

Локационное сверхширокополосное радиовидение с использованием некогерентного во времени излучения

К.В. Завьялова, Д.Я. Суханов

Томский государственный университет, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 36, sdy@mail.tsu.ru

Предлагается метод получения радиоизображений плоских объектов с использованием некогерентного во времени радиоволнового излучения. Зондирование производится монохроматическим сигналом со сканированием по частоте в широкой полосе. Измеряется только амплитуда рассеянного объектом поля. Измерения производятся в плоскости параллельной объекту. Считается, что объект расположен на известном расстоянии от плоскости измерений.

Here is proposed the method of plane objects image reconstruction using time incoherent radio waves. The sounding is carried out by monochromatic signal with frequency scanning on the wide band. Only the magnitude of the backscattered field is measured. The measurements are carried out along the plane parallel to the object. It is considered that the object is placed on the known distance from the measurement plane.

Системы радиовидения [1] находят применение в задачах аэрокосмического мониторинга, контроля качества на производстве, досмотра пассажиров и персонала аэропортов для обеспечения безопасности пассажирских перевозок, а также для получения трёхмерных изображений различных объектов. Для осуществления радиовидения, как правило, используется технология радара с синтезированной апертурой. Однако данная технология требует измерения фазы рассеянной объектом волны. На высоких частотах (терагерцовый диапазон) существует техническая сложность измерения фазы рассеянной волны, поскольку требуется использовать высокочастотные смесители, что приводит к удорожанию системы. В данной работе предлагается метод восстановления радиоизображений с использованием информации только об амплитуде с помощью несинхронизованных передатчика и приемника. То есть измерение фазы не производится, что эквивалентно использованию некогерентного во времени сигнала.

Предлагается следующая схема измерений (рис. 1): излучатель фиксирован в некоторой точке пространства, а приемник, измеряющий амплитуду рассеянной волны, перемещается в плоскости параллельной исследуемому объекту. На некотором известном расстоянии a от плоскости измерений размещается плоский рассеивающий объект, обладающий неоднородным распределением коэффициента рассеяния.

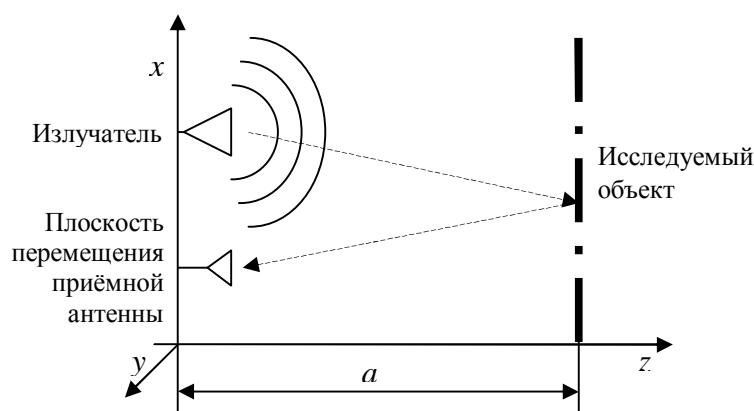


Рис. 1. Схема измерений

В течение измерения амплитуды рассеянного поля излучается монохроматический сигнал на определённой частоте. Затем перестраивается частота излучения, и ещё раз производятся измерения амплитуд рассеянного поля в каждой точке плоскости сканирования. Подобные измерения повторяются на нескольких частотах в широкой полосе. Целью является восстановление распределения коэффициента рассеяния плоского объекта по результатам измерения амплитуды рассеянного поля на различных частотах.

Для определения распределения коэффициента рассеяния объекта был разработан итерационный метод, который основан на решении прямой и обратной задачи распространения волн в промежутке между исследуемым объектом и плоскостью измерений. Учтём, что рассматривается плоский объект и известно поле волны источника перед объектом. Представим его как поле точечного источника в скалярном приближении:

$$S(x, y) = \exp(ikr)/(4\pi r), \quad (1)$$

где $r = \sqrt{(x - x_0)^2 + (y - y_0)^2 + a^2}$, (x_0, y_0, z_0) - координаты источника.

Поскольку функцию прозрачности объекта считаем чисто действительной, то известна фаза волны сразу после рассеяния от плоского объекта, которая определяется из фазового множителя $\exp(ikr)$. Так же, в ходе измерений, получена амплитуда поля в плоскости перемещения приёмной антенны $|A(x, y)|$. В рассматриваемой задаче, необходимо определить амплитуду волнового поля сразу после рассеяния объектом и фазу волны в плоскости измерений. Амплитуда поля вблизи рассеивающего объекта будет описывать коэффициент рассеяния объекта.

В данной работе под прямой задачей понимается определение комплексного волнового поля в плоскости измерений по известному комплексному волновому полю в плоскости объекта. Процедура решения прямой задачи распространения радиоволн от объекта до плоскости измерений включает в себя несколько шагов:

Сначала производится прямое преобразование Фурье от поля волны $V(x, y)$ рассеянной исследуемым объектом (осуществляется переход к спектру плоских волн [2]):

$$\tilde{V}(k_x, k_y) = \iint_{-\infty}^{+\infty} V(x, y) e^{i(k_x x + k_y y)} dx dy.$$

Далее $\tilde{V}(k_x, k_y)$ умножается на фазовый множитель $\exp(ik_z a)$, описывающий набег фазы от плоскости исследуемого объекта до плоскости приема:

$$\tilde{W}(k_x, k_y) = \tilde{V}(k_x, k_y) \exp(ik_z a),$$

где k_x , k_y и $k_z = \sqrt{k^2 - k_x^2 - k_y^2}$ - компоненты волнового вектора, $\tilde{W}(k_x, k_y)$ - угловой спектр волн в плоскости измерений.

На завершающем шаге решения прямой задачи получается комплексное поле в плоскости измерений с помощью обратного преобразования Фурье от функции $\tilde{W}(k_x, k_y)$:

$$U(x, y) = \frac{1}{(2\pi)^2} \iint_{-\infty}^{+\infty} \tilde{W}(k_x, k_y) e^{-i(k_x x + k_y y)} dk_x dk_y,$$

где $U(x, y)$ - комплексное волновое поле в плоскости измерений определенное по комплексному волновому полю в плоскости объекта.

Обратной задачей будем считать задачу определения комплексного волнового поля в плоскости объекта по известному комплексному волновому полю в плоскости

измерений. Процедура решения обратной задачи также включает в себя следующие шаги:

Сначала производится прямое преобразование Фурье от полученного комплексного значения поля в плоскости измерений:

$$\tilde{U}(k_x, k_y) = \iint_{-\infty}^{+\infty} U(x, y) e^{i(k_x x + k_y y)} dx dy$$

Далее $\tilde{U}(k_x, k_y)$ умножается на фазовый множитель $\exp(-ik_z a)$, компенсирующий набег фазы от плоскости измерений до плоскости объекта:

$$\tilde{\tilde{W}}(k_x, k_y) = \tilde{U}(k_x, k_y) \exp(-ik_z a)$$

Здесь $\tilde{\tilde{W}}(k_x, k_y)$ - угловой спектр в плоскости объекта.

На последнем шаге находится комплексное поле в плоскости объекта путем взятия обратного преобразования Фурье от углового спектра:

$$V(x, y) = \frac{1}{(2\pi)^2} \iint_{-\infty}^{+\infty} \tilde{\tilde{W}}(k_x, k_y) e^{-i(k_x x + k_y y)} dk_x dk_y$$

Для восстановления распределения коэффициента рассеяния исследуемого объекта предлагается итерационный алгоритм, использующий описанные выше решения прямой и обратной задач. На нулевом шаге итерационного алгоритма решается прямая задача распространения радиоволн в промежутке от объекта до плоскости измерений (в начальном приближении считается, что объект это бесконечная плоскость с постоянным коэффициентом рассеяния). В результате получают некоторые значения комплексного поля в плоскости измерений $U_0(x, y)$ (нулевая итерация).

В полученном комплексном поле амплитуда заменяется на экспериментально измеренные значения амплитуды:

$$\tilde{U}_0(x, y) = |A(x, y)| \frac{U_0(x, y)}{|U_0(x, y)|}$$

где $\tilde{U}_0(x, y)$ - значение комплексного поля в плоскости измерений с измеренной амплитудой и рассчитанной фазой. Далее по полю в плоскости измерений $\tilde{U}_0(x, y)$, путём решения обратной задачи, находится поле в плоскости исследуемого объекта. В результате получают некоторые значения комплексного поля в плоскости исследуемого объекта $V_0(x, y)$. В полученном комплексном поле в плоскости объекта фаза заменяется фазой волны перед объектом, которая рассчитывается из формулы (1). Замена фазы производится следующим образом:

$$V_1(x, y) = |V_0(x, y)| \frac{S(x, y)}{|S(x, y)|}$$

где $V_1(x, y)$ - восстановленное поле в плоскости исследуемого объекта в начале первой итерации. Далее повторяются решение прямой задачи и замена амплитуды на измеренную амплитуду, в результате чего получается $\tilde{U}_1(x, y)$ - комплексное поле в плоскости измерений после первой итерации. Итерации продолжают до тех пор, пока результат восстановления поля в плоскости объекта корректируется с каждой итерацией. Восстановленным изображением коэффициента рассеяния объекта будет являться амплитуда функции $V_N(x, y)$, где N - количество итераций.

В соответствии с описанной выше схемой измерений, был проведён численный эксперимент для случая, когда область измерения амплитуды имеет размеры 2 м,

$a = 1$ м, а излучатель расположен в центре области измерения амплитуды. На рис. 2 представлено распределение коэффициента рассеяния исследуемого объекта $M(x, y)$ и результат численного моделирования амплитуды поля в плоскости измерений $|A(x, y)|$ на частоте 70 ГГц.

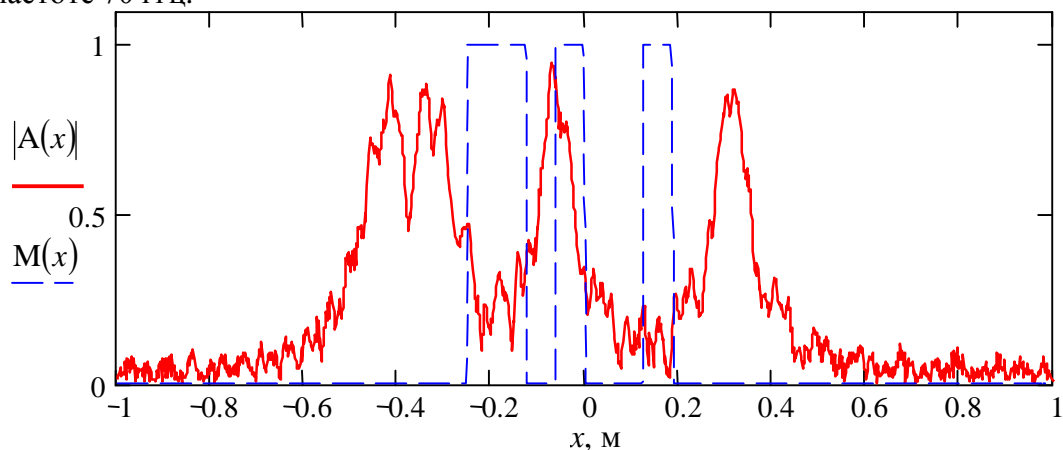


Рис. 2. Амплитуда поля в плоскости измерений и коэффициент рассеяния исследуемого объекта

В результате применения итерационного алгоритма к данным, изображённым на рис. 2. Было восстановлено изображение исследуемого объекта. На рис. 3 представлен результат восстановления изображения после 20 итераций $|V_{20}(x)|$ при частоте сигнала 70 ГГц в сравнении с заданным распределением коэффициента отражения $M(x)$.

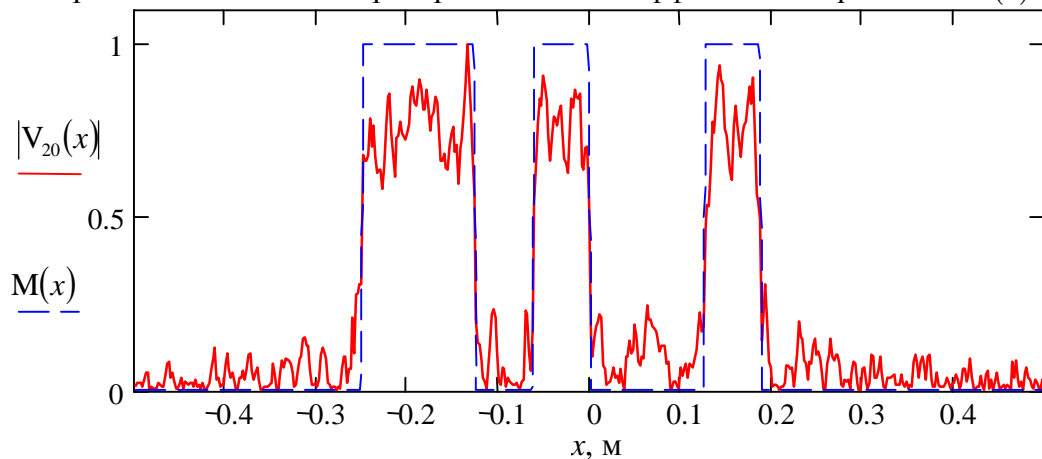


Рис. 3. Результат восстановления изображения объекта после 20 итераций на частоте 70 ГГц

Видно, что графики $|V_{20}(x)|$ и $M(x)$ хорошо согласуются. Полученное изображение приблизительно описывает коэффициент рассеяния исследуемого объекта. Это означает, что предложенный итерационный метод даже при неизвестной фазе позволяет получать результаты сравнимые с методами, использующими фазовую информацию.

Для улучшения качества восстанавливаемого изображения предлагается использовать несколько измерений амплитуды рассеянного поля на различных частотах. Если сложить результаты восстановления изображения на различных частотах по амплитуде, то произойдёт уменьшение уровня шума. В ходе численного эксперимента была рассмотрена равномерная сетка из 16 частот в диапазоне от 70 ГГц

до 100 ГГц. На рис. 4 представлен результат сложения амплитуд изображений восстановленных на 16 различных частотах.

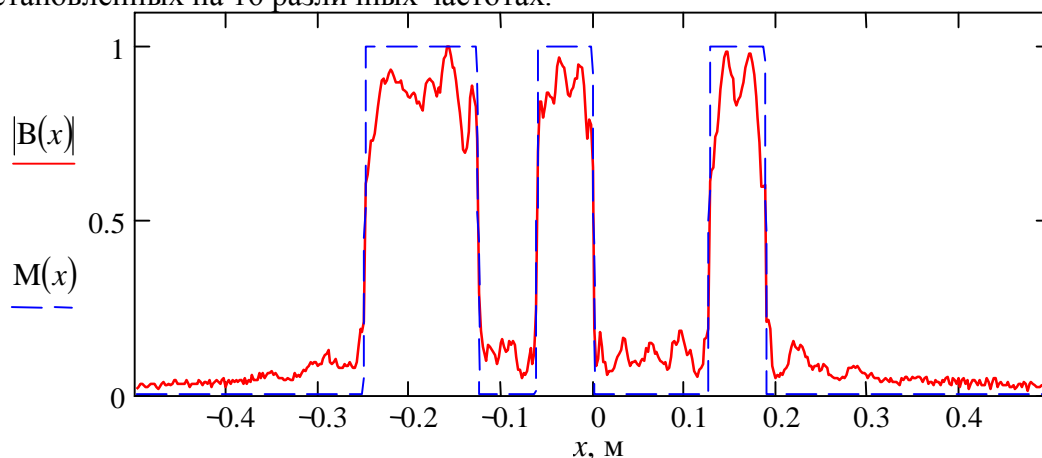


Рис. 4. Результат восстановления изображения при использовании сканирования по частоте в диапазоне 70 - 100 ГГц

По результатам численного моделирования можно заключить, что для восстановления изображения плоского объекта достаточно измерение амплитуды рассеянного поля в зоне дифракции Френеля. При этом, использование широкополосного сканирования по частоте позволяет улучшить качество восстанавливаемого изображения. В случае если расстояние до объекта неизвестно, оно может быть определено путём перебора всех возможных расстояний до объекта и анализа восстановленных изображений на соответствие характерным особенностям объекта, например, объект с двумя градациями коэффициента отражения. Но в общем случае необходимо знать расстояние до объекта.

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

Литература

1. Кондратенков Г.С., Фролов А.Ю. Радиовидение. Радиолокационные системы дистанционного зондирования Земли. Учебное пособие для вузов/ Под ред. Г.С. Кондратенкова. – М.: «Радиотехника», 2005. – 368 с.
2. Виноградова М.Б., Руденко О.В., Сухоруков А.П. Теория волн. -М.: Наука. Главная редакция физ.-мат. Лит., 1979. 384 с.