

На правах рукописи



Литинская Елена Алексеевна

НИЗКОПРОФИЛЬНЫЕ АНТЕННЫЕ РЕШЁТКИ  
С МЕХАНОЭЛЕКТРИЧЕСКИМ ТИПОМ СКАНИРОВАНИЯ

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

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Томск 2022

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

**Научный руководитель:** Саломатов Юрий Петрович, кандидат технических наук, профессор, СФУ

**Официальные оппоненты:** Кирпанев Алексей Владимирович, доктор технических наук, доцент, начальник отдела антенн W-диапазона ОАО «НПП «Радар ММС», г. Санкт-Петербург;

Дмитренко Анатолий Григорьевич, доктор физико-математических наук, профессор, Национальный исследовательский Томский государственный университет (НИ ТГУ), профессор

**Ведущая организация:** Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина).

Защита диссертации состоится 31 мая 2022 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» 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/p8s157dy>

Автореферат разослан «\_\_\_» апреля 2022 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета 24.2.415.01,  
доктор физ.-мат. наук



А. Е. Мандель

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

### Актуальность проблемы.

В настоящее время одним из приоритетных направлений научно-технологического развития РФ является обеспечение информационной связанности территорий страны (системы связи, навигация). Поскольку больше половины территорий нашей страны находятся в труднодоступных и удаленных местностях, где отсутствуют наземные сети связи, одним из возможных средств связи там является спутниковая. Организация сетей спутниковой связи необходима не только для стационарных объектов, но и для мобильных (как на личных транспортных средствах (ТС) потребителей, так на специальном транспорте МЧС, природоохраны, военной техники). Традиционно для непрерывного соединения со спутником на движущемся объекте используют два типа антенных систем (АС): зеркальные антенны (ЗА) с механическим типом сканирования и плоские фазированные антенные решетки (ФАР) с электронным типом сканирования. Эти сканирующие антенны имеют ряд существенных недостатков: ЗА имеют большую ветровую нагрузку, что приводит к необходимости увеличения массы и усложнению механизмов привода, в итоге к ограничению скорости сканирования, у плоских ФАР с электронным сканированием – это ограниченный сектор углов сканирования (что не позволяет им функционировать на территориях с большой географической широтой, либо приводит к необходимости создания АС, имеющих в своем составе несколько ФАР или объемных ФАР) и высокая стоимость ФАР в целом.

Также стоит отметить, что в настоящее время разрабатываются перспективные системы спутниковой связи с использованием среднеорбитальных и низкоорбитальных космических аппаратов, для обеспечения связи с которыми необходимы сканирующие низкопрофильные АС с высокой эффективностью также и для стационарных потребителей.

Исследование механоэлектрических методов сканирования и создания на их основе антенн, имеющих малый вес и профиль и позволяющих осуществить широкоугольное перемещение луча с сохранением направленных характеристик антенн, являются **актуальной** задачей дальнейшего развития систем спутниковой связи. Одно из главных преимуществ механоэлектрического метода сканирования перед электромеханическим заключается в преобладании механических методов управления лучом, что приводит к значительному снижению стоимости всей антенны в целом при сохранении малых размеров профиля антенны.

**Целью диссертационной работы** является исследование механоэлектрических типов сканирования и создание на их основе широкоугольных антенн с малыми габаритами и высокой эффективностью.

**Объектом исследования** являются антенные решетки с механоэлектрическим типом сканирования, **предметом исследования** является реализация низкопрофильных антенных решеток с механоэлектрическим широкоугольным сканированием и высоким коэффициентом усиления (КУ).

### **Задачи диссертационного исследования:**

- 1) анализ современных низкопрофильных АС для спутниковой связи, а также типов сканирования, используемых в данных антеннах;
- 2) исследование механоэлектрических типов сканирования;
- 3) исследование и определение потенциально достижимых характеристик антенных решёток с механоэлектрическим типом сканирования;
- 4) исследование и разработка микрополосковой антенной решётки с механоэлектрическим типом сканирования;
- 5) исследование и разработка антенной решётки на основе резонаторов Фабри-Перо с механоэлектрическим типом сканирования;
- 6) исследование способов построения низкопрофильных антенных решёток с механоэлектрическим типом сканирования для увеличения сектора сканирования.

### **Методы исследования.**

В ходе работы применялось электродинамическое моделирование излучающих структур различными методами (метод конечных элементов (finite element method – FEM), метод конечного интегрирования (finite integration – FI), метод моментов (methods of moments – MoM)) в прикладных программных пакетах. Экспериментальные исследования проводились путем измерения S-параметров при помощи векторного анализатора цепей, характеристики излучения антенн исследовались в безэховых камерах методом сканирования ближнего поля, а также измерениями в дальней зоне.

### **Научная новизна.**

В работе получены следующие новые результаты:

- 1) Зависимости характеристик направленности антенных решёток (АР) с механоэлектрическим типом сканирования от их геометрических параметров;
- 2) Предложена АР с механоэлектрическим типом сканирования с улучшенными направленными характеристиками в секторе углов сканирования  $0^{\circ}$ – $60^{\circ}$ , обладающая малыми массогабаритными показателями;
- 3) Предложена волноводная диаграммобразующая схема (ДОС) для АР на основе резонаторов Фабри–Перо, обеспечивающая уровень потерь на рассогласование не более 0,22 дБ в диапазоне частот 11,8–12,6 ГГц и имеющая высоту 9 мм;
- 4) Предложена АР на основе резонаторов Фабри–Перо с механоэлектрическим типом сканирования, обладающая высоким коэффициентом использования поверхности (КИП) в секторе углов сканирования  $0^{\circ}$ – $90^{\circ}$ ;
- 5) Использование радиопоглощающего материала на задней поверхности затеняющей подрешётки АР на основе резонаторов Фабри–Перо увеличивает КУ решётки в секторе углов  $70^{\circ}$ – $90^{\circ}$ .

### **Защищаемые научные положения.**

- 1) Коэффициент направленного действия (КНД), уровень боковых лепестков (УБЛ) и достижимый сектор сканирования АР с механоэлектрическим типом сканирования определяется количеством используемых в ней подрешёток при неизменном размере апертуры;
- 2) Микрополосковая АР с механоэлектрическим типом сканирования в секторе углов  $30^{\circ}$ – $60^{\circ}$  имеет КУ, превосходящий КУ АР с электронным сканированием с идентичной апертурой на более чем 1,5 дБ;
- 3) Использование антенных элементов на основе резонаторов Фабри–Перо в АР с механоэлектрическим типом сканирования позволяет достичь КИП антенны более 30% в секторе углов сканирования  $0^{\circ}$ – $90^{\circ}$ ;
- 4) КУ АР с механоэлектрическим типом сканирования на основе резонаторов Фабри–Перо с использованием поглотителя на затеняющей подрешётке больше, чем КУ аналогичной АР без поглотителя, более чем на 1 дБ в секторе углов  $70^{\circ}$ – $90^{\circ}$  в угломестной плоскости.

#### **Практическая значимость.**

1. Предложен метод оценки достижимых характеристик направленности АР с механоэлектрическим типом сканирования и влияния геометрических параметров на характеристики направленности решётки;
2. Изготовлена и исследована микрополосковая АР с механоэлектрическим сканированием с сектором сканирования в угломестной плоскости  $0^{\circ}$ – $60^{\circ}$ ;
3. Изготовлена и исследована АР на основе резонаторов Фабри–Перо с механоэлектрическим сканированием с сектором сканирования в угломестной плоскости  $0^{\circ}$ – $90^{\circ}$  для организации спутниковой связи в движении;
4. Использование радиопоглощающего материала на задней поверхности затеняющей подрешётки АР на основе резонаторов Фабри–Перо увеличивает КУ решётки в секторов углов сканирования  $70^{\circ}$ – $90^{\circ}$ .

**Достоверность результатов,** основывается на корректном применении численных и аналитических методов, на использовании современных САПР, апробированных экспериментальных методик и высокоточного оборудования. Результаты работы являются воспроизводимыми и проверяемыми, наблюдаются количественные и качественные совпадения результатов моделирования, экспериментальных исследований и данных, известных из литературы.

#### **Внедрение результатов исследований.**

Результаты исследований были применены в ходе выполнения НИР «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), НИР «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), НИР «Исследование метаматериалов и разработка на их основе сканирующей антенны для систем связи с использованием низкоорбитальных космических аппаратов» (договор №20-47-243003/20 от 04.02.2021).

**Апробация работы.** Основные положения и результаты диссертации обсуждались на конференциях: «International Siberian Conference on Control and Communications (SIBCON)» (Красноярск, 2013 г., Москва, 2016 г.), «Asia-Pacific Microwave Conference (APMC)» (Нью-Дели, Индия, 2016 г.), «Radiation and Scattering of Electromagnetic Waves (RSEMW)» (Геленджик, 2017, 2019, 2021 гг.), «International Scientific-Technical Conference on Actual Problems of Electronics Instrument Engineering (APEIE)» (Новосибирск, 2018г.), «Актуальные проблемы радиофизики (Томск, 2015 г.), «Современные проблемы радиоэлектроники» (Красноярск, 2014, 2018, 2020 гг.), «Antennas Design and Measurement International Conference (ADMInC'2021)», (Санкт-Петербург, 2021 г.).

**Публикации.** По материалам диссертации опубликовано 19 работ, в т. ч. 3 статьи в журналах из перечня ВАК, 1 доклад в журнале, индексируемом в SCOPUS, 11 докладов в трудах конференций, индексируемых в SCOPUS и 7 – в WoS, 4 докладов в трудах других конференций, 2 свидетельства о регистрации программы для ЭВМ.

**Личный вклад автора.** Результаты работы, сформулированные в положениях, выносимых на защиту, и составляющие научную новизну работы, получены автором лично или при непосредственном его участии:

- исследование характеристик АР с механоэлектрическим типом сканирования с помощью численных и аналитических методов анализа;
- разработаны электродинамические модели микрополосковой АР с механоэлектрическим типом сканирования и исследованы характеристики направленности решётки;
- разработаны электродинамические модели АР на основе резонаторов Фабри-Перо с механоэлектрическим типом сканирования и исследованы характеристики направленности решётки;
- сравнение энергетических характеристик АР с механоэлектрическим и электронными типами сканирования;
- выполнены макеты АР с механоэлектрическим типом сканирования;
- экспериментальные исследования АР с механоэлектрическим типом сканирования.

**Структура и объём диссертации.** Диссертация состоит из введения, 4 глав, заключения, списка литературы, приложения. Объём диссертации составляет 164 страницы, количество иллюстраций 155, число цитированных источников 100. Приложение с актами использования результатов исследований изложено на 2 страницах.

## СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

**Во введении** приведены обоснование актуальности темы, постановка проблем, приведены защищаемые положения, изложена научная новизна и практическая значимость работы.

**В первой главе** рассмотрены литературные источники по теме исследования. Проведен обзор современных сканирующих АС, рассмотрены антенны с электромеханическим и механоэлектрическим типами сканирования, антенны с электронным сканированием и многолучевые антенные решётки, а также возможность их применения в мобильных терминалах спутниковой связи, указаны их основные достоинства и недостатки.

По результатам обзора сделаны следующие выводы:

- 1) Современные АС с электронным сканированием, обладающие низким профилем, имеют малый КИП при углах сканирования более  $40^\circ$ ;
- 2) Известные антенны с электромеханическим и механоэлектрическим типами сканирования обладают недостаточной эффективностью для осуществления приема и передачи сигнала со спутника в движении во всей полусфере и имеют большое количество управляющих элементов в составе АС;
- 3) Наименьший профиль антенны при условии сохранения направленных характеристик в широком секторе углов сканирования могут обеспечить антенны с механоэлектрическим типом сканирования. Сделан вывод, что антенны с механоэлектрическим типом сканирования являются наиболее предпочтительными при практической реализации и также имеют невысокую стоимость.

На основе материалов обзора сформулированы цели и задачи исследований в диссертационной работе.

**Во второй главе** приводится исследование характеристик направленности АР с механоэлектрическим типом сканирования в зависимости от их геометрических параметров.

АР с механоэлектрическим типом сканирования состоит из нескольких подрешёток, размещенных на общем основании. Сканирование ДН всей антенны в угломестной плоскости осуществляется путем механического поворота подрешёток на некоторый угол ( $\theta_0$ ) и регулирования фазовой задержки между подрешётками. Сканирование в азимутальной плоскости осуществляется путем вращения общего основания во всем секторе углов  $0^\circ$ – $360^\circ$  (рисунок 1). Поэтому далее исследуется сканирование только в угломестной плоскости.

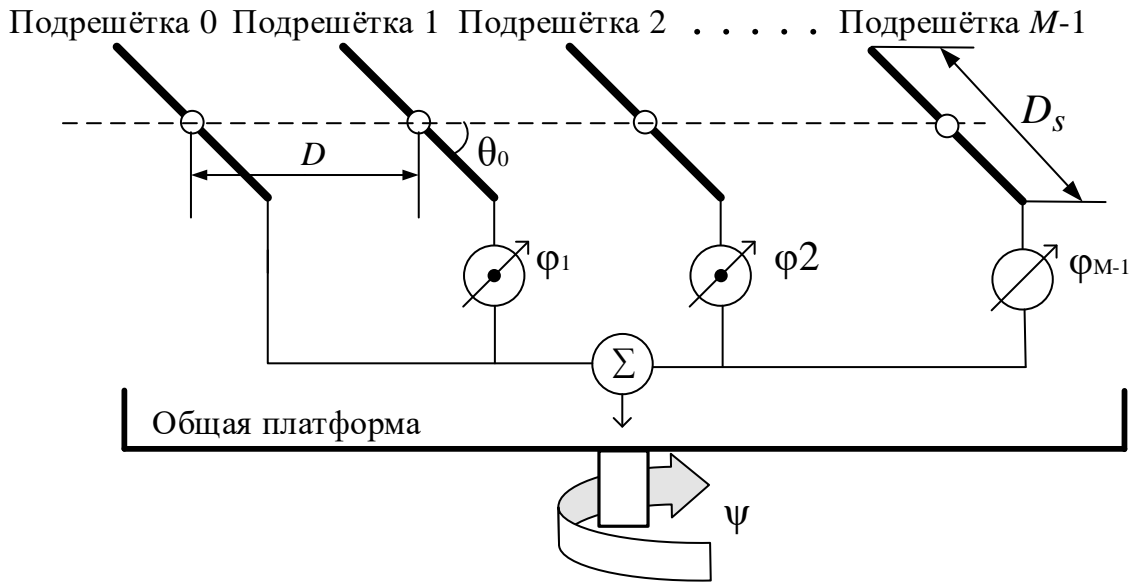


Рисунок 1 – АР с механоэлектрическим типом сканирования.

Получены следующие выражения, определяющие геометрические параметры АР с механоэлектрическим типом сканирования:

1. Расстояние между подрешётками – 
$$D = \frac{\beta \cdot \lambda}{M \cdot 2\Delta\theta_{0,5}},$$

где  $\beta$  – коэффициент, определяемый формой раскрыва, видом амплитудного распределения,  $\beta_m = 51^\circ$ , соответствует равномерному амплитудному распределению,  $2\Delta\theta_{0,5}^\circ$  – ширина ДН по уровню -3дБ в угломестной плоскости,  $M$  – количество подрешёток,  $\lambda$  – длина волны.

2. Высота (профиль) АР –

$$H = \frac{\beta\lambda}{2M\Delta\theta_{0,5}} \left[ (M-1)\sin\theta_0 + \sin(2\theta_0) \right],$$

где  $\theta_0$  – угол поворота подрешёток в угломестной плоскости (рис. 1).

3. Количество излучателей в подрешётке – 
$$N = \text{ENTER} \left( \frac{D - \delta}{d} \right),$$

где  $\text{ENTER}(x)$  – максимальное целое от « $x$ »,  $\delta$  – расстояние между краями подрешёток АР,  $d$  – расстояние между антенными элементами в подрешётке в плоскости сканирования.

4. Размер апертуры подрешётки в плоскости сканирования –

$$D_s = \frac{H \cos\theta_0}{\cos\theta_0 \sin 2\theta_0 + (M-1)\sin\theta_0}.$$

Установлено, что при заданной апертуре значение количества подрешёток ( $M$ ) АР с механоэлектрическим типом сканирования определяют параметры всей решётки, такие как УБЛ диаграммы направленности (ДН), КНД АР и достижимый сектор сканирования.

Ниже приведены зависимости УБЛ ДН и КНД АР с механоэлектрическим типом сканирования от направления максимума ДН при различном количестве



подрешёток АР (рисунок 2). Амплитудное распределение АР равномерно, все подрешётки имеют одинаковые размеры, расстояние между излучателями в подрешётке  $d = 0,5\lambda$ ,  $2\Delta\theta_{0,5} = 3^\circ$ ,  $\lambda = 25\text{мм}$ .

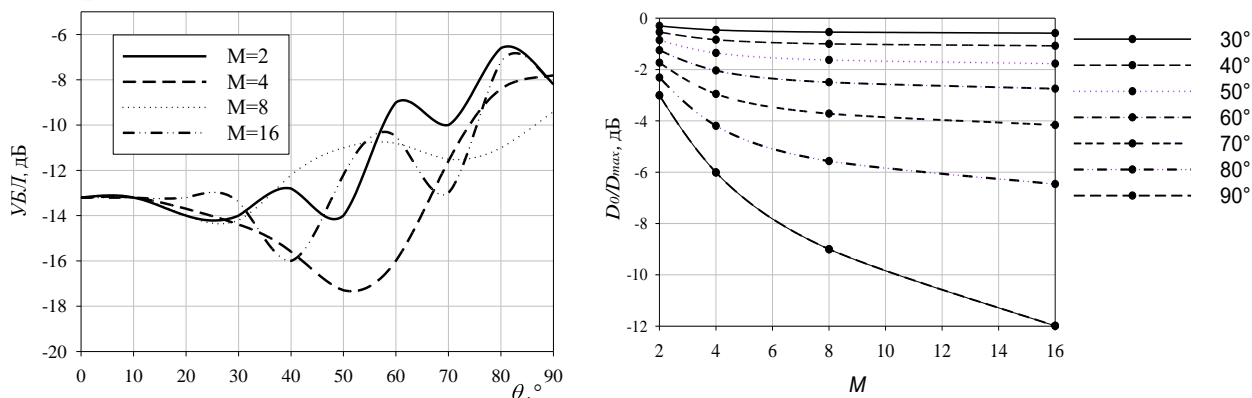


Рисунок 2 – Зависимости параметров АР с механоэлектрическим типом сканирования от направления максимума ДН при различных конфигурациях решётки.

Разбиение АР с механоэлектрическим типом сканирования на 2 или 4 подрешётки позволяет получить выигрыш в КНД от 0,5 до 6,5 дБ относительно других конфигураций решётки, состоящих из 8 или 16 подрешёток, в секторе углов сканирования  $40^\circ$ – $90^\circ$ . При этом в данном секторе сканирования УБЛ ДН превышает -10 дБ при конфигурации решётки, состоящей из 8 подрешёток, в отличие от других рассматриваемых конфигураций.

Таким образом, используя полученные выражения, определяющие геометрические параметры АР с механоэлектрическим типом сканирования и учитывая влияние данных параметров на характеристики направленности решётки, можно оценить потенциально достижимый сектор углов сканирования и размеры всей АР.

**В третьей главе** приведены результаты численного моделирования АР с механоэлектрическим типом сканирования. В ходе исследования проведено сравнение двух типов излучателей, на основе которых целесообразно разрабатывать АР с механоэлектрическим сканированием: микрополосковый излучатель двухслойной конфигурации и излучатель на основе резонатора Фабри-Перо. Результаты исследования показали, что необходимыми характеристиками направленности, а также малыми габаритами и простой технологичностью изготовления для реализации низкопрофильной АР с механоэлектрическим типом сканирования обладает микрополосковый излучатель. Был разработан микрополосковый делитель мощности с последовательно-параллельной схемой деления, позволяющий минимизировать размер подрешётки в угломестной плоскости, а, следовательно, и уменьшить профиль всей АР с механоэлектрическим типом сканирования, снизить эффект затенения подрешёток друг другом, что позволяет увеличить сектор сканирования. На основе микрополоскового излучателя и делителя мощности с последовательно-параллельной схемой деления мощности была исследована подрешётка для АР с механоэлектрическим типом сканирования. Подрешётка состояла из 20 элементов, размеры подрешётки – 273 x 26 x 3 мм

(рисунок 3). В качестве подложки использовался вспененный полистирол с диэлектрической проницаемостью 1,1.

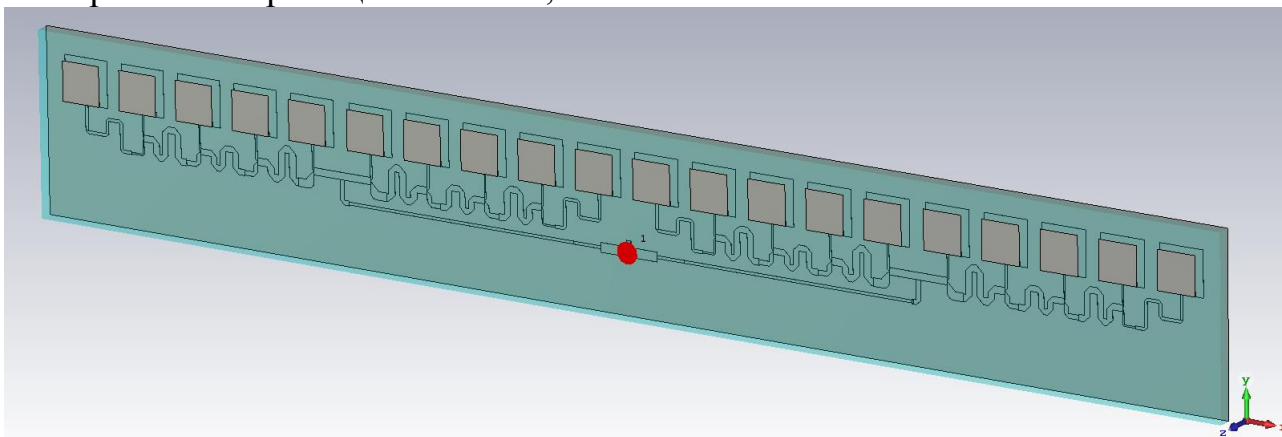


Рисунок 3 – Подрешётка для микрополосковой АР с механоэлектрическим типом сканирования.

На рисунке 4 показаны расчетные ДН подрешётки на 11 ГГц и 11,75 ГГц.

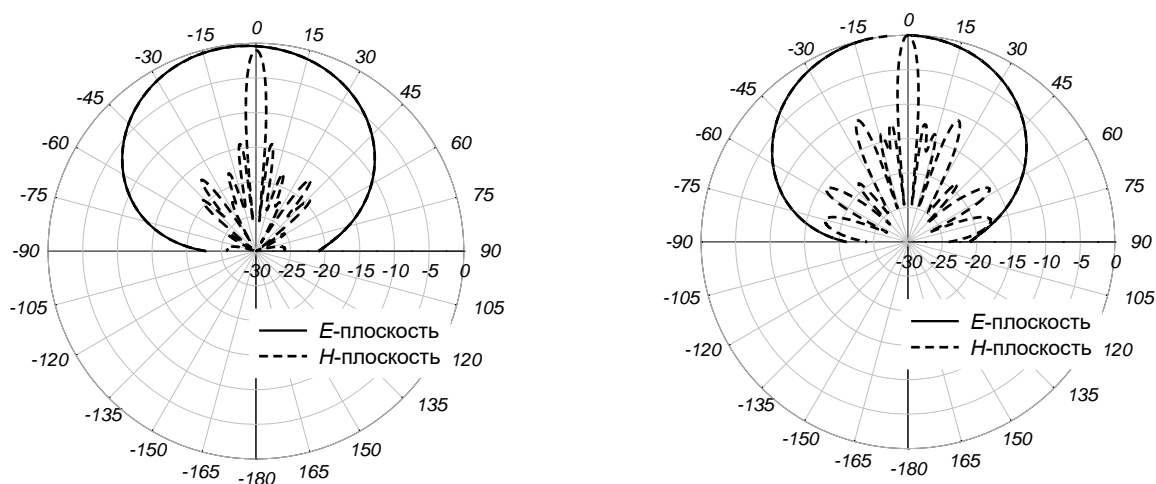


Рисунок 4 – ДН подрешётки АР с механоэлектрическим типом сканирования на частотах 11 ГГц (слева) и 11,75 ГГц (справа).

На основе разработанной подрешётки было проведено численное моделирование АР с механоэлектрическим типом сканирования (рисунок 5). АР состоит из 8 идентичных подрешёток, каждая подрешётка механически вращается, на их выходы вносятся фазовые линейные задержки, зависящие от угла поворота подрешёток. Размеры АР составили 273 x 208 x 30 мм.

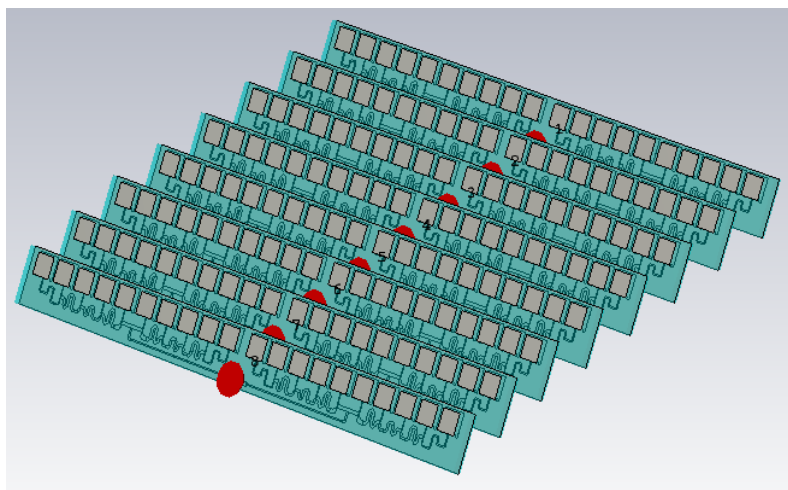


Рисунок 5 – Модель микрополосковой АР с механоэлектрическим типом сканирования.

На рисунке 6 представлены расчетные ДН исследуемой АР с механоэлектрическим типом сканирования на 11 ГГц и 11,5 ГГц при различных углах поворота подрешёток. Электродинамическое моделирование микрополосковой АР с механоэлектрическим типом сканирования проводилось методом конечного интегрирования (finite integration technique).

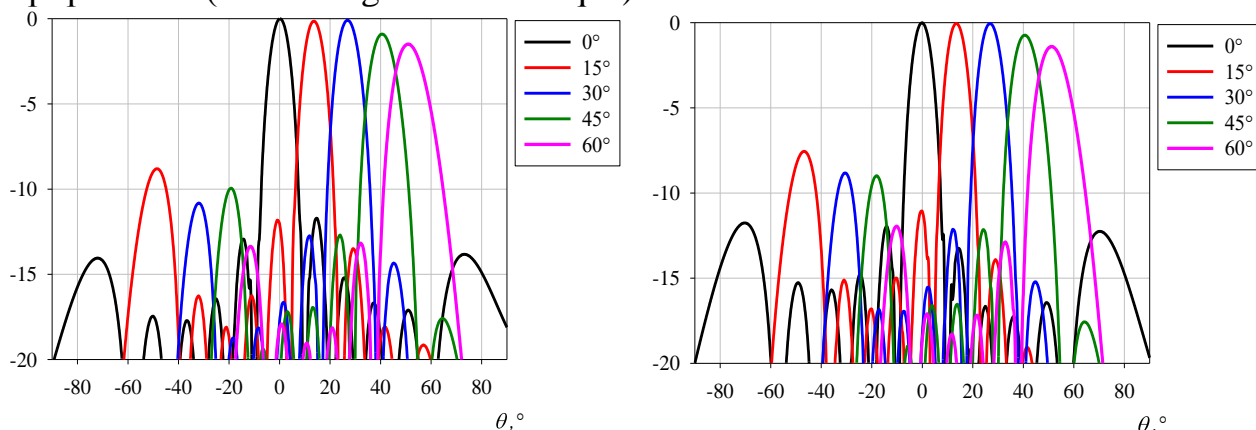


Рисунок 6 – Расчетные ДН АР с механоэлектрическим типом сканирования на частотах 11 ГГц (слева) и 11,5 ГГц (справа) при различных углах поворота подрешёток.

Результаты численного моделирования показали, что деградация КНД АР с механоэлектрическим типом сканирования при отклонении луча на  $60^\circ$  составила 1,5дБ, а при отклонении на  $70^\circ$ —3дБ. Таким образом, разработанная микрополосковая АР обеспечивает сектор сканирования  $\pm 60^\circ$  (по критерию деградации КУ антенны не более чем на 2 дБ) и имеет малый профиль всей антенны, составляющий 22,5 мм при отклонении луча на  $60^\circ$ .

Приведены результаты исследования излучающего элемента на основе резонатора Фабри–Перо (рисунок 7), состоящего из двухслойной частотно-селективной поверхности (ЧСП) частично-отражающей, и открытого конца волновода в качестве возбуждителя.

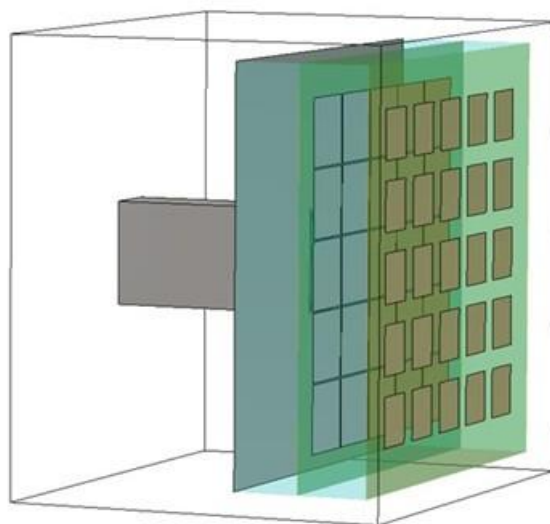


Рисунок 7 – Излучатель на основе резонатора Фабри–Перо.

Расчетные ДН излучающего элемента на основе резонатора Фабри–Перо с линейной поляризацией представлены на рисунке 8.

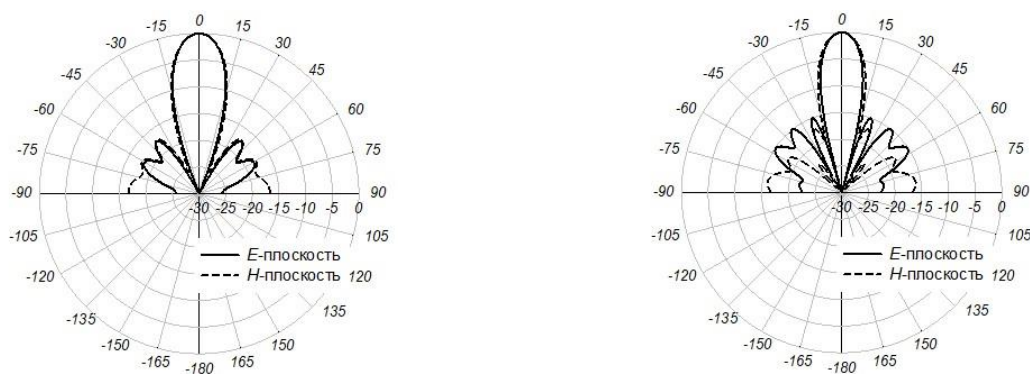


Рисунок 8 – Расчетные ДН излучающего элемента на основе резонатора Фабри–Перо на частотах 11,9 ГГц (слева) и 12,5 ГГц (справа) в *E* и *H* плоскостях.

КУ исследуемого излучателя на основе резонатора Фабри–Перо составляет не менее 19,5дБ в полосе частот 11,9–12,5 ГГц (рисунок 9).

Апертурный КИП исследуемого излучателя составляет более 70% в полосе частот 11,9–12,5 ГГц, что позволяет его отнести к классу эффективных излучающих элементов. Высокая эффективность исследуемого излучателя достигается благодаря отсутствию потерь в линиях питания. Для согласования использовалась диэлектрическая пирамида в раскрытие волновода, позволяющая достичь уровня коэффициента отражения излучающего элемента не более минус 10 дБ во всем приемном диапазоне частот (рисунок 9). Габариты исследуемого излучателя составили 80 x 80 x 66 мм.

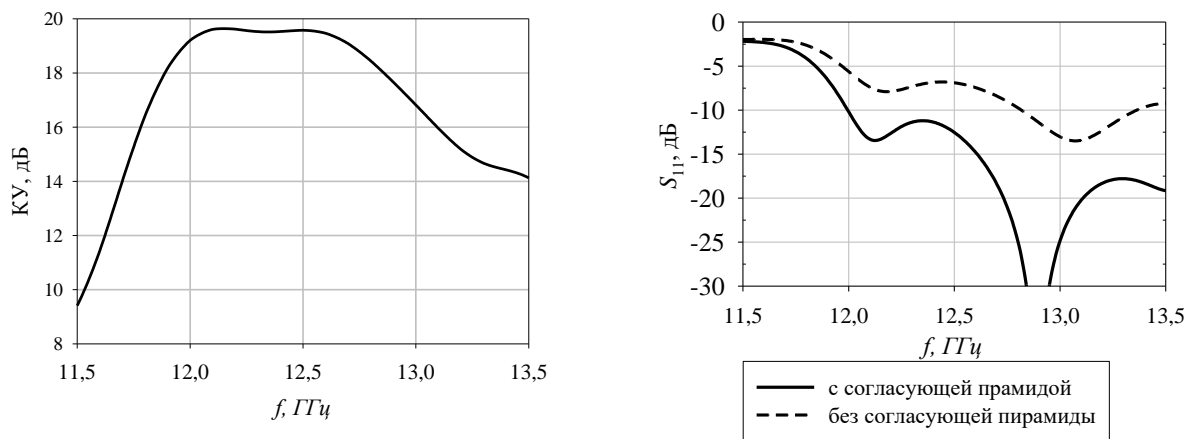
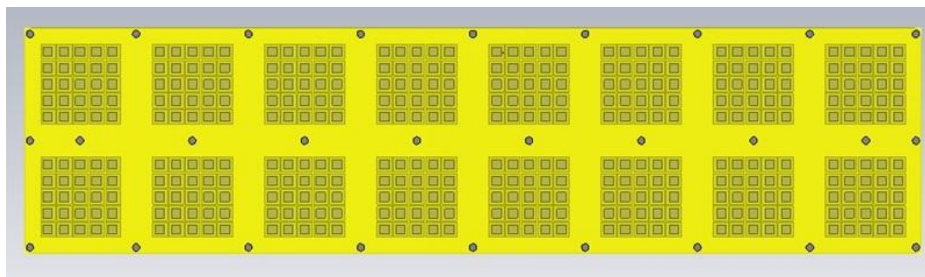
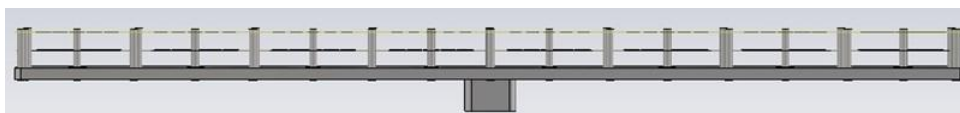


Рисунок 9– График зависимости КУ излучающего элемента на основе резонатора Фабри–Перо от частоты(слева); Зависимость коэффициента отражения антенного элемента на основе резонатора Фабри-Перо от частоты(справа).

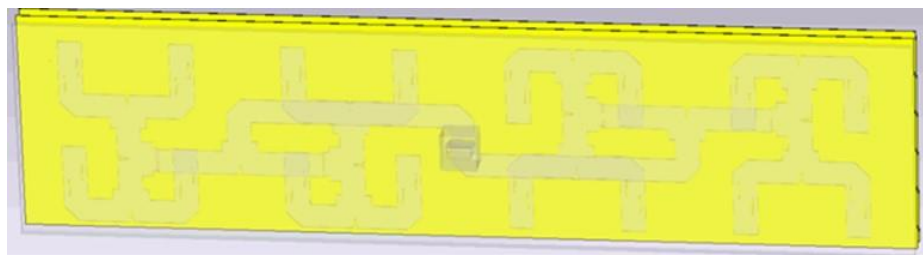
Для создания АР с механоэлектрическим типом сканирования для ССС был разработан и исследован излучающий элемент на основе резонатора Фабри–Перо с круговой поляризацией. В качестве возбуждителя излучающего элемента была разработана схема, состоящая из двух ортогональных щелей в металлическом экране, ЧСП излучателя идентична ЧСП излучателя с линейной поляризацией (рисунок 7). На основе излучателя с круговой поляризацией была разработана подрешётка для АР с механоэлектрическим типом сканирования, состоящая из восьми излучателей в азимутальной плоскости и из двух излучателей в угломестной плоскости (рисунок 10). В качестве диаграммообразующей схемы (ДОС) подрешётки предложена схема на основе пустотелых волноводов малой высоты (20x2 мм), что позволяет обеспечить малые потери в линиях передачи и увеличить эффективность всей АС в целом при сохранении малого профиля ДОС (менее 10 мм). Предложенная ДОС состоит из пяти слоев листового алюминия, в первом выполнен переход с волновода WR-75, переходящий в бинарный делитель мощности в Е-плоскости. Во втором слое располагаются две ступени бинарного делителя мощности в Н-плоскости. Третий слой содержит переходные щели с одного слоя волноводов на другой, кроме того, он выполняет роль широких стенок волноводов. В четвертом слое располагаются еще две ступени бинарных делителей мощности в Н-плоскости. В пятом слое располагаются излучающие щели, запитывающие резонатор Фабри–Перо с круговой поляризацией. Высота волноводной ДОС для подрешётки на основе резонаторов Фабри–Перо составляет 9 мм.



а



б



в

Рисунок 10 – Подрешётка на основе излучателя с круговой поляризацией, вид сверху(а); вид сбоку(б); ДОС подрешётки (в).

Размеры подрешётки составляют 740 x 185 x 36 мм. Расчетные ДН исследуемой подрешётки, полученные электродинамическим методом конечного интегрирования, представлены на рисунке 11.

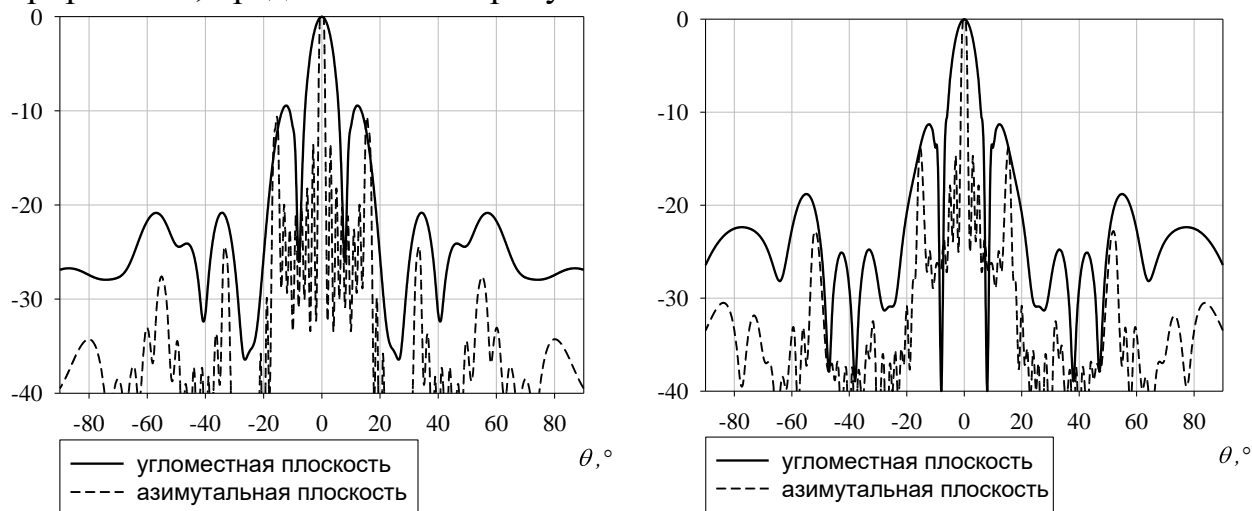


Рисунок 11 – ДН подрешётки на основе элемента с круговой поляризацией на частотах 11,9 ГГц (слева) и 12,5 ГГц (справа).

КУ подрешётки составляет более 32,5дБ в полосе частот от 11,9 ГГц до 12,5 ГГц. Расчетный КЭ исследуемой подрешётки составляет не менее 0,6 в рабочей полосе частот. Расчетный уровень обратных потерь подрешётки на основе резонаторов Фабри–Перо составил не более -13дБ в полосе частот от 11,8 ГГц до 12,6 ГГц.

КИП исследуемой подрешётки на основе элемента с круговой поляризацией составляет более 60%. Достигнутая эффективность демонстрирует возможность реализации АР с механоэлектрическим типом сканирования на основе разработанной подрешётки и использование её в мобильных спутниковых терминалах.

На основе подрешётки с элементом круговой поляризации была разработана и исследована АР с механоэлектрическим типом сканирования. Разработанная АР состоит из двух идентичных подрешёток (рисунок 10), расстояние ( $\delta$ ) между подрешётками 115,2 мм. Расстояние между подрешётками выбрано из соображений уменьшения затенения подрешётками друг друга и деградации направленных характеристик АР при углах сканирования более  $40^\circ$ . Сканирование в угломестной плоскости осуществляется путем поворота подрешёток вокруг своей оси на одинаковый угол.

Полученные путем численного моделирования ДН АР с механоэлектрическим типом сканирования на основе излучателя с круговой поляризацией при различных направлениях луча представлены на рисунках 12 и 13.

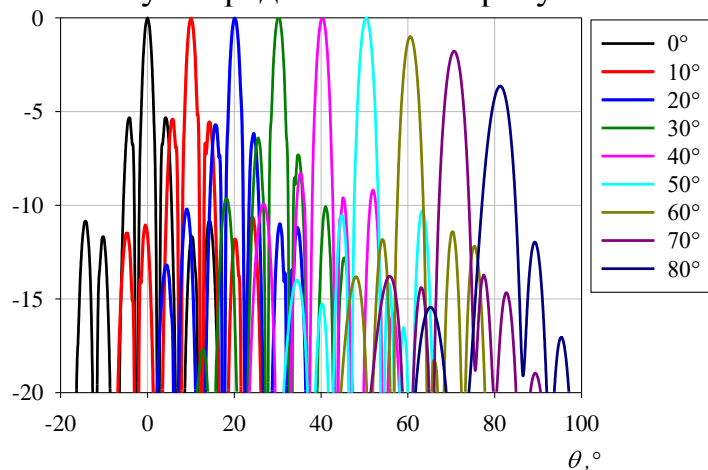


Рисунок 12 – ДН АР на основе излучателей Фабри–Перо с круговой поляризацией при различных направлениях луча на частоте 11,9 ГГц.

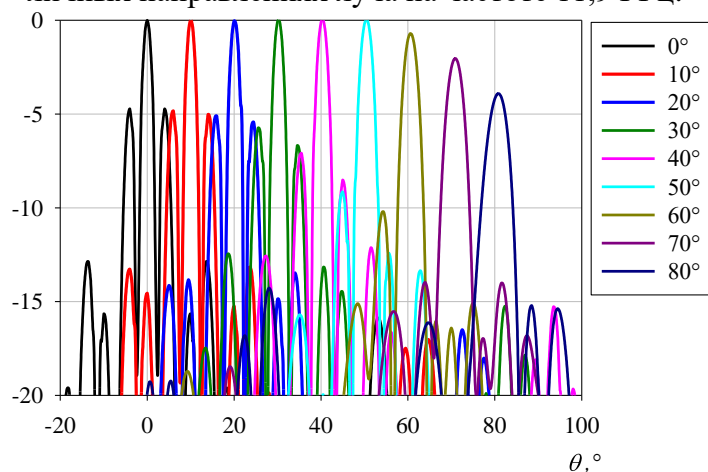


Рисунок 13 – ДН АР на основе резонатора Фабри–Перо с круговой поляризацией при различных направлениях луча на частоте 12,5 ГГц.

Расчетный УБЛ исследуемой АР на основе резонаторов Фабри–Перо с механоэлектрическим типом сканирования при отклонениях луча на  $0^\circ$ – $40^\circ$  во всем рабочем диапазоне длин волн превышает уровень минус 10дБ, что связано с тем, что в результирующем амплитудном распределении АР наблюдается разрыв, связанный с большим расстоянием между подрешётками. Такое расстояние

между краями подрешёток ( $\delta=115$  мм) выбрано для уменьшения эффекта затенения одной подрешёткой другой при больших углах сканирования. КУ АР в секторе углов сканирования  $0^\circ$ – $50^\circ$  практически не меняется благодаря сужению главного лепестка ДН решётки.

В секторе углов сканирования  $0^\circ$ – $50^\circ$  в рабочем диапазоне частот КУ решётки остается неизменным. Деградация КУ составляет не более 1 дБ при отклонении максимума ДН на  $60^\circ$ , при отклонении на  $70^\circ$  – не более 2,2 дБ, при отклонении луча на  $80^\circ$  – не более 4 дБ. Ухудшение направленности при отклонении максимума ДН на  $80^\circ$  более чем на 3 дБ связано с затенением, уменьшающим эффективную поверхность всей решётки, и с наличием вносимых переотражений от затеняющей подрешётки. В секторе углов сканирования  $80^\circ$ – $90^\circ$  необходимо отключать затеняемую подрешётку и осуществлять прием сигнала только одной подрешёткой для повышения КУ решётки в данном секторе углов.

КЭ решётки в НЧ-области рабочего диапазона длин волн составляет не менее 0,7, в высокочастотной (ВЧ) области – не менее 0,6.

Было исследовано влияние поглощающего материала, размещенного на задней поверхности затеняющей подрешётки, на характеристики направленности АР на основе резонаторов Фабри–Перо в секторе углов сканирования  $60^\circ$ – $90^\circ$ . Ниже приведены сравнения зависимостей КУ АР в двух конфигурациях (с использованием поглощающего материала и без него) при различных направлениях максимума ДН АР (рисунки 14 и 15).

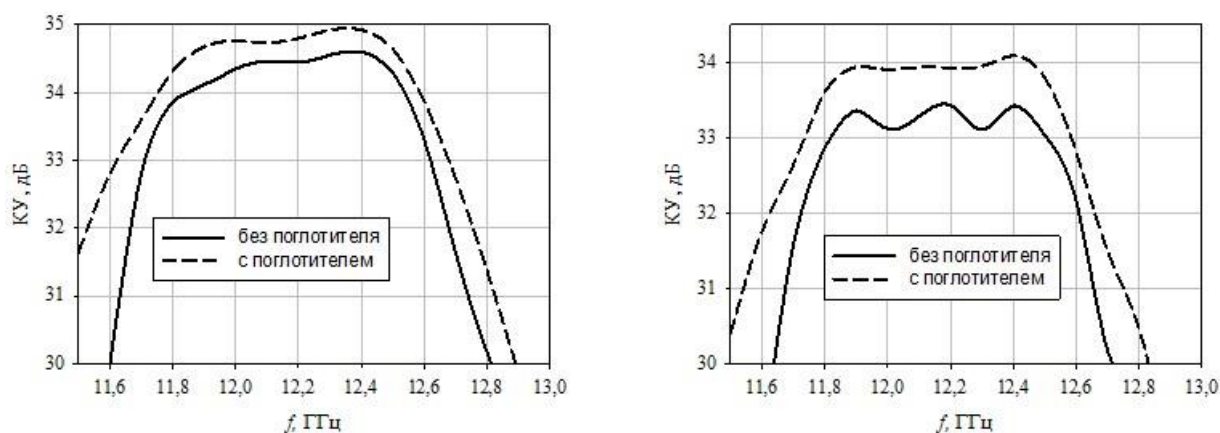


Рисунок 14– Зависимость КУ АР на основе резонатора Фабри–Перо при отклонении максимума ДН на  $60^\circ$  (слева); Зависимость КУ АР на основе резонатора Фабри–Перо при отклонении максимума ДН на  $70^\circ$  (справа).



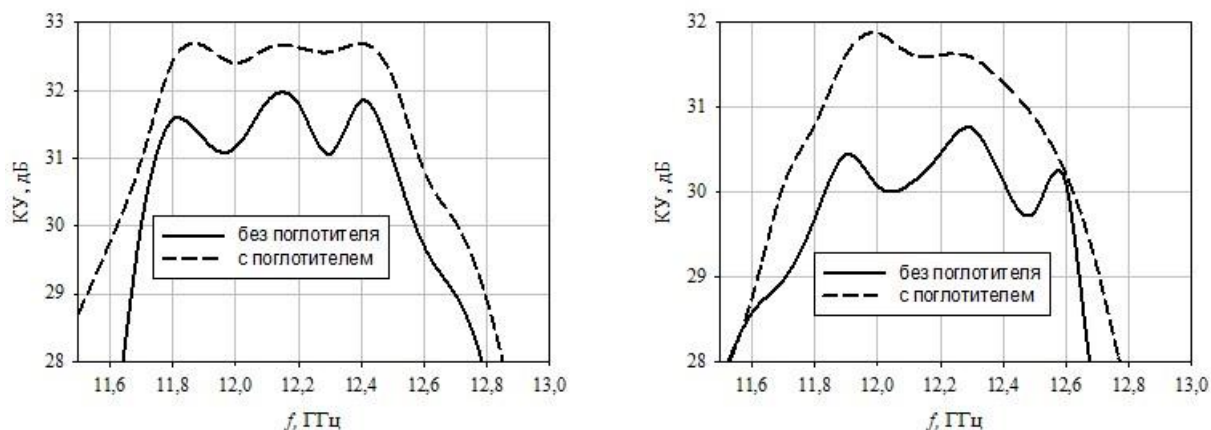


Рисунок 15– Зависимость КУ АР на основе резонатора Фабри–Перо при отклонении максимума ДН на  $80^\circ$  (слева); Зависимость КУ АР на основе резонатора Фабри–Перо при отклонении максимума ДН на  $90^\circ$  (справа).

Уменьшение деградации расчетного КУ АР на основе резонаторов Фабри–Перо при размещении на задней поверхности затеняемой подрешётки поглотителя составило более 1 дБ в секторе углов сканирования  $80^\circ$ – $90^\circ$  в сравнении с расчетным КУ АР без поглотителя. Таким образом, использование поглощающего материала на задней поверхности затеняющей подрешётки АР на основе резонаторов Фабри–Перо позволяет уменьшить уровень переотражений в области низких углов, что приводит к увеличению КУ.

Полученные результаты в данной главе на примере предложенной конструкции микрополосковой АР с механоэлектрическим типом сканирования показали возможность сохранения низкого профиля всей антенны и характеристик направленности при различных отклонениях луча.

Применение в качестве излучателя элемента на основе резонатора Фабри–Перо и построения на его основе АР с механоэлектрическим типом сканирования позволяет достичь КИП антенны более 30% и сохранить характеристики направленности в секторе углов  $0^\circ$ – $90^\circ$ .

**Четвертая глава** посвящена анализу результатов экспериментальных исследований макетов АР с механоэлектрическим типом сканирования и их составных частей с целью оценки возможности создания низкопрофильных спутниковых антенн с широкоугольным сканированием на основе рассмотренных в Главе 3 АР. На рисунке 16 показан макет микрополосковой подрешётки для АР с механоэлектрическим типом сканирования. Конфигурация подрешётки с последовательно-параллельным делителем мощности позволяет обеспечить шаг решётки (расстояние между осями поворота подрешёток) не более  $0,8 \lambda$ , что сохраняет малый профиль антенны при углах сканирования близких к  $90^\circ$ .

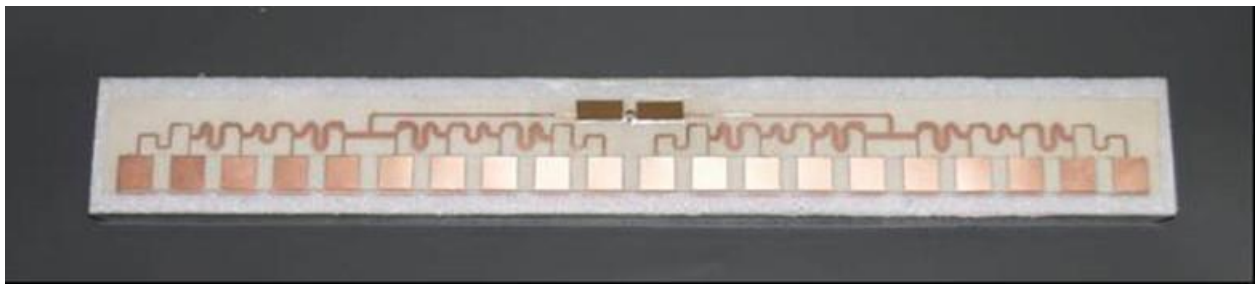


Рисунок 16 – Макет микрополосковой подрешётки.

Сравнение расчетных и измеренных ДН подрешётки представлено на рисунке 17.

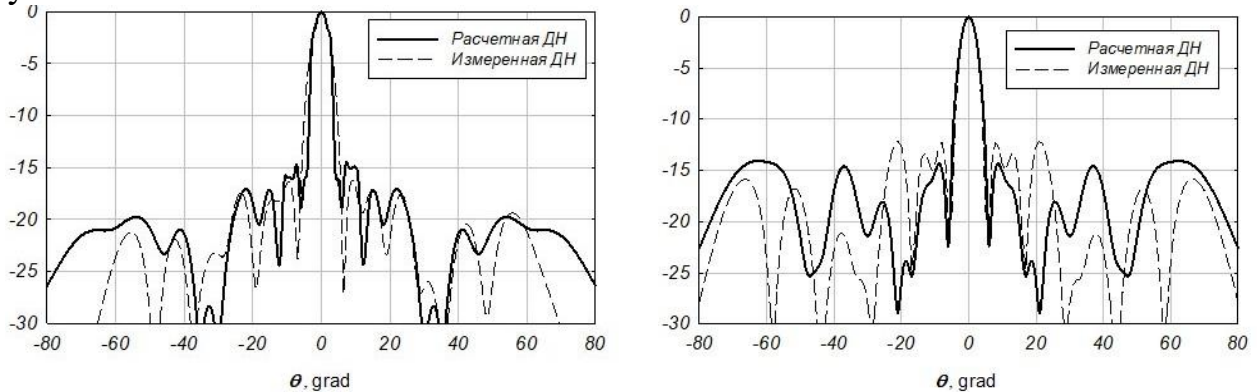


Рисунок 17 – Расчетная и измеренная ДН подрешётки на частотах 11 ГГц (слева) и 11,75 ГГц (справа) в  $E$ -плоскости.

Было проведено экспериментальное исследование микрополосковой АР с механоэлектрическим типом сканирования, макет решётки показан на рисунке 18. Все измерения проводились методом сканирования в ближней зоне с последующим перерасчетом характеристик направленности антенны в дальнюю зону.

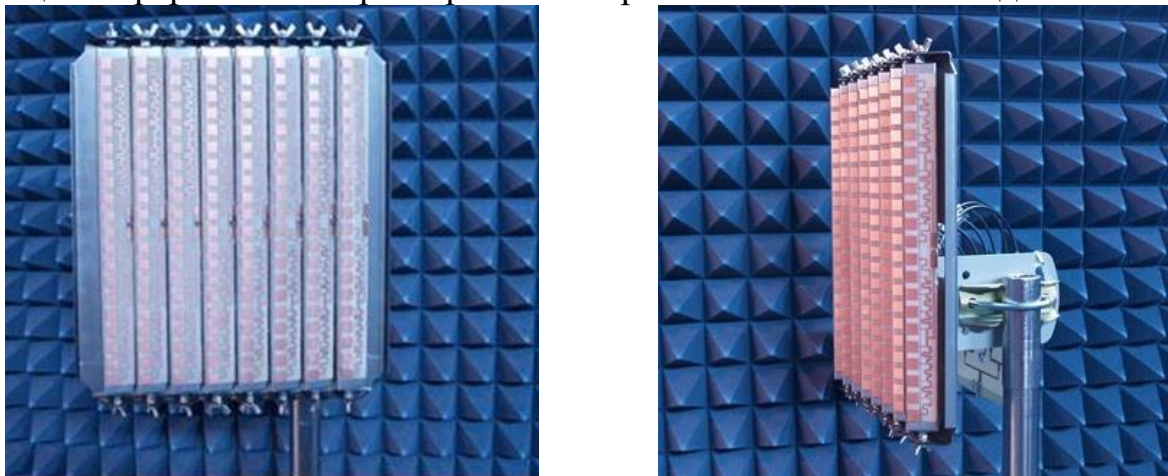


Рисунок 18 – Макет микрополосковой АР с механоэлектрическим типом сканирования (слева), макет АР при повороте подрешёток на  $60^\circ$  (справа).

Ниже приведены ДН микрополосковой АР, полученные экспериментальным путем (рисунок 19).

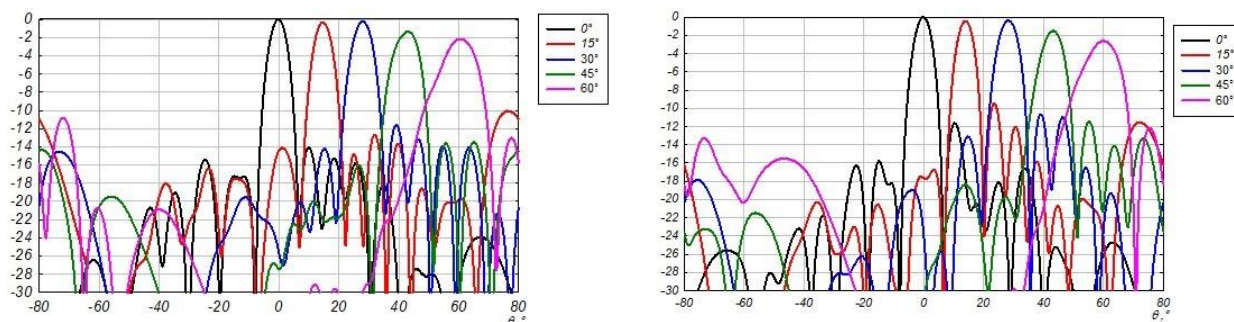


Рисунок 19 – Измеренные ДН АР с механоэлектрическим типом сканирования при различных углах отклонения максимумов ДН на частотах 11 ГГц (слева) и 11,5 ГГц (справа) в  $E$ -плоскости.

По результатам экспериментальных исследований можно сделать вывод о том, что предложенная конфигурация микрополосковой АР с механоэлектрическим типом сканирования позволяет сохранить характеристики направленности решётки в секторе углов  $0^\circ$ –  $60^\circ$ , а также сохранить низкий профиль всей АС не более 22,5 мм (при повороте подрешёток на  $60^\circ$ ), при её апертуре 273 x 208 мм.

Экспериментальное исследование микрополосковой АР с механоэлектрическим и с электронным типами сканирования на примере разработанного макета решётки показало, что при отклонении луча на более чем  $30^\circ$  в угломестной плоскости происходит существенное ухудшение характеристик направленности АР с электронным управлением лучом, при этом ухудшение характеристик направленности АР с механоэлектрическим типом сканирования – незначительно. Электронное сканирование в рассматриваемом случае осуществлялось в том же макете, но без механического поворота подрешёток.

Ниже на рисунках 20 и 21 представлены амплитудные и фазовые распределения АР с механоэлектрическим и электронным типами сканирования.

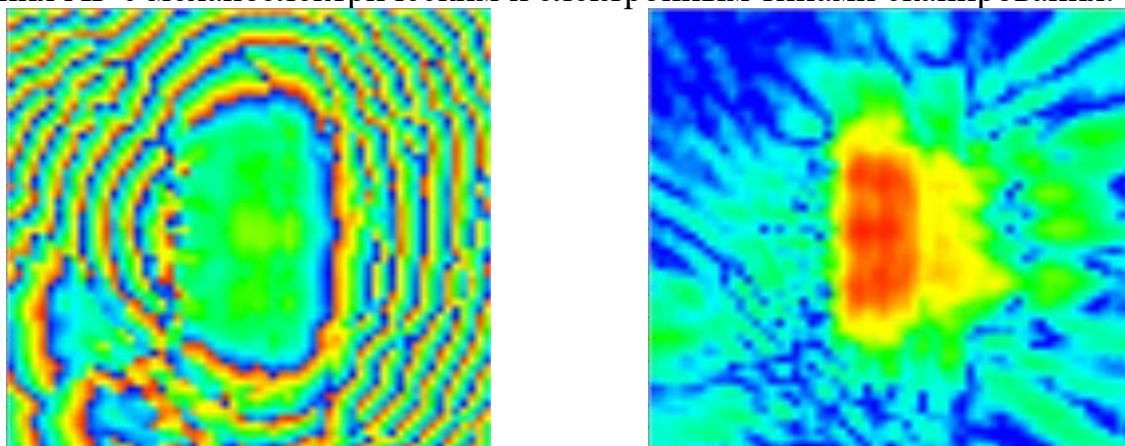


Рисунок 20 – Амплитудное (справа) и фазовое (слева) распределения исследуемой АС с механоэлектрическим типом сканирования при отклонении луча на  $60^\circ$ .

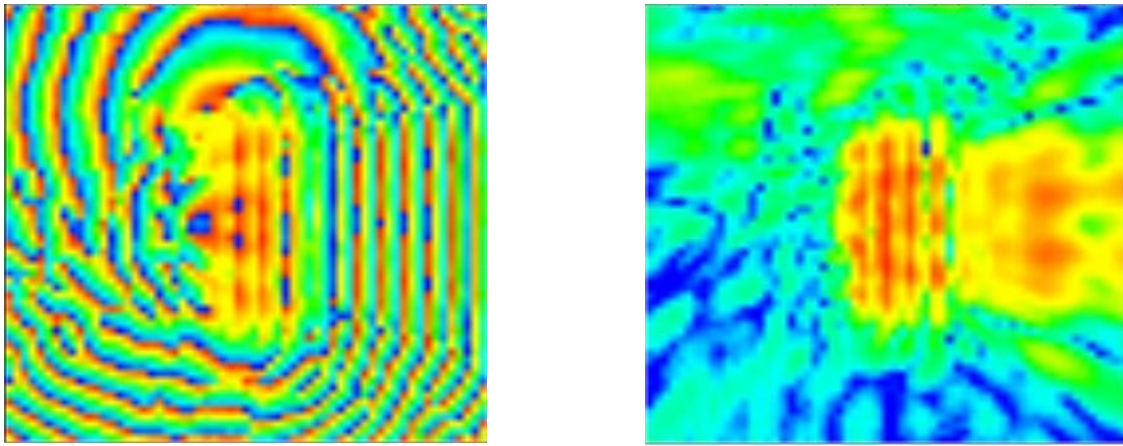


Рисунок 21 – Амплитудное (справа) и фазовое (слева) распределения исследуемой АС с электронным сканированием при отклонении луча на  $60^\circ$ .

Амплитудное и фазовое распределения в апертуре АР с электронным сканированием претерпевают существенные искажения при отклонении луча на  $60^\circ$ , что приводит к резкому ухудшению направленности всей антенны и, как следствие, к невозможности применению АР при углах сканирования более  $40^\circ$ – $50^\circ$ .

Амплитудное и фазовое распределения в апертуре АР с механоэлектрическим типом сканирования при отклонении луча на  $60^\circ$  в целом сохраняют равномерность амплитуд и фаз, что демонстрирует преимущество использования АР с механоэлектрическим типом сканирования перед АР с электронным управлением при углах сканирования выше  $40^\circ$ . При этом габариты (профиль) АР с механоэлектрическим типом сканирования превышает на 22,5 мм профиль идентичной решётки с электронным управлением.

Экспериментально был исследован излучатель на основе резонатора Фабри–Перо (рисунок 22). Макет элемента состоит из двухслойной ЧСП и открытого конца волновода в качестве возбуждителя. Размеры исследуемого элемента – 80 x 80 x 66 мм. Вспененный полистирол с  $\epsilon$  равной 1,1 и толщиной 15 мм использовался в качестве материала, разделяющего слои ЧСП. Рабочая полоса частот элемента на основе резонатора Фабри–Перо составила 11,9–12,5 ГГц.



Рисунок 22 – Антенный элемент на основе резонатора Фабри–Перо.

Сравнение зависимостей измеренного и расчетного КУ элемента на основе резонатора Фабри–Перо от частоты представлено на рисунке 23.

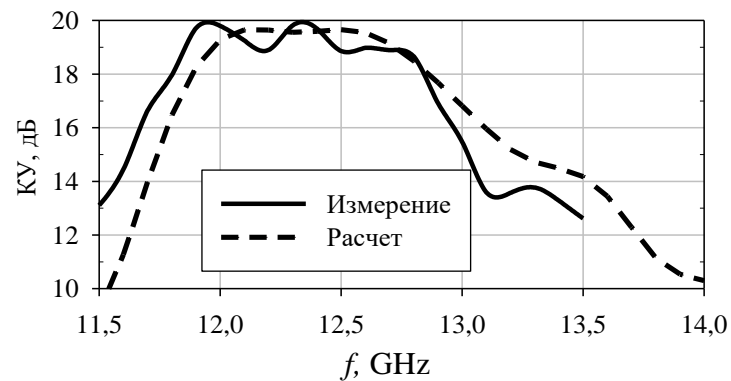


Рисунок 23 – Зависимости измеренного и расчетного КУ элемента на основе резонатора Фабри–Перо от частоты.

Отличие измеренного КУ элемента от расчетного связано с потерями в материале между слоями ЧСП и погрешностью производства при изготовлении макета элемента. Таким образом, на примере антенного элемента на основе резонатора Фабри–Перо экспериментально доказана эффективность исследуемого элемента по критерию КИП более 65% в полосе частот от 11,9 ГГц до 12,5 ГГц.

Экспериментально исследована АР на основе резонаторов Фабри–Перо с механоэлектрическим типом сканирования (рисунок 24), состоящая из двух подрешёток 8 x 2. Экспериментальные частотные зависимости КУ АР на основе резонаторов Фабри–Перо показаны на рисунке 25.



Рисунок 24 – АР на основе резонаторов Фабри–Перо.

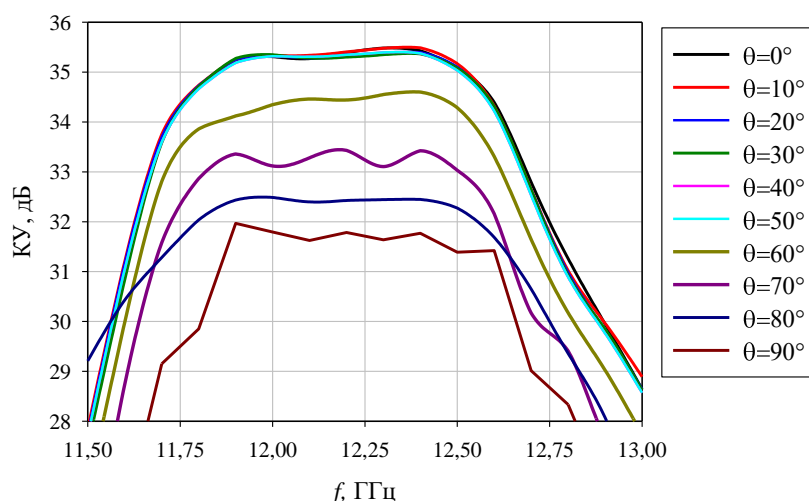


Рисунок 25– Зависимости измеренного КУ АР на основе резонаторов Фабри–Перо от частоты при различных углах поворота подрешёток ( $\theta$ ).

Экспериментальные исследования подтвердили данные расчётов и моделирования, продемонстрировали работу макета АР на основе резонатора Фабри–Перо с механоэлектрическим типом сканирования в секторе углов  $0^\circ$ – $90^\circ$  при значениях КИП более 30%.

**В заключении** изложены основные научные и практические результаты работы.

## ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

Основные результаты работы заключаются в следующем:

1. Получены и подтверждены расчетом и экспериментами взаимосвязи геометрических параметров АР с механоэлектрическим типом сканирования и её характеристик направленности.

2. Разработана и исследована микрополосковая АР с механоэлектрическим типом сканирования. Численными расчетами и экспериментальными исследованиями установлен сектор углов сканирования  $0^\circ$ – $60^\circ$  при сохранении направленных характеристик АР и её малых габаритов.

3. Разработана и исследована АР на основе резонаторов Фабри–Перо с механоэлектрическим типом сканирования. Численными расчетами и экспериментальными исследованиями установлен сектор углов сканирования  $0^\circ$ – $90^\circ$  при сохранении высокой эффективности АР и её малых габаритов.

4. Изготовлены макеты АР с механоэлектрическим типом сканирования. Проведено сравнение характеристик направленности АР с механоэлектрическим и электронным типами сканирования.

5. Теоретические выводы и численные расчёты подтверждены экспериментальными исследованиями макетов антенных систем

## СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ

- АР – антенная решётка  
АС – антенная система  
ДОС – диаграммообразующая схема  
ДН – диаграмма направленности  
ЗА – зеркальная антенна  
КА – космический аппарат  
КИП – коэффициент использования поверхности  
КНД – коэффициент направленного действия  
КУ – коэффициент усиления  
КЭ – коэффициент эллиптичности  
УБЛ – уровень боковых лепестков  
ФАР – фазированная антенная решетка  
УБЛ – уровень боковых лепестков  
ЧСП – частотно-селективная поверхность

## СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

### Публикации в журналах из перечня ВАК

1. Литинская Е. А. ФАР с механоэлектрическим типом сканирования / Е. А. Литинская, В. С. Панько, С. В. Поленга, Ю. П. Саломатов // Успехи современной радиоэлектроники, выпуск 1, 2015. С. 24—28.
2. Литинская Е. А. 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.
3. Литинская Е. А., С. В. Поленга, Ю. П. Саломатов Антенная решётка на основе резонаторов Фабри–Перо с механоэлектрическим типом сканирования // Известия высших учебных заведений. Радиоэлектроника. – 2021. – Т. 24. – № 5. – С. 81–94.

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

1. Литинская Е. А., Станковский А. В. Программа синтеза низкопрофильных волноводных антенных решёток. Свидетельство о государственной регистрации программ для ЭВМ от 05 октября 2017 г.

2. Литинская Е. А., Станковский А. В., Немшон А. Д., 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.

### **Научные статьи, опубликованные в рецензируемых научных изданиях, индексируемых в наукометрической базе данных «Scopus»**

1. Litinskaya Y.A., Stankovsky A.V., Polenga S.V., Salomatov Yu. P. "Wide-angle antenna systems with mechano-electrical beam steering", 2020 Journal of Physics: Conference Series, 1515 (4), № 042089.

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

1. Y. A. Litinskaya, A. M. Alexandrin, K. V. Lemberg, S. V. Polenga and Y. P. Salomatov. "Phased array antenna with combined electrical and mechanical beam steering for satellite networks", 2013 International Siberian Conference on Control and Communications (SIBCON), Krasnoyarsk, Russia, 2013, pp. 1-3.

2. Y. A. Litinskaya, V. S. Panko and Y. P. Salomatov. "The low-profile phased array antenna with combined electrical and mechanical beam steering for satellite communications", 2014 24th International Crimean Conference Microwave & Telecommunication Technology, Sevastopol, Ukraine, 2014, pp. 461-462.

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. A. M. Alexandrin et al. "Ku-band antenna array element based on Fabry-Perot cavity", 2016 Asia-Pacific Microwave Conference (APMC), New Delhi, India, 2016, pp. 1-4.

5. A. V. Stankovsky et al. "A wide-angle mechano-electrical steering antenna system based on multilayer dielectric wedge structure", 2017 Radiation and Scattering of Electromagnetic Waves (RSEMW), Divnomorskoe, Russia, 2017, pp. 45-48.

6. 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.

7. Y. A. Litinskaya, K. V. Lemberg, A. S. Ivanov, A. M. Alexandrin, S. V. Polenga and Y. P. Salomatov. "Antenna Measurement Equipment for Radio Engineering Education", 2018 IV International Conference on Information Technologies in Engineering Education (Inforino), 2018, pp. 1-4.

8. A. V. Stankovsky, Y. A. Litinskaya, A. M. Alexandrin, S. V. Polenga and Y. P. Salomatov. "Spatial Polarizers for CTS Structure-Based Antenna Arrays", 2019 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (EIconRus), Saint Petersburg and Moscow, Russia, 2019, pp. 885-889.

9. 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.

10. 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.

11. Yelena A. Litinskaya, Stanislav V. Polenga, Yury P. Salomatov. «Low-profile antenna array based on Fabry-Perot cavity with mechano-electrical beam steering», Antennas Design and Measurement International Conference 2021 (ADMInC'2021), pp. 84-89.

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

1. Константинов А. П., Литинская Е. А., Панько В. С., Саломатов Ю. П. «Секционированная антенная решётка с механоэлектрическим типом сканирования» // XVII Всероссийская научно-техническая конференция с международным участием, посвященной 119-й годовщине Дня радио. – 2014. – С. 401-405.

2. 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.

3. Е. А. Литинская, А. Д. Худогова. «Разработка подрешётки для антенны с механоэлектрическим типом сканирования» // Сборник XXII Всероссийской научно-технической конференции с международным участием, посвященной 125-й годовщине Дня радио. – 2020. – С. 130-135.