

СВЧ регистрация и голографическая визуализация рассеяния волнового фронта на основе спиновых диодов для системы автономного вождения

К.А. Звездин^{1,А,В,С}, Д.Р. Лещинер^{2,А,С}, А.Ф. Попков^{3,А}, П.Н. Скирдков^{4,А,В,С},
А.Г. Буздаков^{5,А}, Г.Н. Чепков^{6,А}

^А Московский физико-технический институт, Россия

^В Институт общей физики им. А.М. Прохорова РАН

^С Российский квантовый центр

¹ ORCID: 0000-0002-9050-7782, konstantin.zvezdin@gmail.com

² ORCID: 0000-0002-7881-3816, dmitry_1111@inbox.ru

³ ORCID: 0000-0002-9583-0941, afpopkov@inbox.ru

⁴ ORCID: 0000-0003-1782-5044, petr.skirdkov@phystech.edu

⁵ ORCID: 0000-0002-7264-314X, aleksandr.buzdakov@phystech.edu

⁶ ORCID: 0000-0001-8937-5586, chepkov@phystech.edu

Аннотация

В работе обсуждаются схема и перспективы голографической визуализации рассеивающих микроволновых объектов с помощью микроволновой регистрации на основе спиновых диодов для опознания препятствий к движению в системе автономного вождения автомобиля. С уменьшением длины волны дифракционная разрешающая способность голографической системы растет, а регистрирующая способность при заданном уровне облучающего сигнала и шума диода падает. Приведен алгоритм численного восстановления и визуализации препятствий. На основе численного моделирования получены оценки разрешающей способности и надежности опознания объекта в зависимости от расстояния до препятствия. Показано, что имеется оптимальная длина волны, при которой достигается максимальная дальность микроволновой регистрации с учетом разрешающей способности системы и допустимого уровня сигнала. Высокочувствительные спиновые диоды, эффективные в диапазоне длин волн 2-30 см, приближаются по своим возможностям голографической визуализации к оптимальному диапазону, который в случае диодов Шоттки составляет ~ 0.5 - 1 см. Исходя из теоремы Котельникова для частоты выборки гармонического сигнала, а также на основе численных экспериментов, определены требования к плотности размещения приемных элементов антенной решетки регистратора в зависимости от расстояния до объекта, числа датчиков и окна регистрации. Показано, что устройство микроволновой регистрации на основе спиновых диодов может быть перспективным для системы автономного вождения в условиях стесненного движения при плохой видимости и высокой зашумленности.

Ключевые слова: микроволновое излучение, голографическая регистрация, система автономного вождения, спиновый диод, дальность обнаружения.

1. Введение

Для разработки современных транспортных средств и автоматизации управления ими имеют важное значение инструменты контроля окружающей обстановки. Одной из существенных для безопасности вождения характеристик системы является возможность обнаружения объектов и контроля окружения в неблагоприятных условиях –

при наличии тумана, снега или дождя, ночном освещении, транспортной перегрузке и парковке в затрудненных условиях. Ведущими производителями предложены различные варианты решения этой задачи. Оптические камеры наблюдения эффективно работают только в условиях хорошей освещенности. Системы ночного видения, работающие в ИК диапазоне, существенно зависят от погодных условий: активные от наличия дождя, тумана и снега, а пассивные от температуры объектов по сравнению с окружением. Системы звукового видения (парктроники) недостаточно хорошо работают в условиях сильного дождя, зашумленности, или дальности обнаружения более 3 м. Для адекватного и своевременного принятия решений также требуется более детальная информация о регистрируемых объектах. В условиях плохой видимости предпочтительны микроволновые приборы видения: СВЧ радары сантиметрового диапазона пригодны для дальнего обнаружения даже в плохих погодных условиях. Недавно [1-2] была показана возможность голографической регистрации изображений в микроволновом диапазоне с применением Wi-Fi излучателя. В настоящей работе изучаются возможности метода голографического распознавания и визуализации объектов с применением высокочувствительных спиновых диодов, которые имеют преимущества в области малой микроволновой мощности облучения [3-6, 20-22] и могут демонстрировать чувствительность, существенно превосходящую чувствительность диода Шоттки при близком уровне эквивалентного входного шума [16]. Оценки показывают, что при заданной чувствительности с учетом нормативов безопасности облучения дальность безопасного обнаружения препятствий составит не менее 25 м. Как известно, одним из ключевых требований к автомобильным системам распознавания является возможность остановки автомобиля после обнаружения препятствия, т.е. регистрация препятствия на безопасном расстоянии. При ручном управлении и вождении автомобиля со скоростью 48 км/ч для безопасного принятия решения требуется расстояние до объекта около 23 м на сухом покрытии [7]. В плохих погодных условиях оно возрастает до 80 м. Однако в случае полностью автоматизированного автомобиля, находящегося в хорошем техническом состоянии, при движении на скорости 30 км/ч тормозные возможности обеспечивают на сухом покрытии остановку на расстоянии 6 или менее метров, а снижение скорости столкновения во избежание травм и на меньших расстояниях. Таким образом, для полностью автоматизированного автомобиля в условиях стесненного городского движения, в зоне движения с ограничением скорости до 30 км/ч, и при парковке, требуемый уровень безопасности в случае плохой видимости и/или зашумленности должен обеспечиваться при распознавании препятствий с дальностью до 5-10 м и временем обработки данных менее 0,1 сек.

Голографический метод микроволновой визуализации изображений на основе спиновых диодов обсуждался ранее в основном применительно к ближнепольной регистрации. Применение спиновых диодов в устройстве микроволновой визуализации объектов для системы автономного вождения, насколько нам известно, ранее не обсуждалось. Прежде, чем перейти к методам распознавания объектов при микроволновой визуализации с помощью спиновых диодов, обсудим требования к параметрам системы распознавания в условиях автономного вождения.

2. Требования к параметрам системы и конфигурация датчиков

Голографический метод оптической регистрации изображений хорошо известен [8] и широко применяется для визуализации различных объектов [9,10]. На возможность расширения диапазона голографической визуализации изображений на терагерцовый диапазон с применением голографического принципа регистрации волнового фронта с помощью видеокамеры высокого разрешения указано, например, в работе [11]. В предлагавшихся системах голографического видения предполагалось широкополосное многопозиционное облучение с избыточной плотностью приемных элементов. В отли-

чие от матрицы фотоприемников оптического видеорегистратора, СВЧ голографическая система на основе спиновых диодов не только позволяет получать информацию как об амплитуде, так и фазе принимаемого волнового фронта, но и одновременно дает возможность использования спинового диода в качестве микроволнового смесителя, что упрощает систему микроволновой регистрации [4-6]. Частота, при которой чувствительность спинового диода имеет приемлемый уровень (см. требования к диодам ниже) может достигать 10 ГГц и выше, что соответствует длине волны $\lambda = 3$ см и менее.

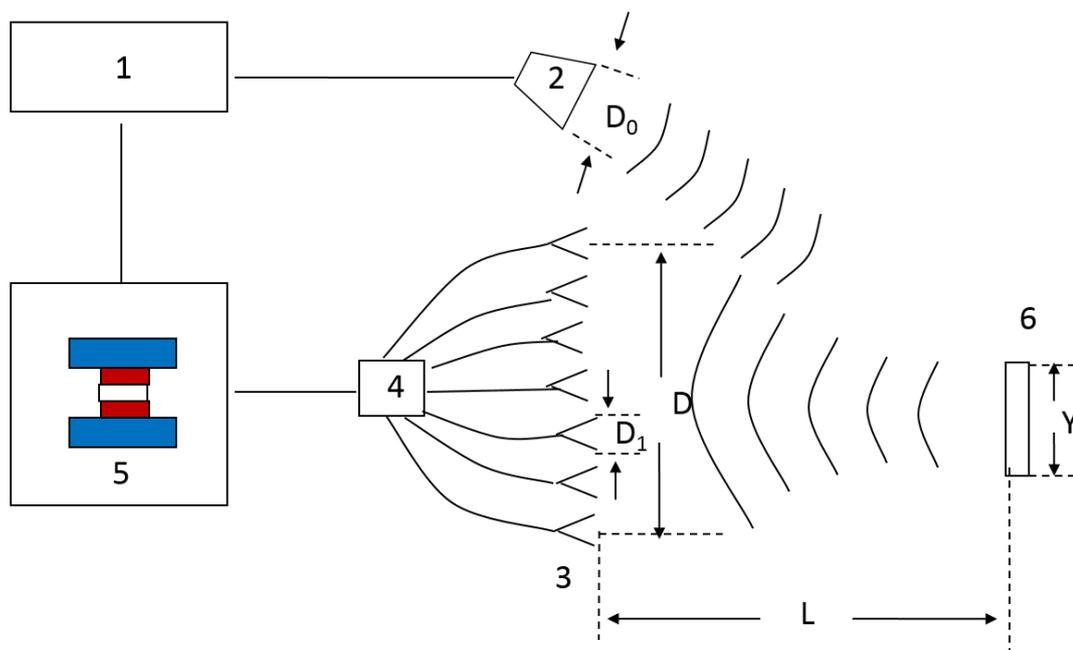


Рис.1 . Схема микроволновой голографической регистрации на основе спинового диода:

1 – СВЧ генератор, 2 – рупорная антенна, 3 – антенная решетка, 4 – переключатель каналов, 5 – блок регистрации со спиновым диодом, 6 – регистрируемый объект.

Согласно классической теории оптического разрешения Аббе для монохроматического облучения, см. напр. [12], дальность обнаружения определяется дифракционным пределом $L = \frac{Yr_n}{0.77\lambda}$, где Y - ширина объекта, $r_n = D/2$ - радиус крайней зоны Френеля, равный радиусу приемного окна регистратора. Поэтому, например, для объекта шириной $Y = 30$ см при диаметре голографического регистратора 2 м на длине волны 3 см получим $L = 13$ м. Требование к плотности размещения датчиков вдоль диаметра регистратора определяется теоремой Котельникова. Согласно этой теореме точное воспроизведение сигнала дается при выборке сигнала с дискретностью не реже полупериода максимальной пространственной частоты амплитудной и фазовой модуляции волнового фронта. Дискретность приема волнового фронта можно связать с дискретностью зон зонной пластинки. Минимальная ширина зоны Френеля на краю зонной пластинки задает максимальную частоту волнового фронта от точечного изображения. Поэтому в соответствии с теоремой Котельникова эта ширина задает максимальное расстояние шага дискретности выборки сигнала. Ширина крайней зоны Френеля дается приближенной формулой

$$\Delta r_n = r_{n+1} - r_n \approx \frac{\lambda L}{2r_n}, \quad (1)$$

где $r_n = \sqrt{\lambda L n}$ - радиус n-ой (крайней) зоны Френеля.

Отсюда видно, что дискретность воспроизведения волнового фронта может быть сделана значительно ниже, чем шаг регистрации при обычном воспроизведении голограммы, который должен быть порядка половины длины волны. Например, при расстоянии 12 м, радиусе 1 м и длине волны 3 см ширина зоны составляет $\Delta r_n = 18$ см. В последнем случае на диаметре регистратора 2 м достаточно 14 датчиков.

3. Методика восстановления изображения и визуализации

Принимаемый когерентный волновой фронт в пределах окна голографического регистратора служит основой для получения изображения и дальнейшей числовой обработки. В задачу распознавания объектов в этой связи входят выделение сигнала из помех и восстановление вида исходного распределения рассеивающей плотности. Восстановление исходного распределения может достигаться при использовании обращенных матриц ядра свертки прямого изображения (обратная задача восстановления изображения). В случае зашумленного сигнала разрешение и дальность обнаружения будут зависеть от эффективности алгоритма выделения сигнала.

Нами рассматривается следующая постановка задачи восстановления изображения. Заданы положения одного монохроматического источника излучения и нескольких принимающих датчиков. Задается формула для вычисления рассеянных сигналов (значений, учитывающих их фазу и амплитуду) – $P(p)$:

$$\int f(\vec{r}) \frac{g(\vec{r})}{R} e^{-ikR} d\vec{r} = P(p), \quad (2)$$

где $f(\vec{r})$ – это значение рассеивающей плотности в точке \vec{r} из области восстановления изображения, а $g(\vec{r})$ – интенсивность излучения в направлении \vec{r} , p – положение датчика, ω – частота сигнала, R – длина ломаной линии, соединяющей положение источника с точкой \vec{r} , и далее с положением датчика, $k = \frac{2\pi}{\lambda}$ – волновой вектор, $\lambda = 6$ см – длина волны излучения.

Разработанный нами алгоритм восстановления поля рассеивающей плотности по голографической картине рассеяния на основе решения обратной задачи в интегральном представлении Френеля – Кирхгофа с учетом амплитудно-фазовой модуляции волнового фронта рассеивающим объектом впервые описан в [13, 14]. Для повышения устойчивости решения обратной задачи рассеяния применялась процедура регуляризации Тихонова [15] в пространстве Фурье гармоник микроволнового поля и ядра обратной задачи рассеяния, а также пороговый алгоритм восстановления сигнала. Алгоритм устойчив к ошибкам вычисления и присутствию случайных шумов, работоспособен в условиях малого числа датчиков и ограниченного одним излучателем поля облучения объекта.

Задача восстановления рассеивающей плотности решается в две последовательно разнесенных стадии, различных по предметной мотивации и по технологии решения. На первой стадии восстанавливается предположительная подходящая форма поля рассеивающей плотности, описываемая суммой гармоник Фурье невысокого порядка, обеспечивающей гладкость данного решения. Подавление высоких гармоник достигается подходящим выбором регуляризующей матрицы Тихонова. Вторая стадия, напротив, направлена на нахождение формы восстановленной плотности в виде кусочно-постоянной функции с предустановленными фиксированными локальными значениями плотности (т.е. известными типично встречающимися значениями рассеивающей плотности материалов). Это достигается методом порогового отсекаания путем кластеризации восстановленных на первой стадии локальных значений плотности вокруг предустановленных значений плотности. Подобная двухступенчатая схема регуляризации (на основе матрицы Тихонова на первой стадии и локальной кластеризации значений плотности на второй) позволяет достичь высокой устойчивости к зашумленно-

сти сигнала даже для невысокого числа принимающих каналов (датчиков антенной решетки). На второй стадии форма решения задачи задает сцену, образованную ограниченными объектами заданной плотности. Это именно то представление, которое требуется в задаче визуализации сцен. Однако начальная регуляризация решения и подавление шумов куда более эффективны в пространстве Фурье.

Восстановление плотности и регуляризация с подавлением высоких гармоник на первой стадии алгоритма производится следующим образом. Интегральное уравнение (2) для $f(\vec{r})$ в пространстве гармоник Фурье заданных порядков представляет собой линейное уравнение, ядро которого задано фиксированной конечной матрицей A . Соответственно, его решение могло бы задаваться применением обратной матрицы A^{-1} : $f(\vec{r}) = A^{-1}P(p)$. Однако, наивной формы матрицы A^{-1} не существует, ибо A , вообще говоря, прямоугольная матрица, причем на практике размерность вектора $f(\vec{r})$ (число гармоник) существенно больше размерности вектора $P(p)$ (числа датчиков). То есть, система недоопределена. При этом решение с регуляризацией по Тихонову обеспечивается заменой (несуществующей) матрицы A^{-1} на матрицу $(A^T A + \Gamma^T \Gamma)^{-1} A^T$, где A^T и Γ^T – эрмитово сопряженные к A и Γ матрицы. Матрица Γ – это регуляризирующая матрица Тихонова (матрица квадратичной формы в пространстве решений), выбор которой остается за нами и должен зависеть от содержательной постановки задачи регуляризации. В нашем случае (подавление высоких гармоник) подходящая форма для Γ – это диагональная матрица, на диагонали которой стоят веса, пропорциональные произведению порядков соответствующих гармоник для каждой из пространственных координат. Этим образом для гармоник высоких порядков обеспечивается оптимальное подавление (в экспериментах найдено, что использование, скажем, в произведении номеров гармоник в степенях выше первой дает слишком сильное подавление высоких гармоник с ухудшением качества воспроизведения формы рассеивающего объекта и его визуализации – так же, как и чрезмерно слабое подавление высоких гармоник приводит к тому же).

Задача же кластеризации локальных значений плотности вокруг заданных известных значений представляет собой одномерную задачу кластеризации. Она может решаться многими стандартными методами, одним из простейших является пороговое отсечение в точке наименьшей локальной плотности значений в пределах интервала – которое и было тут успешно применено, давая весьма адекватную реконструкцию внешней формы объекта как для целей его визуализации, так и для задачи распознавания препятствий.

4. Результаты моделирования и пределы достоверности распознавания

Для оценки эффективности разработанного алгоритма визуализации объектов были проведены серии численных экспериментов с использованием компьютерного моделирования, для модельных задач распознавания ряда как трехмерных, так и двумерных и одномерных объектов (для более детального изучения поведения алгоритма при различных параметрах и теоретических возможностей метода).

Ниже приводятся примеры визуализации трехмерных препятствий в фронтальной плоскости проекции XY. Приведены контуры восстановленного изображения в сравнении с контуром исходного объекта. Виртуальная модель эксперимента включала следующие параметры: расстояние до объекта, поворот объекта, положение объекта по ширине, направление излучателя, диаграмма направленности, конфигурация решетки датчиков. Серии экспериментов позволили установить границы области применимости системы.

Для работы было выбрано два объекта, то есть две различных трехмерных плотности $f(\vec{r})$, которые затем проецировались на плоскость XY. Первый объект имел более про-

стую форму, по сравнению со вторым. В качестве первого объекта был выбран куб (Рис.2а). В качестве второго объекта был выбран человек (Рис.2б).

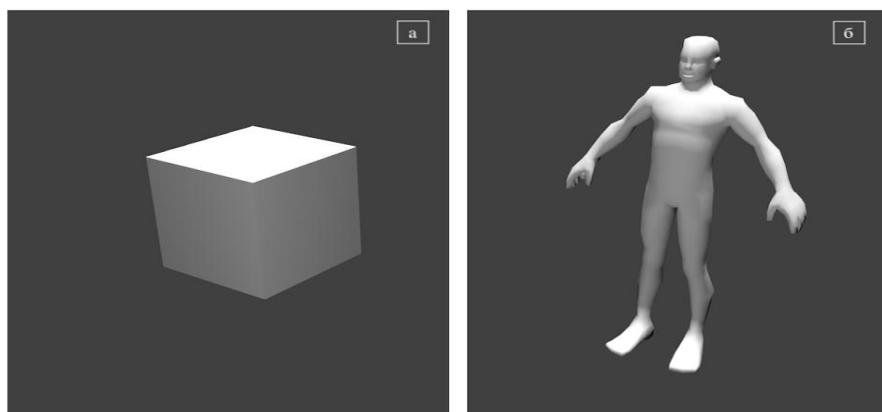


Рис.2: Плотности, использованные при моделировании (а-плотность в форме куба, б-плотность в форме человека).

Для применения предлагаемого алгоритма, необходимо было вычислить сигналы, получаемые с приёмных элементов. Длина волны излучателя: $\lambda = 6$ см, решетка датчиков 13×13 , расстояние между датчиками 20 см. После численного вычисления интегралов (формула 2) были получены значения фазы и амплитуды на каждом из датчиков. На рисунках ниже наглядно показан пример получаемых значений фазы и амплитуд: на Рис.4 показаны данные для объекта в форме куба, расположенного на расстоянии 360 см от голографического стенда (Рис.3а), на Рис.5 показаны аналогичные данные для объекта в форме человека (Рис.3б), расположенного на том же расстоянии от стенда.

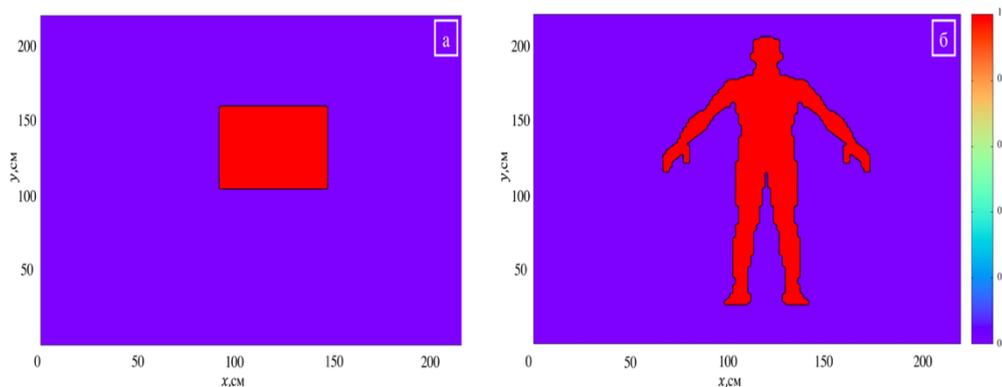


Рис.3: Проекция плотности в форме куба (а) и человека (б) на плоскость.

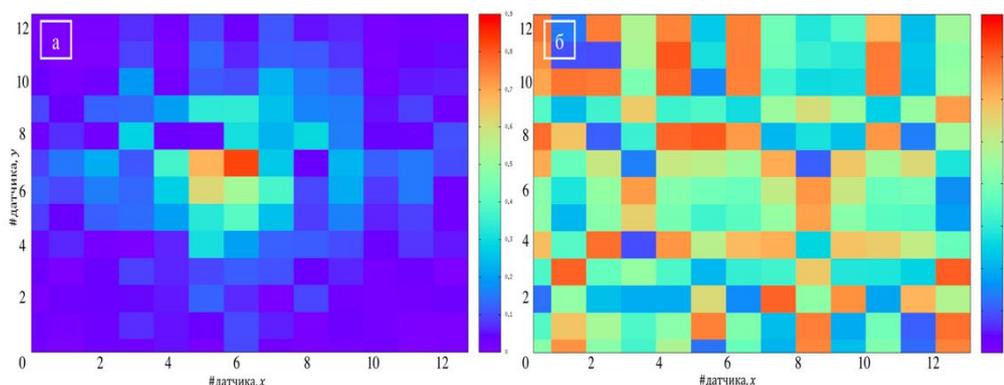


Рис.4: Пример принимаемых сигналов для плотности в форме куба (а-амплитуда, б-фаза).

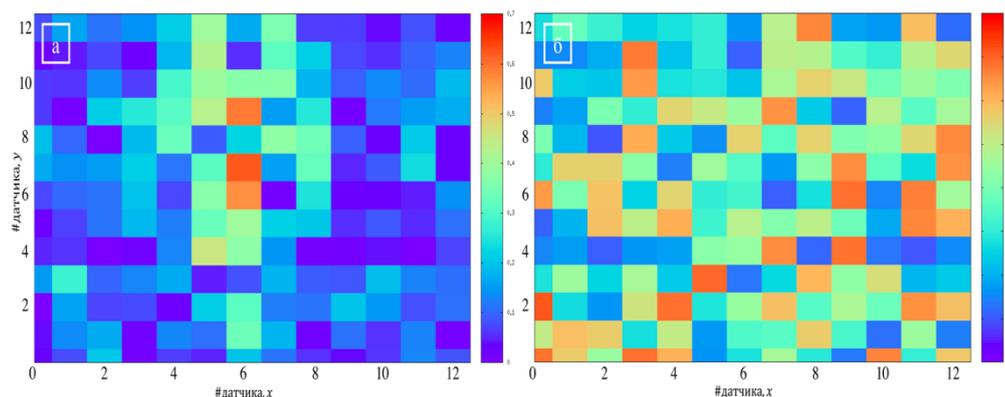


Рис.5: Пример принимаемых сигналов для плотности в форме человека (а-амплитуда, б-фаза).

Далее, после получения сигналов на приёмных датчиках, применяется предлагаемый алгоритм восстановления. На Рис.6а и на Рис.6б показаны примеры восстанавливаемых двумерных плотностей.

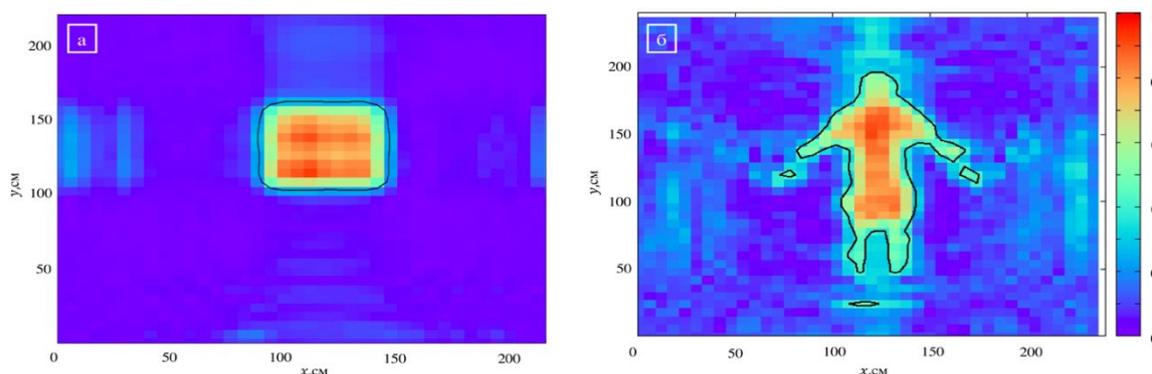


Рис.6: Примеры восстанавливаемых плотностей (а-плотность в форме куба, б-плотность в форме человека).

4.1. Оценка качества алгоритма.

4.1.1. Зависимость качества визуализации от расстояния от объекта до излучателя и от положения объекта.

Для оценки качества визуализации были использованы три показателя: точность, полнота, F1-мера. Полнота определена как отношение площади верно найденной части исходной плотности к площади исходной плотности; точность определена как отношение площади верно найденной части к площади всего восстановленного контура. F1-мера определялась как среднее гармоническое полноты и точности:

$$F1 = \frac{2 * \text{точность} * \text{полнота}}{\text{точность} + \text{полнота}}$$

Для двух объектов, представленных выше, были получены зависимости F1-меры от расстояния от излучателя до объекта и положения центра масс объекта по горизонтали (см Рис.7 и Рис.8). На Рис.7 представлена зависимость F1-меры (указана цветом, по шкале, приведенной справа) для плотности в форме куба, а на Рис.8 представлена зависимость для плотности в форме человека, из которых видно, что приемлемое каче-

ство распознавания сохраняется вплоть до 20 м – что согласуется с поставленными целями по обнаружению дорожных препятствий ближней зоны.

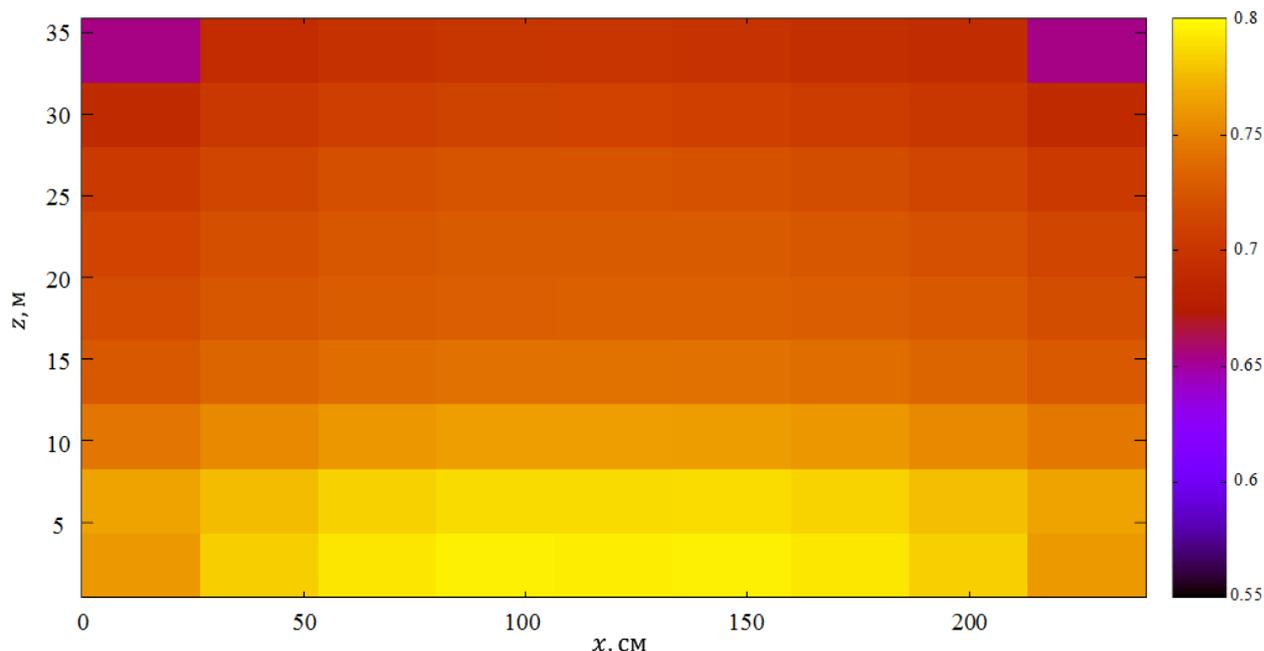


Рис.7: Зависимость F1-меры для плотности в форме куба (ось x определяет положение объекта по вертикали, ось z определяет расстояние от датчиков до объекта).

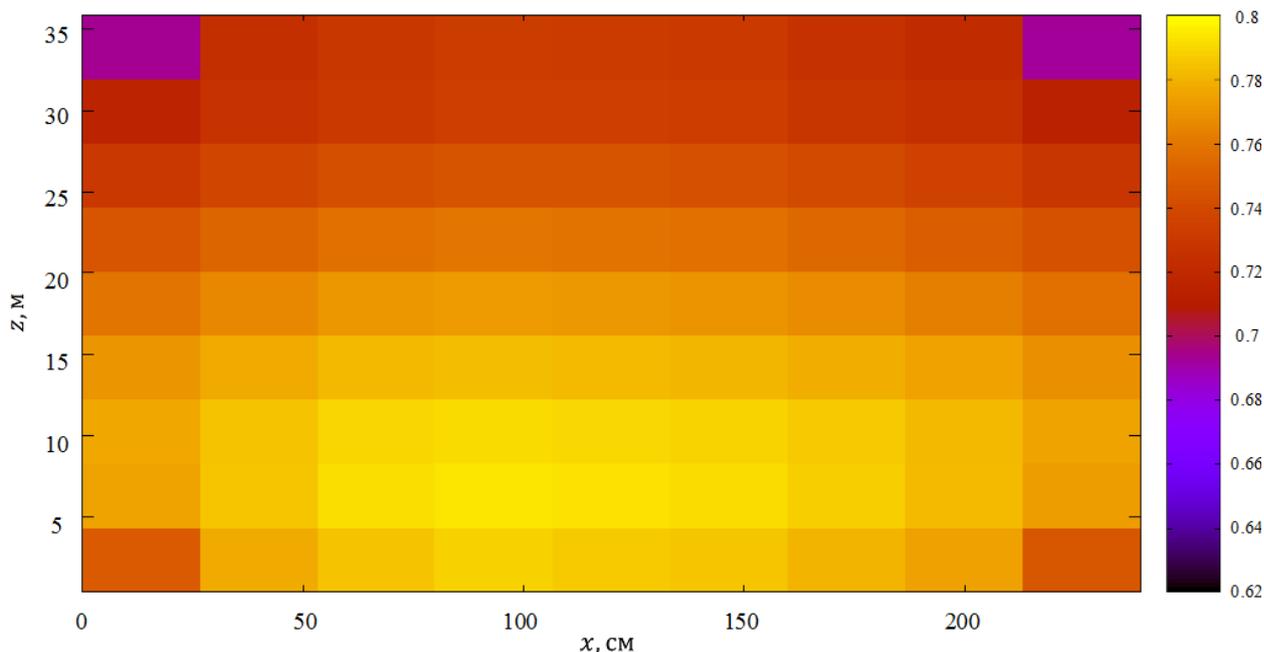


Рис.8: Зависимость F1-меры для плотности в форме человека (ось x определяет положение объекта по вертикали, ось z определяет расстояние от датчиков до объекта).

4.1.2. Зависимость качества распознавания от шума.

Еще одним параметром для оценки качества алгоритма стала устойчивость к шуму. Шум добавлялся следующим образом: к сигналу каждого датчика, вычисленному по формуле (2), добавлялись независимые нормально распределенные случайные величины. Уровень шума измерялся в долях от среднеквадратичной амплитуды сигнала по всему полю датчиков. Пользуясь этим, была получена зависимость устойчивости алгоритма к шуму от расстояния до объекта. Ниже представлен график зависимости максимального шума, при котором еще есть возможность различить объект, от расстояния.

Формальные критерии различимости здесь не использовались, оценка различимости производилась “на глаз”.

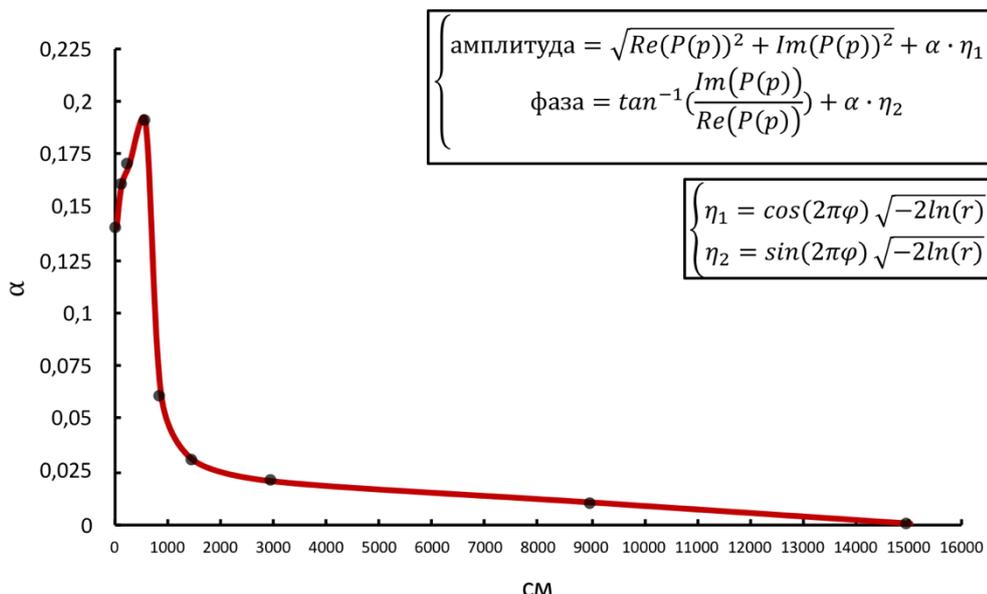


Рис.9: Зависимость максимально допустимого шума от расстояния до объекта.

Из данной зависимости можно сделать следующие выводы: оптимальное расстояние по отношению к устойчивости к шуму до 6 м; устойчивость к шуму высокая: практически приемлемый уровень сохраняется вплоть до 20 м.

4.1.3. Зависимость от расстояния вероятности ошибки распознавания двух полосовых отражателей.

Результаты моделирования показывают, что эффективность разрешения (т.е. минимальная ширина межполосного зазора) для одномерных объектов в виде двух полосовых отражателей зависит от расстояния как $Y = \kappa\lambda L / 2r_n$, где $\kappa = Y / \Delta r_n$ ($n=2$) - отношение ширины зазора к размеру зоны Френеля. Ниже в таблице 1 приведена вероятность ошибки распознавания в зависимости от расстояния до объекта и числа приемников. Вероятность ошибки определяется как процент случаев, когда разрешение объектов не было достигнуто, из всех просчитанных комбинаций параметров объекта (ширины отражателя, ширины зазора), удовлетворяющих приведенным выше условиям разрешения (границам для Y).

Таблица 1. Зависимость вероятности ошибки распознавания от расстояния (L) до объекта и от числа датчиков (N_s) в линейке приемников на ширине окна приема 2 м.

$L \backslash N_s$	4	8	16	32	64
0.3 м	---	18.1%	1.7%	0.2%	0.0%
0.45 м	13.3%	27.4%	5.3%	2.6%	2.2%
0.6 м	31.4%	4.8%	5.1%	4.8%	3.4%
1.5 м	0.0%	9.7%	1.9%	1.3%	2.9%
3 м	24.0%	17.6%	4.2%	4.3%	3.0%
4.5 м	8.3%	16.7%	5.6%	6.3%	6.3%
6 м	---	30.0%	11.6%	9.5%	7.4%
15 м	---	20.0%	20.0%	53.3%	53.3%

Из приведенной таблицы следует, что наиболее надежные условия распознавания для длины волны 3 см и окна приема 2 м для объекта шириной 40 см реализуются при расстоянии до объекта не более 6 м и числе приемных антенных датчиков на ширине окна приема не менее 16.

5. Требования безопасности облучения и дальность обнаружения

Кроме условий оптического разрешения на дальность обнаружения влияют также чувствительность и уровень эквивалентного входного шума детектирующего устройства. Рассмотрим эти условия для спинового диода, который может демонстрировать чувствительность, превосходящую чувствительность диода Шоттки при близком уровне эквивалентного входного шума [16]. Уменьшение мощности, падающей на приемную антенну, при угле направленности рупорной антенны $\theta = \frac{\lambda}{D_0}$, размере отража-

ющего зеркала Y , расстоянии до зеркального объекта L и ширине приемного детектора D_1 можно приближенно оценить по формуле

$$\frac{P_1}{P_2} = \left(\frac{YD_0}{L\lambda} \cdot \frac{LD_1}{2YL} \right)^2 = \left(\frac{D_0D_1}{2L\lambda} \right)^2 \quad (3)$$

Безопасная доза объемного облучения для человека составляет согласно литературным данным $I_G = 0.08$ Вт/кг [16]. Поэтому при весе $G = 50$ кг и облучаемой фронтальной поверхности человека примерно $S = 1$ м² получаем интенсивность безопасного облучения $I_s = \frac{I_G G}{S} = 4$ Вт/м². Эта пороговая интенсивность создается рупорной антенной на расстоянии $R = 1$ м источником мощностью $P_0 = \frac{\pi}{2} I_s R^2 \sim 6$ Вт. С другой стороны, дальность обнаружения сигнала определяется соотношением $P_1 = NP_N$, где N - отношение сигнал/шум, $P_N = V_N/\varepsilon$ - входная пороговая чувствительность спинового диода, которая пропорциональна уровню шумов напряжения диода V_N и обратно пропорциональна его чувствительности $\varepsilon = \frac{dV}{dP}$. Полагая, что длина волны определяет полезную площадь микроволнового источника и приемника, т.е. $D_1^2 D_2^2 \sim \eta \lambda^4$, где параметр η учитывает коэффициент полезности приемной антенны, КПД передающей антенны и согласование приемного тракта, из формулы (3) найдем

$$L = \left(\frac{\pi \eta I_s R^2}{8NP_N} \right)^{\frac{1}{2}} \cdot \lambda \quad (4)$$

При эквивалентной мощности шума спинового диода $\frac{P_N}{(\Delta f)^{1/2}} = 4 \cdot 10^{-12}$ Вт/Гц^{1/2}

[16] для максимальной чувствительности $\varepsilon \sim 10^4$ мВ/мВт, достигаемой при наличии тока смещения, шумовая пороговая мощность при ширине полосы $\Delta f = 10$ кГц равна $P_N = 4 \cdot 10^{-10}$ Вт. Положим для оценок $\eta = 0.1$, $N = 4$, $R = 1$ м, $\lambda = 3$ см, тогда для принятого уровня шума спинового диода получаем дальность обнаружения $L = 250$ м. Для диода Шоттки, с эквивалентной мощностью шума $\frac{P_N}{(\Delta f)^{1/2}} = 2 \cdot 10^{-12}$ Вт/Гц^{1/2}, для

пороговой шумовой мощности получается примерно та же оценка.

В отсутствие тока смещения чувствительность спинового диода ε уменьшается в 100 и более раз. В последнем случае дальность безопасного обнаружения (при принятой дальности безопасного облучения $R = 1$ м) по оценкам на основании формулы (4) составит около $L = 25$ м. При дальности обнаружения до 10 м входная мощность генератора должна составлять не менее $P_0 \sim 2$ Вт. Требования безопасности облучения при этом заведомо выполняются.

6. Микроволновые свойства спиновых диодов и оптимальная длина волны

Спиновый диод представляет собой магнитный туннельный переход, обладающий большим магнетосопротивлением, в котором при микроволновом изменении туннельного тока на переходе возникает постоянное напряжение, обусловленное нелинейностью вольт-амперной характеристики. Эффект выпрямления микроволнового сигнала спиновым диодом имеет несколько механизмов, основанных на индуцированном током ферромагнитном резонансе, тепловом переносе спина (эффект Зеебека), а также модуляции перпендикулярной анизотропии, наведенной напряжением на переходе [4,16,17]. Другие физические механизмы ответа спиновых систем обсуждаются в [18,19]. Наибольшей микроволновой чувствительностью к микроволновому облучению обладают спиновые диоды с неколлинеарной конфигурацией спинов прилегающих магнитных слоев туннельного перехода в условиях резонансного возбуждения спиновых колебаний благодаря токовому переносу вращательного момента при наличии тока смещения вблизи и выше границы микромагнитной неустойчивости [4,17,20-22]. Резонансная зависимость микроволновой чувствительности спинового диода была рассчитана нами на основе модифицированных Слончевским уравнений Ландау-Лифшица для нескольких значений тока смещения [20]. Расчетные параметры близки к параметрам спинового диода работы [17], а именно: наностолбчатая туннельная структура имела диаметр $D = 140$ нм, толщина свободного слоя $d = 2$ нм, намагниченность $M_s = 10^6$ А/м, магнетосопротивление $\frac{\Delta R}{R} = 130\%$, $S\bar{R} = 10$ Ом·мкм², спинполяризационный фактор $\eta_{||}^0 = 0.63$, параметр магнитного затухания $\alpha = 0.01$.

Резонансная частота, при которой возникает максимум микроволновой чувствительности, зависит от эффективной величины магнитного поля, действующего на спины свободного слоя. Максимальная чувствительность падает с ростом частоты. В таблице 3 приведены литературные данные о микроволновой чувствительности спиновых диодов, полученные из теоретических расчетов и экспериментальных измерений. Видно, что чувствительность спинового диода может быть сравнима с чувствительностью полупроводникового диода Шоттки в диапазоне вплоть до 10 ГГц.

Таблица 2. Микроволновая чувствительность спинового диода и контролирующие ее параметры – частота, внешнее магнитное поле, ток смещения.

ε , мВ/мВт	f, ГГц	H, Эр-стед	J, А/см ²	Эксперимент/Теория	Ссылка
12000	1.53	1100	3.8×10^{-6}	эксперимент	[16]
970	1.2	0	0	эксперимент	[17]
75000	1.1	0	2.7×10^{-6}	эксперимент	[17]
30	13.5	0	0	эксперимент	[4]
20000	9.2	500	7×10^{-6}	теория	[20]
40	10	3200	0	теория	[22]

Из формул (2) и (3) видно, что дальность обнаружения, связанная с микроволновым разрешением, с уменьшением длины волны возрастает, а обусловленная ограничением по мощности падает в связи с падением полезной площади излучающего и приемного антенного элемента. В связи с этим имеется оптимальная длина волны, при которой дальность голографического обнаружения при использовании диодов Шоттки в качестве микроволновых приемников максимальна

$$\lambda_0 = \left(\frac{2Yr_n}{\kappa}\right)^{\frac{1}{2}} \cdot \left(\frac{8NP_N}{\pi\eta I_s R^2}\right)^{\frac{1}{4}} \sim 0.5 - 1 \text{ см} \quad (5)$$

Спиновые диоды, как следует из приведенной таблицы 2, по микроволновой чувствительности близки к чувствительности диодов Шоттки и по частотному диапазону приближаются к оптимальному. В отличие от полупроводниковой измерительной ба-

зы, включающей дополнительный блок с СВЧ векторным анализатором спектра для проведения быстрых устойчивых фазовых измерений, спиновые диоды непосредственно могут использоваться как наноразмерные нелинейные элементы для смешивания сигналов в сочетании с ВЧ синхронным усилителем считывания выпрямленного сигнала [5,23]. Это способствует конструктивному упрощению и миниатюризации голографического устройства.

7. Заключение

Таким образом, проделанный анализ на основе численных оценок, результатов численного моделирования и литературных данных показывает, что спиновые диоды могут быть перспективны для создания голографического устройства микроволновой визуализации, предназначенного для автономного вождения транспортного средства в условиях стесненного движения при плохой видимости и высокой зашумленности. Их высокая микроволновая чувствительность и частотный диапазон близки к оптимальным параметрам микроволновой голографической визуализации для указанных условий. Приемлемое качество распознавания сохраняется вплоть до 20 м, что хорошо согласуется с поставленными целями по обнаружению дорожных препятствий ближней зоны. Наиболее надежные условия приема для длины волны 3 см и окне приема 2 м реализуются при числе приемных антенных датчиков на ширине окна приема не менее 16. Оптимальное расстояние по отношению к устойчивости к шуму – до 6 м; устойчивость к шуму высокая: практически приемлемый уровень устойчивости сохраняется вплоть до 20 м.

Работа выполнена при активной поддержке Российского научного фонда (проект № 19-12-00432)

Список литературы

1. Holl P. M., Reinhard F. Holography of wi-fi radiation //Physical review letters. – 2017. – Т. 118. – №. 18. – С. 183901.
2. Chetty K., Smith G. E., Woodbridge K. Through-the-wall sensing of personnel using passive bistatic wifi radar at standoff distances //IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing. – 2012. – Т. 50. – №. 4. – С. 1218-1226.
3. Fu L. et al. Microwave holography using a magnetic tunnel junction based spintronic microwave sensor //Journal of Applied Physics. – 2015. – Т. 117. – №. 21. – С. 213902.
4. Gui Y. S. et al. New horizons for microwave applications using spin caloritronics //Solid State Communications. – 2014. – Т. 198. – С. 45-51.
5. Yao B. M. et al. Rapid microwave phase detection based on a solid state spintronic device //Applied Physics Letters. – 2014. – Т. 104. – №. 6. – С. 062408.
6. Cao Z. X. et al. Spintronic microwave imaging //Applied Physics A. – 2013. – Т. 111. – №. 2. – С. 329-337.
7. Speed, speed limits and stopping distances //Brake: the road safety charity. URL: <http://www.brake.org.uk/fundraise/15-facts/1255-speed> (retrieval date: May 05, 2020).
8. Gabor D. A new microscopic principle //Nature – 1948. – Т. 161. – С. 777-778.
9. Yamaguchi I., Zhang T. Phase-shifting digital holography //Optics letters. – 1997. – Т. 22. – №. 16. – С. 1268-1270.
10. Kreis T. Handbook of holographic interferometry: optical and digital methods – John Wiley & Sons, 2006.
11. Каленков Г. С., Каленков С. Г., Штанько А. Е. Гиперспектральная голографическая фурье-микроскопия //Квантовая электроника. – 2015. – Т. 45. – №. 4. – С. 333-338. (Kalenkov G.S., Kalenkov, S.G., Shtan'ko A.E. (2014), Hyperspectral Holographic Fourier-Microscopy //Quantum Electronics, v. 45, pp. 333-338. – in Russian)
12. Born M., Wolf E. Principles of Optics – Cambridge Univ. Pr., 1999.

13. Leshchiner D. et al. Resolution Limits in Near-Distance Microwave Holographic Imaging for Safer and More Autonomous Vehicles //Journal of Traffic and Transportation Engineering. – 2017. – Т. 5. – С. 316-327.
14. Leshchiner D. et al. Image reconstruction algorithms for the microwave holographic vision system with reliable gap detection at theoretical limits //EPJ Web Conf. – 2018. – Vol. 185.
15. Tikhonov A. N. et al. Numerical methods for the solution of ill-posed problems. – Springer Science & Business Media, 1995. – Mathematics and Its Applications T. 328.
16. Miwa S. et al. Highly sensitive nanoscale spin-torque diode //Nature materials. – 2014. – Т. 13. – №. 1. – С. 50-56.
17. Fang B. et al. Giant spin-torque diode sensitivity in the absence of bias magnetic field //Nature communications. – 2016. – Т. 7. – С. 11259.
18. Plokhov D.I. et al. Current-driven quantum dynamics of toroidal moment in rare-earth nanoclusters //EPJ Web Conf. – 2018. – Vol. 185.
19. Petrov P.N. et al. Inverse spin Hall effect in heterostructures “nanostructured ferromagnet/topological insulator” //EPJ Web Conf. – 2018. – Vol. 185.
20. Кулагин Н. Е. и др. Нелинейный токовый резонанс в спиновом диоде с плоскостным намагничиванием //Физика низких температур. – 2017. – Т. 43. – №. 6. – С. 889–897. (N.E. Kulagin et al. (2017), Nonlinear Current Resonance in the Spin-Torque Diode with a Planar Magnetization // Low Temperature Physics v. 43, p. 708. – in Russian)
21. Demin G., Popkov A. Spin-torque quantization and microwave sensitivity of a nano-sized spin diode //EPJ Web Conf. – 2018. – Vol. 185.
22. Попков А. Ф. и др. Полевые особенности микроволновой чувствительности спинового диода при наличии тока смещения //Известия высших учебных заведений. Электроника. – 2017. – Т. 22. – №. 2. – С. 109-119. (Popkov, A.F et al. (2017), Field Features of Spin-Torque Diode Microwave Sensitivity Presence of Bias Current //Proceedings of Universities. Electronics, v. 22, pp. 109-119 – in Russian).
23. Hemour S. et al. Towards low-power high-efficiency RF and microwave energy harvesting //IEEE transactions on microwave theory and techniques. – 2014. – Т. 62. – №. 4. – С. 965-976.

Spin Diode Based Microwave Registration and Holographic Visualization of Wave Front Scattering for an Autonomous Driving System

K.A. Zvezdin^{1,A,B,C}, D.R. Leshchiner^{2,A,C}, A.F. Popkov^{3,A}, P.N. Skirdkov^{4,A,B,C},
A.G. Buzdakov^{5,A}, G.N. Chepkov^{6,A}

^A Moscow Institute of Physics and Technology (MIPT)

^B Prokhorov General Physics Institute of the Russian Academy of Sciences

^C Russian Quantum Center (RQC)

¹ ORCID: 0000-0002-9050-7782, konstantin.zvezdin@gmail.com

² ORCID: 0000-0002-7881-3816, dmitry_1111@inbox.ru

³ ORCID: 0000-0002-9583-0941, afpopkov@inbox.ru

⁴ ORCID: 0000-0003-1782-5044, petr.skirdkov@phystech.edu

⁵ ORCID: 0000-0002-7264-314X, aleksandr.buzdakov@phystech.edu

⁶ ORCID: 0000-0001-8937-5586, chepkov@phystech.edu

Abstract

In the paper, we discuss the scheme and the prospects of holographic visualization for microwave scattering objects. At the core of our method is microwave registration based on spin diodes, to identify obstacles to the movement for the car's autonomous driving system. The resolution of the holographic system grows with wavelength decrease. However, the recording capacity at a given level of irradiating signal and diode noise decreases. We give an algorithm for the numerical reconstruction and visualization of obstacles. Estimates for the resolution and the reliability of object identification, depending on the distance to the obstacle, obtained by numerical modeling. We show that there is an optimal wavelength to reach the maximum distance of microwave recording, taking into account the system resolution and the acceptable signal level. Highly sensitive spin diodes, feasible for the 2-30 cm wavelength range, nearly approach the optimum range, which is ~ 0.5-1 cm for Schottky diodes, in their holographic visualization ability. Based on the Kotelnikov theorem for the sampling frequency of a harmonic signal, and on numerical experiments, the requirements for the placement density of the receiving elements of the recorder antenna array were determined depending on the distance to the object, the number of sensors and the recording window size. We show that a microwave-recording device based on spin diodes can be promising for an autonomous driving system in conditions of constrained movement with poor visibility and high noise.

Keywords: microwave radiation, holographic registration, autonomous driving system, spin diode, detection range.

References

1. Holl P.M., Reinhard F., Holography of wi-fi radiation // Phys. Rev. Lett. 118, 183901 (2017).
2. Chetty K., Smith G.E., Woodbridge K., Through-the-wall sensing of personnel using passive bistatic wifi radar at standoff distances //IEEE Trans. on Geoscience and Remote Sensing 50(4), 1218-1226 (2012).
3. Fu L. et al., Microwave holography using a magnetic tunnel junction based spintronic microwave sensor // J. Appl. Phys. 117(21), 213902 (2015).

4. Gui Y.S. et al., New horizons for microwave applications using spin caloritronics // *Solid State Communications* 198, 45-51 (2014).
5. Yao B.M. et al., Rapid microwave phase detection based on a solid state spintronic device // *Appl. Phys. Lett.* 104, 062408 (2014).
6. Cao Z.X. et al., Spintronic microwave imaging // *Appl. Phys. A* 111(2), 329–337 (2013).
7. Speed, speed limits and stopping distances // Brake: the road safety charity. [URL: http://www.brake.org.uk/fundraise/15-facts/1255-speed](http://www.brake.org.uk/fundraise/15-facts/1255-speed) (retrieval date: May 05, 2020).
8. Gabor D., A new microscopic principle // *Nature* 161, 777–778 (1948).
9. Yamaguchi I., Zhang T., Phase-shifting digital holography // *Optics letters* 22(16), 1268-1270 (1997)
10. Kreis T., *Handbook of holographic interferometry: optical and digital methods* – John Wiley & Sons, 2006.
11. Каленков Г.С., Каленков С.Г., Штанько А.Е., Гиперспектральная голографическая фурье-микроскопия // *Квантовая электроника*. – 2015. – Т. 45. – №. 4. – С. 333-338. (Kalenkov G.S., Kalenkov, S.G., Shtan'ko A.E., Hyperspectral Holographic Fourier-Microscopy // *Quantum Electronics* 45(4), 333–338 (2014) – in Russian).
12. Born M., Wolf E. *Principles of Optics* – Cambridge Univ. Pr., 1999.
13. Leshchiner D. et al., Resolution Limits in Near-Distance Microwave Holographic Imaging for Safer and More Autonomous Vehicles // *J. of Traffic and Transportation Engineering* 5, 316-327 (2017).
14. Leshchiner D. et al., Image reconstruction algorithms for the microwave holographic vision system with reliable gap detection at theoretical limits // *EPJ Web Conf.* 185 (2018).
15. Tikhonov A.N. et al., Numerical methods for the solution of ill-posed problems // *Mathematics and Its Applications* 328 – Springer Science & Business Media, 1995.
16. Miwa S. et al., Highly sensitive nanoscale spin-torque diode // *Nature Materials* 13(1), 50-56 (2014).
17. Fang B. et al., Giant spin-torque diode sensitivity in the absence of bias magnetic field // *Nature Communications* 7, 11259 (2016).
18. Plokhov D.I. et al., Current-driven quantum dynamics of toroidal moment in rare-earth nanoclusters // *EPJ Web Conf.* 185 (2018).
19. Petrov P.N. et al., Inverse spin Hall effect in heterostructures “nanostructured ferromagnet/topological insulator” // *EPJ Web Conf.* 185 (2018).
20. Кулагин Н.Е. и др., Нелинейный токовый резонанс в спиновом диоде с плоскостным намагничиванием // *Физика низких температур*. – 2017. – Т. 43. – №. 6. – С. 889–897. (N.E. Kulagin et al., Nonlinear Current Resonance in the Spin-Torque Diode with a Planar Magnetization // *Low Temperature Physics* 43, 708 (2017) – in Russian).
21. Demin G., Popkov A., Spin-torque quantization and microwave sensitivity of a nano-sized spin diode // *EPJ Web Conf.* 185 (2018).
22. Попков А.Ф. и др., Полевые особенности микроволновой чувствительности спинового диода при наличии тока смещения // *Известия высших учебных заведений. Электроника*. – 2017. – Т. 22. – №. 2. – С. 109-119. (Popkov, A.F et al., Field Features of Spin-Torque Diode Microwave Sensitivity Presence of Bias Current // *Proceedings of Universities. Electronics* 22, 109-119 (2017) – in Russian).
23. Hemour S. et al., Towards low-power high-efficiency RF and microwave energy harvesting // *IEEE transactions on microwave theory and techniques* 62(4), 965-976 (2014).