

УДК 621.391.244

В.П. ЯКУБОВ, С.Э. ШИПИЛОВ, Р.Н. САТАРОВ

**СВЕРХШИРОКОПОЛОСНОЕ ЗОНДИРОВАНИЕ
ЗА ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИМИ ПРЕГРАДАМИ¹**

В работе рассматривается подход для восстановления радиоизображения объектов за диэлектрическими преградами. В основе подхода лежит метод математической фокусировки отраженных сверхширокополосных сигналов. Зондирующая система представляет собой радар с синтезированием апертуры. Показана возможность повышения качества изображения за счет дополнительной обработки принятых сигналов. В подтверждение работоспособности метода представлены результаты численного моделирования и эксперимента.

Ключевые слова: томография, сверхширокополосное зондирование, фокусировка, синтезирование апертуры.

Введение

Сверхширокополосное (СШП) излучение обладает высоким продольным пространственным разрешением, которое особенно важно для обнаружения скрытых объектов за диэлектрическими препятствиями. Это же излучение обеспечивает достаточное проникновение за препятствие, что позволяет построить радиотомограммы интересующей области пространства. При разработке алгоритмов построения томограммы необходимо обеспечить их устойчивость к шумам и помехам, оказывающим существенное влияние на принятый сигнал при односторонней схеме локации объектов за диэлектрическими преградами [1, 2]. Также важно, чтобы разработанные алгоритмы обеспечили необходимое быстродействие при не слишком высоких требованиях к аппаратуре измерения и регистрации, а также к средствам компьютерной обработки.

В работе рассмотрен алгоритм получения радиотомографического изображения, основанный на фокусировке отраженных СШП-сигналов. Основная идея обработки данных восходит к технологии радара с синтезированием апертуры и фокусировкой, при которой все зарегистрированные в различных точках излучения – приема ρ_j сигналы суммируются в фазе для каждой задаваемой точки фокусировки \mathbf{r} с коррекцией существующего запаздывания:

$$F(\mathbf{r}) = \sum_j S\left(\rho_j, t = 2 \frac{|\mathbf{r} - \rho_j|}{c}\right).$$

Точки излучения – приема могут располагаться произвольно. В приближении однократного рассеяния, когда излучается сигнал $S_0(t)$ и принятый локационный сигнал формируется как

$$S(\rho_j, t) = k_0^2 \iiint_V S_0\left(t - 2 \frac{|\mathbf{r}_1 - \rho_j|}{c}\right) \frac{\Delta\varepsilon(\mathbf{r}_1)}{(4\pi|\mathbf{r}_1 - \rho_j|)^2} (d^3\mathbf{r}_1),$$

можно записать

$$F(\mathbf{r}) = \iiint_V \Delta\varepsilon(\mathbf{r}_1) Q(\mathbf{r}_1; \mathbf{r}) (d^3\mathbf{r}_1).$$

Здесь функция

$$Q(\mathbf{r}_1; \mathbf{r}) = \sum_j S_0\left(t = 2 \frac{|\mathbf{r} - \rho_j|}{c} - 2 \frac{|\mathbf{r}_1 - \rho_j|}{c}\right) \frac{k_0^2}{(4\pi|\mathbf{r}_1 - \rho_j|)^2}$$

¹ Работа выполнена при поддержке АБЦП «Развитие научного потенциала высшей школы» мероприятие 2, проект № 2.1.2/3339, а также ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009–2013 годы в рамках мероприятий 1.2.2 (НК-104П/2) и 1.3.1 (НК-181П/6).

играет роль аппаратной функции системы, т.е. отклика на точечную неоднородность. При достаточном объеме зарегистрированных данных и коротких зондирующих импульсах эта функция приближается к «размазанной» δ -функции:

$$Q(\mathbf{r}_1; \mathbf{r}) \sim \delta(\mathbf{r}_1 - \mathbf{r}),$$

и тогда приближенно можно считать, что

$$\Delta\varepsilon(\mathbf{r}_1) \sim F(\mathbf{r}_1).$$

Эта запись представляет собой приближенное решение задачи томографии.

Численное моделирование

Как было сказано выше, точки излучения – приема могут располагаться произвольно. Для простоты практической реализации и скорости выполнения операции наиболее выгодной представляется круговая схема сканирования (рис. 1). Это равнозначно использованию круговой решетки. При сканировании синтезирование апертуры может проводиться путем вращения одной точки излучения – приема по окружности и линейного сдвига самой окружности.

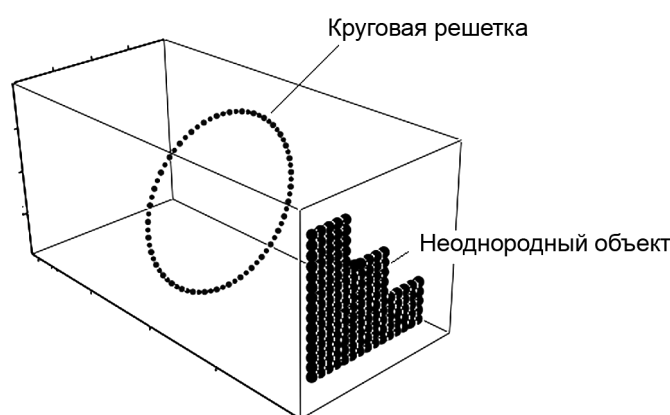


Рис. 1. Круговая система расположения антенных элементов при СШП-зондировании

В ходе численного моделирования была осуществлена проверка влияния различных способов заполнения апертуры на качество восстанавливаемого изображения объекта. Для этого рассматривалась задача рассеяния СШП-импульса, форма которого показана в виде тонкого ступенчатого треугольника (рис. 2, б). Этот объект располагался на расстоянии 20 см от плоскости апертуры круговой решетки. Центр объекта (т. O) и центр плоскости апертуры находились на одной оси. Каждая ступенька тестового объекта имела размер по 5 см.

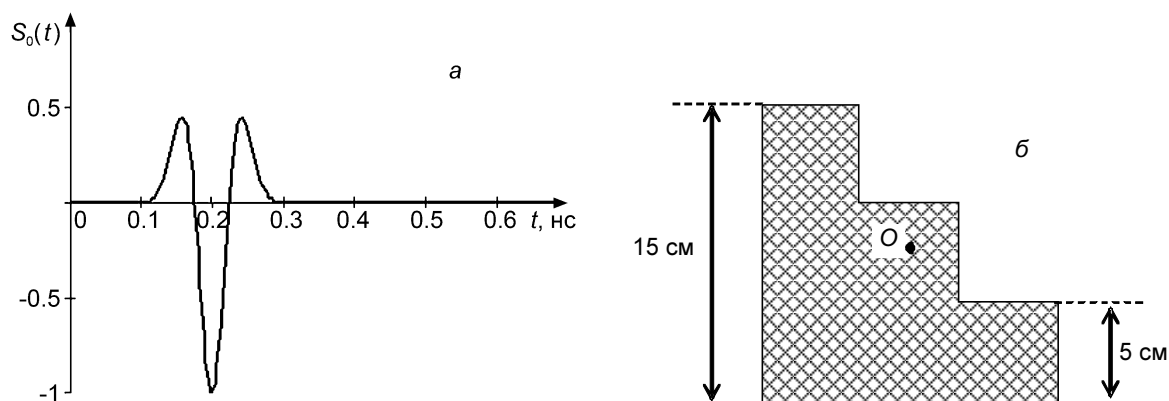


Рис. 2. Зондирующий сигнал (а) и тестовый объект (б)

Были рассмотрены три различных варианта заполнения (синтезирования) апертуры зондирования (рис. 3). На рис. 4 представлены результаты восстановления томограммы тестового объекта для этих трех вариантов заполнения апертуры. Здесь представлены изображения, соответствующие четырем различным слоям, взятым с шагом 0,5 см. Слою № 1 соответствует дальность 19 см,

а слою № 3 – дальность 20 см, на котором и располагался тестовый объект. Более темные участки относятся к большим по амплитуде сигналам. Размеры каждого из слоев томограммы были равны 40×40 см. Общая толщина просматриваемой зоны фокусировки задавалась равной 2 см, но могла быть увеличена. Заметим, что представленные выше томограммы получены путем численного имитационного моделирования сначала прямой и затем обратной задач.

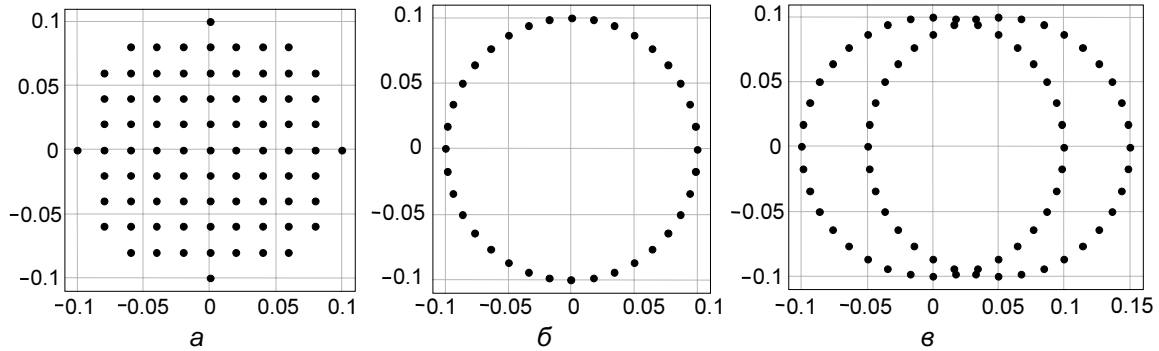


Рис. 3. Различные варианты заполнения апертуры

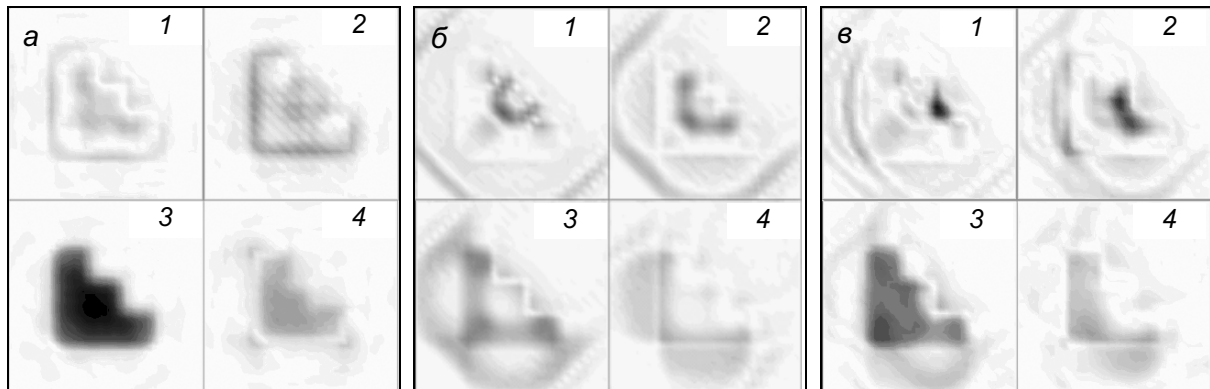


Рис. 4. Томограммы тестового объекта для различных способов заполнения апертуры

Видно, что при использовании заполненной апертуры (рис. 3, *a*) изображение тестового объекта хорошо восстанавливается (рис. 4, *a*), и тестовая неоднородность располагается в третьем слое, что соответствует истине. В случае использования апертуры в виде одиночной окружности с шагом 10° (рис. 3, *b*) восстанавливаемая томограмма получается слабо контрастной (рис. 4, *b*). Контрастность томограммы заметно возрастает (рис. 4, *v*) в случае увеличения числа точек зондирования вдвое (рис. 3, *v*).

Экспериментальное моделирование

Для получения томограммы какого-либо объекта необходимо получение достаточно полного набора его многоракурсных проекций. Это возможно достигнуть либо путем выполнения сканирования объекта, либо путем проведения параллельных многопозиционных измерений. Для получения полного набора измерений авторами была использована круговая система сканирования на основе шагового двигателя, управляемого от компьютера, который одновременно управлял генератором и осциллографом. Такое сканирование равнозначно использованию круговой антенной решетки с параллельным опросом (см. рис. 1).

В качестве генерирующего устройства в эксперименте использовался генератор СШП-импульсов ТМГ100010Р01, выдающий биполярные импульсы с формой импульсов, близкой к периоду синусоиды, амплитудой ± 7 В и длительностью 100 пс по уровню 0,1 от амплитудного значения. В качестве излучающей и приемной антенн использовались специально разработанные на кафедре радиофизики ТГУ малогабаритные СШП-антенны. Коэффициент стоячей волны (КСВН) такой антенны не превышает 2 в полосе от 2 до 23 ГГц. Излучатель в этой полосе имеет достаточно широкую диаграмму направленности ($\sim 60^\circ$), что наилучшим образом подходит для синтеза апертуры протяженных объектов. Регистрация сигналов осуществлялась с использованием стробоскопического осциллографа «ТРИМ» (г. Санкт-Петербург).

На рис. 5 приведена схема проведения эксперимента. Схема состоит из следующих составных частей: сканирующая система 1, обеспечивающая вращение приемной и передающей антенн по окружности радиусом 11,5 см; диэлектрическая преграда 2, представляющая собой стену из газобетонных блоков размером 75×60 см и толщиной 10 см; тестовый диэлектрический объект 3 с размерами, как на рис. 2, б, и толщиной 2 см.

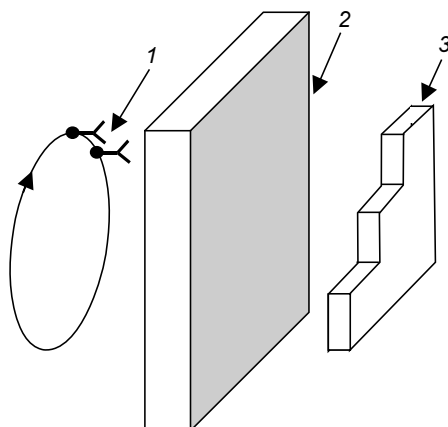


Рис. 5. Схема проведения эксперимента

В ходе эксперимента синтезировалась апертура по результатам измерений отраженных от тестового объекта сигналов на четырех окружностях, сдвинутых друг относительно друга на 5 см аналогично рис. 3, в. Шаг перемещения по углу составлял $4,5^\circ$. Таким образом, за один оборот сканирующей системы реализовывалось 80 осциллограмм. На рис. 6 показаны примеры 80 осциллограмм отраженных СШП-сигналов, записанных при изменении углов сканирования по окружности от 0 до 360° с шагом по углу $4,5^\circ$ в отсутствие стены (рис. 6, а) и в случае наличия стены (рис. 6, б). Разным уровням сигнала соответствуют разные градации серого цвета. Горизонтальная развертка соответствует времени, а вертикальная – углу регистрации отраженного сигнала. Объект располагался на расстоянии 25 см от зондирующей системы при зондировании без стены и на расстоянии 21 см при зондировании через стену.

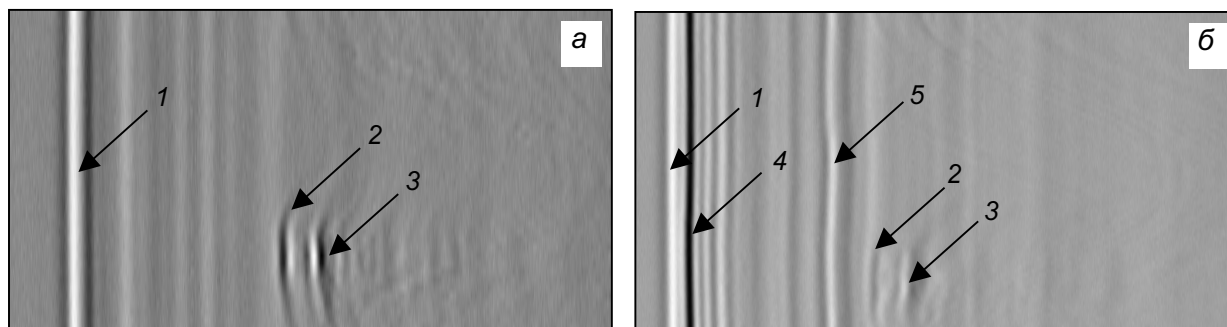


Рис. 6. Экспериментальные осциллограммы отраженных СШП-сигналов без стены (а) и со стеной (б)

Здесь определенными номерами отмечены характерные особенности полученных осциллограмм. Максимальная амплитуда в отраженном сигнале связана с прямым попаданием зондирующего импульса из передающей в приемную антенну 1. Эта часть осциллограммы не меняется от угла поворота. Под номерами 2 и 3 отмечена реакция СШП-импульса на переднюю и заднюю стенку тестового объекта соответственно. В случае наличия стены возникает еще сигнал отраженной от её передней 4 и задней стенки 5. Сравнение осциллограмм показывает заметное уменьшение амплитуды отраженного сигнала от тестового объекта при наличии стены. Кроме того, в осциллограмме на рис. 6, б появились помехи – полосы, вызванные отражением СШП-импульса передней и задней границей стены. Уровень сигнала от объекта при зондировании через стену оказался на уровне шумов регистрирующего устройства. Приведенные выше факторы привели к тому, что восстановленное радиоизображение объекта оказалось низкого качества. Это, в свою очередь, потребовало дополнительной обработки принятых сигналов.

Так был разработан подход устранения помех, основанный на фильтрации постоянных составляющих сигнала на каждом временном отрезке принятого сигнала с учетом информации о сигналах, полученных при других углах сканирования. Применение данного подхода к экспериментальным данным, приведенным на рис. 6, б, позволило значительно понизить уровень помех по отношению к сигналу, отраженному от тестового объекта (рис. 7, а). Сравнение осциллограмм при зондировании без преграды (рис. 6, а) и с преградой после фильтрации (рис. 7, а) показывает эффективность предложенного алгоритма фильтрации, но при этом заметно, что локационный отклик от объекта является более размазанным. Это приводит к ослаблению контрастности восстанавливаемого радиоизображения. Для устранения этого явления был использован алгоритм винеровской фильтрации с регуляризацией. Данная операция позволяет повысить контрастность и одновременно снизить уровень шумов в восстанавливаемом радиоизображении. Для проведения операции винеровской фильтрации необходимо знание опорного сигнала. В качестве опорного можно использовать сигналы, отраженные от металлической пластины или уголкового отражателя. Как видно из рис. 7, б, в результате применения винеровской фильтрации сигналы на границах объекта стали более резкими.

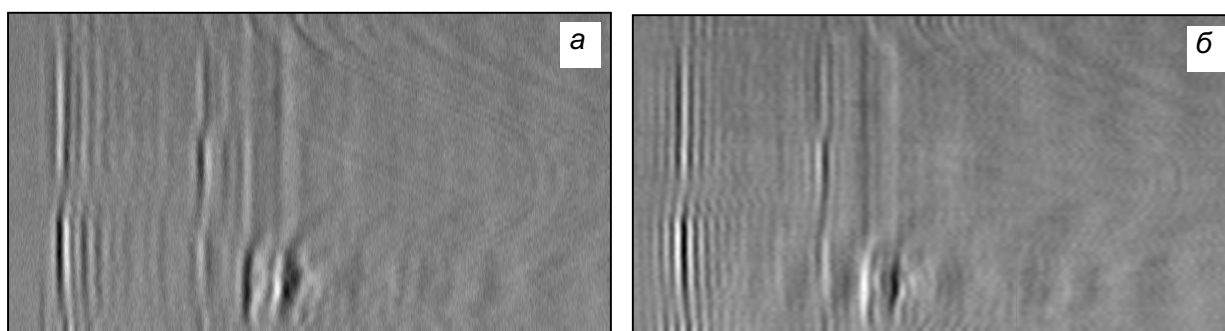


Рис. 7. Результаты дополнительной обработки осциллограмм: фильтрация постоянных составляющих сигнала (а); последовательные операции фильтрации постоянной составляющей и винеровской фильтрации (б)

На основе полученных осциллограмм были построены экспериментальные томограммы тестового объекта при зондировании без преграды (рис. 8, а) и через преграду (рис. 8, б). При зондировании через преграду зарегистрированные сигналы обрабатывались с использованием описанных выше алгоритмов фильтрации. Белый цвет на томограммах соответствует максимальному значению, черный – минимальному, а серый цвет – нулевому уровню сигнала.

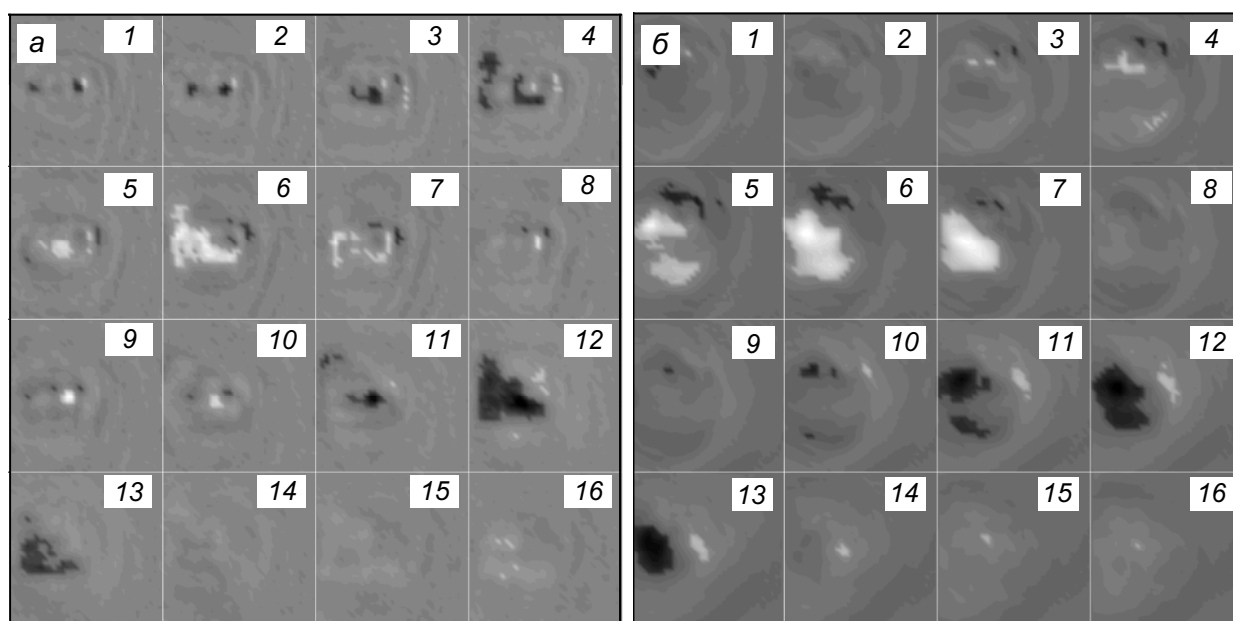


Рис. 8. Экспериментальные томограммы тестового объекта для случая зондирования без преграды (а) и через преграду (б)

На рис. 8 представлены распределения, соответствующие 16 различным слоям, взятым с шагом 0,5 см. Размеры каждого слоя составляли 40×40 см. Слою № 1 соответствует дальность 22,5 см (рис. 8, *a*) и 18,5 см (рис. 8, *б*), слою № 6 – дальность 25 см (рис. 8, *a*) и 21 см (рис. 8, *б*). Передняя плоскость тестового объекта располагалась на дальности 25 см (рис. 8, *a*) и 21 см (рис. 8, *б*), что соответствует слою № 6. Как видно из восстановленных томограмм, повторение формы объекта происходит на слое № 12, но уже другим цветом, что соответствует отражению от задней стенки объекта. Расстояние между слоями № 6 и 12 составляет 3,5 см, что приблизительно соответствует толщине зондируемого объекта, умноженной на его показатель преломления. Таким образом, положение и размер тестового объекта определяются вполне достоверно.

Анализ полученных томограмм показывает, что разрешение восстановленного радиоизображения резко уменьшается при зондировании через большеразмерные диэлектрические преграды. Так, при зондировании без преграды разрешение системы приближенно можно оценить в 3–5 см, при зондировании через преграду разрешение ухудшается до 5–10 см. Данный эффект можно объяснить слабым уровнем используемого в эксперименте зондирующего СШП-импульса, что привело к существенному влиянию шумов и помех на восстанавливаемое изображение. Увеличение уровня зондируемого излучения позволит уменьшить разрешение изображения до 2–3 см.

Приведенные выше результаты обработки эксперимента показывают реальную работоспособность предложенного подхода. По восстановленному послойному радиоизображению можно решать задачу обнаружения и распознавания самих объектов за диэлектрическими преградами. В ряде случаев задача зондирования за преградами сводится к обнаружению подвижных объектов. Такие задачи возникают при отыскании людей под завалами или получении информации о местоположении и количестве террористов в соседнем помещении за стеной. В этом случае сигналы, отраженные от неподвижных объектов, будут являться помехой, и их нужно отфильтровать. В данной работе предлагается подход, в котором фильтрация сигналов от неподвижных объектов проводится на основе разностных данных о регистрации сигналов в соседние периоды времени. Для проверки данного подхода был проведен натурный эксперимент, в котором тестовый объект за стеной перемещался (рис. 9): 3 – начальное положение объекта; 4 и 5 – его последующие положения.

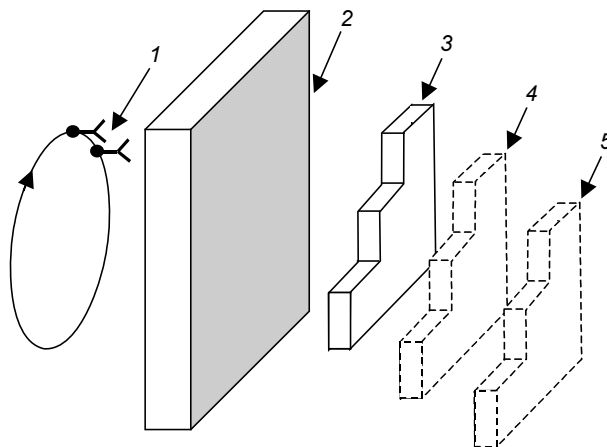


Рис. 9. Схема проведения эксперимента с движущимся тестовым объектом

Рассчитанные в результате эксперимента томограммы представлены на рис. 10. Для получения томограммы, представленной на рис. 10, *a*, использовались осциллограммы, полученные в моменты времени, когда объект находился в положениях 3 и 4 (рис. 9). Аналогично для томограммы, представленной на рис. 10, *б*, использовались осциллограммы, полученные в моменты времени, когда объект находился в положениях 4 и 5 (рис. 9). При каждом новом положении объекта он удалялся от передающей системы на 1 см и одновременно сдвигался вправо от нее также на 1 см. Представленные томограммы соответствуют шестнадцати различным слоям, взятым с шагом 0,5 см. Размеры каждого слоя составляли 40×40 см. Как видно из восстановленных томограмм, полученных в два соседних момента времени, передняя и задняя стенки объекта сместились на 2 слоя, что соответствует перемещению объекта в продольном направлении на 1 см. Смещение в поперечном направлении также присутствует, но его трудно заметить в связи с малым масштабом

изображения. Таким образом, положение движущегося тестового объекта определяется вполне достоверно, а сигналы, отраженные от неподвижных объектов, успешно фильтруются.

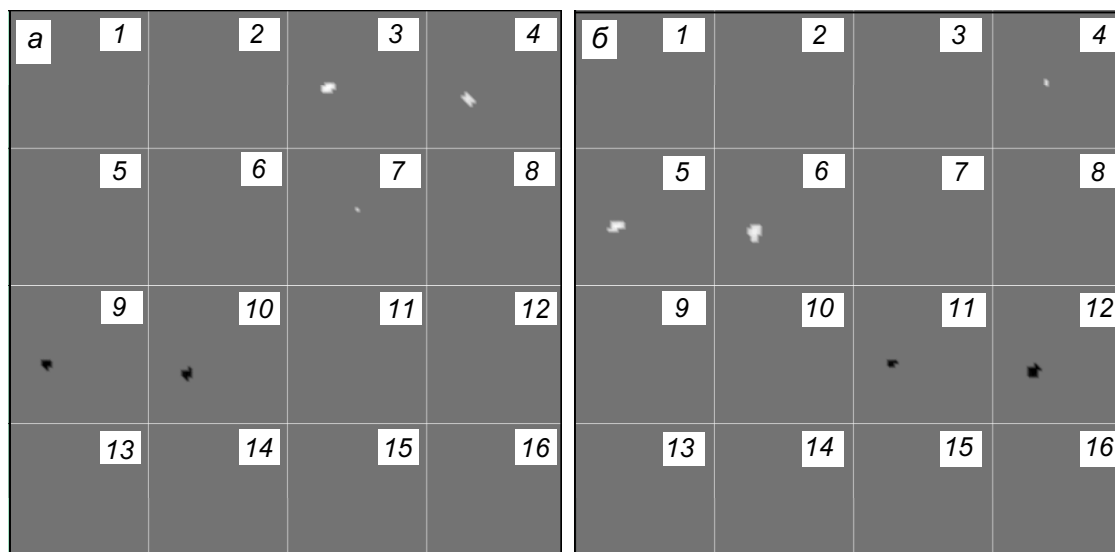


Рис. 10. Экспериментальные томограммы движущегося тестового объекта в соседние моменты времени

Заключение

Разработана методика регистрации и томографической обработки результатов радиоволновых измерений скрытых за диэлектрическими преградами объектов с использованием фокусировки методом синтеза большой апертуры. Путем имитационного моделирования и обработки реальных экспериментальных данных, полученных с использованием сверхширокополосного излучения, на примере тестового диэлектрического объекта подтверждена работоспособность предложенного подхода. Показано, что в случае использования маломощного зондирующего СШП-сигнала длительностью 0,1 нс разрешение может достигать 3 см. Разработана методика повышения разрешающей способности радиотомографического изображения при зондировании за диэлектрическими преградами на основе фильтрации помех и шумов в отраженных сигналах. Разработана методика фильтрации отраженных от неподвижных объектов сигналов для выделения движущихся объектов за диэлектрическими преградами.

Разработанные методы и подходы являются новыми и представляют твердую основу для построения в ближайшее время действующей модели СШП-радиотомографа.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Якубов В.П., Склярчик К.Г., Пинчук Р.В. и др. // Изв. вузов. Физика. – 2008. – № 10. – С. 63–79.
2. Суханов Д.Я., Якубов В.П. // ЖТФ. – 2006. – Т. 76. – Вып. 7. – С. 64–68.

Национальный исследовательский
Томский государственный университет, г. Томск, Россия
E-mail: yvlp@elefot.tsu.ru
shipilov@webmail.tsu.ru

Поступила в редакцию 24.06.10.