

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации  
НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ  
ТОМСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ (НИ ТГУ)  
Наименование учебного структурного подразделения

ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ В ГЭК

Руководитель ООП

д-р. физ.-мат. наук

 Д.Я. Суханов

« 16 » июня 2022 г.

ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА МАГИСТРА  
(МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ)

**ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИИ РАДАРА С СИНТЕЗИРОВАНИЕМ  
АПЕРТУРЫ С НЕКОГЕРЕНТНОЙ ПОДСВЕТКОЙ**

по основной образовательной программе подготовки магистров  
направление подготовки 03.04.03 – Радиоп физика

Махманазаров Рамдас Миршакарзода

Руководитель ВКР

доктор. физ.-мат. наук,

профессор

В.П.Якубов

Консультант

доктор. физ.-мат. наук,

 Д.Я. Суханов

« 16 » июня 2022 г.

Автор работы

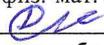
студент группы № 761

 Р.М. Махманазаров

« 16 » июня 2022 г.

Томск 2022

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации.  
НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ  
ТОМСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ (НИ ТГУ)  
Радиофизический факультет  
Кафедра радиофизики

УТВЕРЖДАЮ  
Руководитель ООП  
д-р. физ.-мат. наук  
 Д.Я. Суханов  
«28» сентября 2020 г.

ЗАДАНИЕ

по выполнению выпускной квалификационной работы магистра обучающегося  
Махманазарову Рамдасу Миршакарзода

(Ф.И.О. обучающегося)

по направлению подготовки 03.04.03 Радиофизика, направленность (профиль) «Радиофизика, электроника и информационные системы».

1 Тема выпускной квалификационной работы

Исследование технологии радара с синтезированием апертуры с некогерентной подсветкой

2 Срок сдачи обучающимся выполненной выпускной квалификационной работы:

а) на кафедру – 30.05.2022

б) в ГЭК – 17.06.2022

3 Исходные данные к работе:

Объект исследования – совокупность процессов: дифракция, интерференция, распространение и рассеяние волн в сверхвысокочастотном электромагнитном поле.

Предмет исследования – совокупность математических операций с числовыми значениями, которые соответствуют пространственному распределению амплитуды поля, для реконструкции радио-изображения зондируемых объектов.

Цель исследования – исследовать и разработать новые технологии радара синтезирования апертуры (РСА) с использованием некогерентной подсветки, основанные на методе обратной фокусировки.

Задачи: 1. Разработка теоретической модели; 2. Численное моделирование прямой и обратной задачи; 3. Разработка экспериментальной установки; 4. Проведение экспериментов.

Методы исследования: метод согласованной фильтрации (фокусировка), метод миграций во временной области, метод синтезирования апертуры.

Организация или отрасль, по тематике которой выполняется работа

Томский государственный университет

4. Краткое содержание работы

Разработка методов восстановления радио-изображения с использованием стороннего, некогерентного источника электромагнитного излучения

Руководитель выпускной квалификационной работы

Профессор кафедры радиофизики ТГУ

(должность, место работы)



(подпись)

/ В.П. Якубов

(И.О. Фамилия)

Консультант

Профессор кафедры радиофизики ТГУ

(должность, место работы)



(подпись)

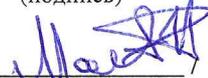
/ Д. Я. Суханов

(И.О. Фамилия)

Задание принял к исполнению

Студент РФФ ТГУ

(должность, место работы)



(подпись)

/ Р.М. Махманазаров

(И.О. Фамилия)

## СОДЕРЖАНИЕ

<b>ВВЕДЕНИЕ</b> .....	4
<b>1. Обзор концепций и основы радарной техники</b> .....	6
1.1. Основы восстановления изображения волновыми способами .....	6
1.2. Радары с синтезированием апертуры .....	10
1.3. Многопозиционные РСА .....	15
1.4. Системы пассивного позиционирования и радиолокация внутри помещений с использованием сторонних источников .....	17
1.5. Восстановление радио изображения с использованием сторонних источников.....	20
1.6. Резюме.....	24
<b>2. Методы синтеза апертуры с некогерентным источником</b> .....	25
2.1. Монохромный случай.....	25
2.1.1.Геометрия задачи.....	25
2.1.2.Прямая задача .....	26
2.1.3.Обратная задача.....	27
2.1.4.Численное моделирование .....	28
2.2. Случай с некогерентной пачкой импульсов .....	32
2.2.1.Геометрия задачи.....	32
2.2.2.Прямая задача .....	33
2.2.3.Обратная задача.....	33
2.2.4.Численное моделирование .....	34
2.3. Резюме.....	36
<b>3. Экспериментальные исследования</b> .....	38
3.1. Устройство измерительной системы .....	38
3.2. Эксперимент по измерению амплитуды сигнала WiFi.....	42
3.3. Эксперимент по измерению амплитуды излучения длиной волны 3см и 8,5 мм.....	45
<b>ЗАКЛЮЧЕНИЕ</b> .....	51
<b>СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ</b> .....	52
<b>ПРИЛОЖЕНИЕ А Отчет о патентных исследованиях</b> .....	55

## ВВЕДЕНИЕ

На сегодняшний день известно множество технологий радаров, использующие различные подходы для получения радиолокационного изображения или радио томограмм [1-17]. Радарная техника применяется в аэрокосмической, оборонной отрасли, в системах технического зрения, в целях навигации беспилотников, метеорологии и других.

Радары классифицируются по назначению (сканирование, слежение, навигация), по типу носителя (наземные, авиационные, морские), по характеру принимаемого сигнала (активные, пассивные), по частотному диапазону и т.д. Диапазон рабочих частот радаров ограничен и расположен от единиц Гц до сотен ГГц в спектре электромагнитного излучения. Возникает проблема использования полосы рабочих частот для корректной работы не только радарных систем, но и любой другой системы, занимающей эфир. В частности, для осуществления томографии или зондирования вблизи высокомоощных станций связи, может потребоваться отключение стороннего источника. В связи с этим, ведутся работы по модификации и оптимизации существующих технологий и методов. Одной из перспективных технологий радаров, решающих проблему зашумления эфира, является технология неизлучающих (пассивных) радаров.

Основной принцип пассивных радаров заключается в использовании стороннего излучения. В качестве стороннего излучения могут быть использованы станции сотовой связи, теле-радио вещания, сигналы GPS, Wi-Fi, а также излучение, приходящее от космических объектов. Пассивные радары не создают помех в сканируемой области, что является их преимуществом. Ключевой особенностью работы пассивных радаров является отсутствие изначальной информации о фазе зондирующего излучения. При этом используемое стороннее излучение (подсветка) может быть как когерентным, так и некогерентным. При известных параметрах

частоты и формы сигнала измеряется только амплитуда рассеянного излучения.

В настоящей диссертации объектом исследования выступает совокупность процессов: дифракция, интерференция, распространение и рассеяние волн в сверхвысокочастотном электромагнитном поле.

Целью данной работы является исследовать и разработать новые технологии радара синтезирования апертуры (РСА) с использованием некогерентной подсветки, основанные на методе обратной фокусировки.

Для достижения цели поставлены следующие задачи:

1. Разработка теоретической модели
2. Численное моделирование прямой и обратной задачи
3. Создание экспериментальной установки РСА
4. Проведение экспериментов по синтезированию апертуры с последующей обработкой данных и восстановление изображения.

На защиту выносится следующее научное положение:

Для восстановления изображения рассеивающих объектов с разрешающей способностью порядка длины волны на основе многопозиционных измерений распределения амплитуды интерференции предметной волны и опорной волны на фиксированной частоте, исходящей от статичного некогерентного источника излучения и однопозиционных измерений поля опорного источника, достаточно провести: нормировку амплитуды предметного сигнала, вычисление квадратуры предметного сигнала и синтезирование апертуры с помощью пространственно согласованной фильтрации.

В работе применяются методы фокусировки (согласованная фильтрация), метод миграции во временной области. Решения прямой и обратной задачи основывались на решениях уравнения Гельмгольца, в скалярном приближении и приближениях однократного рассеяния.

## **1. Обзор концепций и основы радарной техники**

### **1.1. Основы восстановления изображения волновыми способами**

За последнюю декаду техника дистанционного зондирования и обработки данных серьезно продвинулись в развитии, в результате чего стало возможным не только определение размеров и глубины залегания неоднородностей исследуемой среды, но и восстановление ее полной пространственной структуры. При этом среди различных методов бесконтактной диагностики как правило используются томографические методы, заключающиеся в послойном исследовании структуры объекта. В современной томографии используются излучение различной природы – акустические, оптические, радиоволны, рентгеновское и гамма-излучение, сейсмические волны, пучки заряженных частиц и другие. Для каждого вида излучения характерны индивидуальные свойства, однако получаемая информация в процессе томографии по своей сути является общей для восстановления изображения. Таким образом, о методах восстановления изображения можно говорить как об отдельной области решения задач, без сильной зависимости от вида излучения.

Касаемо радиоволновой томографии, основной причиной, препятствующей ее развитию, являются трудности интерпретации измеряемых параметров излучения при его взаимодействии с неоднородными средами. Исследования в работе [3] показывают, что при прохождении микроволнового излучения, например, через биологические ткани оказываются существенными эффекты многократного взаимодействия волн (рассеяния, поглощения, отражения, дифракции, деполяризации и т.д.). В случае, когда характерные размеры неоднородностей соизмеримы с длинами волн используемого излучения (а в данном диапазоне это условие почти всегда выполняется) теория многократного взаимодействия

достаточно сложна для описания процесса распространения излучения в исследуемой среде, что не дает возможности решить задачу восстановления структуры распределения неоднородностей. Существующие направления в радиоволновой томографии рассматривают различные приближения, при которых можно выделить какой-либо доминирующий эффект взаимодействия излучения со средой. В этом случае значительно упрощается описание процесса распространения волн в неоднородной среде, что дает возможность решения задачи восстановления ее пространственной структуры.

Наиболее распространенными являются методы восстановления внутренних характеристик среды на основе учета рассеяния электромагнитного излучения неоднородностями. При этом используется интегральное уравнение Липпмана-Швингера, эквивалентное уравнению Гельмгольца, для поля  $E(\mathbf{r})$  в точке приема:

$$E(\mathbf{r}) = E_0(\mathbf{r}) + k^2 \int G(\mathbf{r} - \mathbf{r}') E(\mathbf{r}') \Delta \varepsilon(\mathbf{r}') d\mathbf{r}'. \quad (1.1)$$

Здесь  $E_0(\mathbf{r})$  зондирующее поле,  $G(\mathbf{r}) = e^{ik\mathbf{r}} / 4\pi\mathbf{r}$  - функция Грина однородного пространства с диэлектрической проницаемостью  $\varepsilon_0$ ,  $\Delta \varepsilon(\mathbf{r}) = (\varepsilon(\mathbf{r}) - \varepsilon_0) / \varepsilon_0$  - возмущенное значение диэлектрической проницаемости среды относительно фона  $\varepsilon_0$ .

Для описания рассеяния на слабоконтрастных неоднородностях удобно использовать борновское приближение, которое учитывает только однократное взаимодействие излучение со средой. Тогда в интеграле (1.1) полное поле заменяется падающим и рассеянное поле записывается как:

$$E_1(\mathbf{r}) = k^2 \int G(\mathbf{r} - \mathbf{r}') E_0(\mathbf{r}') \Delta \varepsilon(\mathbf{r}') d\mathbf{r}'. \quad (1.2)$$

Стоит заметить, что борновское приближение применимо для случаев  $k^2 \Delta \varepsilon r_m^2 \leq 1$ , где  $r_m$  - размер неоднородности [4]. Для случаев крупных неоднородностей распространено использование метода плавных возмущений (МПВ) или приближение Рытова. В методе МПВ поле

представляется в виде амплитуды и комплексной фазы, где фаза находится с помощью теории возмущений. Из названия метода можно определить, что он справедлив в случае распространения волн в средах с плавно меняющимися параметрами и результирующее поле характеризуется суммарным изменением амплитуды и фазы по всей траектории распространения, без учета рассеяния на отдельных неоднородностях.

Еще одним из распространенных приближений является приближение геометрической оптики, с помощью которой становится возможным понижение мерности задачи. Понижение мерности задачи заключается в учете не всего исследуемого объема, а только вдоль траектории зондируемого луча. Таким образом, можно рассматривать упрощенное выражение вида

$$F(\mathbf{r}) = \int \Delta\varepsilon(\mathbf{r}')h(\mathbf{r}, \mathbf{r}')dl, \quad (1.3)$$

где  $F(\mathbf{r})$  - регистрируемый параметр излучения,  $h(\mathbf{r}, \mathbf{r}')$  - функция описывает условия распространения излучения из точки среды  $\mathbf{r}'$  в точку источника  $\mathbf{r}$  вдоль прямой  $l$ .

Точных решений уравнений вида (1.3) известно мало. Подобные уравнения сводят к системе алгебраических уравнений и решают приближенными методами. Также известно, что подобные задачи бывают неустойчивыми и по отношению к ним применяются регуляризирующие методы, которые способствуют выполнению условий корректности задачи по Адамару. Особое место в решении обратных задач занимают точные методы, решение которых записывается в виде интегрального преобразования. Подобные решения обычно достаточно устойчивы к шумам и/или позволяют применить к ним эффективную регуляризацию [5-7].

Одним из самых распространенных интегральных преобразований в задачах томографии является преобразование Радона, которое впервые было использовано в рентгеновской томографии. Существует несколько обращений преобразования Радона:

$$R(p, \varphi) = \int_{-\infty}^{\infty} f(x, y) ds, \quad (1.4)$$

где  $f(x, y)$  описывает внутреннюю структуру среды, определенной в некоторой области, интегрирование ведется вдоль линий  $L$  на плоскости,  $ds$  - приращение длины вдоль линии. Функцию  $R(p, \varphi)$  называют проекцией функции  $f(x, y)$ .

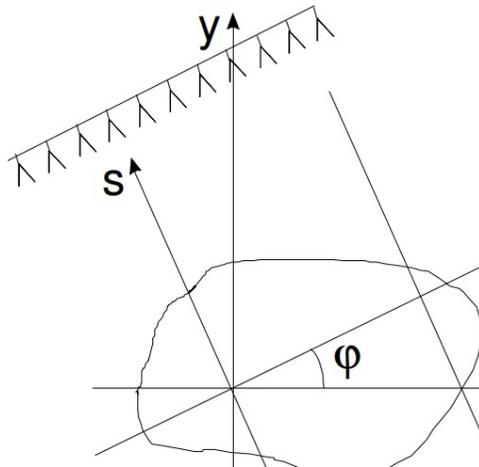


Рисунок 1 – Геометрия измерений классической задачи томографии

Учитывая геометрию (рисунок 1) измерений задачи и используя тригонометрические соотношения для связи координат  $(x, y)$  и  $(p, s)$  можно записать:

$$R(p, \varphi) = \int_{-\infty}^{\infty} f(p \cos \varphi - s \sin \varphi, p \sin \varphi + s \cos \varphi) ds$$

или эквивалентную форму:

$$R(p, \varphi) \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} f(x, y) \delta(p - x \cos \varphi - y \sin \varphi) dx dy.$$

Формула восстановления  $f(x, y)$  впервые была получена Радонем в [5, 6]:

$$f(x, y) = \frac{1}{\pi} \lim_{\varepsilon \rightarrow 0} \left[ \frac{\widehat{R}(x, y, \varepsilon)}{\varepsilon} - \int_{\varepsilon}^{\infty} \frac{\widehat{R}(x, y, z)}{z^2} dz \right],$$

где

$$\widehat{R}(x, y, z) = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} R(x \cos \varphi + y \sin \varphi + z, \varphi) d\varphi.$$

Известны обращения методом Фурье-синтеза:

$$f(x, y) = \frac{1}{(2\pi)^2} \int_0^\pi d\varphi \int_{-\infty}^\infty |w| \widetilde{R}(w, \varphi) \exp\{-iw(x \cos \varphi + y \sin \varphi)\} dw,$$

где  $\widetilde{R}(w, \varphi)$  - трансформанта Фурье проекции  $R(p, \varphi)$  по переменной  $p$ .

Также существуют методы обратного проецирования – методы профильтрации:

$$f(x, y) = \frac{1}{4\pi} \int_{-\infty}^\infty \int_{-\infty}^\infty dudv \exp\{-i(ux + vy)\} \widetilde{g}(u, v) \sqrt{u^2 + v^2},$$

где

$$g(x, y) = \frac{1}{\pi} \int_{-\infty}^\infty \int_{-\infty}^\infty \frac{f(x_0, y_0) dx_0 dy_0}{\sqrt{(x - x_0)^2 + (y - y_0)^2}},$$

$\widetilde{g}(u, v)$  - двумерная трансформанта Фурье от  $g(x, y)$  [6].

Стоит отметить, что в зависимости от используемых теорий представления электромагнитных волн и постановки задачи алгоритмы могут сильно различаться. Известно множество решений обратных задач в рамках скалярной теории дифракции [7, 8]. Также известно множество работ по восстановлению изображения, основанных на поляризационных измерениях [9].

## 1.2. Радары с синтезированием апертуры

Для работы радара (сокращение с английского Radio Detection and Ranging) необходимы источник и приемник электромагнитного излучения. В классических сканирующих радарах источником излучения выступает сам радар. В таком случае установка состоит из комплекса излучающей (передатчик) и приёмной частей. Передатчик излучает заведомо известный по форме и частоте сигнал узкой направленности в область сканирования.

При наличии объекта в сканируемой области часть энергии излучения поглощается объектом, а остальная рассеивается. Рассеянное излучение регистрируется приёмной частью радара и осуществляется последующая обработка. Приемная часть радара представляет собой антенну или антенную решетку.

В зависимости от частоты используемого излучения и специфики применения радара размеры приемной апертуры могут варьироваться. Одним из важных параметров радаров, является разрешающая способность. Соотношение (1.5) позволяет оценить разрешающую способность радара по азимуту (Рисунок 2):

$$\delta y = \Delta Y = R_0 \theta_y = R_0 \lambda / L_y \quad (1.5)$$

$\lambda$  – длина волны используемого излучения,  $R_0$  – расстояние до объекта,  $L_y$  – длина приемной апертуры. Чем меньше  $\delta y$ , тем меньше по размеру объекты можно обнаружить радаром.

Из (1.5) можно заметить, что для достижения высокой разрешающей способности восстанавливаемого объекта при заданной длине волны и расстоянии до него  $R_0$  необходимо увеличить размеры апертуры. К примеру, для радара, работающего на частоте 1.2 ГГц и находящегося на дальности 1 км, для достижения разрешающей способности в 1 м необходима апертура длиной 250м.

Альтернативным способом повышения разрешающей способности является концепция синтезирования апертуры (РСА). Концепция заключается в перемещении реальной антенны, вдоль линии синтезируя длинную апертуру. Для использования технологии радара с синтезированием апертуры (РСА) требуется, чтобы в каждой точке приема сохранялась фаза принимаемого излучения [7-9].

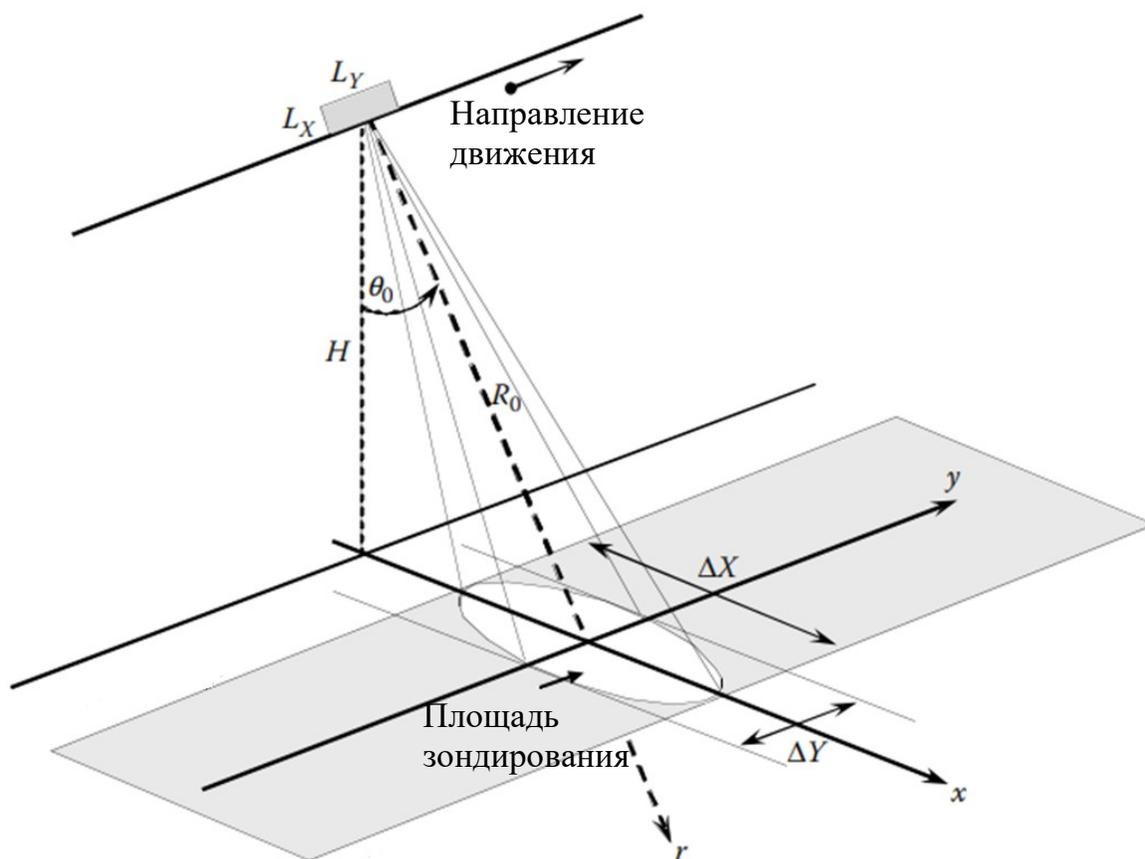


Рисунок 2 – Геометрия сканирования радаров

С появлением концепции PCA было разработано множество технологий радаров синтезированием апертуры (SAR) [1,3,8-9]. Среди них можно выделить основные технологии: инверсные PCA (ISAR), поляриметрические PCA (PolSAR), интерферометрические PCA (InSAR, D-InSAR), пассивные PCA (Passive SAR) или их комбинации – сложные PCA (ASAR). В свою очередь все PCA разделяются на моностатические, мультистатические и многопозиционные (рисунок 3).

Из рисунков 2 и 3 очевидно, что удобно реализовать PCA на летательном аппарате, синтезируя апертуру по направлению его передвижения или же наоборот, производить обратный синтез статичной апертуры по движущемуся объекту. Так и сложилось, что большинство принципов реализаций PCA базируется на летательных аппаратах или космических объектах.

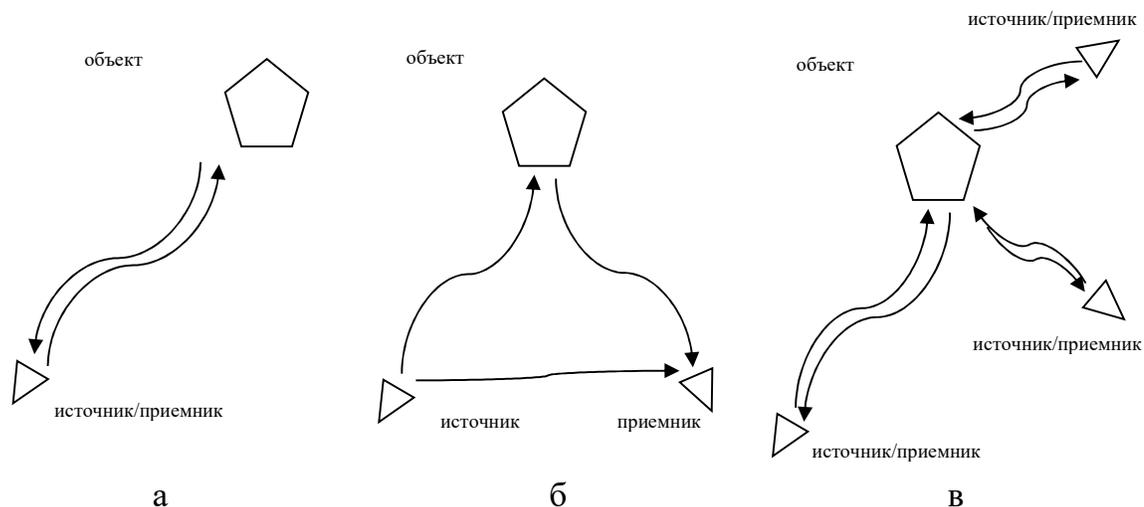


Рисунок 3 – Типы сканирования РСА: а – моностатические, б – мультистатические, в - многопозиционные

Спутник ENVISAT был запущен в марте 2002 года и стал первым гражданским спутником, предлагающим инновационную систему РЛС с синтезированной апертурой с двойной поляризацией (ASAR), работающую в С-диапазоне. Первым полностью PolSAR спутником был японский спутник ALOS, разработанный JAXA, и который был запущен в январе 2006 года. В этой миссии использовался активный поляриметрический радиолокационный датчик L-диапазона (1,3 ГГц) [9, 10].

Система RAMSES (Radar Aéroporté Multi-Spectral d'Etude des Signatures) представляет собой бортовой SAR, разработанный Департаментом электромагнитных и радиолокационных исследований (DEMR) Французского агентства аэрокосмических исследований ONERA. Он летает на авиа-платформе Transall C160, эксплуатируемой CEV (Centre d'Essais en Vol.). RAMSES изначально разрабатывался как испытательный стенд для построения радиолокационных изображений с высокой модульностью и гибкостью, предоставляющий конкретные данные для оценки алгоритма TDRI (обнаружение, распознавание и идентификация целей). Для каждой кампании сбора он может быть сконфигурирован с тремя группами, выбранными из восьми возможных частотных диапазонов: P- (430 МГц), L- (1,3 ГГц), S- (3,2 ГГц), C- (5,3 ГГц), X- (9,5 ГГц), Ku- (14,3 ГГц), Ka- (35 ГГц)

и W- (95 ГГц). Шесть полос могут работать в полностью поляриметрическом режиме [11].

Другой представитель из области спутниковых РСА – TerraSAR-X. Спутник вышел на орбиту 15 июня 2007 года. Программа была реализована при поддержке Министерства науки и образования Германии Германским аэрокосмическим центром (DLR) и производителем космических аппаратов EADS Astrium GmbH. В рабочих режимах TerraSAR-X предоставляет данные с одной или двумя поляризациями. На экспериментальной основе возможны дополнительно квадрупольная поляризация и продольная интерферометрия на частоте 9,5 ГГц [12].

Поляриметрический радар космического базирования, разработанный Канадским космическим агентством (CSA) совместно с MacDonald, Dettwiler and Associates Ltd (MDA) - RADARSAT-2 был успешно запущен в декабре 2007 года. Программа RADARSAT возникла в связи с необходимостью эффективного мониторинга ледяных водных путей Канады. Данные с RADARSAT-2 используются при работе с морским и речным льдом для улучшения обнаружения кромки льда, распознавания типа льда и извлечения информации о его структуре в полярных регионах и в других местах.

В работе [18] представлена концепция зондирования радаром, оснащенный на малый беспилотный летательный аппарат (DJI Phantom 2). На борту используется импульсный Радар PulsOn P410 с полосой частот от 3,1 до 5,3 ГГц с центром на частоте 4,3 ГГц. С помощью зондирования импульсами с частотой 10 МГц осуществляет восстановление изображения миграционными алгоритмами во временной области.

Перечисленные реализации РСА являются небольшой частью большого множества радаров и являются представителями преимущественно моностатической зондирующей схемы синтезирования апертуры и используют когерентное излучение.

### 1.3. Многопозиционные РСА

Особый интерес представляют бистатические (мультистатические) РСА и многопозиционные РСА. Из рисунка 3 можно заметить, что в случае мультистатической конфигурации точки приема и передачи зондирующего излучения разнесены и имеют ряд преимуществ. Подобная конфигурация зондирования стала одной из основных для технологий инверсного РСА (ISAR), неизлучающего РСА (PassiveSAR), интерферометрического РСА (InSAR), а также сложных РСА (ASAR).

В 1990 г. Европейское космическое агентство (ESA) запустило на орбиту аппарат ERS-1 с одиночной SAR-антенной. Спустя 5 лет был запущен ERS-2 – абсолютный аналог ERS-1. Было принято решение использовать эти аппараты для радарной интерферометрии и с 1995 по 1996 гг первый спутник осуществляет проход, сканируя участок поверхности. Через определенное время над этим же участком проходит второй спутник, также сканируя его, при этом он имеет несколько отличающийся от первого диапазон наклона. В результате получают два и более наборов комплексных данных, на основе которых можно проводить вычисления различных параметров. ERS-1, 2 работали в тандеме с 24-часовым интервалом. В начале 2000 г. оба аппарата завершили свою основную миссию [13].

В 2002 г. стартовал наследник программы ERS – Envisat, который на момент запуска являлся крупнейшей спутниковой системой исследования Земли. Аппарат функционирует по сей день и несет на себе множество оборудования, в том числе антенну ASAR (Advanced Synthetic Aperture Radar), работающую на частоте 5,3 ГГц [13].

В работе [14] изложены принципы инверсного SAR для моделирования сигналов, исходящих от пульсара и отраженных от объектов (например астероидов). Благодаря когерентному излучению пульсаров, было показано, что сигналы от них можно моделировать как монохроматические гауссовы импульсы, распределенные в сетке частотно-временных сигналов.

Авторами работы [15] была представлена технология пассивного РСА для обнаружения целей типа «воздух - воздух». В качестве демонстрации работоспособности технологии авторы смоделировали эксперимент, где источник излучения находился на земле, воздушная цель при этом двигалась со скоростью 100 м/с на высоте 100 метров. РСА находился на высоте 1000 м, перемещаясь параллельно цели с той же скоростью. Используя алгоритмы обратных проекций, авторами были восстановлены координаты рассматриваемых целей.

Так же известны РСА, использующие излучение геостационарных спутников, например [16]. В данной работе описана концепция наземного бистатического РСА, использующего модифицированные алгоритмы обратных проекций для получения сфокусированного изображения. Авторам удалось провести сканирование окружающих объектов в пределах 100 м и восстановить радио изображение.

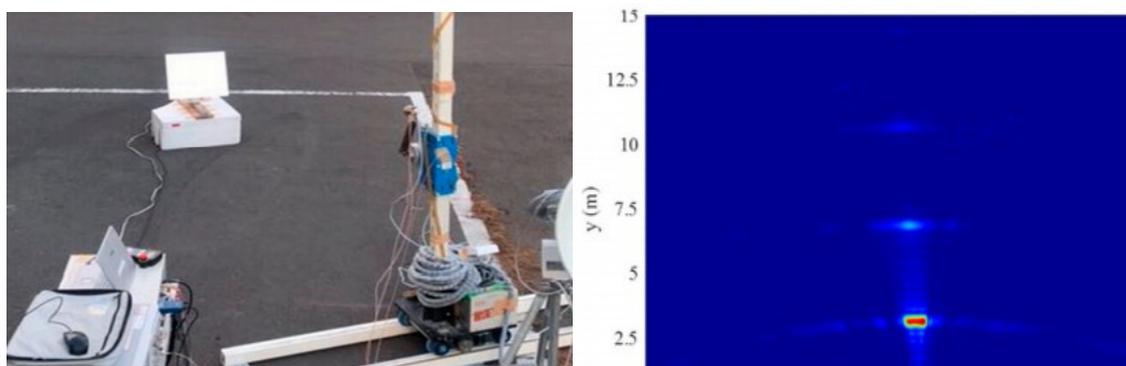


Рисунок 4 – Процесс сканирования металлического листа, используя излучение геостационарного спутника (слева), восстановленное изображение (справа)

Одним из многих примеров использования излучения станций телевидения является работа [17]. Здесь в качестве статичной приемной апертуры выступают два DVB-T приемника, преобразованные в SDR. Для синхронной работы двух DVB-T приемников авторы соорудили термическую переключку между двумя кварцевыми генераторами. По результатам исследования было продемонстрировано обнаружение статичных и

движущихся объектов, на основе эффекта Доплера с разрешением по дальности 150м.

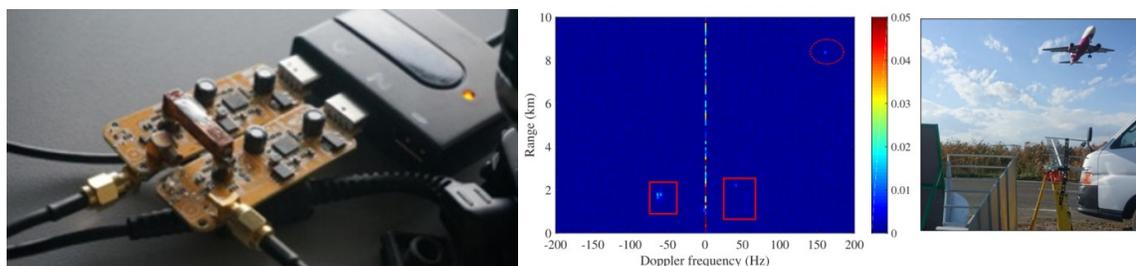


Рисунок 5 – Фотография приёмного блока DVB-T модуля (слева), изображение объектов (центр), фото эксперимента (справа)

Из вышеизложенного следует, что для восстановления радиоизображения может быть использована различная конфигурация измерений рассеянного излучения и различные алгоритмы. При этом в большинстве работ, используемые алгоритмы применяются на комплексных данных. Получение комплексных данных или фазовой информации рассеянного поля осуществляется непосредственными измерениями соответствующих квадратур поля, либо посредством интерференционных измерений.

#### **1.4. Системы пассивного позиционирования и радиолокация внутри помещений с использованием сторонних источников**

Радиотехнические системы, такие как GPS, ГЛОНАСС, позитивно зарекомендовали себя в различных сферах применений. Основной задачей является позиционирование пользователей. Однако особенность распространения радиоволн, не позволяет осуществлять поставленные задачи, когда пользователь расположен в радио-непрозрачном объеме, или в области многократных переотражений. В качестве примера таких областей выступают закрытые, подземные помещения зданий и прочее. Так возникла

задача позиционирования в закрытых для GPS областях и начали широко развиваться Indoor Positioning Systems (IPS), или системы внутреннего (локального) позиционирования.

Системы внутреннего позиционирования (IPS) играют ключевую роль во многих сферах, создавая множество возможностей в эпоху искусственного интеллекта. Отслеживание передвижения роботов / людей и использование технологии обработки данных позволяет оптимизировать энергопотребление и логистические аспекты.

Среди активных методов локализации хорошо известны системы позиционирования на основе Wi-Fi (WPS) для отслеживания перемещений людей в помещениях. WPS — это система радиолокации, которая использует характеристики ближайших точек доступа Wi-Fi и других точек беспроводного доступа, чтобы определить, где находится приемное устройство. В большинстве разработок, приемным устройством выступает смартфон.

Многие, недавно разработанные системы позиционирования внутри помещений [19-21], способны отслеживать геопространственное местоположение пользователей, например, радиочастотная идентификация (RFID), сверхширокополосная (UWB) и другие технологии зондирования. Хотя эти системы еще не используются широко, у них есть большой потенциал для предоставления данных о перемещениях с более высоким разрешением. Однако дороговизна этих систем препятствует их внедрению в большинстве жилых и коммерческих зданий. В последние годы предлагается относительно новая и дешевая альтернатива позиционирования внутри помещений, полностью использующая существующую инфраструктуру (например, сети Wi-Fi), которая обеспечивает приемлемый уровень точности и разрешения обнаружения [22].

Основная методика позиционирования заключается в регистрации уровней принимаемого сигнала (RSSI) смартфоном вместе с адресами различных источников, и последующем расчете расстояний между ними, с

учетом предполагаемого затухания сигнала. Расчет расстояний производится различными алгоритмами и метриками. Общий случай определения расстояний (метрика Минковского):

$$R(RSSI, RSSI_{si}) = \sqrt[p]{\sum_{s=1}^S (RSSI - RSSR_{si})^p} = \|RSSI - RSSR_{si}\|_p,$$

где  $RSSI$  сигнал от опорного источника,  $RSSR_{si}$  сигнал от остальных источников,  $s$  индекс источника. Параметр  $p$  определяет используемую метрику, при  $p = 1$  – расстояние городских кварталов,  $p = 2$  – Евклидово расстояние и тд. Известны также приложения с метриками Хэмминга [22]. После расчета расстояний производится ранжирование (взвешивание) и последующая классификация расчетов. Меньшее расстояние или более высокий ранг означает, что приемник находится ближе к заданной контрольной точке. В проведенном обзоре работ были выявлены различные подходы к выбору алгоритмов классификации. Распространенным алгоритмом для классификации, в рассматриваемой области, выступает алгоритм  $k$ -ближайших соседей [19]. Известны работы с применением классификаторов AdaBoost [23], RandomForest [24], а также других нейросетей.

Известна разработка WPS, использующая дополнительные данные акселерометра и магнетометра [25]. Перечисленные данные записываются со встроенных в смартфон датчиков. Дополнительный набор информации, позволил авторам улучшить точность позиционирования, используя фильтр Калмана.

Рассмотренные технологии решают задачи позиционирования объекта, его перемещение в заранее известном пространстве посредством смартфона. При постановке задачи восстановления радио-изображения, использование технологий синтезирования апертуры в сочетании с IPS и WPS, представляет особый интерес.

## 1.5. Восстановление радио изображения с использованием сторонних источников

Известно несколько работ по восстановлению изображения с помощью WiFi передатчиков. Среди них работа авторов [26], где представлена линейная модель измерений уровня принятого сигнала (RSS) согласованных приемопередатчиков для получения изображений. Восстановление изображение производилось методом наименьших квадратов с использованием SVD (Singular Value Decomposition), а также регуляризации по Тихонову. Геометрия задачи заключалась в расположении 28 приемопередатчиков WiFi по периметру квадрата площадью 40 кв. м (рисунок 6).

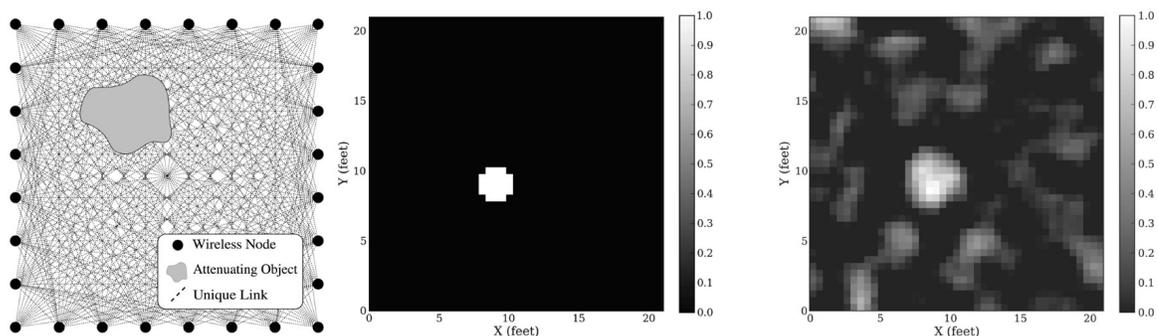


Рисунок 6 – Геометрия задачи (слева), координаты объекта (центр) и восстановленное изображение (справа)

Роутеры работали на частоте 2,4 ГГц. Общая квадратичная ошибка восстановленного изображения составила для одного объекта в виде человека – 0,021, для двух – 0,036 [26].

По аналогии с предыдущими авторами, в работе [27] осуществили моделирование прямой и обратной задачи, сравнив приближения Борна и Рытова. Обширный численный анализ, основанный на сингулярном разложении (SVD) оператора рассеяния, показал, как отсутствие информации о фазе влияет на качество изображения. Было обнаружено, когда данные не очень зашумлены, некогерентный подход Рытова дает более точные

результаты, но не сильно отличаются от результатов, полученных с помощью модели Борна [27].

Как упоминалось ранее, использование беспилотных устройств, в качестве носителей радарной техники, во многом может облегчить и обезопасить процесс зондирования. Так известно несколько работ по разработке мобильного тандема по зондированию объектов с помощью WiFi роутеров. В работе [28] представлен прототип двух беспилотных наземных устройств, оснащенных контроллерами управления, WiFi роутерами с модифицированной антенной параболического типа. Оба роботизированных устройства выступают приемопередатчиками зондирующего излучения. В данной конфигурации зондирования исследуемой области (рисунок 7), измеряется только уровень принятого сигнала (RSS) согласованных приемопередатчиков. В качестве исследуемых объектов выступают строительные материалы (бетон, кирпич). Математическая модель восстановления изображения заключается в пространственной минимизации полной вариации (TV):

$$\min \sum_{i,j} \|D_{i,j}(X)\|, \text{ при условии } Y = KX,$$

где  $D_{i,j}$  зондируемая область,  $X$  распределение объекта в зондируемой области,  $K$  описывает физическую систему измерений амплитуды (с учетом приближения Рытова или с лучевым приближением (LOS)).

Для решения задачи минимизации использовалась библиотека TVAL3 (Минимизация полной вариации с помощью расширенного лагранжиана и алгоритмов переменного направления) из программного пакета Matlab.

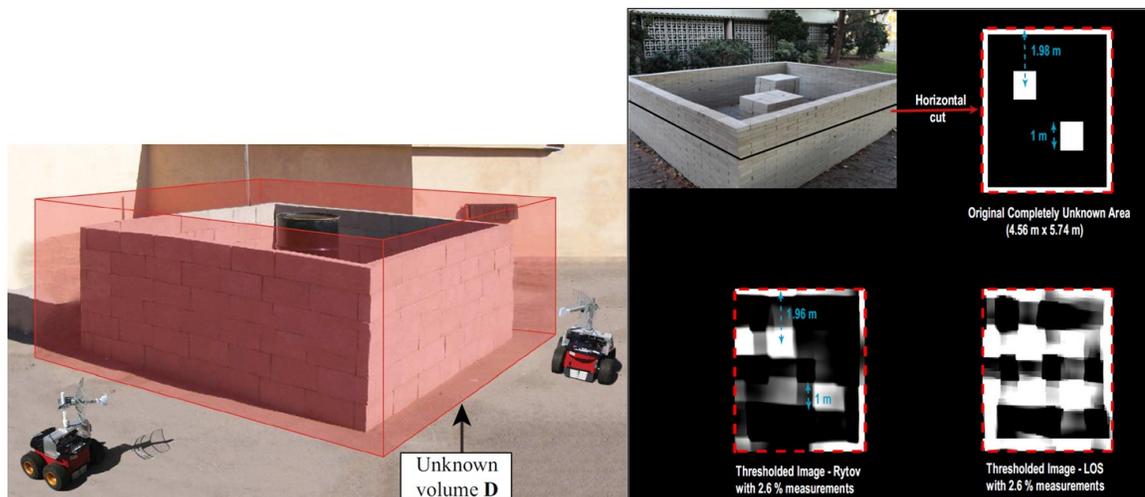


Рисунок 7 – Фото эксперимента (слева), координаты объектов и восстановленные изображения (справа)

По результатам экспериментов была выявлена устойчивость алгоритма восстановления изображения к ошибкам позиционирования антенны. Качественная оценка точности реконструкции изображения с учетом приближения Рытова составила порядка 5 см.

Авторами [29] представлен идентичный концепт, с модернизированным алгоритмом минимизации полной вариации (RTV-PIR). Модернизация алгоритма заключается в переопределении весов при минимизации и добавления априорной информации о зондируемом объекте. В отличие от [28], в [29] зондируемым объектом выступает деревянная конструкция. По результатам работы было представлено восстановление изображения заданного объекта с использованием алгоритмов TVAL3 в соответствии с работой [28], а также с использованием RTV-PIR. Качественно оценить различие можно на рисунке 8.

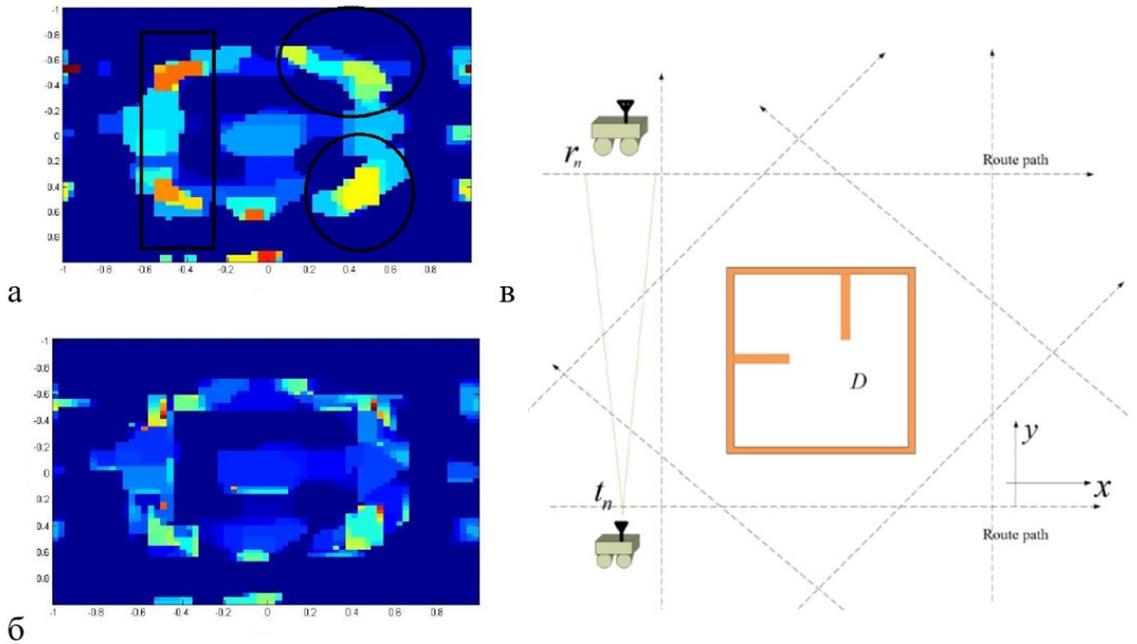


Рисунок 8 – Восстановление изображения алгоритмом TVAL3 (а), алгоритмом RTV-PIR (б), геометрия сканирования (в)

Аналогичным способом произведены разработки для восстановления трехмерных изображений с использованием легких летательных аппаратов Рисунок [30]. В данном случае минимизация производилась для нормы  $l_2$ , и использовалась библиотека TVReg, основанная на алгоритме Нестерова [31].

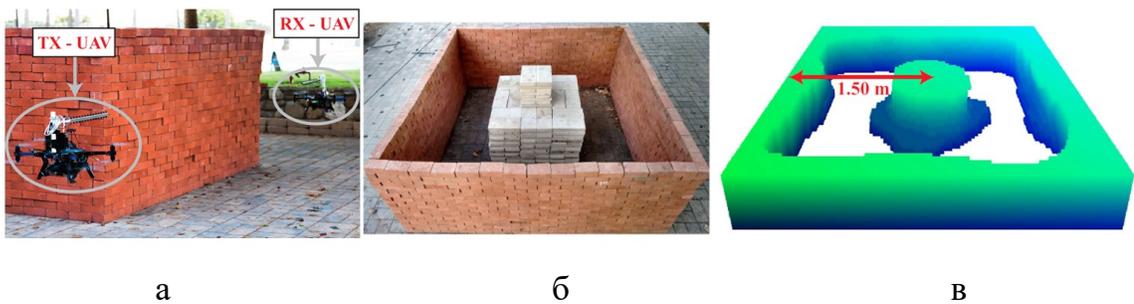


Рисунок 9 – Фото эксперимента (а), фото сканируемой области (б), восстановленное изображение (в)

Зондирование движущихся объектов представляет собой несколько иную задачу, в отличие от томографии покоящихся объектов. Пассивный

синтез апертуры и восстановление изображения, как не странно, связаны с характером и свойствами области зондирования, с источником, приемником, а также самим интересующим объектом. Последние трое могут изменять свои координаты в процессе измерения. Очевидно, что при одновременном изменении координат и свойств перечисленных объектов усложняет задачу. В некоторых случаях, упомянутые перемещения необходимы в рамках поставленной задачи (Радары с доплеровскими приёмниками) [8,15,17].

## **1.6. Резюме**

Проведенный обзор работ в области РСА, использующих стороннее излучение, показал различные подходы решения задачи восстановления изображения или координат объектов. В каждой из технологий присутствуют индивидуальные преимущества и недостатки. Несмотря на множество верифицированных подходов и концепций зондирования, остается проблема восстановления изображения в условиях полного отсутствия информации о фазе излучения.

Рассмотренных работах, подавляющее большинство технологий осуществлены с учетом синхронизации приёмной и передающей частей устройства. Однако такая концепция не всегда осуществима, или представляется экономически не выгодной. С другой стороны, реализация радио-видения без синхронизации приемной и передающей частей представляется внушительно сложной задачей в плане обработки данных, но простейшей в материально техническом плане.

В следующих главах настоящей работы представлены несколько концепций радио-видения с несинхронизированными приемником и источником излучения.

## 2. Методы синтеза апертуры с некогерентным источником

В данном разделе представлены методы для осуществления синтеза апертуры по некогерентному источнику для случая монохроматического излучения и для случая псевдослучайной последовательности импульсов.

### 2.1. Монохромный случай

#### 2.1.1. Геометрия задачи

Для непрерывного случая геометрия задачи проиллюстрирована на рисунке 10.

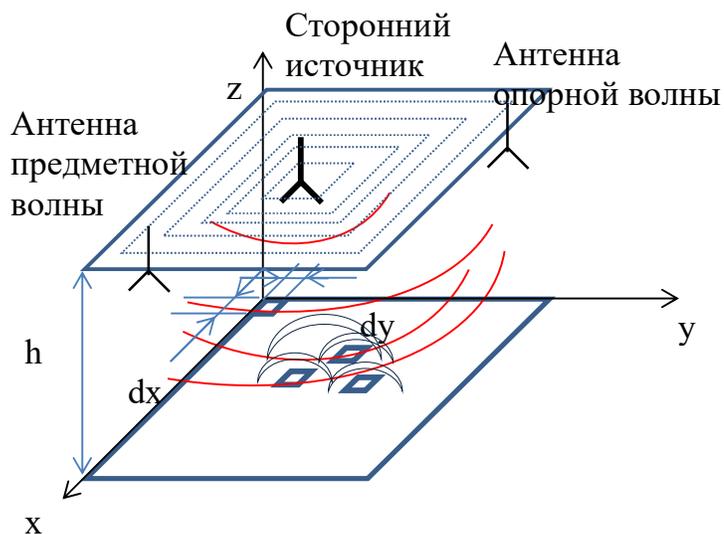


Рисунок 10 – Геометрия задачи в случае монохроматического источника

В модели измерений полагается, что сторонний излучатель неподвижен и находится в одной плоскости с приёмными антеннами. Площадь сканирования представляет собой плоскую, прямоугольную фигуру, параллельную плоскости сканирования. Траектория сканирования производится линейно с шагом  $\sim 0.4$  см. Размеры неоднородностей задаются - не менее половины длины волны. В соответствии представленной конфигурации поставлена прямая задача рассеяния излучения на зондируемых объектах и обратная – восстановление их изображения.

### 2.1.2. Прямая задача

Для решения прямой задачи воспользуемся подходом РСА с когерентным излучением в скалярном приближении и без учета поглощения. Пусть имеется некоторое распределение источников излучения  $j(\mathbf{r}_1)$  в объеме  $V_1$ . Тогда поле в точке  $\mathbf{r}$  однородной среды должно удовлетворять уравнению Гельмгольца:

$$\Delta E(\mathbf{r}) + k^2 E(\mathbf{r}) = -j(\mathbf{r}_1). \quad (2.1)$$

Выражение для поля  $E(\mathbf{r})$  находится с помощью метода функции Грина, которая в свою очередь удовлетворяет уравнению Гельмгольца для свободного пространства:

$$\Delta G_0(\mathbf{r}) + k^2 G_0(\mathbf{r}) = -\delta(\mathbf{r}) \quad (2.2)$$

Решая систему уравнений (2.1) и (2.2), выражение для поля в точке  $\mathbf{r}$  однородной среды можно записать:

$$E(\mathbf{r}) = \iiint_{V_1} j(\mathbf{r}_1) G_0(\mathbf{r}_1 - \mathbf{r}) d^3 \mathbf{r}_1 \quad (2.3)$$

Здесь  $G_0(\mathbf{r}) = \exp(ik|\mathbf{r}|) / 4\pi|\mathbf{r}|$  - функция Грина свободного пространства, волновое число  $k = 2\pi / \lambda = 2\pi f / c$  связано с частотой используемого излучения  $f$ . Для случая сканирования в плоскости  $OXY$  -  $|\mathbf{r}| = \sqrt{x^2 + y^2 + h^2}$ , где  $h$  расстояние от плоскости сканирования до плоскости расположения объектов.

Решение прямой задачи, представленной в виде уравнения (2.3), полагается, что излучение рассеивается/отражается однократно, в рамках приближения Борна, отсутствуют эффекты затенения, а объектами зондирования выступают отраженные источники вторичного излучения.

### 2.1.3. Обратная задача

Для нахождения распределения источников  $j(\mathbf{r}_1)$  по измерения поля  $E(\mathbf{r})$  необходимо решить интегральное уравнение (2.3). Обратимся снова к случаю когерентной томографии. Решение обратной задачи удобно представить с помощью метода обратной фокусировки [8]. Осуществляется вышесказанное следующими преобразованиями:

$$U(\mathbf{r}_F) = \iint_S W(\mathbf{r}_F, \mathbf{r}_S) E(\mathbf{r}_S) dS = \iiint_{V_1} j(\mathbf{r}_1) Q(\mathbf{r}_F, \mathbf{r}_1) d^3\mathbf{r}_1 \quad (2.4)$$

Здесь  $W(\mathbf{r}_F, \mathbf{r}_S) = G_0^*(\mathbf{r}_F - \mathbf{r}_S)$  - фокусирующая функция, и

$$Q(\mathbf{r}_F, \mathbf{r}_1) = \iint_S W(\mathbf{r}_F, \mathbf{r}_S) G_0(\mathbf{r}_S - \mathbf{r}_1) dS$$

Функция  $Q(\mathbf{r}_F, \mathbf{r}_1)$  является аппаратной функцией томографической системы и описывает отклик системы на точечный источник, когда  $j(\mathbf{r}_1) = \delta(\mathbf{r}_1 - \mathbf{r}_0)$ , где  $\mathbf{r}_0$  истинное положение этого источника. При достаточно большой базе зондирующей системы функция  $Q(\mathbf{r}_F, \mathbf{r}_1)$  становится хорошо локализованной так, что  $Q(\mathbf{r}_F - \mathbf{r}_1) \approx \delta(\mathbf{r}_F - \mathbf{r}_1)$ . Тогда согласно выражениям (2.4)  $j(\mathbf{r}_1) \sim U(\mathbf{r}_F)$ .

Важно подчеркнуть, что в каждой точке наблюдения отраженное излучение регистрируется с учетом компонент полного комплексного поля, т.е. с учетом и амплитуды и фазы. Этому соответствует когерентная томография или голография.

Теперь рассмотрим случай некогерентной томографии, когда исключается возможность прямых фазовых измерений. Пусть у нас имеется  $E_0 = A_0 \exp\{i\varphi_0\}$  - опорная волна,  $E_1 = A_1 \exp\{i\varphi_1\}$  - предметная волна.  $A_0, A_1$  - амплитуды соответствующих волн. Будем считать, что  $A_0 \gg A_1$ . Для интенсивности суммарного поля (квадрата интенсивности поля) можно записать:

$$I = |E_0 + E_1|^2 = A_0^2 + A_1^2 + 2A_0A_1 \cos(\varphi_1 - \varphi_0),$$

где  $\varphi = \varphi_1 - \varphi_0 = 2k|\mathbf{r}_1 - \mathbf{r}_0|$  - разность фаз предметной и опорной волн на частоте  $f$ . При  $A_0 \gg A_1$  всегда можно выделить переменную часть интенсивности суммарного поля записав

$$\Delta A^2 = I^2 - \langle I^2 \rangle = 2A_0A_1 \cos(\varphi).$$

Важно, что это выражение с точностью до постоянного множителя совпадает с одной из квадратур рассеянного поля, которое необходимо для использования РСА-технологии и восстановления изображения.

В нашем случае, для монохроматического излучения, когда источники распределены на известной плоскости  $h_0$ , соответственно  $j(\mathbf{r}) = j_s(\boldsymbol{\rho})\delta(z - h_0)$ . При регистрации поля  $E(\mathbf{r})$  на другой плоскости  $z$ , можно записать его пространственный спектр, согласно формуле Вейля:

$$E(\boldsymbol{\kappa}_\perp, z) = \iint \exp\{-i\boldsymbol{\kappa}_\perp \boldsymbol{\rho}\} E(\boldsymbol{\rho}, z) (d^2\boldsymbol{\rho}_\perp) = \frac{i}{2\kappa_z} j_s(\boldsymbol{\kappa}_\perp) \exp\{i\kappa_z(h_0 - z)\},$$

где  $j_s(\boldsymbol{\kappa}_\perp) = \iint j_s(\boldsymbol{\rho}) \exp\{i\boldsymbol{\kappa}_\perp \boldsymbol{\rho}\} (d^2\boldsymbol{\rho})$  - спектр распределения поверхностного тока. С учетом того, что внешняя подсветка считается монохроматической, и сканирование производится по известной плоскости, метод обратной фокусировки переходит в метод согласованной фильтрации. Согласно упомянутому методу [7], решение обратной задачи представляется в виде:

$$W(x, y) \sim j_s(\mathbf{r}_1, h_0) \approx F^{-1} \left[ \frac{1}{2\kappa_z 2\kappa_z^*} \exp\{i\kappa_z z_F\} E(\boldsymbol{\kappa}_\perp, z) \right] \quad (2.5)$$

Где  $F^{-1}$  оператор обратного преобразования Фурье,  $W(x, y)$  - восстановленное изображение.

#### 2.1.4. Численное моделирование

Прямая и обратная задачи были смоделированы в программной среде Mathcad. Были проведены эксперименты с варьированием количества точек зондируемой сцены, высоты  $h$ , частоты  $f$ . Для частоты 10 ГГц была смоделирована функция Грина (рисунок 10). Расстояние до плоскости

зондирования  $h = 20$  см, площадь сканирования 26,4 на 26,4 см с шагом  $\sim 0,44$  см.

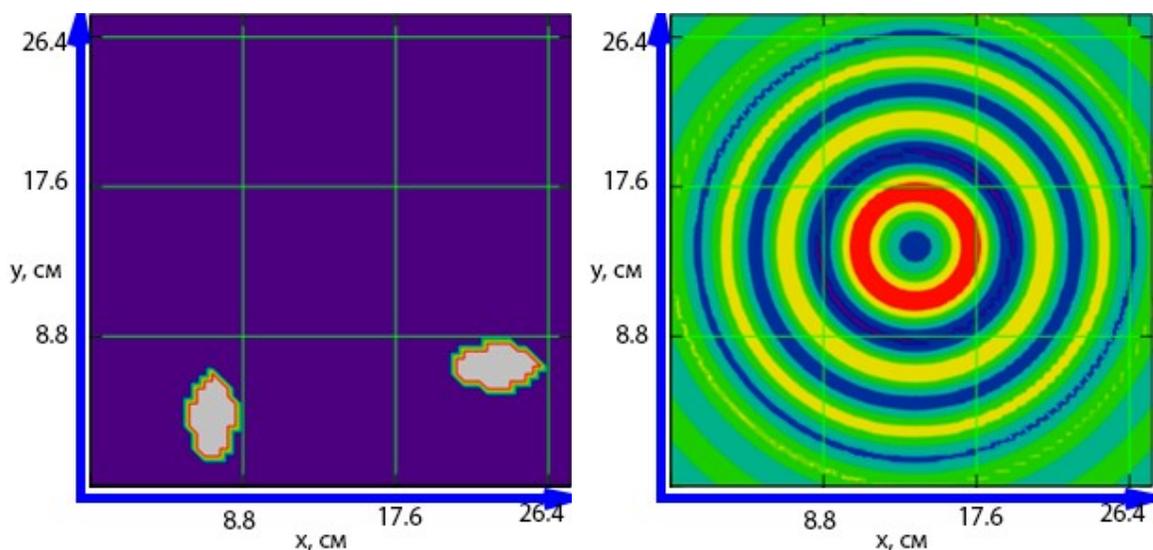


Рисунок 11 – Расположение объектов (слева), действительная часть функции Грина (справа)

Результаты решения прямой и обратной задачи представлены на рисунках 12-16.

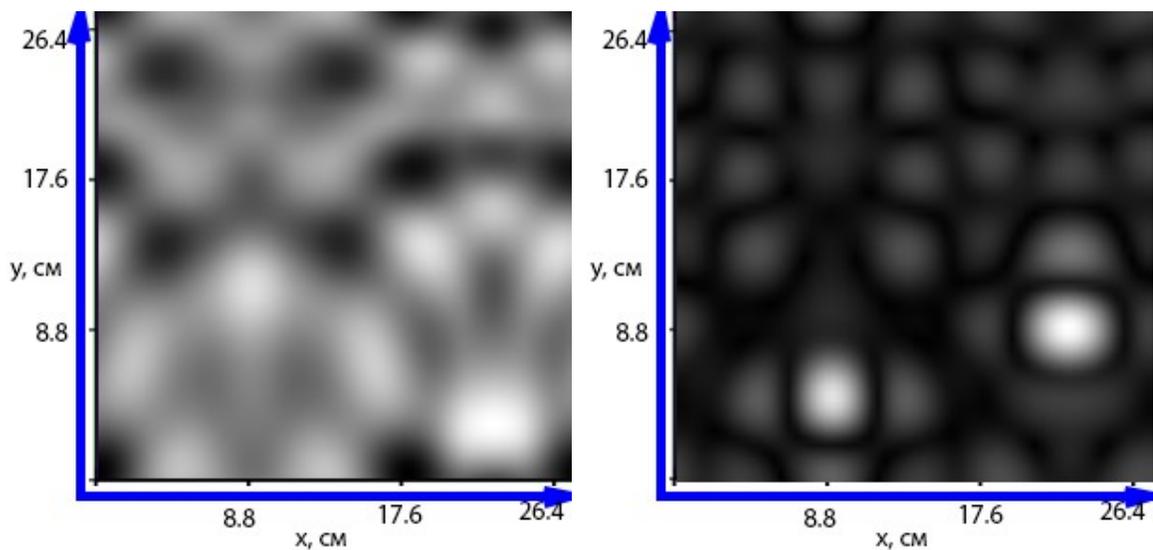


Рисунок 12 – Восстановленное изображение (слева), PCA представление поля (справа)

Из Рисунка 12 можно заметить, что положения и координаты объектов восстанавливаются с незначительными артефактами. РСА представление поля является результатом регистрации интерференционной картины области сканирования.

Для более явного наблюдения интерференционной картины следует увеличить площадь синтезирования. Для тех же самых объектов результат восстановления представлен на рисунке 13

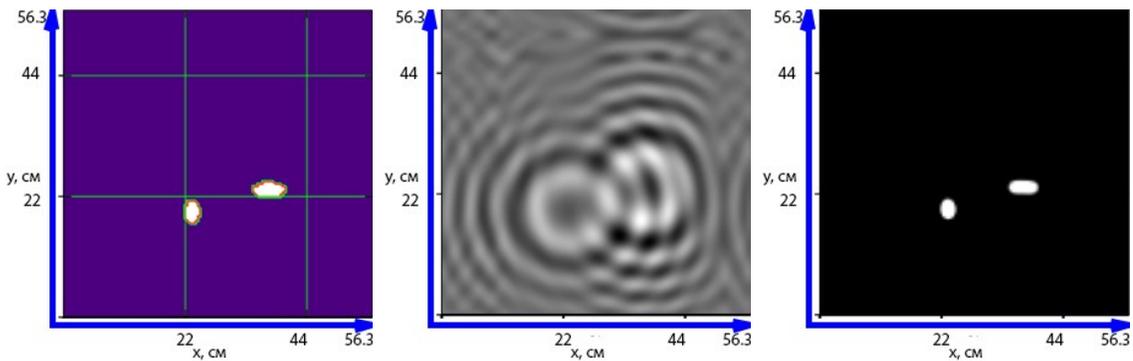


Рисунок 13 – Расположение объектов (слева), РСА представление поля (посередине), восстановленное изображение (справа)

На рисунке 13, площадь синтезирования составляет  $\sim 56,3$  см<sup>2</sup>, на высоте  $h$  20 см, с частотой подсветки 10 ГГц.

Для случая объектов не простой формы, множество которых превалирует, также проводилось моделирование, с разной площадью сканирования.

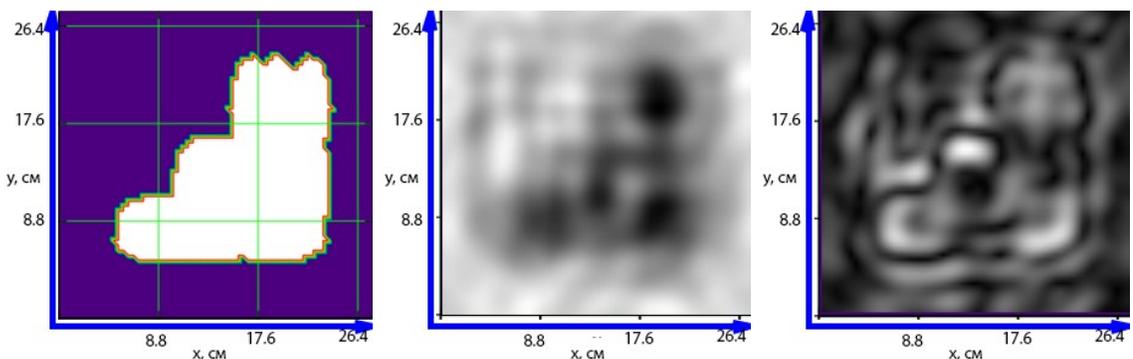


Рисунок 14 – Расположение объектов (слева), РСА представление поля 26,4 см<sup>2</sup> на частоте 10 ГГц (посередине), восстановленное изображение (справа)

При площади сканирования  $\sim 26,3 \text{ см}^2$  на частоте 10 ГГц с шагом 0,44 см и сканирования больших объектов (сравнимых с площадью сканирования), восстановление изображения усложняется. В данном случае требуется введение регуляризующих параметров при восстановлении изображения, или постобработка восстановленного изображения.

Если имеется возможность увеличить площадь сканирования в четыре раза, то восстановление формы объектов заметно изменяется (рисунок 15).

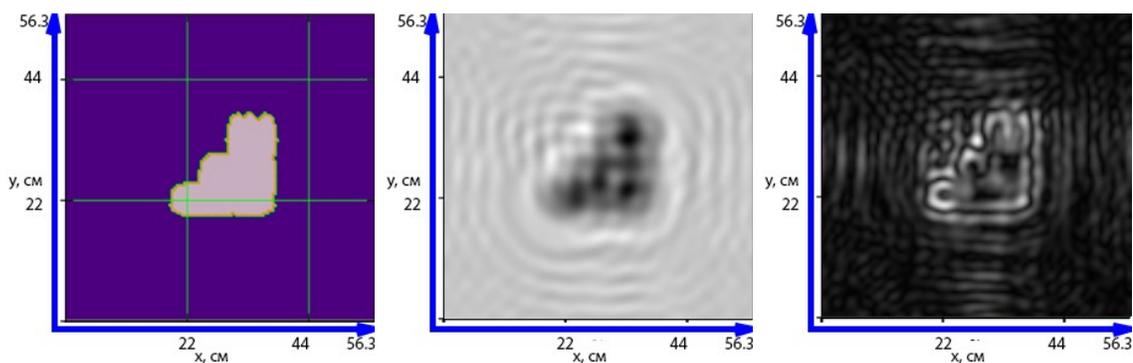


Рисунок 15 – Расположение объектов (слева), РСА представление поля на площади  $56,3 \text{ см}^2$  с частотой 10 ГГц (посередине), восстановленное изображение (справа)

Для случая зондирования с частотой 2,4 ГГц и площадью сканирования  $26,3 \text{ см}^2$  не удастся восстановить изображение, т.к. в этой площади размещается не более двух интерференционных экстремумов. При таких условиях практически невозможно восстановить изображение.

Увеличив площадь сканирования в четыре раза, появляется возможность обнаружения объектов с частотой зондирования 2,44 ГГц (рисунок 16).

Таким образом, этот подход позволяет восстанавливать изображения без изначальной фазовой информации.

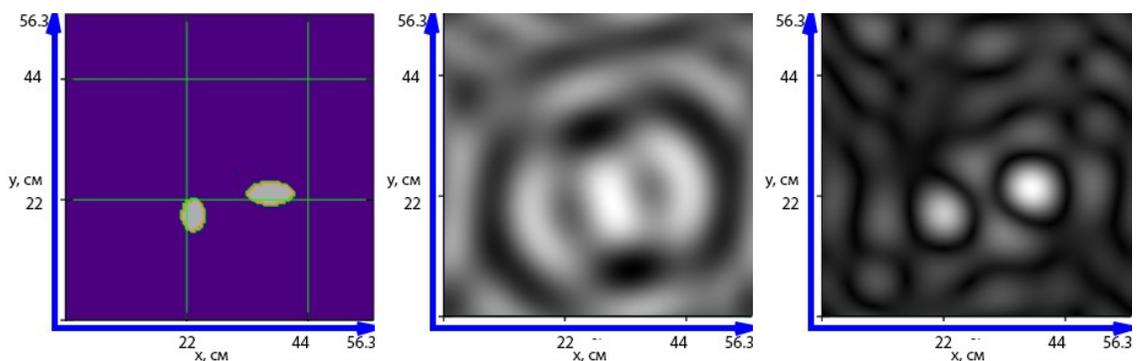


Рисунок 16 – Расположение объектов (слева), PCA представление поля на площади  $56,3 \text{ см}^2$  с частотой  $2,44 \text{ ГГц}$  (по середине), восстановленное изображение (справа)

## 2.2. Случай с некогерентной пачкой импульсов

### 2.2.1. Геометрия задачи

Для случая некогерентной последовательности импульсов, геометрия задачи представлена на рисунке 17.

Как и в случае для монохроматического источника, полагается, что сторонний излучатель неподвижен. При этом приёмники излучения сфокусированы по направлению прихода отраженного излучения, а один из приёмников регистрирует опорный пространственно-временной сигнал. Точки приёма и зондируемые объекты лежат на одной плоскости.

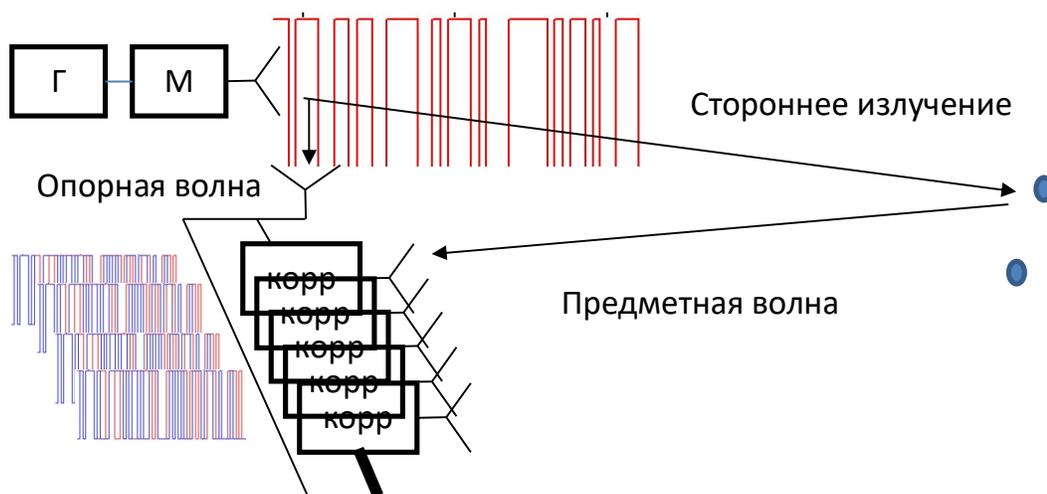


Рисунок 17 – Геометрия задачи в случае зондирования некогерентной пачкой импульсов

Имитационное моделирование с представленной выше конфигурацией было проведено в естественной системе единиц или в так называемой планковской системе, взяв за 1 скорость распространения волн. Помимо этого, нет конкретной привязки к длине волны или типу излучения. Такой подход позволяет существенно упростить расчеты и обобщить задачу на любой тип излучения.

### 2.2.2. Прямая задача

При излучении некогерентной пачки импульсов, пространственно-временной сигнал записывается как

$$E(\mathbf{r}, t) = \iiint_{V_1} j(\mathbf{r}_1) \frac{S_0(t - |\mathbf{r}_1 - \mathbf{r}_0|/c)}{4\pi |\mathbf{r}_1 - \mathbf{r}_0|} d^3\mathbf{r}_1, \quad (2.6)$$

где  $S_0(t)$  – функция, описывающая некогерентную пачку импульсов,  $\mathbf{r}$  – точка наблюдения,  $j(\mathbf{r}_1)$  – распределение источников. В случае  $j(\mathbf{r}_1) = j_0\delta(\mathbf{r}_1 - \mathbf{r}_0)$  точечного источника, измеряемое поле (2.6) регистрируется как:

$$E(\mathbf{r}, t) = j_0 \frac{S_0(t - |\mathbf{r}_1 - \mathbf{r}_0|/c)}{4\pi |\mathbf{r}_1 - \mathbf{r}_0|}.$$

Представленная зависимость носит название дифракционной гиперболы, т.к. асимптотически стремится к гиперболе [7]. Выражение (2.6) является решением прямой задачи.

### 2.2.3. Обратная задача

Для нахождения распределения источников  $j(\mathbf{r}_1)$  предлагается использовать метод миграции во временной области. При корректном расчете запаздываний опорной и предметной волны достаточно просуммировать все значения сигналов по соответствующей гиперболе с учетом задержек.

Задав точку фокусировки  $\mathbf{r}_F$ , можно провести сканирование по всему интересующему пространству и записать уравнение следующего вида:

$$U(\mathbf{r}_F) = \iiint_{V_1} j(\mathbf{r}_1) \delta_S(\mathbf{r}_1, \mathbf{r}_F) d^3 \mathbf{r}_1,$$

где  $\delta_S(\mathbf{r}_1, \mathbf{r}_F)$  – аппаратная функция томографической системы, описывающая отклик на точечный источник,  $U(\mathbf{r}_F)$  – сфокусированное излучение. Как и в случае с монохроматическим излучением, размеры апертуры и плотность сканирования сказывается на виде аппаратной функции. При большом и плотном синтезе апертуры  $\delta_S(\mathbf{r}_1, \mathbf{r}_F) \approx \delta_S(\mathbf{r}_1 - \mathbf{r}_F)$ . Тогда обратная задача приближенно решается следующим выражением:

$$j(\mathbf{r}_1) \sim U(\mathbf{r}_F) = \sum_m E(\mathbf{r}_m, t_m = |\mathbf{r}_m - \mathbf{r}_F|/c), \quad (2.7)$$

где  $\mathbf{r}_m$  – точки наблюдения поля [7].

#### 2.2.4. Численное моделирование

Моделирование прямой и обратной задачи производилось в среде Mathcad. Сетка координат вдоль апертуры составляет 64 точки (приёмников) с единичным шагом. Сетка координат по глубине для восстанавливаемого изображения составляет 128 точек.

Для вычисления прямой задачи необходимо смоделировать сам сигнал (рисунок 18), а также задержки сигнала от объектов. Сигнал задается генерацией псевдослучайной последовательности импульсов и после центрирования выглядит следующим образом:

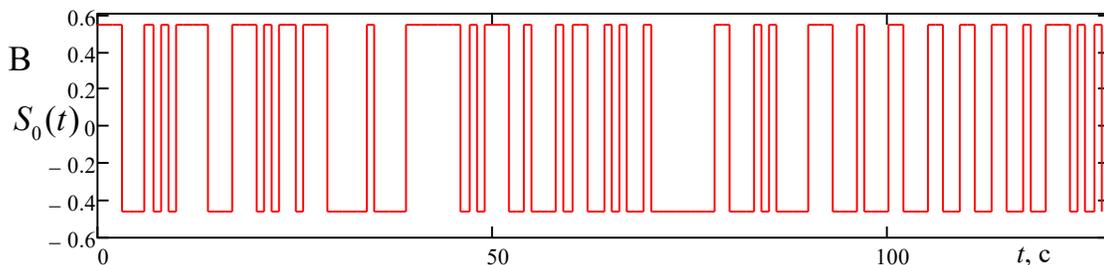


Рисунок 18 – Форма опорного сигнала

Далее производится расчет задержек сигналов от объектов. В случае, когда источник, приемники и зондируемые объекты лежат на одной плоскости, то задержка легко рассчитывается следующим образом:

$$T_m = \frac{2\sqrt{y_1^2 + (x_m - x_1)^2}}{c},$$

где  $y_1$  и  $x_1$  - координаты объекта,  $x_m$  - точка приема,  $c$  - скорость распространения сигнала. Для простоты будем считать, что задержки сигнала происходят на дискретные (целые) величины времени. Учитывая, что время регистрации сигнала ограничено, то максимальная глубина  $\max(y)$  зондирования составит величину, пропорциональную  $1/2\Delta tc$ , где  $\Delta t$  время регистрации опорного сигнала. Таким образом, переходя к пространственному представлению задержек можно перейти к расчету прямой задачи или расчету дифракционных гипербол.

Расчет дифракционных гипербол осуществляется сверткой опорного сигнала  $S_0(x_0, y)$  с задержанным сигналом вдоль апертуры  $S(x_m, y)$ :

$$H(x, y) = F^{-1}[F \{S_0(x_0, y)\} F \{S(x_m, y)\}^*],$$

здесь  $H(x, y)$  представляет собой дифракционные гиперболы (рисунок 19),  $F$  и  $F^{-1}$  - операторы прямого и обратного преобразования Фурье соответственно,  $*$  - комплексное сопряжение.

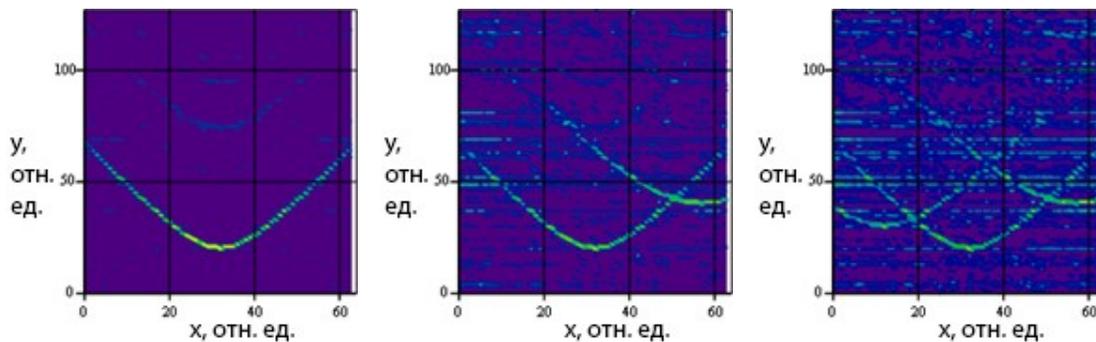


Рисунок 19 – Дифракционные гиперболы для одного (слева), двух (посередине) и трех (справа) точечных объектов

Восстановление изображения объектов методом миграции представлено на рисунке 20.

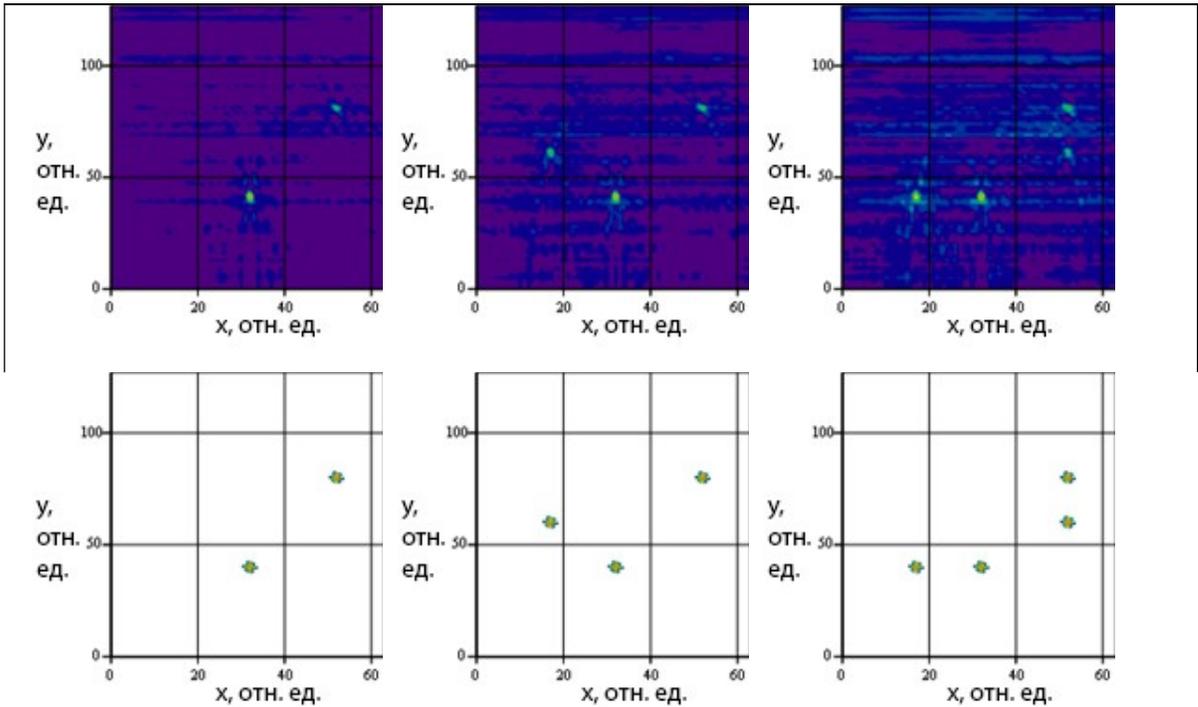


Рисунок 20 – Восстановление изображения (сверху) и расположение точечных источников (снизу), для двух (слева), трех (посередине) и четырех объектов.

### 2.3. Резюме

В данной главе, по результатам численного моделирования, была показана возможность восстановления изображения объектов, подсвеченных стороной подсветкой.

Для случая зондирования с некогерентной пачкой импульсов, можно отметить то, что данная концепция, при ее реализации на техническом уровне для электромагнитных волн, представляется дорогостоящей, т.к. требует высокотехнологичные корреляторы. По результатам моделирования можно заметить, что в восстановленных изображениях присутствуют

незначительные артефакты. Подобные артефакты могут быть сглажены простейшими фильтрами. При использовании волн акустического типа, предложенная технология может стать актуальной.

Для случая монохромной подсветки также заметны артефакты на восстанавливаемых изображениях. Причин возникновения их может быть несколько, например явление Гиббса при вычислении свертки или плохая обусловленность метода решения обратной задачи. Для уменьшения влияния артефактов можно применять пост-обработку изображения или улучшать число обусловленности регуляризацией.

В следующей главе настоящей работы рассматриваются экспериментальные исследования технологии РСА некогерентной подсветкой.

### 3. Экспериментальные исследования

#### 3.1. Устройство измерительной системы

Измерительная система состоит из двух одинаковых приёмных антенн, механического сканера, блока управления сканером, блока передачи данных, коммутации, командного центра и визуализации (компьютер).

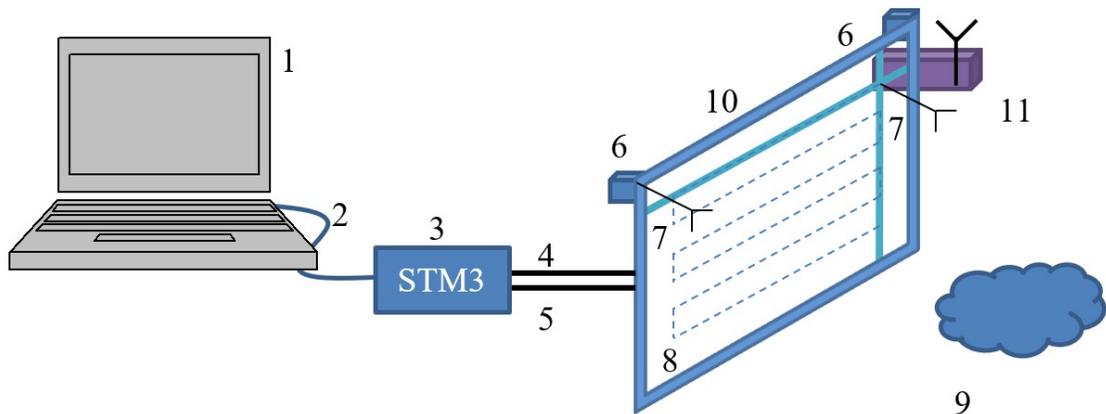


Рисунок 21 – Концепция измерительной системы. 1 – центр управления и обработки данных, 2 – кабель Ethernet, 3 – блок управления сканером и передачи данных, 4 – коаксиальные кабели антенн, 5 – кабели шаговых двигателей, 6 – шаговые двигатели, 7 – приёмные антенны, 8 – траектория сканирования, 9 – объект сканирования, 10 – металлический каркас сканера, 11 – сторонний источник

Приёмные антенны представляют собой симметричные полуволновые диполи, нагруженные на полупроводниковые СВЧ диоды. Было изготовлено две пары приёмных антенн. Одна пара рассчитана на длину волны 12 см, или на частоту  $\sim 2.44$  ГГц. Вторая пара рассчитана на частоту 10 ГГц, что соответствует длине волны 3 см в свободном пространстве. Диполи изготовлены с помощью ЧПУ станка из текстолита толщиной 2 мм.

Подключаются антенны к центральному блоку по коаксиальным кабелям через разъем BNC.

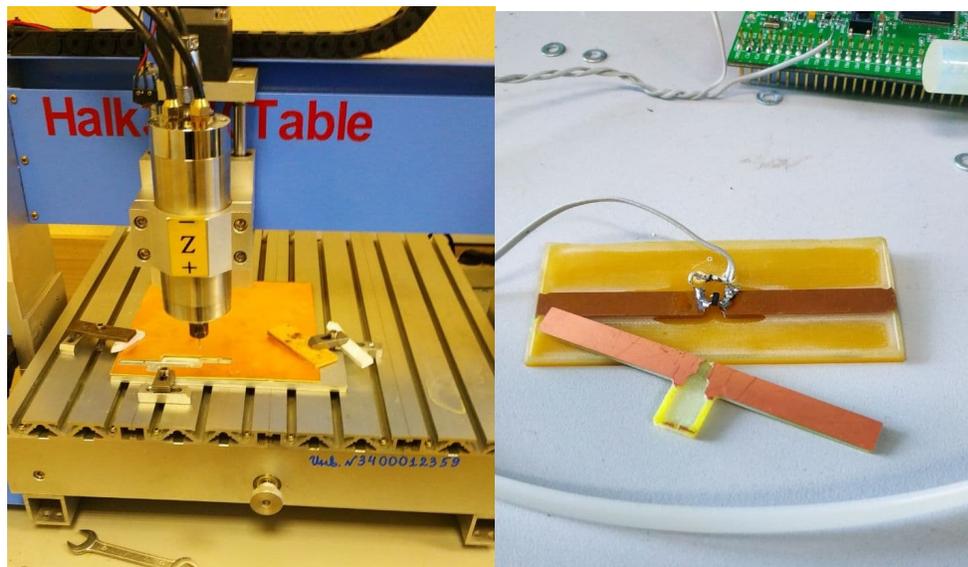


Рисунок 22 – Процесс фрезеровки антенн (слева) и их прототипы (справа)

Механический сканер состоит из металлической рамы, на которой расположены два шаговых двигателя. Вал двигателей приводит в движение направляющие сканера, через ременные передачи по горизонтали и вертикали в одной плоскости. Шаговые двигатели приводятся в движение с помощью драйверов a4988. Драйверы a4988 подключаются к источнику питания 12В и к управляющим контактам step, dir и enable от блока управления.

В качестве блока управления сканером, оцифровки и последующей передачи данных выступает плата с микроконтроллером STM32F4Discovery, дополненная модулем связи Ethernet и усилителями. Семейство микроконтроллеров STM32 построено с использованием 32-рядного ядра Cortex различных версий (в данной работе используется ядро Cortex-M4). Микроконтроллеры данного типа построены на гарвардской архитектуре и имеют 3-ступенчатый конвейер, который уменьшает время исполнения команд. Они разработаны для построения систем с максимальной

энергоэффективностью, и имеют несколько режимов управления энергопотреблением [32].

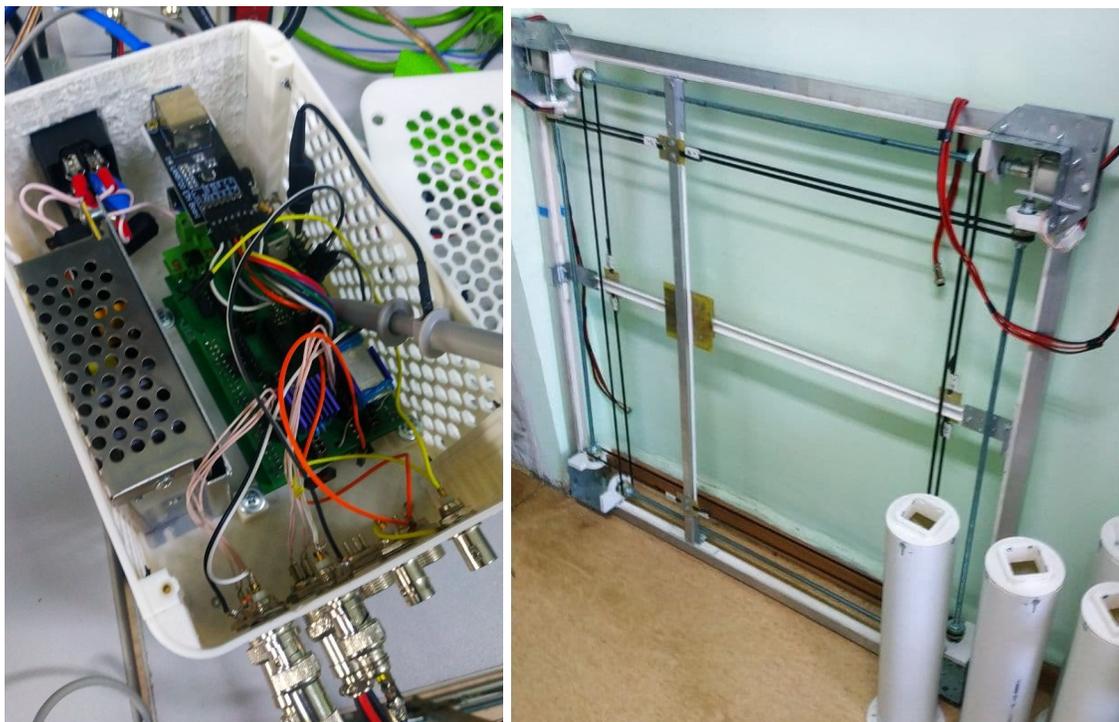


Рисунок 23 – Фотография блока управления сканером, измерения и передачи данных на базе STM32 (слева), внешний вид сканера (справа)

Управление платой осуществляется с компьютера по сети Ethernet. Блок с микроконтроллером STM32 по функционалу можно разделить на несколько частей: управление сканером, оцифровка и передача данных. В прошивке микроконтроллера заранее были прописаны команды для драйвера a4988 (перемещение влево, вправо, вверх, вниз, остановка), команда включения (выключения) АЦП и сохранения (перезаписи) данных в память, команды инициализации сети Ethernet и передачи данных из памяти. Для осуществления полного цикла измерения на управляющем компьютере составлена программа, состоящая из последовательности команд для микроконтроллера.

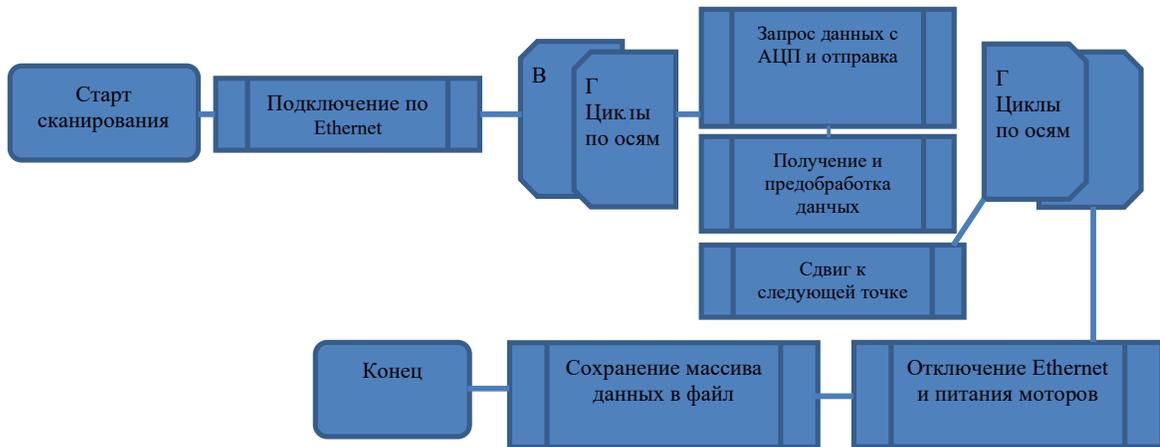


Рисунок 24. Блок схема программы сканирования.

После запуска команды «старт сканирования» происходит инициализация соединения с контроллером по каналу Ethernet. После чего производится запрос на измерение и получение данных с АЦП. Частота дискретизации АЦП составляет  $f = 1$  МГц. При запросе на отправку данных, контроллер осуществляет передачу данных АЦП с помощью DMA (Direct Memory Access) и формирует пакеты данных для дальнейшей передачи по каналу Ethernet на компьютер.

Для регистрации интерференционной картины в области сканирования, регистрируемый сигнал с обеих антенн центрировался, и в каждой точке сканирования рассчитывалась дисперсия измеряемой амплитуды. Далее осуществлялась нормировка и получение фазовой информации:

$$S(x, y) = \left( \frac{A_1(x, y)}{|A_0(x, y)|} - |S_0(x, y, h_0)| \right) \frac{S_0(x, y, h_0)}{|S_0(x, y, h_0)|},$$

где  $A_1(x, y)$  - измеренная амплитуда с предметной антенны,  $A_0(x, y)$  - измеренная амплитуда с опорной антенны,  $S_0(x, y, h_0)$  - функция Грина стороннего источника с известным расстоянием  $h_0$  до зондируемой плоскости, Для восстановления фазы функция  $S(x, y)$  умножается на фазовый множитель опорного сигнала,  $S(x, y)$  - восстановленная фаза.

Далее согласно методу пространственно-согласованной фильтрации осуществляется свертка с комплексно сопряженной функцией Грина:

$$P(x, y) = \iint S(x', y') \frac{\exp\left(-ik\sqrt{(x-x')^2 + (y-y')^2 + h^2}\right)}{\sqrt{(x-x')^2 + (y-y')^2 + h^2}} dx' dy',$$

где  $P(x, y)$  – восстановленное изображение.

### 3.2. Эксперимент по измерению амплитуды сигнала WiFi

Был проведен эксперимент по измерению амплитуды стороннего источника, в качестве которого выступил бытовой WiFi роутер. Для начала было проведено измерение сигнала стороннего источника. На рисунке 25 представлен измеренный сигнал за время 16 мс антенны опорной и предметной волны. Данные измерений с контроллера поступают на вычислительный центр одним массивом данных, в котором четные отсчеты измерены с неподвижной опорной антенны, нечетные – с предметной.

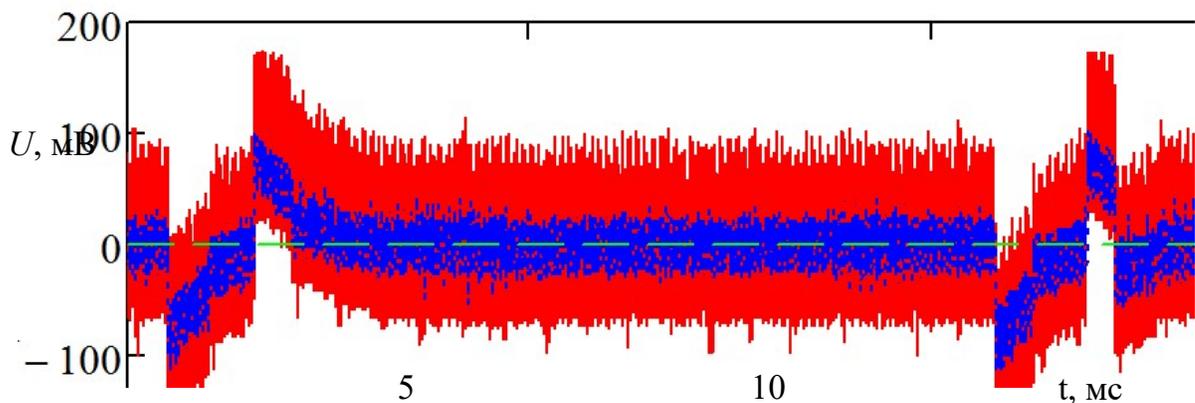


Рисунок 25 – Центрированная амплитуда сигнала от WiFi, измеренная с опорной антенны (красным), с предметной (синим)

По данным измерения, можно заметить амплитудные изменения во времени, которые связаны с модуляцией источника излучения. На

сегодняшний день в технологиях передачи WiFi широко распространены бинарная, квадратичная фазовые модуляции и другие [26]. Для целей радиовидения по технологиям, описанным во второй главе настоящей работы, отсутствуют принципиальные предпочтения к тем или иным видам модуляции и считаются неизвестными.

В эксперименте по работе с излучением WiFi роутера не производилось вмешательства в радиотехническую часть устройства. Для избегания режима «молчания» роутера, была написана программа для ввода в режим передачи и приёма данных роутером по каналу WiFi. Суть программы заключалась в следующем. При запуске программы со стороннего устройства, подключенного к сети роутера, запускался обмен пакетами UDP (User Datagram Protocol) с частотой 10 мс. Таким образом, роутер выходил из режима «молчания».

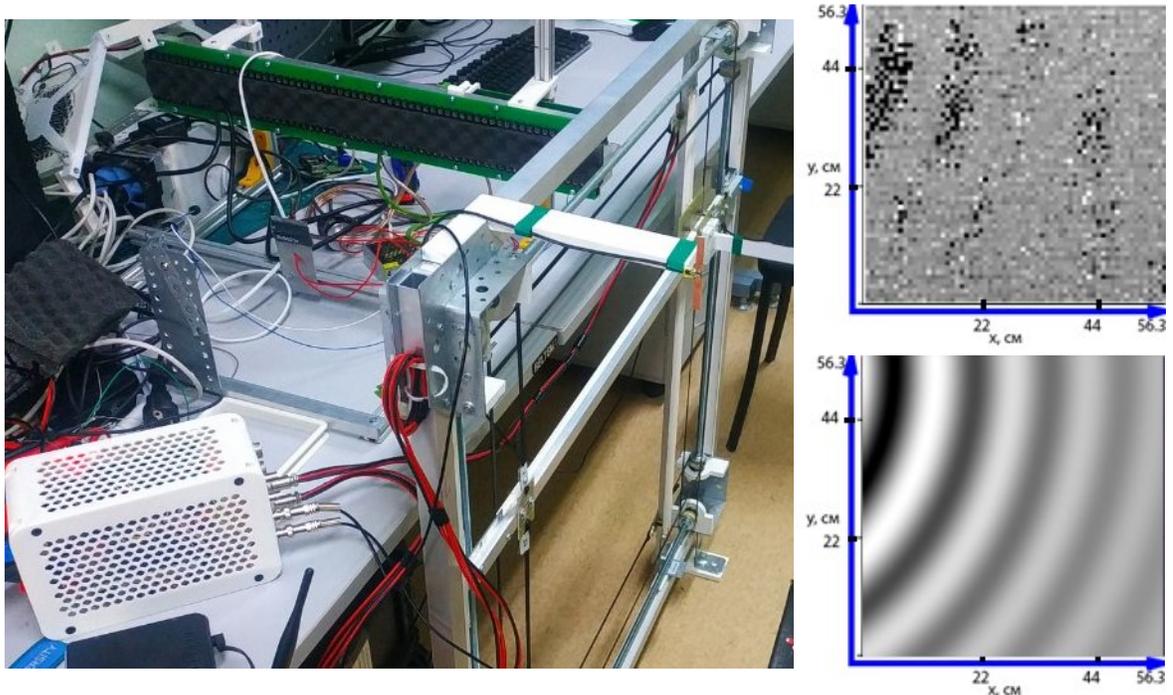


Рисунок 26 – Фотография эксперимента (слева), результат измерения амплитуды поля в области сканирования (сверху), смоделированная действительная часть функции Грина сторонней подсветки (снизу)

Измерения проводились на плоскости 56x56 см с шагом  $\sim 0,87$  см. На рисунке 26, в качестве зондируемого объекта использовался лист текстолита с размерами 30x40 см. Объект располагался на расстоянии 35 см от плоскости сканирования. WiFi роутер расположен на расстоянии  $\sim 65$  см и  $\sim 25$  см от центра плоскости сканирования, по горизонтальной и вертикальной осям соответственно.

Из рисунка 26, можно заметить, что прослеживаются интерференционные экстремумы, качественно совпадающие с функцией Грина источника, с аналогичными координатами местоположения. Однако не наблюдается явная интерференция с зондируемым объектом, что исключает возможность восстановления изображения подсвечиваемого объекта.

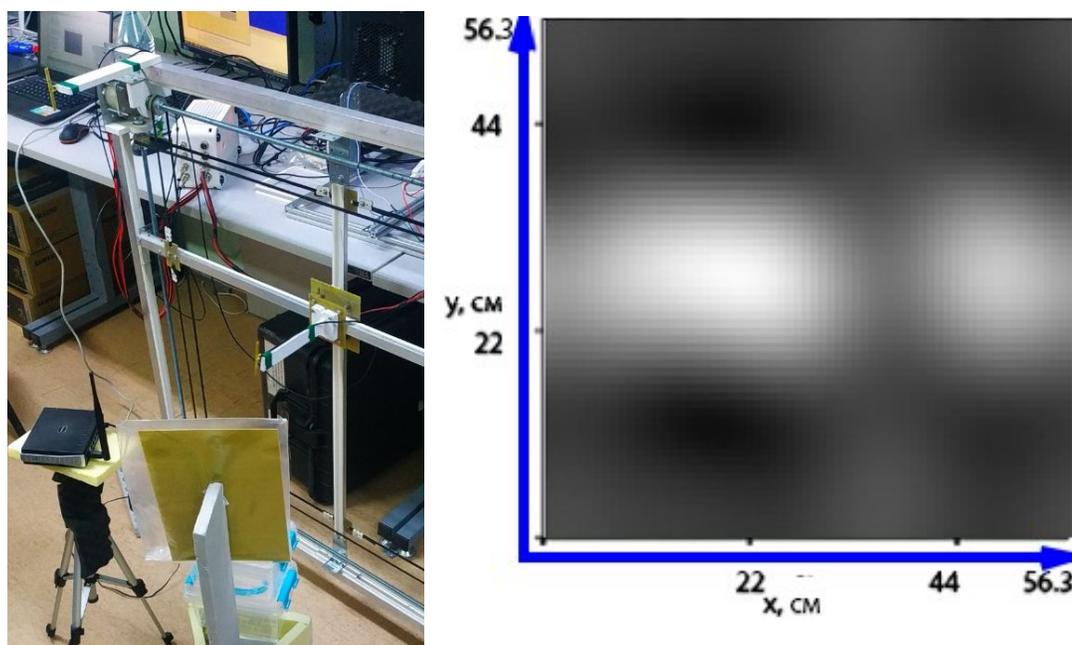


Рисунок 27 – Фотография эксперимента (слева), визуализация объектов (справа)

Также был проведён эксперимент по измерению поля, в конфигурации близко расположенных объекта и стороннего источника (рисунок 26 справа). В данном эксперименте расстояние от плоскости сканирования, до ближайшей точки объекта составляет  $\sim 25$  см.

В эксперименте с конфигурацией близко расположенных источника и объекта интерференционная картина не была зарегистрирована. Однако имеется возможность визуализировать сам сторонний источник и область отражения от объекта (рисунок 27 справа).

В ходе проведения и обработки экспериментальных данных, были выявлены недостатки схемы измерений, такие как малая площадь сканирования, низкая чувствительность антенны предметной волны. В связи с этим были проведены дополнительные экспериментальные исследования со сторонним источником 10 ГГц излучения, частично компенсирующие недостатки, имеющиеся на данном этапе.

### **3.3. Эксперимент по измерению амплитуды излучения длиной волны 3см и 8,5 мм**

В эксперименте с использованием стороннего излучения частотой 10 ГГц, был использован ЖИГ (железо итриевый гранат) резонаторный СВЧ генератор (HP/Agilent 5086-7343 от 5.9 до 12.4 ГГц) с антенной типа «улитка». Этот источник используют в различных видах радиолокации, в частности георадарах подповерхностного зондирования [33].

Источник запитывался модулированным знакопеременным сигналом, амплитудой ~5 В и различными частотами от 7 до 70 Гц (рисунок 28). Потребление тока СВЧ генератора составило ~160-180 мА.

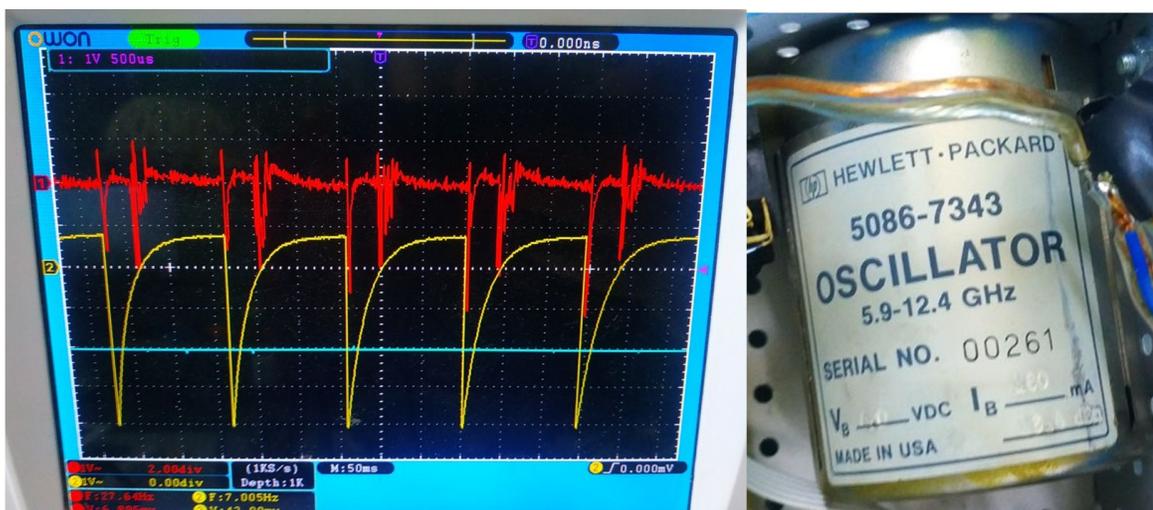


Рисунок 28 – Форма сигнала питания СВЧ генератора (слева желтым), регистрация опорной волны (слева красным), фото СВЧ генератора

Из эксперимента с источником WiFi была выявлена недостаточная чувствительность предметной антенны и, в связи с этим был добавлен дополнительный каскад усиления для антенны предметной волны. Обработка сигналов с антенн при этом осталась прежняя.

В отличие от эксперимента с источником WiFi, в данном эксперименте угол падения волны стороннего источника приблизительно составлял 90 градусов. Т.е. излучатель и объект находились друг напротив друга, а сканирование производилось в плоскости между ними. Для этого была модернизирована сканирующая платформа (рисунок 29). Модернизация заключалась в добавлении радиопрозрачной выноски предметной антенны. Для данной конфигурации зондирования это стало необходимым, т.к. металлические направляющие сканера вносят интерференционные искажения.

Площадь сканирования в данной конфигурации составила  $\sim 26 \times 26$  см с шагом 0,44 см. Расстояние от плоскости сканирования до объекта составляло  $\sim 18$  см.

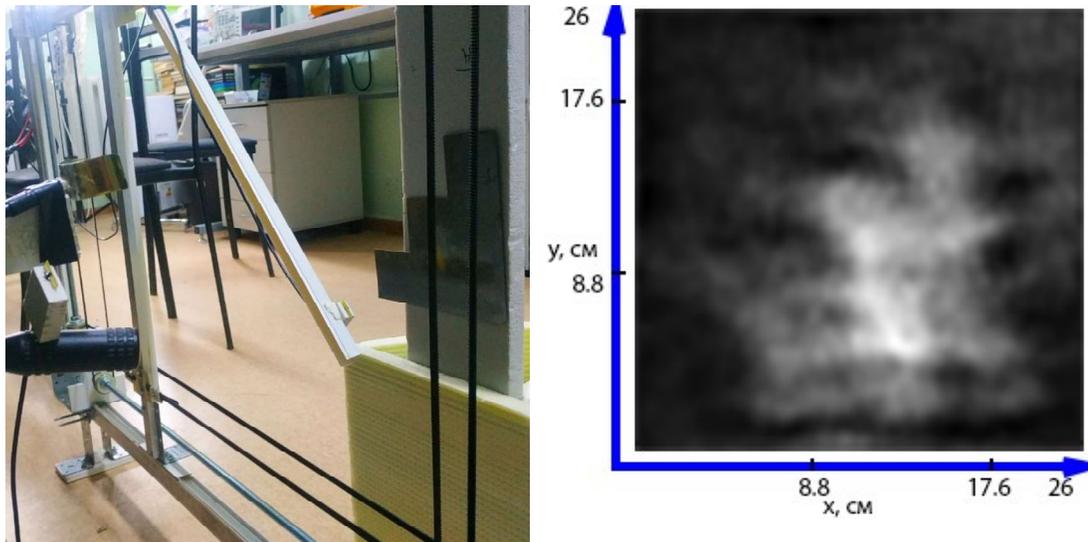


Рисунок 29 – Фото эксперимента (слева), визуализация объекта (справа)

По результатам зондирования удалось визуализировать объект, но отсутствует возможность синтеза апертуры, т.к. интерференционная картина наблюдается слабо и недостаточно для синтезирования апертуры.

Также проведён эксперимент с зондированием плоского объекта с имитацией плоской опорной волны – когда излучающая антенна размещалась рядом с приёмной (рисунок 30). Для этого была использована узкополосная патч-антенна на 10 ГГц. В результате измерений был получен сигнал достаточный для обнаружения объекта (рисунок 31).



Рисунок 30 – Фотографии эксперимента с радиоголографическими измерениями на частоте 10 ГГц

В данном случае, как и в предыдущих обработка не проводилась, поскольку уровень сигнала не достаточен для регистрации интерференционной картины.

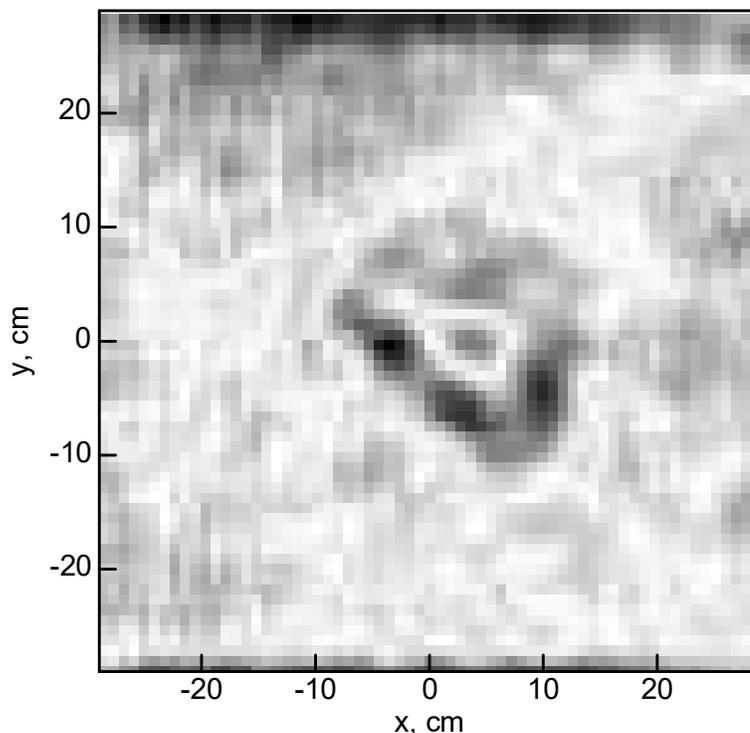


Рисунок 31 – Радиоизображение тестового объекта на частоте 10 ГГц.

Более высокое отношение сигнал-шум удалось достичь при зондировании с помощью ультразвуковых волн в воздухе на частоте 40 кГц (длина волны 8,5 мм). Излучатель располагался за областью сканирования и облучал сферической волной приёмник (рисунок 33).

В результате измерений получено распределение амплитуды ультразвукового поля при наличии тестового объекта (рисунок 34 а) и без тестового объекта (рисунок 34 б), то есть только опорный сигнал.

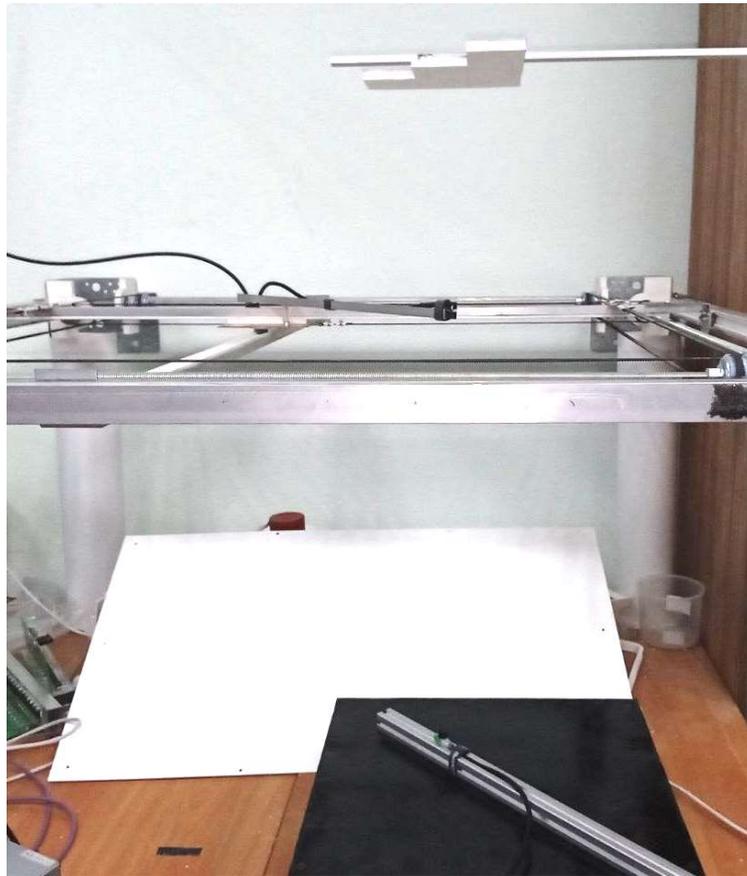


Рисунок 32 – Эксперимент по ультразвуковой голографии в воздухе на частоте 40 кГц, с точечным неподвижным опорным источником.

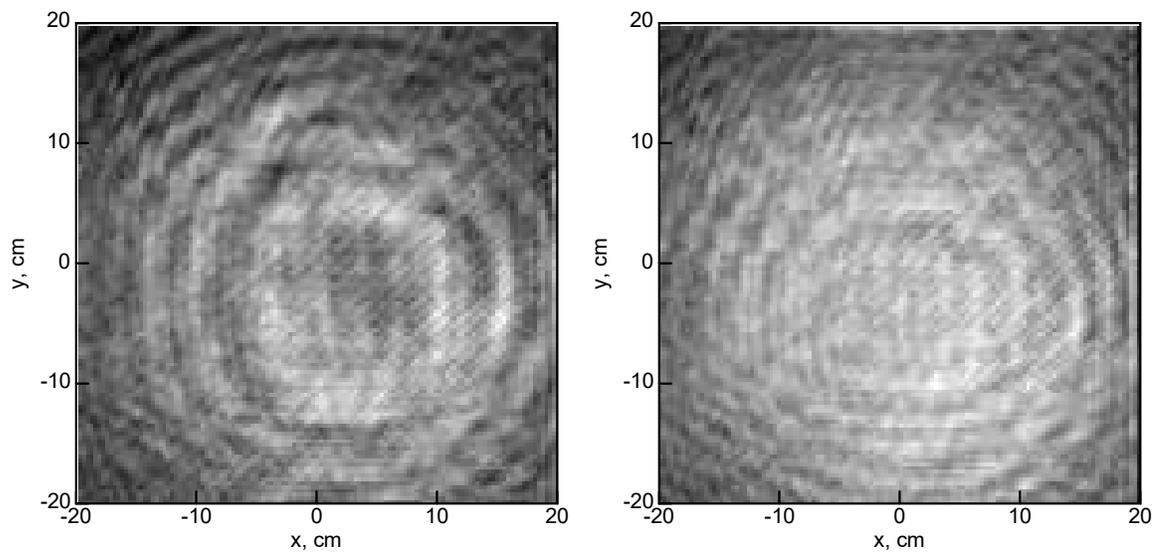


Рисунок 34 – Результаты измерения амплитуды ультразвукового поля с тестовым объектом (слева) и без тестового объекта (справа)

После вычисления квадратуры предметного сигнала (рисунок 35а) и обработки восстановлено изображение объекта (рисунок 35б).

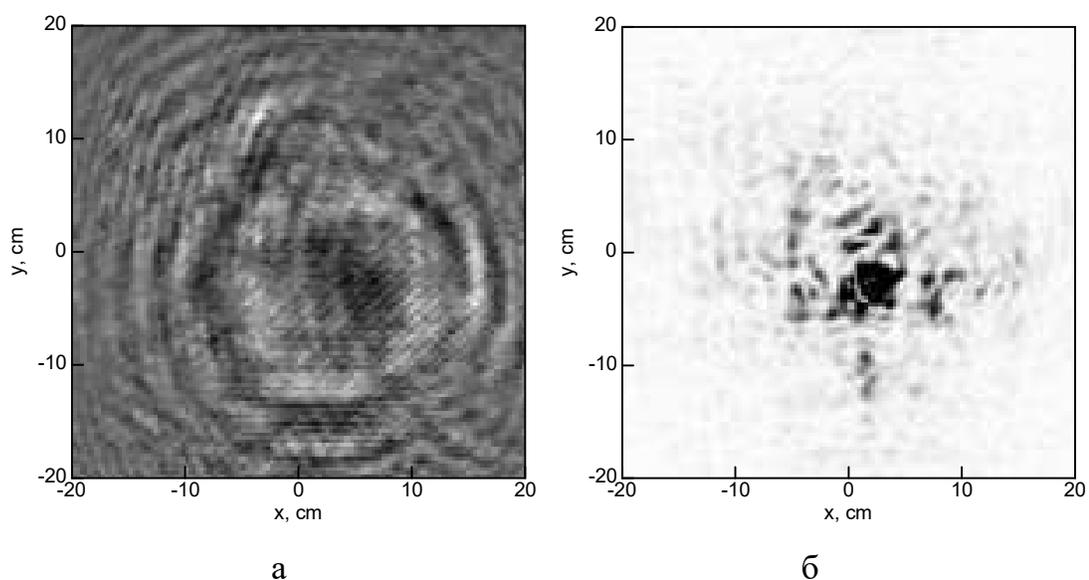


Рисунок 35 – Восстановленная квадратура предметного сигнала (а) и восстановленное изображение объекта (б)

Изображение объекта восстановлено не достаточно отчётливо, что связано с шумами измерений и неточным совпадением опорного сигнала в двух измерениях. Кроме того, необходимое превышение амплитуды опорной волны над предметной выполняется не во всех точках измерений.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В настоящей диссертационной работе были получены следующие основные результаты:

Смоделирована прямая и обратная задача синтеза апертуры по стороннему монохроматическому источнику. Было показано восстановление фазовой информации, по данным амплитуды поля интерференции. С помощью восстановленной фазы показана реконструкция изображения.

По результатам численной модели продемонстрирована возможность использования сторонней подсветки для восстановления изображения миграционными алгоритмами во временной области.

Рассмотрены радиоголографические схемы измерений с различным расположением опорного источника. Экспериментальные исследования радиодиапазоне на частотах 2,4 ГГц и 10 ГГц и на ультразвуковых волнах в воздухе на частоте 40 кГц показали возможность визуализации рассеивающих объектов.

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

- 1 Bovenga F. Synthetic Aperture Radar (SAR) Techniques and Applications // Sensors. – 2020. – Vol. 20. – pp. 1851 – 1870.
- 2 Phase as the Basis for Wave Vision // VOL.P. Yakubov, R. M. Makhmanazarov [et al.] // IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering. – 2019. – Vol. 516. – pp. 012058 – 012068.
- 3 Electron Tomography Three-Dimensional Imaging with the Transmission Electron Microscope / Frank J. – М.: Boston: Springer, 1992. – 399 р.
- 4 Томография ионосферы / Куницын В.Е., Терещенко Е.Д – М.: Наука, 1991. – 176 с.
- 5 Radon, J. On the determination of functions from their integral values along certain manifolds // IEEE Transactions on Medical Imaging. – 1986. – Vol. 5(4). – P. 170–176.
- 6 Преобразование Радона в радиоволновой томографии: метод. указания / Д.В.Лосев. – Томск: Томский Государственный Университет, 2007. – 23 с.
- 7 Обратные задачи радиофизики: учеб. пособие / Якубов В.П., Шипилов С.П. – Томск: Изд-во НТЛ, 2016. – 164 с.
- 8 Радиоволновая томография / В.П.Якубов [и др.]. – М.: Изд-во НТЛ, 2016. – 264 с.
- 9 Polarimetric radar imaging: from basics to applications / Lee J.S., Pottier E. – М.: Boca Raton: CRC Press Taylor & Francis Group, 2009. – 438 р.
- 10 JAXA. Advanced Land Observing Satellite "DAICHI" (ALOS) [электронный ресурс]: Официальный сайт Японского Агентства Аэрокосмических исследований – электрон. дан. – М., 2007. – URL: <https://global.jaxa.jp/projects/sat/alos/>
- 11 The ONERA RAMSES SAR System / Dubois-Fernandez [ et. al.] // Proceedings of IGARSS 2002. – Toronto, Canada, June 24-28, 2002. – Vol. 3. – pp. 1723-1725.
- 12 TerraSAR-X - Germany's radar eye in space [электронный ресурс]: Официальный сайт Германского Космического Агентства – электрон. дан. – М., 2007. – URL: <https://www.dlr.de/content/en/articles/missions-projects/terrasar-x/terrasar-x-earth-observation-satellite.html>

- 13 ESA - ERS 1 and 2 [электронный ресурс]: Официальный сайт Европейского Космического Агентства – электрон. дан. – М., 2007. – URL: [https://www.esa.int/Applications/Observing\\_the\\_Earth/ERS\\_1\\_and\\_2](https://www.esa.int/Applications/Observing_the_Earth/ERS_1_and_2)
- 14 Lazarov A. Pulsar Emissions, Signal Modeling and Passive ISAR Imaging // Sensors. – 2019. – Vol. 19(15). – P. 3344 – 3354.
- 15 Simultaneous passive SAR imaging and detection of airborne targets / Sjögren [et al.] // International Conference on Radar Systems (Radar 2017) – Belfast, 2017. – P. 1-5.
- 16 Passive Bistatic Ground-Based Synthetic Aperture Radar: Concept, System, and Experiment Results/ Feng [et al.] // Remote Sens. – 2019. – Vol.11. – P. 1753 – 1769.
- 17 Passive bistatic radar using digital video broadcasting–terrestrial receivers as general-purpose software-defined radio receivers/ Feng [et al.] // ReVol. Sci. Instrum. – 2018. – Vol. 89. – P. 104701 – 104715.
- 18 Li Ch. J. Synthetic Aperture Radar Imaging Using a Small Consumer Drone / Ch. J. Li, H. Ling // Symposium on Antennas and Propagation & USNC/URSI National Radio Science Meeting: book of abstracts, Vancouver, Canada, 19-24 July. – Vancouver, 2015. – P. 685-686.
- 19 Real-time noncoherent UWB positioning radar with millimeter range accuracy in a 3D indoor environment / C. Zhang, M. Kuhn, A.E. Fathy, M. Mahfouz // IEEE MTT-S International Microwave Symposium Digest. – 2009. – P. 1413–1416.
- 20 Performance evaluation of ultra wideband technology for construction resource location tracking in harsh environments / T. Cheng, M. Venugopal, J. Teizer, P.A. Vela, // Autom Constr. – 2011. – Vol. 20. – P. 1173–1184.
- 21 Teizer J. Ultrawideband for automated real-time threedimensional location sensing for workforce, equipment, and material positioning and tracking / J. Teizer, M. Venugopal, A. Walia, // Transp. Res. Rec. – 2008. – Vol. 2081. – P. 56–64.
- 22 Received-signal-strength-based indoor positioning using compressive sensing / C. Feng, W.S.A. Au, S. Valaee, Z. Tan // IEEE Trans. Mob. Comput. – 2012. – Vol. 11. – P. 1983–1993.
- 23 A lightweight and aggregated system for indoor-outdoor detection using smart devices / S. Li [et al.] // Future Generation Computer Systems. – 2017. – P. 111-117.
- 24 On-Device Learning of Indoor Location for WiFi Fingerprint Approach / M. A. Nuño-Maganda, H. Herrera-Rivas, C. Torres-Huitzil, H. M. Marín-Castro, Y. Coronado-Pérez // Sensors. – 2018. – Vol. 18. – P. 2202-2216.

25 Fusion of WiFi, Smartphone Sensors and Landmarks Using the Kalman Filter for Indoor Localization / Z. Chen [et al.] // Sensors. – 2015. – Vol.15. – P.715-732.

26 Wilson J. Radio Tomographic Imaging with Wireless Networks / J. Wilson, N. Patwari // IEEE TRANSACTIONS ON MOBILE COMPUTING. – 2010. – Vol. 9. – P. 621-632.

27 Gennarelli G. Performance Analysis of Incoherent RF Tomography Using Wireless Sensor Networks / G. Gennarelli, F. Soldovieri // IEEE TRANSACTIONS ON GEOSCIENCE AND REMOTE SENSING. – 2016. – Vol. 54. – P. 2722-2732.

28 Depatla S. X-Ray Vision with Only WiFi Power Measurements Using Rytov Wave Models / S. Depatla, L. Buckland, Y. Mostofi // IEEE Transactions on Vehicular Technology. – 2015. – Vol. 64. – P. 1376-1387.

29 Through-the-Wall Image Reconstruction via Reweighted Total Variation and Prior Information in Radio Tomographic Imaging / Q. Guo, [et al.] // IEEE Access. – 2020. – Vol. 8. – P. 40057- 40066.

30 Karanam C. R. 3D Through-Wall Imaging with Unmanned Aerial Vehicles Using WiFi / C. R. Karanam Y. Mostofi // 16th ACM/IEEE International Conference on Information Processing in Sensor Networks (IPSN): book of abstracts, Pittsburgh, USA, 18-21 April.– Pittsburgh, 2017. – P. 1-12.

31 Jensen T.L. Implementation of an optimal first-order method for strongly convex total variation regularization / T.L. Jensen, J.H. Jørgensen, P.C. Hansen, and S.H. Jensen // BIT Numerical Mathematics. – 2012. – Vol.52. – P. 329-356.

32 STMicroelectronics / Home – STMicroelectronics – [Б. м.], 2022. – URL: [https://www.st.com/content/st\\_com/en.html](https://www.st.com/content/st_com/en.html) (дата обращения 23.05.2022).

33 Росляков С. Н. Зондирование подповерхности движущимся радиолокатором / С. Н. Росляков, К. В. Завьялова // Перспективы развития фундаментальных наук : Сборник научных трудов XIII Международной конференции студентов, аспирантов и молодых ученых: в 7 томах, Томск, 26–29 апреля 2016 года / Национальный исследовательский Томский политехнический университет; под ред. И. А. Курзиной, Г. А. Вороновой. – Томск: Национальный исследовательский Томский политехнический университет, 2016. – С. 114-116.

**ПРИЛОЖЕНИЕ А**  
**Отчет о патентных исследованиях**

УТВЕРЖДАЮ

проф. Д.Я. Суханов /Д.Я. Суханов/  
должность, личная подпись и расшифровка подписи  
руководителя ООП

"30" сентября 2020.

**ЗАДАНИЕ**  
**на проведение патентных исследований**

Наименование работы (темы): Исследование технологии радара с синтезированием апертуры некогерентной подсветкой.

Шифр работы (темы) БИМ

Этап работы первый, сроки его выполнения 16.09.2020- 14.12.2020

Задачи патентных исследований: исследование технического уровня и анализ тенденций развития технологий радаров с синтезированной апертурой непрерывного или импульсного режима работы. Особое внимание должно быть уделено существующим методам синтеза апертуры использующих некогерентное излучение. Так же следует изучить конструктивные особенности радаров и области их применения, оценить разрешающую способность.

**КАЛЕНДАРНЫЙ ПЛАН**

Виды патентных исследований	Подразделения-исполнители (соисполнители)	Ответственные исполнители (Ф.И.О.)	Сроки выполнения патентных исследований. Начало. Окончание	Отчетные документы
1. Поиск методик, областей применения синтезирования апертуры.	Кафедра радиофизики ТГУ	Махманазаров Р.М.	16.09.2018-14.10. 2018	отчет о поиске
2. Поиск технологий радаров с синтезированной апертурой (РСА).	Кафедра радиофизики ТГУ	Махманазаров Р.М.	15.10.2018-14.11. 2018	отчет о поиске
3. Поиск РСА использующих некогерентную подсветку	Кафедра радиофизики ТГУ	Махманазаров Р.М.	15.11.2018-14.12. 2018	отчет о поиске

Руководитель  
патентного  
подразделения

В.П. Беличенко  
личная подпись

В.П. Беличенко  
расшифровка подписи

16.09.2020  
дата

Руководитель  
ВКР магистра

В.П. Якубов  
личная подпись

В.П. Якубов  
расшифровка подписи

16.09.2020  
дата

Консультант  
ВКР магистра

Д.Я. Суханов  
личная подпись

Д.Я. Суханов  
расшифровка подписи

16.09.2020  
дата



1	2	3	4	5	6	7	8
Радар с синтезированием апертуры некогерентной подсветкой. Синтезирование антенного раскрыва. Некогерентная РЛС. Разнесенная РЛС. Некогерентный радар.	Россия, США, Европа	База данных ФИПС (Россия) База данных ЕРО (Европа) База данных USPTO (США)	G01S 13/89(2006.01) G01S 13/90(2006.01) G01S 7/486 (2006.01) G01S 13/06 (2006.01) G01S 5/02 G06T 7/00 (2006.01) G01S 3/00 G01S 7/288 G01S 7/292	International Journal of Remote Sensing International Conference on Radar Акустический журнал Радиопромышленность		2006-2020 (Россия) 1984-2020 (США)	База данных ФИПС (Россия) База данных USPTO (США)

Руководитель  
ВКР магистра



личная подпись

В.П.Якубов  
расшифровка  
подписи

1.10.2020  
дата

Консультант  
ВКР магистра



личная подпись

Д.Я. Суханов  
расшифровка  
подписи

1.10.2020  
дата

Руководитель  
патентного  
подразделения



личная подпись

В. П. Беличенко  
расшифровка  
подписи

1.10.2020  
дата

## ОТЧЕТ О ПОИСКЕ

В.1 Поиск проведен в соответствии с заданием

от 16.09.2020 и Регламентом поиска № от 1.10.2020

В.2 Этап работы первый

В.3 Начало поиска 16.09.2020 Окончание поиска 14.12.2020

В.4 Сведения о выполнении регламента поиска (указывают степень выполнения регламента поиска, отступления от требований регламента, причины этих отступлений) – регламент поиска выполнен полностью.

В.5 Предложения по дальнейшему проведению поиска и патентных исследований – Более детально проанализировать направления исследований научных групп в области радарной техники. Расширить поиск текущей научной и патентной информации в смежных областях.

В.6 Материалы, отобранные для последующего анализа

Таблица В.6.1 – Патентная документация

Предмет поиска (объект исследования, его составные части)	Страна выдачи, вид и номер охранного документа. Классификационный индекс.	Заявитель (патентообладатель), страна. Номер заявки, дата приоритета.	Название изобретения	Сведения о действии охранного документа
1	2	3	4	5
Радар с	Патент RU № 2614041, МПК	Соловьев Геннадий	Способ формирования изображения земной	Статус действует

синтезированием апертуры. Синтезирование антенного раскрыва. Некогерентная РЛС. Разнесенная РЛС. Некогерентный радар.	G01S 13/89(2006.01) G01S 13/90(2006.01)	Алексеевич (RU) Чугунова Вера Алексеевна (RU) АО «Научно- производственное предприятие «Радар ммс»»(RU) 2016113258, 06.04.2016	поверхности в радиолокационной станции с синтезированием апертуры антенны	(последнее изменение статуса 16.07.2020)
	Патент RU № 2483324, МПК G01S 13/89(2006.01)	Анцев Георгий Владимирович (RU), Соловьев Геннадий Алексеевич (RU), Зверев Владимир Леонидович (RU), Чугунова Вера Алексеевна (RU) ОАО «Научно- производственное предприятие «Радар ммс»»(RU) 2011147663/07, 23.11.2011	Способ навигации летательного аппарата по радиолокационным изображениям земной поверхности	Статус действует (последнее изменение статуса 26.11.2020)
	Патент RU № 2315331, МПК G01S 7/486 (2006.01)	Васин Александр Акимович (RU), Гареев Павел Владимирович (RU), Семухин Владимир Федерович (RU), Валов Сергей Вениаминович (RU)  ОАО «Уральское проектно-конструкторское бюро «Деталь»» (RU) 2006113847/09, 24.04.2006	Способ когерентного приема отраженного сигнала при некогерентном излучении зондирующего сигнала и радиолокационная станция для его реализации	Прекратил действие, но может быть восстановлен
	Патент RU № 167306, МПК G01S 13/06 (2006.01)	Демидок Евгений Викторович (RU), Фомин Андрей Владимирович (RU)	Радиолокационная станция на базе сетей сотовой связи стандарта GSM с модулем дисперсионной обработки сигналов канала обнаружения «на просвет»	действует

		AO «НИИ «КАИТ»» 2016132389, 05.08.2016		
	Патент RU № 4707697, МПК G01S 13/89	Thomas R. Coutler (USA), Phillip O. Isaacson (USA), Edwin C.Thiede (USA),  Honeywell Inc (Minneapolis, USA) 858812, 2.05.1986	High resolution noncoherent radar imager	Status Expired – Free Related
	Патент US № 4990925, МПК G01S 5/02	Charles R. Edelsohn(USA), Carl A. Wiley, (USA)  Hughes Aircraft Company, (USA) 607848, Filled 7.05.1984 Date of Patent 5.02.1991	Interferometric radiometer	Status Expired – Free Related
	Патент US № 5726656, МПК G01S 13/90	Robert T. Frankot (USA) Huges Electronics (USA) Filled 19.12.1996 Date of Patent 10.03.1998	Atmospheric Correction method for interferometric synthetic array radar systems operating at long range	Status Expired - Lifetime
	Патент CN №104268874, МПК G06T 7/00 (2006.01)	Chen Weishi (CN),Li Jing (CN)  Application filed by China Academy of Civil Aviation Science and Technology 100028, 2015.01.07	Non-coherent radar image background modeling method based on normal distribution function	
	Патент JP № 2220539, МПК G01S 3/00 G01S 7/288	Kishigami Takaaki (JP), Nakagawa Yoichi (JP), Mukai Hirohito (JP)	Radar device	

		Panasonic Intellectual Property Management Co., Ltd (JP) 13/816045, 09.08.2015		
	Патент WO №03/044558, МПК G01S 7/292	David George Thomas (deceased) Raytheon Company (US) PCT/US02/35555, 30.05.2003	Noncoherent integration, gain enhancement technique for non-stationary targets	

Таблица В.6.2 – Научно техническая, конъюнктурная, нормативная документация и материалы государственной регистрации (отчеты о научно-исследовательских работах)

Предмет поиска	Наименование источника информации с указанием страницы источника	Автор, фирма (держатель) технической документации	Год место и орган издания (утверждения, депонирования источника)
1	2	3	4
Радар с синтезированием апертуры некогерентной подсветкой. Синтезирование антенного раскрыва. Некогерентная РЛС. Разнесенная РЛС. Некогерентный радар.	1. R.Gens, J.L. Van Genderen Review Article SAR interferometry— issues, techniques, applications		International Journal of Remote Sensing Volume 17, 1996 - Issue 10, pp 1803-1835.
	2. S. H. Javadi, A. Farina Radar networks: A review of features and challenges		Information Fusion Volume 61, September 2020, pp 48-55
	3. S. Watts, L. Rosenberg A comparison of coherent and non-coherent radar detection performance in radar sea clutter		International Conference on Radar Systems (Radar 2017), 23-26 oct 2017; doi 10.1049/cp.2017.0497

	4. В.А. Зверев, П.И. Коротин, А.Л. Матвеев. Когерентный синтез апертуры по некогерентному сигналу		Акустический журнал, 2011, том 57, №4, с 534-544
	5. В.А. Зверев. Разрешение источников некогерентных сигналов на основе когерентного синтеза апертуры		Акустический журнал, 2016, том 62, №3, с 375-384
	6. С.Р. Гейстер, Чан Тай Чонг. Математическая модель и время задержки отраженного сигнала при гидроакустическом синтезе апертуры антенны		Доклады БГУИР, 2014, №3(81), с 71-77
	7. А.В. Ксендзук, П.А. Герасимов. Инверсный синтез апертуры в неизлучающих РЛС		Радиопромышленность. — 2016. — № 1. — С. 33—37.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В соответствии с целью и задачами проекта был проведен поиск патентной и научно-технической документации, относящейся к следующим вопросам: технологии радаров с синтезированием апертуры.

Поиск патентной документации произведен в базах данных патентной информации патентных ведомств России (ФИПС), США (USPTO) и Европы (ЕРО). Глубина осуществленного поиска (14 лет в ФИПС, 36 лет в USPTO и ЕРО) позволила оценить картину проведения научных исследований и патентования в сфере РСА в Мире. Поиск в базе данных USPTO и ЕРО показал наличие международных патентов, а также из других стран (Япония, Китай).

Отмечена особая активность следующих организаций:

- «НАУЧНО-ПРОИЗВОДСТВЕННОЕ ПРЕДПРИЯТИЕ «РАДАР ММС»» (RU)
- ОАО «УРАЛЬСКОЕ ПРОЕКТНО-КОНСТРУКТОРСКОЕ БЮРО «ДЕТАЛЬ»» (RU)
- COGNITIVE TECHNOLOGIES (RU)
- HUGHES AIRCRAFT COMPANY, (USA)
- LOCKHEED MARTIN CORP (USA)
- THE BOEING COMPANY (USA)
- TESLA (USA)
- AIRBUS SE (EUROPE)

Основной проблемой поиска патентов по соответствующей тематике стало выделение патентов, максимально подходящих к теме магистерской диссертации. Сложность заключалась в том, термин некогерентный в технологиях САР интерпретируется по-разному, что привело к более подробному изучению патента.

Далее планируется более детально проанализировать направления исследований научных групп в области технологий САР некогерентной

подсветкой. Расширить поиск текущей научной и патентной информации в смежных областях.

# Отчет о проверке на заимствования №1



Автор: efemberg11@mail.ru / ID: 8141197

Проверяющий:

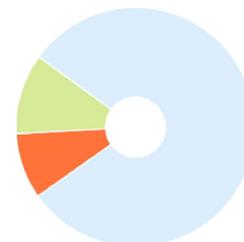
Отчет предоставлен сервисом «Антиплагиат» - <http://users.antiplagiat.ru>

## ИНФОРМАЦИЯ О ДОКУМЕНТЕ

№ документа: 3  
 Начало загрузки: 18.06.2022 18:32:59  
 Длительность загрузки: 00:00:10  
 Имя исходного файла:  
 MD\_Makhmanazarov.pdf  
 Название документа: MD\_Makhmanazarov  
 Размер текста: 72 кБ  
 Символов в тексте: 74118  
 Слов в тексте: 8765  
 Число предложений: 578

## ИНФОРМАЦИЯ ОБ ОТЧЕТЕ

Начало проверки: 18.06.2022 18:33:10  
 Длительность проверки: 00:00:55  
 Комментарии: не указано  
 Поиск с учетом редактирования: да  
 Модули поиска: eLIBRARY.RU, СПС ГАРАНТ, СМИ России и СНГ, Сводная коллекция ЭБС, Сводная коллекция РГБ, Перефразирования по коллекции издательства Wiley, Перефразирования по Интернету, Перефразирования по eLIBRARY.RU, Переводные заимствования по Интернету (KyRu), Переводные заимствования по Интернету (KkRu), Переводные заимствования по Интернету (EnRu), Переводные заимствования по eLIBRARY.RU (KkRu), Переводные заимствования по eLIBRARY.RU (EnRu), Цитирование, Переводные заимствования по eLIBRARY.RU (EnRu), Переводные заимствования (RuEn), Переводные заимствования (KyEn), Переводные заимствования (KkEn), Переводные заимствования, Патенты СССР, РФ, СНГ, Медицина, Кольцо вузов, ИПС Адилет, Интернет Плюс, Издательство Wiley, Диссертации НББ, Библиография, Переводные заимствования издательства Wiley (RuEn), Шаблонные фразы



### ЗАИМСТВОВАНИЯ

8,6%

### САМОЦИТИРОВАНИЯ

0%

### ЦИТИРОВАНИЯ

10,55%

### ОРИГИНАЛЬНОСТЬ

80,85%

Заимствования — доля всех найденных текстовых пересечений, за исключением тех, которые система отнесла к цитированиям, по отношению к общему объему документа. Самоцитирования — доля фрагментов текста проверяемого документа, совпадающий или почти совпадающий с фрагментом текста источника, автором или соавтором которого является автор проверяемого документа, по отношению к общему объему документа.

Цитирования — доля текстовых пересечений, которые не являются авторскими, но система посчитала их использование корректным, по отношению к общему объему документа. Сюда относятся оформленные по ГОСТу цитаты; общепотребительные выражения; фрагменты текста, найденные в источниках из коллекций нормативно-правовой документации.

Текстовое пересечение — фрагмент текста проверяемого документа, совпадающий или почти совпадающий с фрагментом текста источника.

Источник — документ, проиндексированный в системе и содержащийся в модуле поиска, по которому проводится проверка.

Оригинальность — доля фрагментов текста проверяемого документа, не обнаруженных ни в одном источнике, по которым шла проверка, по отношению к общему объему документа.

Заимствования, самоцитирования, цитирования и оригинальность являются отдельными показателями и в сумме дают 100%, что соответствует всему тексту проверяемого документа.

Обращаем Ваше внимание, что система находит текстовые пересечения проверяемого документа с проиндексированными в системе текстовыми источниками. При этом система является вспомогательным инструментом, определение корректности и правомерности заимствований или цитирований, а также авторства текстовых фрагментов проверяемого документа остается в компетенции проверяющего.

№	Доля в отчете	Источник	Актуален на	Модуль поиска	Комментарии
[01]	8%	не указано	13 Янв 2022	Библиография	
[02]	2,59%	Лосев, Дмитрий Витальевич диссертация ... кандидата физико-математических наук : 01.04.03 Томск 2000 <a href="http://dlib.rsl.ru">http://dlib.rsl.ru</a>	раньше 2011	Сводная коллекция РГБ	
[03]	0,2%	Промышленная собственность. Проведение патентных исследований. Справочное пособие <a href="http://bibliorossica.com">http://bibliorossica.com</a>	26 Мая 2016	Сводная коллекция ЭБС	
[04]	0,4%	<a href="http://vital.lib.tsu.ru/vital/access/services/Download/vital:8049/SOURCE01">http://vital.lib.tsu.ru/vital/access/services/Download/vital:8049/SOURCE01</a> <a href="http://vital.lib.tsu.ru">http://vital.lib.tsu.ru</a>	07 Сен 2020	Интернет Плюс	
[05]	0%	<a href="http://vital.lib.tsu.ru/vital/access/services/Download/vital:10571/SOURCE01">http://vital.lib.tsu.ru/vital/access/services/Download/vital:10571/SOURCE01</a> <a href="http://vital.lib.tsu.ru">http://vital.lib.tsu.ru</a>	24 Янв 2020	Интернет Плюс	
[06]	0%	Промышленная собственность. Проведение патентных исследований <a href="http://ibooks.ru">http://ibooks.ru</a>	09 Дек 2016	Сводная коллекция ЭБС	
[07]	0%	Сборник нормативных правовых актов в сфере правовой охраны и использования результатов научно-технической деятельности (8/8) <a href="http://www1.fips.ru">http://www1.fips.ru</a>	25 Июн 2015	Патенты СССР, РФ, СНГ	
[08]	0%	<a href="http://vital.lib.tsu.ru/vital/access/services/Download/vital:7900/SOURCE01">http://vital.lib.tsu.ru/vital/access/services/Download/vital:7900/SOURCE01</a> <a href="http://vital.lib.tsu.ru">http://vital.lib.tsu.ru</a>	07 Сен 2020	Интернет Плюс	

[09]	0%	Алгазинов Н., МАУ 702		20 Июн 2019	Кольцо вузов
[10]	0,1%	ОГЛАВЛЕНИЕ. Реферат Введение Отражательные антенные решетки и их применения Постановка задачи радиовидения и её решение... - PDF Free Download <a href="https://docplayer.ru">https://docplayer.ru</a>		04 Окт 2021	Интернет Плюс
[11]	0,45%	под ред. проф. И. Н. Кравченко Основы изобретательства и патентования учебное пособие Москва 2017 <a href="http://dlib.rsl.ru">http://dlib.rsl.ru</a>		01 Фев 2018	Сводная коллекция РГБ
[12]	0%	44191 <a href="http://e.lanbook.com">http://e.lanbook.com</a>		09 Мар 2016	Сводная коллекция ЭБС
[13]	0,08%	Отчет НИОКТР 1 этап		05 Июн 2017	Кольцо вузов
[14]	0%	Презентация для вебинара (1).pptx		30 Мая 2016	Кольцо вузов
[15]	0%	Презентация для вебинара незагр.pptx		08 Июн 2016	Кольцо вузов
[16]	0%	Промышленная собственность. Проведение патентных исследований <a href="http://studentlibrary.ru">http://studentlibrary.ru</a>		27 Ноя 2017	Сводная коллекция ЭБС
[17]	0%	Промышленная собственность. Проведение патентных исследований <a href="http://studentlibrary.ru">http://studentlibrary.ru</a>		20 Дек 2016	Медицина
[18]	0,31%	<a href="http://www.ursmu.ru/upload/doc/2013/05/16/otchet_zh_2_etap.pdf">http://www.ursmu.ru/upload/doc/2013/05/16/otchet_zh_2_etap.pdf</a> <a href="http://ursmu.ru">http://ursmu.ru</a>		25 Мая 2022	Интернет Плюс
[19]	1,84%	Государственный стандарт РФ ГОСТ Р 15.011-96 "Система разработки и постановки продукции на производство. Патентные исследования. Содержание и порядок проведения" (принят и введен в действие Постановлением Госстандарта РФ от 30 января 1996 г. N 40) <a href="http://ivo.garant.ru">http://ivo.garant.ru</a>		15 Янв 2017	СПС ГАРАНТ
[20]	0%	<a href="https://www.rulit.me/data/programs/resources/pdf/Ishkov_Provedenie-patentnyh-issledovaniy_RuLit_Me_586536.pdf">https://www.rulit.me/data/programs/resources/pdf/Ishkov_Provedenie-patentnyh-issledovaniy_RuLit_Me_586536.pdf</a> <a href="https://rulit.me">https://rulit.me</a>		26 Дек 2021	Интернет Плюс
[21]	0%	<a href="https://www.rulit.me/data/programs/resources/pdf/Ishkov_Provedenie-patentnyh-issledovaniy_RuLit_Me_586536.pdf">https://www.rulit.me/data/programs/resources/pdf/Ishkov_Provedenie-patentnyh-issledovaniy_RuLit_Me_586536.pdf</a> <a href="https://rulit.me">https://rulit.me</a>		02 Июн 2022	Интернет Плюс
[22]	0%	KR_Zotikova.docx		18 Дек 2019	Кольцо вузов
[23]	0%	Интеллектуальная собственность и основы научного творчества <a href="http://ibooks.ru">http://ibooks.ru</a>		09 Дек 2016	Сводная коллекция ЭБС
[24]	0,06%	<a href="https://esu.citis.ru/ikrbs/BY8XNXSBPGJIF0C6HGZEC8J(2/2)">https://esu.citis.ru/ikrbs/BY8XNXSBPGJIF0C6HGZEC8J(2/2)</a> <a href="https://esu.citis.ru">https://esu.citis.ru</a>		20 Мар 2018	Интернет Плюс
[25]	0%	<a href="https://esu.citis.ru/ikrbs/PKBFQKGVUZZK9OTMESD2L4Q">https://esu.citis.ru/ikrbs/PKBFQKGVUZZK9OTMESD2L4Q</a> <a href="https://esu.citis.ru">https://esu.citis.ru</a>		21 Мар 2018	Интернет Плюс
[26]	0%	Маг дис		19 Июн 2017	Кольцо вузов
[27]	0%	2010-Учебные.zip/198 МЕТОДИЧЕСКИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ ПО ПРОВЕДЕНИЮ.txt		09 Апр 2015	Кольцо вузов
[28]	0%	ГОСТ Р15.011-96. Государственный стандарт РФ. Система разработки и постановки продукции на производство. Патентные исследования. <a href="http://sci.vlsu.ru">http://sci.vlsu.ru</a>		09 Сен 2019	Интернет Плюс
[29]	0%	201_152_78_0_0.600_59520841 Стандарт РФ"Патентные исследования". ГОСТ Р15.011-96. Введен в действие с 01.07.1996.(doc-файл) <a href="http://isu.ru">http://isu.ru</a>		05 Дек 2020	Интернет Плюс
[30]	0%	<a href="https://sci.vlsu.ru/doc/Gost_P15_011-096.doc">https://sci.vlsu.ru/doc/Gost_P15_011-096.doc</a> <a href="https://sci.vlsu.ru">https://sci.vlsu.ru</a>		31 Янв 2021	Интернет Плюс
[31]	0%	<a href="https://sci.vlsu.ru/doc/Gost_P15_011-096.doc">https://sci.vlsu.ru/doc/Gost_P15_011-096.doc</a> <a href="https://sci.vlsu.ru">https://sci.vlsu.ru</a>		10 Мая 2022	Интернет Плюс
[32]	0%	ГОСТ Р 15.011-96 «Система разработки и постановки продукции на производство. Патентные исследования. Содержание и порядок проведения» <a href="https://files.stroyinf.ru">https://files.stroyinf.ru</a>		10 Мая 2021	Интернет Плюс
[33]	0%	ГОСТ Р 15.011-96 <a href="http://docload.ru">http://docload.ru</a>		28 Янв 2019	Интернет Плюс
[34]	0%	не указано <a href="http://shr.receptidocs.ru">http://shr.receptidocs.ru</a>		раньше 2011	Интернет Плюс
[35]	0%	Отчёт №1 Методика вар_9.txt		28 Ноя 2011	Кольцо вузов
[36]	0%	ГК-389-Коротков.doc		12 Апр 2012	Кольцо вузов
[37]	0%	Скачать <a href="http://oreluniver.ru">http://oreluniver.ru</a>		04 Авг 2017	Интернет Плюс
[38]	0%	<a href="https://esu.citis.ru/ikrbs/GQTZ9RH7V21SXTJ5RETXHKK(2/2)">https://esu.citis.ru/ikrbs/GQTZ9RH7V21SXTJ5RETXHKK(2/2)</a> <a href="https://esu.citis.ru">https://esu.citis.ru</a>		20 Мар 2018	Интернет Плюс
[39]	0%	Пилипенко, Александр Витальевич диссертация ... кандидата технических наук : 05.13.06 Орел 2013 <a href="http://dlib.rsl.ru">http://dlib.rsl.ru</a>		15 Мая 2014	Сводная коллекция РГБ

[40]	1,42%	О МЕТОДЕ РАДАРНОЙ ИНТЕРФЕРОМЕТРИИ ДЛЯ ОЦЕНКИ ДЕФОРМАЦИИ ЗЕМНОЙ ПОВЕРХНОСТИ. <a href="http://elibrary.ru">http://elibrary.ru</a>	11 Мая 2018	Перефразирования по eLIBRARY.RU
[41]	0%	О МЕТОДЕ РАДАРНОЙ ИНТЕРФЕРОМЕТРИИ ДЛЯ ОЦЕНКИ ДЕФОРМАЦИИ ЗЕМНОЙ ПОВЕРХНОСТИ <a href="http://cyberleninka.ru">http://cyberleninka.ru</a>	29 Янв 2017	Перефразирования по Интернету
[42]	0%	О МЕТОДЕ РАДАРНОЙ ИНТЕРФЕРОМЕТРИИ ДЛЯ ОЦЕНКИ ДЕФОРМАЦИИ ЗЕМНОЙ ПОВЕРХНОСТИ - тема научной статьи по автоматике и вычислительной технике, читать бесплатно текст научно-исследовательской работы в электронной библиотеке КиберЛенинка <a href="http://cyberleninka.ru">http://cyberleninka.ru</a>	01 Янв 2017	Перефразирования по Интернету
[43]	0%	О МЕТОДЕ РАДАРНОЙ ИНТЕРФЕРОМЕТРИИ ДЛЯ ОЦЕНКИ ДЕФОРМАЦИИ ЗЕМНОЙ ПОВЕРХНОСТИ. <a href="http://elibrary.ru">http://elibrary.ru</a>	11 Мая 2018	eLIBRARY.RU
[44]	0%	Выявление, правовая защита и коммерциализация результатов интеллектуальной деятельности. Учебное пособие <a href="http://bibliorossica.com">http://bibliorossica.com</a>	26 Мая 2016	Сводная коллекция ЭБС
[45]	0,26%	Реферат "Томография (Курсовая, Word, 8,1 Кб в архиве)." <a href="http://referats.net">http://referats.net</a>	29 Янв 2017	Перефразирования по Интернету
[46]	0%	РефератОтчет содержит 137 стр, 5 разделов, вве.txt	28 Сен 2016	Кольцо вузов
[47]	0%	Царев, Павел Евгеньевич Обоснование конструкций и параметров устройств для поштучной выдачи круглых лесоматериалов : диссертация ... кандидата технических наук : 05.21.05, 05.21.01 Йошкар-Ола 2013 <a href="http://dlib.rsl.ru">http://dlib.rsl.ru</a>	01 Янв 2013	Сводная коллекция РГБ
[48]	0%	не указано <a href="http://referat-monster.ru">http://referat-monster.ru</a>	08 Янв 2017	Перефразирования по Интернету
[49]	0%	не указано <a href="http://referat-monster.ru">http://referat-monster.ru</a>	08 Янв 2017	Перефразирования по Интернету
[50]	0%	<a href="https://swsu.ru/structura/up/ftd/tmim/Report1.pdf">https://swsu.ru/structura/up/ftd/tmim/Report1.pdf</a> <a href="https://swsu.ru">https://swsu.ru</a>	12 Июн 2022	Интернет Плюс
[51]	0%	Методические указания к выполнению курсовой работы по дисциплине "Маркетинговые исследования" <a href="http://studentlibrary.ru">http://studentlibrary.ru</a>	27 Ноя 2017	Сводная коллекция ЭБС
[52]	0,76%	<a href="http://earth.esa.int/workshops/polinsar2003/papers/31_dubois.pdf">http://earth.esa.int/workshops/polinsar2003/papers/31_dubois.pdf</a> <a href="http://earth.esa.int">http://earth.esa.int</a>	07 Янв 2018	Переводные заимствования (RuEn)
[53]	0%	<a href="http://earth.esa.int/workshops/polinsar2003/papers/abstractbook.pdf">http://earth.esa.int/workshops/polinsar2003/papers/abstractbook.pdf</a> <a href="http://earth.esa.int">http://earth.esa.int</a>	07 Янв 2018	Переводные заимствования (RuEn)
[54]	0,74%	Шипилов, Сергей Эдуардович Сверхширокополосное локационное радиовидение скрытых объектов : диссертация ... доктора физико-математических наук : 01.04.03 Томск 2018 <a href="http://dlib.rsl.ru">http://dlib.rsl.ru</a>	22 Фев 2019	Сводная коллекция РГБ
[55]	0%	Патентные исследования при создании новой техники. Инженерное творчество <a href="http://studentlibrary.ru">http://studentlibrary.ru</a>	20 Янв 2020	Сводная коллекция ЭБС
[56]	0%	АНАЛИЗ ПАТЕНТНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ В ОБЛАСТИ ГЕОИНФОРМАЦИОННОГО МОНИТОРИНГА ЛЕСНОЙ ПОЖАРНОЙ ОПАСНОСТИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ СПУТНИКОВОГО ЗОНДИРОВАНИЯ. <a href="http://elibrary.ru">http://elibrary.ru</a>	16 Сен 2014	eLIBRARY.RU
[57]	0%	ИЗУЧЕНИЕ РЕГИОНАЛЬНЫХ ИСТОЧНИКОВ ПАТЕНТНОЙ ИНФОРМАЦИИ КАК ФАКТОР ЭФФЕКТИВНОЙ ПОДГОТОВКИ АНАЛИТИКОВ ИНФОРМАЦИОННЫХ РЕСУРСОВ. <a href="http://elibrary.ru">http://elibrary.ru</a>	11 Янв 2017	Перефразирования по eLIBRARY.RU
[58]	0%	ИЗУЧЕНИЕ РЕГИОНАЛЬНЫХ ИСТОЧНИКОВ ПАТЕНТНОЙ ИНФОРМАЦИИ КАК ФАКТОР ЭФФЕКТИВНОЙ ПОДГОТОВКИ АНАЛИТИКОВ ИНФОРМАЦИОННЫХ РЕСУРСОВ. <a href="http://elibrary.ru">http://elibrary.ru</a>	11 Янв 2017	eLIBRARY.RU
[59]	0,14%	Семейство микроконтроллеров STM32 <a href="https://infopedia.su">https://infopedia.su</a>	28 Июн 2021	Интернет Плюс
[60]	0%	<a href="http://y64.info/dokuwiki/lib/exe/fetch.php?media=microcontrollers:lab_stm:laboratornyiy-praktikum-stm32f4.pdf">http://y64.info/dokuwiki/lib/exe/fetch.php?media=microcontrollers:lab_stm:laboratornyiy-praktikum-stm32f4.pdf</a> <a href="http://y64.info">http://y64.info</a>	07 Июн 2022	Интернет Плюс
[61]	0,38%	Способ когерентного приема отраженного сигнала при некогерентном излучении зондирующего сигнала и радиолокационная станция для его реализации. Патент РФ 2315331 <a href="http://findpatent.ru">http://findpatent.ru</a>	24 Июн 2015	Патенты СССР, РФ, СНГ
[62]	0,09%	Концептуальный анализ и синтез систем. Лабораторный практикум. <a href="http://elibrary.ru">http://elibrary.ru</a>	21 Ноя 2015	Перефразирования по eLIBRARY.RU
[63]	0,16%	Томский политехнический университет - publications <a href="https://portal.tpu.ru">https://portal.tpu.ru</a>	11 Апр 2021	Интернет Плюс
[64]	0,39%	STM8 и STM32 — объединенное пространство 8- и 32-разрядных микроконтроллеров.	10 Дек 2016	Перефразирования по eLIBRARY.RU

[65]	0,38%	не указано	13 Янв 2022	Шаблонные фразы	
[66]	0%	Радиолокационная станция с когерентным приемом отраженного сигнала при некогерентном излучении зондирующего сигнала   Банк патентов <a href="http://bankpatentov.ru">http://bankpatentov.ru</a>	25 Июн 2015	Патенты СССР, РФ, СНГ	
[67]	0%	Отечественные и зарубежные патенты по транзисторам, магнитотранзисторам и ЖИГ-генераторам за 1992–2003 годы. <a href="http://elibrary.ru">http://elibrary.ru</a>	23 Дек 2016	eLIBRARY.RU	
[68]	0%	Горбунов, Александр Алексеевич диссертация ... кандидата технических наук : 05.13.12 Оренбург 2013 <a href="http://dlib.rsl.ru">http://dlib.rsl.ru</a>	25 Дек 2015	Сводная коллекция РГБ	
[69]	0%	Коллоидно-химические основы регулирования свойств глинисто-солевых дисперсных систем с использованием водорастворимых полимеров <a href="http://dep.nlb.by">http://dep.nlb.by</a>	20 Дек 2016	Диссертации НББ	
[70]	0,32%	не указано	13 Янв 2022	Цитирование	
[71]	0,07%	Passive target detection and tracking from electromagnetic field measurements <a href="https://doi.org">https://doi.org</a>	03 Мар 2022	Издательство Wiley	
[72]	0%	<a href="http://www.isssp.ac.ru/ebooks/conf/Phys_chem_2018.pdf">http://www.isssp.ac.ru/ebooks/conf/Phys_chem_2018.pdf</a> <a href="http://isssp.ac.ru">http://isssp.ac.ru</a>	18 Апр 2022	Интернет Плюс	
[73]	0%	A survey on secret key generation mechanisms on the physical layer in wireless networks <a href="https://doi.org">https://doi.org</a>	25 Янв 2015	Издательство Wiley	
[74]	0%	Accelerated statistical reconstruction for C-arm cone-beam CT using Nesterov's method <a href="https://doi.org">https://doi.org</a>	31 Мая 2015	Издательство Wiley	
[75]	0%	WiFi Sensing with Channel State Information: A Survey: ACM Computing Surveys: Vol 52, No 3 <a href="https://dl.acm.org">https://dl.acm.org</a>	06 Апр 2020	Интернет Плюс	
[76]	0%	<a href="https://www.cs.wm.edu/~yma/files/WiFiSensing_YongsenMa_authorversion.pdf">https://www.cs.wm.edu/~yma/files/WiFiSensing_YongsenMa_authorversion.pdf</a> <a href="https://cs.wm.edu">https://cs.wm.edu</a>	18 Июн 2022	Интернет Плюс	Источник исключен. Причина: Маленький процент пересечения.
[77]	0%	<a href="https://www.cs.wm.edu/~yma/files/WiFiSensing_YongsenMa_authorversion.pdf">https://www.cs.wm.edu/~yma/files/WiFiSensing_YongsenMa_authorversion.pdf</a> <a href="https://cs.wm.edu">https://cs.wm.edu</a>	18 Апр 2022	Интернет Плюс	Источник исключен. Причина: Маленький процент пересечения.
[78]	0%	Accelerometer-Based Activity Recognition of Workers at Construction Sites <a href="https://frontiersin.org">https://frontiersin.org</a>	09 Сен 2020	СМИ России и СНГ	Источник исключен. Причина: Маленький процент пересечения.
[79]	0%	Контроль производства в режиме реального времени <a href="https://swsu.ru">https://swsu.ru</a>	18 Июн 2022	Интернет Плюс	Источник исключен. Причина: Маленький процент пересечения.
[80]	0%	Semantic wireless localization of WiFi terminals in smart buildings <a href="https://doi.org">https://doi.org</a>	30 Июн 2016	Издательство Wiley	Источник исключен. Причина: Маленький процент пересечения.
[81]	0%	45330 <a href="http://e.lanbook.com">http://e.lanbook.com</a>	09 Мар 2016	Сводная коллекция ЭБС	Источник исключен. Причина: Маленький процент пересечения.
[82]	0%	Адаптивная обработка сигналов при синтезе апертуры гидроакустической антенны для построения изображения дна <a href="http://dep.nlb.by">http://dep.nlb.by</a>	11 Ноя 2016	Диссертации НББ	Источник исключен. Причина: Маленький процент пересечения.
[83]	0%	Ксендзук, Александр Владимирович диссертация ... доктора технических наук : 05.07.12 Харьков 2006 <a href="http://dlib.rsl.ru">http://dlib.rsl.ru</a>	16 Июн 2015	Сводная коллекция РГБ	Источник исключен. Причина: Маленький процент пересечения.
[84]	0%	Design of diplexer-integrated filtering power divider with high isolation <a href="https://doi.org">https://doi.org</a>	30 Ноя 2019	Издательство Wiley	Источник исключен. Причина: Маленький процент пересечения.
[85]	0%	Chalmers Research: Lars Ulander <a href="https://research.chalmers.se">https://research.chalmers.se</a>	18 Июн 2022	Интернет Плюс	Источник исключен. Причина: Маленький процент пересечения.
[86]	0%	137355 <a href="http://biblioclub.ru">http://biblioclub.ru</a>	15 Апр 2016	Сводная коллекция ЭБС	Источник исключен. Причина: Маленький процент пересечения.
[87]	0%	Security analysis of drones systems: Attacks, limitations, and recommendations - PMC <a href="https://ncbi.nlm.nih.gov">https://ncbi.nlm.nih.gov</a>	18 Июн 2022	Интернет Плюс	Источник исключен. Причина: Маленький процент пересечения.
[88]	0%	Automated Activity Identification for Construction Equipment Using Motion Data From Articulated Members <a href="https://frontiersin.org">https://frontiersin.org</a>	14 Янв 2021	СМИ России и СНГ	Источник исключен. Причина: Маленький процент пересечения.
[89]	0%	A semantic and prior-knowledge-aided monocular localization method for construction-related entities <a href="https://doi.org">https://doi.org</a>	30 Сен 2020	Издательство Wiley	Источник исключен. Причина: Маленький процент пересечения.
[90]	0%	Improving environment detection by behavior association for context-adaptive navigation <a href="https://doi.org">https://doi.org</a>	31 Мар 2020	Издательство Wiley	Источник исключен. Причина: Маленький процент пересечения.
[91]	0%	dblp: CoRR May 2011 <a href="https://dblp.uni-trier.de">https://dblp.uni-trier.de</a>	13 Дек 2019	Интернет Плюс	Источник исключен. Причина: Маленький процент пересечения.
[92]	0%	Patents in Class 342/25C <a href="http://freepatentsonline.com">http://freepatentsonline.com</a>	05 Ноя 2016	Патенты СССР, РФ, СНГ	Источник исключен. Причина: Маленький процент пересечения.
[93]	0%	A fluence modulation and scatter shielding apparatus for dedicated breast CT: Theory of operation	30 Апр 2020	Издательство Wiley	Источник исключен. Причина: Маленький процент пересечения.

[94]	0%	Система позиционирования Wi-Fi - Wi-Fi positioning system - Википедия <a href="https://doi.org/https://wikichi.ru">https://doi.org/https://wikichi.ru</a>	28 Ноя 2021	Интернет Плюс	Источник исключен. Причина: Маленький процент пересечения.
[95]	0%	Development of a chest digital tomosynthesis R/F system and implementation of low-dose GPU-accelerated compressed sensing (CS) image reconstruction <a href="https://doi.org/https://doi.org">https://doi.org/https://doi.org</a>	31 Мая 2018	Издательство Wiley	Источник исключен. Причина: Маленький процент пересечения.
[96]	0%	<a href="https://elar.urfu.ru/bitstream/10995/104873/1/m_th_a.e.kirill_ova_2021.pdf">https://elar.urfu.ru/bitstream/10995/104873/1/m_th_a.e.kirill_ova_2021.pdf</a> <a href="https://elar.urfu.ru">https://elar.urfu.ru</a>	30 Мая 2022	Интернет Плюс	Источник исключен. Причина: Маленький процент пересечения.
[97]	0%	<a href="http://ams.tsu.ru/TSU/QualificationDep/co-searchers.nsf/074704EFAB27C13847257D6A002DAF96/\$file/%D0%97%D0%B0%D0%B2%D1%8C%D1%8F%D0%BB%D0%BE%D0%B2%D0%B0_%D0%9A.%D0%92_%D0%94%D0%B8%D1%81%D1%81%D0%B5%D1%80%D1%82%D0%B0%D1%86%D0%B8%D1%8F.pdf">http://ams.tsu.ru/TSU/QualificationDep/co-searchers.nsf/074704EFAB27C13847257D6A002DAF96/\$file/%D0%97%D0%B0%D0%B2%D1%8C%D1%8F%D0%BB%D0%BE%D0%B2%D0%B0_%D0%9A.%D0%92_%D0%94%D0%B8%D1%81%D1%81%D0%B5%D1%80%D1%82%D0%B0%D1%86%D0%B8%D1%8F.pdf</a> <a href="http://ams.tsu.ru">http://ams.tsu.ru</a>	18 Июн 2022	Интернет Плюс	Источник исключен. Причина: Маленький процент пересечения.
[98]	0%	Николаев, Петр Николаевич Разработка и исследование методов оперативной двумерной томографии ионосферы с использованием межспутниковых измерений : диссертация ... кандидата физико-математических наук : 01.04.01 Самара 2019 <a href="http://dlib.rsl.ru">http://dlib.rsl.ru</a>	27 Дек 2019	Сводная коллекция РГБ	Источник исключен. Причина: Маленький процент пересечения.
[99]	0%	Актуализация ГОСТ Р 15.011-96"СРПП. Патентные исследования. Содержании порядок проведения". <a href="http://elibrary.ru">http://elibrary.ru</a>	16 Янв 2020	eLIBRARY.RU	Источник исключен. Причина: Маленький процент пересечения.
[100]	0%	Toward Emotion Recognition From Physiological Signals in the Wild: Approaching the Methodological Issues in Real-Life Data Collection <a href="https://frontiersin.org">https://frontiersin.org</a>	15 Июл 2020	СМИ России и СНГ	Источник исключен. Причина: Маленький процент пересечения.
[101]	0%	Захаров, Илья Сергеевич Методы декомпозиции систем и моделирования окружения программных модулей для верификации Си-программ : диссертация ... кандидата физико-математических наук : 05.13.11 Москва 2019 <a href="http://dlib.rsl.ru">http://dlib.rsl.ru</a>	01 Янв 2019	Сводная коллекция РГБ	Источник исключен. Причина: Маленький процент пересечения.
[102]	0%	Широкополосные решетки проволочных антенн с широкоугольным сканированием <a href="http://dep.nlb.by">http://dep.nlb.by</a>	16 Янв 2020	Диссертации НББ	Источник исключен. Причина: Маленький процент пересечения.
[103]	0%	<a href="https://www.rulit.me/data/programs/resources/pdf/Ven_Seti-6G-Put-ot-5G-k-6G-glazami-razrabotchikov_RuLit_Me_678557.pdf">https://www.rulit.me/data/programs/resources/pdf/Ven_Seti-6G-Put-ot-5G-k-6G-glazami-razrabotchikov_RuLit_Me_678557.pdf</a> <a href="https://rulit.me">https://rulit.me</a>	23 Фев 2022	Интернет Плюс	Источник исключен. Причина: Маленький процент пересечения.
[104]	0%	<a href="https://users.aalto.fi/~sergei/Publication_list_updated.pdf">https://users.aalto.fi/~sergei/Publication_list_updated.pdf</a> <a href="https://users.aalto.fi">https://users.aalto.fi</a>	28 Апр 2021	Интернет Плюс	Источник исключен. Причина: Маленький процент пересечения.
[105]	0%	<a href="https://conf-prfn.org/Arch/Proceedings_2021_vol_3.pdf">https://conf-prfn.org/Arch/Proceedings_2021_vol_3.pdf</a> <a href="https://conf-prfn.org">https://conf-prfn.org</a>	04 Мая 2022	Интернет Плюс	Источник исключен. Причина: Маленький процент пересечения.
[106]	0%	<a href="https://postgraduate.tusur.ru/system/file_copies/files/000/001/689/original/%D0%9F%D0%BB%D1%83%D1%87%D0%B5%D0%B2%D1%81%D0%BA%D0%B8%D0%B9_%D0%94%D0%B8%D1%81%D1%81%D0%B5%D1%80%D1%82%D0%B0%D1%86%D0%B8%D1%8F.pdf">https://postgraduate.tusur.ru/system/file_copies/files/000/001/689/original/%D0%9F%D0%BB%D1%83%D1%87%D0%B5%D0%B2%D1%81%D0%BA%D0%B8%D0%B9_%D0%94%D0%B8%D1%81%D1%81%D0%B5%D1%80%D1%82%D0%B0%D1%86%D0%B8%D1%8F.pdf</a> <a href="https://postgraduate.tusur.ru">https://postgraduate.tusur.ru</a>	05 Июн 2022	Интернет Плюс	Источник исключен. Причина: Маленький процент пересечения.
[107]	0%	Аммиак связывает пещеры летучих мышей, с/х отходы и бойни/ Аммиачная гипотеза <a href="http://ecolife.ru">http://ecolife.ru</a>	13 Янв 2021	СМИ России и СНГ	Источник исключен. Причина: Маленький процент пересечения.
[108]	0%	Spektr-RG/SRG - Satellite Missions - eoPortal Directory <a href="https://directory.eoportal.org">https://directory.eoportal.org</a>	17 Июн 2022	Интернет Плюс	Источник исключен. Причина: Маленький процент пересечения.