

Теоретические и экспериментальные исследования разрешения голографической радиолокационной системы

Theoretical and experimental studies of a holographic radar system resolution

М.А. Чиж, В.А. Коротков, А.В. Журавлев, В.В. Разевиг

M.A. Chizh, V.A. Korotkov, A.V. Zhuravlev, V.V. Razevig

Аннотация: В статье рассмотрена задача теоретической оценки поперечного и продольного разрешений голографической радиолокационной системы. Выявлены условия измерения, влияющие на разрешение восстанавливаемых радиоизображений, на их основе предложен алгоритм расчета разрешения. Приведены результаты экспериментов по измерению поперечного и продольно разрешений голографического радиолокатора с рабочим диапазоном частот от 22.2 до 26.2 ГГц. Проводится сравнение теоретических оценок и экспериментальных результатов, полученных для тестовых объектов.

Abstract: The problem of theoretical estimation of transverse and longitudinal resolutions of a holographic radar system is considered in the article. The measurement conditions influencing the resolution of the reconstructed microwave images are defined, on their basis the algorithm for calculating the resolution is proposed. Experimental results of measuring the transverse and longitudinal resolutions of a holographic radar with an operating frequency range of 22.6 to 26.4 GHz are presented. A comparison of theoretical estimates and experimental results obtained for test objects is given.

Ключевые слова: голографический радиолокатор, инверсная синтезированная апертура, получение радиоизображений, разрешение радиолокационной системы

Keywords: holographic radar, inverse synthetic aperture, microwave imaging, radar system resolution

Для регистрации радиоголограмм зондируемых объектов можно использовать принцип инверсной синтезированной апертуры: объект построчно перемещается вблизи антенн неподвижно закрепленного радиолокатора, в заданных точках осуществляется регистрация комплексной амплитуды рассеянного объектом поля. Получение радиоизображения объекта производится методом обратного распространения, подробно описанным в работах [1, 2].

Данный метод основан на разложении зарегистрированной комплексной амплитуды сигнала на плоские волны и умножении Фурье-спектра сигнала на фазовый множитель, учитывающий изменение фазы плоской волны при прохождении заданного расстояния. Восстановленное распределение комплексной амплитуды отраженного объектом сигнала в пространственной области получается применением к полученному спектру обратного трехмерного быстрого преобразования Фурье, ее визуализация представляет собой объемное радиоизображение сцены зондирования.

Практический интерес представляет задача определения наилучшего достижимого разрешения получаемых радиоизображений для заданных условий эксперимента, а также связанная с ней задача коррекции параметров планируемого эксперимента для получения радиоизображений с желаемым разрешением.

Далее в статье приводятся ограничения на выбор параметров эксперимента и теоретические выражения для оценки поперечного и продольного разрешений, проводится сравнение теоретических оценок с экспериментальными результатами, полученными для тестовых объектов.

1. Ограничения на выбор пространственного и частотного шагов

Пусть комплексная амплитуда рассеянной объектом электромагнитной волны зарегистрирована в некоторой плоскости (x, y) , отстоящей от объекта на расстояние h по оси z , направленной вдоль направления зондирования. Уменьшение числа выборок за счет увеличения пространственного шага позволяет сократить объем экспериментальных данных, ускорить и упростить их сбор, передачу, хранение и обработку. Однако при определенной степени разреженности измеренного рассеянного поля восстановление радиоизображения объекта без искажений становится невозможным [3]. Основным ограничением при выборе пространственного шага сканирования является критерий Найквиста-Шеннона (теорема Котельникова), согласно которому непрерывный сигнал со спектром, ограниченным частотой f_{\max} , может быть однозначно восстановлен по своим дискретным отчетам, взятым с частотой, равной или большей $2f_{\max}$. Для удовлетворения критерию Найквиста-Шеннона фазы двух измерений комплексной амплитуды отраженного объектом сигнала должны отличаться менее чем на π радиан. Максимальная разность фаз для двух положений приемопередающей антенны, разделенных шагом Δx , равна $2k\Delta x$, где двойка связана с двойным путем сигнала от антенны к объекту и обратно, и соответствует случаю расположения объекта на нулевой

дальности и на краю области обследования. Тогда согласно критерию Найквиста-Шеннона должно выполняться условие: $2k\Delta x < \pi$ или, в более привычной форме: $\Delta x < \lambda/4$, где λ – длина волны зондирующего сигнала. В большинстве реальных ситуаций объект располагается на некотором расстоянии от поверхности, и ширина диаграммы направленности антенны меньше 180° , поэтому полученное строгое ограничение на практике заменяют на следующее [1]:

$$\Delta x < \lambda/2. \quad (1)$$

Аналогичное ограничение налагается на шаг по частоте Δf при многочастотном зондировании. Изменению пространственной частоты Δk соответствует изменение фазы $2\Delta k h_{\max}$, где h_{\max} – максимальная глубина расположения объекта. Критерий Найквиста-Шеннона в этом случае будет иметь вид $2\Delta k h_{\max} < \pi$ или

$$\Delta f < c/(4h_{\max}). \quad (2)$$

Выполнение указанных требований к выбору пространственного и частотного шагов обеспечивает однозначное восстановление сигнала по полученным экспериментальным или модельным данным.

2. Поперечное и продольное разрешение голографической радиолокационной системы

Оценку поперечного (линейного) разрешения вдоль каждого из направлений сканирования x , y можно получить, проведя оценку размеров участка покрытия в области пространственных частот [1]. Из дисперсионного соотношения для плоских электромагнитных волн следует: $k_x^2 + k_y^2 + k_z^2 = (2k)^2$, таким образом, волновой вектор ограничен в пространстве сферой радиуса $2k$ и, кроме того, шириной диаграммы направленности приемопередающей антенны $\theta_{дн}$. На рис. 1 представлена проекция волнового вектора на плоскость (k_x, k_z) , прямоугольником условно обозначена приемопередающая антенна, плоскость сканирования в пространственной области совпадает с плоскостью (k_x, k_y) .

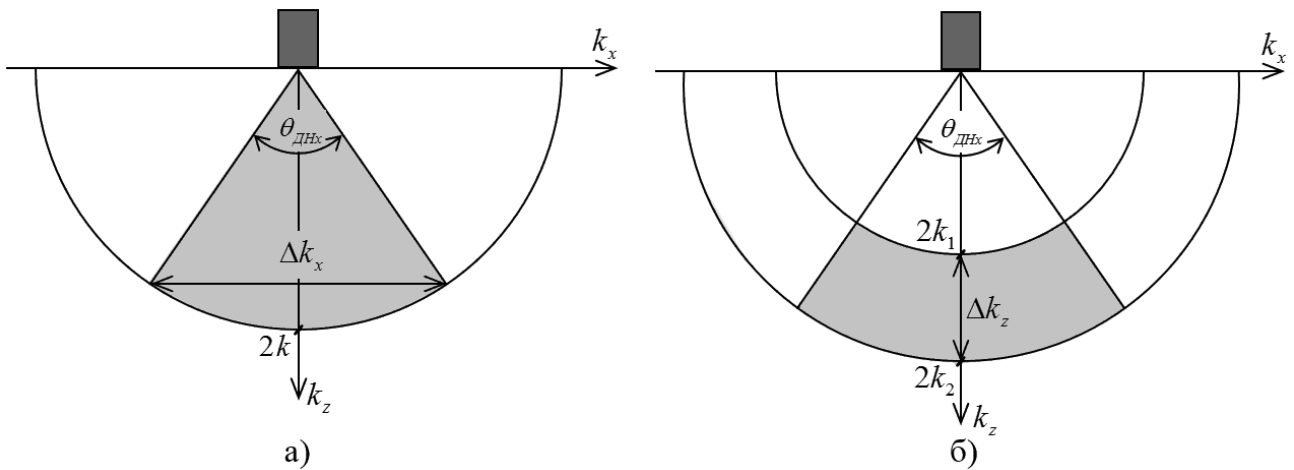


Рис. 1. Ширина раскрытия волновых векторов:

- а) – в поперечном направлении
 б) – в продольном направлении

Изменению волнового вектора Δk_x вдоль направления x в пространственной области соответствует импульс шириной $\delta_x = 2\pi/\Delta k_x$. Из рис. 1 (а) видно, что $\Delta k_x = 4k \sin(\theta_{DHx}/2)$. Тогда поперечное разрешение голографической РЛС вдоль выбранного направления оценивается по формуле:

$$\delta_x = \frac{\lambda}{4 \sin(\theta_{DHx}/2)}. \quad (3)$$

Данная оценка позволяет определить наилучшее достижимое поперечное разрешение вдоль оси x .

В случае многочастотного зондирования в полосе частот $f_1 \div f_2$ продольное разрешение можно оценить по изменению волнового вектора вдоль направления z – Δk_z . Из рис. 1 (б) видно, что $\Delta k_z = 2(k_2 - k_1)$, чему в пространственной области соответствует импульс шириной $\delta_z = 2\pi/\Delta k_z$. Тогда продольное разрешение РЛС оценивается по формуле:

$$\delta_z = \frac{2\pi}{2(k_2 - k_1)} = \frac{c}{2(f_2 - f_1)}. \quad (4)$$

3. Экспериментальная оценка продольного разрешения голографической радиолокационной системы

Экспериментальные исследования проводились с помощью установки, разработанной в Лаборатории дистанционного зондирования МГТУ им. Н.Э. Баумана [4]. Установка включает в себя штатив с держателем для крепления радиолокатора, двухкоординатный

электромеханический сканер с платформой для размещения зондируемых объектов и персональный компьютер с программой управления экспериментом. Радиолокатор имеет рабочий диапазон частот от 22.2 до 26.2 ГГц, излучает постоянный сигнал со ступенчатым переключением частоты с программируемым шагом между частотами. В качестве передающей и приемной антенн использовались круглые волноводы с открытым концом, установленные вплотную друг к другу, что соответствует квазимоностатическому приближению. Экспериментально измеренная ширина диаграммы направленности основного лепестка по уровню половинной мощности для каждой из антенн – 60° . Подробное описание экспериментальной установки и устройства радиолокатора приведено в [5].

Для экспериментальной оценки продольного разрешения разработанного радиолокатора были проведены эксперименты по сканированию специально изготовленного тестового объекта, представляющего собой фрагмент пенопласта с закрепленными на нем четырьмя металлическими гвоздями, расположенными с интервалом 20 мм друг от друга по горизонтали и на расстоянии 20, 40, 80 и 140 мм от раскрыва антенн (рис. 2).

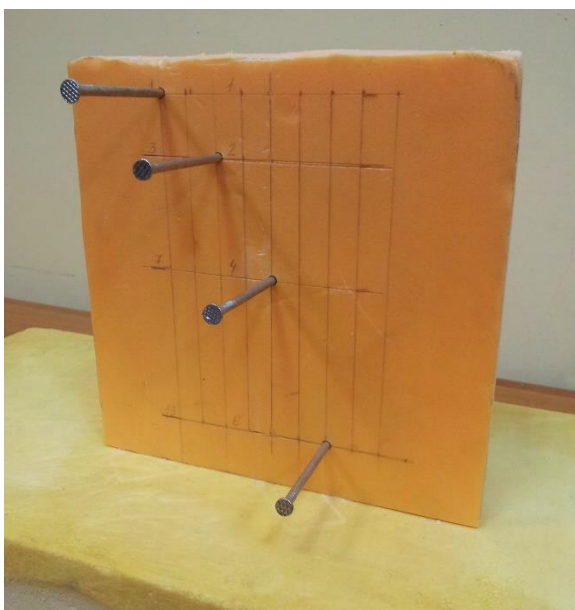


Рис. 2. Тестовый объект для экспериментальной оценки продольного разрешения разработанного радиолокатора

При расположении на экспериментальной установке гвозди для повышения энергии принимаемого сигнала были ориентированы вдоль направления поляризации передающей антенны радиолокатора (рис. 3). Для экранирования металлической конструкции сканера использовалась панель из радиопоглощающего материала.

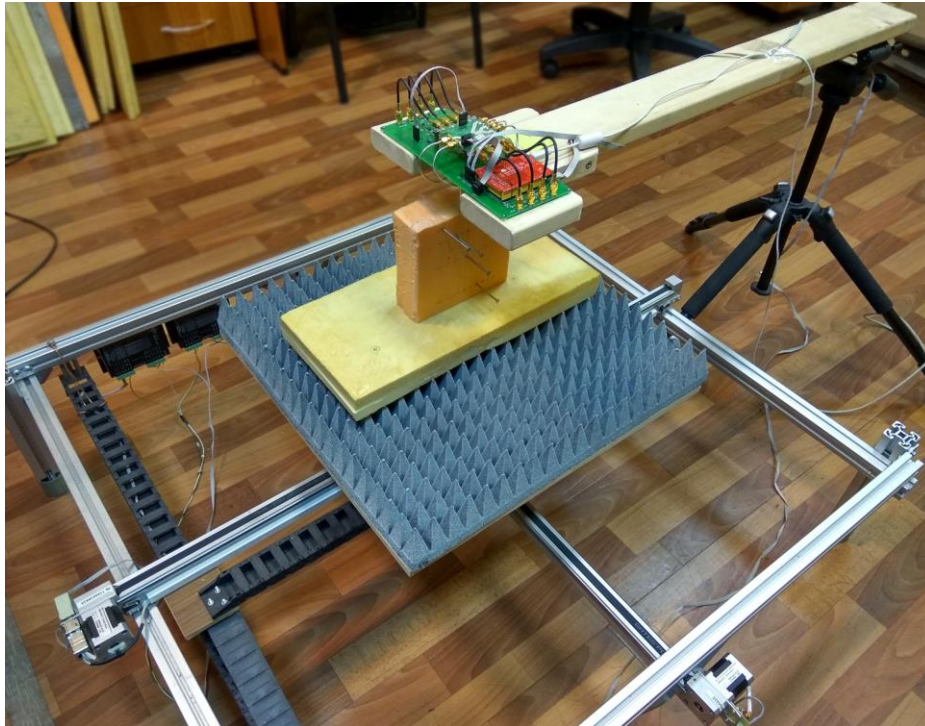


Рис. 3. Расположение тестового объекта на экспериментальной установке

Площадь просканированной области составила 250×2 мм, что соответствует регистрации трех профилей с интервалом 1 мм вдоль направления, перпендикулярного осям гвоздей. Частота зондирующего сигнала изменялась от 22.2 до 26.2 ГГц с шагом 0.1 ГГц.

На рис. 4 представлены восстановленные многочастотным методом обратного распространения радиоизображения тестового объекта в проекции на плоскость, параллельную плоскости сканирования (x, y) . Фокусировка радиоизображений последовательно проводилась на глубину расположения каждого из четырех гвоздей: 20, 40, 80 и 140 мм.

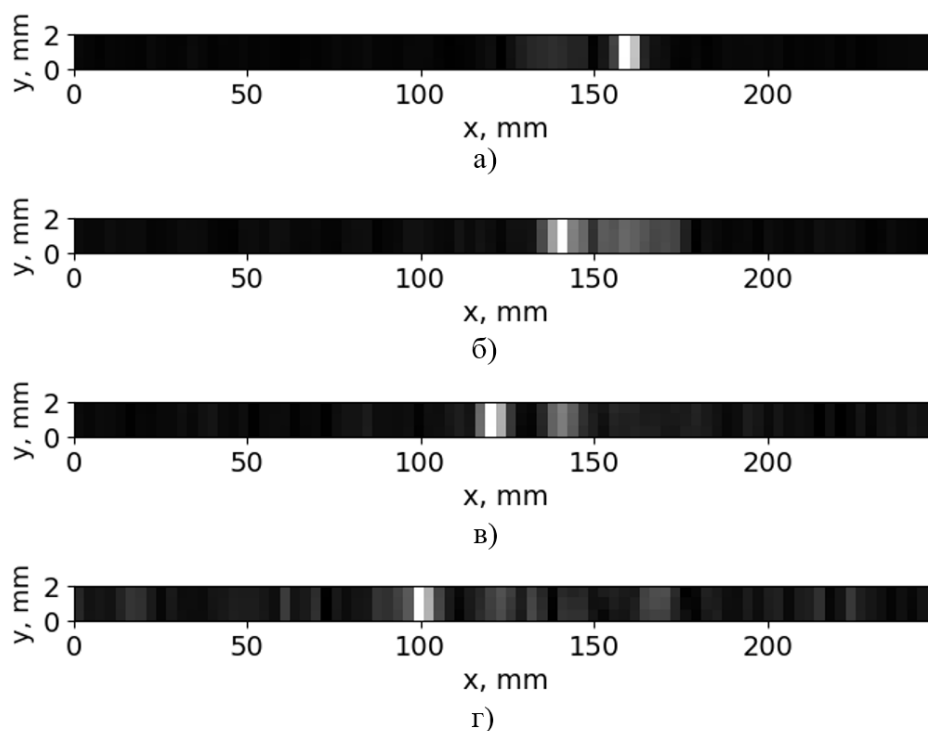


Рис. 4. Радиоизображения тестового объекта, полученные многочастотным алгоритмом:

- а) – фокусировка на дальности 20 мм;
- б) – фокусировка на дальности 40 мм;
- в) – фокусировка на дальности 80 мм;
- г) – фокусировка на дальности 140 мм

Черный цвет на радиоизображениях соответствует низкой амплитуде восстановленного сигнала, белый цвет – максимальной амплитуде и, следовательно, отображает места расположения металлических гвоздей. Отметим, что, поскольку поперечное разрешение радиолокатора δ_x , оцениваемое по формуле (3), равно 5.77 мм, гвозди «разрешаются» по оси x , и расстояние между ними на радиоизображениях соответствует действительному интервалу 20 мм.

На рис. 5 представлены восстановленные одночастотным (а) и многочастотным методами обратного распространения (б) дальностные профили, построенные вдоль средней из трех просканированных линий.

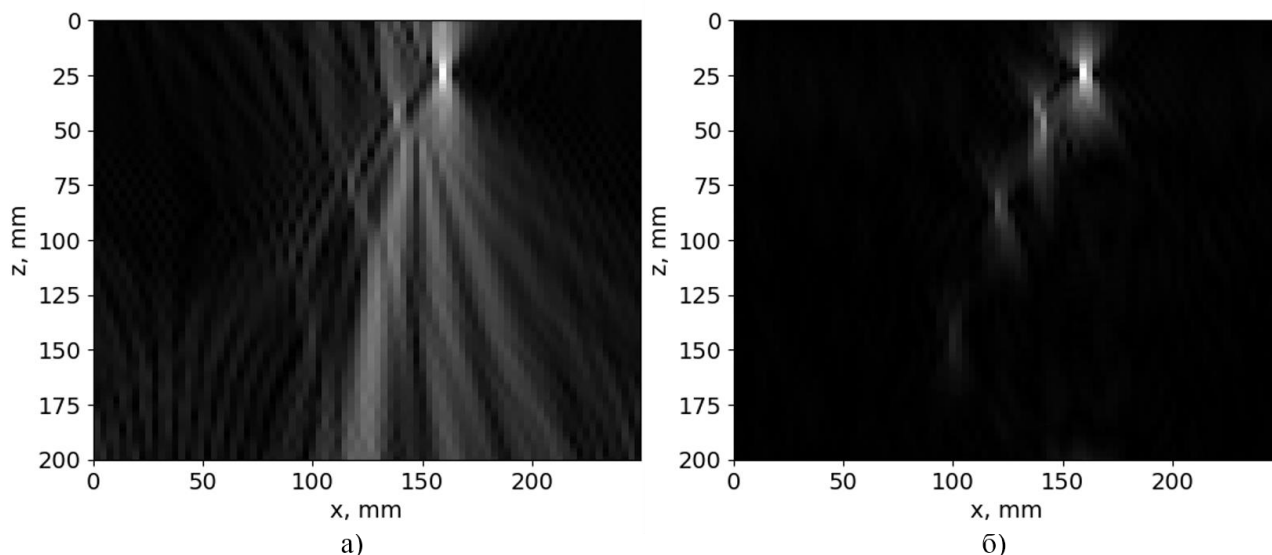


Рис. 5. Дальностные профили тестового объекта:
 а) – восстановленный одночастотным методом;
 б) – восстановленный многочастотным методом

Одночастотный метод не позволяет разрешать объекты по дальности, поэтому по радиоизображению на рис. 5 (а) невозможно определить расстояния от раскрыва антенн радиолокатора до металлических гвоздей.

Многочастотный метод, согласно формуле (4), обеспечивает продольное разрешение объектов δ_z , равное 37.7 мм. Таким образом, первый и второй гвозди, расстояние между которыми 20 мм – меньше продольного разрешения, не «разрешаются» по дальности на радиоизображениях на рис. 5 (б). Этим объясняется также «размывание» амплитуды на рис. 4 (б): кроме сигнала от второго гвоздя на глубине 40 мм присутствует сигнал от близкого верхнего гвоздя. Обратное влияние сигнала от второго гвоздя на рис. 4 (а) незаметно в силу того, что сильное отражение от ближайшего к антеннам гвоздя повышает верхнюю границу динамического диапазона отображаемой в виде полутонного изображения амплитуды. Второй и третий гвозди, расстояние между которыми 40 мм, отображены на рис. 5 (б) в виде пятен, между которыми нет зазора по оси z , третий и четвертый гвозди, разнесенные на 60 мм, отображены в виде отдельных пятен.

Определение положений максимумов амплитуды на рис. 5 (б) позволяет оценить расстояния до объектов как 23.74, 47.48, 83.08, 133.8 мм. Средняя абсолютная погрешность экспериментально измеренного расстояния до объектов – 5.12 мм, средняя относительная погрешность – 11%. Погрешность вызвана заметным ослаблением сигнала при удалении от объектов и субъективной ошибкой измерения расстояния до объектов оператором.

4. Экспериментальная оценка поперечного разрешения голографической радиолокационной системы

Для экспериментальной оценки поперечного разрешения были проведены эксперименты по сканированию специально изготовленной штриховой миры, рис. 6, представляющей собой лист бумаги с наклеенными полосками фольги, расположенными с различными интервалами. Ширина полос фольги – 2 мм, высота – 20 мм, расстояния между полосами – от 5 до 21 мм с шагом 1 мм.

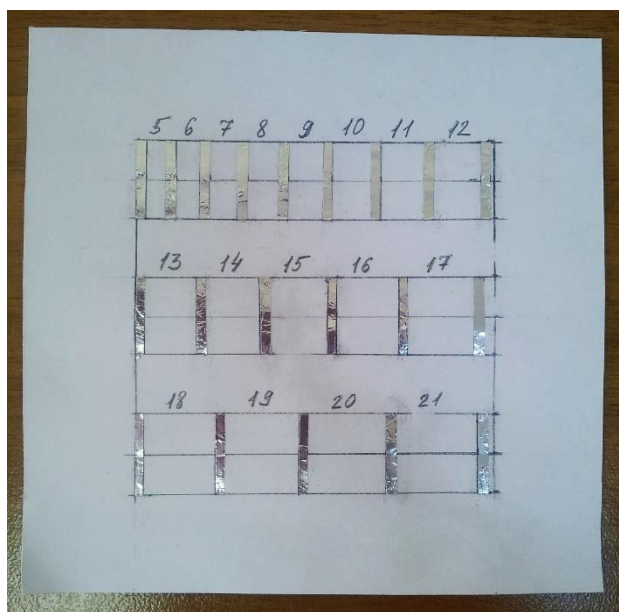


Рис. 6. Фотография штриховой миры из фольги.

Эксперименты проводились на описанной выше экспериментальной установке с голографическим радиолокатором. В первой серии экспериментов мира размещалась в центре области сканирования размерами 200×200 мм на расстояниях 100, 200 и 300 мм, шаг между выборками равнялся 3 мм по обоим направлениям. Для повышения энергии принимаемого сигнала мира располагалась так, что протяженная сторона штрихов была параллельна направлению поляризации предающей антенны. Частота зондирующего сигнала изменялась от 22.2 до 26.2 ГГц с шагом 0.4 ГГц. Расположение миры на экспериментальной установке показано на рис. 7.

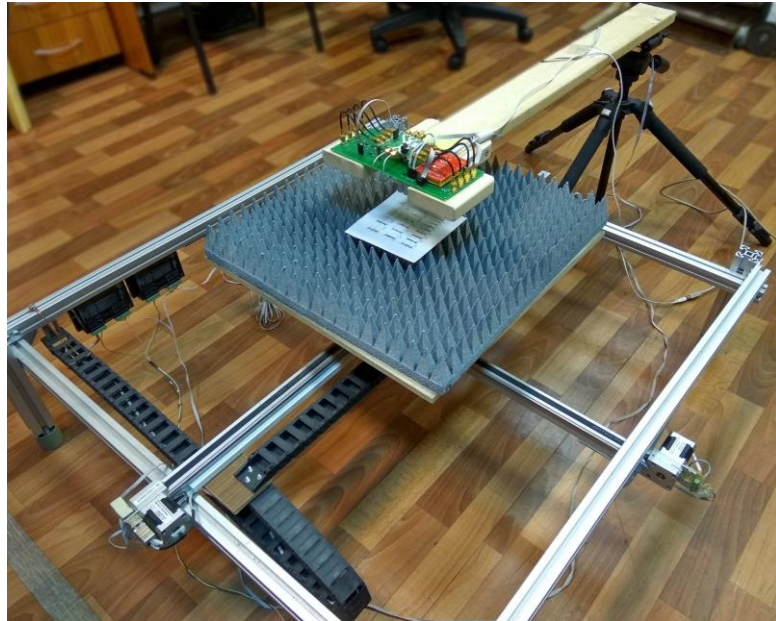


Рис. 7. Расположение миры на экспериментальной установке

Восстановленные радиоизображения на частоте 26.2 ГГц ($\lambda = 1.14$ см) для трех значений расстояния до миры показаны на рис. 8.

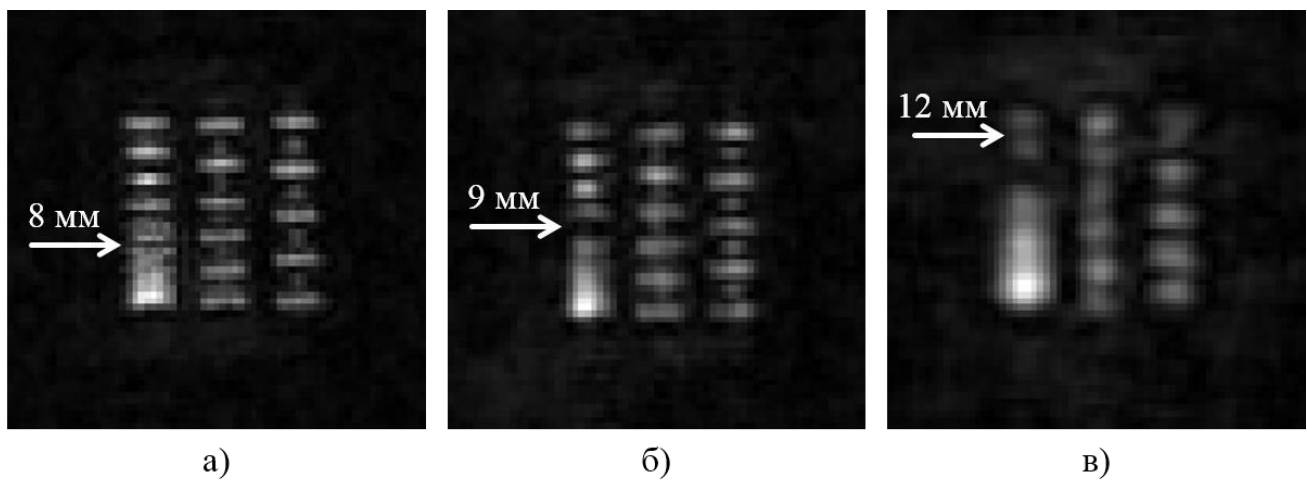


Рис. 8. Восстановленные радиоизображения миры на частоте 26.2 ГГц, просканирована площадь 200×200 мм, фокусировка:

- а) – на дальности 100 мм;
- б) – на дальности 200 мм;
- в) – на дальности 300 мм

Во второй серии экспериментов расстояние от раскрыва антенны до миры было фиксированным и составляло 200 мм, площадь просканированной области задавалась равной

100×100 мм, 150×150 мм и 250×250 мм. Восстановленные радиоизображения на частоте 26.2 ГГц для трех значений просканированной площади показаны на рис. 9.

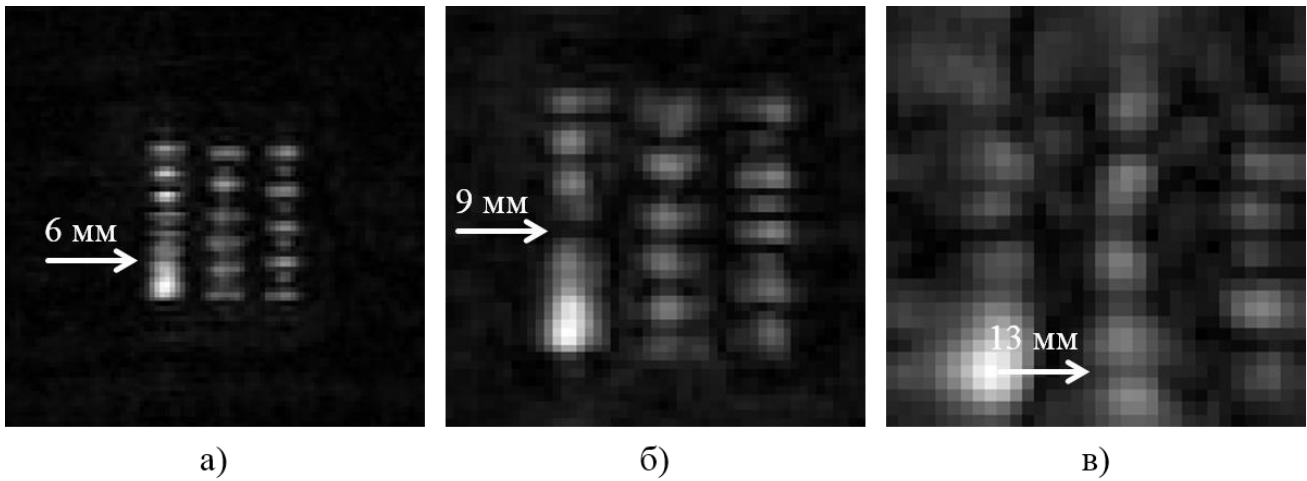


Рис. 9. Восстановленные радиоизображения мира на частоте 26.2 ГГц, фокусировка на дальности 200 мм,
 а) – просканирована площадь 250×250 мм;
 б) – просканирована площадь 150×150 мм;
 в) – просканирована площадь 100×100 мм

Согласно формуле (3), продольное разрешение голографической радиолокационной системы зависит только от частоты зондирующего сигнала и ширины диаграммы направленности антенны и не зависит от таких параметров эксперимента, как расстояние до объекта и площадь просканированной области. Однако в обеих сериях экспериментов продольное разрешение, как это видно из рис. 8 и 9, ухудшается как с увеличением дальности до мира, так и с уменьшением площади сканирования. Дело в том, что в случае, когда просканирована относительно небольшая область пространства, и размер синтезированной апертуры вдоль выбранного направления меньше, чем ширина пятна засветки на глубине расположения объекта, в формуле (3) для оценки продольного разрешения вместо угла $\theta_{дн}$ следует использовать эффективный угол, определяемый размером регистрируемой апертуры и расстоянием до объекта – $\theta_{сAx}$. Из рис. 10 видно, что угол, определяемый размером синтезированной апертуры $\theta_{сAx}$, при известных глубине расположения объекта h и размере зарегистрированной апертуры D_x вдоль направления x вычисляется как:

$$\theta_{сAx} = 2 \arctg(D_x/2h). \quad (5)$$

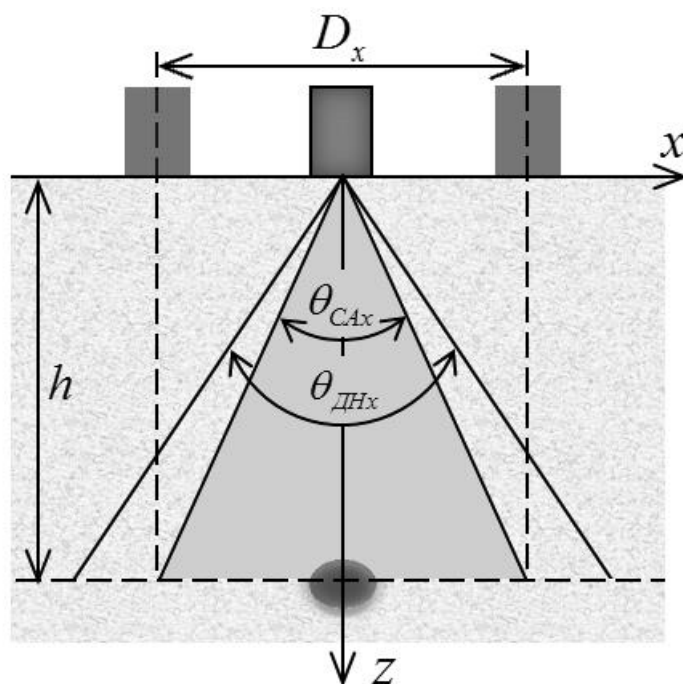


Рис. 10. Оценка поперечного разрешения по углу, определяемому размером синтезированной апертуры

Таким образом, для оценки поперечного разрешения голографической РЛС вдоль направления x (y) при зондировании сигналом с длиной волны λ , размере синтезированной апертуры D_x (D_y) и максимальной глубине расположения искомого объекта h следует:

- 1) рассчитать угол, определяемый размером синтезированной апертуры θ_{CAx} (θ_{CAy}), по формуле (5);
- 2) выбрать наименьший из углов θ_{DNx} (θ_{DHy}) и θ_{CAx} (θ_{CAy});
- 3) для выбранного угла посчитать поперечное разрешение δ_x (δ_y) по формуле (3). Для ускорения расчетов и исключения субъективных ошибок была создана программа на языке программирования Python, реализующая описанный алгоритм. Эта программа позволяет автоматически:

 - 1) рассчитать поперечное и продольное разрешения для задаваемых условий эксперимента;
 - 2) вычислить необходимые значения параметров эксперимента, обеспечивающие желаемое разрешение.

Интересно отметить, что в предположении дальней зоны, когда расстояние до объекта намного больше размера апертуры: $h \gg D_x$, можно приближенно считать $\text{tg}(D_x/2h) \approx \sin(D_x/2h)$, $\theta_{CAx} \approx 2 \arcsin(D_x/2h)$, и тогда формула (3) для оценки поперечного разрешения примет классический для радиолокации вид:

$$\delta_x = \frac{\lambda h}{2D_x}. \quad (6)$$

Однако в большинстве задач, решаемых подповерхностной радиолокацией, размер апертуры значительно больше расстояния до целей, измерения проводятся в ближней или промежуточной зонах, и формулу (3) упрощать не следует.

Результаты применения предложенного алгоритма к двум сериям экспериментов приведены в Таблице 1:

Таблица 1

Серия экспериментов 1				
Просканированная площадь, мм	Дальность, мм	Угол θ_x при расчетах	Теоретическая оценка поперечного разрешения δ_x , мм	Экспериментальная оценка поперечного разрешения δ_x , мм
200×200	100	$\theta_{ДНх} = 60^\circ$	5.72	8
	200	$\theta_{САх} = 53^\circ$	6.4	9
	300	$\theta_{САх} = 37^\circ$	9.05	12
Серия экспериментов 2				
Просканированная площадь, мм	Дальность, мм	Угол θ_x при расчетах	Теоретическая оценка поперечного разрешения, мм	Экспериментальная оценка поперечного разрешения, мм
250×250	200	$\theta_{ДНх} = 60^\circ$	5.72	6
150×150		$\theta_{САх} = 41^\circ$	8.15	9
100×100		$\theta_{САх} = 28^\circ$	11.79	13

Экспериментальная оценка поперечного разрешения проводилась оператором визуально на основе восстановленных радиоизображений миры. Средняя абсолютная погрешность экспериментально измеренного поперечного разрешения в двух сериях экспериментов δ_x – 1.7 мм, средняя относительная погрешность – 23%. Погрешность вызвана заметным ослаблением сигнала при удалении от миры, субъективной ошибкой измерения расстояния до миры оператором, а также тем, что при выводе теоретического выражения для разрешения не учитывалась форма диаграммы направленности антенны и наличие боковых лепестков.

Таким образом, в данной работе предложен алгоритм определения поперечного и продольного разрешения голографической радиолокационной системы при заданных параметрах измерения. Приведены результаты экспериментов, демонстрирующие соответствие экспериментальной и теоретической оценок разрешения.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект №17-20-02077).

Список литературы

1. Sheen D. M., McMakin D. L., Hall T. E. Three-dimensional millimeter-wave imaging for concealed weapon detection // IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques. 2001. Vol. 49, No. 9. P. 1581–1592.
2. В.В. Разевиг, А.С. Бугаев, С.И. Ивашов, И.А. Васильев, А.В. Журавлев, Влияние ширины полосы частот на качество восстановления подповерхностных радиоголограмм, Успехи современной радиоэлектроники, 2012, № 3, стр. 3-13. ISSN 2070-0784.
3. Чиж М.А., Использование разреженных выборок в подповерхностной голографической радиолокации, Радиотехника, 2016, №5, 2016, с. 134-141.
4. [Электронный ресурс]: Сайт Лаборатории дистанционного зондирования, URL: <http://www.rslab.ru/russian/> (дата обращения: 20.12.2017).
5. Andrey Zhuravlev, Vladimir Razevig, Margarita Chizh, Maxim Filippov, and Sergey Ivashov. Inspection of Foam Insulation by Holographic Subsurface Radar, Proceedings of the IEEE International Conference on Microwaves, Communications, Antennas and Electronic Systems (COMCAS 2017), Tel-Aviv, Israel, 13-15 November 2017. P. 1-6.