Научная статья
УДК 623.62

Методический подход к выбору предпочтительного варианта построения образцов техники радиоэлектронной борьбы с использованием технологии программируемого радио

Юрий Митрофанович Глазунов, Алексей Юрьевич Божков, Дмитрий Михайлович Бывших

Аннотация. Показана возможность применения технологии программируемого радио при создании образцов техники радиоэлектронной борьбы. Сформулирована и формализована задача выбора рационального варианта построения образца техники радиоэлектронной борьбы на основе принципов программируемого радио. Предложен методический аппарат, необходимый для решения задачи выбора оптимального варианта построения образца техники радиоэлектронной борьбы с использованием этой технологии.

Ключевые слова: образец техники РЭБ; технология программируемого радио; оптимальный вариант построения образца; технико-экономический эффект; модернизационная пригодность

Для цитирования: Глазунов Ю.М., Божков А.Ю., Бывших Д.М. Методический подход к выбору предпочтительного варианта построения образцов техники радиоэлектронной борьбы с использованием технологии программируемого радио // Вооружение и экономика. 2025. №1(71). С. 75-82.

Original article

A Methodical Approach to the Option Preference for Electronic Warfare Equipment Samples Creation by Means of Programmable Radio Technology

Iurii M. Glazunov, Aleksei Iu. Bozhkov, Dmitrii M. Byvshikh

Abstract. The possibility of programmable radio technology application in the creation of electronic warfare samples is shown. The task of a rational option for an electronic warfare sample based on the programmable radio principles is formulated and formalized. A methodical apparatus is proposed that is required for the optimal option problem solution of electronic warfare equipment sample creation by means of this technology.

Keywords: electronic warfare equipment sample; programmable radio technology; optimal option for the sample; technical and economic effect; modernization suitability

For citation: Glazunov Iu.M., Bozhkov A.Iu., Byvshikh D.M. A Methodical Approach to the Option Preference for Electronic Warfare Equipment Samples Creation by Means of Programmable Radio Technology. Vooruzhenie i ekonomika = Armament and Economics. 2025;71(1): 75-82. (In Russ.).

Развитие системы вооружения радиоэлектронной борьбы (РЭБ) в настоящее время и в перспективе характеризуется рядом следующих особенных факторов [1].

1. Рост типажа и номенклатуры образцов техники РЭБ, входящих в систему вооружения, а также их составных частей. Это приводит к возрастанию сложности работ по поддержанию боеспособности и боеготовности частей РЭБ на необходимом уровне, а также к возрастанию сложности обслуживания и затрат на эксплуатацию техники РЭБ.

2. Высокие темпы морального старения и снижения эффективности образцов техники РЭБ, входящих в систему вооружения РЭБ. Это приводит к необходимости разработки новых образцов на замену устаревших или проведение работ по модернизации этих образцов, что в результате приводит к возрастанию затрат, необходимых на развитие техники РЭБ.

3. Высокий уровень функционально-конструктивной сложности образцов техники РЭБ, входящих в систему вооружения РЭБ. Это приводит к возрастанию сложности их создания и эксплуатации и, следовательно, к возрастанию затрат.

Эти негативные факторы в условиях существенных ограничений по ресурсам, выделяемых на развитие техники РЭБ, приводят к необходимости искать такие направления построения перспективных образцов техники РЭБ и совершенствования работ по их созданию, которые могли бы в той или иной мере парировать (нивелировать) приведенные факторы развития техники РЭБ. Одним из таких перспективных направлений является использование при построении образцов техники РЭБ технологии программируемого радио

© Глазунов Ю.М., Божков А.Ю., Бывших Д.М., 2025

(SDR) [2]. Это доказано практикой создания различных зарубежных радиоэлектронных средств и систем. Наряду с использованием модульного принципа построения [3] образцов техники РЭБ, реализация этого направления совершенствования работ по созданию техники РЭБ, обеспечат в значительной степени достижение цели парирования (нивелирования) приведенных негативных факторов и влияние их последствий.

Основной идеей технологий программируемого радио является [4] «оцифровка эфира», а далее работа с массивом данных с использованием специализированных цифровых сигнальных процессоров (DSP), где DSP используются для проведения расчетов, реализующих необходимые алгоритмы обработки сигналов. При этом базовые параметры приемопередающих устройств образца определяются программным обеспечением, а не аппаратной конфигурацией образца. То есть все то, что «обычные» приемо-передающие устройства делают в «железе», делается на компьютере (DSP) математическими алгоритмами. Это позволяет, в частности, более рационально использовать электромагнитный спектр, повысить пропускную способность и быстродействие. Анализу возможностей когнитивного радио посвящен ряд работ [5-7], доказывающих эффективность этой технологии.

Преимущество использования технологии SDR при построении, в частности, образца техники РЭБ заключается в том, что на одном и том же «железе» можно менять (улучшать) характеристики образца, расширять его возможности. Вопросы возможности применения и преимущества когнитивных систем РЭБ рассматриваются, например, в работах[1]. Американские военные считают, что разработка полностью гибкого подхода к обнаружению и противодействию является вершиной когнитивной радиоэлектронной борьбы. Оснащение войск инструментами когнитивной РЭБ критически важно не только для оперативно-тактического звена управления, но и играет важную роль в стратегическом, что отражается, например, в реализации этих технологий в глобальном центре обработки данных РЭБ ВС США (EW processing Center).

Внедрение технологий SDR не только повышает эффективность средств РЭБ, но потенциально обеспечивает повышение модернизационной пригодности таких образцов, повышение уровня их унификации, сокращение затрат на создание и эксплуатацию образцов, а также сокращение типажа и номенклатуры составных частей для образцов техники РЭБ, входящих в систему вооружения РЭБ.

Упрощенную архитектуру образца радиоэлектронного средства (в том числе образца техники РЭБ), построенного с использованием технологии программируемого радио, можно представить в виде схемы, изображенной на рисунке 1.

Очевидно, что для конкретного перспективного образца техники РЭБ, которому предъявляются вполне конкретные требования, в общем случае не все из устройств, обеспечивающих реализацию алгоритмов обработки сигналов, возможно и целесообразно разрабатывать на основе использования технологии SDR. Действительно, так как использование технологии

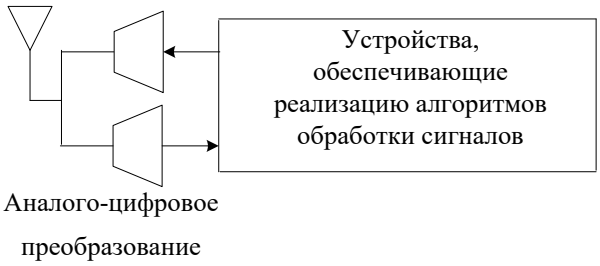

Рисунок 1 – Базовая архитектура образца, построенного с использованием технологии SDR

[1] Когнитивная радиоэлектронная борьба: к маневренной войне в электромагнитном спектре // Катехон. 2022. 19 июля. URL: https://katehon.com/ru/article/kognitivnaya-radioelektronnaya-borba-k-manevrennoy-voyne-v-elektromagnitnom-spektre; ВВС США планируют создать «когнитивную» систему радиоэлектронной борьбы // Dzen.ru: Overclockers.ru. 2024. 03 апреля. URL: https://dzen.ru/a/Zg21UjkzBi2qboko

SDR при построении образца техники РЭБ в первую очередь предусматривает применение в его составе DSP, с возложением на него тех или иных из возможного перечня функций обработки сигналов, то в зависимости от перечня этих функций и требований по уровню их выполнения это определяет научно-технологическую и техническую сложность создания соответствующего DSP, а также объемы потребных затрат на их создание. То есть одним из основных вопросов при выборе варианта построения образца техники РЭБ с использованием технологии SDR является вопрос об определении рациональной номенклатуры функций по обработке сигналов, возлагаемых на DSP в его составе. При этом с одной стороны необходимо учитывать научно-технологические и производственные возможности создания DSP в приемлемые сроки, а с другой стороны, необходимо учитывать величину взвешенного (сопоставительного) потенциального эффекта от применения образца техники РЭБ с таким DSP и затрат на создание, эксплуатацию и применение по назначению такого образца.

При разработке постановки и определении метода решения задачи выбора предпочтительного варианта образца техники РЭБ с использованием технологий SDR будем исходить из следующих основных положений, характеризующих процесс их создания, а также специфику таких процессов.

Общая последовательность разработки любого образца техники РЭБ, в том числе и образца, построенного с использованием технологии SDR, предусматривает решение следующих задач:

- определение (выявление), исходя из «потребностей практики», необходимости создания образца с определенными свойствами (назначением, решаемыми задачами и т.п.);
- определение функций, которые должны выполнять устройства создаваемого образца для обеспечения решения образцом стоящих перед ним задач и выполнения своего предназначения, а также общей «схемы функционирования (последовательности выполнения функций)» – функциональный синтез разработки вариантов функционирования образца;
- разработка вариантов «физической конструкции» образца (номенклатуры конструктивных устройств, узлов, составных частей и т.д., а также порядка их соединения и взаимодействия и т.п.), обеспечивающих выполнение всех функций, возложенных на образец;
- выбор предпочтительного (оптимального, рационального) варианта «физической конструкции» образца;
- изготовление (создание в «железе») образца предпочтительному (по оптимальному, рациональному) варианту его конструкции.

При проведении всех этих работ и при решении возникающих при этом задач необходимо учитывать ряд следующих особенностей, присущих им в ходе создания образцов техники, построенных с использованием технологии SDR.

С экономической точки зрения создание и эксплуатация образцов, построенных на базе DSP, обладает рядом преимуществ и недостатков по сравнению с аналогичными образцами, построенными по традиционной аппаратной схеме.

Во-первых, так как SDR как отдельное устройство разрабатываемого образца обеспечивает выполнение целого ряда функций, выполнение которых обеспечивалось рядом соответствующих конструктивов, в образцах с традиционным «аппаратным» построением очевидно, что вместо разработки нескольких конструктивов (узлов, блоков) в ходе разработки образца необходимо разработать лишь один конструктив (устройство) – SDR с теми же функциональными возможностями. Очевидно также, что в общем случае стоимость разработки этого устройства (SDR) будет зависеть от количества и номенклатуры выполняемых им функций. Стоимость его разработки, как правило, будет выше, чем стоимость разработки традиционных аппаратных устройств, обеспечивающих выполнение функций, возложенных на SDR.

Во-вторых, очевидно, что для обеспечения эксплуатации и обслуживания образца, построенного с использованием технологии SDR, закупать и «обслуживать» будет необходимо определенное количество одного SDR-устройства, тогда как для обеспечения эксплуатации и «обслуживания» аналогичного образца, построенного по традиционной аппаратной схеме, закупать и обслуживать необходимо определенное количество нескольких различных конструктивно-функциональных устройств этого образца.

В-третьих, при принятии решений о целесообразности создания и выборе вариантов построения образцов с использованием технологии SDR необходимо учитывать потенциальные технико-экономические выигрыши за счет возможного повышения уровня межпроектной унификации. Наличие такого факта особенно очевидно при рассмотрении, например, вопросов унификации разнопротокольных образцов радиосвязи. То есть использование в таких образцах устройств, основанных на технологии SDR и обеспечивающих работу нескольких разных однопротокольных образцов, снижает затраты на разработку таких образцов. Кроме того, за счет возрастания при этом серийности таких SDR-устройств снижается закупочная (серийная) их стоимость, что ведет к снижению стоимости эксплуатации и «обслуживания», а также к возрастанию надежности образцов в целом.

Помимо этого, стоит учитывать все потенциальные технико-экономические эффекты от возрастающего при этом уровня модернизационной пригодности таких образцов и сокращения затрат на модернизацию таких образцов техники РЭБ.

Очевидно, что при выборе предпочтительного (оптимального, рационального) варианта построения образца техники РЭБ с использованием технологии SDR необходимо оценить и сравнить, как минимум, два варианта конструкции образца техники РЭБ. Первый вариант традиционной (аппаратной) конструкции, когда возложенные на образец функции выполняются за счет определенных «аппаратных» узлов и блоков, построенных на традиционных принципах функционирования. Второй, когда выполнение части функций обеспечивается за счет применения в конструкции образца технологии SDR. То есть вариант конструкции образца техники РЭБ, когда выполнение ряда из функций образца, возложенных на него, обеспечивается за счет DSP с заложенным в него специальным программным обеспечением обработки радиосигналов, поступающих из входящих трактов образца техники РЭБ. При этом для этого варианта конструкции образца техники РЭБ считается обязательным предварительный перевод получаемых входных радиосигналов в цифровой вид (оцифровка сигналов с помощью аналого-цифрового преобразователя (АЦП)). Выполнение этого условия может быть обеспечено либо за счет применения специальных (отдельных устройств, узлов) АЦП, либо возложения выполнения этой же функции на DSP в составе конструкции образца. Очевидно, что вариантов возлагаемых на DSP функций при выборе конструкции образца техники РЭБ во втором случае, также достаточно много. Считаем, что функции, возлагаемые на образец техники РЭБ и не выполняемые DSP, выполняются за счет использования отдельных «традиционно» построенных узлов и блоков образца техники РЭБ.

С учетом всего вышеприведенного без ограничения общности рассмотрим более подробно задачу выбора предпочтительного (оптимального, рационального) варианта построения образца техники РЭБ с использованием технологии SDR на примере средства радиоэлектронной разведки (РЭР). В интересах формулировки такой задачи, исходя из основных положений SDR [2], принимаются следующие положения, связанные с построением конструкции образца РЭР.

Во-первых. Современные системы радиосвязи характеризуются большим разнообразием применяемых методов цифровой обработки радиосигналов [8]. В данной работе принимается за основу типичная цепочка (последовательность) обработки сигналов в образце РЭР [9], приведенная на рисунке 2.

Во-вторых, принимается следующий состав типичного алгоритма обработки сигналов в образце РЭР [9].

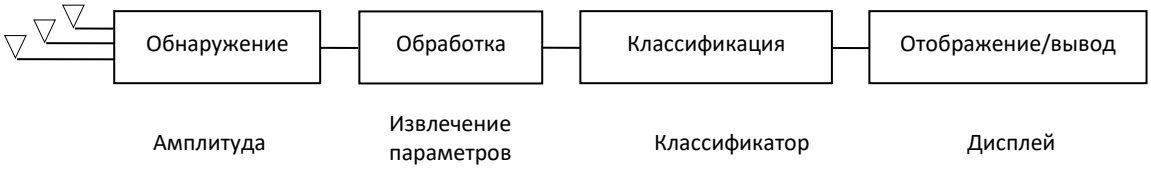

Рисунок 2 – Типичная цепочка обработки сигналов в РЭР

Обнаружение:
- амплитуды (прямое измерение, отношение сигнал/шум);
- фазы (передискретизация и субдискретизация, фазоразностный метод);
- частоты (дискретизация, Фурье, временная развертка, фазочастотные методы);
- направления (сравнение амплитуд, интерфериметричный анализ, сканирование);
- временных характеристик (относительное и абсолютное время прихода сигнала);
- диапазона частот (узкополосный, широкополосный).

Извлечение параметров:
- анализ амплитуд;
- анализ частот;
- анализ фаз;
- анализ диапазона частот;
- селекция, длина, классифицирование и повторение импульсов;
- циклостационарные методы;
- анализ характеристик сигналов;
- обнаружение импульсов с линейной и нелинейной модуляцией;
- определение паттерна смены частот;
- демодуляция;
- доплеровский анализ;
- корреляционный анализ;
- связанные паттерны;
- взаимосвязанные паттерны;
- анализ классифицирования.

Классификация:
- формирование траектории;
- идентификация источников сигналов;
- информация о типах;
- идентификация и фильтрация известных источников сигналов;
- идентификация специфических источников сигналов;
- создание цифрового отпечатка источника сигналов;
- классификация на базе знаний.

Отображение и вывод:
- отображение отслеживания;
- анализ и вывод источников сигналов и уровней угроз;
- представление типов и классификации;
- идентификация угроз;
- организация мер противодействия.

В-третьих, варианты построения образца РЭР с использованием технологии SDR отличаются друг от друга номенклатурой функций типичного алгоритма обработки сигналов, приведенного выше, решение которых возлагается на DSP.

Исходя из вышеприведенного анализа существа, особенностей и технико-экономических преимуществ построения образца техники РЭБ с использованием технологии SDR, задачу выбора предпочтительного (оптимального, рационального) варианта его построения можно сформулировать (описать) следующим образом.

Заданы назначение, задачи образца РЭР, а также функции по обработке сигналов и уровня их выполнения, обеспечивающих решение стоящих перед образцом задач. Заданы ограничения по уровням эффективности решения задач, по массогабаритным и другим эксплуатационно-техническим параметрам образца РЭР. Кроме того, заданы научно-технологические и технические возможности по созданию варианта DSP, входящего в состав образца РЭР и обеспечивающего выполнение возлагаемых на образец задач.

Необходимо выбрать такой вариант построения образца РЭР, с таким вариантом DSP, входящего в его состав, который обеспечивает максимальный технико-экономический

выигрыш от создания, эксплуатации и применения по назначению образца РЭР при заданных ограничениях.

В качестве критерия сформулированы задачи, как свидетельствует вышеприведенный анализ специфики задачи, а также обобщение опыта решения такого типа задач целесообразно взять минимум полных предстоящих затрат на создание, эксплуатацию и применение по назначению образца РЭР.

В интересах формальной (математической) записи ранее сформулированной задачи выбора рационального варианта построения образцов техники РЭБ на основе принципов программируемого радио введем следующие обозначения:

$\{\Phi_i\}$ $i = 1,2,\dots,I$ – множество функций обработки сигналов, возлагаемых на аппаратуру образца в интересах решения его задач (частично рассмотрены выше, а именно: обнаружение, извлечение параметров, классификация, отображение и вывод, более детально рассмотрены в работе [9]);

$\{\Phi_{i^p}\}$ $i^p = 1,2,\dots,I^p$ – множество функций обработки сигналов образца, которые могут быть возложены на DSP;

$\{\Phi_{i^0}\}$ $i^0 = 1,2,\dots,I^0$ – исходное множество функций обработки сигналов образца, не возлагаемых на DSP;

$\{\Phi_{i_l^0}\}$ $i_l^0 = 1,2,\dots,I_l^0$ – множество функций обработки сигналов образца из множества $\{\boldsymbol{\Phi_{i^p}}\}$, не возлагаемых на DSP и возлагаемых на l-е устройство образца $l = 1,2,\dots,L$.

При этом:

$$I^p + I^0 = I,$$
$$\sum_l I_l^0 = I^0.$$

Тогда задачу выбора предпочтительного (оптимального, рационального) варианта построения образца можно записать в виде:

Найти:

$$arg\min_{i^p, i_l^0} \rightleftarrows \{C^{\text{ОКР}}(\Phi_{i^p}) + W(\Phi_{i^p}) \cdot C^C(\Phi_{i^p}) + C^{\text{Э}}(\Phi_{i^p}) \cdot T + \\ + \sum_l^L [C^{\text{ОКР}}(\Phi_{i_l^0}) + W(\Phi_{i_l^0}) \cdot C^C(\Phi_{i_l^0}) + C^{\text{Э}}(\Phi_{i_l^0}) \cdot T]\}, \quad (1)$$

при

$$\Upsilon(\Phi_{i^p}, \Phi_{i_l^0}) \geq \Upsilon^0, \quad (2)$$

$$\mathrm{X}(\Phi_{i^p}, \Phi_{i_l^0}) \leq \mathrm{X}^0, \quad (3)$$

где $C^{\text{ОКР}}$, $C^{\text{С}}$, $C^{\text{Э}}$ – стоимость проведения ОКР, серийного производства и годовой эксплуатации устройств в том числе и DSP, соответственно;

W – величина спроса на устройства, в том числе и DSP;

T – продолжительность обслуживания устройств, в том числе и DSP в ходе эксплуатации образца в годах;

Y, Y^0 – оценка уровня технической реализуемости создания устройств, в том числе и DSP и минимальное значение этого уровня, соответственно;

X, X^0 – «критические» эксплуатационно-технические параметры устройств, в том числе и DSP образца, на которые накладываются ограничения при выполнении функций устройствами в ходе решения образцом возлагаемых на него задач, и их «пограничные» значения, соответственно.

Анализ содержания сформулированной задачи выбора оптимального (рационального) варианта построения образца с использованием технологии SDR и её формальной записи (1)-(3) показывает, что основой алгоритма решения является процедура генерации и перебора вариантов распределения функций обработки сигналов между DSP и другими устройствами образца с проведением соответствующих на каждом шаге алгоритма оценок величин, входящих в (1)-(3). Общая схема алгоритма решения задачи (1)-(3) представлена на рисунке 3.

Рисунок 3 – Общая схема решения задачи выбора предпочтительного (оптимального, рационального) варианта построения образца с использованием DSP

Отметим несколько положений, вытекающих из вышеприведенного содержания технологии SDR и выбранного подхода к решению задачи (1)-(3).

Начальным вариантом разбиения $\{\Phi_i\} \to \{\Phi_{i^p}\}, \{\Phi_{i^0}\}$; $\{\Phi_{i^0}\} \to \{\Phi_{i_l^0}\}$ предпочтительным является разбиение, когда $\{\Phi_{i^p}\} \to \{0\}$, а следующим (вторым) вариантом разбиения является вариант разбиения $\{\Phi_{i^p}\} \to \Phi_{i^p}(\text{АЦП})$, а $\{(\Phi_{i^0})$ все Φ_{i^p} кроме АЦП$\}$.

В заключение остановимся на общей характеристике новых методик, необходимых для реализации предложенного алгоритма решения задачи выбора предпочтительного (оптимального, рационального) варианта построения образцов техники РЭБ с использованием технологии SDR (рисунок 3).

В качестве основы построения методики функционально-структурного синтеза образца техники РЭБ целесообразно использовать метод эволюционного синтеза систем [10] с учетом имеющейся информации о типовых функционально-структурных схемах построения существующих образцов техники РЭБ и полученной в ходе их создания.

За основу построения методики оценки научно-технологической и технической реализуемости создания DSP целесообразно взять методы технологического прогнозирования [11] с учетом имеющейся информации о достигнутом и прогнозном уровнях по созданию DSP.

Содержание остальных методик и используемых в них методах достаточно очевидно и не требует дополнительных разъяснений.

Список источников

1. Аносов Р.С., Бывших Д.М., Глазунов Ю.М., Дмитриев А.В., Карпухин В.И. Технико-экономические и системные аспекты управления качеством системы вооружения радиоэлектронной борьбы: монография / Под ред. В.И. Карпухина. Воронеж: Кварта, 2023. 378 с.
2. Силин А. Технология Software Defined Radio. Теория, принципы и примеры аппаратных платформ // Беспроводные технологии. 2007. №2(7). С. 22-27.
3. Васильев А.Л. Модульный принцип формирования техники. М.: Изд-во стандартов, 1989. 238 с.
4. Jones E. Software Defined Radios, Cognitive Radio and the Software Communications Architecture (SCA) in relation to COMMS, radar and ESM // Cognitive Radio and Software Defined Radios: Technologies and Techniques: 2008 IET Seminar (UK, London, 2008, September 18). DOI: 10.1049/ic:20080393
5. Панов И.В., Сутько Т.А., Шувалов Р.И. Возможности когнитивного радио и когнитивных сетей пооптимизации использования радиочастотного спектра // Евразийский научный журнал. 2015. №12. С. 417-419.
6. Мирошникова Н.Е. Обзор систем когнитивного радио // T-Comm: Телекоммуникации и транспорт. 2013. Т.7. №9. С. 108-111.
7. Елисеев С.Н., Струфелев Е.Д. Применение технологии когнитивного радио в диапазоне ОВЧ ЧМ радиовещания // Информационные технологии. Радиоэлектроника. Телекоммуникации. 2015. № 5-1. С. 247-254.
8. Степанов А.В., Матвеев С.А. Методы компьютерной обработки сигналов систем радиосвязи: монография. М.: Солон-Пресс, 2010. 208 с.
9. Сорохтин Е.М., Минеев С.А. Распределенные программно-определяемые радиосистемы // Вестник Нижегородского университета им. Н.И. Лобачевского. 2010. №5-2. С. 383-388.
10. Балашов Е.П. Эволюционный синтез систем. М.: Радио и связь, 1985. 328 с.
11. Мартино Дж. Технологическое прогнозирование. М.: Прогресс, 1977. 592 с.

Информация об авторах

Ю.М. Глазунов – кандидат технических наук, старший научный сотрудник.
А.Ю. Божков – кандидат технических наук.
Д.М. Бывших – кандидат технических наук, старший научный сотрудник, SPIN код автора 1879-9333.