

DOI: <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2026.3.2>

УДК: 621.396, 517.938

ВОССТАНОВЛЕНИЕ РЕАЛЬНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ОБРАЗЦОВ ШИРОКОПОЛОСНЫХ АНТЕНН ПУТЕМ ОБРАТНОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ

А.С. Дмитриев, В. А. Калинин, А.В. Уваров, Е.В. Федоров, Ф.Д. Якутин

ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН
125009, Москва, ул. Моховая, 11, корп. 7

Статья поступила в редакцию 21 января 2026 г.

Аннотация. В работе предлагается подход к восстановлению характеристик образцов антенн субгигагерцового и гигагерцового частотного диапазона, представленных на рынке, на основе обратного проектирования с использованием пакетов электродинамического моделирования. Реализован процесс, включающий анализ исходных данных производителя, построение и настройку электродинамической модели, ее верификацию по доступным экспериментальным данным и последующее полное моделирование. Подход продемонстрирован на примере планарной антенны с заявленным рабочим диапазоном 0,6-6,0 ГГц. Показано, что полученные в результате моделирования частотные зависимости КСВ $< 2,5-3,0$ хорошо согласуются с экспериментальными измерениями, что подтверждает корректность построенной модели. На основе обратного проектирования получены диаграммы направленности и их эволюция по частоте, отсутствующие в документации производителя. Установлено, что в рассматриваемом случае имеется существенное расхождение между расчётными характеристиками направленности и данными производителя, что указывает на различие в трактовке коэффициента направленности производителем по отношению к стандартному определению. Сделан вывод об эффективности

использования обратного проектирования при выборе и разработке печатных антенн с заданными электродинамическими параметрами.

Ключевые слова: излучение радиоволн, планарные антенны, динамический хаос, сверхширокополосный диапазон частот.

Автор для переписки: Дмитриев Александр Сергеевич, alexandrdrdm@bk.ru

Введение

В настоящее время на рынке присутствует большое количество разнообразных антенн субгигагерцового и гигагерцового диапазонов различных производителей [1,2]. Выбор подходящей (оптимальной) для конкретной задачи антенны осуществляется через сравнение характеристики ряда потенциально подходящих вариантов. При этом потенциальный потребитель сталкивается по меньшей мере с двумя реальностями:

1) Часто производитель указывает только часть, необходимых для осознанного выбора варианта, параметров поставляемой антенны.

2) Нет гарантии, что поставщик имеет ввиду именно ту трактовку технических параметров, которая интересует потребителя.

Это может касаться полосы частот, диаграмм направленности, коэффициентов усиления и т. д. Таким образом, потенциальный потребитель сталкивается с необходимостью каким-то образом получать недостающую информацию непосредственно через дополнительное исследование образцов рассматриваемых антенн. Прямой путь решения этой задачи – достаточно полные экспериментальные измерения характеристик образцов. Однако, кроме некоторых типов измерений, например, измерений S -характеристик, это может оказаться слишком трудоемким и потребовать специальной аппаратуры и условий измерений (например, безэховой камеры значительных размеров, перестраиваемых генераторов радиосигналов, измерительных приемников, поворотных устройств и др.). Ясно, что такие измерения дороги и их далеко не всегда можно реализовать, что заставляет искать альтернативные возможности получения недостающих сведений и параметрах антенн.

1. Постановка задачи

В данной работе в качестве подхода к решению этой задачи рассматривается обратное проектирование антенны [6-8] через анализ ее конструкции (в англоязычной терминологии такие процессы относят к reverse engineering).

В задаче исследования реальных характеристик образцов антенн рассматриваемый процесс обратного проектирования будет состоять из следующих этапов.

1) Анализ характеристик устройства, предоставляемых производителем.

2) Выявление потребителем недостающих параметров, требующихся для принятия решения о возможности применения.

3) Анализ конструкции антенны и создание модели ее электродинамической структуры для исследования с помощью пакета электродинамического моделирования (возможно несколько этапов, итераций).

4) Апробация, настройка модели в пакете и ее верификация через сравнение получаемых характеристик с параметрами, заявляемыми производителем и доступные экспериментальные данные.

5) Полное электродинамическое моделирование электродинамической структуры в специализированном пакете.

б) Анализ результатов и выводы.

В следующих разделах рассматривается реализация такого подхода на примере планарной по конструкции антенне с диапазоном частот, заявляемым производителем 600-6000 МГц.

2. Антенна – объект обратного проектирования

В качестве модельного объекта для определения характеристик путем обратного проектирования было выбрана, представленная на рынке, всенаправленная в азимутальной плоскости антенна «Omni Antenna Model AZ7795G», которая позиционируется как антенна для систем связи 5G в диапазоне частот 600-6000 МГц. Внешний вид антенны в корпусе представлен на рис. 1а.

Собственно электродинамическая структура антенны выполнена на двухсторонней металлизированной плате материала типа FR-4 толщиной 0,9 мм. Внешний вид платы антенны без корпуса приведен на рис. 1б.



Рис. 1. Фотографии образцов печатной антенны CTRF-ANTENNA-AP-60600-13223-SMA:
а – в корпусе, и б – без корпуса.

2.1. Анализ характеристик устройства, предоставляемых производителем

Производитель (предположительно C&T RF Antenna Inc., China оригинальная модель Model: CTRF-ANTENNA-AP-60600-13223-SMA) декларирует следующие характеристики этой антенны, см. Таблицу 1.

Таблица 1. Таблица параметров, заявленных производителем.

Частотный диапазон	600-6000 МГц
Коэффициент усиления	8 дБ
KCB (VSWR)	2
Геометрические размеры	0,9 × 16 × 113 мм
Поляризация	Вертикальная
Материал корпуса	ABS

Кроме того, производитель указывает на всенаправленность (omnidirectional) антенны в азимутальной плоскости.

2.2. Проверка заявленных характеристик реальным и оценка отсутствующих характеристик.

Для решения вопроса о возможной применимости этой антенны для решения конкретных задач, необходима проверка соответствия антенны заявляемым характеристикам и получение диаграммы направленности антенны, в частности в азимутальной плоскости.

В качестве доступного набора измерений для проведения сравнения характеристик экспериментального образца и модели использовались, измеренные с помощью анализатора цепей LibreVNA, зависимости параметров S_{11} , КСВ и импеданса от частоты.

2.3. Анализ конструкции антенны и создание модели ее электродинамической структуры.

Наша первая задача: создать электродинамическую модель антенны, пригодную для работы в специальных программных пакетах электродинамического моделирования типа HFSS [3] и CST Studio.

С этой целью, сначала был разобран образец антенны, изучены и измерены топология печатной антенны и конфигурация фидерного тракта.

Визуальный осмотр платы антенны показал, что ее внешний вид в первом приближении соответствует несимметричному, достаточно широкому в плоскости печатной платы антенны диполю. Ее можно также рассматривать как пару широких монополей находящихся над двумерными «земляными поверхностями».

3. Апробация, настройка и верификация модели

3.1. Упрощенная конфигурация антенны

На первом этапе изучения базовых свойств антенны, включая характеристики диаграммы направленности (ДН) и ее частотной зависимости в сверхширокой полосе частот (СШП), а также с целью упрощения и ускорения расчетов была спроектирована упрощенная конфигурация антенны. Такая

конфигурация представляет собой несимметричный широкий печатный диполь (см. рис 2), который состоит из двух несимметричных прямоугольных плеч диполя длиной l_1 , l_2 , и шириной w_1 , w_2 расположенными на одной подложке на расстоянии Δ друг от друга. Возбуждение структуры происходит в узком месте между прямоугольными плечами диполя. Полные характеристики представлены в Таблице 2.

Большая ширина плеч диполя способствует обеспечению его широкополосности. Размеры плеч диполя согласуются с размерами соответствующих металлизированных площадок в исходной топологии печатной антенны.

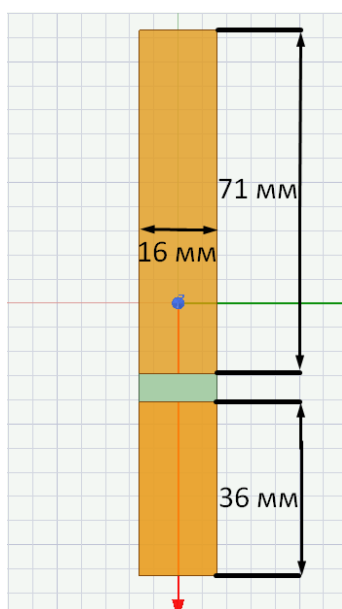


Рис. 2. Типичная конфигурация несимметричного печатного диполя.

Верхнее плечо соответствует возбуждению колебаний на нижних частотах, нижнее – на высоких частотах.

Таблица 2. Характеристики упрощенной конфигурации несимметричного печатного диполя.

Подложка	FR-4 ($\epsilon = 4,5$), с толщиной 0.9 мм
Габаритные размеры подложки	113 мм × 16 мм
Габаритные размеры короткого плеча	$l_1 = 36$ мм, $w_1 = 16$ мм, толщина металлизации $d = 35$ мкм
Габаритные размеры длинного плеча	$l_2 = 71$ мм, $w_2 = 16$ мм,
Расстояние между плечами	$\Delta = 6$ мм
Возбуждение	точечный порт, $Z = 50$ Ом

Для электродинамического моделирования как этой упрощенной конфигурации антенны, так и последующих более реалистичных моделей исходной антенны использовался метод конечных элементов, реализованный в программном пакете HFSS [3].

В качестве материала металлизации был выбран PEC (Perfect Electric Conductor – идеальный электрический проводник), который представляет собой идеализированную модель проводящей среды, обладающей бесконечной проводимостью. Возбуждение упрощенной конфигурации антенны осуществлялось точечным портом в разрезе между плечами с внутренним сопротивлением 50 Ом.

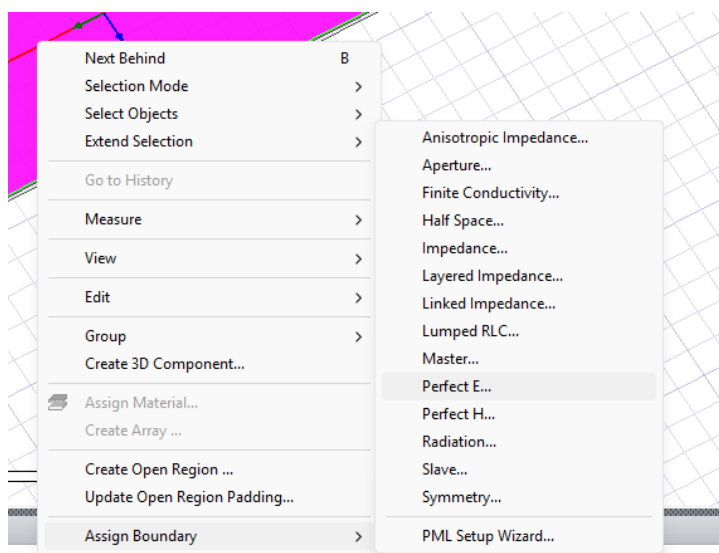


Рис. 3а. Присваивание плечам граничные условия PEC.

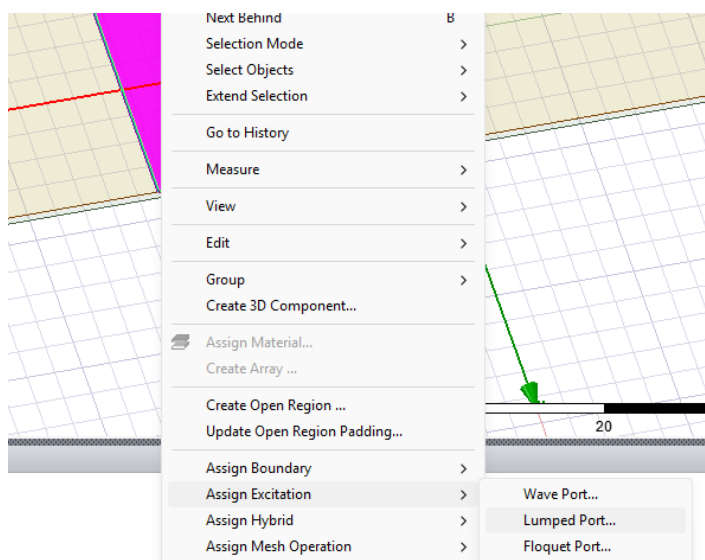


Рис. 3б. Задание точного порта для возбуждения структуры.

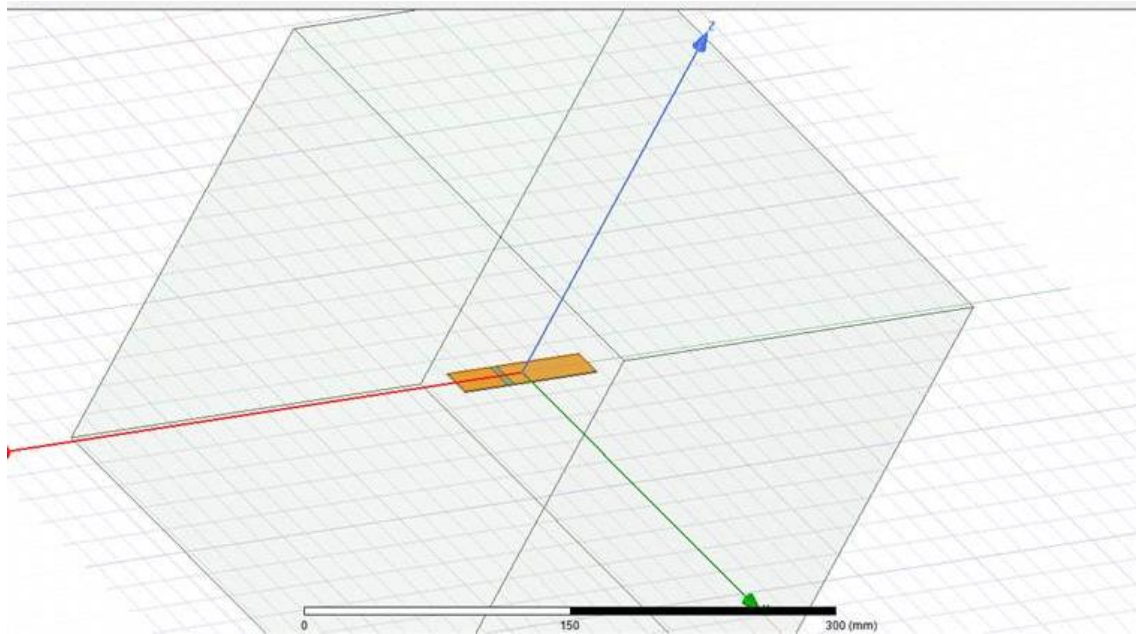


Рис. 3в. Задание бокса Radiation.

3.2. Моделирование упрощенной конфигурации антенны и его результаты

При моделировании в сверхширокой полосе частот от 600 МГц до 6000 МГц производились расчеты коэффициента стоячей волны (КСВ), действительной и мнимой частей импеданса, распределение токов по поверхности антенны, исследовались ее направленные свойства. На рис. 4а представлены расчетная и полученная при измерениях зависимости КСВН от частоты.

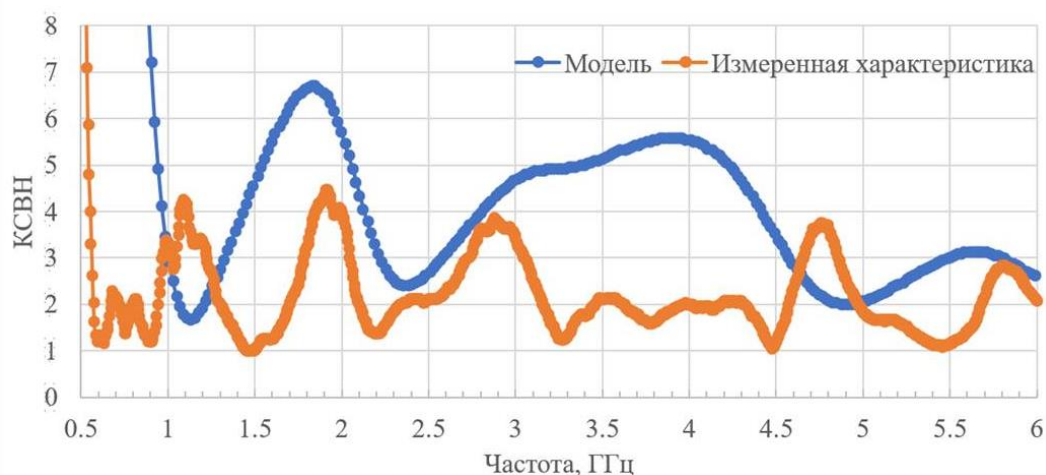


Рис. 4а. Коэффициент стоячей волны (КСВ) для упрощенной конфигурации печатной дипольной антенны.

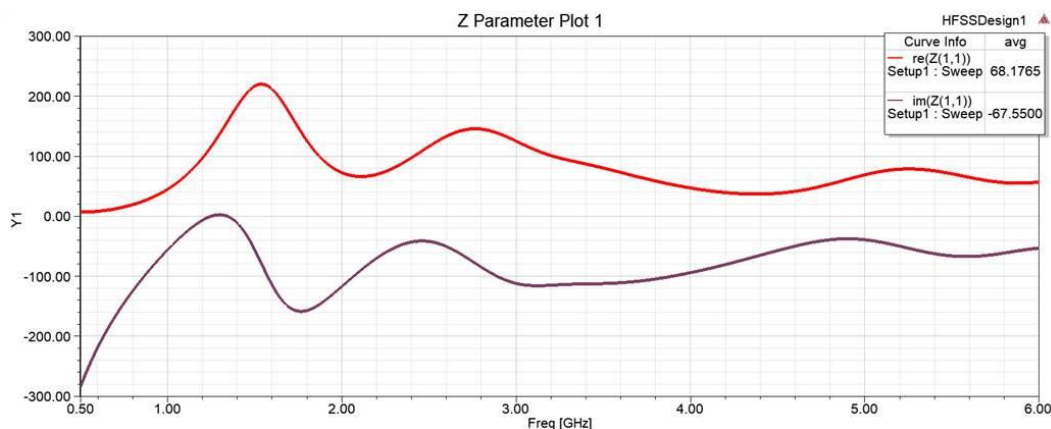


Рис. 4б. Частотная зависимость действительной (красный) и мнимой (фиолетовый) частей входного импеданса упрощенной конфигурации печатной дипольной антенны.

Результаты расчетов показали, что антенна, даже в упрощенной конфигурации, работает в достаточно широком частотном диапазоне, примерно от 1 до 6 ГГц (см. график для КСВН на рис. 4а), как и декларируется производителем для исходной антенны, однако с неполным согласованием. Изучение импеданса антенны (рис. 4б) выявило причину несогласованности антенны с портом, и необходимость введения настроечных цепей.

3.3. Уточненная модель антенны и ее моделирование

По результатам моделирования упрощенной конфигурации антенны, оказалось, что в такой антенне преобладает емкостная составляющая ($X < 0$), которую можно компенсировать добавлением распределенных элементов с индуктивным характером. Активная часть сопротивления антенны составляет почти 70 Ом (см. рис. 4б), ее необходимо согласовать с сопротивлением фидера (50 Ом). Делать это нужно также при помощи широкополосной структуры, например многозвенного трансформатора сопротивления или плавного перехода (экспоненциального или Гауссова) в геометрии питающей линии. Подобная структура (копланарная линия, а также вырезы, влияющие на распределение токов) имеется в образце исходной антенны.

В дополнение к этому анализ результатов моделирования упрощенной конфигурации позволил исследовать частотную зависимости направленных свойств антенны.

На следующем этапе процесса для исследования эффекта влияния настроечных цепей на характеристики антенны была промоделирована конфигурация антенны (рис. 6а), приближенная к образцам, полученным от производителя (рис. 5).

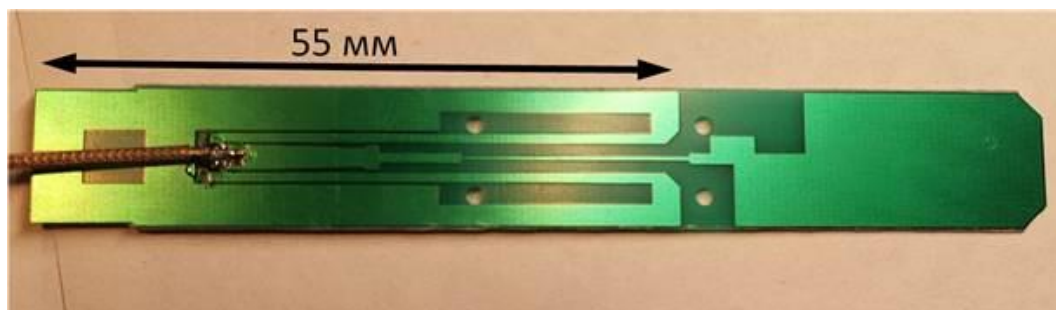


Рис. 5. Фотография экспериментального образца печатной антенны CTRF-ANTENNA-AP-60600-13223-SMA.

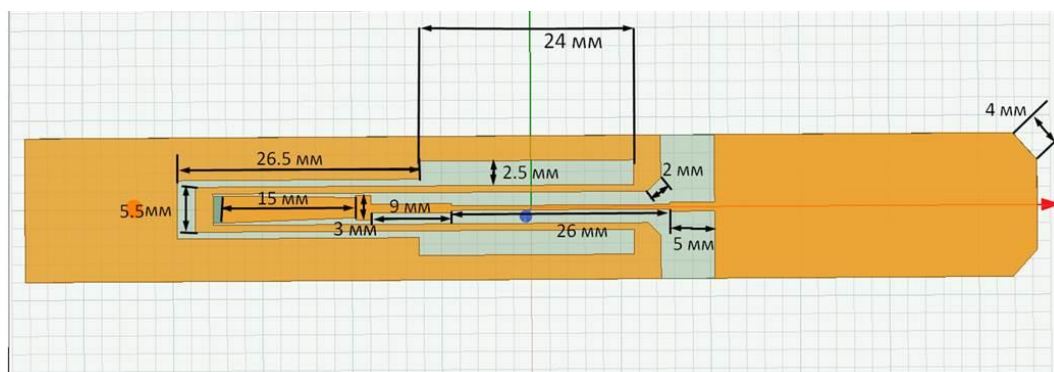


Рис. 6а. Топология печатной дипольной антенны с дополнительными согласующими элементами.

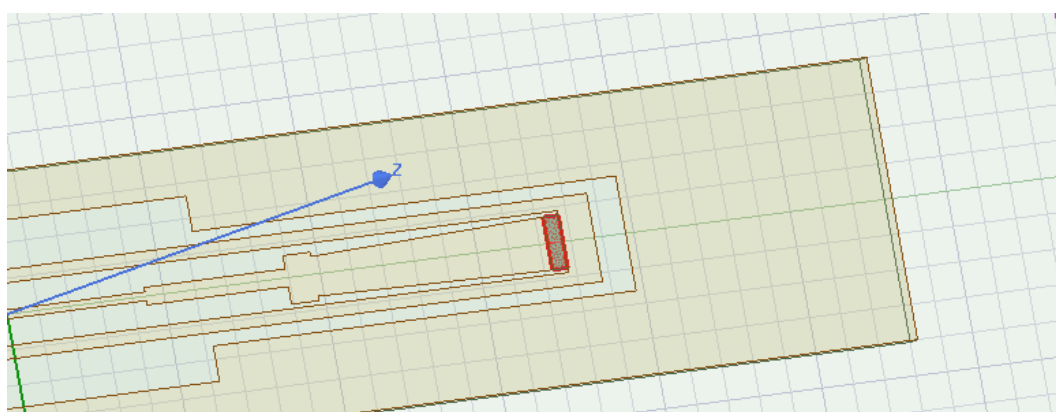


Рис. 6б. Новый порт запитки, подсоединенный к копланарной линии.

Результаты расчета зависимости КСВН от частоты для печатной дипольной антенны с дополнительными согласующими элементами и реальной антенной приведена на рис. 7а. Ее сравнение с экспериментально измеренным

КСВН показывает, качественное сходство двух этих кривых. Кроме того, отметим, что в обоих случаях в рабочей полосе частот максимальное значение КСВН не превышает 4, а в среднем по рассматриваемому диапазону оно составляет 2,5-3,0.

КСВН для такой топологии антенны с дополнительными согласующими элементами во всем диапазоне частот значительно улучшается, но все еще остаются пики до 4-6, при этом график приближается к реальному. Среднее значение импеданса близко к 45-50 Ом, что значительно лучше предыдущего варианта упрощенной конфигурации печатной дипольной антенны.

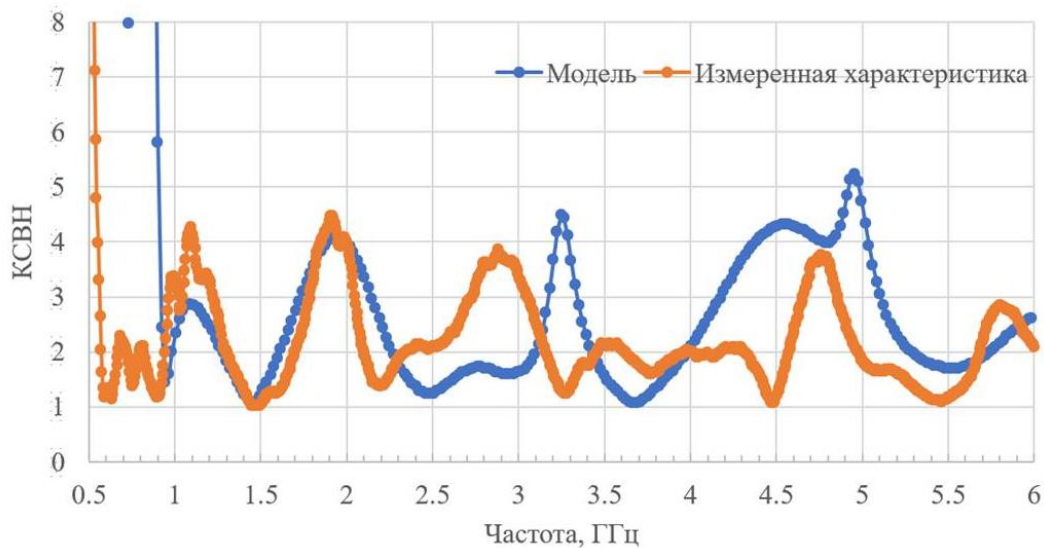


Рис. 7а. Коэффициент стоячей волны по напряжению (КСВН), рассчитанный для печатной дипольной антенны с дополнительными согласующими элементами.

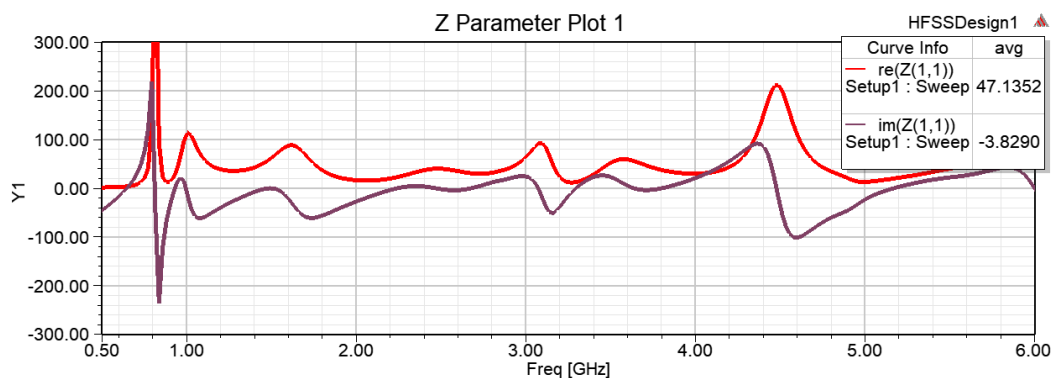


Рис. 7б. Частотная зависимость действительной (красный) и мнимой (фиолетовый) частей входного импеданса для печатной дипольной антенны с дополнительными согласующими элементами.

Попробуем еще улучшить ситуацию добавив оставшиеся вырезы и максимально приблизив топологию антенны к точной полной топологии антенны, представленной производителем для того, чтобы антенна лучше возбуждалась на других модах.

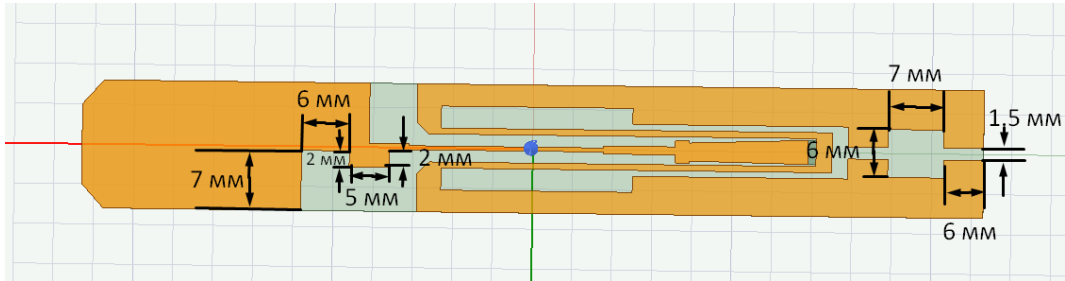


Рис. 8а. Полная итоговая топология и размеры печатной дипольной антенны.

Рассмотрим результаты численного моделирования характеристик антенны S_{11} и КСВН, для сравнения с экспериментальными графиками в пределах 0-6 ГГц (рис 9).

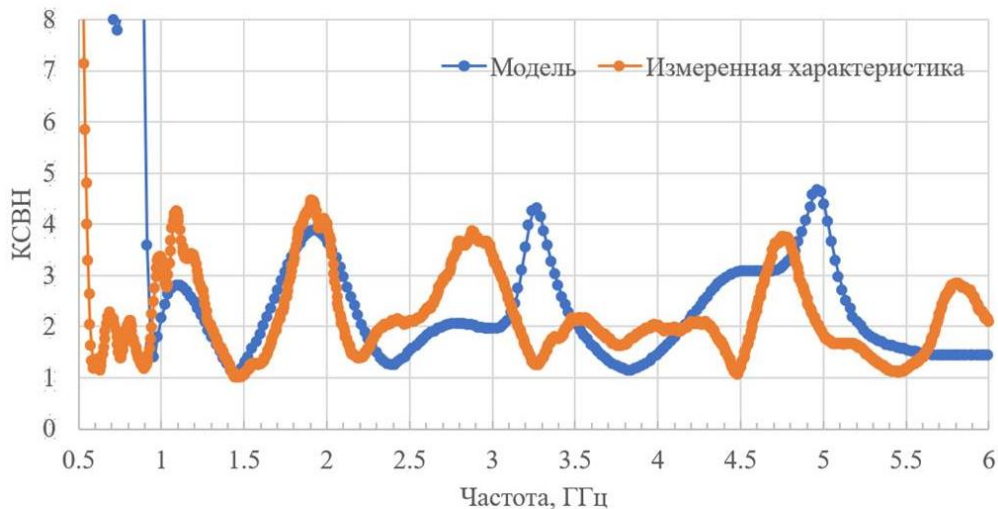


Рис. 9а. Коэффициент стоячей волны по напряжению (КСВН), рассчитанный для полной итоговой топологии печатной дипольной антенны.

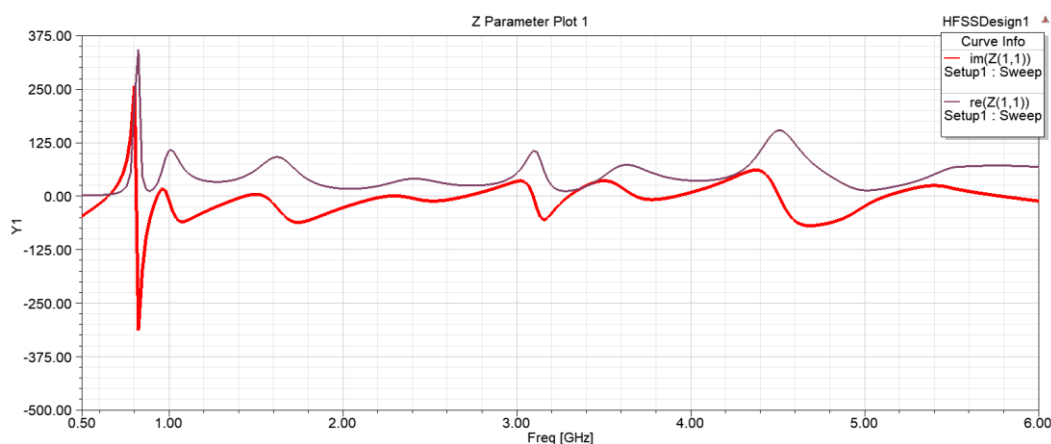


Рис. 9б. Частотная зависимость действительной (красный) и мнимой (фиолетовый) частей входного импеданса для полной итоговой топологии печатной дипольной антенны.

Из рис. 9 видно, что при удовлетворительном совпадении экспериментальных и расчетных результатов в диапазоне частот 1-6 ГГц, характеристики модели антенны в области нижних частот ниже 1 ГГц принципиально отличаются от измеренных: модель имеет высокие КСВ на этих частотах и практически не излучает. Поскольку реальная антенна от модели отличается наличием коаксиального кабеля, было высказано предположение о его влиянии на характеристики излучения в области частот ниже 1 ГГц. Для проверки этой гипотезы в модель антенны был добавлен подводящий кабель (рис. 10а-б). Для того чтобы исключить возможность влияния на результат артефакты, связанные со свойствами конкретного пакета и используемый при этом численный метод моделирование проводилось как в пакете HFSS (метод конечных элементов), так и в пакете CST Studio (расчеты во временной области).

3.4 Моделирование антенны с кабелем питания

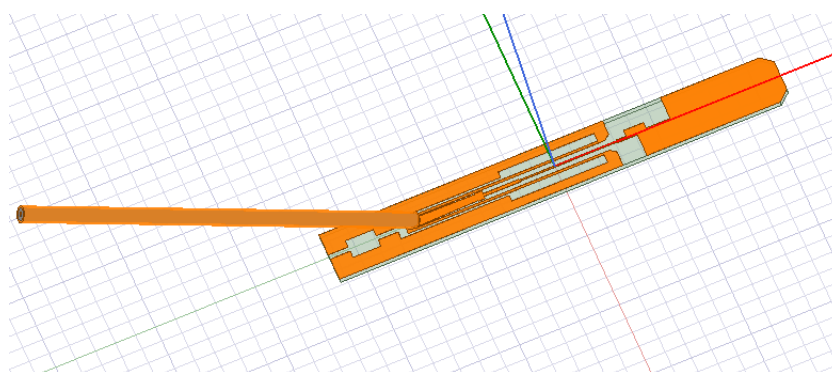


Рис. 10а. Антенна с кабелем.

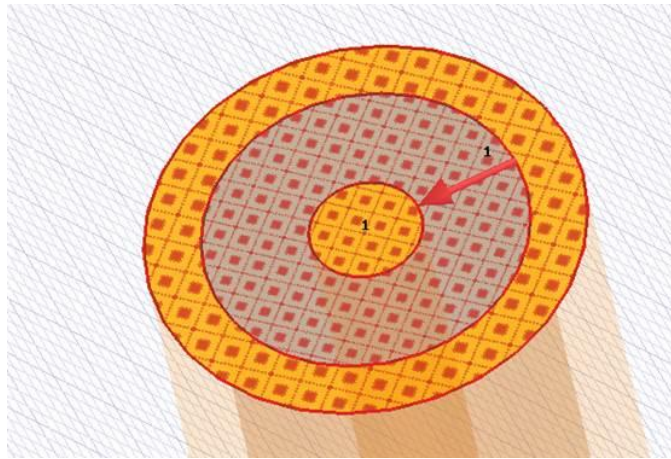


Рис. 10б. Порт питания.

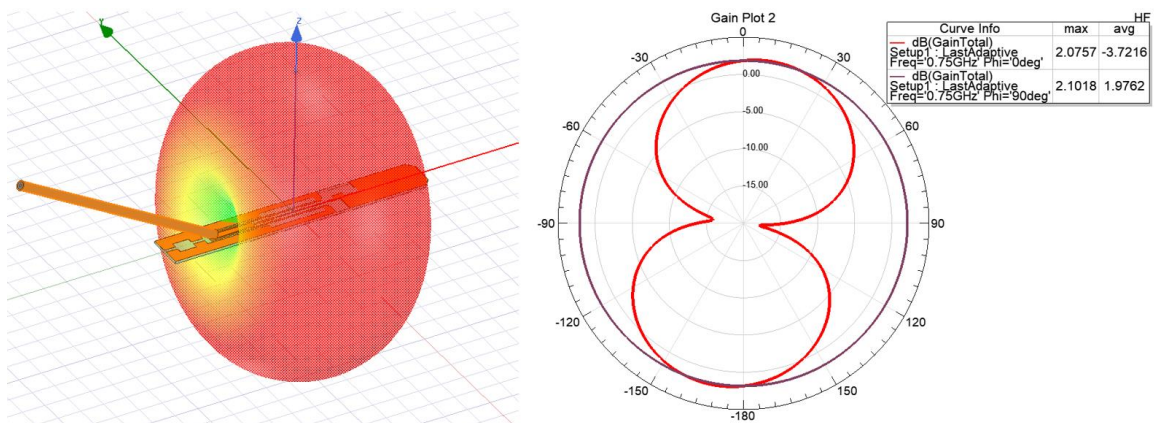


Рис. 10в. Диаграмма направленности на частоте 750 МГц.

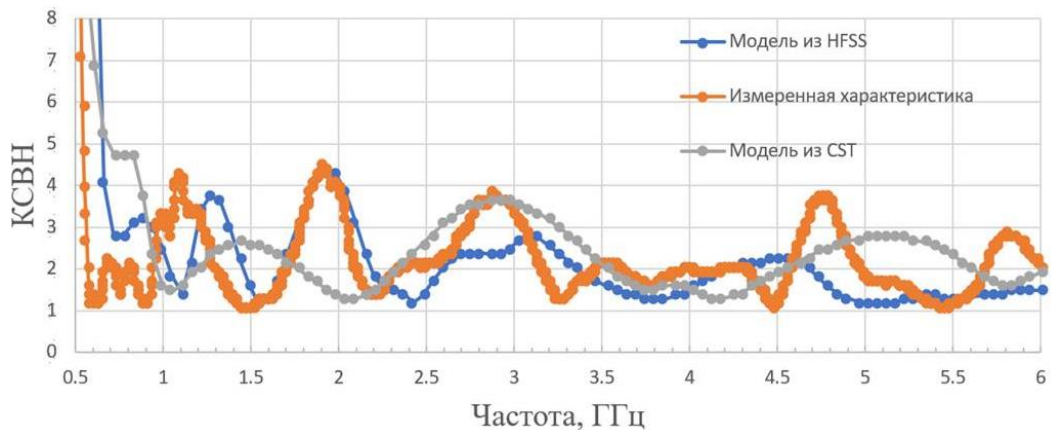


Рис. 10г. КСВН антенны, запитанной кабелем.

Полученные результаты оказались примерно одинаковыми для обоих использованных для моделирования пакетов и приведены на рис. 10в,г. Анализируя график зависимости КСВН от частоты можно заметить, что итоговые характеристики (рис. 10г) моделирования в обоих пакетах Ansys HFSS и CST Studio схожи с измеренной зависимостью, в том числе в области

частот ниже 1 ГГц, что подтверждает верности выдвинутой гипотезы о влиянии кабеля на характеристики антенны в этой части частотного диапазона. Детали расчетных графиков КСВ модели из HFSS и CST отличаются в силу разных методов расчета.

Характеристики излучения антенны на частоте 750 МГц (рис. 10в), показывают, что диаграмма направленности имеет вид тора с небольшой асимметрией. Коэффициент усиления антенны максимален в азимутальной плоскости и составляет 2,1 дБ. Средний КУ в этой плоскости близок к 2 дБ.

Качественно полученные результаты объясняются следующим образом. Нижняя частота антенны определяется длинной частью включая кабель (рис. 5).

Вырезы образуют путь для тока с длиной $l = 55 \text{ мм} \times 4 = 220 \text{ мм}$. Тогда длина волны будет равна: $l = \frac{\lambda}{2} \Rightarrow \lambda = 2l = 440 \text{ мм}$. Такой длине волны соответствует

частота $f = \frac{c}{\lambda} \approx 0,681 \text{ ГГц}$. Рассчитанная нижняя частота соответствует измеренной.

3.5. Характеристики излучения итоговой модели антенны

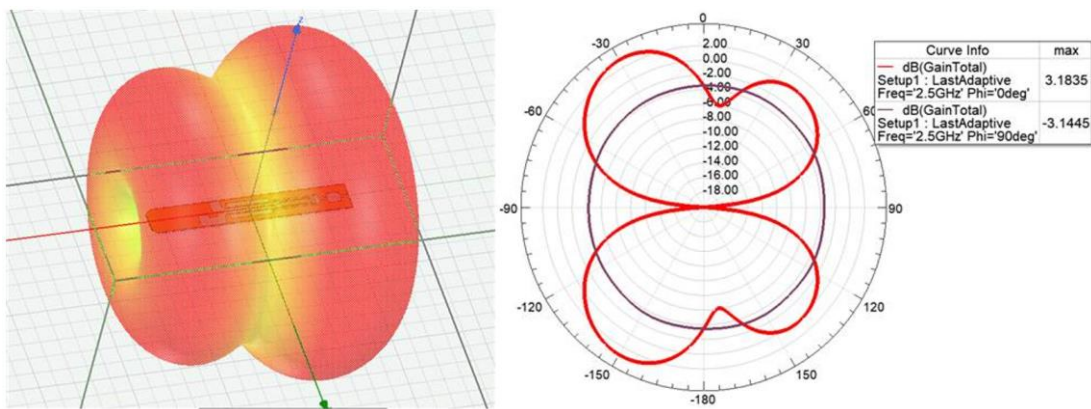
Ниже приводятся характеристики излучения рассматриваемой модели антенны в широком диапазоне частот, полученные с использованием пакета программ HFSS.

Предварительные расчеты показали, что модельная антенна достаточно эффективно излучает во всем рассматриваемом диапазоне 600-6000 МГц. Однако при этом пространственная картина излучения кардинально меняется при изменении частоты. Для того чтобы иметь возможность проанализировать характер этих изменений необходимо рассматривать эволюцию диаграммы направленности антенны с достаточно малым шагом по частоте, и в сверхширокой полосе частот. При этом объем графических данных будет значительно превосходить допустимое число иллюстраций в статье. Так, например, если брать шаг по частоте, через который производятся расчеты диаграммы направленности

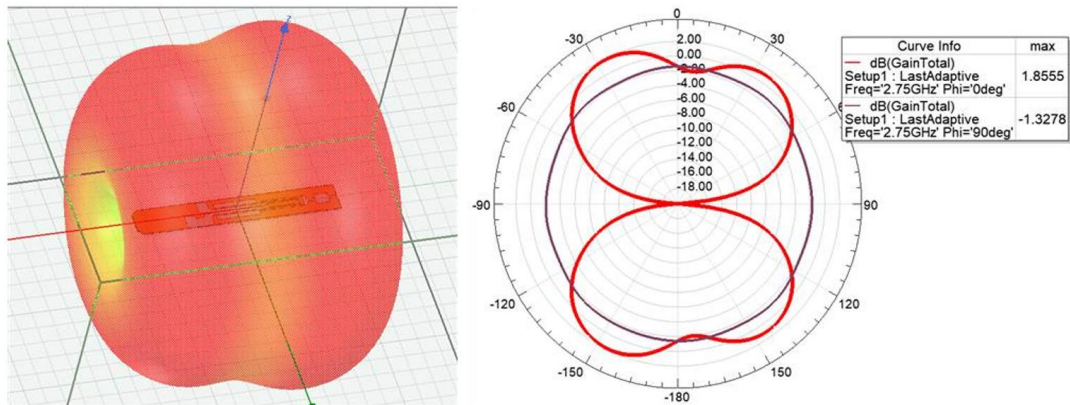
в 100 МГц и всю полосу частот от 600 до 6000 МГц, то число точек по частоте, для которых нужно произвести расчеты и привести ее вид превысит 50. Ясно, что впрямую это неприемлемо. Поэтому было принято решение увеличить шаг счета по частоте до 250 МГц и ограничить рассмотрение динамики диаграммы в полосе частот от 2500 до 5000 МГц. Таким образом число репрезентативных точек, представленных в данной работе, сокращается до 10.

Динамика изменения диаграмм, полученных с ростом частоты представлена ниже на рис. 11.

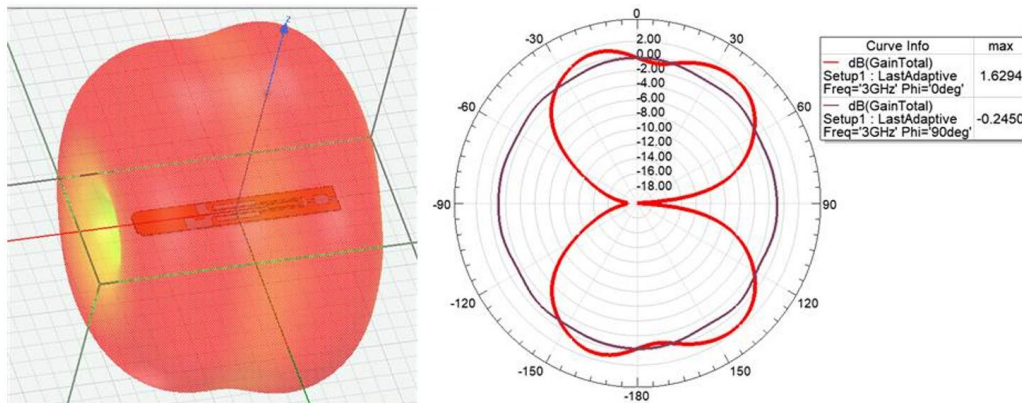
2.5 ГГц:



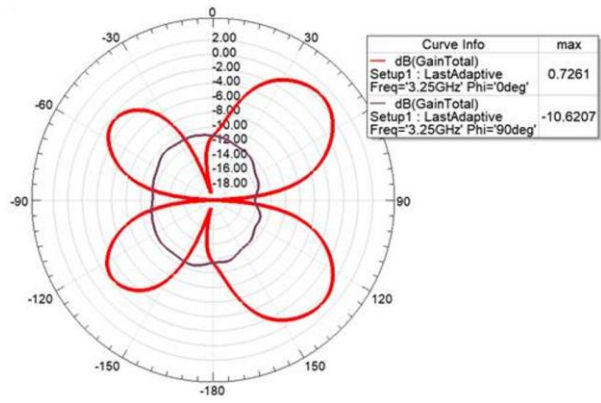
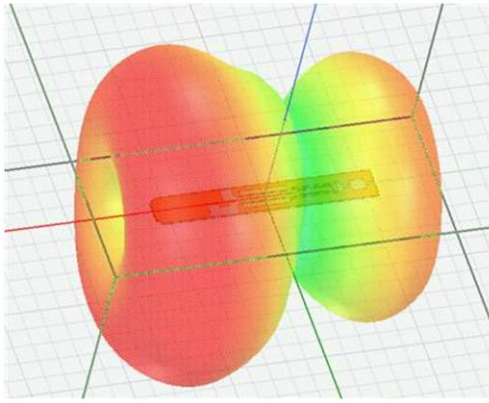
2.75 ГГц:



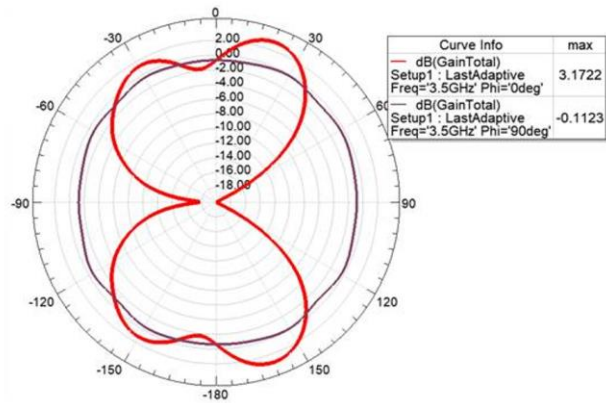
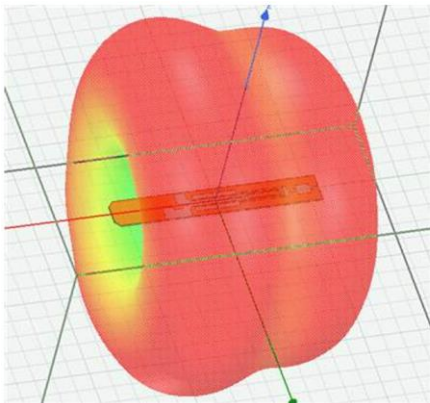
3 ГГц:



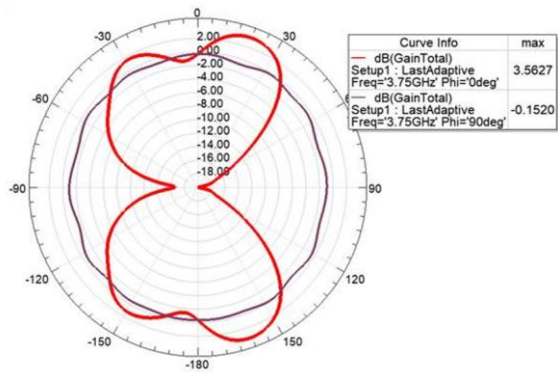
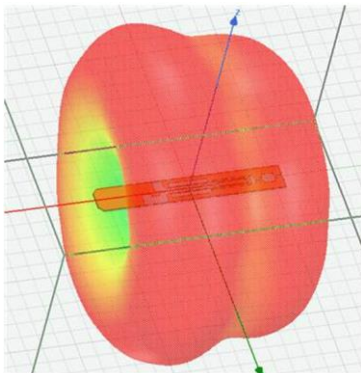
3.25 ГГц:



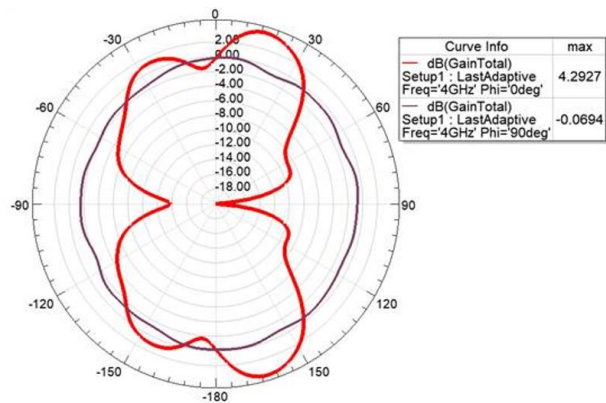
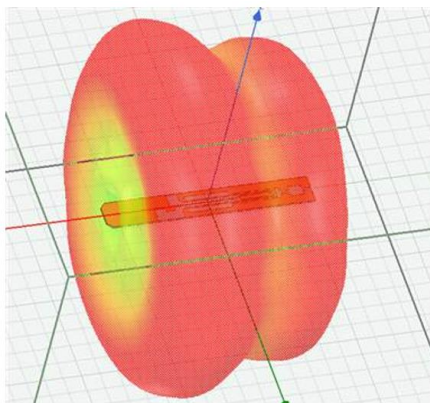
3.5 ГГц:



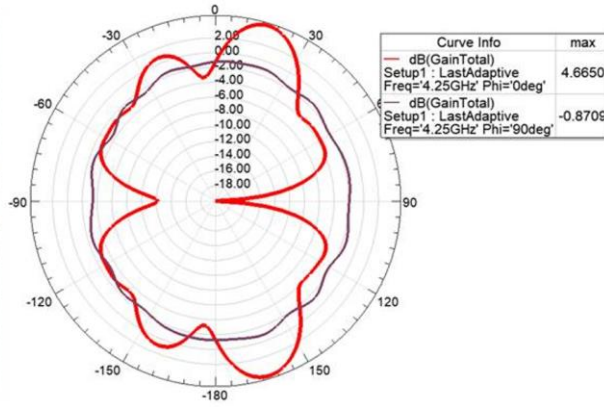
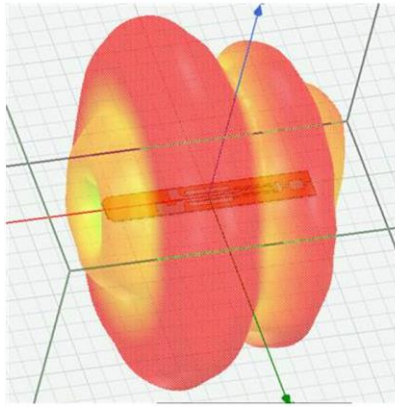
3.75 ГГц:



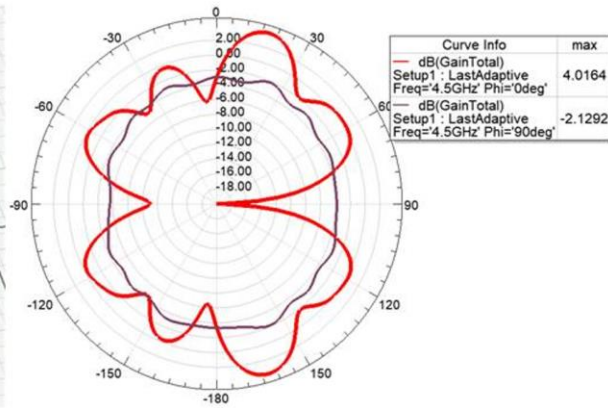
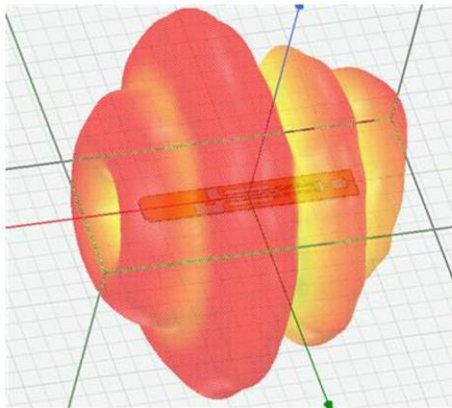
4 ГГц:



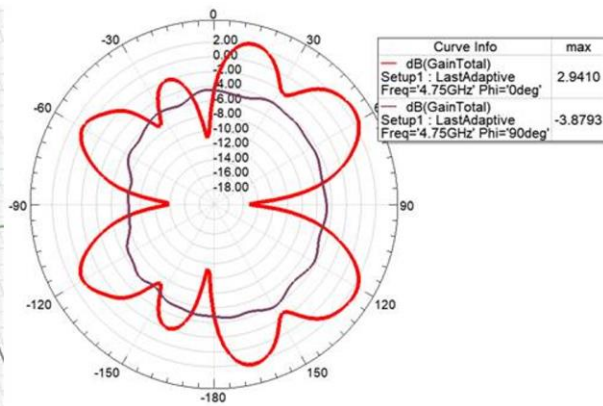
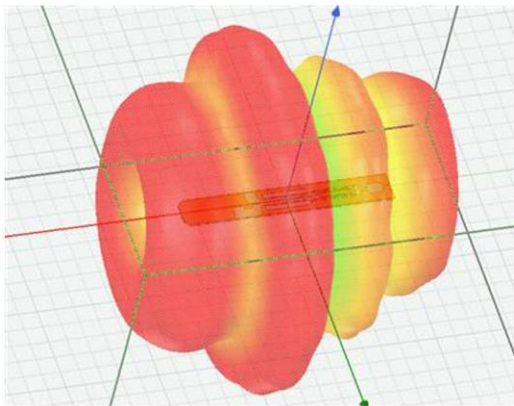
4.25 ГГц:



4.5 ГГц:



4.75 ГГц:



5 ГГц:

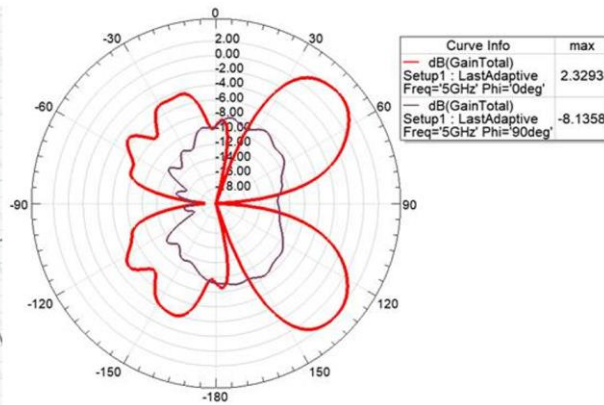
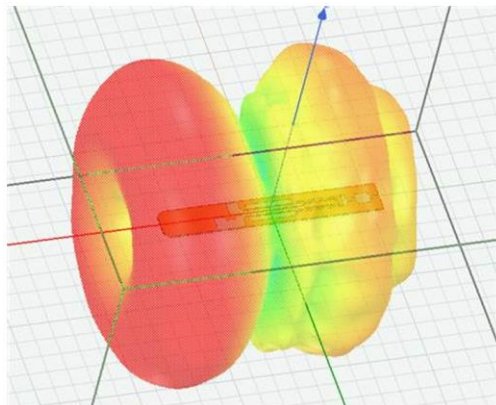


Рис. 11. Эволюция диаграммы направленности антенны, полученной при обратном проектировании, в частотном диапазоне от 2500 до 5000 МГц.

Анализ рис. 11 показывает, что диаграммы направленности рассматриваемой антенны достаточно симметричны в азимутальной плоскости во всем диапазоне частот. При этом их форма, в вертикальной плоскости сильно меняется в зависимости от частоты. Отметим также большую вариабельность от частоты эффективности излучения и коэффициентов усиления по направлению в обеих плоскостях. Так, например, в азимутальной плоскости средний коэффициент усиления в диапазоне частот 2,5-5.0 ГГц меняется в пределах от -10 до $+2$ дБ. При этом на отдельных частотах и углах в вертикальной плоскости достигаются значения вплоть до 4,5 дБ. Значение усиления 8 дБ в рассматриваемом диапазоне частот не было зафиксировано, даже в качестве максимального ни на одной из частот.

Заключение

1) В работе рассмотрена задача обратного проектирования проектирование сверхширокополосных печатных антенн на основе использования пакетов электродинамического моделирования. Предложена схема такого проектирования и осуществлена ее реализации на примере антенны «Omni Antenna Model AZ7795G» с целью проверки и подтверждения заявляемых производителем параметров, а также оценки параметров, отсутствующих в данных по антенне, предоставляемых производителем.

2) Обратное проектирование в основном подтвердило рабочий частотный диапазон рассматриваемой антенны, заявленный как диапазон частот 600-6000 МГц, в котором наблюдается приемлемое согласование антенны ($K_{СВ} < 2,5-3,0$). Расчетные данные имеют хорошее соответствие с экспериментальными, полученными для образца реальной антенны.

3) Это послужило в дальнейшем серьезным аргументом в пользу правильности результатов, получаемых при обратном проектировании и его применения к оценке характеристик антенны отсутствующих в материалах производителя.

4) Обратное проектирование антенной системы позволило расчетным путем определить значения характеристик, которые отсутствовали в данных производителя. В первую очередь это относится к диаграммам направленности антенн и их эволюции в рабочем частотном диапазоне.

5) Эти расчеты показывают, что характеристики направленности антенны в рассмотренном диапазоне частот слабо коррелируют с данными производителя, что свидетельствует, как минимум об отличии понимания коэффициента направленности у производителя от канонического технического определения (Таблица 3).

6) Полученные результаты показывают, что обратное проектирование антенн может быть эффективно использовано при выборе и разработке печатных антенн с требуемыми характеристиками.

Таблица 3. Сравнение характеристик заявленной, реальной и численно промоделированной антенн.

Параметр	Заявленный	Результаты численного моделирования	Реальный
Диапазон частот (ГГц)	0.6-6	0.665-6.5	0.6-6
КСВ	2	<3	<3
Коэффициент усиления, дБ, Максимальный	8	4.665	–

Литература

1. Jebbawi K., Egels M., Pannier P. Triple-Band Printed Dipole Antenna for RFID/GPS/BLE Applications. // Progress In Electromagnetics Research M, 2018, 70, pp.11 - 20. fahal02485577. <http://doi.org/102528/PIERM18050203>.
2. Peng C.-M., Chen I.-F., Liu C.-H. Multiband Printed Asymmetric Dipole Antenna for LTE/WLAN Applications // Advances in Low-Profile Antennas in Wireless Communications. 2013. <https://doi.org/10.1155/2013/704847>.
3. Банков С.Е. Курушин А.А. Разевиг В.Д. Анализ и оптимизация СВЧ структур с помощью HFSS. М.: 2012.

4. Wang Y., Zhang X., Su R., Chen M., Shen C., Xu, X., He R. 2018. 3D Printed Antennas for 5G Communication: Current Progress and Future Challenges // Chinese Journal of Mechanical Engineering: Additive Manufacturing Frontiers 2, (2023)100065. <https://doi.org/10.1016/j.cjmeam.2023.100065>.
5. Смит Х. Полное руководство по антеннам на печатной плате. Конструкция типы и применение. PCBasic.com. 2018.
6. Liu Z, Zhao Z, Yu X., Liu M., Ji R. A novel reverse design method of tag antenna based on image analysis. // J. of Algorithms & Computational Technology. 2020. V. 14. P. 1–11. <https://doi.org/10.1177/1748302620906969>.
7. Chen S., Sun G.-H., Wang K. Inverse Design of Microstrip Antennas Based on Deep Learning. // Electronics, 2025. V. 14. P. 2510-2522. <https://doi.org/10.3390/electronics14132510>.
8. Abaidi I., Belaidi E., Boutte A., H. Bentoutou H. /Reverse engineering for the manufacture of a deployment mechanism of Nanosatellite UHF/VHF antennas. // ICME23. First International Congress on Mechanical Engineering. Constantine. ALGERIA November 15 – 16. 2023. P. 1-6.

Для цитирования:

Дмитриев А.С., Калинин В.А., Уваров А.В., Федоров Е.В., Якутин Ф.Д. Восстановление реальных характеристик образцов широкополосных антенн путем обратного проектирования. // Журнал радиоэлектроники. – 2026. – №. 3. <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2026.3.2>