

РАЗВИТИЕ СХЕМОТЕХНИКИ ЦАР: некоторые итоги

Часть 1

В.Слюсар, д.т.н. / swadim@inbox.ru

УДК 621.396.9, DOI: 10.22184/2070-8963.2018.70.1.72.77

Технология цифровых антенных решеток (ЦАР) стала одной из основных при создании телекоммуникационных систем Massive MIMO, на которые, в свою очередь, опираются будущие сети 5G. Свой вклад в разработку этой технологии внесли советские ученые и разработчики оборудования.

ЭКСКУРС В ИСТОРИЮ МНОГОКАНАЛЬНОГО АНАЛИЗА

Зарождалась технология ЦАР как средство решения радиолокационных задач. В 2017 году исполнилось 55 лет с момента официального начала развития теории цифровых антенных решеток в СССР. Межведомственное научно-техническое совещание, проведенное в 1977 году Научным советом АН СССР по проблеме "Статистическая радиофизика" и Филиалом противовоздушной обороны (ПВО) Сухопутных войск Военной артиллерийской академии им. М.И.Калинина (г. Киев), придало официальный статус термину "цифровая антенная решетка" и констатировало приоритет в разработке и практической реализации соответствующей теории киевской научной школы В.А.Варюхина, датировав начало исследований, выполнявшихся под его руководством, 1962-м годом [1]. Именно тогда было сделано основополагающее изобретение В.А.Варюхина и М.А.Заблоцкого, предлагающее новый способ измерения направлений на источники электромагнитного поля в антенной решетке, позволяющий осуществить их сверхрелеевское разрешение по угловой координате [2]. Данный способ основывался на обработке информации, содержащейся в распределении комплексных амплитуд напряжений на выходах амплитудных, фазовых и фазово-амплитудных многоканальных анализаторов, и позволял определять угловые координаты источников, находящихся в пределах ширины главного лепестка приемной антенной системы.

Изобретение стало подтверждением того факта, что теория цифровых антенных решеток, по сути, прошла свое становление как теория многоканального анализа (Multichannel Estimation) [3]. Ее математические истоки берут начало с развития методов гармонического анализа в 18-м веке. В частности, одним из прообразов нынешних методов разрешения сигналов можно считать метод Прони (Gaspard Riche de Prony), который в 1795 году свел задачу декомпозиции M комплексных экспонент к решению алгебраического уравнения степени M [4, 5].

Прикладные аспекты теории многоканального анализа были развиты в 1920-е годы в виде методов определения направлений прихода радиосигналов совокупностью двух антенн по разности фаз или амплитуд их выходных напряжений. При этом оценка направлений прихода одиночного сигнала осуществлялась по показаниям стрелочных индикаторов либо по форме фигур Лиссажу, рисуемых лучом на экране осциллографа. Примером такого рода является публикация [6]. Патентный поиск в открытых базах данных позволяет выявить несколько десятков патентов, использовавших аналогичные технические решения для радаров, радиопеленгаторов, средств навигации. Речь идет, например, о так называемых phase-comparison direction finder (патент США №2423437) или amplitude-comparison direction finder (патент США № 2419946).

В конце 1940-х годов данный подход привел к появлению теории трехканальных антенных анализаторов,

обеспечивавших решение задачи разделения сигналов воздушной цели и отраженного от подстилающей поверхности "антипода" путем решения системы уравнений, сформированных по комплексным напряжениям трехканальной сигнальной смеси [7]. В указанной ссылке, согласно использованной в книге В.А.Варюхина классификации [3], имел место фазовый многоканальный анализатор, обеспечивавший разрешение сигналов двух источников по углу места. Результаты экспериментальных измерений с помощью аналогичного трехантенного устройства были опубликованы Фредериком Бруксом в 1951 году [8].

К концу 1950-х годов растущая сложность решения подобного рода радиолокационных задач и необходимость эффективной обработки сигналов создают предпосылки для применения в этой сфере электронной вычислительной техники. Например, в 1957 году была опубликована знаковая в этом смысле статья Бена С.Мелтонта и Лесли Ф.Бейли [9], в которой были предложены варианты реализации алгебраических операций по обработке сигналов с помощью электронных схем, являющихся их аналогами, с целью создания машинного коррелятора (a machine correlator) или машинного вычислителя обработки сигналов на основе некоей аналоговой вычислительной машины. По сути, тем самым был создан прецедент симбиоза приемной системы и спецвычислителя для оценивания параметров сигналов.

Приход на смену аналоговым вычислительным средствам цифровой техники буквально через три года, в 1960 году, воплотился в идею использования быстродействующего компьютера для решения пеленгационной задачи. Первоначально – в отношении определения местоположения эпицентра землетрясения. К числу тех, кто первым реализовал эту идею на практике, следует отнести Б.А.Болта [10], который написал программу для IBM 704 по сейсмопеленгации на основе метода наименьших квадратов. Практически синхронно с ним аналогичный подход использовал сотрудник Австралийского национального университета Флинн [11].

Несмотря на то что в указанных экспериментах интерфейс между датчиками и компьютером был реализован с помощью карт ввода данных, такое решение стало решающим шагом на пути появления ЦАР. Далее оставалось лишь решить проблему непосредственной подачи в компьютер цифровых данных, полученных от сенсорных элементов, исключив лишние звенья – этап подготовки перфорационных карт и участие оператора. При этом решение задачи совершенствования обработки информации от решетки сенсорных датчиков могло быть сведено к разработке программного обеспечения интегрированного

с ними компьютера. С этого момента аналогичные решения могли тиражироваться в любых радиотехнических приложениях.

В СССР, по-видимому, первым обратил внимание на потенциальные возможности многоканальных анализаторов Б.И.Поликарпов [12]. Он рассмотрел анализаторы фазового типа с равными или кратными расстояниями между фазовыми центрами приемных каналов, на выходах которых напряжения подвергаются корреляционной обработке, и с помощью вычислительных машин определяются угловые координаты источников сигналов. Б.И.Поликарпов указал на принципиальную возможность разрешения источников сигналов с угловым расстоянием, меньшим ширины главного лепестка диаграммы направленности антенной системы [12].

Однако конкретное решение задачи сверхрешеевского разрешения источников излучения было предложено лишь в 1962 году В.А.Варюхиным и М.А.Заблоцким [2]. В дальнейшем В.А.Варюхиным была разработана общая теория многоканальных анализаторов, основанная на обработке информации, содержащейся в распределении комплексных амплитуд напряжений на выходах антенной решетки. Эта теория рассматривает способы определения угловых координат источников в зависимости от угловых расстояний между ними, фазовых и энергетических соотношений между сигналами, а также функциональные схемы устройств, реализующих теоретические выводы. Определение параметров источников производится непосредственным решением систем трансцендентных уравнений высокого порядка, описывающих функцию отклика многоканального анализатора. Трудности, возникающие при решении трансцендентных систем уравнений высокого порядка были преодолены В.А.Варюхиным путем "сепарации" неизвестных, при которой определение угловых координат сводится к решению двух или даже одного уравнения, а определение комплексных амплитуд – к решению линейных систем уравнений порядка N [13].

Важной вехой в признании научных результатов В.А.Варюхина стала защита в 1967 году его диссертации на соискание ученой степени доктора технических наук. Отличительная особенность разработанных им теоретических основ – максимальная автоматизация процесса оценивания координат и параметров сигналов. За рубежом в это время зарождался подход, базирующийся на формировании функции отклика сейсмического многоканального анализатора и оценке его разрешающей способности на основе визуальных впечатлений. Речь идет о методе Кейпона и разработанных в дальнейшем методах MUSIC, ESPRIT и других проекционных

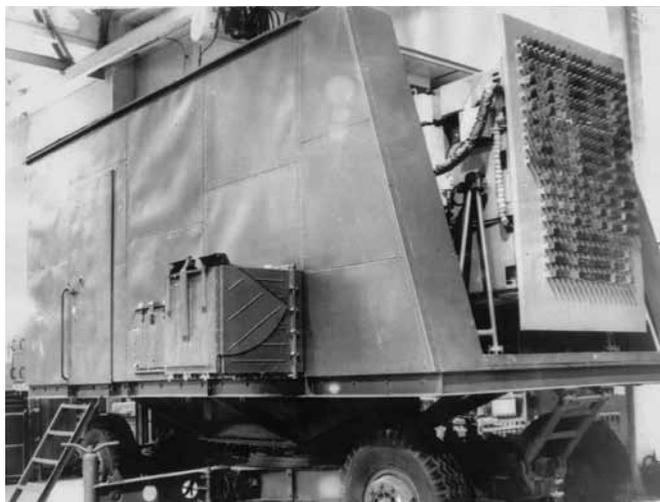


Рис.1. Опытный образец 64-канальной ЦАР

методах спектрального оценивания. Оригинальность основных теоретических достижений научной школы В.А.Варюхина, полученных им и его учениками (прежде всего, в Военной академии ПВО Сухопутных войск имени А.М.Василевского [1, 8]) на фоне разработанных за рубежом теоретических методов спектрального оценивания, сохраняется и ныне благодаря максимальному учету специфических особенностей аналитического описания функции отклика многоканального анализатора, в том числе сформированной на основе операции быстрого преобразования Фурье. Речь идет о сведении задачи свертываемого разрешения сигналов по выходам вторичных приемных каналов к решению алгебраического уравнения степени M (где M – количество источников), возможности несмещенного оценивания параметров сигналов, определению неизвестного количества их источников и др. Этим научным коллективом был разработан и всесторонне апробирован ряд макетов РЛС с ЦАР, при участии его представителей проведены успешные полигонные испытания опытного образца уникальной 64-канальной РЛС с ЦАР (рис.1).

Конечно, делать заключение о приоритете и важности тех или иных альтернативных научных подходов в процессе формирования общей теории ЦАР – дело неблагодарное, учитывая закрытый характер большинства работ и отсутствие возможности подробного ознакомления с научным наследием того времени, даже с учетом Интернета. Изложенный здесь исторический экскурс лишь приподнимает завесу времени над истинным развитием научного поиска и имеет целью указать на историческом фоне общую нишу и временные рамки зарождения теории многоканального анализа. Детальное изложение исторических

этапов развития теории ЦАР заслуживает отдельного рассмотрения.

ЧЕТЫРЕ ЭТАПА РАЗВИТИЯ СХЕМОТЕХНИКИ

Говорить о развитии схемотехники ЦАР имеет смысл, привязав начало его рассмотрения к моменту появления первых экспериментальных образцов. При этом оставим за рамками анализа слишком уж архаичные с позиций сегодняшнего дня схемотехнические подходы 1970-х и первой половины 1980-х годов, связанные с использованием дискретной транзисторной элементной базы и первых опытных образцов интегральных схем АЦП.

В историческом аспекте существенное влияние на развитие элементной базы ЦАР оказал переход от одноканальных к многоканальным микросхемам, появление новых стандартов на интерфейсные шины и модули встраиваемых компьютерных систем, отставание в совершенствовании процессоров цифровой обработки сигналов (DSP) от микропроцессоров универсального назначения, прогресс в разработке программируемых логических интегральных схем (ПЛИС) типа FPGA. Соответственно, в развитии схемотехнической базы в отношении приемных ЦАР можно условно выделить четыре этапа, рассматривая предшествующий временной период как их предысторию.

Первый этап связан с использованием одноканальных микросхем АЦП и с реализацией цифровой обработки сигналов в приемных каналах на основе отдельно взятых микросхем сумматоров, регистров и умножителей. Характерным примером такого подхода является экспериментальный образец 8-канальной ЦАР, созданный в проблемной научно-исследовательской лаборатории Военной академии противовоздушной обороны Сухопутных войск имени Маршала Советского Союза А.М.Василевского в 1989–1992 годах. Помимо устройств первичной цифровой обработки, осуществлявших формирование квадратурных составляющих сигналов и децимацию их отсчетов с когерентным накоплением во времени и сопутствующей цифровой фильтрацией, на дискретных микросхемах оперативных запоминающих устройств (ОЗУ) выполнялась буферизация потока отсчетов перед их записью в память ЭВМ.

Второй этап обусловлен появлением на массовом рынке первых промышленных компьютеров и интерфейсных кросс-плат различных версий стандартов ISA и PCI, когда стало возможным применять для каждого приемного канала свой модуль DSP, в том числе – конструктивно разграничив цифровой и аналоговый сегменты ЦАР [14, 16, 17]. Однако необходимость жесткой синхронизации первичной цифровой обработки сигналов во всех приемных каналах ЦАР вынудила

в дальнейшем отказаться от модулей DSP, заменив их на специально разработанные модули с ПЛИС типа FPGA. Примером такого рода является цифровой сегмент опытного образца модернизированной РЛС П-18 (2001 г.), представленный на рис.2.

Третий этап в развитии элементной базы связан с переходом к использованию стандартов VME и CompactPCI [16, 17], а также применению 4- и 8-канальных микросхем АЦП в многоканальных модулях цифровой обработки сигналов [18]. Временные рамки начала этого этапа в США и странах бывшего СССР различаются примерно на пять-семь лет. Основными принципами данного периода стала максимальная интеграция цифровой обработки с установкой на одной плате формата 6U до 32 и более каналов аналого-цифрового преобразования сигналов с использованием соответствующей эшелонированной обработки их выходных отсчетов сначала в нескольких, а затем и в одной FPGA. В это же время осуществился переход к интегрированным модулям аналоговой обработки сигналов. В тех случаях, когда было уместно, для такой интеграции использовались многоканальные микросхемы аналоговых усилителей; в других вариантах интеграция выполнялась путем конструктивного объединения нескольких приемных модулей (до четырех-восьми) в один блок с общей разводкой питания, контрольных сигналов, сигналов гетеродина и многоканальным разъемом для связи с цифровым блоком [19].

В рамках этого этапа в России выпускается ряд интегральных микросхем для построения ЦАР. В частности, это цифровой четырехканальный приемник 1288XK1T, позволяющий осуществлять селекцию и цифровую предобработку сигналов по выходам АЦП [20]. Немного ранее, в августе 2004 года, компания Texas Instruments выпустила микросхему VCA8617, содержащую восемь аналоговых усилителей с полкой пропускания до 100 МГц каждый.

Вместе с тем, главным недостатком схемотехники третьего этапа стала недостаточная пропускная способность интерфейсов VME и CompactPCI, ограничивавшая канальность ЦАР и темп обновления информации по ее выходам. Для решения этой проблемы разработчики вынуждены были пойти путем создания специальных кросс-плат, обеспечивавших межмодульную передачу данных на промежуточных этапах обработки. Например, между цифровыми приемными и объединительными модулями, где завершалось цифровое диаграммообразование [21, 22]. Это позволило нарастить канальность цифровых модулей обработки в платах формата 6U с шестнадцати 12-разрядных АЦП до 32 и даже 48 на одной плате [23]. Последнее удалось реализовать в 2006 году группе



Рис.2. Цифровой сегмент 8-канальной ЦАР на основе интерфейса PCI

разработчиков во главе с Cheng-Yi Chi при создании быстродействующей цифровой аппаратуры регистрации данных детектора для подавления адронов (Hadron Blind Detector) в рамках эксперимента PHENIX на Релятивистском коллайдере тяжелых ионов (RHIC, Брукхэйвенская национальная лаборатория (BNL), США) [23]. Хотя область применения указанных 48-канальных модулей существенно отличалась от тематики ЦАР, универсальность подходов позволяет ставить их в один ряд с сугубо радиолокационными решениями. Существенно, что на первоначальном этапе разработок Cheng-Yi Chi намеревался разместить на борту платы 6U 64 канала АЦП, однако в дальнейшем отказался от такого решения в пользу менее экзотичного 48-канального варианта. Одной из причин тому стал чрезмерно большой поток данных, который при 48 каналах АЦП вышел на пределы возможностей образцов ПЛИС, доступных к моменту начала разработки. Автору не известны примеры реализации такой плотности АЦП (ЦАП) на борту цифровых плат. Сегодня, как и 10 лет назад, 64 канала остаются пределом возможного для многоканальной топологии АЦП (ЦАП) в составе плат формата 6U.

В сфере телекоммуникаций лучшим техническим решением 2006 года стало программно-реконфигурируемое оборудование для систем MIMO-OFDM 4×4, описанное в [24]. Хотя соответствующие приемные цифровые модули обработки и содержали лишь восемь каналов АЦП, что не является уникальным решением на фоне указанных ранее достижений, передающие цифровые модули стали первыми в своем роде благодаря интеграции на их борту восьми каналов

ЦАП. В то же время серьезным недостатком схемотехники [24] стало чрезмерное количество FPGA в составе платы, что сопровождалось излишним тепловыделением. На этом фоне решения, представленные в [21, 22, 23] и содержащие всего одну ПЛИС, несомненно, являются более продвинутыми.

Нынешний, **четвертый этап**, характеризуется переориентацией на использование компьютерных модулей и интерфейсов стандартов PCI Express. При этом могут применяться встраиваемые компьютерные модули стандартов AdvancedTCA, MicroTCA с мезонинами AMC, CompactPCI Serial, CompactPCI PlusIO, PXI Express, OpenVPX с мезонинами FMC и др.

В отличие от ЦАП, существенные изменения произошли в канальности микросхем АЦП. К примеру, сразу две фирмы, Analog Devices, Inc. (ADI) и Texas Instruments (TI), предлагают на рынке 16-канальные 14-разрядные АЦП с частотой дискретизации 65 МГц. При этом 16-канальные чипы АЦП от ADI AD9249 характеризуются чрезвычайно малой рассеиваемой мощностью в пересчете на один канал, составляющей всего 58 мВт для частоты дискретизации 65 МГц. Таков результат успешного перевода производственного процесса компании на технологические нормы 28 нм. Уникальность же подхода TI состоит в интеграции в рамках одной микросхемы не только 16 каналов АЦП указанной разрядности, но и аналоговых приемников с программируемым коэффициентом усиления, позволяющих подключать микросхемы непосредственно к ультразвуковым датчикам. Таковыми являются чипы семейства AFE (AFE 5816, 5818, 5828). Поскольку полоса частот входных сигналов для этого семейства составляет 150–200 МГц, соответствующие микросхемы вполне можно использовать для оцифровки сигналов на промежуточной частоте и в системах Massive MIMO. Первой в мировой отрасли компания TI предложила также 16-канальную микросхему АЦП ADS52J90, которая может обеспечивать аналого-цифровое преобразование по 32 аналоговым каналам одновременно с частотой дискретизации 40 МГц для 12-битного режима и 32,5 МГц – для 14-разрядного. Тем самым задан серьезный тренд в развитии АЦП на многие годы. В малоканальных решениях (до четырех) совершенствование АЦП осуществляется по линии повышения разрядности до 16 (например, 4-канальная микросхема 16-битных АЦП ADS5263 с частотой дискретизации 100 МГц от TI), увеличения частоты дискретизации (4-канальные 14-битные АЦП AD9694 и ADS54J54 с частотой преобразования до 500 МГц) и улучшения других характеристик. В целом, на мировом рынке эти компании существенно потеснили менее успешные фирмы и в силу уникальности своей продукции занимают

главенствующие позиции в данной сфере. Поэтому создание систем Massive MIMO будет идти преимущественно на АЦП их производства. В пользу этого вывода свидетельствует и поглощение в марте 2017 года компанией Analog Devices известного производителя АЦП Linear Technology Corporation, известной 8-канальными АЦП LTM9011-14 разрядности 14 бит и частотой дискретизации 125 МГц.

В развитии микросхем ЦАП с точки зрения канальности радикальных изменений не произошло, их прогресс пока ограничился на 4-канальном уровне, тогда как основной акцент сделан на повышении быстродействия 14- и 16-разрядных решений. В частности, компания Texas Instruments предлагает 16-битные ЦАП DAC39J84, обеспечивающие 4-канальное преобразование с частотой тактирования 2,8 ГГц, и 14-разрядные чипы DAC38RF8x, в которых 2-канальное функционирование осуществляется с частотой преобразования 9 ГГц. В то же время, 2-канальные 16-битные ЦАП Analog Devices AD9172 имеют более продвинутые характеристики, позволяя в режиме интерполяции обновлять цифровые данные в каждом канале с частотой 12,6 ГГц. Данные показатели дают возможность осуществлять синтез аналоговых сигналов непосредственно на несущей для диапазона частот систем сотовой связи 4G, однако в отношении миллиметрового диапазона 5G по-прежнему вынуждают использовать промежуточное преобразование частоты.

В то же время, благодаря появлению новых микросхем АЦП и ЦАП, усиливается тенденция к интеграции цифровой и аналоговой обработок с возвращением на повестку дня идей, характерных для первого из указанных этапов в развитии элементной базы ЦАП. Речь идет о встраивании микросхем АЦП и FPGA в блоки многоканальных приемников сигналов, выполненных на основе технологии LTCC и ее аналогов.

Отмеченные схемотехнические технологии всех четырех этапов нередко сосуществуют на рынке и продолжают совершенствоваться коллективами разработчиков, успешно их освоившими и масштабирующими на новую элементную базу сообразно имеющимся финансовым ресурсам и конкретно решаемым задачам. Примеры этих реализаций рассмотрим в следующей части статьи.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Миночкин А.И., Рудаков В.И., Слюсар В.И.** Основы военно-технических исследований. Теория и приложения. Том 2. Синтез средств информационного обеспечения вооружения и военной техники / Под ред. А.П.Ковтуненко. – Киев: Гранма, 2012. С. 7–98, 354–521.

2. А.С. СССР № 25752. Способ измерения направлений на источники электромагнитного поля. В.А.Варюхин, М.А.Заблоцкий. 1962.
3. **Варюхин В.А.** Основы теории многоканального анализа – Киев: Наук. Думка, 2015. 168 с.
4. **Prony G.R.B.** "Essai experimental et analytique...", //J. l'Ecole Polytech (Paris). 1975. Vol. 1. P. 24-76.
5. **Hauer J.F., Demeure C.J., Scharf, L.L.** Initial results in Prony analysis of power system response signals. IEEE Transactions on Power Systems. 1990. Vol. 5. P. 80-89. DOI:10.1109/59.49090.
6. **Friis Н.Т.** Oscillographic Observations on the Direction of Propagation and Fading of Short Waves. Proceedings of the Institute of Radio Engineers. May 1928. Vol. 16, Issue 5. P. 658-665.
7. **Hamlin E.W., Seay P.A., Gordon W.E.** A New Solution to the Problem of Vertical Angle-of-Arrival of Radio Waves // Journal of Applied Physics. 1949. Vol. 20. P. 248-251.
8. **Frederick E. Brooks.** A Receiver for Measuring Angle-of-Arrival in a Complex Wave // Proceedings of the I.R.E. April. 1951. P. 407-411.
9. **Ben S. Melton and Leslie F. Bailey.** Multiple Signal Correlators // Geophysics. July, 1957. Vol. XXII, № 3. P. 565-588.
10. **Bolt В.А.** The Revision of Earthquake Epicentres, Focal Depths and Origin-Times using a High-speed Computer // Geophysical Journal. 1960. Vol. 3. Issue 4. P. 433-440.
11. **Flinn E.A.** Local earthquake location with an electronic computer // Bulletin of the Seismological Society of America. July 1960. Vol. 50. № 3. P. 467-470.
12. **Поликарпов Б.И.** О некоторых возможностях применения независимых каналов приема сигналов и использования электронно-вычислительной техники для повышения помехоустойчивости и разрешающей способности радиолокационных измерений // В сб. "Экспресс-информация", БНТ. 1961. № 23.0.
13. **Варюхин В.А., Касьянюк С.А.** Об одном методе решения нелинейных систем специального вида // Журнал вычислительной математики и математической физики, Издание АН СССР. 1966. № 2.
14. **Слюсар В.И.** Цифровые антенные решетки: аспекты развития // Специальная техника и вооружение. 2002. № 1, 2. С. 17-23.
15. **Слюсар В.И.** Цифровые антенные решетки: будущее радиолокации // ЭЛЕКТРОНИКА: Наука, Технология, Бизнес. 2001. № 3. С. 42-46.
16. **Слюсар В.И.** Схемотехника цифрового диаграммообразования. Модульные решения // ЭЛЕКТРОНИКА: Наука, Технология, Бизнес. 2002. № 1. С. 46-52.
17. **Слюсар В.И.** Модульные решения в схемотехнике цифрового диаграммообразования // Известия вузов. Сер. Радиоэлектроника. 2003. Т. 46. № 12. С. 48-62.
18. **Слюсар В.И.** Схемотехника цифровых антенных решеток. Грани возможного // ЭЛЕКТРОНИКА: Наука, Технология, Бизнес. 2004. № 8. С. 34-40.
19. Патент України на корисну модель № 39243. МПК (2006) G01S 13/00, G01S 7/00, H02K 15/00. Багатоканальний приймальний пристрій // **Слюсар В.І., Волощук І.В., Алесін А.М., Гриценко В.М., Бондаренко М.В., Малащук В.П., Шацман Л.Г., Нікітін М.М.** Заявка на выдачу патенту України на корисну модель № u200813442 від 21.11.2008. Патент опубліковано 10.02.2009, бюл. № 3.
20. **Шахнович И.** Российский цифровой приемник 1288ХК1Г – первый представитель серии Мультифлекс // ЭЛЕКТРОНИКА: Наука, Технология, Бизнес. 2006. № 2. С. 24-31.
21. Патент України на корисну модель № 47675. МПК (2009) МПК 7 G 01 S 13/08-13/44, G 01 S 7/02-7/46, H 02 K 15/00-15/16. Система обробки сигналів приймальної цифрової антенної решітки // **Слюсар В.І., Волощук І.В., Гриценко В.М., Бондаренко М.В., Малащук В.П., Шацман Л.Г., Нікітін М.М.** Заявка на выдачу патенту України на корисну модель № u200903986 від 22.04.2009. Патент опубліковано 25.02.2010, бюл. № 4.
22. Патент України на корисну модель № 115692. МПК (2017.01) G 01 S 13/08, 13/44, G 01 S 7/02, H 02 K 15/00, 15/16. Система обробки сигналів приймальної цифрової антенної решітки / **Волощук І.В., Шацман Л.Г., Слюсар В.І., Нікітін М.М., Солощев О.М., Корольов М.О., Шраєв Д.В.** Заявка на выдачу патенту України на корисну модель № u201611076 від 04.11.2016. Патент опубліковано 25.04.2017, бюл. № 8.
23. **Chi C., Anderson W., Azmoun B., Citron Z., Dubey A., Durham M., Fraenkel Z., Harder J., Hemmick T., Kamin J., Kozlov A., Milov A., Naglis M., O'Connor P., Pisani R.P., Radeka V., Ravinovitch I., Sakaguchi T., Sharma D., Sickles A., Sippach F.W., Stoll S., Tserruya I., Woody C., Yu B.** A Faster Digitizer System for the Hadron Blind Detector in PHENIX // IEEE Nuclear Science Symposium Conference Record. 2007. P. 1997-2000.
24. **Mizutani Kei, Sakaguchi Kei, Takada Jun-ichi, Araki Kiyomichi.** Development of MIMO-SDR Platform and Its Application to Real-Time Channel Measurements // EIC Trans. Commun. Vol. E89-B. December 2006. № 12.