

На правах рукописи

Епишкина Виктория Николаевна

**ОСОБЕННОСТИ ПОСТРОЕНИЯ ШИРОКОДИАПАЗОННОЙ
СИСТЕМЫ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ СВЧ-СИГНАЛА ДЛЯ
ФАЗИРОВАННЫХ АНТЕННЫХ РЕШЕТОК БОРТОВЫХ РЛС
С ВЫСОКОЙ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТЬЮ**

Специальность 05.12.07 -

Антенны, СВЧ-устройства и их технологии

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Москва – 2008г.

Работа выполнена в ОАО «НИИП»

Научный руководитель: доктор технических наук,
старший научный сотрудник
Синани Анатолий Исакович

-

Официальные оппоненты: доктор технических наук, профессор
Кашин Валерий Акимович

доктор технических наук, профессор
Николаев Александр Иванович

Ведущая организация: ОАО «МНИИРЭ «Альтаир»

Защита диссертации состоится « » **200 г. в часов** на заседании диссертационного совета Д 212.141.11 при Московском государственном техническом университете им. Н. Э. Баумана по адресу: 105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д.5

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке МГТУ им. Н.Э.Баумана.

Ваши отзывы на автореферат в двух экземплярах, заверенные печатью учреждения, просим направлять по адресу: 105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д.5, МГТУ им. Н. Э. Баумана, ученому секретарю диссертационного совета Д 212.141.11.

Автореферат разослан «___»_____200 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
доктор технических наук,
профессор, зав. отд. НИИ РЛ

Власов И.Б.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Современные бортовые радиолокационные прицельные комплексы (РЛПК) должны обладать рядом характерных боевых и функциональных возможностей, в значительной степени определяющих выбор основных принципов построения составных частей РЛПК, включая антенну. К числу этих качеств относятся:

- многоцелевая работа в режимах обзора и сопровождения целей в широком секторе сканирования (до $\pm 60^\circ$ и выше);
- излучение и прием зондирующих сигналов в X-диапазоне волн в диапазоне частот $10\%f_0$ и более;
- большая дальность обнаружения воздушных и наземных целей в условиях естественных и искусственных помех.

Совокупности перечисленных требований в полной мере отвечают только радары с электронным управлением лучом. Именно поэтому в последние годы разработчики и производители радиолокационных комплексов и антенн так много внимания уделяют решению теоретических вопросов построения и технологии создания антенных систем с электронным управлением лучом (АС с ЭУЛ).

Из всех возможных вариантов радаров наиболее сложными и противоречивыми с точки зрения проектирования и реализации в производстве являются системы управления вооружением истребителей. Это связано с тем, что на борту истребителя в максимально ограниченном объеме и с жесткой регламентацией по массе и энергопотреблению требуется обеспечить электронное управление лучом с характеристиками излучения, превосходящими другие применения АС с ЭУЛ, в более широком рабочем диапазоне частот, с конструкторским выполнением, отвечающим требованиям технологии массового производства. Одним из основных вариантов, позволяющих решить эту технически сложную и **актуальную** с точки зрения обеспечения боевой эффективности и живучести авиационного комплекса задачу является создание фазированной антенной решетки (ФАР) с волноводной распределительной системой (ВРС) строчно-столбцового типа. Именно такая схема ВРС среди известных типов распределительных систем по своей компоновке и габаритам наиболее полно отвечает требованиям размещения в носовом отсеке истребителя, а также позволяет формировать в апертуре ФАР амплитудное распределение (АР) любой заданной формы при высоких точности реализации и КПД. Известные разработки ОАО «НИИП» (СУВ «Заслон» с ФАР Б1.01М, РЛСУ «Барс» с ФАР Н11.01.01М и др.), где выполняется настоящая диссертационная работа, во многом за счет применения ВРС, по параметру высокой энергетической эффективности превосходят все отечественные и зарубежные аналоги в (1.5...1.7) раза. Однако это поколение бортовых ФАР, обладая таким качеством, рассчитано на работу в сравнительно узком рабочем диапазоне частот $f_0 \pm (2.5...3.5)\%$ и относится к размерности самолетов с миделем $\sim 1000\text{мм}$, что в пересчет к X-диапазону составляет $\sim 20\lambda...30\lambda$. На современном же этапе, в связи с ростом требований повышения

помехозащищенности, обеспечения электромагнитной совместимости, интеграции различных составных частей комплекса бортового оборудования (КБО), например РЛС и КРЭБ и др., возникает совершенно **новая проблема** достижения высокой энергетической эффективности ФАР, особенно с малым размером апертуры $\sim 10\lambda \dots 12\lambda$, в сочетании со значительным ($\sim 40\%f_0$) расширением диапазона рабочих частот. Кроме того, **актуальным** становится расширение функциональных задач БРЛС, в частности, повышение разрешающей способности в режимах «воздух-поверхность», работа по низколетящим целям, требующие снижения уровня боковых лепестков (УБЛ) диаграммы направленности (ДН) по суммарно-разностным каналам моноимпульсной ФАР в широком диапазоне частот. Настоящая диссертационная работа посвящена решению перечисленных актуальных для бортовых РЛС задач, прежде всего построению ВРС для малоразмерных ФАР ($\sim 10\lambda \dots 12\lambda$) и развитию найденных методов проектирования ВРС для размеров апертур до $20\lambda \dots 30\lambda$, в которых реализуется АР с высокой точностью в широком диапазоне частот ($\sim 40\%f_0$), а также построению ВРС для моноимпульсных ФАР с высокой энергетической эффективностью, обеспечивающей снижение УБЛ диаграммы направленности по разностному каналу при сохранении характеристик суммарного канала в расширенном диапазоне частот.

Объектом настоящей работы является строчно-столбцовая волноводная распределительная система ФАР X-диапазона, включающая в себя горизонтальные линейки и запитывающий их вертикальный Главный распределитель (ГР), которые в совокупности формируют заданное амплитудное распределение в апертуре бортовой ФАР и требуемое фазовое распределение для моноимпульсной пеленгации.

Предмет исследования – свойства ВРС и основные ее параметры, определяющие высокую энергетическую эффективность ФАР в широком диапазоне частот $\sim 40\%f_0$.

Целью работы является разработка теоретических и инженерных основ увеличения рабочего диапазона частот ВРС до $40\%f_0$ и более в сочетании с обеспечением высокой энергетической эффективности в составе бортовой ФАР.

Задачи исследования. Для достижения поставленной цели определены следующие задачи исследования:

1. Исследование ВРС и входящей в нее элементной базы в широком диапазоне частот.
2. Разработка метода математического моделирования ВРС в широком диапазоне частот.
3. Создание усовершенствованной элементной базы для ВРС, работающей в широком диапазоне частот.

4. Исследование особенностей создания ВРС на основе традиционной и усовершенствованной элементной базы в широком диапазоне частот.

5. Создание ВРС для моноимпульсной ФАР, обеспечивающей снижение УБЛ диаграммы направленности по разностному каналу при сохранении характеристик суммарного канала в расширенном диапазоне частот.

6. Экспериментальное подтверждение проведенных в диссертации теоретических исследований.

Научная новизна.

1. Впервые проведено исследование ВРС и входящих в нее элементов в широком диапазоне частот.

2. Разработан метод математического моделирования ВРС в широком диапазоне частот для ФАР с высокой энергетической эффективностью.

3. Предложен способ проектирования усовершенствованных широкодиапазонных базовых элементов (направленных ответвителей, балансных восьмиполюсников и др.), на основе которых следует выполнять широкодиапазонную ВРС с высоким КПД.

4. Разработаны принципы построения линейных распределителей с большими связями в широком диапазоне частот.

5. Разработаны способы создания ВРС для моноимпульсной ФАР, обеспечивающей снижение УБЛ диаграммы направленности по разностному каналу при сохранении характеристик суммарного канала в расширенном диапазоне частот.

На защиту выносятся:

1. Метод математического моделирования, позволяющий анализировать широкодиапазонную ВРС с высоким КПД.

2. Усовершенствованная элементная база, созданная для ВРС с высоким КПД и работающая в расширенном диапазоне частот.

3. Широкодиапазонная ВРС для ФАР с высокой энергетической эффективностью.

4. Широкодиапазонная ВРС для моноимпульсной ФАР, обеспечивающая снижение УБЛ диаграммы направленности по разностному каналу при сохранении характеристик суммарного канала в расширенном диапазоне частот.

5. Результаты теоретических и экспериментальных исследований широкодиапазонной системы распределения СВЧ-сигнала для ФАР с высокой энергетической эффективностью.

Практическая значимость диссертационной работы состоит в том, что определены основные принципы создания широкодиапазонной ВРС для ФАР X-диапазона с высокой энергетической эффективностью, которые могут быть применены при проектировании аналогичных систем распределения различного назначения, а также разработан метод математического моделирования широкодиапазонных ВРС.

Практическая значимость подтверждена **внедрением** полученных результатов в разработки ОАО «НИИП»: ФАР «СуперСкат» для РЛСУ «Ирбис» истребителя СУ-35 и ФАР «Скат-μ» для РЛПК «Оса» легких фронтовых истребителей класса МИГ-21, МИГ-29 УБТ, ЯК-130.

Основные положения и результаты диссертационной работы докладывались на конференциях:

1. 17-я научно-техническая конференция ГП НИИ Приборостроения им. В.В. Тихомирова, Жуковский, 2002г. (С участием научно-исследовательских институтов и ведущих предприятий оборонно-промышленного комплекса РФ).

2. 18-я научно-техническая конференция. ОАО «НИИП», Жуковский, 16-18 февраля 2005г. (С участием научно-исследовательских институтов и ведущих предприятий оборонно-промышленного комплекса РФ).

3. 3-я научно-техническая конференция «Радиооптические технологии в приборостроении. РТП-2005» Сочи, 12-16 сентября 2005г. (С участием стран СНГ).

4. 12я Международная научно-техническая конференция «Радиолокация, навигация, связь. RLNC-2006», Воронеж, 18-20 апреля 2006г.

5. 4-я научно-техническая конференция «Радиооптические технологии в приборостроении. РТП-2006» Туапсе 11-15 сентября 2006г. (С участием стран СНГ).

6. 19-я научно-техническая конференция. ОАО «НИИП», Жуковский, 21-22 ноября 2007г. (С участием научно-исследовательских институтов и ведущих предприятий оборонно-промышленного комплекса РФ).

7. Юбилейная научно-техническая конференция «Морские комплексы и системы», ОАО «МНИИРЭ «АЛЬТАИР» 15-16 октября 2008г. (С участием научно-исследовательских институтов и ведущих предприятий оборонно-промышленного комплекса РФ).

Основные научные и практические результаты диссертационной работы **использованы при написании 2 отчетов о НИР**, отражены в 8 научных статьях (из них 3 – по перечню, рекомендованных ВАК), изложены в 7 докладах на 7 научно-технических конференциях, защищены 3 патентами на изобретения, опубликована 1 заявка на изобретение.

Структура и объем диссертации. Диссертационная работа состоит из введения, пяти глав, заключения и списка литературы. Работа изложена на 142 страницах машинописного текста, содержит 56 рисунков и 16 таблиц. Список литературы включает 86 наименований.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** обоснована актуальность темы диссертационной работы, сформулирована цель, научная новизна и практическая значимость полученных результатов, дается краткое содержание глав работы. Кроме того, во вводной части диссертации сформулированы основные качества ВРС с большими связями направленных ответвителей (НО), определяющие высокую энергетическую эффективность и широкую диапазонность ФАР. Указаны параметры ВРС, ответственные за энергетическую эффективность в составе ФАР: амплитудное распределение (АР), характеризующее КИП антенны, и КПД ВРС, определяющий совместно с КИП коэффициент усиления. Определена основная особенность ВРС, проявляющаяся при ее работе в широком диапазоне частот и заключающаяся в появлении в этом диапазоне резонансных пиков.

В первой главе теоретически исследованы особенности расчета (синтеза и анализа) строчно-столбцовой ВРС в широком диапазоне частот для ФАР с высокой энергетической эффективностью. Основным вариант структурной схемы построения ВРС, рассматриваемый в настоящей работе показан на рис.1. Она включает в себя:

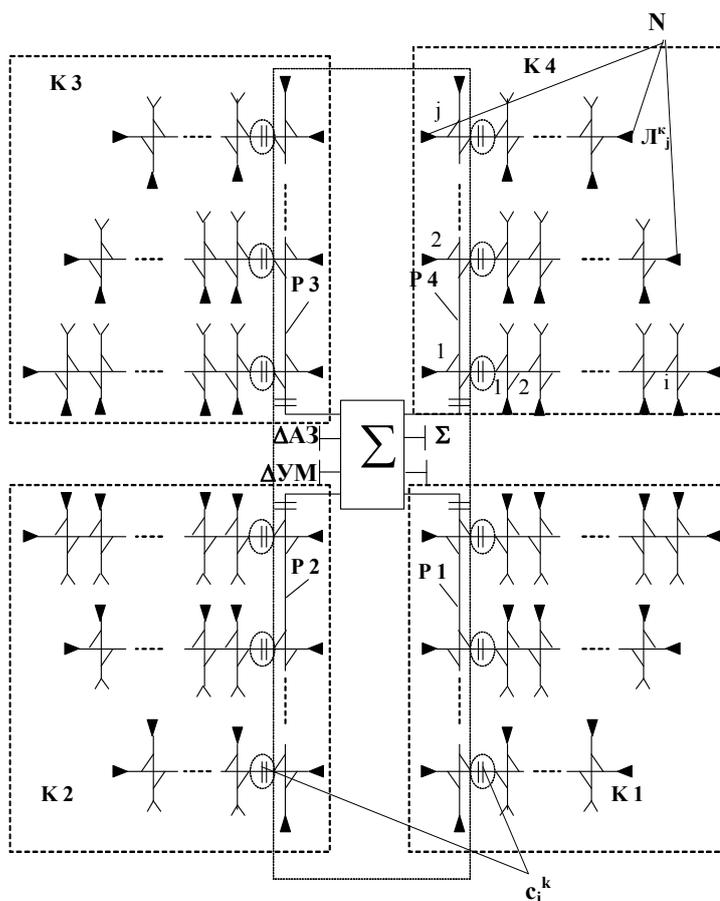


Рис.1. Структурная схема ВРС

- четыре строчно-столбцовых квадранта (K1 – K4), каждый из которых объединяет один линейный распределитель СВЧ-энергии (P1 – P4), разводящий СВЧ-сигнал от сумматора (Σ) в линейки ВРС, и j-линеек ВРС (L_j^k), канализирующих СВЧ-сигнал непосредственно в излучатели апертуры; индексами i и j обозначены номера каналов в линейках (L_j^k) и линейных распределителях (Pk), соответственно;

- СВЧ – сумматор (Σ) – волноводный шестнадцатиполюсник, выполненный из четырех балансных восьмиполюсников (тройников или мостов различных типов);

- соединительные и прочие волноводные элементы (нагрузки (N_i, N_j), скрутки (c_j) и т.д.).

Конструктивно линейные распределители (P1 – P4) обычно объединяются совместно с сумматором (Σ) в субблок, называемый Главным распределителем (ГР).

Теоретическое исследование проводилось на основе следующих, используемых в практике, математических моделей:

1. Энергетический метод (модель 1).
2. Матричный метод (модель 2, 3).
3. Электродинамический метод (модель 4).

Приведены алгоритмы расчета функциональных узлов ВРС (линейного распределителя и СВЧ-сумматора) для каждого из методов, а также определены критерии их использования в расширенном диапазоне частот. В процессе исследования разработан базовый метод математического моделирования ВРС в широком диапазоне частот при сохранении высокой энергетической эффективности ФАР – матрично - электродинамический метод (модель 3). При этом порядок математического моделирования конкретного функционального устройства ВРС (например, линейного распределителя) по этой модели заключается в следующем:

1. Решается задача синтеза с помощью энергетической модели, где по заданному AP на выходе линейного распределителя на средней частоте определяются переходные затухания НО (L_{n_i}) (во всех выходных каналах). Полученные значения L_{n_i} уточняются путем последовательного анализа ВРС с помощью модели 3 на соответствие заданному AP.

2. Решается задача анализа:

2.1. Рассчитываются матрицы рассеяния всех базовых элементов функциональных устройств ВРС в диапазоне частот на основе электродинамических алгоритмов, учитывающих многомодовую структуру поля в волноводе.

2.2. Рассчитываются функциональные устройства ВРС на основе многомодовых матриц рассеяния входящих в них элементов путем их каскадного соединения с помощью алгоритма:

$$|S_{\Sigma}(f)| = |S_{\alpha\alpha}(f)| + |S_{\alpha\beta}(f)|(|F| - |S_{\beta\beta}(f)|)^{-1} |S_{\beta\alpha}(f)| \quad (1)$$

2.3. Осуществляется каскадное соединение функциональных устройств между собой в ВРС энергетическим методом.

В широком диапазоне частот предложено использовать универсальные матрицы $|S_{\alpha\alpha}^n(f)|$, $|S_{\alpha\beta}^n(f)|$, $|S_{\beta\alpha}^n(f)|$, $|S_{\beta\beta}^n(f)|$ (таблицы 1, 2), где $|S_{\alpha\alpha}^n|$, $|S_{\alpha\beta}^n|$, $|S_{\beta\alpha}^n|$, $|S_{\beta\beta}^n|$ - матрицы связи между концами в n-ом элементе, подлежащими каскадному соединению, при этом индексы

$\alpha\alpha$ - обозначают концы, не подлежащие соединению;

$\beta\beta$ - подлежащие соединению;

$\alpha\beta$ - не подлежащие с подлежащими и

$\beta\alpha$ - подлежащие с не подлежащими.

$|F|$ - единичная матрица команд подключения концов.

Принцип построения предложенных универсальных матриц S_{ik}^n сводится к следующему:

1. Формируются матрицы рассеяния каждого n –ого элемента (таблица 1).
2. Фиксируются для каждого элемента номера концов, не подлежащих и подлежащих соединению.
3. Заполняются матрицы $|S_{\alpha\alpha}^n|$, $|S_{\alpha\beta}^n|$, $|S_{\beta\alpha}^n|$, $|S_{\beta\beta}^n|$ (таблица 2).
4. Записывается единичная матрица $|F|$ - команд подключения концов, при этом точка пересечения строк и столбцов, соответствующих соединяемым концам, обозначается 1, а остальные – 0.

В результате выполненного теоретического анализа особенностей использования при проектировании ВРС в широком диапазоне частот математического моделирования и поиска критериев применения различных моделей, показано, что

1. Энергетический метод расчета ВРС (модель 1) может применяться и в широком диапазоне частот при условии, что КСВ соединяемых каналов волноводных устройств в этом диапазоне не превышает 1.2, а направленность НО и развязки восьмиполосников – не хуже 15дБ...20дБ. (В частности энергетическим методом можно рассчитывать функциональные узлы, полученные с помощью модели 3).

2. Одномодовый метод каскадного соединения элементов (модель 2), рассчитанных одномодовым методом, из-за сильного расхождения расчетных характеристик с реальными в широком диапазоне частот к применению не рекомендуется.

3. Матрично - электродинамический метод (модель 3) может использоваться в широком диапазоне частот вплоть до появления резонансных пиков.

4. В области резонансных пиков математическое моделирование в широком диапазоне частот может выполняться только, хотя и с ограниченной точностью, на основе сложной электродинамической модели 4, учитывающей практически весь пакет волн.

Таблица 1

	1	2	3	4
1	$\alpha_1(f)$	$\beta_{12}(f)$	$\Delta_{13}(f)$	$\gamma_{14}(f)$
$S^n(f) = 2$	$\beta_{12}(f)$	$\alpha_2(f)$	$\gamma_{23}(f)$	$\Delta_{24}(f)$
3	$\Delta_{13}(f)$	$\gamma_{23}(f)$	$\alpha_3(f)$	$\beta_{34}(f)$
4	$\gamma_{14}(f)$	$\Delta_{24}(f)$	$\beta_{34}(f)$	$\alpha_4(f)$

Таблица 2

$$S_{\Sigma}(f) = \frac{S_{\alpha\alpha}(f) S_{\alpha\beta}(f)}{S_{\beta\alpha}(f) S_{\beta\beta}(f)}, \text{ где}$$

$$S_{\alpha\alpha}(f) = \begin{matrix} \text{Номера концов,} \\ \text{не подлежащих соединению} \end{matrix} \begin{matrix} \text{Номера концов,} \\ \text{не подлежащих соединению} \end{matrix}$$

$ S_{\alpha\alpha}^1(f) $	0	0	...	0
0	$ S_{\alpha\alpha}^2(f) $	0	...	0
0	0	$ S_{\alpha\alpha}^3(f) $...	0
...
0	0	0	...	$ S_{\alpha\alpha}^n(f) $

$$S_{\alpha\beta}(f) = \begin{matrix} \text{Номера концов,} \\ \text{подлежащих соединению} \end{matrix} \begin{matrix} \text{Номера концов,} \\ \text{не подлежащих соединению} \end{matrix}$$

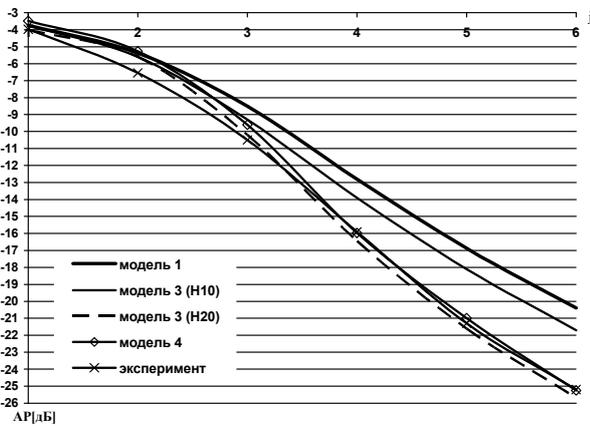
$ S_{\alpha\beta}^1(f) $	0	0	...	0
0	$ S_{\alpha\beta}^2(f) $	0	...	0
0	0	$ S_{\alpha\beta}^3(f) $...	0
...
0	0	0	...	$ S_{\alpha\beta}^n(f) $

$$S_{\beta\alpha}(f) = \begin{matrix} \text{Номера концов,} \\ \text{не подлежащих соединению} \end{matrix} \begin{matrix} \text{Номера концов,} \\ \text{подлежащих соединению} \end{matrix}$$

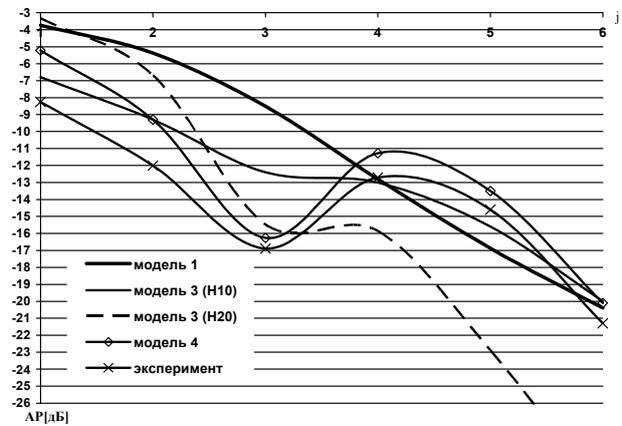
$ S_{\beta\alpha}^1(f) $	0	0	...	0
0	$ S_{\beta\alpha}^2(f) $	0	...	0
0	0	$ S_{\beta\alpha}^3(f) $...	0
...
0	0	0	...	$ S_{\beta\alpha}^n(f) $

$$S_{\beta\beta}(f) = \begin{matrix} \text{Номера концов,} \\ \text{подлежащих соединению} \end{matrix} \begin{matrix} \text{Номера концов,} \\ \text{подлежащих соединению} \end{matrix}$$

$ S_{\beta\beta}^1(f) $	0	0	...	0
0	$ S_{\beta\beta}^2(f) $	0	...	0
0	0	$ S_{\beta\beta}^3(f) $...	0
...
0	0	0	...	$ S_{\beta\beta}^n(f) $



а)



б)

Рис.2. Амплитудное распределение линейного распределителя, рассчитанное различными методами вблизи резонансных пиков на частоте $f=f_0+30.8\%f_0$ (а) и на частоте $f=f_0+35\%f_0$ (б)

Во второй главе проведено детальное исследование входящих в ВРС базовых элементов в широком диапазоне частот ($\sim 50\%f_0$): НО – составляющих основу линейных распределителей, и балансных восьмиполюсников, составляющих основу СВЧ-сумматоров, - предложен способ смещения резонансных пиков этих устройств за пределы расширенного диапазона частот.

Исследование широкоприменяемых (традиционных) в практике многощелевых НО (рис.3) показало, что большие связи таких НО (рис.4), особенно при использовании волноводов стандартного сечения, реализуется вблизи резонанса щелей ($l \geq 0.4\lambda$), возникающих достаточно близко к рабочему диапазону волн. Близость резонанса $f_{рез}$ к рабочему диапазону приводит к сильному изменению всех характеристик НО: $L_n(f)$, $\frac{dL_n(f)}{df}$, $K_{СВ}(f)$, $N(f)$, - которое приводит в широком диапазоне частот к сильному искажению амплитудного распределения ВРС и соответственно изменению КПД.

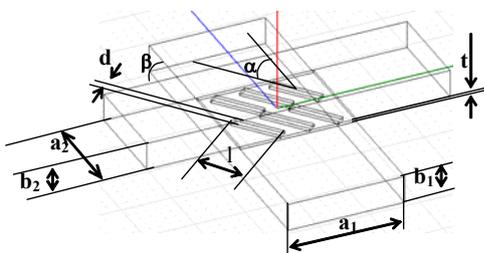
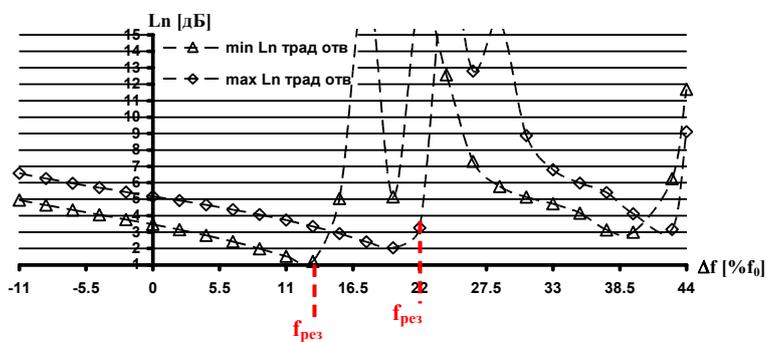
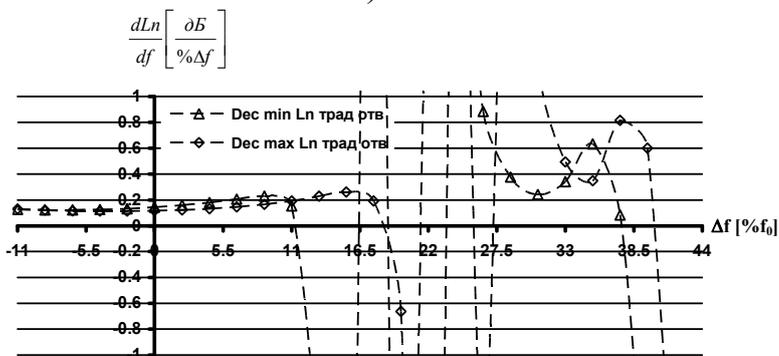


Рис.3. Конструкция многощелевого НО



а)



б)

Рис.4. Основные электрические характеристики традиционного НО: а) переходное затухание $L_n(f)$, б) частотный декремент затухания $\frac{dL_n(f)}{df}$

Реализация широкодиапазонной ВРС с высокой энергетической эффективностью возможна только при использовании НО с большой и стабильной связью в широком диапазоне частот ($\frac{dL_n(f)}{df} \rightarrow 0$) и при отсутствии в этом диапазоне резонансов. В связи с этим разработаны способы стабилизации переходного затухания (L_n) (минимизации частотного декремента затухания $\frac{dL_n}{df}$) для НО в расширенном диапазоне частот. Показано, что основным способом стабилизации переходного затухания НО в расширенном до $40\%f_0$ диапазоне частот является смещение резонансного пика ($f_{рез}$) в сторону высоких частот при одновременной минимизации частотного декремента затухания $\frac{dL_n}{df}$ и КСВ(f) за счет:

- выбора оптимальных сечений волноводных каналов: $b \leq 0.15\lambda$; $a_{min} \leq a \leq a_{max}$, где $a_{min} = 0.5\lambda + 10\%\lambda$; $a_{max} = \lambda - 10\%\lambda$;
- ограничения длины щелей $l \leq 0.35\lambda$;
- преимущественного использования в области связи щелей, смещенных с осевых линий волноводов НО;
- выбора частоты проектирования НО: $f^{(c)} = f_0 + 10(-15)\%f_0$, на которой для каждой координаты следует определить щель, минимально изменяющую свои параметры.

Определены методы уменьшения переходного затухания без существенного увеличения частотного декремента затухания за счет следующего изменения параметров НО:

- минимизации высоты волноводных каналов (b) и толщины стенки в области связи (t) и
- использования максимального количества щелей (n) и максимальной ширины щели (d).

В результате исследования сформулирован порядок проектирования широкодиапазонных многощелевых НО с большими связями, на основе которого создано несколько модификаций ответвителей, обеспечивающих почти полуторо-двукратное расширение рабочего диапазона частот при одновременной стабилизации переходного затухания ($\frac{dL_n}{df}$ уменьшен \sim в 1.5 раза). На рис. 5 приведены три примера реализации топологий размещения щелей в области связи НО, построенных на основе предложенного порядка проектирования и позволяющих в диапазоне частот $\sim 40\%f_0$ при $L_n(f_0) = 5\text{дБ} \dots 6\text{дБ}$ обеспечить частотный декремент затухания не более $0.15 \frac{\partial B}{\%f_0}$.

Исследованы способы увеличения диапазонности балансных восьмиполюсников (Е и Н мостов, тройников), составляющих основу СВЧ-сумматоров. Показано, что основным способом расширения рабочего диапазона частот до $40\%f_0$ является преимущественное использование балансных тройников на волноводах пониженного сечения (по сравнению со

щелевыми E и H-мостами), настроенных по суммарному и балансному плечам до минимального КСВ без резонансных пиков.

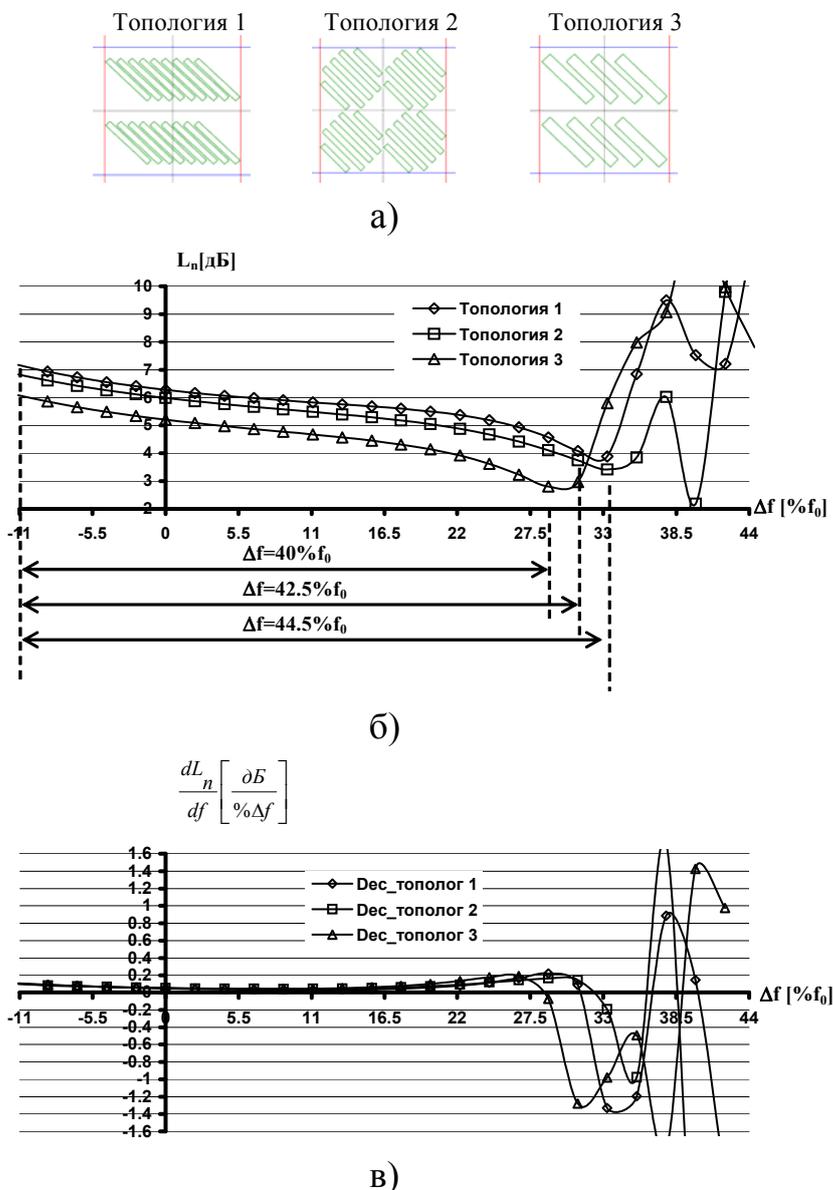


Рис.5. Основные характеристики усовершенствованного НО: а) три типа топологий, б) переходное затухание $L_n(f)$, в) частотный декремент затухания $\frac{dL_n(f)}{df}$

В данной главе также исследована в широком диапазоне частот вспомогательная элементная база (E и H уголки, трансформаторы, гермопереходы и др.), анализ электрических характеристик которой показал, что

- простейшие соединительные волноводные элементы (уголки, изгибы, трансформаторы и т.д.), в основном, обеспечивают работоспособность ($КСВ \leq 1.2 \dots 1.5$) в диапазоне $\geq 40\%f_0$ без резонансных пиков;
- сложные вспомогательные резонансные волноводные узлы (гермопереходы, ступенчатые скрутки и т.д.) для обеспечения рабочего

диапазона $40\%f_0$ требуют специального подбора конструктивного исполнения, исключающего возникновение резонансных пиков.

Третья глава посвящена исследованию широкодиапазонных ВРС для ФАР с высокой энергетической эффективностью. Проведена комплексная оценка всех факторов, определяющих эти качества ВРС, в частности показано, что основными признаками, определяющими работоспособность такой ВРС являются:

1. Отсутствие резонансных пиков.
2. Минимальное различие четвертей ВРС по амплитудному распределению и КПД.
3. Минимальное изменение амплитудного распределения и КПД волноводной распределительной системы в широком диапазоне частот.

Показано, что главными признаками, ограничивающими широкодиапазонность ВРС при высоком КПД, являются резонансные явления 3-х типов, обусловленные:

- 1-й – запердельностью волноводных каналов ($f_{рез}^1$);
- 2-й – запираем магистрального волновода при синфазном сложении отраженных сигналов ($\Delta\varphi_{из} = 180^\circ \cdot n$) ($f_{рез}^2$) и
- 3-й - резонансными явлениями элементной базы ($f_{рез}^3$);

Сформулированы предложения по борьбе с резонансными пиками всех трех типов. Исследованы особенности синтеза широкодиапазонной ВРС, обусловленные количеством входящих в нее НО и формой реализуемого амплитудного распределения. Результаты исследования показали, что наиболее критичными для проектирования ВРС являются малоэлементные распределители с большими связями. Предложен метод самокомпенсации изменения АР в широком диапазоне частот за счет правильной расстановки традиционных (узкодиапазонных) и усовершенствованных (широкодиапазонных) НО в линейном распределителе.

На основе проведенного комплекса исследований сформулированы основные принципы построения наиболее сложных в выполнении малоразмерных линейных распределителей с большими связями в диапазоне частот $\sim 40\%f_0$. На базе предложенных рекомендаций разработан широкодиапазонный шестиканальный линейный распределитель с большими связями. В таблице 3 приведены основные параметры традиционного шестиканального линейного распределителя и аналогичные характеристики такого же распределителя, но выполненного на основе усовершенствованных НО, в диапазоне частот $\sim 40\%f_0$.

Установлено, что с помощью выполненных исследований стабильность характеристик ВРС (особенно амплитуд на последних каналах линейного распределителя) улучшена примерно на 15дБ, а рабочий диапазон расширен примерно вдвое.

Таблица 3.

Параметры линейных распределителей, выполненных на основе традиционных («Скат-μ») и усовершенствованных НО, в диапазоне частот $\sim 40\%f_0$.

№№ п.п.	Наименование параметра	Распределитель для ФАР «Скат-μ»						Распределитель, выполненный на основе усовершенствованных НО					
		1	2	3	4	5	6	1	2	3	4	5	6
1	Амплитудное распределение ($AP_{(i)}$) на средней частоте [дБ]	7	7.5	8	11.5	12.3	15	7	7.5	8	11.5	12.3	15
2	Максимальное изменение AP ($\Delta AP_{(i)}$ [дБ]) в диапазоне частот $\Delta f \approx 40\%f_0$.	-9	-6	-10	15...20	15...20	≥ 20	+2	+1	-1.5	-2	-3	-4...5
3	КПД	0.85...0.12 (на краю диапазона)						0.85...0.7 (во всем диапазоне)					
4	КСВ магистрального канала	≤ 3						≤ 1.4					
5	$f_{рез}^2$ (для $\Delta\varphi_{ш}=180n$) и $КСВ^2$	$f_{рез}^2 = f_0 + 19.5\%f_0$, $КСВ^2 = 2.5...3$						$f_{рез}^2 = f_0 + 19.5\%f_0$, $КСВ^2 = 1.2$					
6	$\Delta f_{раб}$	$\sim 25\%f_0$						$\sim 40\%f_0$					

В четвертой главе проведено исследование путей создания ВРС для моноимпульсной ФАР, обеспечивающей снижение УБЛ диаграммы направленности по разностному каналу ($\Delta УМ$) при сохранении характеристик суммарного канала в расширенном диапазоне частот. Схема оптимизации суммарно-разностных характеристик в одной вертикальной плоскости (плоскости ориентации Главного распределителя) приведена на рис.6. Сущность схемы сводится к замене линейных распределителей ГР ($P_1 - P_4$, рис. 6), с одним магистральным волноводом в каждом, на матрицы Бласса, состоящие из двух линейных распределителей, соединенных ответвленными каналами через фазирующие секции (Φ).

Первые линейные распределители (P_1^k) при этом формируют амплитудные распределения по каналу Σ (AP_{Σ}^{om}), а вторые (P_2^k) совместно с первой – по каналу $\Delta УМ$ ($AP_{\Delta УМ}^{om}$).

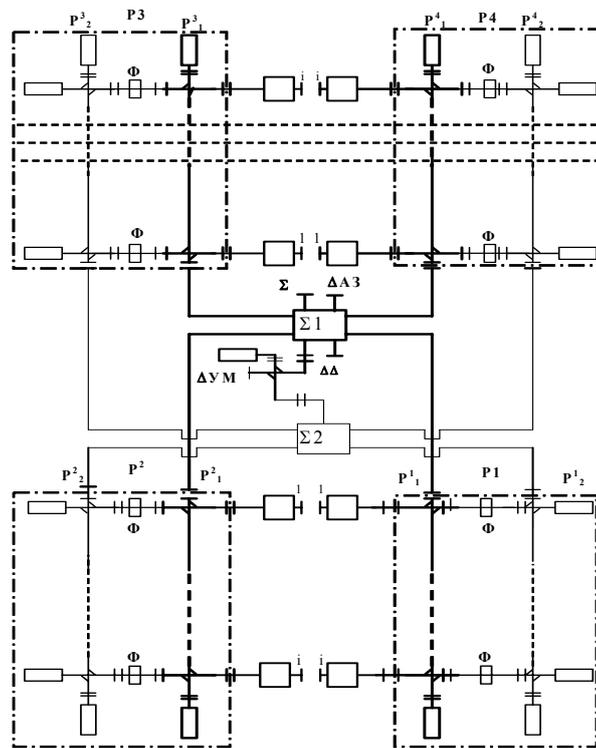


Рис.6. Схема оптимизированного Главного распределителя (ОГР)

Исследованы особенности такой оптимизации ВРС по разностным каналам (Δ) для малоразмерных ФАР, основной из которых является дефицит энергии во втором линейном распределителе, обусловленный высоким КПД и большими связями НО в первом линейном распределителе. Предложен способ реализации малоразмерных ВРС с высоким КПД за счет использования второго укороченного линейного распределителя, что является возможным из-за слабого влияния заднего спадающего фронта AP_{Δ} на уровень боковых лепестков DN_{Δ} (рис.7).

При исследовании возможностей сохранения признаков оптимизации ВРС в широком диапазоне частот рассмотрены основные источники искажений амплитудных и фазовых характеристик ВРС. Показано, что изменение AP_{Σ}^{omn} и $AP_{\Delta УМ}^{omn}$ в диапазоне частот определяется поведением НО линейных распределителей P_1^k и P_2^k , а изменение фазовых характеристик – поведением фазирующих секций $\Delta\Phi_{НО}$. Проведено исследование влияния базовых элементов этого устройства (фазирующих секций и НО) на его параметры (рис.8). В результате исследования показано, что для обеспечения работоспособности ВРС в широком диапазоне частот ($\sim 40\%f_0$) необходимо применять амплитудно-стабильные НО и управляемые фазовращатели в качестве фазирующих секций, что позволяет при высоком КУ (КПД ≈ 0.95 , КИП ≈ 0.9) уменьшить боковое излучение антенны по каналу (Δ) в среднем на 10дБ...15дБ.

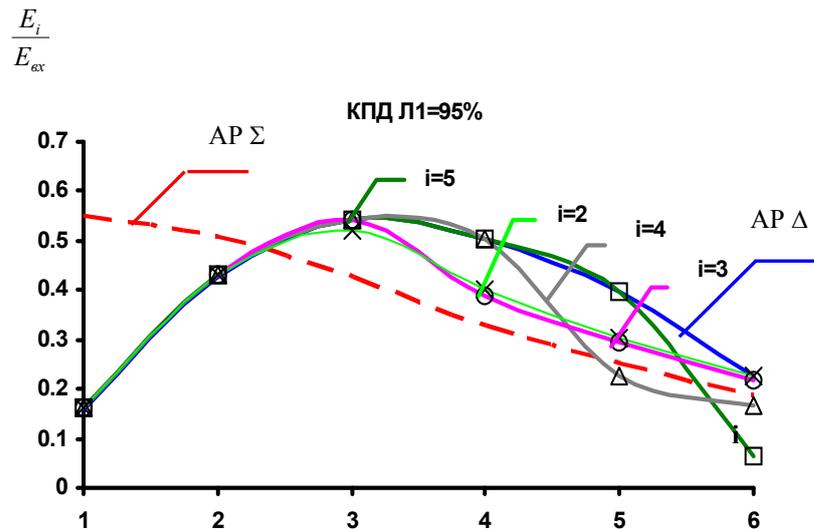


Рис.7. Амплитудные распределения при различном количестве каналов во втором линейном распределителе ОГР

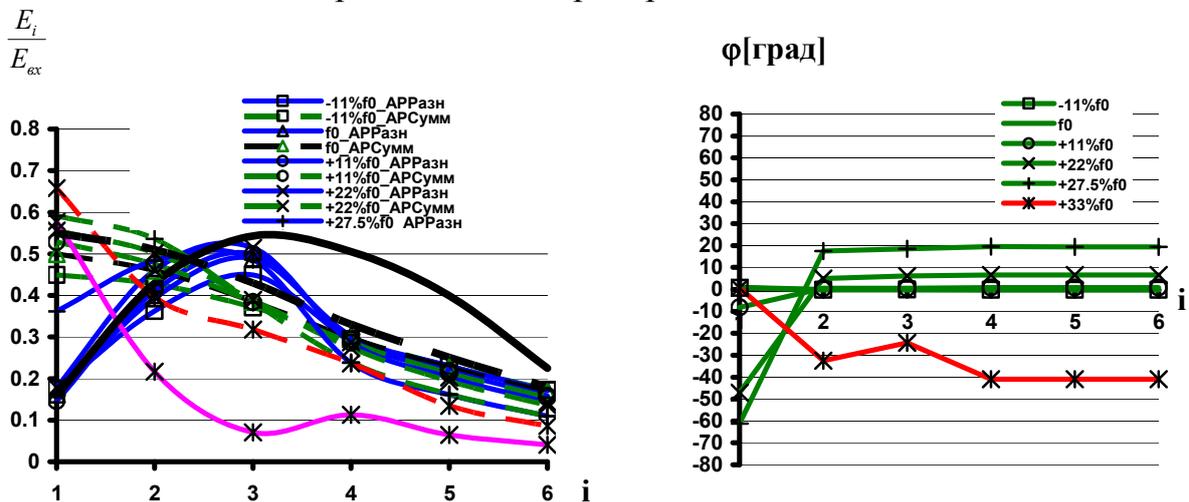


Рис.8. Амплитудно-фазовое распределение ОГР (НО – стабильные, тромбоны - фазовращатели)

В пятой главе на реальных образцах широкодиапазонных ВРС для ФАР «Скат-μ» (РЛПК «Оса») и «СуперСкат» (РЛСУ «Ирбис») (рис.9, 10) с высокой энергетической эффективностью проведено экспериментальное исследование предложенного в главе 1 метода математического моделирования ВРС в широком диапазоне частот (синтез – по энергетическому методу, анализ элементной базы – по электродинамическому алгоритму, анализ функциональных устройств – матричным методом, каскадное соединение функциональных устройств между собой в составе ВРС – по энергетическому методу). Сравнительный анализ АР, измеренного в составе ВРС и АР, полученного путем математического моделирования подтвердило, что синтез ВРС можно выполнять энергетическим способом с последующей корректировкой по результатам последовательного анализа. Подтверждена целесообразность использования для математического моделирования в

широком диапазоне частот модели 3, кроме зон расположения резонансов. Показано, что соединение основных функциональных узлов между собой в составе ВРС за пределами резонансных пиков может с успехом осуществляться энергетическим способом.

Также в данной главе проведено экспериментальное исследование реализуемости предложенных в главах 2 и 3 способов стабилизации параметров НО и ВРС в широком диапазоне частот. Для этого проведена экспериментальная проверка электрических характеристик усовершенствованных широкодиапазонных НО, а также выполнен сравнительный анализ полученных при этом результатов с расчетными. Кроме того, экспериментально исследован выполненный из этих НО линейный распределитель. В таблице 4 указаны синтезированные по заданному АР значения переходных затуханий ($L_{расч}$), а также приведены измеренные в составе отдельных НО соответствующие значения ($L_{изм}$). Графики переходных затуханий ($L_n(f)$) в диапазоне частот $\Delta f \approx 40\%f_0$ для трех НО из числа указанных в таблице (с минимальной связью ($L_n=10$ дБ), средней ($L_n=7$ дБ) и максимальной ($L_n=5$ дБ...6дБ)), а также АР линейного распределителя в сравнении с расчетными приведены на рис.11а и 11б, соответственно. Из рисунков видно, что реализованные в макетах НО переходные затухания, а в макете линейного распределителя амплитудные распределения в диапазоне частот $\sim 40\%f_0$ достаточно хорошо совпадают с расчетными.



Рис.9. ФАР «Скат-μ»: а) вид спереди, б) вид сзади

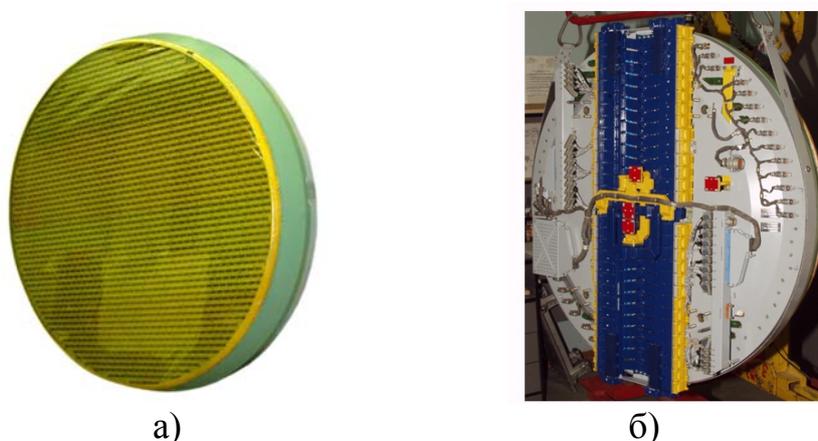


Рис.10. ФАР «СуперСкат»: а) вид спереди, б) вид сзади

В результате исследования подтверждена:

1. Возможность почти двукратного расширения рабочего диапазона НО и линейного распределителя с большими связями ($L_n=10\dots 5\text{дБ}$) (от $20\%f_0$ до $(35\dots 40)\%f_0$).

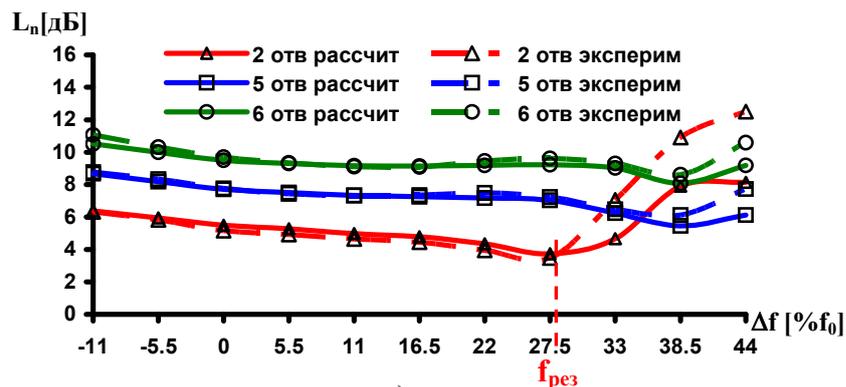
2. Возможность реализации в диапазоне частот $\approx 35\dots 40\%f_0$ относительно стабильного АР ($\Delta\text{АР}\approx\pm 2\text{дБ}$) при КПД не хуже 0.7 при условиях обеспечения минимальных потерь в волноводных каналах.

Таблица 4.

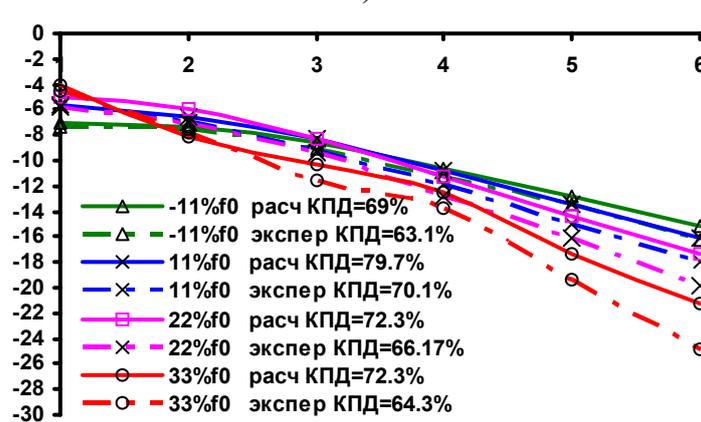
Расчетные и экспериментальные переходные затухания, синтезированные по заданному АР

Параметр	i	1	2	3	4	5	6
АР		1	0.85	0.6	0.36	0.21	0.12
$L_n^{f_0}$ [дБ], расчет		6.02	5.5	5.6	6.5	7.7	9.5
$L_n^{f_0}$ [дБ], эксперим		5.8	5.15	5.3	6.48	7.8	9.7
Длины щелей		0.31λ	0.32λ	0.32λ	0.31λ	0.29λ	0.26λ

Примечание: ширина щелей $d=0.06\lambda$; толщина стенки $w=0.01\lambda$; $\Delta f=44\%f_0$



а)



АР [дБ]

б)

Рис.11. Характеристики усовершенствованного линейного распределителя: а) переходное затухание $L_n(f)$ НО, б) амплитудные распределения линейного распределителя

В заключение в развернутом виде сформулированы основные выводы и результаты диссертационной работы.

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ

1. Сформулированы основные качества волноводной распределительной системы (ВРС), определяющие высокую энергетическую эффективность и широкую диапазонность фазированной антенной решетки (ФАР).
2. Определена основная особенность ВРС, проявляющаяся при ее работе в широком диапазоне частот и заключающаяся в появлении в этом диапазоне резонансных пиков.
3. Проведен анализ различных методов математического моделирования ВРС, в результате которого решена одна из первостепенных задач диссертационной работы - предложен базовый метод математического моделирования ВРС в широком диапазоне частот при сохранении высокого КПД.
4. Определены критерии использования в этом диапазоне других широкоприменяемых в практике методов математического моделирования.
5. Предложены принципы построения новых вариантов усовершенствованных широкодиапазонных базовых элементов, на основе которых следует выполнять широкодиапазонную ВРС.
6. Определены основные особенности построения малоразмерных линейных распределителей с большими связями для рабочего диапазона частот $\sim 40\%f_0$ и более, а также даны рекомендации по их реализации.
7. Предложен способ создания малоразмерной ВРС для моноимпульсной ФАР, обеспечивающей оптимальные характеристики по суммарному каналу и снижение УБЛ ДН по разностному каналу за счет использования усовершенствованных НО, управляемых фазовращателей в качестве фазирующих секций, а также второго укороченного линейного распределителя в расширенном диапазоне частот.
8. На реальных образцах широкодиапазонных ВРС для ФАР «Скат-μ» (РЛПК «Оса») и «СуперСкат» (РЛСУ «Ирбис») экспериментально подтверждена правильность предложенного метода математического моделирования ВРС в широком диапазоне частот: возможность применения энергетического метода при синтезе ВРС; допустимость использования энергетического метода расчета при соединении функциональных узлов; необходимость использования для математического моделирования при реальной элементной базе в широком диапазоне частот матричного алгоритма каскадного соединения элементов ВРС, рассчитанных электродинамическим методом.
9. Экспериментально на опытных и макетных образцах подтверждены предложенные в диссертации пути создания широкодиапазонных базовых элементов, функциональных узлов ВРС и ВРС в целом.

Основные результаты диссертации изложены в следующих работах:

1. Главный распределитель для ФАР «Скат-μ» / Б.П.Ястребов, Е.В.Крылова, В.А.Митин, В.Н.Епишкина // Сборник докладов 17-й научно-технической конференции. - ГП НИИ Приборостроения им. В.В.Тихомирова, Жуковский, 2002. – С. 251-255.
2. Главный распределитель для малоразмерной ФАР с оптимизированными характеристиками излучения / Р.Д.Позднякова, Б.П.Ястребов, В.Н.Епишкина и др. // Антенны. – 2005. - Вып. 2. – С. 58-63.
3. Синани А.И., Епишкина В.Н. Широкополосные волноводные распределители энергии для антенных систем с электронным управлением лучом // Сборник докладов научно-технической конференции «Радиооптические технологии в приборостроении». - Сочи, 2005. – С. 60-64.
4. Широкополосные направленные ответвители для волноводных распределительных систем с высокой энергетической эффективностью / А.И.Синани, Р.Д.Позднякова, Б.П.Ястребов, В.Н.Епишкина // Сборник докладов 12-й Международной научно-технической конференции «Радиолокация, навигация, связь». - Воронеж, 2006. - С. 681-688.
5. Экспериментальное исследование широкодиапазонных распределителей энергии для антенных систем с электронным управлением лучом / А.И.Синани, Р.Д.Позднякова, В.Н.Епишкина, Б.П.Ястребов // Сборник докладов научно-технической конференции «Радиооптические технологии в приборостроении». - Туапсе, 2006 – С.19-21.
6. Епишкина В.Н., Синани А.И., Позднякова Р.Д. Особенности математического моделирования ВРС в широком диапазоне частот для ФАР с высокой энергетической эффективностью // Сборник докладов 19-й научно-технической конференции ОАО «НИИП», Жуковский, 2008. – С. 396-406.
7. Епишкина В.Н. Экспериментальное исследование диапазонных свойств ВРС// Антенны. – 2008. - Вып. 9. – С.81-85.
8. Синани А.И., Позднякова Р.Д., Епишкина В.Н. Основные методы математического моделирования ВРС в широком диапазоне частот для ФАР с высокой энергетической эффективностью// Антенны. –2008. - Вып. 9. – С.21-28.
9. Свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ №2005610937. Программа расчета волноводно-распределительных систем произвольного типа (ВРС+) // П.К. Крылов, Б.П. Ястребов, В.Н. Епишкина, опубл. 19.04.2005.
10. Пат.2310257 Российская Федерация. Волноводная распределительная система // А.И. Синани, Р.Д. Позднякова, В.Н.Епишкина, Б.П.Ястребов, опубл. 10.11.2007.
11. Пат.2330355 Российская Федерация. Способ изменения характеристик направленного ответвителя // А.И. Синани, Р.Д. Позднякова, В.Н. Епишкина, Б.П. Ястребов, опубл. 27.07.2008.

12. Заявка 2008112070 Российская Федерация. Двойной волноводный тройник // В.Н. Епишкина, опубл. 23.03.08.

13. Синани А.И., Позднякова Р.Д., Епишкина В.Н. Широкодиапазонные ВРС для ФАР с высокой энергетической эффективностью // Тезисы докладов юбилейной научно-технической конференции «Морские комплексы и системы». – Москва, 2008. – С.36-37.