

## ЦИФРОВАЯ ОБРАБОТКА СИГНАЛОВ И ИЗОБРАЖЕНИЙ В ИМПУЛЬСНОМ РАДИОЛОКАТОРЕ ПОДПОВЕРХНОСТНОГО ЗОНДИРОВАНИЯ

Линников О.Н., Сосулин Ю.Г., Толмазов Б.Б., Трусов В.Н., Юфряков Б.А.

ЗАО "НТЦСМ", 119619 г.Москва, Производственная ул., д. 6  
МАИ (ГТУ) 125871 г.Москва, Волоколамское ш.4  
[ntcsm@b-52.ru](mailto:ntcsm@b-52.ru), [sosulin@mail.ru](mailto:sosulin@mail.ru), [tolmazov@telecom-astra.ru](mailto:tolmazov@telecom-astra.ru)

Радиолокаторы подповерхностного зондирования (РЛПЗ) используются при решении многих практических задач [1, 2], причем область их применения постоянно расширяется [3, 4]. В настоящее время наибольшее распространение получили импульсные РЛПЗ. Одна из последних успешных разработок в этом направлении – радар субнаносекундного диапазона "Дефектоскоп" [5, 6].

Доклад посвящен вопросам цифровой обработки сигналов и изображений в импульсных РЛПЗ. Рассмотрены основные этапы и процедуры обработки, причем главное внимание уделено особенностям проектирования и экспериментальной оценке эффективности этих процедур. Анализ исследуемых процедур осуществлялся путем обработки данных, полученных с выхода АЦП радара "Дефектоскоп" при зондировании различных сред (песок, бетон, кирпич). Рассматриваются результаты экспериментальных исследований для трех типов объектов: металлический штырь, полая пластмассовая труба, металлическая пластина.

**Сбор и трехмерное представление** радиолокационных данных подповерхностного зондирования являются подготовительным этапом обработки. Использование трехмерного представления (рис.1) позволяет формировать пространство всех принимаемых сигналов и отображать исходные данные и результаты их обработки в виде отдельных временных сигналов и их совокупностей (изображений) с "привязкой" к системе координат.

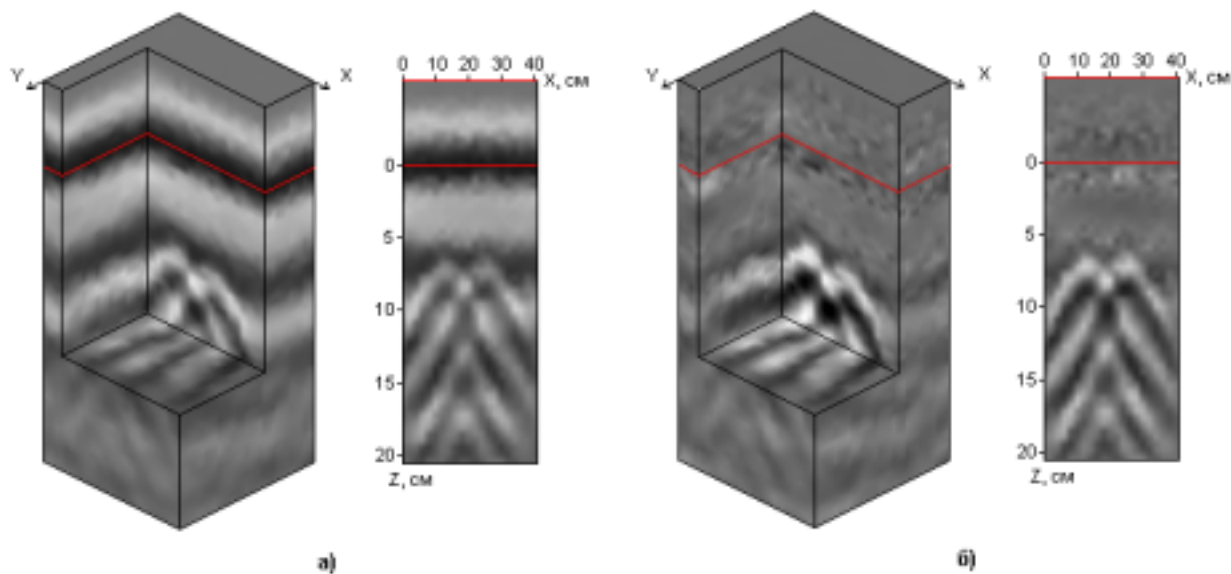


Рис.1.

**Предварительная обработка** включает в себя определение скорости распространения сигнала в среде и выбор начального уровня, от которого ведется отсчет времени задержки отраженного сигнала (отсчет глубины). Чаще всего начальный уровень определяется по сигналу прямого прохождения (рис.1а). Скорость распространения сигнала можно рассчитывать разными методами, в частности, по радиолокационному профилю цели, который для малоразмерных объектов представляет собой гиперболу. После определения скорости сигнала и начального уровня обычно проводится операция вычитания среднего (рис 1б), позволяющая устранить отраженный от поверхности сигнал, а также сигнал прямого прохождения.

**Синтезирование апертуры** используется для повышения разрешающей способности в горизонтальном направлении. Алгоритм сводится к суммированию данных по радиолокационному профилю цели. Рассмотрены следующие вопросы: влияние разнеса приемной и передающей антенн на вид радиолокационного профиля и точность определения глубины; выбор ширины окна в зависимости от глубины залегания объекта; зависимость качества работы алгоритма синтезирования апертуры от точности определения скорости распространения зондирующего сигнала в среде; влияние пространственной ориентации протяженных целей на форму их радиолокационного профиля

и качество обработки методом синтеза апертур. Рис.2 иллюстрирует результаты синтеза апертур в случае наблюдения двух металлических штырей. Как видим, разрешающая способность значительно возросла. Кроме того, устранена ложная метка, возникающая на пересечении радиолокационных профилей исследуемых объектов.

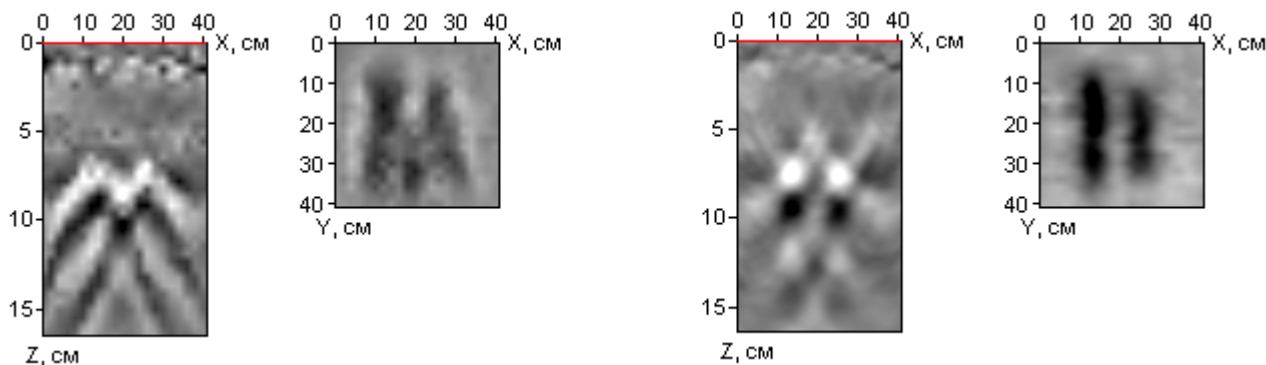


Рис.2.

**Инверсная фильтрация** – один из возможных методов повышения разрешающей способности по глубине. Параметры инверсного фильтра рассчитываются по опорному сигналу, отраженному от выбранного объекта. Исследовано влияние выбора опорного сигнала и параметров фильтра на качество его работы.

**Адаптивная пороговая обработка** используется для устранения ложных отметок и улучшения наблюдаемости изображенных объектов. Исследованы однопороговые и двухпороговые процедуры. Адаптивная двухпороговая обработка не только учитывает затухание в среде, как и однопороговая обработка, но и сохраняет знак сигнала, а также дополнительно подчеркивает наиболее сильные отражения. Результаты такой обработки при разных значениях порогов представлены на рис.3.

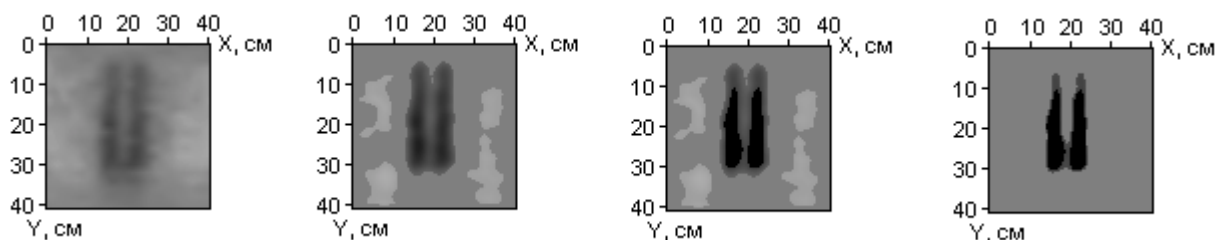


Рис.3.

**Поэлементная обработка и масочная фильтрация изображений** позволяют улучшить их субъективное восприятие оператором при сохранении информативной ценности исходных данных. Рассмотрено несколько видов поэлементной обработки и масочных фильтров (фильтры сглаживания, резкости, медианный). Проведено сравнение двух- и трехмерных фильтров. Рис.4а иллюстрирует результат применения медианного фильтра для устранения импульсной помехи, а рис.4б – фильтра сглаживания, уменьшающего изрезанность изображения.

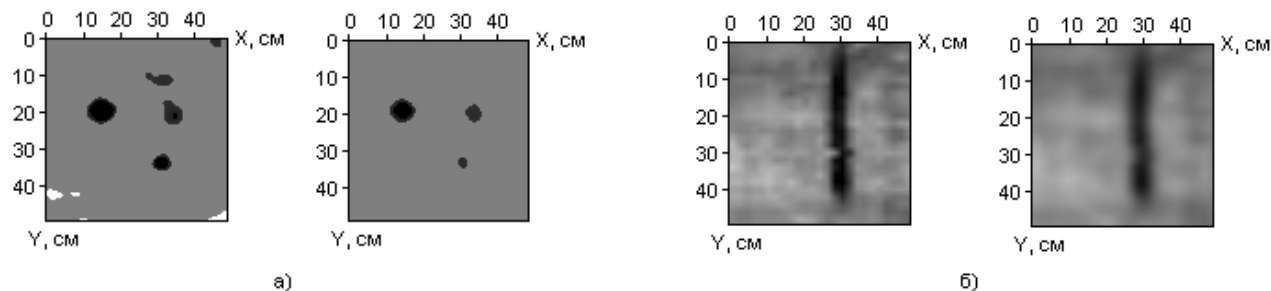


Рис.4.

**Поляризационная селекция** отраженных сигналов, учитывающая поляризационные характеристики подповерхностных объектов, позволяет существенно улучшить их наблюдаемость, в том числе в условиях, когда один объект заслоняет другой, и обеспечить возможность распознавания объектов.

На рис.5 приведены радиолокационные изображения пластмассовой полый трубы и металлического штыря при ортогональных плоскостях поляризации зондирующего сигнала. Расположение объектов показано на рис.5а, радиолокационное изображение для Х-поляризации – на рис.5б, для Y-поляризации – на рис.5в. Эксперименты показали, что учет поляризационных признаков позволяет распознавать рассматриваемые объекты (труба, штырь, металлическая пластина) независимо от их ориентации.

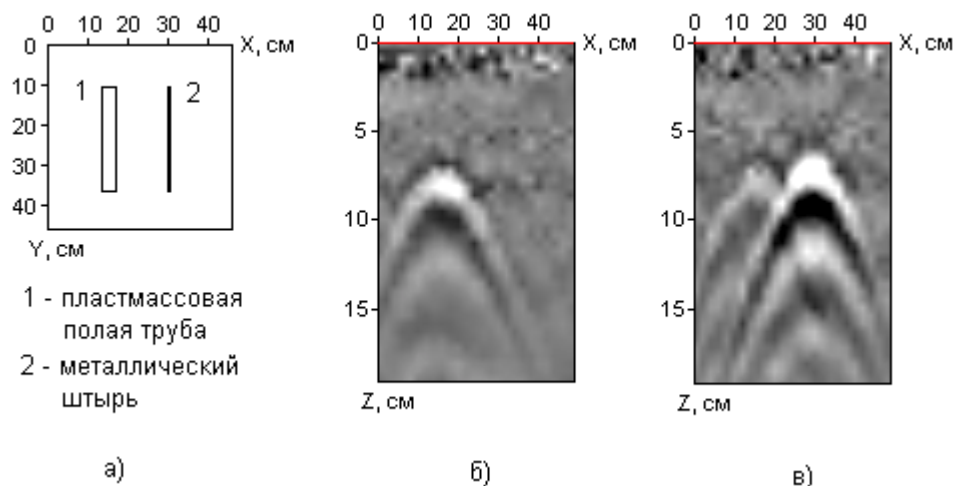


Рис. 5.

Кроме вышеупомянутых, существуют и другие методы обработки сигналов, которые можно применять в импульсных РЛПЗ [1-4]. На практике целесообразно использовать, очевидно, не все возможные методы и алгоритмы обработки, а лишь те, которые приводят к существенному улучшению качества радиолокационных изображений в конкретной ситуации. Неправильный выбор алгоритма или его параметров может привести даже к ухудшению исходного изображения. Рис 6, 7 иллюстрируют применение некоторых методов в случае, когда небольшой металлический объект (монета) расположен немного глубже металлического штыря. Монета скрыта сильными отражениями от штыря для Y-поляризации (рис.6), однако хорошо видна для X-поляризации, когда отражения от штыря отсутствуют (рис.7).

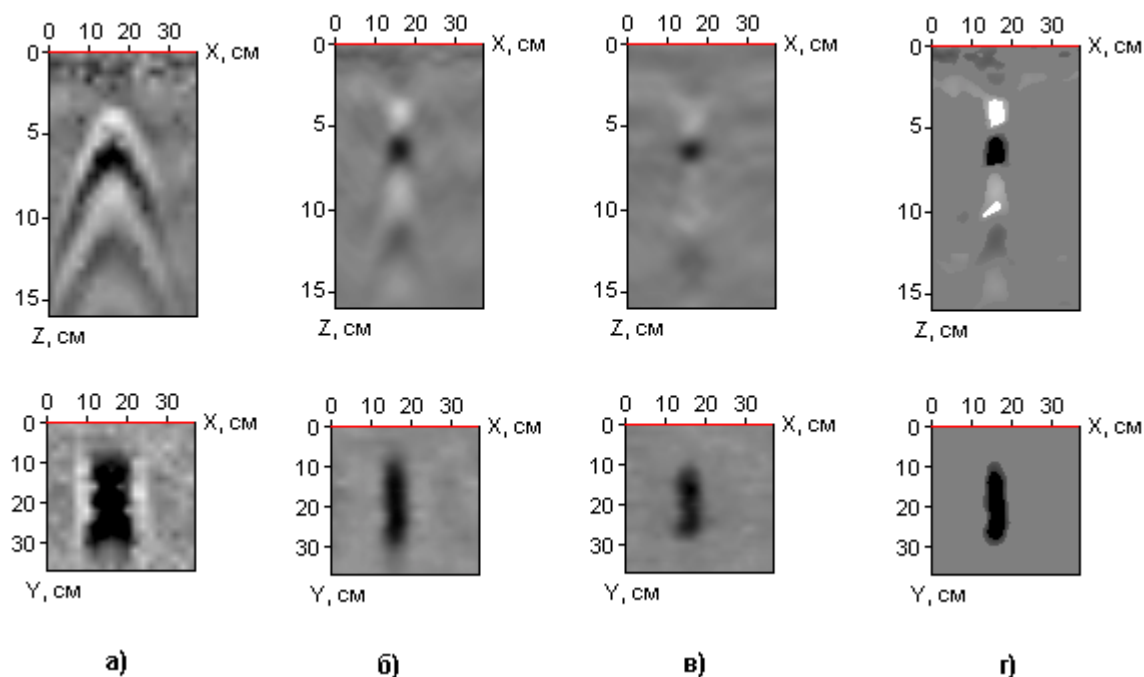


Рис. 6.

Последовательным применением процедур для каждой поляризации добиваемся улучшения качества радиолокационных изображений. На рис.6а и 7а показаны изображения штыря и монеты после предварительной обработки, на рис.6б и 7б – после синтеза апертуры. Выбирая опорный сигнал для X- и Y-поляризации, с помощью инверсного фильтра дополнительно сжимаем отраженный импульс (рис.6в и 7в). На последнем этапе проводится адаптивная пороговая обработка (рис. 6г и 7г).

Последовательным применением процедур для каждой поляризации добиваемся улучшения качества радиолокационных изображений. На рис.6а и 7а показаны изображения штыря и монеты после предварительной обработки, на рис.6б и 7б – после синтеза апертуры. Выбирая опорный сигнал для X- и Y-поляризации, с помощью инверсного фильтра дополнительно сжимаем отраженный импульс (рис.6в и 7в). На последнем этапе проводится адаптивная пороговая обработка (рис. 6г и 7г).

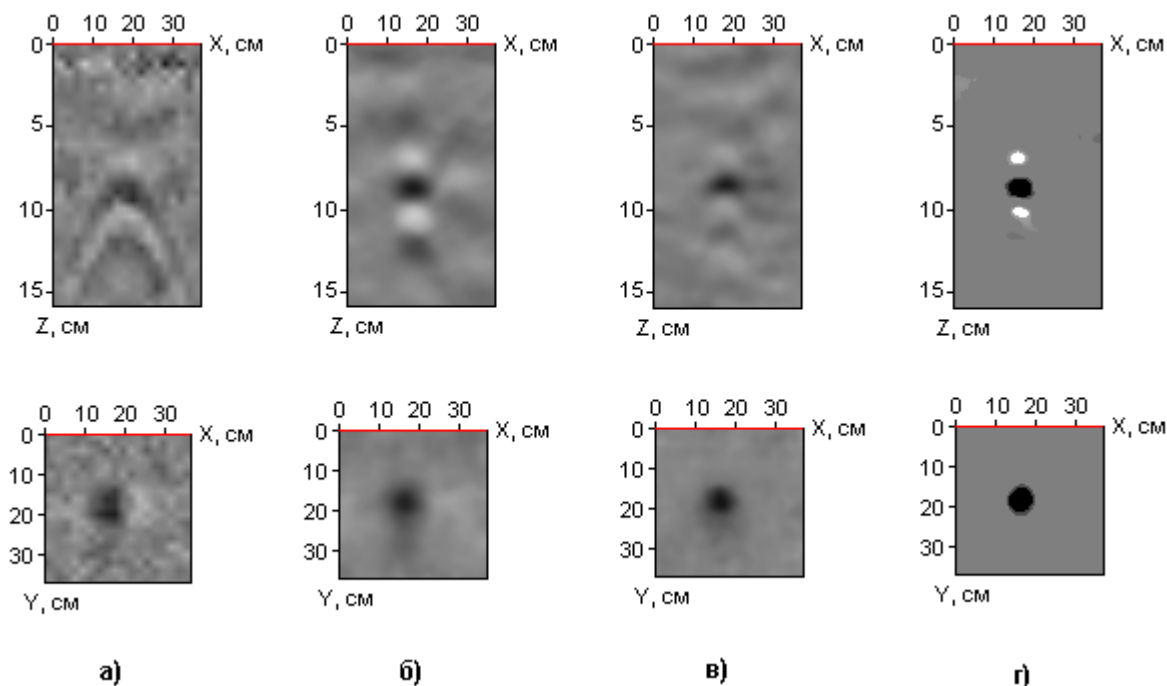


Рис.7.

**Динамическая пространственная визуализация** с использованием, в частности, графической оболочки AutoCAD и пороговая обработка позволяют наглядно отображать интересующие подповерхностные объекты при различных ракурсах наблюдения. На рис.8 приведен пример отображения результатов зондирования бетонной стены со стальной арматурой и локальными неоднородностями в виде двух пространственных изображений, наблюдаемых под разными углами.

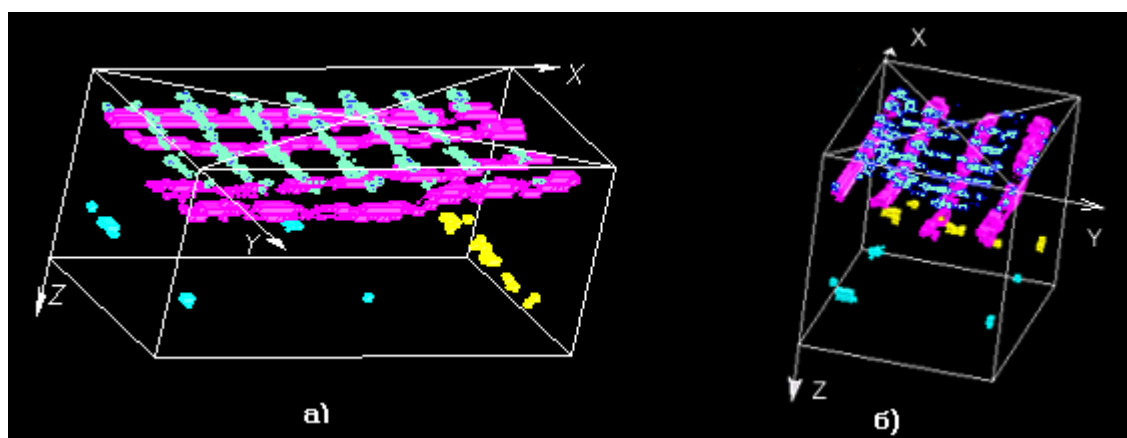


Рис.8.

### Литература

1. Финкельштейн М.И. Подповерхностная радиолокация. – М. Радио и связь, 1994.
2. Daniels D.J. Surface-Penetrating Radar. – IEE radar, sonar, navigation and avionics, series 6, London, UK, 1996.
3. Proc. Of 8<sup>th</sup> Intern. Conf. of Ground-Penetrating Radar, Gold Coast, Australia, May 23-26, 2000.
4. Proc. Of 9<sup>th</sup> Intern. Conf. of Ground-Penetrating Radar, Santa Barbara, California, USA, April 29 – Mai 2, 2002.
5. Andryukhin A.N., Linnikov O.N., Trusov V.N., Surikov B.S., Sosulin Yu.G., Tolmazov B.B.. 3-D surface-penetrating radar "Defectoscope" – 2001 CIE Intern. Conf. on Radar Proceedings, October 15-18 2001 Beijing, China
6. Линников О.Н., Сосулин Ю.Г., Андрюхин А.Н., Трусов В.Н., Суриков Б.С., Толмазов Б.Б. Радиолокатор подповерхностного зондирования "Дефектоскоп". – Радиотехника, 2002, №7.



## DIGITAL PROCESSING OF SIGNALS AND IMAGES IN PULSE SURFACE-PENETRATING RADAR

Linnikov O., Sosulin Yu., Tolmazov B., Trusov V., Yufryakov B.

Scientific and Technical Centre of System Modelling  
Proizvodstvennaya uliza 6, 119619 Moscow, Russia  
Moscow State Aviation Institute Volokolamskoe shosse 4, 125871 Moscow, Russia  
[ntcsm@b-52.ru](mailto:ntcsm@b-52.ru), [sosulin@mail.ru](mailto:sosulin@mail.ru), [tolmazov@telecom-astra.ru](mailto:tolmazov@telecom-astra.ru)

Surface-penetrating radars (SPRs) are used for solution of many problems in practice, moreover, an area of its application is constantly extending. At present, pulse SPRs have maximum spreading. One of the latest successful products in given direction is the radar of subnanosecond range «Defectscope».

The paper is devoted to the questions of digital processing of signals and images in pulse SPRs. The main stages and procedures of processing are considered, primary attention is given to peculiarities of design and to experimental estimate of efficiency of the procedures. An analysis of investigated procedures was realized by processing the data received by means of «Defectscope» radar after probing various media (sand, concrete, brickwork). The results of experimental research for three types of objects, such as metal wire, hollow plastic pipe and metal plate, are considered.

**Collection and 3D representation** of surface-penetrating radar data are preparatory stage of processing. Use of three-dimensional representation allows to form a space of all received signals and to display initial data and results of its processing as separate time signals and their combinations (images) attached to coordinate system. **Preliminary processing** includes determination of velocity of signal propagation in medium and selection of initial level from which we count out time delay of reflected signal (depth count). After this usually an operation of subtraction of the mean value is executed that allows to remove signal reflected from surface and also signal of direct passage. **Aperture synthesis** is used to improve resolution in horizontal direction. We consider the next questions: an influence of distance between receiving and transmitting antennas on type of radar profile and on accuracy of depth determination; a selection of window width in dependence on depth of object bed; dependence of aperture synthesis algorithm performance quality on accuracy of determination of signal propagation velocity in the medium; an influence of space orientation of extended targets on form of their radar profile and quality of processing by means of synthetic aperture. **Inverse filtering** is one of the possible methods for increase of resolution on depth. Parameters of inverse filter are evaluated on base of reference signal reflected from the chosen object. An influence of selection of reference signal and filter parameters on quality of filter functionality is investigated. **Adaptive threshold processing** is used to remove false reflections and to improve supervision of displayed objects. One-threshold and two-threshold procedures are investigated. Adaptive two-threshold processing not only takes into account fading in the medium, as one-threshold processing, but also maintains sign of signal, and in addition it also emphasizes the strongest reflections. **Elementwise processing and mask filtering** of images allow improving their subjective perception by operator while maintaining information value of initial data. Several types of each element processing and mask filters (smoothing, sharpness and median filters) are considered. A comparison of two- and three-dimensional filters is executed. **Polarization selection** of reflected signals that takes into account polarization properties of subsurface objects allows to increase essentially their supervision, including situations when one object hides another, and to provide the possibility of object recognition. **Dynamic space visualization** with the use, in particular, of AutoCAD graphic interface allows to represent visually subsurface for various views of observation.

Besides the above-mentioned, there are other methods of signal processing that can be used in pulse SPRs. Obviously, in practice it is expedient to use not all possible methods and algorithms of processing, but only those that give essential improvement of radar image quality in real situation. Wrong choice of the algorithm or its parameters can even result to aggravation of initial image. An example of sequential application of a number of procedures for improvement of radar image quality is considered.