

Пакет программ для статистического анализа авторегрессионных и дважды стохастических случайных процессов и полей

Н.А. Андриянов^{1,2}

¹Ульяновский государственный технический университет, Северный Венец 32, Ульяновск, Россия, 432027

²Ульяновский институт гражданской авиации имени Главного маршала авиации Б.П. Бугаева, Можайского 8/8, Ульяновск, Россия, 432071

Аннотация. Прорыв в информационных технологиях способствовал в наше время к широкому распространению различных программ и приложений, которые способны решать совершенно разные задачи. Вместе с тем в последние годы были предложены либо новые математические модели изображений, либо модификации известных моделей. Это позволило выполнить исследования в области применения таких моделей. Однако экспериментальное исследование различных алгоритмов обработки изображений, генерируемых новыми моделями, возможно и удобно с использованием различных программ, позволяющих выполнить статистическое моделирование. Однако для упрощения самого моделирования и анализа алгоритмов обработки изображений или адекватности моделей целесообразно использовать программное обеспечение. В работе описывается разработанный программный комплекс, предназначенный для работы с авторегрессионными и дважды стохастическими случайными полями. При этом реализованы не только процедуры имитации таких случайных процессов и полей, но и алгоритмы фильтрации, идентификации параметров моделей, сегментации и распознавания. Для реализации указанных алгоритмов использовались различные языки программирования, такие как Visual Basic, Matlab. Основное преимущество данной работы связано с представленным в программе модулем распознавания объектов на изображениях.

1. Введение

Широкое распространение различных систем мультиспектральной и гиперспектральной съемки земной поверхности приводит к получению огромного объема информации. Понятно, что для ее обработки необходимы автоматические алгоритмы, которые должны быть реализованы в виде специализированного программного обеспечения. Актуальность данной задачи подтверждается исследованиями в области обработки спутниковых изображений [1,2]. Кроме того, применение специальных программ находит отражение во множестве областей обработки изображений. В их числе обработка медицинских снимков [3,4], а также распознавание образов и техническое зрение [5].

Вместе с тем следует отметить, что при обработке спутникового материала особое внимание уделяется методам, основанным на применении математического моделирования [6-12]. И такое ПО практически отсутствует, как показывает практика. Особенно сложно найти

публикации, посвященные не разработанным алгоритмам, а именно программе, реализующей данные алгоритмы. Поэтому в данной работе основное внимание уделяется самому программному продукту, который может быть использован для исследований изображений со сложной структурой.

2. Дважды стохастическая модель изображений

Разработанное ПО служит инструментом исследования дважды стохастических моделей случайных полей (СП) [9,10]. В качестве примера рассмотрим реализацию двумерного СП $X = \{x, \bar{i} \in \Omega\}$, полученного с помощью модели с кратными корнями характеристического уравнения. При этом имитируемые изображения являются производными одномерных авторегрессий. Запишем соответствие для одномерной модели авторегрессии второго порядка с кратными корнями характеристических уравнений [11], имеющей вид $x_i = 2\rho x_{i-1} + \rho^2 x_{i-2} + \xi_i$, в двумерном пространстве

$$x_{ij} = 2\rho_y x_{i-1,j} + 2\rho_x x_{i,j-1} - 4\rho_y \rho_x x_{i-1,j-1} - \rho_y^2 x_{i-2,j} - \rho_x^2 x_{i,j-2} + 2\rho_y^2 \rho_x x_{i-2,j-1} + 2\rho_x^2 \rho_y x_{i-1,j-2} - \rho_y^2 \rho_x^2 x_{i-2,j-2} + b \xi_{ij}. \quad (1)$$

Пусть используемые в такой модели параметры ρ_x и ρ_y являются реализациями двух базовых СП, значения яркости одного из которых будут преобразованы в совокупность корреляционных параметров $\{\rho_{xij}, i=1, \dots, M1, j=1, \dots, M2\}$, а другого соответственно в совокупность корреляционных параметров $\{\rho_{yij}, i=1, \dots, M1, j=1, \dots, M2\}$ в соответствии со следующими соотношениями

$$\rho_{xij} = r_{1x} \rho_{x(i-1)j} + r_{2x} \rho_{xi(j-1)} - r_{1x} r_{2x} \rho_{x(i-1)(j-1)} + \zeta_{xij}, \quad \rho_{yij} = r_{1y} \rho_{y(i-1)j} + r_{2y} \rho_{yi(j-1)} - r_{1y} r_{2y} \rho_{y(i-1)(j-1)} + \zeta_{yij}, \quad (2)$$

где $\{\zeta_{xij}\}$ и $\{\zeta_{yij}\}$ – двумерные СП независимых гауссовских случайных величин с нулевыми средними и дисперсиями $M(\zeta_{xij}^2) = (1 - r_{1x}^2)(1 - r_{2x}^2)\sigma_{\rho_x}^2$ и $M(\zeta_{yij}^2) = (1 - r_{1y}^2)(1 - r_{2y}^2)\sigma_{\rho_y}^2$; $\sigma_{\rho_x}^2 = M(\rho_{xij}^2)$, $\sigma_{\rho_y}^2 = M(\rho_{yij}^2)$.

Пример моделирования изображения с изменяющимися корреляционными свойствами, характеризующий рельеф предполагаемого снимка земной поверхности представлен на рисунке 1, где (а), (в) – базовое СП; (б), (г) – кадр изображения с изменяющимися корреляционными свойствами. Причем для формирования СП на рисунке 1 (а), (б) использовалась модель Хабиби, а для формирования СП на рисунке 1 (в), (г) – модель СП с кратными корнями кратностью (2; 2).

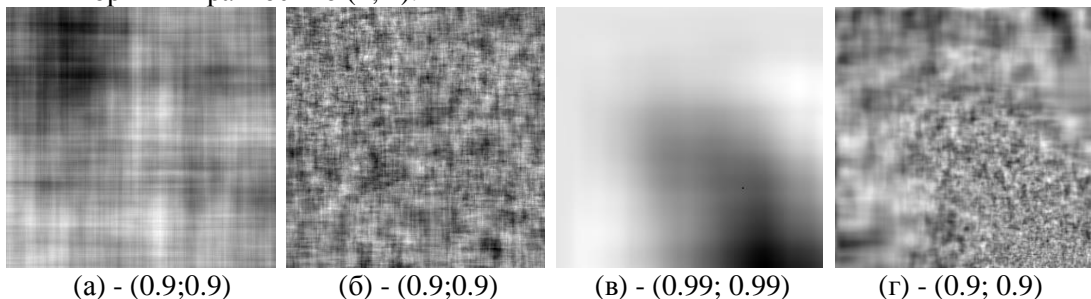


Рисунок 1. Моделирование изображения с изменяющимися корреляционными свойствами.

Анализ рисунка 1 показывает, что применение дважды стохастической модели обеспечивает возможность описания неоднородных свойств изображения, в том числе реальных спутниковых снимков.

3. Программный комплекс в среде Matlab

Matlab предоставляет отличные возможности по оперированию с матрицами. Это можно использовать также при обработке изображений. В частности, сам язык Matlab достаточно похож на C++, и в среде MATLAB, помимо реализации программ с пользовательским

графическим интерфейсом, возможно создание программ, ориентированных на математическое моделирование, численные методы и расчеты. Несмотря на то, что для запуска подобных приложений требуется сама среда MATLAB, скрипты программ являются удобным инструментом для исследования математических моделей изображений и их последовательностей. Такие скрипты могут быть легко доработаны и переписаны в среде Matlab.

Разработанные скрипты, как правило, обладают вводной функциональной частью, в которой можно изменять параметры моделей, выбирать изображения для обработки, устанавливать число циклов при сборе статистических данных. Вторая часть - это реализация конкретных алгоритмов обработки.

Рассмотрим несколько скриптов. Скрипт «Filtration.m» предназначен для исследования алгоритмов фильтрации на основе нелинейного векторного фильтра Калмана (на базе нелинейного векторного фильтра) для дважды стохастических СП, фильтра Винера для дважды стохастических СП, а также фильтров Калмана и Винера для AP изображений. Алгоритм работы скрипта представлен на рисунке 2.

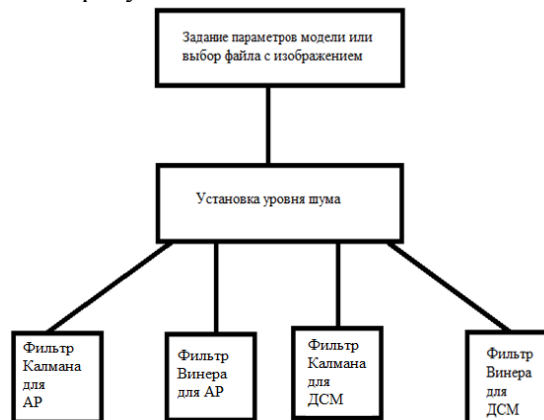


Рисунок 2. Алгоритм работы скрипта фильтрации.

Решение задачи восстановления изображений с параллельной оценкой параметров модели восстановления реализовано в скрипте «PGEstimationAndRestore.m». При этом оценивание внутренних параметров реализуется с использованием псевдоградиентных процедур поиска, а затем применяется нелинейная векторная фильтрация для оценки основного СП [12]. Алгоритм работы скрипта приведен на рисунке 3.

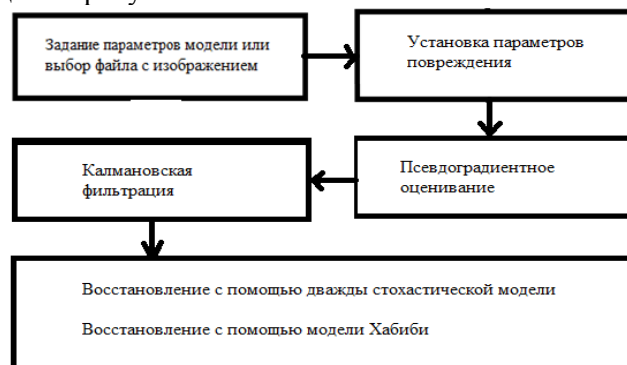


Рисунок 3. Алгоритм работы скрипта оценивания и восстановления.

Также был разработан скрипт, позволяющий выполнять обнаружение аномалий как на имитированных изображениях, так и на реальных. Данный скрипт получил название «RealImageDetection.m». Программа позволяет формировать на моделируемых или реальных изображениях протяженные сигналы квадратной и круглой формы и, задаваясь вероятностью ложной тревоги, исследовать эффективность обнаружения подобных сигналов. На рисунке 4 представлен алгоритм работы скрипта.

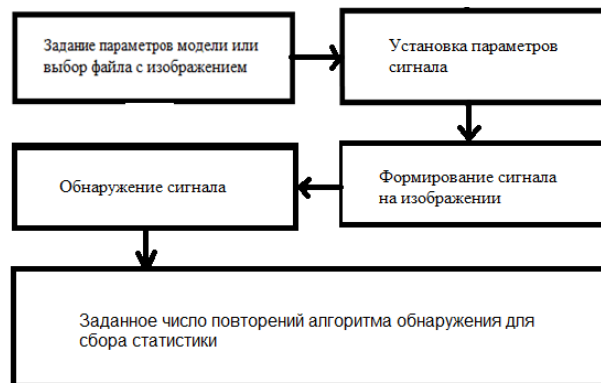


Рисунок 4. Алгоритм работы скрипта обнаружения аномалий.

Таким образом, в среде MATLAB разработан модульный программный комплекс, состоящий из ряда файлов с расширением *.m. Все скрипты могут быть в любой момент изменены и перенастроены, так как данные файлы имеют открытый код, и могут быть отредактированы с помощью обычного "блокнота", что делает его удобным для применения в качестве исследовательского инструмента, например, при проведении лабораторных работ.

4. Программа распознавания геометрических объектов

Научной новизной обладает программная реализация распознавания сигналов на изображении с использованием программы «Распознавание». Работа алгоритма заключается в разбиении исходного изображения на участки, принадлежащие фону и сигналу. После такой бинаризации изображения происходит распознавание формы сигнала. При реализации метода распознавания в качестве основных используются две функции, которые встроены в приложение Image Processing Toolbox.

Таким образом, сначала объекты на изображении локализируются, а затем вычисляются их признаки. Поскольку возможно формирование объектов на изображении только в форме квадрата или круга, то будем в качестве признака формы использовать лишь коэффициент, характеризующий заполнение объекта. Этот параметр может быть найден как дробь, числителем которой является площадь идентифицируемого объекта, а знаменателем – площадь ограничивающего этот объект прямоугольника. Если сигнал имеет форму круга, то коэффициент заполнения $c_{\text{круг}} = \pi/4 = 0.7854$, если сигнал квадратный, то $c_{\text{квадрат}} = 1$. Однако стоит отметить, что точное равенство выполняется лишь в том случае, когда на объектах не присутствует никаких искажений. Если форма круга или квадрата отлична от идеальной, то значения коэффициента заполнения также могут отличаться от приведенных выше значений. Поэтому коэффициенты формы могут вычисляться с некоторой погрешностью.

Структурная схема программы «Распознавание» приведена на рисунке 5. На рисунке 6 показан вид рабочего окна программы.

Таким образом, в результате работы программы формируется изображение, на котором в центр найденного объекта вставляется картинка с текстом, обозначающим его форму. Эти картинки берутся из рабочей папки MATLAB.

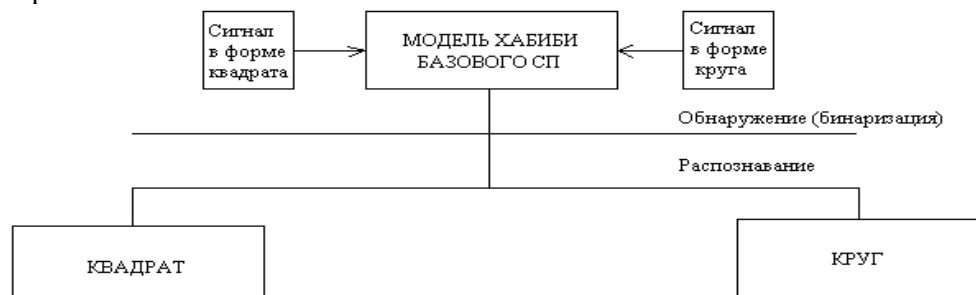


Рисунок 5. Структурная схема пакета «Распознавание».

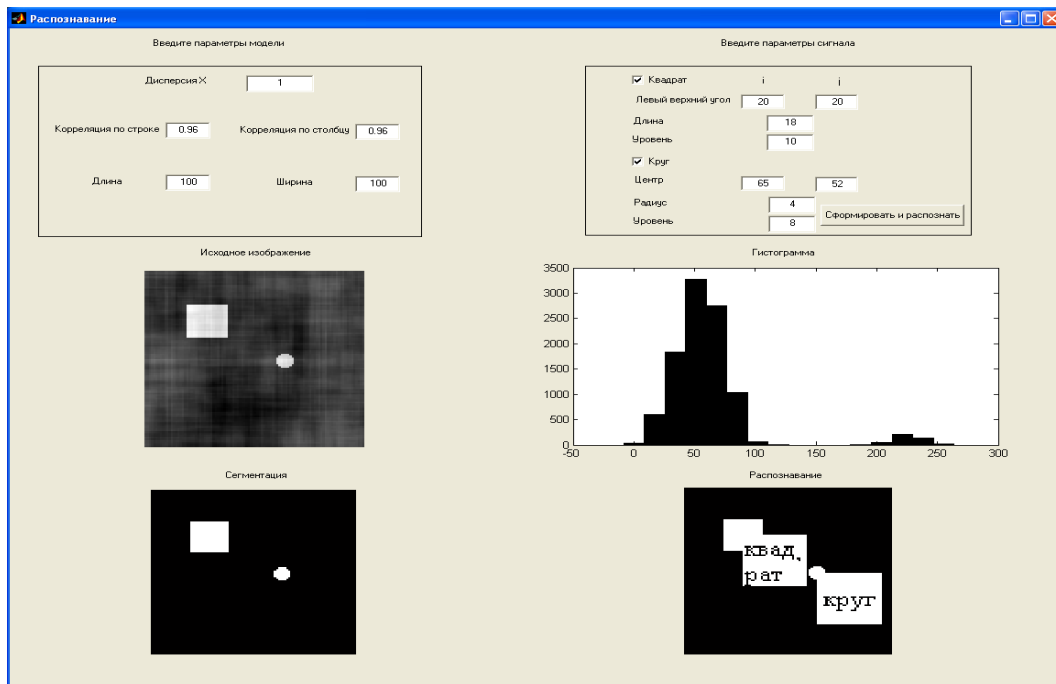


Рисунок 6. Рабочее окно программы «Распознавание».

5. Программный комплекс, реализованный в среде Visual Studio

Недостатком Matlab является необходимость наличия самой среды на компьютере для реализации приложений, а также небольшая скорость вычислений при работе с изображениями больших размеров.

Для реализации программного продукта обработки имитируемых изображений с широким распространением был выбран язык Visual Basic, входящий в среду Visual Studio. Для ОС Windows была разработана программа «Цифровая обработка случайных полей» («ЦОСП»), которая демонстрирует результаты моделирования АР СП, а также результаты их обработки (фильтрации, распознавания). Программа предназначена для линейки ОС Windows и представляет собой скомпилированный exe-файл. Основным преимуществом данного программного продукта является его дружелюбный пользовательский интерфейс. Работа в данной программе не должна вызвать никаких сложностей как у начинающих пользователей, не имеющих представлений о языках программирования, так и у опытных профессионалов, реализующих крупные проекты в области цифровой обработки изображений. Стартовое меню программы представлено на рисунке 7.

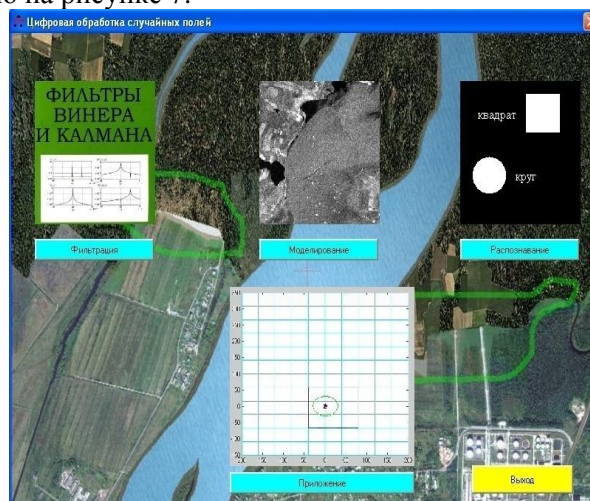


Рисунок 7. Стартовое меню программы «ЦОСП».

Из рисунка 7 видно, что в приложении Windows реализованы алгоритмы фильтрации, имитации изображений, а также обнаружения и распознавания геометрических фигур на фоне изображений со сложной структурой.

Разработанный программный продукт отличается удобным пользовательским интерфейсом и возможностью исследования дважды стохастических и AP моделей изображений.

6. Заключение

Таким образом, разработан программный продукт, который состоит из двух частей:

- приложения MATLAB, реализующие сложные алгоритмы обработки изображений, основанные на дважды стохастических моделях СП и применяемые не только для обработки имитируемого материала, но и реального. Данные приложения требуют от пользователей базовых знаний среды Matrix Laboratory;

- Windows-приложение, демонстрирующее пользователям основные возможности имитации и обработки AP и дважды стохастических изображений, а также их последовательностей.

Разработанный пакет программ для исследования алгоритмов моделирования изображений позволяет моделировать СП на основе дважды стохастических моделей с различными корреляционными параметрами. Имеется возможность получения ковариационных функций исследуемых СП, подбора подходящих параметров модели. Также реализованы предложенные алгоритмы фильтрации и обнаружения аномалий.

7. Литература

- [1] Сергеев, В.В. Параметрическая модель автокорреляционной функции космических гиперспектральных изображений / В.В. Сергеев, Р.Р. Юзькив // Компьютерная оптика. – 2016. – Т. 40, № 3. – С. 416-421. DOI: 10.18287/0134-2452-2016-40-3-416-421.
- [2] Harris, R. Reflections on the value of ethics in relation to Earth observation / R. Harris // International Journal of Remote Sensing. – 2013. – Vol. 34(4). – P. 1207-1219.
- [3] Akil, M. Special issue on real-time processing of medical images / M. Akil, M. Hedi Bedoui // Real-Time Image Processing. – 2017. – Vol. 13(1). – P. 101-102. DOI: 10.1007/s11554-017-0676-5.
- [4] Markelj, P. A review of 3D/2D registration methods for image-guided interventions / P. Markelj, D. Tomazevic, B. Likar, F. Pernus // Medical Image Analysis. – 2012. – Vol. 16(3). – P. 642-661.
- [5] Черногорова, Ю.В. Методы распознавания образов // Молодой ученый. – 2016. – Т. 28. – С. 40-43.
- [6] Васильев, К.К. Авторегрессионные модели многомерных изображений / К.К. Васильев, В.Е. Дементьев // Научно-технические технологии. – 2013. – Т. 14, № 15. – С. 12-15.
- [7] Васильев, К.К. Статистический анализ изображений / К.К. Васильев, В.Р. Крашенинников. – Ульяновск: УлГТУ, 2014. – 214 с.
- [8] Денисова, А.Ю. Идентификация линейной модели наблюдения изображений, получаемых при дистанционном зондировании Земли, с использованием геоинформационных данных / А.Ю. Денисова, В.В. Сергеев // Компьютерная оптика. – 2015. – Т. 39, № 4. – С. 557-563. DOI: 10.18287/0134-2452-2015-39-4-557-563.
- [9] Andriyanov, N.A. Image Models and Segmentation Algorithms Based on Discrete Doubly Stochastic Autoregressions with Multiple Roots of Characteristic Equations / N.A. Andriyanov, Yu.N. Gavrilina // 3rd International Workshop on Radio Electronics and Information Technologies, REIT; Yekaterinburg. CEUR Workshop Proceedings. – 2018. – Vol. 2076. – P. 19-29.
- [10] Andriyanov, N. Development and investigation of doubly stochastic random fields for representation and processing images with complex structure / N. Andriyanov, K. Vasiliev // Интеллектуализация обработки информации: Тезисы докладов 12-й Международной конференции. – М.: Торус Пресс, 2018. – С. 127-128.

- [11] Andriyanov, N. Use autoregressions with multiple roots of the characteristic equations to image representation and filtering / N.A. Andriyanov, K.K. Vasiliev // CEUR Workshop Proceedings. – 2018. – Vol. 2210. – P. 273-281.
- [12] Андриянов, Н.А. Дважды стохастические авторегрессионные модели изображений // Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук. – Ульяновский государственный университет, 2017. – 186 с.

Благодарности

Результаты получены при поддержке гранта РФФИ №18-31-00056.

The software package for statistical analysis of autoregressive and doubly stochastic random processes and random fields

N.A. Andriyanov^{1,2}

¹Ulyanovsk State Technical University, Severny Venets street 32, Ulyanovsk, Russia, 432027

²Ulyanovsk Institute of Civil Aviation, Mozhaiskogo street 8/8, Ulyanovsk, Russia, 432071

Abstract. A breakthrough in information technology has contributed in our time to the wide distribution of various programs and applications that are capable of solving completely different tasks. At the same time, in recent years, either new mathematical models of images or modifications of known models have been proposed. This allowed to carry out research in the field of application of such models. However, an experimental study of various image processing algorithms generated by new models is possible and convenient using various programs that allow statistical modeling. However, to simplify the modeling and analysis of image processing algorithms or the adequacy of models, it is advisable to use software. The paper describes the developed software package designed to work with autoregressive and doubly stochastic random fields. At the same time, not only procedures for simulating such random processes and fields were implemented, but also filtering algorithms, identification of model parameters, segmentation and recognition. To implement these algorithms, various programming languages were used, such as Visual Basic, Matlab. The main advantage of this work is related to the object recognition module in images presented in the program.