



А.В. Леньшин

БОРТОВЫЕ КОМПЛЕКСЫ ОБОРОНЫ САМОЛЕТОВ И ВЕРТОЛЕТОВ

Учебное пособие

В учебном пособии излагаются теоретические основы построения бортовых комплексов обороны самолетов и вертолетов, особенности функционирования в различных условиях, рассмотрены бортовые средства радиоэлектронного противодействия самолетов и вертолетов. Приведена информация о системах и средствах радиоэлектронной борьбы воздушных судов военного назначения.

БОРТОВЫЕ КОМПЛЕКСЫ ОБОРОНЫ САМОЛЕТОВ И ВЕРТОЛЕТОВ



А.В. Леньшин,

БОРТОВЫЕ КОМПЛЕКСЫ ОБОРОНЫ САМОЛЕТОВ И ВЕРТОЛЕТОВ



2018

**ВОЕННЫЙ УЧЕБНО-НАУЧНЫЙ ЦЕНТР
ВОЕННО-ВОЗДУШНЫХ СИЛ
«ВОЕННО-ВОЗДУШНАЯ АКАДЕМИЯ
имени профессора Н.Е. ЖУКОВСКОГО и Ю.А. ГАГАРИНА»
(г. Воронеж)**

А.В. Леньшин

**БОРТОВЫЕ КОМПЛЕКСЫ
ОБОРОНЫ
САМОЛЕТОВ И ВЕРТОЛЕТОВ**

Учебное пособие

**Воронеж
2018**

УДК 623.624

ББК 32.84

Л 46

Рецензенты:

доктор технических наук,
старший научный сотрудник *С.П. Баринов*
(АО «Калужский научно-исследовательский
радиотехнический институт»)

доктор технических наук, профессор *В.П. Лихачев*
(ВУНЦ ВВС «Военно-воздушная академия
имени профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина»)

Леньшин А.В.

Л46 Бортовые комплексы обороны самолетов и вертолетов: учебное пособие / А.В. Леньшин. – Воронеж: ВУНЦ ВВС «ВВА», 2018. – 312 с.

В учебном пособии излагаются теоретические основы построения бортовых комплексов обороны (БКО) самолетов и вертолетов, особенности функционирования в различных условиях, рассмотрены бортовые средства радиоэлектронного противодействия самолетов и вертолетов. Приведена информация о системах и средствах радиоэлектронной борьбы воздушных судов военного назначения.

Пособие предназначено для проведения практических и групповых занятий по дисциплине «Бортовые комплексы радиоэлектронной борьбы» на факультете авиационного радиоэлектронного оборудования ВУНЦ ВВС «Военно-воздушная академия имени профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина» (г. Воронеж).

УДК 623.624

ББК 32.84

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	5
Список основных сокращений	8
Глава 1. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ПОСТРОЕНИЯ БОРТОВЫХ КОМПЛЕКСОВ ОБОРОНЫ	10
1.1. Особенности технического синтеза БКО	10
1.2. Развитие и создание перспективных БКО воздушных судов военного назначения	19
1.3. Устройства запоминания и воспроизведения сигналов	25
1.3.1. Аналоговые устройства запоминания и воспроизведе- ния параметров сигналов	27
1.3.2. Цифровые устройства запоминания и воспроизведе- ния высокочастотных сигналов	35
1.4. Цифровая радиочастотная память и ее применение в си- стемах РЭБ	46
1.5. Приемники для мгновенного измерения частоты	61
Контрольные вопросы	69
Глава 2. БОРТОВЫЕ СРЕДСТВА РАДИОЭЛЕКТРОННОГО ПРОТИВОДЕЙСТВИЯ	71
2.1. Станции предупреждения об облучении	71
2.2. Станции активных помех	80
2.2.1. Малогабаритная станция помех МСП 418К	93
2.2.2. Станция активных помех «Гардения 1ФУЭ»	97
2.2.3. Станция активных помех «Сорбция»	99
2.2.4. Станция активных помех САП 518	102
2.2.5. Самолетная помеховая станция СПС-161 «Герань»	107
2.3. Радиолокационные ловушки	113
2.4. Устройства выброса расходуемых средств РЭБ	119
Контрольные вопросы	122
Глава 3. БОРТОВЫЕ КОМПЛЕКСЫ ОБОРОНЫ САМОЛЕТОВ	124
3.1. Бортовой комплекс обороны «Карпаты»	124
3.1.1. Назначение, принцип действия, тактико-технические характеристики и решаемые задачи БКО-2 «Карпаты»	124
3.1.2. Станция предупреждения об облучении СПО-15	129
3.1.3. Унифицированный тепlopеленгатор «Мак-УЛ1»	133

3.1.4. Автомат помеховый пиротехнический АПП-50-А	135
3.1.5. Вычислитель специализированный самолетный ВСС-Ф	136
3.2. Комплекс средств радиоэлектронного противодействия самолета Су-30МКИ	138
3.3. Комплекс средств радиоэлектронного противодействия КС РЭП-СМ самолета Су-30СМ	163
3.3.1. Станция предупреждения об облучении Л-150-30-СМ	168
3.3.2. Станция активных помех САП 518-СМ	176
3.3.3. Аппаратура управления и целеуказания противорадиолокационными ГСН изделий АУЦ-30-01-СМ	211
3.3.4. Устройство выброса УВ-30МКР	217
3.3.5. Программа подготовки данных предполетного программирования	221
Контрольные вопросы	234
Глава 4. БОРТОВЫЕ КОМПЛЕКСЫ ОБОРОНЫ ВЕРТОЛЕТОВ	237
4.1. Ложные тепловые цели	237
4.1.1. Уравнение оптико-электронного подавления	237
4.1.2. Виды ложных тепловых целей	239
4.2. Станции оптико-электронного подавления	246
4.3. Вертолетные станции активных помех	252
4.4. Вертолетный комплекс РЭБ «Рычаг-АВ-Э»	255
4.5. Бортовой комплекс защиты вертолетов «Кольчуга»	264
4.6. Бортовой комплекс обороны «Витебск»	266
4.7. Бортовой комплекс обороны «Президент-С»	271
4.8. Показатели эффективности БКО	278
4.9. Научно-технические проблемы обеспечения жизненного цикла авиационной техники РЭБ	284
Контрольные вопросы	295
Приложение. КОМПЛЕКС РЭБ С МАЛОРАЗМЕРНЫМИ БЛА «РЕПЕЛЛЕНТ»	297
Список литературы	310

ВВЕДЕНИЕ

Учебное пособие разработано в соответствии с федеральным государственным образовательным стандартом высшего образования по специальности 25.05.03 Техническая эксплуатация транспортного радиооборудования (уровень специалитета) для обеспечения дисциплины «Бортовые комплексы радиоэлектронной борьбы».

При подготовке учебного пособия использовалась только открытая отечественная и зарубежная литература, а также собственный опыт проведения занятий по дисциплине «Бортовые комплексы радиоэлектронной борьбы» на факультете авиационного радиоэлектронного оборудования Военного учебно-научного центра Военно-воздушных сил «Военно-воздушная академия имени профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина» (г. Воронеж).

Современный этап развития радиоэлектронного вооружения ведущих зарубежных стран характеризуется существенным повышением конфликтной устойчивости их функционирования в сложной радиоэлектронной обстановке (РЭО) [1, 2]. Реализация системно интегрированного подхода к созданию радиоэлектронных систем позволяет в настоящее время, и тем более в перспективе, эффективно решать задачи информационного противодействия и информационной защиты в интересах захвата и удержания информационного превосходства над противником при подготовке и в ходе боевых действий.

Действия ВКС России в Сирии стали примером беспрецедентного в истории отечественной авиации успеха при минимуме потерь. Особенно впечатляет почти полное отсутствие потерь при высокой интенсивности полетов в весьма тяжелых природно-климатических условиях. Для ВКС России Сирия стала своего рода полигоном для отработки нового вооружения (Су-30СМ, Су-35С) и новой тактики [3].

Результаты анализа боевых действий, в последнее время имевших место в Европе и на Ближнем Востоке, показывают, что системы и средства РЭБ воздушного базирования остаются одними из ключевых элементов в достижении превосходства над противником и, как следствие, в обеспечении успеха проводимых операций.

В локальных войнах и вооруженных конфликтах умелое применение сил и средств РЭБ приводило к повышению боевого потенциала группировок войск в 1,5 раза, позволяло снизить потери кораблей в 2...3 раза, авиации – в 4...6 раз. При этом в решении важнейшей задачи дезорганизация СУ войсками и оружием противника вклад РЭБ был несравнимо больше, чем иных действий войск. Современные авиационные комплексы радиоэлектронного подавления (КРЭП) находятся в состоянии интенсивного совершенствования. В долгосрочной перспективе (2020-2025 годы) объем задач, возлагаемый на авиацию ВКС, не только не уменьшится, а увеличится в 1,3...1,5 раза за счет количественного увеличения объектов воздействий [4]. Современный КРЭП должен практически мгновенно реагировать на внезапно возникающие угрозы.

Специфика построения и особенностей функционирования авиационных КРЭП в различных условиях такова, что далеко не все аспекты могут излагаться с одинаковой степенью подробности в общедоступной литературе. Автор стремился изложить материал пособия с учетом последних исследований и достижений в области авиационных КРЭП.

Учебное пособие состоит из четырех глав и приложения.

Первая глава посвящена основам построения бортовых комплексов обороны (БКО). Раскрыты особенности технического синтеза БКО и создания перспективных БКО воздушных судов военного назначения, описаны устройства запоминания и воспроизведения сигналов и приемники для мгновенного измерения частоты, широко используемые в авиационных КРЭП.

Во второй главе рассмотрены бортовые средства радиоэлектронного противодействия, излагаются сведения о станциях предупреждения об облучении, станциях активных помех, радиолокационных ловушках и устройствах выброса расходуемых средств РЭБ.

В третьей главе рассмотрены бортовые комплексы обороны самолетов. Особое внимание уделено комплексу средств радиоэлектронного противодействия самолета Су-30СМ.

В четвертой главе излагаются сведения о бортовых комплексах обороны вертолетов, анализируются ложные тепловые цели и станции

оптико-электронного подавления, рассматриваются вертолетные станции активных помех, особенности подавления ИК ГСН.

В приложении приведены основные технические характеристики комплекса РЭБ с малоразмерными БЛА «Репеллент». Список литературы не претендует на полноту и является перечнем материалов, используемых автором и рекомендуемым для более глубокого изучения.

Учебное пособие адресовано курсантам и слушателям Военного учебно-научного центра ВВС «Военно-воздушная академия имени профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина» (г. Воронеж), а также всем желающим ознакомиться с бортовыми средствами и комплексами радиоэлектронной борьбы.

Автор выражает искреннюю благодарность уважаемым рецензентам: первому заместителю генерального директора-генеральному конструктору АО «КНИРТИ» доктору технических наук, старшему научному сотруднику Сергею Петровичу Баринову и профессору кафедры боевого применения средств РЭБ (с воздушно-космическими системами управления и наводящимся оружием) ВУНЦ ВВС «ВВА» доктору технических наук, профессору Лихачеву Владимиру Павловичу, просмотревших рукопись и сделавших ряд весьма полезных замечаний и ценных советов, которые были учтены при подготовке учебного пособия к печати.

Автор признателен и благодарен Ю.И. Маевскому, В.П. Сидорчуку, В.В. Лебедеву, А.Р. Леньшину, оказавшим существенную помощь при подготовке и оформлении графических и иллюстративных материалов пособия, а также всем, кто способствовал систематизации материала, улучшению качества и содержания предлагаемого учебного пособия.

Автор будет рад любым замечаниям и предложениям по улучшению учебного пособия.

Глава 1

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ПОСТРОЕНИЯ БОРТОВЫХ КОМПЛЕКСОВ ОБОРОНЫ

1.1. Особенности технического синтеза бортовых комплексов обороны

Качественные изменения в радиоэлектронном (РЭ) вооружении ведущих зарубежных стран и создание интегрированных информационно-управляющих систем (ИУС) значительно повысили роль РЭБ, способной полностью нейтрализовать информационную составляющую и тем самым обеспечить дезорганизацию управления войсками (силами) и оружием противостоящей стороны. Современному и перспективному РЭ вооружению эвентуального противника должна быть противопоставлена высокоэффективная система вооружения РЭБ видов (родов войск) ВС РФ, обеспечивающая решение в мирное и военное время комплекса возложенных на нее задач в космическом, воздушном, наземном пространстве и на морских акваториях [5].

В настоящее время основу системы вооружения РЭБ видов ВС РФ (родов войск) составляет совокупность специальных средств и комплексов, предназначенных для поражения (подавления) РЭС (комплексов, систем) противника, ведения комплексного технического контроля, а также необходимых для их боевого применения средств радиоэлектронной разведки (РЭР) и управления.

Важнейшими элементами системы вооружения РЭБ являются комплексы РЭП, представляющие собой совокупность средств РЭП, непосредственной (исполнительной) РЭР и управления ими, других обеспечивающих средств и устройств, конструктивно и функционально связанных и совместно используемых для решения задач РЭП. Функционально-технический облик комплексов РЭП, как правило, определяется в результате концептуального проектирования, или, другими словами, синтеза. Существо задачи заключается в обосновании таких состава, структуры и технических характеристик комплексов, которые обеспечивают экстремальное значение выбранного показателя боевой эффективности при заданных ресурсных ограничениях.

Синтез комплекса РЭП (КРЭП) начинается с разработки основных направлений развития техники РЭП, продолжается в ходе военно-технических исследований по обоснованию тактико-технических требований (ТТТ) к КРЭП в рамках военных научно-исследовательских работ (НИР) и завершается (в концептуальном смысле) в специальной промышленной НИР, направленной на разработку тактико-технического задания (ТТЗ) на опытно-конструкторскую работу (ОКР) по созданию соответствующего образца техники РЭП. Реализуемость требований ТТЗ на ОКР оценивается специалистами аппарата генерального конструктора по системе РЭБ, что, в значительной степени, определяет потенциальную возможность выполнения работы организациями промышленности в установленные сроки.

Схема общей технологии синтеза авиационного КРЭП (как наиболее сложного и динамично развивающегося элемента системы вооружения РЭБ ВС РФ) при единых ограничениях на средства РЭП и снижения заметности представлена на рисунке 1.1 (АМ – аппаратный модуль) [5].

Исходные данные и ограничения (рис. 1.1) включают в себя: ТТХ существующих и разрабатываемых изделий электронной техники; типовые условия эксплуатации, требования по ремонтпригодности, надежности, стойкости; ТТХ существующих и разрабатываемых средств РЭП; ограничения по массе, энергопотреблению, объему, требования по условиям эксплуатации; ТТХ существующих и разрабатываемых комплексов РЭП; оперативно-тактические требования; типовые условия применения; ТТХ РЭС противника; ограничения по размещению на носителе.

Следует подчеркнуть, что методология синтеза КРЭП на современном этапе ее развития базируется на методах системной теории конфликта в РЭБ [6–8]. Это позволяет представить процесс синтеза в виде совокупности частных подпроцессов с сохранением его целостности и обеспечить возможность количественного обоснования решений по выбору оптимальных вариантов состава, характеристик и алгоритмов функционирования системы и ее элементов при заданных ограничениях.

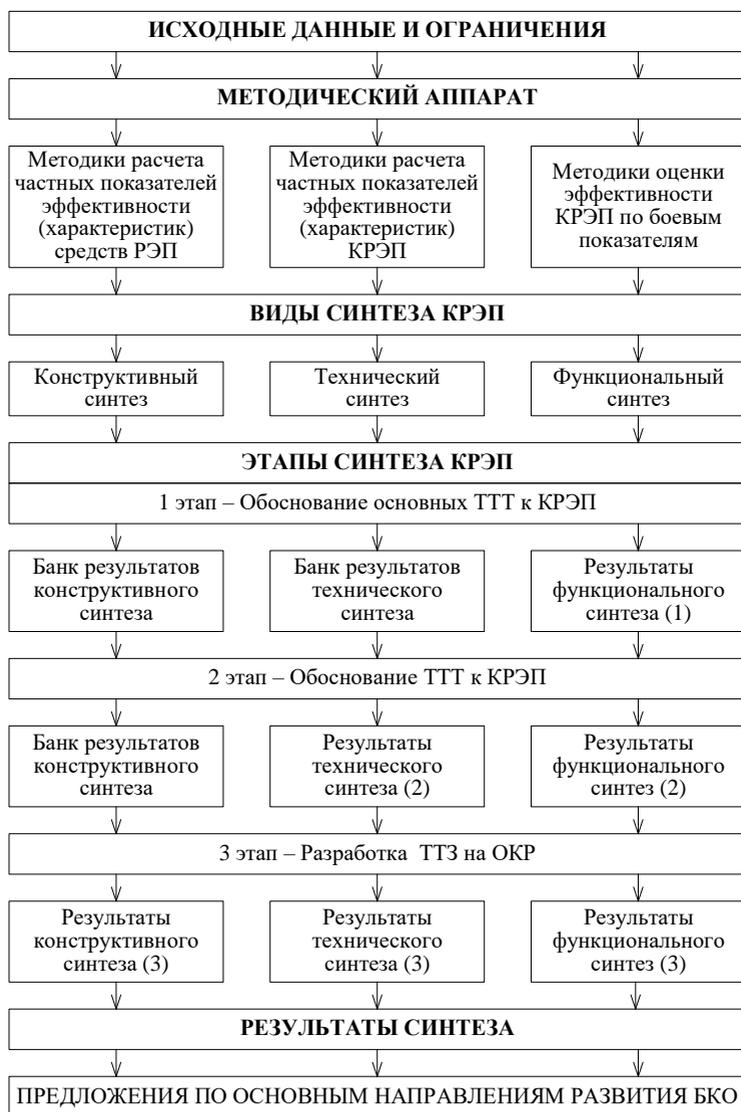


Рис. 1.1. Схема общей процедуры синтеза комплекса РЭП

Сложность процесса конфликтного взаимодействия современных информационных систем с комплексами (средствами) РЭП, отличающегося наличием многочисленных внешнесистемных и внутрисистемных связей, определяет объективные трудности их формального математического описания и «прямого» решения задачи их синтеза [9, 10]. В связи с этим на первый план выдвигаются вопросы корректного описания (моделирования) динамики функционирования конфликтующих систем в сложной радиоэлектронной обстановке, а процесс синтеза представляет собой итерационную процедуру последовательных приближений к оптимальному решению.

Как показал опыт исследований, в процедуре синтеза КРЭП целесообразно выделить три последовательных этапа: первый этап – обоснование основных тактико-технических требований (ТТТ) к комплексу; второй этап – обоснование ТТТ к комплексу; третий этап – разработка ТТЗ на ОКР по созданию комплекса РЭП. На каждом из этапов КРЭП рассматривается с трех позиций: 1) выполняемых им функций (*функциональный синтез*); 2) технических средств, реализующих данные функции (*технический синтез*); 3) конструктивных элементов, используемых для сборки этих средств (*конструктивный синтез*) [5].

Основная задача **функционального синтеза** – обоснование оптимальных состава, структуры и алгоритма функционирования КРЭП, видов и параметров помех, определяющих требуемые характеристики его подсистем (средств разведки, управления, создания помех). **Технический синтез** проводится, главным образом, в интересах обоснования оптимальных принципов построения подсистем КРЭП, а **конструктивный синтез** – оптимизации номенклатуры и технических характеристик конструктивно-сборочных единиц (КСЕ) каждой из подсистем. На всех этапах синтеза выполняется *три типа операций*: 1) генерация альтернативных вариантов; 2) оценка (анализ) эффективности вариантов; 3) выбор предпочтительного варианта реализации системы защиты.

На *первом этапе* проводится только функциональный синтез и определяются наиболее важные (с точки зрения решаемых задач) характеристики КРЭП и входящих в его состав технических средств. Первичные результаты технического и конструктивного синтеза заим-

ствуются из банка данных, полученных при решении задач синтеза КРЭП предыдущего поколения. На данном этапе осуществляется подготовка исходных данных для исследований и обоснование множества типовых условий боевого применения КРЭП, прогнозирование функционально-технического облика РЭС как объектов подавления, определение базовых множеств способов и средств РЭП. Основными результатами функционального синтеза на 1 этапе (рис. 1) являются:

- 1) генерация возможных вариантов состава и структуры КРЭП, алгоритмов функционирования и характеристик КРЭП;
- 2) выбор общего и частных показателей эффективности, комплексная оптимизация средств РЭП и РЭС;
- 3) предварительные исследования по оценке эффективности альтернативных вариантов КРЭП;
- 4) выбор предпочтительного варианта КРЭП.

Особое место на данном этапе занимает задача обоснования (прогнозирования) функционально-технического облика РЭС как объектов подавления в условиях существенной априорной неопределенности. В соответствии с принципом гарантированного результата указанная неопределенность преодолевается с использованием метода «прогнозирования за противника», предусматривающего определение оптимальных характеристик и алгоритмов функционирования РЭС в типовых условиях применения.

На *втором этапе* проводятся функциональный и технический синтезы. При этом первичные результаты конструктивного синтеза заимствуются из соответствующего банка данных. На данном этапе выполняются основные параметрические исследования. Их цель – получение зависимости энергетических и неэнергетических характеристик средств РЭП (элементов КРЭП) от выделяемого ресурса (массы, габаритов, энергопотребления) при различных принципах их построения, а также зависимости показателей эффективности КРЭП от его характеристик в диапазоне возможных ограничений.

Основные результаты технического синтеза на 2 этапе:

- 1) генерация вариантов состава, структуры и характеристик АМ КРЭП;
- 2) комплексная оптимизация КРЭП и средств РЭС (СРЭС);

3) анализ (оценка) эффективности вариантов АМ КРЭП и СРЭЗ;

4) выбор предпочтительного варианта АМ КРЭП и СРЭЗ.

Основными результатами функционального синтеза на 2 этапе (рис. 1) являются:

1) генерация вариантов состава, структуры характеристик КРЭП;

2) комплексная оптимизация средств РЭП и РЭЗ;

3) анализ (оценка) эффективности вариантов КРЭП;

4) выбор предпочтительного варианта КРЭП.

На *третьем этапе* проводятся все виды синтеза КРЭП (функциональный, технический, конструктивный), чтобы построить *целевую функцию* (основной показатель эффективности как функция характеристик КРЭП) и уточнить оптимальные состав, структуру, характеристики и алгоритмы функционирования КРЭП с учетом возможности их реализации на конструктивном уровне. Опыт практического обоснования требований к технике РЭБ показывает, что основное внимание на этом этапе уделяется получению зависимостей характеристик подсистем и комплекса в целом от номенклатуры и технических характеристик КСЕ и комплектующих изделий при заданных ограничениях. Полученные в результате оптимизации характеристики комплексов РЭП трансформируются в соответствующие ТТТ, которые используются при разработке ТТЗ на ОКР [5].

Особенности задач функционального, технического и конструктивного синтеза КРЭП определяют необходимость использования различных критериев оптимизации и методического аппарата для проведения исследований. В частности, функциональный синтез, как правило, проводится по критерию максимума боевого показателя эффективности с использованием методик, воспроизводящих динамику конфликта РЭС с совокупностью комплексов РЭП в типовых условиях их применения. Технический и конструктивный синтезы выполняются в большинстве случаев по критерию минимума стоимости создания подсистем (блоков, узлов, компонентов) с заданной характеристикой (характеристиками), в качестве которой может рассматриваться наиболее жесткое техническое ограничение (масса, энергопотребление, объем и т.д.). Для проведения исследований используются ме-

тодики, позволяющие рассчитывать частные показатели эффективности (характеристики средств РЭП, блоков и узлов аппаратуры) в зависимости от характеристик комплекующих изделий.

На всех этапах синтеза технического облика КРЭП особое место занимает моделирование конфликтного взаимодействия сложных организационно-технических систем, к которым относятся современные ИУС. Как правило, при моделировании конфликтов используются методы теории живучести и теории многоуровневых иерархических систем. Существо данных методов заключается в структурной декомпозиции моделируемого конфликта на взаимосвязанные между собой частные конфликты отдельных элементов (подсистем) рассматриваемых систем и установлении их наиболее существенных (с позиций решаемой проблемы) взаимосвязей.

Это позволяет сформировать динамическую модель конфликта в виде ориентированных структурно-взаимосвязанных мультиграфов, состояния которых отражают возможные исходы частных конфликтов на различных иерархических уровнях [7, 9]. Для математического описания конфликта в настоящее время широко используются аналитические методы теории полумарковских случайных процессов, а также методы имитационного моделирования, базирующиеся на методе Монте-Карло. Это позволяет представить динамическую модель конфликта в виде системы интегро-дифференциальных уравнений относительно вероятностей и плотностей вероятностей распределения времени переходов между состояниями графа.

Процесс получения законов распределения времени переходов их элементов в конфликтах сложных адаптивных систем, число состояний которых может исчисляться сотнями и тысячами, становится весьма трудоемким. Имитационное моделирование не накладывает жестких ограничений на законы распределения случайных параметров системы и количество ее возможных состояний, но также требует большого объема вычислительных экспериментов. При этом для получения достаточных статистик показателей эффективности с необходимой точностью требуется воспроизведение соответствующего количества независимых реализаций случайных величин, характеризующих качество функционирования элементов системы на различных иерархических уровнях конфликта. При имитационном моделирова-

нии важное значение имеет корректный выбор шага моделирования, чтобы воспроизводить одновременное функционирование элементов системы на различных иерархических уровнях конфликта.

При этом наивысший уровень детализации конфликта имеет место при техническом синтезе КРЭП, что определяет необходимость использования при разработке методического аппарата следующих **принципов** [5]:

- **функциональных эквивалентов**, предполагающего выделение и независимое моделирование наиболее существенных элементов системы с целью получения частных (прежде всего, информационных и информационно-боевых) показателей эффективности в аналитической форме и последующим их «вложением» в узловые точки модельного времени в показатели верхнего уровня; это позволяет обеспечить корректный учет всех эффектов РЭБ на уровне информационного конфликта и обеспечить чувствительность интегрального боевого показателя эффективности к варьируемым параметрам;

- **унификации модельных процедур**, заключающегося в формировании ограниченного количества унифицированных модулей для воспроизведения типовых алгоритмов функционирования различных элементов конфликта; при этом существенно упрощается решение большого объема исследовательских задач за счет переноса акцента исследований на формирование необходимых исходных данных и обработку результатов моделирования;

- **рационального сочетания методов имитационного моделирования и аналитических методов**, предусматривающего замену (где это возможно) наиболее трудоемких имитационных процедур аналитическими (численными) расчетами с последующим использованием полученных результатов при оценке интегрального показателя эффективности системы защиты; использование данного принципа позволяет существенно снизить объем вычислительных экспериментов, а в некоторых случаях избежать непродуктивного моделирования при получении вероятностных и точностных показателей качества функционирования систем на краях диапазона их возможных значений.

В целом использование вышеуказанных принципов и подходов обеспечивает возможность адекватного воспроизведения сложного группового конфликта адаптивных систем и расчет показателей их эффективности на различных уровнях конфликта с приемлемой для решения задачи синтеза точностью.

В ходе решения задачи синтеза выявляются противоречия между требуемыми и реально достижимыми характеристиками КРЭП и определяются пути преодоления указанных противоречий. На основе анализа этих путей формулируются предложения по основным направлениям развития техники РЭП в прогнозируемый период.

Практика решения задач синтеза КРЭП позволяет выделить на уровне функционального синтеза *три основные группы внутрисистемных противоречий*:

- 1) информационные;
- 2) функционально-алгоритмические;
- 3) электромагнитной совместимости средств РЭП с другими РЭС в составе комплексов и бортовыми РЭС защищаемых объектов.

Следует подчеркнуть, что границы вышеуказанных противоречий достаточно «размыты» и в действительности они могут значительно «переплетаться».

На техническом уровне эти противоречия сводятся к проблеме реализуемости требуемых значений основных характеристик комплексов РЭП при заданных ресурсных ограничениях. Очевидно, что одним из основных противоречий на данном уровне является необходимость повышения энергопотенциала средств РЭП, приводящая к повышению радиолокационной и радиотехнической заметности КРЭП и защищаемого объекта, при одновременном требовании обеспечения их малой заметности. Преодоление указанного противоречия возможно путем решения задачи комплексной оптимизации характеристик средств РЭП и снижения заметности объекта защиты с учетом его конструктивно-технических особенностей и энерго-массогабаритных ограничений.

На конструктивном уровне основные противоречия сводятся к проблеме реализуемости соответствующих КСЕ средств РЭП при заданных ресурсных ограничениях. Пути преодоления этих противоречий заключаются в оптимизации технических решений с учетом со-

временного состояния и перспектив развития электронной компонентной базы (ЭКБ) и ресурсных ограничений, в том числе объемов финансирования.

Следует подчеркнуть, что создание перспективных КРЭП с предельно достижимыми характеристиками определяет необходимость применения качественно новой ЭКБ. К настоящему времени разработаны промышленные технологии создания многофункциональных широкополосных и сверхширокополосных модулей перспективных комплексов РЭБ на основе многослойных печатных плат СВЧ при одновременном снижении массы, габаритов и повышении их надежности. Разработанная технология обеспечивает возможность изготовления практически всей номенклатуры КСЕ аппаратуры РЭБ, используя глубокую интеграцию СВЧ устройств со схемами управления и цифровой обработки сигналов.

При этом обеспечивается существенное (в 2...3 раза) снижение массогабаритных характеристик, снижение трудоемкости изготовления в 5...15 раз, снижение стоимости аппаратуры РЭБ в 3...5 раз по сравнению с общепринятой технологией микросборок с применением керамических подложек и тонкопленочной технологии в титановом сложном корпусе [5]. Использование в качестве технологического базиса ограниченной номенклатуры унифицированных АМ позволит обеспечить качественный рывок в уровне технического исполнения перспективной аппаратуры и создать новое поколение авиационной техники РЭБ, обеспечивающей парирование преимуществ радиоэлектронного вооружения ведущих зарубежных стран.

1.2. Развитие и создание перспективных БКО воздушных судов военного назначения

Основной прирост боевых потенциалов в ближайшей перспективе будет возможен за счет использования интеллектуальных СУ войсками и оружием, а также применения средств вооруженной борьбы, использующих нетрадиционные способы воздействия на противника. К таким средствам вооруженной борьбы, прежде всего, относит-

ся авиационная техника РЭБ, представляющая собой сложный объект, характеризуемый высокой наукоемкостью.

Оснащение боевых самолетов и вертолетов средствами и комплексами РЭБ способно многократно повысить боевой потенциал и снизить возможные потери. При этом стоимость техники РЭБ составляет единицы процентов по отношению к стоимости основных видов вооружения. Из достаточно широкого круга задач, стоящих перед современными авиационными средствами и комплексами РЭБ, можно выделить задачи, определяющие ряд принципиальных особенностей их построения:

- «жесткая» целесообразность перекрытия диапазонов работы всех РЛС обнаружения, ЦУ, УО, РЭС связи и навигации;
- функциональная необходимость одновременного выполнения большого количества сложных задач – прием и высокоточный анализ сигналов РЭС, определение их координат, типа, режима работы и степени опасности, подавление нескольких угрожающих РЭС (синтез помеховых сигналов и формирование направленного излучения), взаимодействие с БРЭО и экипажем.

Указанные задачи определяют *принципиальные особенности* построения перспективных авиационных средств и комплексов РЭБ:

- сверхширокополосность РТ части аппаратуры (более 3 октав);
- необходимость реализации параллельной сигнальной обработки принимаемых РТ сигналов в мгновенной полосе частот, равной нескольким ГГц;
- максимальное увеличение функциональной плотности исполнения аппаратуры для снижения ее массогабаритных показателей и обеспечения возможности интеграции с другой бортовой аппаратурой;
- предельная унификация базовых цифровых элементов аппаратуры, позволяющая снизить себестоимость, облегчить процессы модификации и модернизации аппаратуры [4].

Указанные особенности перспективной аппаратуры авиационных КРЭП определяют целесообразность ее построения на основе цифровых сверхширокополосных устройств сигнальной обработки, позволяющих в максимальной степени реализовать приведенные вы-

ше особенности и дополнительно получить возможность быстрой реструктуризации аппаратуры обработки путем перезаписи проектов сигнальной обработки в программируемых логических интегральных схемах (ПЛИС), а также многократно повысить точностные характеристики аппаратуры.

За последние годы в области развития средств РЭП РЛС наметился существенный прогресс в рамках *трех классов защиты* (индивидуальной, коллективной и групповой). Этот прогресс обусловлен разработкой принципов:

- оптимальное управление ресурсами подавления (формирование по отношению к каждой конкретной РЛС соответствующих видов помех с параметрами, гарантирующими эффективное подавление);
- обеспечение эффективного выбора приоритетности объектов РЭП (избирательное подавление РЛС, исходя из степени угрозы для защищаемого ЛА) [4].

Техническая реализация наиболее перспективных процедур РЭП РЛС включает в себя:

1) периодическую постановку помех (период создания помехи определяется временем доразведки и излучения помехи с заданными параметрами – процедура типа «Цикл»);

2) обеспечение функционирования в системе РЭП алгоритма подавления, включающего в себя своевременный расчет параметров помех (моментов начала и окончания создания помехи, частоты, мощности, ширины спектра и направления создания) и формирование помехи с требуемыми характеристиками сигналов – процедура типа «Конвейер»;

3) обеспечение в системе РЭП процедуры преобразования входного сигнала с помощью местного гетеродина в сигнал промежуточной частоты аналого-цифровом преобразовании, стробировании, запоминании фазовой структуры сигнала и формировании помехи путем модуляции сигнала по амплитуде и фазе с задержкой по времени излучения – процедура «DRFM» (цифровая радиочастотная память).

Для защиты ЛА от ЗПК необходимо решить ряд задач, совокупность которых может быть квалифицирована как оптико-электронное противодействие по замкнутому циклу:

- обнаружение с высокой степенью надежности факта пуска и определение с необходимой точностью угловых координат атакующей ракеты;
- сопровождение атакующей ракеты с ГСН на траектории с точностью, необходимой для наведения помехового излучения;
- генерацию лазерного излучения, содержащего ряд длин волн, находящихся в пределах спектральных диапазонов оптических ГСН современных и новых поколений ЗРК;
- обеспечение противодействия в течение времени, достаточно для того, чтобы помеховое воздействие на СУ ГСН приводило к срыву процесса наведения;
- генерацию лазерного излучения подавления с плотностью потока мощности значительно выше (на порядки), чем плотность потока мощности ИК излучения самолетов и вертолетов в соответствующем спектральном диапазоне для обеспечения удовлетворительного соотношения (сигнал помехи/сигнал от цели);
- генерацию лазерного излучения с мощностью, достаточной для формирования отраженного излучения от ГСН атакующей ракеты (это дает возможность системе противодействия селективировать ракеты с оптическим наведением от других угроз, измерять дальность до атакующей ракеты, а также осуществлять оценку результатов противодействия) [4].

Существует тенденция объединения многочисленных РТ и ОЭС на одном ЛА (средств радиолокации, РЭБ, государственного опознавания, радионавигации, передачи данных, лазерных, ИК и других датчиков информации) в единый интегрированный радиоэлектронный комплекс (ИРЭК). Такое объединение возможно только при наличии централизованного управления с помощью цифровой ЭВМ с большими ресурсами быстродействия и оперативной памяти.

Только цифровые ЭВМ с высоким быстродействием и большим объемом оперативной памяти способны управлять ресурсами авиационных комплексов РЭБ, включающими:

- совокупность станций активных помех (САП);
- расходуемые средства (дипольные отражатели (ДО), передатчики помех одnorазового действия (ППОД), буксируемые активные

радиолокационные ловушки, противорадиолокационные УР, снаряды с ЭМ боевой частью);

- средства функционального поражения РЭС (СВЧ и лазерное оружие функционального поражения);
- распределение энергетического потенциала САП для одновременного подавления нескольких РЭС;
- способность быстрого изменения ориентации и ширины лучей ДНА (ФАР) САП в заданных секторах пространства;
- способность управления последовательностью создания помех нескольким РЭС одной САП.

Для разработки авиационных КРЭП имеют значения многие характеристики подавляемых РЭС [4, 11, 12]:

- диапазон рабочих частот;
- тип сигнала (импульсный с малой или большой скважностью, непрерывный, непрерывный с ЧМ и т.д.);
- эффективная излучаемая мощность передатчика РЛС;
- вид внутриимпульсной модуляции сигналов (ЛЧМ, ФКМ);
- использование скачкообразной перестройки несущей частоты РЛС или работа на разнесенных частотах;
- длительность импульса, модуляция длительности импульсов, использование групп импульсов;
- период и модуляция периода повторения;
- модуляция сигнала из-за сканирования антенного луча;
- характеристики ДНА в главном луче и в БЛ;
- поляризационные характеристики антенной системы РЭС;
- способ сопровождения цели по угловым координатам;
- способ наведения ракет;
- способность работать в пассивном режиме по импульсным и непрерывным сигналам;
- местоположение, максимальная дальность действия и др.;
- имеющиеся сведения о назначении РЭС;
- способы защиты от воздействия помех и их характеристики.

В зависимости от степени интеграции отдельных элементов аппаратуры РЭБ в различные группы можно выделить несколько ка-

тегорий таких групп: устройства, средства, комплексы и системы РЭБ. Под понятием бортового комплекса обороны (БКО) понимается совокупность БК РЭБ и средств огневого поражения противника [1, 2, 4].

Средства РЭБ, находящиеся на вооружении, в зависимости от решаемых задач подразделяются на индивидуальные, групповые и индивидуально-взаимные.

Индивидуальные средства РЭБ предназначены для защиты самолетов, вертолетов и других ЛА, на которые они установлены, от обнаружения и поражения огневыми средствами ПВО противника путем нарушения работы (снижения эффективности функционирования) РЭС управления оружием. На основе многочисленных исследований по оценке эффективности применения средств РЭБ можно утверждать – средства индивидуальной и индивидуально-взаимной защиты снижают вероятность поражения до 0,2...0,3 [4].

Объекты РЭП индивидуальными средствами РЭБ:

- РЛС УО ЗРК большой, средней и малой дальности и ЗАК;
- БРЛС самолетов и вертолетов;
- ИК и лазерные прицелы зенитных средств и бортового оружия;
- РЛГСН и ИК ГСН управляемых ракет;
- РВ и оптические взрыватели средств поражения [1, 2, 11, 12].

Групповые средства РЭБ предназначены для обеспечения прорыва (преодоления) ПВО противника боевыми порядками авиационных соединений и частей путем РЭП РЭС управления войсками и оружием ПВО и авиации противника, а также его средств РЭБ и разведки. Групповые средства РЭБ устанавливаются на специальных самолетах, вертолетах РЭБ дальней, фронтовой, армейской, морской и военно-транспортной авиации, на боевых самолетах ДА, ДПЛА, автоматических аэростатах, а также на объектах наземного и морского базирования. Групповые средства РЭБ, нарушающие целераспределение, уменьшают число атак средств поражения на 30 ... 40 % [4].

Объекты РЭП групповыми средствами РЭБ:

- РЛС и средства связи управления оружием ПВО;
- средства связи в составе РЭО СУ общевойсковыми объединениями, соединениями и частями противника;

- РЛС обнаружения, определения высоты, опознавания, наведения истребителей и целеуказания ЗРК и ЗАК;
- радиолинии органов управления системы ПВО и радиоизлучающие средства связи и локации в составе РЭО СУ авиацией (тактической, армейской) противника;
- РЛГСН и ИКГСН управляемых ракет;
- пассивные РЭС обнаружения и сопровождения постановщиков активных помех;
- РВ средств поражения;
- средства РЭР и РЭБ;
- РЭС разведывательно-ударных комплексов (РУК) [1, 2, 12].

Индивидуально-взаимные средства РЭБ имеют такое же назначение, как и индивидуальные средства. В состав индивидуально-взаимных средств РЭБ входят индивидуальные средства, дополненные аппаратурой информационного обмена между защищаемыми ЛА. Индивидуально-взаимную защиту может реализовать пара ударных самолетов посредством совместной постановки мерцающей помехи (помеха создается путем поочередного включения ПП).

1.3. Устройства запоминания и воспроизведения сигналов

Устройства запоминания и воспроизведения сигналов (УЗВС) являются составной частью систем информационного обеспечения современных многофункциональных комплексов различного назначения. УЗВС предназначены для:

- запоминания частотно-временной (несущая частота, форма огибающей импульса, длительность и период следования импульсов, форма и ширина спектра сигнала, параметры модуляции, моменты приема сигналов, период обзора пространства) и пространственной структуры (направление прихода, параметры продольной и поперечной функций пространственно-временной когерентности ЭМП и параметры эллипса поляризации сигнала в раскрыве приемной антенны) принимаемых сигналов;

- выдачи данных в системы измерения и анализа параметров этих сигналов;
- воспроизведения в необходимые промежутки времени запомненных сигналов [4, 13].

Запоминание параметров сигналов РЭС в КБО и их воспроизведение необходимо при:

- обработке сигналов в реальном масштабе времени в условиях отсутствия возможности детального анализа их пространственно-временной и спектральной структуры;
- разработке систем РТР и РЭП когерентно-импульсных РЛС и РЛС с пространственно-временной обработкой сигналов.

В настоящее время для запоминания радиосигналов в средствах РТР и РЭП используются следующие физические принципы:

- 1) запоминание с помощью многоканальных (матричных) усилительно-генераторных устройств;
- 2) запоминание на высокочастотных и ультразвуковых линиях задержки (рециркуляторах);
- 3) дискретно-аналоговое запоминание на приборах с переносом зарядов;
- 4) цифровое запоминание.

В системах РЭП используются различные типы ЗУ: многоканальные матричные ЗУ; рециркуляторы радиоимпульсов; потенциало-скопы, работающие на ПЧ; настраиваемые по частоте генераторы гармонических колебаний или источники шума; ЛЗ; ЗУ рециркуляторного типа и взаимодействующие пространственно-разнесенные ретрансляторы, в работе которых используется задержка при распространении в окружающем пространстве. Наиболее *важными характеристиками ЗУ* любого типа являются следующие [13]:

- частотный и динамический диапазон;
- чувствительность;
- длительность запоминания частоты;
- спектральные характеристики запомненного сигнала;
- когерентность;
- быстродействие;
- разрешающая способность (способность одновременно запо-

минать несколько сигналов);

- информационная доступность (произвольная и регламентированная во времени);
- способность считывания без разрушения информации;
- стоимость, размеры, масса и энергетические характеристики.

В зависимости от характера задач использование данных о несущей частоте разведываемых РЭС может быть различным. При *предварительной разведке* измеренную несущую частоту наиболее удобно представлять в виде соответствующего ей кода – числа (например, абсолютного значения несущей частоты). При *исполнительной разведке* важно не измерение абсолютного значения несущей частоты, а возможность запомнить ее с тем, чтобы создать помехи на несущей частоте разведанного РЭС. То есть несущая частота должна быть представлена в таком виде, который простейшим образом позволил бы настроить САП на эту частоту [1].

Различают *кратковременные* и *долговременные* способы запоминания частоты. Кратковременные способы запоминания – это запоминание на время, необходимое для настройки ПП, запоминание используется средствами для оперативной поддержки РЭП. Выбор той или иной схемы запоминания частоты в каждом конкретном случае определяется ее возможностями и требованиями, предъявляемыми к устройству запоминания частоты.

1.3.1. Аналоговые устройства запоминания и воспроизведения параметров сигналов

В существующих САП и станциях РТР применяются два типа аналоговых устройств запоминания (УЗ): многоканальные УЗ частоты на основе матричных приемников (устройства длительного запоминания частоты) и одноканальные УЗ частоты (УЗЧ), использующие принцип построения генератора с запаздывающей обратной связью (устройства кратковременного запоминания частоты) [1, 2].

В **многоканальной одноступенчатой (параллельной) схеме УЗЧ** весь диапазон разведываемых частот Δf_p перекрывается полосовыми фильтрами ($\Phi_i, i = \overline{1, n}$) так, что полосы пропускания Δf_i

соседних фильтров соприкасаются на частотной оси. Каждый фильтр работает на свой автономный приемный канал, состоящий из усилителя (У), детектора (Д) и видеоусилителя сигналов (ВУС). Значение частоты разведываемого сигнала принимается равной средней частоте соответствующего канала. В такой УЗЧ диапазон разведываемых частот равен

$$\Delta f_p = \sum_{i=1}^n \Delta f_i, \quad (1.1)$$

где n – количество фильтров (каналов) в УЗЧ.

При использовании многоканальных приемников, в том числе приемников с цифровым анализом спектра разведываемого сигнала, запоминание частоты сводится к запоминанию номера фильтра, в котором обнаруживается сигнал. Напряжение с выхода этих фильтров поступает после детектирования и усиления на реле. Если в каком-либо канале обнаружится сигнал, то срабатывает реле и включается соответствующий генератор помех Γ_n или широкополосный генератор шума (ГШ). Подобные схемы иногда называют *релейно-спусковыми схемами* запоминания частоты.

Средние частоты спектров помеховых сигналов совпадают со средними частотами полос пропускания соответствующих фильтров, но частоты принимаемых сигналов могут отличаться от последних на величину, не превышающую половины ширины полосы пропускания [4]. Чтобы создавать помеху на частоте принятого сигнала, ширина спектра помехи должна быть не меньше ширины полосы пропускания соответствующего фильтра. Время, затрачиваемое на измерение частоты РЭС, равно времени установления колебаний в фильтре.

Точность измерения частоты в параллельной схеме УЗЧ с АЧХ фильтров, аппроксимированной прямоугольником, может быть оценена максимальной ошибкой $\delta f = \pm \Delta f_i / 2$.

В реальных УЗЧ АЧХ фильтров может существенно отличаться от прямоугольной формы. Поэтому сигналы большой мощности могут проходить на выход реальных фильтров даже в том случае, когда их несущая частота лежит вне пределов полосы пропускания канала. Если при этом в УЗЧ не осуществляется логическая обработка

сигналов на выходах соседних фильтров путем сравнения их интенсивности и частота сигнала будет принята равной средней частоте канала, то ошибка измерения превысит величину $\delta f = \pm \Delta f_i / 2$.

Основными *достоинствами* многоканальных одноступенчатых УЗЧ считаются: большое быстродействие; неограниченное время запоминания; простота схемного решения; надежность; возможность обеспечения высокого разрешения сигналов РЭС по частоте; достаточно высокая точность определения частоты. Для обеспечения высокой точности запоминания частоты необходимо создавать большое число каналов, а это приводит к усложнению схемы и к увеличению объема аппаратуры, что является недостатком таких УЗЧ [4].

Получившая широкое распространение **матричная схема запоминания частоты**, сохраняя достоинства многоканальной схемы, позволяет существенно повысить точность измерения и запоминания несущей частоты и уменьшить число избирательных элементов. Матричная схема представляет собой матрицу из m каналов и n ступеней.

Устройство представляет собой совокупность модулей M_{ij} (рисунок 1.2), в каждом из которых кроме фильтра, триггера, гетеродина и смесителя имеется еще реле Рл, срабатывающее по импульсу, поступающему с триггера в момент появления сигнала в фильтре Φ_{ij} . ВЧ напряжение гетеродина через сработавшее реле подается на соответствующий смеситель S_{mij} канала восстановления частоты [13].

Принятый сигнал вызывает последовательное срабатывание цепочки фильтров (в идеале по одному) в каждом из столбцов от первого до n -го. В первой ступени все ее фильтры (Φ_{i1}) имеют одинаковую полосу пропускания Δf_1 и делят весь диапазон разведываемых частот Δf_p на m частей, т.е. $\Delta f_1 = \Delta f_p / m$. На выходе 1-й ступени приемника за счет соответствующего выбора частот гетеродинов весь частотный диапазон разведки Δf_p сужается по промежуточным частотам до полосы пропускания одного фильтра первой ступени Δf_1 .

Суммарная полоса пропускания всех фильтров 2-й ступени равна полосе пропускания одного фильтра 1-й ступени. Полоса пропускания фильтров 2-й ступени $\Delta f_2 = \Delta f_1 / m$. На выходе 2-й ступени

вой модуляцией и излучается антенной САП на частоте f_{Π} . В канале восстановления необходимо иметь $(n-1)$ смеситель и $(n-1)$ фильтр.

Точность измерения частоты, а, следовательно, и точность настройки частоты сигнала помехи на частоту сигнала подавляемого РЭС, определяется полосой пропускания фильтра последнего столбца

$$\delta f_{\min} = \frac{\Delta f_n}{2} = \frac{\Delta f_p}{2m^n}. \quad (1.2)$$

Рассматриваемое устройство обеспечивает однозначное запоминание и воспроизведение частоты в том случае, когда на его вход поступают одиночные сигналы. В случае одновременного прихода сигналов от нескольких РЭС возникают проблемы с запоминанием и восстановлением их частот [4]. Причина этого эффекта в том, что взаимодействие в смесителях одновременно нескольких напряжений (более двух) вызывает образование сигналов комбинационных частот. В результате на вход усилителя-модулятора будут поступать также сигналы с частотами, на которых в действительности не работает ни одно из РЭС. Указать, какие из частот соответствуют сигналам реальных РЭС, а какие – нет, невозможно, имеет место неоднозначность отчета, запоминания и воспроизведения частот.

Основным *преимуществом матричных устройств* по сравнению с обычными многоканальными, обеспечивающими ту же точность воспроизведения частоты, является меньшее количество используемых элементов. Поэтому одной из главных характеристик матричных устройств является объем аппаратуры, оцениваемый количеством элементов матричной схемы.

Наибольшие трудности при разработке матричных устройств запоминания возникают из-за необходимости принятия мер по устранению взаимного влияния между каналами. Эта трудность преодолевается с помощью специальных фильтров. Матричные приемники обеспечивают лучшую чувствительность и разрешающую способность по частоте по сравнению с обычными многоканальными приемниками. Время реакции (время от приема сигнала до восстановления) у матричных устройств несколько больше, чем у простых многока-

нальных. ЦУЗВС также уступают простым многоканальным по быстродействию.

Основные недостатки матричных устройств запоминания и воспроизведения:

- невозможность запоминания и воспроизведения всех частотно-временных параметров сигнала РЭС (определяется и воспроизводится только несущая частота РЭС) и низкая точность измерения и воспроизведения частоты;
- большое число ВЧ элементов (избирательных фильтров, гетеродинов, смесителей);
- трудности обеспечения ЭМС из-за наличия большого количества гетеродинов и смесителей;
- плохая РЭЗ, обусловленная генерацией сигналов в разных нерабочих диапазонах частот при одновременном воздействии на приемник нескольких сигналов РЭС с разными несущими частотами;
- значительные масса и габариты.

В аналоговом УЗВС может использоваться комбинированный способ измерения и восстановления сигнала с использованием ПФ и устройств ФАПЧ радиосигнала, обеспечивающие высокое качество восстановления частоты сигнала (погрешность восстановления частоты $\sigma_f \approx 10$ Гц).

В качестве аналоговых УЗВС в САП нашли применение управляемые автогенераторы на основе усилителей с запаздывающей обратной связью. Такие устройства называются **рециркуляторами** [4, 13]. На рисунке 1.3 изображена простейшая схема рециркулятора.

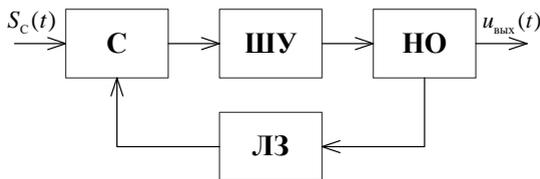


Рис. 1.3. Простейшая схема рециркулятора

Сигнал $s_c(t)$ с несущей частотой f_c поступает на вход широкополосного усилителя (ШУ) и усиливается в нем. С выхода усилителя часть сигнала через направленный ответвитель (НО) подается на ВЧ линию задержки (ЛЗ), где задерживается на время τ_3 , а затем снова поступает на вход ШУ. В зависимости от длительности τ_c принимаемого сигнала и задержки τ_3 его на ЛЗ могут иметь место два режима работы этого устройства: 1) длительность сигнала τ_c меньше времени запаздывания $\tau_c < \tau_3$; 2) длительность сигнала τ_c больше времени запаздывания $\tau_c > \tau_3$.

В первом случае ($\tau_c < \tau_3$) на выходе устройства запоминания частоты в ответ на каждый входной импульс сигнала РЭС $s_c(t)$ образуется последовательность импульсов, представляющая собой пачку копий входного сигнала $s_c(t)$

$$u_{\text{вых}}(t) = \sum_{k=0}^N s_c(t - k\tau_3), \quad (1.3)$$

где $k = 0, 1, 2, \dots, N$ – номер копии в последовательности.

Число N задается устройством управления САП с учетом того, чтобы к приходу очередного импульса РЭС устройство было готово к его запоминанию и воспроизведению. Для этого через интервал времени, несколько меньший периода повторения импульсов подаваемого РЭС, производится принудительное прерывание текущей последовательности копий. Период следования ВЧ импульсов длительности τ_c в пачке равен времени задержки. Амплитуда импульсов определяется амплитудой импульса, поступившего на вход ЛЗ с НО, потерями в ЛЗ и коэффициентом усиления ШУ.

В режиме 1 устройство работает как обычный усилитель радиоимпульсов, циркулирующих в цепи: вход ШУ – выход ШУ – НО – линия задержки – вход ШУ. Большая часть мощности импульсов с выхода ШУ поступает в усилитель-модулятор, где наделяется помеховой модуляцией. После усиления в усилителе мощности помеховые импульсы излучаются передающей антенной САП в направлении по-

давяемого РЭС. В режиме 1 устройство выполняет функции запоминания и воспроизведения коротких импульсных сигналов, а не только их несущей частоты.

Во втором случае ($\tau_c > \tau_3$) усилитель переходит в режим автогенерации и запоминание частоты сигнала возможно на длительное время, если выполняются условия баланса амплитуд и фаз. На выходе УЗВС образуется непрерывный ВЧ сигнал $u_{\text{ВЫХ}}(t) = U \cos(\omega_{\text{ВЫХ}} t + \varphi_0)$,

где $\omega_{\text{ВЫХ}} = 2\pi f_{\text{ВЫХ}} = 2\pi(f_c \pm k/2\tau_3)$; $k = 0, 1, 2, \dots, N$.

Условие баланса фаз будет выполнено, если время задержки τ_3 кратно периоду ВЧ колебаний $T_{\text{ВЫХ}} = 1/f_{\text{ВЫХ}}$

$$\tau_3 = kT_{\text{ВЫХ}} \text{ или } T_{\text{ВЫХ}} = 1/f_{\text{ВЫХ}} = \{\tau_3, \tau_3/2, \tau_3/3, \dots, \tau_3/n\}. \quad (1.4)$$

Отсюда следует многочастотность рассматриваемого УЗВС. Теоретически автоколебания в устройстве могут возникать на собственных частотах генерации $f_k = k/\tau_3$. Практически из-за неравномерности АЧХ ШУ в установившемся режиме автоколебания возникают и поддерживаются преимущественно на одной или нескольких частотах, соответствующих наибольшим значениям коэффициента усиления ШУ. **Точность запоминания частоты** определяется как

$$\delta f = 1/2\tau_3. \quad (1.5)$$

Для достижения высокой точности воспроизведения необходимо иметь ВЧ ЛЗ, обеспечивающие значительную величину τ_3 . Если необходимо получить $\delta f = 1000$ Гц, то задержка $\tau_3 = 10^3$ с. Для получения значительных задержек радиосигналов (десятки, сотни мкс) могут быть использованы линии задержки на поверхностных акустических волнах (ПАВ) или световоды. В таких линиях радиосигнал в соответствующих преобразователях преобразуется в звуковую или световую волну, затем задерживается в ЛЗ, после чего обратным преобразованием «свет – радиоволна» или «звук – радиоволна» восстанавливается ВЧ сигнал.

В качестве ВЧ ЛЗ, не очень существенно искажающих внутреннюю структуру сложных сигналов, могут использоваться: 1) коак-

сиальные ЛЗ; 2) волоконные световоды; 3) ЛЗ на поверхностных акустических волнах (ПАВ); 4) волноводные ЛЗ (в виде компактных «скруток»); 5) ультразвуковые ЛЗ; 6) ЗУ с переносом заряда и приборах с зарядовой связью [4, 13].

Для получения задержек в десятки и сотни микросекунд могут быть использованы ЛЗ на ПАВ. Вариант построения УЗВС с линиями задержки на ПАВ показан на рисунке 1.4 (У – усилитель) [12].

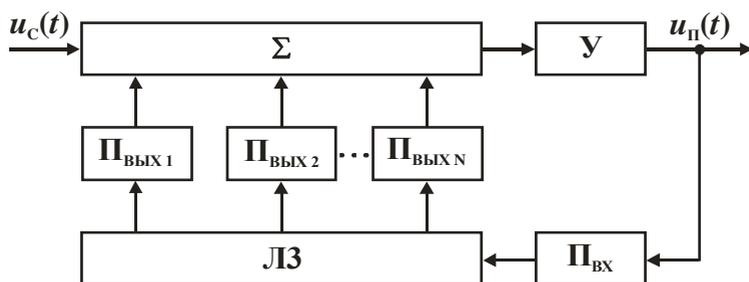


Рис. 1.4. УЗВС с ЛЗ на ПАВ

Сигнал $u_c(t)$ после усиления преобразуется в преобразователе $П_{ВХ}$ в акустические или ЭМ волны оптического диапазона, задерживается на время $\tau_1, \tau_2, \dots, \tau_N$ и после обратного преобразования в радиосигнал поступает вновь на вход У. В результате происходит размножение сигнала РЭС. Структура входного сигнала может быть искажена путем переключения выходов ЛЗ по необходимому закону.

Одноканальные аналоговые УЗВС позволяют запомнить сигнал на малое время. Их конструкция содержит большое число ВЧ элементов. Существенный их *недостаток* – трудности изменения алгоритма их работы в сложной радиоэлектронной обстановке [4].

1.3.2. Цифровые устройства запоминания и воспроизведения высокочастотных сигналов

В ЦУЗВС в значительной мере преодолены недостатки аналоговых устройств запоминания и воспроизведения сигналов. Однако

внедрение цифровой обработки сигналов (ЦОС) в РЭС не исключает применения аналоговой техники. Не утратили своего значения такие широко известные ВЧ усилители, как ЛБВ, которые широко применяются в САП для осуществления разнообразной модуляции. Нельзя обойтись без аналоговых элементов при разработке приемных, антенных и других устройств. В ЦУЗВС в значительной мере преодолены недостатки аналоговых УЗВС [11, 14].

Находят применение три основных способа цифрового запоминания и воспроизведения сигналов [13]. **1-й способ.** Запоминание последовательности дискретизированных по времени и квантованных по уровню отсчетов мгновенных значений радиосигнала $s(t)$. Цифровой образ сигнала запоминается и затем воспроизводится ЦАП.

2-й способ – амплитудно-фазовый. Способ предполагает цифровое представление амплитуды (огibaющей) $S_c(t)$ и фазы $\varphi_c(t)$ сигнала. Запоминание отсчетов амплитуды $S_{cd}(t)$ и фазы $\varphi_{cd}(t)$ производится в ОЗУ. Воспроизведение аналоговой копии сигнала $u_{\text{вых}}(t)$ происходит путем АМ и ФМ ВЧ сигнала местного высокостабильного гетеродина. Законы АМ и ФМ формируются в соответствии с цифровыми кодами амплитуды и фазы, считываемыми из ОЗУ.

3-й способ – спектральный. Способ предполагает представление входного сигнала $s_c(t)$ в виде спектрального образа $S_c(\omega)$ и дальнейшую его цифровую обработку. При этом широко используются алгоритмы быстрого прямого и обратного преобразования Фурье. В отличие от двух предыдущих способов в память ОЗУ записываются цифровые образы спектральной плотности $S_{cd}(\omega)$ сигнала, а восстановление аналоговой копии входного сигнала осуществляется устройством обратного БПФ (ОБПФ).

В САП применяются одноканальные и двухканальные одноканальные ЦУЗВС. Одноканальные одноканальные ЦУЗВС просты в разработке и дешевы в производстве. Известные технические решения таких устройств имеют ряд недостатков, главным из которых является заметное искажение аналоговой копии восстановленного сигнала, что связано с влиянием различных шумов и паразитных излучений на эффективность функционирования ЦУЗВС. Более устойчивы к воздей-

ствию помех двухканальные ЦУЗВС квадратурного типа, в которых реализуется квазиоптимальная цифровая обработка сигналов.

Основные этапы обработки принятого сигнала в ЦУЗВС:

- 1) прием и дискретизация входных сигналов;
- 2) хранение в памяти цифровых образов этих сигналов;
- 3) считывание цифровых образов из памяти и дополнительная (в случае необходимости) их обработка;
- 4) воспроизведение сигналов с требуемыми параметрами в аналоговой форме [4].

Структурная схема ЦУЗВС представлена на рисунке 1.5.

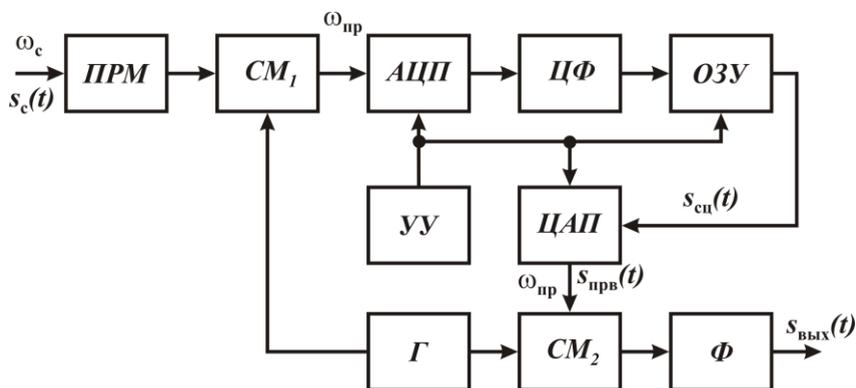


Рис. 1.5. Обобщенная структурная схема ЦУЗВС

Радиосигнал $s_c(t)$, принятый приемником ПРМ, поступает на смеситель SM_1 , куда также подается сигнал $u_r(t)$ внутреннего гетеродина Γ , частота которого $\omega_r(t)$ близка к средней частоте ω_c принятого сигнала. Частота сигнала понижается до значения $\omega_{нр} = \omega_c - \omega_r$. АЦП производит цифровое кодирование аналогового сигнала $s_{ср}(t)$ или его спектральной плотности $S_c(\omega)$. После очищения цифровой копии сигнала от паразитных гармоник в ЦФ цифровой образ сигнала $s_{сц}(t)$ или его спектральной плотности $S_{сц}(\omega)$ запоминается в ОЗУ.

Цифровые слова $s_{\text{ци}}(t)$ или $S_{\text{ци}}(\omega)$, списываемые из ячеек ОЗУ, преобразуются в ЦАП в аналоговый сигнал $s_{\text{прв}}(t)$.

Средняя частота восстановленного сигнала $s_{\text{прв}}(t)$ равна $\omega_{\text{пр}}$, поэтому для восстановления точной копии входного радиосигнала $s_{\text{с}}(t)$ с помощью смесителя СМ_2 и местного гетеродина Γ спектр НЧ сигнала $s_{\text{прв}}(t)$ смещается на частоту $\omega_{\text{с}} = \omega_{\Gamma} + \omega_{\text{пр}}$. Аналоговый фильтр Φ устраняет паразитные гармоники, порожденные смесителем СМ_2 . В результате на его выходе формируется копия $s_{\text{вых}}(t)$ исходного сигнала $s_{\text{с}}(t)$. Работой АЦП, ОЗУ и ЦАП управляет специализированное устройство управления УУ.

На рисунке 1.6 представлена структурная схема устройства цифрового запоминания частоты [4].

На рис. 1.6 введены обозначения: НКП, ПКП – понижающий и повышающий квадратурные преобразователи; АЦП₁, АЦП₂ – АЦП прямой и квадратурной составляющих входного сигнала; СЧ-1, СЧ-2 – первый и второй синтезаторы частот; СБИС 1879ВМ3 – устройство цифровой обработки и запоминания радиосигнала на ПЧ (обведено пунктиром); У – буфер-упаковщик; Д – цифровой детектор сигналов; ПД – блок памяти данных; БСК – блок сигнальных каналов; АУ – арифметическое устройство; ЗТГ – задающий тактовый генератор; Р – буфер-распаковщик; ПК – программный контроллер; ГШ – генератор шума; ДЧТС – делитель частоты тактового сигнала; ЦАП₁, ЦАП₂ – ЦАП прямой и квадратурной составляющих сигнала; ФСУ – шинный формирователь и формирователь сигналов управления; ВУ – внешнее устройство.

Устройство (рис. 1.6) позволяет создавать имитационные отсчеты и уводящие помехи по дальности и скорости, шумовые помехи (доплеровский шум с перестраиваемой полосой, широкополосный фазовый шум с перестраиваемой полосой), а также различные их комбинации, например, увод по дальности на фоне широкополосного шума или увод по скорости на фоне доплеровского шума [4].

СБИС 1879ВМ3 – аналого-цифровая микросхема (без DSP-ядра Neuro Matrix) с несколькими каналами ЦАП и АЦП, 2 Мбит ОЗУ,

с логикой обработки оцифрованного сигнала и управляющего контроллера со 128-битной длиной обрабатываемых данных. Структурная схема СБИС 1879ВМ3 приведена в [4].

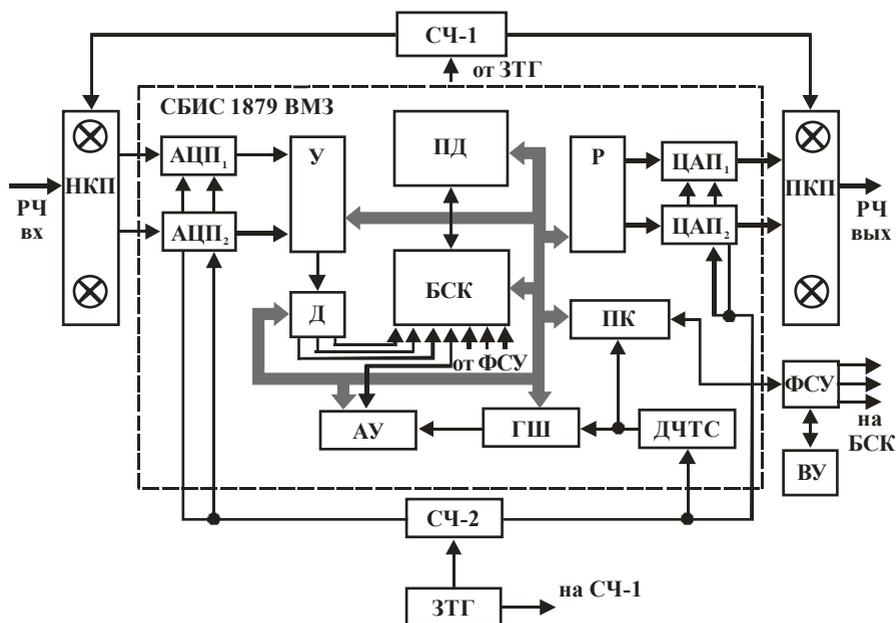


Рис. 1.6. Структурная схема устройства цифрового запоминания частоты

СБИС 1879ВМ3 представляет собой однокристалльную систему накопления и обработки сигналов со встроенными АЦП и ЦАП, предназначенную для предварительной обработки широкополосных (полоса пропускания 600 МГц) аналоговых сигналов, формирования потока данных для вторичной обработки цифровым процессором сигналов (ЦПС) Л1879ВМ1 или 1879ВМ2, восстановления аналогового сигнала после вторичной обработки. Полное время обработки аналогового сигнала (включая его воспроизведение на выходе) – менее 40 нс.

Вариант структурной схемы системы цифрового запоминания ВЧ сигналов [4, 13] представлен на рисунке 1.7.

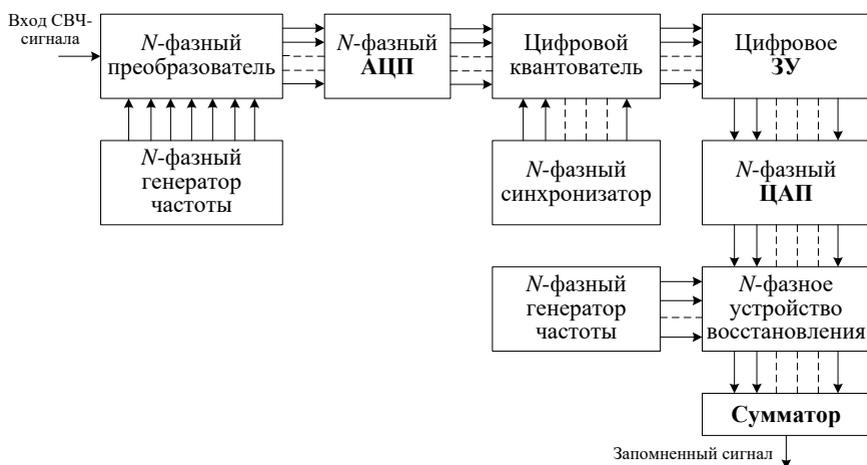


Рис. 1.7. Структурная схема системы цифрового запоминания ВЧ сигналов

Входной СВЧ-сигнал поступает на N -фазный преобразователь, где с помощью сигналов гетеродина преобразуются в сигналы ПЧ с разными фазами. Суммарные частотные составляющие на выходе преобразователя устраняются фильтрацией. Аналоговые сигналы ПЧ затем преобразуются в цифровую форму с помощью N -фазного АЦП и квантуются в цифровом квантователе. Требуемое число бит при этом зависит от числа воспроизводимых параметров входного сигнала. Если требуется, например, воспроизвести только несущую частоту входного сигнала, а его амплитуда не требуется, то достаточны две фазы преобразованного сигнала и только один бит для представления полярности каждого из двух преобразованных сигналов.

До поступления в цифровое ЗУ сигналы квантуются по времени, в результате чего образуются выборки с периодом синхронизации, используемые в цифровом ЗУ. Синхронизирующие сигналы могут иметь любую фазу, однако наилучшие результаты достигаются, когда их фазы имеют соответствующую связь с фазами преобразованных сигналов. Квантованные выборки запоминаются в цифровом ЗУ с

произвольной выборкой, позволяющем осуществлять многократное считывание информации без ее разрушения.

Процесс восстановления входного сигнала включает многоканальное цифроаналоговое преобразование запомненных выборок с последующим их преобразованием в N -фазном преобразователе для восстановления частоты и фазы отдельных сигналов, которые после суммирования образуют восстановленный СВЧ-сигнал [4].

Относительное изменение частоты и фазы в восстановленном СВЧ-сигнале достигается путем соответствующей частотной (фазовой) расстройки генераторов N -фазных сигналов, используемых в N -фазном устройстве восстановления сигнала. При этом сохраняется внутрисигнальная модуляция запоминания сигнала.

Для сохранения информации не только о частоте (фазе), но и амплитуде входного сигнала необходим дополнительный канал. В этом случае цифровая система запоминания строится в соответствии со структурной схемой, представленной на рисунке 1.8.

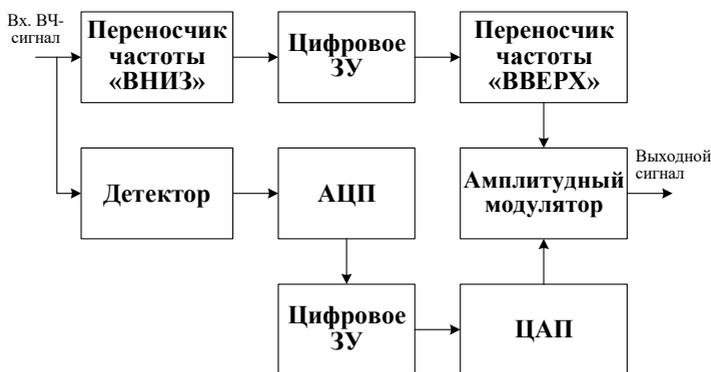


Рис. 1.8. Схема системы цифрового запоминания сигналов с сохранением амплитудной информации

Дополнительный канал включает в себя АД, АЦП, цифровое ЗУ, ЦАП и АМ, предназначенный для восстановления амплитудной информации в запоминаемом СВЧ-сигнале [4, 13]. Цифровые запоминающие системы обеспечивают когерентное и длительное запомина-

ние радиосигнала и открывают хорошие перспективы для повышения эффективности РЭП. С их помощью можно синтезировать частоты СВЧ-сигналов, воспроизводить сигналы с ЛЧМ и ФКМ, создавать вводящие помехи и генерировать многочисленные ЛЦ.

На рисунке 1.9 показана структурная схема фазового ЦУЗВС, запоминающего и воспроизводящего фазу (частоту) ВЧ сигнала с постоянной амплитудой [13].

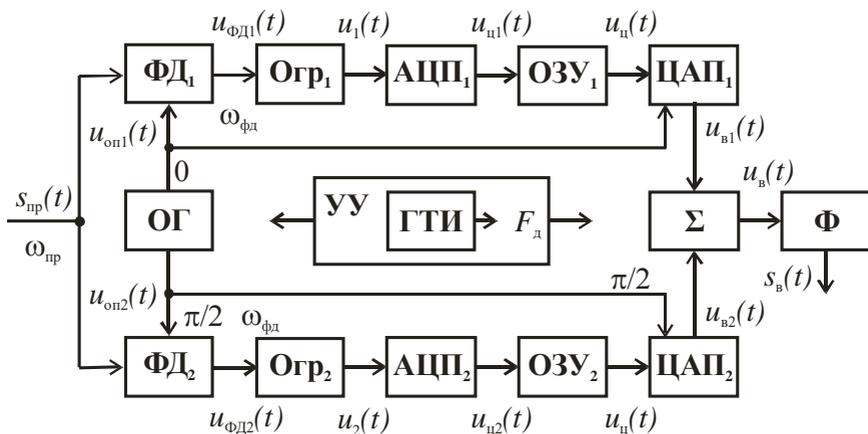


Рис. 1.9. Структурная схема фазового ЦУЗВС

На вход поступает сигнал ПЧ $s_{\text{пр}}(t) = S_c \cos[\omega_{\text{пр}}t + \varphi_c(t)]$, где $\varphi_c(t)$ – функция, отображающая закон фазовой (частотной) модуляции принятого сигнала РЭС.

Сигнал $s_{\text{пр}}(t)$ поступает на входы двух квадратурных фазовых детекторов $\Phi Д_1$ и $\Phi Д_2$, в которых в качестве опорных сигналов используются напряжения стабильного опорного гетеродина ОГ ($\varphi_c(t)$ – функция, отображающая закон фазовой (частотной) модуляции принятого сигнала РЭС). Частота сигнала ОГ практически совпадает ПЧ сигналов, обрабатываемых ЦУЗВС. Опорные сигналы, поступающие на $\Phi Д_1$ и $\Phi Д_2$, сдвинуты относительно друг друга на $\pi/2$. При разли-

ции между $\omega_{\text{пр}}$ и $\omega_{\text{ог}}$ на выходе ФД₁ и ФД₂ образуются напряжения $u_{\text{фд1}}(t) = U_0 \cos[\Omega t + \varphi_c(t)]$, $u_{\text{фд2}}(t) = U_0 \cos[\Omega t + \varphi_c(t) - \pi/2]$.

Далее эти сигналы ограничиваются в Огр₁ и Огр₂ и преобразуются в однополярные меандровые НЧ напряжения $u_1(t)$ и $u_2(t)$, также сдвинутые относительно друг друга на $\pi/2$. В фазовом ЦУЗВС при обработке сложного сигнала $s_{\text{пр}}(t)$ частота меандровых напряжений $u_1(t)$ и $u_2(t)$ реально изменяется по закону

$$F_{\text{м}}(t) = \frac{\Omega + \varphi(t)}{2\pi}, \quad (1.6)$$

т.е. фактически на выходе ограничителей образуются фазоманипулированные сигналы.

В АЦП происходит дискретизация напряжений $u_1(t)$ и $u_2(t)$ по времени и цифровое однобитное кодирование отсчетов. Цифровые сигналы $u_{\text{ц1}}(t)$ и $u_{\text{ц2}}(t)$ в виде последовательности однобитовых кодовых чисел поступают в ОЗУ₁ и ОЗУ₂, в регистры которых записывается информация о фазах сигналов $u_1(t)$ и $u_2(t)$. Работой ОЗУ управляет генератор тактовых импульсов ГТИ, совмещенный с УУ. Воспроизведение аналоговой копии входного сигнала $u_1(t)$ и $u_2(t)$ производится по командам УУ [13].

С выходов ОЗУ₁ и ОЗУ₂ цифровые сигналы $u_{\text{ц1}}(t)$ и $u_{\text{ц2}}(t)$ вида 01 или 10 поступают на ЦАП₁ и ЦАП₂, на выходе которых восстанавливаются аналоговые сигналы $u_{\text{в1}}(t)$ и $u_{\text{в2}}(t)$ фазоманипулированного сигнала. ЦАП₁ и ЦАП₂ выполнены в виде ключей (схемы «И»), на вход которых подаются $u_{\text{ц1}}(t)$ и $u_{\text{ц2}}(t)$ и ВЧ сигналы $u_{\text{оп1}}(t)$ и $u_{\text{оп2}}(t)$ опорного гетеродина.

Цифровые сигналы $u_{\text{ц1}}(t)$ и $u_{\text{ц2}}(t)$ преобразуются в соответствующие напряжения, открывающие ключи для пропускания сигналов ОГ в нужное время.

На выходе ЦАП₂ формируется сигнал $u_{B2}(t)$, противофазный напряжению $u_{B1}(t)$. На выходе Σ образуется фазоманипулированное колебание

$$u_B(t) = S_B \cos[\omega_{ог}t + \psi(t)], \quad (1.7)$$

где $\psi(t)$ – закон фазовой манипуляции (ψ_{\max} – девиация фазы)

$$\psi(t) = \begin{cases} \psi_{\max} & \text{при } 0 < t < T_M/2, \\ -\psi_{\max} & \text{при } T_M/2 < t < T_M. \end{cases} \quad (1.8)$$

ψ_{\max} – значение девиации фазы.

Восстановленное колебание наряду с информативной составляющей $\omega_{ог} + \Omega$ содержит значительное количество паразитных колебаний на комбинационных частотах $\omega_{ог} - \Omega$, $\omega_{ог} \pm 3\Omega$, $\omega_{ог} \pm 5\Omega$ и т.д. Паразитные гармоники фильтруются фильтром Φ , настроенного на частоту $\omega_{ог} \approx \omega_{пр}$ и имеющим полосу пропускания, обеспечивающую неискаженную передачу спектра принятого фазомодулированного сигнала РЛС.

Суммарная мощность паразитных гармоник в однобитовом ЦУВЗС составляет около 23,4 % от мощности основной составляющей или 19 % от мощности передатчика САП [13]. Двухканальное ЦУВЗС позволяет снизить мощность 3-й и 5-й гармоник примерно на 10 дБ по сравнению с одноканальными ЦУВЗС.

На рисунке 1.10 изображена структурная схема двухканального квадратурного УЗВС [13].

Схема работает в полосе частот ± 125 МГц.

На вход ЦУЗВС подается сигнал со средней частотой 1 ГГц (спектральные составляющие сигнала лежат в полосе $1 \pm 0,125$ ГГц). Входной сигнал $s_{свх}(t)$ путем преобразования частоты с помощью местного гетеродина (Γ) разделяется на пару квадратурных составляющих $s_{cs}(t)$ и $s_{ss}(t)$, которые образуются на выходе смесителей $См_1$ и $См_2$. Фильтры (Φ) устраняют паразитные гармоники, возникающие на выходе смесителей в процессе гетеродинирования.

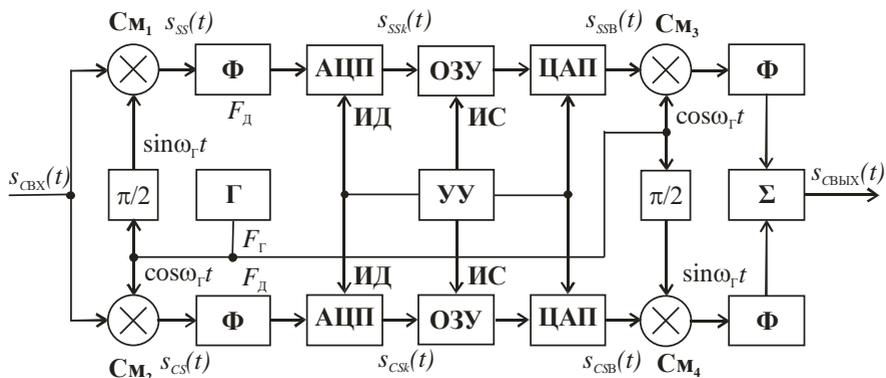


Рис. 1.10. Структурная схема двухканального квадратурного УЗВС

С выходов фильтров ВЧ сигнал направляется в АЦП, где он преобразуется в цифровой код. Дискретизация непрерывного сигнала $s_c(t)$ проводится под воздействием импульсов дискретизации ИД, вырабатываемыми УУ. Цифровой код сигнала $s_k(t)$ направляется в ОЗУ, в состав которого входят регистры памяти.

При необходимости воспроизведения сигнала запомненные цифровые слова с УУ списываются с ячеек регистра и передаются в ЦАП для преобразования дискретного двоичного кода в напряжение. Каждый разряд преобразуемого двоичного числа представляется соответствующей порцией эталонного напряжения.

За счет суммирования всех порций эталонных напряжений на выходе ЦАП образуются аналоговые копии квадратурных составляющих входного сигнала, средняя частота которых равна ПЧ принятого сигнала.

Перенос спектра сигнала на истинную частоту f_c входного воздействия $s_{CBX}(t)$ происходит в смесителях См3 и См4. Для немедленного воспроизведения $s_{CBX}(t)$ устройство управления (УУ) должно формировать импульсы считывания сразу же после окончания входного воздействия.

1.4. Цифровая радиочастотная память и ее применение в системах РЭБ

Устройства **цифровой радиочастотной памяти (ЦРЧП)** – важнейшие элементы современных систем и комплексов РЭБ. В зарубежной литературе и в некоторых отечественных источниках используется соответствующее понятие **Digital Radio Frequency Memory (DRFM)**. Несмотря на то, что в их названии сделан акцент на «частоту», DRFM являются, по существу, устройствами запоминания и воспроизведения РЛ сигналов (и других тоже) с любыми видами частотной и фазовой модуляции. Разработана технология цифрового запоминания пространственных частот DRFM-S, которая является естественным обобщением обычной технологии DRFM и имеет дополнительные преимущества, связанные с учетом направлений приема и передачи сигналов [4].

Технология и устройства ЦРЧП позволяют получать и хранить в цифровой форме копии радиочастотных сигналов, а также выполнять их последующую цифровую обработку с целью формирования сигналов с модуляцией различного вида.

В системах РЭБ сформированные с помощью ЦРЧП модулированные сигналы излучаются в обратном направлении к РЛС противника. При этом могут решаться две основные задачи: 1) приемное устройство «забывается» значительным потоком «отраженных» сигналов, что мешает РЛС обнаруживать цели, определять их параметры и формировать необходимые данные для систем вооружения, прежде всего для ЗРК; 2) система ЦРЧП формирует специальные модулированные сигналы, которые фактически представляют собой радиопортреты целей различных типов [32].

При приеме таких сигналов в РЛС противника формируются ложные цели (ЛЦ), трудноотличимые от настоящих (истинных). Вследствие этого противник вынужден тратить существенные ресурсы на отслеживание ЛЦ, что может обернуться для него дополнительными потерями и ухудшением общего положения во время боевых действий. Фактически действие системы с ЦРЧП можно здесь сравнить с влиянием на противника дезинформации.

Общая структурная схема радиосистемы с ЦРЧП представлена на рисунке 1.11 (ПНПЧ, ПВПЧ – понижающий и повышающий преобразователи частоты; БП – блок памяти; БУП – блок управления памятью; Г(СЧ) – гетеродин (синтезатор частот).

В радиосистемах с ЦРЧП (рис. 1.11) в общем случае обеспечиваются понижение частоты входного ВЧ сигнала, принятого от РЛС, его фильтрация, преобразование в цифровую форму, хранение и обработка с помощью внешнего управляющего устройства, преобразование в аналоговую форму и повышающее преобразование частоты. Сформированный таким образом нужный сигнал излучается в сторону РЛС противника.

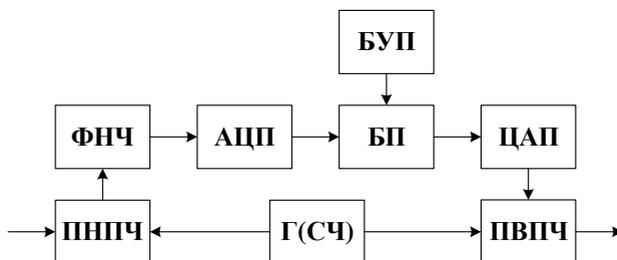


Рис. 1.11. Общая структурная схема радиосистемы с ЦРЧП

Технология ЦРЧП может применяться в аппаратуре для тестирования РЛС и обучения персонала, в аппаратуре для тестирования систем связи на устойчивость к воздействию систем РЭБ противника.

В зарубежных источниках в связи с технологией ЦРЧП (DRFM) также используются такие понятия, как *цифровой синтезатор образов (digital image synthesizer)* и *синтезатор ложных целей (false target image synthesizer)* [31]. Под данными устройствами понимают не только собственно цифровую часть, то есть ЦРЧП, но и устройство в целом, включая входные и выходные радиочастотные блоки.

Современные РЛС используют широкополосные сигналы с последующей когерентной обработкой отраженного сигнала. Параметры и закон модуляции зондирующего сигнала могут адаптировать-

ся к текущим условиям наблюдения цели (РЭ обстановка, дальность до цели, ее скорость) и режимам работы РЛС (обнаружение, сопровождение цели). В этом случае УЗВС должно обеспечивать формирование имитирующей помехи, когерентной с зондирующим сигналом с точностью до доплеровского сдвига частоты и случайной фазы отражения от цели.

Создание УЗВС, формирующих имитирующие помехи и обеспечивающих их когерентность, стало возможным благодаря появлению цифровых процессоров обработки сигналов с производительностью, обеспечивающей преобразование зондирующего сигнала (задержку с дискретом в единицы метров и доплеровское смещение частоты с дискретом единицы Гц) в реальном масштабе времени при ширине спектра зондирующего сигнала в десятки...сотни МГц.

Применение технологии ЦРЧП позволяет получить ряд существенных *преимуществ* для систем РЭБ и других устройств и систем:

1. В системе с ЦРЧП нет необходимости формировать сигнал для воздействия на РЛС противника с нуля. Для этой цели используется принимаемый сигнал РЛС, который соответствующим образом обрабатывается. Обратный сигнал, передаваемый системой с ЦРЧП в сторону РЛС, воспринимается ею не как посторонний мешающий сигнал, который нужно отфильтровать, а именно как полезный сигнал, содержащий информацию об интересующих объектах. Этот сигнал не может быть проигнорирован РЛС, что весьма важно.

2. Системы с ЦРЧП – многофункциональные, способны работать как в различных режимах подавления РЛС, так и формировать многочисленные ложные образы целей.

3. Механизм функционирования системы с ЦРЧП позволяет применять ее для оказания мешающего воздействия на системы связи и радиоразведки противника. Также эта система может вводить противника в заблуждение посредством имитации работы собственной РЛС или системы связи и излучения соответствующих импульсных и модулированных сигналов.

4. Для функционирования системы с ЦРЧП и эффективного воздействия на РЛС противника не требуется высокая мощность радиопередающего устройства, что характерно для классических систем

РЭП. Поэтому в таких системах зачастую нет необходимости использовать мощные источники электропитания.

5. Технология ЦРЧП позволяет создавать компактные устройства, которые могут быть установлены на транспортных средствах многих типов, в том числе на небольших ЛА.

6. При изменении решаемых задач зачастую нет необходимости заменять всю систему РЭБ с ее радиочастотным блоком, достаточно внести необходимые изменения в программно-цифровую часть.

7. Устройства с ЦРЧП могут функционировать в автоматическом режиме, что создает хорошие перспективы их активного применения на беспилотных и роботизированных платформах [32].

В то же время для эффективного противодействия радарам современные системы ЦРЧП должны быть широкополосными и обеспечивать высокую скорость преобразования сигналов. Для этих целей необходимы быстродействующие АЦП и ЦАП, которые являются критически важными компонентами этих систем.

На первых этапах в системах РЭБ использовалась относительно простая структура ЦРЧП (рисунк 1.12).

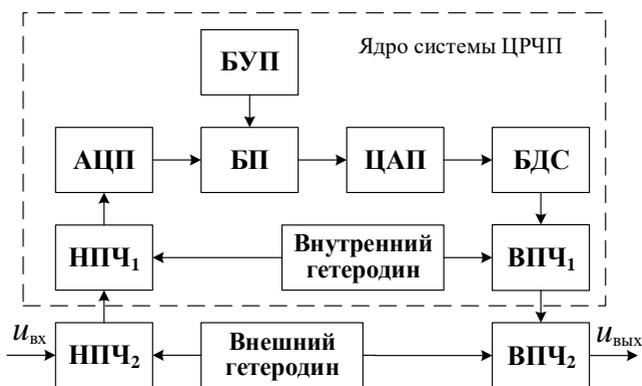


Рис. 1.12. Структура ЦРЧП, использовавшаяся для противодействия относительно простым радарам

На рис. 1.12 обозначено: НПЧ₁, НПЧ₂ – понижающие преобразователи частоты; ВПЧ₁, ВПЧ₂ – повышающие преобразователи ча-

стоты; БДС – блок введения доплеровского сдвига. Структура ЦПЧП (рис. 1.12) позволяла переизлучать в сторону РЛС противника копии принятых сигналов с нужными задержками по времени и с необходимыми изменениями по амплитуде и частоте. Это давало возможность противостоять РЛС с простыми импульсными сигналами, создавая для них ЛЦ стационарных и мобильных объектов.

На более поздних этапах развития в РЛС стали использоваться сложные сигналы с внутриимпульсной модуляцией – как частотной, так и фазовой. Также в современных РЛС применяется усовершенствованная обработка сигналов, основанная на спектральном анализе и корреляционных методах. Современные РЛС со сложными сигналами способны не только обнаруживать цели, но и определять их тип и структуру. Для противостояния таким РЛС нужны более совершенные системы ЦРЧП.

Современная структура ЦРЧП для создания сложных радиопортретов приведена на рисунке 1.13 (ВС – входной сигнал от РЛС; БФКС – блок формирования квадратурных составляющих; БДС – блок введения доплеровского сдвига; БАК – блок введения амплитудных коэффициентов; БВЗ блок введения временных задержек; С – сумматор данных для всех каналов системы; КРЦ – комплексный радиопортрет цели).

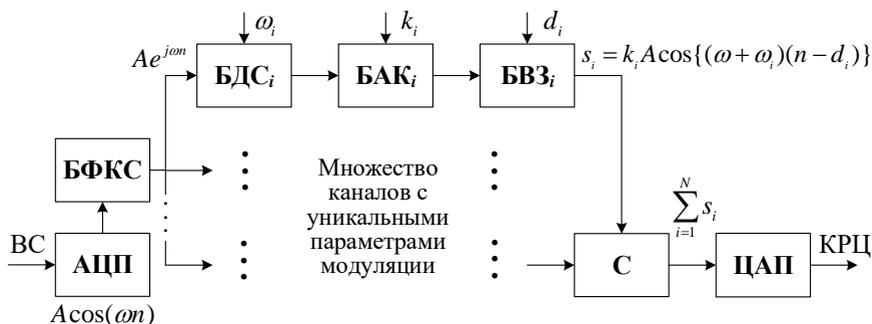


Рис. 1.13. Современная структура ЦРЧП для создания сложных радиопортретов

Современная структура ЦРЧП (рис. 1.13) позволяет формировать нужный радиопортрет цели с учетом множества точек отражения сигнала РЛС со своими параметрами. Общий отраженный сигнал формируется как сумма частных отраженных сигналов со своей амплитудой, задержкой, частотными и фазовыми сдвигами [32]. При принятии такого сигнала в приемнике РЛС формируется образ нужной цели: военного самолета определенного типа, протяженного объекта, к примеру, корабля, групповой цели и др.

Основные характеристики устройств ЦРЧП различных поколений приведены в таблице 1.1.

Таблица 1.1 – Характеристики устройств ЦРЧП различных поколений

Характеристики	Поколения устройств и систем ЦРЧП			
	второе, 1999–2003	третье, 2004–2006	четвертое, 2007–2011	пятое, 2012–2017
Частота дискретизации, Гвыб/с	1	1,2	2	5
Разрешение АЦП и ЦАП, бит	8	10	10, 12	10, 12
Мгновенная ширина полосы частот, МГц	400	500	800	2000
Разрешение по задержке распространения, нс (м)	16 (2,4)	13,3 (2) 3,3 (0,5)	0,5 (75 мм)	0,2 (30 мм)
Динамический диапазон, свободный от паразитных составляющих, дБн	30	36	45	>45
Цифровое мгновенное измерение частоты	нет	нет	есть	есть
Цифровой эквалайзер	нет	нет	есть	есть
Произвольная модуляция	нет	нет	есть	есть
Коррекция фазы, связанная с увеличением расстояния	нет	нет	есть	есть
Типовая системная задержка, нс	120-250	120-250	70-280	>70

Приведенные в таблице 1.1 данные позволяют получить представление о различных поколениях устройств ЦРЧП. Данные в таблице 1.1 показывают, что технология ЦРЧП развивается в направлении создания широкополосных систем, увеличения разрешения АЦП и ЦАП, повышения динамического диапазона, свободного от паразитных составляющих, увеличения разрешения по параметрам формируемых целей, реализации дополнительных корректирующих и других функций.

В современных системах ЦРЧП активно применяются ПЛИС и цифровые процессоры обработки сигналов. Одна из таких систем – широкополосная высококачественная ЦРЧП, построенная на ПЛИС, – показана на рисунке 1.14 (Тр – трансформатор; ТСД – тактовый сигнал дискретизации; СТ – симметрирующий дискретизатор). Среди приложений устройства – работа против импульсно-доплеровской РЛС.

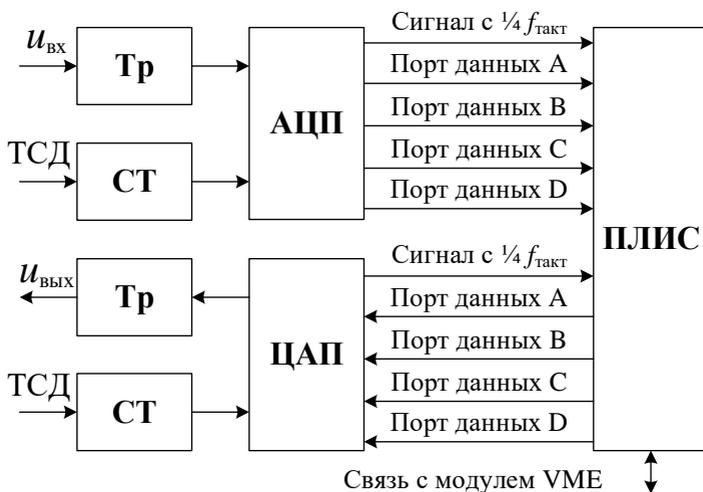


Рис. 1.14. Структура ЦРЧП на ПЛИС

В этой схеме использованы АЦП производства ATMEL AT84AS004, ЦАП фирмы EUVIS MD651D и ПЛИС компании XILINX Virtex 4 SX55. Частота дискретизации составляет 2 Гвыб/с, полоса частот – 800 МГц. Измеренное значение динамического диапазона, свободного от паразитных составляющих, для частот 100...900 МГц не хуже минус 47 дБн [32].

Среди зарубежных средств с ЦРЧП выделяются изделия нескольких типов: модули радиочастотной памяти; радиомодули с блоком ЦРЧП, которые могут быть установлены на различные объекты; генераторы имитации отраженных сигналов, используемые для тестирования радаров и обучения персонала; многоканальные и многофункциональные симуляторы для радаров и задач РЭБ.

Зарубежными компаниями выпускаются модули ЦРЧП с полосой частот на уровне 1 ГГц, характеристики модулей ЦРЧП приведены в таблице 1.2 (ПС – паразитные составляющие).

Таблица 1.2 – Характеристики модулей ЦРЧП

Компания	Тип устройства	Полоса частот / частота дискретизации	Разрешение АЦП и ЦАП, бит	Разрешение по задержке, нс	Динамический диапазон, дБн
Kratos-СТИ	Модуль ЦРЧП ¹	0,2 / 0,5	12; 16	2	65
	Широкополосный модуль ЦРЧП ¹	0,9 / 2,2	10; 12	0,5	47
KOR Electronics	Широкополосный модуль ЦРЧП ²	1 / –	10; 12	0,5	50
Mercury Systems	Квадратурный модуль ЦРЧП ³	0,6 / 0,72	–	5,56	ПС < –20
Radio Frequency Simulation Systems	Одноканальный модуль ЦРЧП ⁴	0,9 / 2,2	10; 12	0,5	ПС < –49
	Одноканальный модуль ЦРЧП ⁵	0,725-1,4 / 1,8-3,6	12; 12	0,3...0,5	ПС < –60

- ¹ – Однослотовый модуль VME-64X
- ² – Двухслотовый модуль VME
- ³ – Однослотовый модуль 6U VME-64X
- ⁴ – Однослотовый модуль 6U VME x 160 мм
- ⁵ – Широкий однослотовый модуль 3U VPX x 160 мм

Одно из таких устройств – широкополосный модуль компании Kratos-CTI. Глубина памяти (максимальная длительность записываемого сигнала) у него составляет 200 мс. Модуль позволяет формировать до 16 независимых и скоординированных значений расстояния, доплеровского сдвига и амплитуды для целей на один канал. При этом в стандартной 19-дюймовой стойке может быть реализовано до восьми каналов ЦРЧП.

У другого устройства этой компании – модуля памяти высококачества (High Fidelity Digital RF Memories) – не такая широкая полоса (200 МГц), но весьма высокое разрешение АЦП и ЦАП – 12 и 16 бит соответственно. Глубина памяти – до 8 мс.

У широкополосного модуля компании KOR Electronics, которая в дальнейшем была приобретена фирмой Mercury Systems, диапазон задержки составляет от 120 нс до 7,5 мс, длительность импульса – от <20 нс до непрерывного сигнала, частота повторения импульсов – <100 Гц – 5 МГц; диапазон доплеровского сдвига ± 2 МГц, разрешение по доплеровскому сдвигу 0,05 Гц.

У модуля ЦРЧП компании Mercury Systems промежуточная частота находится в полосе 2,5...3,5 ГГц, минимальная длительность входного импульса 40 нс, глубина памяти более 1 мс, задержка в блоке памяти менее 90 нс.

Модуль ЦРЧП в обычном исполнении компании Radio Frequency Simulation Systems характеризуется диапазоном по задержке от 50 м до 30 000 км, диапазоном доплеровского сдвига ± 20 МГц, контролем амплитуды в диапазоне 0...40 дБ с шагом 0,125 дБ. Компания также выпускает модули памяти в специальном, защищенном исполнении.

Компания Kratos-CTI выпустила **многоканальный симулятор радиоэлектронной обстановки DRFM-RES**, служащий для тестирования радаров, обучения персонала и разработки систем РЭБ

[32]. В данной системе может одновременно работать до 20 каналов и генерироваться до 500 целей. Основные характеристики симулятора:

- полоса частот: до 1,5 ГГц;
- диапазон рабочих частот: 2–18 ГГц и др.;
- разрешение АЦП и ЦАП: 10 и 12 бит;
- разрешение по задержке: 0,5 нс;
- глубина памяти: до 200 мс;
- динамический диапазон, свободный от ПС, 45 дБн;
- ширина импульса: от 25 нс до непрерывного сигнала;
- динамический диапазон: 120 дБ;
- разрешение по амплитуде: 0,25 дБ;
- диапазон доплеровского сдвига: ± 10 МГц;
- разрешение по доплеровскому сдвигу: 0,5 Гц;
- диапазон задержки: от 300 нс до 8 мс.

Специфическая категория изделий с ЦРЧП, используемых для решения задач РЭБ, – **радиоловушка**. Типовое применение таких изделий – защита самолетов от ракет противника. При этом сигналы радиоловушка воздействуют на РПУ РЛС головки самонаведения ракеты и сбивают ее с курса.

Одно из таких устройств – активная радиоловушка компании Selex ES. Данная радиоловушка выпускается с самолета, из стандартного картриджа. Устройство заранее программируется, может изменять режимы функционирования во время полета. Ее масса 1,1 кг, диаметр 55 мм, питание – от батарей. Компания планирует в ближайшем будущем уменьшить диаметр устройства до 21,8 мм.

Радиоловушка может храниться в течение пяти лет. Ее существенные преимущества – невысокая цена и удобство эксплуатации. Здесь требуется лишь минимальная подготовка оператора; радиоловушка также может выпускаться автоматически [32].

Одна из значимых отечественных разработок в данной области – **универсальное устройство формирования сигналов на основе ЦРЧП** (рисунок 1.15), созданное в ЦНИРТИ имени академика А.И. Берга.

На рис. 1.15 обозначено: КГ – кварцевый генератор; АТ – аттенюатор; КН, КВ – конвертер вниз и вверх соответственно; СП –

специализированный процессор; ПЗУ – постоянное запоминающее устройство.

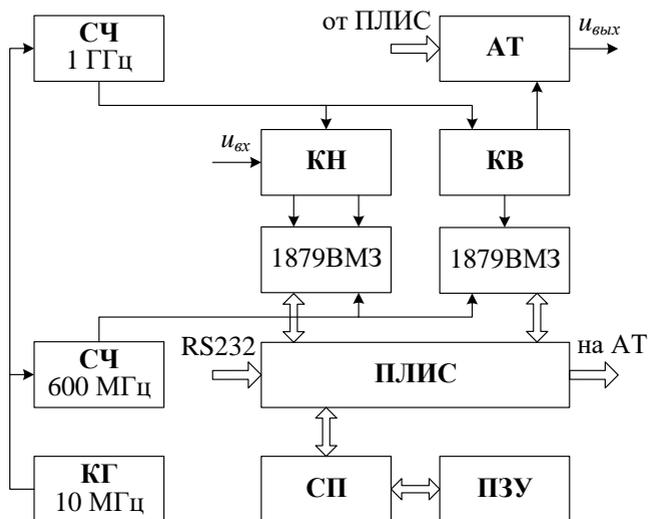


Рис. 1.15. Функциональная схема устройства формирования радиопортрета

Данное устройство (рис. 1.15) может формировать различные выходные сигналы – от шумовых до имитационных, создающих на экране РЛС ложные отметки цели. Устройство способно при необходимости изменять параметры выходных сигналов на основе анализа входных сигналов. **Радиолокационный портрет объекта** представляется совокупностью так называемых «блестящих точек» – отражений зондирующего сигнала от различных поверхностей объекта и его углов. Каждая блестящая точка описывается тремя параметрами: амплитудой, задержкой и доплеровским смещением.

В устройстве используется перенос радиочастотного сигнала из рабочего диапазона 750...1250 МГц в диапазон промежуточных частот 0...250 МГц с одновременным формированием квадратурных составляющих сигнала. В качестве сигнала гетеродина используется сигнал с частотой 1 ГГц, соответствующей середине рабочего диапазона.

Разработчики устройства применили шестиразрядное амплитудное квантование квадратурных составляющих сигнала. Частота дискретизации сигнала равна 600 МГц. В устройстве используется специально разработанная для цифровой обработки и формирования сигналов микросхема 1879ВМ3 (компания НТЦ «Модуль»), представляющая собой быстродействующий программируемый сигнальный контроллер. Она изготовлена на основе 0,25 мкм КМОП-технологии, степень интеграции – 1400000 эквивалентных вентилях [32].

Основные функции контроллера:

- оцифровка, запись и хранение в памяти цифровой копии сигнала;
- восстановление сигнала из хранящейся в памяти цифровой копии;
- выполнение вычислений в соответствии с заданными законами модуляции;
- управление работой устройства цифрового запоминания частоты в соответствии с программой, заранее размещенной в памяти команд контроллера.

Основными цифровыми элементами модуля формирования сигналов являются:

- две полузаказные СБИС 1879ВМ3;
- ПЛИС фирмы ALTERA семейства Stratix II;
- высокоскоростной сигнальный процессор TMS320С6414.

Устройство формирования радиолокационных портретов объектов обладает следующими ***основными характеристиками:***

- частотный диапазон: 750...1250 МГц;
- динамический диапазон входного сигнала –25...5 дБм;
- количество блестящих точек – до 32;
- диапазон доплеровских сдвигов для блестящих точек ± 120 кГц;
- диапазон задержек для блестящих точек 0,7...7 мкс;
- диапазон амплитуд для блестящих точек 30 дБ;
- шаг изменения доплеровского сдвига 0,59 Гц;
- шаг изменения задержки 1,666 нс;
- шаг изменения амплитуды 1 дБ;

- масса 470 г;
- габариты 220 x 100 x 40 мм;
- напряжение питания 5 В;
- максимальный потребляемый ток 5 А.

В устройстве используется интерфейс управления RS-232 [32].

На рисунке 1.16 представлена структурная схема устройства формирования когерентной помехи в широком диапазоне частот для подавления РЛС и РЛ ГСН УР, работающих в режиме сопровождения и наведения [4].

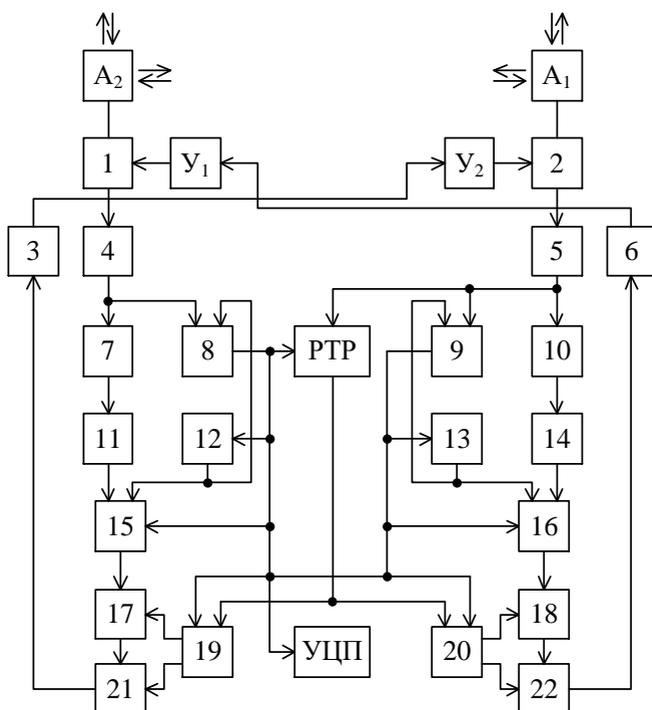


Рис. 1.16. Схема устройства формирования когерентной помехи

На рис. 1.16 обозначено: A_1, A_2 – первая и вторая антенны; 1, 2 – первый и второй узлы развязки; U_1, U_2 – усилители; 3, 6 – полосовые цифро-радиочастотные преобразователи; 4, 5 – полосовые радиочастотно-цифровые преобразователи; 7, 10 – цифровая память; 8, 9 – измерители комплексного коэффициента усиления; РТР – система радиотехнической разведки; 11, 14 – доплеровские модуляторы; 12, 13 – генераторы калибровочного сигнала; 15, 16 – коммутаторы режимов работы; 17, 18 – фазовращатели; 19 – модулятор когерентной помехи; 20 – банк выравнивающих поправок; 21, 22 – аттенюаторы.

Устройство формирования когерентной помехи работает в двух режимах: в режиме калибровки и в рабочем режиме. Элементы 5, 10, 14, 22, 6 в совокупности и элементы 4, 7, 11, 21, 3 в совокупности представляют собой каналы DRFM [4].

Полосовые радиочастотно-цифровые преобразователи 4 и 5, осуществляющие перенос спектра входного сигнала в область ПЧ, его фильтрацию и оцифровку, построены на следующих элементах: СВЧ-фильтр, квадратурный преобразователь частоты, фильтр базовой частоты и АЦП. Полосовые цифро-радиочастотные преобразователи 3 и 6, осуществляющие цифро-аналоговое преобразование сформированного цифрового сигнала, фильтрацию и перенос спектра в рабочий диапазон частот, содержит ЦАП, фильтр базовой частоты, квадратурный преобразователь частоты и выходной СВЧ-фильтр.

Обобщение данных о разработках в области ЦРЧП позволяет прогнозировать развитие этой технологии. **Основные направления развития систем и устройств с ЦРЧП** заключаются в следующем:

- разработка сверхширокополосных систем с полосой до 2 ГГц и выше;
- развитие многоканальных и многофункциональных систем, которые одновременно решают задачи РЭП РЛС разных типов, функционирующих в нескольких частотных диапазонах;
- развитие адаптивных систем, изменяющих параметры и алгоритмы своего функционирования в зависимости от ситуации (частоту, полосу частот, типы модуляции, виды создаваемых портретов целей);
- формирование радиопортретов новых непростых целей, отличающихся такими характеристиками, как небольшие размеры, высо-

кая скорость и сложная маневренность, необычная структура и поверхность, изменение конфигурации БЛА, УР новых типов и др.;

- создание радиопортретов объектов с учетом дополнительных факторов (используемых материалов, особенностей поверхности, погодных условий и др.);

- РЭП РЛС со сложными сигналами (с ППРЧ, шумоподобными и др.);

- разработка методов снижения паразитных составляющих в ЦРЧП;

- развитие дополнительных и корректирующих функций – изменение частоты сигналов и др.;

- разработка и создание микроминиатюрных устройств ЦРЧП, которые, например, могут быть установлены на малоразмерных БЛА, а также стать основой создания новых малогабаритных радиолушек;

- проработка вопросов совместного функционирования группы систем ЦРЧП, расположенных на разных транспортных платформах, что позволяет одновременно имитировать многие цели в разных секторах пространства и формировать сложные картины развития обстановки;

- использование технологии ЦРЧП для анализа ЭМС, то есть влияния отраженных сигналов РЛС военного и гражданского назначения на системы связи и другие радиосистемы (сотовые, спутниковые, транкинговые, системы управления и др.);

- опыт разработки и эксплуатации устройств с ЦРЧП может быть использован при создании систем радиосвязи с ретрансляторами, поскольку эти устройства можно рассматривать как специфические ретрансляторы и корректоры сигналов;

- использование систем с ЦРЧП для составления баз данных как по принятым сигналам РЛС, так и сформированным сигналам-радиопортретам, что можно в дальнейшем использовать в гражданских и военных системах для контроля радиочастотного спектра, а также в учебных программах [32].

Таким образом, применение систем с ЦРЧП позволяет эффективно противодействовать самым современным РЛС. Системы с

ЦРЧП активно развиваются и в будущем смогут обеспечить еще более широкие возможности для решения задач РЭБ.

1.5. Приемники для мгновенного измерения частоты

В системах РТР и радиомониторинга применяются специальные технические средства для обнаружения радиосигналов и измерения их параметров. К этим средствам предъявляются весьма жесткие требования по ширине рабочего частотного диапазона, времени обработки информации, массе, габаритам и энергопотреблению [1, 2, 11]. Один из типов таких радиосредств – приемники для мгновенного измерения частоты (МИЧ).

Методы и приемники для мгновенного измерения частоты (англ. Instantaneous Frequency Measurement – IFM), которые активно развиваются с 60-х годов 20 века, позволяют измерить несущую частоту высокочастотного радиосигнала за очень короткое время – несколько десятков наносекунд [15]. В течение долгого времени для мгновенного измерения частоты использовались приемники с традиционной структурой (рисунок 1.17), принципиальные операции выполнялись в аналоговой форме.

В данной схеме входной высокочастотный сигнал разделяется и проходит по двум каналам: с линией задержки (ЛЗ) и без нее. Затем сигналы поступают на фазовый коррелятор, на выходе которого формируются два видеосигнала, пропорциональные синусу и косинусу фазового сдвига [15]. Частота входного радиочастотного сигнала вычисляется как

$$f = c \frac{\arctg(Y/X)}{2\pi L \sqrt{\varepsilon}}, \quad (1.9)$$

где c – скорость света; $X = \cos(\beta L)$, $Y = \sin(\beta L)$ – выходные сигналы фазового коррелятора, $\beta = 2\pi / \lambda$; λ – длина волны входного сигнала; L – длина ЛЗ; ε – диэлектрическая проницаемость материала ЛЗ.

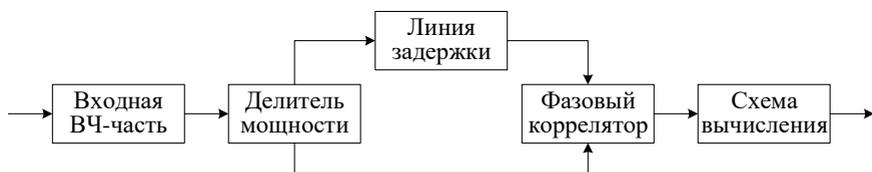


Рис. 1.17. Традиционная структурная схема приемника с МИЧ

Этой классической схеме МИЧ свойственны существенные недостатки. Для повышения точности измерения частоты необходимо увеличивать длину ЛЗ. Однако для расширения рабочего частотного диапазона нужно сокращать время задержки, что приводит к снижению точности и разрешающей способности приемника. К тому же такой приемник не подходит для измерения при перекрывающихся во времени сигналах.

Преодоление указанного противоречия возможно при использовании многоканальных приемников, с помощью которых проводятся измерения на различных участках диапазона. Также можно применять более сложные структуры (рисунок 1.18) [15], предлагаемые в развитие традиционной схемы (ДМ – делитель мощности).

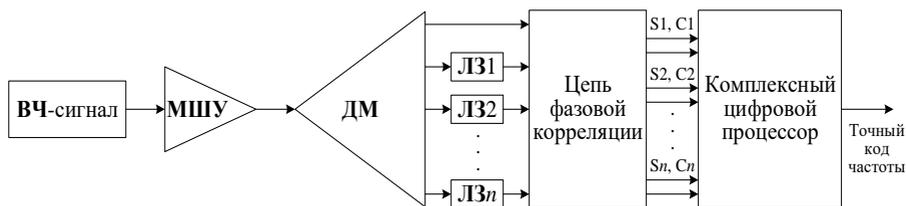


Рис. 1.18. Схема широкополосного приемника МИЧ со многими ЛЗ

В данных решениях используются широкополосный малошумящий усилитель (МШУ), многоканальный ДМ высокочастотного сигнала, группа линий задержки, сложная цепь фазовой корреляции и комплексный цифровой вычислитель кода частоты. При этом самая протяженная ЛЗ обеспечивает точность определения частоты, а короткие ЛЗ – широкий диапазон рабочих частот. Цепь фазовой корреляции

ляции формирует совокупность сигналов, пропорциональных синусу и косинусу разницы фаз для ЛЗ ($S_1, C_1 \dots S_n, C_n$).

Кроме схемы со многими ЛЗ, для преодоления недостатков базовой схемы МИЧ была предложена структура с переменной линией задержки, в которой применена схема с ЛЗ на ПАВ. Переменная ЛЗ может быть реализована, в частности, с помощью двух ЛЧМ-фильтров на ПАВ и генератора, управляемого напряжением. Такой подход позволяет создать более широкополосный приемник МИЧ и исключить неопределенность измерений частоты благодаря тщательному выбору параметров управляемой ЛЗ.

Вместо традиционной схемы МИЧ со многими ЛЗ можно использовать схему с группой полосно-заграждающих фильтров. Такая схема была реализована для диапазона частот 1,50...4,66 ГГц. Фильтры выполняются на разомкнутых микрополосковых резонаторах. Этот подход позволяет упростить как моделирование, так и реализацию радиоприемника МИЧ.

Однако в целом схемы, позволяющие строить широкополосные и точные измерители частоты на основе аналоговых принципов, весьма сложны и приводят к относительно крупногабаритным устройствам. Поэтому основная линия развития приемников МИЧ – использование цифровых методов. В последние годы развиваются различные методы построения цифровых приемников МИЧ [15]. Один из основных методов – применение цифровых ЛЗ, что является логичным развитием прежнего подхода с аналоговыми физическими ЛЗ. Структурная схема реализации метода приведена на рисунке 1.19.



Рис. 1.19. Структурная схема МИЧ с цифровыми задержками

ВЧ радиосигнал разделяется на квадратурные составляющие, преобразуется в цифровую форму и поступает на ПЛИС, с помощью которой реализован алгоритм определения частоты на основе формирования задержек. В данном случае частота сигнала находилась в по-

лосе 750...1250 МГц, входной сигнал изменялся в диапазоне $-40...0$ дБм. В схеме использовался 10-разрядный АЦП и ПЛИС Virtex-6.

Среднеквадратическая ошибка измерения частоты составила менее 1 МГц. Та же точность измерения может быть реализована при использовании 6-разрядного АЦП с уменьшенным динамическим диапазоном.

Другой базовый вариант цифрового приемника МИЧ основан на использовании быстрого преобразования Фурье (БПФ). Широкополосный (монобитный) приемник с одноразрядным аналого-цифровым преобразованием показан на рисунке 1.20.

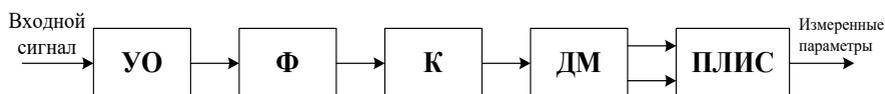


Рис. 1.20. Структурная схема широкополосного приемника МИЧ

Данное устройство измеряет частоту и выполняет другие функции. Входной радиосигнал ограничивается по амплитуде при помощи усилителя-ограничителя (УО), проходит через фильтр (Ф) и преобразуется в цифровую форму при помощи быстродействующего компаратора (К). Для согласования высокоскоростного цифрового потока и ПЛИС применяется демультимплексор (ДМ). Основная обработка сигнала выполняется в ПЛИС на базе монобитного БПФ.

Монобитное БПФ характеризуется упрощенным алгоритмом, реализуемым благодаря исключению операции умножения. Расчеты показали, что при частоте дискретизации входного радиосигнала 10 ГГц и 1024-точечном БПФ точность измерения частоты составляет 10 МГц при отношении сигнал/шум, превышающем 0 дБ. Недостатком данного метода, помимо относительно высокого требуемого отношения сигнал/шум, является невозможность измерения частот перекрывающихся во времени сигналов. В то же время можно создать приемники с рабочей полосой до десятков гигагерц при относительно небольших габаритах и энергопотреблении.

В рассматриваемом монобитном приемнике применяется цифровой алгоритм определения входной частоты, разработанный

компанией Elettronica S.p.A. Сравнение проводилось для входных частот в диапазоне 2...18 ГГц. При этом точность измерения частоты для цифрового приемника при непрерывном сигнале находится на уровне 0,5 МГц, что в два с лишним раза лучше, чем у аналогового. Выигрыш еще значительнее при отношении сигнал/помеха менее 1.

Реализация мгновенного измерения частоты с помощью алгоритма БПФ возможна с применением 16-разрядного квантования амплитуды сигнала. Проверка предложенного подхода выполнялась с помощью моделирования в среде MATLAB. Аппаратная реализация осуществлялась на ПЛИС Xilinx Spartan 3E (тип XC3S500E).

Среди проектов цифровых приемников для МИЧ стоит выделить структуру цифрового приемника МИЧ на основе преобразования Гильберта. Используется усовершенствованная цифровая архитектура для более быстрой реализации преобразования Гильберта на ПЛИС. Это позволяет выполнять анализ радиосигналов в реальном времени. С помощью приемника анализируются непрерывные и импульсные сигналы в полосе частот от 0 до 1,2 ГГц, при этом максимальная ошибка измерения частоты не превышает 2 МГц, а время измерения не более 100 нс.

Разработчики ищут новые цифровые методы для МИЧ. К примеру, предлагается алгоритм МИЧ, реализуемый с помощью вычислительного метода CORDIC. Метод исключает использование операции умножения и вследствие этого обеспечивает более простую реализацию на ПЛИС. Эксперимент был проведен для входных частот в диапазоне 30 МГц. При этом точность измерения частоты весьма высокая – 0,1 МГц. В то же время этот метод демонстрирует удовлетворительные результаты при относительно высоких значениях отношения сигнал / помеха – более 5 дБ.

Помимо цифровых методов, среди важнейших и перспективных направлений МИЧ – методы радиофотоники, которые активно прорабатываются в последнее время. Основные преимущества их применения для МИЧ: измерение частот сигналов в очень широкой полосе (десятки гигагерц), более высокая помехоустойчивость, низкие потери, определенное упрощение схем и снижение их стоимости [15]. Среди соответствующих методов радиофотоники – использование специальных волоконно-оптических решеток Брэгга, смешивание

оптических сигналов в высоконелинейном оптоволокне, метод фазовой модуляции и др.

Так, мгновенное измерение частоты в схеме с решеткой Брэгга выполнялось для диапазона радиочастот 1...10 ГГц, ошибка измерения частоты составила $\pm 0,2$ ГГц. В схеме МИЧ с использованием фазового модулятора для диапазона частот 1,6...24,6 ГГц ошибка измерения частоты находилась в пределах $\pm 0,3$ ГГц. При использовании метода смешивания оптических сигналов измерение проводилось для весьма широкой полосы радиочастот (1...40 ГГц), при этом ошибка измерения для большинства частот не превышала 5 %.

Что касается готовой продукции, то в открытом доступе в Интернете представлена информация по ряду зарубежных приемников МИЧ с цифровой обработкой, характеристики которых приведены в таблице 1.3 [15] (ΔF_p – диапазон частот; Δf_0 – разрешение по частоте; R_F – разрядность кода; ΔP_F – динамический диапазон; δf_0 – точность измерения частоты (СКЗ); ЦЧД – цифровой частотный дискриминатор). У всех приемников на выходе реализован цифровой код, представляющий результат измерения частоты входного сигнала. Масса приемника 0,4...3,0 кг.

Таблица 1.3 – Характеристики цифровых приемников МИЧ

Фирма	Модель, тип устройства	ΔF_p , ГГц	Δf_0 , МГц	R_F , бит	ΔP_F , дБм	δf_0 , МГц	$U_{\text{пит}}$, В $I_{\text{пот}}$, мА
Teledyne Defences & Space	DR063, модуль МИЧ	0,5... 2,4	0,5	12	-55...5	4 (СШ 0 дБ)	+5, 300; +3,3, 1300; -5, 60
	DR076, модуль МИЧ	2...6	0,5	13	-55...5	4 (СШ 0 дБ)	+5, 1600
	DR073, в виде модуля VME64	2... 18	0,5	13	-55...5	3 (СШ 3 дБ)	+12, 100 +3,3, 2000; +5, 2000; -12, 400
API	FDFD74	2...	1	14	-50...10	2	+5, 800

Глава 1. Теоретические основы построения БКО

technologies corp.	09-2, модуль МИЧ	18				(СШ 6 дБ)	+12/+15, 800; -12/-15, 150
	FDFD68 50-1, модуль ЦЧД	2,4... 5,0	1,45	11	-10...10	2	+5, 500 +12/+15, 400; -12/-15, 50
	FDFD76 78-1, модуль ЦЧД	6... 18	1,25	14	0...10	4	+15, 700 +5, 700; -5,2, 600
Mercury Computer Systems, Inc.	FM0218 14, модуль МИЧ	2... 18	1	14	-50...10	3 (СШ 0 дБ)	+5, 100 -5, 100; +12, 1050
Meuro Microwave Corp.	IFM0218 R2E6M100, модуль МИЧ	2... 18	3	13	-60... -5	6	+5, 2000 -5, 1000; +12, 1500
	IFM1826 R2E6M100, модуль МИЧ	18... 26,5	2	13	-60... -5	6	+5, 2000 -5, 1000; +12, 1500
	IFM2640 R2E6M100, модуль МИЧ	26,5 ...40	2	13	-60... -10	6	+5, 2000 -5, 1000; +12, 1500
Wide Band Systems, Inc.	Приемник МИЧ	0,5... 18	1	16	-50...10	6	-

Фирмы-разработчики, как правило, не дают подробного описания структур и алгоритмов функционирования приемников, отмечают лишь общие моменты. Например, компания Teledyne Defence & Space в приемниках использует цифровые фазовые корреляторы, реа-

лизованные на ПЛИС с помощью собственных запатентованных методов, а также логарифмические усилители типа SDLVA (Successive Detection Log Video Amplifier), имеющие выход для радиосигнала с ограничением и видеовыход.

Что касается готовой продукции, то в открытом доступе в Интернете представлена информация по ряду зарубежных приемников МИЧ с цифровой обработкой, характеристики которых приведены в таблице 1. У всех приемников на выходе реализован цифровой код, представляющий результат измерения частоты входного сигнала. Фирмы-разработчики, как правило, не дают подробного описания структур и алгоритмов функционирования приемников, отмечают лишь общие моменты. Например, компания Teledyne Defence & Space в приемниках использует цифровые фазовые корреляторы, реализованные на ПЛИС с помощью собственных запатентованных методов, а также логарифмические усилители типа SDLVA (Successive Detection Log Video Amplifier), имеющие выход для радиосигнала с ограничением и видеовыход.

Приемники МИЧ выпускаются в различном конструктивном исполнении. На радиочастотном входе приемника DR063 используется соединитель SMA female, а для выходного кода частоты, управления и электропитания – соединитель типа micro-D.

Приемники МИЧ выпускают и другие компании, например, Rockwell Collins, которая разрабатывает и изготавливает устройства с диапазоном рабочих частот 0,5...18 ГГц, устанавливаемые в стандартные 19-дюймовые приборные стойки.

Стоит отметить, что производители, как правило, не приводят в спецификациях приемников такой ключевой показатель, как время измерения входной частоты. Компания Teledyne Defence & Space, к примеру, указывает общее время прохождения сигнала (полная длительность рабочего цикла), которое составляет 200 нс. Минимальная длительность входного радиоимпульса равна 50 нс. Приемники этой компании могут измерять частоты перекрывающихся во времени сигналов при различии в частоте более 50 МГц.

Существуют определенные резервы дальнейшего сокращения времени мгновенного измерения частоты входных сигналов (времени рабочего цикла). Перед разработчиками стоит задача заметного по-

вышения точности определения частоты, которая нередко остается невысокой и вряд ли может соответствовать особенностям будущих радиоэлектронных противоборств. Другая задача – поиск новых методов МИЧ. С точки зрения внешнего исполнения вектор развития приемников МИЧ видится в их изготовлении в виде микромодулей и в более широком использовании специализированных микросхем. В то же время во многих ситуациях и приемники МИЧ, и соответствующие алгоритмы будут интегрированы в многофункциональные цифровые комплексы радиомониторинга.

В заключение следует отметить, что такие тенденции, как быстрое и повсеместное распространение новых РЭ технологий и средств, их доступность частным лицам, активное использование преступными группами, создают предпосылки для широкого применения приемников МИЧ в деятельности технических подразделений правоохранительных органов и негосударственных служб безопасности.

Контрольные вопросы

1. Перечислите виды синтеза КРЭП.
2. Назовите этапы синтеза КРЭП.
3. Назовите типы операций на этапах синтеза КРЭП.
4. Перечислите три основные группы внутрисистемных противоречий на уровне функционального синтеза КРЭП.
5. Какие принципы используются при разработке методического аппарата синтеза КРЭП?
6. Назовите принципиальные особенности построения перспективных авиационных средств и комплексов РЭБ.
7. Перечислите объекты РЭП индивидуальными средствами РЭБ.
8. Перечислите объекты РЭП групповыми средствами РЭБ.
9. Для чего предназначены устройства запоминания и воспроизведения сигналов?
10. Какие устройства входят в состав модуля матричной схемы запоминания частоты?
11. Перечислите состав простейшей схемы рециркулятора.

12. Какие устройства могут использоваться в качестве линий задержки, не очень существенно искажающих внутреннюю структуру сложных сигналов?
13. Какие физические принципы используются для запоминания радиосигналов в средствах РТР и РЭП?
14. Перечислите наиболее важные характеристики запоминающих устройств любого типа.
15. Назовите основные достоинства многоканальных одноступенчатых устройств запоминания частоты.
16. Точность определения частоты с помощью матричной схемы запоминания частоты.
17. Перечислите основные способы цифрового запоминания и воспроизведения сигналов.
18. Назовите основные этапы обработки принятого сигнала в ЦУЗВС.
19. Перечислите состав общей структурной схемы радиосистемы с ЦРЧП.
20. Какие устройства входят в состав структурной схемы приемника с МИЧ?
21. Перечислите состав структурной схемы МИЧ с цифровыми задержками.
22. Перечислите состав структурной схемы широкополосного приемника МИЧ.