

Восстановление характеристик широкополосных антенн для систем связи 5G путем обратного проектирования

А.С. Дмитриев¹, В.В. Ицков², В.А. Лазарев³, А.В. Уваров⁴, Ф.Д. Якутин⁵

^{1,2,3,4,5}Институт радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН
125009, Москва, ул. Моховая, 11-7

¹E-mail: alexandrdm@bk.ru

²E-mail: itskov@phystech.edu

³Email: dilvishya@gmail.ru

⁴E-mail: uvarov8@gmail.com

⁵E-mail: yakutin@gmail.com

В докладе рассматривается задача восстановления характеристик образцов антенн субгигагерцового и гигагерцового частотного диапазона, 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. Ключевые слова: излучение радиоволн, планарные антенны, сверхширокополосный диапазон частот, динамический хаос.

Reverse engineering to restore the performance of broadband antennas for 5G communication systems

A.S. Dmitriev, E.V. Efremova, V.V. Itskov, V.A. Lazarev, A.V. Uvarov, F.L. Yakunin

Kotelnikov Institute of Radioengineering and Electronics of RAS

This paper examines the problem of reconstructing the characteristics of sub-GHz and GHz antenna samples based on reverse engineering using electromagnetic modeling packages. The process implemented includes analysis of the manufacturer's source data, construction and tuning of an electromagnetic model, its verification using available experimental data, and subsequent full simulation. The approach is demonstrated using a planar antenna with a declared operating range of 0.6–6.0 GHz. It is shown that the resulting frequency dependences of VSWR <2.5–3.0 agree well with experimental measurements, confirming the validity of the constructed model.

Keywords: radio wave radiation, planar antennas, ultra-wideband frequency range, dynamic chaos.

Введение

В настоящее время на рынке присутствует большое количество разнообразных антенн субгигагерцового и гигагерцового диапазонов различных производителей [1–4]. Выбор антенны 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.

Постановка задачи

В данной работе в качестве подхода к решению этой задачи рассматривается обратное проектирование антенны [6-9] 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.
6. 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.

Антенна – объект обратного проектирования

В качестве модельного объекта для определения характеристик путем обратного проектирования было выбрана, представленная на рынке, всенаправленная в азимутальной плоскости антенна «KX-PCB-5G», которая позиционируется как антенна для систем связи 5G в диапазоне частот 600 – 6000 МГц. Внешний вид антенны представлен на рис. 1. Собственно электродинамическая структура антенны выполнена на двухсторонней металлизированной плате материала типа FR-4 толщиной 0,9 мм (рис. 1). Топология антенны, используемая при моделировании показана на рис. 2.



Рис. 1. Внешний вид антенны

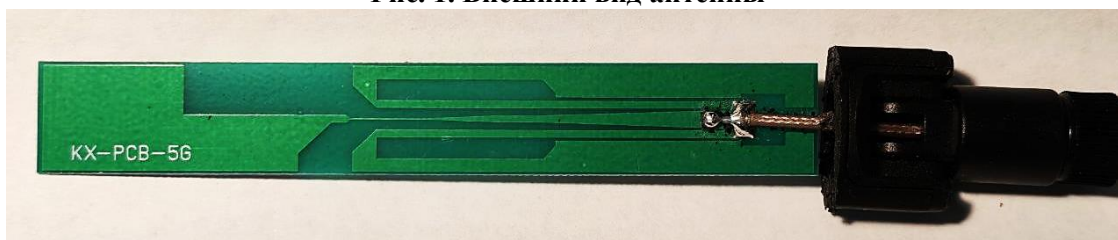


Рис. 2. Печатная антенна KX-PCB-5G без корпуса

Производитель декларирует следующие характеристики антенны KX-PCB-5G, см. Таблицу 1.

Таблица 1. Таблица параметров, заявленных производителем

Частотный диапазон	600 – 6000 МГц
Коэффициент усиления	до 8 дБ
КСВ (VSWR)	2
Геометрические размеры	0,9 × 15 × 104 мм
Поляризация	Вертикальная
Материал корпуса	ABS

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

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} , КСВН и импеданса от частоты.

Наша первая задача: создать электродинамическую модель антенны, пригодную для работы в средствах электродинамического моделирования (СЭМ) типа HFSS [5]. Основу решения трехмерных и двумерных задач электродинамики в HFSS составляет метод конечных элементов (МКЭ).

Для получения модели в СЭМ был разобран корпус образца антенны, изучены и измерены элементы топологии печатной антенны (рис. 2) и конфигурация фидерного тракта. После чего графическими средствами пакета была подготовлена топология макета с соответствующими размерами (рис. 3).

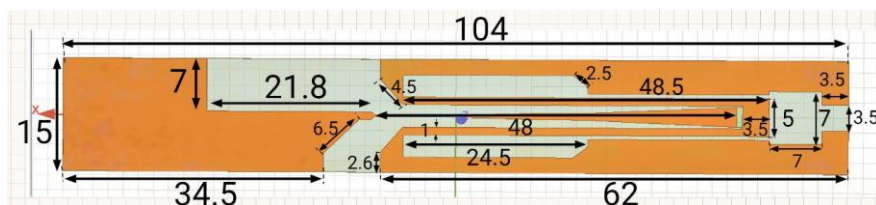


Рис. 3. Топология печатной антенны с характерными размерами

Апробация, настройка и верификация модели

Были произведены расчеты зависимости КСВН от частоты для модели антенны и произведено их сравнение с характеристиками реальной антенной. Оно показало

качественное сходство двух этих кривых, за исключением значений в нижней части полосы частот.

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

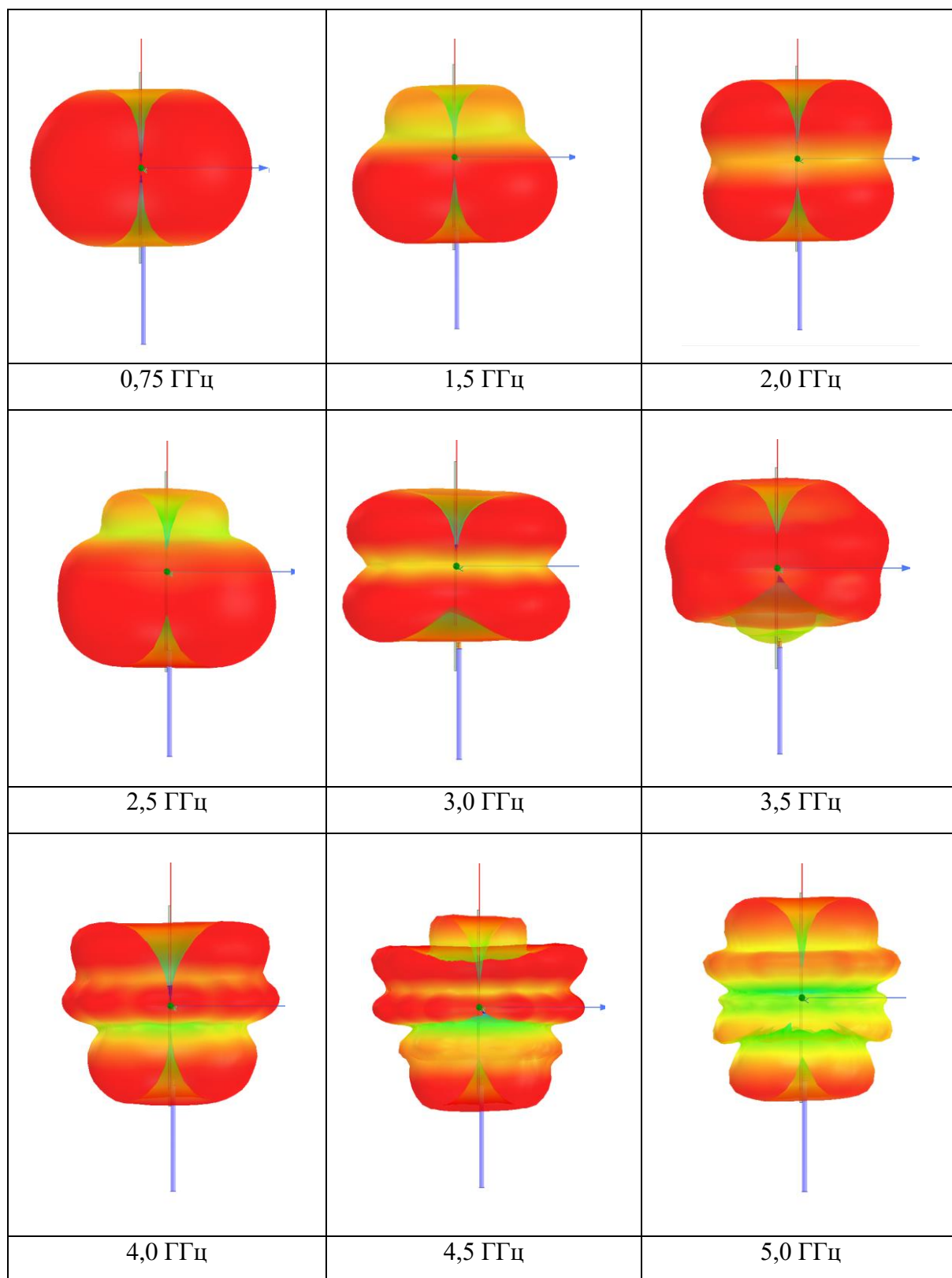


Рис. 4. Эволюция диаграммы направленности антенны, полученной при обратном проектировании

Анализ рис. 4. показывает, что диаграммы направленности 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 антенны в диапазоне частот 0.75 – 5.0 ГГц меняется: без кабеля в пределах -4.6 дБи до +6.3 дБи, с кабелем от 2.3 дБи до +6.3 дБи.

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 «КХ-PCB-5G» 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 ($K_{CB} < 2,5 - 3,0$). 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 2).

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

Таблица 2. 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
KCB	2	<3	<3
Коэффициент усиления, дБ, максимальный	8	6.3	-

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
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. Wang Y., Zhang X., Su R., Chen M., Shen C., Xu, X., 2018He R. 3D Printed Antennas for 5G Communication: Current Progress and Future Challenges // Chinese Journal of Mechanical Engineering: Additive Manufacturing Frontiers 2, (2023)100065.
4. Смит Х. Полное руководство по антеннам на печатной плате. Конструкция типы и применение. PCBasic.com. 2018.
5. Банков С.Е. Курушин А.А. Разевиг В.Д. Анализ и оптимизация СВЧ структур с помощью HFSS. М.: 2012.
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. DOI: 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.
9. А.С. Дмитриев, В. А. Калинин, А.В. Уваров, Е.В. Федоров, Ф.Д. Якутин. Восстановление характеристик образцов широкополосных печатных антенн через обратное проектирование // Журнал радиоэлектроники. 2026. №3.