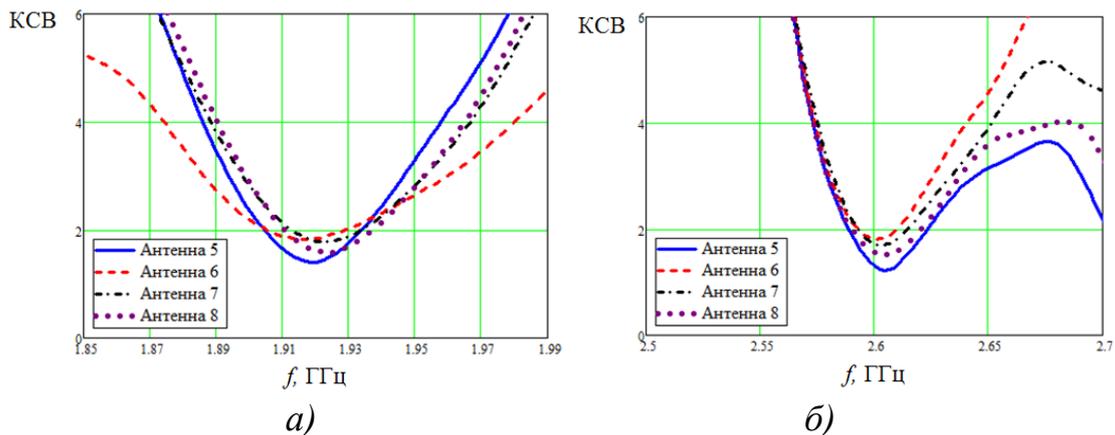


Рис.4.14. Графики зависимости КСВ от частоты в полосах: GSM 1900 (1850 - 1990 МГц) (*а*) и WiMAX (2.5 - 2.69 ГГц) (*б*).

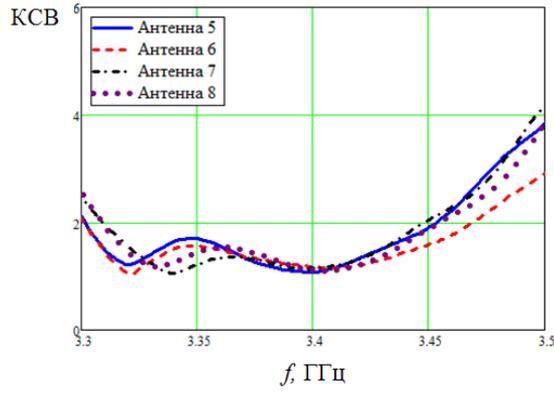


Рис.4.15. Графики зависимости КСВ от частоты в полосе WiMAX (3.3 - 3.5 ГГц).

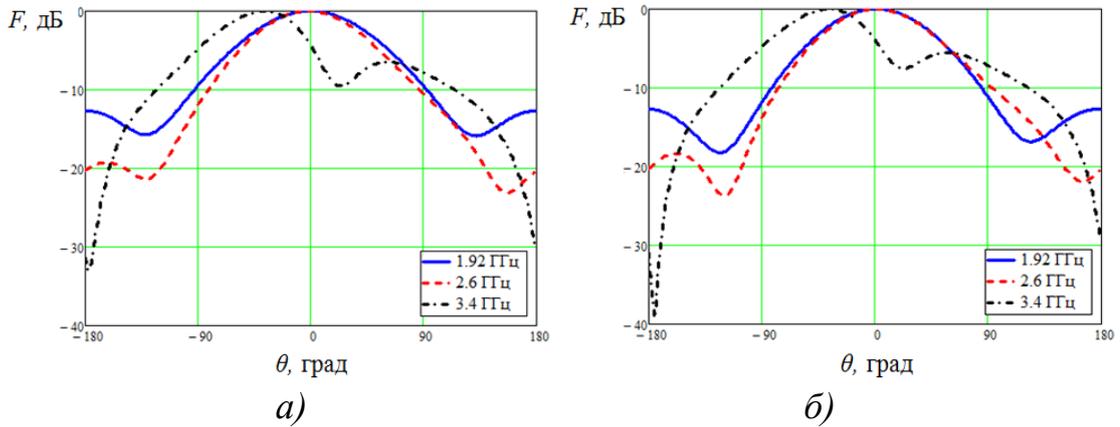


Рис.4.16. ДН антенны 5 в плоскостях E (а) и H (б).

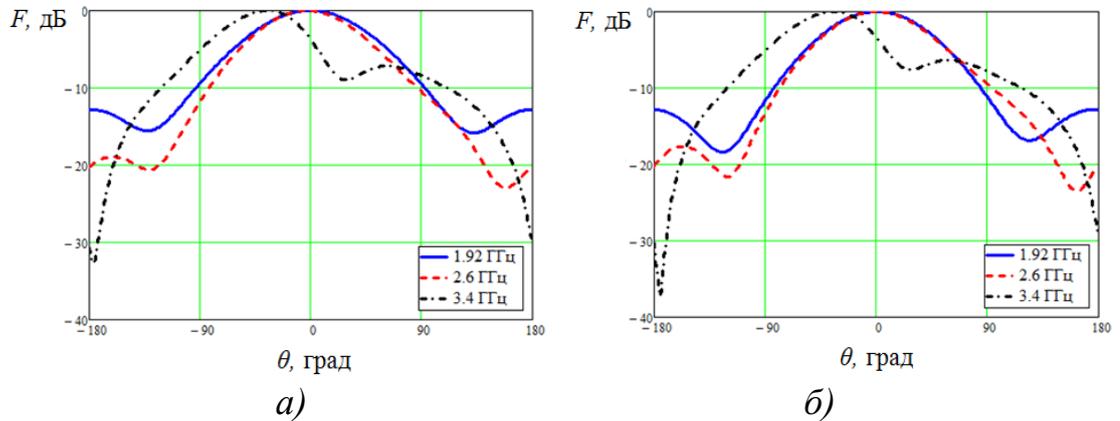


Рис.4.17. ДН антенны 6 в плоскостях E (а) и H (б).

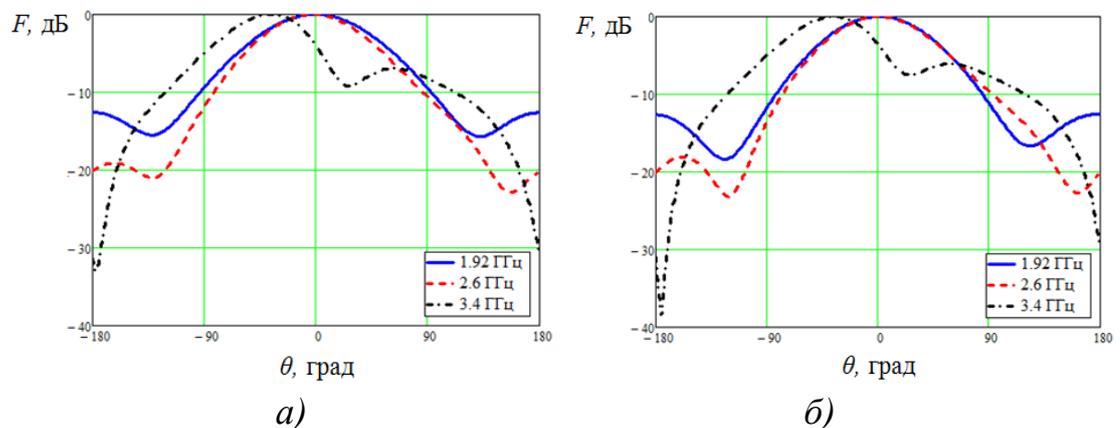


Рис.4.18. ДН антенны 7 в плоскостях E (а) и H (б).

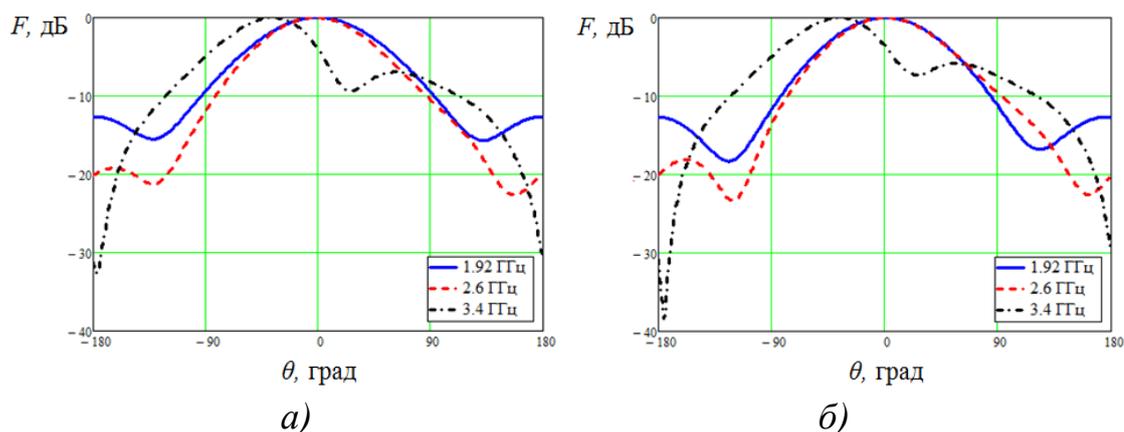


Рис.4.19. ДН антенны 8 в плоскостях Е (а) и Н (б).

В этой части рассмотрены особенности моделирования микрополосковых антенн сотовых телефонов. Представлены электродинамические модели антенн, работающих в двух и трёх диапазонах. Предложены варианты конструкций, обеспечивающих безопасную работу пользователя.

Результаты электродинамического моделирования представлены в виде частотных характеристик антенны и характеристик направленности. Зависимости КСВ по напряжению от частоты показывают возможность двух- и трёхдиапазонной работы антенны.

Глава 5. Экспериментальное исследование печатной антенны типа «бабочка» частотных диапазонов WiMAX

В этой главе экспериментально исследована печатная антенна «бабочка», работающей в частотных диапазонах WiMAX. Показаны результаты эксперимента печатной антенны «бабочка» и сравнение их с вычисленными результатами.

Заключение

В диссертационной работе были получены следующие результаты:

1. Проведен обзор и анализ антенн сотовых телефонов, а также тенденции их развития по пути расширения используемых частот. Выявлена необходимость создания антенн нового поколения сотовой связи. Эти антенны сотовых телефонов должны одновременно работать в нескольких рабочих диапазонах частот, и отличаются существенно более широкой полосой частот и желательно имеют ослабленное облучение абонента. Также следует отметить необходимость разработки антенн сотовых аппаратов с дополнением к существующим рабочим частотам более высоких рабочих частот на 2 ГГц и выше частоты.

2. Предположены широкополосные микрополосковые антенны, допускающие работу телефонного аппарата на двух частотах, при условии изготовления аппарата корпуса из диэлектрики. Проведено исследование характеристик направленности и согласование этих антенн численными методами показало возможность практического применения таких антенн при двухчастотной работы.

3. Предположены двухдиапазонные микрополосковые антенны типа «бабочка» с возбуждением от коаксиальной линии и электродинамически исследованы их согласование и направленные свойства. Эти антенны

обеспечивают одновременную работу в диапазонах частот сотовой связи: GSM 1900 (1850-1990 МГц) и WiMAX (2.5-2.69 ГГц).

4. Предположены трёхдиапазонные микрополосковые антенны типа «бабочка» с возбуждением от коаксиальной линии и электродинамически исследованы их согласование и направленные свойства. Эти антенны обеспечивают одновременную работу в диапазонах частот сотовой связи: GSM 1900 (1850-1990 МГц), WiMAX (2.5-2.69 ГГц) и WiMAX (3.3-3.5 ГГц).

5. Разработана теория приближенного расчёта микрополоскового печатного излучателя, использующая теорию неоднородных нагруженных линий с потерями на излучение. Эта теория позволяет выявить влияние различных параметров на характеристики антенны.

6. Выявлено уменьшение уровня облучения СВЧ излучения аппарата на оператора (абонента) в процессе работы с помощью печатного излучателя, размещенного на диэлектрической подложке с экраном.

7. Предложена методика наращивания рабочих диапазонов частот в разрабатываемой печатной антенне.

8. Экспериментально исследован микрополосковый печатный излучатель в частотных диапазонах WiMAX. Результаты эксперимента подтверждают теоретические результаты.

9. Основные результаты работы опубликованы в 05 статьях перечня рецензируемых научных изданий ВАК РФ, обсуждены на 07 научных конференциях, поданы 02 заявки на получение патента и внедрены в учебный процесс на кафедре «Радиофизика, антенны и микроволновая техника» МАИ.

Основные публикации по теме диссертации

В изданиях, рекомендованных ВАК РФ:

1. Буй, Као Нинь. Антенны сотовых телефонов / Као Нинь Буй // Антенны. - 2013. - № 9. - С. 56-64.

2. Буй, Као Нинь. Широкополосные антенны сотовых телефонов / Д.И. Воскресенский, Е.В. Овчинникова, Као Нинь Буй // Антенны. - 2014. - № 2. - С. 27-30.

3. Буй, Као Нинь. Двухдиапазонные микрополосковые антенны сотовой связи / Д.И. Воскресенский, Е.В. Овчинникова, Као Нинь Буй, С.Г. Кондратьева // Антенны. - 2015. - № 1. - С. 17-27.

4. Буй, Као Нинь. Методика приближенного расчёта характеристик направленности широкополосной микрополосковой антенны сотовой связи / Д.И. Воскресенский, Е.В. Овчинникова, Као Нинь Буй, Ван Винь Фам // Антенны. - 2015. - № 6. - С. 7-17.

5. Буй, Као Нинь. Трёхдиапазонные микрополосковые антенны сотовой связи / Д.И. Воскресенский, Е.В. Овчинникова, Суан Кхоа Буй, Као Нинь Буй, Ван Винь Фам // Антенны. - 2015. - № 7. - С. 37-45.

Заявки на получение патента:

6. Буй, Као Нинь. Широкополосная микрополосковая антенна / Д.И. Воскресенский, Е.В. Овчинникова, С.Г. Кондратьева, Као Нинь Буй // Заявка № 2014153320. Зарегистрирован 29.12.2014 г.

7. Буй, Као Нинь. Широкополосная микрополосковая антенна / Д.И. Воскресенский, Е.В. Овчинникова, С.Г. Кондратьева, Као Нинь Буй // Заявка № 2014153321. Зарегистрирован 29.12.2014 г.

В других изданиях:

8. Буй, Као Нинь. Антенны сотовых телефонов / Као Нинь Буй // Сборник тезисов докладов Московской молодёжной научно-практической конференции «Инновации в авиации и космонавтике - 2013». Москва, 16-18 апреля 2013, С.212-213.

9. Буй, Као Нинь. Печатные антенны сотовых телефонов / Као Нинь Буй // Материалы 3-й международной научно-практической конференции «Академическая наука-проблемы и достижения». Москва, 20-21 февраля 2014, Т.1, С. 177-181.

10. Буй, Као Нинь. Электродинамическое моделирование печатных антенн сотовых телефонов / Као Нинь Буй // Сборник тезисов докладов Московской молодёжной научно-практической конференции «Инновации в авиации и космонавтике - 2014». Москва, 22-24 апреля 2014, С. 139-140.

11. Буй, Као Нинь. Двухдиапазонные печатные антенны сотовых телефонов / Као Нинь Буй, Е.В. Овчинникова, С.Г. Кондратьева, Суан Кхоа Буй // Сборник тезисов докладов 13-й международной конференции «Авиация и космонавтика - 2014». Москва, 17-21 ноября 2014, С. 18-20.

12. Буй, Као Нинь. Электродинамическое моделирование двухдиапазонных печатных антенн сотовой связи / Као Нинь Буй // Тезисы докладов 12-й молодежной научно-технической конференции «Радиолокация и связь - перспективные технологии». Москва, 11 декабря 2014, С. 364-366.

13. Буй, Као Нинь. Трёхдиапазонные печатные антенны сотовых телефонов / Е.В. Овчинникова, Као Нинь Буй, Ван Винь Фам, Нгок Линь Нгуен // Сборник тезисов докладов Московской молодёжной научно-практической конференции «Инновации в авиация и космонавтике - 2015». Москва, 21-23 апреля 2015, С. 106-107.

14. Буй, Као Нинь. Электродинамическое моделирование трёхдиапазонных микрополосковых антенн сотовых телефонов / Као Нинь Буй // Материалы IX международной научно-практической конференции «Актуальные вопросы науки, технологии и производства». Санкт-Петербург, 22-23 мая 2015, С. 48-51.