

## Сравнение вариантов зондирования „на отражение“ и „на просвет“ в системах радиовидения малой дальности

© В.В. Разевиг,<sup>1</sup> А.С. Бугаев,<sup>2</sup> С.И. Ивашов<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана, 105005 Москва, Россия

<sup>2</sup> Московский физико-технический институт, 141701 Долгопрудный, Московская обл., Россия  
e-mail: vrazevig@rslab.ru

Поступило в Редакцию 30 июня 2022 г.

В окончательной редакции 26 июля 2022 г.

Принято к публикации 27 июля 2022 г.

Технология радиовидения позволяет с помощью радиоволн получать изображения объектов, находящихся в оптически непрозрачной среде, либо внутренней структуры объектов, непрозрачных в оптическом диапазоне длин волн. Часто в системах радиовидения малой дальности используется вариант зондирования „на отражение“, когда совмещенная приемо-передающая антенна сканирует по плоскости, формируя двумерную синтезированную апертуру, при этом регистрируется отраженный от объекта наблюдения сигнал, в результате чего формируется радиоголограмма объекта. Вторым вариантом может быть зондирование „на просвет“, при котором передающая и приемная антенны находятся по разные стороны от объекта и сканируют синхронно, в этом случае регистрируется прошедший сигнал. Целью работы является теоретическое и экспериментальное сравнение двух этих вариантов зондирования, выявление достоинств и недостатков каждого варианта с учетом особенностей, возникающих при решении различных задач радиовидения.

**Ключевые слова:** радиоголография, радиоизображение, отраженный сигнал, прошедший сигнал, разрешение по дальности.

DOI: 10.21883/JTF.2022.11.53450.173-22

### Введение

Технология радиовидения позволяет с помощью радиоволн, рассеянных объектами, определять их положение и форму, в том числе при нахождении объектов в оптически непрозрачной среде, но относительно прозрачной в радиодиапазоне. Эта технология имеет различные применения, такие как: неразрушающий контроль конструкций и материалов [1–4]; обнаружение запрещенных к проносу предметов, скрытых под одеждой человека [5,6]; визуализация внутренней структуры тканей и органов человека в медицине [7,8]; обнаружение людей за препятствиями [9]. Характеристики объектов определяются по так называемым радиолокационным изображениям (радиоизображениям), процесс получения которых заключается в регистрации комплексной радиоголограммы объекта и последующем ее восстановлении. Регистрация радиоголограммы происходит путем облучения объекта когерентным сигналом с помощью одного или некоторого количества передающих элементов, распределенных в пространстве, и измерения комплексной амплитуды рассеянного объектом сигнала с помощью набора распределенных приемных элементов.

Часто в системах радиовидения малой дальности используется единственная приемо-передающая антенна, которая сканирует по плоскости в пределах заданной области обследования. Сканирование осуществляется

либо рукой оператора [1], либо с помощью электро-механического сканера [3,4]. Такое построение антенной системы (АС) является моностатическим, при котором может быть реализован только принцип работы „на отражение“.

В радиолокационных системах (РЛС) большой дальности хорошо зарекомендовал себя бистатический „просветный“ принцип построения РЛС, когда передающая и приемная антенны находятся по разные стороны объекта наблюдения. В таких системах используется метод теневого инверсного радиолокационного синтезирования апертуры, с помощью которого возможно восстанавливать профильную функцию теневого силуэта объекта и его теневой спектральный портрет [10,11]. Достоинством такого построения является то, что при наблюдении рассеянного „вперед“ поля происходит резкое увеличение эффективной поверхности рассеяния объектов [10], практически не зависящее от мер противорадиолокационной маскировки [12].

Поэтому настоящую работу было решено посвятить исследованию „просветного“ принципа в системах радиовидения малой дальности. В ней выполнено теоретическое и экспериментальное сравнение моностатической и бистатической „просветной“ конфигураций АС. Исследуются системы радиовидения, использующие непрерывный сигнал со ступенчатым переключением частоты.

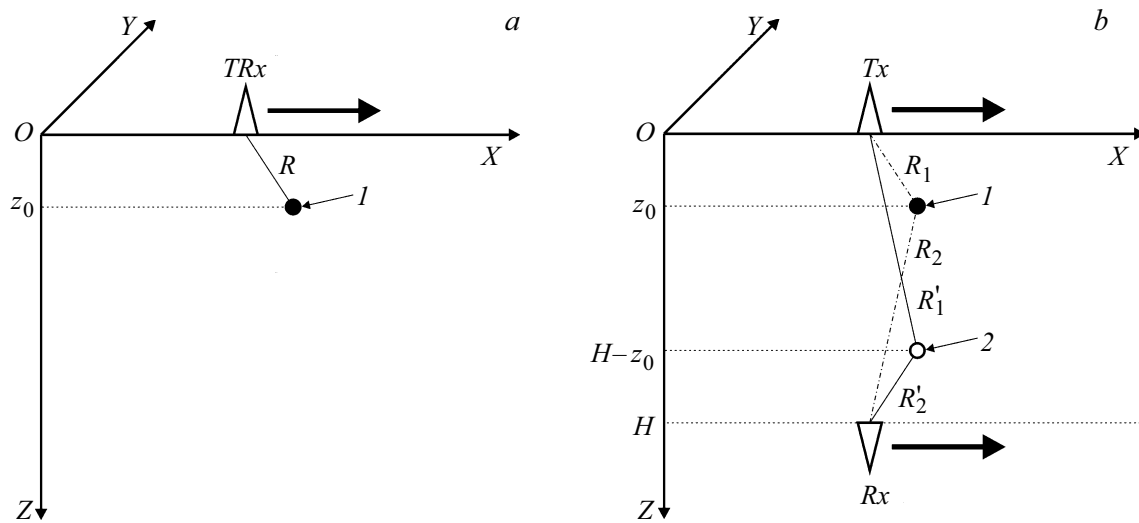


Рис. 1. Варианты работы систем радиовидения: *a* — на отражение, *b* — на просвет; 1 — истинный объект, 2 — мнимый объект.

Литературный поиск выявил не так много работ, посвященных системам радиовидения малой дальности, работающих „на просвет“, например, [7,13]. Наиболее близкая к настоящей работе „просветная“ конфигурация антенной системы рассматривается в [7], но в ней нет сравнения вариантов „на отражение“ и „на просвет“. В [13] предлагается метод получения хорошего разрешения по дальности, но для этого необходимо использовать мультистатическую конфигурацию антенной системы.

## 1. Теоретические предпосылки

Рассмотрим геометрию системы радиовидения, работающей „на отражение“, с единственной прямо-передающей антенной (TRx), рис. 1, *a*. Антенна сканирует в плоскости  $z = 0$ , в каждом узле двумерной эквидистантной сетки излучает непрерывный сигнал со ступенчатым переключением частоты и на каждой частоте регистрирует отраженный от объекта сигнал. На рисунке текущее направление движения антенны показано стрелкой. Зондируемым объектом выступает всенаправленный точечный рассеиватель, расположенный в абсолютно однородной среде.

В системах радиовидения основной информацией о зондируемом объекте является набег фазы при распространении сигнала на пути „передающая антенна–объект–приемная антенна“ [5]. При данной конфигурации набег фазы пропорционален удвоенному расстоянию от антенны до объекта:

$$\Delta\phi(f) = \frac{2\pi f \sqrt{\varepsilon_E}}{c} 2R, \quad (1)$$

где  $c$  — скорость света,  $\varepsilon_E$  — диэлектрическая проницаемость среды, в которой находится зондируемый объект.

Изменение расстояния  $R$  от прямо-передающей АС до объекта при сканировании АС в плоскости регистрации радиоголограммы влечет за собой изменение набегов фаз, в том числе с учетом изменения частот. Поэтому система, работающая на отражение, способна определять расстояние до зондируемого объекта и разрешать объекты, находящиеся на разных расстояниях от плоскости регистрации.

Геометрия системы радиовидения, работающей „на просвет“, приведена на рис. 1, *b*. В процессе сканирования передающая ( $Tx$ ) и приемная ( $Rx$ ) антенны перемещаются синхронно. В этом случае набег фазы зависит от суммарного расстояния  $R_1$  (от передающей антенны до объекта) и  $R_2$  (от объекта до приемной антенны):

$$\Delta\phi(f) = \frac{2\pi f \sqrt{\varepsilon_E}}{c} (R_1 + R_2), \quad (2)$$

При этом  $z_0$  слабо влияет на  $R_1 + R_2$ , особенно если передающая и приемная антенны в процессе сканирования занимают такое положение, что объект находится на линии между ними или вблизи нее. Кроме того, для любого объекта, расположенного в плоскости  $z = z_0$ , существует мнимый объект, расположенный в плоскости  $z = H - z_0$ , где  $H$  — расстояние между передающей и приемной антеннами, такой, что  $R_1 + R_2 = R'_1 + R'_2$  при любом положении антенн в процессе сканирования. Здесь  $R'_1$  — расстояние от передающей антенны до мнимого объекта,  $R'_2$  — расстояние от мнимого объекта до приемной антенны. Поэтому можно предположить, что при работе на просвет разрешающая способность по дальности будет хуже, чем при работе на отражение.

Далее проверим эту гипотезу методом компьютерного моделирования, но сначала остановимся на методе восстановления радиоголограмм.

## 2. Метод восстановления радиоголограмм

Введем функцию контраста, описывающую распределение электрических свойств объекта по отношению к окружающей его среде [8]:

$$\chi(\mathbf{r}') = \frac{\varepsilon(\mathbf{r}') - \varepsilon_E}{\varepsilon_E}, \quad (3)$$

где  $\varepsilon(\mathbf{r}')$  — диэлектрическая проницаемость объекта в точке  $\mathbf{r}' = [x', y', z']^T$  ( $T$  — обозначает транспонирование), диэлектрическая проницаемость среды.

Методы восстановления радиоголограмм служат для вычисления функции распределения контраста по восстанавливаемому объему путем обработки зарегистрированной радиоголограммы. При отображении результата восстановления визуализировать можно как трехмерный объем восстановленных данных целиком, так и строить его сечения различными плоскостями. В дальнейшем изложении будут приведены оба варианта.

В настоящей работе для восстановления будем использовать метод обратных проекций [14,15], согласно которому при работе „на отражение“ значение функции контраста в точке пространства с координатами  $(x', y', z')$  может быть вычислено по формуле

$$\chi(x', y', z') = \sum_{f=f_{\min}}^{f_{\max}} \sum_{x=-S_x/2}^{S_x/2} \sum_{y=-S_y/2}^{S_y/2} E(f, x, y) \times \exp\left(jk2\sqrt{(x' - x)^2 + (y' - y)^2 + (z')^2}\right), \quad (4)$$

где  $E(f, x, y)$  — значение радиоголограммы, зарегистрированное на частоте  $f$  при расположении антенны в точке с координатами  $(x, y, 0)$ ;  $k = 2\pi f \sqrt{\varepsilon_E}/c$  — волновое число;  $f_{\min}$  и  $f_{\max}$  — диапазон изменения частоты зондирующего сигнала;  $S_x$  и  $S_y$  — размеры области регистрации радиоголограммы по соответствующим осям,  $j$  — мнимая единица. При восстановлении шаг по частоте равен шагу зондирующего сигнала со ступенчатым переключением частоты. Шаги по координатам  $X$  и  $Y$  определяются характеристиками сканирующей системы, для достижения наилучших результатов расстояние между соседними выборками не должно превышать четверти длины волны [5].

При работе „на просвет“ формула для восстановления выглядит следующим образом:

$$\chi(x', y', z') = \sum_{f=f_{\min}}^{f_{\max}} \sum_{x=-S_x/2}^{S_x/2} \sum_{y=-S_y/2}^{S_y/2} (E(f, x, y) \times \exp\left(jk\left[\sqrt{(x' - x)^2 + (y' - y)^2 + (z')^2} + \sqrt{(x' - x)^2 + (y' - y)^2 + (z' - H)^2}\right]\right). \quad (5)$$

При этом предполагается, что передающая антенна перемещается в плоскости  $z = 0$ , а приемная — в плоскости  $z = H$ .

## 3. Компьютерное моделирование

Параметры вычислительных экспериментов были следующими:

- диапазон частот 15–24 GHz с шагом  $\Delta f = 250$  MHz (37 частот);
- размеры области регистрации радиоголограмм  $S_x = S_y = 300$  mm;
- шаг между выборками 3 mm по обоим осям;
- расстояние между антеннами по оси  $Z$  в „просветном варианте“  $H = 170$  mm.

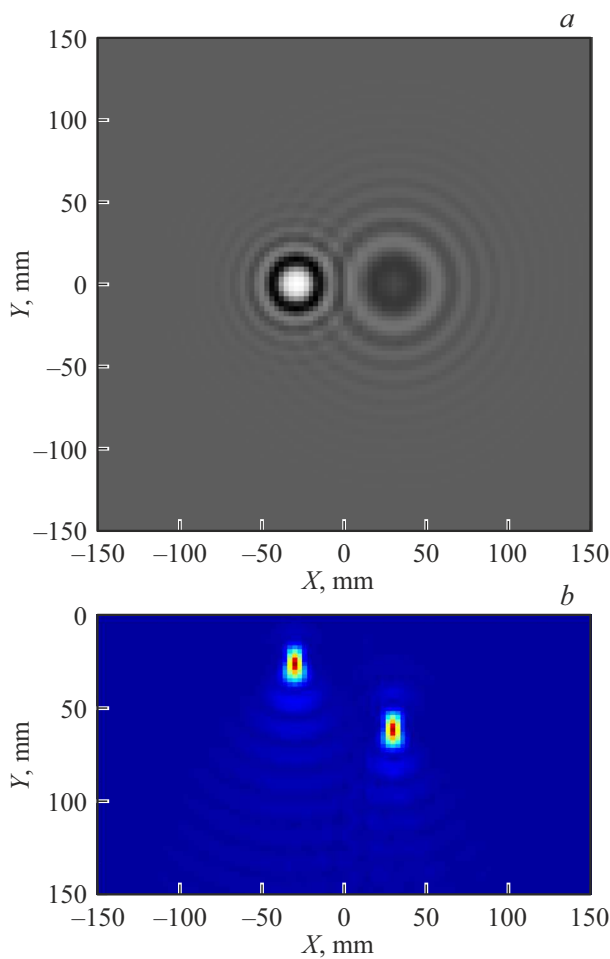
В первом вычислительном эксперименте в качестве объектов выступали два всенаправленных точечных рассеивателя, имеющие координаты  $(-30, 0, 30)$  и  $(30, 0, 70)$  mm. Моделировался вариант работы „на отражение“. Радиоголограмма рассчитывалась по формуле

$$E(f, x, y) = E_0 \sigma \sum_{i=1}^N \left( \frac{G(f, \theta_i, \varphi_i)}{R_i} \right)^2 \exp[-jk2R_i], \quad (6)$$

где  $E_0$  — амплитуда возбуждения передатчика;  $\sigma = 1$  — эффективная площадь рассеяния точечного рассеивателя, введенная в формулу для соблюдения размерности;  $N$  — количество точечных рассеивателей;  $R_i = \sqrt{(x - x_i)^2 + (y - y_i)^2 + z_i^2}$  — расстояние от точки текущего положения приемо-передающей антенны до  $i$ -го рассеивателя с координатами  $(x_i, y_i, z_i)$ ;  $k = \frac{2\pi f \sqrt{\varepsilon_E}}{c}$  — волновое число;  $\varepsilon_E$  — диэлектрическая проницаемость среды;  $G(f, \theta_i, \varphi_i)$  — диаграмма направленности антенны на частоте  $f$ ;  $\theta_i$  и  $\varphi_i$  — азимутальный и полярный углы между нормалью к плоскости и направлением из точки текущего положения антенны на  $i$ -й рассеиватель. Радиоголограмма рупорной антенны, которая использовалась в физических экспериментах, была заранее рассчитана с помощью программы электродинамического моделирования FEKO и записана в файл.

Отметим, что при работе „на отражение“ многочастотный сигнал с указанными в начале раздела параметрами имеет разрешение по дальности  $\delta r = c/(2\Delta F) = 1.7$  cm и однозначный интервал дальностей  $\delta R = c/(2\Delta F) = 60$  cm.

На рис. 2 приведены рассчитанная по формуле (6) радиоголограмма (показана ее действительная часть на частоте 20 GHz) и результаты ее восстановления — радиоизображение, построенное в вертикальной плоскости  $y = 0$ . Радиоизображение демонстрирует, что система радиовидения, работающая на отражение, способна определять пространственное положение объекта как в плоскости регистрации радиоголограммы, так и по дальности.



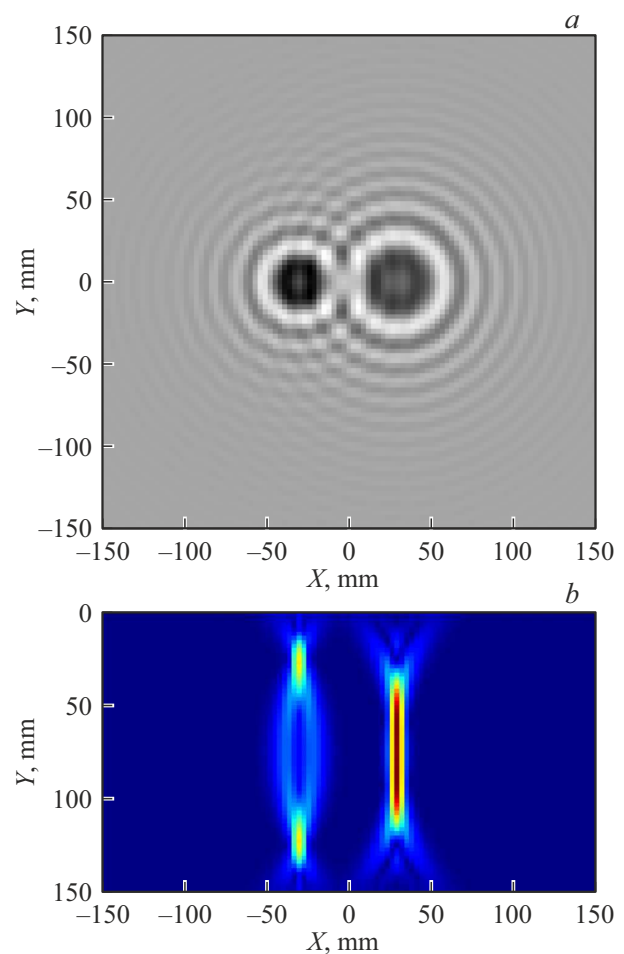
**Рис. 2.** Результаты моделирования варианта „на отражение“: *a* — радиоголограмма, *b* — результат ее восстановления.

Во втором вычислительном эксперименте для тех же точечных рассеивателей моделировался вариант „на просвет“<sup>1</sup>. Для расчета радиоголограммы использовалась формула

$$E(f, x, y) = E_0 \sigma \sum_{i=1}^N \frac{G(f, \theta_{1,i} \varphi_{1,i}) G(f, \theta_{2,i} \varphi_{2,i})}{R_{1,i} R_{2,i}} \times \exp[-jk(R_{1,i} + R_{2,i})], \quad (7)$$

где  $R_{1,i} = \sqrt{(x - x_i)^2 + (y - y_i)^2 + z_i^2}$  — расстояние от точки текущего положения передающей антенны до  $i$ -го рассеивателя;  $R_{2,i} = \sqrt{(x - x_i)^2 + (y - y_i)^2 + (H - z_i)^2}$  — расстояние от  $i$ -го рассеивателя до точки текущего положения приемной антенны;  $\theta_{1,i}, \varphi_{1,i}$  и  $\theta_{2,i}, \varphi_{2,i}$  — углы, относящиеся к передающей и приемной антеннам соответственно.

Результаты моделирования приведены на рис. 3. Полученное радиоизображение (рис. 3, *b*) подтвердило предварительные теоретические рассуждения, а также выявило интересные моменты. Если объект располо-



**Рис. 3.** Результаты моделирования варианта „на просвет“: *a* — радиоголограмма, *b* — результат ее восстановления.

жен близко к антенне (в данном эксперименте левый рассеиватель на расстоянии  $z = 30$  mm), то, как и предполагалось, для него на радиоизображении имеется мнимый двойник, расположенный на расстоянии  $170 - 30 = 40$  mm. При этом невозможно определить, какой из откликов соответствует истинному положению объекта. А объект, расположенный дальше от антенны (правый рассеиватель на расстоянии  $z = 70$  mm), на радиоизображении вообще не локализуется по дальности, „размазываясь“ почти по всему диапазону дальностей.

Поясним причину этого с помощью геометрических построений. Сначала проанализируем вариант „на отражение“. Для упрощения рассмотрим плоскую геометрию при  $y = 0$  (рис. 1, *a*). Пусть точечный рассеиватель имеет координаты  $(x_0, 0, z_0)$ . Знание набега фазы отраженного сигнала при текущем положении антенны  $(x_A, 0, 0)$  в процессе ее перемещения вдоль оси  $x$  позволяет по формуле (1) определить расстояние до рассеивателя  $R^1$ . Следовательно, имея измерения при одном положении

<sup>1</sup> Заметим, что набег фазы можно однозначно измерить только в пределах  $\pm 180^\circ$ , хотя истинное значение набега фазы на рассматриваемых частотах и при анализируемой геометрии может достигать

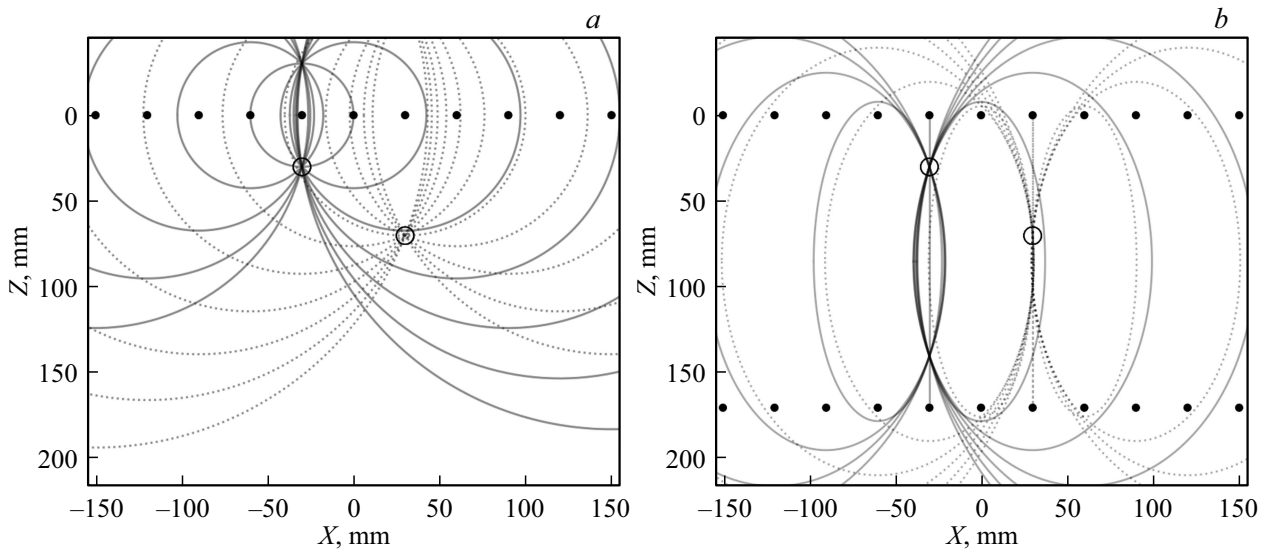


Рис. 4. Иллюстрация локализации объектов: *a* — на отражение, *b* — на просвет.

антенны, про положение рассеивателя можно сказать, что он лежит на окружности радиуса  $R$  с центром в точке  $(x_A, 0, 0)$ . При перемещении антенны каждое ее положение дает новую окружность, в результате чего положение рассеивателя можно определить как точку пересечения всех окружностей. Проиллюстрируем это рис. 4, *a*, где окружности построены для 11 положений антенны, которые показаны черными кругами. Построения сделаны для двух рассеивателей с координатами, как и раньше,  $(-30, 0, 30)$  и  $(30, 0, 70)$  мм, их положения показаны белыми кругами с черной границей. Окружности для разных рассеивателей показаны разными линиями (сплошной и пунктирной). Видно, что окружности пересекаются под разными углами, что в итоге дает хорошую локализацию обоих рассеивателей. Также видно, что в варианте „на отражение“ тоже существуют мнимые объекты (на рис. 4, *a* виден левый мнимый рассеиватель, а правый тоже существует, но он не попал в отображаемую область), однако они попадают в другое полупространство (в область отрицательных значений  $Z$ ), поэтому не мешают определению истинного положения объекта.

Перейдем к варианту „на просвет“. В этом случае набег фазы, измеренный при одном положении передающей антенны с координатами  $(x_A, 0, 0)$  и приемной антенны с координатами  $(x_A, 0, H)$ , позволяет определить суммарное расстояние  $R_1 + R_2$  (рис. 1, *b*). Точки, для которых  $R_1 + R_2 = \text{const}$ , лежат на эллипсе, центр которого находится в точке  $(x_A, 0, H/2)$ , длина большей оси равна  $R_1 + R_2$ , а длина малой —  $\sqrt{(R_1 + R_2)^2 - H^2}$ . Геометрические построения приведены на рис. 4, *b*, из которого видно, что рассеиватель, расположенный на меньшей дальности (30 мм), локализуется, и для

сотен радиан, см. формулу (1), поэтому для однозначного определения расстояния нужны измерения на нескольких частотах

него в том же полупространстве присутствует двойник. Эллипсы, соответствующие рассеивателю с большей дальностью (70 мм), пересекаются под острыми углами, практически касаясь друг друга, поэтому локализовать этот рассеиватель по дальности практически невозможно.

#### 4. Эксперимент

Эксперименты проводились с помощью радиолокационной системы, состоящей из векторного анализатора цепей (ВАЦ) и двумерного электромеханического сканера. В системе используется принцип инверсного синтеза апертуры: антенная система является стационарной, а сканер перемещает мимо нее обследуемый объект.

В первоначальном варианте установки [16] на каретке сканера был закреплен монтажный стол (МС) с опорами по углам, на которых устанавливался пенополиуретановый лист (или несколько листов), служащий для размещения объектов обследования. Между листом и МС располагался радиопоглощающий материал для предотвращения отражений от металлических направляющих сканера. В таком исполнении было невозможно установить вторую антенну снизу для реализации варианта зондирования „на просвет“. Поэтому к МС были прикреплены выносы из алюминиевого уголка, а уже на них размещались пенополиуретановые листы (рис. 5, слева). Антенна, подключенная ко второму порту ВАЦ, была установлена сверху, а антенна, подключенная к первому порту — снизу (рис. 5, справа).

Предварительная калибровка антенно-фидерных трактов была выполнена методом, описанным в [17].

При проведении эксперимента одновременно регистрировались все  $S$ -параметры двухпортовой системы.

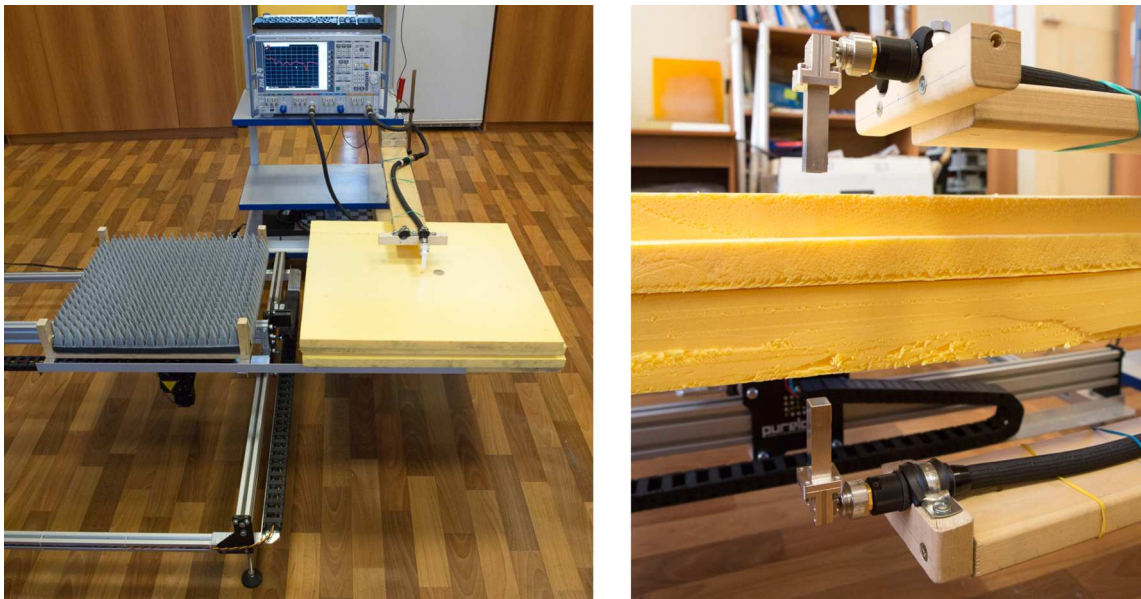


Рис. 5. Установка для регистрации радиоголограмм.

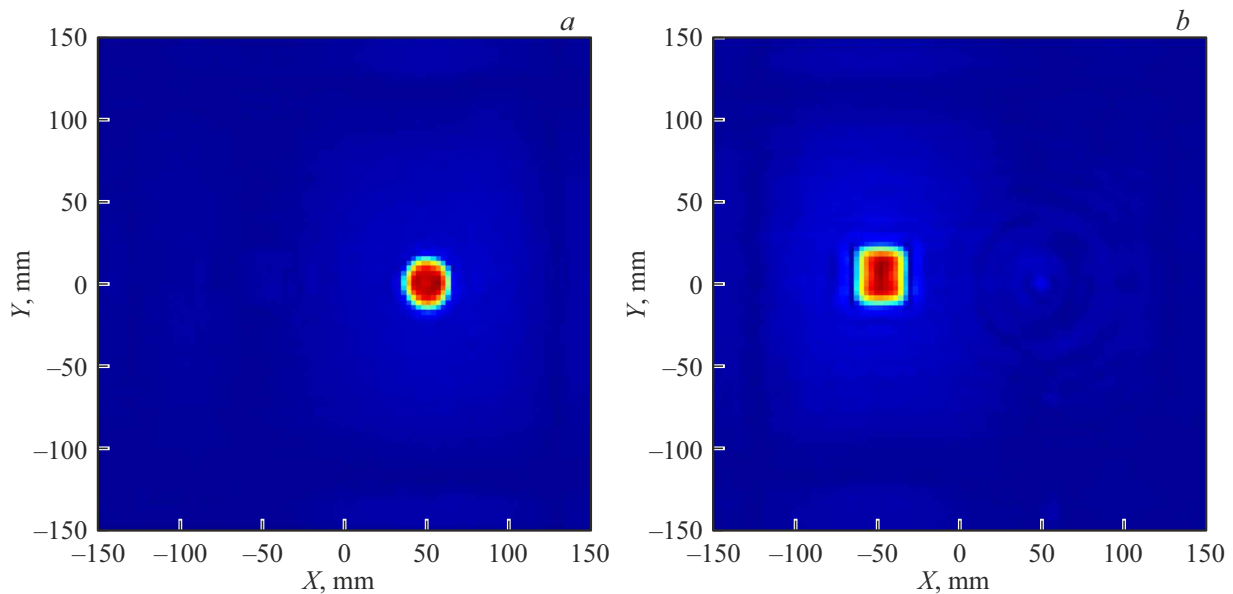


Рис. 6. Радиоизображения круга и квадрата для варианта „на отражение“, построенные для разных плоскостей,  $z$ :  $a$  — 60,  $b$  — 110 mm.

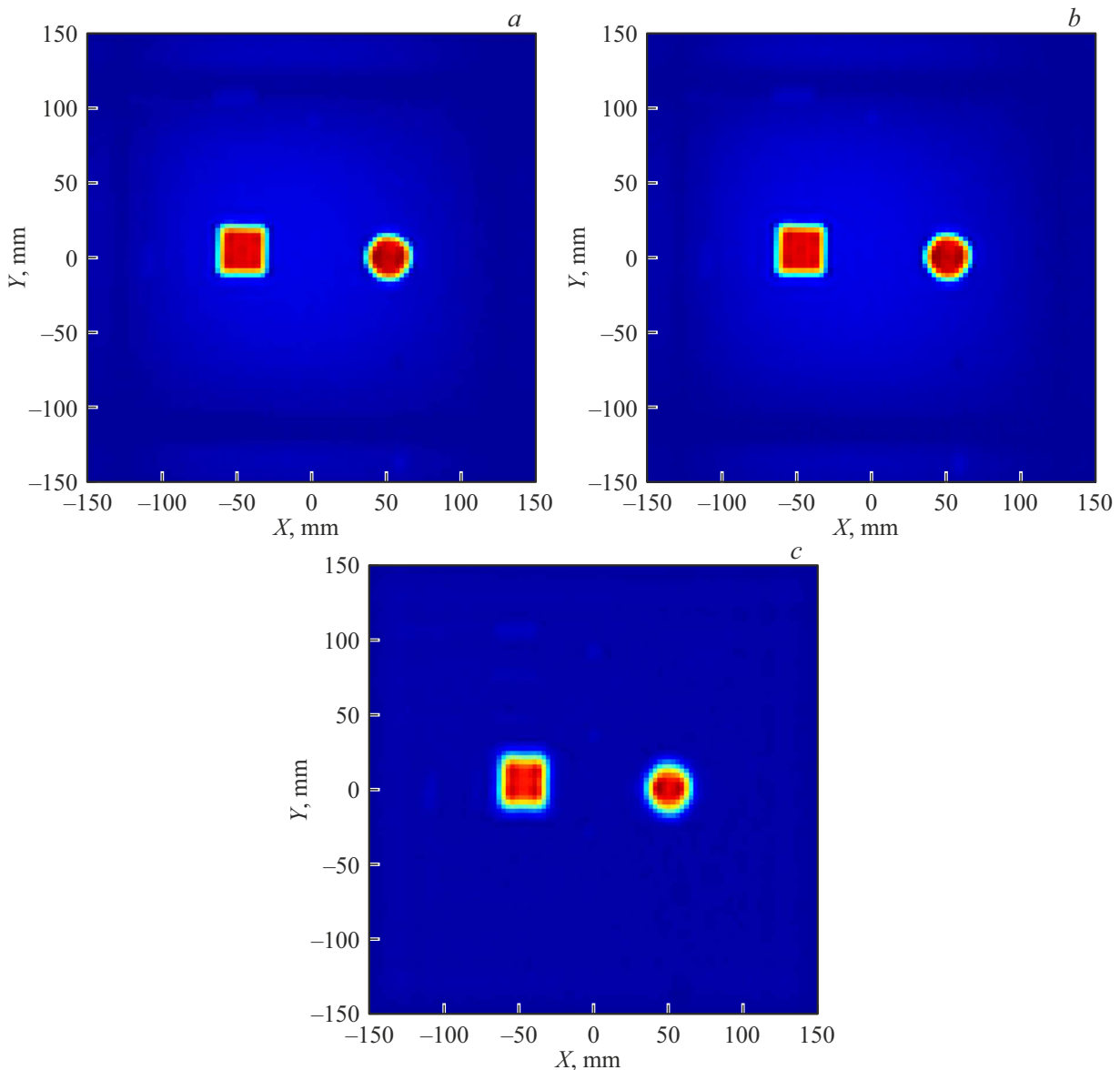
В варианте „на отражение“ использовался параметр  $S_{22}$  (так как сверху располагалась антенна, подключенная к порту № 2), а в варианте „на просвет“ — параметр  $S_{21}$ .

Параметры физических экспериментов совпадали с параметрами вычислительных экспериментов.

В первом эксперименте на нижний лист пенополиуретана толщиной 50 mm был положен металлический квадрат со стороной 30 mm, а на верхний лист — металлический круг диаметром 30 mm. Антенны были размещены таким образом, что расстояние от нижней антенны до поверхности нижнего листа составляло

10 mm. Расстояние между антеннами, как уже говорилось выше, составляло 170 mm (нужно заметить, что фотографии на рис. 5 сделаны при меньшем расстоянии между антеннами). Таким образом, в системе координат, приведенной на рис. 1,  $Z$ -координата круга была равна 60 mm, а квадрата — 110 mm.

Зарегистрированные радиоголограммы очень похожи на полученные путем моделирования, поэтому здесь для экономии места приводить их не будем. Результаты восстановления радиоголограммы для варианта „на отражение“ приведены на рис. 6.



**Рис. 7.** Радиоизображения круга и квадрата для варианта „на просвет“, построенные для разных плоскостей,  $z$ :  $a$  — 60,  $b$  — 110,  $c$  — 85 mm.

Видно, что на каждом радиоизображении присутствует только тот объект, который расположен в той плоскости, для которой это радиоизображение построено. На радиоизображении на рис. 6,  $a$  нет даже и следа от второго, более дальнего объекта. На радиоизображении на рис. 6,  $b$  присутствует едва заметный след от круга, который расположен ближе к верхней антенне, чем квадрат, и уровень отраженного от него сигнала больше.

Результаты восстановления радиоголограммы для варианта „на просвет“ приведены на рис. 7.

На радиоизображениях, построенных для плоскостей  $z = 60$  и 110 mm, присутствуют оба объекта — как уже говорилось, на каждом из них есть изображение истинного объекта и изображение мнимого объекта, расположенного на другой дальности (расстояния в

эксперименте были подобраны таким образом, чтобы мнимые объекты попадали в плоскость расположения другого объекта). Более того, на радиоизображении, построенном для промежуточной плоскости  $z = 85$  mm, также присутствуют оба объекта, но здесь они чуть сильнее размыты. Это подтверждает эмпирические рассуждения и результаты компьютерного моделирования.

Во втором эксперименте использовался более сложный пространственно-протяженный объект — металлический крест, установленный на лист пенополиуретана наклонно (рис. 8).

Радиоголограммы, зарегистрированные при работе на отражение и на просвет, приведены на рис. 9 (показаны действительные части радиоголограмм на частоте 20 GHz).

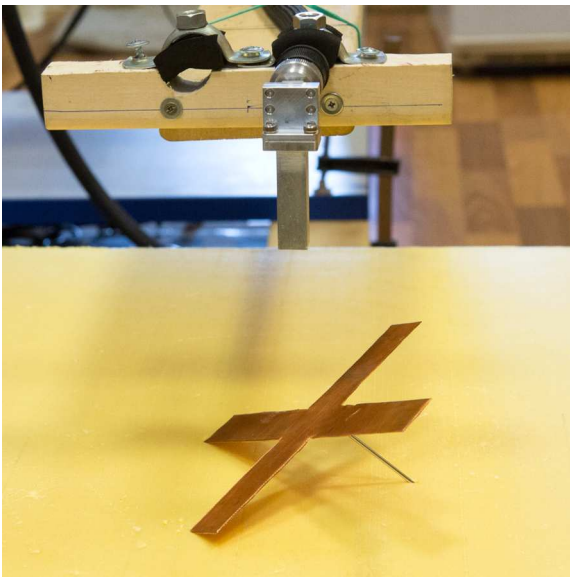


Рис. 8. Крест, установленный наклонно.

Здесь налицо различие между радиоголограммами: по рис. 9, *a* невозможно определить форму объекта, но интуитивно кажется, что он наклонный [18]; на рис. 9, *b*, напротив, форма объекта хорошо просматривается, но он представляется плоским.

Результаты восстановления радиоголограммы для вариантов „на отражение“ и „на просвет“ приведены на рис. 10 и 11 соответственно.

Для креста разница между двумя вариантами сохраняется: при использовании отраженного сигнала на каждом радиоизображении присутствует фрагмент объекта, соответствующий плоскости построения радиоизобра-

жения (при этом строб по дальности определяется шириной полосы зондирующего сигнала), а прошедший сигнал дает „теневое“ радиоизображение объекта, практически не зависящее от расстояния до плоскости, для которой оно строится. Нужно заметить, что при работе на отражение тоже можно „собрать“ весь пространственно распределенный по оси объект на одном радиоизображении. Для этого нужно применить метод проекции максимальной интенсивности [19], заключающийся в расчете трехмерного массива восстановленных данных, выборе в нем для каждой координаты  $(x, y)$  значения с максимальной интенсивностью и назначения его соответствующему пикселю плоского радиоизображения:

$$I_{2D}(x, y) = \max_z [I_{3D}(x, y, z)], \quad (8)$$

где  $I_{3D}(x, y, z)$  — трехмерный массив восстановленных данных,  $I_{2D}(x, y)$  — плоское радиоизображение.

В заключение на рис. 12 приведем результаты визуализации трехмерного массива восстановленных данных.

В третьем эксперименте сравним варианты „на отражение“ и „на просвет“ при обследовании слабоконтрастных объектов, таких, как воздушные полости в листе пенополиуретана (в отличие от металлических объектов с хорошей отражающей способностью в первых двух экспериментах). Для этого был подготовлен тестовый образец с вырезами разной формы и глубины на его верхней поверхности (рис. 13). При зондировании лист с вырезами накрывался таким же листом, но без вырезов, таким образом, имитировались воздушные полости в толще образца.

На рис. 13, *a* белый фон объектов соответствует вырезам глубиной 2.5–3 мм, а серый фон — глубиной 9–10 мм. Разброс глубин вызван тем, что вырезы выполнялись вручную.

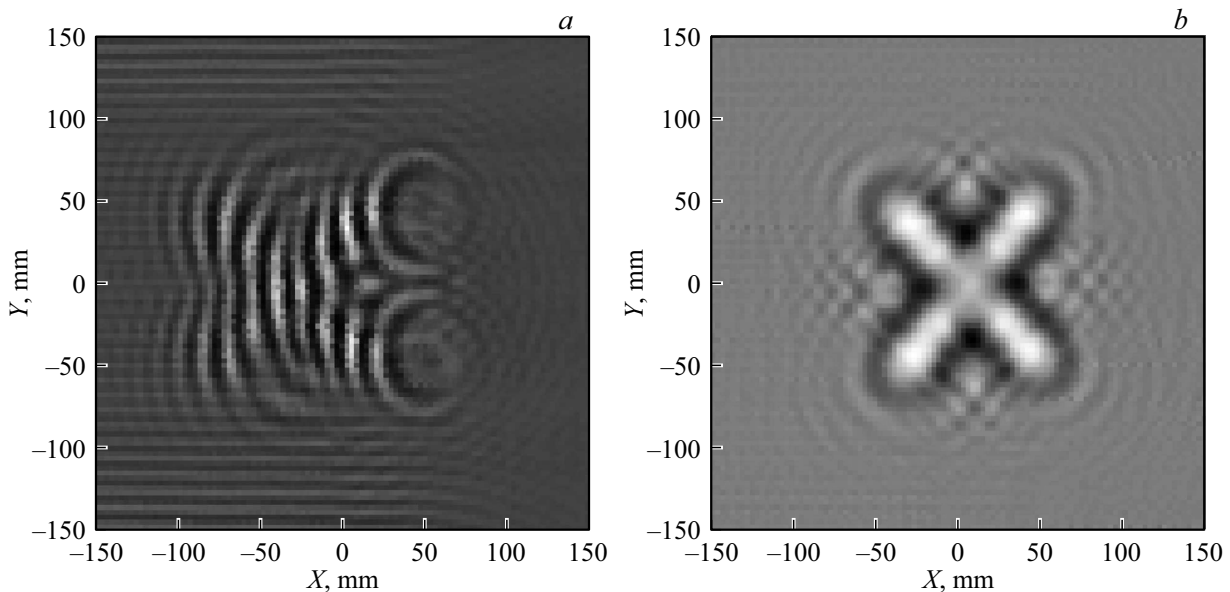
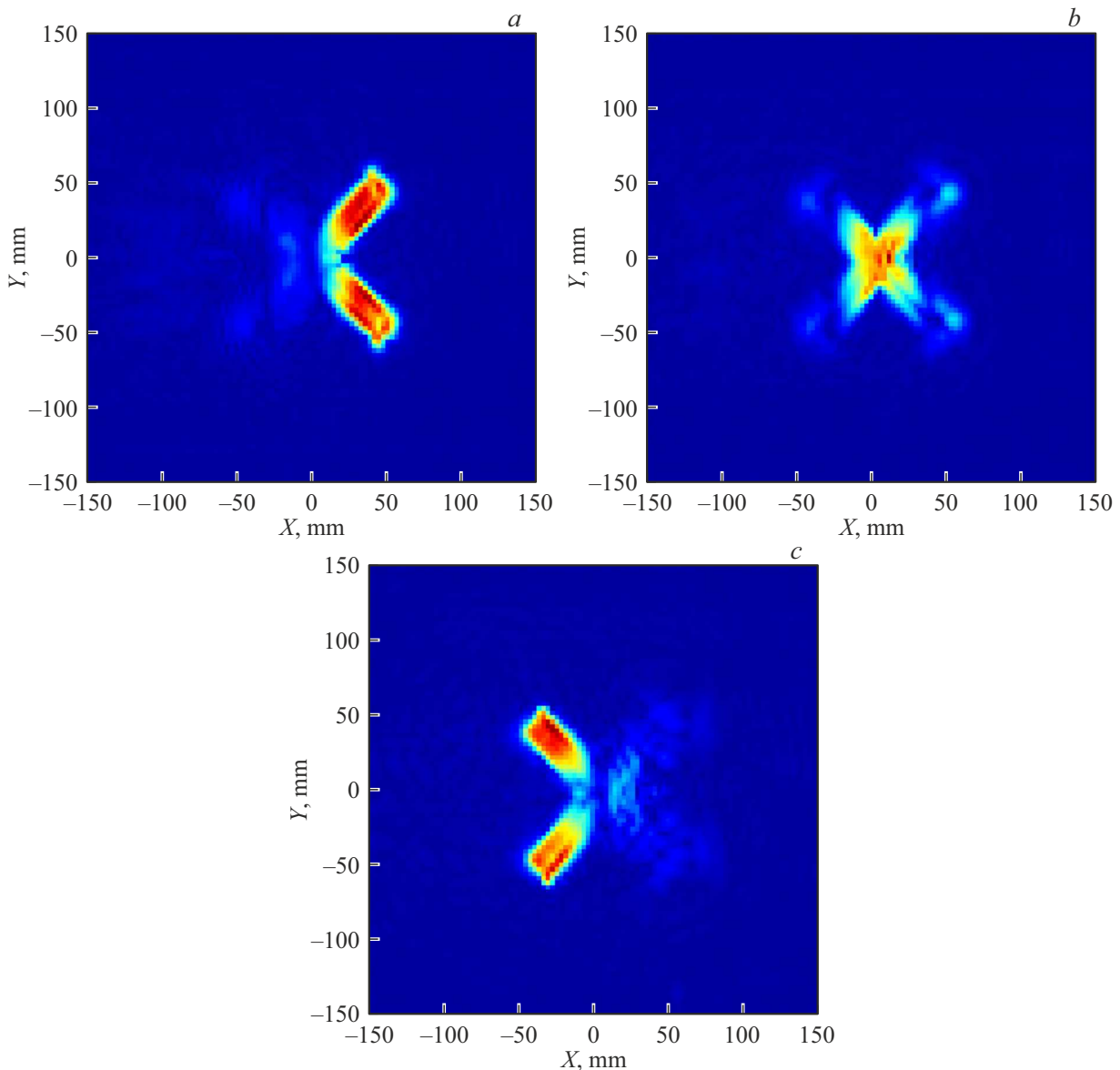


Рис. 9. Радиоголограммы наклонного креста: *a* — на отражение, *b* — на просвет.





**Рис. 10.** Радиоизображения наклонного креста для варианта „на отражение“, построенные для разных плоскостей,  $z$ :  $a$  — 60,  $b$  — 80,  $c$  — 100 mm.

В этом эксперименте были изменены параметры: размер области регистрации был равен  $350 \times 300$  mm, а вертикальное расстояние между антеннами — 126 mm. Результаты восстановления радиоголограмм, построенные для двух вариантов зондирования в плоскости  $z = 60$  mm (расстояние от верхней антенны до поверхности листа с вырезами), приведены на рис. 14.

Анализ полученных радиоизображений позволяет сделать следующие наблюдения:

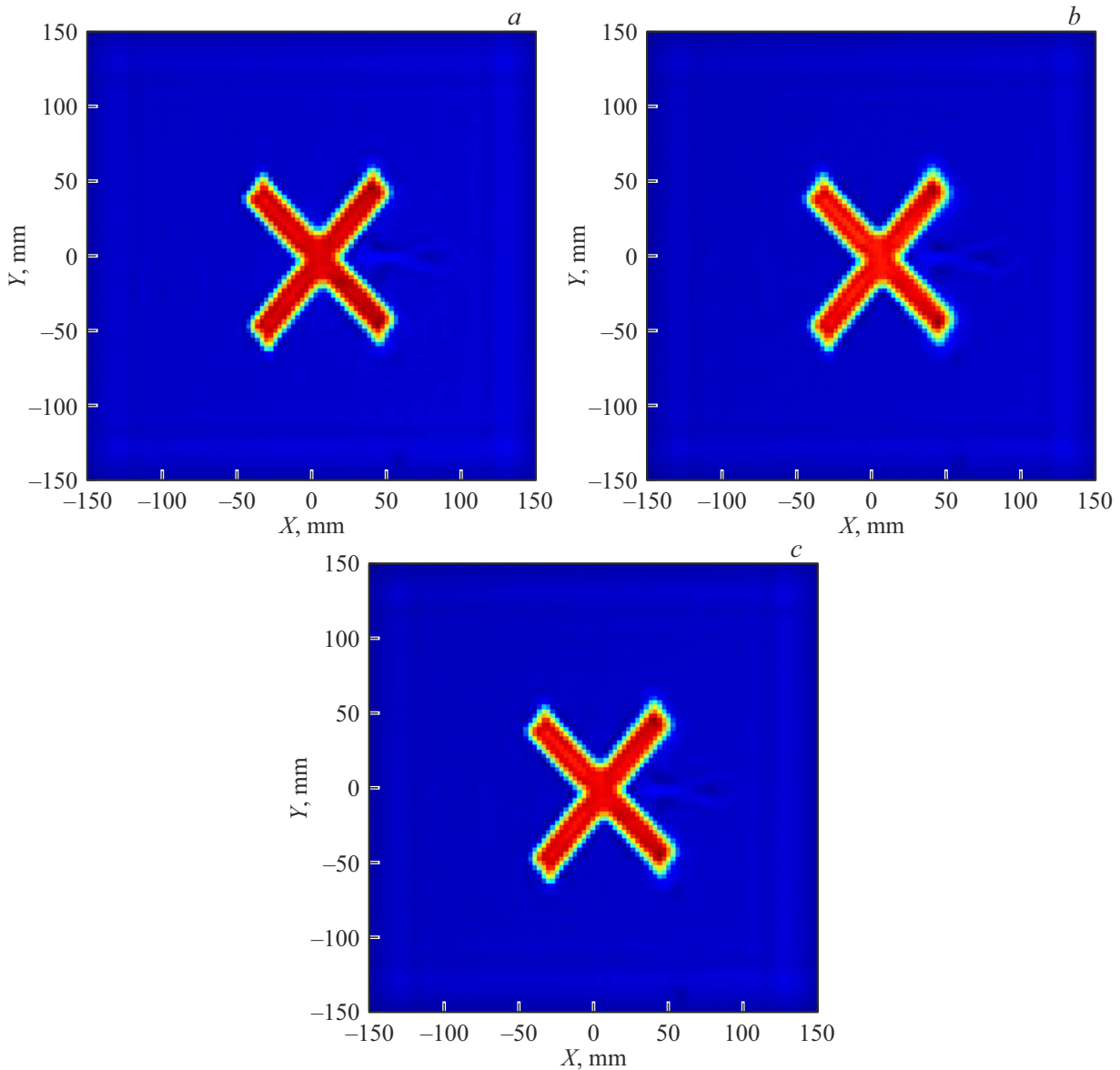
- фоновых артефактов значительно меньше на радиоизображении для случая „на просвет“;
- на „просветном“ радиоизображении полости с большей толщиной (протяженностью по оси  $Z$ ) имеют большую яркость, поэтому можно предположить, что

вариант „на просвет“ позволяет оценивать толщину объектов<sup>2</sup>;

- в варианте „на отражение“ не прослеживается связь между толщиной полости и ее яркостью на радиоизображении, наоборот, полости малой толщины (левая верхняя и левая нижняя) имеют большую яркость, чем более толстые полости; вероятно, это связано с тем, что в этом варианте отражение волны происходит в основном от ближней к антенне границы „среда–полость“;

- полости меньшей толщины лучше видны в варианте „на отражение“, а большей толщины — в варианте „на просвет“.

<sup>2</sup> Дополнительный эксперимент с деревянными столбиками разной толщины не подтвердил однозначной связи между толщиной объекта и его яркостью на радиоизображении.



**Рис. 11.** Радиоизображения наклонного креста для варианта „на просвет“, построенные для разных плоскостей,  $z$ :  $a$  — 60,  $b$  — 80,  $c$  — 100 mm.

В заключительном эксперименте сравнение двух подходов проводилось на фрагменте вертолетной лопасти, предоставленной Московским вертолетным заводом им. М.Л. Миля (рис. 15). Образец изготовлен из композитного материала на основе стеклопластика и имеет сотовую внутреннюю структуру с размером сот около 7.5 mm. В три расположенные рядом соты с помощью шприца было впрыснуто по 2 ml воды в каждую. Обнаружение влаги в вертолетных лопастях из композиционных материалов является весьма актуальной задачей, так как ее наличие приводит, во-первых, к растрескиванию лопастей и потере несущей способности в процессе многократного превращения воды в лед и обратно, а во-вторых, к разбалансировке ротора винта из-за изменения веса лопастей [20].

Данный эксперимент интересен тем, что верхняя поверхность образца не является плоской. Дело в том, что при обследовании объектов с неплоской и/или непараллельной плоскости регистрации радиоголограмм верхней поверхностью расстояние от плоскости регистрации до поверхности при разных положениях антенны разное. Из-за этого при работе „на отражение“ существенный вклад в радиоголограмму вносят отражения от поверхности, которые по уровню часто превышают отражения от внутренних объектов/дефектов, что мешает их выявлению и распознаванию. Этой проблеме посвящено большое количество работ, например [21–23].

В данном эксперименте размер области регистрации был равен  $240 \times 240$  mm (меньше, чем сам фрагмент,

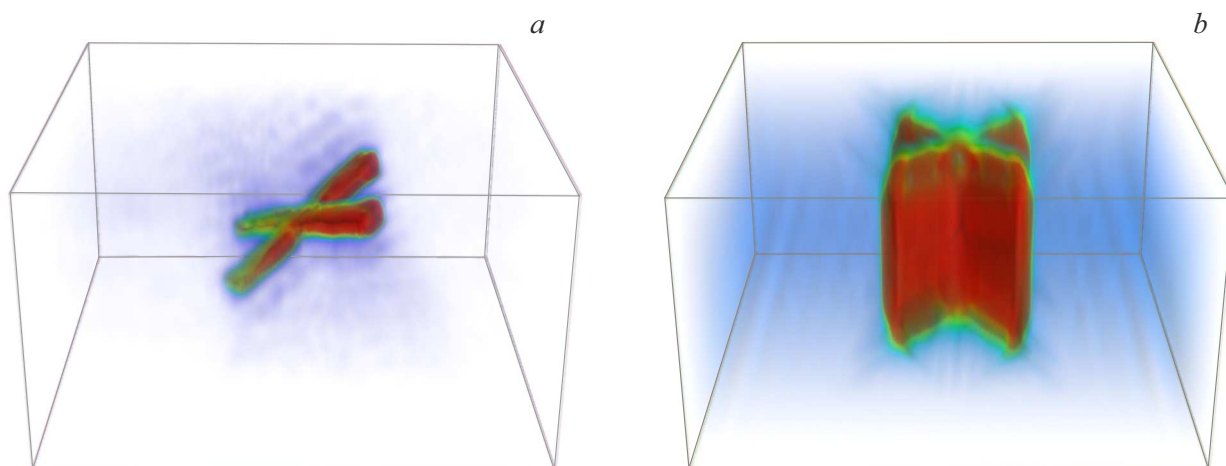


Рис. 12. Визуализация трехмерного массива восстановленных данных для креста: *a* — на отражение, *b* — на просвет.

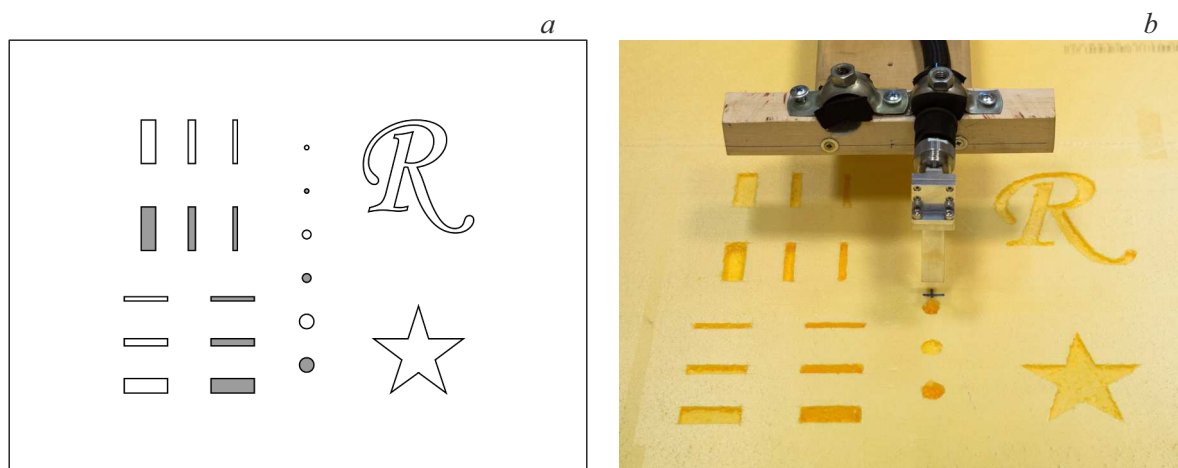


Рис. 13. Тестовый образец: *a* — чертеж, *b* — фотография.

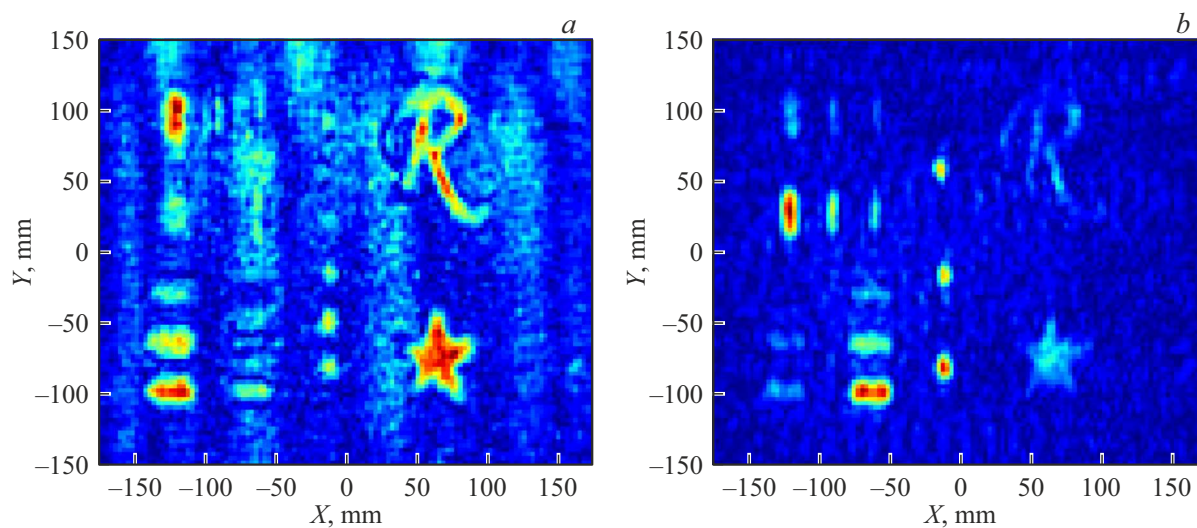


Рис. 14. Радиоизображения листа пенополиуретана с вырезами: *a* — на отражение, *b* — на просвет.

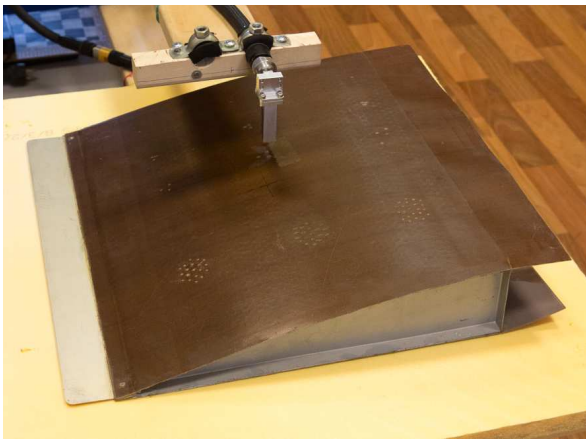


Рис. 15. Лопасть вертолета.

чтобы в радиоголограмму не попадали сильные отражения от металлических краев образца), а вертикальное расстояние между антеннами — снова 170 mm. Результаты восстановления радиоголограмм, построенные для двух вариантов зондирования в плоскости  $z = 57$  mm (расстояние от антенны до поверхности лопасти в месте впрыскивания воды), приведены на рис. 16.

Видно, что сигнал, отраженный от верхней поверхности лопасти, внес существенный вклад в полученное радиоизображение (рис. 16, *a*), что затрудняет обнаружение на нем сот, заполненных водой. При работе „на просвет“ переменная толщина объекта практически не сказалась на радиоизображении (фон на рис. 16, *b* достаточно однородный), и проблемное место можно выявить с большей надежностью.

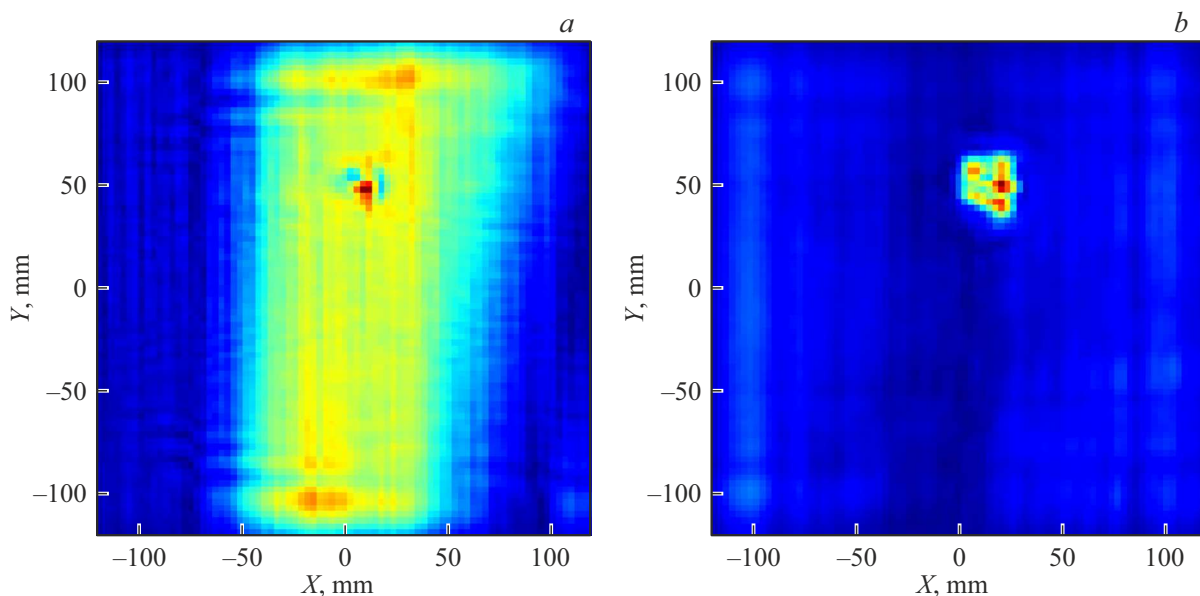


Рис. 16. Радиоизображения лопасти вертолета в воде в сотах: *a* — на отражение, *b* — на просвет.

## Заключение

В работе выполнено экспериментальное сравнение двух вариантов построения системы радиовидения малой дальности:

1) вариант „на отражение“, когда единственная приемо-передающая антенна сканирует по плоскости, формируя синтезированную апертуру и регистрируя отраженный от зондируемого объекта сигнал;

2) вариант „на просвет“, когда разнесенные по дальности передающая и приемная антенны сканируют синхронно, регистрируя прошедший сигнал.

Наиболее очевидными достоинствами варианта „на отражение“ является отсутствие необходимости в двухстороннем доступе к объекту и возможность обследования объектов, ограниченных с одной стороны радионепрозрачным материалом, например, теплоизоляционными покрытиями, нанесенными на металлическую подложку. Если не принимать это во внимание, т.е. считать, что объект пронизаем для электромагнитных волн и к нему возможен доступ с двух сторон, то можно выделить следующие достоинства и недостатки каждого варианта.

Вариант „на отражение“ обладает разрешением по дальности, определяемым шириной полосы зондирующего сигнала. При этом можно локализовывать объект по дальности и разрешать несколько объектов, расположенных на разных дальностях. Однако при зондировании металлических объектов можно определить положение только ближней к антенне поверхности объекта, отражение от дальней границы не регистрируется. Для диэлектрических объектов в регистрируемых данных отражения от дальней по отношению к антенне поверхности присутствуют, но они слабее по уровню, и поэтому определить положение дальней границы также

не всегда возможно. Недостатки метода проявляются при обследовании образцов с неплоской поверхностью, в толще которых расположены подлежащие обнаружению объекты/дефекты. Переменное расстояние от антенны до поверхности образца в процессе ее сканирования является причиной отражений от поверхности, которые маскируют отражения от подповерхностных объектов/дефектов. Для их подавления нужно при обработке радиоголограмм использовать те или иные методы фильтрации.

В варианте „на просвет“ разрешение по дальности в целом намного хуже, чем в варианте „на отражение“, и тем хуже, чем дальше объект расположен от передающей (приемной) антенны. Если расстояние от антенны до объекта больше, чем примерно четверть расстояния между антеннами, то разрешение по дальности практически пропадает, и объект при восстановлении „размазывается“ по всем дальностям, т.е. при построении радиоизображений в плоскостях, параллельных плоскости регистрации, объект присутствует во всех плоскостях, начиная с плоскости расположения объекта и дальше. Но если в решаемой задаче нет необходимости определять расстояние до объекта, а нужно только знать его координаты в плоскости  $XOY$ , этот недостаток оборачивается достоинством: для того, чтобы „найти“ все объекты, которые могут находиться на разных дальностях, достаточно построить радиоизображение для плоскости, лежащей посередине между антеннами, в то время как в варианте „на отражение“ для этого нужно строить радиоизображения для разных дальностей, что требует больше времени.

Большим достоинством варианта „на просвет“ является малая чувствительность к переменному расстоянию от плоскости регистрации до поверхности образцов с неплоской поверхностью, в толще которых расположены подлежащие обнаружению объекты/дефекты.

При обследовании объектов, обладающих одинаковыми диэлектрическими свойствами, но разной толщиной, уровень прошедшего сигнала, вероятно, должен быть связан с толщиной объекта. Поэтому можно предположить, что в „просветном“ варианте можно определять толщину объектов, хотя бы относительную. Первый посвященный этому эксперимент не выявил однозначной связи между толщиной объекта и его яркостью на радиоизображении, поэтому для подтверждения возможности определения толщины требуются дополнительные исследования.

Уровень сигнала зависит от длины пути его распространения. При варианте „на отражение“ уровень сигнала тем больше, чем ближе объект к антенне, а при „просветном“ варианте уровень сигнала практически не зависит от того, где между антеннами находится объект: ближе к одной из антенн или ближе к середине. Поэтому при зондировании сред с высоким уровнем затухания, для ситуации, когда образец имеет существенную толщину и подповерхностный объект/дефект расположен близко к поверхности, метод „на отражение“ может

иметь преимущество с точки зрения уровня полезного сигнала.

## Финансирование работы

Исследование выполнено при финансовой поддержке грантов Российского научного фонда № 21-19-00043 (в части модификации установки для реализации варианта „на просвет“, проведения экспериментов и обработки их результатов) и Российского фонда фундаментальных исследований № 20-57-46004 (в части математического моделирования).

## Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

## Список литературы

- [1] A.V. Zhuravlev, S.I. Ivashov, V.V. Razevig, I.A. Vasiliev, A.S. Bugaev. 7th International Workshop on Advanced Ground Penetrating Radar Nantes, 1–6 (2013). DOI: 10.1109/IWAGPR.2013.6601548
- [2] M. Ghasr, Y. Le Pape, D. Scott, R. Zoughi. *ACI Mater. J.*, **112**, 115 (2015). DOI: 10.14359/51686981
- [3] L. Capineri, M. Chizh, A. Zhuravlev, V. Razevig, S. Ivashov, P. Falorni. *NDT E International*, **109**, 102191 (2020). DOI: 10.1016/j.ndteint.2019.102191
- [4] S. Kharkovsky, R. Zoughi. *IEEE Instrumentation & Measurement Magazine*, **10** (2), 26 (2007). DOI: 10.1109/MIM.2007.364985
- [5] D.M. Sheen, D.L. McMakin, T.E. Hall. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, **49** (9), 1581 (2001).
- [6] L. Carrer, A.G. Yarovoy. *The 8th European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP 2014)*, p. 2786–2790. DOI: 10.1109/EuCAP.2014.6902403
- [7] R.K. Amineh, A. Khalatpour, H. Xu, Y. Baskharoun, N.K. Nikolova. *Intern. J. Biomed. Imaging*, **2012**, Article ID 291494, (2012). DOI: 10.1155/2012/291494.
- [8] R. Chandra, I. Balasingham, H. Zhou, R.M. Narayanan. *Medical Microwave Imaging and Analysis, Chapter 19 in Medical Image Analysis and Informatics: Computer-aided Diagnosis and Therapy* (Boca Raton, FL: CRC Press, 2017). ISBN: 978-1-4987-5139-7, p. 451–466.
- [9] P.K. Kumar, T.K. Kumar, 2011 International Conference on 3D Imaging (IC3D), 1–5 (2011). DOI: 10.1109/IC3D.2011.6584387
- [10] M. Cherniakov (ed.). *Bistatic Radar. Principles and Practice* (Wiley, England, 2007)
- [11] В.В. Чапурский. *Радиотехника*, **3**, 52 (2009).
- [12] P.Y. Ufimtsev. *Proc. IEEE*, **84** (12), 1830 (1966).
- [13] R.K. Amineh, M. Ravan, J. McCombe, N. K. Nikolova. 2013 IEEE MTT-S International Microwave Symposium Digest (MTT), 1–3 (2013). DOI: 10.1109/MWSYM.2013.6697459
- [14] D.L. Mensa. *High Resolution Radar Cross-section Imaging* (Artech House, Norwood, MA, 1991)
- [15] А.А. Курикса. *Радиотехника и электроника*, **47** (12), 1484 (2002).

- [16] В.В. Разевиг, А.С. Бугаев, С.И. Ивашов, А. Кизилай. Электромагнитные волны и электронные системы, **26** (6), 5 (2021).  
DOI: 10.18127/j15604128-202106-01.EDNXHBVNA
- [17] V.V. Razevig, A.V. Zhuravlev, A.S. Bugaev, M.A. Chizh. 2017 Progress in Electromagnetics Research Symposium — Fall (PIERS — FALL), 178–185 (2017).  
DOI: 10.1109/PIERS-FALL.2017.8293133
- [18] L. Capineri, P. Falorni, M. Inagaki, T. Bechtel, V. Razevig, C. Windsor. *Proceedings of the XIII International Conference on Ground Penetrating Radar* (Lecce, Italy, 21–25 June 2010), p. 657–662.
- [19] R.H. Hashemi, W.G. Bradley, C.J. Lisanti. *MRI: The Basics* (Wolters Kluwer Health, 2012), ISBN 9781451148718
- [20] R.W. Gent, N.P. Dart, J.T. Candsdale. *Aircraft Icing* (Defense Evaluation and Research Agency, Farnborough, Hampshire GU14 OLX, UK, The royal Society, 2000)
- [21] Y. Altuncu, I. Akduman, A. Yapar. *IEEE Geosci. Remote Sens. Lett.*, **4** (2), 251 (2007).
- [22] M. El-Shenawee. *J. Opt. Soc. Amer. A. Opt. Image Sci. Vis.*, **20** (1), 183 (2003).
- [23] X. Zhu, Z. Zhao, W. Yang, Y. Zhang, Z. Nie, Q.-H. Liu. *Progr. Electromagn. Res.*, **117**, 19 (2011).