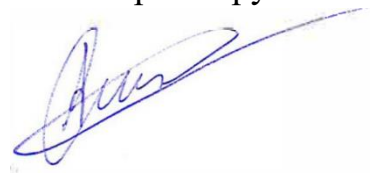


На правах рукописи



Станковский Андрей Вадимович

ПЛОСКИЕ АНТЕННЫЕ СИСТЕМЫ С ШИРОКОУГОЛЬНЫМ  
МЕХАНОЭЛЕКТРИЧЕСКИМ СКАНИРОВАНИЕМ

Специальность 2.2.14 – «Антенны, СВЧ устройства и их технологии»

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Томск 2023

Работа выполнена в федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Сибирский федеральный университет» (СФУ)

**Научный руководитель:** **Саломатов Юрий Петрович,**  
кандидат технических наук, профессор, ФГАОУ  
ВО «Сибирский федеральный университет»,  
г. Красноярск

**Официальные оппоненты:** **Калошин Вадим Анатольевич,**  
доктор физико-математических наук, заведующий лабораторией электродинамики композиционных сред и структур, ФГБУН Институт радиотехники и электроники им. В. А. Котельникова РАН, г. Москва;

**Буянов Юрий Иннокентьевич,**  
кандидат физико-математических наук,  
доцент, ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский Томский государственный университет», г. Томск

**Ведущая организация:** ФГАОУ ВО Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина), г. Санкт-Петербург

Защита диссертации состоится «21» декабря 2023 г. в 11 часов 30 минут на заседании диссертационного совета 24.2.415.01, созданного на базе ФГБОУ ВО «Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники» (ТУСУР) по адресу: 634050, г. Томск, пр. Ленина, 40, ауд. 201.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ТУСУРа и на сайте <https://postgraduate.tusur.ru/urls/d4265k5f>

Автореферат разослан «\_\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2023 г.

Ученый секретарь

диссертационного совета 24.2.415.01

доктор физ.-мат. наук



А. Е. Мандель

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЫ

### Актуальность работы.

Активное развитие спутниковой связи, особенно с использованием средне- и низкоорбитальных космических аппаратов (КА), приводит к тому, что возникает потребность в сканирующих антенных системах (АС) для наземных терминалов (мобильных: автомобиль, поезд, судно; и стационарных), которые могут обеспечить непрерывную работу систем спутниковой связи (ССС) и передачу данных. Федеральная программа «Сфера» предполагает введение в эксплуатацию новых спутниковых группировок для связи и для дистанционного зондирования Земли. Спутниковые группировки «Скиф» (предоставление широкополосного доступа в Интернет) и «Экспресс-РВ» (обеспечение Арктики интернетом и связью), не относятся к геостационарным и требуют постоянного слежения за спутником даже для стационарных терминалов.

Стоит отметить, что в труднодоступных и удаленных местностях, к которым относятся большие территории РФ, зачастую нет возможности организовать наземную связь. В этом случае для обеспечения информационной связанности остаётся единственный вариант – использование спутниковой связи. В связи этим развитие систем связи, зондирования и навигации является приоритетным направлением как технологических, так и научных исследований.

Сканирующие системы обеспечивают перемещение максимума ДН одним из нескольких способов:

- механический (реализуется путём поворота всей антенны и характеризуется наибольшей инерционностью);
- электрический (изменение токов или напряжений в управляющих устройствах, приводящее к изменению амплитудно-фазового распределения (АФР) в раскрыве антенны);
- механоэлектрический (с помощью электродвигателей или электромагнитов осуществляется механическое перемещение одного или нескольких элементов антенны с изменением АФР).

АС с механическим сканированием зачастую не отвечают требованиям к габаритам и скорости перемещения луча ДН. В то же время, АС с электрическим типом сканирования, имеющие, как правило, малый профиль и высокое быстродействие, изготавливаются на основе специализированных микросхем зарубежного производства. Недоступность или высокая стоимость таких компонентов приводит к невозможности создания на их основе антенн, доступных для массового потребителя. АС с механоэлектрическим типом сканирования – это альтернативные решения для создания низкопрофильных сканирующих антенн, и представляющие наибольший интерес.

Рассматриваемые в рамках данной научной работы системы по своим характеристикам относятся к механоэлектрическому способу сканирования, поскольку части её перемещаются относительно друг друга без изменения профиля антенны при помощи электродвигателей (механически), но сам принцип управления ДН

больше подходит под описание электрического способа сканирования и является квазиоптическим. Возможность изменения ориентации фазового фронта волны и осуществления управления ДН на основе структур, вносящих линейный фазовый набег, реализованных в виде диэлектрических клиньев, перешла в радиочастотный диапазон из оптики. Основными недостатками таких структур являются большие размеры и малые углы наклона ДН. Хорошие характеристики АС достигаются лишь при малых углах наклона луча (до  $20^\circ$ ). Данный способ позволяет осуществлять управление лучом без использования фазовращателей (как при механическом сканировании) и без изменения профиля системы (как при электрическом сканировании), т.к. подвижными элементами являются только структуры в виде дисков, вращающиеся вокруг своей оси.

**Целью диссертационной работы** является исследование различных типов плоских структур для квазиоптического управления ДН антенны и создание на их основе АС с широкоугольным механоэлектрическим сканированием.

**Задачи диссертационного исследования:**

- 1) Исследование различных структур для квазиоптического управления ДН антенны;
- 2) Разработка алгоритмов и программного обеспечения (ПО) для расчёта различных отклоняющих и фокусирующих систем;
- 3) Электродинамическое моделирование сканирующих АС, состоящих из двух идентичных отклоняющих структур;
- 4) Экспериментальное исследование макета АС, демонстрирующего возможность создания плоских АС с механоэлектрическим сканированием;
- 5) Исследование макетов пространственных поляризаторов, работающих в составе плоских АС.

**Объектом исследования** являются плоские антенные системы с широкоугольным механоэлектрическим сканированием, **предметом исследования** являются структуры квазиоптического управления лучом ДН для плоских АС.

**Методы исследования.**

Для решения задач диссертационного исследования применялись следующие методы: математическое моделирование; электродинамическое моделирование при помощи САПР; экспериментальные исследования.

Основным методом исследования в данной диссертационной работе является моделирование. В работе использовались следующие методы электродинамического моделирования: метод конечных элементов (finite element method) и метод конечного интегрирования (finite integration).

В представленном исследовании математическое моделирование позволило получить формулы и выражения, описывающие прохождение волны через «бесконечно тонкие» структуры, вносящие определённые изменения в фазовое распределение этой волны. Данные формулы позволяют также построить графики диаграмм направленности АС, имеющей в своём составе такие структуры, на основе которых и делается вывод о работоспособности таких систем с точки зрения математического моделирования.

Моделирование при помощи САПР позволяет построить компьютерную модель и рассчитать амплитудно-фазовое распределение в некотором конечном пространстве.

Макетирование является воплощением электродинамической модели в реальную модель (макет) и призвано оценить, насколько сходятся результаты, полученные при моделировании, с реальными измерениями характеристик АС. Экспериментальные исследования проводились в безэховой камере методом измерения в дальней зоне и сканирования ближнего поля АС при помощи векторного анализатора цепей.

#### **Научная новизна.**

1) Показано, что перфорированная отклоняющая структура с гексагональным расположением отверстий отличается меньшей толщиной, меньшими достижимыми коэффициентом заполнения и эффективной диэлектрической проницаемостью по сравнению с прямоугольным расположением отверстий, а также обеспечивает меньший уровень боковых лепестков за счёт увеличения количества дискретных ячеек при неизменных размерах апертуры;

2) Предложены диэлектрические структуры, работающие по принципу квазиоптического управления лучом, позволяющие осуществить механоэлектрическое сканирование в угломестной плоскости в диапазоне  $120^\circ$ , отличающиеся плоской формой;

3) Предложено использование дополнительного диэлектрического слоя в отклоняющих структурах, имеющих резкие границы перехода материал-воздух, отличающееся увеличением коэффициента направленного действия и уменьшением уровня боковых лепестков;

4) Предложено использование плоского трёхслойного пространственного поляризатора меандрового типа в составе АС с механоэлектрическим сканированием, позволяющая получать эллиптическую поляризацию при наклоне ДН с сохранением малого профиля.

#### **Теоретическая и практическая значимость.**

Полученные в результате исследований и моделирования АС могут быть использованы в спутниковой связи (СС) и радионавигации. Способ управления лучом ДН с использованием рассматриваемых структур является более простым альтернативным решением по сравнению с электрическим сканированием. Такие антенны можно устанавливать стационарно для организации связи посредством низкоорбитальных КА, а также на подвижных объектах для осуществления СС в движении. Предлагаемое решение позволит осуществить управление ДН при использовании двух отклоняющих дисков, расположенных непосредственно перед антенной. Таким образом, исследованные системы могут использоваться не только в новых АС, но и как дополнение к уже работающим антеннам.

Теоретическая значимость определяется результатами электродинамического моделирования сканирующих АС на основе структур квазиоптического управления ДН. При этом одной из основных задач является достижение в таких

системах как можно большего угла наклона (порядка  $60^\circ$ - $70^\circ$ ) для возможности осуществления связи со спутниками на большей территории России. А также получение эллиптической (в идеальном случае – круговой) поляризации в сканирующих АС с линейной поляризацией при различных углах наклона ДН.

**Практическая значимость:**

- 1) Предложены варианты диэлектрических структур квазиоптического управления ДН для создания на их основе низкопрофильных сканирующих АС;
- 2) Изготовлена и исследована АС с механоэлектрическим типом сканирования с максимальным углом наклона ДН  $\pm 60^\circ$  (диапазон сканирования  $120^\circ$ );
- 3) Предложено использование согласующего (просветляющего) слоя в структурах с изменяемым коэффициентом заполнения с целью увеличения коэффициента направленного действия (КНД) и уменьшения уровня боковых лепестков (УБЛ) в АС с квазиоптическим типом управления ДН;
- 4) Исследована конструкция трехслойного меандрового поляризатора, позволяющая получить эллиптическую поляризацию с коэффициентом эллиптичности (КЭ) не ниже 0,6 в сканирующих АС при углах наклона ДН до  $\pm 50^\circ$ ;
- 5) Разработано программное обеспечение для синтеза различных вариантов отклоняющих структур на основе диэлектрических материалов и на основе частотно-селективной поверхности (ЧСП).

**Защищаемые научные положения:**

- 1) Использование гексагонального расположения отверстий в перфорированной отклоняющей структуре позволяет уменьшить ее толщину на 13% за счёт уменьшения на 11,7% минимально достижимого значения эффективной диэлектрической проницаемости, а также достичь более низкого (на 5 дБ) значения уровня боковых лепестков (УБЛ) ДН от источника плоской волны по сравнению с прямоугольным расположением отверстий за счёт увеличения количества дискретных ячеек при неизменных размерах апертуры;
- 2) В сканирующих АС на основе структур квазиоптического управления лучом максимальный угол отклонения ДН составляет  $60^\circ$  (диапазон сканирования  $120^\circ$ ) при снижении КНД не более, чем на 6 дБ, из-за уменьшения эффективной апертуры;
- 3) Использование согласующего слоя толщиной  $2\lambda/5$  в отклоняющей структуре, состоящей из диэлектрических пластин треугольной формы с фиксированным значением диэлектрической проницаемости, увеличивает КНД на 1,5 дБ и уменьшает УБЛ на 2 дБ;
- 4) Плоский трёхслойный поляризатор меандрового типа позволяет получить коэффициент эллиптичности от 0,6 до 0,9 при углах наклона ДН сканирующей системы  $\pm 50^\circ$  в полосе частот от 25% до 40%.

**Достоверность результатов** основывается на корректном использовании современных САПР для электродинамического моделирования с применением различных методов и точностей расчёта, на корректном применении численных методов, использовании высокоточного оборудования и апробированных экспериментальных методик для проведения экспериментальных исследований. Результаты

работы являются воспроизводимыми и проверяемыми, наблюдается количественное и качественное совпадения результатов моделирования, экспериментальных исследований и данных, известных из литературы.

#### **Внедрение результатов работы.**

Результаты исследований были применены в ходе выполнения следующих научно-исследовательских работ: «Антенны с механоэлектрическим сканированием» (2014); «Разработка антенных решеток Ka/Q диапазонов с совмещенными ортогональными поляризациями для перспективных систем спутниковой связи» (2017); «Развитие методов сканирования и разработка на их основе низкопрофильной сканирующей антенной системы для работы в сетях спутниковой связи на территории Красноярского края (договор №18-47-243003/18 от 13.06.2018); «Развитие методов сканирования низкопрофильных антенных систем и разработка на их основе антенн для спутниковой связи в движении (договор №19-37-90003/19 от 26.08.2019); «Антенны перспективных сетей связи для использования на территориях Крайнего Севера (договор № 711 от 21.12.2022).

#### **Апробация результатов.**

Основные результаты диссертационного исследования докладывались и обсуждались на следующих конференциях: «Ural Symposium on Biomedical Engineering, Radioelectronics and Information Technology», USBEREIT, (Екатеринбург, 2021г.); «Antennas Design and Measurement International Conference» (ADMInC'2021), (Санкт-Петербург, 2021г.); «International Scientific-Technical Conference on Actual Problems of Electronics Instrument Engineering» (APEIE), (Новосибирск, 2018г.); «Radiation and Scattering of Electromagnetic Waves» (RSEMW), (Геленджик, 2019, 2021 гг.); «International Siberian Conference on Control and Communications» (SIBCON), (Москва, 2016г.); «International Crimean Conference Microwave and Telecommunication Technology» (CriMiCo), (Севастополь, 2014, 2015 гг.); «Актуальные проблемы радиофизики», (Томск, 2015г.); «Электронные средства и системы управления», (Томск, 2015г.); «Современные проблемы радиоэлектроники», (Красноярск, 2014г.).

#### **Публикации.**

По материалам диссертационного исследования опубликовано 20 научных работ, из них 3 в журналах из перечня ВАК, 1 в журнале, входящем в международную систему цитирования Scopus, 12 в сборниках публикаций, индексируемых в базе Scopus, 7 в Web of Science, получено 4 свидетельства о регистрации программы для ЭВМ.

#### **Личный вклад автора.**

Результаты исследований, представленные в диссертационной работе и сформулированные в виде научных положений получены автором лично или при его непосредственном участии. Результаты работы и направления дальнейших научных исследований обсуждались с научным руководителем и другими членами научного коллектива. Личный вклад автора включает исследование электродинамических характеристик сканирующих АС, в том числе разработку электродина-

мических моделей отклоняющих структур, поляризаторов, а также разработку алгоритмов и написание ПО для расчётов параметров различных структур и макросов для упрощения процессов моделирования. Проведены моделирование и экспериментальные исследования с последующей обработкой полученных данных и представлением их в виде графиков и таблиц.

### Структура и объём диссертации.

Диссертация включает введение, 3 главы, заключение, список литературы и 2 приложения. Объём диссертации составляет 150 страниц, в том числе 140 иллюстраций и 9 таблиц, число цитированных источников – 86. Приложение с документами, подтверждающими право на интеллектуальную собственность изложено на 4 страницах, приложение с актами использования результатов исследований изложено на 3 страницах.

## СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЫ

**Во введении** приведено обоснование актуальности темы, сформулированы цели и задачи диссертационного исследования, приведены защищаемые положения, изложена научная и практическая значимость работы.

**В первой главе** собрана и обобщена краткая информация о традиционных и современных сканирующих АС с различными типами сканирования. Выделены достоинства и недостатки каждой из представленных схем. Рассмотрены основные способы квазиоптического управления лучом ДН с помощью отклоняющих диэлектрических структур и структур на частотно-селективных поверхностях (ЧСП). В данной главе также проведено математическое моделирование сканирующей системы, состоящей из двух идеализированных бесконечно тонких отклоняющих структур (дисков) (рисунок 1).

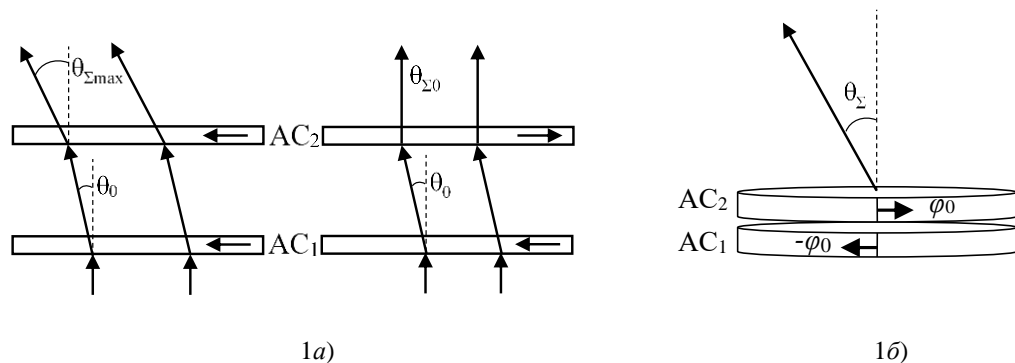


Рисунок 1 – Принцип работы сканирующей системы на основе бесконечно тонких отклоняющих структур

Взаимный синхронный поворот дисков вокруг общей оси в противоположные стороны обеспечит перемещение максимума ДН в угломестной плоскости. Сканирование по азимуту при этом может осуществляться совместным поворотом дисков в одинаковом направлении.



Получена математическая зависимость угла отклонения ДН сканирующей АС  $\theta_{\Sigma}$  от взаимных смещений дисков  $\varphi_{\Delta}$  при различных углах наклона фазового распределения в одном слое  $\theta_0$ :

$$\theta_{\Sigma}(\varphi_{\Delta}) = \arcsin\left(2 \sin \theta_0 \cos\left(\frac{\varphi_{\Delta}}{2}\right)\right).$$

Из рисунка 2 видно, что максимальный угол наклона зависит от угла отклонения луча ДН при прохождении одного слоя. В результате проведённых исследований был выбран наиболее подходящий угол отклонения в одном слое структуры равный  $30^{\circ}$ . При использовании этого значения, получается максимально достижимый расчётный наклон ДН АС равный  $90^{\circ}$ . Для  $\theta_0 > 30^{\circ}$  уменьшается продольный размер отклоняющей конфигурации, а, следовательно, при неизменном значении апертуры АС, увеличится количество зонирований, что приведет к дополнительным искажениям в амплитудном распределении.

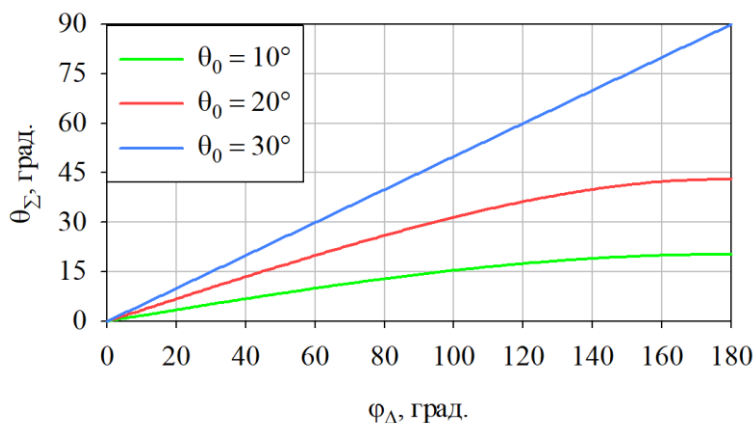


Рисунок 2 – Зависимость угла наклона ДН  $\theta_{\Sigma}$  от угла поворота дисков  $\varphi_{\Delta}$  при различных значениях  $\theta_0$

Угол наклона  $\theta_{\Sigma} = 60^{\circ}$  достигается при  $\theta_0 > 25^{\circ}$ , однако, в этом случае увеличивается сектор углов взаимного смещения слоёв  $\varphi_{\Delta}$  для получения тех же значений наклона ДН. Таким образом, угол  $\theta_0$  выбирается, исходя из требований к максимальному углу отклонения ДН  $\theta_{\Sigma_{\max}}$ , а также требований к высоте профиля сканирующей АС.

**Во второй главе** показан принцип работы и результаты электродинамического моделирования структур – аналогов диэлектрического клина. Предложены и исследованы четыре конфигурации, линейно или дискретно изменяющие фазовую задержку и обеспечивающие наклон фазового фронта волны, и, как следствие, отклонение ДН: 1 – структура, состоящая из слоев диэлектриков с различными диэлектрическими проницаемостями; 2 – структура из диэлектрических пластин треугольной формы с фиксированным значением диэлектрической проницаемости; 3 – две структуры из перфорированного диэлектрика с различными вариантами расположения отверстий (рисунок 3).

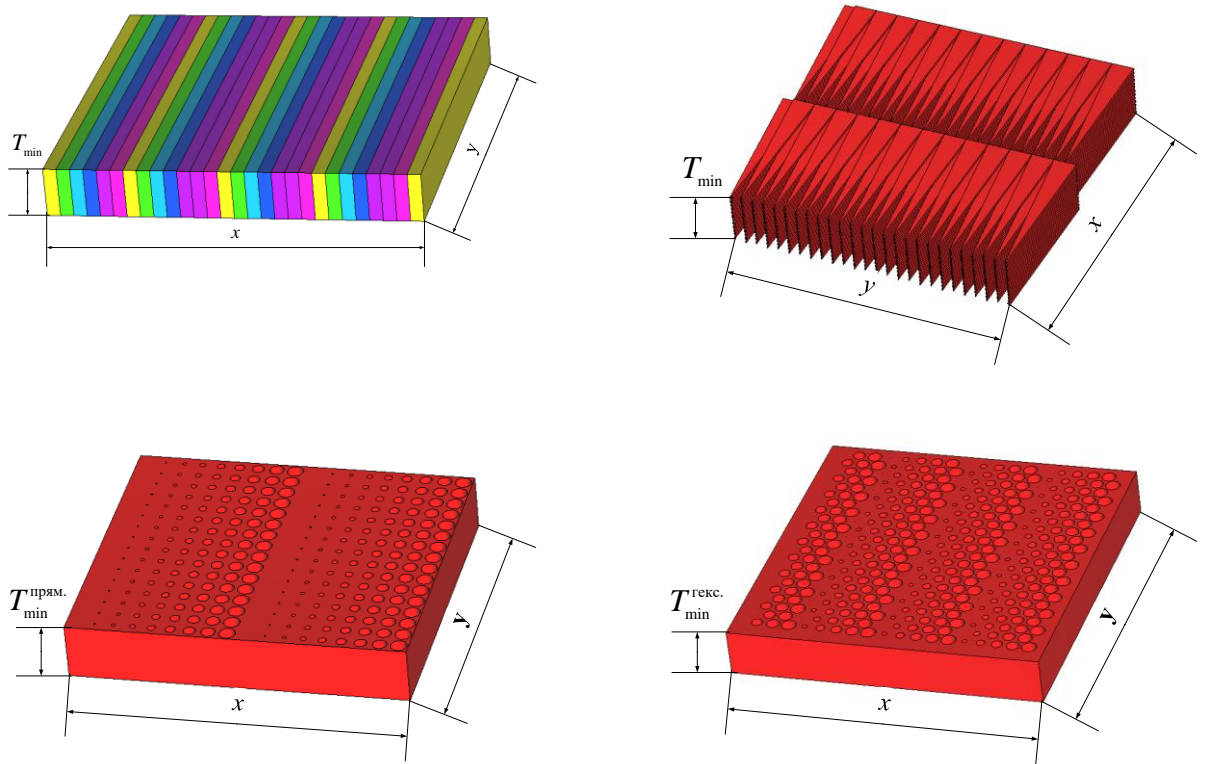


Рисунок 3 – Структуры, вносящие линейный фазовый набег

Проведено их электродинамическое моделирование. На рисунке 4 приведены ДН для первых двух отклоняющих структур при прохождении через них плоской волны.

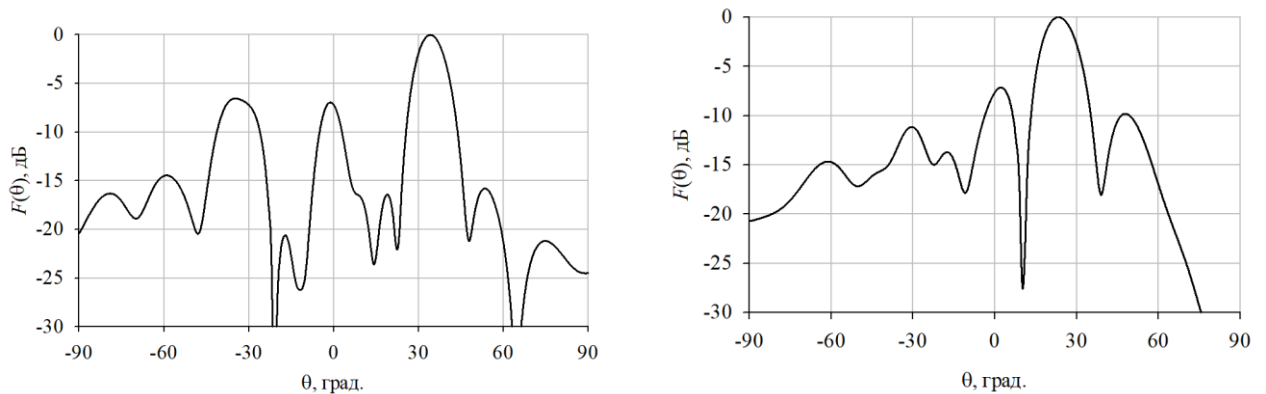


Рисунок 4 – Отклонение ДН с помощью структуры, состоящая из слоев диэлектриков с различными диэлектрическими проницаемостями (слева), и структуры из диэлектрических пластин треугольной формы с фиксированным значением диэлектрической проницаемости

Определено, что перфорированная структура с гексагональным расположением отверстий позволяет уменьшить толщину профиля на 13% за счет уменьшения на 11,7% минимально достижимого значения эффективной диэлектрической проницаемости, а также достичь более низкого (на 5 дБ) значения уровня боковых лепестков (УБЛ) ДН от источника плоской волны по сравнению с прямоугольным расположением отверстий (рисунок 5) вследствие увеличения количества дискретных ячеек при неизменных размерах апертуры АС.

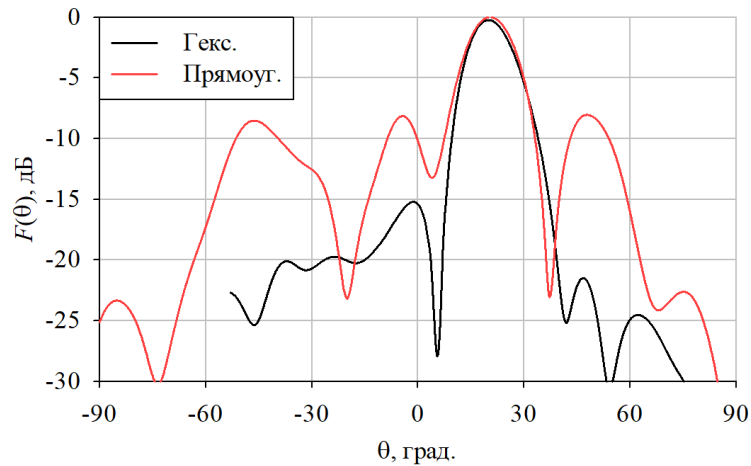


Рисунок 5 – Совмещенные графики ДН для гексагонального и прямоугольного расположения отверстий

Также рассмотрена фокусирующая структура линзового типа на основе перфорированного диэлектрика и совмещение в одном слое фокусирующей и отклоняющей структур для исследования возможности создания сканирующих АС с источником сферических волн (рисунок 6).

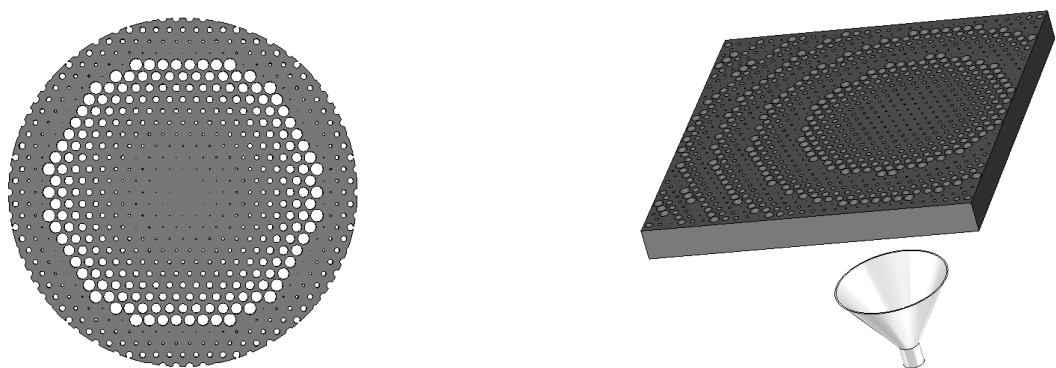


Рисунок 6 – Фокусирующая структура с гексагональным расположением отверстий (слева); совмещение фокусирующей и отклоняющей структур в одном слое (справа)

На описанном принципе были построены модели структур с наклоном 15°, 20° и 30°. На рисунке 7 приведены совмещенные ДН.

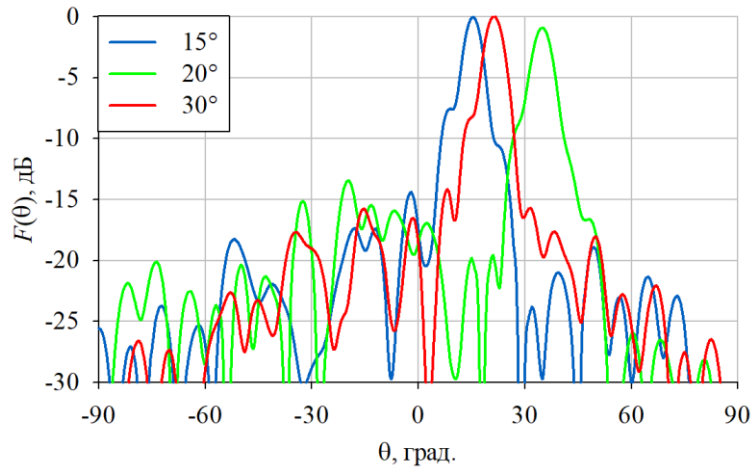


Рисунок 7 – ДН совмещенной структуры для трех углов наклона

Углы наклона ДН составили, соответственно,  $15^\circ$ ,  $20^\circ$  и  $35^\circ$ .

Помимо этого в данной главе приведено исследование влияния дополнительного слоя, который условно можно назвать согласующим или просветляющим, в составе отклоняющей структуры, состоящей из диэлектрических пластин треугольной формы с фиксированным значением диэлектрической проницаемости (рисунок 8 слева). Определено, что толщина такого слоя ( $T_s$ ) должна иметь значение равно  $2\lambda/5$ . Его диэлектрическая проницаемость ( $\epsilon_r$ ) выбирается равной среднему арифметическому между минимальным и максимальным значениями  $\epsilon_{eff}$  отклоняющей структуры.

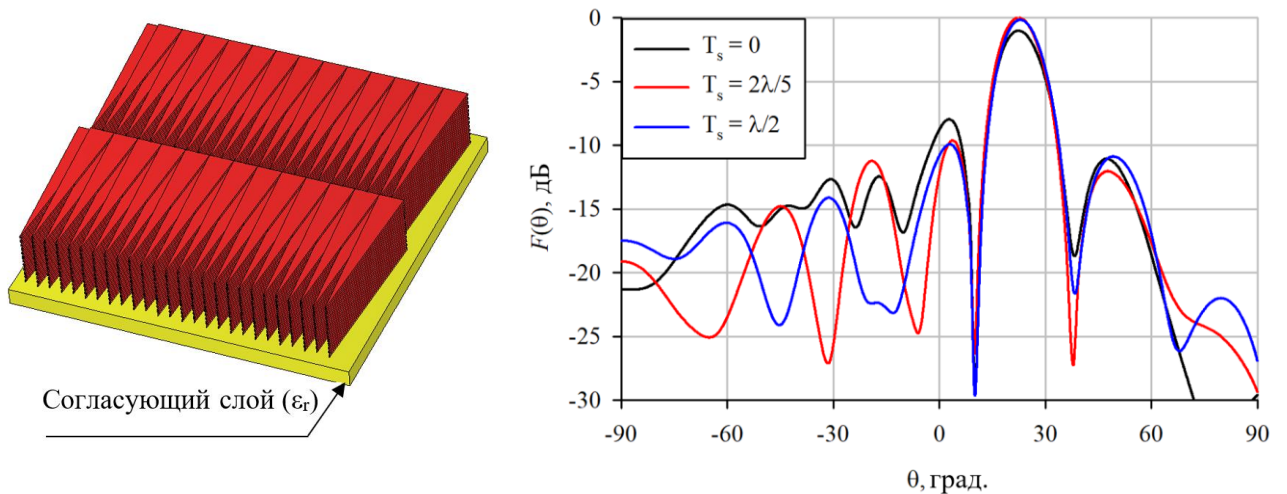


Рисунок 8 – Структура из пластин треугольной формы с согласующим слоем (слева) и ДН на частоте  $f_0$  с согласующим слоем различной толщины (справа)

ДН такой АС при разной толщине согласующего слоя представлены на рисунке 8 справа. Введение согласующего слоя позволяет увеличить КНД АС на 1,5 дБ, и снизить УБЛ на 2 дБ. При этом для слоёв с  $T_S = 2\lambda / 5$  и  $T_S = \lambda / 2$  не наблюдается различий в области главного лепестка и по УБЛ. Следовательно, делать согласующий слой толщиной более  $2\lambda / 5$  не имеет смысла. Также показано, что использование такого слоя нецелесообразно для структуры, набранной из материалов с различной диэлектрической проницаемостью.

Проведено электродинамическое моделирование сканирующих АС на основе трех типов отклоняющих структур (рисунок 9).

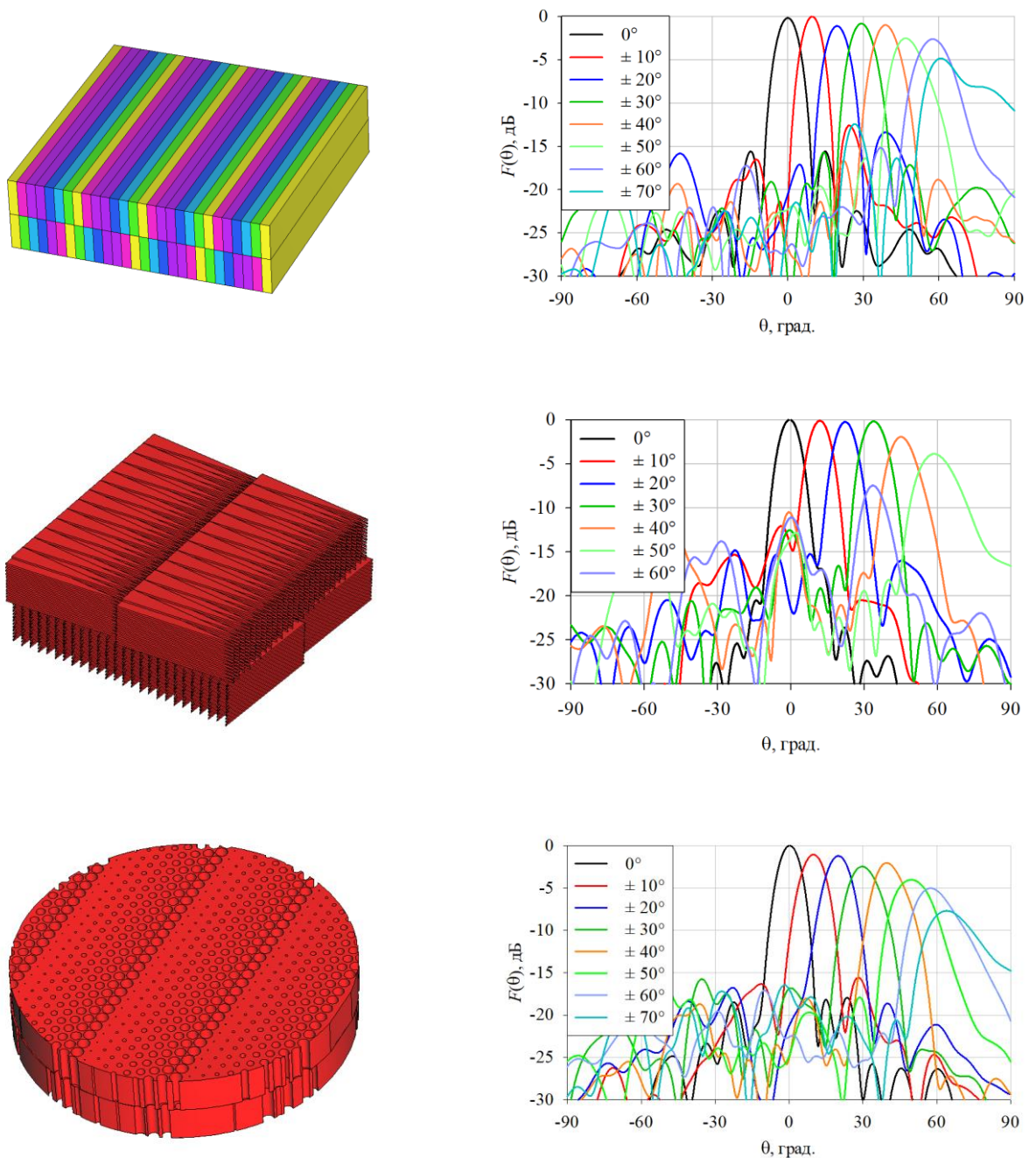


Рисунок 9 – Модели сканирующих АС и их ДН

Разработанное программное обеспечение позволило значительно упростить процесс синтеза различных топологий отклоняющих и фокусирующих структур. Приводятся результаты работы программы для расчёта перфорированной структуры с гексагональным расположением отверстий.

Для сканирующей системы на основе структуры, набранной из диэлектрических пластин треугольной формы, было также исследовано влияние согласующего слоя. На рисунке 10 приведены зависимости абсолютных значений КНД от взаимных углов поворота структур для разных значений согласующего слоя.

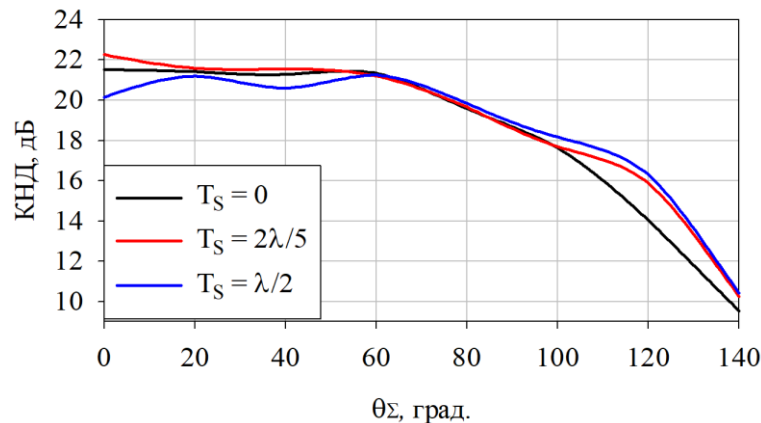


Рисунок 10 – Зависимость КНД от взаимных углов поворота при разной толщине согласующего слоя

При малых углах поворота (от  $0^\circ$  до  $60^\circ$ ) слой с толщиной  $T_S = 2\lambda/5$  оказывает небольшое положительное влияние, а слой с толщиной  $T_S = \lambda/2$  демонстрирует ухудшение КНД. Для значений углов от  $60^\circ$  до  $100^\circ$  влияния согласующего слоя практически не наблюдается. А для угла  $120^\circ$  ( $\pm 60^\circ$ ) видно увеличение КНД примерно на 2 дБ для каждого из слоёв.

В данной главе также рассмотрены отклоняющая и фокусирующая ЧСП на основе фазокорректирующих элементов (ФКЭ). Приведена программа синтеза пространственных полосовых фильтров на ЧСП и примеры ее работы в виде расчетов номиналов элементов и размеров для ФКЭ.

Проведено электродинамическое моделирование ФКЭ и сравнение полученных характеристик с S-параметрами резонаторного и полосового фильтров. Далее приводятся амплитудная и фазовая характеристики нескольких синтезированных широкополосных ФКЭ, настроенных на разную центральную частоту.

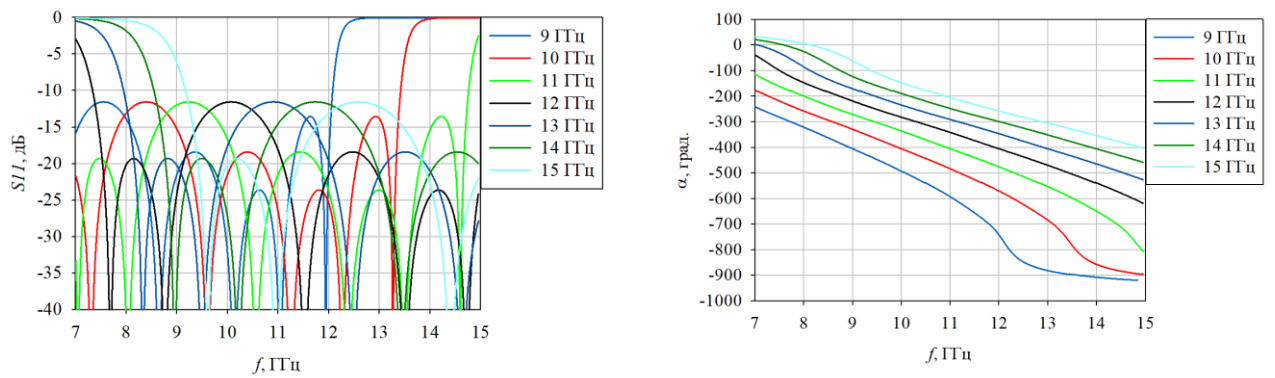


Рисунок 11 – Зависимость фазы коэффициента передачи от частоты для различных фазо-корректирующих элементов, настроенных на разную центральную частоту

Синтезированные ФКЭ имеют регулировку по фазе порядка  $400^\circ$  в диапазоне 10,7–12,7 ГГц. И на их основе была разработана ЧСП, отклоняющая ДН (рисунок 12).

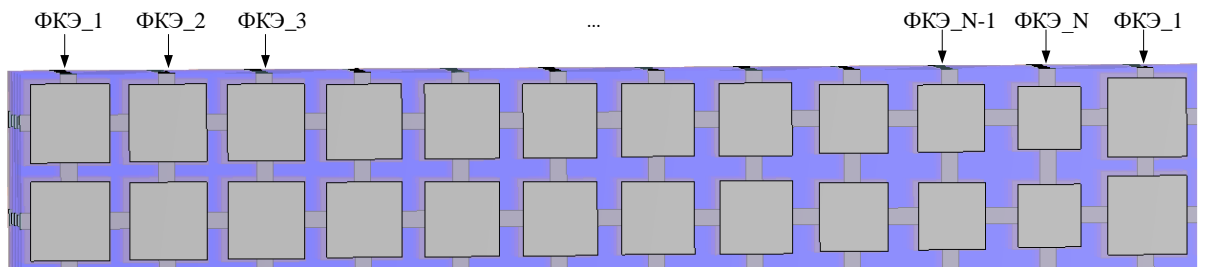


Рисунок 12 – Фрагмент модели отклоняющей ЧСП

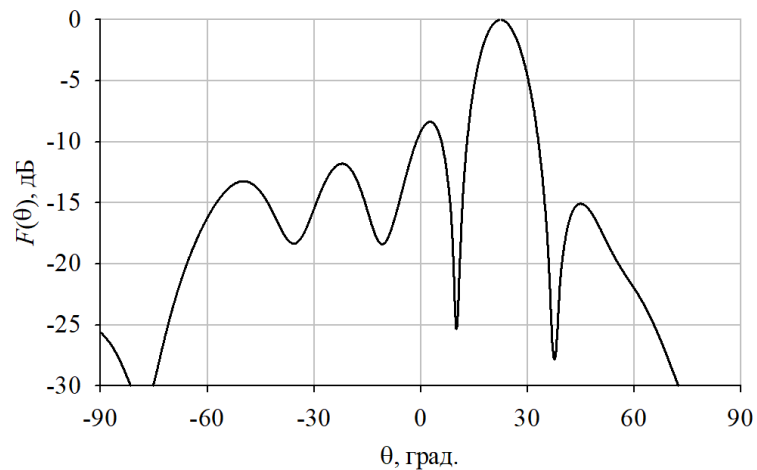


Рисунок 13 – Отклонение ДН с помощью ЧСП

В третьей главе приведены результаты электродинамического моделирования АС, приближенной к реальной, а также макет сканирующей системы с механо-электрическим сканированием на основе квазиоптического управления ДН, а также результаты экспериментальных измерений изготовленного макета в безэховой камере.

На рисунке 14 приведены фотографии элементов макета сканирующей АС на структуре из диэлектриков с различными диэлектрическими проницаемостями и макета в собранном виде. Слои реализованы из доступных диэлектриков с подходящими характеристиками (таблица 1).

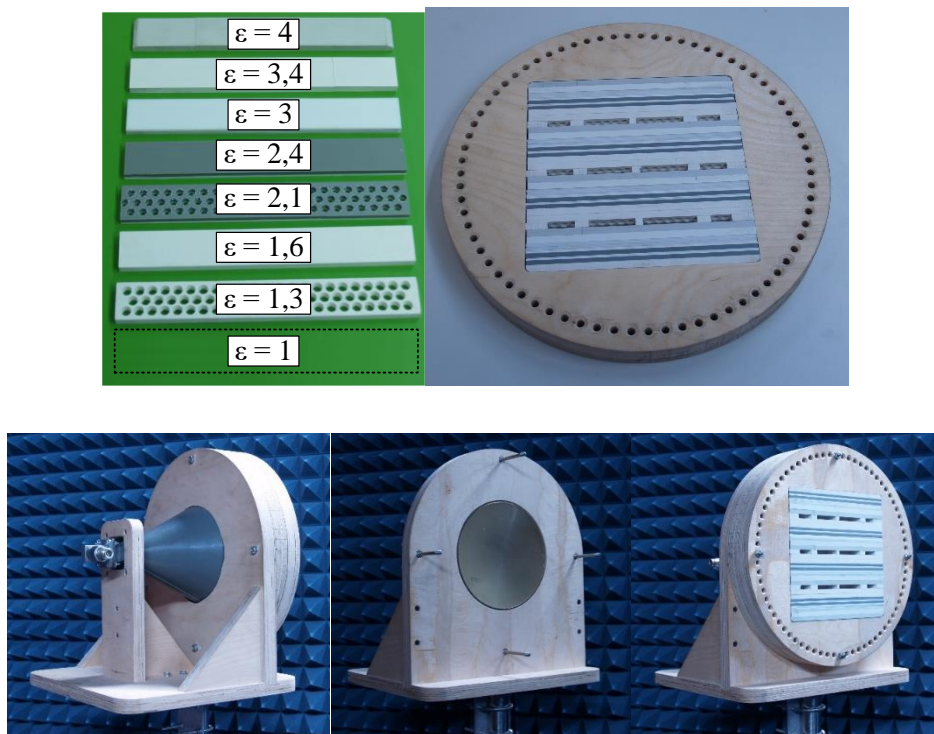


Рисунок 14 – Элементы отклоняющей структуры и макет сканирующей АС

Таблица 1 – Используемые материалы

Материал	Воз- дух	Перф. вспен. ПВХ	Вспен. ПВХ	Перф. ПС	ПС	ПЭТ	НПВХ 1	НПВХ 2
$\epsilon$	1	1,3	1,6	2,1	2,4	3	3,4	4
$n$	1	1,14	1,27	1,4	1,6	1,7	1,8	2
$\text{tg } \delta$ (20 Гц)	0	–	$2,6 \cdot 10^{-3}$	–	$1,2 \cdot 10^{-3}$	$9,7 \cdot 10^{-3}$	$1,6 \cdot 10^{-2}$	$1,6 \cdot 10^{-2}$

где ПВХ – поливинилхлорид, ПС – полистирол, ПЭТ – полиэтилентерефталат, НПВХ – непластифицированный поливинилхлорид.

Слой с  $\epsilon = 1,3$  и  $\epsilon = 2,1$  реализованы путём перфорации ближайших по характеристикам материалов, для снижения эффективной диэлектрической проницаемости. Для уменьшения влияния анизотропии, значения диаметров отверстий выбраны близкими к значению толщины слоя.



Сравнение измеренных и расчетных ДН (рисунок 15) показывает хорошее совпадение результатов.

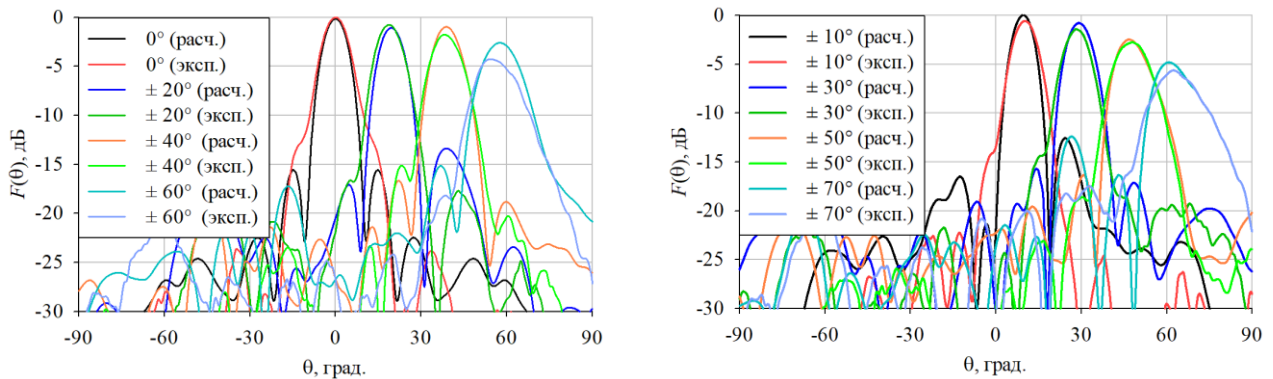


Рисунок 15 – Совмещенные рассчитанные и экспериментальные ДН для некоторых угловых смещений

Максимальный угол наклона ДН составил  $62^\circ$ , снижение КНД относительно максимального значения составило 6 дБ, а для угла наклона  $55^\circ$  и меньше деградация КНД не превысила 4 дБ, что несколько хуже, чем в расчетах. При этом УБЛ оказался лучше расчетных и не превысил уровня -14 дБ.

Показано, что снижение КНД за счёт уменьшения эффективной апертуры при увеличении угла наклона ДН соответствует аналитическому расчету (рисунок 16).

Таким образом, результаты исследований различных типов структур квази-оптического управления лучом ДН показывают возможность использования данных конфигураций при создании низкопрофильных АС с широкоугольным механоэлектрическим сканированием для организации спутниковой связи как для мобильных потребителей, так и для стационарных потребителей с использованием средне- и низкоорбитальных космических аппаратов.

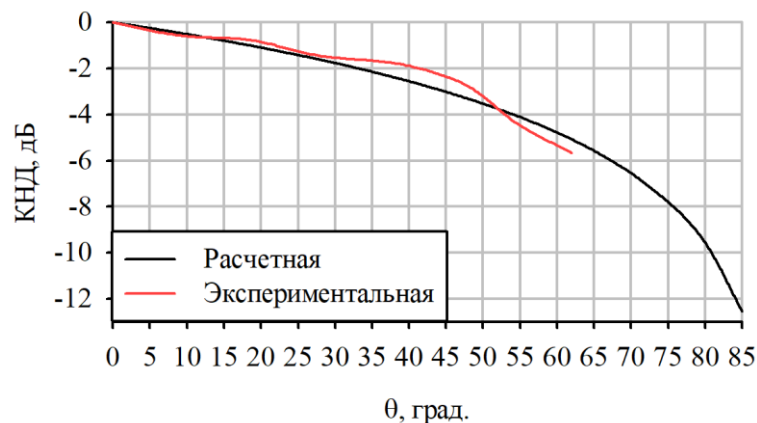


Рисунок 16 – Снижение КНД при увеличении угла наклона ДН

В данной главе также рассмотрены поляризационные характеристики сканирующих АС и исследованы различные типы пространственных поляризаторов. Проведен анализ существующих типов поляризаторов.

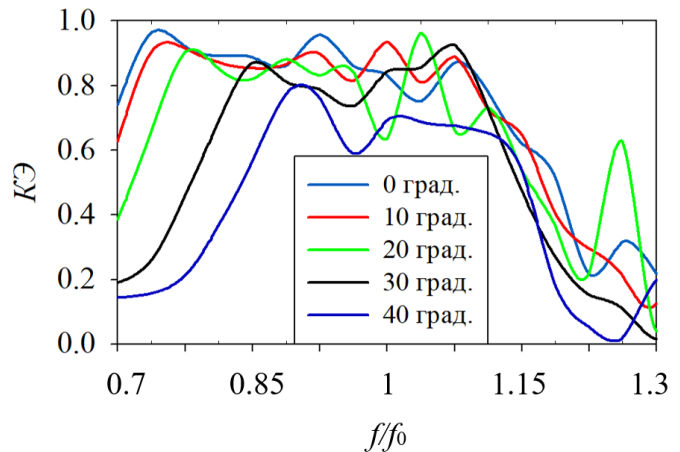
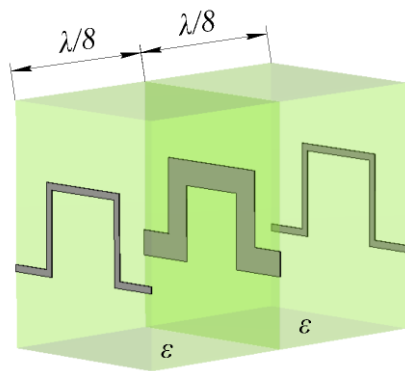


Рисунок 17 – Элементарная ячейка трехслойного меандрового поляризатора (слева) и расчетные значения КЭ для различных углов наклона (справа)

Выявлено, что при отклонении ДН рабочая полоса поляризатора сужается, в связи с чем необходимо использовать поляризатор, имеющий широкую полосу рабочих частот. Для сохранения низкого профиля сканирующих АС наиболее подходящим является использование трёхслойного меандрового поляризатора (рисунок 17 слева) с полосой рабочих частот более 40% по уровню КЭ не ниже 0,7 и высотой профиля  $\lambda/4$ . При повороте излучающей структуры на  $40^\circ$  (отклонение ДН на  $50^\circ$ ) рабочая полоса сужается до 25% при значениях КЭ не ниже 0,6 (рисунок 17 справа).

**В заключении** изложены основные научные и практические результаты работы, а также перспективы дальнейших исследований.

## ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

Основные результаты работы заключаются в следующем:

1) Показано, что перфорированная отклоняющая структура с гексагональным расположением отверстий отличается меньшей толщиной (на 13%), меньшим достижимым коэффициентом заполнения (на 11,7%) и эффективной диэлектрической проницаемостью по сравнению с прямоугольным расположением отверстий, а также обеспечивает меньший уровень боковых лепестков (на 5дБ) за счёт увеличения количества дискретных ячеек при неизменных размерах апертуры;

2) Предложены диэлектрические структуры, работающие по принципу квазиоптического управления лучом, позволяющие осуществить механоэлектрическое сканирование в угломестной плоскости в диапазоне  $120^\circ$ . Полученные результаты экспериментального исследования имеют хорошее совпадение с теоретическими. Измеренный наклон ДН для изготовленного макета равен  $62^\circ$ , снижение КНД при таком направлении составляет 6 дБ, что хуже, чем в расчётах. При этом для угла наклона менее  $55^\circ$  деградация КНД близка к полученным расчётным значениям и не превышает 4 дБ. УБЛ не превышает значения -14 дБ;

3) Предложен способ увеличения КНД и уменьшения УБЛ за счет использования дополнительного диэлектрического слоя в составе отклоняющих структур с переменным значением коэффициента заполнения;

4) Исследовано использование поляризатора, показывающее возможность изменения поляризации с помощью трехслойного поляризатора меандрового типа в АС с механоэлектрическим сканированием (при сохранении малого профиля) в диапазоне  $\pm 50^\circ$  в полосе частот от 25 до 40% при изменении КЭ от 0,6 до 0,9;

5) Разработано программное обеспечение для расчёта и синтеза различных вариантов отклоняющих и фокусирующих диэлектрических структур, структур на основе ЧСП, а также поляризаторов.

### СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ

АС – антенная система

АФР – амплитудно-фазовое распределение

ДН – диаграмма направленности

КНД – коэффициент направленного действия

КЭ – коэффициент эллиптичности

ПО – программное обеспечение

САПР – система автоматизированного проектирования

ССС – система спутниковой связи

УБЛ – уровень боковых лепестков

ФКЭ – фазокорректирующий элемент

ЧСП – частотно-селективная поверхность

### СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ

1. Станковский А. В. Экспериментальное исследование антенной решётки с механоэлектрическим и электронным типами сканирования / Е. А. Литинская, А. Д. Немшон, А. В. Станковский, С. В. Поленга, Ю. П. Саломатов // Известия высших учебных заведений. Физика. – 2015. – № 8/3. – Т. 58. – С. 45–49.

2. Станковский А. В. Широкополосная антенная решётка проходного типа на основе пространственных полосовых фильтров / Е. А. Литинская, А. Д. Немшон, А. В. Станковский, С. В. Поленга, Р. М. Крылов, Ю. П. Саломатов // Известия высших учебных заведений. Физика. – 2015. – № 8/3. – Т. 58. – С. 71–75.

3. Станковский А.В., Поленга С.В., Литинская Е.А., Рязанцев Р.О., Александрин А.М., Гафаров Е.Р., Ерохин А.А., Саломатов Ю.П. Антенная решетка Кудиапазона частот на основе резонатора Фабри-Перо // Письма в журнал технической физики. 2023. Т. 49. Выпуск 13. С. 3-6.

4. Litinskaya Y. A., Stankovsky A. V., Polenga S. V., Salomatov Yu. P. Wide-angle antenna systems with mechanoelectrical beam steering // Journal of Physics: Conference Series, Vol. 1515, Is. 4. 2020.

### **Свидетельства о государственной регистрации программы для ЭВМ**

1. Станковский А. В. Программа расчёта перфорированных диэлектрических структур квазиоптического управления лучом. Свидетельство о государственной регистрации программ для ЭВМ от 02 февраля 2017 г.
2. Станковский А. В., Немшон А. Д., Литинская Е. А., Поленга С. В. Программа синтеза пространственного полосового фильтра N-порядка на основе ЧСП. Свидетельство о государственной регистрации программ для ЭВМ от 15 января 2020 г.
3. Станковский А. В., Поленга С. В., Литинская Е. А. Программа расчета размеров меандрового поляризатора плоской и цилиндрической форм. Свидетельство о государственной регистрации программ для ЭВМ от 27 февраля 2023 г.
4. Станковский А. В., Поленга С. В., Литинская Е. А. Расчёт отклоняющей структуры, набранной из диэлектрических пластин треугольной формы. Свидетельство о государственной регистрации программ для ЭВМ от 04 августа 2023 г.

### **Доклады в трудах конференций, индексируемых в Scopus и(или) Web of Science**

1. A. V. Stankovsky, S. V. Polenga, A. D. Nemshon, K. V. Lemberg, Y. P. Salomatov. Wide-angle mechano-electrical beam steering antenna system // 24nd Int. Crimean Conference «Microwave & Telecommunication Technology» (CriMiCo'2014). 7—13 September, Sevastopol, Crimea, Russia, P. 467-468.
2. A. D. Nemshon, A. V. Stankovsky, A. M. Alexandrin, S. V. Polenga, V. S. Panko, Y. P. Salomatov. A broadband sub-wavelength phase-correcting element for transmit antenna arrays // 24nd Int. Crimean Conference «Microwave & Telecommunication Technology» (CriMiCo'2014). 7—13 September, Sevastopol, Crimea, Russia, p. 469-470.
3. Y. A. Litinskaya, A. D. Nemshon, A. V. Stankovsky, S. V. Polenga and Y. P. Salomatov. Experimental research of the antenna array with electronic and combine electronic and mechanical beam steering // 2016 International Siberian Conference on Control and Communications (SIBCON), Moscow, Russia, 2016, pp. 1-3.
4. E. R. Gafarov, A. V. Stankovsky, Y. P. Salomatov. A GNSS Quadrupole Antenna With a Spatial Polarizer for the Suppression of Low-Angle Multipath // 2016 International Siberian Conference on Control and Communications (SIBCON), Moscow, Russia, 2016, pp. 1-4.
5. A. V. Stankovsky, S. V. Polenga, R. M. Nemshon, Y. A. Litinskaya, E. R. Gafarov, Yu. P. Salomatov. Meander-Line Polarizer for Omnidirectional Antenna // 2016 International Siberian Conference on Control and Communications (SIBCON), Moscow, Russia, 2016, pp. 1-4.
6. E. R. Gafarov, A. V. Stankovsky, Y. P. Salomatov. A GNSS dipole antenna with a meander-line polarizer for the reduction of multipath interference // 2017 Radiation and Scattering of Electromagnetic Waves (RSEMW), pp. 311-313.
7. A. V. Stankovsky, S. V. Polenga; A. D. Nemshon; Ye. A. Litinskaya; A. M. Alexandrin; K. V. Lemberg; Yu. P. Salomatov. A wide-angle mechano-electrical

steering antenna system based on multilayer dielectric wedge structure // 2017 Radiation and Scattering of Electromagnetic Waves (RSEMW), pp. 45-48.

8. Y. A. Litinskaya, S. V. Polenga, A. V. Stankovsky and Y. P. Salomatov. A Ku-Band Low-Profile Wide-Angle Scanning Antenna Array with Combined Beam Steering // 2018 XIV International Scientific-Technical Conference on Actual Problems of Electronics Instrument Engineering (APEIE), Novosibirsk, Russia, 2018, pp. 238-242.

9. Stankovsky A. V., Litinskaya Ye. A., Alexandrin A. M., Polenga S. V., Salomatov Yu. P. Spatial polarizers for CTS structure-based antenna arrays // Proceedings of the 2019 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering, ElConRus 2019, p. 885-889.

10. Y. A. Litinskaya, S. V. Polenga, A. V. Stankovsky, A. D. Hudonogova and Y. P. Salomatov. A Subarray for Ku-Band High-Gain Scanning Antenna Based on CTS Waveguide // 2019 Radiation and Scattering of Electromagnetic Waves (RSEMW), Divnomorskoe, Russia, 2019, pp. 285-288.

11. Stankovsky A. V., Litinskaya Y. A., Nemshon A. D., Polenga S. V., Salomatov Y.P. Synthesis of Spatial Band-Pass Filter Based on Frequency-Selective Surfaces // Proceedings - 2021 Ural Symposium on Biomedical Engineering, Radioelectronics and Information Technology, USBEREIT 2021, pp. 234–237.

12. Y. A. Litinskaya, A. V. Stankovsky, S. V. Polenga and Y. P. Salomatov. Design and Analysis of Antenna Array with Combined Beam Steering // 2021 Radiation and Scattering of Electromagnetic Waves (RSEMW), 2021, pp. 195-198.

#### **Доклады (тезисы) в трудах других конференций**

1. А. В. Станковский, С. В. Поленга, А. Д. Немшон, Ю. П. Саломатов. Антенная система с широкоугольным механоэлектрическим сканированием на основе перфорированного диэлектрика // Всероссийская научно-техническая конференция с международным участием «Современные проблемы радиоэлектроники». Красноярск 2014, стр. 405-409.

2. А. В. Станковский, С. В. Поленга, А. Д. Немшон, Ю. П. Саломатов. Дисконная антенна // Системы связи и радионавигации. Сборник тезисов. Красноярск 2014, стр. 34-36.

3. Литинская Е. А., Немшон А. Д., Поленга С. В., Станковский А. В., Саломатов Ю. П. Низкопрофильная антенная решётка с широкоугольным сканированием // 25-ая Международная Крымская конференция «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии (КРЫМИКО'2015)». – 2015. – С. 473-474.

4. А. В. Станковский, С. В. Поленга, А. Д. Немшон, Ю. П. Саломатов. Дисконная антенна с широкоугольным механоэлектрическим сканированием // Электронные средства и системы управления. X Международная научно-практическая конференция. Материалы докладов. Часть 1. Томск 2014, стр. 149-153.