

ОТЗЫВ

официального оппонента Горбачева Анатолия Петровича

на диссертационную работу Лю Шухуа

***«Пространственно-временные и энергетические характеристики
элементарных и сверхширокополосных комбинированных антенн»***,

представленную на соискание ученой степени кандидата технических наук
по специальности 2.2.14 – Антенны, СВЧ-устройства и их технологии.

Диссертационная работа представлена на 120 страницах, содержит 97 рисунков, список цитируемых литературных источников объемом 90 позиций. Текстовая часть работы включает введение, 5 глав, заключение, список литературы и приложение. Автореферат - брошюра, 24 страницы.

Актуальность темы исследования

Тема исследования характеристик и последующего компьютерного проектирования сверхширокополосных (СШП) антенн остаётся актуальной по ряду причин, связанных как с прогрессом в области антенных технологий, так и с расширением областей применения таких антенн в диапазоне сверхвысоких частот (СВЧ), включая решения фундаментальных научных задач. Целесообразно перечислить сферы применения СШП-антенных систем.

Радиолокация. СШП-сигналы позволяют повысить разрешающую способность по дальности и угловым координатам, эффективно проникать сквозь преграды (например, стены, грунт), обнаруживать объекты с малой эффективной поверхностью рассеяния, такие как беспилотные летательные аппараты (БПЛА).

Связь. СШП-технологии обеспечивают высокую скорость передачи данных, низкое энергопотребление и высокоэффективную электромагнитную совместимость. Они используются в беспроводных персональных сетях (WPAN, WBAN), системах позиционирования, IoT-устройствах. Например,

стандарт IEEE 802.15.4z регламентирует распространение и использование СШП в массовых мероприятиях и бизнес-решениях.

Медицина и экология. СШП-антенны применяются для дистанционной медицинской диагностики (сердечная деятельность, дыхание), обнаружения технологических дефектов в трубопроводах, мониторинга состояния окружающей среды.

Логистика и производство. СШП-технологии используются для точного отслеживания активов, оптимизации управления запасами и повышения эффективности производственных процессов.

Безопасность. СШП-системы применяются для предотвращения столкновений подвижных объектов, контроля доступа к ним и обеспечения безопасности на предприятиях.

Мощные источники СШП применяются для воздействия на различные среды и объекты, в том числе биологические, востребованное в решении фундаментальных задач.

Исследования характеристик СШП-антенн связаны с преодолением физических ограничений. Например, существует противоречие между требованием компактных размеров антенн и необходимостью широкой полосы рабочих частот. Важной задачей является определение фундаментальных ограничений, связывающих ключевые параметры: электрический размер, коэффициент усиления, относительную ширину диапазона рабочих частот, коэффициент отражения по входу. Такие ограничения помогают инженерам оценивать предельные характеристики антенн при заданных размерах и требованиях к работе. Решение этих задач требует реализации новых типов антенн. При этом перспективными направлениями являются: синтез СШП-антенн с заданными характеристиками, включая направленность и полосу пропускания; исследование временных характеристик, включая искажения коротких импульсов.

Таким образом, актуальность темы обусловлена как практическим спросом на СШП-антенны в современных технологиях, так и необходимостью решения фундаментальных научных задач, связанных с их характеристиками и применением, когда прослеживаются как технологическая, так и фундаментальная составляющая, что заслуживает поддержки.

Степень обоснованности научных положений и других результатов работы

Научные положения и другие результаты, сформулированные в диссертационной работе Лю Шухуа, представляются обоснованными и важными для проектирования СШП антенн. Обе последние квалификации достигаются за счёт чёткой постановки задач во введении, последовательного их решения в основной части и подтверждения результатов моделированием и экспериментом.

После первого раздела, где дан обзор антенн, применяемых для излучения короткоимпульсных сигналов, включая источники мощных СШП-импульсов, изложена информация по методической части исследования. Представлена информация по программным продуктам (4NEC2 и FDTD), использовавшимся в работе. Показаны возможности и ограничения данных программ. Приведены краткие характеристики векторных анализаторов цепей (Agilent 87619ET и Agilent N5227A), использовавшихся для исследования характеристик комбинированных СШП антенн в частотной области. Приведены краткие характеристики цифровых осциллографов реального времени (Tektronix TDS 6604 и LeCroy Wave Master 830Zi), использовавшихся для исследования характеристик комбинированных СШП антенн во временной области. Показано, что контрольно-измерительное оборудование, программные продукты позволяют в полной мере решать задачи исследования.

В третьем разделе на базе численного эксперимента проводится анализ зон распространения электромагнитных полей СШП излучателей. На основе анализа распределения потоков энергии, включая временные формы компонентов излученного электромагнитного поля вокруг канонических структур, показаны особенности образования ближней и дальней зон излучения в случае гармонического и импульсного возбуждения антенны.

В четвертом разделе в численном и реальном эксперименте исследована возможность настройки верхней граничной частоты полосы согласования комбинированных СШП антенн. Важно отметить, что предложенный соискательницей механизм настройки верхней граничной частоты не изменяет габаритных размеров комбинированной СШП антенны и, что особенно важно в мощных источниках СШП излучения, не ухудшает электрическую прочность антенны. Здесь также присутствует описание мощных комбинированных СШП антенн, использовавшихся в мощных источниках СШП излучения, где был применён предложенный механизм настройки.

В пятом разделе представлена методика нахождения центра излучения комбинированной СШП антенны в режиме импульсного излучения. Здесь эксперимент с реальными антеннами также дополнялся численным экспериментом. Следует отметить использование в нем высококласного осциллографа LeCroy Wave Master 830Zi с полосой 30 ГГц. Хорошее совпадение результатов численного и реального экспериментов убедительно доказывают существование двух центров излучения комбинированной СШП антенны для Е- и Н-плоскостей.

Достоверность и новизна научных положений, выводов и рекомендаций

Научные положения, выводы и рекомендации, сформулированные в диссертационной работе, являются обоснованными и достоверными, вполне отвечая актуальным требованиям в области проектирования СШП антенн, в частности, электрически малых СШП антенн.

Обоснованность и достоверность полученных результатов подтверждаются тем, что, во-первых, основные результаты базируются на эффективных и проверенных временем численных методах – МоМ и FDTD. При их реализации соискательницей уделено особое внимание корректности моделей и устойчивости численных решений путем верификации результатов с использованием этих двух методов, сравнением с результатами других авторов. Во-вторых, в процессе моделирования в коде 4NEC2 (проволочные модели) тщательно контролировались длины проволочек, длины сегментов и отношения диаметров проволочек к их длине. Важным подтверждением служат также натурные измерения характеристик комбинированных СШП антенн, которые хорошо согласуются с результатами моделирования, свидетельствуя о достоверности разработанных подходов.

Доказательством как достоверности, так и научной новизны является публикация основных результатов исследований в авторитетных рецензируемых научных изданиях. Результаты диссертации отражены в статьях, опубликованных в журналах из перечня ВАК РФ, таких как «Радиотехника и электроника», «Известия вузов – Физика», «Доклады ТУСУР». Кроме того, значимые результаты представлены в топовом международном журнале «IEEE Transactions on Antennas and Propagation». Публикация в таких взыскательных научно-технических журналах подтверждает соответствие работы критериям новизны и научной значимости. Сама научная новизна заключается в том, что впервые предложен новый критерий определения дальней зоны излучения СШП антенны, отличающийся от известного обоснованным выбором точки наблюдения. Решена важная задача создания настроечного механизма комбинированной СШП антенны, обеспечивающий как расширение, так и сужение ее полосы согласования. Отмечаю также выработку новой методики определения положения центров излучения комбинированных СШП антенн при возбуждении их биполярными импульсами напряжения наносекундной

длительности. Эти новые научные результаты легли в основу положений, выносимых на защиту, подчёркивая их продуманность и отражая вклад в развитие теории и практики СШП антенн.

Рекомендации, сформулированные в заключении, логически вытекают из полученных в работе теоретических и экспериментальных результатов, носят конкретный характер и направлены на практическое применение разработанных методик.

Соответствие диссертации и автореферата установленным требованиям

Полученные в диссертационной работе результаты соответствуют паспорту специальности 2.2.14 – Антенны, СВЧ-устройства и их технологии, где я бы рекомендовал обратить внимание на два пункта:

- Исследование характеристик антенн и микроволновых устройств для их оптимизации и модернизации, что позволяет осваивать новые частотные диапазоны, обеспечивать электромагнитную совместимость, создавать высокоэффективную технологию и т. д.
- Исследование и разработка адаптивных и малошумящих антенных систем, больших антенн с высоким усилением, активных фазированных антенных решеток со сверхбольшими мощностями излучения, радиооптических антенных систем и антенн с уникальными характеристиками.

В библиографическом списке диссертационной работы имеются ссылки на авторов и данные ретроспективных материалов, перечислены также научные работы соискателя.

Автореферат адекватно отражает основное содержание диссертационной работы и позволяет чётко представить перечисленные в работе задачи исследования, их взаимосвязь и увидеть полученные в ходе решения результаты.

Теоретическая значимость работы заключается в разработке нового критерия определения границы дальней зоны СШП антенны в режиме излучения сверхкоротких электромагнитных импульсов. Предложенный критерий асимптотической изоморфности для временных форм компонент электрического E и магнитного H полей при нахождении границы дальней зоны излучения, корректно соотносится с критерием $rE_p \approx \text{const}$, где r – расстояние до точки наблюдения, E_p – пиковая напряженность электрического поля, излученного антенной. Кроме того, предложена методика по измерению положения центров излучения СШП антенн в режиме излучения ими наносекундных импульсов. Полученные результаты расширяют и углубляют знания о характеристиках СШП антенн.

Практическая ценность диссертационной работы определяется разработкой конкретных инструментов и созданием новых устройств, имеющих потенциал для реального применения. Разработан критерий определения дальней зоны излучения СШП антенн позволяющий определять границу зоны в численных экспериментах (во временной области) для произвольной формы возбуждающего антенну импульса. Разработан настроенный элемент, позволяющий как сужать, так и расширять полосу согласования комбинированной СШП антенны и использовать ее при различных источниках СШП излучения с различными импульсами напряжения на выходе генератора, возбуждающего антенну. Разработана методика нахождения центра излучения комбинированной СШП антенны, которая позволяет эффективно использовать ее в качестве облучателя в зеркальной антенне. Ценность работы подтверждается её использованием в научно исследовательской работе, выполненной по госзаданию, что подтверждено соответствующим актом.

Личный вклад соискателя и публикации

Объём и значимость проделанной соискателем работы подтверждаются списком публикаций, включая статьи в рецензируемых журналах из перечня ВАК и индексируемых в международных базах данных Scopus/Web of Science, доклады на авторитетных международных и всероссийских конференциях. Это отражает существенный объём полученных научных и практических результатов, характеризующих проделанную работу.

Как указано в диссертации и автореферате, часть результатов получена в соавторстве, и вклад автора оговорен. Представляется убедительным, что основные научные результаты, составляющие новизну работы и выносимые на защиту положения, были получены автором лично или при его определяющем участии. Это характеризует существенный личный вклад соискателя в исследование СШП антенн, а также в решение поставленных в диссертации задач.

Вместе с тем по работе **возникли следующие замечания.**

1. В третьем разделе говорится о разработке нового, более общего по сравнению с известным вышеупомянутым критерием $\Gamma E_p \approx \text{const}$, правила определения границы дальней зоны СШП антенны в режиме излучения сверхкоротких электромагнитных импульсов. При этом заявлено о его преимуществе с существующим критерием. Что мешает критерию $\Gamma E_p \approx \text{const}$ определить границу дальней зоны излучения в произвольной точке?

2. В четвертом разделе говорится о настроечном элементе, позволяющем как сужать, так и расширять полосу согласования комбинированной СШП антенны. При этом в качестве характеристик антенны приводятся только КСВН и диаграммы направленности на фиксированных частотах. Представляется, что этих данных маловато, чтобы уверенно говорить о характеристиках излучения антенны во всей полосе рабочих частот. Полагаю, что следовало бы дополнить эти исследования измерениями коэффициента усиления в полосе частот.

3. Для возбуждения комбинированных СШП антенн в ходе своих исследований соискательница использовала биполярные импульсы напряжения. Но это приводит к тому, что требуются дополнительные технические решения в виде формирователей биполярных импульсов. В работе не просматривается рельефное обоснование такого выбора возбуждающего импульса.

4. В работе показано существование двух разнесенных в пространстве центров излучения комбинированной СШП антенны, но нет объяснения причины. Возможно, что это связано с конструкцией антенны: один центр излучения связан с излучателем магнитного типа (активный магнитный диполь), а второй с излучателем электрического типа (ТЕМ-рупором), которые разнесены в пространстве антенны.

Заключение

На основании вышеизложенного считаю, что диссертационная работа Лю Шухуа является самостоятельно выполненной научной квалификационной работой, в которой содержится решение ряда задач относящихся к теории и практике применения сверхширокополосных антенн, имеющей существенное значение для развития технических наук в области техники СВЧ. Указанные выше замечания, имея локальный характер, не влияют на общую положительную оценку работы. Сформулированные научные положения, выводы и рекомендации, изложенные в заключении, обоснованы, а полученные результаты достоверны. В публикациях соискательницы вполне убедительно отражена новизна результатов её исследований, а практическая значимость подтверждена соответствующими документами.

Считаю, что диссертационная работа «Пространственно-временные и энергетические характеристики элементарных и сверхширокополосных комбинированных антенн» соответствует пункту 9 положения ВАК,

предъявляемым к кандидатским диссертациям, а Лю Шухуа заслуживает присуждения ей ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.2.14 – Антенны, СВЧ-устройства и их технологии.

Официальный оппонент



Горбачев А.П.

«22» января 2026 года

Сведения

Горбачев Анатолий Петрович, доктор технических наук по специальности 05.12.21 (номенклатура 1999 года), профессор по специальности «Антенны, СВЧ-устройства и их технологии» (аттестат ПРФ № 002123), профессор кафедры «Радиоприёмные и радиопередающие устройства» ФГБОУ ВО «Новосибирский государственный технический университет» («НГТУ»).

630073, г. Новосибирск, просп. К. Маркса, дом 20. Телефон: +7 (383) 346-15-46. E-mail: gorbachev@corp.nstu.ru

Подпись А.П. Горбачева заверяю.

Начальник отдела кадров НГТУ

Пустовалова Ольга Константиновна

«22» января 2026 г.

