

УДК: 616-071

Новые подходы к акустическому анализу состояния организма человека

D. Tikhonenko, O. Tikhonenko, P. Cherkashin, G. Shipitsina,
I. Shushkevitch, A. Shcherbakov

New Approaches to Acoustic Analysis of the State of the Human Body

Abstract. The article is devoted to the formulation and discussion of a new approach to the study of the acoustic picture of the human body using a regular structure of microphones, which are analogous to a phased receiving antenna array, and further processing of information using mathematical methods of digital medicine. Particular attention is paid to passive methods of obtaining information about internal processes in the human body associated with the emission of acoustic vibrations from internal organs (heart, lungs).

Keywords: acoustics, stethoscope, auscultation, ultrasound scan, digital antenna array (DAA), phased acoustic antenna array (PhAAA).

Д.О. Тихоненко¹

О.О. Тихоненко²

П.А. Черкашин³

Г.Н. Шипицина⁴

И.Ю. Шушкевич⁵

А.Ю. Щербakov⁶

¹Руководитель проекта BodyVo,
E-mail: t.daniil@bodyvo.com.

²Кандидат философских наук, председатель
совета директоров ООО «ПрогноТех».
E-mail: f2r@bk.ru, t.oleg@bodyvo.com.

³Научный сотрудник Ассоциации РКЦФА.
E-mail: pcherkashin@gmail.com

⁴Главный специалист ЦРКЦФА, ВИНТИ РАН,
Центр развития криптовалют
и цифровых финансовых активов (ЦРКЦФА).

E-mail: info@c3da.org

⁵Главный специалист ЦРКЦФА, ВИНТИ РАН,
Центр развития криптовалют
и цифровых финансовых активов (ЦРКЦФА).

E-mail: info@c3da.org.

⁶Доктор технических наук, профессор, главный научный сотрудник РАН (ИТМиВТ им.С.А.Лебедева),
начальник ЦРКЦФА, ВИНТИ РАН, Центр развития криптовалют
и цифровых финансовых активов (ЦРКЦФА).

E-mail: x509@ras.ru

Аннотация. Статья посвящена формулированию и обсуждению нового подхода к изучению акустической картины организма человека при помощи регулярной структуры микрофонов, представляющих собой аналог фазированной приемной антенной решетки, и дальнейшей обработки информации при помощи математических методов цифровой медицины. Особое внимание уделяется пассивным методам получения информации о внутренних процессах в организме человека, связанных с излучением акустических колебаний от внутренних органов (сердца, легких).

Ключевые слова: акустика, стетоскоп, аускультация, ультразвуковое исследование (УЗИ), цифровая антенная решетка (ЦАР), фазированная акустическая антенная решетка (ФААР).

ВВЕДЕНИЕ

Как неоднократно отмечалось [1], реализация цифровых технологий в медицине в первую очередь связана с «оцифровкой» данных и накоплением больших данных. Это отражает вполне объяснимый тренд медицинской цифровизации, связанный прежде всего с количественными изменениями, а не с появлением нового подхода к диагностике различных состояний. Кроме того, необходимо отметить, что акустический анализ медицинских состояний,

как правило, выполняется профессиональными врачами, для ультразвука – узкими специалистами, в то время как проведение аускультации с использованием стетоскопа доступно широкому кругу медицинских работников.

В силу своей универсальности акустический анализ – весьма эффективный метод как врача общей практики, так и узкого специалиста. Выделим два направления акустического анализа: активное исследование (ультразвуковая диагностика, локация) и пассивное прослушивание (аускультация). В дальнейшем мы остановимся на пассивных методах анализа,

поскольку воздействие их на организм минимально. Необходимо отметить, что на применение новых методов анализа звуковых сигналов оказывают влияние такие факторы, как консервативность методов ультразвукового обследования и аускультации, отсутствие моделей и практики приема и анализа звуков, требующих высокой вычислительной мощности. Рассмотрим естественные результаты развития акустических технологий – УЗИ-сканеры и цифровые стетоскопы.

УЛЬТРАЗВУКОВЫЕ СКАНЕРЫ

Одним из лидеров в сфере ультразвуковой диагностики является компания Signostics, которая в 2009 году разработала свой первый ручной УЗИ-сканер. Устройство **Signos RT**, отличающееся неплохим качеством изображения при размере экрана 2,7 дюймов, компания определяет как самое маленькое и удобное ручное ультразвуковое устройство в мире, предназначенное для использования в акушерских исследованиях, сканирования органов брюшной полости и сердца, отдельных периферических сосудов, определения пневмоторакса и плеврального выпота (рис. 1).



Рис. 1. Устройство ультразвуковой диагностики Signos RT

Вариант миниатюрного УЗИ-сканера **Sonimage P3** представила компания Konica Minolta Medical Imaging в 2013 году. Данное устройство, аналогичное описанному выше Signos RT, производится по лицензионному соглашению.

ЦИФРОВЫЕ СТЕТОСКОПЫ

Прогресс наблюдается и в консервативной области электронных стетоскопов. На сегодняшний день с помощью новейших устройств возможно обнаружение подозрительных характеристик работы сердца. Таким неинвазивным, безрадиационным, быстрым и портативным инструментом для оказания помощи клиницистам в оценке звуков, связанных с клинически значимой обструкцией коронарных артерий, застойной сердечной недостаточностью и аномалиями сердечных клапанов, является система **CADence**, состоящая из цифрового стетоскопа, используемого для записи сердечных тонов, встроенных датчиков для записи электрической активности сердца (ЭКГ) и программного приложения CADence (рис. 2). Последнее представляет собой инструмент поддержки клинических решений, предназначенный для оказания помощи квалифицированному клиницисту в анализе нормальных/физиологических и патологических шумов сердца после записи сердечных тонов и ЭКГ.

Автоматизированный анализ сердечных тонов системой CADence должен производиться в сочетании с наблюдением врача, а также с учетом всей другой релевантной информации о пациенте, обязательной для постановки диагноза. Система CADence не предназначена для использования в качестве автономного диагностического устройства.

Функции записи и сравнения звуков сердца, легких и других органов выполняет стетоскоп **Stethee** с помощью приложения Stethee. Данное устройство подключается непосредственно к любым проводным или беспроводным наушникам, возможно подключение к мобильному устройству. Устройство Stethee (рис. 2), оснащено двухъядерным процессором, обработкой сигналов в реальном времени, двухквadratными сердечными и дыхательными фильтрами, а также технологией шумоподавления воздушного шлюза. Сочетание данных функций обеспечивает высокое качество прослушивания и позволяет повысить эффективность и производительность медицинской помощи.

Цифровой стетоскоп **Thinklabs One** также

упрощает медицинское обслуживание (рис. 2). Это эффективный инструмент аускультации, используемый, в частности, в ведущих медицинских учебных заведениях для эффективного обучения практическим навыкам аускультации

и позволяющий в режиме реального времени наблюдать пациента одновременно преподавателем и студентами (в том числе удаленно), использовать возможности визуализации, внешние микрофоны, мобильные устройства.



CADence: автоматический анализатор звуков сердца



Стетоскоп Stethee



Стетоскоп Thinklabs One

Рис. 2. Примеры аппаратов пассивного прослушивания звуков от внутренних органов

ИСТОРИЯ ПРОЕКТА ОТ КАРДИОМА (CARDIOM) ДО ГОЛОСА ТЕЛА (BODYVO)

Первоначально развитием модели цифрового стетоскопа фактически являлся проект **CARDIOM**. Суть проекта заключалась в прослушивании звуков работы сердца через микрофон мобильного устройства и сохранении аудиозаписей, соответствующих звукам сердца. Далее производилось установление соответствия звуков сердца и ЭКГ. Первичные данные собирались у кардиологов. Пациент приходил на ЭКГ к врачу, который через электронный стетоскоп записывал звук работы сердца и соответствие в текущий момент ЭКГ сердца пациента. Для формирования качественной базы соответствий необходимы были данные десятков тысяч пациентов. Поскольку один врач мог обеспечить данные 30-50 пациентов, проект оказался технически трудно реализуем.

Далее развитие проекта было в сторону устройства с тремя микрофонами эхографа **RuCore 24/7** для размещения его на животе беременной женщины. С помощью полученных звуков была построена 3D-модель плода ребенка и его положение в утробе матери.

Данный универсальный пассивный эхограф с широким кругом применения - от личного до специализированных клиник - предоставляет врачу записанную звуковую информацию для прослушивания, дает максимально полный набор сведений для врача и пациента (при домашнем использовании).

Следующий макет прибора (бандаж или высокие трусы) содержит три микрофона с несферической диаграммой направленности (для точного определения направления на звук с учетом фазы), датчик сверхнизких частот, датчик контакта с телом, колесико-курвиметр для определения перемещения по телу, датчики положения блока в пространстве и блок передачи данных, кнопку "начать измерения".

Все измерения отображаются на трехмерной фигуре человека, а цветом выделяются места рекомендуемого прикладывания прибора.

Измерения ведутся с перемещением прибора по телу. По мере накопления данных на фигуре начинает динамически отображаться сердце и легкие, а также крупные сосуды, дающие звук и эхо, отображается сердце плода, положение которого позволяет моделировать положение всего плода в пространстве. Дополнительно измеряется корреляции пульса плода

и матери и строится доплер-модель кровотока. Первично прибор калибруется - передвигается по телу и придает макету реальные размеры, что дает возможность зафиксировать изменения фигуры при течении беременности.

Отличием прибора от существующих является визуализация работы органов (включая работу сердца матери и плода - для беременных) в виде понятной неспециалисту графической модели.

Технические отличия – определение направления на источник звука, учет положения прибора в пространстве, высокая частота дискретизации для сохранения особенностей сигнала.

Проект фазированной акустической антенной решетки

Дальнейшим развитием проекта является высокоточное изучение параметров акустических сигналов. Техническая реализация выполнена при помощи размещения на облегающей тело футболке решетки из n на m компактных микрофонов. Звук от этих микрофонов передается на смартфон и обрабатывается на нем.

Первично для приёма акустических сигналов, используется плотно соприкасающаяся с телом микрофонная решётка 7×3 микрофонов (рис.3).



Полученное устройство представляет собой фазированную антенную акустическую решетку (ФААР) для акустического сигнала – аналог цифровой антенной решетки (ЦАР). Сигнал снимается с частотой не менее 44 кГц с разрядностью 8 и сохраняется на внешнем хранилище. Объем данных равен приблизительно 1 Мбайт/мин.

Переход от небольшого числа микрофонов, позволяющих определить направление на источник звука с антенной решетки, связан с возможностью высокоточной локации источников звука, а также звуковой локации, когда синтезированная диаграмма направленности позволяет последовательно сканировать источники звука без перемещения приемных устройств по телу. Кроме того, ЦАР позволяет обеспечить разрешение так называемого сверхрэлеевского типа.

Анализ спектра (в первую очередь - фазы сигнала) позволяет установить направление и расстояние до всех источников звука [20]. Таким образом, можно определить следующие важные параметры внутренних органов:

- основной сердечный ритм и вариабельность пульса;
- работа желудочков сердца;
- основной цикл дыхания для каждого легкого;

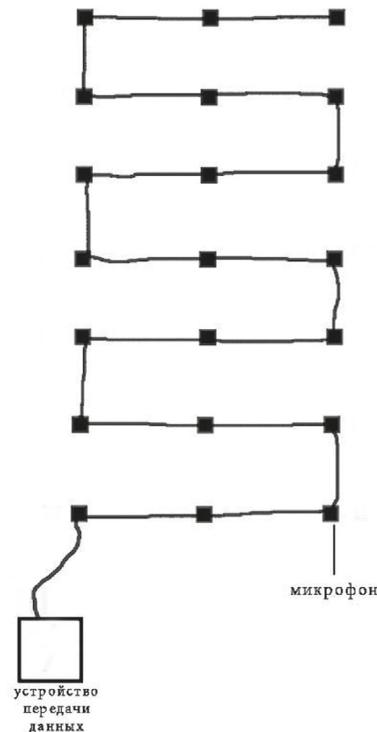


Рис. 3 Реализация применения микрофонной решетки для приема акустических сигналов

- неоднородности и наличие жидкости в легких;

- движение крови в аорте и артериях.

После обработки сигналов можно построить:

- динамическую 3D модель работы сердца и легких;

- модель кровообращения с вычислением функции артериального давления.

Для беременных возможно определить сердцебиение плода и его положение.

В перспективе, изучая гармоники спектра акустических сигналов ФААР, можно установить места отражения звуковых волн и определить:

- места появления опухолей;

- проблемы с кишечником,

- тромбы в сосудах.

Анализ источников акустических сигналов

Как мы заметили выше, фазированная антенная акустическая решётка позволяет с высокой точностью установить направление на звуковой сигнал, а оперирование с частью решётки - вычислить точки пересечения направлений в пространстве. Для этого необходимо разделить ФААР на три (минимум) подрешетки. Тогда пересечение трех лучей в пространстве точно даст расположение источника звука.

Таковыми источниками будут:

- желудочки и клапаны сердца;

- бронхиальные каналы;

- зоны звуковых аномалий кровеносных сосудов (сужение или расширение), которые дают перепад пульсовой волны и также являются источниками звука.

При движении тела (ходьба, бег, физические упражнения) положение источников звука (сердца и его частей) меняется, и это дает материал для создания динамической объёмной модели, что также является принципиально новым.

Для беременных можно создать уникальную картину изменения положения плода в течение времени, ориентируясь на положение его сердца как источника звука.

Весьма важным является синфазность работы сердца матери и плода. По этому параметру на ранней стадии можно диагностировать множество проблем роста и развития плода, а также спрогнозировать послеродовой пе-

риод его жизни.

Отражения звуковых волн идентифицируются по изменению фазы и позволят увидеть:

- жидкость в лёгких;

- неоднородности в тканях;

- уплотнения в печени и почках.

Тем самым решается задача ранней диагностики:

- опухолей;

- непроходимости кишечника и спаек;

- наличие кист.

ОСНОВЫ ПОСТРОЕНИЯ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ АНТЕННОЙ РЕШЕТКИ

Напомним, что антенная решётка [2] — это совокупность излучающих (в нашем случае — принимающих) элементов, расположенных в определённом порядке, ориентированных и возбуждаемых так, чтобы получить заданную диаграмму направленности.

Будем рассматривать ФААР как аналог цифровой антенной решётки (ЦАР) - антенной решетки с поэлементной обработкой сигналов, в которой сигналы от излучающих элементов подвергаются аналого-цифровому преобразованию с последующей обработкой по определённым алгоритмам [3].

Более общее определение ЦАР предполагает формирование диаграммы направленности как на прием, так и на передачу сигналов: в случае ФААР в первую очередь нас интересует проблема приема сигнала, однако нельзя отрицать возможность и активного воздействия на организм источниками акустических колебаний как с целью диагностики, так и терапии.

Таким образом, цифровая антенная решётка (ЦАР) — пассивная или активная антенная система, представляющая собой совокупность аналого-цифровых (цифро-аналоговых) каналов с общим фазовым центром, в которой формирование диаграммы направленности осуществляется в цифровом виде, без использования фазовращателей [3]. В зарубежной литературе используются эквивалентные термины digital antenna array или smart antenna [4].

В нашем случае ЦАР работает в акустическом диапазоне и на прием.

Различие между ЦАР и разновидностью активной фазированной антенной решётки (АФАР) заключается в методах обработки информации. В основе АФАР лежит приёмопередающий модуль (ППМ), включающий в себя два канала: приёмный и передающий. В каждом канале установлен усилитель, а также по два устройства управления амплитудно-фазовым распределением: фазовращатель и аттенюатор.

В ЦАР в каждом канале установлен цифровой приёмопередающий модуль, в котором аналоговая система управления амплитудой и фазой сигнала заменена системой цифрового синтеза и анализа сигналов [3, 5- 8].

Теория цифровых антенных решёток (ЦАР) зарождалась как теория многоканального анализа (Multichannel Estimation) [9, 10]. Исторически проблема начала обсуждаться и изучаться в 20-х годах XX века для определения направлений прихода радиосигналов при помощи совокупности двух антенн по разности фаз или амплитуд их выходных напряжений [11].

В конце 1940-х годов подход анализа разности фаз привёл к появлению теории трёхканальных радиолокационных антенных анализаторов, обеспечивавших решение задачи разделения сигналов воздушной цели и отражённого от подстилающей поверхности (земли, воды) «антипода» путём решения системы уравнений, сформированных по комплексным напряжениям трёхканальной сигнальной смеси [12]. Результаты экспериментальных измерений с помощью аналогичного трёхантенного устройства были опубликованы Фредериком Бруксом в 1951 г. [13].

К концу 1950-х годов возрастающая сложность решения радиолокационных задач обусловила необходимость применения электронной вычислительной техники [9, 10].

В 1957 г. Бен С. Мелтон и Лесли Ф. Бейли в своей статье [14] предложили способы реализации алгебраических операций по обработке сигналов с помощью электронных схем, являющихся их аналогами, с целью создания машинного коррелятора (а machine correlator) или машинного вычислителя обработки сигналов на основе аналоговой вычислительной машины.

В результате замещения аналоговых вы-

числительных средств цифровыми буквально через несколько лет возникла идея использования быстродействующего компьютера для решения пеленгационной задачи, первоначально в отношении определения местоположения эпицентра землетрясения [9, 10]. Б. А. Болт стал одним из первых, кто реализовал эту идею на практике [15], написав программу для IBM 704 по сейсмопеленгации на основе метода наименьших квадратов. Сотрудник Австралийского национального университета Е.А. Флинн использовал аналогичный подход [16].

В Советском Союзе потенциальные возможности многоканальных анализаторов впервые оценил Поликарпов Б. И. [17] в 1961 г. Им были изучены анализаторы фазового типа с равными или кратными расстояниями между фазовыми центрами приёмных каналов, на выходах которых напряжения подвергаются корреляционной обработке. С помощью вычислительных машин определяются угловые координаты источников сигналов. Поликарпов Б. И. указал на принципиальную возможность разрешения источников сигналов с угловым расстоянием, меньшей ширины главного лепестка диаграммы направленности антенной системы (сверхрэлеевское разрешение) [9, 10].

Конкретное решение задачи сверхрэлеевского разрешения источников излучения было предложено в 1962 году Варюхиным В.А. и Заблоцким М.А., которыми был изобретён соответствующий способ измерения направлений на источники электромагнитного поля [18]. 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 приёмной антенной системы [9, 10].

В дальнейшем Варюхиным В.А. была разработана общая теория многоканальных анализаторов, основанная на обработке информации, содержащейся в распределении комплексных амплитуд напряжений на выходах антенной решётки [10]. 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 систем трансцендентных уравнений высокого порядка, были преодолены Варюхиным В.А. путём «сепарации» неизвестных, при которой определение угловых координат сводится к решению двух или даже одного уравнения, а определение комплексных амплитуд — к решению систем линейных систем уравнений порядка N [19].

Кратко рассмотрим приёмный канал ЦАР и ФААР. Основа приёмного канала — аналого-цифровой преобразователь (АЦП) [21-23]. Аналого-цифровой преобразователь заменяет в аналоговом варианте реализации активного модуля два устройства: фазовращатель и аттенюатор. АЦП позволяет перейти от аналогового к цифровому представлению сигнала для дальнейшего его анализа в схеме цифровой обработки сигнала.

Для корректной работы АЦП в канале также присутствует ещё маломощный усилитель (МШУ) [21-23]. МШУ поднимает амплитуду сигнала до требуемого уровня для дальнейшей оцифровки.

Несколько слов необходимо сказать о преобразовании частоты в ЦАР. При работе с сигналами, оцифровка или цифро-аналоговое преобразование которых на несущей частоте

является неэффективной (недостаточная разрядность и канальность имеющихся АЦП/ЦАП, их высокое энергопотребление и т. п.), в ЦАР может выполняться одно или несколько промежуточных преобразований частоты [21-23]. Следует отметить, что всякое преобразование частоты вносит дополнительные погрешности в обработку сигналов и снижает потенциальные характеристики ЦАР. Для акустического сигнала это также верно.

ВЫВОДЫ

Новый подход к акустическому анализу позволяет решить массу проблем в области медицинской диагностики. В частности, для акустической ЦАР и ФААР возможны выявление и локация внутри организма объектов, размер которых гораздо меньше ширины диаграммы направленности, что является впечатляющим результатом.

Преимущество цифровой медицины, опирающейся на математические методы, в том числе в области обработки сигналов, заключается в возможности получать результаты высокой точности и глубины диагностики, что позволит не только улучшить качество диагностических процедур, но и сделать их более понятными и доступными как для врачей, так и для пациентов.

На описанный способ подана патентная заявка «Способ акустического анализа состояния организма» [24].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Тихоненко З.О., Тихоненко О.О., Щербачев А.Ю. Цифровые технологии анализа крови // Вестник современных цифровых технологий, 2020. №5. С. 44-48.
2. ГОСТ 23282-91. Решётки антенные. Термины и определения. – URL: <http://gostrf.com/normadata/1/4294830/4294830746.pdf>
3. Слюсар В.И. Основные понятия теории и техники антенн. Антенные системы евклидовой геометрии. Фрактальные антенны. SMART-антенны. Цифровые антенные решётки (ЦАР). МIMO-системы на базе ЦАР // Разделы 9.3- 9.8 в книге «Широкополосные беспроводные сети передачи информации». Вишневецкий В.М., Ляхов А.И., Портной С.Л., Шахнович И.В. – М.: Техносфера. – 2005. С. 542 – 563.
4. Слюсар В.И. Smart-антенны пошли в серию // Электроника: наука, технология, бизнес, 2004. № 2.

- С. 62 – 65.
5. Слюсар В.И. Цифровое диаграммообразование- базовая технология перспективных систем связи // Радиоаматор, 1999. № 8. С. 58 – 59.
 6. Слюсар В.И. Цифровое формирование луча в системах связи: будущее рождается сегодня // Электроника: наука, технология, бизнес. 2001. № 1. С. 6-12.
 7. Слюсар В.И. Цифровые антенные решётки: будущее радиолокации // Электроника: наука, технология, бизнес. 2001. № 3. С. 42- 46.
 8. Слюсар В.И. Цифровые антенные решётки: аспекты развития // Специальная техника и вооружение, 2002.- № 1,2. С. 17- 23. Дата обращения: 4 июня 2014. Архивировано 23 декабря 2018 года.
 9. Slyusar V. I. Origins of the Digital Antenna Array Theory // International Conference on Antenna Theory and Techniques, 24-27 May, 2017, Kyiv, Ukraine. Pp. 199—201.
 10. Слюсар В. И. Развитие схемотехники ЦАР: некоторые итоги. Часть 1 // Первая миля. Last mile. Приложение к журналу «Электроника: наука, технология, бизнес», 2018. №1. С. 72 — 77.
 11. Friis H. T. 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. Pp. 658—665.
 12. 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. Pp. 248—251.
 13. Frederick E. Brooks. A Receiver for Measuring Angle-of-Arrival in a Complex Wave // Proceedings of the I.R.E.- April, 1951. Pp. 407—411.
 14. Ben S. Meltont and Leslie F. Bailey. Multiple Signal Correlators // Geophysics. — July, 1957. Vol. XXII. No. 3. Pp. 565—588.
 15. Bolt B. A. The Revision of Earthquake Epicentres, Focal Depths and Origin-Times using a High-speed Computer // Geophysical Journal. — 1960. Vol. 3, Issue 4. Pp. 433—440.
 16. Flinn E. A. Local earthquake location with an electronic computer // Bulletin of the Seismological Society of America. — July 1960. Vol. 50. No. 3. Pp. 467—470.
 17. Поликарпов Б. И. О некоторых возможностях применения независимых каналов приема сигналов и использования электронно-вычислительной техники для повышения помехоустойчивости и разрешающей способности радиолокационных измерений // Сборник «Экспресс-информация», БНТ. № 23, 1961.
 18. Варюхин В. А., Заблоцкий М. А. Авторское свидетельство СССР № 25752 «Способ измерения направлений на источники электромагнитного поля». 1962.
 19. 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.
 20. Марпл С. Л. Цифровой спектральный анализ и его приложения. Пер. с англ. — Москва, Мир, 1990. 265 стр.
 21. 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: «Гранмна». — 2012. С. 7 — 98; 354—521.
 22. Слюсар В.И. Идеология построения мультистандартных базовых станций широкополосных систем связи // Известия вузов. Сер. Радиоэлектроника, 2001. Том 44. № 4. С. 3- 12.
 23. Слюсар В.И. Многостандартная связь: проблемы и решения // Радиоаматор, 2001. № 7. С. 54 – 54. № 8. С. 50- 51.
 24. Патентная заявка №2020135943 от 02.11.2020 «Способ акустического анализа состояния организма».