

На правах рукописи



ТЕЛЕГИН Сергей Александрович

**ГЕНЕРАЦИЯ МИКРОВОЛНОВОГО ИЗЛУЧЕНИЯ
МНОГОЭЛЕМЕНТНЫМИ АКТИВНЫМИ ИНТЕГРИРОВАННЫМИ
АНТЕННАМИ НА ПОЛЕВЫХ ТРАНЗИСТОРАХ**

Специальность 01.04.03 – Радиофизика

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание учёной степени
кандидата физико-математических наук

Фрязино – 2017

Работа выполнена в Фрязинском филиале Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН (ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН), Фрязино.

Научный руководитель: Любченко Владимир Евтихиевич
доктор физико-математических наук,
профессор

Официальные оппоненты: Кузнецов Юрий Владимирович
доктор технических наук, профессор,
зав. кафедрой 405 «Теоретическая
радиотехника» ФГБОУ ВО «Московский
авиационный институт (национальный
исследовательский университет)»

Шмелев Александр Борисович
доктор технических наук, профессор,
ведущий научный сотрудник автономной
экспертной группы ОАО «Радиотехнический
институт имени академика А.Л. Минца»

Ведущая организация: АО «НПП «Исток» им. А.И. Шокина»
(г. Фрязино)

Защита состоится «29» сентября 2017 г. в 10.00 на заседании диссертационного совета Д 002.231.02 на базе ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН по адресу: 125009, г. Москва, ул. Моховая 11, корп. 7.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на официальном сайте ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН:

<http://www.cplire.ru/rus/dissertations/Telegin/dissertation.pdf>

Автореферат разослан «___» _____ июля 2017 г.

Учёный секретарь
диссертационного совета
д.ф.-м.н.



Потапов А. А.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы

В связи с потребностями радиотехнических систем микроволнового (СВЧ) диапазона волн важным является вопрос создания компактных твердотельных источников излучения. Классические схемы, в которых генератор включает в себя источник электромагнитных колебаний, усилительный каскад и антенну, с повышением рабочей частоты становятся все менее эффективными из-за потери мощности в передающих линиях. В то же время на частотах порядка 10 ГГц и выше становится возможным использовать малогабаритные микрополосковые антенны и конструктивно интегрировать их с активным полупроводниковым элементом. Данное устройство обозначают термином микрополосковая активная антенна или антенна-генератор (АГ).

В настоящей работе на примере микрополосковой логопериодической антенны, интегрированной с полевым транзистором, рассматриваются проблемы генерации микроволнового излучения и взаимодействия элементов в источниках излучения, выполненных в виде многоэлементных антенных решеток.

Первые работы, описывающие данный тип антенн, появились в 60-х годах прошлого века, хотя сама идея интеграции антенны с генератором известна еще с конца 1920-х годов. Потенциальными преимуществами таких устройств являются малые размеры и масса, технологичность процесса изготовления, а также низкая себестоимость. Привлекательной представляется также возможность построения многоэлементных конструкций для увеличения мощности излучения и повышения коэффициента направленного действия.

В качестве активного элемента АГ используются двухэлектродные полупроводниковые приборы (диод Ганна, ЛПД, туннельный диод и т. п.), или трехэлектродные (биполярный или полевой транзистор). Двухэлектродные приборы успешно объединяются с микрополосковыми антеннами, однако имеют недостаточно высокий коэффициент полезного действия. Поэтому, несмотря на определенное усложнение конструкции, предпочтение отдается транзисторам. Пассивной антенной служат как частотно-селективные микрополосковые антенны, так и антенны, относящиеся к классу частотно-независимых (т.н. «галстук-бабочка», логопериодическая, спиральная и т. п.).

Важнейшим вопросом при проектировании и исследовании активных антенн является определение условий генерации на необходимой частоте или в полосе частот. Геометрические размеры антенны в данном случае являются лишь одним из параметров, определяющих спектр генерации. Во многих трудах исследователи указывают на несоответствие параметров генерации реальных активных антенн расчетным. Особенно усложняется ситуация в случае

многоэлементных конструкций, а именно такие устройства представляют наибольший практический интерес. При этом даже в случае одномерной решетки решение задачи требует проведения довольно сложных расчетов и экспериментальных исследований с учетом многих физических факторов, таких как:

- геометрические размеры антенны и материал подложки;
- характеристики активного элемента (транзистора);
- возможность возбуждения поверхностных волн в диэлектрике;
- электромагнитное взаимодействие между элементами.

Цель диссертационной работы

Целью настоящей работы являлась разработка конструкций многоэлементных решеток микрополосковых антенн, интегрированных с полевыми транзисторами, и создание на их основе источников излучения СВЧ диапазона. Для достижения поставленной цели в процессе выполнения работы были решены следующие задачи:

- компьютерное моделирование микрополосковых антенн, обеспечивающих работу АГ как в одночастотном, так и в многочастотном режиме ;
- исследование особенностей работы транзисторов в качестве активных элементов, возможности повышения КПД генерации и мощности суммарного сигнала антенн-генераторов в решетке;
- определение условий синхронизации решетки антенн-генераторов с помощью внешнего источника СВЧ излучения, а также путем взаимной синхронизации АГ;
- исследование способов вывода излучения, полученного с помощью активных интегрированных антенн, как в свободное пространство, так и в диэлектрический и полый металлический волноводы.

Научная новизна

- Получено распределение плотности электромагнитной энергии в области ближнего поля излучения микрополосковой логопериодической антенны. Расчеты проводились для типовых рабочих частот активных антенн.
- Для случая многоэлементных антенных решеток из активных антенн логопериодического типа определены условия взаимной и внешней синхронизации, а также влияние полупрозрачного диэлектрического зеркала на параметры генерируемого излучения.
- Осуществлена интеграция решетки из активных логопериодических антенн с волноводом, встроенным в диэлектрическую подложку.

Указанные результаты получены впервые.

Практическая ценность работы

- В процессе исследований созданы образцы активных интегрированных антенн и многоэлементных решеток, которые могут быть применены в качестве компактных источников излучения в коротковолновой части сантиметрового и миллиметровом диапазонах волн.
- Разработана конструкция и созданы лабораторные образцы СВЧ генераторов с выводом излучения как в свободное пространство, так и через диэлектрический или полый металлический волновод.

Основные положения, выносимые на защиту

- Конструкция микрополосковой антенны логопериодического типа является предпочтительной для создания широкополосных и многочастотных активных антенн (антенн-генераторов) СВЧ диапазона, в том числе с использованием полевых транзисторов.
- В условиях взаимной и внешней синхронизации излучателей в решетке АГ на полевых транзисторах осуществляется суммирование сигналов в пространстве с повышением выходной мощности, а также сужение диаграммы направленности излучения.
- Использование полупрозрачного диэлектрического зеркала позволяет до 3-х раз расширить полосу взаимной синхронизации АГ в решетке активных антенн и обеспечить эффективное суммирование мощности излучения отдельных АГ.
- Предложенная конструкция генератора на основе решетки логопериодических активных антенн и волновода, встроенного в диэлектрическую подложку, позволяет осуществлять вывод излучения не только в свободное пространство, но и значительной его части (десятки процентов) в диэлектрический и полый металлический волноводы.

Апробация работы

Результаты работы докладывались на международной конференции “The 6th ESA Workshop on Millimeter-Wave Technology and Applications and The 4th Global Symposium on Millimeter Waves GSMM2011”, (Espoo, Finland, 2011), на международной конференции “XXX URSI GA Scientific Symposium”, (Istanbul, Turkey, 2011), на 21-й международной конференции «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии» (Севастополь, Украина, 2012), на 9-м и 10-м Всероссийском семинарах по радиофизике миллиметровых и субмиллиметровых волн

(Нижний Новгород, 2013, 2016), на конференции, посвященной 70-летию ФГУП «НПП «ИСТОК», «СВЧ-ЭЛЕКТРОНИКА. 70 ЛЕТ РАЗВИТИЯ» (Фрязино, 2013), а также на конференции «2-я Московская Микроволновая неделя» (Москва, 2014).

Публикация результатов

Основное содержание диссертационной работы отражено в 12 печатных работах.

1. Любченко В. Е., Телегин С. А., Юневич Е. О., “Моделирование логопериодической печатной антенны методом пространственной матрицы передающих линий,” Радиотехника, 2013, № 4, с. 82-86.
2. Любченко В. Е., Юневич Е. О., Калинин В. И., Котов В. Д., Радченко Д. Е., Телегин С. А., “Генерация микроволнового излучения активными антеннами на полевых транзисторах в условиях синхронизации внешним сигналом,” Радиотехника и электроника, 2013, том 58, № 10, с. 1044-1047.
3. Любченко В. Е., Юневич Е. О., Калинин В. И., Котов В. Д., Радченко Д. Е., Телегин С. А., “Генерация микроволнового излучения активными антеннами на полевых транзисторах в квазиоптическом резонаторе,” Радиотехника и электроника, 2013, том 58, № 12, с. 1192-1196.
4. Любченко В. Е., Юневич Е. О., Калинин В. И., Котов В. Д., Радченко Д. Е., Телегин С. А., “Генерация микроволнового излучения активными антеннами на полевых транзисторах в квазиоптическом резонаторе,” Электронная техника. Серия 1 «СВЧ-техника», 2013, вып. 4(519), с. 120-124.
5. Любченко В. Е., Юневич Е. О., Калинин В. И., Котов В. Д., Радченко Д. Е., Телегин С. А., “Генерация микроволнового излучения активными антеннами на полевых транзисторах в условиях синхронизации внешним сигналом,” Электронная техника. Серия 1 «СВЧ-техника», 2013, вып. 4(519), с. 124-129.
6. V. E. Lyubchenko, E. O. Yunevich, V. I. Kalinin, V. D. Kotov, D. E. Radchenko, S. A. Telegin., “Active Integrated Antennas and Arrays with Field-Effect Transistors,” Telecommunication Sciences Ed. Tech. Univ. Kiiiv, 2012, v.3, N1, pp.55-60.
7. Любченко В. Е., Калинин В. И., Котов В. Д., Радченко Д. Е., Телегин С. А., Юневич Е. О., “Логопериодическая активная антенна, интегрированная с волноводом на диэлектрической подложке,” Известия академии инженерных наук им. А.М. Прохорова, 2014, № 3, с. 48-53.
8. Любченко В. Е., Радченко Д. Е., Телегин С. А., Юневич Е. О. Микрополосковая антенна-генератор. Патент на полезную модель №156623 с приоритетом от 23.06.2015 г., зарег. в Госреестре 16.10.2015г.

9. Любченко В. Е., Юневич Е. О., Калинин В. И., Котов В. Д., Радченко Д. Е., Телегин С. А., “Активные микрополосковые антенны и фазированные решетки на полевых транзисторах,” Радиоэлектроника. Наносистемы. Информационные технологии, 2015, том 7, № 1, с. 3-14.
10. Любченко В. Е., Юневич Е. О., Калинин В. И., Котов В. Д., Радченко Д. Е., Телегин С. А., “Многочастотная и хаотическая генерация в микрополосковой антенне, интегрированной с полевым транзистором,” [Электронный ресурс] Журнал радиоэлектроники, 2015, № 1, URL: <http://jre.cplire.ru/alt/jan15/5/text.html> (дата обращения: 05.01.2017).
11. Любченко В. Е., Калинин В. И., Котов В. Д., Радченко Д. Е., Телегин С.А., Юневич Е. О., “Генерация гармоник в схеме микрополосковой антенны-генератора, интегрированной с волноводом, встроенным в диэлектрическую подложку,” [Электронный ресурс] Журнал радиоэлектроники, 2016, № 2, URL: <http://jre.cplire.ru/koi/feb16/12/text.html> (дата обращения: 05.01.2017).
12. Любченко В. Е., Калинин В. И., Котов В. Д., Радченко Д. Е., Телегин С. А., Юневич Е. О., “Генерация и фильтрация СВЧ излучения в схеме микрополосковой антенны-генератора, интегрированной с волноводом, встроенным в диэлектрическую подложку,” [Электронный ресурс] Журнал радиоэлектроники, 2016, № 10, URL: <http://jre.cplire.ru/jre/oct16/12/text.html> (дата обращения: 05.01.2017).

Всего по результатам работы подготовлено более 20 публикаций (статей, патентов и тезисов докладов на конференциях).

Личный вклад автора

- Созданы трехмерные компьютерные модели микрополосковых активных антенн логопериодического типа и проведены эксперименты по компьютерному моделированию и расчету параметров антенн, в том числе распределения плотности электромагнитной энергии излучения.
- Спроектированы и изготовлены образцы активных антенн, в том числе, интегрированных с волноводом на диэлектрической подложке, проведены экспериментальные исследования по выводу излучения АГ в диэлектрический и полый металлический волноводы.
- Разработан специальный перестраиваемый источник питания, обеспечивающий независимое питание элементов решеток антенн-генераторов.
- Совместно с Юневичем Е.О. и Радченко Д.Е. проведены экспериментальные исследования по синхронизации антенн-генераторов и анализ полученных результатов.

Структура и объем работы

Диссертация состоит из введения, 5-и глав, заключения и списка литературы. В работе приводится 58 рисунков и 4 таблицы. Библиография содержит 86 наименований. Общий объем работы составляет 100 машинописных страниц.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении дается обоснование выбора темы диссертации, формулировка целей и задач, описание структуры диссертации.

Глава 1 является обзором литературы, в котором обсуждаются преимущества и недостатки существующих конструкций микрополосковых антенн-генераторов, а также области их применения. Проведенный анализ показывает, что, несмотря на то, что исследования по созданию активных антенн с использованием полупроводниковых приборов ведутся более 30 лет, и опубликовано большое количество работ, проблема остается актуальной, в особенности для миллиметрового диапазона волн. Большинство исследований в этой области проведено на частотах до 10 ГГц, и используемые в них подходы на более высоких частотах неэффективны.

Одной из наиболее важных задач является создание многоэлементных решеток антенн-генераторов, что связано с необходимостью обеспечить синхронизацию работы нескольких автогенераторов как по частоте, так и по фазе, а также эффективное суммирование сигналов и достаточно узкую диаграмму направленности излучения.

Для проектирования активных антенных решеток, расположенных на диэлектрической подложке, применяются различные схемы взаимодействия элементов. В общем случае взаимодействие может осуществляться как волнами в свободном пространстве, так и поверхностными волнами в подложке, при этом вклад каждого типа связи может быть больше или меньше в зависимости от геометрии антенны и типа среды, в которую происходит излучение. Если элементы решетки связаны посредством микрополосковых линий, то данный тип связи также необходимо учитывать. Кроме того, необходимо учитывать характеристики нелинейных активных элементов. В связи с этим в главе обсуждаются теоретические основы синхронизации антенн-генераторов при воздействии внешнего гармонического сигнала и в многоэлементных конструкциях.

В Главе 2 описывается расчет характеристик микроволнового излучения, генерируемого микрополосковой логопериодической антенной. Проводится сравнение с другими распространенными типами микрополосковых антенн.

В разделе 2.1 приводится описание методики исследования свойств микрополосковой логопериодической антенны и результаты моделирования. Для проведения моделирования в

работе используется метод пространственной матрицы передающих линий (3D-TLM). Он заключается в разбиении пространственной области на множество частей, представляющих собой передающие линии. Исследуемое пространство разбивается на трехмерную решетку с периодом D . Двенадцать полевых компонент представлены гибридной TLM ячейкой. Электрические и магнитные граничные условия представляются в виде короткозамкнутых цепей и цепей с открытыми концами. Магнитные и диэлектрические материалы учитываются путем включения участков длиной $\frac{1}{2}D$ в последовательные узлы (компоненты магнитного поля) и разомкнутых участков $\frac{1}{2}D$ в параллельные узлы (компоненты электрического поля). Потери представляются дополнительным сопротивлением параллельных узлов. Для заданной структуры вычисляется реакция во временной области, затем с помощью преобразования Фурье происходит расчет частотной характеристики.

Определение поля в дальней зоне производится путем интегрирования токов по эквивалентной поверхности. Преимущество эквивалентной поверхности заключается в том, что она позволяет автоматически учесть эффекты, связанные со свойствами материалов (диэлектриков, магнетиков) и источников энергии.

Эффективность ЛПА как излучателя изучалась с учетом возможности сравнения с результатами эксперимента.

В разделе 2.2 рассматриваются конструкции исследуемых микрополосковых антенн. Одна из сторон диэлектрика полностью металлизирована. В качестве диэлектрика использован материал ФЛАН-5 с диэлектрической проницаемостью $\epsilon = 5$. Моделировались размеры диэлектрической подложки 20мм x 20мм, с толщиной 0,5мм, 1,5мм, 2,0мм и 3,0мм. Антенны, описанные в данном разделе, рассчитывались исходя из желаемого значения длины волны в свободном пространстве $\lambda = 30$ мм. Во всех случаях считалось, что к антенне прикладывался шумоподобный сигнал с равномерным распределением спектральной плотности, амплитудой $U=0,1$ В.

Размеры логопериодической антенны выбирались исходя из условий резонанса наибольшего зубца на частоте 10 ГГц. Угол раствора антенны равняется 120° , область металлизации - 60° , период антенны (отношение длин соседних зубцов) - $\sqrt{2}$. Параметры были выбраны исходя из необходимости согласования с транзистором в условиях эксперимента в соответствии с имеющимися данными расчетов. Длина наибольшего зубца

$$L \approx \lambda_{\text{eff}} / 4$$

$$\lambda_{\text{eff}} = \lambda / \sqrt{\frac{\epsilon + 1}{2}} \quad (1)$$

Здесь λ - длина волны в вакууме. Для сравнения логопериодической антенны с антеннами другого типа были смоделированы микрополосковые прямоугольная и дипольная антенна, также рассчитанные на работу на частоте 10 ГГц.

Раздел 2.3 посвящен результатам моделирования, которые показывают, что логопериодическая антенна является наиболее предпочтительной из рассмотренных нами типов антенн вследствие ее широкополосных свойств, слабо зависящих от толщины диэлектрической подложки и обусловленных многорезонаторной конструкцией антенны. Анализ диаграмм направленности излучения антенн показал, что для логопериодической антенны характерно значение коэффициента направленности порядка 7 dBi, а основной лепесток ориентирован по нормали к плоскости антенны. В случае прямоугольной микрополосковой антенны влияние толщины диэлектрика на значения резонансных частот оказывается более существенным, и расчетное значение (10 ГГц) достигается при толщине диэлектрика равной примерно $\lambda_d/4$. Что касается диаграммы направленности прямоугольной антенны, то она сходна с диаграммой логопериодической антенны. Дипольная антенна продемонстрировала ожидаемый результат с единичным пиком на частоте 10 ГГц, положение которого практически не зависит от толщины диэлектрика. По сравнению с логопериодической и прямоугольной антенной коэффициент направленности данной антенны оказался меньше и находился в пределах 6,1- 6,7 dBi. Дополнительным преимуществом логопериодической антенны является то, что она обладает более предпочтительным для согласования с пространством излучения импедансом.

В разделе 2.4 приводится распределение поля в ближней зоне микрополосковых антенн. Анализ поля микрополосковой логопериодической антенны показал, что на основной резонансной частоте, определяемой длиной первого (наибольшего) зубца, основная мощность излучается не первым, а вторым по величине зубцом. Из картины распределения мощности следует также, что питание к активным элементам антенны необходимо подавать к краям лепестков антенны по линии симметрии антенны, т. к. данные области антенны свободны от высокочастотных токов.

Глава 3 посвящена анализу характеристик единичной активной логопериодической антенны-генератора на полевом транзисторе.

В конструкции антенны-генератора, представленной в разделе 3.1, в качестве пассивного излучающего элемента использовалась микрополосковая логопериодическая антенна, представленная на рис. 1а. К лепесткам антенны припаиваются затвор и сток полевого

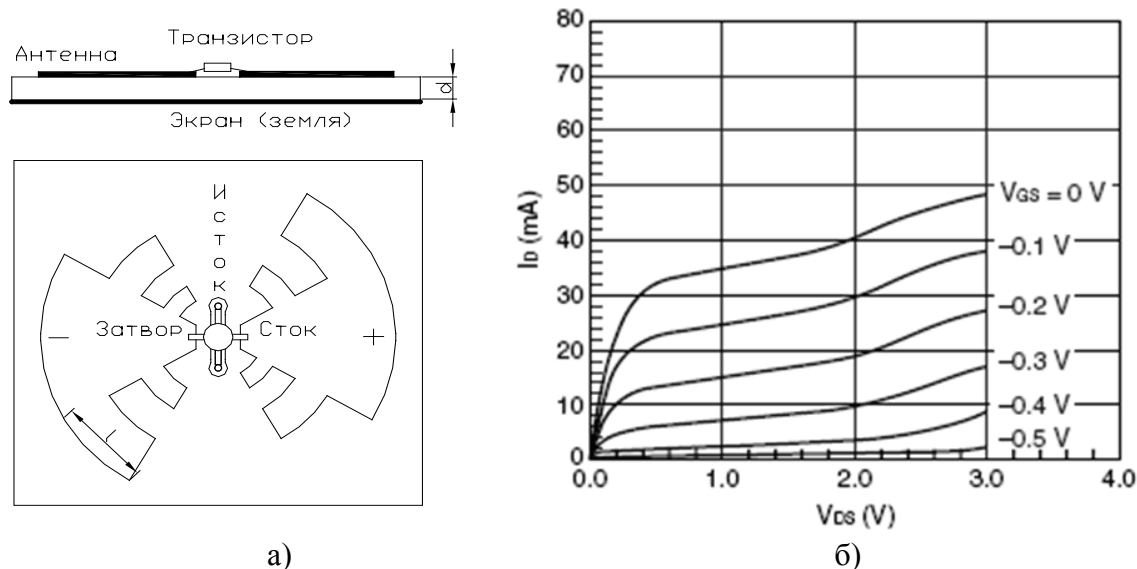


Рисунок 1. а) Конструкция антенны-генератора; б) Вольт-амперная характеристика транзистора.

транзистора. Исток транзистора соединяется с металлическим экраном с обратной стороны диэлектрической пластины. На затвор и сток подаются управляющие напряжения от источника питания. Экран антенны подключается к общему нулю источника питания. Типовые вольт-амперные характеристики используемых в работе транзисторов представлены на рис. 1б. В зависимости от величины подаваемых на антенну напряжений питания, можно изменять рабочую точку транзистора и тем самым влиять на параметры генерируемого излучения. Используемый в данной работе метод компьютерного моделирования позволяет вычислить значения тока и напряжения на портах моделируемого устройства, а также S-параметры пассивной антенны. Условия баланса фаз и амплитуд в данном случае имеют вид:

$$\left| \frac{S_{21}^T}{S_{12}^T} \right| |S_{21}^A| = 1 \text{ или } \lg \left(\left| \frac{S_{21}^T}{S_{12}^T} \right| |S_{21}^A| \right) = 0, \quad (2)$$

$$\varphi_{s_{T_{21}}} - \varphi_{s_{T_{12}}} + \varphi_{s_{A_{21}}} = 2\pi n, n = 0, 1, 2, \dots$$

Где $|S_{21}^T|$ и $|S_{12}^T|$ - соответствующие S-параметры транзистора, а коэффициент передачи антенны $|S_{21}^A|$ - определяется из результатов моделирования отклика на 2-м порту антенны при возбуждении только первого порта. Порты модели расположены между экраном и лепестками

антенны в местах предполагаемого подключения транзистора. Для антенны внешнего радиуса 7,062 мм анализ полученных данных показал, что в диапазоне частот от 10 ГГц до 22 ГГц условия баланса фаз и амплитуд выполняются на частоте 15,26 ГГц, что подтверждается данными эксперимента.

Эксперименты по изучению изготовленных образцов антенн (раздел 3.2) показали, что являясь многорезонаторной системой, логопериодическая АГ способна генерировать мощность на различных частотах или в многочастотном режиме. Решающую роль при этом играет частотная зависимость коэффициента усиления транзистора. Генерация наблюдалась при значениях коэффициента усиления транзистора более 10. В режиме одночастотной генерации результаты эксперимента достаточно хорошо согласуются с расчетом (рис. 2а). При этом максимальная излучаемая мощность обеспечивается при толщине диэлектрика $\lambda_d/4$.

Описанные в разделе 3.3 эксперименты по изучению облучения АГ электромагнитным полем внешнего источника показали, что при приближении частоты синхросигнала к собственной частоте генератора наблюдалось смещение частоты генерации к частоте синхросигнала, возникновение асинхронного взаимодействия с образованием комбинационных частот и характерного “адлеровского” спектра, а также последующий скачкообразный захват частоты в полосе, увеличивающейся с увеличением интенсивности облучения. Мощность внешнего сигнала, необходимая для осуществления захвата, на порядок меньше мощности автономно работающей АГ.

При воздействии на антенну-генератор внешнего сигнала также повышается величина положительной обратной связи и, вследствие этого, мощность излучения (рис. 2б).

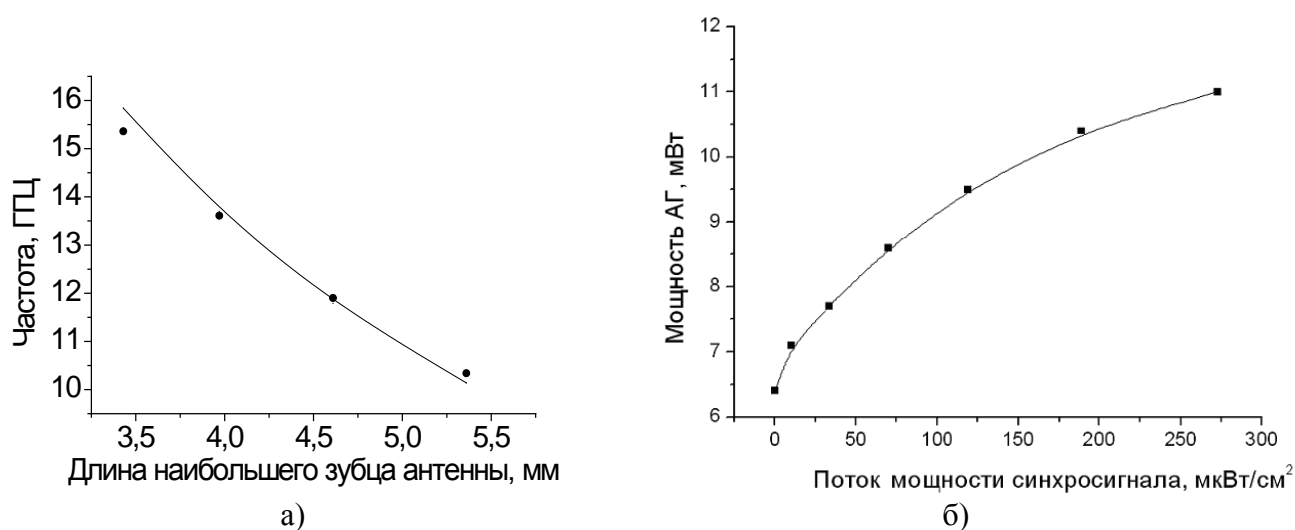


Рисунок 2. а) Зависимость частоты генерации АГ от геометрических размеров антенны: сплошная кривая – расчетные значения; точки – экспериментальные данные; б) Увеличение пиковой мощности АГ при облучении ее внешним синхросигналом.

Измерения спектров излучения показывают, что при синхронизации ширина спектральной линии уменьшается и приближается к спектру синхросигнала. Также уменьшается нестабильность частоты.

Установлено, что воздействие на антенну-генератор внешнего СВЧ поля позволяет синхронизировать автоколебания антенны-генератора в полосе частот порядка 150 МГц, что превышает возможный разброс частот автоколебаний отдельных генераторов в антенной решетке. Кроме того, внешняя синхронизация существенно улучшает параметры генерируемого сигнала: уменьшает ширину спектральной линии и нестабильность частоты, а также позволяет увеличить эффективность (КПД) генерации.

В Главе 4 рассмотрены основные возможности синхронизации элементарных излучателей в решетках активных антенн, имеющие ключевое значение при проектировании многоэлементных активных антенн-генераторов:

- взаимная синхронизация одно- и двумерных решеток активных антенн;
- внешняя синхронизация;
- влияние дополнительного полупрозрачного зеркала.

Производится расчет и апробация конструкции решеток из микрополосковых антенн, обеспечивающих работу в одночастотном и многочастотном режимах.

В разделе 4.1 показана возможность взаимной синхронизации одномерных и двумерных решеток из антенн-генераторов логопериодического типа.

Для обеспечения питания излучателей в решетках АГ в экспериментальных исследованиях был разработан специальный перестраиваемый источник питания, обеспечивающий независимое питание элементов решеток АГ. Параметры источника позволяют задавать общий режим работы (смещение затвора) и изменять напряжение стоков индивидуально для каждого из транзисторов, контролируя при этом ток в данной цепи.

Проведенные в работе эксперименты, показали, что при работе 2-х логопериодических антенн-генераторов, частоты генерации которых различаются менее чем на 50 МГц, может происходить их взаимная синхронизация. В результате осуществляется генерация и излучение решетки АГ на одной частоте, приблизительно соответствующей среднему арифметическому от собственных частот антенн. Установлено, что взаимное влияние излучателей осуществляется преимущественно путем возбуждения поверхностных волн в диэлектрической подложке. Если антенны расположены линейно и расстояние между центрами соседних антенн близко к длине волны в диэлектрике, происходит их взаимная синхронизация и когерентное суммирование мощностей излучения антенн-генераторов в пространстве, что подтверждается сужением общей диаграммы направленности (ДН) излучения (рис. 3).

Как показали наши экспериментальные исследования, при создании на одной подложке двумерной решетки АГ, несмотря на наличие частотной синхронизации, синхронное по фазе взаимодействие колебаний всех АГ в условиях экспериментов обеспечивалось лишь в некоторых случаях, в зависимости от размеров и расстояния между антеннами, и в ходе большинства экспериментов наблюдалась многолучевая ДН (рис. 3). Согласно теоретическим положениям, описанным в Главе 1 и подтвержденным для одномерных решеток, в двумерной матрице в условиях экспериментов также должна была обеспечиваться синхронизация по

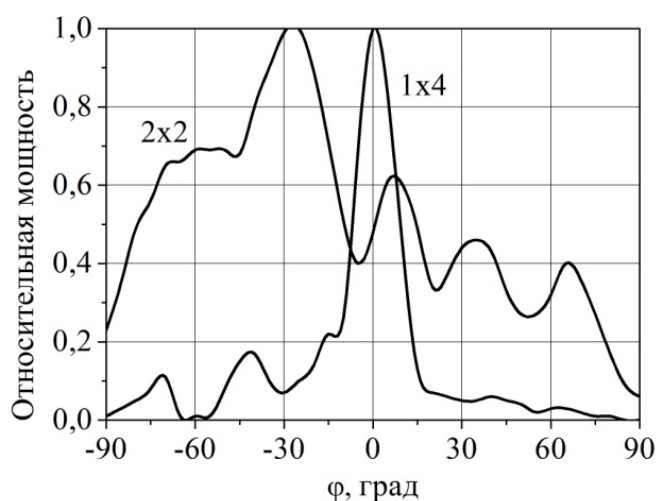


Рисунок 3. Диаграммы направленности взаимно синхронизированных АГ.

частоте и по фазе. Однако в реальности все элементы в двумерных решетках АГ взаимодействуют друг с другом, и не только с двумя соседними АГ в исследуемом случае, и для их корректного описания требуется уточнение модели взаимодействия генераторов.

Решить проблему синхронизации по частоте и по фазе большого количества независимых излучателей можно с помощью облучения решетки АГ внешним полем.

Раздел 4.2 посвящён исследованию внешней синхронизации решеток активных антенн логопериодического типа. Экспериментальные исследования возможности синхронизации многоэлементной активной антенны показали, что в случае уже взаимно синхронизированных АГ, диапазон частот внешнего сигнала, в котором имеет место синхронизация на частоте внешнего сигнала (полоса внешней синхронизации), зависит от количества работающих антенн-генераторов и потока мощности электромагнитного поля, воздействующего на АГ (рис. 4). Из рисунка видно, что при увеличении количества одновременно работающих АГ полоса синхронизации внешним сигналом уменьшается и монотонно растёт по мере увеличения потока мощности электромагнитного поля, воздействующего на решетку.



Рисунок 4. Зависимость полосы внешней синхронизации для отдельно взятой АГ (1) и линейных решеток из двух (2) и трех (3) взаимно синхронизированных АГ от потока мощности синхросигнала.

В случае одновременной работы нескольких излучателей в решетке и отсутствия между ними взаимной синхронизации, возможность внешней синхронизации определяется многими факторами – количеством АГ, расстройкой собственных частот и разбросом мощности генерации излучателей, геометрическим положением антенн, потоком мощности синхросигнала в месте расположения АГ. В линейной решетке из трех АГ синхронизация внешнем полем с потоком мощности 300 мкВт/см^2 достигается при условии, что разность двух соседних частот не превышает величину порядка 150 МГц . Это в несколько раз превышает допустимый разброс частот, при котором имеет место взаимная синхронизация.

Изменение спектра излучения линейной решетки при внешней синхронизации в зависимости от соотношения частот АГ и внешнего сигнала носит следующий характер. В отсутствие синхросигнала, за счет взаимодействия между генераторами, устанавливается асинхронный режим с многочастотным спектром колебаний. При воздействии внешнего синхросигнала вне полосы синхронизации наблюдается взаимная синхронизация АГ в более широкой полосе ($\sim 250 \text{ МГц}$) и устанавливается генерация всех антенн-генераторов на общей частоте, отличной от частоты воздействующего синхросигнала. Результирующий спектр излучения содержит общую частоту генерации, частоту синхросигнала и комбинационные составляющие между ними. При перестройке и вхождении синхросигнала в полосу захвата ($\sim 150 \text{ МГц}$) наблюдается полная синхронизация (захват) всей решетки АГ на частоте синхросигнала.

На рис. 5 приведены диаграммы направленности (ДН) решетки из трех АГ для различных случаев синхронизации, а в таблице 1 - результаты измерения параметров излучения ($P_{изм}$ – мощность в максимуме ДН, P_0 – полная мощность генерации). Из приведенных данных видно, что в линейной решетке частичное сужение диаграммы направленности может иметь место и в случае отсутствия синхронизации за счет асинхронного взаимодействия между АГ.

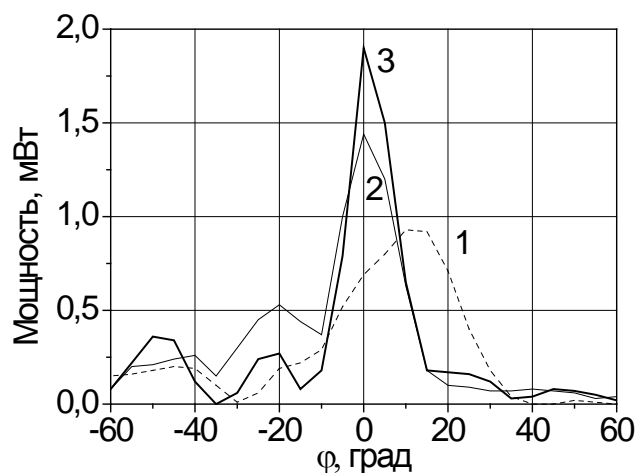


Рисунок 5. Диаграммы направленности излучения решетки: 1 - АГ не синхронизированы; 2 – взаимная синхронизация; 3 – внешняя синхронизация.

Однако ДН достаточно широкая, и максимум ее отклоняется от нормали. Взаимная синхронизация позволяет получить повышение мощности суммарного сигнала отдельных генераторов, а ширина ДН уменьшается в четыре раза по сравнению с автономно работающей антенной. Наличие синхросигнала приводит к дополнительному сужению диаграммы

Таблица 1 – Параметры излучения решетки АГ в различных режимах синхронизации

Параметры излучения	φ , град	$P_{изм}$, мВт	P_0 , мВт
Одиночная АГ	65	0,17	7
Решетка без синхронизации	30	0,93	14,90
Взаимная синхронизация	17	1,44	13,7
Внешняя синхронизация	13	1,9	14

направленности и росту излучаемой мощности. Как было показано в главе 3, под воздействием синхросигнала происходит значительное сужение ДН одиночной антенны генератора, что также способствует общему сужению диаграммы направленности решетки.

В разделе 4.3 рассмотрены условия частотной и фазовой синхронизации решетки антенн-генераторов, расположенных на общей диэлектрической подложке в резонаторе, образованном слоем металлизации обратной стороны подложки и полупрозрачным диэлектрическим отражателем. В процессе экспериментов было обнаружено, что расположение пластины из поликора параллельно плоскости антенн на расстоянии $d \sim 0,5\lambda$ приводит к увеличению полосы взаимной синхронизации соседних генераторов до 140 МГц. Данное значение почти втрое превышает полосу взаимной синхронизации в случае взаимодействия антенн за счет распространения поверхностной волны в подложке. Это можно объяснить тем, что отраженный сигнал образует стоячую волну, которая стимулирует синхронный режим генерации в решетке АГ. Как показано выше, в случае линейной решетки наблюдалась возможность увеличения мощности суммарного сигнала и в условиях взаимной синхронизации без использования дополнительного полупрозрачного отражателя, однако при синхронизации в резонаторе наблюдается значительный рост мощности излучения (рис. 6а). Это может быть связано с увеличением коэффициента обратной связи в каждой отдельной АГ под влиянием полупрозрачного зеркала.

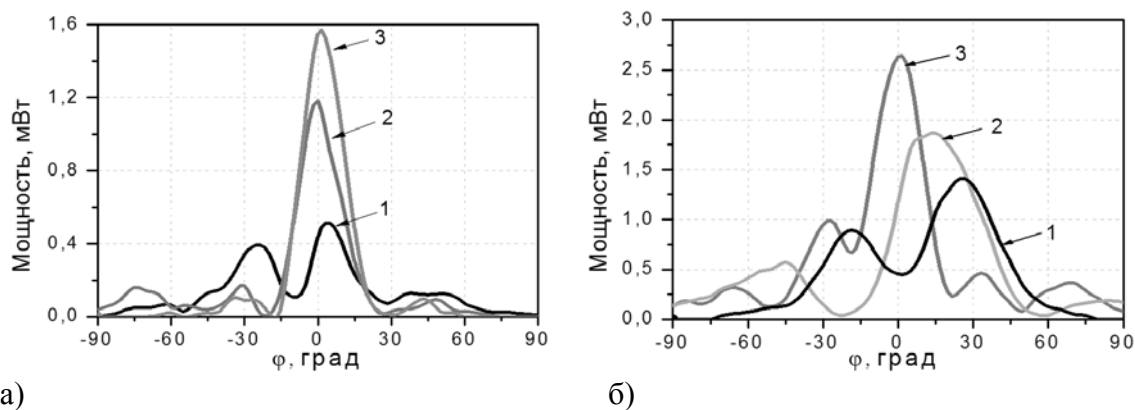


Рисунок 6. Диаграмма направленности решеток активных антенн: а) линейной 1x3, б) двумерной 2x2.

В решетке 2x2 вне резонаторной структуры взаимная синхронизация, в отличие от линейной решетки, не обеспечивает эффективного суммирования сигналов в нормальном направлении (кривая 2 на рис. 6б). При этом ДН остается широкой и направление главного лепестка отклоняется от нормали. В резонаторной структуре режим синхронного

взаимодействия осуществляется на общей частоте с синхронизацией фаз всех антенн-генераторов. В этом случае результирующая мощность направлена нормально к плоскости антенны и заметно явное сужение результирующей ДН плоской решетки из 4-х активных АГ, что подтверждает эффективность использования полупрозрачного отражателя для повышения коэффициента взаимной связи между антеннами-генераторами и осуществления эффективного суммирования сигналов от нескольких источников излучения данного типа.

В Главе 5 обсуждаются конструкции генератора на основе решетки антенн-излучателей, позволяющие улучшить условия взаимной синхронизации и повысить мощность суммарного сигнала. Также исследуются возможности эффективного вывода излучения, как в свободное пространство (раздел 5.1), так и в волновод. Рассмотрены перспективы применения микрополосковых интегрированных антенн-генераторов на полевых транзисторах в системах миллиметрового диапазона.

В разделе 5.2 изучена возможность вывода излучения активной антенны-генератора в планарное фидерное устройство, а именно волновод, интегрированный в диэлектрическую подложку - конструкцию, получившую широкое распространение в последние годы под названием SIW (рис. 7). Особенностью данных структур является то, что они сохраняют большинство преимуществ полых металлических волноводов: большая передаваемая мощность, полностью экранированная структура и высокая добротность резонаторов. При этом приобретаются особенности планарных структур: малые размеры и вес, низкая стоимость производства.

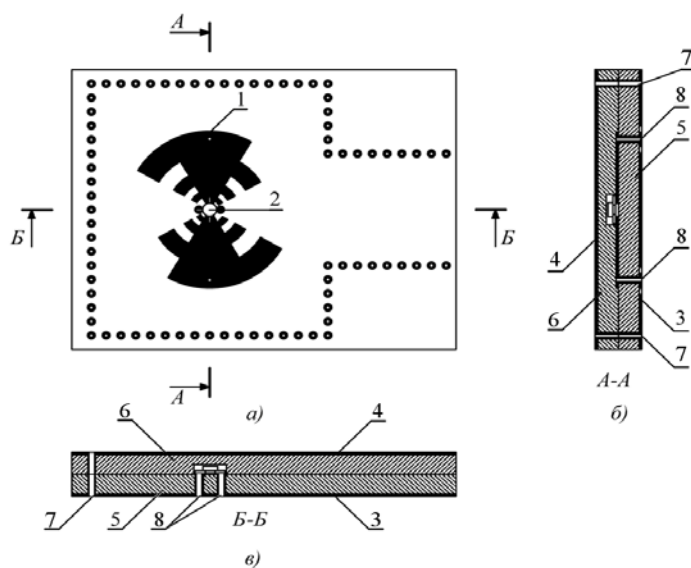


Рисунок 7. Конструкция СВЧ генератора на основе волновода интегрированного в подложку. 1 - логопериодическая антенна; 2 - транзистор; 3,4 - внешняя металлизация; 5, 6 – диэлектрические пластины; 7,8 – металлизированные отверстия.

Для первоначального расчета распределения поля в предполагаемой конструкции генератора использовались следующие параметры. Материал диэлектрика – Rogers 4350В ($\epsilon=3,66$), толщина обоих слоев диэлектрика – 1,5мм, расстояние между рядами отверстий – 10мм, диаметр отверстий – 1мм, расстояние между центрами соседних отверстий – 2мм. В качестве излучателя использовалась уже изученная нами логопериодическая антенна с внешним радиусом 7мм. Вместо транзистора использовались 2 дискретные порта, имитирующие соединения сток-исток и затвор-исток. Из полученных в результате компьютерного моделирования данных следует, что на частоте 15ГГц (основная мода для волновода) значительная часть энергии излучения отводится в область волновода.

В образующемся между пластинами резонаторе можно также расположить несколько планарных излучателей, обеспечив таким образом суммирование мощностей генераторов и вывод генерируемой мощности в планарный волновод (рис. 8).

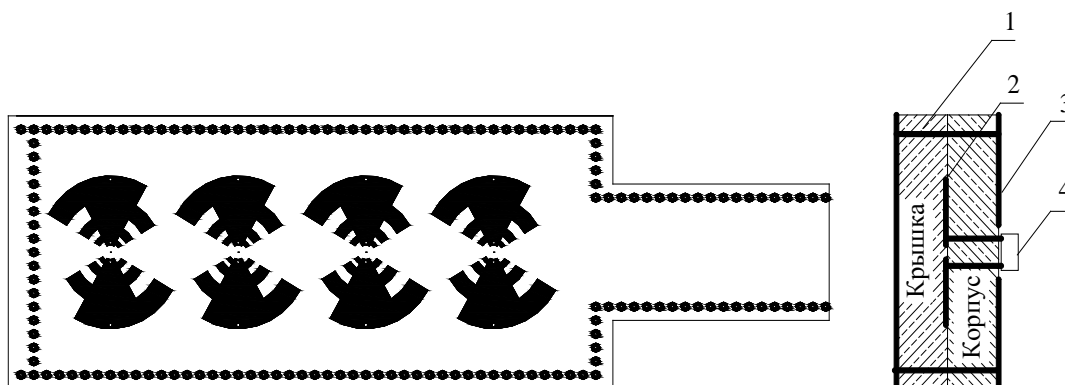


Рисунок 8. Конструкция источника СВЧ излучения на основе SIW –волновода и линейной решетки микрополосковых антенн-генераторов: а) – вид резонансной камеры со снятой крышкой; б) – камера в разрезе: 1- металлизированные отверстия; 2 – антенна; 3 – металлизация диэлектрика; 4 – транзистор.

Измерения спектров одиночных АГ показали, что их собственные частоты существенно отличаются. Так же отличаются и их мощности, измеряемые на выходе SIW волновода (табл. 2).

Установлено, что частота определяется в основном резонансными свойствами антенны, а уровень мощности излучения вблизи собственных частот резонатора незначителен, распределение поля внутри резонатора определяется геометрическим расположением АГ.

Проведенные ранее исследования сложения мощностей в пространстве такой же линейки из четырех АГ показали, что необходимым условием для синфазного сложения мощностей

Таблица 2 – Параметры одиночных антенн-генераторов

Номер АГ	Частота, ГГц	Мощность, мкВт
1	12,0	180
2	11,52	70
3	12,08	440
4	12,4	160

является различие собственных частот генераторов, не превышающее 50 МГц. В случае работы в резонаторе разброс частот может быть значительно больше (табл. 2). Данные измерения выходной мощности при одновременной работе нескольких АГ приведены в таблице 3.

Таблица 3 – Синхронизация АГ в волноводе

Работающие АГ	Частота, ГГц	Мощность, мкВт
1+2	Не синхронизируются	320
1+2+3	12,32	320
1+2+3+4	12,34	1500

Установлено, что суммарная мощность при одновременной работе 4-х АГ может составлять до 2 мВт. Таким образом, при соединении четырех антенн в линейную решетку, помещенную в SIW резонатор, имеет место их взаимная синхронизация, несмотря на большую разницу собственных частот отдельных антенн-генераторов, а суммарная мощность более чем вдвое превышает сумму мощностей отдельных антенн.

SIW-волновод можно спроектировать так, что для первой гармоники он является запертым, вторая же гармоника беспрепятственно в нем распространяется. Для апробации идеи было создано два макета SIW-генераторов рассчитанных на частоту около 12 ГГц по первой гармонике. Материалом диэлектрической подложки служил Arlon AD255 толщиной 2 мм (общая толщина двух пластин 4 мм). В качестве активного элемента использовался полевой транзистор NE350184с с коэффициентом усиления 13,5дБ на частоте 20ГГц. В результате эксперимента максимальная измеренная мощность на выходе из волновода конструкции, рассчитанной на первую гармонику, составила порядка 1 мВт. При этом, как и ожидалось, конструкция, рассчитанная на вторую гармонику, эффективно отсекала первую гармонику и на выходе волновода мощность второй гармоники составила порядка 100мкВт. Для сравнения, полная мощность, генерируемая АГ в открытое пространство (т.е. вне закрытого резонатора) составила 5 мВт.

В разделе 5.3 обсуждаются возможности применения антенн-генераторов в миллиметровом диапазоне волн. Перспективными решениями представляются: генерация на гармониках, повышение связанности генераторов с использованием передающих линий, а также переход к монолитному исполнению антенны-генератора.

Особо отметим, что предложенная в диссертации конструкция решеток из активных логопериодических антенн позволяет осуществлять суммирование сигналов на третьей гармонике с применением распространенных транзисторов диапазона 26 ГГц и тем самым обеспечить выход в частоты свыше 60 ГГц без применения умножителей частоты.

В Заключении приведены основные результаты диссертационной работы.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЫ

- Для микрополосковых активных антенн логопериодического типа предложенная эквивалентная модель позволила при помощи 3D-TLM метода смоделировать основные параметры генерируемого антенной излучения.
- В рамках предложенной модели впервые исследовано распределение плотности электромагнитной энергии ближнего поля области формирования излучения микрополосковой активной логопериодической антенной. Расчеты проводились для типовых рабочих частот активных антенн.
- С помощью разработанной модели рассчитаны параметры интегрированных логопериодических антенн, работающих как в одночастотном, так и в многочастотном режимах. Изготовлены лабораторные образцы для проведения экспериментальных исследований.
- Для случая многоэлементных решеток из антенн логопериодического типа исследованы условия взаимной и внешней синхронизации, изучено влияние полупрозрачного диэлектрического зеркала на условия генерации.
- Получено эффективное суммирование мощности сигналов в пространстве для одномерной и двумерной решеток.
- Осуществлена интеграция активных логопериодических антенн-генераторов и планарного волновода на диэлектрической подложке для эффективного вывода излучения.

ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЫ

- [A1] Любченко В. Е., Телегин С. А., Юневич Е. О., “Моделирование логопериодической печатной антенны методом пространственной матрицы передающих линий,” Радиотехника, 2013, № 4, с. 82-86.
- [A2] Любченко В. Е., Юневич Е. О., Калинин В. И., Котов В. Д., Радченко Д. Е., Телегин С. А., “Генерация микроволнового излучения активными антеннами на полевых транзисторах в условиях синхронизации внешним сигналом,” Радиотехника и электроника, 2013, Том 58, N 10, с. 1044-1047.
- [A3] Любченко В. Е., Юневич Е. О., Калинин В. И., Котов В. Д., Радченко Д. Е., Телегин С. А., “Генерация микроволнового излучения активными антеннами на полевых транзисторах в квазиоптическом резонаторе,” Радиотехника и электроника, 2013, Том 58, N 12, с. 1192-1196.
- [A4] Любченко В. Е., Юневич Е. О., Калинин В. И., Котов В. Д., Радченко Д. Е., Телегин С. А., “Генерация микроволнового излучения активными антеннами на полевых транзисторах в квазиоптическом резонаторе,” Электронная техника. Серия 1 «СВЧ-техника», 2013, вып. 4(519), с. 120-124.
- [A5] Любченко В. Е., Юневич Е. О., Калинин В. И., Котов В. Д., Радченко Д. Е., Телегин С. А., “Генерация микроволнового излучения активными антеннами на полевых транзисторах в условиях синхронизации внешним сигналом,” Электронная техника. Серия 1 «СВЧ-техника», 2013, вып. 4(519), с. 124-129.
- [A6] V. E. Lyubchenko, E. O. Yunevich, V. I. Kalinin, V. D. Kotov, D. E. Radchenko, S. A. Telegin., Active Integrated Antennas and Arrays with Field-Effect Transistors, Telecommunication Sciences Ed. Tech. Univ. Kiiv, 2012, v.3, N1, pp. 55-60.
- [A7] Любченко В. Е., Калинин В. И., Котов В. Д., Радченко Д. Е., Телегин С. А., Юневич Е. О., “Логопериодическая активная антенна, интегрированная с волноводом на диэлектрической подложке,” Известия академии инженерных наук им. А.М. Прохорова, 2014, N 3, с. 48-53.
- [A8] V. E. Lyubchenko, E. O. Yunevich, V. I. Kalinin, V. D. Kotov, D. E. Radchenko, S. A. Telegin., “Quasi-optical power combining in the active antenna arrays,” Proc. of the 22nd International Crimean Conference Microwave and Telecommunication Technology (CriMiCo), 2012, pp. 116 – 117.

- [A9] V. E. Lyubchenko, E. O. Yunevich, V. I. Kalinin, V. D. Kotov, S. A. Telegin., “Space power combining in the active antenna array,” Proc. of the 22nd International Crimean Conference Microwave and Telecommunication Technology (CriMiCo), 2012, pp. 118 – 119.
- [A10] V. E. Lyubchenko, V. I. Kalinin, V. D. Kotov, S. A. Telegin, E. O. Yunevich, "Active Log-Periodic Antennas for Spatial and Quasi-Optical Microwave Power Combining", Proc. of the Millimeter Wave Days: The 6th ESA Workshop on Millimeter-Wave Technology and Applications, and The 4th Global Symposium on Millimeter Waves GSMM2011, May 23-25, 2011, Espoo, Finland.
- [A11] Любченко В. Е., Юневич Е. О., Калинин В. И., Котов В. Д., Радченко Д. Е., Телегин С. А., “Генерация микроволнового излучения активными антеннами на полевых транзисторах в условиях синхронизации внешним сигналом,” Тезисы докладов IX Всероссийского семинара по радиофизике миллиметровых и субмиллиметровых волн. Нижний Новгород, 2013 г, с. 71.
- [A12] Любченко В. Е., Юневич Е. О., Калинин В. И., Котов В. Д., Радченко Д. Е., Телегин С. А., “Генерация микроволнового излучения активными антеннами на полевых транзисторах в квазиоптическом резонаторе,” Тезисы докладов IX Всероссийского семинара по радиофизике миллиметровых и субмиллиметровых волн. Нижний Новгород, 2013 г, с. 67.
- [A13] Любченко В. Е., Радченко Д. Е., Телегин С. А., Юневич Е. О. Микрополосковая антенна-генератор. Патент на полезную модель №156623 с приоритетом от 23.06.2015 г., зарег. в Госреестре 16.10.2015г.
- [A14] Любченко В. Е., Юневич Е. О., Калинин В. И., Котов В. Д., Радченко Д. Е., Телегин С. А., “Активные микрополосковые антенны и фазированные решетки на полевых транзисторах,” Радиоэлектроника. Наносистемы. Информационные технологии, 2015, том 7, № 1, с. 3-14.
- [A15] Любченко В. Е., Юневич Е. О., Калинин В. И., Котов В. Д., Радченко Д. Е., Телегин С. А., “Многочастотная и хаотическая генерация в микрополосковой антенне, интегрированной с полевым транзистором,” [Электронный ресурс] Журнал радиоэлектроники, 2015, № 1, URL: <http://jre.cplire.ru/alt/jan15/5/text.html> (дата обращения: 05.01.2017).

- [A16] Любченко В. Е., Калинин В. И., Котов В. Д., Радченко Д. Е., Телегин С.А., Юневич Е. О., “Генерация гармоник в схеме микрополосковой антенны-генератора, интегрированной с волноводом, встроенным в диэлектрическую подложку,” [Электронный ресурс] Журнал радиоэлектроники, 2016, № 2, URL: <http://jre.cplire.ru/koi/feb16/12/text.html> (дата обращения: 05.01.2017).
- [A17] Любченко В. Е., Калинин В. И., Котов В. Д., Радченко Д. Е., Телегин С. А., Юневич Е. О., “Генерация и фильтрация СВЧ излучения в схеме микрополосковой антенны-генератора, интегрированной с волноводом, встроенным в диэлектрическую подложку,” [Электронный ресурс] Журнал радиоэлектроники, 2016, № 10, URL: <http://jre.cplire.ru/jre/oct16/12/text.html> (дата обращения: 05.01.2017).
- [A18] Любченко В. Е., Юневич Е. О., Калинин В. И., Котов В. Д., Радченко Д. Е., Телегин С. А., “Многочастотная и хаотическая генерация в микрополосковой антенне, интегрированной с полевым транзистором”, 2-я Московская микроволновая неделя, Москва, 2014г, Сборник докладов, с. 35-39.
- [A19] Телегин С. А., Любченко В. Е., Юневич Е. О., Радченко Д. Е., Калинин В. И., Котов В. Д., “Логопериодическая активная антенна, интегрированная с волноводом на диэлектрической подложке,” 2-я Московская микроволновая неделя, Москва, 2014г, Сборник докладов, с. 52-56.
- [A20] Любченко В. Е., Радченко Д. Е., Телегин С. А., Юневич Е. О., “Микрополосковая антенна-генератор с выводом излучения в волновод, встроенный в диэлектрическую подложку,” Тезисы докладов X Всероссийского семинара по радиофизике миллиметровых и субмиллиметровых волн, Нижний Новгород, 2016г, с.71-72.