

На правах рукописи

Костиков Григорий Александрович

ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ АНТЕННЫ ВИВАЛЬДИ В  
РЕЖИМЕ ИЗЛУЧЕНИЯ СВЕРХКОРОТКИХ ИМПУЛЬСОВ И  
СВЕРХШИРОКОПОЛОСНЫХ СИГНАЛОВ

Специальность: 05.12.07 – антенны, СВЧ–устройства и их технологии

АВТОРЕФЕРАТ  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Санкт-Петербург – 2007

Работа выполнена в Санкт-Петербургском государственном электротехническом университете “ЛЭТИ” им. В. И. Ульянова (Ленина).

Научный руководитель –  
кандидат технических наук, доцент Сугак М. И.

Официальные оппоненты:  
доктор технических наук, профессор Алешкин А. П.  
кандидат технических наук Федотов А. Н.

Ведущая организация – ФГУП НИИ “Вектор”, г. Санкт-Петербург

Защита состоится « 14 » ноября 2007 г. в 15<sup>00</sup> часов на заседании диссертационного совета Д 212.238.03 Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета “ЛЭТИ” им. В.И. Ульянова (Ленина) по адресу: 197376, Санкт-Петербург, ул. Проф. Попова, 5.

С диссертационной работой можно ознакомиться в библиотеке университета.

Автореферат разослан « 05 » октября 2007 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета

Баруздин С. А.

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность темы.** В настоящее время сверхкороткие импульсы (СКИ) и сверхширокополосные сигналы (СШПС) используются в системах различного назначения, в частности: подповерхностного зондирования, радиолокации, диагностических, локального противодействия, и, наконец, связанных системах. Развитие импульсных систем требует разработки эффективных излучателей широкополосных и импульсных сигналов.

Несмотря на большое число работ, посвященных исследованиям импульсных антенн, в настоящее время этот элемент систем не достаточно хорошо изучен. Определения, используемые для описания антенн, работающих в режиме узкополосного воздействия, требуют корректировки при их использовании для импульсных антенн. Эта задача решена в работах Зернова Н. В. и Авдеева В. Б., в них приводятся определения и методики расчета основных энергетических характеристик, которыми необходимо пользоваться при описании свойств сверхширокополосных и импульсных антенн, а также уточнены величины, входящие в уравнение дальности при использовании несинусоидальных сигналов. Однако в литературе отсутствуют количественные данные об энергетических характеристиках огромного класса антенн, что затрудняет выбор геометрии, не позволяет проводить расчет системных характеристик (дальность работы, потребление, КПД и др.) и их оптимизацию.

В системах с особыми требованиями на скрытность и массу применение классических и хорошо зарекомендовавших себя импульсных антенн, таких как *ТЕМ* - рупора, биконические вибраторы и др., затруднительно. Плоские конструкции обладают лучшими массогабаритными и конструктивными характеристиками, что подчеркивает целесообразность их использования для формирования импульсного излучения. Наиболее ярким представителем класса планарных широкополосных антенн является антенна Вивальди. Вместе со всеми достоинствами плоских структур она незначительно проигрывает объемным в своих электрических характеристиках. Известны системы, в которых антенна этого типа используется для приема и излучения импульсного сигнала, однако их недостатком является отсутствие целостного анализа излучателя в импульсном режиме. В литературе отсутствуют сведения о том, как геометрия излучателя, длительность и форма СКИ влияют на его энергетические характеристики, что существенно усложняет проектирование систем. Поэтому исследования антенны Вивальди в режиме импульсного возбуждения на сегодняшний день являются актуальными.

**Цель работы и задачи исследований.** Целью настоящей работы является теоретическое и экспериментальное исследование антенны Вивальди, работающей в режиме излучения импульсного сигнала, в частности:

- электродинамический анализ основных энергетических характеристик излучателя (коэффициента полезного действия (КПД), энергетического коэффициента направленного действия (ЭКНД), энергетического коэф-

фициента усиления (ЭКУ)) и выявление закономерностей поведения характеристик с изменением длительности, формы возбуждающего импульса, а также геометрии излучателя;

- определение оптимальных, по критерию максимизации энергетической эффективности, геометрий и длительностей импульса, выработка рекомендаций к проектированию;
- исследование кроссполяризационных эффектов излучателя и их количественная оценка;
- сравнительный анализ характеристик антенны Вивальди с другими видами импульсных антенн.

Для достижения поставленных целей необходимо решить следующие **задачи**:

- произвести расчет энергетических характеристик для различных геометрий излучателя, форм и длительностей возбуждающего импульса, выполнить обобщение полученных результатов, выявить закономерности поведения энергетических характеристик;
- сформулировать рекомендации, на основе которых можно проводить разработку антенн Вивальди с требуемыми энергетическими свойствами;
- выполнить проектирование и разработку антенны Вивальди;
- разработать экспериментальную методику анализа фидерного КПД импульсных антенн;
- провести сравнительный анализ энергетических характеристик антенны Вивальди с излучателями других типов.

**Объект и методы исследований.** Объектом исследования является антенна Вивальди, предназначенная для формирования импульсного излучения. При решении задач, поставленных в диссертации, использовался численный электродинамический метод конечного интегрирования (*FIT*), а также экспериментальные методы анализа.

**Научная новизна диссертационной работы заключается:**

- в количественном описании энергетических свойств антенны Вивальди, возбуждаемой СКИ и СШП сигналами;
- в выявленных закономерностях поведения энергетических характеристик антенны Вивальди с изменением ее геометрии и длительности возбуждающего импульса;
- в исследовании кроссполяризационных эффектов антенны Вивальди в импульсном режиме.

**Научные положения, выносимые на защиту:**

1. При соотношении сторон антенны Вивальди меньше единицы энергетический коэффициент направленного действия растет монотонно с увеличением длины, нормированной к пространственной длительности импульса, если ширина раскрытия щелевой линии существенно больше длины - имеет максимум.

2. Значение фидерного КПД антенны Вивальди инвариантно, в пределах допустимой погрешности, к изменению закона расширяющейся щелевой линии от экспоненциального до линейного, при оптимальном выборе сопротивления источника.
3. Энергия кроссполяризационного излучения антенны Вивальди максимальна при равенстве пространственной длительности возбуждающего импульса и длины излучателя.

**Практическая значимость результатов работы заключается в:**

- выработанных рекомендаций по выбору геометрий излучателя, позволяющих обеспечить требуемую длительность, энергетiku и поляризационные свойства излучаемого антенной импульса;
- возможности корректно пользоваться уравнением дальности при расчете характеристик импульсных систем, использующих антенны Вивальди (дальность работы, потребление, КПД);
- сопоставлении энергетических характеристик антенны Вивальди и других типов импульсных антенн.

**Внедрение результатов работы.** Основные результаты работы были получены в процессе выполнения хоздоговорных НИР, проводимых в 2003 - 2006 годах на кафедрах Теоретических основ радиотехники и Радиоэлектронных средств СПбГЭТУ «ЛЭТИ», в частности в работах:

- разработка многочастотных антенн для «РАТАН-600»;
- исследование и разработка сверхширокополосных печатных антенн.

Материалы диссертации (теоретические и практические) внедрены в разработки кафедры ТОР и РЭС СПбГЭТУ «ЛЭТИ», нашли реализацию в экспериментальных макетах радиосистем заказчика, используются в спецкурсе «Теория и проектирование современных антенных систем».

**Достоверность научных и практических результатов.** Выводы и рекомендации, содержащиеся в диссертационной работе, подтверждаются адекватностью применяемых математических моделей, хорошим согласием теоретических результатов и натуральных экспериментов, сопоставлением с результатами полученными другими авторами.

**Апробация работы.** Основные теоретические и практические положения работы докладывались и обсуждались на:

- 59, 60, 61, 62 научно-технических конференциях НТОРЭС им. Попова, посвященных дню радио (Санкт-Петербург, апрель, 2004, 2005, 2006, 2007 годов);
- политехническом симпозиуме (Санкт-Петербург 2004 г.);
- конференции по актуальным проблемам радиоэлектроники и телекоммуникаций (СГАУ, Самара, 2004 г.);
- международной конференции по волновой электронике «VII International Conference for young researchers: Wave Electronics and its application in information and telecommunication systems», St. Petersburg, 2004;

- 14-й международной конференции «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии» (*Crimico-2004*), Севастополь, Украина;
- 6-ом и 7-ом международном симпозиуме по электромагнитной совместимости и электромагнитной экологии (*EMC-2005, EMC-2007*), Санкт-Петербург, 2005, 2007;
- XI и XIII международной научно-технической конференции «Радиолокация, навигация и связь» (*RLNC-2005, RLNC-2007*), Воронеж, ВГУ. На конференции 2005 года доклад с названием «Расчет энергетических характеристик антенн в режиме возбуждения сверхкороткими импульсами» был удостоен диплома за лучший доклад;
- «Современные проблемы радиоэлектроники», Красноярск, КГУ, 2005 и 2006 годов;
- международной конференции «Сверхширокополосные сигналы и сверхкороткие импульсы в радиолокации, связи и акустике», 2005 г., Суздаль, Россия;
- научно-технических конференциях профессорского - преподавательского состава СПбГЭТУ (ЛЭТИ) в 2003, 2004, 2005, 2006, 2007 г.;
- научно-техническом семинаре «Современные проблемы техники и электроники СВЧ» СПбГЭТУ, 2005, 2006, 2007 г.;
- 3-ей международной конференции «Ultrawideband and ultrashort impulse signals» (*UWBUSIS-2006*), Sevastopol, Ukraine.

Результаты работы автора отмечены дипломами и грантами 12-ти конкурсов, среди которых конкурс стипендий президента РФ 2006 г., конкурс научных проектов аспирантов и докторантов СПбГЭТУ «ЛЭТИ» 2005, 2006 годов. Часть работы выполнена при поддержке гранта правительства Санкт-Петербурга 2004 года, шифр гранта: М04-3.9Д-256.

**Публикации.** По теме диссертации опубликовано 25 научных работ, из них – 7 статей (5 статей, опубликованных в ведущих рецензируемых журналах и изданиях, определенных ВАК), 18 работ – в сборниках трудов и материалов научно-технических конференций.

**Структура и объем.** Диссертация состоит из введения, четырех глав с выводами, заключения, списка литературы, включающего 125 наименований, и двух приложений. Основная часть работы изложена на 92 страницах машинописного текста. Диссертация содержит 145 рисунков и 1 таблицу.

## СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** обоснована актуальность темы диссертационной работы, направленной на количественное описание энергетических свойств антенн, излучающих СКИ и СШП сигналы, сформулированы цель и задачи исследований, изложены научная новизна и практическая значимость полученных результатов, сформулированы основные положения, выносимые на защиту.

**В первой главе** цитируются определения энергетических характеристик, которые наиболее целостно описывают свойства импульсных антенн – КПД, ЭКНД, ЭЭП, а также уравнение дальности для систем, использующих несинусоидальные сигналы. Отмечено, что в ряде работ для количественного описания энергетических свойств импульсных антенн используются характеристики, рассчитанные на одной частоте, и на основе таких подходов делаются выводы об энергетике антенн, возбуждаемых СКИ. В результате неизбежно возникают: ошибки в оценке системных характеристик (дальность работы системы, КПД, потребление, ее масса и габариты), трудности при сравнении различных антенн, возбуждаемых СКИ, затруднения при оптимизации энергии сигнала, излучаемого антенной. Поэтому расчет энергетических характеристик антенн является важнейшей задачей, решение которой позволяет упростить разработку и существенно улучшить технические характеристики импульсных систем.

Во второй части главы рассматриваются характеристики и конструкции излучателей Вивальди. Проводится обзор работ, посвященных исследованиям антенн Вивальди в импульсном режиме, выявляются их недостатки. На основе изложенного в главе материала обоснована актуальность диссертации, поставлены цели и задачи исследований.

**Вторая глава** посвящена исследованию фидерного КПД антенны Вивальди, который определяется как отношение излученной антенной энергии ( $W_{\text{изл}}$ ) к энергии возбуждающего антенну импульса ( $W_{\text{пад}}$ ):

$$\eta = \frac{W_{\text{изл}}}{W_{\text{пад}}} = \frac{\oint \int E_{\text{изл}}^2(t) dt ds}{Z_0 \int a_{\text{пад}}^2(t) dt},$$

где  $E_{\text{изл}}(t)$  - абсолютное значение напряженности электрического поля, излученного антенной,  $Z_0 = 120\pi$ , Ом - волновое сопротивление свободного пространства,

$a_{\text{пад}}(t)$  - амплитуда падающей на антенну волны, нормированная к волновому сопротивлению линии,  $S$  - замкнутая поверхность в дальней зоне излучателя.

Представляет практический ин-

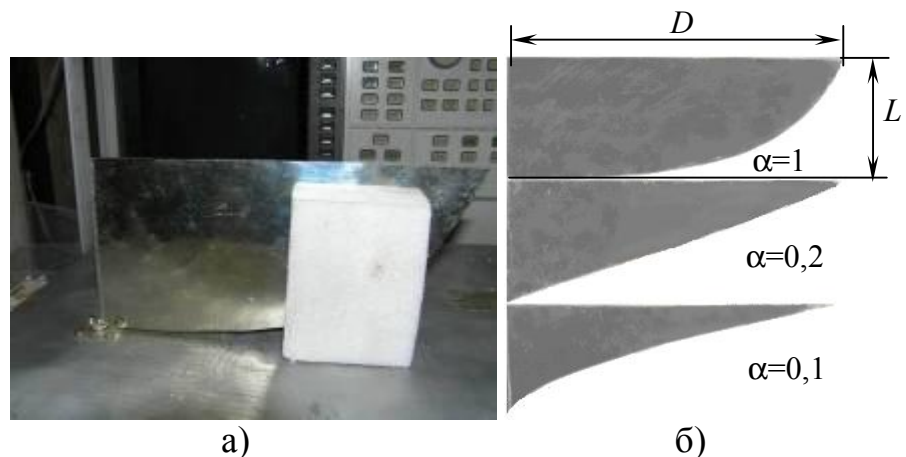


Рис. 1. а) Экспериментальная установка; б) геометрии исследуемых излучателей.

интересен вопрос о том, как форма расширяющейся щелевой линии, размеры излучателя, длительность и форма возбуждающего импульса влияют на фидерный КПД антенны. Целью настоящей главы является количественная оценка КПД излучателя Вивальди, возбуждаемого СКИ различной формы и длительности и выявление закономерностей в поведении характеристики с изменением геометрии и сопротивления питающей линии. Эти данные позволяют правильно выбирать параметры антенны для излучения сигнала заданной формы и длительности с требуемой энергетической эффективностью.

В первом разделе главы формулируются рекомендации, на основе которых можно выбрать сопротивление питающей линии. Установлено, что форма отраженного сигнала существенно зависит от волнового сопротивления линии и электрической длины излучателя ( $t_a/t_i$ ), где  $t_a=D/c$ ,  $c$ -скорость света в вакууме,  $D$ -продольный размер излучателя,  $t_i$  – длительность возбуждающего импульса. На рис. 2, а приводятся экспериментальная и расчетная зависимости сигнала, отраженного от входа излучателя, возбуждаемого монополярным импульсом, фотография экспериментальной установки приведена на рис. 1, а, исследуемые излучатели на рис. 1, б, здесь  $\alpha$  - параметр, характеризующий закон изменения щелевой линии излучателя.

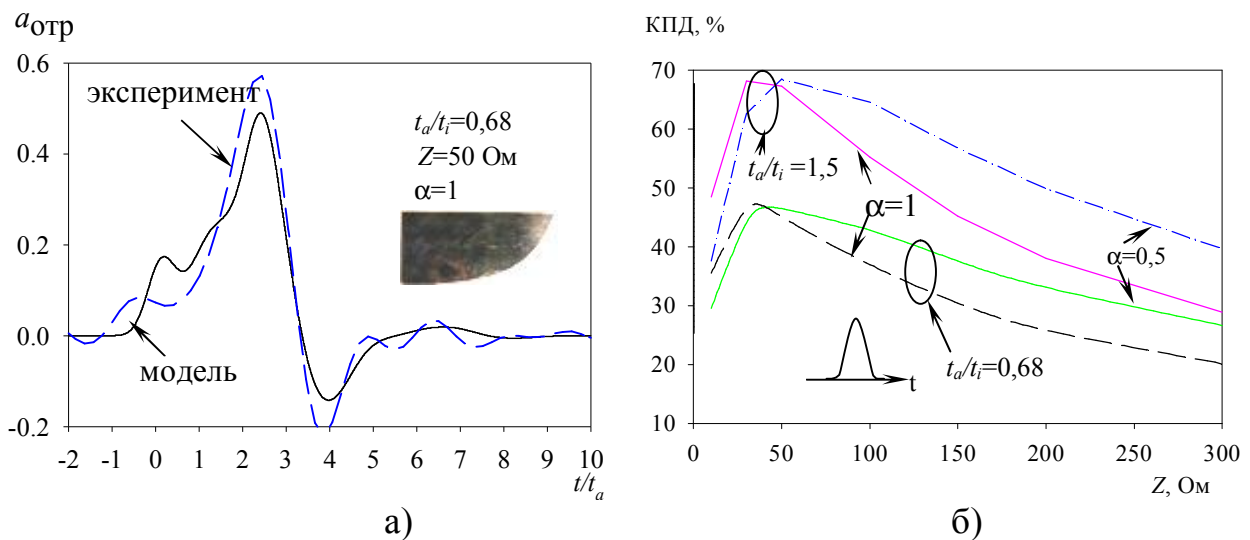


Рис. 2. а) Экспериментальная и расчетная зависимости сигнала отраженного в питающую линию излучателя Вивальди ( $\alpha=1$ ); б) КПД излучателя для различных сопротивлений линии.

На рис. 2, б приводятся зависимости КПД излучателя от сопротивления фидера. Из приведенных кривых обращают на себя внимание следующие закономерности. Имеет место максимум, который свидетельствует о существовании оптимального сопротивления генератора для заданной формы расширяющейся щелевой линии ( $t_a/t_i$  слабо влияет на его положение на оси сопротивлений). Снижение нормированной длины излучателя приводит к падению КПД. Сопротивление линии, при котором происходит максимизация КПД



излучателя, испытывает монотонный рост с уменьшением  $\alpha$  (рис. 3, а), зависимости получены для монополюсного варианта излучателя. Отношение размеров излучателя  $L/D$ , где  $L$ -ширина излучателя, слабо влияет на поведение зависимости.

На рис. 3, б приведено семейство кривых КПД в зависимости от нормированной, к пространственной длительности импульса, длины излучателя ( $t_a/t_i$ ); в качестве параметра на графике выступает отношение  $L/D$ . Значение сопротивления выбирается оптимальным (в соответствии с рис. 3, а).

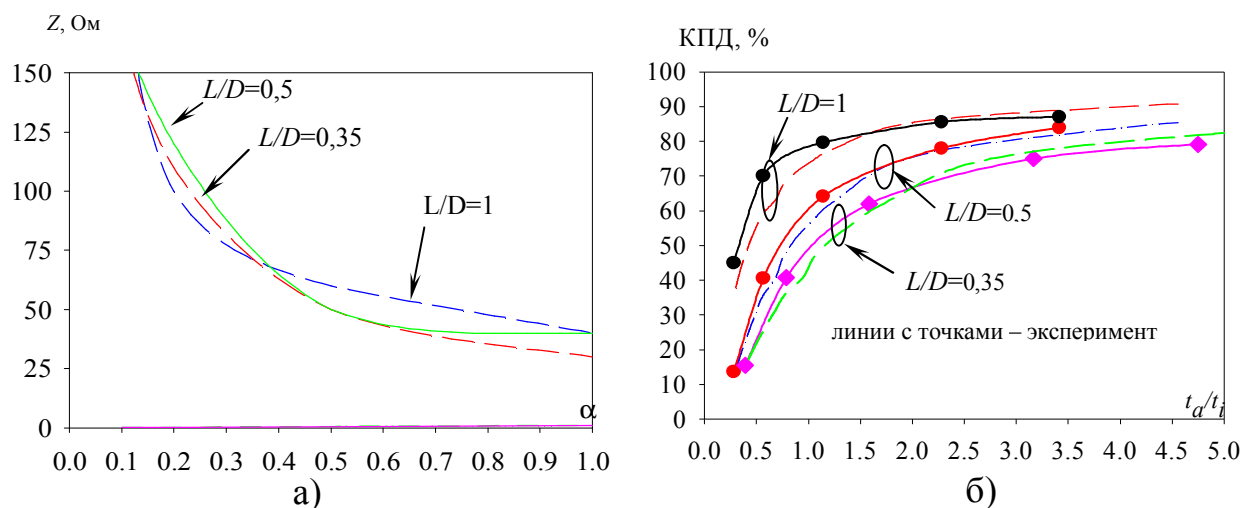


Рис. 3. а) Оптимальное сопротивление питающей линии для различных профилей антенны; б) фидерный КПД для различных пропорций излучателя.

При малых  $t_a/t_i$  антенна обладает низким значением КПД, это вызвано тем, что основная доля спектральной плотности мощности импульса сосредоточена на низких частотах, где излучатель обладает плохим уровнем согласования. Увеличение электрической длины приводит к росту КПД, вследствие увеличения доли энергии, попадающей в рабочую полосу частот. С ростом  $t_a/t_i$  выход кривых на некоторый постоянный уровень происходит весьма быстро. Установлено, что изменение параметра  $\alpha$ , в пределах  $0,1 \dots 1$ , слабо влияет на КПД излучателя ( $<5\%$ ), сопротивление линии, при котором происходит максимизация КПД, испытывает монотонное снижение с увеличением  $\alpha$ .

В заключительном разделе второй главы исследуются излучатели с формой, отличающейся от рассмотренных ранее отсутствием некоторых частей сплошной металлизации (рис. 4). Выявлено, что при переходе от классической формы излучателя к геометрии, близкой к  $V$ -антенне КПД уменьшается не более чем, на 8 % в широком диапазоне изменения нормированной длины антенны.



Рис. 4.

**В третьей главе** проводятся исследования характеристик направленности антенны Вивальди, прежде всего ЭКНД и угло-временных зависимостей излучаемых полей. В соответствии с работами Авдеева В. Б., ЭКНД импульсной антенны определяется как:

$$D_s(\theta, \varphi) = \lim_{r \rightarrow \infty} \frac{4\pi \cdot r^2 \cdot \int_t |\vec{E}(\theta, \varphi, t)|^2 dt}{\oint_s \int_t |\vec{E}(\theta, \varphi, t)|^2 dt ds},$$

где  $\vec{E}(q, j, t)$  - напряженность излученного поля,  $r$ -расстояние до точки наблюдения.

На основе метода конечного интегрирования (*FIT*) выполнен расчет ЭКНД и ЭКУ излучателя Вивальди, возбуждаемого импульсными сигналами различной формы и длительности. Получены зависимости, позволяющие проследить влияние размеров антенны и формы расширяющейся щелевой линии на уровень излучаемой антенной энергии и ее распределение в пространстве.

Рассчитаны угловые зависимости ЭКНД излучателя для различных  $t_a/t_i$ . На рис. 5. приводятся угломестная и азимутальная зависимости ЭКНД, при относительной длине антенны  $t_a/t_i=2,28$ .

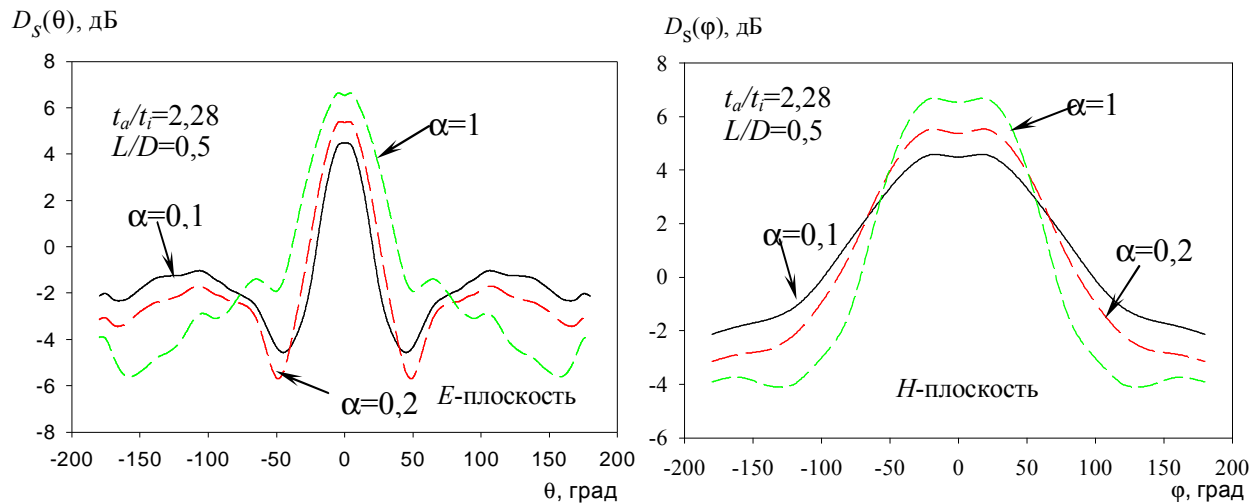


Рис. 5. Угломестная и азимутальная зависимости ЭКНД ( $t_a/t_i=2,28$ ).

Параметром на графике является коэффициент  $\alpha$ . Видно, что при увеличении  $\alpha$  ЭКНД в нормальном направлении растет. Это связано с тем, что боковое излучение при малых  $\alpha$  становится более заметным. Основной лепесток ЭКНД в азимутальной плоскости оказывается шире, чем в угломестной. На рис. 6 приводится зависимость ЭКНД излучателя с  $L/D=0,5$  от электрической длины. Параметром на графике является параметр, определяющий форму расширяющейся щелевой линии. Увеличение электрической длины приводит к монотонному росту ЭКНД. Поведение кривой вполне укладывается в пред-

ставления об излучении антенны в монохроматическом режиме. Когда спектр импульса узок и сосредоточен в области низких частот, то средневзвешенный по спектру КНД мал. Увеличение  $t_a/t_i$  приводит к возникновению гармоник в спектре сигнала, на которых КНД имеет более высокое значение, в результате происходит и увеличение ЭКНД.

Из диапазона исследуемых  $\alpha$  наиболее выгоден излучатель с  $\alpha=1$ , его уменьшение приводит к падению ЭКНД и при отношениях  $t_a/t_i > 0,8$  отличие в ЭКНД излучателей с  $\alpha=1$  и  $\alpha=0,1$  достигает 2 дБ. Следует отметить, что для электрически длинных антенн и  $\alpha$ , близких к 0,1, наблюдается замедление роста ЭКНД с увеличением  $t_a/t_i$ . Дальнейшее увеличение параметра может привести к снижению ЭКНД, связанному с существенной несинхронностью поля в раскрытии излучателя. Более сильное появление данного эффекта заметно для излучателей с высоким отношением  $L/D$ . В области коротких электрических длин кривая асимптотически приближается к значению ЭКНД диполя Герца (1,5).

Во втором разделе главы исследуются поляризационные свойства излучателей Вивальди и оценивается влияние на них геометрии антенны. Выполнен электродинамический расчет коэффициента поляризационных потерь (КПП):

$$KПП = \frac{W_{\text{кросс}}}{W_{\text{изл}}} = \frac{\oint \int_{s,t} E_{\phi}^2(t) dt ds}{\oint \int_{s,t} (E_{\phi}^2(t) + E_{\theta}^2(t)) dt ds},$$

где  $W_{\text{кросс}}$  - энергии кроссполяризационного излучения антенны,  $W_{\text{изл}}$  - полная излученная энергия,  $E_j(t)$ ,  $E_q(t)$  - напряженность азимутальной и угломестной составляющих электрического поля, соответственно. Рассмотрено поведение КПП для различных геометрий излучателя и параметров сигнала. На Рис. 7, а приведена зависимость КПП от  $t_a/t_i$  для излучателя с  $L/D=0,5$ . Наиболее характерные особенности поведения кроссполяризационной составляющей поля, излучаемого антенной Вивальди, заключаются в следующем: излучатели с малыми значениями  $\alpha$  обладают наиболее высоким уров-

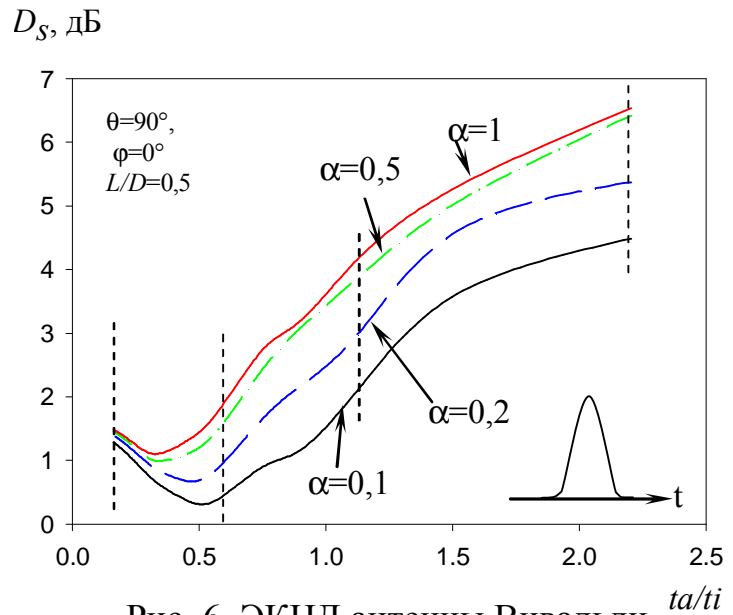


Рис. 6. ЭКНД антенны Вивальди.

нем паразитного излучения, при увеличении  $\alpha$  происходит снижение уровня кроссполяризационного излучения, для излучателя с  $t_a/t_i \approx 1$  и  $\alpha=1$  оно достигает 20 %; уход от  $t_a/t_i \approx 1$  приводит к снижению влияния формы расширяющейся щелевой линии на уровень паразитного излучения, при изменении  $L/D$  характер кривых сохраняется, но уровень излучения существенно отличается (излучатели с большими значениями  $L/D=1$  имеют максимальное значение КПП на 20 % меньше, чем излучатели с  $L/D=0,5$ ). Причина снижения заключается в том, что малые  $D$  препятствуют формированию токов с существенной продольной составляющей.

Решающей характеристикой, которая определяет энергетическую эффективность импульсной антенны, является ЭКУ. Для импульсных излучателей он вводится в данной работе по аналогии с антеннами, работающими в синусоидальном режиме, как произведение КПД на ЭКНД. Основные задачи, которые решались в настоящем разделе: количественная оценка ЭКУ излучателя Вивальди; выявление основных закономерностей его поведения для различных длительностей импульса и геометрий излучателя; выбор геометрий, обеспечивающих лучшие значения ЭКУ.

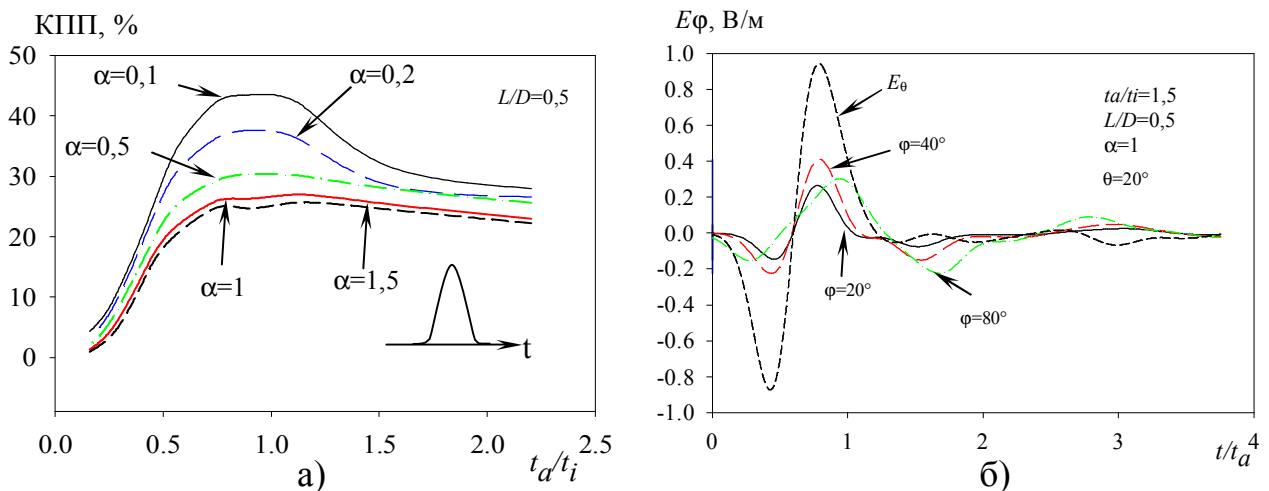


Рис. 7. а) КПП антенны Вивальди с  $L/D=0,5$ ; б) напряженность основной и кроссполяризационной составляющих поля.

Энергетический коэффициент усиления излучателя с  $L/D=0,5$  представлен на рис. 8, а, параметром на графике является форма расширяющейся щелевой линии. Сопротивление питающей линии при построении зависимости для заданного  $\alpha$  выбиралось оптимальным в соответствии с кривыми, представленными на рис. 3, а. Для электрически коротких антенн, как и следовало ожидать, ЭКУ, вследствие низкого КПД, стремится к нулю. Увеличение электрической длины излучателя приводит к монотонному росту ЭКУ, и при электрической длине около 2 замечен выход кривых для  $\alpha=0,1$ ;  $0,2$  на некоторый постоянный уровень, свидетельствующий о том, что дальнейшее увеличение электрической длины не приведет к существенному увеличению

энергетической эффективности антенны. Излучатели с  $\alpha \approx 1$ , за счет более высокого ЭКНД, обладают и лучшим ЭКУ. В случае возбуждения антенны импульсным сигналом биполярной формы, ЭКУ оказывается в среднем на 5 дБ выше, чем при возбуждении монополярным импульсом той же длительности.

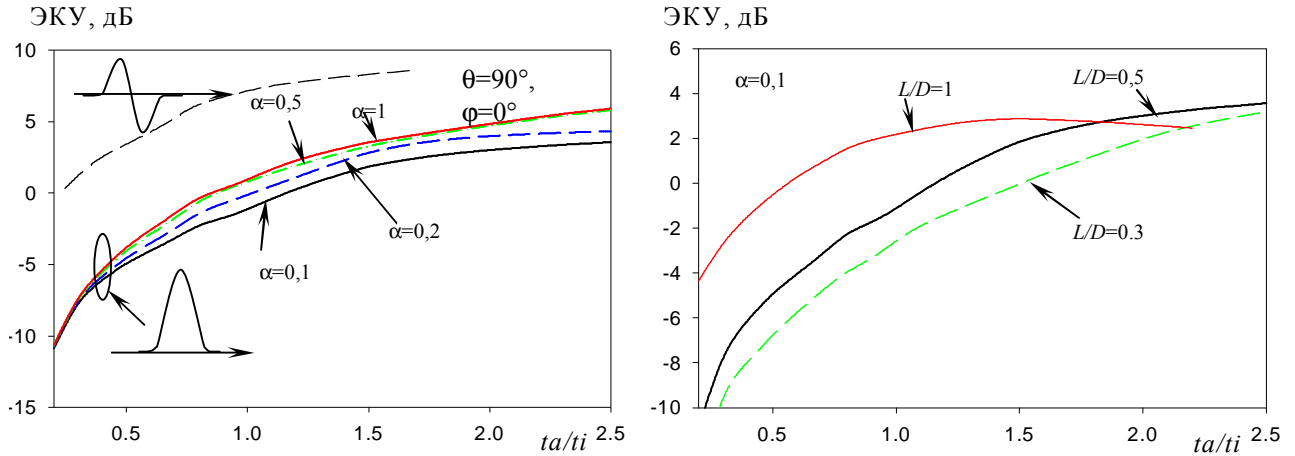


Рис. 8. а) ЭКУ излучателя Вивальди ( $L/D=0,5$ ), б) ЭКУ излучателя Вивальди ( $\alpha=1$ ).

Зависимости ЭКУ излучателя с различными  $L/D$ , построенные для  $\alpha=1$  представлены на рис. 8, б. При малых электрических длинах с увеличением  $L/D$  он монотонно растет. Увеличение электрической длины выше 1,5 приводит к немонотонности изменения ЭКУ излучателя с  $L/D \approx 1$ , эта кривая демонстрирует наличие оптимальных пропорций излучателя.

На основе представленных данных и рекомендаций можно выбрать размеры и форму расширяющейся щелевой линии излучателя, обеспечивающие требуемые направленные свойства.

**Четвертая глава** посвящена разработке и экспериментальному исследованию конструкций излучателя Вивальди. Здесь также проводится сравнение энергетических характеристик антенн различных типов (вибраторные излучатели, плоские широкополосные,  $TEM$ -рупор и др.) с излучателем Вивальди. Приведенные данные позволяют сделать вывод об об-

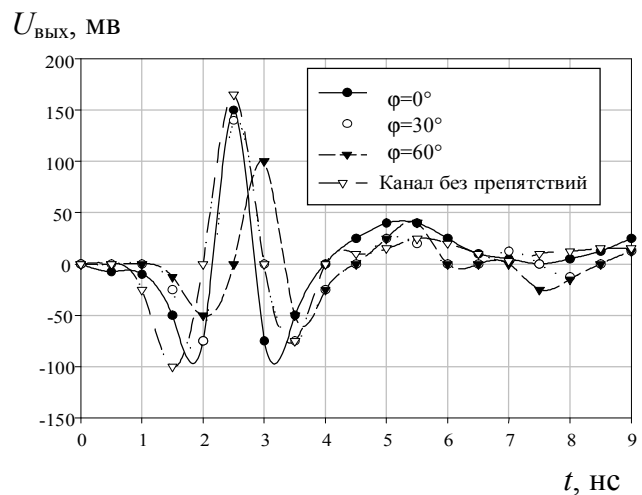


Рис. 9. Сигнал на приемной антенне для нескольких углов поворота передающей антенны.

ласти применения излучателя Вивальди в системах различного класса и выявить преимущества и недостатки различных антенн, а также ранжировать их по энергетической эффективности.

Первый раздел главы посвящен полевым измерениям антенны в импульсном режиме, исследуется влияние различных препятствий и длительности возбуждающего импульса на форму сигнала и степень его затухания в каналах связи приемной и передающей антенной, в котором является излучатель Вивальди. Возбуждение передающей антенны проводилось гауссовым импульсом с длительностью 1.8 нс ( $t_d/t_i=0,38$ ), осциллограмма напряжения на нагрузке приемной антенны, в случае канала без препятствий и при прохождении сигнала через офисную стену толщиной 20 см, приведены на рис. 9. (параметром на кривой является угол поворота приемной антенны в азимутальной плоскости). Препятствие не внесло существенного затухания сигнала и изменения его формы по сравнению с распространением в прямом канале. Экспериментальные исследования распространения импульсного сигнала в более сложных каналах продемонстрировали возможность возбуждения и приема излучателем Вивальди импульсных сигналов хорошего качества, в том числе и на сложных трассах.

Применение двухполяризационных антенн позволяет увеличить информативность системы. Во втором разделе главы приводятся результаты разработки биортогонального излучателя и его системы питания на основе скрещенных излучателей Вивальди. КСВ обоих каналов разработанной антенны имеет значение около 2 с перекрытием по частоте 5. Развязка между каналами в худшем случае составляет -20 дБ и увеличивается с ростом частоты. В рабочей полосе частот антенна имеет стабильную форму диаграммы направленности. В работе рассматривается возможность организации эллиптической поляризации излучаемого поля при помощи широкополосного моста, включенного на входе антенны.

В следующем разделе проводится сравнительный анализ излучателя Вивальди с другими типами импульсных антенн. Исследованы и разработаны плоские импульсные антенны (рис. 10). Получены количественные значения основных энергетических характеристик: линейного вибраторного излучателя (интересные

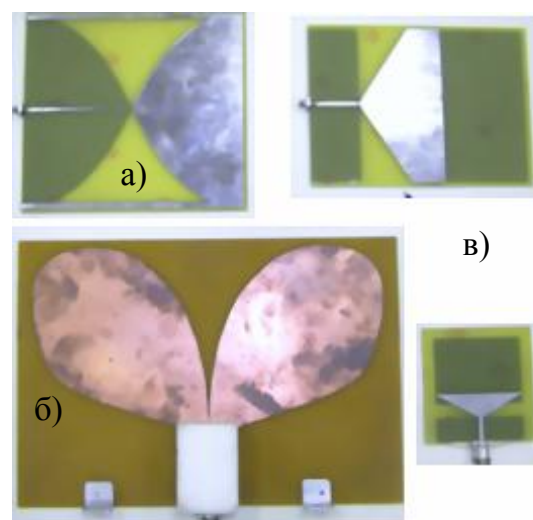


Рис. 10. Экспериментальные образцы разработанных излучателей. а)- широкополосный вибратор; б) антенна Вивальди ; в) вибраторы с емкостным элементом в плече.

для нас в качестве граничной оценки), плоского биконического вибратора, широкополосного вибратора с емкостным элементом в плече. Полученные данные позволяют сделать вывод, что излучатель Вивальди, как и плоский широкополосный вибратор, несущественно проигрывает *ТЕМ* – рупору в энергетической эффективности.

Обнаружено, что, начиная с некоторых нормированных длин, режим работы плоского широкополосного вибратора близок к существующему в антенне Вивальди (происходит формирования бегущей волны вдоль кромок излучателя). Для антенн этого типа эффект может оказаться неблагоприятным, в работе рассматриваются способы его устранения.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

**Основные результаты диссертационной работы** сводятся к следующему:

1. Получены количественные данные об основных энергетических характеристиках (ЭКНД, КПД, ЭКУ) излучателя Вивальди, возбуждаемого СКИ и СШПС различной длительности, на основе которых, пользуясь уравнением дальности, можно оценить характеристики систем (дальность работы, потребление, КПД).
2. Найдены соотношения между пропорциями излучателя и длительностью возбуждающего сигнала, которые обеспечивают максимизацию энергетической эффективности антенны Вивальди, сформулированы рекомендации по выбору геометрий излучателя, позволяющих обеспечить требуемую длительность, энергетику и поляризационные свойства излучаемого антенной импульса.
3. Выявлены закономерности влияния волнового сопротивления питающей линии на КПД излучателя, найдены оптимальные сопротивления, при которых происходит максимизация КПД.
4. Получены количественные соотношения, определяющие кроссполяризационные эффекты излучателя Вивальди, возбуждаемого СКИ, выявлены закономерности поведения паразитной составляющей поля от параметров структуры и длительности возбуждающего импульса.
5. Выполнены разработка и экспериментальное исследование ряда импульсных антенн.
6. Проведен сравнительный анализ энергетических характеристик антенны Вивальди с другими типами широкополосных антенн.

### **Опубликованные работы по теме диссертации:**

1. Экспериментальное исследование антенны Вивальди в импульсном режиме / А.А.Головков, Д.А.Калиникос, Г.А.Костиков, М.И.Сугак // Изв. СПбГЭТУ «ЛЭТИ» (Известия государственного электротехнического университета). Сер. радиоэлектроника и телекоммуникации. – 2003. – Вып. 2. – С. 13-16.

2. Костиков, Г.А. Кроссполяризационные эффекты при импульсном излучении ТЕМ-рупора / Г.А.Костиков, Б.Е.Лавренко, М.И.Сугак // Изв. СПбГЭТУ «ЛЭТИ» (Известия государственного электротехнического университета). Сер. радиоэлектроника и телекоммуникации. – 2003. – Вып. 2. – С. 29-32.
3. Костиков, Г.А. Энергетические характеристики длинного монополя при импульсном возбуждении / Г.А.Костиков, М.И.Сугак // Изв. вузов России. Радиоэлектроника. – 2003. – Вып. 4. – С. 12-19.
4. Костиков, Г.А. Сравнение направленных свойств импульсных линейных антенн / Г.А.Костиков, М.И.Сугак // Изв. СПбГЭТУ «ЛЭТИ» (Известия государственного электротехнического университета). Сер. радиоэлектроника и телекоммуникации. – 2004. – Вып. 1. – С. 7-10.
5. Импульсные антенны: электродинамический анализ F1-методом и экспериментальные результаты / А.А.Головков, Г.А.Костиков, М.И.Сугак, Д.А.Калиникос, Б.Е.Лавренко // 59-я научн. техн. конф., посв. дню радио: материалы конф., г. Санкт-Петербург, апр. 2004 г. – СПб.: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 1998. – С. 3-4.
6. Костиков, Г. А. Электродинамический анализ антенны Вивальди в импульсном режиме / Г.А.Костиков // Молодые ученые – промышленности Северо-Западного региона: материалы семинаров политехн. симпоз., г. Санкт-Петербург, май 2004 г. – СПб.: Изд-во СПбГПУ, 2004. – С. 42.
7. Костиков, Г. А. Электродинамический анализ кроссполяризационных эффектов в импульсных антеннах/ Г.А.Костиков, Б.Е.Лавренко // Молодые ученые – промышленности Северо-Западного региона: материалы семинаров политехн. симпоз., г. Санкт-Петербург, май 2004 г. – СПб.: СПбГПУ, 2004. – С. 43.
8. Анализ энергетических характеристик модифицированной антенны Вивальди в импульсном режиме/ А.А.Головков, Д.А.Калиникос, Г.А.Костиков, М.И.Сугак // Актуальные проблемы радиоэлектроники и телекоммуникаций: материалы всерос. научн. техн. конф., г. Самара, июнь 2004 г. – Самара: СГАУ, 2004. – С. 28-32.
9. Характеристики антенны Вивальди в импульсном режиме / А.А.Головков, Д.А.Калиникос, Г.А.Костиков, М.И.Сугак // СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии (Крымико 2004): материалы 14-ой международной крымской конф., г. Севастополь, 13-17 сентября 2004 г. – Севастополь: Изд-во: «Вебер», 2004. – С. 346-347.
10. Костиков, Г. А. Характеристики плоских слабонаправленных импульсных излучателей / Г.А.Костиков, М.И.Сугак // Изв. СПбГЭТУ «ЛЭТИ» (Известия государственного электротехнического университета). Сер. радиоэлектроника и телекоммуникации. – 2004. – Вып. 2. – С. 34-40.
11. Костиков, Г. А. Плоский шлейф-вибратор в режиме излучения сверхкоротких импульсов / Г.А.Костиков // Молодые ученые – промышленности



- Северо-Западного региона: материалы семинаров политехн. симпоз., Санкт-Петербург, дек. 2004 г. – СПб.: СПбГПУ, 2004. – С. 60.
12. Костиков, Г. А. Исследование эффектов взаимного влияния излучателей Вивальди / Г.А.Костиков, М.И.Сугак // 6-ой междундународный симпоз. по электромагнитной совместимости и электромагнитной экологии (EMC-2005): материалы симпоз., г. Санкт- Петербург, 21-26 июня 2005 г. – СПб: изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2005. – С. 149-151.
  13. Головков, А. А Сравнительный анализ энергетических характеристик импульсных антенн / А.А.Головков, Г.А.Костиков, М.И.Сугак // Изв. вузов России. Радиоэлектроника. – 2005. – Вып. 1. – С. 50-55.
  14. Костиков, Г. А. Экспериментальное и теоретическое исследование взаимного влияния антенн Вивальди / Г.А.Костиков, М.И.Сугак // Современные проблемы радиоэлектроники: сб. научн. тр., г. Красноярск, май 2005 г. – Красноярск: ИПЦ КГТУ, 2005. – С. 257-258.
  15. Костиков, Г. А. Расчет энергетических характеристик антенн в режиме возбуждения сверхкороткими импульсами / Г.А.Костиков, М.И.Сугак // Радиолокация, навигация и связь (RLNC-2005): материалы XI междунар. научн. техн. конф., г. Воронеж, 11-17 апреля 2005 г. – Воронеж: Издатель НПФ «САКВОЕЕ», 2005. – С. 1864-1872.
  16. Костиков, Г. А. Электродинамический анализ коэффициента усиления импульсных излучателей / Г.А.Костиков, М.И.Сугак // 60-ая юбилейная научн. техн. конф. посв. дню радио: материалы конф., г. Санкт - Петербург, апр. 2005 г. – Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2005. – С. 5-6.
  17. Костиков, Г. А. Коэффициент усиления импульсных планарных излучателей / Г.А.Костиков, М.И.Сугак // Сверхширокополосные сигналы и сверхкороткие импульсы в радиолокации, связи и акустике (USUIRCA-2005): сб. научн. тр. 1-ой междунар. конф. российского научн. техн. общества радиотехники, электроники и связи им. А. С. Попова, г. Суздаль, 27-29 сентября 2005 г. – М: НТО РЭС, 2005. – Вып. 1. – С. 127-130.
  18. Характеристики направленности линейной синхронной антенны при ее возбуждении сверхкороткими импульсами различной формы / Г.А.Костиков, А.Ю.Одинцов, А.А.Покровский, М.И.Сугак // 61-ая научн. техн. конф., посв. дню радио: материалы конф., г. Санкт-Петербург, апр. 2006 г. – СПб: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2006. – С. 6-7.
  19. Возбуждение линейной антенны ступенчатым импульсом с фронтом конечной длительности / Г.А.Костиков, А.Ю.Одинцов, А.А.Покровский, М.И.Сугак // Современные проблемы техники и электроники СВЧ: материалы научн. техн. семинара, г. Санкт-Петербург, 2006 г. – СПб: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2006. – С. 4-5.
  20. Калиникос, Д. А. Проектирование и экспериментальное исследование сверхширокополосного двухполяризационного излучателя / Д.А.Калиникос, Г.А.Костиков, М.И.Сугак // Современные проблемы ра-

- диоэлектроники: сб. научн. тр., г. Красноярск, май 2006 г. – М.: «Радио и связь», 2006. – С. 108-110.
21. Kostikov, G. A. Vivaldi Antenna in the Ultrashort Impulse Operating Mode (Антенна Вивальди в сверхкороткоимпульсном режиме работы) / G.A.Kostikov, M.I.Sugak, A.A.Pokrovski, A.J.Odintsov // Ultrawideband and ultrashort impulse signals (UWBUSIS-2006): proceedings of third international conference, Sevastopol, Sep. 19-22, 2006. – P. 382-384.
  22. Костиков, Г. А. Энергетические характеристики печатного сверхширокополосного вибратора над проводящим экраном / Г.А.Костиков, М.И.Сугак, А.Ю.Одинцов // Радиолокация, навигация и связь (RLNC-2007): материалы XI междунар. научн. техн. конф., г. Воронеж, апрель 2007 г. – Воронеж: Изд-во НПФ «САКВОЕЕ», 2007 г. – С. 756-767.
  23. Костиков, Г. А. Сравнение направленных свойств линейной антенны, возбуждаемой униполярным или биполярным сверхкороткими импульсами / Г.А.Костиков, М.И.Сугак, А.Ю.Одинцов // Радиолокация, навигация и связь (RLNC-2007): материалы XI междунар. научн. техн. конф., г. Воронеж, апрель 2007 г. – Воронеж: Изд-во НПФ «САКВОЕЕ», 2007. – С. 542-549.
  24. Костиков, Г. А. Энергетический коэффициент направленного действия импульсных антенн возбуждаемых униполярными и биполярными сверхкороткими импульсами / Г.А.Костиков, М.И.Сугак, А.Ю.Одинцов // 7-ой междунар. симпоз. по электромагнитной совместимости и электромагнитной экологии (EMC-2007): тр. симпоз., Санкт-Петербург, 26-29 июня 2007 г. – СПб: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2007. – С. 222-224.
  25. Костиков, Г. А. Энергетический коэффициент направленного действия линейной антенны, возбуждаемой униполярным или биполярным сверхкороткими импульсами / Г.А.Костиков, А.Ю.Одинцов, М.И.Сугак // Антенны. – 2007. – Вып. 6 (121). – С. 46-50.