



УДК 621.396.621.54

DOI: 10.22184/NanoRus.2019.12.89.439.447

РАЗРАБОТКА РАДИОЛОКАЦИОННОГО ПРИЕМНИКА С БОЛЬШИМ ДИНАМИЧЕСКИМ ДИАПАЗОНОМ ДЛЯ ОБНАРУЖЕНИЯ БПЛА

DEVELOPING A RADAR RECEIVER WITH A LARGE DYNAMIC RANGE FOR UAV DETECTION

ЦЫПЛЕНКОВ Ю. С.¹*Главный конструктор
synthesprom@yandex.ru*TSYPLENKOV Y. S.¹*Chief Designer
synthesprom@yandex.ru*ОВЧИННИКОВ В. Г.²*Инженер-разработчик,
аспирант НГТУ им. Р. Е. Алексеева
OvchinnikovVG@yandex.ru*OVCHINNIKOV V. G.²*Design engineer, graduate student of Nizhny Novgorod State
Technical University named after R. E. Alekseev
OvchinnikovVG@yandex.ru*¹ООО «СИНТЕЗАТОР-НН»*603057, Россия, г. Нижний Новгород, ул. Нартова, 2, оф. 315
Тел.: +7 (831) 414-33-07*²АО «НПП «Полет»*603950, Россия, г. Нижний Новгород, ГСП-462,
пл. Комсомольская, 1
Тел.: +7 (831) 244-86-17*¹“SYNTHESIZER-NN” LLC*of. 315, 2 Nartova St., Nizhny Novgorod, 603057, Russia
Tel.: +7 (831) 414-33-07*²SPE Polet JSC*1 Komsomolskaya Square, GSP-462,
Nizhny Novgorod, 603950, Russia
Tel.: +7 (831) 244-86-17*

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

Ключевые слова: многоканальное приемное устройство; динамический диапазон по компрессии 1 дБ; межканальная развязка; коэффициент шума; структурно-параметрическая оптимизация; многолучевой радиолокатор; беспилотный летательный аппарат.

The requirements for a multi-beam radar receiver used for detecting small-scale low-visible low-speed targets at short range against the background of reflections from the earth's surface and local objects, are extremely high in terms of providing a large dynamic range for 1 dB of compression, low noise and low power consumption. The present paper is devoted to the solution of the outlined problem in the space of diametrically contradictory parameters, where the problem of structural-parametric synthesis is formulated, methods for optimizing the structure and its elements are considered, and basic algorithms for finding general and particular solutions of the synthesis problem are determined.

Keywords: multichannel receiver; dynamic compression range 1 dB; inter-channel decoupling; noise factor; structural-parametric optimization; multipath radar; unmanned aerial vehicle.

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, с одной стороны, 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, так как для большинства средств ПВО нижняя граница зоны обнаружения начинается от 5 км. С другой стороны, имеет место мощное отражение зондирующего сигнала от земной поверхности. Поэтому задача обнаружения

и распознавания слабого сигнала на фоне сильных помех является как никогда актуальной как в условиях холодной войны, так и в локальных военных конфликтах [1].

Основным средством борьбы с несанкционированным вторжением является многолучевой радиолокатор, который позволяет обнаруживать, сопровождать, измерять параметры движения цели с высокой точностью и выдавать данные в центр управления огневой подготовкой за счет использования в своем составе малошумящего быстродействующего синтезатора опорных частот с низким уровнем побочных спектральных составляющих, приемного устройства с большим динамическим диапазоном и цифровой обработкой сигнала с длительным временем накопления.

В данной статье затронем основные принципы построения многоканального радиолокационного приемника с большим



динамическим диапазоном, разработанного специально для обнаружения беспилотных летательных аппаратов в условиях воздействия пассивных помех в виде отражений от земной поверхности, метеорологических объектов и местных предметов.

Одной из основных проблем, возникающих при создании многоканального приемного устройства, является одновременное обеспечение большого динамического диапазона, низкого коэффициента шума, достаточной межканальной развязки и малого энергопотребления. Настоящая работа посвящена поиску методов увеличения линейного динамического диапазона или динамического диапазона по компрессии 1 дБ, ограниченного сверху таким параметром, как точка однодецибелной компрессии [3], а снизу — минимально возможным уровнем сигнала, который способен принять и идентифицировать радиолокационный приемник в надлежащем качестве. 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 мы все чаще обращаем свой взор на возможности информационных технологий в решении широкого класса задач. Информационные технологии представляют собой упорядоченный процесс реализации некоторых операций обработки информации [2].

Введем ряд понятий, которые будем использовать в данной статье для обозначения наиболее значимых процессов. Понятие «**поиск**» соответствует процессу решения так называемой задачи **синтеза**. Эта задача, обратная по отношению к задаче анализа, является наиболее важной при создании систем: заданы функции системы, найти структуру системы. При этом задача **анализа** соответствует классическому понятию процесса решения так называемой прямой задачи при структурно-функциональном подходе: задана структура системы, найти ее функции (показатели качества функционирования). Понятие «**решение**» относится к результату поиска или синтеза — определенной структуре создаваемой системы [2].

Коснемся методологии решения системных задач синтеза на основе информационных технологий и систем. Она включает закономерности функционирования и развития систем, методы синтеза систем, 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 определенных функций, нужных внешнему потребителю.

Внутреннее состояние объекта характеризуется вектором состояния или структуры объекта:

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

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

Выполняемые объектом функции качественно характеризуются определенными свойствами, а количественно — отражающими эти свойства показателями качества функционирования

объекта. В итоге функционирование объекта характеризуется совокупностью **единичных показателей качества функционирования**

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

Здесь K_μ есть μ -й единичный показатель качества функционирования ($\mu = \overline{1, n}$); K — обобщенный показатель качества функционирования.

Число n связано с многофункциональностью объекта и во многом определяет его сложность.

Сформулируем *логическую* постановку задачи анализа и синтеза.

Задача анализа. Задан вектор \bar{S} , определить K (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 ($i = \overline{1, m}$) вектора состояния \bar{S} системы, которые обеспечивали бы заданные или наилучшие значения единичных показателей K_μ системы ($\mu = \overline{1, n}$), входящих в обобщенный показатель качества K . При проведении разработки многоканального приемного устройства ставится именно задача синтеза.

При этом в качестве обобщенного показателя K фигурирует техническое задание (ТЗ) на разработку объекта новой техники с включенными 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 l элементов \bar{S}_ξ ($\xi = \overline{1, l}$) в виде всех допустимых решений поставленной задачи. Тогда целью решения задачи синтеза является выбор такого состояния системы $\bar{S}_\xi \equiv \bar{S}_\xi^o$ (ее варианта), при котором достигается возможно большее значение **обобщенного показателя качества**:

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

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

Процесс синтеза новых решений представляет собой итеративный процесс в замкнутом цикле, который начинается с задачи анализа, сменяющейся задачей синтеза, результат которой через обратную связь подается 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 — обобщенный показатель качества функционирования на k -м шаге, K^o — оптимальное значение показателя K .

Под методологией проектирования приемного устройства с заданным набором характеристик следует понимать совокупность методов упорядочивания технической системы — структуры, состоящей из набора взаимосвязанных элементов, несущих вполне определенную функциональную нагрузку, в целях приведения системы в другое состояние — наделенное

совокупностью уникальных свойств, определяющих качество системы в глазах конечного потребителя. Уникальные свойства система приобретает в результате согласованного взаимодействия ее элементов, на выходе которой мы получаем комплекс ключевых характеристик, ожидаемых заказчиком. Наиважнейшими характеристиками приемного устройства являются: динамический диапазон по компрессии 1 дБ, коэффициент шума, межканальная развязка и потребляемая мощность.

К отличительным особенностям методологии синтеза новых решений относятся:

- 1) системный подход к формированию методологии;
- 2) сочетание формализованных и неформализованных подходов;
- 3) инновационный характер;
- 4) компьютерная реализация.

Системный подход к формированию методологии заключается в ее 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. Особо следует подчеркнуть необходимость решить весь этот комплекс задач, а не какую-то одну из них.

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

- I этап — формирование исходных данных;
- II этап — синтез принципиального решения (ПР);
- III этап — синтез общего решения (ОР);
- IV этап — синтез частотного решения (ЧР);
- V этап — проверка функционирования системы.

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

Более подробно рассмотрим содержание перечисленных выше этапов применительно к разработке многоканального приемного устройства.

I этап — формирование исходных данных. Этот этап, как правило, включает обоснование исходных данных для системного исследования с различными ограничивающими условиями и формирования обобщенного показателя качества K_1 аналогично записи (2).

Сначала надо 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 учетом определенных ограничений.

Затем нужно решить одну из главных задач этого этапа — формирование обобщенного показателя качества

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

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

Приступая к выполнению этапа I, пробежимся по основным пунктам ТЗ на многоканальное приемное устройство. Очевидно, что обобщенный показатель качества функционирования K представляют собой вектор наиболее значимых технико-экономических характеристик, которые приводятся в ТЗ на выполнение опытно-конструкторской работы на многоканальное приемное устройство. Для решения поставленной узконаправленной задачи ограничимся девятью параметрами (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 накладываемых ограничений 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);

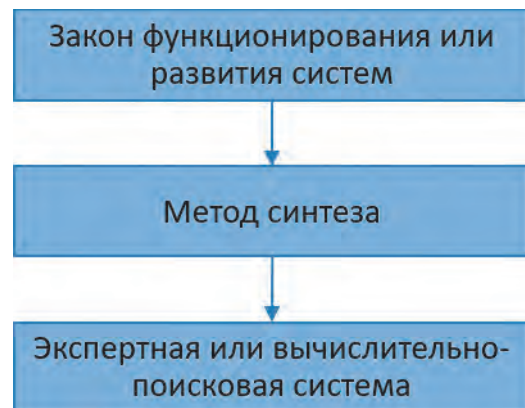


Рис. 1. Иерархическое представление средств методологии

Таблица 1. Основные характеристики многоканального приемного 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 приемных 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



- $C_3 = \{N_\beta | \beta = \overline{1, B}\}$ — совокупность ограничений, накладываемая на структуру объекта — признаки и параметры его элементов (по технологическим и эргономическим условиям);
- $C_4 = \{P_\gamma | \gamma = \overline{1, T}\}$ — 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 приемного тракта — наличие поглощающих материалов;
- $C_5 = \{M_\delta | \delta = \overline{1, \Delta}\}$ — ограничения на элементную базу: разрешение 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 практики не удается на I этапе 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 приемное устройство, является, как правило, многоступенчатым и итеративным процессом.

II этап — синтез принципиального решения. На данном этапе решаются принципиальные вопросы создания объекта, при которых учитываются и рассматриваются лишь основные особенности структуры объекта, наиболее эффективно обеспечивающие его основные функции. Принципиальное решение может быть описано как совокупность, состоящая из множества структурных элементов s_i , непосредственно соответствующих определенным эффектам ε_i , объединенных с множеством Π_i^{ex} входных и множеством Π_i^{max} выходных связей в виде потоков энергии, вещества и информации (сигналов):

$$PP = \left\{ \Pi_i^{ex} \cup (s_i \Leftrightarrow \varepsilon_i) \cup \Pi_i^{max} | i = \overline{1, m} \right\}. \quad (7)$$

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

В соответствии с изложенным содержанием II 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 определенным 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 K_2) и структурной стороной объекта синтеза (структура PP).

При решении экстремальной задачи (8) необходимо найти такое значение PP путем вариации составляющих его входных Π_i^{ex} и выходных Π_i^{max} потоков, а также различных эффектов ε_i , вместе с их носителями (структурными элементами) s_i , которые доставляют 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 невозможность сформировать целевую функцию $K_2(PP)$ с математически выраженной зависимостью между K_2 и PP .

Так как многоканальное приемное устройство представляет собой сильно структурированную систему, то поиск принципиального решения будет осуществлен с использованием средств методологии $M'_2(2)$ в виде иерархической совокупности, состоящей из закона соответствия функций и структуры \mathcal{Z}_m , морфологического метода синтеза и анализа M_m и экспертной системы \mathcal{E}_m на основе морфологического метода:

$$M'_2 = \{\mathcal{Z}_m \Rightarrow M_m \Rightarrow \mathcal{E}_m\}. \quad (10)$$

Опираясь на закон соответствия функций и структуры, приступим к поиску ПР, используя морфологический метод синтеза и анализа, состоящий из ряда шагов. Во-первых, проведем 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 приемника 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 приемного устройства.
3. Применение входных маломощных 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 приемного устройства. В результате совместного использования первых пяти способов достигнут динамический диапазон по компрессии 1 дБ порядка 89 дБ, чем и была обеспечена возможность приема сильных

сигналов, отраженных от земной поверхности в режиме закрытия ключа.

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

В связи с жесткими требованиями, предъявляемыми к радиолокационным приемникам для обнаружения БПЛА, необходимость применения 7-го способа наряду с первыми пятью является крайне необходимой мерой и позволит достичь экстремальных показателей по динамическому диапазону и коэффициенту шума. Суть метода заключается в последовательной многоступенчатой оптимизации приемного тракта за счет 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 приемника при большом входном сигнале и 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 одного приемного канала, представленной на рис. 2.

III этап — синтез общего решения. На этом этапе снимается большинство идеализаций, вводимых на II этапе, и ставится задача синтеза общего решения объекта с учетом более конкретных показателей качества. Исходным объектом \bar{S}_{ic} может служить полученное на II этапе принципиальное решение ПР в виде структуры, а конечным — ОР в виде некоторой знаковой или образной модели (пространственной структуры \bar{S}).

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

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

Здесь $K_3, C_1'', C_2'', C_3'', C_4'', C_5''$ — совокупность ограничений, аналогичных совокупностям (5) и (6). В формулу (10) следует ввести совокупность $K_3 = \{K_\mu | \mu = \overline{1, n}\}$, в которой число n показателей

качества K_μ может быть существенно шире, чем на II этапе синтеза, поскольку она должна включать целый ряд дополнительных показателей (показатели надежности — 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 задач синтеза III этапа ставится следующая экстремальная задача:

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

При этом ищется такое состояние системы (ее структура) $OP \equiv OP_\xi^o$ на заданном множестве D_3 , которое обеспечивает возможно большее значение критерия эффективности решения задачи синтеза (обобщенного 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 приемного устройства на этом этапе весьма затруднительно математически записать $K_3(OP)$ и формализовать функционирование объекта. Отсюда для такого класса объекта не удается 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 проводим анализ принципиального решения и вычисляем основные технические характеристики (функции K_3) системы с помощью программы ADsimRF.

ADsimRF — интерактивная программа фирмы Analog Devices для расчета передающих и приемных радиотрактов [3]. Часть исходных параметров для расчета радиотрактов задается разработчиком: количество звеньев радиотракта (Number of Stages), значение входной мощности (Input Power), полосы сигнала (Analysis Bandwidth), пик фактора (PEP-to-RMS Ratio), запас от точки однодецибельной компрессии (точка, в которой отклонение амплитудной характеристики устройства от идеальной составляет 1 дБ) (1dB Backoff Warning), запас относительно

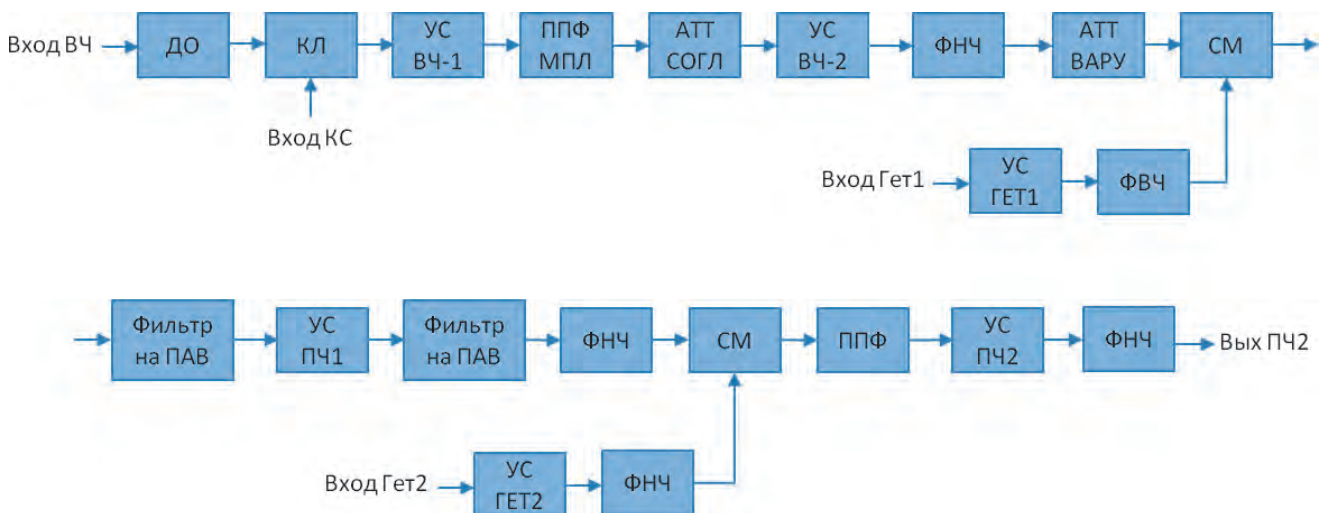


Рис. 2. Структурная схема приемного канала многоканального приемного устройства

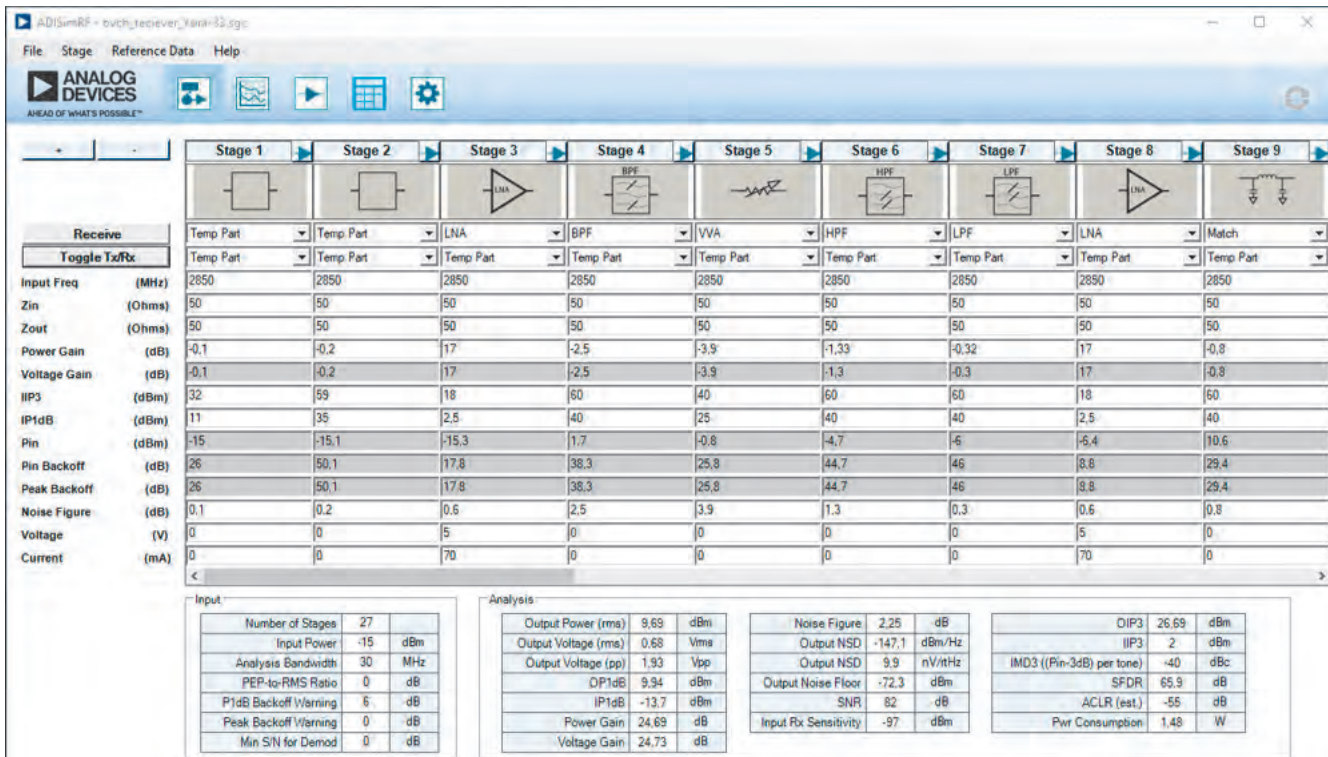


Рис. 3. Основное окно программы ADIsimRF

точки компрессии пиковой мощности для каждого элемента радиотракта (Peak Backoff Warning), минимальное отношение сигнал/шум для демодулятора (Min S/N for Demod).

Проектирование приемного 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 однодецибелной компрессии по входу элемента (IIP1) и выходу (OIP1), точки пересечения интермодуляционных искажений 3-го порядка по входу элемента (IP3) и выходу (OIP3), коэффициент шума (Noise Figure), напряжение питания (Voltage) и ток потребления (Current). Данная программа удобна в использовании и наглядно демонстрирует прохождение сигнала по цепи (рис. 3).

Рассчитав основные характеристики приемного тракта, строим матрицу несоответствий, в которой отражаем наименование параметра, значения параметров по ТЗ, значения расчетных параметров и проверку условия на выполнение ТЗ. Фрагмент матрицы несоответствий представлен в табл. 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 [2] между комплексом требуемых параметров, отраженных в техническом задании, и совокупностью параметров некоторого базового варианта системы. Другими словами, оптимизация — это приведение

Таблица 2. Матрица несоответствий

№	Наименование параметра	Значение по ТЗ	Значение расчетное	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 приемных 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 приемного канала многоканального приемного устройства

системы к вполне определенному состоянию \bar{S}_ξ^o с заданным качеством функционирования K^o .

Компьютерный метод синтеза позволяет определить при заданных ограничениях наилучшие значения параметров оптимизации, при которых достигается максимум целевой функции (5). Одним из параметров оптимизации выступает коэффициент ослабления аттенюатора VARU. Подбор конкретного элемента по заданному комплексу характеристик осуществляем с помощью морфологической матрицы [2]. В результате поиска экстремального решения целевой функции получаем детализированную функциональную схему приемного канала, представленную на рис. 4.

IV этап — синтез частного решения. Необходимость этого этапа вытекает из требуемой детальной проработки синтезируемого объекта. Характеризуется как результат решения задачи поиска конкретных параметров элементов или других характерных 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. следует существенно обузить 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.

Задача синтеза частного решения на этом этапе ставится следующим образом.

Пусть выбрана совокупность

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

исходных данных, 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 ($C_1''' \subset C_1, C_2''' \subset C_2, C_3''' \subset C_3, C_4''' \subset C_4, C_5''' \subset C_5$).

Отличительная особенность IV этапа синтеза — возможность полной формализации протекающих в объекте процессов и отсюда — формальной (математической) записи $K(\bar{S}_\xi)$ или $K_4(ЧР_\xi)$ для данного этапа.

Задача синтеза IV этапа имеет следующую математическую формулировку. Пусть задано множество

$$D_4 = (ЧР_1, \dots, ЧР_\xi, \dots, ЧР_n) \quad (15)$$

исходных состояний проектируемой системы с конечным числом t элементов $ЧР_\xi (\xi = \overline{1, t})$. Тогда итогом решения задачи синтеза является выбор такого состояния вектора $ЧР_\xi$ системы, который доставляет возможно большее значение обобщенному показателю качества системы

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

на заданном множестве D_4 пространства $E^m (D_4 \subset E^m)$.

Данная задача синтеза частного решения соответствует общей постановке задачи синтеза и есть экстремальная задача нелинейного математического программирования, поскольку для большинства синтезируемых систем целевая функция $K_4(ЧР_\xi)$ является нелинейной. Более того, во многих случаях $K_4(ЧР_\xi)$ в заданной области поиска является многоэкстремальной функцией.

Поиск частного есть не что иное, как процесс разработки схемы электрической принципиальной, где основным критерием оптимизации выступает динамический диапазон по компрессии 1 дБ. Далее разрабатываются перечень элементов,

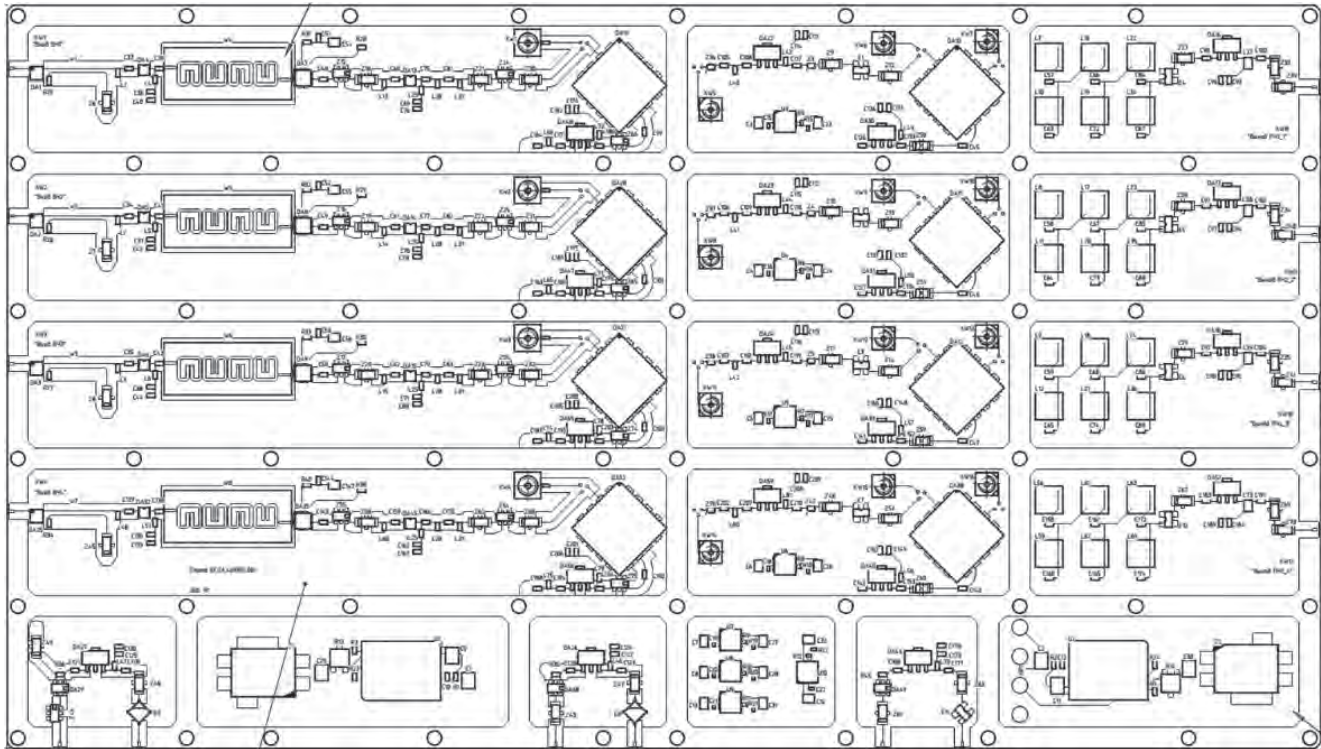


Рис. 5. Топология печатного узла многоканального приемного устройства

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 своем классе межканальную развязку (более 60 дБ), создавая топологию печатного узла в виде набора многоячеистых структур, показанных на рис. 5.

При разработке 3D-модели корпуса конструктор руководствуется требованиями по электромагнитной совместимости отдельных узлов (ячеек) платы между собой в целях обеспечения параметра 8 табл. 2 — «Динамический диапазон по побочным спектральным составляющим». Для этого в данной разработке рельеф корпуса укрупненно повторяет рисунок печатной платы (земляные дорожки соответствуют торцевым поверхностям корпуса).

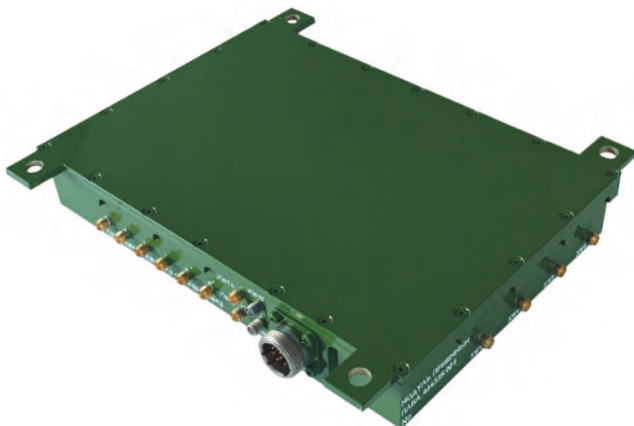


Рис. 6. Внешний вид многоканального приемного устройства S-диапазона

Таким образом, на основе синтезированной структуры, приведенной на рис. 4, был изготовлен 4-канальный приемный модуль, изображенный на рис. 6, который после регулировки и настройки представлен для идентификации заявленных характеристик.

Этап — проверка выполнения некоторых условий функционирования системы. Необходимость данного этапа проектирования вытекает из приводимых ниже соображений.

Не следует думать, что решение сформулированных ранее задач на II, III и IV этапах даже при самых совершенных методах синтеза всегда позволяет гарантировать поиск оптимального варианта системы для всех без исключения сложных условий функционирования. В большинстве случаев для этих условий возникает потребность произвести анализ 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 поставить и решить некоторые задачи анализа, которые в общем виде формулируются следующим образом: задана структура $\bar{S} = (s_1, \dots, s_m)$ системы, определить показатели качества $K_\mu (\mu = 1, n')$ объекта, количественно характеризующее определенные его свойства ($n' < n$):

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

Задачу анализа при наличии опытного образца многоканального приемного устройства принято решать экспериментальным путем. Причем измерение основных функций системы (технических характеристик) проводилось с использованием поверенного контрольно-измерительного оборудования.

Методика эксперимента была нацелена на определение минимально возможного и максимально допустимого уровней

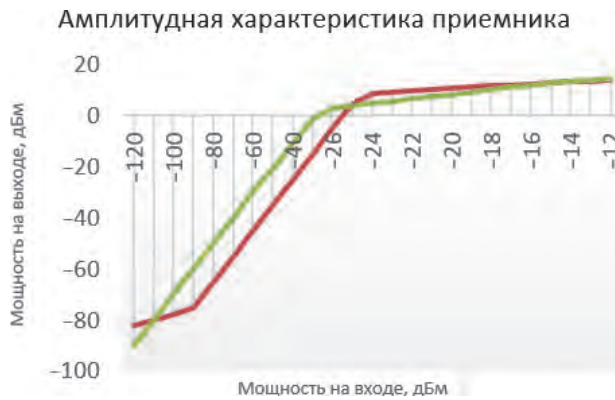


Рис. 7. Амплитудная характеристика приемника (красный график — до оптимизации, серый — после оптимизации)

входных воздействий, при которых обеспечивалась бы линейная работа приемного устройства. Для этого проведены измерения амплитудной характеристики (АХ), т. е. зависимости выходной мощности от входной мощности приемника. На основании полученных данных рассчитана матрица, определяющая зависимость коэффициента усиления (КУ) приемного канала от входной мощности. Применяя интерполяцию данных, построили графики зависимости АХ и КУ от входной мощности.

По графику амплитудной характеристики (рис. 7) линейный участок соответствует области слабой нелинейности, определяемой «сверху» точкой однодецибелной компрессии (в англоязычной литературе точкой пересечения IP1). Ограничений «снизу», влияющих на линейность АХ «полупроводникового» приемника, не существует. Однако есть минимальный уровень входного сигнала, при котором амплитуда полезного сигнала на выходе приемного 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 приемника до и после оптимизации приемного тракта (рис. 8). В первом случае, когда приемная система не настроена, при входных уровнях от -120 до -40 дБм коэффициент усиления неизменен (красный график на рис. 8). Это и есть абсолютно линейный участок. В диапазоне входных воздействий от -40 до -29 дБм коэффициент усиления приемника уменьшился на 1 дБ, что говорит о наличии слабой нелинейности, обусловленной суммарной компрессией активных элементов приемного тракта.

Таким образом, до проведения структурно-параметрической оптимизации приемного устройства диапазон входных мощностей от -120 до -29 дБм можно рассматривать как область несущественной нелинейности. Оценка динамического диапазона, выполненная графическим способом, составляет $-29 - (-120) = 89$ дБ, что недостаточно для гарантированной работы многолучевого радиолокатора.

В ходе оптимизации коэффициент усиления был снижен с 45 до 30 дБ за счет перераспределения коэффициентов усиления отдельных узлов, а область несущественной нелинейности стала более протяженной. В результате оптимизации приемного тракта динамический диапазон по компрессии 1 дБ увеличился



Рис. 8. Коэффициент усиления приемника (красный график — до оптимизации, серый — после оптимизации)

на 6 дБ и составил 95 дБ, что соответствует требованиям ТЗ с запасом, перекрывающим погрешность, связанную с разбросом параметров радиоэлементов и неидеальностью настройки приемных каналов.

Результаты проведенного экспериментального исследования подтвердили правильность заявленных гипотез, научных предположений и адекватность математической модели.

Авторы считают, что в данной работе *новыми* являются следующие положения и результаты.

- Разработана методология структурно-параметрического синтеза многоканального приемного устройства, которая является частью методологии синтеза новых решений [2].
- Разработан алгоритм оптимизации приемника по динамическому диапазону и коэффициенту шума.
- Получена детализированная функциональная схема приемного канала как общее решение задачи синтеза.

Итак, процесс разработки многоканального приемного устройства для многолучевого радиолокатора S-диапазона проходил с использованием перспективной методологии на основе морфологического и компьютерного методов синтеза, а также законов функционирования и развития систем вместе с экспертными и вычислительной поисковой 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. Монография / под ред. И. К. Антонова. — М.: Радиотехника, 2017. — 216 с.: цв.
2. Воинов Б. С., Бугров В. Н., Воинов Б. Б. Информационные технологии и системы: поиск оптимальных, оригинальных и рациональных решений. Второе дополненное научное электронное издание. В 2 томах. Том I / Воинов Б. С., Бугров В. Н., Воинов Б. Б. Методология синтеза новых решений. — М.: Наука, 2007.
3. Методика расчета высокочастотных трактов приемопередающих устройств на основе специализированной программы ADIsimRF: учебно-методическое пособие / В. А. Ботов, Д. Ю. Вишняков, Л. Н. Казаков, Е. А. Селянская; Яросл. гос. ун-т им. П. Г. Демидова. — Ярославль: ЯрГУ, 2016. — 56 с.