

**РАЗРАБОТКА АЛГОРИТМА ДЛЯ ОБРАБОТКИ РЕЗУЛЬТАТОВ  
ГЕОРАДИОЛОКАЦИИ С ЦЕЛЬЮ ОБНАРУЖЕНИЯ ОБЪЕКТОВ ПОД ЗЕМЛЕЙ**  
**Алыков А.Н. Email: Alykov630@scientifictext.ru**

*Алыков Алексей Николаевич – бакалавр,  
кафедра специальной робототехники и мехатроники,  
Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана, г. Москва*

**Аннотация:** в статье анализируется проблема автоматической обработки результатов георадиолокационного сканирования. Рассматриваются основные трудности при обработке, варианты решения проблемы и выборка наиболее подходящих методов в результате экспериментов. Учитывая уровень работ в мире и основные требования к конечному продукту, предлагается разработать алгоритм, который автоматически обрабатывает радарограмму с целью обнаружения объектов под землей. Для решения проблемы используются простые и достаточно известные методы обработки изображений.

**Ключевые слова:** георадиолокация, обработка радарограмм, неразрушающий контроль.

**DEVELOPMENT OF THE ALGORITHM FOR DETECTING OBJECTS UNDER  
THE GROUND BY GPR DATA PROCESSING**

**Alykov A.N.**

*Alykov Aleksey Nikolayevich – Bachelor,  
DEPARTMENT OF SPECIAL ROBOTICS AND MECHATRONICS,  
BAUMAN MOSCOW STATE TECHNICAL UNIVERSITY, MOSCOW*

**Abstract:** the article analyzes signal processing and techniques for Ground-Penetrating Radar. Main problems that arise during processing were established. Existing developments and methods for solving problems were considered. The investigation of developments trends showed necessary requirements for the final product. It's proposed to develop an algorithm for automatic detecting objects under the ground by GPR data processing. It's planned to use image processing methods, that are easily implemented in any software package.

**Keywords:** GPR-method, processing GPR data, non-destructive control.

УДК 550.83

Применение систем георадиолокации в настоящее время приобретает все более широкие масштабы. Естественно это обусловлено неоспоримыми преимуществами данного метода. Но одновременно с ними существует целый ряд трудностей, связанных с обработкой и интерпретацией данных. И одной из основных проблем является необходимость обработки больших массивов данных. Так же в большинстве случаев определение электрофизических границ требует участия оператора, или применение сверхсложных самообучающихся алгоритмов. Более того, эта задача усложняется наличием помех различного рода и сложной формой полезного сигнала [2].

В данной статье рассматривается алгоритм, позволяющий автономно и быстро обработать радарограмму с целью обнаружения объектов под землей. Данная проблема является актуальной, так как существующие аналоги либо узко специализированы, либо позволяют провести только предварительную обработку. Алгоритм одинаково хорошо обрабатывает как простые, так и достаточно сложные, сильно зашумленные данные, полученные с георадара. Кроме этого, отсутствует необходимость оператором вводить какие-либо параметры, зависящие от вида исследуемой области. В ходе разработки была проведена выборка существующих видов обработки информации, с последующей реализацией при помощи функций пакета MATLAB Image Processing Toolbox.

Радарограмма состоит из набора вертикально состыкованных трасс, зарегистрированных приемной антенной в каждой точке сканирования (по горизонтальной оси радарограммы расположена ось сканирования, а по вертикальной – время приема отраженного сигнала). В результате на вход алгоритма радарограмма поступает в виде изображения, представленном на рис. 1.

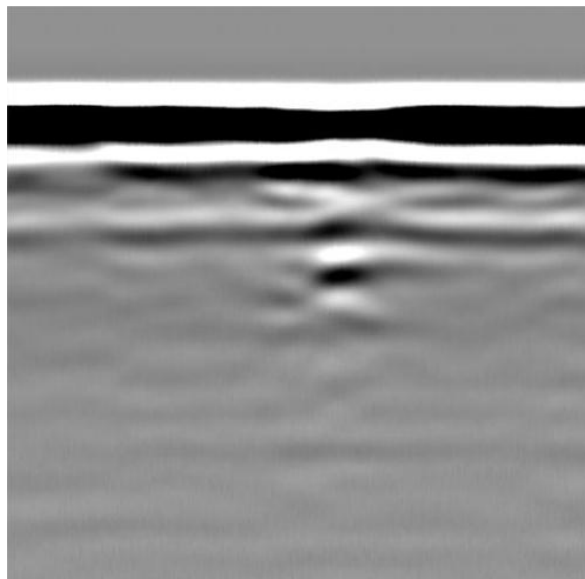


Рис. 1. Входные данные для алгоритма

Следующим этапом необходимо избавиться от высокочастотных помех, которыми заполнена вся область радарограммы. Частота помех значительно превышает максимальную частоту спектра полезного сигнала. В ходе исследования было доказано, что наиболее эффективным средством удаления помех является фильтр верхних частот, который пропускает колебания с частотой, не превышающей границу пропускания, и подавляет все шумы с частотой выше границы пропускания. В эксперименте были проанализированы результаты применения различных методов обработки на множестве радарограмм. Например, еще одним способом избавления от помех является сглаживание, но сглаживание не позволяет добиться приемлемых результатов. Так как данное преобразование хорошо удаляет точечные шумы, которые не мешают обработке радарограмм на данном этапе. Либо получается сильно размытое изображение, что значительно ухудшает качество данных, и, следовательно, качество интерпретации радарограмм.

Результат частотной фильтрации получается достаточно темным, и не представляется возможным дальнейшая обработка подобной радарограммы. Для решения данной задачи можно использовать средства усиления контраста изображения. Так как в нашем случае основная часть гистограммы сконцентрирована около нулевых уровней яркости, данная проблема решается выравниванием гистограммы. Гистограмма изображения – дискретная функция, описываемая уравнением

$$f(x) = \frac{n_i}{n}, \quad (1)$$

где  $n_i$  – число пикселей с яркостью  $i$ ,  $n$  – общее количество пикселей. Для наиболее удобного восприятия и дальнейшей обработки изображения гистограмму равномерно растягивают по всему диапазону яркости. И значение каждого пикселя будет определяться формулой

$$s(x) = 255 \sum_{i=0}^k \frac{n_i}{n} \quad (2)$$

Данный метод позволяет увеличить контрастность изображения при помощи растяжения диапазона яркости.

Следующим этапом необходимо избавиться от шумов и случайных помех. Для этого можно применять различные методы фильтрации, например, алгоритм адаптивной винеровской фильтрации позволяет избавиться от аддитивного гауссова белого шума [3]. В методе преобразования частот используется специальная матрица трансформации – матрица Мак-Клеллана. Медианная фильтрация применяется для удаления сигнала шумов, случайных выбросов короткой продолжительности. Фильтрация заключается в присвоении значению каждой точки среднего значения всех точек, попавших в некоторую двумерную область с центром в исходной точке. В результате данной процедуры происходит сглаживание границ полезного сигнала и удаление импульсных помех, что необходимо для дальнейшей обработки.

На следующем этапе необходимо избавиться от толщины линий, которая не представляет особого интереса для обнаружения объектов. Для этого можно применить метод выделения границ. Так как данные методы достаточно чувствительны к шумам, представляющим собой резкий перепад интенсивности (на чем и основаны методы выделения контуров), предварительно были проведены шумоподавляющие процедуры. В технической литературе описано большое количество алгоритмов выделения контуров и границ. В данной работе было рассмотрено применение и результаты наиболее популярных методов (оператор Превитта, Робертса, Собеля, Кирша, Робинсона, алгоритм Канни и Log-

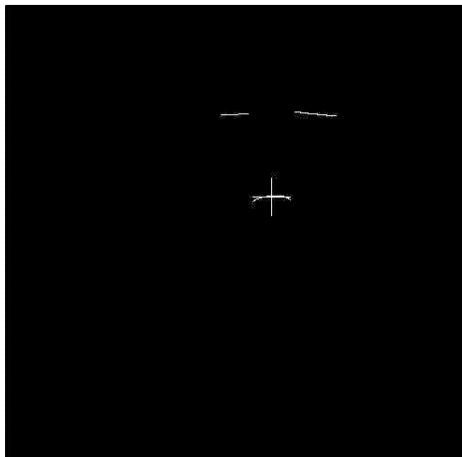
алгоритм). [4] Исходя из полученных результатов, были выбраны два наиболее подходящих метода, которые будут использоваться в дальнейшем. Учитывая теорию распространения радиоволн, больший интерес представляют именно верхние границы участков и объектов, так как нижние границы выражены неявно, искажены повторно отраженными сигналами. Обработка методом Превитта дает необходимый результат.

Метод Канни необходим для определения некоторой ширины области интереса. К исходному изображению применяем метод Канни. В результате получаем выделенные контуры всех объектов. Можно заметить, что область, где предположительно располагается объект, отличается большим количеством выделенных контуров. Просуммируем значения по каждому столбцу, область интереса явно отличается большей рассчитанной суммой. Считаем максимальное количество идущих подряд столбцов, сумма которых превышает среднее значение по всему изображению. Полученное число будем называть шириной области интереса.

Изображение, полученное после применения метода Превитта необходимо преобразовать таким образом, чтобы избавиться от разрывов на границах сред, случайных выбросов. Исследовав результаты применения различных комбинаций морфологических операций, было определено, что наилучшими методами обработки для получения сплошной линии одинаковой толщины, определяющей границы слоев и объекта, являются последовательно примененные операции соединения пикселей объекта, закрытия и построения остова объекта. В итоге получаем обработанное изображение, близкое к идеальному, на котором уже достаточно хорошо просматриваются границы слоев земли и искомого объекта.

На следующем этапе необходимо избавиться от горизонтальных линий предварительно запомнив их расположение. Так как в данном случае горизонтальные линии представляют слои земли с разной диэлектрической проницаемостью и мешают дальнейшей обработке радарограммы. Было определено, что существующие методы (вычитание скользящего среднего, полосовая фильтрация последовательное выделение и удаление горизонтальных линий) не позволяют достичь необходимых результатов, так как, либо оставляют часть границ, либо значительно искажают полезный сигнал. Поэтому применяется достаточно простая операция: удаляем все горизонтальные линии, превышающие по длине ширину области интереса.

Как говорилось ранее, отражения волн от объектов под землей представлены в виде повернутых гипербол. И максимальная точка соответствует центру искомого объекта. Поэтому единственное, что осталось сделать – это определить координаты максимумов на изображении, полученном на предыдущем этапе. Для этого воспользуемся величиной ширины области интереса. Поиск максимумов заключается в последовательном исследовании каждого объекта, представленного на результирующем изображении. Если объект содержит точку, удовлетворяющую условиям локального максимума, то она отмечается крестом. При этом необходимо заметить, что наложенные друг на друга гиперболы (чем характеризуются следы от объектов), необходимо отмечать только одним крестиком, соответствующим центру искомого объекта. Результат окончательной обработки представлен на рис. 2.



*Рис. 2. Окончательный результат*

Таким образом, проанализировав результаты применения различных методов обработки изображений, были определены наиболее подходящие процедуры, и составлен алгоритм, позволяющий определить наличие объекта и его местоположение под землей. В данный алгоритм загружается радарограмма, проводится последовательность операций, и на выходе получаем изображение с отмеченным положением объекта под землей. Данный алгоритм был реализован в пакете Matlab и протестирован на массиве данных из 17 радарограмм. Среднее время обработки составило порядка 7.2 мс

на одну трассу. Верно определены 26 объектов из 30 (ошибки первого рода  $\approx 13\%$ ). Ложно определены 4 объекта (ошибки второго рода  $\approx 13\%$ ).

*Список литературы / References*

1. *Финкельштейн М.И.* Подповерхностная радиолокация // Радио и связь, 1994. С. 200-216.
2. *Глазунов В.В.* Георадиолокационные исследования верхней части геологического разреза и инженерных сооружений // Записки Горного института, 2009. С. 231-234.
3. *David J. Daniels.* Ground Penetrating Radar // The Institution of Electrical Engineers, London, UK, 2004. С. 247-349.
4. *Muthukrishnan R.* Edge detection techniques for image segmentation // International Journal of Computer Science & Information Technology, 2011. С. 259-267.