

# Состояние и перспективы развития интегральных схем программно-конфигурируемых радиочастотных приемопередатчиков

Е.М. Савченко<sup>1,2,3</sup>, А.С. Будяков<sup>1,4</sup>, Д.И. Гаранович<sup>1,2</sup>, К.М. Огурцова<sup>1</sup>

<sup>1</sup>АО «НПП «Пульсар»

<sup>2</sup>МИРЭА – Российский технологический университет

<sup>3</sup>АО «ГЗ «Пульсар»

<sup>4</sup>МГТУ им. Н.Э. Баумана

**Аннотация:** представлены общие сведения о программно-конфигурируемом радио. Проведён обзор состояния и перспектив развития интегральных схем программно-конфигурируемого радио за рубежом и в России. Рассмотрены серийно выпускаемые зарубежные и отечественные микросхемы, проведен их сравнительный анализ. Обозначены перспективные направления развития отечественных интегральных схем программно-конфигурируемых радиочастотных приемопередатчиков.

**Ключевые слова:** SDR, ПКР, программно-конфигурируемое радио, адаптивное радио, когнитивное радио, приёмопередатчик

## 1. Введение

Программно-конфигурируемое радио (ПКР, Software Defined Radio – SDR) это оборудование, в котором большинство функций физического уровня выполняются в программном виде, при этом аппаратные функции управляются программным путем. Такой подход обеспечивает резкое повышение функциональных возможностей аппаратуры, т.к. позволяет приёмопередатчику работать в различных сервисах и стандартах связи в широкой полосе частот [1].

Внедрение ПКР привносит новые возможности в радиоэлектронных системах связи, телеметрии, управлению необслуживаемыми системами:

- оперативное изменение текущей конфигурации радиоэлектронной системы с минимальными затратами времени и средств;
- оперативное добавление новых функций и возможностей без дорогостоящего изменения аппаратной части;
- снижение стоимости текущего обслуживания аппаратной части системы связи;
- использование универсальной аппаратной части системы связи в различных сетях и для различных применений;
- создание адаптивных систем с автоматической настройкой в зависимости от изменяющихся условий работы.

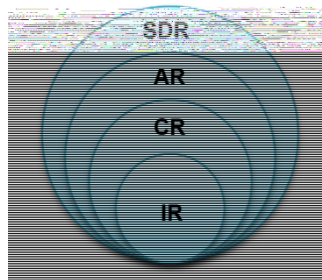


Рисунок 1. Развитие ПКР.

Технология ПКР является ключевой в предполагаемом последующем развитии радиооборудования:

- адаптивное радио (Adaptive Radio – AR), подразумевает автоматическое регулирование в цепи обратной связи, исключающее вмешательство пользователя в шаблонных ситуациях, уровень данной радиосвязи характеризуется также наличием устройств наблюдения, измерения и анализа, идентификации и управления, обеспечивающих возможность принимать решение на основании аналитических построений;

- когнитивное «умное» радио (Cognitive Radio – CR), подразумевает автоматическое изменение частоты, мощности, модуляции, стандарта связи в зависимости от текущих условий, имеет возможность совместного использования спектра различных технологий радиодоступа, другими словами, это быстрая и гибкая система, у которой существует возможность динамически обнаружить коммуникационную среду и адаптировать параметры передачи данных через радиоканал;

- интеллектуальное радио (Intelligent Radio – IR) позволит осуществить применение машинного обучения для принятия решений на основе накопленного опыта, исключит такой источник риска, как человеческий фактор, при работе радиооборудования, увеличит скорость и точность обработки данных.

## **2. История развития ПКР и состояние зарубежных разработок.**

Одним из первых лабораторных прототипов «программного радио» можно назвать прибор, появившийся в Техасском отделении E-Systems в 1984 г., который представлял собой цифровой радиоприёмник с программируемым подавлением интерференции и демодуляцией, использующий массив векторных процессоров с доступом к общей памяти [2].

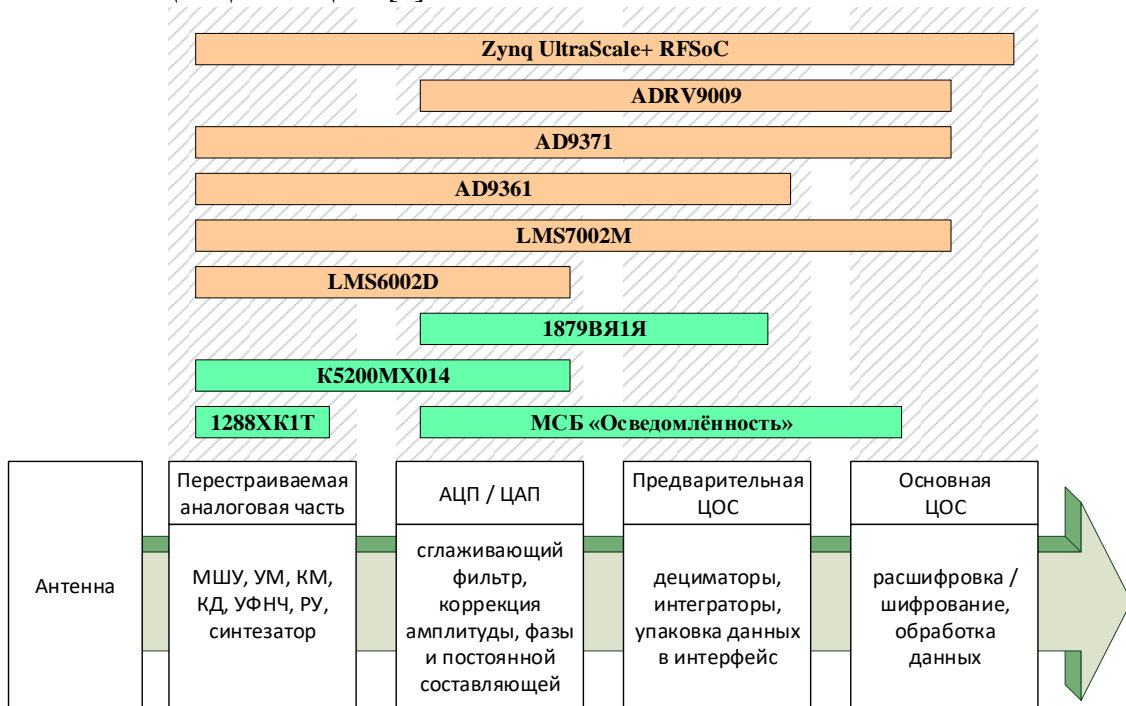
Параллельно с распространением концепции цифровой приёмопередачи происходило бурное развитие цифровых сигнальных процессоров (ЦСП, Digital Signal Processor – DSP) и в 1983 г. фирма Texas Instruments выпустила TMS32010, получив статус лидера на рынке ЦСП.

В 1991 г. Джозеф Митола изложил концепцию ПКР, в которой ввёл сам термин и определение идеального ПКР [3] – содержащего из аналоговых блоков только антенны, аналогово-цифровые и цифро-аналоговые преобразователи (АЦП и ЦАП). В этом же году начался, в последствии ставший знаковым, военный проект SpeakEasy, предполагающий использование ПКР для обеспечения поддержки 10 стандартов военной связи в одной системе с диапазоном рабочих частот 2 – 2000 МГц и возможности программного обновления системы под возникающие стандарты кодирования и модуляции.

Представленный в 1995 г. опытный образец размером с грузовик представлял собой приёмник с малошумящим усилителем (МШУ), квадратурным демодулятором (ДМ), автоматической регулировкой усиления (АРУ), АЦП и несколькими сотнями ЦСП TMS320C40, работающими на частоте 40 МГц, передатчик же состоял из ЦАП, квадратурного модулятора (КМ) и усилителя мощности (УМ). Покрытие широкого диапазона частот обеспечивалось разделением аналоговой части на поддиапазоны с сохранением конфигурации цифровой части. Эта архитектура стала стандартом широкополосных ПКР. В дальнейшем развитие ПКР направилось в сторону уменьшения размеров, стоимости, увеличения степени интеграции, принимаемой полосы частот, увеличения возможностей цифровой обработки сигналов.

Естественным развитием направления ПКР стало стремление реализовать необходимые функции в виде одного или нескольких кристаллов интегральных схем. В качестве одной из первых научных публикаций по теме можно упомянуть статью

2007 г. специалистов Motorola Labs с описанием микросхемы КМОП приёмопередатчика для ПКР с диапазоном рабочих частот 100 МГц – 2,5 ГГц и полосой пропускания до 20 МГц с использованием прямого цифрового синтеза частоты гетеродина до 1 ГГц, данная микросхема предназначена для работы с внешними АЦП/ЦАП и ЦСП [4].



**Рисунок 2.** Основные блоки ПКР и реализация этих блоков в зарубежных и отечественных интегральных схемах

В 2010 г. компания Lime Microsystems освоила серийное производство SiGe БикМОП микросхемы LMS6002D с диапазоном рабочих частот 300 МГц – 3,8 ГГц и полосой пропускания до 28 МГц, представляющую одноканальный многодиапазонный LTE приёмопередатчик (1Tx, 1Rx), включающий программно-конфигурируемую радиочастотную часть (УМ, МШУ, КМ, КД, синтезатор, перестраиваемые фильтры и схемы АРУ), а также 12-битные ЦАП/АЦП в корпусе с габаритными размерами 9x9 мм<sup>2</sup>. В 2014 г. появилась КМОП микросхема приемопередатчика LMS7002M с рабочими частотами 50 МГц – 3,8 ГГц и полосой пропускания до 108 МГц включающая функционал LMS6002D, дополненный встроенным блоком ЦСП и 8-битным микроконтроллером семейства 8051 для управления и калибровки.

В 2013 г. Analog Devices выпустила многоканальный приемопередатчик AD9361 с диапазоном рабочих частот 70 МГц – 6,0 ГГц и полосой пропускания 56 МГц (4Tx, 6Rx), с возможностью синхронизации нескольких микросхем и встроенной ЦОС, далее в 2016 г. выпустила AD9371 с диапазоном рабочих частот 300 МГц – 6,0 ГГц и полосой пропускания 100 МГц (2Tx, 2Rx), встроенным 32-х битным микроконтроллером ARM для автокалибровки, коррекции амплитудных и фазовых ошибок, постоянной составляющей и др. Далее – ADRV9009 с диапазоном рабочих частот 75 МГц – 6,0 ГГц и полосой пропускания 200 МГц (2Tx, 2Rx).

Все эти и другие интегральные ПКР с нулевой промежуточной частотой (НПЧ, Zero Intermediate Frequency – ZIF) получили широкое распространение во многих областях техники. Относительно низкая частота дискретизации таких систем и соответствующая ей узкая полоса приёма определяет их относительно низкое энергопотребление и сниженные требования к линейности и динамическому

диапазону АЦП/ЦАП. Эти же характеристики являются врождёнными недостатками ПКР с прямой оцифровкой радиочастотного сигнала (direct RF sampling). Тем не менее, ПКР с прямой оцифровкой обладают возможностью многополосного приёма или приёма с ультраширокой полосой и близки к концепции идеального ПКР.

В 2017 г. компания Xilinx начала поставки СнК приёмопередатчиков Zynq UltraScale+ RFSoc с прямой оцифровкой радиочастотного сигнала. Старший образец семейства – ZU49DR, обладает диапазоном входных частот до 6 ГГц, 16 каналами 14-битных АЦП с частотой дискретизации до 2,5 Гвыб/с, 16 каналами 14-битных ЦАП с частотой дискретизации до 10 Гвыб/с, 4-х ядерным процессором Arm Cortex A53 и 2-х ядерным процессором реального времени Arm Cortex-R5 [8], а некоторые СнК серии уже выпускаются в особо-стойком исполнении Defence-Grade по стандарту MIL-STD-810 [9].

### **3. Состояние отечественных разработок и перспективы развития**

В 2006 г. АО НПЦ «Элвис» выпустила микросхему цифровой части четырехканального ПКР-приемника 1288ХК1Т с частотой дискретизации входного сигнала до 100 МВыб/с на каждый канал, с возможностью синхронизации до восьми микросхем для построения программно-перенастраиваемых фазированных и адаптивных антенных решёток. В состав микросхемы не входят АЦП, что с одной стороны делает данный приёмник более универсальным и с другой стороны – снижает интеграцию и усложняет использование в аппаратуре. Потребляемая мощность не более 750 мВт.

В 2013 г. НТЦ «Модуль» выпустила цифровой программный приемник 1879ВЯ1Я с двумя 64-х разрядными ЦСП, 32-х битным процессором ARM1176JZF-S и системой перестраиваемых комплексных фильтров. В состав микросхемы входят четыре 12-битных АЦП с частотой дискретизации 82 МГц. Микросхема выполнена по технологии КМОП 90-нм и предназначена для использования в научном и медицинском оборудовании, аппаратуре пользователя спутниковых навигационных систем и др. Потребляемая мощность не более 2,7 Вт.

В части продукции АО «ППК Миландр» следует выделить микросборку «Осведомлённость» с двумя 14-ти битными АЦП 5101НВ015 с частотой дискретизации до 125 МГц и системой ЦОС 1967ВН044. Потребляемая мощность не более 2,0 Вт.

В 2018 г. АО «НИИМА «Прогресс» разработал аналоговую микросхему приёмопередающего тракта К5200МХ014 в диапазоне частот 0,1 – 2,5 ГГц с полосой до 2,5 МГц. Узкая ширина полосы и входящие в состав 8-битные АЦП ограничивают применение данной микросхемы в универсальном ПКР.

В АО «НПП «Пульсар» в 2017-м году разработан функционально-полный комплект кристаллов аналоговой части программно-конфигурируемых приёмника и формирователя с диапазоном частот 0,1 – 2,5 ГГц и полосой сигнала до 40 МГц с использованием ранее полученного научно-технического задела по разработке радиочастотных интегральных микросхем [10 – 16].

Несмотря на высокий уровень имеющихся разработок, на данный момент в числе отечественных серийно-выпускаемых микросхем присутствуют только отдельные составные блоки архитектуры ПКР и нет микросхем, способных в едином корпусе обеспечить приём, обработку и передачу сигнала с полосой до 40 МГц и рабочими частотами до 6 ГГц.

### **4. Заключение**

Можно выделить два основных направления развития интегральных схем ПКР:

- 1) архитектура радио с нулевой промежуточной частотой и развитой

программно-конфигурируемой аналоговой частью с сниженными требованиями к АЦП/ЦАП;

- 2) архитектура радио с прямой оцифровкой радиочастоты АЦП/ЦАП и большей частью обработки сигнала в цифровом виде.

Оба вышеуказанных направления активно развиваются. В России имеется опыт разработки отдельных блоков ПКР с нулевой промежуточной частотой. Отсутствие серийно выпускаемых АЦП/ЦАП в радиочастотном диапазоне пока не позволяет судить о перспективах освоения архитектуры ПКР с прямой оцифровкой радиочастоты.

С учетом имеющегося опыта разработки и отлаженных маршрутов проектирования можно выделить следующие направления разработки интегральных схем ПКР, развитие которых представляется целесообразным и возможным в ближайшее время в России:

- универсальные широкополосные ПКР с повышенной радиационной стойкостью и устойчивостью к сбоям от ТЗЧ для систем космического назначения;
- узкополосные ПКР с относительно низким потреблением, радиационно-стойкие для роботизированных комплексов с автономным питанием;
- узкополосные ПКР с низким энергопотреблением для мобильных наземных систем широкого применения.

Важно отметить, что в условиях активного развития радиосистем Massive MIMO для 5G необходимо закладывать возможность синхронизации большого количества интегральных схем ПКР [5]. А с учётом предполагаемых частот 6G проводить исследования по расширению рабочих частот в диапазон от 100 ГГц до 1 ТГц [6;7].

#### Список литературы

1. Галкин В. А. Основы программно-конфигурируемого радио: монография / В. А. Галкин; – М.: Изд-во Горячая линия–Телеком, 2013. – 372 с., ил. ISBN 978-5-9912-0305-0– 2013.
2. Johnson P. New research lab leads to unique radio receiver //E-Systems Team. – 1985. – Т. 5. – №. 4. – С. 6-7.
3. Mitola J. Software radios: Survey, critical evaluation and future directions //IEEE Aerospace and Electronic Systems Magazine. – 1993. – Т. 8. – №. 4. – С. 25-36.
4. Cafaro G. et al. A 100 mhz 2.5 ghz direct conversion cmos transceiver for sdr applications //2007 IEEE Radio Frequency Integrated Circuits (RFIC) Symposium. – IEEE, 2007. – С. 189-192.
5. Nishimori K. Novel technologies using massive MIMO transmission toward 5G and its beyond systems //2018 International Symposium on Antennas and Propagation (ISAP). – IEEE, 2018. – С. 1-2.
6. Katz M., Matinmikko-Blue M., Latva-Aho M. 6Genesis Flagship Program: Building the Bridges Towards 6G-Enabled Wireless Smart Society and Ecosystem //2018 IEEE 10th Latin-American Conference on Communications (LATINCOM). – IEEE, 2018. – С. 1-9.
7. Будяков А. С., Котельницкий А. В., Шишкунова Е. В. Состояние и перспективы развития КВЧ интегральных схем класса «система на кристалле» // Электронная техника. Серия 2: Полупроводниковые приборы. – 2011. – №. 2. – С. 104-113.
8. Основные характеристики приёмопередатчиков Zynq UltraScale+ RFSoc // Официальный сайт Xilinx URL: <https://www.xilinx.com/products/silicon-devices/soc/rfsoc.html#ProductTable> (дата обращения: 04.04.2019).
9. Defence-Grade Zynq UltraScale+ RFSoc // Официальный сайт Xilinx URL: <https://www.xilinx.com/products/silicon-devices/soc/xq-zynq-ultrascale-rfsoc.html#productAdvantages> (дата обращения: 04.04.2019).
10. Савченко Е.М., Будяков А.С., Першин А.Д., Дроздов Д.Г., Кузьмин А.Ю., Сиомко В.О. Новые разработки отечественных СВЧ МИС широкополосных усилителей // Твердотельная электроника. Сложные функциональные блоки РЭА: материалы научно-технической конференции. Москва, 07-09 октября 2015 г. – М.: Изд-во ОАО «НПП «Пульсар», 2015. – С. 183-187.

11. Будяков А.С., Савченко Е.М. Анализ основных направлений построения интегральных СВЧ усилителей мощности L- и S- диапазонов частот с выходной мощностью до 2,5 Вт на основе кремниевых транзисторов // Твердотельная электроника. Сложные функциональные блоки РЭА: материалы научно-технической конференции. Москва, 07-08 октября 2008 г. – М.: Изд-во Московское научно-техническое общество радиотехники, электроники и связи имени А.С. Попова, 2008. – С. 103-105.
12. Патент № 2310268 Российская Федерация, МПК Н 03 F 3 45. Каскодный дифференциальный усилитель с низковольтным питанием: № 2006111143/09: заявл. 05.04.2006: опубл. 10.11.2007 / Прокопенко Н.Н., Будяков А.С., Савченко Е.М.; заявитель ГОУ ВПО «Южно-Российский государственный университет экономики и сервиса» (ЮРГУЭС). – Текст: непосредственный.
13. Савченко Е.М., Будяков А.С., Мартынов А.А., Вагин А.В., Гладких М.В., Гаранович Д.И. Кремниевые монолитные интегральные схемы СВЧ квадратурных модуляторов L и S диапазонов частот // Твердотельная электроника. Сложные функциональные блоки РЭА: материалы научно-технической конференции. Москва, 07-09 октября 2015 г. – М.: Изд-во ОАО «НПП «Пульсар», 2015. – С. 177-179.
14. Будяков А.С., Вагин А.В., Васильев А.Г., Мельничук С.А., Савченко Е.М. Кремниевые СВЧ смесители на основе диодов Шоттки в монолитном и гибридном исполнении // Электронная техника. Серия 2: Полупроводниковые приборы. – 2010. – № 2 (225). – С. 28-33.
15. Савченко Е.М., Будяков А.С., Вагин А.В. Анализ основных направлений построения кремниевых интегральных СВЧ преобразователей частоты в монолитном исполнении // Материалы XVI координационного научно-технического семинара по СВЧ технике. п. Хахалы Нижегородская область, 08-10 сентября 2009 г. – М.: Изд-во ФГУП "НПП "Салют", 2009. – С. 94-96.
16. Будяков А.С., Савченко Е.М. Особенности разработки ИМС широкополосных делителей частоты // Электроника, микро- и нанoeлектроника Сборник научных трудов 11-ой Российской научно-технической конференции. Редактор: Стенин В.Я. Нижний Новгород, 29 июня-04 июля 2009 г. – М.: Изд-во Национальный исследовательский ядерный университет "МИФИ", 2009.