

На правах рукописи



Светличный Юрий Алексеевич

**РЕАЛИЗАЦИЯ ЦИФРОВЫХ МЕТОДОВ
В МНОГОПОЗИЦИОННЫХ СТАНЦИЯХ С МНОГОКАНАЛЬНЫМИ
ФАЗИРОВАННЫМИ АНТЕННЫМИ РЕШЕТКАМИ
И СОВМЕЩЕННЫМИ КАНАЛАМИ РАДИОЛОКАЦИИ И СВЯЗИ**

Специальность 05.12.04 – Радиотехника, в том числе системы и устройства
телевидения

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Томск — 2020

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники» (ТУСУР)

Научный руководитель: **Малютин Николай Дмитриевич,**
доктор технических наук, профессор

Официальные оппоненты: **Добычина Елена Михайловна,**
доктор технических наук, доцент, профессор
кафедры радиофизики, антенн и микроволновой
техники ФГБОУ ВО «Московский авиационный
институт (национальный исследовательский
университет)», г. Москва

Суханов Дмитрий Яковлевич,
доктор физико-математических наук, профессор,
заведующий лабораторией электромагнитных
методов контроля ФГАОУ ВО «Национальный
исследовательский Томский государственный
университет», г. Томск

Ведущая организация: Акционерное общество «Научно-
производственное предприятие «Радиосвязь», г.
Красноярск

Защита состоится 23 декабря 2020 г. в 11 часов 00 минут на заседании диссертационного совета Д 212.268.01, созданного на базе Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники, по адресу: 634050, г. Томск, пр. Ленина, 40, ауд. 201.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ТУСУРа и на сайте:
<https://postgraduate.tusur.ru/urls/wr6o4j64>

Автореферат разослан «___» ноября 2020 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
д.ф.-м.н., профессор



Мандель Аркадий Евсеевич

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. В состав многих современных радиотехнических систем входят фазированные антенные решетки (ФАР). Применение цифровых методов в ФАР позволяет получать ранее недостижимые параметры. Такие решетки принято называть цифровыми фазированными антенными решетками (ЦФАР).

Технические решения, применяемые в ЦФАР, вносят определяющий вклад в технические параметры, характеристики технологичности, надежности, стоимости изделия; таким образом, на этапе технического проектирования целесообразно использовать определенный алгоритм выбора оптимального конструктивного решения (синтеза) ЦФАР. Принятые способы моделирования предполагают проведение сложных математических расчетов и использование больших объемов статистической информации, что предопределяет существенные временные и финансовые затраты. При этом не всегда возможно получить комплексную оценку качества системы по причине отсутствия формализуемых алгоритмических решений. Разработка методики синтеза оптимального технического решения на основе эмпирических методов может решить указанную проблему.

Улучшение технических характеристик ЦФАР в большинстве случаев достигается увеличением числа цифровых каналов, в пределе – в каждом приемном и передающем канале ФАР сигнал обрабатывается в цифровой форме после перехода к ней с помощью ЦАП и АЦП. В указанных случаях известные принципы построения устройств цифровой обработки сигналов (ЦОС) в виде сосредоточенных модулей чаще всего не применимы, следовательно, актуальной является задача синтеза многоканального цифрового устройства, распределенного по полотну антенной решетки, каналы передачи данных и сигналов синхронизации которого должны иметь высокую производительность при устойчивости к внешним воздействующим факторам.

Значительное количество линий синхронизации и передачи данных многоканальных ЦФАР усложняет задачу их трансляции с поворотной платформы на стационарный модуль управления. Известные решения – перенос модуля

управления на полотне антенны, использование многоканальных переходов – не являются эффективными по стоимостным и техническим характеристикам. Каналы синхронизации и передачи данных на базе волоконно-оптических линий требуют разработки метода уплотнения нескольких волоконно-оптических каналов синхронизации и данных ЦФАР в один двунаправленный.

Переход к многопозиционным системам позволяет использовать преимущества методов кооперативной обработки сигналов и информации. В известных решениях для объединения позиций чаще всего применяются оптические или проводные линии синхронизации и передачи данных. При этом для позиций, размещаемых в труднодоступной местности с отсутствующей инфраструктурой или на мобильных платформах, необходима реализация беспроводных методов синхронизации и передачи данных. Кроме того, разработанный метод передачи данных должен обладать увеличенной дальностью действия в сравнении с известными для снижения количества позиций в группировке и стоимости поля наблюдения в целом.

Степень разработанности темы диссертации. В настоящее время ЦФАР – развивающийся вариант антенных систем в областях радиолокации, навигации и связи (наземные и бортовые радиолокаторы, радиорелейные линии и системы связи типа 5G, спутниковые связные и навигационные системы).

Мировым научным сообществом по тематике работ проводятся исследования, издаются тематические труды, описывающие как фундаментальные принципы построения антенных систем класса ЦФАР, так и отдельные важные вопросы данной области знаний. Среди отечественных ученых следует отметить труды школы Воскресенского Д.И. (МАИ), МГТУ им. Н.Э. Баумана, НГТУ им. Р.Е. Алексеева, СибГУ им. М.Ф. Решетнева и др., среди зарубежных - авторов США, Германии, Индии и Китая.

Необходимые для практической реализации ЦФАР важные вопросы в известных источниках не приводятся или не раскрываются с достаточной подробностью в связи с малым практическим опытом, наличием широкого спектра вопросов. Работы поставлены в области энергетических характеристик,

излучателей, СВЧ ППМ, систем питания и др., при этом вопросы построения аппаратуры ЦОС ЦФАР в целом остаются нераскрытыми.

Известно, что для оценки предлагаемой конструкции на этапе технического предложения с целью экономии временных и материальных ресурсов целесообразно строить математическую модель — значительное количество рекомендаций приведено в известной литературе, однако все математические зависимости определены только для отдельных составных частей ЦФАР. В действительности комплексный показатель качества ЦФАР зависит от многих факторов, не имеющих формализуемых решений, следовательно, составить модель качества ЦФАР стандартными методами представляется проблематичным. Методология научных исследований в условиях отсутствия прямых математических зависимостей и формализуемых решений предписывает рассматривать возможность применения эвристических методов (М.Н. Пиганов), при этом методики, пригодной для синтеза оптимальных технических решений ЦФАР в известной литературе не приводится.

Цифровые методы в ЦФАР в известной литературе (В.Л. Гостюхин, Л.Н. Григорьев, Е.М. Добычина) разработаны в части алгоритмов ЦОС, схемотехнических решений отдельных узлов (чаще – цифровых приемопередающих модулей), технологий отдельных цифровых и аналоговых элементов. Известные методы применимы для сосредоточенного устройства ЦОС с малым количеством каналов, при проектировании распределенных по полотну антенной решетки многоканальных устройств ЦОС требуются новые решения, при этом схемы и конструкции должны рассматриваться совместно как взаимовлияющие. Известные варианты реализации каналов синхронизации и передачи данных для реализуемых решений ЦФАР, в том числе с волоконно-оптическими линиями, изучены недостаточно полно.

В области многопозиционных систем известны принципы построения, разработаны алгоритмы обработки сигналов и информации (В.С. Черняк, А.Г. Рындык, С.А. Топичев). Необходимые решения в области методов синхронизации и передачи данных разнесенных позиций беспроводным способом,

передачи данных по основному радиолокационному каналу приводятся в зарубежной литературе в общем виде без раскрытия технических подробностей. Многопозиционные РЛС в отечественных научно-технических источниках практически не представлены, несмотря на значительный научный задел.

Таким образом, рассматриваемая в работе область знаний принадлежит к значимым, но малоисследованным научным вопросам в области ЦФАР.

Целью работы является разработка усовершенствованной технологии устройства ЦОС многоканальной ЦФАР с цифровым диаграммообразованием в приемном и передающем каналах на базе распределенного по полотну антенной решетки вычислительного устройства с волоконно-оптическими цифровыми каналами, возможностью работы в многопозиционном режиме с синхронизацией и передачей данных беспроводным способом.

Для достижения цели потребовалось решение следующих основных **задач**:

1. Предложение новой методики синтеза оптимальных по заданным критериям качества конструкций ЦФАР на основе метода экспертных оценок.
2. Синтез усовершенствованного устройства ЦОС для многоканальной ЦФАР, распределенного по полотну антенной решетки с объединением сегментов оптическими цифровыми каналами синхронизации и передачи данных (структурная и функциональная схемы, типовая конструкция).
3. Разработка цифрового метода уплотнения сигналов синхронизации и передачи данных в один двунаправленный оптический канал.
4. Разработка цифрового метода передачи данных между сегментами многопозиционных систем по радиолокационному каналу
5. Разработка цифрового метода синхронизации сегментов многопозиционных систем беспроводным способом.
6. Определение направлений дальнейших исследований с учетом перспективных технологий микроэлектроники, радиофотоники, цифровых программно-определяемых радиосистем.

Научная новизна работы заключается в развитии теории и методологии в новой области антенных систем - цифровых фазированных антенных решеток:

1. Предложена новая схема синхронизации и передачи данных для цифровой фазированной антенной решетке на базе цифровых волоконно-оптических линий, позволяющая объединять существенно большее количество цифровых каналов, распределенных по полотну антенной решетки на значительно большие расстояния в сравнении с ранее известными решениями.

2. Усовершенствованы относительно ранее известных методы синхронизации и передачи данных МРЛС, позволяющие увеличить дальность связи между сегментами и снять ограничение по наличию коммуникационной инфраструктуры в местах размещения при снижении стоимости поля наблюдения.

3. Известный метод радиолокации усовершенствован путем дополнения радиолокационных режимов режимом передачи данных, что позволило реализовать резервный канал передачи данных, имеющий ряд преимуществ в сравнении с радиорелейной линией и спутниковым каналом связи.

Теоретическая значимость работы заключается в развитии теории цифровой обработки сигналов, являющейся основой для создания линейки новых многоканальных систем с цифровым формированием диаграммы направленности в приемном и передающем каналах.

Практическая значимость работы заключается в использовании ее результатов для модернизации, разработки ряда радиолокационных многопозиционных станций нового поколения, работающих в автоматическом режиме с минимальным обслуживанием.

Внедрение результатов работы позволило реализовать на практике новую технологию построения аппаратуры цифровой обработки сигналов для линейки цифровых многоканальных ФАР следующего поколения, имеющую важное значение для развития направления унифицированных многопозиционных систем ПАО «НПО «Алмаз», работающих в автоматическом режиме с минимальным обслуживанием – акт приведен в приложении А. Результаты использованы в ОКР «Разработка промышленной технологии и конструктивно-технологических решений создания приемо-передающих модулей и подрешетки активной фазированной антенной решетки (АФАР) «С»-диапазона для перспективных

радиолокационных станций» (ПАО «НПО «Алмаз»), НИР «Исследование технических принципов построения и характеристик бистатических радиолокационных систем метрового диапазона волн» (ПАО «НПО «Алмаз»), НИР «Кристалл» (ООО «ЛЭМЗ-Т», н/рук. Светличный Ю.А.).

Методы исследований

В диссертационной работе использовались математико-статистические методы, теория систем, теория информации, теория ЦОС.

Расчеты выполнялись в математическом пакете Scilab 6.0.

Лабораторные и экспериментальные исследования выполнялись с использованием изготовленных в ходе работы макетов, контрольно-измерительных приборов и технологического программного обеспечения.

Научные положения, выносимые на защиту

1. Метод передачи сигналов синхронизации и данных по полотну многоканальных ЦФАР на базе цифровых оптических каналов с кодированием 8b/10b на ПЛИС обеспечивает скорость передачи в пять раз большую (до 8 Гбит/с, не менее 10 м длина каналов) в сравнении с линиями LVDS (до 1,6 Гбит/с, до 2 м) при абсолютной задержке передачи информации от устройства управления до цифровой подрешетки не более 0,5 мкс и джиттере кадровых синхроимпульсов в цифровых подрешетках не более 2 нс, что в 4-5 раз меньше соответствующих показателей известных технических решений.

2. Метод синхронизации позиций МРЛС с использованием устройства прямого цифрового синтеза с накоплением на базе высокостабильного опорного генератора позволяет в 10-25 раз улучшить точность синхронизации системы единого времени (до 3 нс, СКО) в сравнении с точностью стандартных приемников СРНС, обеспечить синхронность фаз радиосигналов с частотой 100 МГц на разнесенных позициях с погрешностью не хуже $0,01^\circ$ (СКО), что достаточно для обеспечения когерентного радиоприема в кооперативном режиме.

3. Метод совмещения каналов радиолокации и передачи данных в МРЛС с ЦФАР позволяет обеспечить независимость системы от наличия коммуникационной инфраструктуры в местах размещения в отличие от методов с

использованием спутниковых или кабельных каналов связи, исключить необходимость выделения дополнительного частотного ресурса и увеличить дальность передачи данных не менее чем в три раза (не менее 210 км на скорости не менее 1 Мбит/с в метровом диапазоне волн в условиях прямой видимости) в сравнении с использованием радиорелейной линии.

Степень достоверности и апробация результатов работы

Достоверность результатов работы обеспечивается корректным использованием математического аппарата, согласованностью полученных результатов с опубликованными изысканиями других авторов. Предложенные математические и аналитические выкладки согласуются с практической реализацией и подтверждены результатами выполненных экспериментов.

Представленные материалы диссертационной работы докладывались на трех Российских и двух международных научно-технических конференциях.

Публикации. По теме диссертации опубликовано 10 работ, из них: 3 статьи в изданиях, рекомендованных ВАК, 6 докладов в трудах международных и Российских конференций, 1 свидетельство о регистрации программы для ЭВМ.

Личный вклад автора. Основные результаты, представленные в защищаемых научных положениях, получены лично автором при непосредственном участии в качестве главного конструктора разрабатываемых технических решений: выполнены расчеты, реализованы схемотехнические решения и алгоритмы, проведены эксперименты, принято участие в организации серийного выпуска. Текст диссертации составлен лично.

Структура и объем диссертации. Диссертационная работа изложена на 151 машинописной странице и состоит из введения, трех разделов, заключения, списка сокращений и списка литературы. Графический материал представлен в виде 75 рисунков и 9 таблиц. Список использованных источников включает 133 наименования на 14 листах.

Результаты диссертационной работы выполнены при поддержке Министерства образования и науки РФ, базовая часть ГЗ (уникальный идентификатор FEWM-2020-0046).

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Введение содержит рассмотрение предметной области, формулирование цели работы и обоснование ее актуальности, определение задач, требующих решения для достижения цели, и возможных методов их решения. Представлены научная новизна работы, теоретическая и практическая значимость, методы апробации, результаты внедрения, а также положения, выносимые на защиту.

Раздел 1 носит обзорно-аналитический характер. Рассмотрены варианты построения перспективных антенных систем с цифровыми фазированными решетками на основе анализа и систематизации тематических публикаций отечественных и зарубежных авторов, изучения и оценки текущего положения дел в предметной области на практике. Приведенный обзор литературы в области задач, подлежащих решению в рамках работы, раскрывает текущее состояние дел по актуальным вопросам работы.

В разделе 2 рассматривается реализация цифровых методов в решении задач исследований. В первой части раздела 2 рассмотрены основополагающие варианты конструкции цифровых антенных систем, синтезированы схемы ЦФАР. Варианты типовых конструкций ЦФАР представлены на рисунке 1.

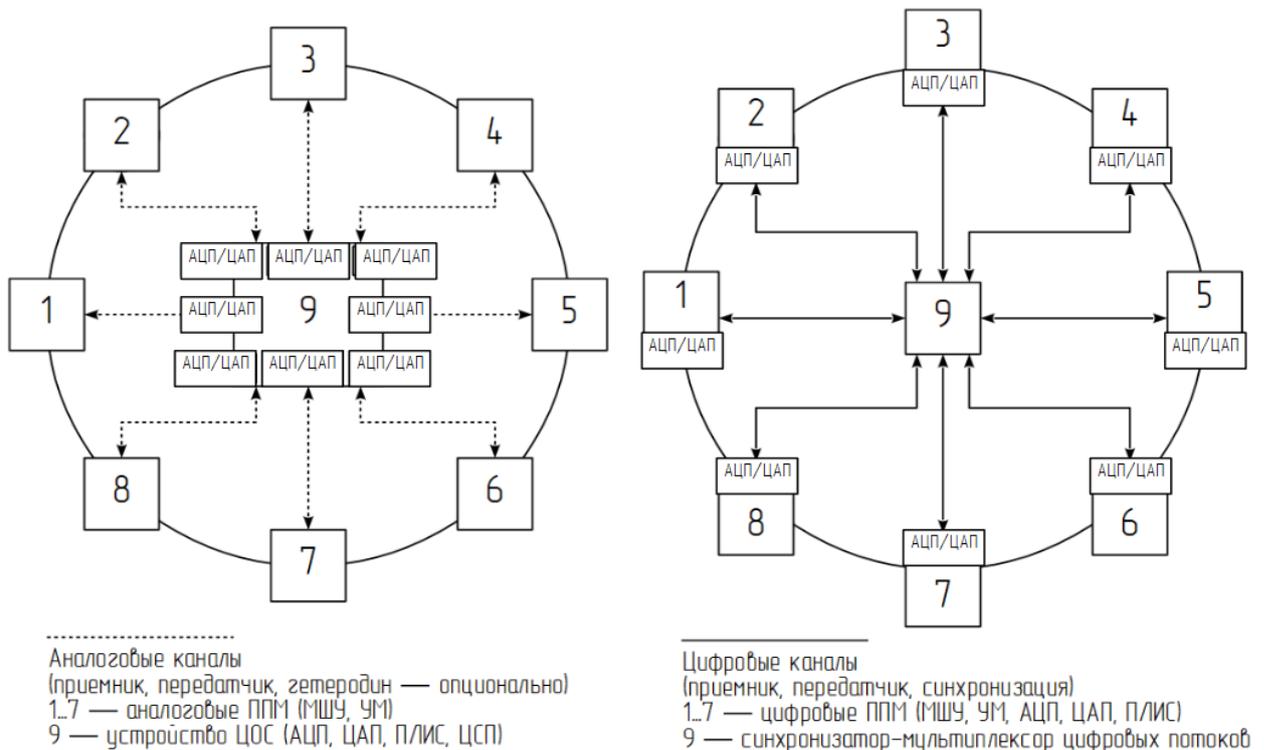


Рисунок 1 – ЦФАР с сосредоточенным и распределенным устройством ЦОС

Математические модели отдельных модулей могут быть составлены относительно просто, модель же ЦФАР в целом не имеет простых или формализуемых алгоритмических решений. Для выбора оптимальной конструкции ЦФАР из совокупности рассматриваемых возможных реализаций предложено использовать обобщённую целевую функцию метода экспертных оценок, в которой учтены все основные характеристики и параметры проектируемой ЦФАР

$$\xi_k = \sum_{i=1}^n \gamma_i \cdot \zeta_i \quad (1)$$

где: γ_i – коэффициент значимости i -ого показателя качества;

ζ_i – i -й показатель качества в k -ом варианте схемы.

Оценки могут быть представлены в виде, приведенном на рисунке 2.

$$\text{AESA}_{\text{opt } 1} = \begin{cases} \text{Sch}=1, n=10, d \gg \lambda, \text{UHF} = \{ \text{Tch-3, Pr-5, DM-5, Kr-5, Km-5} \} \\ \text{Sch}=1, n=50, d \gg \lambda, \text{UHF} = \{ \text{Tch-3, Pr-4, DM-3, Kr-3, Km-3} \} \\ \text{Sch}=1, n=100, d \gg \lambda, \text{UHF} = \{ \text{Tch-3, Pr-4, DM-2, Kr-2, Km-2} \} \end{cases}$$

$$\text{AESA} = \{ 1,0; 0,6; 0,2; 0,9; 0,7 \}$$

$$\text{AESA}_1 \begin{pmatrix} n = 10 \\ n = 50 \\ n = 100 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 15 \\ 11 \\ 9 \end{pmatrix}$$

$\text{AESA}_{\text{opt } 1}$ – матрица экспертных оценок; AESA – вектор значимости критериев качества; AESA_1 – показатели качества для различного числа каналов одной схемы, определенные в работе: Tch-точность амплитудно-фазового распределения, Pr-стоимость, DM-массогабариты, Kr-надёжность, Km-технологичность

Рисунок 2 – Пример показателей качества для одной реализации ЦФАР и различного количества каналов (10, 50, 100)

Предложенная схема ЦФАР с объединением распределенных сегментов волоконно-оптическими цифровыми каналами и цифровым диаграммообразованием в приемном и передающем каналах приведена на рисунке 3. Схема ЦФАР состоит из периферийных вычислительных устройств (ПВУ) с цифровыми приемно-передающими модулями (ЦППМ) и центрального вычислительного устройства (ЦВУ), объединенных цифровыми высокоскоростными волоконно-оптическими каналами передачи данных и сигналов синхронизации. Реализация диаграммообразования в приемном и передающем каналах выполнена по принципу программно-определяемой радиосистемы (ПОР).

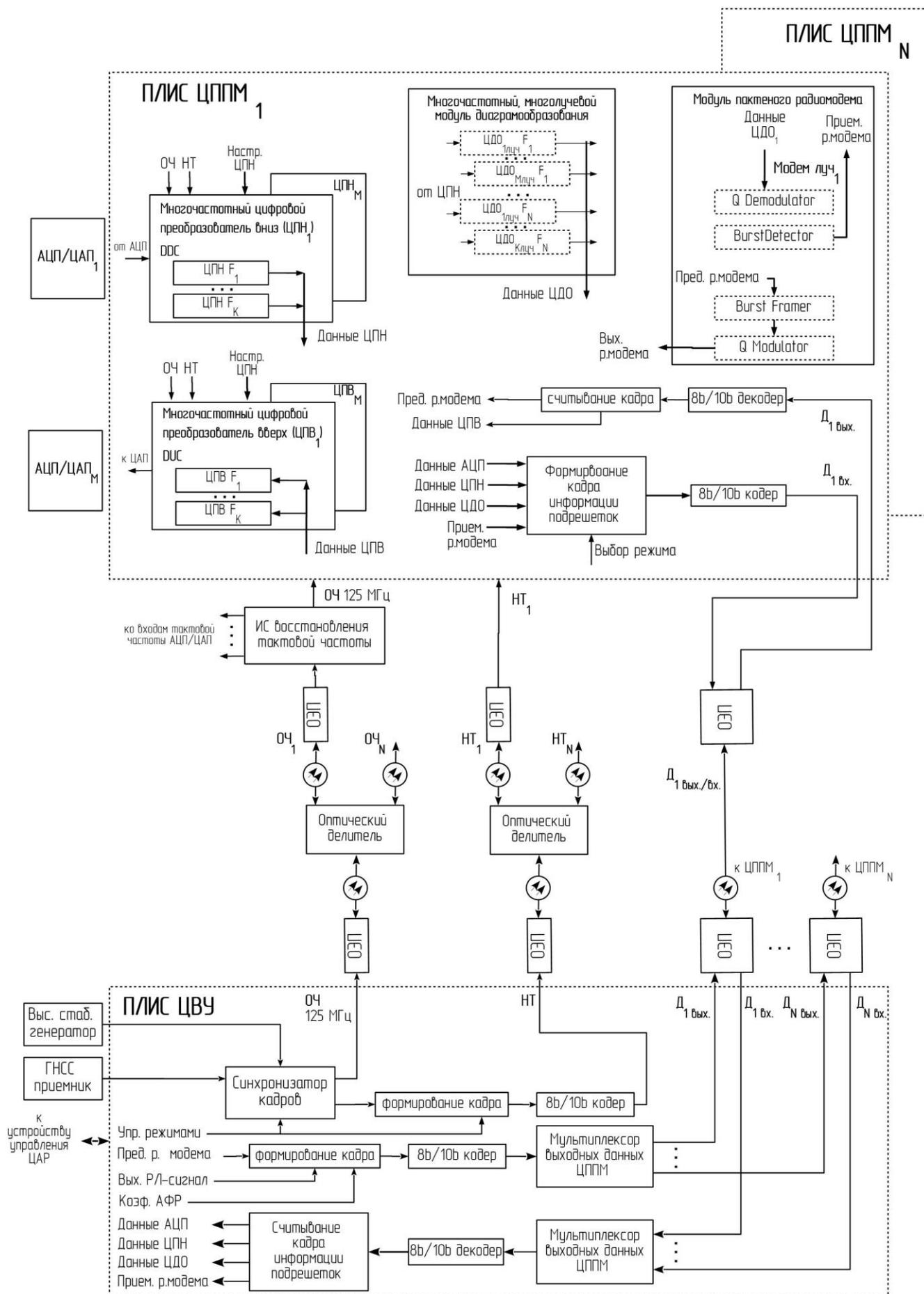


Рисунок 3 – Схема ЦФАР

Для организации канала между ПВУ, находящимся на вращающейся антенной части системы, и ЦВУ – на стационарной, предложена схема с уплотнением каналов по длине волны оптического излучения и одноканальным волоконно-оптическим вращающимся переходом, приведенная на рисунке 4.

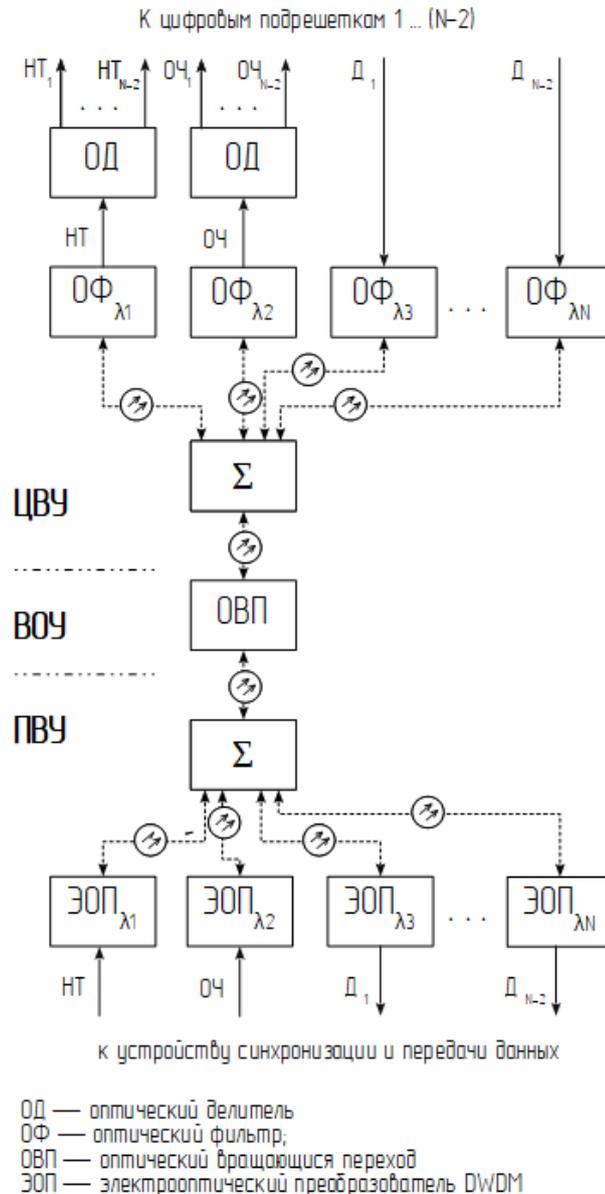


Рисунок 4 – Схема устройства мультиплексирования оптических каналов

Во второй части раздела 2 предложены технические решения ЦФАР, необходимые для обеспечения работы в режиме многопозиционных систем, выполнен расчет и обоснование применения методов синхронизации и передачи данных между разнесенными позициями. Синхронизация позиций должна обеспечивать когерентный радиоприем, дополнительно должна быть реализована связь между позициями. Канал связи предложено обеспечить путем временного

разделения основного радиолокационного канала между радиолокационным и связным режимами. Временная диаграмма приведена на рисунке 5.

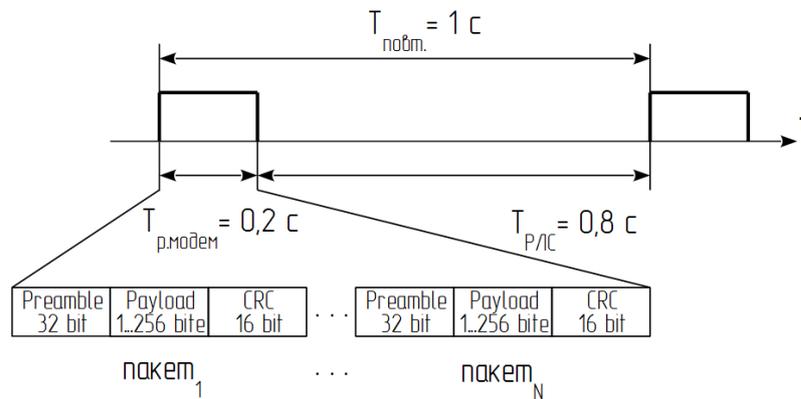


Рисунок 5 – Временная диаграмма передачи данных МРЛС

Пропускная способность канала передачи данных МРЛС при условии совмещения с радиолокационным определена согласно формуле

$$R = \frac{\Delta F}{2} \cdot \log_2(N) \cdot R_S \cdot T_S \quad (2)$$

где: ΔF – полоса радиосигнала;

N – размерность модуляции (для BPSK $N=2$, для 16QAM $N=16$ и т.д.);

R_S – эффективность помехоустойчивого кода (отношение размера полезной информации к размеру избыточного кодирования);

T_S – отношение времени передачи ко времени обзора пространства МРЛС.

Параметры режимов передачи данных МРЛС в зависимости от вида модуляции и полосы для $R_S=0,8$ и $T_S = 0,2$ приведены на рисунке 6.

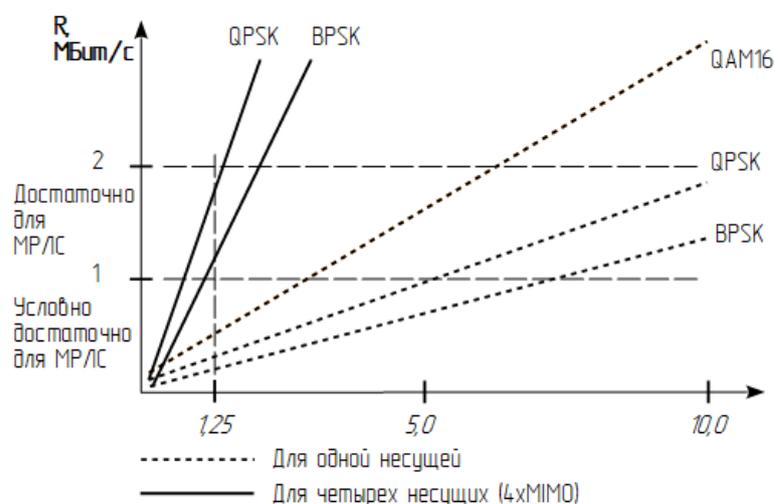


Рисунок 6 – Скорости передачи данных по каналу МРЛС

Расчет обеспечиваемой дальности связи выполнен с использованием метода расчета бюджета мощности согласно формуле

$$M = P_{\text{пер}} + G_{\text{прм}} + G_{\text{прд}} - L_S - L_0 - P_S, \quad (3)$$

где: $P_{\text{пер}}$ – мощность передатчика, дБм;
 $G_{\text{прм}}$ – коэффициент усиления (КУ) приемной антенны, дБ;
 $G_{\text{прд}}$ – КУ передающей антенны, дБ;
 L_S – потери на трассе, дБ;
 L_0 – потери в приемо-передающей аппаратуре, дБ;
 P_S – чувствительность приемника, дБм.

Графики дальности связи между позициями МРЛС в сравнении с радиоре-
 лейной линией (РРЛ) для метрового диапазона волн приведены на рисунке 7.

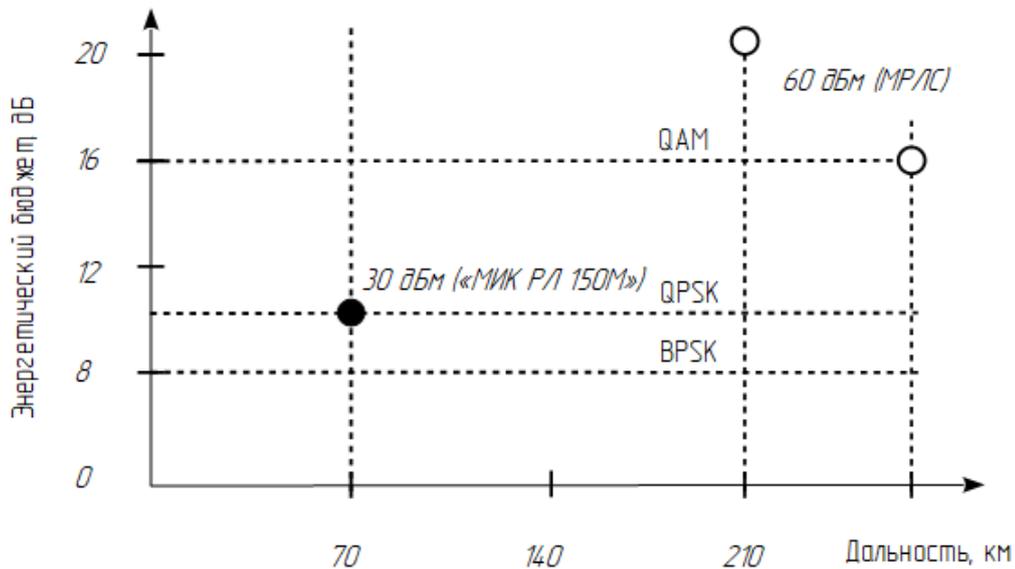


Рисунок 7 – Обеспечиваемые дальности связи между позициями

Для синхронизации позиций МРЛС предложена схема на основе
 спутниковых радионавигационных систем (СРНС), приведенная на рисунке 8.

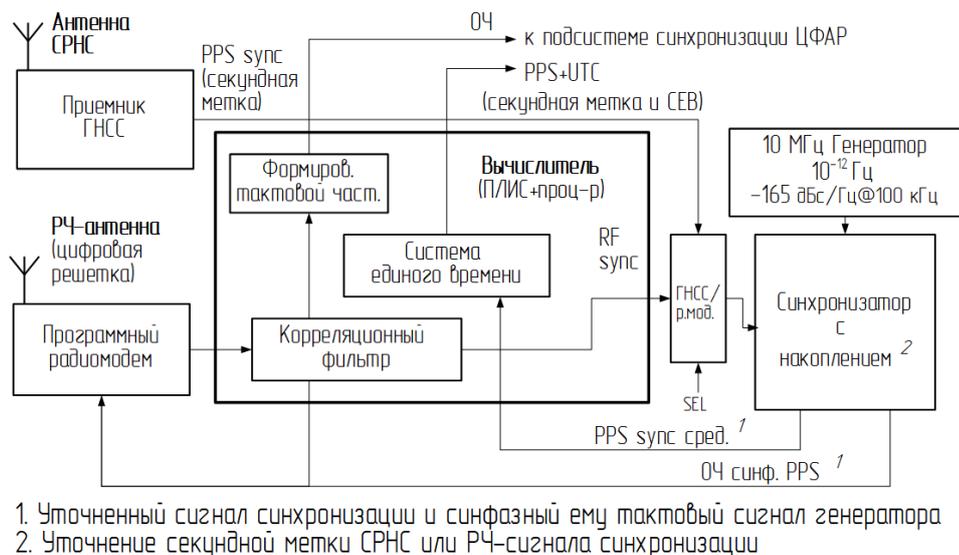


Рисунок 8 — Схема синхронизатора позиций

В заключительной части раздела 2 выполнен прогноз путей дальнейшего совершенствования технологии антенных систем с ЦФАР, связанные с технологиями радиофотоники, многофункциональной микроэлектроники (системы-на-кристалле), программно-определяемых радиосистем.

Выполненные в разделе 2 теоретические расчеты и проведенные практические мероприятия позволили создать действующие макеты, лабораторные стенды и опытные образцы ЦФАР и приступить к проведению практических экспериментов.

В разделе 3 описаны проверки предложенных технических решений.

Приведены методики проведения экспериментов, проводимых в лабораторных условиях и в реальной обстановке, приведены и обобщены их результаты. Стенд для проверок в лабораторных условиях приведен на рисунке 9.

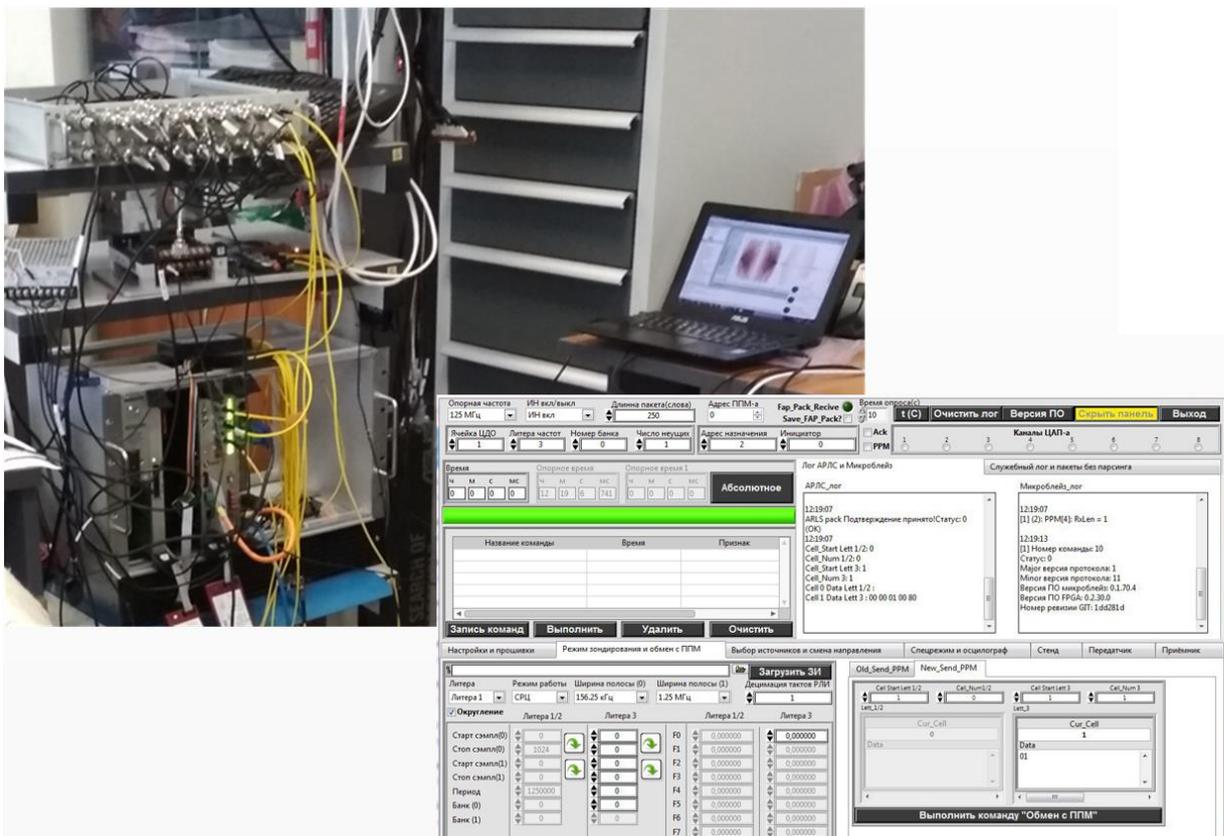


Рисунок 9 – Стенд ЦФАР для проверок в лабораторных условиях

В части синтеза оптимальных по заданным критериям качества конструкций ЦФАР (задача 1) на практике была подтверждена возможность использования метода экспертной оценки для выбора наилучших технических решений из рассматриваемых реализаций. Результаты выбора оптимальной конструкции

приведены на рисунке 10. Анализ конструктивного исполнения подтвердил целесообразность размещения узлов АЦП и ЦАП в типовой конструкции ЦФАР возможно ближе к излучателям с обеспечением минимальных длин аналоговых трактов, переходов и сочленений сигнальных трактов.

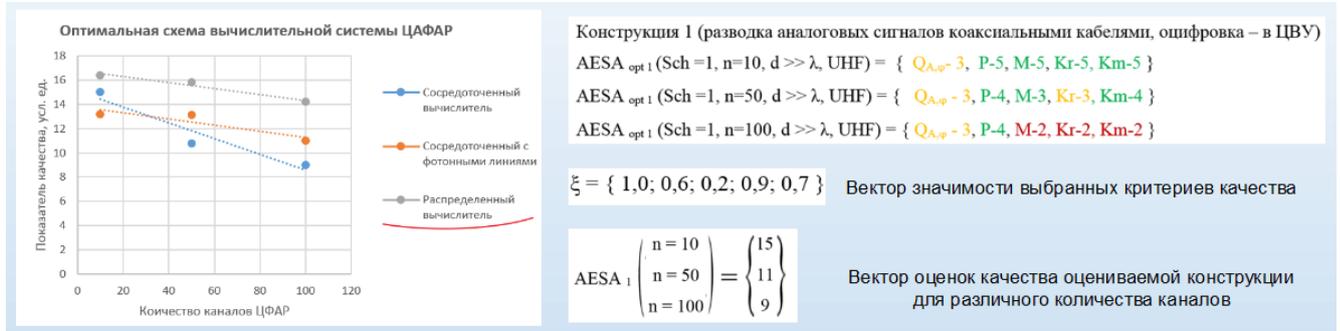


Рисунок 10 — Результаты оценки технических решений ЦФАР

На основе синтезированных структурной и функциональной схем устройства ЦОС многоканальной ЦФАР (задача 2) выполнена и проверена типовая конструкция ЦФАР с распределенным устройством ЦОС для различных частотных диапазонов, приведенная на рисунке 11.

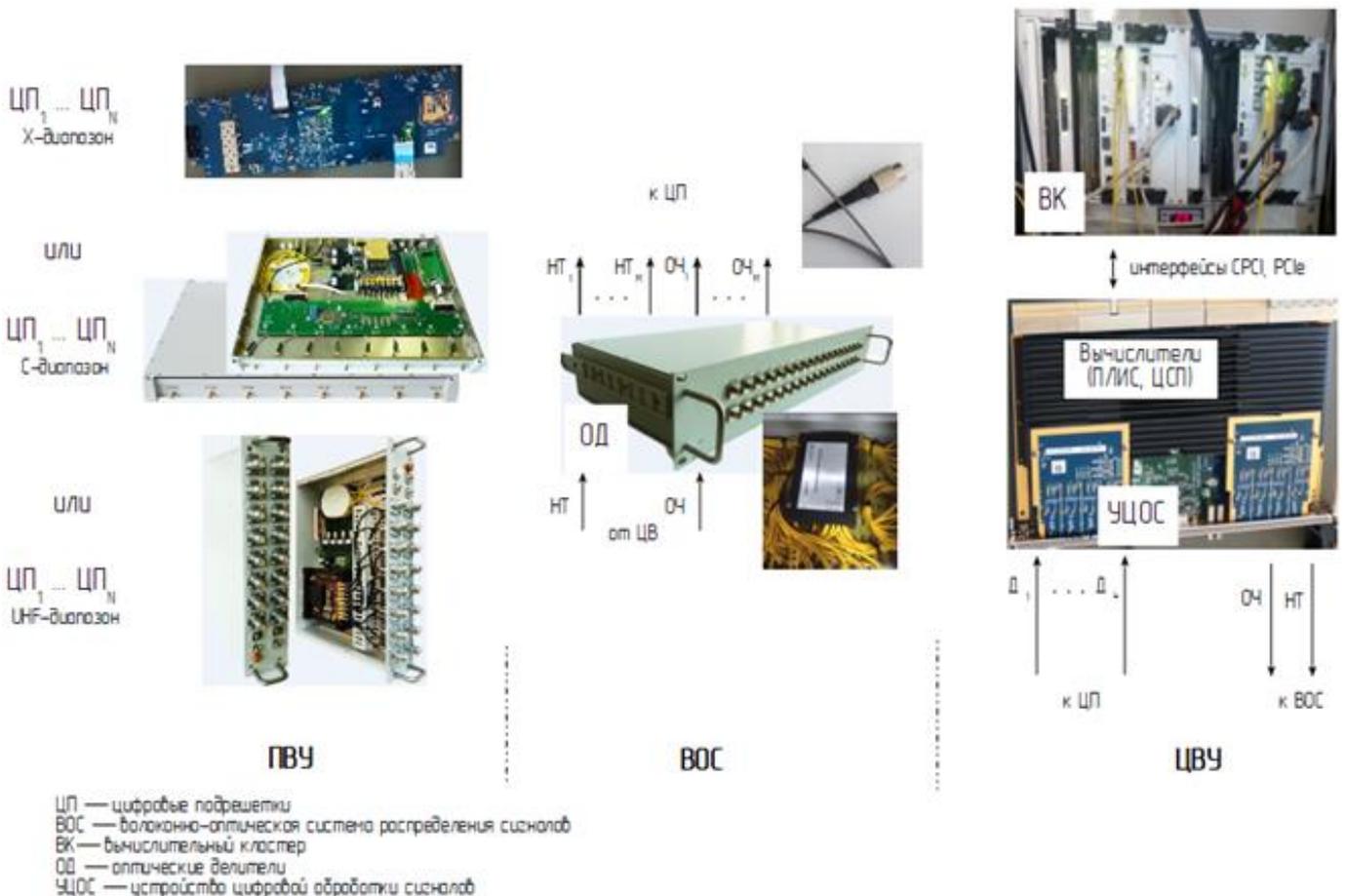


Рисунок 11 – Типовая конструкция ЦФАР с распределенным устройством ЦОС

Использование цифровых волоконно-оптических каналов с кодированием 8b/10b на ПЛИС обеспечивает скорость передачи в пять раз большую (не менее 8 Гбит/с при длине канала не менее 10 м) в сравнении с линиями LVDS (до 1,2 Гбит/с, до 2 м) при абсолютной задержке от ЦВУ до ЦППМ не более 0,42 мкс и джиттере кадровых синхроимпульсов не более 2 нс, что в 4-5 раз меньше соответствующих показателей известных технических решений.

В соответствии с задачей 3 реализовано техническое решение уплотнения оптических каналов. Волоконно-оптическая система передачи данных АФАР (ВОСПД АФАР) с устройством уплотнения каналов приведена на рисунке 12.

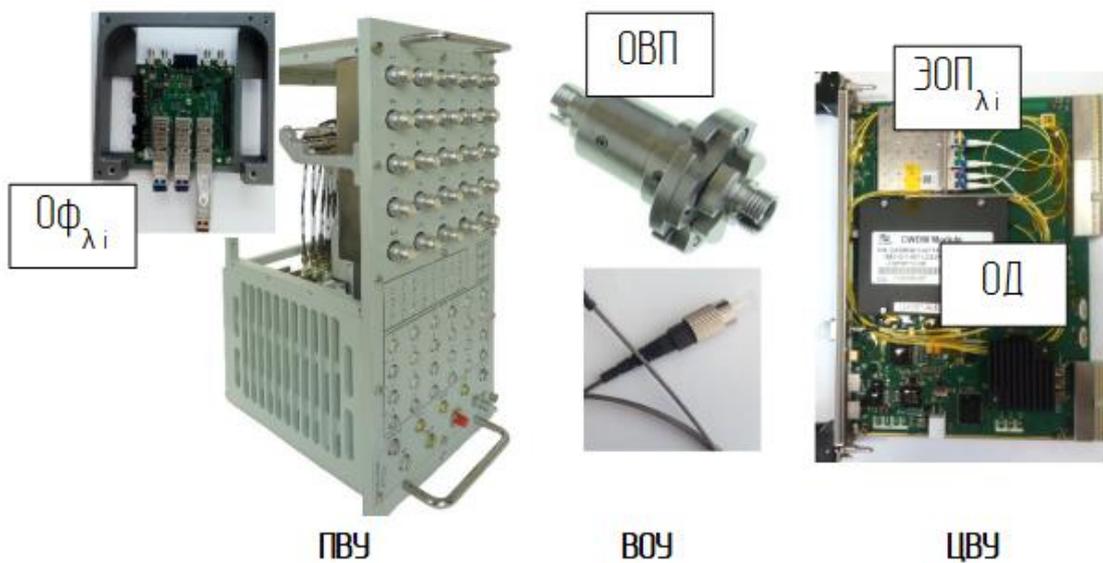


Рисунок 12 – ВОСПД АФАР с устройством уплотнения каналов

Проверка ЦФАР в режиме МРЛС проводилась в условиях эксплуатации бистатического радиолокатора, схема позиции приведена на рисунке 13.



Рисунок 13 – Схема опытной позиции бистатического радиолокатора

На одной из позиций был реализован режим приема, на второй – приема и формирования сигналов. Проверки показали принципиальную возможность передачи данных, а также достаточные для МРЛС характеристики (задача 4): скорость передачи не хуже 1 Мбит/с, вероятность ошибок в канале связи составляет около 10^{-6} при ОСШ не менее 13,5 дБ.

Дальность связи в сравнении с радиорелейным оборудованием увеличилась более чем в 3 раза (не менее 210 км в метровом диапазоне волн при условии прямой видимости) за счет кратно большего энергетического потенциала и соответствует дальности действия МРЛС. Увеличение скорости передачи информации по отношению к используемому спутниковому каналу связи составило более 7 раз (1 Мбит/с против 128 кБит/с).

Дрейф фазы радиосигнала частотой 100 МГц на разнесенных позициях бистатического радиолокатора за период накопления 0,1-0,2 с не превышает $0,01^\circ$ (СКО), что не влияет на итоговую ошибку измерений МРЛС, позволяет обеспечить когерентный радиоприем на разнесенных позициях (задача 5).

Определены пути дальнейшего совершенствования ЦФАР в направлениях: новых методов обработки сигналов на основе радиофотонных технологий, мультипроцессорных систем - на - кристалле (СНК) с интегрированными радиочастотными (РЧ) модулями, создания СНК на отечественных технологиях, базирующихся на мультипроцессорных интегральных схемах (задача 6).

Проведенные и описанные в разделе 3 эксперименты на практике подтвердили сходимость с теоретическими изысканиями, все технические решения и расчеты, приведенные в разделе 2, оказались состоятельными. В ходе работ с учетом полученного практического опыта улучшены ранее разработанные и созданы новые изделия в рамках внедрения результатов работы. Составлен перечень планов по дальнейшему развитию результатов.

В заключении сформулированы основные научно-технические результаты работы, сделаны выводы о ее практической значимости и целесообразности продолжения исследований в предметной области.

В приложении приведен акт о внедрении результатов работы.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

Работа носит выраженный прикладной характер, содержание всех научных положений направлено на решение задач совершенствования практической реализации ФАР с использованием новых цифровых методов.

Наиболее важные результаты представлены следующими выводами:

1. Предложенная методика синтеза оптимальных по заданным критериям качества конструкций ЦФАР на основе методов экспертных оценок позволяет минимизировать технические и экономические риски НИОКР при минимальных временных и финансовых ресурсах.

2. Разработанное устройство ЦОС многоканальной ЦФАР с цифровыми приемными и передающими каналами, объединенными цифровыми волоконно-оптическими линиями синхронизации и передачи данных обладает кратно лучшими параметрами в сравнении с прототипами и позволяет реализовать перспективные системы с ЦФАР.

3. Метод уплотнения сигналов синхронизации и передачи данных в единственный двунаправленный оптический канал для передачи через одноканальный оптический вращающийся переход позволяет снизить массогабаритные и стоимостные показатели антенного опорно-поворотного устройства в сравнении с многоканальной реализацией.

4. Разработанные методы синхронизации и передачи данных сегментов многопозиционных систем беспроводным способом позволяют снять ограничения по наличию коммуникационной инфраструктуры для развертывания МРЛС, обеспечить когерентный радиоприем на разнесенных позициях, увеличить расстояние между позициями и снизить стоимость поля наблюдения.

5. Сформулированные пути совершенствования ЦФАР позволили спланировать дальнейшие исследования.

В целом, задачи исследований решены в полном объеме, внедрение результатов позволило успешно реализовать ряд НИР и ОКР, обеспечить запуск в серийное производство ряда изделий. Исследования в обозначенных в работе направлениях целесообразно продолжить.

СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Статьи в рецензируемых научных изданиях из перечня ВАК

1. **Светличный Ю.А.** Особенности подхода к конструированию вычислительных систем цифровых фазированных антенных решеток / Ю.А.Светличный // Успехи современной радиоэлектроники. — 2018. — №12. — С. 156-159.

2. **Светличный Ю.А.,** Дегтярев П.А. Синхронизация и передача данных в радиотехнических системах с территориально распределенными сегментами. / Ю.А.Светличный // Доклады Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники. — 2019. — №3 Том 23. — С. 5-9.

3. **Светличный Ю.А.** Распределение сигналов синхронизации и данных цифровой антенной решетки на базе волоконно-оптических линий / Ю.А. Светличный // Доклады Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники. — 2020. — №3 Том 27. — С. 6-11.

Доклады в сборниках трудов международных конференций

1. Куприц В. Ю., Лундяк Т. С., **Светличный Ю. А.**, Скоторенко И. В., Дегтярев П. А. Оценка эффективности подавления активных шумовых помех методом автокомпенсации в радиотехнических системах связи и навигации // 26-я Международная Крымская конференция «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии» (КрыМиКо'2016) Севастополь, 4-10 сентября 2016 г.: материалы конф. в 12 т., Севастополь, 2015. – Т.5: С. 540-544.

2. **Светличный Ю.А.** Техническая реализация систем ЦОС в радиотехнических комплексах с распределенными модулями на зарубежной и отечественной ЭКБ. 21-я Международная конференция «Цифровая обработка сигналов и ее применение — DSPA 2019» — Москва, РНТОРЭС им. А.С.Попова, 2019. Сборник докладов. – Т.2: С.442-447.

Доклады в сборниках трудов всероссийских конференций

1. Ф.И. Шеерман, ... **Ю.А. Светличный.** Разработка универсального приемника L-, S- и C-диапазона на базе перспективных полупроводниковых технологий. Актуальные вопросы развития систем и средств воздушно-

космической обороны. Сборник докладов Шестой научно-технической конференции молодых ученых и специалистов, посвященной 80-летию со дня рождения А.А. Леманского, Москва, 2015. / общ. ред. Н.Э. Ненартович. — М.: ПАО «НПО «Алмаз», 2015. С. 204 — 210.

2. **Светличный Ю.А.**, Дегтярев П.А. Расчет характеристик подсистемы передачи данных по основному радиолокационному каналу многопозиционной радиолокационной системы. Конференция к 90-летию со Дня рождения главного конструктора РЛС А.А. Зачепиского – Нижний Новгород, ПАО «НИТЕЛ» им. В.И. Ленина, 2019. Сборник докладов. – С. 42-47.

3. **Светличный Ю.А.** Особенности подхода к конструированию вычислительных систем цифровых фазированных антенных решеток. Системы связи и радионавигации: сб. тезисов / науч. ред. В.П. Шабанов — Красноярск, АО «НПП «Радиосвязь», 2018. Сборник докладов. С 164-167.

4. Микитчук К.Б., ЧижА.Л., Скоторенко И.В., Григорьев Е.В., **Светличный Ю.А.**, Сычева А.В.. Оптоэлектронный гетеродин X-диапазона со сверхнизким фазовым шумом // «Электроника и микроэлектроника СВЧ-2019» / VIII Всероссийской конференция. Сб. статей / СПб.: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2019 г., с. 204-208.

Другие публикации

1. Глазов Г.Н., Ровкин М.Е., **Светличный Ю.А.** Свидетельство №2019617821 Программа расчета характеристик линейных и плоских ФАР. Заявка 2019616709 от 94.06.2019, рег. 20.06.2019.

Отчет о научно-исследовательских работах

1. Научно-технический отчет по итогам выполнения НИР «Кристалл» / рук. Светличный Ю.А. / ООО «ЛЭМЗ-Т». – 2019. – 204 С.

В заключении автор выражает благодарность научному руководителю, коллегам за переданный опыт и совместный труд, положенный в основу работы.