

УДК 621.371

Д.Я. СУХАНОВ, В.Н. ЦЫДЕНОВА

ДОПЛЕРОВСКОЕ РАДИОВИДЕНИЕ С ПРИМЕНЕНИЕМ ПОДВИЖНОГО ПАРАБОЛИЧЕСКОГО ПЕРЕИЗЛУЧАТЕЛЯ¹

Предлагается метод визуализации объектов по измерениям доплеровским радиолокатором с применением подвижного параболического переизлучателя. Предполагается, что движение переизлучателя создаёт доплеровский эффект и позволяет измерить сигнал, рассеянный неподвижным объектом, с применением доплеровского радиолокатора. Приводятся результаты численного моделирования и экспериментальных исследований.

Ключевые слова: радиовидение, доплеровский радиолокатор.

Введение

Технологии радиовидения [1] получают всё большее распространения в связи с широкой областью их применения, в частности для систем контроля качества на производстве, для обнаружения и визуализации объектов, скрытых под поверхностью Земли, для систем безопасности и контроля доступа. Радиоизображения с разрешением, близким к дифракционному пределу, получают при использовании технологии радара с синтезированной апертурой благодаря измерениям амплитудно-фазового распределения поля на апертуре, размерами сравнимой с расстоянием до исследуемого объекта. Для измерения амплитудно-фазового распределения на плоскости необходимо либо применение двумерных антенных решёток, что является достаточно дорогостоящим решением, либо применение сканирования с помощью одиночного приёмо-передатчика, что требует значительного времени, однако намного экономичнее применения решёток. Ускорение процесса сканирования позволит создать недорогие и быстродействующие системы радиовидения. Перемещение самого приёмо-передатчика невозможно ускорить существенно в связи с его большой массой и наличием подводных кабелей и фидерных линий для передаваемого и принимаемого сигналов.

Одним из перспективных решений ускорения процесса сканирования является применение подвижных переизлучателей [2], которые могут быть достаточно лёгкими для быстрого механического сканирования, а также не имеют подводных кабелей и фидерных линий. В данной работе предлагается в качестве переизлучателя использовать подвижный параболический цилиндр, который позволяет сканировать поле, а также создавать доплеровский эффект для неподвижных объектов. Возникновение доплеровского эффекта позволяет использовать в качестве радиолокаторов недорогие доплеровские датчики, которые массово выпускаются промышленностью для регистрации движения.

Постановка задачи

Предлагается схема измерений, представленная на рис. 1. Предлагается использовать два параболических переизлучателя. Один параболический переизлучатель неподвижен и служит для фокусировки волны на второй параболический переизлучатель, который может перемещаться навстречу первому. Доплеровские радиолокаторы располагаются в фокусе неподвижного переизлучателя. В отличие от работы [2] здесь рассматривается два вогнутых переизлучателя, обладающих фокусирующими свойствами. Рассеянная неподвижным переизлучателем волна имеет фронт, близкий к цилиндрическому, с осью, параллельной оси z . То есть неподвижный переизлучатель позволяет уменьшить расхождение волны по одной из осей и, как следствие, увеличить амплитуду волны, дошедшей до подвижного переизлучателя. Подвижный переизлучатель ориентирован таким образом, что фокусирует падающую на него плоскую волну в своём фокусе, после прохождения которого волны расходятся в широком диапазоне углов, что позволит облучать объекты с различных позиций и получать рассеянный сигнал на всех точках апертуры системы. В данном случае апертура системы по оси x ограничена областью перемещения подвижного переизлучателя.

Рассеянные объектом волны, согласно теореме взаимности, возвращаются в приёмную антенну доплеровского радиолокатора по той же траектории и с тем же фазовым набегом. При этом

¹ Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ в рамках проекта № 12-02-31470 мол_а.

считаем, что излучающая и приёмная антенны размещены достаточно близко и расстоянием между ними можно пренебречь.

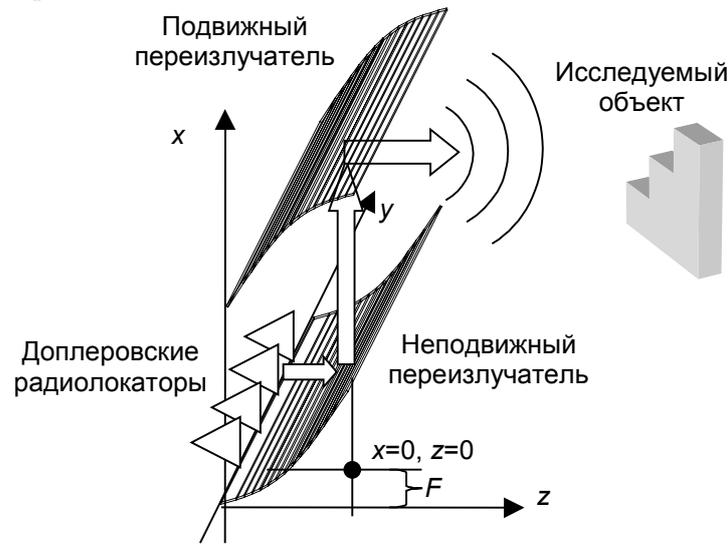


Рис. 1. Схема измерений

Для проверки сделанных предположений относительно распространения радиоволн в предложенной системе было проведено численное моделирование. В данном случае нас интересуют качественные оценки амплитудно-фазового распределения полей. В большей степени представляет интерес фазовое распределение поля, поскольку именно оно несёт большую часть информации об объектах в среде. Численное моделирование будем проводить на основе метода эквивалентных точечных источников, размещённых на равномерной сетке на параболических переизлучателях.

Поскольку объём вычислений значителен, то численное моделирование было проведено с применением технологий параллельного программирования OpenCL на графической карте nVidia Geforce GTX480. Численное моделирование рассеянного поля проводилось на основе приближения однократного рассеяния согласно выражению [3]

$$U(\mathbf{r}) = \iint_S C U_0(\mathbf{r}') \frac{\partial G(\mathbf{r}, \mathbf{r}')}{\partial n'} d^2 \mathbf{r}', \quad (1)$$

где \mathbf{r} – точка наблюдения рассеянного поля; \mathbf{r}' – точка интегрирования по рассеивающей поверхности; $U_0(\mathbf{r}')$ – поле волны, падающей на рассеивающую поверхность; $G(\mathbf{r}, \mathbf{r}') = \exp(ik|\mathbf{r} - \mathbf{r}'|)/(4\pi|\mathbf{r} - \mathbf{r}'|)$ – функция Грина свободного пространства; C – коэффициент отражения, который примем равным -1 .

Численное моделирование проводилось на частоте 10 и 24 ГГц. В качестве переизлучателей рассматривались параболические цилиндры с фокусным расстоянием 5 см и размерами по оси z 20 см. В результате численного моделирования была рассчитана реакция системы на точечный рассеиватель, то есть аппаратная функция на частоте 10 ГГц (рис. 2, а). Также реакцию на точечный рассеиватель можно оценить аналитически, если приближённо считать рассеиватель не параболическим цилиндром, а тонким стержнем, проходящим по фокусу параболического цилиндра с корректировкой на постоянный фазовый набег. В этих приближениях реакцию на точечный рассеиватель можно записать в виде

$$A(x, y) = a(x, y, h) \exp \left(i2k \sqrt{(y - y_0)^2 + \left(x + \sqrt{h^2 + (x - x_0)^2 + 4F} \right)^2} \right), \quad (2)$$

где $a(x, y, h)$ – плавно меняющийся амплитудный множитель, описывающий ослабление поля с расстоянием; h – расстояние от плоскости перемещения фокуса подвижного переизлучателя до точечного рассеивателя; (x_0, y_0, h) – координата точечного рассеивателя; x – координата подвижного переизлучателя (расстояние от фокуса неподвижного параболоида до фокуса подвижного параболоида); y – положение доплеровского радиолокатора; F – фокусное расстояние параболоида.

лоидов. Далее будем считать, что амплитудный множитель $a(x, y, h)$ не существенно влияет на поле измерений, поскольку меняется намного медленнее экспоненциального множителя, и $a(x, y, h) = 1$. На рис. 2, б представлен результат аналитического расчёта аппаратной функции.

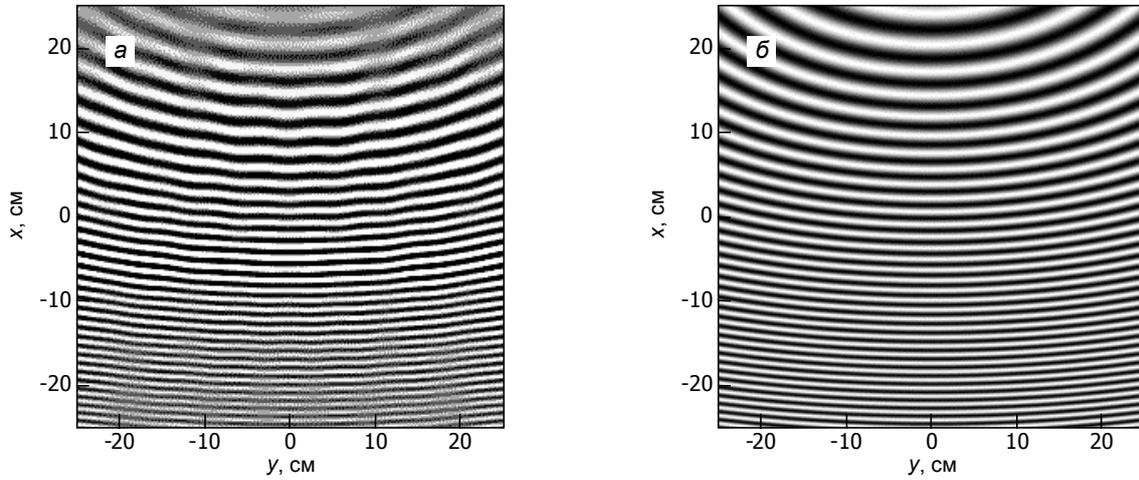


Рис. 2. Реакция системы на точечный рассеиватель на частоте 10 ГГц: *a* – численная модель, *б* – аналитический расчёт

Из сравнения аналитического решения (2) и численно модели видно их достаточно точное соответствие, следовательно, выражение (2) может быть использовано в качестве аппаратной функции для восстановления радиоизображений.

Было проведено численное моделирование поля в области измерений для объекта сложной формы (в форме ступенчатого треугольника с размерами ступеньки 5 см) на частоте 24 ГГц. Результат численного моделирования представлен на рис. 3.

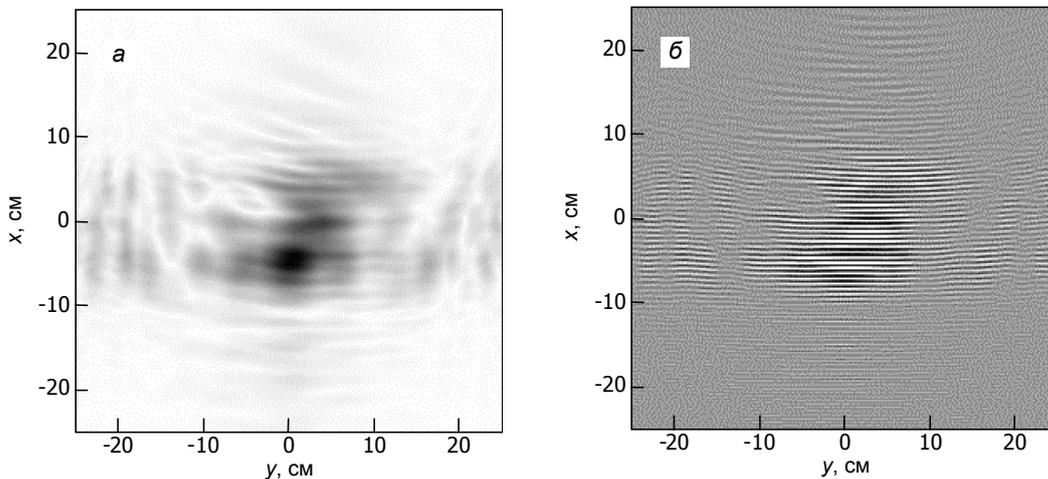


Рис. 3. Реакция системы на объект в форме ступенчатого треугольника на частоте 24 ГГц: *a* – амплитуда сигнала, *б* – С-квадратура сигнала

Даже по данным моделирования прямой задачи можно видеть некоторые очертания тестового объекта, это связано с фокусирующими свойствами переизлучателя и плоской формой объекта, однако такого качества изображения недостаточно для получения разрешения, близкого к дифракционному пределу. Поэтому необходимо решить обратную задачу восстановления распределения рассеивающих неоднородностей на основе измеряемых данных на выходе доплеровских радиолокаторов.

Восстановление радиоизображений

Для восстановления изображения объекта предлагается использовать метод пространственно-согласованной фильтрации. Предполагается представить каждую точку объекта в виде точечного рассеивателя. Таким образом, в линейном приближении измеренный сигнал от сложного объекта, можно представить в виде суммы сигналов от точечных рассеивателей. То есть сигналы от рассеивателей, расположенных в различных точках пространства, можно использовать в качестве пространственно-согласованного фильтра.

Сигнал от точечного рассеивателя, без учёта ослабления сигнала с расстоянием, можно записать в виде

$$E_0(x, y, x', y', z') = \exp[ik2r],$$

где $r = \sqrt{\left(x + \sqrt{(x-x')^2 + z'^2}\right)^2 + (y-y')^2}$; $k = 2\pi f_0 / c$, f_0 – частота радиолокаторов; x – координата переизлучателя; $(x=0, y)$ – координата радиолокатора; (x', y', z') – координата рассеивателя.

Для восстановления плоского изображения объекта предлагается следующая операция согласованной фильтрации:

$$\rho_R(x', y', z') = \iint_{yx} U(x, y) E_0^*(x, y, x', y', z') dx dy, \quad (4)$$

где $\rho_R(x', y', z')$ – восстановленное распределение неоднородностей в среде; $U(x, y)$ – измеренное поле; x – положение подвижного переизлучателя; y – положение радиолокатора.

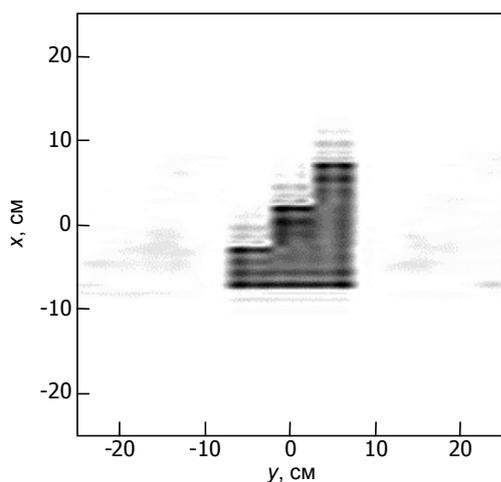


Рис. 4. Восстановленное изображение на частоте 24 ГГц

Выражение (4) является решением обратной задачи. Следует отметить, что в данном случае нет разрешения по дальности, поэтому изображение объекта будет восстановлено, если точно задать дальность до объекта z' . Результат восстановления изображения объекта представлен на рис. 4.

Можно видеть отчётливо различимое изображение моделируемого объекта с разрешением порядка половины длины волны, однако на изображении присутствуют артефакты, что связано с дискретностью численной модели, ограниченностью области моделирования, а также небольшим различием аналитически рассчитанной аппаратной функции и численно смоделированной.

Следует отметить, что в данной системе разрешение по оси x и по оси y различно, по оси y разрешение будет хуже, поскольку угловой размер апертуры системы в данном случае меньше. Также

это следует из того, что ширина пространственного спектра аппаратной функции по оси x шире, чем по оси y .

Экспериментальные исследования

Для проверки предложенного метода и разработанной численной модели были проведены экспериментальные исследования по визуализации металлического объекта ступенчатой формы с размером ступеньки 5 см.

В качестве доплеровского радиолокатора использовался доплеровский датчик CON-RSM1700 работающий на частоте 24 ГГц. В эксперименте вместо линейной решётки доплеровских датчиков использовался механический сканер, который перемещал датчик по оси y с шагом 5 мм. Параболический переизлучатель имел ту же форму, что была рассмотрена в численной модели. Сигнал с доплеровского датчика измерялся с помощью микровольтметра UT-70D. Фотография экспериментальной установки представлена на рис. 5.

После обработки данных измерений было восстановлено изображение тестового объекта (рис. 6). Качество восстановленного изображения невысоко вследствие погрешностей в изготов-

лении экспериментальной установки (в частности, параболических переизлучателей) и наличие шумов измерений. Однако полученный результат подтверждает принципиальную возможность восстановления радиоизображений объектов с помощью доплеровских радиолокаторов и подвижного переизлучателя.

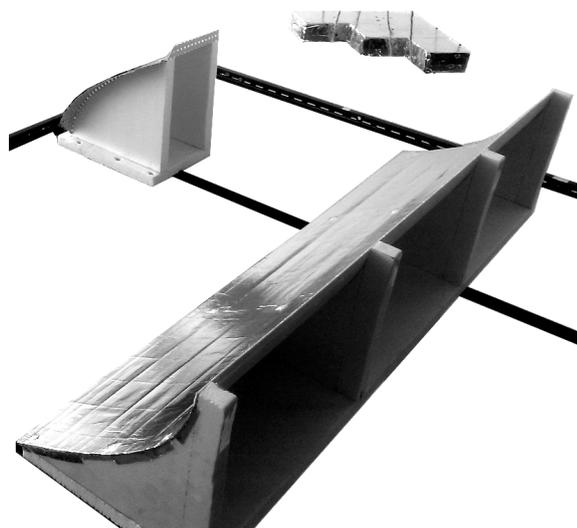


Рис. 5. Фотография экспериментальной установки и тестового объекта

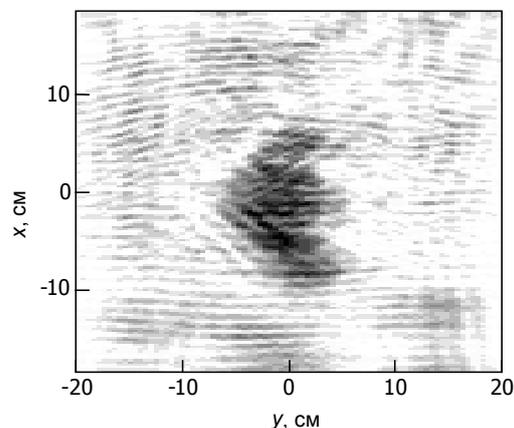


Рис. 6. Восстановленное радиоизображение тестового объекта

Заключение

Предложена схема радиовидения на основе доплеровских радиолокаторов и подвижного параболического переизлучателя. Разработана численная модель системы на основе технологии параллельного программирования OpenCL. Экспериментально показана возможность получения радиоизображений на примере тестового объекта сложной формы. Пока экспериментально не удалось достигнуть разрешения, предсказываемого численным моделированием, что связано с погрешностями изготовления экспериментальной установки.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кондратенков Г.С., Фролов А.Ю. Радиовидение. Радиолокационные системы дистанционного зондирования Земли: учеб. пособ. для вузов / под ред. Г.С. Кондратенкова. – М.: Радиотехника, 2005. – 368 с.
2. Суханов Д.Я., Рубаненко А.С. // Изв. вузов. Физика. – 2012. - Т. 55. - № 8/2. – С. 5-11.
3. Виноградова М.Б., Руденко О.В., Сухоруков А.П. Теория волн. – М.: Наука, 1990.

Национальный исследовательский Томский государственный университет,
г. Томск, Россия
E-mail: sdy@mail.tsu.ru

Поступила в редакцию 15.07.13.

Суханов Дмитрий Яковлевич, к.ф.-м.н.;
Цыденова Виктория Николаевна, студентка.

D.Y. SUKHANOV, V.N. TSYDENOVA

DOPPLER RADIOVISION USING MOVABLE PARABOLIC RE-RADIATOR

Proposed a method of visualization of objects by measuring the Doppler radar using movable parabolic re-radiator. It is assumed that the movement of re-radiator creates a Doppler effect and provides a measure of the signal scattered by a stationary object with the use of Doppler radar. The results of numerical simulation and experimental studies are presented.

Keywords: radiovision, Doppler radiolocator.