



Клюев Андрей Викторович

**ПРЕОБРАЗОВАНИЕ РАДИОСИГНАЛОВ В ПАРАМЕТРИЧЕСКИХ
РАСSEИВАТЕЛЯХ**

Специальность 05.12.04 - Радиотехника, в том числе системы и устройства
телевидения

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Шуя – 2016

Работа выполнена в ФГБОУ ВО «Ивановский государственный университет», Шуйский филиал.

Научный руководитель: **Бабанов Николай Юрьевич**,
доктор технических наук, доцент, проректор по научной работе
ФБГОУ ВО «Нижегородский государственный технический
университет им. Р.Е. Алексеева»

Официальные
оппоненты: **Щитов Аркадий Максимович**,
доктор технических наук, старший научный сотрудник, ведущий
научный сотрудник, ОАО «ФНПЦ Нижегородский научно-
исследовательский приборостроительный институт «Кварц»
им. А.П. Горшкова»

Рябокоть Алексей Владимирович,
кандидат технических наук, инженер 1 категории
ОАО «Владимирское конструкторское бюро радиосвязи»

Ведущая организация: ФГАО ВО «Национальный исследовательский Нижегородский
государственный университет им. Н.И. Лобачевского»

Защита диссертации состоится «13» декабря 2016 г. в 14-00 ч. на заседании диссертационного совета Д212.025.04 при Владимирском государственном университете имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых по адресу : 600000, г. Владимир, ул. Горького, д.87, ВлГУ, ФРЭМТ, корпус 3, ауд. 301.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВО Владимирского государственного университета имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых и на сайте <http://www/vlsy.ru>.

Автореферат разослан «6» октября 2016 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета Д212.025.04,
доктор технических наук, профессор



А.Г. Самойлов

Актуальность темы

Настоящая работа относится к исследованиям эффекта нелинейного рассеивания радиоволн на объектах, содержащих точечные нелинейности. Одним из направлений прикладного применения данного эффекта является использование пассивных нелинейных радиоответчиков в качестве радиомаркеров. Их целесообразно применять тогда, когда не представляется возможным использовать активные радиомаяки, требующие периодического обслуживания или в условиях сильных переотражений от границы раздела сред и местных предметов.

Работы по исследованию эффекта нелинейного рассеяния радиоволн, выполненные под руководством В. Б. Штейншлейгера, А. А. Горбачева, Н. С. Вернигорова, В. С. Парватова, Г. Д. Михайлова, Б. М. Петрова, Т. М. Заборонковой, Д. М. Семенихиной, Г. Н. Щербакова, С. В. Ларцова, С. Н. Разьникова, А. В. Николаева, С. Н. Панычева, Н. Ю. Бабанова показали, что с помощью пассивных нелинейных радиоответчиков могут решаться многие актуальные практические задачи, такие как: создание эталонных безфидерных источников электромагнитного излучения в радиодиапазоне, определение распределения поля источников электромагнитного излучения, маркировка товаров, людей, объектов, грузов и маршрутов движения, создание нелинейных помех радиоприему, обнаружения оказавшихся за бортом людей, предварительно оснащенных спасательным жилетом с пассивным нелинейным радиоответчиком.

Среди пассивных нелинейных радиоответчиков наиболее сильный уровень ответных сигналов наблюдается от параметрических рассеивателей, у которых частота ответного сигнала равна половине частоты запросного сигнала.

Параметрический рассеиватель состоит из антенной части, принимающей запросный сигнал и переизлучающий ответный сигнал в окружающее пространство, и параметрического генератора, для которого запросный сигнал выступает сигналом накачки. Ответный сигнал появляется как результат возбуждения параметрического генератора на половинной частоте сигнала накачки, которым может быть простейший электрический контур с нелинейной емкостью, в качестве которой выступает полупроводниковый диод (см. рис. 1). Простота и дешевизна конструкции параметрического рассеивателя так же является привлекательной чертой его применения для целей радиомаркировки объектов.

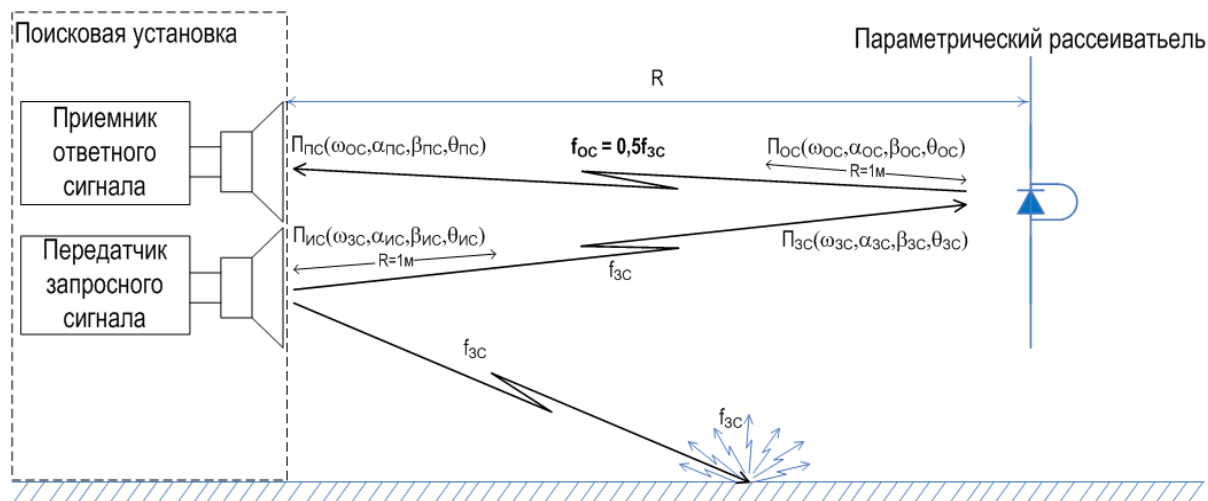


Рис.1. Объект исследования

Использование параметрических рассеивателей в практических задачах предполагает учет целого ряда их специфических свойств и особенностей, что привело к созданию отдельного научного направления, в рамках которого и выполнено данное диссертационное исследование.

Степень разработанности темы

Практически все известные из публикаций параметрические рассеиватели представляли собой дипольные или рамочные конструкции, при этом не ставилась задача совершенствования конструкции параметрических рассеивателей. Многие работы посвящены идее маркировки различных объектов с помощью параметрических рассеивателей, однако не обсуждался их конструктив, при этом дипольные или рамочные параметрические рассеиватели не годятся для решения этой задачи из-за сильного влияния объектов на антенную часть. Такое положение дел было связано с отсутствием теории параметрических рассеивателей, в построении которой автор принимал активное участие под руководством научного руководителя. Отдельным результатам, полученным в рамках работ по созданию теории параметрических рассеивателей и посвящена настоящая работа.

Цель настоящей работы

Разработка путей повышения эффективности систем радиомаркировки на основе результатов натурных экспериментов и моделирования процессов преобразования радиосигналов в параметрических рассеивателях и приемнике поисковой установки.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие **задачи**:

1. Разработать методику моделирования реакции параметрических рассеивателей на внешнее воздействие на основе их представления четырехполюсниками при помощи процессной модели и использования расчетных программных комплексов по анализу нелинейных радиотехнических схем;
2. Апробировать новые конструкции параметрических рассеивателей - четырехполюсников на основе моделирования процессов преобразования радиосигналов в параметрических рассеивателях и результатов натурных экспериментов;
3. Апробировать применение в запросном сигнале сигнала накачки в виде последовательности ЛЧМ радиоимпульсов.

Методы исследования. При решении поставленных задач в работе были использованы методы математического анализа, теории дифференциальных уравнений, теории радиоцепей, теории параметрических генераторов, теории длинных линий, методов оптимального приема радиосигналов, методов компьютерного моделирования.

Объектом исследования являются процессы преобразования радиосигналов в пассивных параметрических рассеивателях и способы обработки ответных сигналов, рассеянных параметрическими рассеивателями, в приемнике системы радиомаркировки, использующей параметрические рассеиватели.

Предметом исследования являются новые конструкции параметрических рассеивателей и запросный сигнал, в котором в качестве сигнала накачки используются ЛЧМ радиоимпульсы.

Научная новизна заключается в том, что:

1. Разработана методика моделирования амплитудной характеристики параметрического рассеивателя – четырехполюсника на основе использования расчетных программных комплексов по анализу нелинейных радиотехнических схем с учетом представления параметрических рассеивателей в виде процессной модели, которая дополняет известные методы анализа свойств параметрических рассеивателей;
2. Предложены новые параметрические рассеиватели – четырехполюсники в виде полосковых конструкций;
3. На основе натурального и численного экспериментов проведена апробация новых конструкций параметрических рассеивателей:

- показано, что новая конструкция параметрического рассеивателя с мостовой нагрузкой из четырех параметрических генераторов обладает наилучшими показателями, как по уровню ответного сигнала, так и минимальному уровню сигнала накачки необходимому для возбуждения такого рассеивателя;
 - показано, что увеличение числа параметрических генераторов в нагрузке параметрического рассеивателя можно рассматривать, как возможный путь расширения полосы генерации, при этом с ростом числа параметрических генераторов в нагрузке растет, как уровень максимально-возможного ответного сигнала, так и уровень сигнала накачки необходимого для возбуждения параметрического рассеивателя.
4. Доказана возможность повышения эффективности систем радиомаркировки, использующих параметрические рассеиватели на основе применения новых конструкций параметрических рассеивателей в виде четырехполосников с оптимальными значениями входных сопротивлений антенн сигнала накачки и ответного сигнала и способа формирования ответного сигнала в виде последовательности ЛЧМ радиоимпульсов.

Результаты работы, имеющие **практическую значимость**:

1. Разработан метод формирования прямоугольных радиоимпульсов ответного сигнала, по которому перед облучением параметрического рассеивателя прямоугольным радиоимпульсом сигнала накачки он облучается коротким синхронизирующим сигналом с частотой ответного сигнала и амплитудой в Q раз меньше амплитуды радиоимпульса сигнала накачки, где Q – добротность параметрического контура в нагрузке параметрического рассеивателя;
2. Определены перспективные направления повышения эффективности систем радиомаркировки, использующие параметрические рассеиватели;
3. Созданы и апробированы новые конструкции полосковых параметрических рассеивателей - четырехполосников (мостового параметрического рассеивателя и трехгенераторного параметрического рассеивателя).

Результаты работы, имеющие **теоретическую значимость**:

1. Доказано, что оптимизация значений сопротивлений антенны сигнала накачки и антенны ответного сигнала позволяет увеличить примерно на порядок уровень ответного сигнала от параметрического рассеивателя – четырехполосника;

2. Для учета частотных свойств антенн параметрического рассеивателя предложено замещать их на эквивалентной схеме последовательным колебательным контуром с сопротивлением, равным сопротивлению излучения антенны;
3. Показано, что с ростом числа параметрических контуров в нагрузке дипольного параметрического рассеивателя увеличиваются значения максимальной амплитуды ответного сигнала и уровня сигнала накачки, достаточного для возбуждения дипольного параметрического рассеивателя;
4. Изучены факторы, влияющие на форму и длительность переходных процессов при возбуждении ответного сигнала в параметрическом рассеивателе;
5. Проведена модернизация методов формирования ответных сигналов в параметрическом рассеивателе в виде ЛЧМ радиоимпульсов, которые могут быть подвергнуты компрессии в приемнике, при этом обеспечивается возможность когерентного накопления последовательностей радиоимпульсов ответного сигнала и эффективное ослабление синхронизирующих сигналов, представляющих собой короткие ЛЧМ радиоимпульсы с обратным законом изменения частоты.

Результаты и научные положения, выносимые на защиту

- 1) Метод моделирования амплитудной характеристики параметрического рассеивателя – четырехполюсника, ориентированный на использование расчетных программных комплексов по анализу нелинейных радиотехнических схем и представление параметрических рассеивателей в виде процессной модели.
- 2) Результаты апробации новых конструкций параметрических рассеивателей - четырехполюсников на основе моделирования процессов преобразования радиосигналов в параметрических рассеивателях и натурных экспериментов.
- 3) Предложенные и апробированные на основе моделирования и натурных экспериментов новые конструкции полосковых параметрических рассеивателей.
- 4) Новый способ формирования запросного сигнала, позволяющий получить ответный сигнал в виде ЛЧМ радиоимпульса и существенно ослабляющий импульсы синхронизации в приемнике поисковой установки.

Личный вклад

Работа выполнена под научным руководством д. т. н., доцента Н. Ю. Бабанова, предложившего общее направление исследований и участвовавшего в получении и обсуждении некоторых результатов. Большая часть результатов получена лично

автором, в частности к таким результатам относятся исследования полосковых параметрических рассеивателей.

Достоверность обеспечивается для экспериментальных результатов их повторяемостью, для теоретических выводов и обобщений - подтверждается результатами экспериментов. Кроме того, полученные результаты опираются, подтверждают и развивают научные результаты, полученные другими исследователями.

Апробация работы.

Результаты работы докладывались и обсуждались на научно-технических конференциях и семинарах:

- 1) Десятой международной научной конференции «Перспективные технологии в средствах передачи информации – ПТСПИ-2013».- 26-28 июня 2013г.- Владимир.
- 2) Двадцать первой международной научно-технической конференции. «Информационные системы и технологии ИСТ-2015».- Нижний Новгород.- НГТУ.
- 3) Девятнадцатой научной конференции по радиофизике, посвященной 70-летию радиофизического факультета.- Н.Новгород.- ННГУ.- 2015.
- 4) Восьмой международной научной конференции «Шуйская сессия студентов, аспирантов, педагогов, молодых ученых “Университет - новой школе”», г.Шуя 18-19 июня 2015г.
- 5) Международной научно-технической конференции, INTERMATIC – 2015, МИРЭА, Москва, 1 – 5 декабря 2015 г.
- 6) Двадцать второй международной научно-технической конференции «Информационные системы и технологии» ИСТ–2016 посвященная 80-летию РТФ – ФРК – ФИСТ – ИРИТ, - Нижний Новгород, -ННГУ.- 2016г.

Публикации по теме работы

По тематике исследования опубликовано 13 научных статей, из них 4 в изданиях, рекомендованных ВАК РФ и патент на изобретение.

Внедрение результатов работы

Результаты диссертации внедрены в ФГУП РФЯЦ- ВНИИЭФ (г. Саров).

Структура и объем диссертации.

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы и изложена на 179 страницах, включает 94 рисунка. Список литературы содержит 116 источников.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обосновывается актуальность исследований, проводимых в рамках данной диссертационной работы, ставятся задачи работы, формулируется цель, научная новизна, теоретическая и практическая значимость работы.

Первая глава посвящена анализу актуальных задач в области изучения параметрических рассеивателей. Рассмотрено состояние исследований по тематике изучения параметрических рассеивателей, в рамках которого представлен обзор литературы, на основе которого определены перспективные задачи исследования.

Здесь же представлена методика моделирования зависимостей, характеризующих свойства параметрических рассеивателей, в частности амплитудной характеристики. Методика ориентирована на использование методов математического моделирования процессов, протекающих в нелинейных и параметрических электрических схемах, в частности, методологии, развиваемой д.т.н., профессором Н.И. Бирюком. Задача моделирования свойств параметрических рассеивателей решается в два этапа: 1) моделирование нелинейного преобразования запросного сигнала в ответный сигнал в эквивалентной схеме параметрического рассеивателя (токов и напряжений) и 2) преобразование найденных характеристик в зависимости, связывающие параметры волны запросного сигнала с параметрами волны ответного сигнала.

Вторая глава посвящена численному моделированию дипольных параметрических рассеивателей по методике, описанной в первом разделе.

На первом этапе выполнялось моделирование свойств параметрических рассеивателей - двухполюсников, в виде полуволновых диполей (на частоте сигнала на накачки), нагруженных на несколько, последовательно включенных параметрических генераторов. Каждый из параметрических генераторов представлял собой электрический контур, состоящий из индуктивности в виде проволочной дужки и нелинейной емкости, роль которой выполнял полупроводниковый диод ДЗ11. При помощи таких конструкций параметрических рассеивателей рассмотрена возможность расширения частотного диапазона генерации ответного сигнала. В частности, с этой целью исследован дипольный двухгенераторный параметрический рассеиватель, структурная схема которого представлена на рис. 2, а эквивалентная схема на рис.3.

На эквивалентной схеме на рис.3 полупроводниковый диод представляется в

виде параллельно соединенных нелинейной емкости $C(U)$ и нелинейной проводимости $g(u)$. Сигнал накачки в соответствии с теоремой Нортонa моделируется ЭДС $e(t)=E_{CH}COS(\omega_{CH}t)$ с внутренним сопротивлением, равным сопротивлению излучения антенны. Антенна в эквивалентной схеме параметрического рассеивателя представлена в виде последовательного электрического контура, настроенного на частоту запросного сигнала, соответственно сопротивление контура равно сопротивлению излучения антенны. Это позволило учесть частотные свойства дипольной антенны.

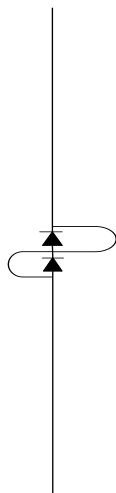


Рис.2. Структурная схема дипольного двухгенераторного параметрического рассеивателя

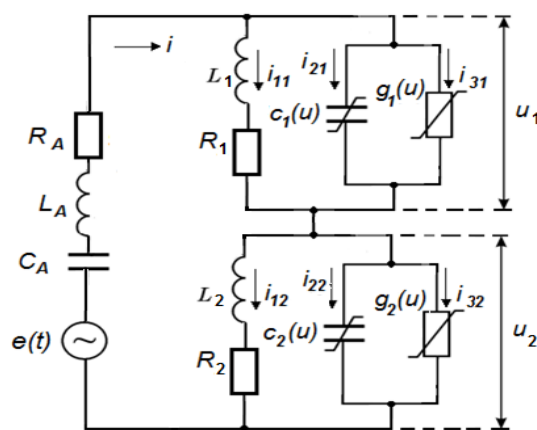


Рис.3. Эквивалентная схема дипольного двухгенераторного параметрического рассеивателя

Эквивалентная схема дипольного двухгенераторного параметрического рассеивателя описывается системой уравнений Кирхгофа:

$$\begin{cases} L_A \frac{di}{dt} + iR_A + \frac{1}{C_A} \int idt + u_1 + u_2 = e; \\ i = i_{11} + i_{21} + i_{31} = i_{12} + i_{22} + i_{32}; \\ L_1 \frac{di_{11}}{dt} + i_{11}R_1 = u_1; \\ L_2 \frac{di_{12}}{dt} + i_{12}R_2 = u_2. \end{cases} \quad (1)$$

В интересующем нас диапазоне напряжений сигнала накачки на диоде удобно применять аппроксимирующие функции в виде полиномиальной аппроксимации для $C(u) = C_0 f(u) = C_0 \sum_{n=0}^N \beta_n u^n$ и экспоненциальной аппроксимации для $g(u) = g_0 \exp(bu)$. Для использованных в исследовании импульсных полупроводниковых диодов Д311 параметры аппроксимации $C(U)$ и $g(u)$ в численных экспериментах принимались равными: $N=3$, $C_0=1.17E-11$ Ф; $\beta_0=0.99945$; $\beta_1=1.516$; $\beta_2=3.4198$; $\beta_3=4.323$; $g_0=7.7E-5$; $b=19.61$.

С учетом принятых аппроксимаций система (1) преобразуется к виду (2):

$$\begin{cases} \frac{d^2 i}{dt^2} = -\frac{di}{dt} \frac{R_A}{L_A} - \omega_{0A}^2 i + \frac{1}{L_A} \left(\frac{d\vartheta}{dt} - \frac{du_1}{dt} - \frac{du_2}{dt} \right); \\ \frac{d^2 u_1}{dt^2} = -\left\{ \frac{du_1}{dt} \left(\frac{D_1 E_1}{C_{01}} + \frac{R_1}{L_1} A_1 \right) + \left(\frac{du_1}{dt} \right)^2 B_1 + \omega_{01}^2 \left[u_1 (R_1 D_1 + 1) - \left(L_1 \frac{di}{dt} + i R_1 \right) \right] \right\} / A_1; \\ \frac{d^2 u_2}{dt^2} = -\left\{ \frac{du_2}{dt} \left(\frac{D_2 E_2}{C_{02}} + \frac{R_2}{L_2} A_2 \right) + \left(\frac{du_2}{dt} \right)^2 B_2 + \omega_{02}^2 \left[u_2 (R_2 D_2 + 1) - \left(L_2 \frac{di}{dt} + i R_2 \right) \right] \right\} / A_2, \end{cases} \quad (2)$$

где обозначено: $\omega_{0A}^2 = 1/L_A C_A$; $\omega_{01}^2 = 1/L_1 C_{01}$; $\omega_{02}^2 = 1/L_2 C_{02}$;

$$A_1 = \sum_{n=0}^N (n+1) \beta_{n1} u_1^n; \quad A_2 = \sum_{n=0}^N (n+1) \beta_{n2} u_2^n;$$

$$B_1 = \sum_{n=0}^N n(n+1) \beta_{n1} u_1^{n-1}; \quad B_2 = \sum_{n=0}^N n(n+1) \beta_{n2} u_2^{n-1};$$

$$D_1 = g_{01} e^{b_1 u_1}; \quad E_1 = 1 + b_1 u_1; \quad D_2 = g_{02} e^{b_2 u_2}; \quad E = 1 + b_2 u_2.$$

Численное решение уравнений (2) после замены переменных сводится к решению системы шести дифференциальных уравнений первого порядка (3), которая и является математической моделью дипольного двухгенераторного параметрического рассеивателя, ее удобно загружать в моделирующий программный комплекс:

$$\begin{cases} x1 = \frac{dx}{dt}; \quad y1 = \frac{dy}{dt}; \quad z1 = \frac{dz}{dt}; \\ \frac{dx1}{dt} = F_1; \quad \frac{dy1}{dt} = F_2; \quad F_3 = \frac{dz1}{dt}; \end{cases} \quad (3)$$

где: $x=i$; $y=u_1$; $z=u_2$; F_1, F_2, F_3 — правые части уравнений (2);

$$F_1 = -x1 \frac{R_A}{L_A} - \omega_{0A}^2 x + \frac{1}{L_A} \left(\frac{d\vartheta}{dt} - y1 - z1 \right);$$

$$F_2 = -\left\{ y1 \left(\frac{D_1 E_1}{C_{01}} + \frac{R_1}{L_1} A_1 \right) + (y1)^2 B_1 + \omega_{01}^2 [y(R_1 D_1 + 1) - (L_1 x1 + x R_1)] \right\} / A_1;$$

$$F_3 = -\left\{ z1 \left(\frac{D_2 E_2}{C_{02}} + \frac{R_2}{L_2} A_2 \right) + (z1)^2 B_2 + \omega_{02}^2 [z(R_2 D_2 + 1) - (L_2 x1 + x R_2)] \right\} / A_2;$$

Анализ модели эквивалентной схемы на рис. 3 позволяет определить зависимость спектральной компоненты тока на частоте ответного сигнала i_{OC} , протекающего через сопротивление излучения антенны, от величины ЭДС $e(t)$:

$$i_{OC} = i_{OC}(e(t)). \quad (4)$$

Эта зависимость преобразуется в амплитудную характеристику, то есть зависимость интенсивности волны ответного сигнала P_{OC} , формируемой параметрическим рассеивателем на расстоянии 1 метр, от интенсивности волны сигнала накачки P_{CH} , облучающей параметрический рассеиватель:

$$P_{OC} = P_{OC}(P_{CH}). \quad (5)$$

Величину интенсивности волны ответного сигнала, переизлучаемого дипольной антенной параметрического рассеивателя легко вычислить по значению i_{OC} , если известны сопротивление излучения дипольной антенны на частоте ответного сигнала $R_{A OC}$ и коэффициент усиления антенны по мощности на частоте ответного сигнала G_{OC} :

$$P_{OC} = R_{A OC} i_{OC}^2 G_{OC} / 4\pi, \quad (6)$$

Интенсивность волны сигнала накачки связана с мощностью сигнала накачки, циркулирующего в параметрическом рассеивателе P_{CH} как:

$$P_{CH} = P_{CH} S_{CH} (1 - \Gamma_{CH}^2), \quad (7)$$

где S_{CH} – эффективная площадь антенны параметрического рассеивателя на частоте сигнала накачки; а Γ_{CH} – коэффициент отражения в тракте сигнала накачки параметрического рассеивателя, который можно найти как:

$$\Gamma_{CH} = [(R_{A CH} - Z_{ПГ CH})] / [(R_{A CH} + Z_{ПГ CH})]. \quad (8)$$

где $R_{A CH}$ – сопротивление излучения дипольной антенны на частоте сигнала накачки, $Z_{ПГ CH}$ – сопротивление системы параметрических генераторов на частоте сигнала накачки ($Z_{ПГ}$ может носить комплексный характер). Далее при помощи закона сохранения энергии можно связать P_{CH} ЭДС сигнала накачки $e(t)$:

$$P_{CH} = e^2(t) / (R_{A CH} + Z_{ПГ CH}). \quad (9)$$

Из выражений (7) - (9) следует, что для определения амплитудной характеристики (5), при анализе схемы параметрического рассеивателя, наряду с зависимостью (4) необходимо найти зависимость:

$$Z_{ПГ CH} = Z_{ПГ CH}(e(t)). \quad (10)$$

Вычисление (10) при помощи математической модели (3) не сложнее, чем вычисление (5). Методика вычисления амплитудной характеристики (5) по вычисленным зависимостям (4) и (9) при помощи выражений (6) - (10) не сопряжена с итерационным процессом, поэтому на ее основе легко проводить моделирование свойств параметрических рассеивателей, которое выполнялось средствами программного моделирования LabVIEW.

С помощью разработанной модели, кроме амплитудной характеристики дипольного двухгенераторного параметрического рассеивателя, были рассчитаны амплитудные характеристики дипольных параметрических рассеивателей, нагруженных на один и три параметрических генератора в виде электрического контура с нелинейной емкостью, которые представлены на рис. 4.

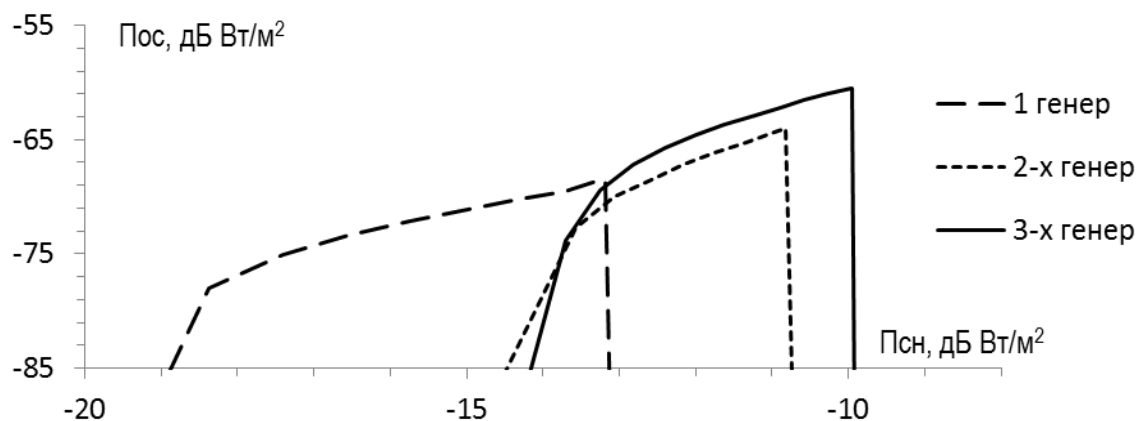


Рис. 4. Амплитудные характеристики для дипольных одногенераторного, двухгенераторного и трехгенераторного параметрических рассеивателей.

На рис. 4 видны тенденции: 1) момент генерации в одногенераторном параметрическом рассеивателе наступает раньше чем в двух других конструкциях параметрических рассеивателей; 2) увеличение числа параметрических генераторов смещает передний и задний фронты генерации; 3) с увеличением числа параметрических генераторов возрастает максимально-возможная величина ответного сигнала. Численный эксперимент показал, что увеличение числа параметрических контуров можно рассматривать как путь расширения частотной полосы генерации. На рис. 5 представлены рассчитанные частотные характеристики одногенераторного, двухгенераторного и трехгенераторного дипольных параметрических рассеивателей. Из рис. 5 следует, что таким образом можно расширить полосу генерации по крайней мере на 60%.

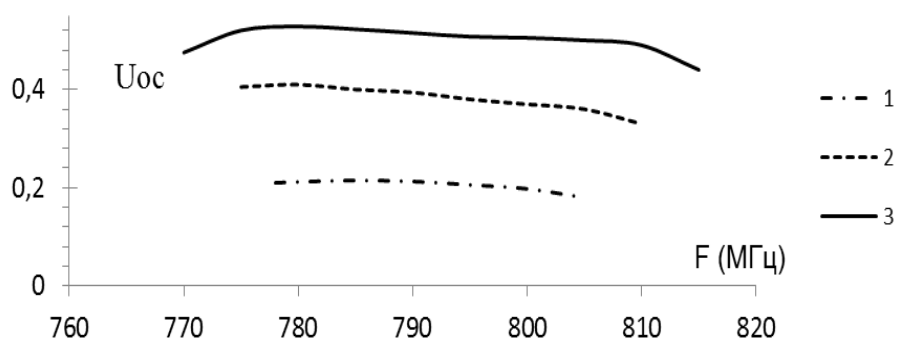


Рис. 5. Частотные характеристики дипольных параметрических рассеивателей: 1 - для одногенераторного параметрического рассеивателя, 2 - для двухгенераторного параметрического рассеивателя, 3 - для трехгенераторного.

Разработанная модель позволяет исследовать не только амплитудные, но и временные свойства параметрического рассеивателя, в частности исследовать воздействие на него различных сигналов накачки, изучать переходные процессы и процессы синхронизации при одновременном воздействии сигнала накачки и

синхронизирующего сигнала с частотой половинной субгармоники сигнала накачки, то есть на частоте ответного сигнала.

На рис. 6 представлены формы радиоимпульсов ответного сигнала для разных амплитуд радиоимпульсов сигнала накачки. Хорошо видно, что для определенных значений амплитуды радиоимпульса сигнала накачки переходные процессы могут существенно исказить форму радиоимпульса ответного сигнала, а в некоторых случаях переходные процессы могут не успеть закончиться на протяжении всей длительности радиоимпульса сигнала накачки.

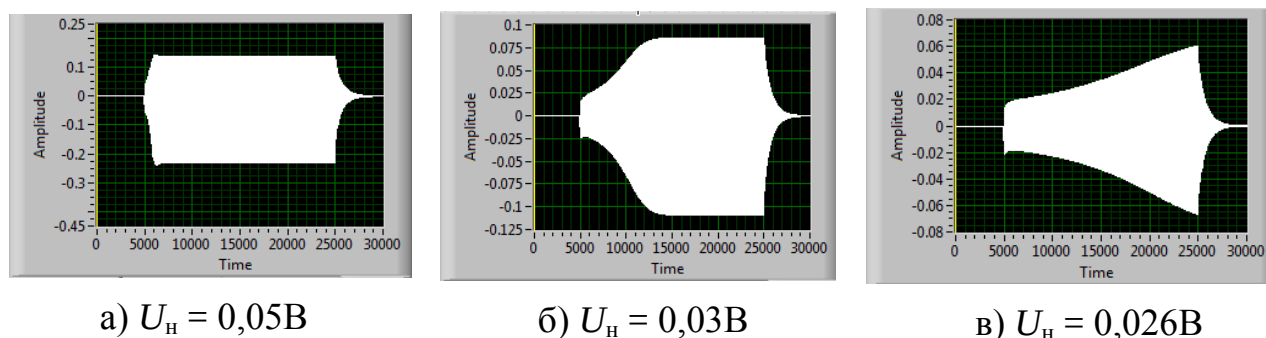


Рис.6. Формы радиоимпульсов ответного сигнала, переизлучаемого параметрическим рассеивателем для разных амплитуд радиоимпульсов сигнала накачки

На рис. 7 приведены результаты моделирования совместного действия на параметрический рассеиватель радиоимпульсов синхронизирующего сигнала и сигнала накачки при формировании радиоимпульсов ответного сигнала.

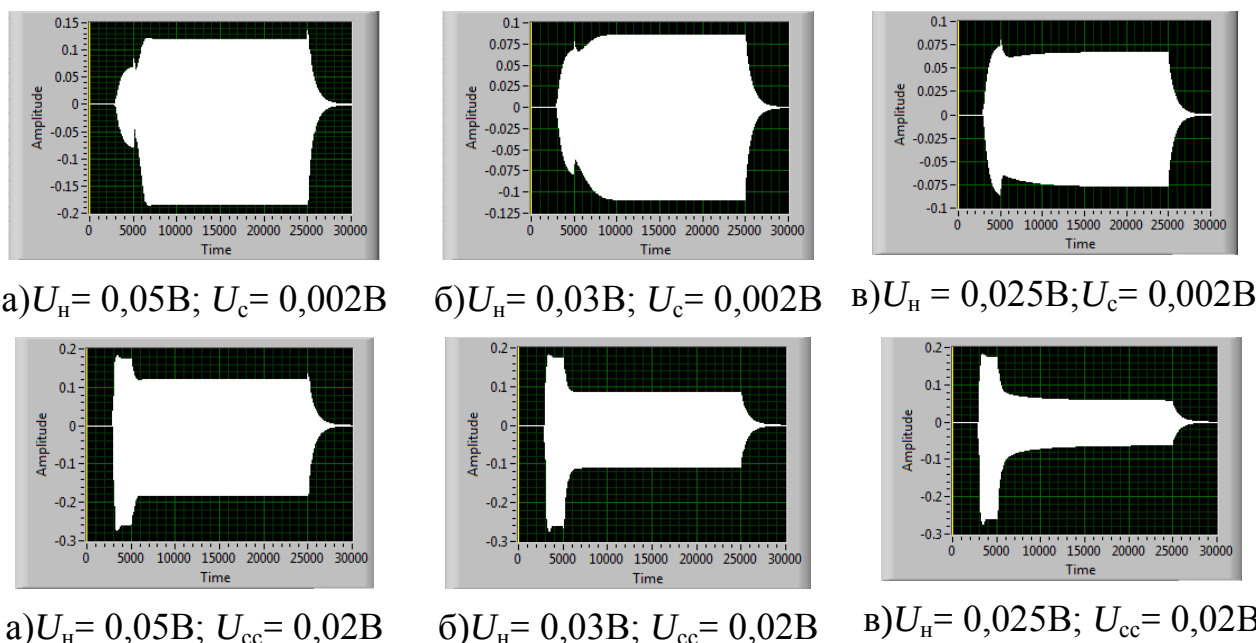


Рис.7. Импульсы синхронизации ($\tau_{cc} = 0,2\text{мкс}$) и ответного сигнала ($\tau_{oc} = 2\text{мкс}$), при совместном воздействии на параметрический контур сигнала накачки и синхросигнала.

Из рис.7 хорошо видно, что радиоимпульсы синхронизирующего сигнала с

большой амплитудой обеспечивают формирование прямоугольных радиоимпульсов ответного сигнала с длительностью, такой же как у радиоимпульса сигнала накачки за счет резкого сокращения времени установления колебаний в параметрическом контуре. Радиоимпульсы синхронизирующего сигнала с меньшей амплитудой обеспечивают только синхронизацию начальной фазы радиоимпульсов ответного сигнала при нарастающем передним фронте.

Следует отметить, что у синхронизирующего сигнала появилась новая функция: наряду с заданием фазы ответного сигнала радиоимпульсы синхронизирующего сигнала должны как бы «подготовить» параметрический контур для генерации радиоимпульса ответного сигнала с максимально возможным уровнем. В результате радиоимпульс ответного сигнала становится близким к прямоугольному.

Модельные эксперименты позволили оценить требуемое для сокращения переходных процессов соотношение амплитуд радиоимпульсов сигнала накачки и синхронизирующего сигнала. Учитывая резонансное усиление синхронизирующего сигнала в параметрическом контуре, можно дать приблизительную оценку этого соотношения как Q , где Q - добротность параметрического генератора параметрического рассеивателя при слабом сигнале. При этом задний фронт радиоимпульса синхронизирующего сигнала должен всегда совпадать с передним фронтом радиоимпульса сигнала накачки.

Д.т.н. Н.Ю.Бабановым и д.т.н. С.В.Ларцовым была предложена идея формировать конструкции параметрических рассеивателей в виде четырехполюсников – наличие антенн, настроенных на частоты сигнала накачки и ответного сигнала позволит выполнить их независимое согласование с параметрическим генератором. Для этого параметрический генератор должен быть четырехполюсником, что возможно, если нагрузкой параметрического генератора является система из нескольких параметрических контуров.

Одной из задач диссертации была апробация нескольких новых конструкций параметрических рассеивателей – четырехполюсников. В частности, выполнено математическое моделирование (а в дальнейшем экспериментальное измерение) характеристик мостового параметрического рассеивателя (см. рис.8), представлявшего собой четыре параметрических контура включенных по мостовой схеме, к плечам которой присоединены проволочные полуволновые диполи на

частоты сигнала накачки и ответного сигнала.

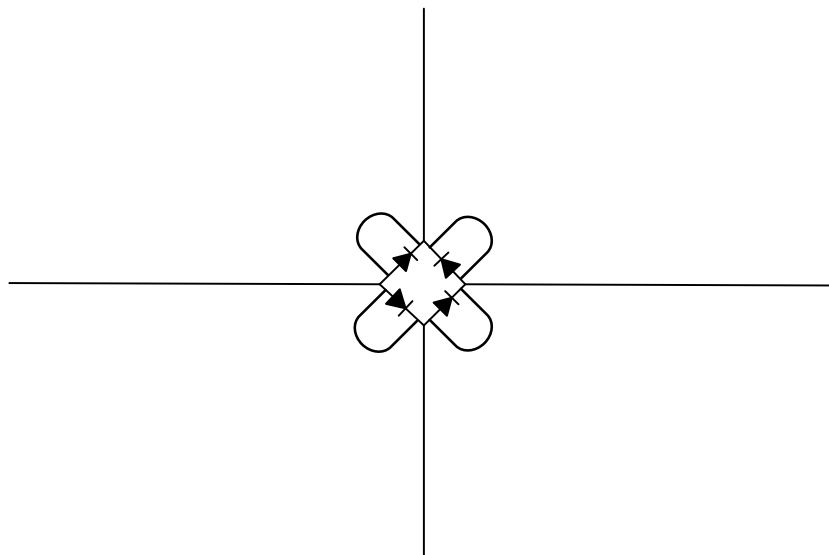


Рис.8. Структурная схема мостового параметрического рассеивателя с дипольными антеннами

Следует отметить, что проволочная, конструкция антенн параметрического рассеивателя ориентирована на их размещение в условиях «свободного пространства», что не позволяет его располагать на маркируемом объекте и, соответственно, использовать в качестве пассивного радиоответчика.

Решением указанной проблемы может стать использование параметрических рассеивателей у которых антенны имеют полосковую конструкцию.

Первым из предложений по реализации конструкций такого параметрического рассеивателя – четырехполюсника была идея подключения антенны, настроенной на частоту ответного сигнала, к одному из параметрических генераторов в рассмотренной выше (см. рис.2) конструкции двухгенераторного параметрического рассеивателя. Новая конструкция в принципе ориентирована на применение полосковых антенн, так как антенны сигнала накачки и ответного сигнала должны иметь один общий полюс. Как показали исследования близкое расположение антенн сигнала накачки и ответного сигнала, между которыми должен находиться один параметрический контур, приводит к их сильному взаимному влиянию. Поэтому автором было предложено в разрыв между антеннами включать еще один параметрический контур. Соответственно антенна сигнала накачки оказалась нагруженной на три, последовательно включенных, параметрических контура, а антенна ответного сигнала на один из крайних параметрических контуров. Структурная схема полученного таким образом полоскового параметрического рассеивателя представлена на рис. 9.

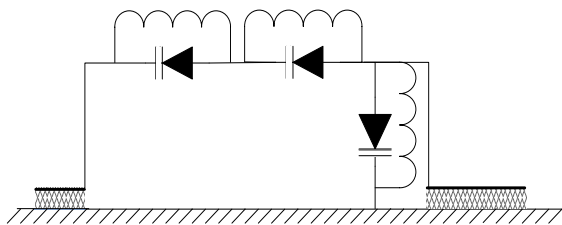


Рис. 9. Структурная схема полоскового трехгенераторного параметрического рассеивателя.

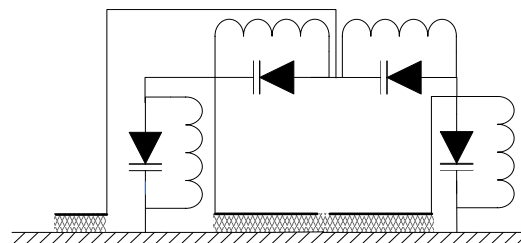


Рис.10. Структурная схема полоскового мостового параметрического рассеивателя

Также была разработана конструкция мостового полоскового параметрического рассеивателя. Проблема реализации мостового параметрического рассеивателя с полосковыми антеннами сигнала накачки и ответного сигнала заключалась в том, что конструкция его нелинейного элемента (моста) предполагает наличие четырех, гальванически не связанных полюсов, а полосковая конструкция антенн сигнала накачки и ответного сигнала предполагает наличие общей «земли» и, соответственно, объединение двух полюсов. Конструктивное решение данной задачи было найдено на основе использования в качестве антенны ответного сигнала антенной решетки из двух, последовательно – соединенных полосковых антенн (см. рис. 10).

Успешная апробация параметрических рассеивателей – четырехполюсников связана с возможна на основе построения их математических моделей, с помощью которых выполнялись численные эксперименты по нахождению их амплитудных характеристик. Возможность построения математических моделей параметрических рассеивателей – четырехполюсников связана с возможностью учета частотных свойств их антенн, которые, как уже отмечалось выше, было предложено представлять в виде последовательных контуров с сопротивлением потерь, равным сопротивлению излучения.

В качестве примера на рис. 11 представлена эквивалентная схема полоскового трехгенераторного параметрического рассеивателя.

Система уравнений математической модели, описывающей работу эквивалентной схемы трехгенераторного параметрического рассеивателя, составлялась на основе анализа уравнений Кирхгофа эквивалентной схемы на рис.11.

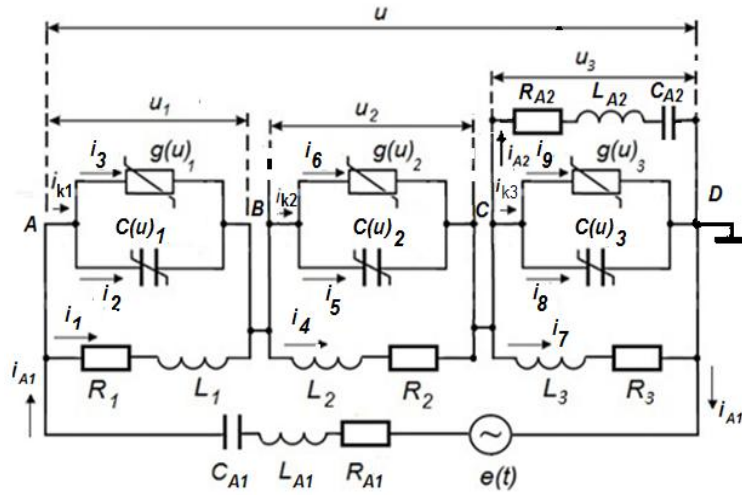


Рис. 11. Эквивалентная схема трехгенераторного параметрического рассеивателя.

Получившаяся в результате математическая модель трехгенераторного параметрического рассеивателя является системой из пяти дифференциальных уравнений второго порядка (11):

$$\begin{aligned}
 \frac{d^2 A_1}{dt^2} &= \frac{1}{L_{A1}} \left(\frac{d\varphi(t)}{dt} - \frac{du_1}{dt} - \frac{du_2}{dt} - R_{A1} \frac{d^2 A_1}{dt^2} - \frac{1}{C_{A1}} i_{A1} \right); \\
 \frac{d^2 i_{A2}}{dt^2} &= \frac{1}{L_{A2}} \left(\frac{du_2}{dt} - R_{A2} \frac{di_{A2}}{dt} - \frac{1}{C_{A2}} i_{A2} \right); \\
 \frac{d^2 u_1}{dt^2} &= - \left\{ \frac{du_1}{dt} \left[\frac{D_1 E_1}{C_{01}} + \frac{R_1}{L_1} A_1 \right] + \left(\frac{du_1}{dt} \right)^2 B_1 + \right. \\
 &\quad \left. + \omega_{01}^2 \left[u_1 (R_1 D_1 + 1) - \left(L_1 \frac{di_{A1}}{dt} + i_{A1} R_1 \right) \right] \right\} / A_1; \\
 \frac{d^2 u_2}{dt^2} &= - \left\{ \frac{du_2}{dt} \left(\frac{D_2 E_2}{C_{02}} + \frac{R_2}{L_2} A_2 \right) + \left(\frac{du_2}{dt} \right)^2 B_2 + \right. \\
 &\quad \left. + \omega_{02}^2 \left[u_2 (R_2 D_2 + 1) - \left(L_2 \frac{d^2 A_1}{dt^2} + i_{A1} R_2 \right) \right] \right\} / A_2; \\
 \frac{d^2 u_3}{dt^2} &= - \left\{ \frac{du_3}{dt} \left(\frac{D_3 E_3}{C_{03}} + \frac{R_3}{L_3} A_3 \right) + \left(\frac{du_3}{dt} \right)^2 B_3 + \right. \\
 &\quad \left. + \omega_{03}^2 \left[u_3 (R_3 D_3 + 1) - \left(L_3 \left[\frac{di_{A1}}{dt} - \frac{di_{A2}}{dt} \right] + [i_{A1} - i_{A2}] R_3 \right) \right] \right\} / A_3.
 \end{aligned} \tag{11}$$

Система уравнений (11) после замены переменных сводится к системе дифференциальных уравнений первого порядка (12), удобной для загрузки в моделирующий программный комплекс:

$$\begin{cases} y_i = \frac{dx_i}{dt} \\ \frac{dy_i}{dt} = F_i; \quad i = 1 \div 5 \end{cases}, \tag{12}$$

где x_i — искомые производящие функции; F_i — функции, стоящие в правой части уравнений (11).

Математическая модель мостового параметрического рассеивателя определялась аналогично.

Возможность моделирования свойств параметрических рассеивателей - четырехполюсников позволила решать задачи согласования антенн параметрического рассеивателя с системой параметрических генераторов. В классической постановке задача наилучшего согласования достигается при равенстве активных сопротивлений антенн и системы параметрических генераторов как на частоте сигнала накачки, так и на частоте ответного сигнала. В данном случае существенно, что величина сопротивления системы параметрических контуров зависит от величины сопротивления антенн и согласование антенны и параметрического генератора превращается в итерационную процедуру. В этой ситуации задачу оптимизации проще решать, как задачу поиска наилучших значений сопротивлений антенн сигнала накачки и ответного сигнала при введении конкретного критерия, например, достижения максимального уровня ответного сигнала или наименьшего уровня сигнала накачки, при котором происходит возбуждение параметрического рассеивателя.

Выполненные расчеты показали, что с точки зрения максимизации уровня ответного сигнала у мостового параметрического рассеивателя наилучшими значениями сопротивлений антенн сигнала накачки и ответного сигнала являются значения $R_{A1} \approx 73 \text{ Ом}$, $R_{A2} \approx 700 \text{ Ом}$, а для трехгенераторного параметрического рассеивателя $R_{A1} \approx 73 \text{ Ом}$, $R_{A2} \approx 650 \text{ Ом}$.

Для данных оптимальных параметров входных сопротивлений антенн полосковых параметрических рассеивателей и выполнялись счетные эксперименты, а так же реализовывались реальные конструкции для натурных экспериментов.

Исходя из выбранных конструкций полосковых излучателей в виде полуволновых полосковых резонаторов, в расчетах для трехгенераторного полоскового рассеивателя были приняты коэффициенты усиления антенны сигнала накачки равным 6 дБ, а коэффициент усиления антенны ответного сигнала, у которой излучающие щели расположены ближе друг к другу, 5 дБ.

Для мостового полоскового параметрического рассеивателя расчетное значение коэффициента усиления антенны сигнала накачки было принято равным так же 6 дБ (антенны одинаковые), а для системы из двух последовательно включенных полосковых антенн ответного сигнала так же 6 дБ.

Рассчитанные амплитудные характеристики параметрических рассеивателей - четырехполюсников представлены на рис. 12. Там же представлены

экспериментально-измеренные амплитудные характеристики соответствующих параметрических рассеивателей.

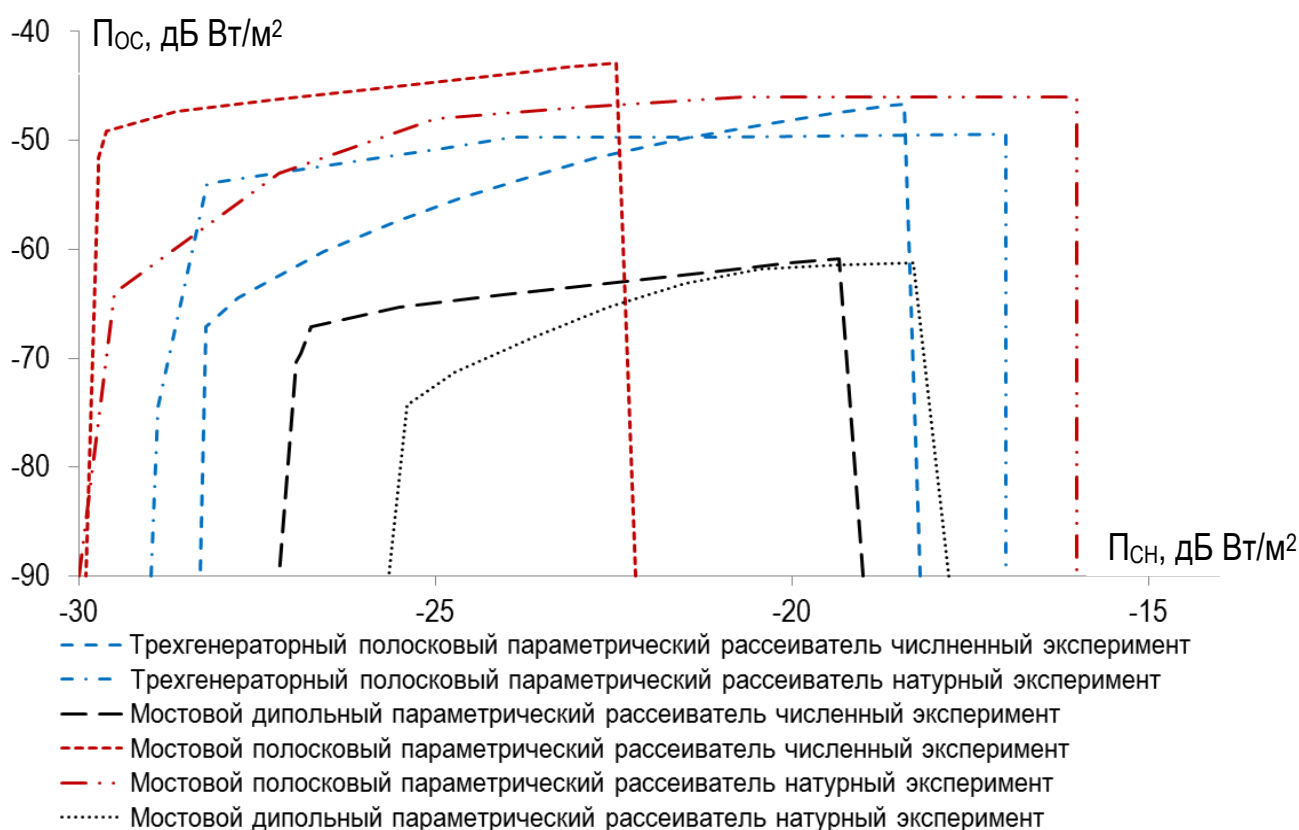


Рис. 12. Рассчитанные и измеренные экспериментально амплитудные характеристики параметрических рассеивателей.

В Третьей главе диссертации представлены результаты экспериментальных исследований известных и предложенных конструкций параметрических рассеивателей.

В экспериментах в качестве сигнала накачки использовался непрерывный сигнал, излучаемый в диапазоне частот 770 – 810 МГц, ответный сигнал принимался на частоте половинной субгармоники сигнала накачки. Схема измерительной установки представлена на рис. 13.

Излучающая и приемная антенны измерительной установки были изготовлены по конструкции «двойной квадрат». Поляризация антенн – линейная. Особенностью методики измерений являлось то, что приемником одновременно фиксировались интенсивности и ответного сигнала и сигнала накачки, который попадал на вход приемника по побочному каналу через антенну ответного сигнала. Калибровка измерительного стенда выполнялась методом замещения.

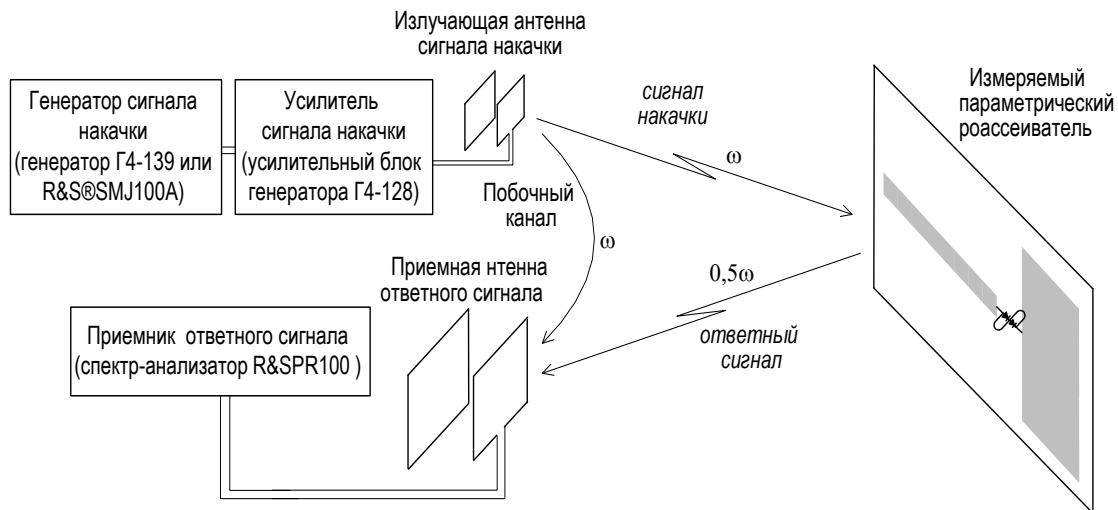


Рис. 13. Схема измерительной установки

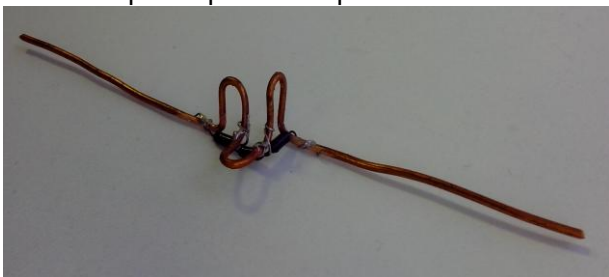
Фотографии исследованных параметрических рассеивателей представлены на рис. 14.



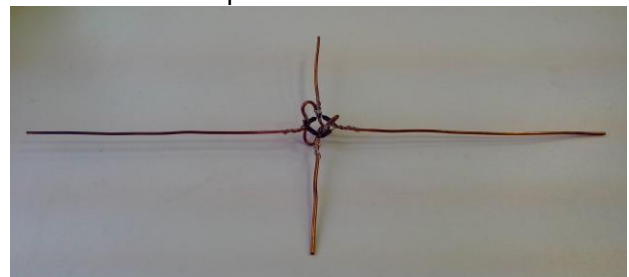
Дипольный одnogенераторный параметрический рассеиватель



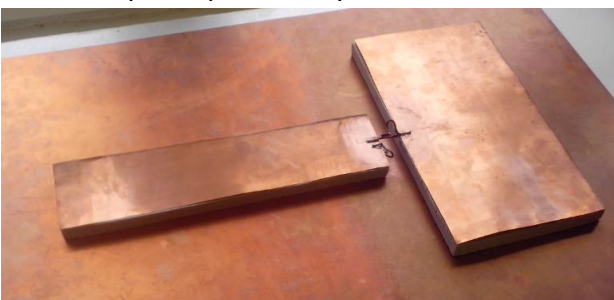
Дипольный двухгенераторный параметрический рассеиватель



Дипольный трехгенераторный параметрический рассеиватель



Мостовой параметрический рассеиватель с дипольными антеннами



Полосковый трехгенераторный параметрический рассеиватель



Полосковый мостовой параметрический рассеиватель

Рис. 14. Фотографии экспериментально исследованных параметрических рассеивателей.

У всех параметрических рассеивателей дужки индуктивностей и проволочные антенны - диполи были изготовлены из медной проволоки $\varnothing 2$ мм, в качестве нелинейной емкости использовался высокочастотный диод Д311. Полосковые

антенны полосковых параметрических рассеивателей были выполнены в виде полуволновых резонаторов на несимметричной полосковой линии. Их излучающими элементами являются две боковые щели, общее сопротивление излучения которых определяется шириной полоска как: $R_A = 120\lambda/2b$, где b – ширина полоскового резонатора, λ – длина волны.

Натурные эксперименты (см. рис. 15) подтвердили обнаруженные расчетным путем тенденции зависимостей свойств дипольных параметрических рассеивателей от числа параметрических генераторов в их нагрузке (см. рис. 10).

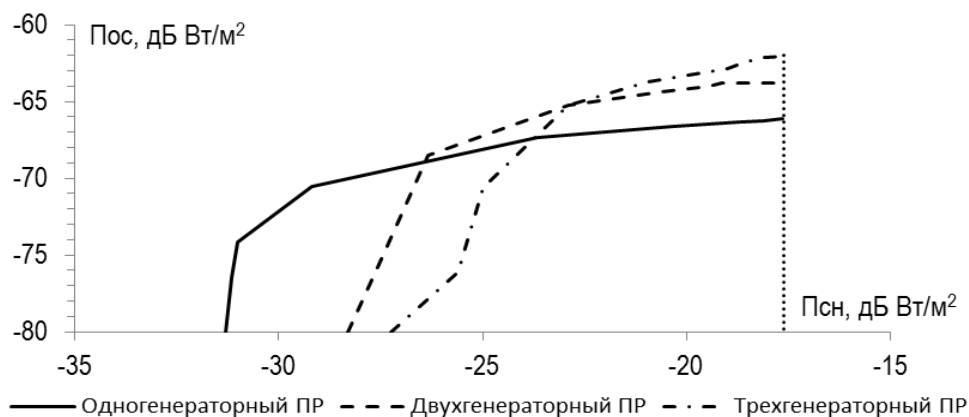


Рис. 15. Семейство амплитудных характеристик дипольных параметрических рассеивателей с одним, двумя и тремя параметрическими генераторами в нагрузке.

Другим результатом натурных экспериментов является то, что успешно экспериментально апробированы конструкции параметрических рассеивателей в виде четырехполюсников, при этом доказана реализуемость и хорошая работоспособность нового типа параметрических рассеивателей – полосковых параметрических рассеивателей (см. рис. 11).

Четвертая глава посвящена задаче повышения чувствительности приёмника системы обнаружения параметрических рассеивателей на основе использования последовательностей ЛЧМ радиоимпульсов в качестве сигнала накачки. Как показано д.т.н. Н.Ю.Бабановым, высокую чувствительность этой системы можно получить за счет реализации когерентной обработки импульсной последовательности ответного сигнала. Для этого можно использовать явление синхронизации возбуждаемого в параметрическом генераторе сигнала внешним сигналом с частотой возбуждаемого колебания. Однако внешний синхронизирующий сигнал, обеспечивая детерминированную фазу радиоимпульсу ответного сигнала, одновременно является когерентной помехой приему и должен

быть скомпенсирован или существенно ослаблен в приемнике ответного сигнала. Указанные противоречивые требования удовлетворены для сигналов накачки в виде последовательности узкополосных радиоимпульсов на основе использования синхронизирующего сигнала, состоящего из двух коротких радиоимпульсов с частотой ответного сигнала и противоположными фазами. Передний фронт радиоимпульса сигнала накачки совпадает или с первым или со вторым из синхронизирующих радиоимпульсов, что позволяет формировать когерентную последовательность радиоимпульсов ответного сигнала с законом кодирования, отличным от такого закона у последовательности радиоимпульсов синхронизирующего сигнала. Такое решение позволило применять методы когерентной и квазикогерентной обработки последовательностей узкополосных радиоимпульсов ответного сигнала при приеме.

Применение сигнала накачки в виде последовательности ЛЧМ радиоимпульсов в системе обнаружения должно позволить существенно повысить чувствительность приемника и открывает возможность определения дальности до обнаруженного параметрического рассеивателя. Для этого необходимо ответить на два вопроса:

- 1) будет ли адекватным преобразование ЛЧМ радиоимпульса сигнала накачки в ЛЧМ радиоимпульс ответного сигнала в параметрическом рассеивателе, нагруженном на систему из параметрических генераторов и
- 2) можно ли адаптировать метод формирования в параметрическом рассеивателе когерентной импульсной последовательности радиоимпульсов ответного сигнала, предложенного для узкополосных радиоимпульсов, на случай использования ЛЧМ радиоимпульса сигнала накачки.

Положительный ответ на первый вопрос получен при помощи численного эксперимента (см. рис. 17), в котором было определено, что ЛЧМ радиоимпульс сигнала накачки успешно преобразуется в параметрическом рассеивателе в соответствующий ЛЧМ радиоимпульс ответного сигнала и для одnogенераторных и для параметрических рассеивателей, нагруженных на систему из параметрических генераторов.

Изучение второго вопроса показали, что непосредственный перенос метода, разработанного для узкополосных радиоимпульсов, на случай использования ЛЧМ радиоимпульса сигнала накачки не эффективен и требуется модернизация известных методов формирования когерентной последовательности ответного

сигала с возможностью компенсации синхросигнала в приемнике.

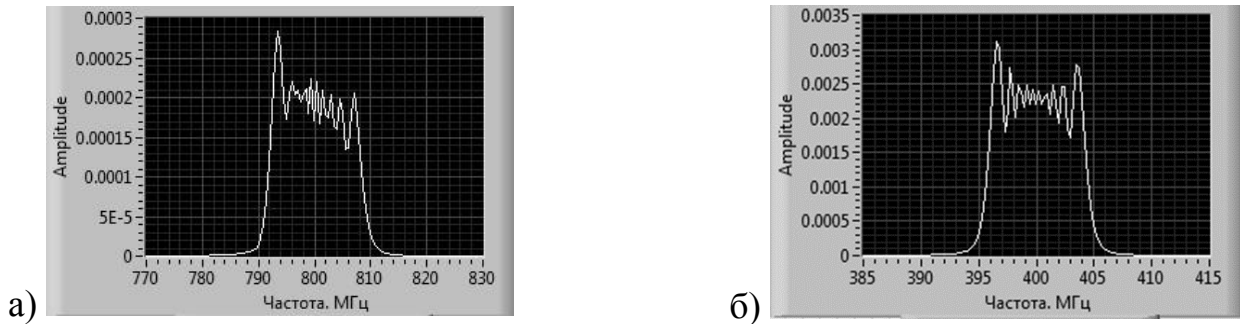
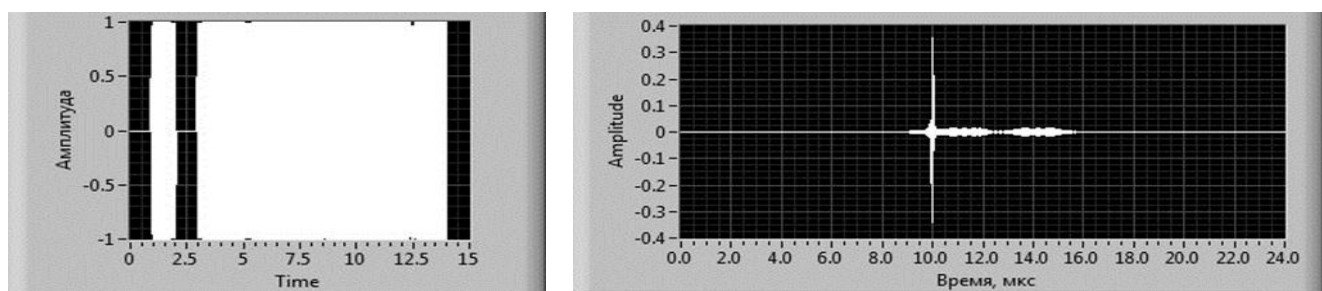


Рис. 16. Спектрограммы: а) ЛЧМ радиоимпульса сигнала накачки; б) соответствующего ЛЧМ радиоимпульса ответного сигнала, при $f_{CH}=800$ МГц; $\Delta f_{dev}=20$ МГц; $T_{CH}=3$ мкс, $B=60$

Модернизация была выполнена на основе использования для синхронизации короткого ЛЧМ радиоимпульса синхронизирующего сигнала с обратным законом изменения частоты. Такой синхронизирующий сигнал осуществляет синхронизацию ответных сигналов, возбуждающихся в параметрическом рассеивателе, и подвергается наибольшему ослаблению, и не накапливается в приемнике.

Модернизированный метод формирования в параметрическом рассеивателе когерентной импульсной последовательности ЛЧМ радиоимпульсов ответного сигнала апробировался путем моделирования процессов в приемнике поисковой установки средствами программного комплекса LabVIEW. На рис. 17 показано прохождение смеси радиоимпульсов синхронизирующего сигнала и ответного сигнала с ЛЧМ обратными законами через фильтр, согласованный с ответным сигналом. При этом наблюдается подавление синхросигналов при существенном возрастании амплитуды принимаемого сигнала.



А) Смесь радиоимпульсов синхронизирующего сигнала и ответного сигнала с ЛЧМ с обратными законами на входе фильтра

Б) Смесь радиоимпульсов синхронизирующего сигнала и ответного сигнала с ЛЧМ с обратными законами на выходе фильтра

Рис. 17. Прохождение смеси радиоимпульсов синхронизирующего сигнала и ответного сигнала с ЛЧМ обратными законами через фильтр, согласованный с ответным сигналом

На данное техническое решение получен патент на изобретение.

В заключении приводятся основные результаты и выводы полученные автором при выполнении работы.

В приложении приводится акт внедрения результатов работы во ФГУП ВНИИЭФ (г. Саров).

Основные результаты работы. Таким образом, можно считать достигнутой цель, поставленную перед диссертационной работой: на основе натурных исследований и проведения численного эксперимента в диссертации определены пути повышения эффективности систем радиомаркировки, использующих параметрические рассеиватели. Исследования опирались на изучение процессов преобразования сигналов в параметрическом рассеивателе и приемнике поисковой установке при помощи разработанных математических моделей параметрических рассеивателей и приемника. При этом были получены новые научные результаты:

1. На основе анализа известных публикаций определено, что перспективными направлениями исследования являются апробация новых конструкций параметрических рассеивателей в виде четырехполосников и исследование возможности применения в поисковых установках запросных сигналов, содержащих сигналы накачки в виде ЛЧМ радиоимпульсов.
2. Получены соотношения, позволяющие связать амплитудную характеристику, используемую в процессной модели параметрического рассеивателя с зависимостями, получаемыми при анализе эквивалентной схемы параметрического рассеивателя, которые позволили разработать методику математического моделирования свойств параметрических рассеивателей. Методика ориентирована на использование расчетных программных комплексов по анализу нелинейных радиотехнических схем.
3. Предложено антенну в эквивалентной схеме параметрического рассеивателя представлять в виде последовательного электрического контура, настроенного на центральную частоту излучения, сопротивление потерь которого равно сопротивлению излучения антенны, что позволило выполнять математическое моделирование параметрических рассеивателей - четырехполосников, содержащих две антенны, настроенные на частоты сигнала накачки и ответного сигнала.
4. На основе численного и натурального экспериментов выполнена апробация новых конструкций параметрических рассеивателей – четырехполосников и оптимизация значений величин их сопротивлений излучения по критерию

- достижения максимально возможного уровня ответного сигнала. Результаты математического моделирования находятся в хорошем качественном и удовлетворительном количественном соответствии с результатами натурных экспериментов.
5. На основе численного и натурального экспериментов показано, что увеличение числа параметрических генераторов в нагрузке параметрического рассеивателя можно рассматривать как возможный путь расширения полосы генерации, при этом с числом параметрических генераторов в нагрузке растет и уровень максимально-возможного ответного сигнала и уровень сигнала накачки необходимого для возбуждения параметрического рассеивателя.
 6. На основе численного и натурального экспериментов показано, что новая конструкция параметрического рассеивателя с мостовой нагрузкой из четырех параметрических генераторов обладает лучшими показателями как по уровню ответного сигнала, так и минимальному уровню сигнала накачки необходимому для возбуждения параметрического рассеивателя.
 7. Предложены и апробированы при помощи численного и натурального экспериментов новые конструкции полосковых параметрических рассеивателей в виде трехгенераторного и мостового полосковых параметрических рассеивателей.
 8. Предложен метод формирования прямоугольных радиоимпульсов ответного сигнала, по которому перед облучением параметрического рассеивателя прямоугольным радиоимпульсом сигнала накачки он облучается коротким синхронизирующим сигналом с частотой ответного сигнала и амплитудой в Q раз меньше амплитуды радиоимпульса сигнала накачки (Q – добротность параметрического контура в нагрузке параметрического рассеивателя).
 9. Предложен и апробирован при помощи модельного эксперимента запросный сигнал, состоящий из ЛЧМ радиоимпульса сигнала накачки и синхронизирующего сигнала состоящего из двух коротких одинаковых ЛЧМ радиоимпульсов с обратными направлениями изменения частоты. Данный запросный сигнал позволяет формировать ответный сигнал в виде ЛЧМ радиоимпульса, при этом синхронизирующий сигнал осуществляя синхронизацию в параметрическом рассеивателе, в приемнике поисковой установки подвергается наибольшему ослаблению и не накапливается. На данное техническое решение получен патент на изобретение.

Список публикаций автора по теме диссертации

Журналы из перечня ВАК

- 1) Клюев. А. В. Использование параметрических рассеивателей для маркировки индивидуальных средств спасения, терпящих бедствие на воде / Н.Ю.Бабанов, А.В.Клюев, С.В.Ларцов, В.П.Самарин // Проектирование и технология электронных средств. – 2014.- №1.-С. 47-54.
- 2) Клюев. А. В. Экспериментальные исследования параметрических рассеивателей / Н.Ю.Бабанов, А.В.Клюев, С.В.Ларцов // Проектирование и технология электронных средств. – 2015.- №1.- С. 47-50.
- 3) Клюев. А. В. Моделирование мостового параметрического рассеивателя / Н.Ю.Бабанов, А.В.Клюев, С.В.Ларцов, В.П.Самарин // Проектирование и технология электронных средств.- 2015.- №2.- С. 15-20.
- 4) Клюев. А. В. Моделирование процессов переизлучения на частоте половинной субгармоники сигнала накачки в одноконтурном параметрическом рассеивателе / Н.Ю.Бабанов, А.В.Клюев, С.В.Ларцов, В.П.Самарин // Известия высших учебных заведений. Радиофизика.- 2015.- №4.- С. 326-337.

Патент

- 5) Клюев. А. В. Способ обнаружения широкополосных параметрических рассеивателей /Бабанов Н.Ю., Клюев А.В., Ларцов С.В., Самарин В.П. //Патент Российской Федерации на изобретение №2532258 по заявке 2013135592 от 29.07.2013, опубликовано 10.11.2014 Бюллетень № 31.

Конференции

- 6) Клюев. А. В. Формирование суммарной диаграммы направленности, не содержащей «нулей» от нелинейной отражательной решетки из параметрических рассеивателей / Н.Ю.Бабанов, А.В.Клюев, А.С.Корсаков, С.В.Ларцов // Материалы X Международной научной конференции «Перспективные технологии в средствах передачи информации – ПТСПИ-2013».- 26-28 июня 2013г.- Владимир.- т.2.- С. 152-154.
- 7) Клюев. А. В. Формирование ответных сигналов в параметрическом рассеивателе в виде ЛЧМ радиоимпульсов / Н.Ю.Бабанов, А.В.Клюев // Материалы XXI Международной научно-технической конференции. «Информационные системы и технологии ИСТ-2015».- Нижний Новгород.- НГТУ.- С. 57.
- 8) Клюев. А. В. Моделирование мостовой схемы параметрического рассеивателя / Н.Ю.Бабанов, А.В.Клюев, С.В.Ларцов, В.П.Самарин // Труды XIX Научной конференции по радиофизике.- Н.Новгород.- ННГУ.- 2015.- С. 76-77.

- 9) Ключев. А. В. Экспериментальные исследования параметрических рассеивателей с несколькими параметрическими контурами в нагрузке / Н.Ю.Бабанов, А.В.Ключев, С.В.Ларцов // Труды XIX Научной конференции по радиофизике.- Н.Новгород.- ННГУ.- 2015.- С. 74-75.
- 10) Ключев. А. В. Экспериментальное исследование мостовой схемы параметрического рассеивателя// Труды VIII Международной научной конференции «Шуйская сессия студентов, аспирантов, педагогов, молодых ученых “Университет - новой школе”», г. Шуя 18-19 июня 2015г.
- 11) Ключев. А. В. Экспериментальное исследование полосковых параметрических рассеивателей / Н.Ю. Бабанов, А.В. Ключев, С.В. Ларцов //Материалы XXII международной научно-технической конференции «Информационные системы и технологии» ИСТ–2016 посвященной 80-летию РТФ – ФРК – ФИСТ – ИРИТ, - Нижний Новгород, -ННГУ.- 2016.- С. 62-63.
- 12) Ключев. А. В. Экспериментальные исследования мостового параметрического рассеивателя/Ключев, А. В.//Материалы Международной научно-технической конференции, 1 – 5 декабря 2015 г. INTERMATIC – 2015, часть 4. МИРЭА. МОСКВА. с.205-208.
- 13) Ключев. А. В. Моделирование параметрических рассеивателей нагруженных на несколько параметрических генераторов /Ключев, А. В.//Материалы Международной научно-технической конференции, 1 – 5 декабря 2015 г. INTERMATIC – 2015, часть 4. МИРЭА. МОСКВА. с.209-212.

Подписано в печать 01.06.16. Формат $60 \times 84^{1/16}$. Бумага офсетная.

Печать трафаретная. Уч.-изд. л. 1,0. Тираж 100 экз. Заказ 292.

Типография НГТУ. 603950, Нижний Новгород, ул. Минина, 24.