

**В.П. Якубов, С.Э. Шипилов, И.С. Федянин, И.Ю. Кузьменко,
Т.Р. Муксунов**

Национальный исследовательский Томский государственный университет

Повышение разрешения радиоизображений с использованием тактированной решетки

Анализируется возможность повышения пространственного разрешения радиоизображений, снятых с использование принципа тактированной решетки. Рассмотрены два варианта - монохроматического зондирования с полностью заполненной решеткой на частоте 24 ГГц и сверхширокополосного импульсного зондирования с разряженной решеткой. Показано, что оба варианта имеют разрешением не хуже 1-2 см. Основным достоинством первого варианта является малая себестоимость, а второго скорость сканирования. Каждый из вариантов обладает широкими перспективами развития.

Ключевые слова: тактированная решетка, датчики перемещений, СШП импульсы, синтезирование большой апертуры

Идея использования тактированных антенных решеток для получения радиоизображений, высказанная сотрудниками немецкого института неразрушающих методов контроля (IZFP, Германия), позволяет существенно уменьшить взаимное влияние антенных элементов в фазированных решетках [1]. При этом в каждый конкретный момент времени работает только одна пара из передающих и приемных элементов. В настоящей работе исследуется, как при этом обстоит дело с пространственным разрешением.

Как известно пространственное разрешение любой системы радиовидения определяется его рабочей длиной волны λ . Локационная схема в этом смысле имеет преимущество – поскольку трасса зондирования проходится дважды, то разрешение определяется половиной длины волны $\lambda/2$. Наиболее простая схема радиовидения может быть построена с использованием, так называемых, датчиков перемещений, которые работают принципу простейшего радиолокатора. На рис. 1 слева показан внешний вид датчика перемещений CON-RSM1700, который использует частоту 24 ГГц и это соответствует рабочей длине волны $\lambda = 1,25$ см. Потенциально ожидаемое разрешение оценивается как 0,62 см. С выхода смесителя датчика снимается низкочастотный сигнал пропорциональный квадратурной составляющей отраженного от цели сигнала $u = A \cos \varphi$. Важно, что фазовая информация при этом сохраняется.

Использование планарной решетки из таких датчиков, включаемых в тактированном режиме легко имитируется, например, путем простого перемещения в плоскости зондирования. Это позволяет снять полную волновую проекцию исследуемой цели приблизительно за 20 минут. В качестве тестовой цели был взят вырезанный из асбестоцементной плиты ступенчатый треугольник с размером каждой ступеньки 5 см (рис. 1, справа). Для оценки разрешающей способности в центре было сделано квадратное отверстие размером 2x2 см.

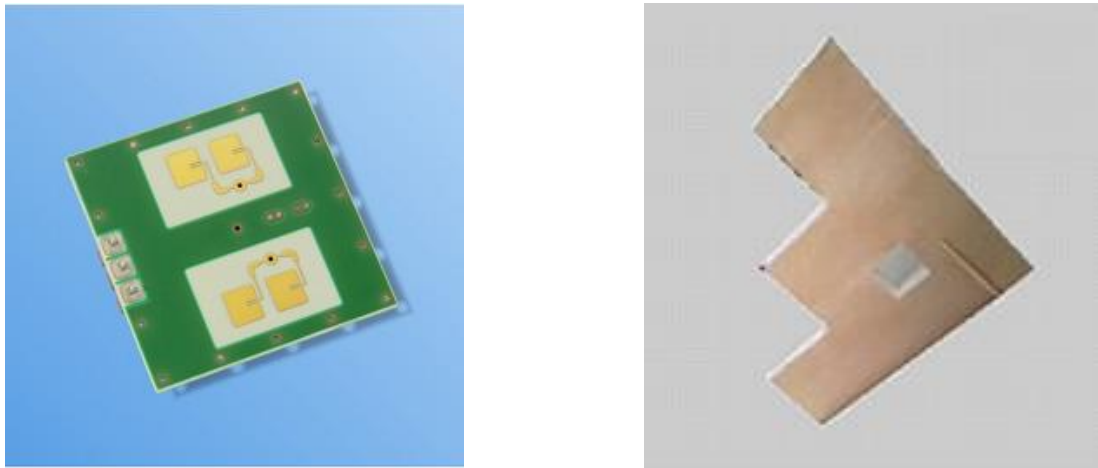


Рисунок 1

На рис. 2 слева показано исходное распределение квадратурных составляющих, снятых с шагом 0,4 см для тестового треугольника, помещенного на расстоянии 10 см от плоскости зондирования. Видно, что хотя объект и узнаваем, но разрешение оставляет желать лучшего. Поскольку используется слабонаправленный излучатель, то каждая точка на изображении - результат множественных отражений. Изображение выглядит размытым в двух направлениях.

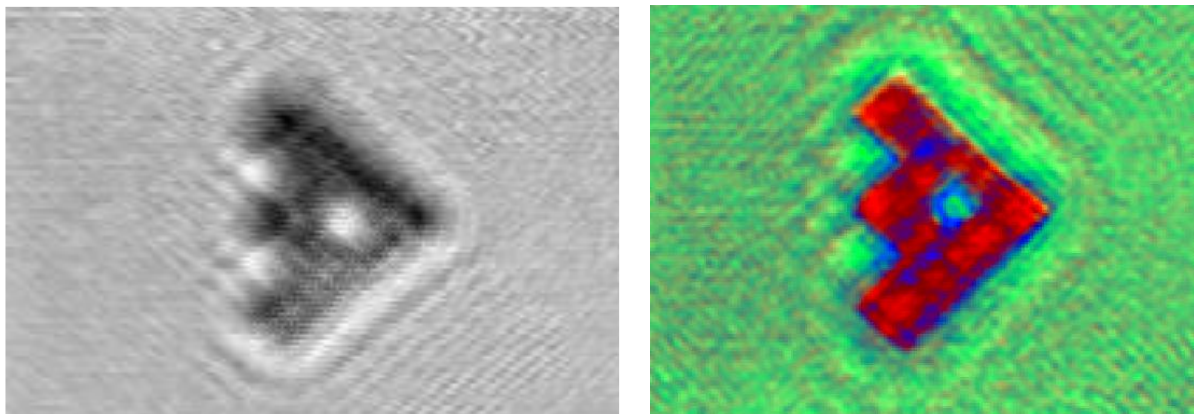


Рисунок 2

Для повышения разрешения оказывается достаточным провести фокусировку изображения с использованием технологии синтеза большой апертуры. Эта операция проводится с использованием двумерной согласованной фильтрации с комплексной аппаратной функцией

$$W(\mathbf{r}-\mathbf{r}_F) = \exp(-2ik|\mathbf{r}-\mathbf{r}_F|),$$

где $k = 2\pi/\lambda$ - волновое число, а \mathbf{r} и \mathbf{r}_F - радиус-векторы точек на апертуре и на изображении, соответственно. Свертка исходного изображения с этой функцией выравнивает фазы всех суммируемых составляющих в каждой точке синтезируемого изображения [2-3]. Результат показан на рис. 2 справа. Видно, что разрешение

существенно повысилось - приблизительно до 0,5-1 см. Важно подчеркнуть, что при использовании монохроматического излучения важным условием качественного изображения является полная заполненность апертуры при зондировании. Это легко обеспечивается путем простого механического сканирования, но требуется относительно длительное время для измерений, что затрудняет возможность получения радиоизображений в режиме реального времени.

Наиболее перспективным для практического применения идеи тактированной решетки является использование сверхширокополосного (СШП) импульсного излучения. В этом случае становится доступной пространственно-временная фокусировка излучения, при которой излучение локализуется как в поперечном, так и в продольном направлениях. Рабочая зона зондирования выступает как некий электромагнитный «снаряд», летящий со скоростью света. Эта зона представляет собой аппаратную функцию (АФ) томографической системы. В первом приближении результат локационных измерений – это свертка пространственного распределения неоднородностей среды с АФ системы. Важным достоинством использования СШП излучения является возможность использования разряженной тактированной антенной решетки. Множество частот равнозначно множеству электрических трасс и как бы реализует множество пространственных разносов и дает высокую заполненность эквивалентной решетки. На рис. 3 слева показана такая тактированная антенная решетка, состоящая из 6 передающих (внутренне кольцо) и 16 приемных (внешнее обрамление) СШП элементов, которые последовательно коммутируются с помощью электромеханических СШП коммутаторов фирмы «Dynatech» (рис. 4). Развязка между переключаемыми каналами составляет 60 дБ, минимальное время уверенного переключения - 15 мс.

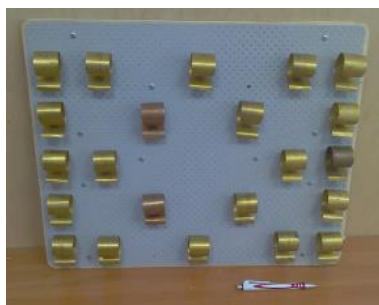


Рисунок 3

Разработанная решетка составляет основу для созданного портативного СШП радиотомографа (рис. 3 справа), вес которого равняется 12 кг. Полный опрос решетки и восстановление радиоизображения осуществляется за время равное 8 с.

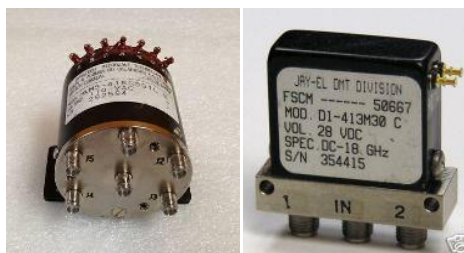


Рисунок 4

На рис. 5 показана тестовая сцена из 5-ти рублевых монет и её радиоизображение, полученное с помощью портативного радиотомографа. Для зондирования были использованы СШП импульсы без заполнения длительностью 200 пс. Видно, что достигнутое разрешение имеет порядок 2 см [4].

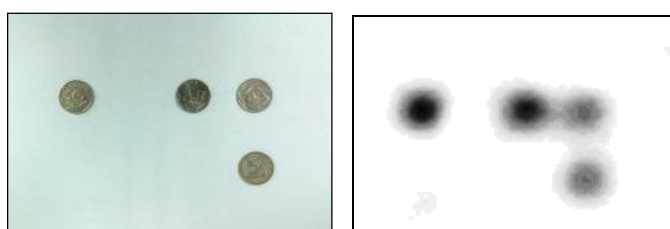


Рисунок 5

Таким образом, в работе показано, что наиболее перспективной для использования в режиме тактированной антенной решетки является разряженная решетка из СШП антенн, а алгоритм обработки – согласованная фильтрация [4-5].

Работа выполнена по программе повышения конкурентоспособности Томского государственного университета

Библиографический список

1. Якубов В.П., Склярчик К.Г., Пинчук Р.В., Суханов Д.Я., Булавинов А.Н., Бевецкий А.Д. Радиоволновая томография скрытых объектов для систем безопасности // Известия высших учебных заведений. Физика. 2008, № 10. - С. 63-79.
2. Якубов В.П., Шипилов С.Э., Суханов Д.Я., Клоков А.В. Радиоволновая томография: достижения и перспективы. – Томск: Изд-во НТЛ, 2014. – 280 с.
3. Федянин И.С., Кузьменко И.Ю., Шипилов С.Э., Якубов В.П. Радиовидение с использованием решетки микроволновых доплеровских датчиков // Известия высших учебных заведений. Физика. 2012. Т. 55. № 9-2. С. 270-271.
4. Шипилов С.Э. Метод синтезирования апертуры в 3D радиотомографии // Известия высших учебных заведений. Физика. – 2013. - Т.57. - № 9. – С.70-76.
5. Сатаров Р.Н., Кузьменко И.Ю., Муксунов Т.Р., Клоков А.В., Балзовский Е.В., Буянов Ю.И., Шипилов С.Э., Якубов В.П. Коммутируемая сверхширокополосная антенная решетка для радиотомографии // Известия высших учебных заведений. Физика. 2012. Т. 55. № 8. С. 26-30.