

АЛГОРИТМЫ ОБРАБОТКИ СИГНАЛОВ ПРИ ИДЕНТИФИКАЦИИ ПОДПОВЕРХНОСТНЫХ ОБЪЕКТОВ

АЛГОРИТМИ ОБРОБКИ СИГНАЛІВ ПРИ ІДЕНТИФІКАЦІЇ ПІДПОВЕРХНЕВИХ ОБ'ЄКТІВ

О.В. Сытник¹, А.В. Гороховатский²

О.В. Ситнік¹, О.В. Гороховатський²

¹ *Институт радиофизики и электроники им. А.Я. Усикова НАН Украины,
12, ул. Ак. Проскуры, Харьков, 61085, Украина
E-mail: ssvp11@ire.kharkov.ua*

² *Харьковский национальный университет радиоэлектроники,
14, Просп. Ленина, Харьков, 61058, Украина
E-mail: gorohovatsky@rambler.ru*

Рассматриваются алгоритмы предварительной обработки сигналов локатора подповерхностного зондирования и методика идентификации наблюдаемых объектов. Предварительная обработка состоит в фильтрации, удалении нежелательных нестационарных трендов, сегментации и поиске связанных областей. В основу методики идентификации положен аппарат преобразования класса Nough. Основой такого подхода служит возможность представления отраженного электромагнитного сигнала от физического объекта в виде аналитической модели в пространстве спектров параметров. Предварительная обработка данных осуществляется в интерактивном режиме, обеспечивая минимальное отношение сигнал/шум при представлении объектов в пространстве характеристических функций. Предложена процедура анализа радиолокационных изображений на связность его элементов. Обсуждаются соображения по выбору порогов в пространстве спектров параметров и в пространстве сигналов. Разработан алгоритм свертки изображений с целью повышения контрастно-фоновой чувствительности. Ил.10. Библиогр.:12 назв.

Розглядаються алгоритми попередньої обробки сигналів локатора підповерхневого зондування і методика ідентифікації об'єктів, що спостерігаються. Попередня обробка складається з фільтрації, видаленні небажаних нестационарних трендів, сегментації і пошуку зв'язних областей. В основу методики ідентифікації покладений апарат перетворення класу Nough. Основою такого підходу служить можливість представлення відбитого електромагнітного сигналу від фізичного об'єкта у вигляді аналітичної моделі в просторі спектрів параметрів. Попередня обробка даних здійснюється в інтерактивному режимі, що забезпечує мінімальне відношення сигнал/шум при представленні об'єктів у просторі характеристичних функцій. Запропоновано процедуру аналізу радіолокаційних зображень на зв'язність його елементів. Обговорюється вибір порогів у просторі спектрів параметрів і в просторі сигналів. Розроблено алгоритм згортки зображень з метою підвищення контрастно-фонові чутливості.

Введение

Среди разнообразных технических средств интроскопии земных недр можно выделить особый класс устройств – видеоимпульсные радиолокационные станции (РЛС) или георадары [1 - 5]. Основное назначение таких РЛС состоит, в частности, в обнаружении подземных коммуникаций (как металлических труб, так и пластиковых и керамических труб) при проведении земляных работ, обнаружении пустот в грунте и дефектов дорожного покрытия. Эти приборы незаменимы в строительстве, археологии, при работах в шахтах, в криминалистике (при обнаружении несанкционированных захоронений), в ледовой разведке и ряде других научных и хозяйственных приложений.

Как правило, подобные устройства работают с видеоимпульсными сигналами длительностью порядка единиц наносекунд. Такие сигналы относятся к классу широкополосных, занимая полосу частот от единиц мегагерц до единиц гигагерц. Это необходимо для получения требуемого разрешения по глубине зондирования. Если для обычного радиолокатора основным фактором, определяющим ослабление сигнала и, таким образом, дальность обнаружения объекта, является сферическая расходимость электромагнитных волн, то в случае подповерхностной радиолокации дальность (глубина) обнаружения определяется в большей степени затуханием и дисперсией сигнала в среде, поскольку большинство грунтов и геологических пород обладают сильной дисперсией и коэффициентом поглощения, быстро растущим с увеличением частоты сигнала.

Из выходного сигнала подповерхностной РЛС формируется георадиолокационный профиль в виде изображения, интерпретация которого осуществляется, как правило, обученным специалистом. Отклики от объектов носят сложный характер, маскируются шумами и рассеянным сигналом от толщи грунта. Контрасно-фоновая чувствительность РЛС в значительной мере зависит от глубины залегания искомых объектов и не может быть улучшена путем простого повышения мощности излучаемого сигнала.

Целью настоящей работы является разработка интерактивных методов обработки сигналов видеоимпульсного георадара для повышения эффективности

использования этого класса приборов при решении радиофизических и геофизических задач.

Алгоритмы предварительной обработки данных

Исходный сигнал видеоимпульсного георадара необходимо вначале подготовить к обработке. Это связано с тем обстоятельством, что в силу ряда причин в выходных данных содержится нежелательный, как правило, медленноменяющийся, тренд. Кроме того, области содержащие потенциальные цели, необходимо выделить путем определения связности точек изображения и проверке на соответствие определенной модели. Совокупность процедур и алгоритмов, предназначенных для подготовки данных для тематической обработки, будем называть предварительной обработкой. Рассмотрим два основных класса алгоритмов: алгоритмы автоматического удаления тренда и алгоритмы определения областей связности.

Удаление тренда. Одним из наиболее распространенных методов предварительной обработки данных видеоимпульсных локаторов является вычисление оценки среднего значения сигнала вдоль направления движения антенны радара и поэлементное вычитание этой оценки из данных в соответствующем временном стробе. Обычно эту операцию объединяют с вычислениями корреляционной функции и плотности спектра мощности. Само вычисление оценки среднего осуществляется достаточно просто [6]:

$$m_i = \frac{1}{N} \sum_{j=0}^{N-1} x_i^j, \quad (1)$$

где $i = 0, \dots, M - 1$ номер строба дальности, M - число элементарных стробов по развертке; $j = 0, \dots, N - 1$ номер элемента радиолокационного изображения вдоль маршрута движения локатора, N - число пикселей изображения вдоль поверхности земли.

Пример радиолокационного изображения, формируемого георадаром, без вычитания среднего значения показан на рис. 1.

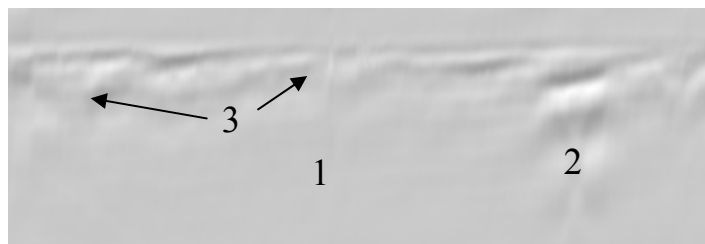


Рис. 1. Радиолокационное изображение без удаления тренда

Длительность развертки по глубине (направление сверху – вниз) равно 50 нс, расстояние по поверхности земли – 30 м, длительность зондирующего импульса по уровню половинной мощности – 2 нс, число стробов по глубине – 256, размер элемента разрешения по глубине при условии, что среда имеет диэлектрическую проницаемость $\varepsilon \approx 9...10$ составляет 0,1 м. Исследуя это изображение можно сделать вывод, что в области отмеченной цифрой 1 отсутствуют неоднородности грунта и точечные цели. Объект 2, как было известно априори, представляет собой группу отражателей, образованных бетонно-кирпичным коробом теплотрассы. Слабоконтрастные объекты 3 представляют собой отклики точечных целей на зондирующий сигнал георадара. На рис.2. представлена информационная компонента сигнала. В течении первых 20 нс развертки наблюдается аномальная флуктуация сигнала, обусловленная не полностью компенсированным трендом.

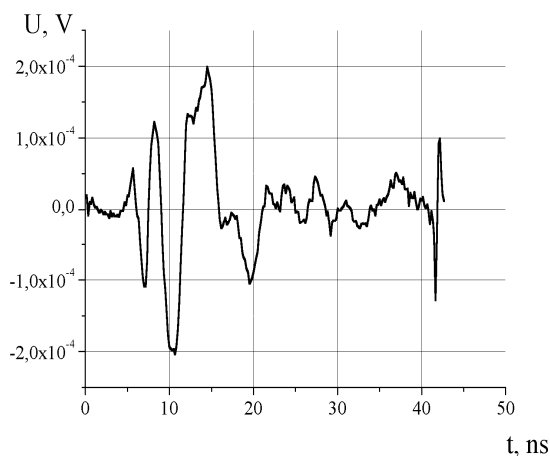


Рис.2. Сигнал без среднего

Выброс сигнала на 42 нс развертки вызван аппаратурной помехой.

Один из наиболее простых способов удаления медленноменяющегося, по сравнению с полезными данными, тренда состоит в применении высокочастотной фильтрации [2]. Однако, этот способ требует достаточно точного согласования частотной характеристики фильтра с характеристикой сигналов, образующих отклики от целей. В противном случае часть объектов будет утеряна.

В математической статистике при обработке и анализе временных рядов широкое распространение получили методы на основе скользящего среднего [7]. Поскольку любая гладкая функция при самых общих допущениях может быть локально представлена полиномом с довольно высокой степенью точности, то к группе из $2m + 1$ элементов, взятых по столбцу подбирают полином и используют его для определения значения тренда в средней $m + 1$ точке группы.

Подбор полинома осуществляется следующим образом. Выбирается окно (интервал) длительностью τ , в котором содержится $2m + 1$ элементов. Многочлен порядка K определяется в общем виде как следующая сумма:

$$\mathbf{x}(t) = \sum_{k=0}^K (t\tau)^k \cdot c_k, \quad (2)$$

где c_k - коэффициенты аппроксимирующего полинома.

Ошибка полиномиальной аппроксимации тренда, выраженная как функция от коэффициентов полинома, описывается суммой

$$\varepsilon(\{c\}) = \sum_{t=0}^{2m+1} \left(x(t) - \sum_{k=0}^K (t\tau)^k \cdot c_k \right)^2. \quad (3)$$

Дифференцируя (3) по c_k и приравнявая производные к нулю, получаем систему линейных алгебраических уравнений:

$$\frac{\partial \varepsilon}{\partial c_j} = \sum_{t=0}^{2m+1} 2 \left[x(t) - \sum_{k=0}^K (t\tau)^k \cdot c_k \right] \left[-(t\tau)^j \right] = 0, \quad (4)$$

где $j = 0, \dots, K$.

Решая (4) относительно коэффициентов c_k , находим их оптимальные значения, которые минимизируют (3), в том числе и в точках измерения $x(t)$. Далее первый элемент последовательности выбрасывается, а новый $2m + 2$ -ой элемент добавляется в конец группы. Затем процедура подбора полинома той же степени повторяется для такой обновленной группы данных. Полученный ряд считается оценкой тренда данных и может вычитаться из исходной последовательности. Априорное предположение о «медленности» изменения тренда, как вдоль строки, так и вдоль столбца радиоизображения допускает применение для его аппроксимации относительно коротких полиномов, что допустимо в случае проведения измерений в полевых условиях, при отсутствии помех от местных предметов и работающих посторонних радиосредств. В городских условиях помехи приводят к появлению осциллирующих компонент тренда. Требуемый порядок аппроксимирующего полинома возрастает, что приводит к необходимости выполнения большего объема вычислений, и при размере исходного файла данных в несколько сотен мегабайт приводит к неприемлемо большим временам обработки.

Определение областей связности. Эта процедура необходима для уменьшения влияния фона и помех. Рассмотрим несколько возможных подходов к построению подобных процедур.

1. *Пороговое отсечение яркости* [8]. Наиболее просто пороговая обработка (сегментация) осуществляется, когда известно, что изображение состоит из фона и одного объекта, яркость которого находится в диапазоне $[B_1, B_2]$, где B_1 - нижний уровень яркости, B_2 - верхний уровень яркости. В этом случае каждой точке $A(i, j)$ ($i = 0, \dots, m - 1$; $j = 0, \dots, n - 1$, $m \times n$ - размер анализируемого изображения) поля зрения D ($A(i, j) \in D$) сопоставляется метка 1, если она принадлежит объекту, и метка 0 в противном случае. Если известно, что $B(i, j)$ – яркость одной из точек искомого объекта, значение которой априорно находится в диапазоне

$[B_1, B_2]$, то выделение объекта по яркости проводится в соответствии со следующей процедурой:

$$B'(i, j) = \begin{cases} B(i, j), & \text{при } B_1 \leq B(i, j) \leq B_2, \\ B_F, & \text{при } B(i, j) \notin [B_1, B_2], \end{cases} \quad (5)$$

где $B'(i, j)$ - значение яркости преобразованного изображения, B_F - значение яркости, соответствующее фону. В простейшем варианте функция $B'(i, j)$ принимает значения 0 и 1. Пороги B_1 и B_2 выбираются динамически в диалоговом режиме. Одним из способов выбора порогов может быть, например, анализ гистограммы. Пример гистограммы L распределения уровней яркостей пикселей изображения приведен на рис. 3.

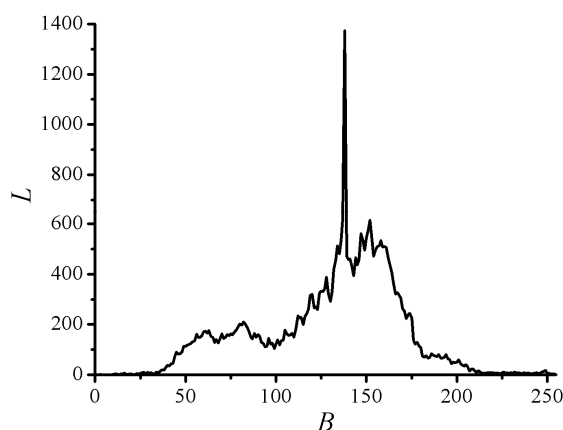


Рис. 3. Гистограмма распределения яркости

На рис. 4 представлен результат гистограммной сегментации исходного изображения (рис. 1), из которого удален тренд, при порогах $B_1 = 129$ и $B_2 = 143$. Уровням, которые находятся вне указанного диапазона $[B_1, B_2]$, присвоено значение 255. Прямоугольником выделен фрагмент изображения, где локализован отклик от цели.

Очевидно, что непосредственный анализ изображения после такой обработки затруднен из-за наличия ряда ложных областей. Тем не менее, метод порогового отсечения может быть взят в качестве базовой обработки.



Рис. 4 Пример сегментации изображения при двухпороговом квантовании

2. *Центроидное связывание.* С целью уменьшения влияния ложных областей можно применить к исходному изображению после пороговой сегментации центроидное связывание [9].

Суть его состоит в автоматической заливке связной (в некотором смысле) области изображения заданным цветом, начиная с указанного в диалоге стартового пикселя, по правилу

$$B(i, j) = b, \text{ если } \left\{ |B(i, j) - B(i^*, j^*)| < B_3, |i - i^*| \leq 1, |j - j^*| \leq 1, B(i^*, j^*) = b \right\}, \quad (6)$$

где b - заданный цвет заливки, B_3 - порог на различие яркости внутри однородной области, (i^*, j^*) - координаты уже закрасленного пикселя. Метод позволяет убрать однородную (ложную) область, включающую указанную в диалоге точку.

3. *Интерактивная гистограммная сегментация* [10]. Этот метод предполагает построение гистограммы распределения яркости некоторой выделенной области и удаление тех пикселей изображения, яркости которых соответствуют пикам гистограммы и предположительно относятся к фону. Оставшаяся часть изображения подвергается бинаризации в соответствии с некоторым порогом. На

рис. 5,а) представлен выбранный фрагмент исходного изображения в диапазоне яркостей 0 – 255. На рис. 5 б) – этот же фрагмент после приведения результирующего изображения к бинарному по порогу 143.



Рис. 5. Результат интерактивной гистограммной обработки

Идентификация объектов

Модель сигнала, формируемого передатчиком, можно представить в виде

$$x(t) = e^{-k t^2}, \quad (7)$$

где k - некоторая константа.

При излучении сигнала антенной происходит его дифференцирование и в пространство излучается электромагнитная волна, амплитуда которой может быть описана как:

$$y(t) = -2kt \cdot e^{-k t^2}. \quad (8)$$

Отраженный от объектов сигнал, задержанный во времени на τ , содержит помеховую компоненту $w(t)$, которая может быть охарактеризована гауссовским шумом с дисперсией σ^2 и нулевым математическим ожиданием

$$s(t) = -2k(t - \tau) \cdot e^{-k(t-\tau)^2} + w(t). \quad (9)$$

Модель (9) позволяет идентифицировать объект по чередующимся уровням яркости сигнала. Другими словами, отклик от объекта на радиолокационном изображении формируется в виде темных и светлых геометрических форм, вложенных друг в друга (см., например, объекты 2, 3 на рис. 1). При перемещении антенны георадара по поверхности земли относительно точечного отражателя такой отклик формируется в виде находящихся рядом светлой и темной гиперболических кривых [1].

Эффективным инструментом идентификации объектов, поддающихся аналитическому описанию, является преобразование Hough [11, 12]. Функция распределения яркостей, являющаяся откликом от объекта, на исходном, но предварительно очищенном от помех и трендов изображении представляет собой образ объекта в пространстве сигналов. Сегментированное и сведенное к бинарному виду изображение образует некоторое подмножество сигнальной области, известное под названием характеристическая функция [11]. В силу специфики работы георадара [1] при его перемещении по поверхности земли относительно точечного отражателя отклик от него на изображении достаточно близко аппроксимируется гиперболической поверхностью, определяемой уравнением

$$\varphi(\tau, \vec{a}) = h - \sqrt{\frac{c^2 \tau^2}{4\mu\varepsilon} - x^2} = 0, \quad (10)$$

где τ - текущее значение задержки распространения электромагнитного сигнала от антенны георадара до точечного отражателя и обратно; $\vec{a} = \{\varepsilon, x\}^T$ - вектор параметров; ε - диэлектрическая проницаемость среды; x - горизонтальное смещение фазового центра антенны георадара относительно точки, образованной нормалью, опущенной из точечного объекта на поверхность земли; T - символ транспонирования; h - глубина залегания объекта относительно поверхности

земли; c - скорость распространения электромагнитных волн в свободном пространстве; $\mu \approx 1$ - магнитная проницаемость среды.

Согласно [11] преобразование Nough ставит во взаимно однозначное соответствие каждой характеристической функции сигнала спектр ее параметров в соответствии с моделью (10).

$$H(\vec{a}) = \iint_{\mathfrak{Z}} \chi(\tau, x) \delta(\varphi(\tau, \vec{a})) d\tau dx, \quad (11)$$

где $\chi(\bullet)$ - характеристическая функция; $\vec{a} \in \mathfrak{Z}$ - область определения искомых параметров.

Очевидно, что каждый спектральный отсчет (11) при конкретном значении $\vec{a} = \vec{a}^*$ равен объему области, заключенной в пересечении подмножества \mathfrak{Z} с поверхностью $\varphi(\tau, \vec{a})$. Следовательно, максимальный спектральный отсчет дает наиболее вероятное значение оценки искомых параметров.

Таким образом, задача идентификации точечных подповерхностных отражателей состоит в формировании характеристической функции, вычислении преобразования Nough, выборе порога в пространстве спектров сигналов, отыскании статистически достоверных оценок параметров аналитической модели и свертке исходного изображения с моделью для повышения результирующей контрастно-фоновой чувствительности. На рис. 6 показан спектр преобразования (11) для обрабатываемого изображения, а на рис. 7 - характеристическая функция с построенной по оценке (11) проекцией $\varphi(\tau, \vec{a})$ поверхности.

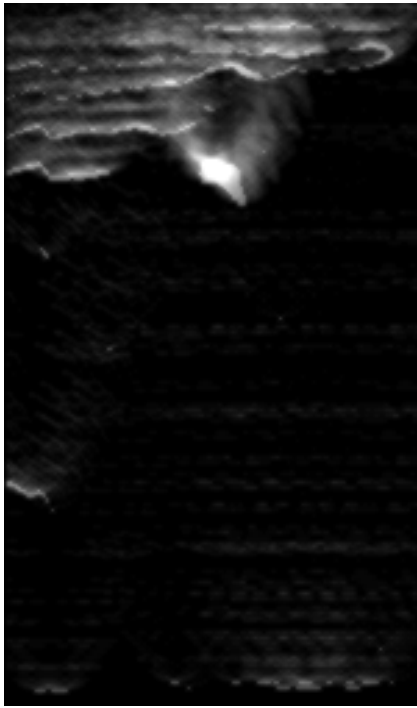


Рис. 6. Спектр преобразования Hough



Рис. 7. Оценка вектора $\varphi(\tau, \vec{a})$

Дальнейшая обработка изображения, сформированного георадаром, сводится к осуществлению кросс-корреляции [10] полученного в результате предварительной обработки бинаризованного сигнала со сформированной в результате оценки кривой, показанной на рис. 7. Результирующее изображению формируется в соответствии с алгоритмом:

$$K(i, j) = B(i, j) \otimes G(i, j) = \sum_{v=-w/2}^{w/2} \sum_{k=-h/2}^{h/2} B(i+v, j+k)G(v, k), \quad (12)$$

где w, h - размеры маски G , содержащей кривую, построенную по оптимальным параметрам спектра преобразования Hough. Результат обработки в соответствии с (12) по 20 точкам кривой и при пороговом отсечении по уровням 84-136 приведен на рис. 8.

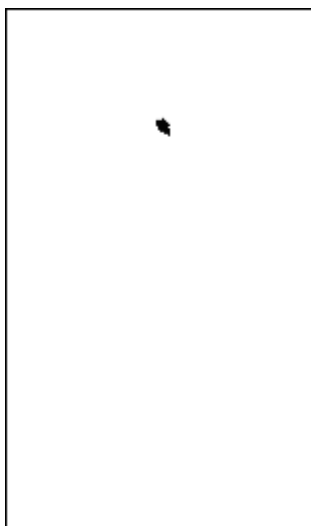


Рис. 8. Результат кросс-корреляции и идентификации после порогового отсечения по уровням 84-136

Очевидно, обработка методом кросс-корреляции с пороговым отсечением и связыванием позволяет достаточно успешно идентифицировать искомый объект (рис. 8). На рис. 8 достаточно хорошо виден отклик от объекта, представляющего собой поперечное сечение металлической трубы теплотрассы в кирпичном коробе. Очевидно, что в сравнении с исходным сигналом (рис. 1) интерпретация обработанных таким образом изображений не представляет труда даже для неподготовленного пользователя. Отношение контраста объекта по отношению к среднему уровню фона возросло после обработки почти на 26 дБ по сравнению с 5 дБ (рис.1). Это увеличение контрастно-фоновой чувствительности, как показал анализ, обусловлено числом значащих пикселей яркости, которые участвуют в кросс-корреляции. Для рассматриваемой цели это число достигало 20. Кроме того, вид объекта на изображении близок к его реальной форме, что является дополнительным фактором, облегчающим его идентификацию. Некоторая размытость отклика объясняется отличием формы реального объекта от идеального точечного отражателя, а также влиянием помех как в пространстве сигналов, так и в пространстве спектров параметров.

Выводы

Таким образом, комплексное применение автоматических и интерактивных методов обработки сигналов георадара позволяет повысить эффективность интерпретации георадиолокационного профиля благодаря повышению контрастно-фоновой чувствительности и преобразованию откликов от подповерхностных объектов к их истинной форме. Обработка сигнала при этом включает три последовательных этапа: а) автоматической процедуры удаления динамических медленноменяющихся трендов и фильтрации; б) интерактивной сегментации и бинаризации изображения, вычисления спектра параметров и их оценок; в) автоматической процедуры кросс-корреляции изображения. Выигрыш в контрастно-фоновой чувствительности в значительной мере зависит от эффективности первого этапа обработки, а также от глубины залегания и геометрии отражающих объектов.

Список использованных источников

1. Хармут Х. Ф. Несинусоидальные волны в радиолокации и радиосвязи / Пер. с англ. – М.: Радио и связь, 1985. – 376 с.
2. Строителев В.Г. Методы обработки сигналов при подповерхностном радиолокационном зондировании. // Зарубежная радиоэлектроника. – 1991. – №1. – С.95 – 105.
3. Финкельштейн М.И., Кутев В.А., Золотарев В.П. Применение радиолокационного подповерхностного зондирования в инженерной геологии. / Под. Ред. М.И. Финкельштейна. – М.: Недра. – 1986. – 487 с.
4. Иммореев И.Я. Сверхширокополосная локация. Основные особенности и отличия от традиционной радиолокации. // Электромагнитные волны и электронные системы. – 1987. – Т.2, №1. – С.81 – 88.
5. Вопросы подповерхностной радиолокации. Коллективная монография. О.В. Сытник, И.А. Вязьмитинов, А.Ю. Гринев / Под ред. А.Ю. Гринева. М.: Радиотехника. – 2005. – 416 с.
6. Отнес Р., Эноксон Л. Прикладной анализ временных рядов. Основные методы. – М.: Мир. – 1982. – 428 с.
7. Кендалл М., Стюарт А. Многомерный статистический анализ и временные ряды: Пер. с англ./ Под ред. А.Н. Колмогорова, Ю.В. Прохорова. — М.: Наука, 1976. — 736 с.
8. Путятин Е.П., Аверин С.И. Обработка изображений в робототехнике. М.: Машиностроение, 1990. – 320 с.
9. Форсайт Д., Понс Ж. Компьютерное зрение. Современный подход. Пер. с англ.- М.: Издательский дом «Вильямс», 2004. – 928с.
10. Шапиро Л., Стокман Дж. Компьютерное зрение. Пер. с англ.- М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2006. – 752с.
11. Лабунец В.Г., Чернина С.Д. Теория и применение преобразования Хо // Зарубежная радиоэлектроника. – 1987. - № 10. – С. 43 – 56.

12. Shapiro S.D. Use of the Hough Transform for Image Data Compression // Pattern Recognition. – 1980. – V. 12. – P. 333 – 337.