

О Т З Ы В

официального оппонента доктора технических наук, профессора
Кузнецова Юрия Владимировича на диссертацию и автореферат
Телегина Сергея Александровича

«Генерация микроволнового излучения многоэлементными активными интегрированными антеннами на полевых транзисторах»,
представленной на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.03 «Радиофизика»

Работа посвящена исследованию условий генерирования электромагнитного излучения многоэлементными активными антенными решётками с полевыми транзисторами в свободное пространство и в планарные волноводы. В работе проведено сравнительное компьютерное моделирование различных типов микрополосковых антенн и экспериментальное исследование спектральных, мощностных и пространственных характеристик автогенератора с активной логопериодической антенной на полевом транзисторе. Повышение эффективности синхронизации антенной решётки связанных антенных автогенераторов достигнуто за счёт использования конструкции с полупрозрачным диэлектрическим зеркалом. Проведено компьютерное моделирование и экспериментальное исследование вывода электромагнитного излучения в планарный волновод, интегрированный в диэлектрическую подложку.

Повышение эффективности и расширение функциональных возможностей источников электромагнитных колебаний с заданными характеристиками неизменно остаётся актуальной научной проблемой теории и техники микроволновых устройств. Традиционно поставленная задача решается с помощью автогенератора, формирующего колебание заданной формы и частоты, усилительного каскада, согласующего генератор и антенну, и излучающую микроволновую структуру, формирующую заданное пространственное распределение электромагнитного поля. Однако необходимость перехода на частоты свыше 10 ГГц приводит к потерям мощности в линиях передачи, уменьшение которых достигается интегрированием активного полупроводникового усилителя с излучающей микроволновой структурой.

Важным ресурсом для повышения эффективности автогенераторов, интегрированных с антеннами, является обоснованный выбор конструкции антенны, использование связанных антенных решёток и обеспечение условий синхронизации генерирующей микроволновой структуры. Это позволяет учитывать особенности используемой технологии генерирования электромагнитных излучений для достижения заданных характеристик.

Целью диссертационной работы является повышение эффективности автогенераторов электромагнитных излучений на основе микроволновых структур, интегрированных с активными полупроводниковыми приборами,

за счёт разработки конструкций и обеспечения требуемых условий синхронизации взаимосвязанных антенных элементов.

Цель была достигнута в результате решения следующих задач:

- анализ известных аналитических соотношений возникновения автоколебаний и установившегося режима генерации в микроволновых структурах с активными полупроводниковыми приборами для определения условий реализации синхронизации;
- компьютерное моделирование излучающих микроволновых структур для обоснования конструкции и расчёта параметров антенн и антенных решёток;
- экспериментальное исследование конструкции и условий синхронизации активных антенных решёток-автогенераторов;
- исследование способов повышения эффективности вывода в свободное пространство и в плоский интегрированный волновод суммарного электромагнитного колебания решётки антенн с полевыми транзисторами.

Для решения поставленных задач использовались **методы** теории электродинамики и распространения радиоволн, теории автогенераторов, методов анализа линейных систем, электродинамического компьютерного моделирования.

Корректность и достоверность разработанных в диссертации методов и алгоритмов подтверждается совпадением результатов с ранее известными экспериментальными и теоретическими данными, а также экспериментальной проверкой предложенных технических решений.

Научная новизна полученных результатов исследований состоит в следующем:

- выявлено распределение плотности электрической энергии в ближнем поле излучения микрополосковой логопериодической антенны;
- определены условия внешней и внутренней синхронизации решётки антенн-генераторов в конструкции с полупрозрачным диэлектрическим зеркалом.
- предложена конструкция для объединения антенной решётки из активных логопериодических антенн с плоским волноводом, встроенным в диэлектрическую подложку.

Содержание диссертации отражено в 11 статьях, из них в 8 статей опубликовано в журналах, рекомендованных ВАК, патенте на полезную модель, а также докладывалось на 7-ми научно-технических конференциях различного уровня.

Практическая ценность работы заключается в созданных лабораторных образцах активных антенн и антенных решёток с выводом электромагнитных колебаний в свободное пространство и в интегрированный плоский волновод, которые могут быть использованы в качестве источников излучения сантиметрового диапазона длин волн.

Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения, списка литературы и содержит 100 страниц основного текста.

Во введении содержатся сведения, определяющие актуальность, новизну, научную значимость и практическую ценность полученных результатов.

В первой главе представлен обзор литературы по принципам построения микрополосковых антенн-генераторов, включая анализ известных аналитических соотношений возникновения автоколебаний и установившегося режима генерации в микроволновых структурах с активными полупроводниковыми приборами для определения условий реализации синхронизации. Отдельно рассмотрены аналитические соотношения для условий возникновения колебаний и синхронизации в линейной решётке антенн-генераторов.

Рассмотрены особенности конструкций и определения характеристик антенн-генераторов, особое внимание уделено микрополосковой логопериодической антенне, поскольку она обеспечивает эффективное излучение колебаний в широкой полосе частот, а также вопросам синхронизации линейных и плоских антенных решёток.

На основании проведённого анализа литературы обоснована необходимость разработки многоэлементных решёток антенн-генераторов, и сформулирована задача исследования условий синхронизации решёток генераторов и эффективного суммирования мощностей излучения отдельных элементов.

Вторая глава посвящена компьютерному электродинамическому моделированию методом пространственной матрицы передающих линий (TLM). Проведён расчёт частотных характеристик и диаграмм направленности логопериодической и прямоугольной микрополосковых антенн в зависимости от конструктивных параметров, включая материал и толщину диэлектрической подложки.

Особый интерес представляет моделирование и сопоставительный анализ распределения плотности электрической энергии в ближней зоне для микрополосковых логопериодической, прямоугольной и дипольной антенн, что позволило определить области, свободные от пучностей электрической энергии, в которых предложено подключать питание полевых транзисторов.

На основании проведённого моделирования сделан выбор в пользу логопериодической конфигурации активной антенны-генератора ввиду широкой полосы рабочих частот и слабой зависимости формы частотной характеристики от толщины диэлектрической подложки.

В третьей главе приведены результаты экспериментального исследования частотных, мощностных и пространственных характеристик излучения логопериодической антенны-генератора на полевом транзисторе.

В качестве расчётной зависимости амплитуды и фазы частотной характеристики антенны, обеспечивающей выполнение условий баланса амплитуд

и фаз генератора в установившемся режиме, использована разработанная модель логопериодической антенны без учёта характеристик полевого транзистора. Это позволило предсказать частоту, на которой выполняется условие стабильных колебаний.

Экспериментальное исследование частоты и мощности генерируемого излучения выявило зависимости этих параметров от длины наибольшего зубца антенны и толщины подложки. Сопоставление зависимостей с результатами моделирования показало отличие данных эксперимента и моделирования, что объясняется тем, что при моделировании не учтено влияние возможных изменений в режиме работы транзистора.

Дополнительно проведено экспериментальное исследование частоты и мощности внешнего синхронизирующего колебания на результирующую частоту генерации и форму диаграммы направленности одиночной антенны-генератора. Показано, что внешнее воздействие позволяет синхронизировать автоколебания антенны-генератора в диапазоне частот порядка 150 МГц, при этом уменьшается ширина спектральной линии и повышается эффективность генерации.

В четвертой главе проанализированы результаты экспериментальных исследований внутренней и внешней синхронизации линейной антенной решётки из трёх антенн-генераторов и плоской прямоугольной антенной решётки из четырёх антенн-генераторов. Представлены результирующие спектральные и пространственные характеристики антенных решёток, генерирующих электромагнитные колебания.

Показано, что для линейной антенной решётки при мощности источника синхронизации, на порядок меньше генерируемой мощности, синхронизация обеспечивается при разбросе собственных частот антенн-генераторов до 150 МГц, тогда как внутренняя синхронизация за счёт взаимной связи между антеннами на одной подложке обеспечивается при отличии собственных частот не более, чем на 50 МГц. При внешней синхронизации наблюдается также сужение диаграммы направленности в плоскости, проходящей через продольную ось линейной решётки.

Особый интерес представляет конструкция с внешней синхронизацией за счёт использования полупрозрачной диэлектрической пластины, устанавливаемой со стороны излучения антенной решётки. Показано, что дополнительным преимуществом такой конструкции является существенное увеличение мощности излучения под влиянием резонатора, образуемого диэлектрической пластиной.

В пятой главе перечислены условия эффективного сложения мощностей излучения отдельных антенн-генераторов в свободном пространстве, а также проанализирована конструкция вывода излучения в плоский волновод, интегрированный в диэлектрическую подложку. Показана возможность выделения второй гармоники генерируемого автоколебания с помощью диэлек-

трической пластины, а также волновода, встроенного в диэлектрическую подложку

Переходя к **общей оценке работы**, следует отметить ее достоинства:

В работе проведено развитие теории и практики условий генерирования электромагнитного излучения активными антеннами, интегрированных с полевыми транзисторами, как в свободное пространство, так и в планарные волноводы.

Проведено сравнительное компьютерное моделирование различных типов микрополосковых антенн и экспериментальное исследование спектральных, мощностных и пространственных характеристик автогенератора с активной логопериодической антенной на полевом транзисторе.

Повышение эффективности синхронизации антенной решётки связанных антенных автогенераторов достигнуто за счёт использования конструкции с полупрозрачным диэлектрическим зеркалом.

Компьютерное моделирование и экспериментальное исследование вывода электромагнитного излучения в планарный волновод, интегрированный в диэлектрическую подложку, показало возможность выделения заданной частоты генерации.

Представленный подход содержит элементы научной новизны и практической ценности, подтверждаемой реализацией предложенного подхода в действующей аппаратуре созданных лабораторных образцов активных антенн и антенных решёток с выводом электромагнитных колебаний в свободное пространство и в интегрированный плоский волновод.

Вместе с тем, в работе есть следующие **недостатки**:

1. Обзор литературы проведён в основном по публикациям 1991 - 1994 годов, хотя доступны актуальные работы по тематике диссертации. Выводы по обзору не содержат конкретных формулировок по достигнутому уровню теории и параметров эффективности известных антенн-генераторов.

2. Параметры компьютерного электромагнитного моделирования, включая использованное программное обеспечение, не описано в работе. Обоснование выбора логопериодической микрополосковой антенны недостаточно убедительно. Рекомендации по выбору точек подключения выводов активных полупроводниковых приборов сделано по рассчитанному распределению плотности электрической энергии без учёта распределения магнитной энергии в ближней зоне антенны.

3. Методика проведения экспериментальных исследований автогенераторов описана недостаточно подробно, теоретические зависимости, использованные для сравнения с экспериментами, в работе не представлены (Рис. 3.4). Компьютерная модель для определения баланса амплитуд и фаз, построенная без учёта параметров полевого транзистора (Рис. 3.3), не позволяет предсказать даже частоту автогенератора.

4. Экспериментально обнаруженное изменение ширины спектральной линии автогенератора при использовании внешней синхронизации не проанализировано количественно (Рис. 3.10). При этом не учтены статистические характеристики параметров фликер-шума, характерного для излучений автогенераторов.

5. При экспериментальном анализе режима взаимной синхронизации прямоугольной решётки из 4-х антенн, отмечается наличие зависимости режима от размеров и расстояния между антеннами, однако в работе эти зависимости не анализируются.

6. В заключении отсутствуют количественные показатели достигнутой эффективности автогенераторов микроволнового излучения по сравнению с известными техническими решениями.

7. В тексте диссертации отсутствуют ссылки на использование материала опубликованных работ, что затрудняет оценку полноты изложения материалов диссертации в работах соискателя.

Отмеченные недостатки несколько снижают ценность представленной работы, однако не могут повлиять на положительную оценку диссертации в целом.

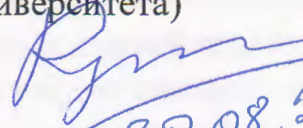
Диссертационная работа Телегина Сергея Александровича является самостоятельной, законченной научно-исследовательской работой. Автореферат отражает основное содержание диссертации. По актуальности, новизне, достоверности полученных результатов, научной и практической ценности результатов работа отвечает требованиям «Положения о присуждении учёных степеней», утвержденного постановлением Правительства Российской Федерации № 842 от 24 сентября 2013 г., предъявляемым к кандидатским диссертациям, а ее автор достоин присуждения ему ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.03 «Радиофизика».

Заведующий кафедрой «Теоретическая радиотехника»

Московского авиационного института

(национального исследовательского университета)

доктор технических наук, профессор

 Ю.В. Кузнецов
30.08.2017

Подпись Кузнецова Ю.В. заверяю:

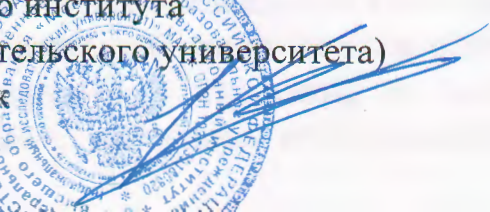
Декан факультета радиоэлектроники летательных аппаратов

Московского авиационного института

(национального исследовательского университета)

кандидат технических наук



 В.В. Кирдяшкин

Данные официального оппонента:

Кузнецов Юрий Владимирович

Доктор технических наук, специальность 05.12.04 - Радиотехника, в том числе системы и устройства телевидения

Почтовый адрес: Волоколамское шоссе, д. 4, г. Москва, А-80, ГСП-3, 125993

ФГБОУ ВО «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)»

Заведующий кафедрой «Теоретическая радиотехника»

Профессор