

Акционерное общество «Научно-производственное объединение
«Лианозовский электромеханический завод»

На правах рукописи

Годин Андрей Сергеевич

**Электрически малые излучатели антенн с использованием
импедансногласованных материалов**

РЕЗЮМЕ ДИССЕРТАЦИИ
на соискание учёной степени
кандидата технических наук НИУ ВШЭ

Научный руководитель:
доктор технических наук
Климов Константин Николаевич

Москва 2019

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. В настоящее время современные мобильные телекоммуникационные устройства такие как смартфоны, планшеты, ноутбуки и т.п. в их состав входит антенны различных диапазонов волн: LTE, 3G, GSM, Wi-Fi, Bluetooth, Глонасс-GPS. Современные радиолокационные системы в состав которых входит антенное полотно с большим количеством антенных излучателей, системы автокомпенсации активных помех, антенны передачи информации и команд управления, для всех этих устройств требуется обеспечивать заданный уровень развязки между различными каналами передачи информации и управления. В антенных решетках пытаются разместить, в рамках одного приемо-передающего полотна, передачу и прием сигналов разных частотных диапазонов. Для чего необходимо решить задачу уменьшения связи между излучателями в антенной решетке. Эту связь можно уменьшить, увеличивая электрическое расстояние между излучателями с помощью увеличения диэлектрической и магнитной проницаемостей материала, в который помещают излучатели антенного полотна. При этом для минимизации отражения электромагнитной волны от границы раздела материал-вакуум импеданс такого материала согласуют с импедансом вакуума. Все это и определяет актуальность создания электрически малых излучателей антенн с использованием импедансносогласованных материалов.

Термин импеданс среды был введен Шелкуновым (Schelkunoff S.A.). Вопрос о распространении понятия импеданса на электромагнитные поля также был рассмотрен Страттоном (Stratton J.A.). Он рассмотрел решение задачи о согласовании импедансов сред и показал, что для отсутствия отражения плоской волны от границы раздела двух сред, необходимо равенство волновых сопротивлений данных сред. Материалы, импеданс (волновое сопротивление) которых согласован с импедансом (волновым сопротивлением) вакуума, т.е. импедансносогласованные с вакуумом материалы применялись Буеллом (Buell K.) и Карилайненом (Karilainen A.) для увеличения рабочей длины волны уже

существующих излучателях антенн. Следует также отметить, что большая часть исследований по моделированию электрически малых антенн используют специальное программное обеспечение по расчету электромагнитных полей. За рубежом, работы по исследованию и разработкам электрически малых антенн с использованием импедансногласованных материалов проводятся на универсальных электродинамических программах уже более 10 лет. Именно поэтому для нашей страны является актуальной задачей электродинамического моделирования и разработки электрически малых излучателей антенн с использованием импедансногласованных материалов.

Объект исследования. Антенные излучатели, включающие в свой состав импедансногласованные с вакуумом материалы, для антенных систем навигации и связи.

Предмет исследования. Закономерности, методики, анализ и синтез излучателей антенн, включающие в свой состав импедансногласованные с вакуумом материалы, для антенных систем навигации и связи.

Цель исследования заключается в разработке излучателя с использованием импедансногласованных с вакуумом материалов для создания антенных систем с минимальным габаритным размером и заданным электрическим характеристикам для решения задач навигации и связи.

Научная проблема. Разработка электрически малого излучателя антенн с использованием импедансногласованного с вакуумом материала с предельно достижимым значением коэффициента усиления для заданного габарита.

Научные задачи.

1. Проведение численного моделирования электрически малых излучателей антенн с применением импедансногласованных материалов.
2. Разработка метода синтеза электрически малых излучателей антенн с применением импедансногласованных с вакуумом материалов.

3. Разработка автоматизированного программно-аппаратного комплекса для измерений диаграмм направленностей электрически малых антенн.

4. Разработка электрически малого излучателя антенны с использованием импедансногласованного с вакуумом материала.

5. Проведение измерений и сравнение с расчетными характеристиками электрически малого излучателя антенны с использованием импедансногласованного с вакуумом материала.

Научная новизна результатов работы состоит в следующем:

1. Предложен излучатель с использованием импедансногласованных с вакуумом материалов, обладающий двумя индукционными и двумя дальними зонами, в котором достигается предельное значение коэффициента усиления для заданного габарита, согласно критерию Чу.

2. Разработан метод увеличения рабочей длины волны существующих антенных излучателей с использованием импедансногласованных материалов без изменений их геометрических размеров.

3. Разработан алгоритм управления процессом проведения и обработки результатов для измерений диаграмм направленностей электрически малых антенн, который позволил уменьшить стоимость программно-аппаратного комплекса.

Теоретическая значимость проведенного исследования заключается:

1. Разработан метод увеличения рабочей длины волны существующих антенных излучателей с использованием импедансногласованных материалов.

2. Предложен излучатель с использованием импедансногласованных с вакуумом материалов, обладающий двумя индукционными и двумя дальними зонами.

3. На универсальных электродинамических программах исследованы свойства представленного излучателя и оценены предельно возможные, по коэффициенту усиления, характеристики для заданных габаритов.

Практическая значимость проведенного исследования заключается:

1. Для произвольных излучателей путем помещения их в импедансногласованный с вакуумом материал показана допустимость смещения на 25% рабочего диапазона частот в область длинноволнового диапазона.

2. Показана возможность достижения предельного значения коэффициента усиления для заданного габарита излучателя при использовании импедансногласованного с вакуумом материала.

3. Разработан программно-аппаратный комплекс для автоматизированного измерения диаграмм направленностей электрически малых антенн, который предоставляет нужную точность измерения антенных характеристик при уменьшении стоимости в 7 раз, по сравнению с существующими на рынке комплексами.

Метод исследования в диссертационной работе при рассмотрении электрически малых излучателей антенн с использованием импедансногласованных с вакуумом материалов заключался в применении численного моделирования на современных электродинамических пакетах расчета, основанные на уравнениях Максвелла, и принципа электродинамического подобия.

Положения, выносимые на защиту:

1. Предельно достижимые для заданных габаритов излучателя согласно критерию Чу значения коэффициента усиления достигаются в излучателях с двумя индукционными и двумя дальними зонами, которые могут

быть реализованы при использовании импедансногласованных с вакуумом материалов.

2. Рабочая частота излучателя может быть уменьшена без изменения геометрии при использовании импедансногласованных с вакуумом материалов.

3. Уменьшена в 7 раз по сравнению с существующими на рынке стоимость автоматизированного программно-аппаратного комплекса для мультимчастотных измерений диаграмм направленностей электрически малых антенн при использовании системы позиционирования и разработанного программного обеспечения.

Соответствие паспорту специальности. Направление диссертационной работы заключается в разработке электрически малых антенн с использованием импедансногласованных с вакуумом материалов и вносит вклад в следующие области исследований «Электроника, радиотехника и телекоммуникации», перечисленные в паспорте специальности НИУ ВШЭ «Инженерные науки и прикладная математика»:

1. Исследование явлений прохождения электромагнитных волн различных диапазонов частот через среды, их рассеяния и отражения (1-е положение).

2. Исследование новых процессов и явлений, позволяющих повысить эффективность радиотехнических, электронных и телекоммуникационных устройств и систем (2-е положение).

3. Разработка радиотехнических, электронных и телекоммуникационных устройств и систем для использования их в промышленности, биологии, медицине, метрологии и других отраслях народного хозяйства, включая спутниковые системы (3-е положение).

Апробация. В процессе диссертационного исследования было получено два патента на полезную модель: «Излучатель Климова» (RU № 169311),

«Излучатель Година» (RU № 170118). Результаты работы были представлены на следующих всероссийских и международных конференциях:

1. Конов К.И., Годин А.С. Комплекс для измерения диаграмм направленностей излучателей АФАР. // Сборник докладов I Международного симпозиума «Компьютерные измерительные технологии». 3 апреля 2015 г., Россия, Москва.

2. Годин А.С., Гежа Д.С., Дризе А.Д. Численное электродинамическое моделирование внутреннего куба Сестрорецкого. // Сборник трудов II Всероссийской объединенной научной конференции «Проблемы СВЧ электроники» и «Инновационные решения» Keysight Technologies», 26-28 октября, 2015 г., Россия, Москва.

3. Климов К.Н., Годин А.С., Круглов А.И., Цай А.Б. Численное электродинамическое моделирование куба Гюйгенса. Московский электродинамический семинар, 1 сентября 2015, ИРЭ РАН, Москва, Россия.

4. Годин А.С., Перфильев В.В., Дризе А.Д., Климов К.Н. Использование импедансносогласованного материала для измерения частотного диапазона излучателей. // Сборник трудов XXIII Международной научно-технической конференции «Радиолокация, навигация, связь». В 3-х томах. 18-20 апреля 2017 г., Россия, Воронеж.

5. K.N. Klimov, I.K. Epaneshnikova, A.M. Belevtsev, A.S. Godin, A.D. Drize, Synthesis of structures of electric small-sized radiators using impedance matching materials for millimeter waves, SPIE Security + Defence, 11-14 September 2017, Warsaw, Poland.

6. Годин А.С., Степанов Е.И., Мацаян М.С., Климов К.Н. Электрически малые излучатели для перспективных систем РЛС. // Сборник трудов III Всероссийской научно-технической конференции им. В.А. Солнцева «Проблемы СВЧ электроники -2017». 8-9 ноября 2017 г., Россия, Москва.

7. Victor Perfilyev, Konstantin Klimov, Andrey Godin. Construction of distribution systems of multibeam active phased array antennas. // Moscow Workshop

on Electronic and Networking Technologies (MWENT-2018). 14-16 March 2018, Moscow, Russia.

8. Годин А.С., Климов К.Н. Использование импедансносогласованных материалов для расширения полосы частот излучателей антенн. // Сборник трудов VII Всероссийская научно-техническая конференция по обмену опытом в области создания сверхширокополосных радиоэлектронных систем («СВЧ-2018»). 17-18 апреля 2018 г., Россия. Омск.

9. Godin A.S., Klimov K.N. Expansion of the band of operating frequencies for antenna radiators using impedance-matched materials. // International Scientific and Technical Conference «Systems of Signal Synchronization, Generating and Processing in Telecommunications» (SYNCHROINFO-2018). 4-5 July 2018. The Republic of Belarus, Minsk.

На предприятии АО «НПО «ЛЭМЗ» в практику проектирования и производства были внедрены основные результаты диссертационного исследования:

- спроектирован и изготовлен электрически малый излучатель с использованием импедансносогласованного с вакуумом материалом, измерены его электрические характеристики;
- разработан программно-аппаратный комплекс для автоматизированного измерения диаграмм направленностей электрически малых излучателей антенн.

По теме диссертационной работы, получены призовые места на следующих конкурсах:

- Лауреат премии правительства Москвы молодым ученым за 2018 год в области «Электроника и средства связи»;
- 1 место в XX городском конкурсе правительства Москвы профессионального мастерства «Московские мастера» по профессии инженер-электроник;

Личный вклад соискателя состоит в непосредственном участии в постановке задач исследования и их решении, создание метода увеличения рабочей длины волны существующих антенных излучателей с использованием импедансносогласованных материалов без изменений их геометрических размеров, которая позволила уменьшить рабочую частоту излучателя в 1.5 раза и достичь предельно достижимых, согласно критерию Чу, значений коэффициента усиления излучателей. Лично автором предложены и исследованы два новых объекта электродинамики: внешний куб Гюйгенса и внешний куб Сестрорецкого, которые позволяют оценить предельно достижимые параметры излучателей антенн заданных габаритов с помощью численного моделирования на универсальных электродинамических программах, что позволило определить радиус шара (полусфера) из импедансносогласованного материала для увеличения рабочей длины волны существующих излучателей. Годин А.С. разработал алгоритм управления процессом проведения и обработки результатов для измерений диаграмм направленностей электрически малых антенн, который предоставляет нужную точность измерения антенных характеристик при уменьшении стоимости в 7 раз по сравнению с существующими на рынке комплексами. Лично автором и при участии автора подготовлены основные публикации по выполненной работе.

В рамках диссертационного исследования Годин А.С. как автор и соавтор получил два патента на полезную модель: № 169311, № 170118.

Достоверность полученных результатов в диссертационном исследовании подтверждается:

- численным моделированием на современных электродинамических пакетах расчета, основанных на уравнениях Максвелла;
- соответствием полученных результатов фундаментальным физическим принципам;
- проведением экспериментальных исследований.

Основные результаты работы

При решении задач, поставленных в диссертационной работе, были получены следующие результаты:

1. Предельно достижимые для заданных габаритов излучателя согласно критерию Чу значения коэффициента усиления достигаются в излучателях с двумя индукционными и двумя дальними зонами, которые могут быть реализованы при использовании импедансногласованных с вакуумом материалов.

2. Рабочая частота излучателя может быть уменьшена без изменения геометрии при использовании импедансногласованных с вакуумом материалов.

3. Уменьшена в 7 раз по сравнению с существующими на рынке стоимость автоматизированного программно-аппаратного комплекса для мультислотных измерений диаграмм направленностей электрически малых антенн при использовании системы позиционирования и разработанного программного обеспечения.

Таким образом, разработан излучатель с использованием импедансногласованных с вакуумом материалов для создания антенных систем с минимальным габаритным размером и заданным электрическим характеристикам для решения задач навигации и связи, т.е. поставленная в диссертационной работе цель выполнена.

Данное исследование позволит в дальнейшем проводить миниатюризацию антенных систем для перспективных систем связи и навигации. Использование в антенных излучателях импедансногласованных материалов позволяет увеличить развязку между антенными излучателями, уменьшить толщину антенного полотна, увеличить сектор обзора антенной решетки, уменьшить обратное рассеяние антенн. Импедансногласованные материалы могут быть использованы и для снижения заметности, например, БПЛА (беспилотных

летательных аппаратов), поскольку не только уменьшаются габариты антенн, но и снижается их эффективная площадь рассеяния.

Публикации

Результаты диссертации, выносимые на защиту, отражены в публикациях, перечисленных ниже.

Статьи, опубликованные в журналах, входящих в международные базы цитирования Scopus, Web of Science:

1. Godin, A.S., Tsai, A.B., Klimov, K.N. Numerical electrodynamic analysis of the interior problem for a Huygens element that is an interior Huygens cube. // J. Commun. Technol. Electron. Vol. 60, No 4, pp. 329-334, 2015.
2. Godin, A.S., Tsai, A.B., Klimov, K.N. Numerical electrodynamic analysis of the external Huygens cube. // J. Commun. Technol. Electron. Vol. 60, No 5, pp. 436-453, 2015.
3. Godin, A.S., Tsai, A.B., Klimov, K.N. Numerical electromagnetic investigation of patterns of the external problem for the Huygens element that is the external Huygens cube. // J. Commun. Technol. Electron. Vol. 60, No 7, pp. 737-746, 2015.
4. Godin, A.S., Matsayan, M.S., Klimov, K.N. Numerical electrodynamic analysis of the external Sestroretskii cube. // J. Commun. Technol. Electron. Vol. 61, No 5, pp. 453-468, 2016.
5. Godin, A.S., Matsayan, M.S., Klimov, K.N. Numerical electrodynamic investigation of the interior 3D problem of the Sestroretskii cube. // J. Commun. Technol. Electron. Vol. 61, No 6, pp. 574-586, 2016.
6. Godin, A.S., Matsayan, M.S., Klimov, K.N. Numerical electrodynamic analysis of the far-field patterns of the external Sestroretskii cube. // J. Commun. Technol. Electron. Vol. 61, No 7, pp. 776-782, 2016.
7. Klimov, K.N., Godin, A.S., Matsayan, M.S. On the possibility of existence of a self-consistent solution for an electromagnetic field in vacuum. // J. Commun. Technol. Electron. Vol. 61, No 10, pp. 1091-1094, 2016.
8. Godin, A.S., Klimov K.N. Expansion of the band of operating frequencies for antenna radiators using impedance-matched materials. // International Scientific and Technical Conference «Systems of Signal Synchronization, Generating and Processing in Telecommunications» (SYNCHROINFO-2018). 4-5 July 2018. The Republic of Belarus, Minsk.