

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

ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ.
Заведующий кафедрой,
профессор

Н. И. Войтович

2018 года

Исследование возможностей работы антенны КРМ системы посадки
ПРМГ-76У в двухчастотных диапазонах

ПОЯСНИТЕЛЬНАЯ ЗАПИСКА
К ВЫПУСКНОЙ КВАЛИФИКАЦИОННОЙ РАБОТЕ
ЮУрГУ–11.03.03.2018.233 ПЗ ВКР

Руководитель проекта,
К.т.н, доцент

Б. В. Жданов
« ____ » _____ 2018 года

Автор ВКР
студент группы КЭ – 480

А. В. Дударев
« ____ » _____ 2018 года

Нормоконтролёр

Ю.А. Ташкинов
« ____ » _____ 2018 года

Челябинск 2018

АННОТАЦИЯ

Дударев А.В. Исследование возможностей работы антенны КРМ системы посадки ПРМГ-76У в двухчастотных диапазонах. – Челябинск: ЮУрГУ, 2018, 98 с. 62 ил., библиогр. список – 18 наим. 7 прил., 7 листов плакатов ф. А1.

Проведено исследование о возможности использования распределительного фидерного тракта для двухдиапазонного режима работы антенны КРМ системы посадки ПРМГ-76У, ПРМГ-76УМ.

Рассчитаны амплитудные ДН существующего рабочего диапазона частот (ОД) и амплитудные ДН дополнительного международного диапазона частот (МД).

Проведено совмещение линий курса, формируемых курсовой антенной с точностью $\pm 0,85'$ (угловых минут) с использованием методики электронной регулировки курса (ЭРК).

Спроектирован и рассчитан направленный ответвитель устройства ЭРК в программном пакете CST MICROWAVE STUDIO. На направленный ответвитель оформлен полный комплект КД.

Требования, предъявляемые по техническому заданию, были полностью выполнены.

					<i>110303.2018.233.00.00 ПЗ</i>			
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подп.</i>	<i>Дата</i>				
<i>Разраб.</i>		<i>Дударев А.В.</i>			<i>Исследование возможностей работы антенны КРМ системы посадки ПРМГ-76У в двухчастотных диапазонах</i>	<i>Лит.</i>	<i>Лист</i>	<i>Листов</i>
<i>Проб.</i>		<i>Жданов Б.В.</i>				<i>У</i>	<i>6</i>	<i>98</i>
<i>Н.Контр</i>		<i>Ташкинов Ю.А.</i>			<i>ЮУрГУ Кафедра КиПР</i>			
<i>Утв.</i>		<i>Войтович Н.И.</i>						

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	9
1 АНАЛИЗ ТЕХНИЧЕСКОГО ЗАДАНИЯ.....	10
2 ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ	11
3 ОБЗОР ЛИТЕРАТУРЫ И АНАЛИЗ СОСТОЯНИЯ ВОПРОСА	12
3.1 ПРМГ-76У(М)	12
3.2 Формирование ДН у курсовых радиомаяков систем ПРМГ-76У и ПРМГ-76УМ.....	14
3.3 Схема антенны КРМ системы ПРМГ-76У	18
4 ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ	20
4.1 Измерение АФР делителей 2.207.114 №3 и 2.207.113 №2.....	20
5 РАСЧЁТНАЯ ЧАСТЬ	26
5.1 Расчёт выходных характеристик антенны КРМ в ОД и МД.....	26
5.1.1 Расчёт длин фазирующих ВЧ кабелей для делителя 2.207.114 №3 антенны КРМ	26
5.1.2 Расчёт длин фазирующих ВЧ кабелей для делителя 2.207.113 №2 антенны КРМ	39
5.2 Построение графических зависимостей: амплитудной ДН существующего рабочего диапазона частот (ОД), амплитудной ДН дополнительного международного диапазона частот (МД)	47
5.3 Выводы по полученным результатам	57
5.4 Расчёт и моделирование направленного ответвителя устройства электронной регулировки курса	57
6 КОНСТРУКТОРСКИЙ РАЗДЕЛ.....	66
7 МОДЕЛЬ УСТРОЙСТВА РЕГУЛИРОВКИ КУРСА. РАСЧЁТЫ ПО СОВМЕЩЕНИЮ “0” ДН ОД И МД	75
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	80
БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК	82
ПРИЛОЖЕНИЯ.....	84
ПРИЛОЖЕНИЕ А	84
ПРИЛОЖЕНИЕ Б	86

ПРИЛОЖЕНИЕ В	88
ПРИЛОЖЕНИЕ Г	90
ПРИЛОЖЕНИЕ Д	92
ПРИЛОЖЕНИЕ Е	94
ПРИЛОЖЕНИЕ Ж	96

ВВЕДЕНИЕ

Системы посадки являются основным средством, обеспечивающим безопасную посадку самолётов в различных климатических и погодных условиях, а также в разное время суток.

Посадочные радиомаячные группы дециметрового диапазона ПРМГ-76У, ПРМГ-76УМ – это системы посадки, изготавливаемые ЧРЗ “Полёт”. Данные системы позволяют производить безопасную посадку самолётов в дневное и ночное время суток на аэродромах при метеоминимумах I, II категории ИКАО в режимах ручного или автоматического управления летательным аппаратом, оборудованным аппаратурой РСБН-2С.

В данной работе проведено исследование возможности работы системы КРМ (Курсовой радиомаяк) системы посадки ПРМГ-76У в двух частотных диапазонах: существующий рабочий диапазон 927 МГц – 932 МГц (отечественный диапазон - ОД), дополнительный международный диапазон частот 990 МГц – 994,8 МГц (МД). Были рассчитаны диаграммы направленности (ДН) существующего рабочего диапазона частот (ОД) и международного диапазона частот (МД). После проведения сравнительного анализа ДН в ОД и МД, был проведён расчёт по совмещению “0” ДН ОД и МД при помощи методики электронной регулировки курса (ЭРК).

Также в данной работе был спроектирован 8 дБ направленный ответвитель (НО) на полосковой линии с комбинированной лицевой связью. НО был реализован на материале ARLON AD 250. Спроектированный направленный ответвитель входит в состав устройства электронной регулировки курса (ЭРК).

1. АНАЛИЗ ТЕХНИЧЕСКОГО ЗАДАНИЯ

В данной работе необходимо оценить возможность использования антенны КРМ системы посадки ПРМГ-76У, изготавливаемой ЧРЗ “Полёт”, для работы в двух частотных диапазонах, то есть необходимо проверить, будет ли работать система не только в существующем частотном диапазоне ОД (927 МГц – 932 МГц), но и в дополнительном международном диапазоне частот МД (990 МГц – 994,8 МГц).

Необходимо провести оценку смещения углового положения линии курса в ОД и МД. Точность, требуемая при совмещении линий курса, формируемых курсовой антенной должна составлять не более $\pm 0,85'$ (угловых минут).

Также требуется разработать 8 дБ направленный ответвитель, входящий в состав устройства электронной регулировки курса. Данный направленный ответвитель должен быть реализован на симметричной полосковой линии.

					<i>110303.2018.233.00.00 ПЗ</i>	<i>Лист</i>
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подп.</i>	<i>Дата</i>		<i>10</i>

2. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Исходя из технического задания, необходимо исследовать возможность работы антенны КРМ системы посадки ПРМГ-76У для работы в двух частотных диапазонах.

Исходные данные, предъявляемые к исследованию:

1. Для исследования выбрана курсовая антенна ПРМГ-76У, изготавливаемая ЧРЗ “Полёт”.

2. Существующий рабочий диапазон 927 МГц – 932 МГц (отечественный диапазон – ОД).

3. Дополнительный международный диапазон частот 990 МГц – 994,8 МГц (МД).

4. Требуется точность совмещения линий курса, формируемых курсовой антенной $\pm 0,85'$ (угловых минут).

Ожидаемые результаты:

1. Оценка смещения углового положения линии курса в ОД и МД.

2. Оценить возможность использования распределительного фидерного тракта для двухдиапазонного режима работы антенны (сравнение ДН в ОД и МД).

Также необходимо разработать направленный ответвитель, входящий в состав устройства электронной регулировки курса.

Требования, предъявляемые к направленному ответвителю:

1. Направленный ответвитель должен быть реализован на симметричной полосковой линии с комбинированной лицевой связью.

2. Коэффициент связи: $8 \pm 0,2$ дБ.

3. Развязка не менее 20 дБ.

4. Рабочая полоса частот 990 – 994,8 МГц.

5. КСВН в рабочей полосе частот 990 – 994,8 МГц не должен превышать 1,2.

3. ОБЗОР ЛИТЕРАТУРЫ И АНАЛИЗ СОСТОЯНИЯ ВОПРОСА

3.1. ПРМГ-76У(М)

ПРМГ-76У, ПРМГ-76УМ [1] – это системы посадки, изготавливаемые ЧРЗ “Полёт”. Данные системы позволяют обеспечить безопасную посадку самолётов днём и ночью на аэродромах при метеоминимумах I, II категории ИКАО в режимах ручного, автоматического или полуавтоматического управления летательным аппаратом, оборудованным аппаратурой РСБН-2С.

Метеоминимум (метеорологический минимум) – это минимальная высота крайней границы облаков и горизонтальной видимости, при которой пилотам разрешается совершать взлёты и посадки самолётов. Метеорологический минимум I категории ИКАО (для пилота) подразумевает посадку самолёта при дальности видимости на взлётно-посадочной полосе не менее 550 метров (не более 800 метров) и нижней границы облаков 60 метров. Метеорологический минимум II категории ИКАО (для пилота) подразумевает посадку самолётов при дальности видимости на взлётно-посадочных полосах не менее 350 метров (не более 800 метров) и нижней границы облаков 30 метров.

Характерные особенности системы ПРМГ-76УМ:

1. Принцип формирования ДН, а также стабильность параметров на выходе, как у ПРМГ-76У.
2. Масса системы уменьшена на 500 кг, по сравнению с ПРМГ-76У.
3. Энергопотребление для основной аппаратуры уменьшено в 2 раза.
4. Аппаратура выполнена на современной (микропроцессорной) элементной базе.
5. В состав системы включены два кондиционера [4].
6. Имеется возможность автоматического переключения на резервную сеть.

Системы ПРМГ-76У и ПРМГ-76УМ могут использоваться на полевых и временных аэродромах.

					<i>110303.2018.233.00.00 ПЗ</i>	<i>Лист</i>
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подп.</i>	<i>Дата</i>		<i>12</i>

В состав систем ПРМГ-76У и ПРМГ-76УМ входит: глissадный радиомаяк (ГРМ), курсовой радиомаяк (КРМ), ретранслятор дальногомера (РД), аппаратура телесигнализации и телеуправления (ТУ-ТС), которая устанавливается на командно-диспетчерский пункт (КДП).

В данной работе будет проводиться исследование возможности использования антенны КРМ системы ПРМГ-76У в двух частотных диапазонах: 927 МГц – 932 МГц (ОД) и 990 МГц – 994,8 МГц (МД).

Рисунок 3.1 – Антенна КРМ системы ПРМГ-76 У(М)

Рассмотрим принцип формирования ДН КРМ систем ПРМГ-76У и ПРМГ-76УМ.

					<i>110303.2018.233.00.00 ПЗ</i>	<i>Лист</i>
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подп.</i>	<i>Дата</i>		<i>13</i>

3.2. Формирование ДН у курсовых радиомаяков систем ПРМГ-76У и ПРМГ-76УМ

Курсовые системы ПРМГ-76У и ПРМГ-76УМ [1] являются системами с равным сигналом [1].

Антенный комплекс создаёт ДН [2] в виде двух скрещивающихся лепестков, равносигнальная зона их совпадает с курсовой линией.

Формирование ДН [3] происходит следующим образом:

Исходный сигнал состоит из двух последовательных групп импульсов типа меандр, первая группа импульсов поступает с частотой $f_1 = \Omega_1/2\pi = 1300$ Гц, а вторая с частотой $f_2 = \Omega_2/2\pi = 2100$ Гц (рис. 3.2).

Рисунок 3.2 – Сигнал, поступающий с модулятора

Исходный сигнал, формируемый передатчиком, поступает на ЛФТ (линейка фидерного тракта) и делится на два сигнала (суммарный F_Σ и разностный F_Δ сигналы) (рис. 3.3), каждый из которых также состоит из двух групп импульсов с частотой 1300 Гц и 2100 Гц соответственно, причём каждая группа импульсов имеет свою фазу, задаваемую коммутатором фазы.

Рисунок 3.3 – Формирование суммарного F_{Σ} и разностного F_{Δ} сигналов

При формировании «правой» диаграммы излучается сигнал, модулированный по амплитуде сигналом вида меандр с частотой $f_1 = \Omega_1/2\pi = 1300$ Гц [1]. Данный сигнал получается при вычитании «пачек» импульсов с частотой 1300 Гц суммарного (F_{Σ}) и разностного (F_{Δ}) сигналов (рис. 3.4), это связано с тем, что данные группы импульсов имеют противоположные фазы (0° и 180°).

Рисунок 3.4 – Формирование «правой» ДН

При формировании «левой» диаграммы происходит излучение сигнала, с частотой $f_2 = \Omega_1/2\pi = 2100$ Гц. Данный сигнал формируется при сложении

					<i>110303.2018.233.00.00 ПЗ</i>	<i>Лист</i>
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подп.</i>	<i>Дата</i>		<i>15</i>

«пачек» импульсов с частотой 2100 Гц суммарного (F_{Σ}) и разностного (F_{Δ}) сигналов (рис. 3.5).

Рисунок 3.5 – Формирование «левой» ДН

«Правая» и «левая» диаграммы формируются не одновременно, а поочередно с частотой коммутации $f_k = \Omega_k/2\pi = 12,5$ Гц [1].

Для того чтобы получить итоговую ДН антенны КРМ в азимутальной плоскости необходимо совместить «правую» и «левую» диаграммы (рис. 3.6).

Рисунок 3.6 – ДН антенны КРМ системы типа ПРМГ в азимутальной плоскости

При поочередной коммутации «правой» и «левой» диаграмм, относительное разностное напряжение, влияющее на индикаторный прибор, определяется коэффициентом разнотышимости.

					<i>110303.2018.233.00.00 ПЗ</i>	<i>Лист</i>
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подп.</i>	<i>Дата</i>		<i>16</i>

Коэффициент разнотонности сигнала (КРС), равен модулю разности амплитуд сигналов, имеющих вид меандр, на частоте 1300 МГц и 2100 МГц, к их сумме (формула 3.1).

$$KPC = \left| \frac{U_{1300} - U_{2100}}{U_{1300} + U_{2100}} \right| \quad (3.1)$$

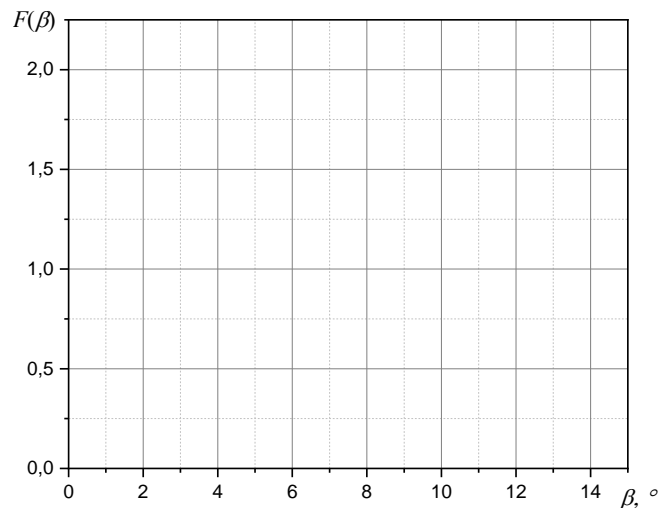


Рисунок 3.7 – ДН антенны КРС системы типа ПРМГ в угломестной плоскости

ДН в азимутальной плоскости [2] находится по следующим формулам [1]:

$$F(\varphi)_{1300} = B_1 + 0,5B_2; \quad F(\varphi)_{2100} = B_1 - 0,5B_2, \quad (3.2)$$

где $B_1 = \sum_{n=1}^{n=3} c_n \cos((2n-1)\pi 0,7 \sin \varphi)$; $B_2 = \sum_{n=1}^{n=5} d_n \sin((2n-1)\pi 0,7 \sin \varphi)$;

Значения коэффициентов a_n и b_n :

n	1	2	3	4	5
c_n	1	0,7	0,25	–	–
d_n	0,4	0,95	1	0,65	0,35

ДН в угломестной плоскости находится следующим образом [1]:

$$F(\beta) = -2j \sin(SkZ_{cm} / D_{cm}), \quad (3.3)$$

где $S = 1,25$ м – высота фазового центра антенны.

Из выше приведённого следует, что сигнал КРМ ПРМГ в области приёма [1]:

$$w = E_0(N_{k2}(t)N_{m2}(t)F(\varphi)_{2100}(1/R_{cm})F(\beta)\exp(j\omega t + \Phi) + N_{k1}(t)N_{m1}(t)F(\varphi)_{1300}) \quad (3.4)$$

где N_{k1}, N_{k2} – функции коммутации правой и левой антенн;

$$N_{k1}(t) = \tau / T + (2 / \pi) \sum_{n=1}^{\infty} (1 / n) \times \sin(n\pi\tau / T_k) \cos n\Omega_k t;$$

$$N_{k2}(t) = \tau / T_k - (2 / \pi) \sum_{n=1}^{\infty} (1 / n) \times \sin(n\pi\tau / T_k) \cos n\Omega_k t;$$

N_{m1}, N_{m2} – функции модуляции правой и левой антенны;

$$N_{m1}(t) = 1 / 2 + (2 / \pi) \sum_{n=1}^{\infty} (1 / n) \times \sin(n\pi / 2) \cos n\Omega_1 t;$$

$$N_{m2}(t) = 1 / 2 + (2 / \pi) \sum_{n=1}^{\infty} (1 / n) \times \sin(n\pi / 2) \cos n\Omega_2 t;$$

$\tau = 35 \text{ мс}$ – длительность рабочего интервала; $T_k = 80 \text{ мс}$ – период коммутации.

3.3. Схема антенны КРМ системы ПРМГ-76У

Сигнал суммарного (F_{Σ}) и разностного (F_{Δ}) каналов поступает с линейки фидерного тракта (ЛФТ) на делители 2.207.114 №3 и 2.207.113 №2 (рис. 3.7). Причём на делитель 2.207.114 №3 подаётся разностный сигнал (F_{Δ}), а на делитель 2.207.113 №2 – суммарный сигнал (F_{Σ}).

Делители суммарного и разностного каналов создают амплитудно-фазовые распределения (АФР) для антенной решётки, состоящей из десяти горизонтальных полуволновых вибраторов (рис.3.8). В схеме антенны КРМ также присутствуют 3 дБ направленные ответвители (НО), необходимые для деления сигнала, поступающего с делителей 2.207.114 №3 и 2.207.113 №2, пополам. Для создания необходимых фазовых распределений на излучателях антенной решётки используются технологические кабели, находящиеся между 3 дБ НО и излучателями (1-10). Кабели, идущие к излучателям 1-5 отличаются по длине от кабелей, идущих к излучателям 6-10 на $\lambda / 4$ (фазовая

длина кабелей, идущих к излучателям 6-10 на 90° больше, чем у кабелей, идущих к излучателям с 1-5).

Рисунок 3.8 – Функциональная схема антенны КРМ

Для определения возможности использования антенны КРМ в двухдиапазонных режимах: 927 МГц – 932 МГц (ОД) и 990 МГц – 994,8 МГц (МД) необходимо определить АФР сигналов, формируемых на выходах делителей суммарного (делитель 2.207.113 №2) и разностного (делитель 2.207.114 №3) каналов.

					<i>110303.2018.233.00.00 ПЗ</i>	<i>Лист</i>
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подп.</i>	<i>Дата</i>		<i>19</i>

4. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

4.1 Измерение АФР делителей 2.207.114 №3 и 2.207.113 №2

Определим амплитудно-фазовые распределения (АФР) сигналов на выходах делителей 2.207.114 №3 и 2.207.113 №2.

Для того, чтобы измерить основные характеристики: амплитуду, фазу сигнала, коэффициент стоячей волны (КСВ) делителей 2.207.114 №3 (рис. 4.1) и 2.207.113 №2 (рис. 4.2), был выбран измеритель комплексных коэффициентов передачи (ИККП) «Обзор – 103» (рис. 4.3).

Рисунок 4.1 – Исследуемый делители 2.207.114 №3

Рисунок 4.2 – Исследуемый делители 2.207.113 №2

					<i>110303.2018.233.00.00 ПЗ</i>	<i>Лист</i>
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подп.</i>	<i>Дата</i>		<i>20</i>

Рисунок 4.3 – «Обзор – 103»

Основные характеристики ИККП «Обзор – 103»:

1. Диапазон рабочих частот: 0,3 МГц – 1300 МГц
2. Параметры, которые можно измерять: комплексные коэффициенты отражения и прохождения.
3. Пределы относительной погрешности для КСВН: $\pm (2,4 \times \text{КСВН}) \%$.
4. Пределы абсолютной погрешности измерений фазы коэффициентов отражения: $\pm (4 / \text{КСВН} + 3)^\circ$.
5. Пределы абсолютной погрешности измерений фазы коэффициентов передачи: $\pm (3 + 0,05 \times |S_{21}|)^\circ$
6. Уровень сигнала на выходе: $\pm (3 + 0,05 \times |S_{21}|)^\circ$.

При выборе прибора для измерения характеристик (амплитуды, фазы, КСВ) с выходов делителей основным требованием было: прибор должен измерять необходимые параметры делителей в диапазонах ОД (927 МГц – 932 МГц) и МД (990 МГц – 994,8 МГц). Из выше приведённых технических характеристик измерительного прибора видно, что данный прибор полностью нас устраивает, так как диапазон рабочих частот «Обзор – 103» составляет: 0,3 МГц – 1300 МГц.

					<i>110303.2018.233.00.00 ПЗ</i>	<i>Лист</i>
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подп.</i>	<i>Дата</i>		<i>21</i>

Для работы с «Обзор – 103» также необходим ПК, в качестве которого был взят ноутбук Acer V5 – 522G. Для обращения к анализатору с персонального компьютера необходимо было установить ПО Setup_Obzor103_v2.4.5, после установки мы можем в полной мере работать с ИККП «Обзор – 103», а именно снимать необходимые для нас характеристики.

Рисунок 4.4 – Интерфейс ПО Setup_Obzor103_v2.4.5

Затем для того, чтобы приступить к измерениям была произведена калибровка прибора по ХХ (холостой ход), КЗ (короткое замыкание), нагрузке и по потерям в кабеле.

					<i>110303.2018.233.00.00 ПЗ</i>	<i>Лист</i>
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подп.</i>	<i>Дата</i>		22

Рисунок 4.5 – Элементы, используемые при калибровке «Обзор – 103»

При снятии характеристик с каждого из выходов делителей 2.207.114 №3 и 2.207.113 №2 на остальные выходы устанавливались согласованные нагрузки ТЖ2.243.443, для поглощения отражённой волны.

Затем были измерены: амплитуда в логарифмическом масштабе (в дБ), фаза (в °), расширенная фаза (в °), а также КСВН с каждого из входов делителей 2.207.114 №3 и 2.207.113 №2 на двух центральных частотах диапазонов ОД и МД: 930 МГц, 992 МГц.

Рисунок 4.6 – Измерение амплитуды, фазы и КСВ на выходе 5-6 делителя 2.207.114 №3, видно, что на всех остальных выходах установлены согласованные нагрузки

					<i>110303.2018.233.00.00 ПЗ</i>	<i>Лист</i>
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подп.</i>	<i>Дата</i>		<i>23</i>

Рисунок 4.7 – Полученные параметры с выхода 5-6 делителя 2.207.114 №3

После проведения измерений были составлены таблицы, в которые были внесены данные, полученные при определении АФР делителей (таблица 4.1, таблица 4.2). В эти таблицы были добавлены дополнительные колонки, которые будут необходимы для последующих расчётов: амплитуда, пересчитанная в разы, для обоих делителей (2.207.114 №3 и 2.207.113 №2) на обеих центральных частотах (930 МГц, 992 МГц).

Перевод амплитуды, из дБ в разы производится по следующей формуле:

$$\text{дБ} = 20 \lg A \Rightarrow A = 10^{\frac{\text{дБ}}{20}} \quad (4.1)$$

					110303.2018.233.00.00 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата		24

Таблица 4.1 – АФР делителя 2.207.114 №3 на частоте 930 МГц и частоте 992 МГц

№ вых	f=930 мГц					f=992 мГц				
	А, дБ	А, раз	φ, °	φ _{расшир} , °	КСВН	А, дБ	А, раз	φ, °	φ _{расшир} , °	КСВН
1-10	-18,61	0,117	176,11	-4143,69	1,05	-18,78	0,115	159,18	-4160,83	1,05
4-7	-4,95	0,566	21,22	-4298,77	1,02	-4,88	0,57	-5,93	-4325,95	1,05
5-6	- 5,74	0,516	-128,93	-4449	1,05	-5,75	0,516	-164,63	-4484,65	1,06
2-9	-9,83	0,323	81,9	-4598,11	1,06	-9,89	0,32	37,49	-4642,52	1,07
3-8	-6,15	0,493	-18,01	-4698,01	1,04	-6,2	0,489	-63,19	-4743,2	1,04

Таблица 4.2 – АФР делителя 2.207.113 №2 на частоте 930 МГц и частоте 992 МГц

№ вых	f=930 мГц					f=992 мГц				
	А, дБ	А, раз	φ, °	φ _{расшир} , °	КСВН	А, дБ	А, раз	φ, °	φ _{расшир} , °	КСВН
3-8	-16,16	0,16	169,5	-4150,22	1,06	-16,14	0,16	149,8	-4169,89	1,03
4-7	-6,06	0,5	18,14	-4301,58	1,05	-6,03	0,5	-10,8	-4330,62	1,03
5-6	-1,21	0,87	-70,24	-4390,24	1,07	-1,17	0,87	-98,73	-4418,73	1,06

5. РАСЧЁТНАЯ ЧАСТЬ

5.1 Расчёт выходных характеристик антенны КРМ в ОД и МД

Исходя из полученных в экспериментальной части данных, снятых с выходов делителей 2.207.114 №3 (см. таблицу 4.1) и 2.207.113 №2 (см. таблицу 4.2) как на существующем диапазоне частот ОД (927 МГц – 932 МГц), так и в международном диапазоне частот МД (990 МГц – 994,8 МГц) видно, что разности фаз на выходах делителя 2.207.114 №3 разные и не равны π (180°). Для делителя суммарного канала 2.207.113 №2 фазовые соотношения, полученные на выходах также нас не устраивают, так как разности фаз на выходах должны быть равны 0° . Следовательно, необходимо произвести выравнивание фаз, то есть выполнить фазировку делителей.

Для получения необходимых фазовых соотношений будут использоваться фазировочные ВЧ кабели.

Проведём расчёты, необходимые для фазировки делителей 2.207.114 №3 и 2.207.113 №2 в ОД и МД.

5.1.1 Расчёт длин фазировочных ВЧ кабелей для делителя 2.207.114 №3 антенны КРМ

Изначально будем проводить выравнивание фаз делителя 2.207.114 №3 на частоте 930 МГц (центральная частота ОД).

Во всех расчётах будет использоваться фаза в радианах. Перевод фазы из градусов в радианы производится по следующей формуле:

$$\varphi^\circ = \frac{\varphi^\circ \pi}{180^\circ} (\text{рад}) \quad (5.1)$$

Переведём фазы сигналов на выходах делителя 2.207.114 №3 (см. таблицу 4.1), на частоте 930 МГц из градусов в радианы. Для этого воспользуемся формулой (5.1).

$$\varphi_{1-10} = 176,11^\circ = \frac{176,11^\circ \times \pi}{180^\circ} (\text{рад}) = 3,07 \text{ рад} \quad (5.2)$$

$$\varphi_{4-7} = 21,22^\circ = \frac{21,22^\circ \times \pi}{180^\circ} (\text{рад}) = 0,37 \text{ рад} \quad (5.3)$$

$$\varphi_{5-6} = -128,93^\circ = \frac{-128,93^\circ \times \pi}{180^\circ} (\text{рад}) = -2,25 \text{ рад} \quad (5.4)$$

$$\varphi_{2-9} = 81,9^\circ = \frac{81,9^\circ \times \pi}{180^\circ} (\text{рад}) = 1,43 \text{ рад} \quad (5.5)$$

$$\varphi_{3-8} = -18,01^\circ = \frac{-18,01^\circ \times \pi}{180^\circ} (\text{рад}) = -0,314 \text{ рад} \quad (5.6)$$

Длина волны определяется по формуле:

$$\lambda = \frac{c}{f} \quad (5.7)$$

Рассчитаем длину волны по формуле (5.7) на частоте 930 МГц:

$$\lambda_{930} = \frac{3 \cdot 10^8}{930 \cdot 10^6} = 0,323 \quad (5.8)$$

Волновое число рассчитывается по следующей формуле:

$$k = \frac{2\pi}{\lambda} = \frac{2\pi f}{c} \quad (5.9)$$

Рассчитаем волновое число на частоте 930 МГц, используя формулу (5.9):

$$k_{930} = \frac{2\pi}{0,323} = 19,45 \quad (5.10)$$

Для излучателей с 1 по 5 фазировку будем проводить по следующей формуле:

$$\Phi_{1-5} = \varphi_i + kl_{01} + k\Delta l_i + k\Delta l^2 \quad (5.11)$$

где φ_i – исходная фаза делителя 2.207.114 №3, взятая в радианах, k – волновое число, l_{01} – длина общего технологического кабеля (примем её равной 0,8 м), Δl_i – длина подстроечного кабеля (его длину необходимо определить), Δl^2 – технологический кабель (примем его равным 1,5 м).

Для излучателей с 6 по 10 выравнивание фаз будем проводить по формуле:

$$\Phi_{6-10} = \varphi_i + kl_{01} + k\Delta l_i + k\Delta l^3 + \frac{\pi}{2} \quad (5.12)$$

где Δl^3 – технологический кабель (возьмём его равным 1,581 м).

Технологические кабели $\Delta l^2, \Delta l^3$ задают необходимые фазовые соотношения сигналов после направленных ответвителей. ВЧ кабели $\Delta l^2, \Delta l^3$ были подобраны таким образом, чтобы их длины различались на $\lambda / 4$.

Приведём схему делителя 2.207.114 №3 антенны КРМ с учётом технологических кабелей ($\Delta l^2, \Delta l^3$) и общих технологических кабелей (l_{01}) (рис. 5.1).

Рисунок 5.1 – Делитель 2.207.114 №3 антенны КРМ с учётом технологических и общих технологических длин кабелей

Сигналы, поступающие с выходов (1-10, 2-9, 3-8, 4-7, 5-6) делителя 2.207.114 №3 (делитель разностного канала) проходят через общие

					<i>110303.2018.233.00.00 ПЗ</i>	<i>Лист</i>
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подп.</i>	<i>Дата</i>		28

технологические кабели l_{01} (0,8 м) и подстроечные кабели Δl_i (их необходимо определить) и поступают на 3 дБ направленные ответвители (НО) (рис. 5.1). 3 дБ НО (WE1, WE2, WE3, WE4, WE5) делят поступающий на них сигнал пополам.

При прохождении разностного сигнала ΔU через основную линию НО (WE1, WE2, WE3, WE4, WE5) происходит сдвиг фазы сигнала на 90° (рис. 5.2). С учётом технологического кабеля Δl^3 (который на $\lambda/4$ длиннее технологического кабеля Δl^2) фаза на излучателях 6,7,8,9,10 будет равна 180° . При этом при распределении сигнала с основной линии НО на вспомогательную, сигнал на выходе направленного ответвителя имеет сдвиг фазы 0° . В результате разность фаз между излучателями антенной решётки: 1-10, 2-9, 3-8, 4-7, 5-6 будет равна 180° (рис.5.2).

Рисунок 5.2 – Получение необходимых фазовых соотношений для излучателей 1-10 путём подбора технологических и общих технологических кабелей

На НО (WE1, WE2, WE3, WE4, WE5) установлены согласованные нагрузки для поглощения сигнала (рис. 5.1). Причём к направленным ответвителям WE3, WE4, WE5 вместо согласованных нагрузок R3, R4, R5 подключается делитель 2.207.113 №2.

После подбора технологических кабелей и общих технологических кабелей необходимо определить длины подстроечных кабелей ($\Delta l_{1-10}, \Delta l_{2-9}, \Delta l_{3-8}, \Delta l_{4-7}, \Delta l_{5-6}$).

Рассчитаем $k\Delta l_i$ по следующей формуле:

$$k\Delta l_i = \varphi_{\max} - \varphi_i \quad (5.13)$$

где φ_{\max} – максимальная из фаз (в радианах) на выходах делителя.

Определим максимальную из фаз (в радианах) на частоте 930 МГц:

$$\varphi_{\max} = \varphi_{1-10} = 3,07 \text{ рад} \quad (5.14)$$

Рассчитаем $k\Delta l_i$ по формуле (5.13) для частоты 930 МГц:

$$k_{930}\Delta l_{1-10} = 3,07 - 3,07 = 0 \text{ рад} \quad (5.15)$$

$$k_{930}\Delta l_{4-7} = 3,07 - 0,37 = 2,7 \text{ рад} \quad (5.16)$$

$$k_{930}\Delta l_{5-6} = 3,07 - (-2,25) = 5,32 \text{ рад} \quad (5.17)$$

$$k_{930}\Delta l_{2-9} = 3,07 - 1,43 = 1,64 \text{ рад} \quad (5.18)$$

$$k_{930}\Delta l_{3-8} = 3,07 - (-0,314) = 3,384 \text{ рад} \quad (5.19)$$

Определим Δl_i из формул (5.15) – (5.19):

$$\Delta l_{1-10} = \frac{0}{k_{930}} = 0 \text{ м} \quad (5.20)$$

$$\Delta l_{4-7} = \frac{2,7}{k_{930}} = \frac{2,7}{19,45} = 0,139 \text{ м} \quad (5.21)$$

$$\Delta l_{5-6} = \frac{5,32}{k_{930}} = \frac{5,32}{19,45} = 0,274 \text{ м} \quad (5.22)$$

$$\Delta l_{2-9} = \frac{1,64}{k_{930}} = \frac{1,64}{19,45} = 0,084 \text{ м} \quad (5.23)$$

$$\Delta l_{3-8} = \frac{3,384}{k_{930}} = \frac{3,384}{19,45} = 0,174 \text{ м} \quad (5.24)$$

Определим суммарные длины кабелей, находящихся между 3 дБ направленными ответвителями и выходами делителя 2.207.114 №3.

$$l_{1-10} = \Delta l_{1-10} + l_{01} = 0 + 0,8 = 0,8 \quad (5.25)$$

$$l_{4-7} = \Delta l_{4-7} + l_{01} = 0,139 + 0,8 = 0,939 \quad (5.26)$$

$$l_{5-6} = \Delta l_{5-6} + l_{01} = 0,274 + 0,8 = 1,074 \quad (5.27)$$

$$l_{2-9} = \Delta l_{2-9} + l_{01} = 0,084 + 0,8 = 0,884 \quad (5.28)$$

$$l_{3-8} = \Delta l_{3-8} + l_{01} = 0,174 + 0,8 = 0,974 \quad (5.29)$$

Полученные при расчётах результаты занесём в таблицу.

Таблица 5.1 – Результаты, полученные при фазировке делителя 2.207.114 №3 на частоте 930 МГц

№ выхода	$\varphi, ^\circ$	$\varphi, \text{рад}$	$k_{930} \Delta l_i$	Δl_i	l_i
1-10	176,11	3,07	0	0	0,8
4-7	21,22	0,37	2,7	0,139	0,939
5-6	-128,93	-2,25	5,32	0,274	1,074
2-9	81,9	1,43	1,64	0,084	0,884
3-8	-18,01	-0,314	3,384	0,174	0,974

Приведём схему делителя 2.207.114 №3 антенны КРМ после определения длин, фазирующих ВЧ кабелей ($\Delta l_{1-10}, \Delta l_{2-9}, \Delta l_{3-8}, \Delta l_{4-7}, \Delta l_{5-6}$) на частоте 930 МГц (ОД).

Рисунок 5.3 – Схема делителя 2.207.114 №3 антенны КРМ на частоте 930 МГц с учётом найденных длин кабелей

На схеме фазировки делителя 2.207.114 №3 (рис. 5.3) длина подстроечного кабеля Δl_{1-10} не указана, так как она получилось равной 0 м (формула (5.20)).

Рассчитаем фазы по формуле (5.11) для излучателей с 1 по 5 и по формуле (5.12) для излучателей с 6 по 10.

$$\Phi_1 = 3,07 + 19,45 \cdot 0,8 + 19,45 \cdot 0 + 19,45 \cdot 1,5 = 47,805 \quad (5.30)$$

$$\Phi_2 = 1,43 + 19,45 \cdot 0,8 + 19,45 \cdot 0,084 + 19,45 \cdot 1,5 = 47,799 \quad (5.31)$$

$$\Phi_3 = -0,314 + 19,45 \cdot 0,8 + 19,45 \cdot 0,174 + 19,45 \cdot 1,5 = 47,805 \quad (5.32)$$

$$\Phi_4 = 0,37 + 19,45 \cdot 0,8 + 19,45 \cdot 0,139 + 19,45 \cdot 1,5 = 47,809 \quad (5.33)$$

$$\Phi_5 = -2,25 + 19,45 \cdot 0,8 + 19,45 \cdot 0,274 + 19,45 \cdot 1,5 = 47,814 \quad (5.34)$$

$$\Phi_6 = -2,25 + 19,45 \cdot 0,8 + 19,45 \cdot 0,274 + 19,45 \cdot 1,581 + \frac{\pi}{2} = 50,96 \quad (5.35)$$

$$\Phi_7 = 0,37 + 19,45 \cdot 0,8 + 19,45 \cdot 0,139 + 19,45 \cdot 1,581 + \frac{\pi}{2} = 50,955 \quad (5.36)$$

$$\Phi_8 = -0,314 + 19,45 \cdot 0,8 + 19,45 \cdot 0,174 + 19,45 \cdot 1,581 + \frac{\pi}{2} = 50,952 \quad (5.37)$$

$$\Phi_9 = 1,43 + 19,45 \cdot 0,8 + 19,45 \cdot 0,084 + 19,45 \cdot 1,581 + \frac{\pi}{2} = 50,945 \quad (5.38)$$

$$\Phi_{10} = 3,07 + 19,45 \cdot 0,8 + 19,45 \cdot 0 + 19,45 \cdot 1,581 + \frac{\pi}{2} = 50,951 \quad (5.39)$$

Значения фаз, полученные после фазировки делителя 2.207.114 №3 на частоте 930 МГц, занесём в таблицу.

Таблица 5.2 – Фазы на выходах излучателей антенной решётки с учётом найденных длин фазирующих ВЧ кабелей для делителя 2.207.114 №3 на частоте 930 МГц.

№ излучателя	Φ_i , рад
1	47,805
2	47,799
3	47,805
4	47,809
5	47,814
6	50,96
7	50,955
8	50,952
9	50,945
10	50,951

Рассчитаем разности фаз на выходах излучателей: 1-10, 2-9, 3-8, 4-7, 5-6 после подбора фазирующих ВЧ кабелей для делителя 2.207.114 №3 на частоте 930 МГц (центральная частота ОД).

$$\Phi_{1-10}(930) = \Phi_{10} - \Phi_1 = 50,951 - 47,805 = 3,146 \text{ рад} \quad (5.40)$$

$$\Phi_{2,9}(930) = \Phi_9 - \Phi_2 = 50,945 - 47,799 = 3,146 \text{ рад} \quad (5.41)$$

$$\Phi_{3,8}(930) = \Phi_8 - \Phi_3 = 50,952 - 47,805 = 3,147 \text{ рад} \quad (5.42)$$

$$\Phi_{4,7}(930) = \Phi_7 - \Phi_4 = 50,955 - 47,809 = 3,146 \text{ рад} \quad (5.43)$$

$$\Phi_{5,6}(930) = \Phi_6 - \Phi_5 = 50,96 - 47,814 = 3,146 \text{ рад} \quad (5.44)$$

Исходя из полученных значений разностей фаз, можно сказать, что данный вариант фазировки полностью нас устраивает, так как разности фаз на выходах излучателей получились примерно равными π .

После получения необходимых фазовых соотношений для делителя 2.207.114 №3 антенны КРМ на частоте 930 МГц (центральная частота ОД) необходимо осуществить выравнивание фаз для этого же делителя, но на частоте 992 МГц (центральная частота МД).

Так как длины технологических и общих технологических кабелей были уже подобраны для делителя 2.207.114 №3 в ОД, поэтому необходимо определить только длины подстроечных кабелей для данного делителя в МД.

Определим длины подстроечных кабелей Δl_i для делителя 2.207.114 №3 на частоте 992 МГц.

Переведём фазы сигналов на выходах делителя 2.207.114 №3 на частоте 992 МГц (см. таблицу 4.1) из градусов в радианы. Для этого воспользуемся формулой (5.1).

$$\varphi_{1-10} = 159,18^\circ = \frac{159,18^\circ \times \pi}{180^\circ} (\text{рад}) = 2,78 \text{ рад} \quad (5.45)$$

$$\varphi_{4-7} = -5,93^\circ = \frac{-5,93^\circ \times \pi}{180^\circ} (\text{рад}) = -0,1 \text{ рад} \quad (5.46)$$

$$\varphi_{5-6} = -164,63^\circ = \frac{-164,63^\circ \times \pi}{180^\circ} (\text{рад}) = -2,87 \text{ рад} \quad (5.47)$$

$$\varphi_{2-9} = 37,49^\circ = \frac{37,49^\circ \times \pi}{180^\circ} (\text{рад}) = 0,65 \text{ рад} \quad (5.48)$$

$$\varphi_{3-8} = -63,19^\circ = \frac{-63,19^\circ \times \pi}{180^\circ} (\text{рад}) = -1,1 \text{ рад} \quad (5.49)$$

Рассчитаем длину волны по формуле (5.7) на частоте 992 МГц:

$$\lambda_{992} = \frac{3 \cdot 10^8}{992 \cdot 10^6} = 0,302 \quad (5.50)$$

Рассчитаем волновое число на частоте 992 МГц, используя формулу (5.9):

$$k_{992} = \frac{2\pi}{0,302} = 20,805 \quad (5.51)$$

Определим максимальную из фаз (в радианах) на частоте 992 МГц.

$$\varphi_{\max} = \varphi_{1-10} = 2,78 \text{ рад} \quad (5.52)$$

Рассчитаем $k\Delta l_i$ по формуле (5.13) для частоты 992 МГц:

$$k_{992}\Delta l_{1-10} = 2,78 - 2,78 = 0 \text{ рад} \quad (5.53)$$

$$k_{992}\Delta l_{4-7} = 2,78 - (-0,1) = 2,88 \text{ рад} \quad (5.54)$$

$$k_{992}\Delta l_{5-6} = 2,78 - (-2,87) = 5,65 \text{ рад} \quad (5.55)$$

$$k_{992}\Delta l_{2-9} = 2,78 - 0,65 = 2,13 \text{ рад} \quad (5.56)$$

$$k_{992}\Delta l_{3-8} = 2,78 - (-1,1) = 3,88 \text{ рад} \quad (5.57)$$

Определим Δl_i из формул (5.53) – (5.57):

$$\Delta l_{1-10} = \frac{0}{k_{992}} = 0 \text{ м} \quad (5.58)$$

$$\Delta l_{4-7} = \frac{2,88}{k_{992}} = \frac{2,88}{20,805} = 0,138 \text{ м} \quad (5.59)$$

$$\Delta l_{5-6} = \frac{5,65}{k_{992}} = \frac{5,65}{20,805} = 0,272 \text{ м} \quad (5.60)$$

$$\Delta l_{2-9} = \frac{2,13}{k_{992}} = \frac{2,13}{20,805} = 0,102 \text{ м} \quad (5.61)$$

$$\Delta l_{3-8} = \frac{3,88}{k_{992}} = \frac{3,88}{20,805} = 0,186 \text{ м} \quad (5.62)$$

Определим суммарные длины кабелей, находящиеся между 3 дБ направленными ответвителями и выходами делителя 2.207.114 №3 на частоте 992 МГц.

$$l_{1-10} = \Delta l_{1-10} + l_{01} = 0 + 0,8 = 0,8 \quad (5.63)$$

$$l_{4-7} = \Delta l_{4-7} + l_{01} = 0,138 + 0,8 = 0,938 \quad (5.63)$$

$$l_{5-6} = \Delta l_{5-6} + l_{01} = 0,272 + 0,8 = 1,072 \quad (5.64)$$

$$l_{2-9} = \Delta l_{2-9} + l_{01} = 0,102 + 0,8 = 0,902 \quad (5.65)$$

$$l_{3-8} = \Delta l_{3-8} + l_{01} = 0,186 + 0,8 = 0,986 \quad (5.66)$$

Полученные при расчётах результаты занесём в таблицу.

Таблица 5.3 – Результаты, полученные при фазировке делителя 2.207.114 №3 на частоте 992 МГц

№ выхода	$\varphi, ^\circ$	$\varphi, \text{ рад}$	$k_{992} \Delta l_i$	Δl_i	l_i
1-10	159,18	2,78	0	0	0,8
4-7	-5,93	-0,1	2,88	0,138	0,938
5-6	-164,63	-2,87	5,65	0,272	1,072
2-9	37,49	0,65	2,13	0,102	0,902
3-8	-63,19	-1,1	3,88	0,186	0,986

Приведём схему делителя 2.207.114 №3 антенны КРМ после определения длин, фазирующих ВЧ кабелей ($\Delta l_{1-10}, \Delta l_{2-9}, \Delta l_{3-8}, \Delta l_{4-7}, \Delta l_{5-6}$) на частоте 992 МГц (центральная частота МД).

Рисунок 5.4 – Схема делителя 2.207.114 №3 антенны КРМ на частоте 992 МГц с учётом найденных длин кабелей

На схеме фазировки делителя 2.207.114 №3 длина подстроечного кабеля Δl_{1-10} не указана, так как она получилось равной 0 м (формула (5.58)).

Рассчитаем фазы по формуле (5.11) для излучателей с 1 по 5 и по формуле (5.12) для излучателей с 6 по 10.

$$\Phi_1 = 2,78 + 20,805 \cdot 0,8 + 20,805 \cdot 0 + 20,805 \cdot 1,5 = 50,632 \quad (5.67)$$

$$\Phi_2 = 0,65 + 20,805 \cdot 0,8 + 20,805 \cdot 0,102 + 20,805 \cdot 1,5 = 50,624 \quad (5.68)$$

$$\Phi_3 = -1,1 + 20,805 \cdot 0,8 + 20,805 \cdot 0,186 + 20,805 \cdot 1,5 = 50,621 \quad (5.69)$$

$$\Phi_4 = -0,1 + 20,805 \cdot 0,8 + 20,805 \cdot 0,138 + 20,805 \cdot 1,5 = 50,623 \quad (5.70)$$

$$\Phi_5 = -2,87 + 20,805 \cdot 0,8 + 20,805 \cdot 0,272 + 20,805 \cdot 1,5 = 50,64 \quad (5.71)$$

$$\Phi_6 = -2,87 + 20,805 \cdot 0,8 + 20,805 \cdot 0,272 + 20,805 \cdot 1,581 + \frac{\pi}{2} = 53,896 \quad (5.72)$$

					<i>110303.2018.233.00.00 ПЗ</i>	<i>Лист</i>
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подп.</i>	<i>Дата</i>		37

$$\Phi_7 = -0,1 + 20,805 \cdot 0,8 + 20,805 \cdot 0,138 + 20,805 \cdot 1,581 + \frac{\pi}{2} = 53,879 \quad (5.73)$$

$$\Phi_8 = -1,1 + 20,805 \cdot 0,8 + 20,805 \cdot 0,186 + 20,805 \cdot 1,581 + \frac{\pi}{2} = 53,877 \quad (5.74)$$

$$\Phi_9 = 0,65 + 20,805 \cdot 0,8 + 20,805 \cdot 0,102 + 20,805 \cdot 1,581 + \frac{\pi}{2} = 53,881 \quad (5.75)$$

$$\Phi_{10} = 2,78 + 20,805 \cdot 0,8 + 20,805 \cdot 0 + 20,805 \cdot 1,581 + \frac{\pi}{2} = 53,888 \quad (5.76)$$

Значения фаз, полученные после фазировки делителя 2.207.114 №3 антенны КРМ на частоте 992 МГц, занесём в таблицу.

Таблица 5.4 – Фазы на выходах излучателей антенной решётки с учётом найденных длин фазирующих ВЧ кабелей для делителя 2.207.114 №3 на частоте 992 МГц

№ излучателя	Φ_i , рад
1	50,632
2	50,624
3	50,621
4	50,623
5	50,64
6	53,896
7	53,879
8	53,877
9	53,881
10	53,888

Рассчитаем разности фаз на выходах излучателей: 1-10, 2-9, 3-8, 4-7, 5-6 после подбора длин, фазирующих ВЧ кабелей для делителя 2.207.114 №3 антенны КРМ на частоте 992 МГц.

$$\Phi_{1-10} = \Phi_{10} - \Phi_1 = 53,888 - 50,632 = 3,256 \text{ рад} \quad (5.77)$$

$$\Phi_{2-9} = \Phi_9 - \Phi_2 = 53,881 - 50,624 = 3,256 \text{ рад} \quad (5.78)$$

$$\Phi_{3-8} = \Phi_8 - \Phi_3 = 53,877 - 50,621 = 3,256 \text{ рад} \quad (5.79)$$

$$\Phi_{4-7} = \Phi_7 - \Phi_4 = 53,879 - 50,623 = 3,256 \text{ рад} \quad (5.80)$$

$$\Phi_{5-6} = \Phi_6 - \Phi_5 = 53,896 - 50,64 = 3,256 \text{ рад} \quad (5.81)$$

Разности фаз на выходах излучателей, полученные после подбора длин ВЧ кабелей для делителя 2.207.114 №3 на частоте 992 МГц, получились немного больше π и равны 3,256 радиана. Данную ситуацию избежать не получится так, как даже если мы начнём изменять длины ВЧ кабелей, это приведёт к тому, что на одной из частот разности фаз будут равны π , а на другой – разности фаз отличаться от π на 0,1 – 0,15 радиана. Это связано с тем, что длины технологических кабелей подбирались таким образом, чтобы обеспечить необходимые фазовые соотношения для делителя 2.207.114 №3 в ОД.

После получения необходимых фазовых соотношений на выходах делителя разностного канала 2.207.114 №3 в ОД и МД, проведём фазировку делителя суммарного канала 2.207.113 №2.

5.1.1 Расчёт длин фазирующих ВЧ кабелей для делителя 2.207.113 №2 антенны КРМ

Выравнивание фаз на выходах делителя 2.207.113 №2 будет проводиться аналогично фазировке делителя 2.207.114 №3.

Для излучателей с 3 по 5 выравнивание фаз будем проводить по следующей формуле:

$$\Phi_{3-5} = \varphi_i + kl_{01} + k\Delta l_i + k\Delta l^2 + \frac{\pi}{2} \quad (5.82)$$

где φ_i – исходная фаза делителя 2.207.113 №2, взятая в радианах, k – волновое число, l_{01} – длина общего технологического кабеля (примем её равной 0,8 м), Δl_i – длина подстроечного кабеля (его длину необходимо определить), Δl^2 – технологический кабель (примем его равным 1,5 м).

В формуле (5.82) $\frac{\pi}{2}$ добавляется для того, чтобы учесть фазовую длину направленного ответвителя.

Для излучателей с 6 по 8 выравнивание фаз будем проводить по формуле:

$$\Phi_{6-8} = \varphi_i + kl_{01} + k\Delta l_i + k\Delta l^3 \quad (5.83)$$

где Δl^3 – технологический кабель (возьмём его равным 1,581 м).

Подбор длин технологических и общих технологических кабелей проводился при фазировке делителя разностного канала (2.207.114 №3).

Приведём схему делителя 2.207.113 №2 антенны КРМ с учётом технологических и общих технологических длин кабелей.

Рисунок 5.5 – Схема делителя 2.207.113 №2 антенны КРМ на частоте 930 МГц с учётом технологических и общих технологических длин кабелей

Сигналы с выходов делителя 2.207.113 №2, проходящие через общие технологические кабели l_{01} и подстроечные кабели Δl_i (их длины необходимо определить), поступают на НО (WE1, WE2, WE3). При прохождении сигнала через основную линию направленного ответвителя (НО) происходит сдвиг фазы на 90° . С учётом технологического кабеля Δl^2 , через который проходит сигнал, поступающий с основного канала направленного ответвителя, фаза на

выходе, получится равной 90° . При ответвлении сигнала с основного канала направленного ответвителя на вспомогательный канал происходит сдвиг фазы 0° , но с учётом технологического кабеля Δl^3 (длина кабеля Δl^3 на $\lambda/4$ длиннее длины кабеля Δl^2) фаза на выходе получится равной 90° . В итоге разности фаз между излучателями 3-8, 4-7, 5-6 будут равны 0° .

Определим длины фазирующих ВЧ кабелей для делителя 2.207.113 №2 на частоте 930 МГц (центральная частота ОД).

Переведём фазы сигналов на выходах делителя 2.207.113 №2 на частоте 930 МГц (см. таблицу 4.2) из градусов в радианы. Для этого воспользуемся формулой (5.1).

$$\varphi_{3-8} = 169,5^\circ = \frac{169,5^\circ \times \pi}{180^\circ} (\text{рад}) = 2,958 \text{ рад} \quad (5.84)$$

$$\varphi_{4-7} = 18,14^\circ = \frac{18,14^\circ \times \pi}{180^\circ} (\text{рад}) = 0,317 \text{ рад} \quad (5.85)$$

$$\varphi_{5-6} = -70,24^\circ = \frac{-70,24^\circ \times \pi}{180^\circ} (\text{рад}) = -1,226 \text{ рад} \quad (5.86)$$

Определим максимальную из фаз (в радианах).

$$\varphi_{\text{макс}} = \varphi_{3-8} = 2,958 \text{ рад} \quad (5.87)$$

Рассчитаем $k\Delta l_i$ по формуле (5.13):

$$k_{930}\Delta l_{3-8} = 2,958 - 2,958 = 0 \text{ рад} \quad (5.88)$$

$$k_{930}\Delta l_{4-7} = 2,958 - 0,317 = 2,641 \text{ рад} \quad (5.89)$$

$$k_{930}\Delta l_{5-6} = 2,958 - (-1,226) = 4,184 \text{ рад} \quad (5.90)$$

Выразим Δl_i из формул (5.88) – (5.90):

$$\Delta l_{3-8} = \frac{0}{k_{930}} = \frac{0}{19,45} = 0 \text{ м} \quad (5.91)$$

$$\Delta l_{4-7} = \frac{2,641}{k_{930}} = \frac{2,641}{19,45} = 0,136 \text{ м} \quad (5.92)$$

$$\Delta l_{5-6} = \frac{4,184}{k_{930}} = \frac{4,184}{19,45} = 0,215 \text{ м} \quad (5.93)$$

Определим суммарные длины кабелей, находящихся между 3 дБ направленными ответвителями и выходами делителя 2.207.113 №2. При этом l_{01} – длина общего технологического кабеля (берём её равной 0,8 м).

$$l_{3-8} = \Delta l_{3-8} + l_{01} = 0 + 0,8 = 0,8 \quad (5.94)$$

$$l_{4-7} = \Delta l_{4-7} + l_{01} = 0,136 + 0,8 = 0,936 \quad (5.95)$$

$$l_{5-6} = \Delta l_{5-6} + l_{01} = 0,215 + 0,8 = 1,015 \quad (5.96)$$

Полученные при расчётах результаты занесём в таблицу.

Таблица 5.5 – Результаты, полученные при фазировке делителя 2.207.113 №2 на частоте 930 МГц

№ выхода	$\varphi, ^\circ$	$\varphi, \text{ рад}$	$k_{930} \Delta l_i$	Δl_i	l_i
3-8	169,5	2,958	0	0	0,8
4-7	18,14	0,317	2,614	0,136	0,936
5-6	-70,24	-1,226	4,184	0,215	1,015

Приведём схему делителя 2.207.113 №2 антенны КРМ на частоте 930 МГц с учётом найденных длин подстроечных кабелей ($\Delta l_{3-8}, \Delta l_{4-7}, \Delta l_{5-6}$).

Рисунок 5.6 – Схема делителя 2.207.113 №2 антенны КРМ на частоте 930 МГц с учётом найденных длин кабелей

На схеме фазировки делителя 2.207.113 №2 длина кабеля Δl_{3-8} не указана, так как она получилась равной 0 м (формула (5.91)).

Рассчитаем фазы для излучателей с 3 по 5 по формуле (5.82) и для излучателей 6 по 8 по формуле (5.83).

$$\Phi_3 = 2,958 + 19,45 \cdot 0,8 + 19,45 \cdot 0 + 19,45 \cdot 1,5 + \frac{\pi}{2} = 49,264 \quad (5.97)$$

$$\Phi_4 = 0,317 + 19,45 \cdot 0,8 + 19,45 \cdot 0,136 + 19,45 \cdot 1,5 + \frac{\pi}{2} = 49,27 \quad (5.98)$$

$$\Phi_5 = -1,226 + 19,45 \cdot 0,8 + 19,45 \cdot 0,215 + 19,45 \cdot 1,5 + \frac{\pi}{2} = 49,262 \quad (5.99)$$

$$\Phi_6 = -1,226 + 19,45 \cdot 0,8 + 19,45 \cdot 0,215 + 19,45 \cdot 1,581 = 49,266 \quad (5.100)$$

$$\Phi_7 = 0,317 + 19,45 \cdot 0,8 + 19,45 \cdot 0,136 + 19,45 \cdot 1,581 = 49,273 \quad (5.101)$$

$$\Phi_8 = 2,958 + 19,45 \cdot 0,8 + 19,45 \cdot 0 + 19,45 \cdot 1,581 = 49,268 \quad (5.102)$$

Полученные при фазировке значения занесём в таблицу.

Таблица 5.6 – Фазы на выходах излучателей после подбора ВЧ кабелей для делителя 2.207.113 №2 на частоте 930 МГц

№ антенны	Φ_i , рад
3	49,264
4	49,27
5	49,262
6	49,266
7	49,273
8	49,268

Рассчитаем разности фаз на выходах излучателей: 3-8, 4-7, 5-6 после подбора ВЧ кабелей (подстроечные кабели) для делителя 2.207.113 №2 антенны КРМ на частоте 930 МГц.

$$\Phi_{3-8} = \Phi_8 - \Phi_3 = 49,268 - 47,264 = 0,004 \text{ рад} \quad (5.103)$$

$$\Phi_{4-7} = \Phi_7 - \Phi_4 = 49,273 - 49,27 = 0,003 \text{ рад} \quad (5.104)$$

$$\Phi_{5-6} = \Phi_6 - \Phi_5 = 49,266 - 49,262 = 0,004 \text{ рад} \quad (5.105)$$

Исходя из полученных значений разностей фаз, можно сказать, что данный вариант фазировки полностью нас устраивает, так как разности фаз на выходах излучателей получились примерно равными 0 радиан.

После получения необходимых фазовых соотношений для делителя 2.207.113 №2 на частоте 930 МГц (центральная частота ОД), необходимо выполнить выравнивание фаз для этого же делителя, но на частоте 992 МГц (центральная частота МД).

Проведём расчёт длин ВЧ кабелей для делителя 2.207.113 №2 на частоте 992 МГц.

Переведём фазы сигналов на выходах делителя 2.207.113 №2 на частоте 992 МГц (см. таблица 4.2) из градусов в радианы. Для этого воспользуемся формулой (5.1).

$$\varphi_{3-8} = 149,8^\circ = \frac{149,8^\circ \times \pi}{180^\circ} (\text{рад}) = 2,615 \text{ рад} \quad (5.106)$$

$$\varphi_{4-7} = -10,8^\circ = \frac{-10,8^\circ \times \pi}{180^\circ} (\text{рад}) = -0,19 \text{ рад} \quad (5.107)$$

$$\varphi_{5-6} = -98,73^\circ = \frac{-98,73^\circ \times \pi}{180^\circ} (\text{рад}) = -1,723 \text{ рад} \quad (5.108)$$

Определим максимальную из фаз (в радианах).

$$\varphi_{\text{макс}} = \varphi_{3-8} = 2,615 \text{ рад} \quad (5.109)$$

Рассчитаем $k_{\Delta l_i}$ по формуле (5.13):

$$k_{992} \Delta l_{3-8} = 2,615 - 2,615 = 0 \text{ рад} \quad (5.110)$$

$$k_{992} \Delta l_{4-7} = 2,615 - (-0,19) = 2,805 \text{ рад} \quad (5.111)$$

$$k_{992} \Delta l_{5-6} = 2,615 - (-1,723) = 4,338 \text{ рад} \quad (5.112)$$

Определим Δl_i из формул (5.108) – (5.110):

$$\Delta l_{3-8} = \frac{0}{k_{992}} = \frac{0}{20,805} = 0 \text{ м} \quad (5.113)$$

$$\Delta l_{4-7} = \frac{2,805}{k_{992}} = \frac{2,805}{20,805} = 0,135 \text{ м} \quad (5.114)$$

$$\Delta l_{5-6} = \frac{4,338}{k_{992}} = \frac{4,338}{20,805} = 0,209 \text{ м} \quad (5.115)$$

Определим суммарные длины кабелей, находящихся между 3 дБ направленными ответвителями и выходами делителя 2.207.113 №2. При этом l_{01} – длина общего технологического кабеля (берём её равной 0,8 м).

$$l_{3-8} = \Delta l_{3-8} + l_{01} = 0 + 0,8 = 0,8 \quad (5.116)$$

$$l_{4-7} = \Delta l_{4-7} + l_{01} = 0,135 + 0,8 = 0,935 \quad (5.117)$$

$$l_{5-6} = \Delta l_{5-6} + l_{01} = 0,209 + 0,8 = 1,009 \quad (5.118)$$

Полученные при расчётах результаты занесём в таблицу.

Таблица 5.7 – результаты, полученные при фазировке делителя 2.207.113 №2 на частоте 992 МГц

№ выхода	$\varphi, ^\circ$	$\varphi, \text{ рад}$	$k_{930} \Delta l_i$	Δl_i	l_i
3-8	149,8	2,615	0	0	0,8
4-7	-10,8	-0,19	2,805	0,135	0,935
5-6	-98,73	-1,723	4,338	0,209	1,009

Приведём схему делителя 2.207.113 №2 антенны КРМ на частоте 930 МГц с учётом найденных длин ВЧ кабелей ($\Delta l_{3-8}, \Delta l_{4-7}, \Delta l_{5-6}$).

Рисунок 5.7 – Схема делителя 2.207.113 №2 антенны КРМ на частоте 992 МГц с учётом найденных длин ВЧ кабелей

Рассчитаем фазы по формуле (5.82) для излучателей с 3 по 5 и по формуле (5.83) для излучателей с 6 по 8.

$$\Phi_3 = 2,615 + 20,805 \cdot 0,8 + 20,805 \cdot 0 + 20,805 \cdot 1,5 + \frac{\pi}{2} = 52,037 \quad (5.119)$$

$$\Phi_4 = -0,19 + 20,805 \cdot 0,8 + 20,805 \cdot 0,135 + 20,805 \cdot 1,5 + \frac{\pi}{2} = 52,041 \quad (5.120)$$

$$\Phi_5 = -1,723 + 20,805 \cdot 0,8 + 20,805 \cdot 0,209 + 20,805 \cdot 1,5 + \frac{\pi}{2} = 52,048 \quad (5.121)$$

$$\Phi_6 = -1,723 + 20,805 \cdot 0,8 + 20,805 \cdot 0,209 + 20,805 \cdot 1,581 = 52,162 \quad (5.122)$$

$$\Phi_7 = -0,19 + 20,805 \cdot 0,8 + 20,805 \cdot 0,135 + 20,805 \cdot 1,581 = 52,155 \quad (5.123)$$

$$\Phi_8 = 2,615 + 20,805 \cdot 0,8 + 20,805 \cdot 0 + 20,805 \cdot 1,581 = 52,152 \quad (5.124)$$

Полученные при фазировке значения занесём в таблицу.

Таблица 5.8 – фазы на выходах излучателей после фазировки делителя 2.207.113 №2 на частоте 992 МГц

№ антенны	Φ_i , рад
3	52,037
4	52,041

Продолжение таблицы 5.8

5	52,048
6	52,162
7	52,155
8	52,152

Рассчитаем разности фаз на выходах излучателей: 1-10, 2-9, 3-8, 4-7, 5-6 после подбора ВЧ кабелей для делителя 2.207.113 №2 антенны КРМ на частоте 992 МГц (центральная частота МД).

$$\Phi_{3-8} = \Phi_8 - \Phi_3 = 52,152 - 52,037 = 0,115 \text{ рад} \quad (5.125)$$

$$\Phi_{4-7} = \Phi_7 - \Phi_4 = 52,155 - 52,041 = 0,114 \text{ рад} \quad (5.126)$$

$$\Phi_{5-6} = \Phi_6 - \Phi_5 = 52,162 - 52,048 = 0,114 \text{ рад} \quad (5.127)$$

Исходя из фазовых соотношений полученных, после расчёта длин кабелей для делителя 2.207.113 №2 на частоте 992 МГц, можно сделать вывод, что данный вариант фазировки нас устраивает, хотя разности фаз получились чуть больше 0 радиан и равны 0,114 радиан. Данную ситуацию избежать не получится так, как даже если мы начнём изменять длины ВЧ кабелей, это приведёт к тому, что на одной из частот разности фаз будут равны 0 радиан, а на другой – разности фаз отличаться от 0 радиан на 0,1 – 0,12 радиана.

Таким образом, была проведена фазировка делителей 2.207.114 №3 и 2.207.113 №2 антенны КРМ в ОД и МД.

5.2. Построение графических зависимостей: амплитудной ДН существующего рабочего диапазона частот (ОД), амплитудной ДН дополнительного международного диапазона частот (МД).

После проведения фазировки делителей 2.207.114 №3 и 2.207.113 №2 приступим к построению ДН, получаемых на выходах излучающих антенн. Делители, подключенные через 3дБ направленные ответвители к излучателям,

задают амплитудно-фазовые распределения для излучателей антенной решётки.

ДН будем строить как для существующего рабочего диапазона частот ОД (927 МГц – 932 МГц), так и для дополнительного международного диапазона частот МД (990 МГц – 994,8 МГц).

Для начала построим эквидистантную антенную решётку (рис. 5.8) [2,3], т.е. антенную решётку у которой все излучатели находятся на одинаковом расстоянии по отношению друг к другу. В нашем случае все излучатели располагаются на одной оси с расстоянием между друг другом, равным d_0 .

Проведём дополнительные построения на эквидистантной антенной решётке. Вначале проведём вектор \vec{R}_0 (фронт волны) через начало координат. Угол, лежащий между нормалью и фронтом волны, обозначим φ . Построим отрезок MN, перпендикулярный к фронту волны, а затем проведём два вектора \vec{R}_n и \vec{R}_{-n} параллельных \vec{R}_0 (рис. 5.8).

Из рисунка 5.8 найдём \vec{R}_n и \vec{R}_{-n} :

$$\vec{R}_n = \vec{R}_0 - \Delta \quad (5.128)$$

$$\vec{R}_{-n} = \vec{R}_0 + \Delta \quad (5.129)$$

По рисунку 5.8 определим Δ :

$$\Delta = z_n \sin(\varphi) \quad (5.130)$$

Определим общий сигнал излучателей z_n и z_{-n} :

$$F_{n;-n} = \dot{A}_n e^{jkR_n} + \dot{A}_{-n} e^{jkR_{-n}} = e^{jkR_0} \left[\dot{A}_n e^{-jk\Delta} + \dot{A}_{-n} e^{jk\Delta} \right] \quad (5.131)$$

где \dot{A}_n и \dot{A}_{-n} комплексные амплитуды излучателей z_n и z_{-n} , $k = \frac{2\pi}{\lambda}$ – волновое число, j – мнимая единица.



Рисунок 5.8 – Эквидистантная антенная решётка

Определим выражение для нахождения суммарного сигнала при равенстве амплитуд ($\dot{A}_n = \dot{A}_{-n}$) излучателей z_n и z_{-n} :

$$F_{n;-n(\Sigma)} = \dot{A}_n [e^{-jk\Delta} + e^{jk\Delta}] = 2 \dot{A}_n \cos(kz_n \sin(\varphi)) \quad (5.132)$$

В формуле (5.132) множитель e^{jkR_0} не учитывается, так как он не влияет на результат расчёта.

Определим формулу для нахождения разностного сигнала при $\dot{A}_n = -\dot{A}_{-n}$:

$$F_{n;-n(\Delta)} = \dot{A}_n [e^{-jk\Delta} - e^{jk\Delta}] = j2 \dot{A}_n \sin(kz_n \sin(\varphi)) \quad (5.133)$$

В формуле (5.133) множитель e^{jkR_0} не учитывается, так как он не влияет на результат расчёта.

Рассчитаем ДН [2] разностного типа (используются АФР делителя 2.207.114 №3) (рис. 5.9). Для того чтобы построить ДН для системы из 10 излучателей, необходимо просуммировать разностные сигналы каждого из излучателей (1...10).

$$F_{\Delta}(\varphi) = \sum_{n=1}^{N=10} j2 A_n \sin(kz_n \sin(\varphi)) = \sum_{n=1}^{N=10} A_n e^{jkz_n \sin(\varphi)} e^{j\Phi_n} \quad (5.134)$$

где A_n – амплитуда соответствующего излучателя (1...10), $z_n = (5-n)d_0 + \frac{d_0}{2}$, $d_0 = 0,25 \text{ м}$ – расстояние между излучателями z_n и z_{-n} , φ – угол, отсчитываемый от нормали (при расчёте ДН берём $-90^\circ \leq \varphi \leq +90^\circ$), Φ_n – фаза на выходе n излучателя после проведения фазировки делителя 2.207.114 №3.

В формуле (5.134) амплитуды (A_n) излучателей 1...10 берутся из таблицы 4.1 в размах. Фазы Φ_n берутся из таблицы 5.2 для частоты 930 МГц и из таблицы 5.4 для частоты 992 МГц.

При построении ДН [2] возьмём модуль от суммы сигналов (формула 5.134), то есть $|F_{\Delta}(\varphi)|$, это необходимо для того, чтобы получить ДН, у которой оба лепестка будут находиться в положительной области.



Рисунок 5.9 – Эквидистантная антенная решётка с 10 излучателями

Построим ДН (рассчитывается множитель решётки) разностного канала (используется делитель 2.207.114 №3) на частоте 930 МГц (центральная частота ОД) и частоте 992 МГц (центральная частота МД).

-80 -60 -40 -20 20 40 60 80 $\varphi, ^\circ$

Рисунок 5.10 – Расчётные ДН разностного канала в азимутальной плоскости по измеренным АФР, при $\varphi (-90^\circ, 90^\circ)$

-20 -15 -10 -5 10 15 20 $\varphi, ^\circ$

Рисунок 5.11 – Расчётные ДН разностного канала в азимутальной плоскости по измеренным АФР, при $\varphi (-20^\circ, 20^\circ)$

					<i>110303.2018.233.00.00 ПЗ</i>	<i>Лист</i>
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подп.</i>	<i>Дата</i>		52

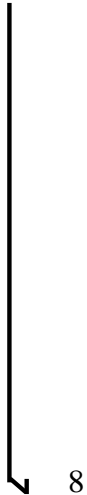
Рисунок 5.12 – Расчётные ДН разностного канала в азимутальной плоскости по измеренным АФР, при $\varphi (-2^\circ, 2^\circ)$

Рассчитаем ДН [2] для 6 излучателей (рис. 5.13). Для этого необходимо сложить суммарные сигналы (формула (5.132)) каждого из излучателей (3...8).

$$F_{\Sigma}(\varphi) = \sum_{n=3}^{N=8} 2 A_n \cos(kz_n \sin(\varphi)) = \sum_{n=3}^{N=8} A_n e^{jkz_n \sin(\varphi)} \quad (5.135)$$

где A_n – амплитуда соответствующего излучателя (3...8), $z_n = (5-n)d_0 + \frac{d_0}{2}$, $d_0 = 0,25 \text{ м}$ – расстояние между излучателями z_n и z_{-n} , φ – угол, отсчитываемый от нормали (при расчёте ДН берём $-90^\circ \leq \varphi \leq +90^\circ$).

В формуле (5.135) амплитуды (A_n) излучателей 3...8 берутся из таблицы 4.2 в размах.



8

Рисунок 5.13 – Эквидистантная антенная решётка с 6 излучателями

При построении ДН [2] для 6 излучателей возьмём модуль от суммы сигналов каждого излучателя, то есть $|F_{\Sigma}(\varphi)|$.

Построим ДН (рассчитывается множитель решётки) суммарного канала (используется делитель 2.207.113 №2) на частоте 930 МГц (центральная частота ОД) и частоте 992 МГц (центральная частота МД).

Рисунок 5.14 – Расчётные ДН суммарного канала в азимутальной плоскости по измеренным АФР, при $\varphi (-90^\circ, 90^\circ)$

					<i>110303.2018.233.00.00 ПЗ</i>	<i>Лист</i>
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подп.</i>	<i>Дата</i>		54

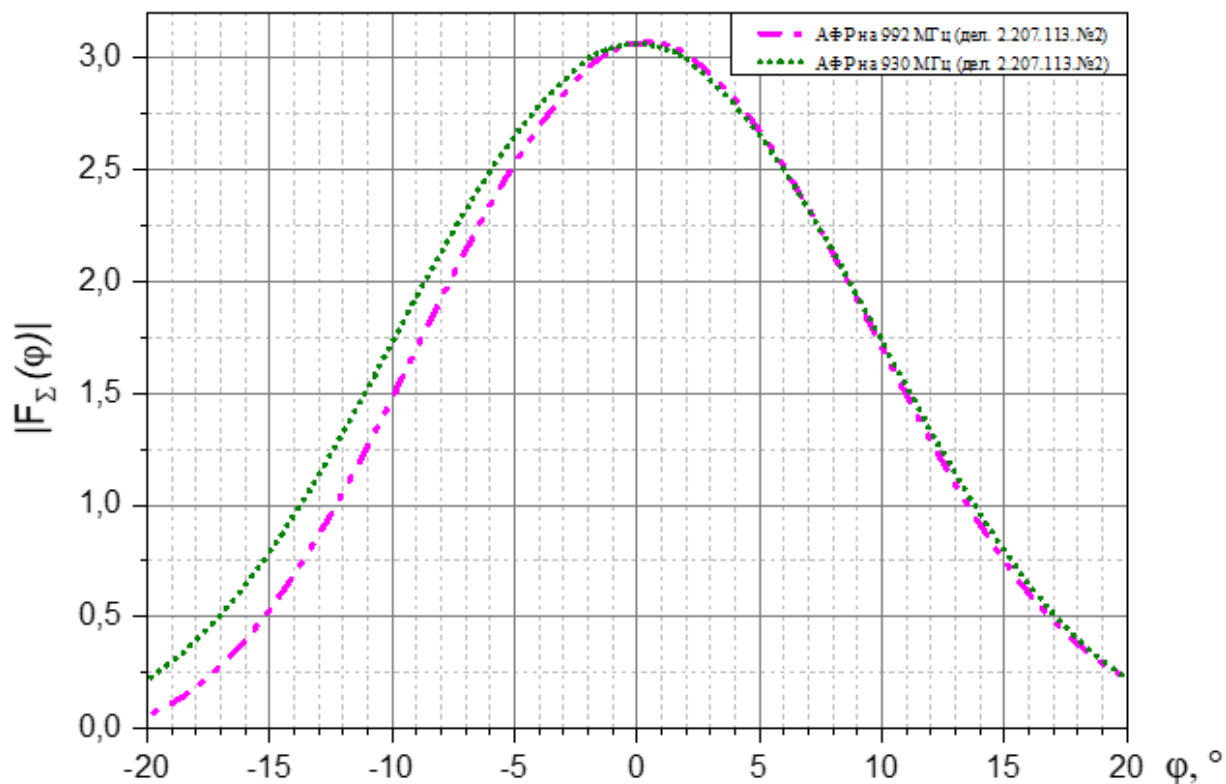


Рисунок 5.15 – Расчётные ДН суммарного канала в азимутальной плоскости по измеренным АФР, при φ (-20°, 20°)

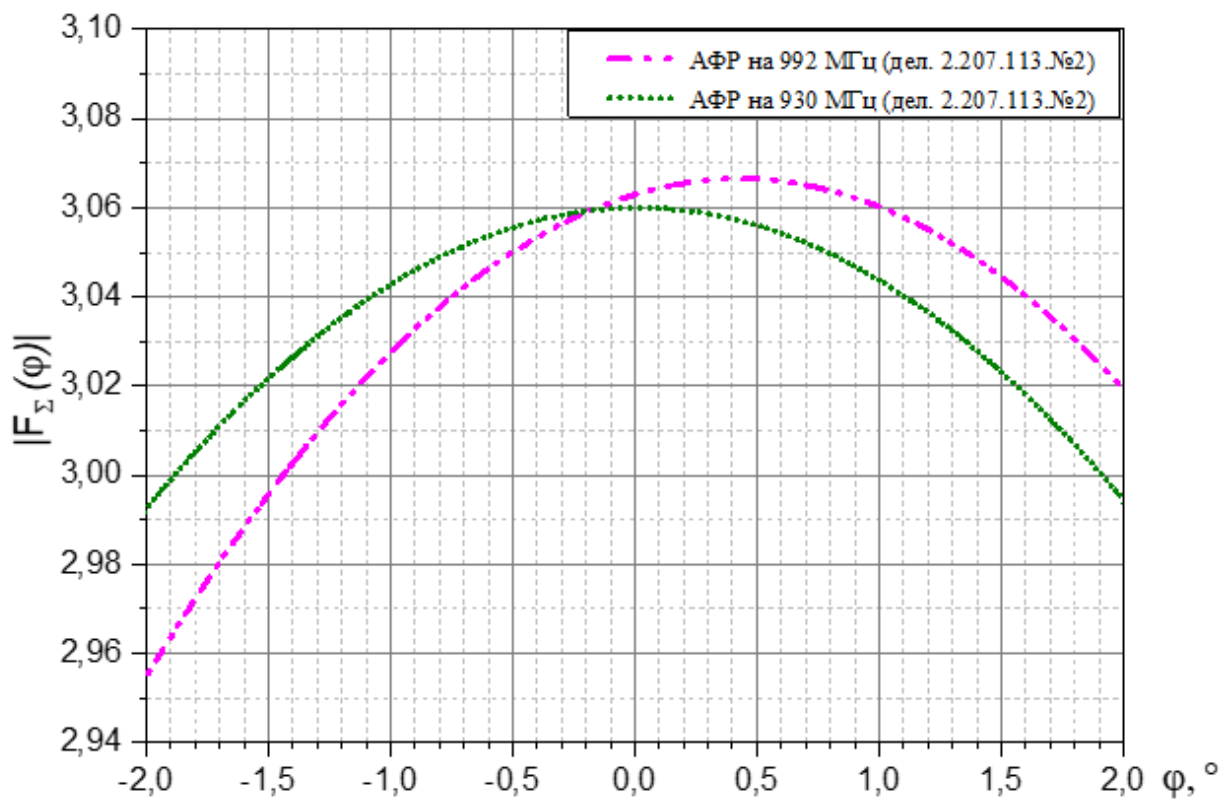


Рисунок 5.16 – Расчётные ДН суммарного канала в азимутальной плоскости по измеренным АФР, при φ (-2°, 2°)

Построим графики, на которых будут одновременно отображены ДН, формируемые суммарным и разностным сигналами.

Рисунок 5.17 – Расчётные ДН суммарного и разностного каналов в азимутальной плоскости по измеренным АФР, при φ (-90° , 90°)

Рисунок 5.18 – Расчётные ДН суммарного и разностного каналов в азимутальной плоскости по измеренным АФР, при φ (-2° , 2°)

					<i>110303.2018.233.00.00 ПЗ</i>	<i>Лист</i>
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подп.</i>	<i>Дата</i>		<i>56</i>

5.3 Выводы по полученным результатам

Таким образом, были построены амплитудные ДН существующего рабочего диапазона частот (ОД) (927 МГц – 932 МГц), а также амплитудные ДН дополнительного международного диапазона частот (МД) (992 МГц – 994,8 МГц).

ДН разностного типа на частоте 992 МГц (АФР на 992 МГц (дел. 2.207.114 №3)) сдвинута вправо на $0,325^\circ$ относительно, ДН разностного типа, но на частоте 930 МГц (АФР на 930 МГц (дел. 2.207.114 №3)) (рисунок 5.18). На практике данное смещение ДН приведёт к тому, что самолёт при посадке отклонится от ВПП (Взлётно-посадочная полоса), что может привести к неблагоприятным последствиям. Поэтому необходимо произвести смещение разностной ДН для 10 излучателей на частоте 992 МГц (АФР на 992 МГц (дел. 2.207.114 №3)) влево на $0,325^\circ$ до 0° . Для проведения расчётов по совмещению “0” ДН разностного типа в ОД (927 МГц – 932 МГц) и МД (992 МГц – 994,8 МГц) будет использоваться методика электронной регулировки курса (ЭРК), разработанная преподавателями кафедры КиПР.

В качестве недостатка также можно выделить большой уровень боковых лепестков ДН разностного типа (рис. 5.10, рис. 5.17).

Также можно заметить отклонение ДН суммарного канала на частоте 992 МГц (АФР на 992 МГц (дел. 2.207.113 №2)) от ДН суммарного типа, но на частоте 930 МГц (рис. 5.16).

5.4 Расчёт и моделирование направленного ответвителя устройства электронной регулировки курса

Необходимо разработать направленный ответвитель, входящий в состав устройства электронной регулировки курса (ЭРК).

Требования, предъявляемые по ТЗ к направленному ответвителю:

1. Направленный ответвитель должен быть реализован на симметричной полосковой линии с комбинированной лицевой связью.

2. Коэффициент связи: $8 \pm 0,2$ дБ.
3. Развязка не менее 20 дБ.
4. Рабочая полоса частот 990 – 994,8 МГц.
5. КСВН в рабочей полосе частот 990 – 994,8 МГц не должен превышать 1,2.

1. Проведём расчёт направленного ответвителя.

Для начала определим длину направленного ответвителя. Направленный ответвитель имеет фазовую длину 90° .

Длина проводника направленного ответвителя находится по следующей формуле [4,5,6]:

$$L = \frac{\lambda}{4} \quad (5.136)$$

где λ – длина волны.

Для определения длины волны воспользуемся формулой [14,16]:

$$\lambda = \frac{v}{f} \quad (5.137)$$

где v – скорость распространения волны, f – частота.

Скорость распространения волны находится по формуле [8,9,10]:

$$v = \frac{c}{\sqrt{\epsilon\mu}} \quad (5.138)$$

где c – скорость света, ϵ – относительная диэлектрическая проницаемость материала, μ – относительная магнитная проницаемость.

Материалом для центральной полосковой платы был выбран фольгированный диэлектрик ARLON AD250 PTFE 0,508 Cu 35/35 DK 2,5. Данный материал имеет следующие основные характеристики: $\epsilon = 2,5$, тангенс угла диэлектрических потерь $\text{tg}\delta = 0,0018$, толщина диэлектрика $S = 0,5$ мм, толщина металлизации $t = 0,035$ мм.

Материалом для обкладок симметричной полосковой линии был выбран тот же материал, но с толщиной диэлектрика, равной 2 мм.

Исходя из выше приведённых формул определим длину проводника:

$$L = \frac{c}{4f\sqrt{\varepsilon}} = \frac{3 \cdot 10^8}{4 \cdot 992 \cdot 10^6 \sqrt{2,5}} = 47,85 \text{ мм} \quad (5.139)$$

После определения длины проводника необходимо рассчитать ширину полосковой линии.

Проведём поперечный разрез направленного ответвителя (рис. 5.19).

Рисунок 5.19 – Поперечный разрез направленного ответвителя

На рисунке 5.19 а) приведена структура симметричной полосковой линии, на рисунке 5.19 б) приведена структура связанной симметричной полосковой линии. Рассчитаем случай, изображённый на рисунке 5.19 а), причём расчёт для данного случая будем проводить как с использованием электродинамических методик расчёта, так и при помощи специализированной программы расчёта полосковых линий (TXLINE). Структура симметричной полосковой линии (рис. 5.19 а)) состоит из центрального диэлектрика 1, на котором нанесён медный печатный проводник 2. С обеих сторон от фольгированного диэлектрика расположены диэлектрические обкладки 3, на которых нанесена медная металлизация. Так как, диэлектрические обкладки сделаны из одного и того же материала (ARLON AD250 PTFE 2,032 Cu 35/35 DK 2,5), имеют одинаковые характеристики: $\varepsilon = 2,5$, $\text{tg}\delta = 0,0018$, толщина диэлектрика $S_1 = 2$ мм, следовательно, можно пренебречь диэлектрической пластиной 1 и перейти к симметричной полосковой линии с диэлектрическим заполнением (рис. 5.20).

Рисунок 5.20 – Симметричная полосковая линия с диэлектрическим
заполнением

На рисунке 5.20 изображена симметричная полосковая линия, на которой b – это расстояние между внешними металлизациями ($b = 4,57$ мм), а W – ширина полоска.

Волновое сопротивление линии с внутренним печатным проводником нулевой толщины ($t/b \leq 0,05$) определяется следующим образом [7, 11, 12]:

$$\rho = \frac{30 \cdot \pi \cdot K(\kappa)}{K(\kappa^*)} \quad (5.140)$$

где $K(\kappa)$ и $K(\kappa^*)$ – это полные эллиптические интегралы первого рода;

$$\kappa = \operatorname{sch} \frac{\pi W}{2b};$$

$$\kappa^* = \operatorname{th} \frac{\pi W}{2b}.$$

Для того чтобы определить ширину проводника W по формуле 5.138, необходимо решать уравнения с эллиптическими интегралами первого рода. Для определения ширины проводника W воспользуемся более простым методом, основанным на использовании графиков для определения габаритных размеров симметричной полосковой линии с диэлектрическим заполнением.

Для того, чтобы использовать эквивалентные графики для определения ширины W , необходимо, чтобы выполнялось условие ($t/b \leq 0,05$) [11].

Проверим выполнение условия:

					110303.2018.233.00.00 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата		60

$$\frac{t}{b} = \frac{0,035}{4,57} = 0,0077 \leq 0,05 \quad (5.141)$$

Так как условие, полосы нулевой толщины выполняется, следовательно, воспользуемся эквивалентными графиками [11] (рис. 5.21) для определения ширины полоска (W).

Рисунок 5.21 – Эквивалентный график для определения основных размеров симметричной полосковой линии с диэлектрическим заполнением

Определим значение выражения $\rho\sqrt{\varepsilon}$, где ρ - это волновое сопротивление, для нашего случая $\rho = 50 \text{ Ом}$, $\varepsilon = 2,5$.

$$\rho\sqrt{\varepsilon} = 50\sqrt{2,5} = 79,1 \approx 80 \quad (5.142)$$

Исходя из эквивалентного графика получаем: $\frac{W}{b} = 0,75$.

Следовательно, $W = 0,75 \cdot b = 0,75 \cdot 4,57 = 3,428 \text{ мм}$.

Для проведения расчёта основных параметров связанной симметричной линии (рис. 5.19 б)) воспользуемся программой TXLINE (рис. 5.22).

Рисунок 5.22 – Определение основных размеров полосковой линии с применением программы TXLINE.

В программе TXLINE ширина проводника (W) получилась, равной 3,412 мм, при теоретическом расчёте $W = 3,428$ мм, длина полоска L при расчёте в программе TXLINE получилась, равной 47,88 мм, при теоретическом расчёте $L = 47,85$ мм.

2. Проектирование направленного ответвителя.

После нахождения основных габаритов симметричной полосковой линии спроектируем направленный ответвитель в CST MICROWAVE STUDIO. Причём данный направленный будет реализован на полосковой линии с комбинированной лицевой связью (рис. 5.23).

Рисунок 5.23 – Общая модель направленного ответвителя с комбинированной лицевой связью.

					110303.2018.233.00.00 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докцм.	Подп.	Дата		62

Для проектирования направленного ответвителя известны следующие параметры: S (толщина диэлектрика на котором располагаются полоски) равна 0,5 мм, $\frac{b}{2}$ – ширина диэлектрических обкладок, равна 2 мм, H – расстояние между внешней металлизацией, равно 4,57 мм. Необходимо определить область перекрытия W_c и ширину полосковой линии W . Для определения области перекрытия и ширины полосковой линии воспользуемся справочником Фельдштейна [11]. Для 8 дБ направленного ответвителя $W = 2,3$ мм, $W_c = 0,3$ мм.

При проектировании направленного ответвителя в CST MICROWAVE STUDIO использовались пособия [13], [14].

При проектировании 8 дБ направленного ответвителя в CST MICROWAVE STUDIO была создана его электродинамическая модель (рис. 5.24). Для получения необходимых АФР направленного ответвителя была подобрана величина области связи $W_c = 0,15$ мм.

Рисунок 5.24 – Электродинамическая модель направленного ответвителя

После проведения расчёта направленного ответвителя в CST MICROWAVE STUDIO временным методом (Time Domain Solver), получены необходимые амплитудно-фазовые распределения (АФР) на его выходах.

Рисунок 5.25 – Амплитудные распределения на выходах направленного ответвителя

Рисунок 5.26 – Фазовые распределения на выходах направленного ответвителя

					<i>110303.2018.233.00.00 ПЗ</i>	<i>Лист</i>
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подп.</i>	<i>Дата</i>		<i>64</i>

Рисунок 5.27 – КСВН

Таким образом, после проведения расчёта направленного ответвителя были получены следующие результаты:

- 1) Коэффициент связи – 8,041 дБ.
- 2) Развязка – 29,98 дБ.
- 3) Разность фаз между основной и связанной линией – 90°.
- 4) КСВН в рабочей полосе частот 990 – 994,8 МГц не превышает 1,12.

Результаты, полученные при проектировке направленного ответвителя, полностью соответствуют требованиям, предъявляемым по ТЗ. После проведения расчёта направленного ответвителя можно переходить к его конструктивной реализации.

6 КОНСТРУКТОРСКИЙ РАЗДЕЛ

В состав конструкции разработанного направленного ответвителя входят следующие основные части:

1) Печатные платы (плата полосковая 110303.2018.233.00.01, плата полосковая 110303.2018.233.00.02, плата полосковая 110303.2018.233.00.03).

2) Две крышки (110303.2018.233.00.04 и 110303.2018.233.00.05).

3) Разъёмы.

Рассмотрим более подробно особенности каждой конструктивной части направленного ответвителя.

Центральная печатная плата (рис. 6.1) (плата полосковая 110303.2018.233.00.01) имеет компактные габаритные размеры 77×36 мм, причём данная печатная плата является двухсторонней.

Рисунок 6.1 – Плата полосковая 110303.2018.233.00.01 (Слой 1 – изображение слева, Слой 2 – изображение справа)

В качестве ламината для изготовления центральной печатной платы выбран материал ARLON AD250 PTFE 0,508 Cu 35/35 DK=2,5. Данный фольгированный диэлектрик состоит из пористого материала на основе тефлона, имеет толщину диэлектрика 0,5 мм, диэлектрическую проницаемость, равную 2,5. С обеих сторон диэлектрика нанесена медная фольга толщиной 35 мкм. Фирма Arlon предоставляет широкий спектр фольгированных материалов с толщинами материала от 0,3 мм до 3,5 мм, и диэлектрической проницаемостью материала от 2,5 до 11. Ламинат ARLON был выбран, так как он отличается высокой прочностью, повторяемостью

					<i>110303.2018.233.00.00 ПЗ</i>	<i>Лист</i> 66
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подп.</i>	<i>Дата</i>		

параметров, долговечностью работы, а также из-за того, что данный материал широко распространён в отечественной промышленности.

Для изготовления полосковой платы 110303.2018.233.01 был выбран комбинированный позитивный метод. После изготовления металлизированные части печатного узла покрываются составом Ср6 (гальваническое серебрение) или покрытие сплавом олово-висмут О-Ви (99,8)9 без оплавления. Данные покрытия обеспечивают хорошую электропроводность, низкое переходное сопротивление, а также высокую степень защиты от коррозии. На печатной плате 110303.2018.233.01 сделано 4 отверстия, диаметром 3,2 под винты М3-6g×14.36.016 ГОСТ 17473-80 [16].

В качестве согласованной нагрузки для развязанного плеча центральной платы направленного ответвителя (плата полосковая 110303.2018.233.01) был выбран толстоплёночный чип-резистор общего применения P-12-1-50 Ом±0,5-Т-П-М АБШК.434110.023 ТУ. Данный чип резистор имеет номинальное сопротивление 50 Ом с допустимым отклонением от номинала ±0,5 % и номинальную мощность рассеивания 1 Вт. Резистор P-12-1-50 Ом±0,5-Т-П-М АБШК.434110.023 ТУ можно использовать в диапазоне температурах -60 °С до +120 °С.

Обкладки полосковой линии (рис. 6.2, рис 6.3) (плата полосковая 110303.2018.233.00.02 и плата полосковая 110303.2018.00.03) также, как и центральная плата (плата полосковая 110303.2018.233.00.01) имеют размеры 77×36 мм. Материалом для данных плат также был выбран ламинат фирмы Arlon: ARLON AD250 PTFE 0,508 Cu 35/35 DK=2,5, с диэлектрической проницаемостью, равной 2,5, толщиной диэлектрика 2 мм и толщиной медной фольги 35 мкм.

					<i>110303.2018.233.00.00 ПЗ</i>	<i>Лист</i>
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подп.</i>	<i>Дата</i>		67

Рисунок 6.2 – Плата полосковая 110303.2018.233.00.02 (Слой 1 – изображение слева, слой 2 – изображение справа)

Рисунок 6.3 – Плата полосковая 110303.2018.233.00.03 (Слой 1 – изображение слева, слой 2 – изображение справа)

Экранировочные платы (плата полосковая 110303.2018.233.00.02 и плата полосковая 110303.2018.00.03) изготавливаются комбинированным позитивным методом. После травления платы все металлизированные поверхности покрываются составом Ср6 или О-Ви (99,8)9 без оплавления.

В каждой из обкладок полосковой линии (плата полосковая 110303.2018.233.00.02 и плата полосковая 110303.2018.00.03) имеется по 4 отверстия диаметром 3,2 мм, необходимыми для крепления данных плат к центральной плате (плата полосковая 110303.2018.233.00.01) при помощи 4 винтов М3-6g×14.36.016 ГОСТ 17473-80 [16] и обеспечения этим хорошей электромагнитной связи между печатными платами. В экранировочной плате (плата полосковая 110303.2018.233.00.03) сделан вырез под резистор Р-12-1-50 Ом±0,5-Т-П-М АБШК.434110.023 ТУ (рис. 6.4).

					<i>110303.2018.233.00.00 ПЗ</i>	<i>Лист</i>
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подп.</i>	<i>Дата</i>		<i>68</i>

Рисунок 6.4 – Вырез по резистор в плате полосковой 110303.2018.233.00.03

Корпус направленного ответвителя состоит из двух крышек 110303.2018.233.00.04 (рис. 6.5) и 110303.2018.233.00.05 (рис. 6.6). Данные крышки обеспечивают прочность, жёсткость конструкции, а также защищают полосковые платы, располагающиеся под, ними от механических воздействий.

Рисунок 6.5 – Крышка 110303.2018.233.00.04

Рисунок 6.6 – Крышка 110303.2018.233.00.05

Материалом для крышек был выбран Алюминиевый лист АМг6. МЗ ГОСТ 21631-76 [15], толщиной 3 мм. В крышках 110303.2018.233.00.04 и

					<i>110303.2018.233.00.00 ПЗ</i>	<i>Лист</i>
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подп.</i>	<i>Дата</i>		<i>69</i>

110303.2018.233.00.05 выполнено по 10 отверстий под винты МЗ-6g×14.36.016 ГОСТ 17473-80 [16] и МЗ-6g×7.36.016 ГОСТ 17473-80 [16].

На лицевую сторону крышки 110303.2018.233.00.04 наносится маркировка (рис. 6.5), выполняемая методом лазерного маркирования или при отсутствии лазерного маркировки маркировка осуществляется краской МКЭ чёрной ОСТ 107.9.4003-96 (Шрифт 3-Пр3 ГОСТ 26.008-85 [17]).

На крышки 110303.2018.233.00.04 и 110303.2018.233.00.05 наносится покрытие Хим.Н6.О-С (60)9, для повышения электропроводности.

В качестве разъёмов для направленного ответвителя были выбраны разъёмы РТС ТЖЗ.640.061-1 (рис. 6.7), изготавливаемые на ЧРЗ “Полёт”.

Рисунок 6.7 – Разъём РТС ТЖЗ.640.061-1

Рассмотрим процесс сборки конструкции направленного ответвителя.

На центральную плату направленного ответвителя (плата полосковая 110303.2018.233.00.01) устанавливается резистор Р-12-1-50 Ом±0,5-Т-П-М АБШК.434110.023 (поз. 11) (рис. 6.8). Вариант установка резистора Р-12-1-50 Ом±0,5-Т-П-М АБШК.434110.023 (R1) показан на рисунке 6.9. При пайке резистора используется припой ПОСК 50-18 ГОСТ 21930-76 (п.2 на рис. 6.9). Покрытие элемента и места пайки осуществляется лаком УР-231 УХЛ2.3 ТУ 6-21-14-90.

					<i>110303.2018.233.00.00 ПЗ</i>	<i>Лист</i>
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подп.</i>	<i>Дата</i>		<i>70</i>

11

Рисунок 6.8 – Установка резистора R-12-1-50 Ом±0,5-Т-П-М
АБШК.434110.023 на центральной плате (плата полосковая 110303.2018.233.00.01)

Установка резистора R1 поз. 11 М5:1

Рисунок 6.9 – Вариант установки резистора R1 (R-12-1-50 Ом±0,5-Т-П-М
АБШК.434110.023)

Разъёмы устанавливаются на предназначенные для них места на центральной полосковой плате (плата полосковая 110303.2018.233.00.01)), промаркированные XW1, XW2, XW2 (рис. 6.10, рис. 6.11).

Рисунок 6.10 – Расположение разъёмов XW1 и XW2 на полосках
центральной платы

					<i>110303.2018.233.00.00 ПЗ</i>	<i>Лист</i>
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подп.</i>	<i>Дата</i>		71

Рисунок 6.11 – Расположение разъёма XW3 на плате полосковой
110303.2018.233.00.01

Для устранения зазоров между разъёмами РТС ТЖЗ.640.061-1 (XW1, XW2, XW3) и крышками (110303.2018.233.00.04 и 110303.2018.233.00.05) используются прокладки ТЖ8.680.761 (рис. 6.12).

Рисунок 6.12 – Установка разъёмов XW1, XW2, XW3

На рисунке 6.12 размеры А и Б обеспечиваются прокладками поз. 9 (ТЖ8.680.761).

Поверх центральной платы располагаются обкладки полосковой линии (плата полосковая 110303.2018.233.00.02 и плата полосковая 110303.2018.00.03) (рис. 6.13).

Рисунок 6.13 – Установка обкладок полосковой линии

Поверх обкладок полосковой линии устанавливаются крышки (110303.2018.233.00.04 и 110303.2018.233.00.05) (рис.6.14). Данные крышки фиксируются 4 винтами М3-6g×14.36.016 ГОСТ 17473-80 [16] на которые накручиваются гайки М3.016 ГОСТ 5916-70, а также 12 винтами, М3-6g×7.36.016 ГОСТ 17473-80 [16] (рис.6.15), обеспечивающими крепление разъемов к крышкам (110303.2018.233.00.04 и 110303.2018.233.00.05). После затяжки крепёжные детали покрываются лаком АК-113.У1 ГОСТ 23832-79 [18].

Рисунок 6.14 – Установка крышек (110303.2018.233.00.04 и 110303.2018.233.00.05).

					<i>110303.2018.233.00.00 ПЗ</i>	<i>Лист</i>
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подп.</i>	<i>Дата</i>		73

Рисунок 6.15 – Фиксация конструкции винтами

Рисунок 6.16 – Конструкция направленного ответвителя

					<i>110303.2018.233.00.00 ПЗ</i>	<i>Лист</i>
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ док.м.</i>	<i>Подп.</i>	<i>Дата</i>		74

6. МОДЕЛЬ УСТРОЙСТВА РЕГУЛИРОВКИ КУРСА. РАСЧЁТЫ ПО СОВМЕЩЕНИЮ “0” ДН ОД И МД

Корректировка положения ДН разностного канала на частоте 992 МГц (АФР на 992 МГц (дел. 2.207.114 №3)) проводится для того, чтобы при заходе на посадку самолёт не отклонялся от ВПП. Допустимое значение отклонения самолёта от ВПП должно составлять не более ± 7 м. ДН разностного типа на частоте 992 МГц (АФР на 992 МГц (дел. 2.207.114 №3)) отклонена на $0,325^\circ$ от ДН разностного канала на частоте 930 МГц (АФР на 930 МГц (дел. 2.207.114 №3)). В реальности это приведёт к тому что самолёт отклонится от ВПП на 23 м (рис. 7.1, формула 7.1).

$$l = 4000 \text{ м} \times \operatorname{tg}(0,325^\circ) = 23 \text{ м} \quad (7.1)$$

Рисунок 7.1 – Заход на посадку самолёта: а) без совмещения “0” ДН в ОД и МД, б) при совмещении “0” ДН в ОД и МД

Исходя из выше приведённого рисунка (рис. 7.1) видно, что необходимо провести совмещение “0” ДН ОД и МД.

Для того чтобы произвести совмещение “0” ДН разностного канала на частоте 992 МГц (АФР на 992 МГц (дел. 2.207.114 №3)) и разностной ДН на

частоте 930 МГц (АФР на 930 МГц (дел. 2.207.114 №3)) используется методика электронной регулировка курса (ЭРК).

Ниже рассмотрим суть методики ЭРК.

ДН разностного канала на частоте 992 МГц (АФР на 992 МГц (дел.2.207.114 №3)) имеет ошибку «смещения». Для устранения ошибки «смещения» сигнал разностного канала U_{Δ} , умножается на выражение $\sqrt{1-\alpha_1^2}$, (где α_1 равен 0,4 (8 дБ)) и складывается с сигналом суммарного канала $-U_{\Sigma}$, умноженным на коэффициент α_2^* (где значение коэффициент α_2^* подбирается из диапазона: от 0,2 до 0). Корректировка положения ДН проводится за счёт подбора, такого коэффициента α_2^* , при котором происходит совмещение “0” ДН разностного канала ОД и МД.

Для расчёта разностной ДН в МД с учётом коррекции используется следующая формула:

$$\tilde{F}_{\Delta}(\varphi) = \sqrt{1-\alpha_1^2} F_{\Delta}(\varphi) - \alpha_2^* F_{\Sigma}(\varphi) \quad (7.2)$$

где $\tilde{F}_{\Delta}(\varphi)$ – это ДН разностного типа МД с учётом электронной регулировки курса;

$F_{\Delta}(\varphi)$ – это ДН разностного канала МД (АФР на 992 МГц (дел. 2.207.114 №3));

$F_{\Sigma}(\varphi)$ – это ДН суммарного канала МД (АФР на 992 МГц (дел. 2.207.113 №2));

$$F_{\Delta}(\varphi) = \sum_{n=1}^{N=10} A_n e^{jk z_n \sin(\varphi)} e^{j\Phi_n};$$

$$F_{\Sigma}(\varphi) = \sum_{n=3}^{N=8} A_n e^{jk z_n \sin(\varphi)};$$

$$\alpha_1 = 0,4;$$

$$\alpha_2^* = \alpha_1 \times \alpha_2;$$

α_2^* перебирается от 0,2 до 0;

φ – угол, отсчитываемый от нормали.

Смещение ДН МД проводится за счёт изменения коэффициента α_2^* от 0,2 до 0. Причём при подборе «нужного» коэффициента α_2^* , происходит смещение разностной ДН на частоте 992 МГц в “0”.

Построим ДН с учётом ЭРК:

Рисунок 7.2 – ДН разностного канала с учётом ЭРК, при $\varphi (-90^\circ, 90^\circ)$

					<i>110303.2018.233.00.00 ПЗ</i>	<i>Лист</i>
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подп.</i>	<i>Дата</i>		77

Рисунок 7.3 – ДН разностного канала с учётом ЭРК, при $\varphi (-1^\circ, 1^\circ)$

Исходя из полученных ДН с учётом коррекции, видно, что при $\alpha_2^* = 0,055$ (25 дБ) происходит совмещение “0” ДН МД и ОД.

Для совмещения ДН в ОД и МД используется устройство электронной регулировки курса (ЭРК), состоящее из двух направленных ответвителей (WX1 и WX2) и одного аттенюатора (рис. 7.4).

Рисунок 7.4 – Модель устройства ЭРК

					<i>110303.2018.233.00.00 ПЗ</i>	<i>Лист</i>
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ док.м.</i>	<i>Подп.</i>	<i>Дата</i>		<i>78</i>

В данной работе был спроектирован в программе CST MICROWAVE STUDIO [13, 14] 8дБ направленный ответвитель (WX1), реализованный на симметричной полосковой линии с комбинированной лицевой связью. Была разработана конструкция направленного ответвителя, а также оформлен полный комплект КД, соответствующий требованиям ЕСКД.

					<i>110303.2018.233.00.00 ПЗ</i>	<i>Лист</i>
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подп.</i>	<i>Дата</i>		79

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. В данной работе проведено исследование возможности работы штатной системы КРМ (Курсовой радиомаяк) системы посадки ПРМГ-76У в двухчастотных диапазонах: существующий рабочий диапазон 927 МГц – 932 МГц (отечественный диапазон - ОД), дополнительный международный диапазон частот 990 МГц – 994,8 МГц (МД).

2. В результате экспериментальных исследований получено, что используемые делители мощности (2.207.114 №3 и 2.207.113 №2) создают амплитудно-фазовые распределения (АФР) практически одинаковые на частотах ОД и МД, следовательно, они могут быть использованы.

3. Разработана модель фидерного тракта, а также выполнена фазировка, то есть были получены требуемые фазовые соотношения на выходах излучателей в требуемом диапазоне. Были рассчитаны АФР на выходах излучателей при использовании этой модели, применительно к сигналам МД. После получения АФР на выходах излучателей были рассчитаны ДН суммарного и разностного каналов в ОД и МД. Полученная ДН разностного канала МД оказалась смещённой на $0,325^\circ$ вправо относительно разностной ДН ОД.

4. Для совмещения ДН в ОД и МД была проанализирована модель устройства ЭРК, полученные результаты показывают, что при ответвлении разностного сигнала в суммарную ДН при $\alpha_2^* = 0,055$ (25 дБ) можно идеально совместить ДН своими “0” в положении ВПП.

5. В работе был спроектирован направленный ответвитель, входящий в состав устройства ЭРК. Направленный ответвитель был реализован на симметричной полосковой линии с комбинированной лицевой связью. При проектировании направленного ответвителя использовалась система для моделирования СВЧ устройств: CST MICROWAVE STUDIO. На конструкцию

					110303.2018.233.00.00 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата		80

направленного ответвителя был оформлен полный комплект КД, соответствующий требованиям ЕСКД.

6. Таким образом, данная работа показывает, что в новой двухдиапазонной антенне КРМ можно использовать существующий фидерный тракт антенны КРМ системы ПРМГ-76 У(М), при этом необходимо для совмещения ДН в ОД и МД использовать устройство ЭРК. Также необходимо разработать новый двухдиапазонный излучатель. Такая задача не стояла в данной работе.

Требования технического задания были полностью выполнены.

					<i>110303.2018.233.00.00 ПЗ</i>	<i>Лист</i>
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подп.</i>	<i>Дата</i>		<i>81</i>

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Пахолков, Г.А. Угломерные радиотехнические системы посадки: (Прогнозирование точностных характеристик) / Г.А. Пахолков, М.Е. Соломник, Ю.Г. Шатраков. – М.: Транспорт, 1982. – 159 с.
2. Сазонов, Д.М. Антенны и устройства СВЧ: Учеб. Для радиотехнич. спец. вузов / Д.М. Сазонов. – М.: Высш. шк., 1988. – 432 с.
3. Пименов, В.Ю. Техническая электродинамика / В.Ю. Пименов, В.И. Вольман, А.Д. Муравцов. – М.: Радио и Связь, 2000. – 536 с.
4. Никольский, В.В. Автоматизированное проектирование устройств СВЧ / В.В. Никольский, В.П. Орлов, В.В. Феоктистов. – М.: Радио и связь, 1982. – 272 с.
5. Мещанов, В.П. Автоматизированное проектирование направленных ответвителей СВЧ / В.П. Мещанов, А.Л. Фельдштейн. – М.: Связь, 1980. – 144 с.
6. Бахарев, С.И. Справочник по расчёту и конструированию СВЧ полосковых устройств / С.И. Бахарев, В.И. Вольман, Ю.Н. Либ. – М.: Радио и связь, 1982. – 382 с.
7. Воскресенский, Д.И. Устройства СВЧ и антенны / Д.И. Воскресенский, В.Л. Гостюхин, В.М. Максимов, Л.И. Пономарёв. – М.: Радиотехника, 2006. – 376 с.
8. Малорацкий, Л.Г. Проектирование и расчёт СВЧ элементов на полосковых линиях / Л.Г. Малорацкий, Л.Р. Явич. – М.: Советское радио, 1972. – 232 с.
9. Нефёдов, Е.И. Полосковые линии передачи / Е.И. Нефёдов, А.Т. Фиалковский. – М.: Наука, 1980. – 312 с.
10. Семёнов, Н.А. Техническая электродинамика. Учебное пособие для вузов / Н.А. Семёнов. – М.: Связь, 1973. – 480 с.
11. Мазепова, О.И. Справочник по элементам полосковой техники / О.И. Мазепова, В.П. Мещанов, Н.И. Прохорова, А.Л. Фельдштейн, Л.Р. Явич. – М.: Связь, 1973. – 336 с.

					110303.2018.233.00.00 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата		82

12. Фельдштейн, А.Л. Синтез четырёхполюсников и восьмиполюсников на СВЧ / А.Л. Фельдштейн, Л.Р. Явич. – М.: Связь, 1971. – 388 с.

13. CST Microwave studio: workflow & solver overview // Computer simulation technology AG. – 2010. – 110 с.

14. Бухарин В. А., Попов И. А. Введение в CST Microwave Studio: Учебное пособие. – Челябинск: Изд-во ЮУрГУ, 2010. – 97 с.

15. ГОСТ 21631–76. Листы из алюминия и алюминиевых сплавов. ТУ. – М.: ФГУП Стандартиформ, 2008. – 39 с.

16. ГОСТ 17473-80. Винты с полукруглой головкой классов точности А и В. Конструкция и размеры. – М.: Издательство стандартов, 1989. – 15 с.

17. ГОСТ 26.008-85. Шрифты для надписей, наносимых методом гравирования. – М.: Издательство стандартов, 1995. – 35 с.

18. ГОСТ 23832-79. Лак АК-113 и АК-113Ф. ТУ. – М.: Издательство стандартов, 1999. – 9 с.

					<i>110303.2018.233.00.00 ПЗ</i>	<i>Лист</i>
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подп.</i>	<i>Дата</i>		<i>83</i>

ПРИЛОЖЕНИЕ А

Плата полосковая

110303.2018.233.00.01

					<i>110303.2018.233.00.00 ПЗ</i>	<i>Лист</i>
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подп.</i>	<i>Дата</i>		84

ПРИЛОЖЕНИЕ Б

Плата полосковая

110303.2018.233.00.02

					<i>110303.2018.233.00.00 ПЗ</i>	<i>Лист</i>
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подп.</i>	<i>Дата</i>		<i>86</i>

ПРИЛОЖЕНИЕ В

Плата полосковая

110303.2018.233.00.03

					<i>110303.2018.233.00.00 ПЗ</i>	<i>Лист</i>
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подп.</i>	<i>Дата</i>		<i>88</i>

ПРИЛОЖЕНИЕ Г

Крышка

110303.2018.233.00.04

					<i>110303.2018.233.00.00 ПЗ</i>	<i>Лист</i>
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подп.</i>	<i>Дата</i>		<i>90</i>

ПРИЛОЖЕНИЕ Д

Крышка

110303.2018.233.00.05

					<i>110303.2018.233.00.00 ПЗ</i>	<i>Лист</i>
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подп.</i>	<i>Дата</i>		92

ПРИЛОЖЕНИЕ Е

Направленный ответитель

Сборочный чертёж

110303.2018.233.00.06 СБ

					<i>110303.2018.233.00.00 ПЗ</i>	<i>Лист</i>
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подп.</i>	<i>Дата</i>		<i>94</i>

ПРИЛОЖЕНИЕ Ж

Направленный ответитель

Спецификация

110303.2018.233.00.06

					<i>110303.2018.233.00.00 ПЗ</i>	<i>Лист</i>
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подп.</i>	<i>Дата</i>		<i>96</i>