

Методология разработки радиолокационного приёмника с большим динамическим диапазоном и низким коэффициентом шума

Юрий Цыпленков (synthesprom@yandex.ru),
 Виктор Овчинников (ovchinnikovvg@yandex.ru),
 Владислав Баранов (dj_poteha@mail.ru)

Для обнаружения малоразмерных малозаметных низкоскоростных целей на малой дальности на фоне отражений от земной поверхности и местных предметов требования к приёмному устройству многолучевого радиолокатора оказываются крайне высокими в части обеспечения большого динамического диапазона по компрессии 1 дБ, низкого коэффициента шума и малого энергопотребления. Решению обозначенной проблемы в пространстве диаметрально противоречивых параметров посвящена данная статья, где формулируется задача структурно-параметрического синтеза, рассматриваются методы оптимизации структуры и входящих в неё элементов, определяются базовые алгоритмы для поиска общего и частного решений указанной задачи.

Задача обнаружения малоразмерных малозаметных низкоскоростных целей на малой дальности появилась в результате поиска наиболее эффективных методов защиты стратегически важных объектов от несанкционированного проникновения беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) на прилегающую к охраняемому объекту территорию. Сложность задачи заключается в том, что исследуемый объект имеет малую эффективную площадь рассеяния и непредсказуемый характер движения. Появление БПЛА на расстоянии 150–200 метров от охраняемого объекта усложняет обнаружение и захват цели, т.к. для большинства средств ПВО нижняя граница зоны обнаружения начинается с 5 км. С другой стороны, имеет место мощное отражение зондирующего сигнала от земной поверхности. В связи с этим задача обнаружения и распознавания слабого сигнала на фоне сильных помех является весьма актуальной [1].

В качестве основного средства борьбы с несанкционированным вторжением выступает многолучевой радиолокатор, который позволяет обнаруживать, сопровождать, измерять параметры движения цели с высокой точностью и выдавать данные в центр управления огневой подготовкой. Это достигается за счёт использования в радиолокаторе малощумящего быстродействующего синтезатора опорных частот с низким уровнем побочных спектральных составляющих, приёмного устройства

с большим динамическим диапазоном и цифровой обработкой сигнала с длительным временем накопления.

В данной статье будут затронуты основные принципы построения многоканального радиолокационного приёмника с большим динамическим диапазоном, разработанного специально для обнаружения БПЛА в условиях воздействия пассивных помех в виде отражений от земной поверхности, метеорологических объектов и местных предметов.

Одной из основных проблем, возникающих при создании многоканального приёмного устройства, является одновременное обеспечение большого динамического диапазона, низкого коэффициента шума, достаточной межканальной развязки и малого энергопотребления. Настоящая статья посвящена поиску методов увеличения линейного динамического диапазона или динамического диапазона по компрессии 1 дБ, ограниченного сверху таким параметром, как точка односторонней компрессии [2], а снизу – минимально возможным уровнем сигнала, который способен принять и идентифицировать в надлежащем качестве радиолокационный приёмник. Следует отметить, что меры улучшения динамического диапазона по компрессии 1 дБ справедливы лишь при условии сохранения низкого значения коэффициента шума, глубокой межканальной развязки и малого энергопотребления.

В связи со сложностью процесса разработки конечного продукта всё большую роль в решении широкого класса задач играют возможности информационных технологий, представляющих собой упорядоченный процесс реализации некоторых операций обработки информации [3].

Введём ряд понятий, которые будут использоваться в данной статье для обозначения наиболее значимых процессов. Понятие *поиска* соответствует процессу решения так называемой задачи *синтеза*, которая, как обратная по отношению к задаче анализа, является наиболее важной при создании системы, когда заданы её функции и необходимо найти её структуру. При этом задача *анализа* соответствует классическому понятию процесса решения так называемой прямой задачи при структурно-функциональном подходе, когда задана структура системы и требуется найти её функции (показатели качества функционирования). Понятие *решения* относится к результату поиска или синтеза – определённой структуре создаваемой системы [3].

Вкратце рассмотрим методологию решения системных задач синтеза на основе информационных технологий и систем. Она включает в себя закономерности функционирования и развития систем, методы их синтеза, а также экспертные и вычислительно-поисковую системы на их основе.

При выполнении системных исследований, создании новых систем и устройств приходится сталкиваться с разрешением проблемы их синтеза. Представим объект исследования двумя характерными сторонами. Первая, внутренняя сторона объекта, определяет его внутреннее состояние, а вторая – внешняя сторона, относится к выполнению объектом определённых функций, необходимых внешнему потребителю.

Внутреннее состояние объекта характеризуется вектором состояния или структуры объекта:

$$\vec{S} = (s_1, \dots, s_i, \dots, s_m), \quad (1)$$

где s_i есть i -я составляющая \bar{S} вектора или просто i -я переменная ($i = \overline{1, m}$). Значение m характеризует размерность вектора и во многих случаях связано со сложностью объекта.

Выполняемые объектом функции качественно характеризуются определёнными свойствами, а количественно – отражающими эти свойства показателями качества функционирования объекта. В итоге функционирование объекта характеризуется совокупностью *единичных показателей качества функционирования*:

$$K = \{K_\mu | \mu = \overline{1, n}\}, \quad (2)$$

где K_μ есть μ -й единичный показатель качества функционирования ($\mu = \overline{1, n}$), K – обобщённый показатель качества функционирования. Число n связано с многофункциональностью объекта и во многом определяет его сложность.

Сформулируем логическую постановку задач анализа и синтеза:

- **Задача анализа.** Задан вектор \bar{S} , определить (прямая задача).
- **Задача синтеза.** Задано K , найти вектор \bar{S} (обратная задача).

Другими словами, под синтезом в данной задаче понимается поиск таких значений составляющих s_i ($i = \overline{1, m}$) век-

тора состояния \bar{S} системы, которые обеспечивали бы заданные или наилучшие значения единичных показателей K_μ системы ($\mu = \overline{1, n}$), входящих в обобщённый показатель качества K . При проведении разработки многоканального приёмного устройства ставится именно задача синтеза. При этом в качестве обобщённого показателя K фигурирует техническое задание (ТЗ) на разработку объекта новой техники с включёнными в него отдельными требованиями заказчика (единичными показателями качества K_μ). В качестве же искомого вектора \bar{S} выступает сам продукт разработки (прибор, модуль, блок и т.п.) с входящими в него технически реализованными составляющими вектора \bar{S} в виде отдельных элементов s_i этой разработки.

Математическая постановка задачи синтеза: пусть множество D допустимых состояний системы имеет конечное число t элементов \bar{S}_ξ ($\xi = \overline{1, t}$) в виде всех допустимых решений поставленной задачи. Тогда целью решения задачи синтеза является выбор такого состояния системы $\bar{S}_\xi \equiv \bar{S}^o$ (её варианта), при котором достигается возможно

большее значение *обобщённого показателя качества*:

$$K^o = K(\bar{S}^o) = \max_{\bar{S}_\xi \in D} K(\bar{S}_\xi). \quad (3)$$

Найденный вариант \bar{S}^o системы будем называть оптимальным по определённым критериям.

Процесс синтеза новых решений представляет собой итерационный процесс в замкнутом цикле, который начинается с задачи анализа, сменяющейся задачей синтеза, результат которой через обратную связь подаётся на вход блока анализа, и процесс повторяется до тех пор, пока не будет выполняться тождество:

$$K^k \equiv K^o, \quad (4)$$

где K^k – обобщённый показатель качества функционирования на k -м шаге, K^o – оптимальное значение показателя K .

Под методологией проектирования приёмного устройства с заданным набором характеристик следует понимать совокупность методов упорядочивания технической системы, наделённой совокупностью уникальных свойств, определяющих качество системы для конечного потребителя. Данная система является структурой, состоящей из набора



Новый доплеровский метеорадиолокатор X-диапазона: замена или модернизация МРЛ-5?














Трудное мы делаем сразу,
«невозможное» требует
несколько больше времени!

ООО «СИНТЕЗАТОР-НН»

http://www.synthesizer-nn.com

Нижний Новгород - 2019

Реклама

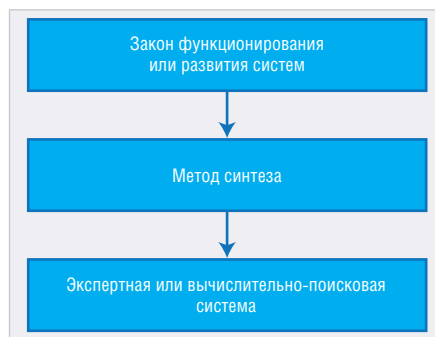


Рис. 1. Иерархическое представление средств методологии

взаимосвязанных элементов, несущих вполне определённую функциональную нагрузку с целью приведения системы в другое состояние. Уникальные свойства система приобретает в результате согласованного взаимодействия её элементов, на выходе которого получается комплекс ключевых характеристик, ожидаемых заказчиком. Наиважнейшими характеристиками приёмного устройства являются динамический диапазон по компрессии 1 дБ, коэффициент шума, межканальная развязка и потребляемая мощность. К отличительным особенностям методологии синтеза новых решений относятся:

- системный подход к формированию методологии;
- сочетание формализованных и неформализованных подходов;
- инновационный характер;
- компьютерная реализация.

Системный подход к формированию методологии заключается в её структурировании в виде отдельных, но вместе с тем связанных этапов системных исследований, а также в иерархичности представления в них знаний в виде совокупностей средств (законов функционирования и развития систем, методов их синтеза, экспертных и вычислительно-поисковой систем на основе этих методов). Структурирование в виде этапов системных исследований определяется тем, что отдельные этапы логически вытекают из иерархии задач синтеза. Особенно следует подчеркнуть необходимость решить весь комплекс задач, а не какую-то одну из них.

Последовательность решения таких задач можно назвать *сквозным системным синтезом*, который включает в себя пять этапов:

1. Формирование исходных данных.
2. Синтез принципиального решения (ПР).
3. Синтез общего решения (ОР).
4. Синтез частотного решения (ЧР).

Таблица 1. Основные характеристики многоканального приёмного устройства

№	Наименование параметра	Значение параметра
1	Диапазон входных частот, МГц	2700...3000
2	Коэффициент шума, дБ, не более	2,5
3	Ширина полосы фильтра основной избирательности, МГц, не менее	30
4	Межканальная развязка, дБ, не менее	60
5	Динамический диапазон по компрессии 1 дБ, дБ, не менее	90
6	Количество приёмных каналов	4
7	Потребляемая мощность, Вт, не более	27
8	Динамический диапазон по побочным спектральным составляющим в полосе от 10 кГц до 1 МГц относительно выходной частоты, дБ, не менее	75
9	Коэффициент стоячей волны по напряжению, не более	1,5

5. Проверка функционирования системы.

Иерархичность представления средств методологии при выполнении этапов в виде определённой их совокупности выступает как последовательность законов функционирования и развития систем, методов их синтеза, а также экспертных и вычислительно-поисковой систем на их основе. Иерархичность является наиболее обоснованной при системном подходе, поскольку реализует переход от высшего уровня знаний к низшему (см. рис. 1). Эта последовательность может быть различной на разных этапах в зависимости от характерных для них формализованных или неформализованных подходов. Рассмотрим более подробно содержание перечисленных этапов применительно к разработке многоканального приёмного устройства.

ФОРМИРОВАНИЕ ИСХОДНЫХ ДАННЫХ

Этот этап, как правило, включает в себя обоснование исходных данных для системного исследования с различными ограничивающими условиями и формирования обобщённого показателя качества K_1 аналогично записи (2). Сначала необходимо изучить *функционирование системы* и выбрать совокупность $\{K_\mu | \mu = \overline{1, n}\}$ требуемых единичных показателей K_μ из общего числа N принципиально возможных ($n \leq N$). Эти единичные показатели должны в наибольшей мере определять качество синтезируемой системы и удовлетворять условиям работы в надсистеме с учётом ряда ограничений. Затем нужно решить один из главных вопросов данного этапа – формирование обобщённого показателя качества:

$$K_1 = \{K_\mu | \mu = \overline{1, n}\}, \quad (5)$$

который должен состоять из единичных показателей качества $K_1 = \{K_\mu | \mu = \overline{1, n}\}$ и выступать как обобщённый критерий эффективности решения задачи синтеза системы.

Приступая к выполнению 1-го этапа, рассмотрим основные пункты ТЗ на многоканальное приёмное устройство. Очевидно, что обобщённый показатель качества функционирования K представляет собой вектор наиболее значимых технико-экономических характеристик, которые, приводятся в ТЗ на выполнение опытно-конструкторской работы. Для решения поставленной узконаправленной задачи ограничимся 9 параметрами (см. табл. 1).

К исходным данным также относятся формирование и обоснование следующих частных совокупностей ограничений или ограничивающих условий:

- $C_1 = \{K_\mu | \mu = \overline{1, n}\}$ – совокупность ограничений, накладываемых на единичные показатели качества K_μ ;
- $C_2 = \{L_\alpha | \alpha = \overline{1, A}\}$ – совокупность ограничений, накладываемых на условия функционирования объекта синтеза (ограничения на механические и климатические условия);
- $C_3 = \{N_\beta | \beta = \overline{1, B}\}$ – совокупность ограничений, накладываемых на структуру объекта – признаки и параметры его элементов (по технологическим и эргономическим условиям);
- $C_4 = \{P_\gamma | \gamma = \overline{1, \Gamma}\}$ – производственные ограничения (особенности технологии изготовления печатных плат (ПП): ширина дорожек, зазор между дорожками, диаметры отверстий на внутреннем и внешнем слоях, доступность в производстве материала ПП; электромагнитная совместимость узлов приёмного тракта – наличие поглощающих материалов);
- $C_5 = \{M_\delta | \delta = \overline{1, \Delta}\}$ – ограничения на элементную базу: разрешения военного представительства на использование элементной базы в данном изделии; ограничения иностранных государств на ввоз импортных материалов и элементов.

Таким образом, общая совокупность C исходных данных представляет собой сочетание следующих составляющих:

$$C = \{K_1, C_1, C_2, C_3, C_4, C_5\}. \quad (6)$$

Входящие в совокупность (6) составляющие $K_1, C_1, C_2, C_3, C_4, C_5$ большей частью взаимозависимы и противоречивы. Ввиду этого в большинстве случаев на практике на 1-м этапе не удаётся окончательно сформировать общую совокупность C исходных данных для всего процесса системного исследования, поэтому часто приходится уточнять или разделять совокупность C на последующих этапах синтеза, а иногда даже корректировать после завершения всех его этапов (с последующим повторением синтеза). Отсюда синтез сложных систем, таких как многоканальное приёмное устройство, является, как правило, многоступенчатым и итерационным процессом.

СИНТЕЗ ПРИНЦИПАЛЬНОГО РЕШЕНИЯ

На данном этапе решаются принципиальные вопросы создания объекта, при которых учитываются и рассматриваются лишь основные особенности его структуры, наиболее эффективно обеспечивающие его основные функции. Принципиальное решение может быть описано как совокупность, состоящая из множества структурных элементов, соответствующих определённым эффектам \mathcal{E}_p объединённых с множеством $\Pi_i^{вх}$ входных и множеством выходных связей в виде потоков энергии, вещества и информации (сигналов):

$$PP = \{\Pi_i^{вх} \cup (s_i \leftrightarrow \mathcal{E}_i) \cup \Pi_i^{вых} \mid i = \overline{1, m}\}. \quad (7)$$

Естественно, на данном этапе требуется довольно высокий уровень абстракции, чтобы учитывать самое главное и принципиальное, не вдаваясь в детали реализации системы.

В соответствии с изложенным содержанием 2-го этапа сначала необходимо сформировать совокупность C' исходных данных для его реализации:

$$C' = \{K_2, C_1', C_2', C_3', C_4', C_5'\}. \quad (8)$$

Здесь $K_2, C_1', C_2', C_3', C_4', C_5'$ представляют собой совокупности, аналогичные (5) и (6), но скорректированные в соответствии с требуемым уровнем абстракции.

Для реализации данного этапа должна быть решена следующая *экстремальная задача* синтеза:

$$K_2^o \rightarrow \max_{PP \in D_2} K_2(PP). \quad (9)$$

Здесь K_2 – значение критерия эффективности решения данной задачи, сформулированного определённым образом

на основе выбранной совокупности C' исходных данных; PP – совокупность (7), характеризующая состояние (структуру) объекта синтеза; $K_2(PP)$ – целевая функция, выражающая связь между функциональной стороной объекта (критерий эффективности) и структурной стороной объекта синтеза (структура PP).

При решении экстремальной задачи (9) необходимо найти такое значение PP путём вариации составляющих его входных $\Pi_i^{вх}$ и выходных $\Pi_i^{вых}$ потоков, а также различных эффектов вместе с их носителями (структурными элементами) s_p , которое обеспечивает экстремальное или возможно максимальное значение критерия эффективности $K_2 = K_2^o$. Характерная особенность экстремальной задачи синтеза для данного этапа – невозможность в подавляющем большинстве случаев формализовать протекающие в системе процессы. Отсюда следует невозможность сформировать целевую функцию $K_2(PP)$ с математически выраженной зависимостью между K_2 и PP .

Поскольку многоканальное приёмное устройство представляет собой сильно структурированную систему, то поиск принципиального решения будет осуществлён с использованием средств методологии M' (2) в виде иерархической совокупности, состоящей из закона соответствия функций и структуры \mathcal{Z}_c , морфологического метода синтеза и анализа M_m и экспертной системы \mathcal{E}_m , на основе морфологического метода:

$$M' = \{\mathcal{Z}_c \Rightarrow M_m \Rightarrow \mathcal{E}_m\}. \quad (10)$$

Опираясь на закон соответствия функций и структуры, приступим к поиску PP , используя морфологический метод синтеза и анализа, состоящий из ряда шагов. Во-первых, проведём анализ существующих способов увеличения динамического диапазона по компрессии 1 дБ (при условии коэффициента шума не более 2,5) и выберем ключевые, которые можно использовать в системном поиске:

1. Установка на входе приёмника ограничителя сигналов, который будет нормировать большие сигналы с уровнем мощности порядка 1 Вт (+30 дБм) к некоторому безопасному для входных каскадов уровню.
2. Использование системы временной автоматической регулировки усиления (ВАРУ) в тракте приёмного устройства.
3. Применение входных малошумящих высокочастотных усилителей с большим динамическим диапазоном по компрессии 1 дБ.

4. Двойное преобразование частоты с помощью двойных балансных смесителей с повышенным динамическим диапазоном.

5. Фильтры на поверхностных акустических волнах (ПАВ) для повышения спектральной чистоты сигналов в ближней зоне.

6. Отключение первого усилителя при наличии большого сигнала на входе (перевод усилителя в режим Bypass).

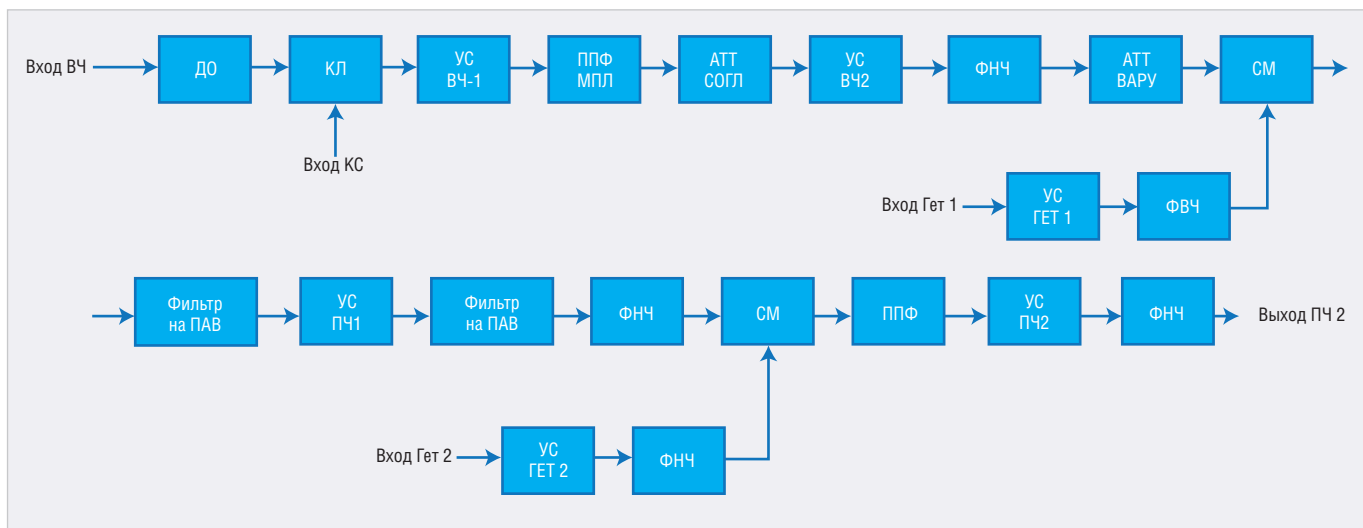
7. Оптимальное распределение усиления по тракту для расширения динамического диапазона по компрессии 1 дБ при заданных ограничениях на коэффициент шума.

Первые пять способов были использованы при проектировании макетного образца 4-канального приёмного устройства. В результате их совместного применения достигнут динамический диапазон по компрессии 1 дБ порядка 89 дБ, чем и была обеспечена возможность приёма сильных сигналов, отражённых от земной поверхности в режиме закрытия ключа.

Использование 6-го способа крайне нежелательно для получения непрерывного во времени радиолокационного изображения, т.к. ступенчатое включение и отключение усилителя может привести к потере информации об объекте обнаружения в ближней зоне (до 1 км).

В связи с жёсткими требованиями, предъявляемыми к радиолокационным приёмникам для обнаружения БПЛА, необходимость применения 7-го способа наряду с первыми пятью является крайне необходимой мерой, позволяющей достичь экстремальных показателей по динамическому диапазону и коэффициенту шума. Суть метода заключается в последовательной многоступенчатой оптимизации приёмного тракта за счёт введения цифровых аттенуаторов с шагом перестройки коэффициента ослабления 0,5 дБ с последующей их заменой на фиксированные (при серийном производстве). Для плавной регулировки динамического диапазона приёмника при большом входном сигнале и для обнаружения целей в любом канале дальности желательно ввести быстродействующий аттенуатор с аналоговым управлением, который будет использован в качестве ВАРУ.

В результате системного поиска получено принципиальное решение задачи синтеза в виде структурной схемы



Примечание: ДО – диодный ограничитель, КЛ – ключ, УС ВЧ-1 – первый усилитель высокой частоты, ППФ МПЛ – полосно-пропускающий фильтр, выполненный на микрополосковых линиях передачи, АТТ СОГЛ – аттенуатор согласующий, УС ВЧ-2 – второй усилитель высокой частоты, ФНЧ – фильтр нижних частот, АТТ ВАРУ – аттенуатор временной автоматической регулировки усиления, СМ – смеситель, УС ГЕТ-1 – усилитель первого гетеродина, ФВЧ – фильтр верхних частот, Фильтр на ПАВ – фильтр на поверхностных акустических волнах, УС ПЧ-1 – первый усилитель промежуточной частоты, ППФ – полосно-пропускающий фильтр, УС ПЧ-2 – второй усилитель промежуточной частоты, УС ГЕТ-2 – усилитель второго гетеродина.

Рис. 2. Структурная схема приёмного канала многоканального приёмного устройства

одного приёмного канала, представленной на рисунке 2.

СИНТЕЗ ОБЩЕГО РЕШЕНИЯ

На этом этапе снимается большинство идеализаций, вводимых на 2-м этапе, и ставится задача синтеза общего решения объекта с учётом более конкретных показателей качества. Исходным объектом $S_{ис}$ может служить полученное на 2-м этапе принципиальное решение ПР в виде структуры, а конечным – ОР в виде некоторой знаковой или образной модели (пространственной структуры \bar{S}).

Первоначально на 3-м этапе проектирования необходимо сформировать совокупность C'' исходных данных ($C'' \subset C$) для этого этапа:

$$C'' = \{K_3, C_1'', C_2'', C_3'', C_4'', C_5''\}, \quad (11)$$

где $K_3, C_1'', C_2'', C_3'', C_4'', C_5''$ – совокупность ограничений, аналогичных совокупностям (5) и (6). В формуле (11) для технических систем рассматривается совокупность $K_3 = \{K_\mu | \mu = 1, n\}$, в которой n показателей качества может быть существенно больше, чем на 2-м этапе синтеза, поскольку она должна включать в себя целый ряд дополнительных показателей: показатели надёжности – сохраняемость, долговечность, безотказность; конструктивные показатели – малогабаритность, устойчивость к механическим и климатическим воздействиям, воздействиям электромагнитных полей; экономические показатели – экономичность изготовления, обслуживания, ремонта и т.д.

Для решения вопросов синтеза на 3-м этапе ставится следующая экстремальная задача:

$$K_3^o = \max_{OP \in D_3} K_3(OP). \quad (12)$$

При этом ищется такое состояние системы (её структура) $OP \equiv OP_\xi^o$ на заданном множестве D_3 , которое обеспечивает наибольшее возможное значение критерия эффективности решения задачи синтеза (обобщённо-го показателя качества):

$$K_3(OP_\xi^o) = \max_{OP \in D_3} K_3(OP). \quad (13)$$

Сформулированная экстремальная задача (12) соответствует общей постановке задачи синтеза (3), однако при синтезе многоканального приёмного устройства на этом этапе весьма затруднительно математически записать $K_3(OP)$ и формализовать функционирование объекта – т.е. для такого класса объектов не удаётся поставить экстремальную задачу синтеза в виде задачи математического программирования.

Поиск общего решения задачи синтеза осуществляется при совместном использовании морфологического и компьютерного методов синтеза. Для этого проводится анализ принципиального решения и вычисляются основные технические характеристики (функции K_3) системы с помощью программы ADsimRF (интерактивной программы от компании Analog Devices для расчёта передающих и приёмных радиотрактов [2]). Часть исходных параметров для расчёта радиотрактов задаётся разработчиком. К ним относятся:

- количество звеньев радиотракта (Number of Stages);
- значение входной мощности (Input Power);

- значение полосы сигнала (Analysis Bandwidth);
- значение пик-фактора (PEP-to-RMS Ratio);
- запас от точки однодецибельной компрессии (точка, в которой отклонение амплитудной характеристики устройства от идеальной составляет 1 дБ) (P1dB Backoff Warning);
- запас относительно точки компрессии пиковой мощности для каждого элемента радиотракта (Peak Backoff Warning);
- минимальное отношение сигнал/шум для демодулятора (Min S/N for Demod).

Проектирование приёмного ВЧ-тракта заключается в выборе и наполнении звеньев конкретными элементами (микросхемами). При выборе элементов ключевыми становятся такие характеристики, как коэффициент усиления элемента (Power Gain), точки однодецибельной компрессии по входу (IIP1) и выходу (OIP1) элемента, точки пересечения интермодуляционных искажений 3-го порядка по входу (IIP3) и выходу (OIP3) элемента, коэффициент шума (Noise Figure), напряжение питания (Voltage) и ток потребления (Current). Данная программа удобна в использовании и наглядно демонстрирует прохождение сигнала по цепи (см. рис. 3).

Рассчитав основные характеристики приёмного тракта, можно построить матрицу несоответствий, в которой отражены наименование параметра, значения параметров по ТЗ, значе-

ния расчётных параметров и проверка условия на выполнение ТЗ. Фрагмент матрицы несоответствий представлен в таблице 2. Очевидно, что наличие ряда несоответствий заставляет прибегнуть к структурно-параметрической оптимизации с использованием алгоритмов экстремального поиска (компьютерный метод синтеза).

Оптимизацию технической системы можно рассматривать как процесс разрешения противоречий [3] между комплексом требуемых параметров, отражённых в ТЗ, и совокупностью параметров некоторого базового варианта системы. Другими словами, оптимизация – это приведение системы к вполне определённому состоянию S_0^* с заданным качеством функционирования K^0 .

Компьютерный метод синтеза позволяет определить при заданных ограничениях наилучшие значения параметров оптимизации, при которых достигается максимум целевой функции (5). Одним из таких параметров выступает коэффициент ослабления аттенюатора ВАРУ. Подбор конкретного элемента по заданному комплексу характеристик осуществляется с помощью морфологической матрицы [3]. В результате поиска экстремального решения целевой функции получается детализированная функциональная схема приёмного канала, представленная на рисунке 4.

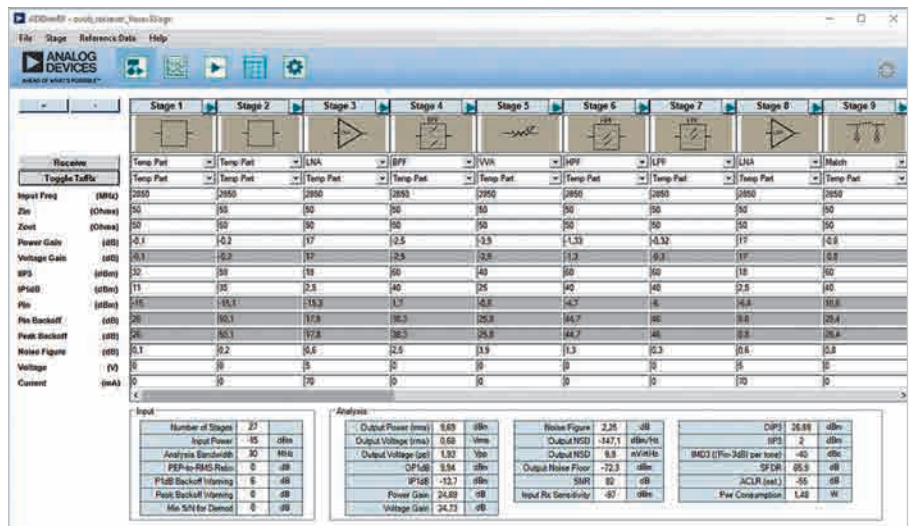


Рис. 3. Основное окно программы ADIsimRF

Таблица 2. Матрица несоответствий

№	Наименование параметра	Значение по ТЗ	Расчётное значение	Проверка условия выполнения ТЗ
1	Диапазон входных частот, МГц	2700...3000	2700...3000	Соответствует
2	Коэффициент шума, дБ, не более	2,5	2,25	Соответствует
3	Ширина полосы фильтра основной избирательности, МГц, не менее	30	30	Соответствует
4	Межканальная развязка, дБ, не менее	60	53	Не соответствует
5	Динамический диапазон по компрессии 1 дБ, дБ, не менее	90	82	Не соответствует
6	Количество приёмных каналов	4	4	Соответствует
7	Потребляемая мощность, Вт, не более	27	35	Не соответствует
8	Динамический диапазон по побочным спектральным составляющим в полосе от 10 кГц до 1 МГц относительно выходной частоты, дБ, не менее	75	81	Соответствует
9	Коэффициент стоячей волны по напряжению, не более	1,5	1,5	Соответствует

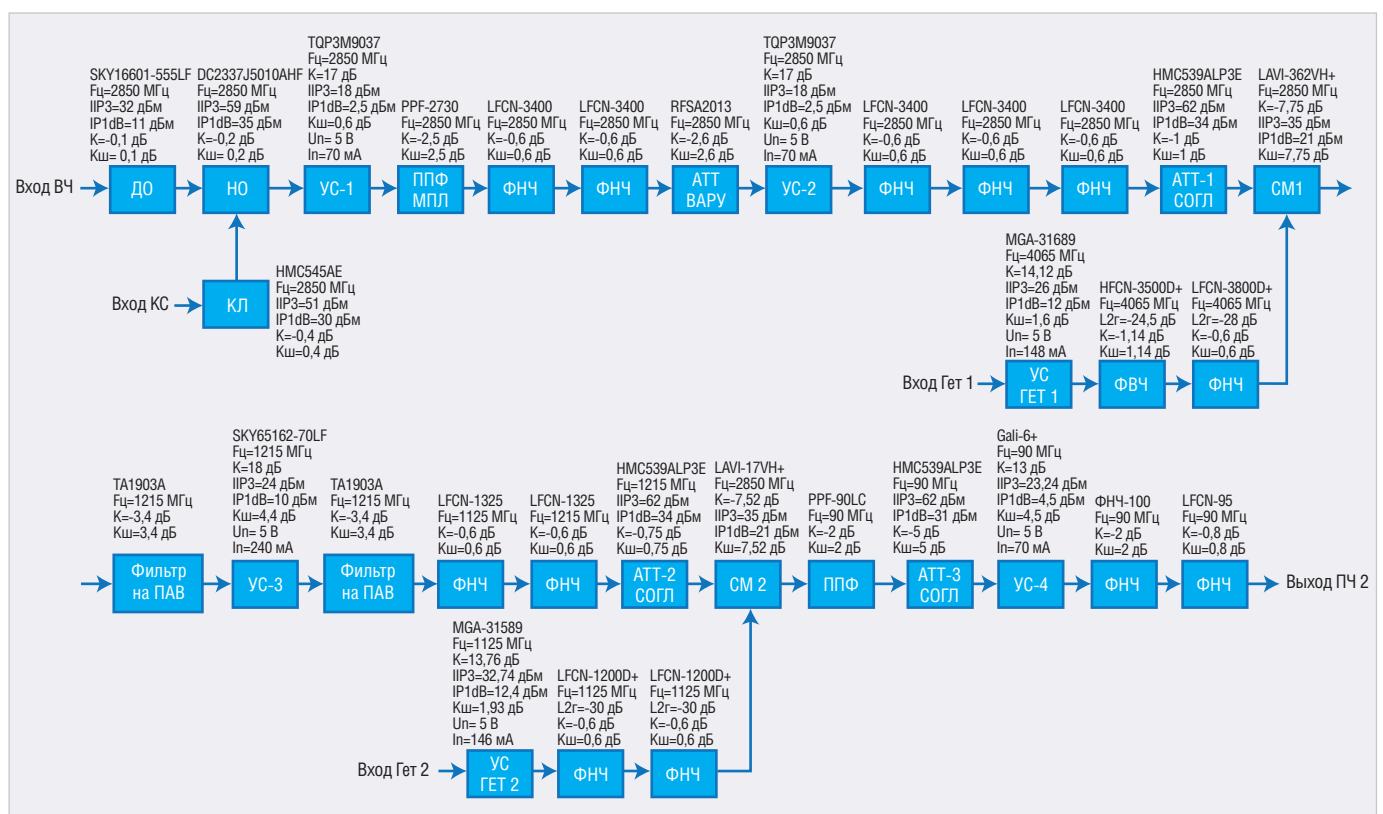


Рис. 4. Детализированная функциональная схема приёмного канала многоканального приёмного устройства

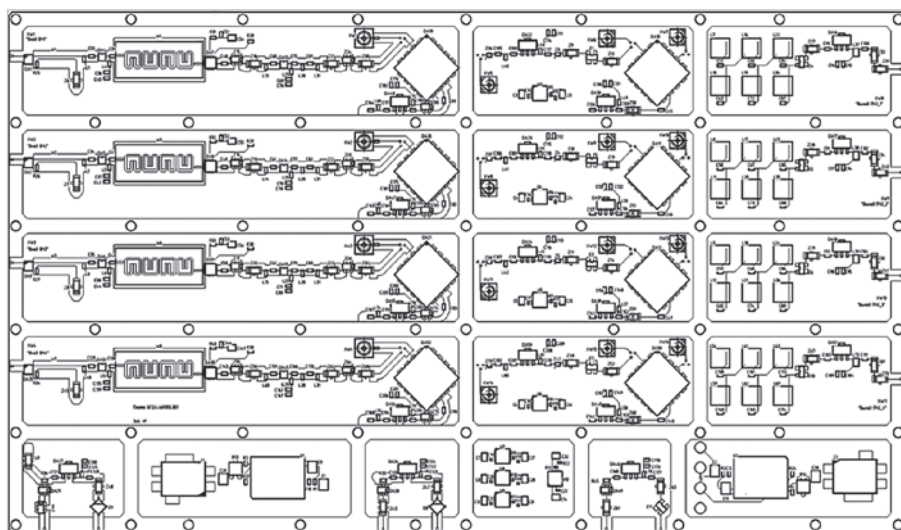


Рис. 5. Топология печатного узла многоканального приёмного устройства

СИНТЕЗ ЧАСТНОГО РЕШЕНИЯ

Необходимость данного этапа вытекает из требования детальной проработки синтезируемого объекта. Этот этап можно охарактеризовать как решение задачи поиска конкретных параметров элементов или других признаков заданного общего решения. При этом исходным и конечным объектом синтеза является некоторая образная или знаковая модель системы.

В начале выполнения этапа необходимо скорректировать исходные данные (6) – совокупность $C''' \subset C$, т.е. существенно оптимизировать исходные данные. В частности, следует существенно уменьшить число n показателей качества во множестве (5): $K_4 = \{K_\mu | \mu = \overline{1, n}\}$. Следует исключить некоторые показатели, которые не являются определяющими при синтезе частного решения объекта.

Пусть выбрана совокупность исходных данных:

$$C''' = \{K_4, C_1''', C_2''', C_3''', C_4''', C_5'''\}, \quad (14)$$

где $K_4, C_1''', C_2''', C_3''', C_4''', C_5'''$ – скорректированные совокупности указанных выше частных ограничений C_1, C_2, C_3, C_4, C_5 ($C_1''' \subset C_1, C_2''' \subset C_2, C_3''' \subset C_3, C_4''' \subset C_4, C_5''' \subset C_5$).

Отличительной особенностью 4-го этапа синтеза является возможность полной формализации протекающих в объекте процессов и отсюда – формальной (математической) записи $K(\bar{S}_\xi)$ или $K_4(\text{ЧР}_\xi)$.

Задача синтеза 4-го этапа имеет следующую математическую формулировку. Пусть задано множество исходных состояний проектируемой системы:

$$D_4 = (\text{ЧР}_1, \dots, \text{ЧР}_\xi, \dots, \text{ЧР}_t) \quad (15)$$

с конечным числом t элементов ЧР_ξ ($\xi = \overline{1, t}$). Тогда результатом решения задачи синтеза является выбор такого

состояния вектора ЧР_ξ системы, которое обеспечивает наибольшее возможное значение обобщённого показателя качества системы:

$$K_4^o = \max_{\text{ЧР}_\xi \in D_4} K_4(\text{ЧР}_\xi) \quad (16)$$

на заданном множестве D_4 пространства E^m ($D \subset E^m$). Данная задача синтеза частного решения соответствует общей постановке задач синтеза и представляет собой экстремальную задачу нелинейного математического программирования, поскольку для большинства синтезируемых систем целевая функция $K_4(\text{ЧР}_\xi)$ является нелинейной. Более того, во многих случаях $K_4(\text{ЧР}_\xi)$ в заданной области поиска является многоэкстремальной функцией.

Поиск частного решения есть не что иное, как процесс разработки электрической принципиальной схемы, где основным критерием оптимизации выступает динамический диапазон по компрессии 1 дБ. Далее разрабатываются перечень элементов, спецификация, печатная плата, 3D-модель корпуса и весь комплект конструкторской и эксплуатационной документации, необходимый для изготовления опытного образца конечного продукта.

При разработке печатной платы конструктор руководствуется требованиями по электромагнитной совместимости, обеспечивая наилучшую в своём классе межканальную развязку (более 60 дБ), создавая топологию печатного узла в виде набора многоячеистых структур, показанных на рисунке 5. При разработке 3D-модели корпуса конструктор руководствуется требованиями по электромагнитной совместимости отдельных узлов (ячеек) платы между собой с целью обеспечения параметра 8 таблицы 2 («Динамический



Рис. 6. Внешний вид многоканального приёмного устройства S-диапазона

диапазон по побочным спектральным составляющим»). Для этого в данной разработке рельеф корпуса укрупнённо повторяет рисунок печатной платы (земляные дорожки соответствуют торцевым поверхностям корпуса).

Таким образом, на основе синтезированной структуры, приведённой на рисунке 4, был изготовлен 4-канальный приёмный модуль, изображённый на рисунке 6.

ПРОВЕРКА ВЫПОЛНЕНИЯ НЕКОТОРЫХ УСЛОВИЙ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ СИСТЕМЫ

Необходимость данного этапа проектирования обусловлена следующими соображениями. Не следует думать, что решение сформулированных ранее на 2-м, 3-м, 4-м этапах задач даже при самых совершенных методах синтеза всегда позволяет гарантировать нахождение оптимального варианта системы для всех без исключения сложных условий функционирования. В большинстве случаев для этих условий возникает потребность в проведении анализа некоторых дополнительных показателей множества (5), весьма важных для данной области использования. В некоторых случаях требуется осуществить проверку при других ограничениях C_1, C_2, C_3, C_4, C_5 .

Необходимость проверки некоторых условий функционирования требует формулирования и решения задач анализа, которые в общем виде формулируются следующим образом. Задана структура $\bar{S} = (s_1, \dots, s_i, \dots, s_m)$ системы, необходимо определить показатели качества K_μ ($\mu = \overline{1, n'}$) объекта, количественно характеризующие определённые его свойства ($n' < n$):

$$\bar{S} \rightarrow K_\mu. \quad (17)$$

Задачу анализа при наличии опытного образца многоканального приёмного устройства принято решать экспериментальным методом. Измерение основных функций системы

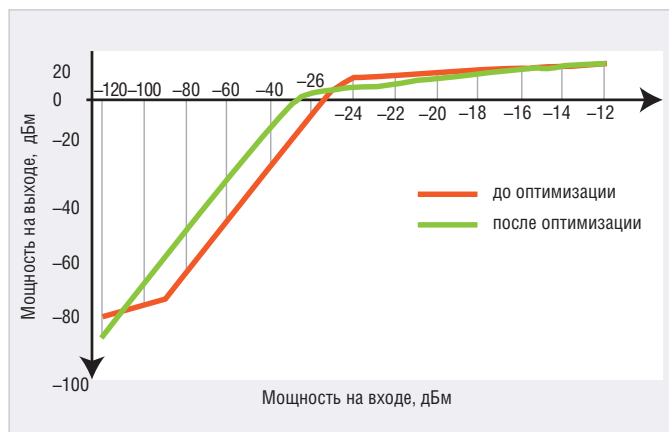


Рис. 7. Амплитудная характеристика приёмника

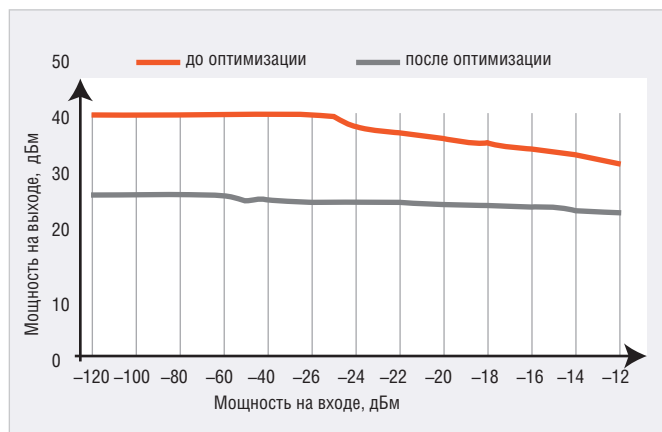


Рис. 8. Коэффициент усиления приёмника

(технических характеристик) проводилось с использованием поверенного контрольно-измерительного оборудования. Методика эксперимента была нацелена на определение минимально возможного и максимально допустимого уровней входных воздействий, при которых обеспечивалась бы линейная работа приёмного устройства. Для этого проведены измерения амплитудной характеристики (АХ), т.е. зависимости выходной мощности от входной мощности приёмника. На основании полученных данных рассчитана матрица, определяющая зависимость коэффициента усиления (КУ) приёмного канала от входной мощности. После интерполяции данных построены графики зависимости АХ и КУ от входной мощности.

По графику амплитудной характеристики (см. рис. 7) линейный участок соответствует области слабой нелинейности, определяемой «сверху» точкой однодецибелльной компрессии (в англоязычной литературе – точкой пересечения IP1). Ограничений «снизу», влияющих на линейность АХ «полупроводникового» приёмника не существует. Однако есть минимальный уровень входного сигнала, при котором амплитуда полезного сигнала на выходе приёмного устройства должна превышать уровень шумов квантования аналого-цифрового преобразователя хотя бы на 1 дБ, чтобы принятую смесь сигнал-помеха можно было обнаружить, распознать и идентифицировать.

Для более точного определения диапазона входных и выходных амплитуд, соответствующих линейному участку, построим графики зависимости коэффициента усиления от мощности на входе приёмника до и после оптимизации приёмного тракта (см. рис. 8). В первом случае, когда при-

ёмная система не настроена, при входных уровнях от -120 до -40 дБм коэффициент усиления неизменен (красный график на рисунке 8), т.е. это и есть абсолютно линейный участок. В диапазоне входных воздействий от -40 до -29 дБм коэффициент усиления приёмника уменьшился на 1 дБ, что говорит о наличии слабой нелинейности, обусловленной суммарной компрессией активных элементов приёмного тракта. Таким образом, до проведения структурно-параметрической оптимизации приёмного устройства диапазон входных мощностей от -120 до -29 дБм можно рассматривать как область несущественной нелинейности. Оценка динамического диапазона, выполненная графическим способом, составляет $-29 - (-120) = 91$ дБ, что недостаточно для гарантированной работы многолучевого радиолокатора.

В ходе оптимизации коэффициент усиления был снижен с 45 до 30 дБ за счёт перераспределения коэффициентов усиления отдельных узлов, а область несущественной нелинейности стала более протяжённой. В результате оптимизации приёмного тракта динамический диапазон по компрессии 1 дБ увеличился на 6 дБ и составил 95 дБ, что соответствует требованиям ТЗ с запасом, перекрывающим погрешность, связанную с разбросом параметров радиоэлементов и неидеальностью настройки приёмных каналов.

Результаты проведённого экспериментального исследования подтвердили правильность заявленных гипотез, научных предпосылок и адекватность математической модели. Авторы считают, что в данной работе новыми являются следующие положения и результаты:

- разработана методология структурно-параметрического синтеза мно-

гоканального приёмного устройства, которая является частью методологии синтеза новых решений [3];

- разработан алгоритм оптимизации приёмника по динамическому диапазону и коэффициенту шума;
- получена детализированная функциональная схема приёмного канала как общее решение задачи синтеза.

Процесс разработки многоканального приёмного устройства для многолучевого радиолокатора S-диапазона осуществлялся с использованием перспективной методологии на основе морфологического и компьютерного методов синтеза. В работе использованы законы функционирования и развития систем вместе с экспертными и вычислительными поисковыми системами синтеза новых решений. В результате получен опытный образец законченного продукта с отличными техническими характеристиками, сравнимыми с мировым уровнем разработок, готовый к применению в реальной аппаратуре гражданского и специального назначения.

ЛИТЕРАТУРА

1. Лавров А.А., Антонов И.К., Ненашев А.С., Чернов С.А. Многолучевые радиолокаторы в составе охранных комплексов. Антитеррор. / под ред. И.К. Антонова. – М.: Радиотехника, 2017. – 216 с.
2. Ботов В.А., Вишняков Д.Ю., Казаков Л.Н., Селянская Е.А. Методика расчёта высокочастотных трактов приёмо-передающих устройств на основе специализированной программы ADIsimRF. – Ярославль: ЯрГУ, 2016. – 56 с.
3. Воинов Б.С., Бугров В.Н., Воинов Б.Б. Информационные технологии и системы: поиск оптимальных, оригинальных и рациональных решений. В 2 томах. Том I. Методология синтеза новых решений. – М.: Наука, 2007.

