

УДК 621.396.676.2  
EDN: RCCYNK

## Исследование усечения сферой электродинамической модели «корпус автомобиля – низкопрофильная антенна»

Лянгузов Д. А.

Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича,  
Санкт-Петербург, 193232, Российская Федерация

**Постановка задачи.** Для анализа электродинамических моделей и синтеза низкопрофильных антенн возникает необходимость в серии однотипных вычислений электрических характеристик антенн. В данной работе предлагается подход, основанный на модификации электродинамической модели с целью повышения скорости вычислений. Задачей является исследование усечения электродинамической модели «корпус автомобиля – низкопрофильная антенна» сферой. **Цель работы:** сформулировать правила усечения электродинамических моделей для повышения скорости вычислений с незначительными потерями в точности расчетов (до 10 %). **Используемые методы:** в качестве численного метода электродинамики использован метод конечных элементов с тетраэдральной формой ячеек; для пересчета токов из ближней зоны в дальнюю выбран метод Стреттона – Чу. **Новизна работы** заключается в подходе к анализу электродинамических моделей в виде усечения сферой. **Результат:** разработаны практические рекомендации по обоснованному преобразованию электродинамической модели для повышения скорости вычислений с приемлемой точностью расчетов. **Практическая значимость:** представленные результаты работы позволяют значительно сократить время вычислений электрических характеристик антенны и анализировать сложные электродинамические модели на персональном компьютере, снижая требования к вычислительному ресурсу при решении итерационных задач.

**Ключевые слова:** антенна, электродинамическая модель, усечение, сфера, рекомендации

### Введение

В практических задачах конструкционного синтеза антенн важное место занимает этап определения электрических характеристик антенны. При разработке крышевых антенн следует учитывать влияние корпуса объекта, на который установлена антенна. Для анализа электродинамических моделей «антенна – подвижный объект» с помощью численных методов (в данном случае рассмотрим метод конечных элементов как наиболее точный для представления произвольных структур сложной формы) требуется значительный вычислительный ресурс. Так, в таблице 1 представлены результаты сравнительного анализа количества конечных элементов для фургона и легкового автомобиля, внешний вид моделей приведен в таблице 2. Анализируется электродинамическая модель низкопрофильной широкополосной антенны с рабочим диапазоном частот 27–520 МГц, и круговой диаграммой направленности (ДН) [1, 2].

В рамках исследования был проведен анализ современных научных публикаций на тему конструкционного синтеза низкопрофильных антенн. В статье [3] авторами разработана низкопрофильная самолетная антенна, в конструкции которой применены излучатель сложной формы и группы шунтов

#### Библиографическая ссылка на статью:

Лянгузов Д. А. Исследование усечения сферой электродинамической модели «корпус автомобиля – низкопрофильная антенна» // Вестник СПбГУТ. 2025. Т. 3. № 1. С. 3. EDN: RCCYNK

#### Reference for citation:

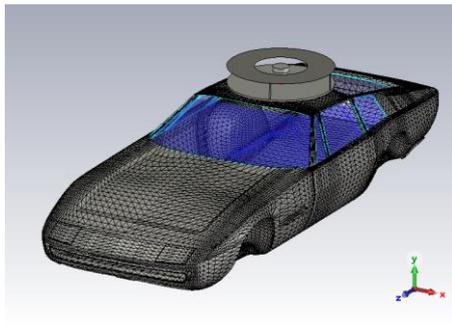
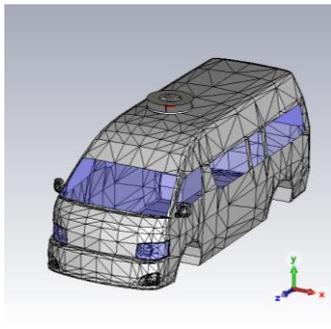
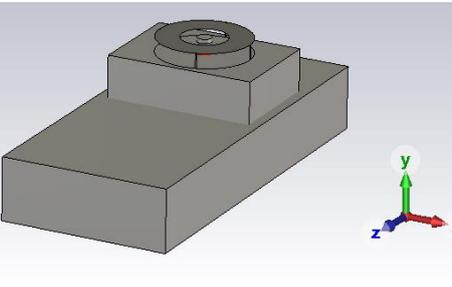
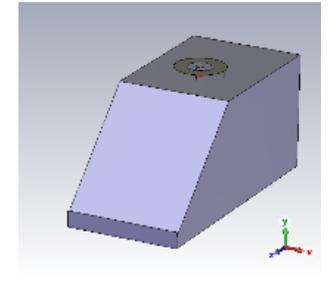
Lyanguzov D. Study of Sphere Truncation of the Electrodynamics Model “Car Body – Low-Profile Antenna” // Herald of SPbSUT. 2025. Vol. 3. Iss. 1. P. 3. EDN: RCCYNK

(по 2 и 8 единиц). В работе [4] широкополосность достигается благодаря вырезам в металлической части антенны, что позволяет изменить поверхностное распределение токов на определенных частотах. Авторы работ [5, 6] использовали интегрированный в подложку волновод и емкостную нагрузку плеч антенны на распределенные элементы. В статье [7] бортовая антенна разработана с учетом расположения над металлическим экраном; в работе [8] описан метод модификации конечно-элементной сетки. Приемы снижения размерности модели без значительной потери точности для повышения вычислительной эффективности описаны в [9]: авторами достигнуто уменьшение вычислительной сложности задачи в 4 раза с понижением точности на 5 %. В работе [10] анализируемая структура представлена в виде эквивалентной схемы; проведен сравнительный анализ с полной моделью.

Таблица 1. Количество конечных элементов в электродинамических моделях автомобилей

Тип кузова	Количество конечных тетраэдральных элементов
Фургон (полная модель)	23 328 864
Фургон (упрощенная модель)	73 174
Легковой автомобиль (полная модель)	38 895 024
Легковой автомобиль (упрощенная модель)	4 145 544
Идеально проводящая плоскость	123 648

Таблица 2. Внешний вид полных и упрощенных моделей автомобилей

	Легковой автомобиль	Фургон
Полная модель		
Используемые материалы корпуса	Стекло, алюминий	Стекло, сталь
Упрощенная модель		
Используемые материалы корпуса	Идеально проводящий материал (ПЕС, аббр. от англ. Perfect Electronic Conductor)	

Во всех рассмотренных работах влияние корпуса подвижного объекта, на который установлена антенна, не учитывается. Временные затраты на расчет не описываются, электрические характеристики определяются для полной модели антенны, повторить и воспроизвести результаты в рамках одиночного исследования затруднительно.

В данной работе предлагается вариант определения электрических характеристик антенн с учетом влияния корпуса подвижного объекта, отличающийся от классического снижением вычислительных затрат, особенно для задачи итерационного синтеза излучателя.

### Результаты анализа электродинамической модели

В задачах синтеза антенн объем вычислений обусловлен необходимостью многократного определения электрических характеристик антенны. Учитывая современные условия производства со сжатыми сроками, процесс разработки готового изделия может занимать до нескольких месяцев. Анализ полной модели на современном персональном компьютере с процессором AMD Ryzen 9 7900X 12-Core Processor и объемом оперативной памяти 64 Гб может занимать несколько часов. Опираясь на результаты успешного конструкционного синтеза антенн, необходимо осуществить около 200 итераций для определения квазиоптимального решения задачи (на это потребуется около 250 ч.) [11, 12]. В качестве способа снижения временных затрат на расчеты выполним усечение модели сферой, центр которой совпадает с геометрическим центром антенны (рисунок 1).

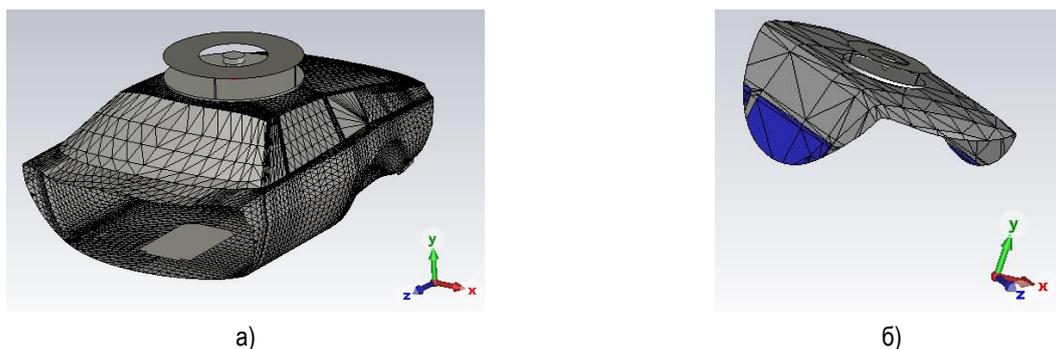


Рис. 1. Внешний вид усеченных моделей легкового автомобиля (а) и фургона (б)

При усечении сферой количество конечных элементов в полных точных моделях сокращается в 6 раз для фургона и в 1,5 раза для легкового автомобиля. Разница в размере моделей обусловлена формой: кабина легкового автомобиля, на которой установлена антенна, обладает более сложной формой по сравнению с остальным кузовом. У фургона, напротив, весь кузов однородной формы. По сравнению с полной упрощенной моделью, усеченная модель более точно описывает полную точную модель автомобиля, в особенности неоднородности корпуса и различия в материалах кузова, попадающие в ближнюю зону антенны. На диаграмме представлен сравнительный анализ размерности полных и усеченных моделей по количеству элементарных ячеек (рисунок 2).

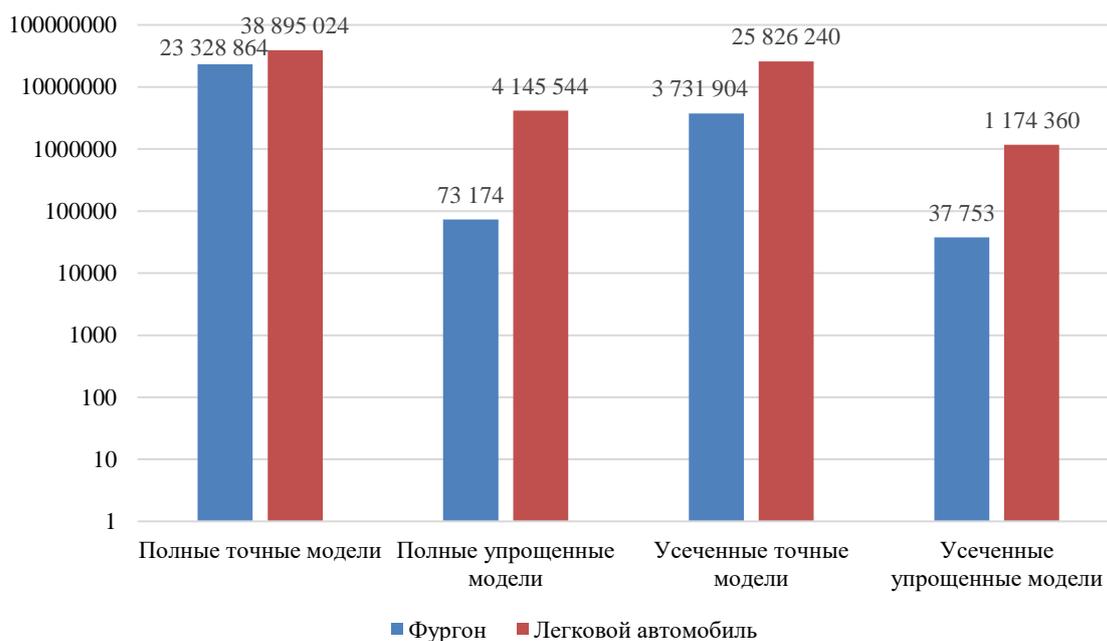


Рис. 2. Размерность моделей фургона и легкового автомобиля

Сравним результаты вычисления электрических характеристик антенн методом конечных элементов для полной и усеченной моделей при условии, что структура антенны не оптимизирована под данный тип кузова (таблица 3).

Таблица 3. Результаты вычисления электрических характеристик антенны

	$f$ , МГц	27	150	250	350	450	520
	$\lambda$ , м	11,1	2,0	1,2	0,9	0,7	0,6
$R_{сф}$ , м	0,6	19,5	3,5	2,1	1,5	1,2	1,0
	0,7	15,9	2,9	1,7	1,2	1,0	0,8
	0,9	12,3	2,2	1,3	1,0	0,7	0,6
	1,3	8,3	1,5	0,9	0,6	0,5	0,4
	2,4	4,6	0,8	0,5	0,4	0,3	0,2

Из полученных данных можно сделать вывод, что частотное распределение коэффициента стоячей волны (КСВ) слабо изменилось при усечении модели антенны сферой, разница составляет не более 6 % (рисунок 3).

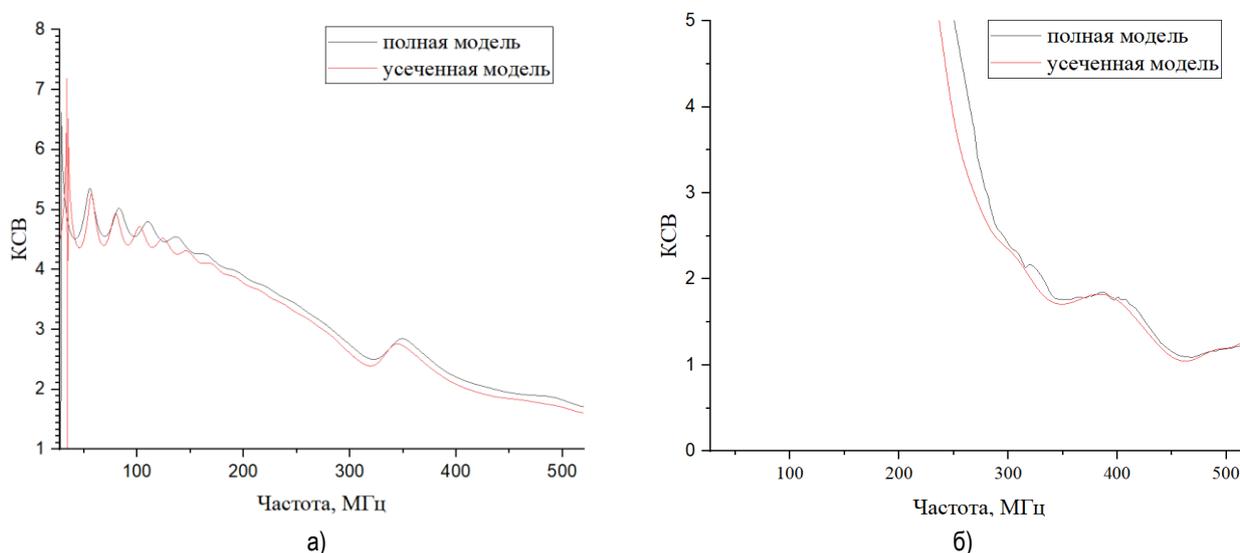


Рис. 3. Частотное распределение КСВ для моделей фургона (а) и легкового автомобиля (б)

Что касается формы ДН, различия в значениях полной и усеченной сферой точной моделей достигают 8 раз (рисунок 4). Исследуем зависимость электрических характеристик модели антенны от величины отношения радиуса сферы усечения  $R_{сф}$  к длине волны  $\lambda$  (таблица 3). Предположим, что для значений  $R_{сф}$ , кратных  $\lambda$ , результаты будут схожи с полной моделью. Величины  $R_{сф}/\lambda$ , при которых значения ДН усеченной модели соответствуют полной (с незначительной погрешностью), выделены в таблице 3 курсивом.

Анализируя полученные результаты построения ДН антенны при различных величинах сферы усечения, можно сделать следующие выводы:

- на частотах 27 и 150 МГц (соответствующих нижней границе рассматриваемого диапазона) ДН усеченной модели не соответствует полной модели ни для одного варианта усечения сферой. Отношение  $R_{сф} / \lambda$  принимает значение от 4,6 до 19,5;

- на частоте 250 МГц формы ДН усеченной сферой модели схожи с полной для  $R_{сф} = 1,3$  м, что соответствует значению  $R_{сф} / \lambda = 0,9$ ;

- на частоте 350 МГц подобное сходство наблюдается для  $R_{сф} = 0,9$  м, что соответствует значению  $R_{сф} / \lambda = 1,0$ ;

- на частоте 450 МГц ДН лишь одной усеченной модели ( $R_{сф} = 1,3$  м) не соответствует полной, остальные результаты расчета ДН усеченных моделей близки к полной модели ( $R_{сф} = 0,3; 0,7; 1,0; 1,2$  м);

– на частоте 520 МГц усеченная модель ( $R_{сф} = 1,3$  м) также не соответствует полной, наиболее близкими к ней являются усеченные модели с радиусами усечения равными 0,9 и 2,4 м (значения  $R_{сф} / \lambda$  составляют 0,2 и 0,6, соответственно). В остальных случаях имеются различия в результатах для угловых секторов 0–50°; 100–160°; 300–350°, что можно принять как ограниченное сходство с полной моделью.

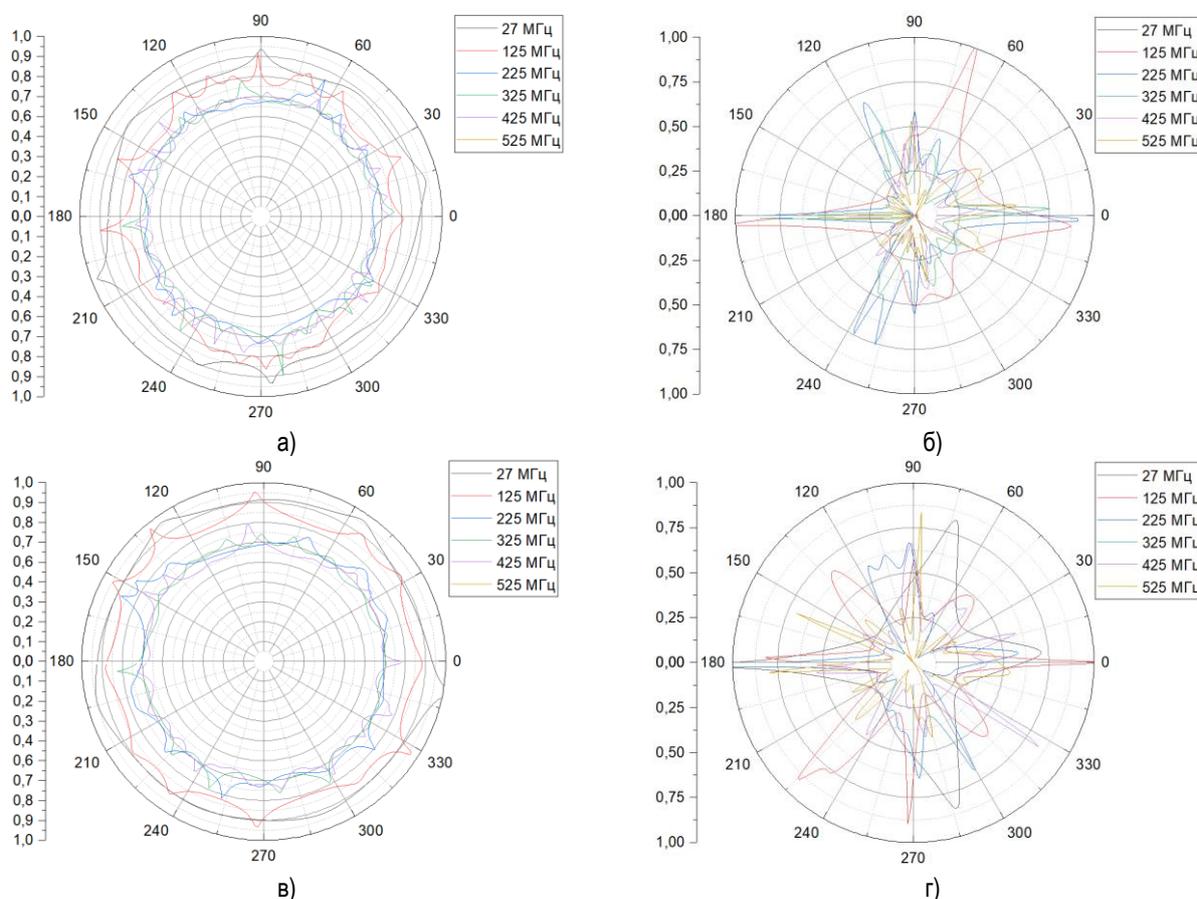


Рис. 4. Нормированные ДН моделей автомобилей (в горизонтальной плоскости):  
а) полная модель, фургон; б) полная модель, легковой автомобиль;  
в) усеченная модель, фургон; г) усеченная модель, легковой автомобиль

Заметна тенденция к увеличению количества соответствий усеченных моделей полной с повышением рабочей частоты. Предположим, что это обусловлено частотной зависимостью размера ближней зоны (БЗ) антенны. При рассмотрении БЗ на частотах 30–520 МГц размер усекающей сферы охватывал ее частично, при построении ДН часть токов не учитывалась. С ростом частоты размер БЗ изменяется в меньшую сторону. Усечение объекта сферой тех же размеров включало в себя основную часть токов БЗ, формирующих поверхностное распределение токов, которое, в свою очередь, определяет форму ДН. Проверим эту гипотезу, расширив границы исследования за верхнюю частоту рассматриваемого диапазона частот до 1 ГГц (рисунки 5–6). Анализируя полученные результаты, можно сделать следующие выводы:

– лишь для сферы радиусом 0,5 м форма ДН отличается от остальных результатов (прочих размеров усечений и полной модели) – это объясняется тем, что при данном варианте усечения модель представляет собой антенну, расположенную на плоской окружности (не учитывает влияния неравномерностей корпуса объекта установки); подобные формы ДН соответствуют результатам предыдущих исследований [2];

– гипотеза о соответствии размера усечения модифицированных моделей в рамках диапазона 30–520 МГц размеру БЗ антенны подтвердилась: при возрастании частоты анализа до диапазона 520 МГц – 1 ГГц результаты полной и усеченной моделей сопоставимы, погрешность результатов составляет в среднем до 10 %;

– временные затраты на расчет полной модели фургона в диапазоне частот 30–520 МГц составили 4 ч. 32 мин., модели, усеченной сферой радиусом 0,9 м (как наиболее близкой к полной) – 44 мин. 19 с.; в данном случае погрешность результатов в некоторых направлениях превышает 20 % от полной модели (в диапазоне частот 30–250 МГц), а в диапазоне 250–520 МГц погрешность не превышает 10 %;

– временные затраты на расчет полной модели фургона в диапазоне частот 520–1000 МГц составили 2 ч. 47 мин., модели, усеченной сферой радиусом 0,9 м (как наиболее близкой к полной) – 21 мин. 27 с.

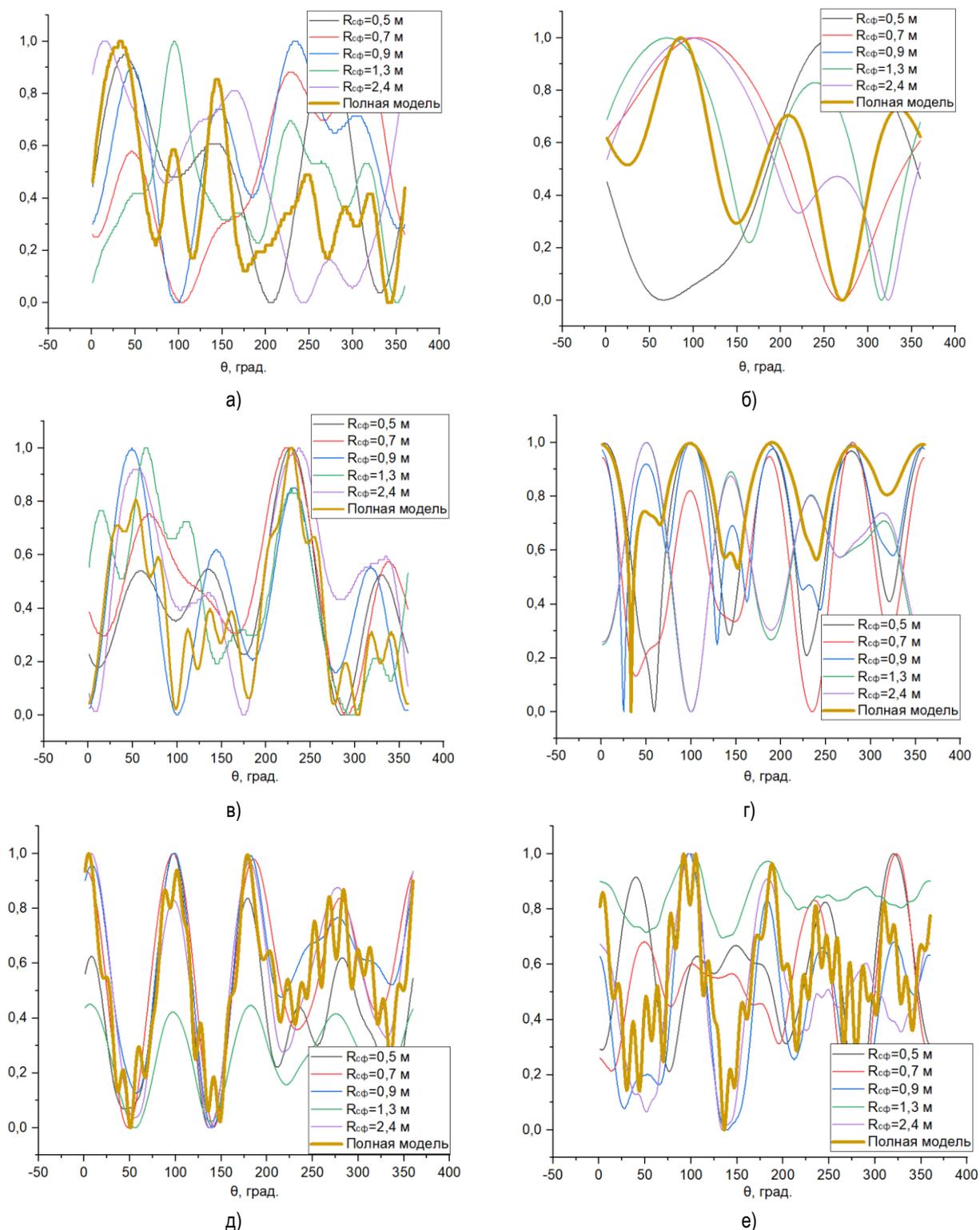


Рис. 5. Зависимость форм ДН антенны от радиуса сферы усечения на частоте:  
а) 30 МГц; б) 150 МГц; в) 250 МГц; г) 350 МГц; д) 450 МГц; е) 520 МГц

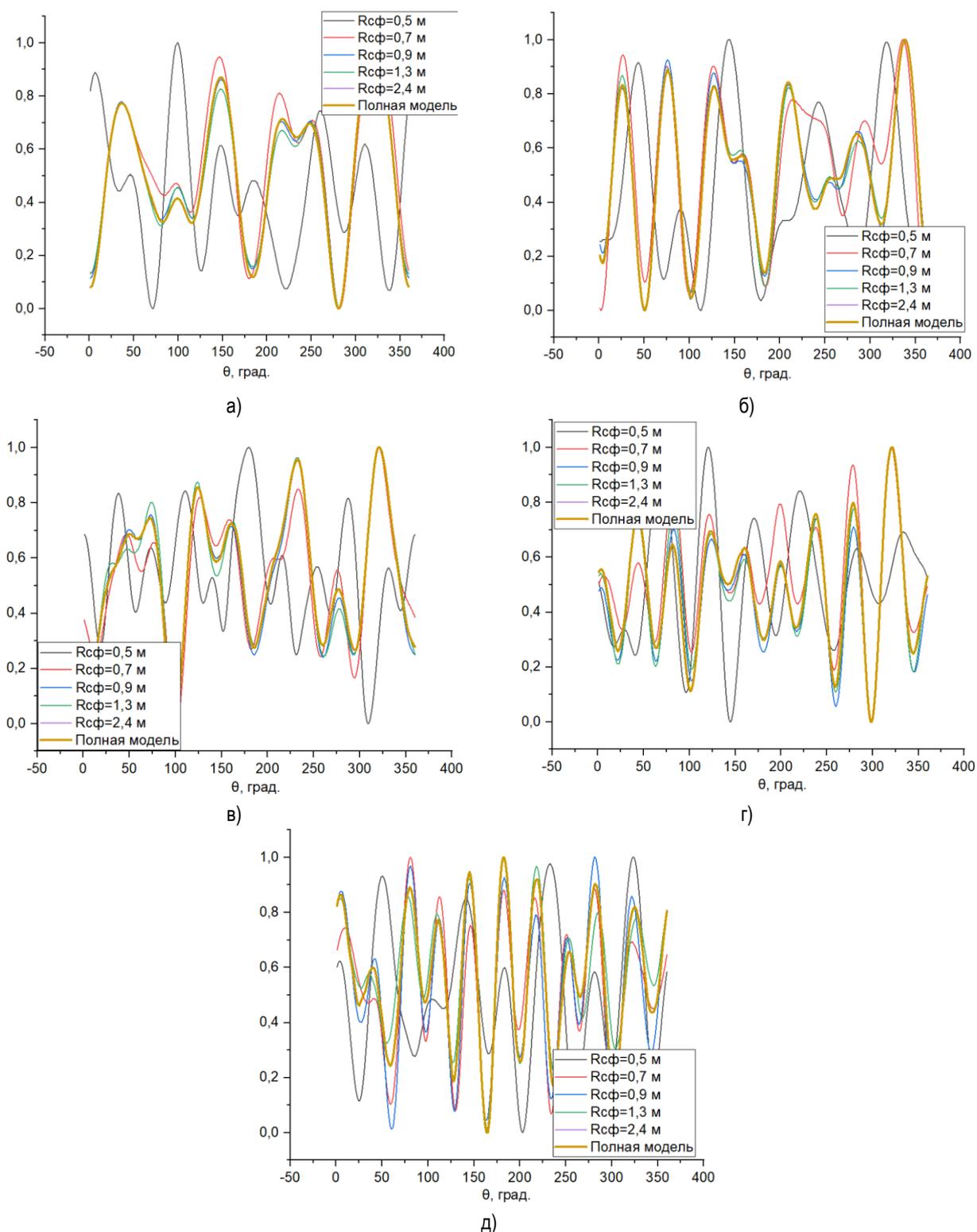


Рис. 6. Зависимость форм ДН антенны от радиуса сферы усечения на частоте:  
а) 620 МГц; б) 720 МГц; в) 820 МГц; г) 920 МГц; д) 1 ГГц

### Выводы

По результатам проведенных исследований были сделаны следующие выводы:

*Во-первых*, усечение полной модели «антенна – корпус подвижного объекта» сферой позволяет значительно (до 9 раз) уменьшить вычислительную сложность моделей. Этот прием может быть полезным с точки зрения сокращения временных ресурсов при решении итерационных вычислительных задач.

*Во-вторых*, усечение полной модели сферой предпочтительнее, чем использование полной упрощенной модели из-за точности представления граней (на которых появляются вторичные поверхностные токи) и возможности учета нескольких материалов в одной модели.

*В-третьих*, точность представления результатов зависит от размера сферы, радиус которой в общем случае должен быть кратным длине волны и превышать размеры ближней зоны антенны для данной длины волны.

Апробация полученных результатов на практике, а также определение их пригодности для антенн других типов – задачи дальнейшего исследования.

### Литература

1. Лянгузов Д. А., Майбурд С. В., Худайназарова Д. Р. Диапазонный несимметричный вибратор. Патент на изобретение RU 2826482 С1. Опубл. 11.09.2024. Бюл. № 26. EDN: TRBUKK
2. Бородулин Р. Ю., Лянгузов Д. А. Модель низкопрофильной антенны для размещения на поверхности ограниченных размеров // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2022. № 12. С. 193–199. DOI: 10.24412/2071-6168-2022-12-193-200. EDN: LEMJWJ
3. Hua C., Liu J., Yu Y., Ren W., Shen Z. Low-Profile and Wideband Surface-Wave Antenna of Conical Beam for UAV Applications // IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters. 2024. Vol. 23. Iss. 5. PP. 1548–1552. DOI: 10.1109/LAWP.2024.3362057
4. Wu Q., Li H., Wong S., Lin Y., He Y. A Low-Profile Dual-Polarized Dielectric Resonator Antenna for 2G/3G/4G Base Station Applications with Gain Enhancement // Proceedings of 2024 IEEE International Workshop on Radio Frequency and Antenna Technologies (iWRF&AT, 31 May – 03 June 2024, Shenzhen, China). 2024. PP. 486–488. DOI: 10.1109/iWRFAT61200.2024.10594368.
5. Yang Y., Ren J., Zhang B., Liu J., Wang H., Song D., Yin Y. Wideband Tripolarized MIMO Antenna With Pattern Diversity for 5G Application // IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters. 2024. Vol. 23. Iss. 1. PP. 349–353. DOI: 10.1109/LAWP.2023.3324391
6. Демшевский В. В., Сидоренко С. С., Богачев И. А., Сергеев К. Д. Улучшенная низкопрофильная антенна вытекающей волны на основе ИПВ // Электроника и микроэлектроника СВЧ. 2024. № 1. С. 334–336. EDN: QDVQDS
7. Илларионов И. А. Разработка низкопрофильной бортовой спиральной антенны L-диапазона // V научный форум телекоммуникации: теория и технологии ТТТ-2021: Материалы XIX Международной научно-технической конференции «Физика и технические приложения волновых процессов-2021» (23–26 ноября 2021 г., Самара). Самара, 2021. С. 149–150. EDN: WIUQJD
8. Suzuki S., Kawase Y., Yamaguchi T., Toyama S., Kakami S. et al. Dynamic Analysis of Circuit Breaker with Oil Dashpot Using Multimesh Modification Method // IEEE Transactions of Magnetics. 2011. Vol. 47. Iss. 5. PP. 1002–1005. DOI: 10.1109/TMAG.2010.2090652
9. Biyik E., D'Amato F., Subramaniyan A., Sun C. Reduced Order Modeling for Clearance Control in Turbomachinery // Proceedings of 2016 IEEE Conference on Control Applications (9–22 September 2016, Buenos Aires, Argentina). 2016. PP. 1143–1148. DOI: 10.1109/CCA.2016.7587960
10. Ziarati P., Kullukcu B., Beker L. Modeling Miniaturized Piezoelectric Ultrasound Transducers: Comparison of Lumped and Finite Element Models // Proceedings of 2022 IEEE International Ultrasonics Symposium (07–11 September 2020, Las Vegas, USA). 2022. DOI: 10.1109/IUS46767.2020.9251723
11. Дворников С. В., Власенко В. И., Русин А. А. Синтез низкопрофильных антенн методом фрактального анализа // Научно-аналитический журнал «Вестник Санкт-Петербургского университета Государственной противопожарной службы МЧС России». 2021. № 4. С. 86–94. EDN: NTICPG
12. Соколов В. С., Степанов М. А. Синтез двухдиапазонной антенной решетки МИМО 4×4 для сетей Wi-Fi // Современные проблемы радиоэлектроники: Материалы XXIII Всероссийской научно-технической конференции с международным участием, посвященной 127-й годовщине Дня радио. Красноярск, 2022. С. 294–299. EDN: JJTRO1

Статья поступила 8 февраля 2025 г.  
Одобрена после рецензирования 17 февраля 2025 г.  
Принята к публикации 11 марта 2025 г.

### Информация об авторе

Лянгузов Данила Андреевич – кандидат технических наук, инженер кафедры радиотехники Санкт-Петербургского государственного университета телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича.  
E-mail: lyanguzov.da@sut.ru; danilalgz@ya.ru

## Study of Sphere Truncation of the Electrodynamical Model “Car Body – Low-Profile Antenna”

### D. Lyanguzov

The Bonch-Bruevich Saint Petersburg State University of Telecommunications,  
St. Petersburg, 193232, Russian Federation

**Task statement.** When solving the problems of analyzing electrodynamic models and synthesizing low-profile antennas, there is a need for a series of similar calculations of the electrical characteristics of antennas. In this paper, we propose an approach to modify the electrodynamic model in order to increase the speed of calculations. The objective of the study is to study the truncation of the electrodynamic model “car body – low-profile antenna” by a sphere. The purpose of the work: to formulate rules for truncating electrodynamic models to increase the speed. **The purpose** of the work is to formulate rules for truncating electrodynamic models to increase the speed of calculations with minor (up to 10 %) losses in calculation accuracy. **Methods used:** determination of near-field surface currents using the finite element method, construction of a radiation pattern using the Stretton-Chu method. **Novelty** of the work lies in the approach to the analysis of electric-dynamic models in the form of truncation by a sphere. **Result:** practical recommendations for a reasonable transformation of the electrodynamic model to increase the speed of calculations with acceptable calculation accuracy. **Practical significance:** the presented results of the work allow to reduce the time of calculation of the electrical characteristics of the antenna up to 9 times, allowing to analyze complex electrodynamic models on a personal computer, reducing the requirements for the computing resource when solving iterative problems.

**Key words:** antenna, electrodynamic model, truncation, sphere, recommendations

### Information about Author

Lyanguzov Danila – Ph.D. of Engineering Sciences, Engineer of the Department of Radio Engineering (The Bonch-Bruevich St. Petersburg State University of Telecommunications). E-mail: lyanguzov.da@sut.ru; danilalgz@ya.ru