

Федеральное государственное автономное
образовательное учреждение
высшего образования
«Южно-Уральский государственный университет»
(национальный исследовательский университет)
Факультет «Высшая школа электроники и компьютерных наук»
Кафедра «Конструирование и производство радиоаппаратуры»

РАБОТА ПРОВЕРЕНА

Рецензент,

М.С. Воробьев

2018 г.

ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ

Заведующий кафедрой,

Н.И. Войтович

2018 г.

Разработка лабораторного макета многолучевой антенной решетки с
матрицей Батлера

ПОЯСНИТЕЛЬНАЯ ЗАПИСКА

К ВЫПУСКНОЙ КВАЛИФИКАЦИОННОЙ

РАБОТЕ ЮУрГУ – 11.04.03.2018.569.00.00 ПЗ ВКР

Руководитель ВКР,

А.Б. Хашимов

«__»_____ 2018 г.

Автор ВКР,

Е.А. Куликов

«__»_____ 2018 г.

Нормоконтролер,

А.В. Зотов

«__»_____ 2018 г.

Челябинск 2018

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	7
1 БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ ОБЗОР.....	9
2 ИССЛЕДОВАНИЕ ВАРИАНТОВ ПОСТРОЕНИЯ ПАРАЛЛЕЛЬНОЙ ДИАГРАММООБРАЗУЮЩЕЙ СХЕМЫ БАТЛЕРА.....	13
2.1 Общая теория построения параллельной диаграммообразующей схемы Батлера	20
2.2 Устройства изменения фазы	26
2.3 Моделирование работы шлейфного моста.....	29
3 КОНСТРУКЦИЯ ЛАБОРАТОРНОГО МАКЕТА	37
3.1 Конструкция излучающей апертуры многолучевой излучающей решетки.....	40
3.2 Конструкция вибраторного излучателя.....	42
4 РАЗРАБОТКА ПРОГРАММНОГО КОМПЛЕКСА ДЛЯ РАСЧЕТА ДИАГРАММЫ НАПРАВЛЕННОСТИ ЛАБОРАТОРНОГО МАКЕТА	45
4.1 Расчет диаграммы направленности многолучевой антенной решетки в промежуточной и дальней зонах.....	45
4.2 Исследование амплитудно-фазовых характеристик лабораторного макета МАР в рабочем диапазоне частот	52
5 РАЗРАБОТКА МЕТОДИЧЕСКИХ УКАЗАНИЙ ПО ПРОВЕДЕНИЮ ИЗМЕРЕНИЙ ДИАГРАММЫ НАПРАВЛЕННОСТИ МНОГОЛУЧЕВОЙ АНТЕННОЙ РЕШЕТКИ И ОБРАБОТКИ РЕЗУЛЬТАТОВ ИССЛЕДОВАНИЙ	63
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	65
БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК	66
ПРИЛОЖЕНИЯ	
ПРИЛОЖЕНИЕ А. МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ ПО ПРОВЕДЕНИЮ ЛАБОРАТОРНОЙ РАБОТЫ «ИССЛЕДОВАНИЕ МНОГОЛУЧЕВЫХАНТЕННЫХ РЕШЕТОК»	70

					11.04.03.2018.569.00.00 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		5

ПРИЛОЖЕНИЕ Б	79
ПРИЛОЖЕНИЕ В	82
ПРИЛОЖЕНИЕ Г	84
ПРИЛОЖЕНИЕ Д.....	86

					<i>11.04.03.2018.569.00.00 ПЗ</i>	<i>Лист</i>
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>		6

ВВЕДЕНИЕ

С момента изобретения радио антенная техника шагнула далеко вперед, открывая новые горизонты человечеству. При проектировании современных систем радиосвязи стремятся достичь оптимальной помехоустойчивости при заданной пропускной способности, либо увеличить пропускную способность при заданных требованиях к электромагнитной совместимости и помехоустойчивости.

Общей тенденцией развития антенн является увеличение количества подключаемых устройств при сохранении требуемого качества и предоставление нового, ранее недоступного, качества сигнала. Такое стало возможно благодаря распространению антенных решеток. Антенная решетка – это антенна, содержащая совокупность излучающих элементов, расположенных в определенном порядке, ориентированных и возбуждаемых так, чтобы получить заданную диаграмму направленности [1, с. 1].

Существует два способа обеспечения сканирования антенной решеткой. В первом способе движение луча обеспечивается механическим перемещением частей антенной решетки, изменяя направление главного максимума в пространстве или форму диаграммы направленности (далее – ДН). Достигается это за счет изменения геометрической формы возбуждающего радиоволновода или путем вращения всей антенной решетки. Из достоинств механического сканирования можно выделить высокую надежность и точность, среди недостатков – общая громоздкость и высокая масса системы.

Второй способ заключается в электрическом управлении амплитудно-фазовым распределением токов или полей на излучающих элементах. Такой способ управления положением ДН носит название электрического сканирования, а антенная система – фазированной антенной решетки (далее – ФАР). Первая отечественная антенна с электронным сканированием была разработана коллективом специалистов под руководством Ю.А. Юрова в 1955 году в Ленинградском электротехническом институте [2]. Достоинствами антенн с

					<i>11.04.03.2018.569.00.00 ПЗ</i>	<i>Лист</i>
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>		7

электрическим сканированием являются быстрая скорость работы, малые массогабаритные характеристики, недостатками – сложность построения.

Перед антенными решетками ставится ряд важных задач: сканирование в широком секторе углов, получение ДН заданной формы, обработка информации с разных каналов, повышение надежности радиосистемы вследствие параллельного действия многих элементов. В качестве современных антенных решеток, способных в должной мере решать поставленные задачи, выступают многолучевые антенные решетки (далее – МАР).

Обычно для создания необходимых фазовых распределений на излучателях МАР пользуются коммутируемыми фазовращателями, характеристики которых могут изменяться под воздействием управляющего сигнала. В данной работе используется диаграммообразующее устройство, составленное из направленных ответвителей с фазосдвигающими отрезками кабеля. Сканирование (изменение положения главного луча) происходит за счет подключения определенных входов схемы. Из недостатков данного метода сканирования можно выделить фиксированное положение луча, в отличие от метода с использованием фазовращателей, при котором положение луча изменяется за счет корректировки фазового сдвига на самом фазовращателе.

Главная цель данной выпускной квалификационной работы – определить, возможно ли использовать спроектированную антенную решетку в качестве лабораторного макета и предоставить методические указания по проведению лабораторной работы.

					<i>11.04.03.2018.569.00.00 ПЗ</i>	<i>Лист</i>
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>		8

1 БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ ОБЗОР

Согласно стандарту Института инженеров электротехники и электроники IEEE, многолучевая антенна – это антенна, способная создавать семейство основных лепестков из одной неподвижной апертуры с использованием многопортовой подачи со взаимно однозначным соответствием между входными портами и основными долями, причем последние характеризуются наличием уникального указателя основного луча направления [3, с. 57].

Тема многолучевых антенных решеток и систем, сконструированных на их основе, является достаточно распространенной в технической литературе. Термины и определения основных понятий в области антенных решеток указаны в отечественных и международных стандартах [1, 3].

Многолучевые антенные решетки и, в частности, конструкторские решения построения диаграммообразующих схем до сих пор являются одной из актуальных и востребованных тем в антенной области. Научные работы отечественных и зарубежных исследователей направлены на повышение характеристик диаграммообразующих схем при уменьшении количества используемых элементов, адаптации схем под различные частотные диапазоны, расширение круга устройств, в которых возможно их применение.

Произведен поиск и исследование научных работ в данной области. В статьях под авторством Нечаева Ю.Б. и Фаняева И.А. показаны модификации классической матрицы Батлера для 4 x 4 и 8 x 8 схем, достоинствами которых является уменьшение количества элементов и пересечений линий передач, при этом при упрощении конструкции не страдают электрические характеристики [4, 5].

Из зарубежных работ хотелось бы выделить научные статьи Chang D.C., Bhowmik W. и Slomian I., которые занимались задачей оптимизации параметров матрицы Батлера под конкретные условия использования [6 – 8].

					<i>11.04.03.2018.569.00.00 ПЗ</i>	<i>Лист</i>
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>		9

Уайт Дж. и Сычев А.Н. по отдельности провели исследование такого элемента матрицы Батлера, как кроссовер, в данных работах можно найти рекомендации по его конструированию [9, 10]. Индийский исследователь Menon Sreedevi спроектировал и изготовил несколько видов кроссоверов и получил их характеристики при помощи векторного анализатора Keysight E5080. Исследования были проведены на разных частотах и с использованием материалов подложки с отличающейся диэлектрической проницаемостью. Полученные результаты соответствовали вычислениям, спроектированные кроссоверы возможно применять для синтеза матрицы Батлера для фазированных антенн [11].

Рассмотрены спроектированные варианты многолучевых антенных решеток. Одной из первых коммерческих MAP для военного применения считается радар AWS-9. Разработчикам из Siemens удалось устранить недостатки предыдущих поколений систем опознавания и получить продукт, в свое время широко востребованный на рынке радарных систем [12]. Кроме того, были рассмотрены решения, созданные отечественными разработчиками для разнообразных сфер применения [13, 14].

В основном научные исследования направлены на модернизацию диаграммообразующего модуля, однако компания Electromagnetic Technologies Industries занимается исследованием и разработкой антенных систем, включающих в себя как ДОУ, так и антенные решетки. Инженерами данной компании создано множество антенных систем, отличающихся сектором действия и диапазоном частот [15].

На официальном сайте Федерального института промышленной собственности был произведен патентный поиск по ключевым словам «многолучевая антенная решетка» и «матрица Батлера». Среди около 250 результатов поиска было выбрано три патента на изобретение, которые наиболее подходили к практическому применению в рамках тематики данной выпускной квалификационной работы [16 – 18].

					<i>11.04.03.2018.569.00.00 ПЗ</i>	<i>Лист</i>
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>		10

Описания принципов работы и построения антенных систем можно найти в учебниках для радиотехнических специальностей вузов. В учебных пособиях даны методические инструкции по определению основных характеристик МАР (нормированная комплексная ДН, разность фаз, сектор формирования ДН, уровень пересечения соседних ДН, нормированные взаимные сопротивления входных каналов) и рекомендации по проектированию излучающей части антенны. Среди рассмотренной учебно-методической литературы хотелось бы выделить работы под авторством Воскресенского Д.И., Сазонова Д.М., Хансена Р.С. и Вендика О.Г. [19 – 23]. Из иностранной литературы будут полезными учебники по конструированию микроволновых устройств Позара Д. и Фукса Е. являются фундаментальным источником информации по методам и технологиям разработки СВЧ устройств, в том числе и на основе микрополосковой технологии [24, 25].

В учебном пособии для вузов Белова Л.А. «Устройства формирования СВЧ-сигналов и их компоненты» [26] содержится обширная справочная база по производителям компонентов, узлов и устройств СВЧ-диапазона. Приведены основные характеристики фазовращателей, показаны отличия устройств различных производителей, их особенности, достоинства и недостатки.

Рассмотрено большое количество литературных источников по проектированию микрополосковых СВЧ устройств. В большей части они содержат общие сведения о матричном анализе многополюсников, об определении матриц рассеивания и отражения. Однако, среди рассмотренных источников были найдены методы расчета параметров и размеров микрополосковых устройств, в частности шлейфных мостов. Основная часть информации была взята из книг под авторством Лебедева И.В., Малорацкого Л.Г. и Малушкова Г.Д. [28 – 30].

Симонс Р.Н. в своей монографии рассматривает компланарные линии передачи как основной компонент для создания устройств и схем СВЧ диапазона. В его книге [31] даны основные понятия и рекомендации по проектированию и применению компланарных линий.

					11.04.03.2018.569.00.00 ПЗ	Лист
						11
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

В практической части работы были использованы характеристики диэлектрического материала, наиболее распространенного и сохраняющего свои характеристики на заданном диапазоне частот [32].

					<i>11.04.03.2018.569.00.00 ПЗ</i>	<i>Лист</i>
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>		12

2 ИССЛЕДОВАНИЕ ВАРИАНТОВ ПОСТРОЕНИЯ ПАРАЛЛЕЛЬНОЙ ДИАГРАММООБРАЗУЮЩЕЙ СХЕМЫ БАТЛЕРА

Структурная схема многолучевой антенны (рисунок 1) включает излучающую часть (решетка излучателей или раскрыв апертурной антенны), диаграммообразующее устройство (далее ДОУ) – основной элемент функциональной схемы, создающие требуемые поля в излучающей части, и входы антенны в виде поперечных сечений линии передачи с единственным распространяющимся типом волны.

Рисунок 1 – Структурная схема многолучевой антенны

Амплитудно-фазовые распределения на выходах многолучевых антенных решеток строят с помощью специальных проходных многополюсников, часть входов которых подключается к излучателям решетки, а другая часть входов соответствуют независимым каналам с различающимися ДН. Данный проходной многополюсник применяется для питания многолучевых антенных решеток и является диаграммообразующей схемой (далее ДОС). Обычно ДОС выполняются из реактивных элементов для сохранения высокого КПД антенны: направленных ответвителей, фиксированных фазосдвигателей, отрезков линии передачи и др.

Наиболее широкое распространение получили МАР на основе последовательной (матрица Бласса) и параллельной (матрица Батлера) ДОС.

					11.04.03.2018.569.00.00 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		13

В настоящее время существует множество разнообразных конструкций параллельных ДОС на матрице Батлера. В основном научные исследования в этой области направлены на модификацию классической схемы Батлера для работы в определенном диапазоне частот, уменьшение количества используемых элементов при сохранении заданных электрических характеристик, снижение ошибки разности фаз на выходе матрицы.

Нечаев Ю.Б. и Щетинин Н.Н. в своей статье предлагают схемно-конструктивный вариант трехслойного направленного ответвителя с апертурной (щелевой) связью для работы в диапазоне от 4 до 8 ГГц с оптимизацией для достижения максимально равномерных высоких характеристик по развязке и согласованию входов. Было доказано, что переходы с щелевой связью обеспечивают совместимость и гибкость между линиями на различных слоях, сохраняя широкую пропускную способность, низкие потери на излучение и являясь компактными. Изготовленный макет при эксперименте показал развязку между каналами не хуже 13 дБ при максимальной ошибке разности фаз в 12° [4].

Рисунок 2 – Изображение макета матрицы Батлера на основе направленного ответвителя с апертурной связью (Нечаев Ю.Б.)

Фаняев И.А. и Кудин В.П. разработали новую схему матричного коммутатора, которая в сравнении с классической матрицей Батлера имеет на шнсть пересечений линий передачи меньше, являясь конструктивно более

					<i>11.04.03.2018.569.00.00 ПЗ</i>	<i>Лист</i>
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>		14

простой (см. рисунок 3). При сравнительном анализе было показано, что основные характеристики новой и классической схем ведут себя практически одинаково на всем рассматриваемом диапазоне частот [5].

Рисунок 3 – Синтезированная ДОС на 8×8 матрице Батлера с обновленной топологией (Фаняев И.А.)

На рисунке 3 квадратами обозначены 3 дБ направленные ответвители с разностью фаз между выходами в 180° , жирными точками – фазосдвигатели, цифрами слева (справа) – входы (выходы).

Разработке ДОС на матрице Батлера посвящено множество зарубежных работ, выпускавшихся как в 1990-ые годы, так и в настоящее время. Это говорит об актуальности тематики и широкой возможности для модернизации существующих схем под различные задачи в области антенной техники.

Пример построения четырехлучевой матрицы Батлера с формулами расчета элементов приведен в статье «The study of Butler matrix BFN for four beams antenna system». Авторы показали, что для уменьшения влияния многоканальных помех выгоднее использовать многолучевую систему вместо широконаправленной, доказав это теоретически и практически [6]. Данная работа стала отправной точкой для множества последующих работ в области проектирования многолучевых антенн.

В работе индийских исследователей Bhowmik W. и Srivastava S. представлена оптимизированная топология матрицы Батлера с указанием

					<i>11.04.03.2018.569.00.00 ПЗ</i>	<i>Лист</i>
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>		15

методики расчета и анализа, где математические расчеты проводились с использованием математического пакета MATLAB, а расчет и исследование элементов схемы – при помощи программного комплекса электромагнитного анализа Sonnet Suites (High Frequency Electromagnetic Software) [7].

Разработчики из Informa UK Limited предлагают концепцию 8 x 8 матрицы Батлера, реализованной в однослойной структуре. Особенностью предложенной конструкции является отсутствие СВЧ кроссоверов как элементов матрицы и низкие потери в цепях путем поддержки максимально коротких соединительных линий [8].

Сычев А.Н. в своей работе рассматривает характеристики СВЧ кроссоверов для применения в ДООУ антенных решеток. В матрицах Батлера кроссовер обеспечивает непрерывную передачу двух потоков СВЧ-энергии в двух пересекающихся направлениях с высокой развязкой между каналами. При анализе схем и конструкций мостов и кроссоверов было выявлено достоинства и недостатки различных типов кроссоверов и даны рекомендации по их проектированию [9]. Данная работа является конкретизацией результатов, полученных в ходе исследований Уайта Дж., описавшего основные структуры микрополосковых кроссоверов [10].

В 1990-ых гг. компанией Siemens был разработан дальнебойный радиолокатор для установки на судах военно-морского флота RN Type T996 (другое название: AWS-9). Радар обеспечивает обнаружение и идентификацию целей на расстоянии до 115 км в сантиметровом диапазоне частот (от 1250 до 1350 МГц), формируя более 100 лучей в круговом секторе обзора [12].

					<i>11.04.03.2018.569.00.00 ПЗ</i>	<i>Лист</i>
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>		16

Рисунок 4 – Многолучевая антенна RN Type T996 (AWS-9)

Система, состоящая из фазированной антенной решетки под управлением многолучевой полосковой матрицы с усилителем бегущей волны, была разработана для интеграции с другими действующими системами управления. Система радара обеспечивает комплексную обработку сигналов как в ручном, так и в автоматическом режиме

Российский спутник «Купон» в составе активной фазированной антенной решетки содержит 64 конических рупора, обеспечивающей сканирование луча в конусе с углом 18° . Каждая антенная решетка формирует по четыре независимых луча с «карандашной» ДН шириной в 4° [13, 14].

Компания Electromagnetic Technologies industries, Inc является разработчиком антенного оборудования и постоянно проводит теоретические и экспериментальные исследования, направленные на развитие связи и обороны. Разработанная инженерами компании система состоит из схемы формирования луча, соединенной с антенным блоком согласованными по фазе кабелями [15].

					11.04.03.2018.569.00.00 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		17

Рисунок 5 – Антенная система, разработанная компанией ETI

Для создания необходимых фазовых соотношений на передающей апертуре антенной решетки была использована ДОС, построенная при помощи комбинации квадратурных ответвителей, гибридных СВЧ компонентов и фазовращателей. Согласно экспериментально полученным данным, модель антенны 4ET35816 (восемь лучей) обладает коэффициентов усиления 28 дБ при секторе обзора в 120°. Диапазон рабочих частот от 3,2 до 3,7 ГГц, мощность входящего сигнала до 20 Вт.

Инженеры из научно-внедренческого предприятия «ПРОТЕК» разработали антенную систему с одним выходом, формирующую несколько лучей в ожидаемых направлениях источников сигнала для приема на одно устройство [18]. Структурную схему разработанной ими системы можно посмотреть на рисунке 6.

					11.04.03.2018.569.00.00 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		18

Рисунок 6 – Структурная схема антенной системы
предприятия «ПРОТЕК»

Основным недостатком рассмотренных ДОС является большое количество пересечений линий передач, в связи с чем могут проявляться дополнительные помехи на излучателях. Кроме того, практически все матричные схемы изготовлены с использованием полосковых фазовращателей, что исключает возможную их замену или перенастройку.

Использование навесных компонентов также малопригодно, поскольку даже современные фазовращатели или направленные ответвители имеют недостаточный срок службы.

					11.04.03.2018.569.00.00 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		19

2.1 Общая теория построения параллельной диаграммообразующей схемы Батлера

Диаграммообразующая схема – это сложный функциональный узел, состоящий из пассивных СВЧ элементов. Он используется для обеспечения требуемой фазы и амплитуды сигналов, подаваемых на антенну. Достоинством данного вида устройств является электронное формирование лучей антенных решеток без необходимости механического воздействия на элементы системы. Такие электронно-управляемые схемы разрабатываются при использовании компьютерного исследования антенных элементов и соответствующих электронных компонентов в частотной или во временной области.

Простейшей схемой ДОУ является схема, состоящая из делителей мощности, принцип работы схемы заключается в разделении полученного сигнала от каждого элемента решетки на выходы. Выходы от делителей соединяются с сумматором посредством фиксированных фазовращателей. Фактически, такие схемы обычно используются для формирования 16 лучей, однако поскольку уровень сигнала уменьшается на каждом элементе, необходимо применение предусилителей [19, с. 365].

Наиболее широкое распространение получили МАР на основе последовательной (матрица Бласса) и параллельной (матрица Батлера) ДОС.

2.1.1 Последовательная диаграммообразующая схема (матрица Бласса)

Последовательная ДОС (или матрица Бласса) состоит из двух взаимно пересекающихся систем линий передачи, связанных в местах пересечений направленными ответвителями со слабой связью (см. рисунок 7).

					<i>11.04.03.2018.569.00.00 ПЗ</i>	<i>Лист</i>
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>		<i>20</i>

Рисунок 7 – МАР с последовательным питанием (матрица Бласса)

Требуемые амплитудно-фазовые распределения поля в излучателях решетки, определяющие веер ДН, обеспечиваются выбором коэффициентов связи направленных ответвителей и фазовых сдвигов, вносимых фазовращателями, которые определяются путем расчета [20, с. 361].

С помощью последовательной ДОС имеется возможность создать систему существующих и не взаимодействующих между собой остронаправленных лучей, причем их число не превышает число элементов решетки.

Преимуществом ДОС на матрице Бласса является возможность построить не зависящие от частоты направления лучей при подборе определенных длин линий на входах излучателей. Недостатком же является слишком большое число направленных ответвителей и снижение КПД за счет потерь мощности в нагрузках.

					11.04.03.2018.569.00.00 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		21

2.1.2 Параллельная диаграммообразующая схема (матрица Батлера)

Схема ДОУ на основе матрицы Батлера с параллельным питанием соединяет 2^n элементов решетки с равным количеством портов лучей. Основными элементами параллельной ДОС являются чередующиеся ряды гибридных соединений и фиксированных фазовращателей. Классическая схема Батлера показана на рисунке 8 [21, с. 410].

Фактически, матрица Батлера является эквивалентом аналоговой цепи быстрого преобразования Фурье, следовательно, ДОУ имеет минимальное число компонентов и минимальные электрические длины.

Рисунок 8 – МАР с параллельным питанием (матрица Батлера)

Формируемые ДОС на матрице Батлера амплитудные распределения равномерные на всех каналах, при отсутствии отражений от излучателей все каналы согласованы и развязаны. Положительным качеством является широкополосность за счет равенства геометрических путей от входов к излучателям.

					<i>11.04.03.2018.569.00.00 ПЗ</i>	<i>Лист</i>
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>		22

Разность фаз задается типом ДОС, например, для N-канальной ДОС, построенной по параллельной схеме:

$$\varphi_n = \pm \frac{\pi}{N} (2n-1), \quad n = 1, 2, \dots, \frac{N}{2}. \quad (1)$$

Здесь знак плюса соответствует лучам, располагающимся справа от нормали решетки, а минус – слева.

Согласно выражению (1), для восьмиканальной МАР принимаются следующие значения разности фаз: $\varphi_1 = \pm \frac{\pi}{8}$; $\varphi_2 = \pm \frac{3\pi}{8}$; $\varphi_3 = \pm \frac{5\pi}{8}$; $\varphi_4 = \pm \frac{7\pi}{8}$.

На излучателях создаются линейные фазовые распределения возбуждения, представленные в таблице 1 для поочередного возбуждения четырех правых входов ДОС. Распределения фаз для левых входов легко устанавливаются из условия симметрии левой и правой половин ДОС. Рассчитаем значения фаз.

Таблица 1. Распределения фаз для входов ДОС

Номер входа, m	Номер излучателя, n							
	1	2	3	4	5	6	7	8
1	$-\frac{5}{8}\pi$	$-\frac{6}{8}\pi$	$-\frac{7}{8}\pi$	$-\frac{8}{8}\pi$	$-\frac{9}{8}\pi$	$-\frac{10}{8}\pi$	$-\frac{11}{8}\pi$	$-\frac{12}{8}\pi$
2	$-\frac{5}{8}\pi$	$-\frac{8}{8}\pi$	$-\frac{11}{8}\pi$	$-\frac{14}{8}\pi$	$-\frac{1}{8}\pi$	$-\frac{4}{8}\pi$	$-\frac{7}{8}\pi$	$-\frac{10}{8}\pi$
3	$-\frac{6}{8}\pi$	$-\frac{11}{8}\pi$	$-\frac{16}{8}\pi$	$-\frac{5}{8}\pi$	$-\frac{10}{8}\pi$	$-\frac{15}{8}\pi$	$-\frac{4}{8}\pi$	$-\frac{9}{8}\pi$
4	$-\frac{8}{8}\pi$	$-\frac{15}{8}\pi$	$-\frac{6}{8}\pi$	$-\frac{13}{8}\pi$	$-\frac{4}{8}\pi$	$-\frac{11}{8}\pi$	$-\frac{2}{8}\pi$	$-\frac{9}{8}\pi$

Данные таблицы 1 были вычислены с учетом того, что величина фазового сдвига между любыми двумя соседними излучателями $\Delta\varphi$, рассчитанная согласно

выражению (1), равна $\frac{\pi}{8}$, $\frac{3\pi}{8}$, $\frac{5\pi}{8}$ и $\frac{7\pi}{8}$ для первого, второго, третьего и четвертого

входа соответственно.

Диаграммы направленности МАР рассчитываются по формуле:

$$F_n(\theta, \varphi) = F_n(\theta, \varphi) \frac{\sin[N(-kd \sin \theta + \varphi_n) / 2]}{N \sin[(-kd \sin \theta + \varphi_n) / 2]}, \quad (2)$$

где φ_n определяется из (1).

Сектор формирования ДН Ω , определяемый по уровню их пересечения ξ (см. рисунок 9), связан с числом входов (лучей) N уравнением

$$\Omega = 2\theta_{cp} N. \quad (3)$$

Уровень пересечения соседних ДН – важная характеристика МАР, определяющая падение КНД в пределах парциальной ДН антенны, ограниченной этим уровнем. Без учета направленных свойств одиночного излучателя при равномерном амплитудно-фазовом распределении поля по решетке

$$\xi = \frac{1}{N \sin\left(\frac{\pi}{2N}\right)}. \quad (4)$$

Рисунок 9 – К определению уровня пересечений ДН

					11.04.03.2018.569.00.00 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		24

Амплитудно-фазовое распределение на выходах ДОС описывается следующим выражением:

$$S_{m,n} = \frac{1}{\sqrt{N}} e^{-j\frac{2\pi}{N}(m-1)(n-1)} \quad (5)$$

где $N = 8$ – число каналов; m – номер входа; n – номер выхода.

С увеличением частоты происходит сужение лучей и их сближение, при этом происходит появление дифракционных лепестков.

Параллельная ДОС отличается от последовательной принципиальным отсутствием поглощающих элементов, идеальными равноамплитудными и линейными фазовыми распределениями возбуждения и гораздо меньшим числом направленных ответвителей $\frac{N}{2} \log_2 N$. Однако ДОС на основе матрицы Батлера проста только при числе элементов решетки $N = 2^p$, где p – целое число [14]. Определенным недостатком параллельной схемы является изменение положения лучей в пространстве при изменении частоты.

Достоинством многолучевых антенн на матрице Батлера является возможность составления ДОС из одинаковых делителей мощности и набора фиксированных фазосдвигателей. Однако, это предопределяет ряд недостатков: невозможность реализации амплитудных распределений специальной формы, обеспечивающих ДН с низким уровнем боковых лепестков; необходимость использования только бинарного количества элементов решетки $N = 2^p$, где p – целое число; положение луча в пространстве зависит от частоты.

Разработка ДОС на основе матрицы Батлера сопровождается схемной и конструкторско-технологической сложностью. Большая часть распределительных антенных систем изготавливается с использованием печатных технологий, изделия обладают хорошими массогабаритными характеристиками и низкой стоимостью. Однако, при увеличении числа излучателей возрастает количество пересечений линий передач. От этого недостатка можно избавиться применением делителей мощности с полной связью (кроссоверы) или проектированием схемы на многослойной печатной плате.

					<i>11.04.03.2018.569.00.00 ПЗ</i>	<i>Лист</i>
						25
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>		

2.2 Устройства изменения фазы

Разрабатываемая антенная решетка представляет собой антенну с электронным управлением, следовательно, для изменения значения фазы в таком типе антенн служат изменяющие фазу устройства – фазосдвигатели, фазовращатели или линии задержки.

2.2.1 Фазовращателем обычно называется устройство управления фазой, способное находится в двух состояниях (например, на основе р-і-п диодов). Выключатель при приближении к идеалу имеет два состояния, в одном из которых он является идеально пропускающим (нулевое сопротивление ключа), а в другом – идеально отражающим (бесконечное сопротивление ключа). Функцию ключа в дискретных фазовращателях выполняют р-і-п диоды, а перевод из одного состояния в другое осуществляется внешним управляющим воздействием. Фазовращатели такого типа различают на отражательные и проходные [23, с. 174].

В настоящее время выпускается множество фазовращателей, выполненных в корпусах для навесного и поверхностного монтажа. Обладая широкой полосой частот, данные устройства также характеризуются широким диапазоном изменений фазы. Например, модулятор фазы с аналоговым управлением НМС247 производства фирмы «Nittite» работает в диапазоне частот от 6 до 16 ГГц и обеспечивает изменение фазы проходящего сигнала до 800°, при этом управление происходит за счет вариаций управляющего напряжения [26, с. 172].

					<i>11.04.03.2018.569.00.00 ПЗ</i>	<i>Лист</i>
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>		26

2.2.2 Простейшим устройством для сдвига фазы проходного типа является отрезок линии передачи длиной l . Электромагнитная волна, проходя через отрезок, получает фазовый сдвиг $\Delta\varphi = 2\pi l/\Lambda$ [27, с. 432]. Для изменения фазы можно изменять длину отрезка или величину фазовой скорости волны в пределах данного отрезка (изменять электрическую длину l/Λ).

2.2.3 Среди различных типов направленных ответвителей (устройства, предназначенные для ответвления части СВЧ энергии из основного тракта во вспомогательный) на полосковых линиях широко используются шлейфные, гибридные кольца и на связанных линиях передачи, которые обладают следующими параметрами: направленность, переходное ослабление, диапазон частот, коэффициент отражения [28].

Частным случаем ответвителя является двухшлейфный ответвитель, изображенный на рисунке 10, подробный анализ которого подтверждает его идеальную направленность первого типа [29, с. 177 – 180].

Рисунок 10 – Схема двухшлейфного направленного ответвителя

В [29] при помощи матриц восьмиполосников доказывается, что разница фаз между боковыми плечами составляет $\pi/2$. Из этого следует, что направленные

					<i>11.04.03.2018.569.00.00 ПЗ</i>	<i>Лист</i>
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>		27

отвлетлители можно использовать при построении матрицы Батлера в качестве устройства разделения сигнала и изменения фазы.

Рабочие параметры двухшлейфного ответвителя определяются согласно следующим формулам:

– рабочее затухание

$$C_{12} = 20 \lg \frac{1}{|S_{12}|} = 20 \lg \sqrt{1 + Y^2}, [\text{дБ}]; \quad (6)$$

где Y – нормированная волновая проводимость шлейфов.

– переходное ослабление

$$C_{13} = 20 \lg \frac{1}{|S_{13}|} = 20 \lg \frac{\sqrt{1 + Y^2}}{Y}, [\text{дБ}]; \quad (7)$$

– коэффициент деления

$$\Delta C = C_{13} - C_{12} = 20 \lg \frac{|S_{12}|}{|S_{13}|} = 20 \lg Y, [\text{дБ}]. \quad (8)$$

Существует частный случай, когда $Y_0 = 1$, а $Y_1 = \sqrt{2}$, тогда ответвитель является гибридным соединением (трехдецибельный шлейфный мост):
 $C_{12} = C_{13} = 3,01$ дБ.

					<i>11.04.03.2018.569.00.00 ПЗ</i>	<i>Лист</i>
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>		28

2.3 Моделирование работы шлейфного моста

В СВЧ аппаратуре широко применяются шлейфные направленные ответвители (шлейфные мосты, кроссоверы): в фазовращателях и переключателях, в разветвителях и сумматорах мощности, в балансных смесителях. Широкополосность направленных ответвителей служит основой для построения матриц Батлера для фазированных антенных решеток.

В СВЧ технике широко применяется двухшлейфный ответвитель, стандартная конструкция которого представляет собой два отрезка линии передачи, соединенных между собой с помощью двух шлейфов, длина которых в общем случае приравнивается одной четверти длины волны в линии передачи. Схема кроссовера представлена на рисунке 10.

Направленный ответвитель называется мостом, когда мощность делится поровну между боковыми плечами, при этом переходное ослабление – отношение падающей на ответвитель мощности к мощности, ответвляемой во вспомогательное боковое плечо – равно 3 дБ [30, с. 169].

Для расчета двухшлейфных мостов достаточно определить следующие параметры: длину волны на центральной частоте устройства и ширину микрополосковой линии передачи.

2.3.1 Компланарная линия передачи

Компланарной линией передачи (далее – КЛ) называется такая плоская миниатюрная линия, конструкция которой представляется собой диэлектрическую пластину с диэлектрической проницаемостью гораздо больше единицы, на одной стороне которой располагаются ленточные проводники [31].

					11.04.03.2018.569.00.00 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		29

Рисунок 11 – Конфигурация компланарной линии

Достоинством конструкции КЛ является возможность легкого построения направленных ответвителей, у которых входные и выходные цепи будут воздействовать друг на друга гораздо меньше, чем в других линиях передачи. Кроме того, такая конфигурация позволяет осуществлять более простой монтаж пассивных и активных элементов на печатную плату.

Рассчитаем параметры КЛ при помощи утилиты для расчета полосковых линий TX-LINE. Для этого выберем тип линии CPW Ground (КЛ с заземленным слоем) и зададим следующие исходные данные:

1) В качестве материала подложки выберем стеклотекстолит СТЭФ-У с диэлектрической проницаемостью 5,5 и тангенсом угла диэлектрических потерь 0,04 толщиной $H = 1,5$ мм [32];

2) В качестве проводникового материала выберем медную пленку толщиной $T = 0,03$ мм с волновым сопротивлением $Z_0 = 50$ Ом;

3) За центральную частоту примем 975 МГц, поскольку диапазон рабочих частот многолучевой антенной решетки Δf от 900 до 1050 МГц;

4) Расстояние между проводником и полигоном $G = 3$ мм;

Результаты расчета представлены на рисунке 12.

					11.04.03.2018.569.00.00 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		30

Рисунок 12 – Определение параметров КЛ в утилите TX-LINE

Таким образом, ширина линии W_0 равна 2,37 мм, а ее длина L_0 – 38,94 мм.

Длина волны на центральной частоте будет $\lambda_0 = c/f_{ц} = 3 \cdot 10^8 / 975 \cdot 10^6 = 308$ мм, где c – скорость распространения света в вакууме, $f_{ц}$ – центральная частота.

Для начала определим длину волны в линии.

$$\lambda_{л} = \frac{\lambda_0}{\sqrt{\epsilon_{эф}}}, \quad (9)$$

где $\epsilon_{эф}$ – эффективная диэлектрическая проницаемость в линии.

Подставив значения, полученные ранее, получаем, что длина волны в линии равна 156,3 мм.

Длины линий двухшлейфного моста определяются как:

$$L_0 = L_1 = \frac{\lambda_{л}}{4}, \quad (10)$$

где L_0 – длина шлейфа; L_1 – расстояние между шлейфами.

Таким образом, длина шлейфов L_0 равна 38,9 мм, что соответствует значениям, рассчитанным в утилите TX-LINE (см. рисунок 12).

					<i>11.04.03.2018.569.00.00 ПЗ</i>	<i>Лист</i>
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>		31

Ширина линии L_0 отличается от ширины линии L_1 , поскольку они имеют разные волновые сопротивления. Волновое сопротивление КЛ между шлейфами находится через соотношение [33, с. 118]:

$$Z_0 = \frac{Z_1}{\sqrt{2}}. \quad (11)$$

Таким образом, получаем, что $Z_0 = 35,36$ Ом.

Произведем расчет ширины КЛ в TX-LINE с учетом полученного сопротивления, тогда ширина линии между шлейфами W_1 равна 4,17 мм.

					<i>11.04.03.2018.569.00.00 ПЗ</i>	<i>Лист</i>
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>		32

2.3.2 Моделирование и исследование в САПР

Для определения корректного режима работы шлейфного моста и матрицы Батлера в целом, необходимо провести электродинамическое моделирование модели. Для этих целей будет использоваться бесплатная версия современной САПР Sonnet Suite Lite, которая позволяет проводить исследование СВЧ структур и обладает широким функционалом.

Для начала в среде проектирования создается трехмерная модель исследуемого шлейфного моста согласно размерам, определенным ранее, и задаются параметры материалов. На входах и плечах устанавливаются соответствующие дискретные порты с сопротивлением 50 Ом. Построенную модель можно увидеть на рисунке 13.

Рисунок 13 – Трехмерная модель шлейфного моста

Для упрощения расчетов из модели исключены полигоны земли, полосковые проводники являются микрополосковыми, однако размеры взяты с учетом компланарной линии. Затем задаются граничные условия, параметры среды и частотный диапазон. Выбирается оптимальная расчетная сетка.

В результате необходимо получить графики зависимости S -параметров и фазы от частоты на входах и плечах моста.

					11.04.03.2018.569.00.00 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		33

После расчета частотным методом были получены зависимости S-параметров и фазы от частоты, графики представлены на рисунках 14 и 15.

Рисунок 14 – График зависимости S-параметров моста от частоты

Согласно произведенным расчетам, переходное ослабление на центральной частоте 975 МГц равно минус 2,95 дБ и в целом сохраняется на всем диапазоне частот, что соответствует определению моста.

					<i>11.04.03.2018.569.00.00 ПЗ</i>	<i>Лист</i>
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>		<i>34</i>

Рисунок 15 – График зависимости фазы моста от частоты

Фаза на выходе из основного плеча равна $93,1^\circ$ на центральной частоте, что также соответствует определению моста.

Можно сделать вывод, что спроектированное устройство является двухшлейфным мостом и подходит для использования в качестве элементов матрицы Батлера.

Произведем расчет коэффициента стоячей волны (далее – КСВ) смоделированного шлейфного моста согласно соотношению:

$$\text{КСВ} = \frac{1 + |\Gamma|}{1 - |\Gamma|} = \frac{1 + |S_{11}|}{1 - |S_{11}|}, \quad (12)$$

где Γ – коэффициент отражения.

					<i>11.04.03.2018.569.00.00 ПЗ</i>	<i>Лист</i>
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>		35

Получившийся график зависимости КСВ от частоты представлен на рисунке 16.

Рисунок 16 – График зависимости КСВ моста от частоты

Таким образом, по рисунку 16 можно сделать вывод, что КСВ спроектированного гибридного соединения не превышает значения 1,17 во всем диапазоне исследуемых частот. На центральной частоте $f_{ц} = 975$ МГц КСВ примерно равно 1,09, что является очень хорошим результатом.

					<i>11.04.03.2018.569.00.00 ПЗ</i>	<i>Лист</i>
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>		36

3 КОНСТРУКЦИЯ ЛАБОРАТОРНОГО МАКЕТА

Лабораторная установка предназначена для изучения студентами принципов работы и построения фазированных антенных решеток и исследования диаграмм направленности макетов антенных решеток. Система строится по модульному принципу: при необходимости можно быстро заменить приборы или антенную решетку (см. рисунок 17).

Рисунок 17 – Структурная схема лабораторной установки, где:

- 1 – измеритель комплексного коэффициента передачи;
- 2 – передающая антенна;
- 3 – лабораторный макет многолучевой антенной решетки;
- 4 – опорно-поворотное устройство;
- 5 – детекторная секция (матрица Батлера).

					<i>11.04.03.2018.569.00.00 ПЗ</i>	<i>Лист</i>
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>		37

Передающая антенна установлена такая же, как и на антенной решетке.

Роль генератора СВЧ сигналов и измерительного прибора выполняет измеритель комплексных коэффициентов приема и передачи (векторный анализатор цепей) ОБЗОР-TR1300/1 производства компании Планар (Челябинск). Данный прибор обладает следующими характеристиками [35]:

- диапазон частот от 300 кГц до 1300 МГц;
- измерение параметров S_{11} , S_{21} ;
- динамический диапазон измерения модуля коэффициента передачи более 130 дБ.

Спроектированная антенная решетка устанавливается на опорно-поворотное устройство ОПУ-1,5 (далее – ОПУ), предназначенное для угловой ориентации измерительных антенн при измерении параметров электромагнитного поля в лабораторных, заводских или полевых условиях. ОПУ изготовлено из диэлектрических материалов, не вносящих искажение в электромагнитное поле, что позволяет использовать устройство при проведении исследований параметров антенн. ОПУ имеет опору в виде трех деревянных выдвижных ног, прикрепленных к основанию азимутального механизма шарнирами.

Поворот установленной антенны на определенный угол обеспечивается азимутальным механизмом, позволяющим изменять угол поворота от 0° до 360° с точностью 1° . Отсчет угла производится с помощью шкалы и нониуса, штурвалом устанавливается азимутальный угол. Для установки антенной решетки на мачту ОПУ была спроектирована цельнометаллическая втулка, обеспечивающая надежное крепление основания антенной решетки и возможность поворота при помощи азимутального механизма ОПУ.

Детекторная секция представляет собой печатную плату с матрицей Батлера, построенной с использованием спроектированных двухшлейфных мостов.

					<i>11.04.03.2018.569.00.00 ПЗ</i>	<i>Лист</i>
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>		<i>38</i>

Рисунок 18 – Внешний вид распределительной матрицы Батлера

Матрица Батлера конструктивно состоит из восьми двухшлейфных направленных ответвителей, фазосдвигающих отрезков кабеля и разъемов N-типа для подключения кабелей, по которым будет передаваться СВЧ сигнал на определенный вход матрицы.

					11.04.03.2018.569.00.00 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		39

3.1 Конструкция излучающей апертуры многолучевой излучающей решетки

Внешний вид излучающей апертуры многолучевой излучающей решетки представлен на рисунке 19.

Рисунок 19 – Внешний вид конструкции излучающей апертуры МАР, где

1 – основание МАР (экран);

2 – вибраторный излучатель;

3 – втулка;

4 – кронштейн;

5 – уголок.

					11.04.03.2018.569.00.00 ПЗ	Лист
						40
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

Основание МАР служит для установки вибраторных излучателей, матричной схемы ДОУ, размещения кабелей и экранирования излучения.

На основании имеются отверстия для установки вибраторных излучателей. Расстояние между излучателями выбирается таким образом, чтобы ширина главного лепестка ДН на уровне 0,707 была примерно равна 15°. Ширина лепестка и расстояние между излучателями связаны следующим соотношением:

$$2\theta_{0,7E} \approx 51^\circ \frac{\lambda}{Nd}, \quad (13)$$

где N – количество излучателей; d – расстояние между излучателями.

Таким образом, при центральной частоте работы антенны 975 МГц для обеспечения ширины главного лепестка 14° необходимо расстояние между излучателями в 0,14 м.

					<i>11.04.03.2018.569.00.00 ПЗ</i>	<i>Лист</i>
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>		41

3.2 Конструкция вибраторного излучателя

Внешний вид одиночного вибраторного излучателя представлен на рисунке 20.

Рисунок 20 – Внешний вид вибраторного излучателя

Для того, чтобы понять, подходит ли излучатель данного типа для применения в проектируемой МАР, необходимо исследовать его амплитудно-частотные характеристики в широкой полосе частот.

Для этого подключим излучатель, установленный на экране, к откалиброванному методом короткого замыкания измерителю комплексных коэффициентов передачи ОБЗОР-TR1300/1. Установим полосу частот измерительного прибора от 400 до 1200 МГц для того, чтобы точно определить рабочую полосу частот излучателя.

Измерения КСВ и коэффициента отражения S_{11} показали следующий результат (см. рисунок 21 и 22).

					<i>11.04.03.2018.569.00.00 ПЗ</i>	<i>Лист</i>
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>		42

Рисунок 21 – График зависимости КСВ от частоты
одиночного вибраторного излучателя

По рисунку 21 можно сделать вывод, что данный вибраторный излучатель обладает рабочей полосой частот от 650 МГц до 1050, в которой КСВ не превышает значения 1,5.

Рисунок 22 – График зависимости коэффициента отражения от частоты
одиночного вибраторного излучателя

					11.04.03.2018.569.00.00 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		43

График, изображенный на рисунке 22, показывает, что в выбранном диапазоне частот данный исследуемый вибраторный излучатель обладает оптимальными амплитудными характеристиками.

Из вышесказанного можно сделать вывод, что приведенный одиночный вибраторный излучатель подходит для использования его в качестве элемента лабораторного макета МАР, обладая оптимальными показателями КСВ и коэффициента отражения в широком диапазоне частот от 650 до 1050 МГц.

					<i>11.04.03.2018.569.00.00 ПЗ</i>	<i>Лист</i>
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>		44

4 РАЗРАБОТКА ПРОГРАММНОГО КОМПЛЕКСА ДЛЯ РАСЧЕТА ДИАГРАММЫ НАПРАВЛЕННОСТИ ЛАБОРАТОРНОГО МАКЕТА

Перед тем, как производить измерения диаграммы направленности лабораторного макета, необходимо теоретически рассчитать возможную ДН. Построим модель антенны при помощи интерактивной среды математического программирования MATLAB с последующей визуализацией результатов.

Программный комплекс представляет собой программный код, написанный на высокоуровневом языке MATLAB с возможностью изменения входных данных. В качестве демонстрации результата выполнения программы используется график ДН.

4.1 Расчет диаграммы направленности многолучевой антенной решетки в промежуточной и дальней зонах

Перед математическим описанием модели лабораторного макета MAP необходимо ввести изначальные данные:

- длина волны на центральной частоте $\lambda_{ц} = 0,308$ м;
- количество излучателей $N = 8$;
- расстояние между излучателями $d = 0,14$ м;
- распределение фаз на выходах ДОС задано в таблице 1.

Расчет направленности излучения проводится с условием, что центр координат приходится на электрический центр антенны (мачта треноги).

Направленность рассчитывается по следующей формуле:

$$F(\varphi) = \cos \varphi \cdot \sum_{n=1}^N 1 \cdot e^{i(k \cdot x_n \cdot \sin \varphi + \psi_n)}, \quad (14)$$

где $k = 2\pi/\lambda_{ц}$ – волновое число.

					11.04.03.2018.569.00.00 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		45

Нормированный график направленности МАР, построенный без учета подключения конкретных входов (синфазное подключение), представлен на рисунке 23:

Рисунок 23 – Расчетная ДН с синфазным подключением

Согласно рисунку 23, спроектированная МАР имеет ширину луча на уровне $\frac{1}{\sqrt{2}} = 0,707$ от максимальной амплитуды (что соответствует приблизительно уровню минус 3 дБ) примерно 14° .

Спроектированный лабораторный макет МАР имеет 4 входа. Произведем расчет ДН с учетом подключения различных входов МАР при заданном значении фаз (таблица 1). Результаты представлены на рисунках 24 – 27. Поскольку ДН обладает свойством симметричности, для упрощения покажем только положительную часть.

					<i>11.04.03.2018.569.00.00 ПЗ</i>	<i>Лист</i>
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>		46

Предположим, что подключен первый вход с разностью фаз между излучателями в минус $\pi/2$.

Рисунок 24 – Расчетная ДН МАР при подаче сигнала на первый вход

По рисунку 24 можно сделать вывод, что при подаче сигнала на первый вход происходит смещение ДН на $7,75^\circ$.

					11.04.03.2018.569.00.00 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		47

Теперь пусть будет подключен второй вход МАР с разностью фаз между излучателями в минус $3\pi/2$. Результаты представлены на рисунке 25.

Рисунок 25 – Расчетная ДН МАР при подаче сигнала на второй вход

Согласно рисунку 25 можно сделать вывод, что при подключении второго входа происходит незначительное изменение формы боковых лепестков и смещение ДН примерно на $23,75^\circ$ от исходной.

					11.04.03.2018.569.00.00 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		48

Предположим, что подключен третий вход МАР с разностью фаз между излучателями в минус $5\pi/2$. Результаты представлены на рисунке 26.

Рисунок 26 – Расчетная ДН МАР при подаче сигнала на третий вход

По рисунку 26 видно, что отклонение от изначальной ДН составляет примерно $41,25^\circ$, а изменение формы боковых лепестков уже значительно.

					11.04.03.2018.569.00.00 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		49

Наконец, предположим, что подключен четвертый вход МАР с разностью фаз между излучателями в минус $7\pi/2$. Тогда ДН приобретает следующий вид (см. рисунок 27).

Рисунок 27 – Расчетная ДН МАР при подаче сигнала на четвертый вход

Согласно рисунку 27, отклонения ДН при подаче сигнала на четвертый вход составляет $61,5^\circ$, а изменение формы боковых лепестков более значительно.

					11.04.03.2018.569.00.00 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		50

Для наглядности представим ДН для синфазных излучателей и при подаче сигнала на разные входы на одном графике в полярной системе координат (см. рисунок 23).

Рисунок 28 – Расчетные ДН МАР в полярной системе координат

Как видно по рисунку 28, подключение различных входов матрицы Батлера вызывает отклонение положения основного лепестка ДН. Данное теоретическое построение доказывает, что разработанная МАР является сканирующей антенной решеткой.

					<i>11.04.03.2018.569.00.00 ПЗ</i>	<i>Лист</i>
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>		<i>51</i>

4.2 Исследование амплитудно-фазовых характеристик лабораторного макета МАР в рабочем диапазоне частот

Проведем исследование амплитудно-фазовых характеристик собранного лабораторного макета МАР в рабочем диапазоне частот. Целесообразно исследование разделить на несколько этапов: исследование амплитудно-частотных характеристик ДОС на матрице Батлера, исследование амплитудно-фазовых характеристик излучателей в составе МАР для определения их влияния друг на друга и исследование ДН лабораторного макета МАР с последующим сравнением с теоретическими значениями.

4.2.1 Исследование характеристик ДОС Батлера

Проведем исследование характеристик матрицы Батлера при подаче сигнала на разные входы в диапазоне частот от 500 МГц до 1300 МГц.

Для этого будем поочередно подключать входы матрицы ко входу измерителя. Следует учесть, что неиспользуемые входы ДОС обязательно замыкаются согласованными нагрузками, чтобы исключить возможность переотражения сигнала и создания паразитных наводок. Результаты исследования представлены на рисунке 29.

					11.04.03.2018.569.00.00 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		52

Рисунок 29 – Графики зависимости КСВ от частоты при подаче сигнала на разные входы матрицы Батлера

Как видно по рисунку 29, на рабочем диапазоне частот матрица Батлера обладает удовлетворительными характеристиками, однако появляется смещение полосы частот.

					11.04.03.2018.569.00.00 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		53

Рисунок 30 – Графики зависимости коэффициента отражения от частоты при подаче сигнала на разные входы матрицы Батлера

4.2.2 Исследование характеристик излучателей в составе МАР

Проведем исследование амплитудно-фазовых характеристик МАР. Для этого необходимо на выход измерителя установить первый вход матрицы Батлера, а на вход поочередно подключать все восемь излучателей. Таким образом получим значения коэффициентов передачи на каждом излучателе, входящем в состав антенной решетки.

					<i>11.04.03.2018.569.00.00 ПЗ</i>	<i>Лист</i>
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>		54

Рисунок 31 – Графики зависимости коэффициента передачи от частоты для первой четверки излучателей

					11.04.03.2018.569.00.00 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		55

Рисунок 32 – Графики зависимости коэффициента передачи от частоты для второй четверки излучателей

По рисункам видно, что значения коэффициентов передачи всех излучателей остаются на уровне примерно от минус 14 до минус 10 дБ на диапазоне частот от 850 до 1075 МГц.

Проведем исследование фазовых отношений на каждом излучателе. Для этого вновь поочередно будем подключать излучатели к измерителю и на разных частотах смотреть изменение значения фазы сигнала. Пусть измерения проводятся на диапазоне частот от 800 до 950 МГц с шагом в 10 МГц.

Результаты измерений фазовых значений приведены в таблице 2.

					11.04.03.2018.569.00.00 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		56

Таблица 2. Измерение значений сдвига фазы на излучателях МАР

Частота, МГц	Сдвиг фазы на излучателе							
	№1	№2	№3	№4	№5	№6	№7	№8
800	144°	171°	139°	-137°	35°	96°	81°	128°
810	71°	112°	70°	150°	-18°	30°	15°	65°
820	-16°	51°	6°	86°	-77°	-47°	-62°	4°
830	-95°	-9°	-55°	19°	-144°	-108°	-138°	-71°
840	-156°	-77°	-116°	-49°	141°	-171°	149°	-142°
850	146°	-144°	176°	-113°	65°	127°	77°	152°
860	84°	147°	108°	-175°	-7°	68°	6°	87°
870	25°	81°	39°	123°	-76°	10°	-61°	25°
880	-38°	18°	-32°	59°	-145°	-54°	-124°	-39°
890	-105°	-35°	-102°	-5°	150°	-123°	174°	-105°
900	-176°	-88°	-169°	-67°	82°	163°	110°	-169°
910	110°	-145°	129°	-131°	20°	91°	44°	125°
920	37°	146°	67°	163°	-42°	32°	-24°	61°
930	-31°	72°	5°	100°	-112°	-19°	-92°	-1°
940	-94°	2°	-61°	35°	177°	-77°	-159°	-65°
950	-156°	-64°	-128°	-30°	108°	-141°	136°	-129°

Согласно данным, приведенным в таблице 2, можно сделать вывод, что наиболее линейное изменение фазы наблюдается на частоте 900 МГц.

4.2.3 Исследование ДН лабораторного макета МАР

Для проведения исследования ДН лабораторного макета необходимо собрать лабораторную установку согласно рисунку 17. Используя азимутальный механизм треноги, производятся измерения параметра S_{21} при изменении угла поворота антенной решетки от минус 90° до плюс 90° с дискретностью в 5°.

					11.04.03.2018.569.00.00 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		57

Измерения проводятся отдельно для каждого из четырех входов, на неиспользуемые устанавливаются согласующие нагрузки. Результаты измерений со сравнением с теоретической ДН представлены на рисунках 33 – 36. Подключим первый вход ДОС и проведем измерения.

Рисунок 33 – Расчетная и экспериментальная ДН МАР при подаче сигнала на первый вход

По рисунку 33 видно, что происходит смещение положения главного лепестка ДН примерно на $12,5^\circ$.

					<i>11.04.03.2018.569.00.00 ПЗ</i>	<i>Лист</i>
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>		58

Далее подключается второй вход и проводятся те же измерения.

Рисунок 34 – Расчетная и экспериментальная ДН МАР при подаче сигнала на второй вход

По рисунку 34 можно сделать вывод, что происходит смещение положения главного лепестка ДН примерно на $7,5^\circ$.

					<i>11.04.03.2018.569.00.00 ПЗ</i>	<i>Лист</i>
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>		59

Подключим третий вход ДЭС.

Рисунок 35 – Расчетная и экспериментальная ДН МАР при подаче сигнала на третий вход

Согласно рисунку 35, происходит смещение положения главного лепестка ДН примерно на $17,5^\circ$.

					11.04.03.2018.569.00.00 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		60

Подключается четвертый вход ДОС и проводятся измерения.

Рисунок 36 – Расчетная и экспериментальная ДН МАР при подаче сигнала на четвертый вход

По рисунку 36 можно сделать вывод, что смещение положения главного лепестка ДН составляет примерно 10° .

В результате проведенного исследования можно сделать вывод, что практическая центральная рабочая частота несколько смещена от расчетной. Причина этого заключается в том, что при проектировании и производстве матрицы были использованы материалы с параметрами, отличными от теоретически рассчитанных. Вследствие этого гибридные соединения (двухшлейфные мосты) были изготовлены с другими геометрическими и электрическими размерами.

					11.04.03.2018.569.00.00 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		61

Кроме того, нельзя исключать тот факт, что измерения проводилось в лабораторных условиях, в которых возможны паразитные наводки и отражения. Для наиболее близких к истине результатов рекомендуется проводить измерения в безэховой камере (идеальный вариант) или на крыше.

					11.04.03.2018.569.00.00 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		62

5 РАЗРАБОТКА МЕТОДИЧЕСКИХ УКАЗАНИЙ ПО ПРОВЕДЕНИЮ ИЗМЕРЕНИЙ ДИАГРАММЫ НАПРАВЛЕННОСТИ МНОГОЛУЧЕВОЙ АНТЕННОЙ РЕШЕТКИ И ОБРАБОТКИ РЕЗУЛЬТАТОВ ИССЛЕДОВАНИЙ

Проведение исследований и разработки составляющих частей матрицы Батлера и лабораторного макета MAP являются отправной точкой для создания методических указаний к проведению лабораторной работы по измерению ДН MAP. Предлагается следующее наименование лабораторной работы: «Исследование многолучевых антенных решеток».

Ожидается, что выполнение лабораторной работы содействует формированию у студентов следующих компетенций согласно [36]:

1) Общекультурных:

- способности работать в команде, толерантно воспринимая социальные и культурные различия;
- способности к самоорганизации и самообразованию;

2) Общепрофессиональных:

- способности представлять адекватную современному уровню знаний научную картину мира на основе знания основных положений, законов и методов естественных наук и математики;
- способности использовать основные приемы обработки и представления экспериментальных данных;

3) Профессиональных:

- готовности проводить эксперименты по заданной методике, анализировать результаты, составлять обзоры, отчеты.

Полагается, что внедрение данной лабораторной работы в учебный процесс поспособствует более широкому пониманию принципов устройства и работы антенных систем.

					<i>11.04.03.2018.569.00.00 ПЗ</i>	<i>Лист</i>
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>		63

При выполнении лабораторной работы перед студентами ставятся следующие цели:

1. Изучить принципы работы и построения фазированных антенных решеток (ФАР). Изучить методы управления диаграммой направленности ФАР.

2. Изучить принципы работы и построения многолучевых антенных решеток.

3. Исследовать диаграммы направленности макета многолучевой антенной решетки (МАР).

Для проверки теоретической подготовки студента разработан список контрольных вопросов, который предусматривает полное или частичное понимание исследуемого вопроса.

Полный текст разработанных методических указаний по проведению лабораторной работы «Исследование многолучевых антенных решеток» приведен в приложении А.

					<i>11.04.03.2018.569.00.00 ПЗ</i>	<i>Лист</i>
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>		64

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе выполнения выпускной квалификационной работы был проведен ряд исследовательских работ, результатом которых стали методические указания по проведению лабораторной работы «Исследование многолучевых антенных решеток».

Было проведено исследование существующих вариантов построения матричной схемы Батлера, используемая схема отличается меньшим количеством входов для питания антенной решетки при таком же количестве излучателей. Кроме того, в схеме использовано меньшее число пересечений проводников, чем в аналогичных. Однако, сами же проводники, выполняющие функцию фазосдвигателей, не имеют возможности изменения сдвига фазы, это значение фиксировано, в отличие от схем с коммутируемыми фазовращателями. Был рассчитан и смоделирован двухшлейфный мост, используемый в качестве элемента диаграммообразующей схемы.

В практической части работы была спроектирована и изготовлена конструкция многолучевой антенной решетки, проведено исследование ее амплитудно-фазовых характеристик. Результаты показали небольшое несоответствие расчетных характеристик и экспериментальных, вызванное тем, что спроектированная ДОС отличается от теоретически рассчитанной и поэтому требует доработки.

Можно сделать вывод, что изготовленный вариант многолучевой антенной решетки пригоден к использованию в качестве лабораторного макета с учетом отклонения направленности главного лепестка ДН в среднем на 10° .

					11.04.03.2018.569.00.00 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		65

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. ГОСТ 23282-91. Решетки антенные. Термины и определения. – М.: Изд-во стандартов, 1992. – 7 с.
2. Вендик, О.Г. Первая фазированная антенная решетка (Работа группы Ю.Я. Юрова в 1955 – 1960 гг.) / О.Г. Вендик, Ю.В. Егоров // Сб. «Антенны»; под ред. Л.Д. Бахраха. – 1999. – Вып. 1 (42).
3. IEEE Std 145-2013. IEEE Standard for Definitions of Terms for Antennas. – New York: IEEE, 2013. – 92 P.
4. Нечаев, Ю.Б. Широкополосная матрица Батлера на основе направленного ответвителя с апертурной связью / Ю.Б. Нечаев, Н.Н. Щетинин // Теория и техника радиосвязи. – 2011. – №4. – С. 43-48.
5. Фаняев, И.А. Распределительная матрица для питания восьмиэлементной антенной решетки / И.А. Фаняев, В.П. Кудин // Вестник ГГТУ им. П.О. Сухово. – 2012. - №4. – С. 52-57.
6. Chang, D.C. The study of Butler matrix BFN for four beams antenna system / D.C. Chang, S.H. Jou // Antennas and Propagation Society International Symposium. – 2003. – Vol. 4. – P. 176-179.
7. Bhowmik, W. Optimum Design of a 4x4 Planar Butler Matrix Array for WLAN Application / W. Bhowmik, S. Srivastava // Journal of Telecommunications. – 2010. – Vol. 2. – Issue 1. – P. 68-74.
8. Slomian, I. Folded single-layer 8×8 Butler matrix / I. Slomian, K. Wincza, K. Staszek, S. Gruszczynski // Journal of Electromagnetic Waves and Applications. – 2017. – Vol. 31. – Issue 14. – P. 1368-1398.
9. Сычев, А.Н. Кроссоверы СВЧ на связанных линиях с полной связью / А.Н. Сычев // Доклады ТУСУРа. – 2017. – Т. 20. - №3. – С. 124-127.
10. Wight, J.S. A microstrip and stripline crossover structure / J. S. Wight, W. J. Chudobiak, V. Makios // IEEE Trans. Microw. Theory Tech. – 1976. – Vol. 24. - №5. – P. 270.

					11.04.03.2018.569.00.00 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		66

11. Menon, K.S. Microstrip patch antenna assisted compact dual band planar crossover / K.S. Menon // Electronics. – 2017. – Vol. 6. – №74.

12. www.forecastinternational.com/archive/disp_pdf.cfm?DACH_RECNO=765 (дата обращения: 18.04.2018).

13. Анпилогов, В.Р. Многолучевые антенные системы HTS / В.Р. Анпилогов, А.В. Шишлов, А.Г. Эйдус // Технологии и средства связи. Специальный выпуск. Спутниковая связь и вещание. – 2014. – С. 54 – 67.

14. Yegorov, E.N. The system of active phased array antennas for satellite relay “Kupon” / E.N.Yegorov, V.V. Likhtenvald, G.V. Sbitnev // Proceedings of the XVIII Moscow International Conference on Antenna Theory and Technology. – 1998.

15. Дигнес, С.И. Многолучевые антенны: решения компании ETI / С.И. Дигнес, Е.Р. Хасьянова // Электроника: Наука, технологии, бизнес. – 2012. – №2. – С. 106 – 110.

16. Описание изобретения к патенту 2623836 Российская Федерация, МПК7 Н 01 Q 19/15. Сканирующая апертурная гибридная приемо-передающая антенна / Г.А. Морозов, Т.И. Сухачева, А.Г. Янченко. – № 2016113334; заявл. 08.04.2016; опубл. 29.06.2017, Бюл. № 19. – 8 с.

17. Описание изобретения к патенту 2654994 Российская Федерация, МПК7 Н 01 Q 25/00. Приемная многолучевая активная фазированная антенная решетка / А.Г. Ефимов, А.Г. Каменев, И.В. Чернов. - № 2017109062; заявл. 17.03.2017; опубл. 23.05.2018, Бюл. №15. – 7 с.

18. Описание изобретения к патенту 2649096 Российская Федерация, МПК7 Н 01 Q 3/00. Многолучевая антенная система с одним выходом / В.Г. Маркин, А.В. Журавлев, В.А. Шуваев, Е.М. Красов, О.Ю. Макаров. - № 2017106453; заявл. 27.02.2017; опубл. 29.03.2018, Бюл. №10. – 8 с.

19. Хансен, Р.С. Фазированные антенные решетки / Р.С. Хансен. – 2-е изд. – М.: Техносфера, 2012. – 560 с.

20. Устройства СВЧ и антенны. Проектирование фазированных антенных решеток: Учеб. пособие для вузов / под ред. Д.И. Воскресенского. – 4-е изд., перераб. и доп. – М.: Радиотехника, 2012. – 744 с.

					<i>11.04.03.2018.569.00.00 ПЗ</i>	<i>Лист</i>
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>		67

21. Сазонов, Д.М. Антенны и устройства СВЧ: Учеб. для радиотехнич. спец. вузов. / Д.М. Сазонов. – М.: Высш. шк., 1988. – 434 с.
22. Hansen, R.C. Microwave Scanning Antennas. Volume 3: Array Systems / R.C. Hansen. – New York: Academic Press, 1971. – 464 P.
23. Вендик, О.Г. Антенны с электрическим сканированием. Введение в теорию / О.Г. Вендик, М.Д. Парнес; под ред. Л.Д. Бахраха. – 2001. – 250 с.
24. Pozar, D.M. Microwave Engineering, Third Edition / D.M. Pozar. – Wiley, 2005. – P. 727.
25. Fooks, E.H. Microwave engineering using microstrip circuits / E. H. Fooks. – New York: Prentice Hall, 1990. – P. 333.
26. Белов, Л.А. Устройства формирования СВЧ-сигналов и их компоненты: учеб. пособ. / Л.А. Белов. – М.: Издательский дом МЭИ, 2010. – 320 с.
27. Пименов, Ю.В. Техническая электродинамика: Учеб. пособие для вузов / Ю.В. Пименов, В.И. Вольман, А.Д. Муравцов; под ред. Ю.В. Пименова. – М.: Радио и связь, 2000. – 536 с.
28. Лебедев, И.В. Техника и приборы СВЧ: Учебник для студентов вузов по специальности «Электронные приборы» / И.В. Лебедев; под ред. Н.Д. Девяткова. – М.: «Высш. школа», 1970. – 440 с.
29. Малорацкий, Л.Г. Проектирование и расчет СВЧ элементов на полосковых линиях / Л.Г. Малорацкий, Л.Р. Явич. – М.: «Советское радио», 1972. – 232 с.
30. Малушков, Г.Д. Антенны и устройства сверхвысоких частот. Часть I. Линии передачи и устройства сверхвысоких частот: Учебное пособие / Г.Д. Малушков. – М.: МИРЭА, 1973. – 264 с.
31. Simons, R.N. Coplanar waveguide circuits, components, and systems / R.N. Simons. – John Wiley & Sons, 2004. – P. 464.
32. ГОСТ 12652-74. Стеклотекстолит электротехнический листовой. Технические условия. – М.: Стандартинформ, 2008. – 14 с.

					11.04.03.2018.569.00.00 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		68

33. Сазонов, Д.М. Устройства СВЧ: Учеб. пособие / Д.М. Сазонов, А.Н. Гридин, Б.А. Мишустин: Под ред. Д.М. Сазонова. – М.: Высш. школа, 1981. – 295 с.

34. Анализаторы цепей векторные «TR5048», «TR7530», «Обзор TR1300/1». Руководство по эксплуатации. Технические характеристики. – Челябинск, 2017. – 35 с.

www.planarchel.ru/Products/Measurement%20instrument/tr1300/Operating_Manual_TRVNA_Part1_24_03_2017_Rus.pdf (Дата обращения: 06.06.2018).

36. Приказ Минобрнауки России от 12.11.2015 N 1333 "Об утверждении федерального государственного образовательного стандарта высшего образования по направлению подготовки 11.03.03 Конструирование и технология электронных средств (уровень бакалавриата)" (Зарегистрировано в Минюсте России 30.11.2015 N 39905).

					<i>11.04.03.2018.569.00.00 ПЗ</i>	<i>Лист</i>
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>		69

ПРИЛОЖЕНИЕ А
МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ
ПО ВЫПОЛНЕНИЮ ЛАБОРАТОРНОЙ РАБОТЫ
«ИССЛЕДОВАНИЕ МНОГОЛУЧЕВЫХ АНТЕННЫХ РЕШЕТОК»

ЦЕЛЬ РАБОТЫ

1. Изучить принципы работы и построения фазированных антенных решеток (ФАР). Изучить методы управления диаграммой направленности ФАР.
2. Изучить принципы работы и построения многолучевых антенных решеток.
3. Исследовать диаграммы направленности макета многолучевой антенной решетки (МАР).

1 ПРИНЦИПЫ ПОСТРОЕНИЯ И РАБОТЫ АНТЕННЫХ РЕШЕТОК

Антенная решетка – это антенна, у которой излучающий раскрыв состоит из определенного числа площадок, фаза и амплитуда возбуждения которых независимы. Каждая отдельная площадка может рассматриваться как самостоятельный излучатель. Управляя фазой каждого излучателя (непрерывно или дискретно) можно менять направление максимума излучения без механического поворота всей антенной системы. Такой способ управления положением ДН антенны носит название электрического сканирования, а антенная решетка с управляемой фазой в каждом излучателе (или группе излучателей) называется фазированной.

Фазированные антенные решетки (далее – ФАР) позволяют очень быстро, по сравнению с механическим вращением, изменять положение главного луча

					<i>11.04.03.2018.569.00.00 ПЗ</i>	<i>Лист</i>
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>		<i>70</i>

ДН. Однако такое изменение не может быть осуществлено в широком секторе углов, что является основным недостатком ФАР. Излучатели могут располагаться линейно, тогда имеет место линейная ФАР. Если излучатели расположены в одной плоскости – то плоская ФАР. Также возможны варианты цилиндрической, сферической и других форм. Основные свойства ФАР рассмотрим на примере линейной. Как правило, на практике используют линейные решетки идентичных излучателей, одинаково ориентированных и расположенных на равных расстояниях d друг от друга. Если амплитуды токов возбуждения в излучателях одинаковы, то ДН такой антенной решетки может быть представлена в виде

$$F(\theta) = f_{\text{изл}}(\theta) \cdot \frac{\sin\left(\frac{N}{2}(\beta d \sin \theta - \psi)\right)}{N \sin\left(\frac{1}{2}(\beta d \sin \theta - \psi)\right)}, \quad (1)$$

где $f_{\text{изл}}(\theta)$ – диаграмма направленности одиночного излучателя;

N – количество излучателей;

θ – угол, отсчитываемый от перпендикуляра к линии расположения излучателей;

ψ – разность фаз возбуждающих токов в соседних излучателях.

Положение главного максимума определяется фазовым сдвигом ψ . Конкретные же значения фаз возбуждающих токов в каждом излучателе вычисляются согласно

$$\psi_i = (i-1)\psi, \quad (2)$$

где i – номер излучателя.

Существует несколько способов осуществления соотношения (2) при помощи специально реализованного фидерного тракта, именуемого диаграммообразующей схемой (далее – ДОС).

В последовательных схемах (см. рисунок 1) используются идентичные фазовращатели, при помощи которых создаются одинаковые фазовые сдвиги между токами в соседних излучателях. Если необходимо отклонить главный лепесток ДН на некоторый угол, то следует изменить электрическую длину всех

					11.04.03.2018.569.00.00 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		71

фазовращателей на одну и ту же величину. Питающий фидер здесь работает в режиме бегущей волны, а излучатели слабо связаны с фидером при помощи направленных ответвителей.

Рисунок А.1 – Последовательная схема питания ФАР

В параллельной схеме (см. рисунок 2) излучатели имеют автономные фазовращатели и связаны с входным трактом через последовательный ряд делителей мощности.

Рисунок А.2 – Параллельная схема питания ФАР

Недостатком последовательной схемы являются высокие требования к стабильности работы фазовращателей, а также неравномерность распределения мощности между фазовращателями. Через ближайшие к генератору фазовращатели проходит почти вся мощность, подводимая к решетке, а до последних фазовращателей доходит лишь незначительная ее часть.

Параллельная схема лишена этих недостатков, однако имеет более сложную систему управления, обусловленную тем, что требует применения

					<i>11.04.03.2018.569.00.00 ПЗ</i>	<i>Лист</i>
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>		72

фазовращателей с разным диапазоном сдвига по фазе. В ряде случаев можно использовать комбинацию обеих схем – комбинированные ДОС.

Изменение фазового сдвига может быть плавным или дискретным. В последнем случае управление фазой называют коммутационным.

Многолучевые антенные решетки (МАР) обычно имеют ДОС с несколькими входами и при подключении генератора к одному из входов антенная решетка формирует соответствующий луч (см. рисунок 3).

Рисунок А.3 – Многолучевая ФАР

В параллельных схемах питания антенных решеток – матрицах Батлера – используются фиксированные фазовращатели и четырехполюсники. Последовательно осуществляя подачу колебаний на любой вход ДОС и прослеживая пути движения мощности к каждому излучателю решетки, можно определить возникающие фазовые распределения.

					<i>11.04.03.2018.569.00.00 ПЗ</i>	<i>Лист</i>
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>		73

Рисунок А.4 – Матрица Батлера

Значения фаз возбуждающих токов ψ_i в каждом излучателе схемы, показанной на рисунке А.4 представлены в таблице А.1.

					11.04.03.2018.569.00.00 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		74

Таблица А1. Распределения фаз на излучателях

Номер входа, m	Номер излучателя, n							
	1	2	3	4	5	6	7	8
1	$-\frac{5}{8}\pi$	$-\frac{6}{8}\pi$	$-\frac{7}{8}\pi$	$-\frac{8}{8}\pi$	$-\frac{9}{8}\pi$	$-\frac{10}{8}\pi$	$-\frac{11}{8}\pi$	$-\frac{12}{8}\pi$
2	$-\frac{5}{8}\pi$	$-\frac{8}{8}\pi$	$-\frac{11}{8}\pi$	$-\frac{14}{8}\pi$	$-\frac{1}{8}\pi$	$-\frac{4}{8}\pi$	$-\frac{7}{8}\pi$	$-\frac{10}{8}\pi$
3	$-\frac{6}{8}\pi$	$-\frac{11}{8}\pi$	$-\frac{16}{8}\pi$	$-\frac{5}{8}\pi$	$-\frac{10}{8}\pi$	$-\frac{15}{8}\pi$	$-\frac{4}{8}\pi$	$-\frac{9}{8}\pi$
4	$-\frac{8}{8}\pi$	$-\frac{15}{8}\pi$	$-\frac{6}{8}\pi$	$-\frac{13}{8}\pi$	$-\frac{4}{8}\pi$	$-\frac{11}{8}\pi$	$-\frac{2}{8}\pi$	$-\frac{9}{8}\pi$

2 ОПИСАНИЕ ЛАБОРАТОРНОЙ УСТАНОВКИ

В лабораторную установку для исследования ДН многолучевых антенных решеток входят следующие приборы и устройства: 1 – измеритель комплексного коэффициента передачи; 2 – передающая антенна; 3 – лабораторный макет многолучевой антенной решетки; 4 – опорно-поворотное устройство; 5 – детекторная секция (матрица Батлера).

Рисунок А.5 – Лабораторная установка

Макет МАР представляет собой линейную решетку из восьми вибраторных излучателей, размещенных впереди экрана, выполненного из листового алюминия.

					11.04.03.2018.569.00.00 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		76

ДОС, выполненная на компланарных линиях, располагается позади экрана и представляет собой параллельную схему питания на двухшлейфных гибридных мостах и фазовращателях из коасиальной линии передачи.

Лабораторный макет рассчитан на центральную рабочую частоту $f_{ц} = 900$ МГц, расстояние между излучателями составляет 140 мм.

Измеритель комплексного коэффициента передачи ОБЗОР-TR1300/1 позволяет проводить измерения коэффициентов передачи и отражения, а также разности фаз сигнала.

3 ВЫПОЛНЕНИЕ РАБОТЫ

1. Изучить настоящие методические указания, а также книги из библиографического списка и руководство по эксплуатации ОБЗОР-TR1300/1.

2. Предварительно рассчитать ДН лабораторного макета многолучевой антенной решетки согласно выражению

$$F(\varphi) = \cos \varphi \cdot \sum_{n=1}^N 1 \cdot e^{i(k \cdot x_n \cdot \sin \varphi + \psi_n)}, \quad (3)$$

3. Ознакомиться с лабораторной установкой и приборами, входящими в нее. Включить ОБЗОР-TR1300/1, настроить частоту работы и откалибровать методом переключки.

4. Исследовать ДН МАР. Для этого необходимо:

а) установить на опорно-поворотном устройстве лабораторный макет многолучевой антенной решетки;

б) подключить ОБЗОР-TR1300/1 к первому входу ДОС при помощи откалиброванного фидера, на неиспользуемые входы установить согласованные нагрузки;

					<i>11.04.03.2018.569.00.00 ПЗ</i>	<i>Лист</i>
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>		<i>77</i>

в) измерить ДН решетки в диапазоне углов поворота макета от минус 90° до плюс 90° с дискретностью в 5° , отмечая все экстремальные точки;

г) переключить вход ДОС, повторить измерения с другими входами в соответствии с пунктом 4, в.

4 СОДЕРЖАНИЕ ОТЧЕТА

1. Схема ДОС макета антенной решетки.
2. График расчетных ДН.
3. Графики экспериментально полученных ДН.
4. Выводы по проделанной работе.

5 КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Как будет меняться ДН макета МАР при отклонении центральной рабочей частоты при синфазном возбуждении и при линейно изменяющимся сдвиге фаз? Считать, что свойства гибридных мостов при этом не меняются.

2. Существуют ли у исследуемой МАР дифракционные лепестки?

3. Чем определяется уровень первого и последнего (в видимой области) боковых лепестков ДН антенной решетки?

4. Чем ограничивается угловой диапазон сканирования ДН МАР?

5. Чем ограничивается частотный диапазон работы антенной решетки?

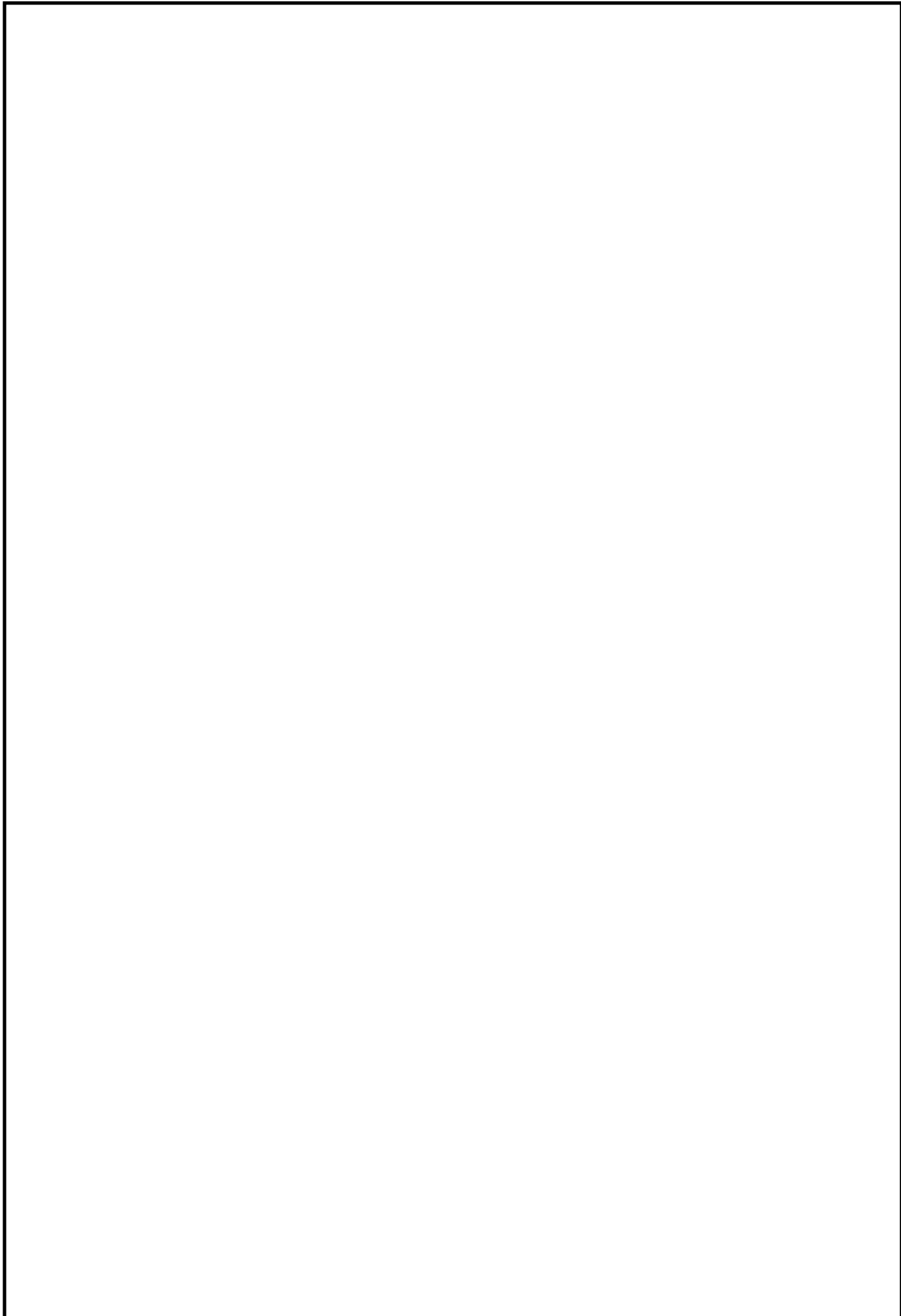
6. Для чего необходимо использовать согласованные нагрузки на свободных входах ДОС?

7. Какие изменения следует внести в конструкцию лабораторного макета для уменьшения уровня боковых лепестков?

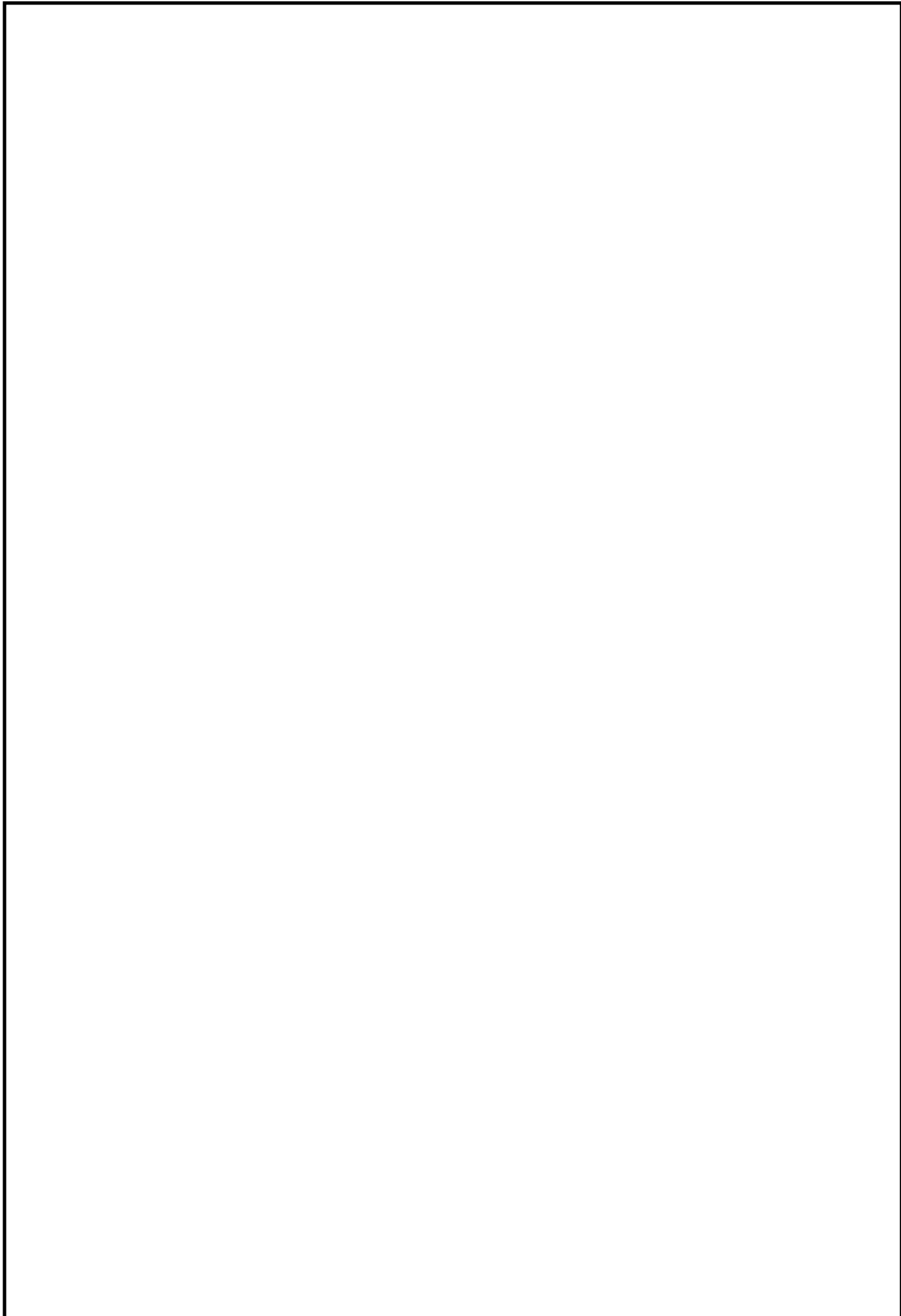
					<i>11.04.03.2018.569.00.00 ПЗ</i>	<i>Лист</i>
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>		78

ПРИЛОЖЕНИЕ Б
СПЕЦИФИКАЦИЯ
11.04.03.2018.569.01.00

					11.04.03.2018.569.00.00 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		79



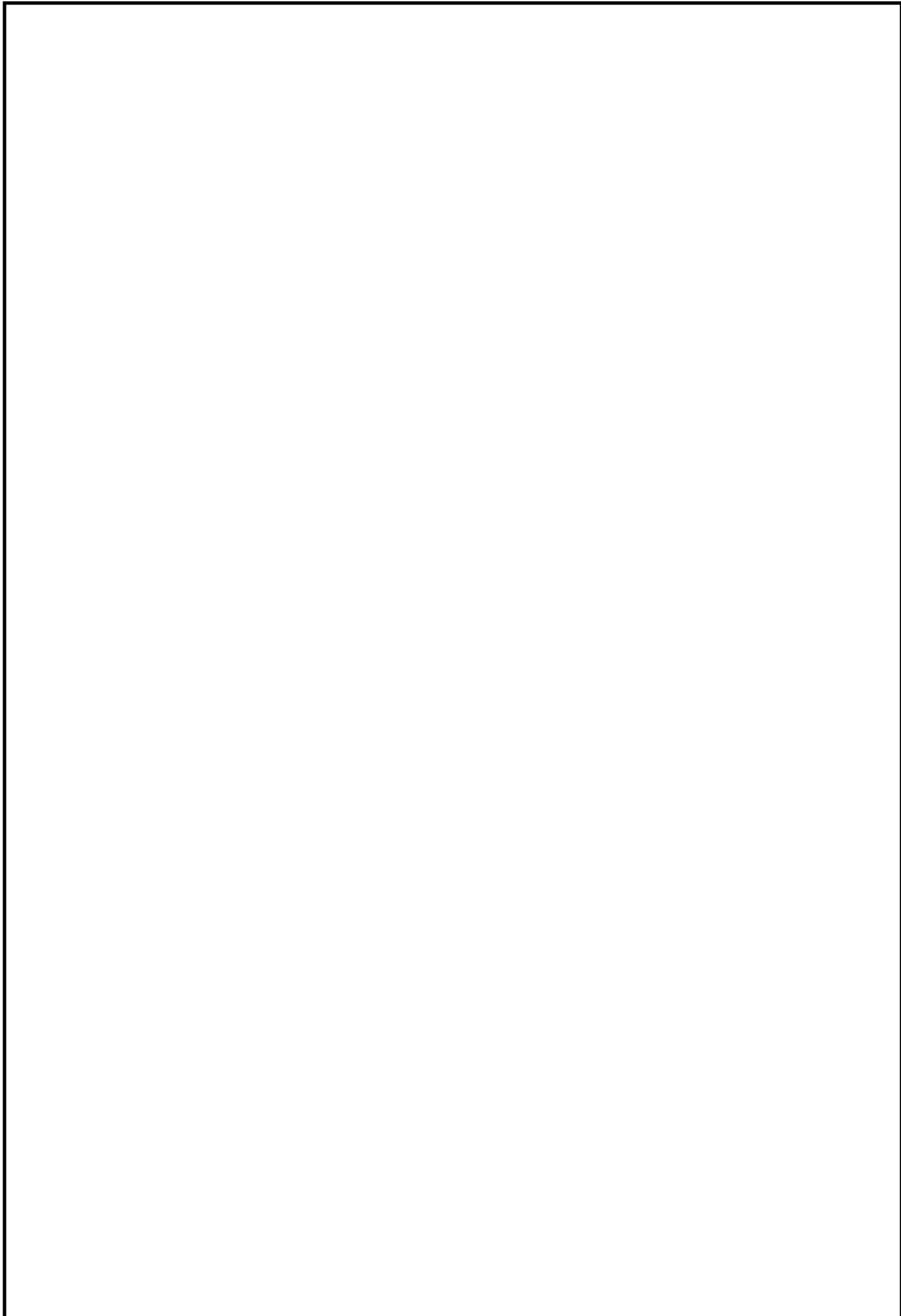
					<i>11.04.03.2018.569.00.00 ПЗ</i>	<i>Лист</i>
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>		<i>80</i>



					<i>11.04.03.2018.569.00.00 ПЗ</i>	<i>Лист</i>
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>		<i>81</i>

ПРИЛОЖЕНИЕ В
ЭКРАН
11.04.03.2018.569.01.01

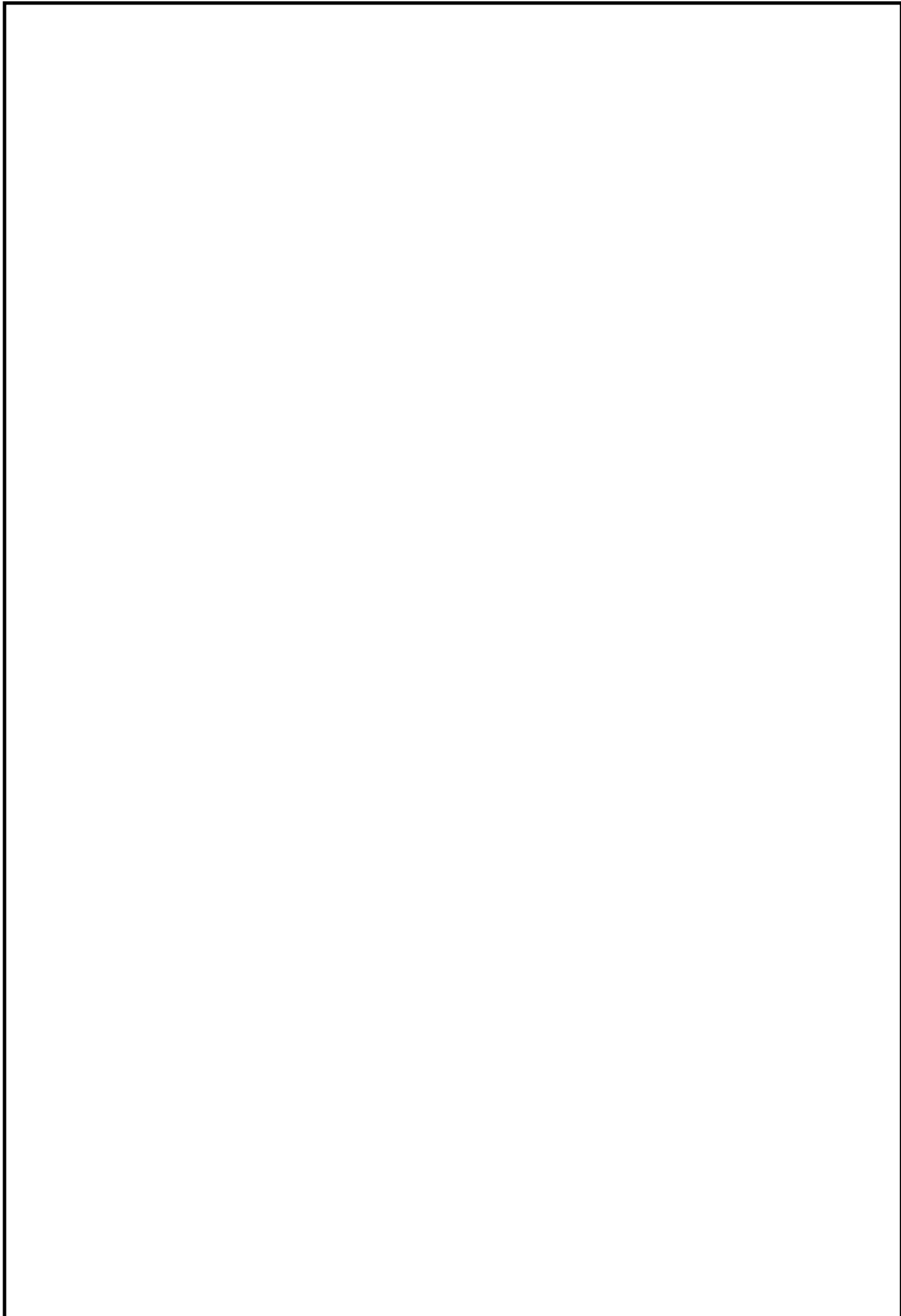
					11.04.03.2018.569.00.00 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		82



					<i>11.04.03.2018.569.00.00 ПЗ</i>	<i>Лист</i>
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>		<i>83</i>

ПРИЛОЖЕНИЕ Г
КРОНШТЕЙН
11.04.03.2018.569.01.03

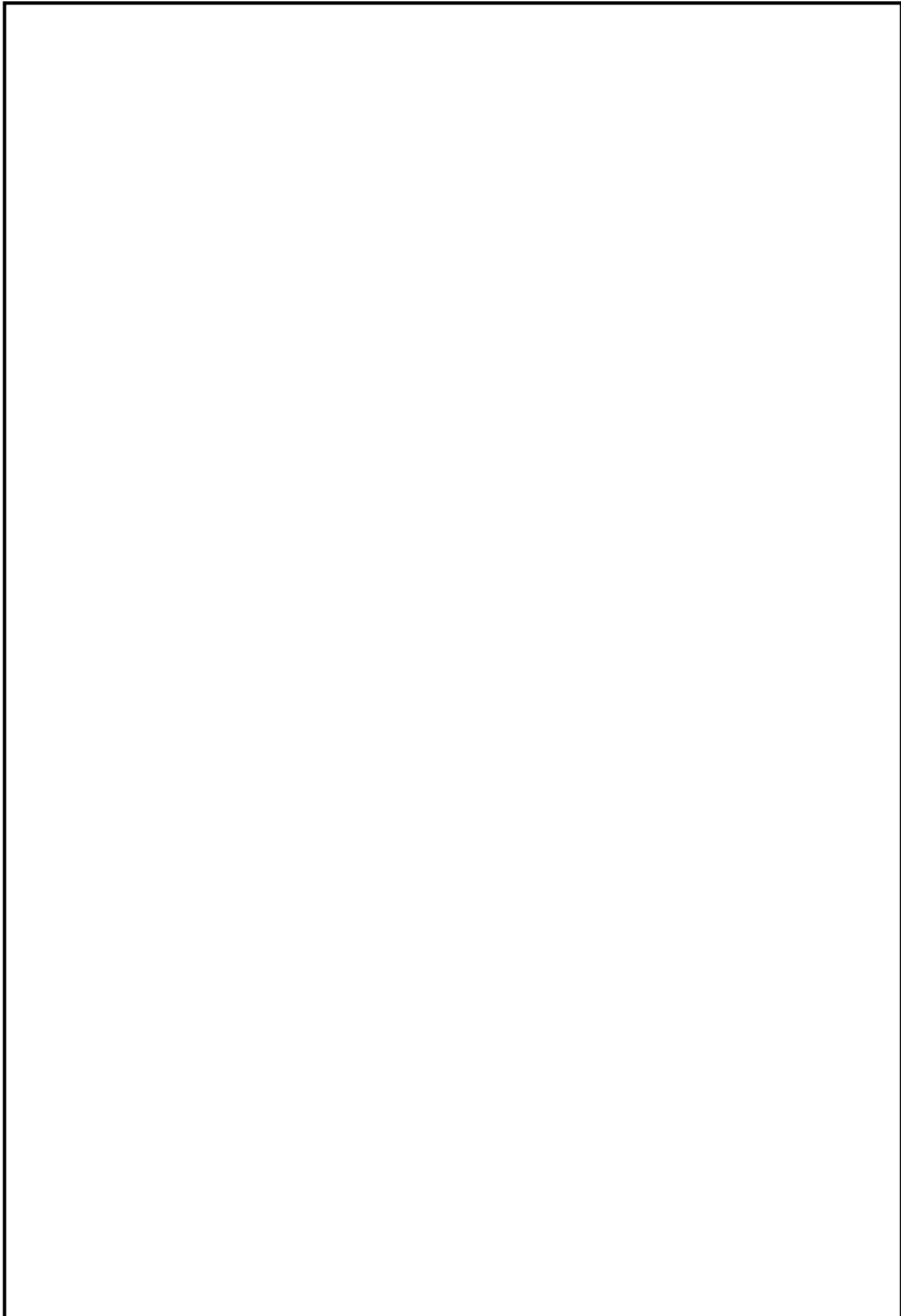
					11.04.03.2018.569.00.00 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		84



					<i>11.04.03.2018.569.00.00 ПЗ</i>	<i>Лист</i>
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>		<i>85</i>

ПРИЛОЖЕНИЕ Д
УГОЛОК
11.04.03.2018.569.01.04

					11.04.03.2018.569.00.00 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		86



					<i>11.04.03.2018.569.00.00 ПЗ</i>	<i>Лист</i>
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>		<i>87</i>