

УДК 53.097

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ВОЗДЕЙСТВИЯ СВЧ ИЗЛУЧЕНИЯ ПЕРСПЕКТИВНОГО ДИАПАЗОНА 5G (3,4-3,8 ГГц) НА ТКАНИ ЧЕЛОВЕКА

М.В. БРИЛЕВСКАЯ, И.И. КУДРЕНОК, В.А. ШУТОВИЧ, М.В. ДАВЫДОВ

*Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники  
(г. Минск, Республика Беларусь)*

**Аннотация.** Рассматривается моделирование воздействия СВЧ излучения на имитаторы тканей человека в среде CST Studio Suite. В рамках данного исследования получены коэффициенты отражения, поглощения и прохождения через имитатор сухой кожи человека электромагнитными волнами частотой 3,4-3,8 ГГц.

**Ключевые слова:** СВЧ, излучение, LTE, 5G, КСВ, коэффициенты S11 и S21, ЭМИ, имитатор биоткани.

## SIMULATION OF THE IMPACT OF 5G (3.4-3.8 GHz) MICROWAVE RADIATION ON HUMAN TISSUE

MILENA V. BRILEVSKAYA, ILYA I. KUDRENOK, VIKTOR A. SHUTOVICH,  
MAXIM V. DAVYDOV

*Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics (Minsk, Republic of Belarus)*

**Abstract.** The simulation of the effect of microwave radiation on human tissue simulators in the CST Studio Suite environment is considered. Within the framework of this study, the coefficients of reflection, absorption and transmission through a simulator of dry human skin by electromagnetic waves with a frequency of 3.4-3.8 GHz were obtained.

**Keywords.** Microwave, radiation, LTE, 5G, SWR, coefficient S11 and S21, EMR, biological tissue simulator.

### Введение

Количество IoT (множество физических объектов, подключенных к интернету и обменивающихся данными) из года в год растет высокими темпами. Например, глобальный рынок устройств умного дома в 2021 году вырос на 11,7 % в сравнении с 2020 годом и составил 895 млн устройств [1]. Нужно учесть, что многие из этих девайсов подключаются к всемирной сети Интернет. В связи с этим начала актуализироваться проблема пропускной способности: в рамках использующихся технологий (3G, 4G, Wi-Fi) постоянно возрастающий объем информации становится затруднительно передавать. Внедрение нового поколения мобильной связи 5G может решить данную проблему. Сравнивая его с текущим поколением сети 4G, можно выделить следующие преимущества:

- более высокая скорость передачи данных;
- низкая задержка сигнала;
- возможность подключения большего числа девайсов;
- высокая энергоэффективность;
- многократно возросшая пропускная способность;
- высокая мобильность пользователей [2].

Технология 5G будет использовать для передачи информации электромагнитные волны как с уже используемой длиной (в рамках технологии LTE), так и с меньшей, что означает меньшую дальность ее распространения [3]. А это влечет за собой увеличение количества ретрансляционных вышек и приводит к еще более плотному окружению электромагнитным излучением (ЭМИ). Формально в рамках 5G NR выделяется два диапазона: Frequency Range 1 (традиционные частоты до 6 ГГц) и Frequency Range 2 (с частотами выше 24 ГГц) [2]. На

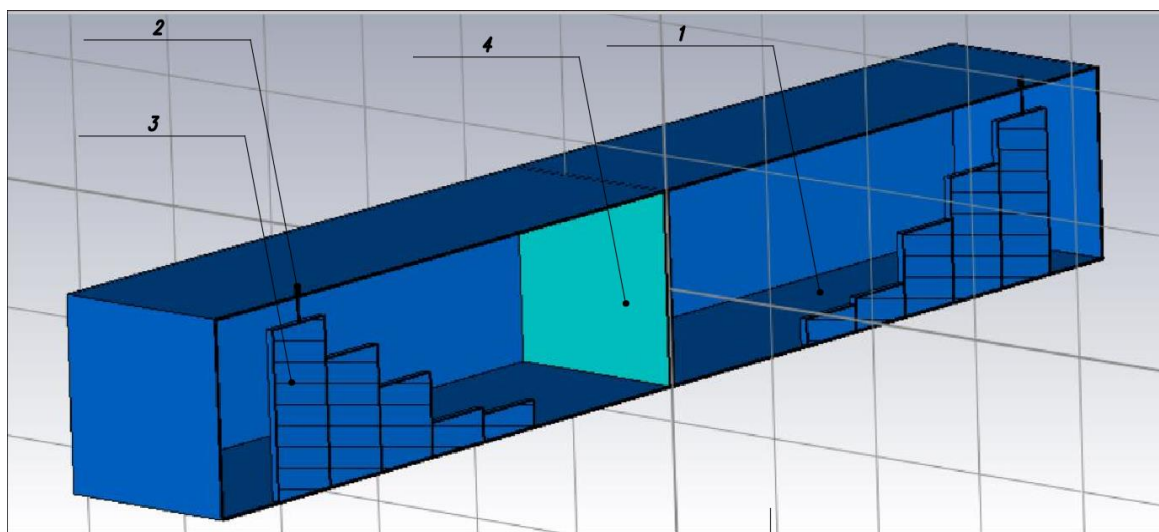
начальном этапе планируется использование миллиметрового диапазона ( $f > 24$  ГГц) в только местах активного потребления (бизнес-центры, научные кластеры, высокотехнологичные производства), в остальных – FR1. Необходимо оценить потенциальное влияние от этого типа волн. В данной статье описывается моделирование воздействия ЭМИ на ткани человека частотами, принадлежащими к более распространенному диапазону до 6 ГГц.

### Методика проведения эксперимента

Выполняя анализ спектра ЭМИ, стоит учитывать, что не весь диапазон FR1 будет использоваться для развёртывания сети 5G: в разных странах выделяются свои диапазоны. В Европе и США планируется использовать диапазон 3,4-3,8 ГГц, и наиболее серьёзные разработчики технологий ориентируются именно на него. С другой стороны, Восток — Япония и Китай — планируют использовать 4,4-4,99 ГГц [2]. В России диапазон 3,4-3,8 ГГц занят военными и спецслужбами, поэтому утвержден другой — 4,7-4,9 ГГц для сети 5G [4]. Выбраны для исследований частоты 3,4-3,8 ГГц как наиболее распространенные.

Для оценки взаимодействия ЭМИ с биотканями было проведено моделирование по данной методике [5]. Воздействие ЭМИ на ткани человека можно повести в ПО CST Studio Suite, которое специализируется в анализе и оптимизации электромагнитных компонентов и систем. Модель представлена на рис. 1.

Основа данной модели – прямоугольный волновод. От его поперечных размеров зависит частотный диапазон. Так как вдоль волновода не может распространяться волна с длиной превышающей  $\lambda_{кр}$ .  $\lambda_{кр} = 2a$ , где  $a$  – ширина волновода. Также существуют стандартизированные размеры волноводов [6]. Для выбранных частот 3,4-3,8 ГГц подходит образец с размерами 72 мм \* 34 мм. При передаче по нему практически отсутствуют потери, поэтому длина может быть произвольной. Внутри него, на все поперечное сечение помещается имитатор биоткани для избегания эффекта огибания тканей электромагнитными волнами.



**Рис. 1.** Модель для исследования воздействия ЭМИ на имитатор ткани; 1.1 – волновод; 1.2 – коаксиальный кабель; 1.3 – согласующий трансформатор; 1.4 – имитатор биоткани

Источником и приемником электромагнитного излучения определены коаксиальные кабели, соединяющиеся с волноводом, у которых различные сопротивления, влияющие на коэффициент стоячей волны (КСВ). При прохождении волн от коаксиального кабеля на волновод и обратно могут происходить отражения, которые ведут к появлению волн с разной амплитудой, а это снижает эффективность установки, и приводит к искажениям в результатах. Для того, чтобы минимизировать данный негативный эффект используется коаксиально-волновой переход (КВП) или же элемент, который согласует сопротивление коаксиального кабеля и сопротивление волновода [7]. Для широкополосного согласования применяются

ступенчатые переходы, представляющие собой каскадное соединение четвертьволновых трансформаторов (ступенек) с разными волновыми сопротивлениями.

В данной модели использован переход, в котором скачки сопротивлений (зависят от высоты ступенек) изменяются пропорционально полиномам Чебышёва (характеристика имеет большую крутизну по сравнению с другими вариантами).

В середину волновода помещается имитатор биоткани, который занимает все поперечное сечение волновода. Затем создается материал имитатора сухой кожи человека: задаются значения диэлектрической постоянной (42,87) и электрической проводимости (2,64), которые у тканей сильно разнятся, при этом они зависят от частоты [8]. Сухая кожа выбрана как внешняя оболочка человека, на нее в первую очередь воздействуют волны. Далее проводится моделирование с образцами толщиной 0,5, 1, 2, 3, 4, 5 мм.

По результатам моделирования получаются графики параметров  $S_{11}$  (отражения излучения от имитатора) (рис. 2),  $S_{21}$  (прохождения излучения через имитатор) (рис. 3), а также графики параметров  $S_{22}$  и  $S_{12}$ , когда входной и выходной порты меняют местами. На основе этих параметров вычисляется величина параметра поглощения ЭМИ имитатором (рис. 4). Зачастую графики  $S_{12}$  и  $S_{21}$ , а также  $S_{11}$  и  $S_{22}$  попарно идентичны, в случае симметричности модели.

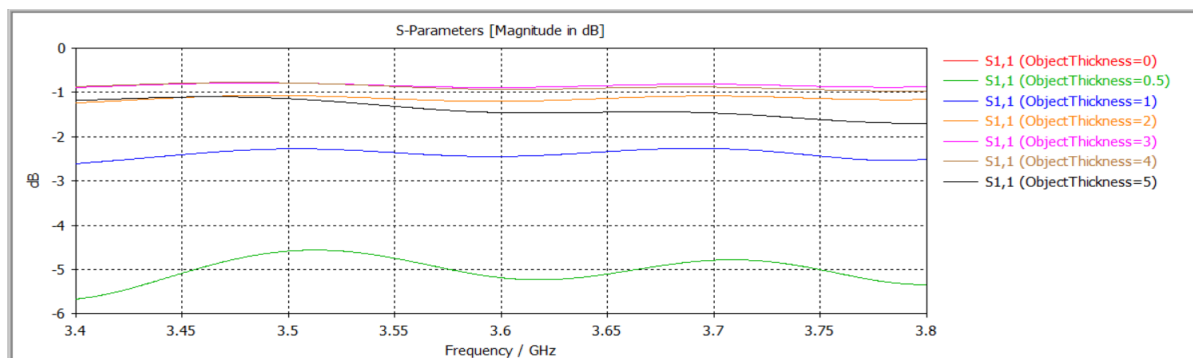


Рис. 2. Параметр  $S_{11}$  имитатора сухой кожи на частотах 3.4–3,8 ГГц

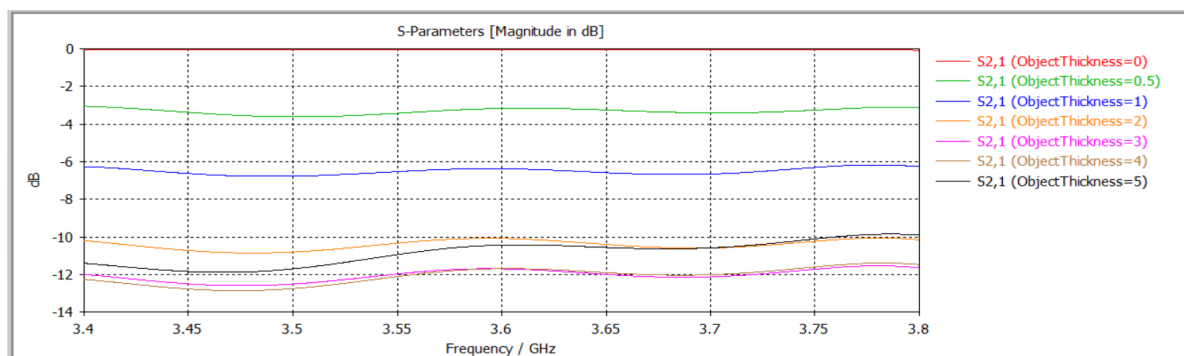


Рис. 3. Параметр  $S_{21}$  имитатора сухой кожи на частотах 3.4–3,8 ГГц

Параметр  $S_{21}$  для объекта с нулевой толщиной (представлен на рисунке 2) практически не отклоняется от нулевой отметки и составляет сотые доли дБ в зависимости от частоты, что является отличным результатом. Это говорит об низком отражении ЭМИ от самой модели.

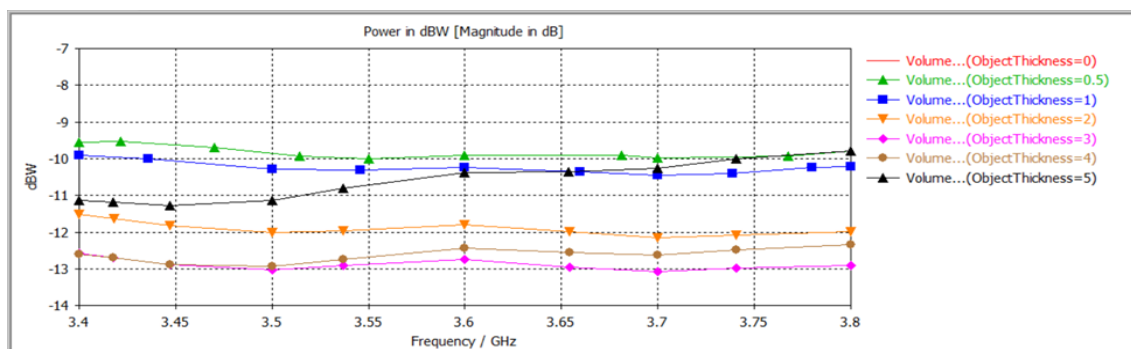


Рис. 4. Параметр поглощения ЭМИ имитатором сухой кожи на частотах 3.4-3,8 ГГц

### Результаты и их обсуждение

Проведя анализ графиков, можно выявить некоторые тренды:

1) Начиная с толщины 0,5 мм (-5 дБ) параметр S11 увеличивается до -0,8 дБ у образца с толщиной 3 мм, затем снижается до -1,5 дБ у объекта с толщиной 5 мм. Графики у тканей с толщинами 4 мм и 5 мм одинаковы.

2) Показатель S21 обратную тенденцию. Сначала прохождение ухудшается с -3,2 дБ у ткани с толщиной 0,5 мм до -12 дБ у тканей с толщинами 3 и 4 мм, затем наблюдается улучшение до -10,8 дБ у 5 мм объекта. На частотах выше 3,6 ГГц графики у 2 мм и 5 мм совпадают.

3) Рассеивание энергии в ткани сначала падает с -9,8 дБ у 0,5 мм образца до -12,9 дБ у 3 мм, потом растет до -10,5 дБ у 5 мм. Наблюдается еще одна интересная особенность: график ткани с толщиной 5 мм растет с увеличением частоты с -11,2 дБ до -9,8 дБ.

Более подробные численные данные представлены в табл. 1.

Таблица 1. Результаты моделирования воздействия ЭМИ на имитатор сухой кожи

Частотный диапазон, ГГц	Толщина имитатора, мм	Сухая кожа, усредненный показатель по частоте		
		S11	S21	W
3,4-3,8	0,5	-5,0	-3,2	-9,8
	1	-2,4	-6,5	-10,3
	2	-1,1	-10,4	-11,9
	3	-0,8	-12,0	-12,9
	4	-1,5	-12,0	-12,6
	5	-1,5	-10,8	-10,5

### Заключение

Моделирование по данной методике позволило выяснить характер взаимодействия СВЧ излучения с имитаторами, близкими по параметрам с различными биотканями. Она позволяет в короткие сроки получить параметры S11, S21, поглощения высокой достоверности без трудоемкого процесса изготовления волноводной установки и проведения опытов на реальных объектах, но в то же время модель максимально близко по своему составу соответствует им.

По результатам моделирования можно сделать следующие выводы: 1) в общем случае повышения толщины приводит к росту коэффициента отражения, но в то же время лучший показатель -0,8 дБ был получен у имитатора 3 мм; 2) ожидаемый эффект от увеличения толщины - коэффициент проождения снижается, минимум получен у той же толщины 3 мм и составляет -12 дБ; 3) наименьшие различия зафиксированы в показателе поглощения (3 дБ, например, у S21 это 8,8 дБ), здесь самый высокий показатель у кожи толщиной 0,5 мм (-9,8 дБ), а самый низкий у образа толщиной 3 мм (-12,9 дБ).

Данная особенность (максимумы и минимумы коэффициентов у имитатора толщиной 3 мм) требует дополнительных исследований для формирования убедительного объяснения.

### Список литературы

1. Мировой рынок устройств для умного дома в 2021 году вырос на 11,7 % благодаря развитию интернета [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://3dnews.ru/1064678/mirovoy-rinok-ustroystv-dlya-umnogo-doma-v-2021-godu-viros-na-117-blagodarya-razvitiyu-shirokopolosnogo-interneta/>. – Дата доступа: 12.10.2022.
2. 5G: как работает технология и зачем нам это нужно [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://rb.ru/longread/what-is-5G/>. – Дата доступа: 10.10.2022.
3. В чем разница между 4G и 5G? [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://habr.com/ru/post/439136/>. – Дата доступа: 10.10.2022.
4. Диапазон нашёлся: 5G в России будет работать на частотах 4,7–4,9 ГГц [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://3dnews.ru/1023056/diapazon-nashyolsya-5g-v-rossii-budet-rabotat-na-chastotah-4749-ggts>. – Дата доступа: 12.10.2022.
5. Шутович, В. А. Методика проведения моделирования воздействия СВЧ излучения на ткани человека / В. А. Шутович // Электронные системы и технологии [Электронный ресурс] : сборник материалов 58-й научной конференции аспирантов, магистрантов и студентов БГУИР, Минск, 18-22 апреля 2022 г. / Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники ; редкол.: Д. В. Лихаческий [и др.]. – Минск, 2022. – С. 513–515. – Режим доступа : <https://libeloc.bsuir.by/handle/123456789/46926>. – Дата доступа: 10.10.2022.
6. Трубы прямоугольные и n-образные высокой точности и чистоты поверхности из алюминия и алюминиевых сплавов для волноводов: ГОСТ Р 55774- 2013. – Введ. 22.11.2013 – Москва: Всероссийский институт легких сплавов, 2013г., 15с.
7. Согласующие трансформаторы [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://studfile.net/preview/4574718/page:22/>. – Дата доступа: 11.10.2022.
8. С.Gabriel, S.Gabriel: Compilation of the Dielectric Properties of Body Tissues at RF and Microwave Frequencies, Internet document. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://apps.dtic.mil/dtic/tr/fulltext/u2/a305826.pdf> Дата доступа: 12.10.2022.