

Отзыв официального оппонента д.т.н., с.н.с Щитова Аркадия Максимовича на диссертацию А.В.Клюева на тему «Преобразование радиосигналов в параметрических рассеивателях», представленную на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.12.04 - Радиотехника, в том числе системы и устройства телевидения

Актуальность темы диссертационного исследования А.В. Клюева связана с задачами радиомаркировки различных объектов, которые впоследствии нужно обнаруживать на значительных расстояниях. Данные объекты предполагается маркировать с помощью пассивных радиомаркеров в виде параметрических рассеивателей, у которых ответный сигнал формируется в результате параметрического преобразования энергии облучающего поля в сигнал с частотой половинной субгармоники запросного (облучающего) сигнала. Для этого нагрузкой параметрического рассеивателя должен быть параметрический генератор, настроенный на частоту запросного сигнала, который в данном случае выступает сигналом накачки.

Автор справедливо указывает, что данный метод следует рассматривать как дополнительный к методам, основанным на использовании активных радиомаяков. Как хорошо известно, активные средства радиомаркировки имеют ограниченный ресурс работы, определяемый емкостью используемой батареи. К моменту, когда емкость батареи активного радиомаяка будет исчерпана, а задача поиска еще не решена, упавший самолет, спасательный плот, упавший за борт контейнер, сброшенный с самолета груз и т.д. можно будет обнаруживать средствами пассивной радиомаркировки, имеющими практически неограниченный временной ресурс работы, поэтому тема представленной А.В. Клюевым диссертации актуальна.

Степень разработанности темы. Работа относится к исследованиям эффекта нелинейного рассеяния радиоволн, ведущихся с 30-х годов 20-го столетия.

Одним из направлений этих исследований, связанных с прикладным использованием эффекта нелинейного рассеяния радиоволн, является создание систем пассивной радиомаркировки при помощи нелинейных радиоответчиков, активно развиваемого в настоящее время научным руководителем диссертанта – д.т.н. Н.Ю. Бабановым и д.т.н. С.В. Ларцовым. Параметрические рассеиватели – один из классов пассивных нелинейных радиоответчиков, известных с середины 90-х годов 20-го столетия.

Автором выполнен обзор научных источников по тематике исследования свойств и использования пассивных нелинейных радиоответчиков, включая

параметрические рассеиватели. При этом был сделан вывод, что перспективными направлениями исследований 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. Следует отметить, что диссертационное исследование А.В. Клюева базируется на предложенной Н.Ю. Бабановым процессной модели пассивного нелинейного радиоответчика, которая активно использовалась автором в задачах моделирования.

Направления исследований связаны с участием автора в создании и использовании прикладной теории параметрических рассеивателей, которая позволит решать задачи моделирования известных и новых конструкций параметрических рассеивателей, а также определения реакции параметрических рассеивателей на внешнее воздействие запросным сигналом. Соответственно, **цель** исследований сформулирована как поиск путей повышения эффективности систем радиомаркировки на основе моделирования процессов преобразования радиосигналов в параметрических рассеивателях и приемнике поисковой установки и натуральных экспериментов.

Представленная диссертация состоит из введения, 4-х глав, заключения и приложения.

Во введении обсуждается актуальность темы исследований, формулируются цель и задачи работы, научная новизна, теоретическая и практическая значимость работы.

Первая глава носит постановочный характер, она посвящена анализу состояния исследований по тематике изучения параметрических рассеивателей и выбору методологии моделирования процессов в параметрических рассеивателях.

Выполненный Клюевым А.В. обзор дает представление об основных проблемах использования параметрических рассеивателей в прикладных задачах. Они связаны с тем, что к началу исследований были экспериментально апробированы только простейшие, предложенные еще в 1994 году, конструкции параметрических рассеивателей (диполь или рамка, нагруженные на параметрический контур из диода и индуктивности в виде проволочной дужки). Данные конструкции не удовлетворяют требованиям размещения параметрических рассеивателей на маркируемых объектах.

В то же время, выполненный автором анализ известных публикаций показал, что предлагались новые конструкции параметрических рассеивателей, лишенные указанных недостатков. В частности, научным руководителем работы – Бабановым Н.Ю. – выдвинута идея реализации конструкций параметрического

рассеивателя в виде четырехполюсника, при этом получено несколько патентов на устройства. Преимущества такой конструкции очевидны – появляется возможность отдельной настройки антенны запросного облучающего сигнала и антенны ответного сигнала. В то же время, предложенные новые конструкции не апробировались ни экспериментально, ни теоретически, их работоспособность была не очевидна.

Вторым проблемным вопросом, на который обращает внимание А.В. Клюев, является использование ЛЧМ радиоимпульсов запросного сигнала при поиске параметрических рассеивателей. Преимущество данного метода зондирования параметрических рассеивателей так же очевидно – открывается возможность определения дальности при их обнаружении. Однако и в данном случае метод был не апробирован.

Апробацию указанных перспективных технических решений автор выполнял на основе моделирования процессов преобразования зондирующего сигнала в параметрическом рассеивателе и когерентного накопления переизлучаемого на половинной субгармонике ответного сигнала в приемнике поисковой установки.

Для моделирования процессов в параметрических рассеивателях А.В. Клюев предлагает использовать методику, базирующуюся на сочетании процессной модели параметрического рассеивателя и методов моделирования процессов в радиотехнических параметрических цепях с нелинейностями, развитых д.т.н., профессором Н.И. Бирюком, ориентированных на использование в моделирующих программных комплексах. Для этого им определены методы перехода от параметров, описывающих сигналы в эквивалентной схеме параметрического рассеивателя на частотах запросного и ответного сигналов, в параметры, характеризующие облучающую волну запросного сигнала и волну переизлучаемого ответного сигнала.

Вторая глава посвящена численному моделированию процессов преобразования сигналов в параметрических рассеивателях.

Первоначально выполнено моделирование традиционной конструкции дипольного параметрического рассеивателя, при этом сделано несколько интересных предложений: найдена удачная аппроксимация диода, выступающего в роли нелинейной емкости; для учета частотных свойств предложено антенну моделировать электрическим контуром с сопротивлением потерь, равным сопротивлению излучения антенны.

Разработанная модель параметрического рассеивателя позволила исследовать временные свойства параметрического рассеивателя, в частности, процессы, протекающие при одновременном воздействии на параметрический рассеиватель

запросного сигнала, содержащего сигнал накачки и синхронизирующий сигнал на частоте ответного сигнала.

На основе математического моделирования установлено, что предварительно воздействующий на параметрический рассеиватель синхронизирующий сигнал с амплитудой в Q раз (Q – добротность параметрического контура) меньше амплитуды радиоимпульса сигнала накачки существенно сокращает время переходных процессов при возбуждении параметрического рассеивателя.

Разработанная модель дипольного параметрического рассеивателя позволила исследовать изменение его свойств от числа последовательно включенных параметрических генераторов в нагрузку. Показано, что такое конструктивное изменение можно рассматривать как возможный путь расширения полосы генерации и увеличения уровня максимально возможного ответного сигнала.

Учет частотных свойств антенн параметрических рассеивателей позволил автору выполнить апробацию их новых конструкций в виде четырехполюсников, при этом оказалось возможным решать задачи оптимизации входных сопротивлений антенн в соответствии с тем или иным критерием.

Оказалось, что антенна сигнала накачки должна быть достаточно низкоомной (~ 70 Ом), а антенна ответного сигнала – высокоомной (600-700 Ом).

Это позволило разработать принципиально новые конструкции полосковых нелинейных рассеивателей, у которых антенны реализованы по полосковой технологии. Попытка реализации полоскового параметрического рассеивателя на основе предложенной в одном из патентов конструкции с двумя параметрическими контурами в нагрузке показала, что наблюдается сильное взаимное влияние принимающей и переизлучающей антенн. Обнаруженная проблема успешно решена А.В. Ключевым за счёт перехода к схеме с тремя параметрическими контурами в нагрузке, которая была смоделирована, оптимизирована по критерию максимума излучения и в дальнейшем реализована в макете, с которым проводились натурные эксперименты.

Самая эффективная мостовая схема параметрического рассеивателя также была реализована А.В. Ключевым в полосковом варианте. Проблема реализации мостового полоскового параметрического рассеивателя оказалась связана с тем, что полосковая конструкция антенн сигнала накачки и ответного сигнала имеет три полюса, а конструкция его нагрузки из мостового соединения четырех параметрических контуров – четыре полюса. А.В. Ключевым найдено простое решение данной задачи путем использования в качестве антенны ответного сигнала антенной решетки из двух последовательно соединенных полосковых антенн.

В целом во второй главе диссертации представлена методика моделирования и оптимизации параметров антенн параметрических рассеивателей, которая позволяет выполнять инженерный расчет апробированных типов параметрических рассеивателей.

Третья глава диссертации посвящена экспериментальной апробации известных и предложенных конструкций параметрических рассеивателей. При этом экспериментально исследовались те же параметрические рассеиватели, свойства которых моделировались во второй главе: дипольные одно-, двух- и трехгенераторные параметрические рассеиватели; параметрические рассеиватели – четырехполосники: мостовой параметрический рассеиватель с дипольными антеннами и в полосковом исполнении, полосковый трехгенераторный параметрический рассеиватель.

Измерения проводились на стандартном для таких измерений стенде по стандартной методике, особенностью которой был метод фиксации уровня излучаемого запросного сигнала (сигнала накачки) приемником по побочному каналу одновременно с измеряемым ответным сигналом.

В целом экспериментальные измерения оказались в хорошем качественном и количественном соответствии с результатами моделирования.

Четвертая глава посвящена задаче использования последовательностей ЛЧМ радиоимпульсов в качестве сигнала накачки в системе обнаружения параметрических рассеивателей. Эта задача интересна с точки зрения возможности измерения дальности до обнаруженного параметрического рассеивателя.

Специфика задачи связана с тем, что для формирования ответного сигнала в виде когерентной последовательности радиоимпульсов необходимо одновременно с последовательностью радиоимпульсов сигнала накачки излучать последовательность синхронизирующих радиоимпульсов, задающих закон изменения начальной фазы в последовательности радиоимпульсов ответного сигнала. Синхронизирующий радиоимпульс осуществляет управление начальной фазой радиоимпульса ответного сигнала в момент возбуждения параметрического генератора, для этого радиоимпульсы синхросигнала должны перекрываться с передним фронтом радиоимпульса сигнала накачки. В дальнейшем синхроимпульсы должны быть скомпенсированы в приемнике поисковой системы.

Выполненный А.В. Клюевым модельный эксперимент по апробации известного из литературы метода показал, что использование запросного сигнала в виде суммы из последовательности ЛЧМ радиоимпульсов сигнала накачки и синхроимпульса в виде двойного короткого ЛЧМ радиоимпульса с тем же законом изменения частоты

приводит к формированию последовательности ответного сигнала в виде ЛЧМ радиоимпульсов с определенным законом изменения начальной фазы, но при этом указанные синхроимпульсы плохо ослабляются в приемнике, настроенном на прием ЛЧМ радиоимпульса ответного сигнала.

Автором модернизирован указанный метод, для чего синхронизирующие радиоимпульсы предложено излучать с обратным законом изменения частоты. Синхронизация выполняется так же в момент перекрытия синхроимпульса и переднего фронта сигнала накачки и управляется за счёт инвертирования синхроимпульса, а обратный закон изменения частоты гарантирует ослабление синхросигнала в приемнике.

Модernизированный способ апробирован при помощи счетного эксперимента средствами программного комплекса LabVIEW, на него получен патент на изобретение.

В заключении приводятся основные результаты диссертационного исследования.

Говоря об особенностях диссертационного исследования А.В. Клюева, следует отметить ее практическую направленность и широкое использование методов моделирования. В то же время следует отметить, что основные научные результаты, полученные автором на основе компьютерного моделирования, проверены в натуральных экспериментах.

Рассматривая степень обоснованности научных положений, выводов и рекомендаций, сформулированных в диссертации, следует указать, что выполненное А.В. Клюевым диссертационное исследование основывается на использовании методов и положений теорий длинных линий и антенн, нелинейных электрических цепей, помехоустойчивого приема, статистической радиотехники, теории колебаний. Автором освоены и эффективно использованы методы математического моделирования и прикладные методы экспериментальных измерений в СВЧ области.

Достоверность и обоснованность научных положений диссертации обеспечивается также тем, что в целом совпадают результаты, полученные путем моделирования на основе разработанных математических моделей и натуральных экспериментов, а также совпадением полученных результатов с результатами других исследователей.

Основные положения диссертации неоднократно докладывались и обсуждались на научно-технических конференциях, включая международные, публиковались в рецензируемых журналах, проходили экспертизу при патентовании.

Теоретические и прикладные результаты диссертационной работы А.В. Клюева

внедрены в Федеральном государственном унитарном предприятии «Российский федеральный ядерный центр – Всероссийский научно-исследовательский институт экспериментальной физики», внедрение подтверждается актом, приложенном к диссертации.

Автореферат соответствует диссертации и в целом дает представление об основных научных результатах, полученных А.В. Клюевым и методах, примененных для их получения. Основные результаты, представленные в диссертации, опубликованы автором в цитируемых в диссертации 13 научных работах, включая 4 статьи в рецензируемых изданиях, рекомендованных ВАК, 1 патенте на изобретение и 8 публикациях в трудах и материалах международных научных конференций.

Говоря о личном вкладе автора, следует отметить, что все положения и научные результаты, содержащиеся в диссертации, опубликованы А.В. Клюевым в научных изданиях. Работа выполнена под научным руководством д.т.н., доцента Н.Ю. Бабанова, предложившего общее направление исследований и участвовавшего в получении и обсуждении основных результатов и являющимся соавтором большинства научных работ. При этом А.В. Клюев, наверное, первый исследователь (кроме самого Н.Ю. Бабанова), который реализовал и конкретизировал в своих работах новый подход к исследованию параметрических рассеивателей. При этом ряд результатов А.В. Клюева связан с большим уровнем самостоятельности. Например, это предложения по модели диода. Ее преимущество в том, что будучи «компактной» в математическом смысле, она хорошо «настраивается» по стандартным справочным данным. Отличаются оригинальностью исследования трехконтурного параметрического рассеивателя и вообще идея параметрического рассеивателя - четырехполосника достаточно хорошо проработана и доведена до практической методики, позволяющей синтезировать новые конструкции параметрических рассеивателей. В частности, к таким новым конструкциям относятся полосковые параметрические рассеиватели, результаты разработки и экспериментальной апробации которых представлены в настоящей диссертации. Новизна диссертационного исследования связана с выполненной апробацией новых конструкций параметрических рассеивателей на основе натурального и численного экспериментов, его предложений по созданию новых конструкций полосковых параметрических рассеивателей и модернизации способа поиска параметрических рассеивателей с использованием сигнала накачки в виде последовательности ЛЧМ радиоимпульсов.

Говоря о теоретической значимости исследования, следует отметить его предложения по исследованию свойств параметрических рассеивателей на основе

одновременного учета особенностей процессной модели параметрических рассеивателей и моделированию процессов в эквивалентной схеме параметрического рассеивателя. Используемые А.В. Клюевым аппроксимации вольт-амперных и вольт-фарадных характеристик диода, а также его предложения по представлению антенн параметрических рассеивателей в виде электрического контура с сопротивлением потерь, равным сопротивлению излучения, позволили выполнить анализ параметрических рассеивателей – четырехполюсников, обладающих более высокой эффективностью по сравнению с дипольными параметрическими рассеивателями.

Говоря о результатах, значимых для практики, следует отметить два результата:

1) Предложены, реализованы и апробированы на основе модельного и натурного экспериментов конструкции полосковых параметрических рассеивателей.

2) Показано, что при формировании в параметрическом рассеивателе последовательности радиоимпульсов ответного сигнала с заданным законом изменения начальной фазы путем излучения с радиоимпульсом сигнала накачки радиоимпульсов синхросигнала, целесообразно радиоимпульсы синхросигнала излучать с амплитудой в Q раз меньше амплитуды радиоимпульса сигнала накачки, где Q – добротность параметрического контура в нагрузке параметрического рассеивателя.

Таким образом, А.В. Клюевым выполнено серьезное научное исследование, обладающее теоретической и практической значимостью, в котором на основе исследований автора, опубликованных в научных статьях, патенте, тезисах и материалах конференций представлены результаты, которые можно характеризовать как новые научно обоснованные технические решения, внедрение которых позволит эффективно решать задачи создания и использования параметрических рассеивателей.

При этом автором показана высокая квалификация исследователя – радиотехника как в области методов математического анализа, теории дифференциальных уравнений, теории радиоцепей, теории параметрических генераторов, теории длинных линий, методов оптимального приема радиосигналов, методов компьютерного моделирования, так и в области экспериментальных измерений с использованием современных измерительных приборов и создания полосковых антенн.

Диссертация А.В. Клюева не лишена недостатков.

1. Выделенные перспективные направления исследований параметрических рассеивателей (ПР) представляются не полными; кроме того, при их проработке не

рассматривались вопросы сложности технической реализации, временные и материальные затраты, что сегодня часто является определяющим фактором.

В этой связи целесообразно было бы в первую очередь рассмотреть менее затратные направления, например:

- полная оптимизация конструкции известных и новых вариантов ПР, включая антенну и параметры нелинейного элемента;

- увеличение (как минимум на порядок) рабочих частот ПР, что может существенно повысить эффективность систем за счет большей направленности антенн и уменьшить габариты и вес установок.

2. Нигде (за исключением стр.160) не приведены численные оценки повышения эффективности систем радиомаркировки, а, согласно поставленной цели, это должно быть основным результатом диссертации. Целесообразно выбрать численную характеристику эффективности (потери преобразования, КПД, и т. п.) для сравнения различных ПР.

3. Представляется проблематичной возможность технической реализации обнаружителя широкополосных ПР в соответствии со структурной схемой рис.4.11.

Не ясно:

- а) каковы требования по развязке антенн 6, 7, 9 и как их реализовать?

- б) каковы требования к стабильности частот генераторов 2, 3? Синхронизированы ли они между собой?

- в) каков уровень мощности излучается?

- г) как будут мешать отражения от сторонних объектов?

4. На чем основана оценка в повышении чувствительности приемника на 30-45 дБ (стр. 160), если численный эксперимент (рис. 4.15, стр. 158) дал увеличение амплитуды ответного сигнала в 3 раза?

5. Почему отвергнут режим непрерывной или квазинепрерывный режим генерации источника запросного сигнала? В этом случае безразлично, с какой начальной фазой началась генерация ответного сигнала, а при необходимости фазу можно определить и сигнал инвертировать, а главное – не требуется источник синхронизирующих импульсов и, следовательно, нет проблемы его компенсации в приемнике.

6. В диссертации нет сведений о зарубежных исследованиях по данной тематике.

Указанные замечания не снижают благоприятного впечатления от знакомства с научным исследованием А.В. Клюева, которое выполнено на высоком прикладном и математическом уровне. Диссертация написана понятным языком для специалистов - радиотехников и соответствует уровню кандидатской диссертации по найденным

