

На правах рукописи

Геворкян Армен Валерьевич

**ГАШЕНИЕ ПОЛЕЙ РАССЕЯНИЯ ОБЪЕКТОВ СИСТЕМОЙ  
АНТЕНН ВИВАЛЬДИ**

05.12.07 — Антенны, СВЧ-устройства и их технологии

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание учёной степени

кандидата технических наук

Таганрог, 2016

Работа выполнена на кафедре антенн и радиопередающих устройств института радиотехнических систем и управления инженерно-технологической академии Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Южный федеральный университет» (АиРПУ ИРТСУ ИТА ЮФУ).

Научный руководитель: **Юханов Юрий Владимирович**  
д.т.н., профессор, заведующий кафедрой АиРПУ  
ИРТСУ ИТА ЮФУ, г. Таганрог

Официальные оппоненты: **Габриэльян Дмитрий Давидович**  
д.т.н., профессор, зам. руководителя по науке  
НТК ФГУП «РНИИРС», г. Ростов-на-Дону

**Звездина Марина Юрьевна**  
д.ф.-м.н., доцент, зав. кафедрой «Радиоэлектроника» ФГБОУ ВО «ДГТУ», г. Ростов-на-Дону

Ведущая организация: АО «КБ «Связь», г. Ростов-на-Дону

Защита состоится 2 марта 2017 г. в 14 часов на заседании диссертационного совета Д 212.208.20 в Южном федеральном университете в аудитории Д-406 по адресу: 347928, пер. Некрасовский 44, корпус «Д», г. Таганрог, Ростовская область.

С диссертацией можно ознакомиться в Зональной научной библиотеке Южного федерального университета по адресу ул. Зорге, 21 Ж, г. Ростов-на-Дону, Ростовская область или на сайте <http://hub.sfedu.ru/diss/announcement/efc0adb0-fc0a-499c-9491-016f24e524cf/>.

Автореферат разослан «\_\_» \_\_\_\_\_ 201\_\_ г.

Учёный секретарь  
диссертационного совета Д 212.208.20  
кандидат технических наук, доцент



## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

### Актуальность

Проектирование и разработка современных летательных аппаратов (ЛА), вертолётов, беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) и других видов вооружений и военной техники проводится с применением «Стелс»-технологий, представляющих собой комплекс мер, направленных на снижение радиолокационной заметности (РЛЗ) объектов [1–7].

Одним из самых распространённых способов уменьшения ЭПР объектов является использование радиопоглощающих покрытий (РПП) и радиопоглощающих материалов (РПМ), закрывающих «блестящие элементы» конструкций. Однако их применение ограничено диапазоном длин волн, как правило, от 2 до 20 см [7]. С ростом длины волны увеличивается размер и вес покрытий, и их использование в ЛА, не говоря уже о БПЛА, из-за несообразных данных, становится весьма затруднительным. Многие радиолокационные станции (РЛС) самолётов дальнего радиолокационного обнаружения (ДРЛО), такие как AWACS и HAWKEYE [8, 9] (с РЛС AN/APS-125, 138, 139), работают в диапазонах дециметровых и метровых длин волн, поэтому здесь для уменьшения РЛЗ ЛА необходимо использовать альтернативные РПМ и РПП методы.

Поэтому, разработка альтернативных средств снижения радиолокационной заметности объектов в диапазоне частот менее 1 ГГц является актуальной задачей.

К средствам снижения РЛЗ объектов в дециметровом и метровом диапазонах длин волн [8, 9] можно отнести использование пассивных, полуактивных и активных средств управления рассеянием электромагнитных волн (ЭМВ) в виде конформных импедансных нагрузок, управляемых импедансных покрытий и частотно-селективных экранов.

К перспективным средствам управления характеристиками рассеяния объектов с целью снижения их РЛЗ можно отнести специально размещаемые на борту защищаемого объекта антенные решетки (АР) [10], поле излучения или рассеяния (в зависимости от назначения) которых призваны скомпенсировать в заданном направлении полное рассеянное поле объекта. Их называют – системы гашения. В зависимости от того происходит ли гашение за счет дополнительного излучения собственного поля антенн или только за счет переотражения принятого ими сигнала, такие системы подразделяют на активные (САГ), полуактивные (СПАГ) и пассивные (СПГ) [10–14]. В двух последних системах антенны работают в режиме отражательных решеток. В СПАГ антенны нагружены на управляемые пассивные элементы типа аттенюаторов, фазовращателей, варикапов и т.д. В режиме СПГ нагрузками антенн являются неуправляемые сосредоточенные или распределенные RLC-элементы.

Такие структуры имеют несомненные преимущества в несообразных данных, так как с помощью относительно небольшого числа антенн в режиме

излучения (САГ) возможно скомпенсировать значительные уровни ЭПР больших объектов. В режиме СПАГ и СПГ этого же эффекта можно добиться за счет пропорционального увеличения числа антенн в антенной системе за счет соответствующего роста коэффициента усиления АР. Поэтому разработка систем гашения поля рассеяния объектов с целью снижения их РЛЗ является весьма актуальной задачей.

Поскольку РЛС ДРЛО работают на частотах от сотен МГц до десятков ГГц активное гашение также необходимо обеспечивать на этих частотах. В связи с этим актуальной задачей является необходимость разработки для средств гашения сверхширокополосных АР (СШАР).

Практическая реализация средств активного и полуактивного гашения сталкивается с рядом трудностей, которые связаны с тем, что устройства управления рассеянным полем (например, диаграммообзарующие схемы) являются громоздкими и их вес и размеры быстро растут с увеличением количества излучателей. Решению этой проблемы [10] может поспособствовать создание устройств управления с использованием технологий радиофоники, так как оптические устройства значительно компактнее СВЧ-устройств. Помимо этого, требуется соединение средств управления со средствами радиотехнической разведки, которые могут находиться на значительном удалении друг от друга. Из линий передачи, с точки зрения малых массогабаритных параметров и малых затуханий, наиболее пригодными являются волоконно-оптические линии связи. В связи с вышесказанным актуальной задачей является создание оптической элементной базы (модуляторы, детекторы, усилители и т.д.), которая удовлетворяла бы требованиям, предъявляемым к устройствам управления рассеянным полем.

**Целью диссертационной работы** является разработка и исследование систем конформных антенных решеток Вивальди и детектора оптических СВЧ-АМ колебаний на основе ЛПД для систем гашения рассеянного объектами поля.

Для достижения поставленной цели предполагается решить следующие задачи:

1. Решить задачи активного, полуактивного и пассивного гашения модели плоского двумерного металлического объекта с помощью решётки апертурных антенн.

2. Разработать конструкции сверхширокополосных конформных антенн Вивальди и решётки на их основе на поверхности клина и исследовать их характеристики.

3. Разработать конструкции сверхширокополосных конформных антенн Вивальди и решётки на их основе на сопряжении цилиндрической поверхности и клина (клин-цилиндр и цилиндр-клин-цилиндр) и исследовать их характеристики.

4. Разработать и численно исследовать СПГ рассеянного поля на основе конформных антенн Вивальди, размещенную на модели кромки крыла ЛА.



5. Разработать конструкцию, изготовить макет и провести экспериментальные исследования СПГ рассеянного поля объекта.

6. Разработать и исследовать детектор оптических СВЧ-АМ колебаний на основе усилителя на ЛПД.

**Научная новизна диссертационной работы** определяется поставленными задачами и впервые полученными результатами:

1. Решены задачи активного, полуактивного и пассивного гашения рассеянного поля двумерной модели фрагмента плоского металлического объекта с помощью решётки апертурных антенн.

2. Предложена новая схема питания антенн Вивальди, позволяющая улучшить их характеристики излучения.

3. Исследованы характеристики конформных антенн Вивальди на поверхностях типа: клин, клин-цилиндр и цилиндр-клин-цилиндр.

4. Изучено влияние конструктивных элементов носителя на параметры конформной СШАР.

5. Предложена СПГ рассеянного поля на основе короткозамкнутых конформных антенн Вивальди, расположенных на криволинейной поверхности (кроме крыла ЛА).

6. Исследовано влияние сосредоточенных резистивных нагрузок на характеристики рассеяния СПГ рассеянного поля на основе нагруженных антенн Вивальди.

7. Разработаны, изготовлены и исследованы макеты СПГ рассеянного поля на основе короткозамкнутых и нагруженных антенн Вивальди.

8. Результаты исследования конструкции усилителя на ЛПД, работающего в режиме детектирования оптических СВЧ-АМ колебаний (детектора).

#### **Достоверность результатов**

Достоверность полученных в диссертации результатов подтверждается использованием проверенных уравнений и известных способов решений, асимптотической оценкой строгих результатов, соответствием полученных результатов физическим представлениям, а также совпадением результатов численных и экспериментальных исследований.

#### **Практическая значимость результатов диссертационной работы**

Строгое и приближенное решение задач рассеяния плоской волны на системе апертурных антенн в виде плоскопараллельных волноводов на плоскости в режиме активного, полуактивного и пассивного гашения позволили дать им сравнительную характеристику, выявить преимущества и недостатки каждой из систем. Предложенные конструкции антенн Вивальди в качестве составных элементов обтекателя исследованы в режиме излучения и рассеяния, что позволило реализовать на их основе макет СПГ поля рассеяния модели цилиндрического объекта в форме фрагмента крыла ЛА. Численно и

экспериментально показана эффективность СПГ на основе таких конструкций. Исследована возможность использования усилителя на ЛПД в качестве альтернативного широкополосного детектора оптических СВЧ-АМ колебаний.

Полученные результаты могут быть использованы при постановке задач практической реализации систем гашения ЭМП рассеяния на реальных объектах.

Результаты диссертационной работы внедрены в выполненные научно-исследовательские работы и гранты, а также в учебный процесс ЮФУ, что подтверждается соответствующими актами.

#### **Личный вклад соискателя**

Автор разработал электродинамические модели антенн Вивальди на поверхности клина и поверхностях сопряжения клин-цилиндр и цилиндр-клин-цилиндр. Провел численный анализ их характеристик излучения. Разработал схему питания антенн Вивальди, позволяющую улучшить их характеристики излучения.

Автор провёл исследования и интерпретацию результатов, полученных в ходе исследований, а также принимал участие в разработках конструкций СШАР и СПГ рассеянного поля. Автор разработал макет СПГ рассеянного поля и участвовал в проведении его экспериментальных исследований. Автору принадлежат результаты исследования детектора. Часть опубликованных работ выполнена в соавторстве с научными руководителями и сотрудниками научного коллектива.

#### **Основные положения и результаты, выносимые на защиту:**

1. Результаты решения двумерной задачи активного, полуактивного и пассивного гашения рассеянного поля фрагмента плоского металлического объекта с помощью решётки апертурных антенн.
2. Схема питания антенн Вивальди, позволяющая улучшить их характеристики излучения.
3. Конструкции конформных СШАР на основе антенн Вивальди на телах сложной формы, являющихся составной частью поверхности объекта, и результаты численных исследований этих конструкций.
4. Конструкция СПГ рассеянного поля на основе антенн Вивальди и результаты численных исследований этих конструкции.
5. Макет СПГ рассеянного поля и результаты измеренных экспериментальных характеристик.
6. Результаты исследования характеристик детектора оптических СВЧ-АМ колебаний на основе усилителя на ЛПД.

**Апробация диссертационной работы.** Основные результаты диссертации докладывались и обсуждались на следующих конференциях:

1. XI Всероссийская научная конференция молодых учёных, студентов и аспирантов «Техническая кибернетика, радиоэлектроника и системы

управления» (РФ, Таганрог, октябрь 2012).

2. Международная научная конференция «Излучение и рассеяние электромагнитных волн «ИРЭМВ-2013» (РФ, Таганрог-Дивноморское, 23–28 июня 2013).

3. 5-ая Международная научно-практическая конференция «Актуальные проблемы радиофизики - 2013» (РФ, Томск, 1–6 октября 2013).

4. III Всероссийская (с международным участием) научно-техническая конференция аспирантов, магистрантов и молодых ученых «Молодые ученые – ускорению научно-технического прогресса в XXI веке» (РФ, Ижевск, 22–24 апреля 2015).

5. Международная научная конференция «Излучение и рассеяние электромагнитных волн «ИРЭМВ–2015» (РФ, Таганрог–Дивноморское, 28 июня – 03 июля 2015).

6. 6-ая Международная научно-практическая конференция «Актуальные проблемы радиофизики - 2015» (РФ, Томск, 5–10 октября 2015).

7. 2016 International Conference on Applied Social Science and Information Technology (ASSIT2016) (Bangkok, Thailand, 24–25 July 2016).

8. IEEE 5th Asia-Pacific Conference on Antennas and Propagation (APCAP 2016) (Taiwan, Kaohsiung, 26–29 July 2016).

9. IEEE Radio and Antenna Days of the Indian Ocean (RADIO 2016) (Reunion Island, 10–13 October 2016).

10. IEEE International Symposium on Phased Array Systems and Technology (MA USA, Waltham, 18–21 October 2016).

**Публикации.** По материалам диссертационной работы опубликовано 13 работ, в том числе 3 статьи в центральных журналах из перечня ВАК и 5 статей в изданиях индексируемых базами данных Scopus и Web of Science, и 5 статей и тезисов в трудах Всероссийских и международных конференций.

**Структура работы.** Диссертационная работа состоит из введения, четырёх разделов и заключения. Она содержит 226 страниц машинописного текста, 233 рисунка, 10 таблиц и список использованной литературы из 163 наименований.

## СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** обоснована актуальность темы диссертации, поставлена цель и сформулированы задачи исследования, показана научная новизна, достоверность и практическая значимость результатов исследований, представлена апробация диссертационной работы и список публикаций, а также изложено краткое содержание работы.

**В первом разделе** проведён обзор методов гашения рассеянного объектами поля. Подробно рассмотрен метод активного гашения рассеяния. На примере плоского объекта размером  $2L$  (отрезков  $[-L; L]$ ), который может



служить моделью многих элементов реальных объектов. исследована возможность активного гашения отражённого поля.

В качестве антенны системы активного гашения (САГ) взята решетка из  $M=2N+1$  антенн в виде открытых концов плоских волноводов (рисунок 1). На объект с САГ (рисунок 2) из направления  $\varphi_i$  падает однородная плоская параллельно-поляризованная (Н-поляризованная) волна ( $E^i, H^i$ ) единичной амплитуды

$$H_z^i = e^{ik(x \cos \varphi_i + y \sin \varphi_i)}, \quad E_x^i = \sin \varphi_i e^{ik(x \cos \varphi_i + y \sin \varphi_i)}$$

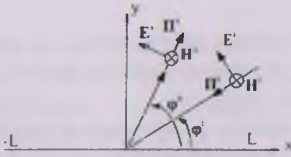


Рисунок 1

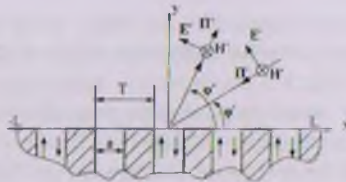


Рисунок 2

С помощью леммы Лоренца в интегральной форме получены выражения для бистатической диаграммы рассеяния (ДР)

$$G(\varphi) = kLG_0(\varphi) - \frac{(2N+1)ka}{2} F_{AR}^S(\varphi) F_0^S(\varphi) + \frac{(2N+1)ka}{2} H_0 F_{AR}^S(\varphi) F_0^S(\varphi);$$

где

$$F_{AR}^S(\varphi) = \frac{\sin \left[ (2N+1) \frac{kT}{2} (\cos \varphi_i + \cos \varphi) \right]}{(2N+1) \sin \left[ \frac{kT}{2} (\cos \varphi_i + \cos \varphi) \right]}, \quad F_{AR}^R(\varphi) = \frac{\sin \left[ (2N+1) \frac{kT}{2} (\cos \varphi_0 - \cos \varphi) \right]}{(2N+1) \sin \left[ \frac{kT}{2} (\cos \varphi_0 - \cos \varphi) \right]}$$

и моностатической ДР ( $\varphi = \varphi_i$ )

$$G(\varphi) = kLG_0(\varphi_i) - \frac{(2N+1)ka}{2} F_{AR}^S(\varphi_i) F_0^S(\varphi_i) + \frac{(2N+1)ka}{2} H_0 F_{AR}^R(\varphi_i) F_0^R(\varphi_i);$$

$$F_{AR}^S(\varphi) = \frac{\sin \left[ (2N+1) \frac{kT}{2} (\cos \varphi_i) \right]}{(2N+1) \sin \left[ \frac{kT}{2} (\cos \varphi_i) \right]}, \quad F_{AR}^R(\varphi) = \frac{\sin \left[ (2N+1) \frac{kT}{2} (\cos \varphi_0 - \cos \varphi) \right]}{(2N+1) \sin \left[ \frac{kT}{2} (\cos \varphi_0 - \cos \varphi) \right]}$$

$$G_{ii}(\varphi_i) = \sin^2 \varphi_i \frac{\sin \left[ 2kl \cos \varphi_i \right]}{2kl \cos \varphi_i}$$

$\varphi_0$  — направление главного максимума АР в режиме излучения.

В результате из (1.1) найдено условие гашения поля в заданном фиксированном направлении  $\varphi = \varphi_i = \varphi_0$  ( $F_{AR}^R(\varphi_i = \varphi_0) = 1$ ):

$$H_z = - \frac{kLG_0(\varphi_0) - \frac{(2N+1)ka}{2} F_{AR}^S(\varphi_0) F_0^S(\varphi_0)}{(2N+1) \frac{ka}{2} F_0^S(\varphi_0)}$$



На рисунке 2 и 3 представлены бистатическая и моностатическая ДР объекта длиной  $L=5\lambda$  с одной гасящей антенной размером  $a=1,5\lambda$  в САГ, где синяя кривая соответствует характеристикам плоского объекта, а красная — плоского объекта с САГ.

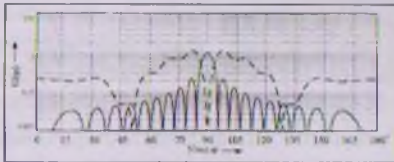


Рисунок 3

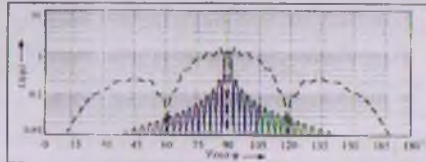


Рисунок 4

Исследования показали, что для увеличения сектора углов, в котором происходит гашение, при большом количестве излучателей необходимо уменьшать период решётки, чтобы гарантировать уход дифракционных максимумов в область мнимых углов. Подтверждением этому является моностатическая ДР объекта с 21 излучателем с периодом решётки  $0,48\lambda$ , приведённая на рисунке 5.

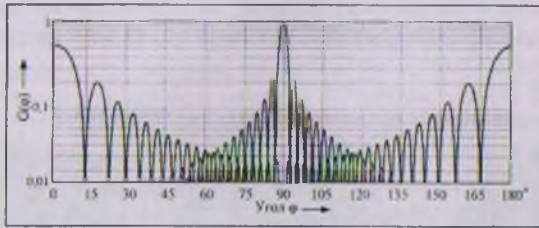


Рисунок 5

Таким образом, с помощью системы активного гашения можно существенно снижать радиолокационную заметность объекта (до  $-20$ дБ и ниже см.рис.1.12 и 1.13), но в узком секторе углов, меньшем ширины основного лепестка моностатической ДР объекта. Расширить угловой сектор удастся (в соответствии с ф. (1.31)) за счет уменьшения периода решетки и ухода дифракционных лепестков в область мнимых углов.

Рассмотрено приближенное решение задач полуактивного и пассивного гашения поля рассеяния плоской поверхности. Получены приведенные к раскрытию антенн значения импеданса нагрузок, обеспечивающих нулевое отражение волны в заданном направлении  $\varphi = \varphi_0$ :

$$Z_0^1 = \frac{c_{ij}(\varphi_0)}{(2N+1)a \int_{-a/2}^{a/2} F_{AR}^s(\varphi_0) F_0^s(\varphi_0) - c_{ij}(\varphi_0) dx}$$

Дано сравнение каждого из режимов гашения волн. Показано, в каких случаях предпочтительнее тот или иной режим гашения (активный, полуактивный или пассивный).

Второй раздел посвящён разработке и численным исследованиям (в пакете HFSS) конформных СШАР. В качестве основы для конформных СШАР были выбраны антенны с расширяющейся щелью в печатном исполнении, которые на практике зачастую называют антеннами Вивальди. Выбор антенн Вивальди обусловлен простотой и дешевизной их изготовления и возможностью согласования с линией питания в большом диапазоне частот.

В работе приведены и подробно исследованы пять конструкций конформных СШАР на основе антенн Вивальди, из которых сверхширокополосными оказались три: АР на поверхности клина (рисунок 6); на поверхности сопряжения клин-цилиндр (рисунок 7) и цилиндр-клин-цилиндр (рисунок 8). Антенны располагались в вырезе клиноподобного объекта и были выполнены из материала Arlon AD300С толщиной 1,5 мм. У всех трёх конструкций (СШАР на поверхности клина — —; поверхности сопряжения клин-цилиндр — - - и цилиндр-клин-цилиндр — - -) согласование по уровню КСВ<3 в диапазоне 1-15 ГГц (рисунок 9) и, за исключением диапазона 14–15 ГГц, относительно плавный (без больших провалов и скачков КУ (рисунок 10)). Суммарная ширина антенн была равна 30 мм. Полученных характеристик удалось добиться за счёт такой схемы питания антенн, при которой излучатели, припаянные к жилам коаксиальных кабелей, «соприкасаются» друг с другом (см. рисунок 6). Было принято решение называть это схемой питания антенн по типу «жила-жила».

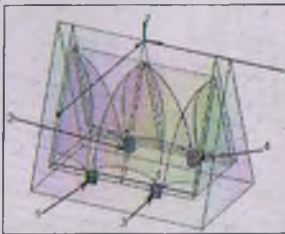


Рисунок 6

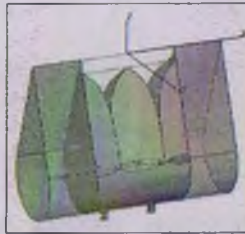


Рисунок 7

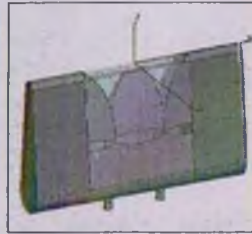


Рисунок 8

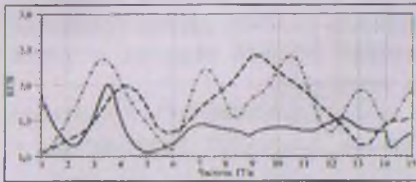


Рисунок 9 — ЧХ КСВ

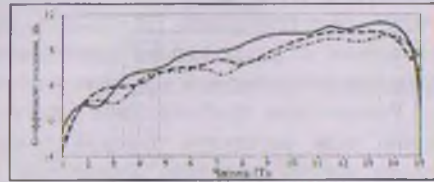


Рисунок 10 — ЧХ КУ

На примере конформной СШАР на клине (см. рисунок 6), было проведено исследование влияния размеров клина на характеристики излучения СШАР и 5 решёток из неё. Показано, что учёт фрагментов окружающих конструктивных элементов позволяет за значительно меньшее время добиться примерно таких

же характеристик, которые имела бы эта СШАР, если бы она исследовалась, например, в составе ЛА.

Третий раздел посвящён разработке и экспериментальному исследованию широкополосной системы пассивного гашения (СПГ) рассеянного от кромки крыла поля на основе антенн Вивальди. Была разработана и исследована СПГ с пятью решётками из конформных короткозамкнутых антенн Вивальди (рисунок 11). В результате исследований удалось добиться уменьшения ЭПР (рисунок 12) более чем на 13 дБ (— — кромка крыла без СПГ; — — — кромка крыла с СПГ) в диапазоне частот 1,38–1,76 ГГц или на 27,5 % относительно частоты 1,38 ГГц.



Рисунок 11

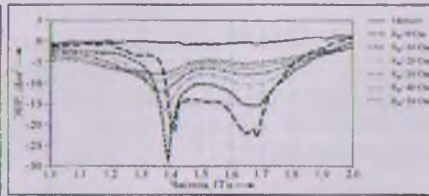


Рисунок 12 — ЧХ ЭПР

Из рисунка 12 видно, что подключение резистивных нагрузок ( $R_n > 0$  Ом) уменьшает эффективность гашения, но расширяет полосу рабочих частот СПГ. На рисунке 13 приведена моностатическая ДР кромки крыла без СПГ (—); с СПГ (— —) и с СПГ, нагруженной на сопротивление  $R_n = 10$  Ом (— —) на частоте 1,7 ГГц. Видно, что использование СПГ позволяет существенно уменьшить уровень ЭПР в пределах главного лепестка. Однако на других углах падения ЭПР сильно растёт. Подключение резистивных нагрузок позволяет уменьшить рост отражений на углах вне главного лепестка, но при этом уменьшается и уровень гашения в пределах главного лепестка.

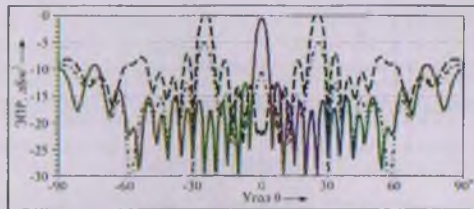


Рисунок 13 — Моностатическая ДР

Также были проведены численные и экспериментальные исследования СПГ из двух АР на фрагменте кромки крыла меньшего размера (рисунок 14 и 15).

Экспериментальные исследования макета проводились в ЦКП «Прикладная электродинамика и антенные измерения» кафедры АиРПУ ИРТСУ



ИТА ЮФУ с соблюдением требуемой методики проведения измерений. Из-за малости электрических размеров макета использовался метод компенсации фона, а погрешность измерения ЭПР составляла не более 3,4 дБ.

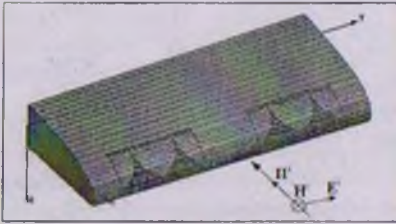


Рисунок 14



Рисунок 15 — Фото макета

Из сравнения рисунков 16–19 видно, что экспериментально измеренная моностатическая ДР качественно и количественно (с учётом погрешностей измерений) совпадает с результатами численных исследований

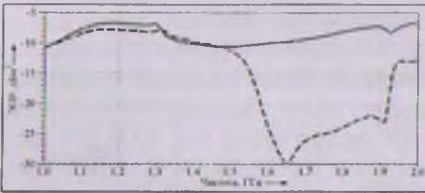


Рисунок 16 — ЧХ рассчитанной ЭПР

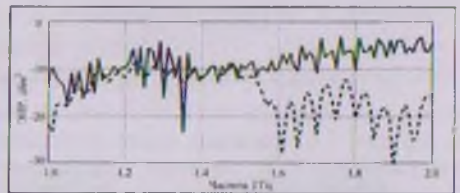


Рисунок 17 — ЧХ измеренной ЭПР

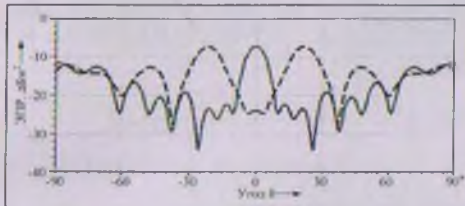


Рисунок 18 — Рассчитанная моностатическая ДР

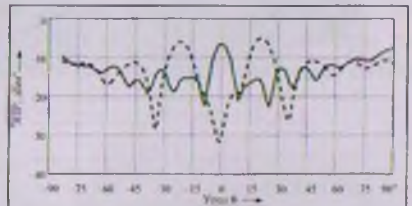


Рисунок 19 — Измеренная моностатическая ДР

В четвертом разделе проведён обзор фотодетекторов и сделано заключение о необходимости разработки детектора на основе усилителя на ЛПД. Выбор ЛПД был обусловлен двумя факторами — возможностью не использовать отдельный усилитель и тем, что уже давно существуют ЛПД, рабочие частоты которых превышают 100 ГГц (использование таких частот позволяет существенно увеличить информационную ёмкость канала). Описана модель и механизм детектирования оптических СВЧ-АМ колебаний усилителем на ЛПД.

В результате исследований:

1) Проведен теоретический анализ воздействия оптического СВЧ-АМ колебания на работу усилителя на ЛПД. Приведена эквивалентная схема усилителя. На основе второго уравнения Кирхгофа, составлено дифференциальное уравнение второго порядка. С помощью метода «медленно меняющихся амплитуд» из дифференциального уравнения второго порядка получено два уравнения первого порядка относительно амплитуды и фазы, которые называются «укороченными». Полученное уравнение было решено с помощью формулы Кардано и найдено аналитическое соотношение для определения АЧХ и КУ детектора.

2) Проведено исследование влияния параметров системы (детектора, находящегося под оптическим воздействием) на АЧХ и КУ детектора. Сделаны выводы о влиянии каждого из них.

3) Проведено исследование влияния параметров системы на АХ детектора. Получено выражение для определения чувствительности детектора. Исследовано влияние параметров системы чувствительность и динамический диапазон детектора. Сделаны выводы о влиянии каждого из них.

4) С помощью классического метода Ляпунова и критерия Рауса-Гурвица были получены аналитические соотношения для определения устойчивости детектора и исследовано влияние параметров системы на неё. Установлено, что влияние параметров системы на устойчивость работы детектора отсутствует.

Сделан вывод о возможности использования усилителя на ЛПД в качестве детектора оптических СВЧ-АМ колебаний.

В заключении сформулированы основные выводы и результаты диссертационной работы. Определены перспективы дальнейших исследований и разработок по теме диссертации.

#### Цитируемая литература

1. Дмитриев Ф.К. Работа в США по программе "Стелт" // Зарубежное военное обозрение. — 1985. — № 1. — С. 49–51.

2. Кирсанов В.А. Разработка в США авиационной техники по программе "Стелс" // Зарубежное военное обозрение. — 1989. — № 3. — С. 40–44.

3. Ананьин Э.В., Ваксман Р.Г., Патраков Ю.М. Методы снижения радиолокационной заметности // Зарубежная радиозлектроника. — М. — 1994. — №4–5. — С. 5–21.

4. Львова Л.А. Радиолокационная заметность летательных аппаратов. — Снежинск: Изд-во РФЯЦ ВНИИТФ? 2003. — 232 с.

5. Алексеев А.Г., Штагер Е.А., Козырев С.В. Физические основы технологии STEALTH. — СПб.: ВВМ, 2007. — 284 с.

6. Лагарьков А.Н., Погосян М.А. Фундаментальные и прикладные проблемы Стелс-технологий // Вестник российской Академии Наук. — 2003. — Том 73. — №9. — С. 779–787.

7. Лагарьков А.Н., Федоренко А.И., Кисель В.Н., Кибец С.Г., Семененко В.Н. Актуальные задачи стелс-технологий. // Институт теоретической и

прикладной электродинамики Российской академии наук. [Электронный ресурс]. — URL: [http://www.itae.ru/science/topics/№4%20\(стелс\).pdf](http://www.itae.ru/science/topics/№4%20(стелс).pdf) (дата обращения: 16.07.2016).

8. Родин В., Неведомский Е. Саморлётная система «Авакс» // Зарубежное военное обозрение. — 1975. — №6. — С. 58–62.

9. Кедров С. Большой небесный глаз. Самолёт радиолокационного дозора США «Хокай» Е-2 // Крылья Родины. — 2000. — № 1. — С. 15–19.

10. Максимов В.М. Уменьшение эффективной площади рассеяния ФАР методом активного гашения // Радиотехника. — М. — 1995 — №7–8. — С.69–72.

11. Бойко А.И., Иванов В.П. О гашении поля излучающего цилиндра // Радиотехника и электроника. — 1974. — Т. 19. — № 3. — С. 494–500.

12. Тютюкин В.В., Уколов А.Т., Федорюк М.В. Активное гашение электромагнитных волн // Радиотехника и электроника. — 1979. — Т. 24. — № 10. — С. 1982–1988.

13. Федорюк М.В., Тютюкин В.В. Активное гашение электромагнитных полей по методу векторных сферических гармоник // Радиотехника и электроника. — 1981. — Т. 26. — № 10. — С. 2488–2492.

14. Петров Б.М., Семенихин А.И. Управляемые импедансные покрытия и структуры // Зарубежная радиоэлектроника. № 6. 1994. с. 9-16.

#### Список публикаций автора по теме диссертации

1. *Геворкян А.В.* Анализ амплитудно-частотной характеристики детектора СВЧ АМ-оптических колебаний // XI Всероссийская научная конференция молодых учёных, студентов и аспирантов «Техническая кибернетика, радиоэлектроника и системы управления». Сборник материалов. — Таганрог. — 2012. — Том 1. — С.75.

2. *Геворкян А.В.* Исследование влияния мощности входного сигнала на параметры СВЧ АМ-оптического детектора // XI Всероссийская научная конференция молодых учёных, студентов и аспирантов «Техническая кибернетика, радиоэлектроника и системы управления». Сборник материалов. — Таганрог. — 2012. — Том 1. — С.76.

3. *Геворкян А.В., Демьяненко А.В., Алексеев Ю.И.* Усилитель на лавинно-пролётном диоде как альтернативный детектор СВЧ-амплитудно-модулированных оптических колебаний // Международная научная конференция «Излучение и рассеяние электромагнитных волн» ИРЭМВ-2013. Труды международной научной конференции. Таганрог – Дивноморское. — 2013. — С. 476–480.

4. *Геворкян А.В., Демьяненко А.В., Алексеев Ю.И.* Альтернативное детектирование СВЧ-амплитудно-модулированных оптических колебаний на основе методов фотоники // «Известия высших учебных заведений. Физика». Томск. — 2013. — Том 56. — №9/2. — С.43–45.

5. *Демьяненко А.В., Геворкян А.В., Алексеев Ю.И.* Амплитудно-частотная характеристика (АЧХ) усилителя на лавинно-пролётном диоде в режиме



детектирования СВЧ-амплитудно-модулированных оптических колебаний [Электр. ресурс] // «Инженерный вестник Дона». — 2014. — №2. — URL: <http://www.ivdon.ru/rumagazine/archive/n2y2014/2396>. — 10 с.

6. *Геворкян А.В.* Использование усилителя на лавинно-пролётном диоде в качестве детектора СВЧ-амплитудно-модулированных оптических колебаний // III Всероссийская научно-техническая конференция аспирантов, магистрантов и молодых ученых с международным участием "Молодые ученые — ускорению научно-технического прогресса в XXI веке". Сборник материалов конференции. — Ижевск. — 2015. — С. 281–285.

7. *Геворкян А.В., Демьяненко А.В.* Теоретическое исследование чувствительности и динамического диапазона детектора СВЧ-амплитудно-модулированных оптических колебаний // Изв. вузов. Физика. — Август 2015. — Том 58. — № 8/3. — С. 262–265.

8. *Геворкян А.В., Демьяненко А.В.* Теоретическое исследование чувствительности и динамического диапазона усилителя на ЛПД в режиме детектирования СВЧ-АМ оптических колебаний // Международная научная конференция «Излучение и рассеяние электромагнитных волн» ИРЭМВ-2015. Труды международной научной конференции. Таганрог–Дивноморское. — 2015. — С. 476–480.

9. *Геворкян А.В.* The research of the stability of the amplifier, which based on IMPATT diode and operates in the mode detection SHF-AM optical oscillations // International Conference on Applied Social Science and Information Technology (ASSIT2016) (Bangkok, Thailand, 2016). — 2016. — 5 p.

10. *Геворкян А.В.* The research of the possibility of expanding the working frequency band of the compact patch antenna via the additional radiator // International Conference on Applied Social Science and Information Technology (ASSIT2016), (Bangkok, Thailand, 2016). — 2016. — 4 p.

11. *Yukhanov Yu.V., Gevorkyan A.V., Privalova T.Yu.* Radiation Characteristics of Vivaldi Antenna on the Surface of the Wedge-Cylinder Adjunction // IEEE 5th Asia-Pacific Conference on Antennas and Propagation (APCAP 2016) (Taiwan, Kaohsiung, 26–29 July 2016). — 2016. — P. 232–233.

12. *Yukhanov Yu.V., Privalova T.Yu., Gevorkyan A.V.* Characteristics of Vivaldi Antenna Located on a Cylindrical Surface // IEEE Radio and Antenna Days of the Indian Ocean (RADIO 2016) (Réunion Island, 10–13 October 2016) — 2016. — 2 p.

13. *Yukhanov Yu.V., Gevorkyan A.V., Privalova T.Yu.* Radiation Characteristics Of Vivaldi Antenna On The Wedge Surface // IEEE International Symposium on Phased Array Systems and Technology (MA USA, Waltham, 18–21 October 2016). — 2016. — 6 p.

Формат 60 × 84<sup>1/16</sup>. Бумага офсетная. Печать ризография.

Заказ № 162. Тираж 100 экз.

Отпечатано в Отделе полиграфической, корпоративной и сувенирной продукции НПК КИВИ МЕДИА ЦЕНТРА ЮФУ

г. Таганрог, 28, Энгельса, 1