На правах рукописи

Андриянов Никита Андреевич

ДВАЖДЫ СТОХАСТИЧЕСКИЕ АВТОРЕГРЕССИОННЫЕ МОДЕЛИ ИЗОБРАЖЕНИЙ

Специальность
05.13.18 – Математическое моделирование,
численные методы и комплексы программ

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Ульяновск – 2017

Работа выполнена на кафедре «Телекоммуникации» федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Ульяновский государственный технический университет».

Научный руководитель – **Дементьев Виталий Евгеньевич,**
кандидат технических наук, доцент

Официальные оппоненты – **Фурман Яков Абрамович,**
доктор технических наук, профессор
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Поволжский государственный технический университет», профессор кафедры радиотехники и медико-биологических систем

– **Ходаков Александр Михайлович,**
кандидат физико-математических наук,
Ульяновский филиал Федерального бюджетного учреждения науки «Институт радиотехники и электроники им. В.А.Котельникова РАН», старший научный сотрудник лаборатории твердотельной электроники, опто- и наноэлектроники (УФ –2)

Ведущая организация – Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Ульяновский институт гражданской авиации имени Главного маршала авиации Б.П. Бугаева»

Защита диссертации состоится «13» декабря 2017 г. в 10^{00} часов на заседании диссертационного совета Д 212.278.02 при ФГБОУ ВО «Ульяновский государственный университет», расположенном по адресу: г. Ульяновск, ул. Набережная р. Свияги, 106, корп. 1, ауд. 703.

С диссертацией и авторефератом диссертации можно ознакомиться в научной библиотеке Ульяновского государственного университета и на сайте ВУЗа http://www.ulsu.ru, а также с авторефератом можно ознакомиться на сайте Высшей аттестационной комиссии при Министерстве образования и науки РФ – http://vak.ed.gov.ru..

Отзывы на автореферат в двух экземплярах, заверенные печатью организации, просим направлять по адресу: 432017, г. Ульяновск, ул. Л. Толстого, д. 42, УлГУ, Отдел подготовки кадров высшей квалификации.

Автореферат разослан «___» _____ 2017 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета,
кандидат физико-математических наук
доцент Волков М.А.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы

В последние годы широкое распространение получили методы мультиспектральной (до 10 спектральных диапазонов) и гиперспектральной (до 300 диапазонов) регистрации участков земной поверхности. Получение и обработка значительных объёмов информации представляется весьма сложной задачей и требует значительных вычислительных затрат.

Цифровая обработка изображений представляет в настоящее время интерес для многих исследователей. Например, обработке медицинских изображений[1,2,3] посвящены работы П. Маркеля (P. Markelj), Д. Томашевича (D. Tomazevic), А. Мохаммеда (Mohamed Akil) В.Р. Крашенинникова. Успехов в обработке спутниковых изображений[4,5,6] достигли Б. Кришна Моэн (B. Krishna Mohan), Р. Харрис (R. Harris), В.А. Сойфер, В.В. Сергеев, В.В. Мясников, К.К. Васильев и др. Кроме того, актуальна адаптация различных алгоритмов обработки изображений под сигналы другого вида и при решении иных задач[7].

При этом существует подход, когда обработка изображений строится на каких-либо локальных (частных) алгоритмах, и подход, когда базой для целого ряда разрабатываемых алгоритмов служит математическая модель.

Несмотря на разнообразие, известные математические модели многомерных изображений (МИ) обладают рядом недостатков. Среди них

---

[1] Markelj, P., Tomazevic, D., Likar, B., Pernus, F. A review of 3D/2D registration methods for image-guided interventions // Medical Image Analysis Volume 16, Issue 3, April 2012, Pages 642-661

[2] Mohamed Akil, Mohamed He´di Be´doui Special issue on real-time processing of medical images // Real-Time Image Processing, 2017 DOI 10.1007/s11554-017-0676-5

[3] Крашенинников В.Р., Л.И. Трубникова, М.Л. Албутова, А.С. Яшина Алгоритм обнаружения маркера заболевания желочного пузыря на изображениях фаций сыворотки крови // Ульяновский медико-биологический журнал. №4, 2015 - С. 105-110.

[4] R. Harris Reflections on the value of ethics in relation to Earth observation // International journal of remote sensing 34 (4), 2013. p. 1207-1219

[5] Сергеев В.В., Юзькив Р.Р. Параметрическая модель автокорреляционной функции космических гиперспектральных изображений // Компьютерная оптика, 2016, том 40, выпуск 3, С. 416–421

[6] Васильев К.К., Дементьев В.Е., Авторегрессионные модели многомерных изображений //Наукоемкие технологии, 2013, т.14, №15, с. 12-15

[7] И. В. Семушин, Ю. В. Цыганова, К. В. Захаров. Устойчивые алгоритмы фильтрации — Обзор и новые результаты для систем судовождения // Информационные технологии и вычислительные системы, Институт Системного Анализа, Российская Академия Наук, 2013, 4, сс. 90–112.

особое место занимают значительные трудности описания пространственно неоднородного и нестационарного во времени реального материала. Для описания таких изображений было предложено использовать смешанные модели[8] (Шалыгин А.С., Палагин Ю.И). В 1987 г. Вудс (R.J. Woods) и соавторы предлагают двумерную дважды стохастическую гауссову (DSG) модель[9], которая была введена, чтобы обеспечить полную модель для пространственных фильтров, адаптирующихся к локальной структуре в сигнале изображения. В одной из первых работ этого направления для моделирования изображений предлагается использовать комбинации разных методов формирования случайных полей (СП).

Однако при использовании данных результатов для описания многомерных СП получаемые решения либо не позволяют в полной мере описать многообразия характеристик реальных изображений, либо сопряжены со значительными сложностями при последующем анализе и оценивании.

Таким образом, существует актуальная задача разработки и исследования дважды стохастических моделей МИ, близких по своим свойствам к реальным изображениям, в том числе к снимкам земной поверхности. Область применения разрабатываемых моделей достаточно широка: от встраивания в качестве плагинов в программах обработки изображений до использования в целях обеспечения исходными данными задачи проектирования аэрокосмических систем. Актуальность диссертации может быть также подтверждена тем, что тема исследований соответствует программам развития, принятым в Российской Федерации[10,11].

---

[8] Шалыгин А.С., Палагин Ю.И. Прикладные методы статистического моделирования, Л.: Машиностроение. Ленингр. отд-ние, 1986. — 320 с.

[9] Woods J.W., Dravida S., Mediavilla R. Image Estimation Using Doubly Stochastic Gaussian Random Field Models // Pattern Analysis and Machine Intelligence, issue №2, vol. 9 – February, 1987, pp. 245-253.

[10] Концепция развития российской космической системы дистанционного зондирования Земли на период до 2025 года. - Москва, Федеральное космическое агенство, 2006 - 72 с.

[11] Федеральная целевая программа "Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2014 - 2020 годы". Утверждена постановлением Правительства Российской Федерации от 21 мая 2013 г. №426

Объектом исследования в диссертационной работе являются системы обработки МИ и их последовательностей.

Предмет исследования – дважды стохастические АР модели СП, их вероятностные свойства, а также эффективность алгоритмов обработки изображений, построенных на базе таких моделей.

Целью работы является повышение эффективности статистического анализа МИ за счет использования дважды стохастических авторегрессионных (АР) моделей СП.

Для достижения названной цели решаются следующие задачи:

1. Исследование основных преимуществ и недостатков известных подходов к моделированию МИ.
2. Разработка алгоритмов имитации МИ и их последовательностей на основе дважды стохастических АР моделей СП.
3. Разработка методики подгонки параметров дважды стохастических моделей на основе реальных изображений и их последовательностей.
4. Разработка численных методов идентификации параметров дважды стохастических моделей на базе процедур псевдоградиентного (ПГ) поиска.
5. Синтез алгоритмов фильтрации дважды стохастических АР СП и МИ с помощью методов нелинейной векторной фильтрации и на базе модифицированного фильтра Винера.
6. Разработка алгоритмов обнаружения сигналов на фоне изображений со сложной структурой и сравнительный анализ синтезируемых алгоритмов с алгоритмами, базирующимися на АР моделях СП, как для имитируемых, так и для реальных изображений.
7. Разработка пакета программ для реализации основных алгоритмов формирования и обработки последовательностей изображений на основе предложенных моделей.

Методы исследований, использованные при решении поставленных задач, основаны на применении аппарата теории вероятностей, математической статистики и математического моделирования. При этом используются

средства современной информатики и вычислительной техники, включая язык программирования MATLAB и среду программирования Visual Studio, а также программные средства работы с графическими изображениями.

Научная новизна результатов заключается в следующем:

1. Впервые предложены и исследованы математические модели СП на многомерных сетках, базирующиеся на комбинациях АР моделей с кратными корнями характеристических уравнений.

2. Разработан новый численный метод идентификации параметров дважды стохастических моделей МИ на базе процедур ПГ оценивания, превосходящий оценивание в скользящем окне и менее требовательный к ресурсам, чем корреляционно-экстремальный алгоритм.

3. Синтезированы и исследованы алгоритмы фильтрации дважды стохастических СП, наблюдаемых на фоне белого шума, обеспечивающие выигрыш по сравнению с алгоритмами, основанными на АР СП.

4. Разработана и исследована методика восстановления повреждённых участков изображений по реальным данным на основе процедур нелинейной фильтрации дважды стохастических МИ и ПГ оценивания их параметров, позволяющая проводить адекватное восстановление неоднородных изображений.

5. Синтезирован и исследован алгоритм обнаружения протяжённых детерминированных сигналов на фоне МИ, описываемых с помощью дважды стохастических моделей СП, применение которого приводит к повышению эффективности обнаружения по сравнению с АР алгоритмами.

6. Впервые в едином программном комплексе реализованы алгоритмы моделирования дважды стохастических АР изображений и их обработки.

Достоверность результатов обеспечивается корректным применением современного математического аппарата, достаточным учётом влияющих факторов и заданных ограничений. Достоверность научных положений, выводов и методик подтверждена непротиворечивостью применяемых моделей и методов, результатами экспериментальных исследований, а также

эффективностью функционирования алгоритмов и программного обеспечения при внедрении.

Теоретическая значимость работы состоит в разработке и исследовании дважды стохастических АР моделей изображений, позволяющих адекватно описывать реальный неоднородный материал, а также в получении аналитических выражений для анализа вероятностных свойств частных дважды стохастических моделей, позволяющих имитировать изображения с заданными корреляционными свойствами.

Практическая ценность диссертационной работы заключается в том, что предложенные алгоритмы обработки изображений, основанные на дважды стохастических АР моделях СП, могут быть использованы разработчиками перспективных систем обработки последовательностей неоднородных изображений, а разработанное программное обеспечение позволяет непосредственно осуществлять обработку различных последовательностей МИ.

Основные научные положения, выносимые на защиту:

1. Математическая модель многомерных дважды стохастических СП и их последовательностей, основанная на комбинации АР моделей с кратными корнями характеристических уравнений.

2. Методика формирования изображений с изменяющимися в пространстве статистическими параметрами, базирующаяся на применении оценивания в скользящем окне.

3. Численный метод идентификации параметров дважды стохастических АР моделей СП, использующих комбинации АР первого порядка, обеспечивающий приемлемую скорость и эффективность оценки и базирующийся на ПГ процедурах оценивания.

4. Алгоритм фильтрации изображений, основанный на дважды стохастических АР моделях и применении нелинейной векторной фильтрации, обеспечивает выигрыши при фильтрации неоднородных изображений по сравнению с алгоритмами, основанными на обычных АР моделях СП.

5. Алгоритм обнаружения сигналов на фоне неоднородных изображений со сложной структурой, обеспечивающий повышение эффективности обнаружения по сравнению с алгоритмами, основанным на АР моделях СП.

6. Комплекс исследовательских программ для имитации последовательностей МИ и проверки адекватности и эффективности разработанных алгоритмов, отличающийся простотой использования и позволяющий применять алгоритмы обработки изображений на базе дважды стохастических моделей СП.

Реализация и внедрение результатов работы. Результаты диссертационного исследования использованы при выполнении грантов РФФИ №13-01-00308 «Синтез, вероятностный анализ и методы подгонки смешанных моделей последовательностей изображений на многомерных сетках», №16-41-732027 р_офи_м «Построение стохастических моделей и алгоритмов обработки последовательностей неоднородных многозональных изображений для региональных систем экологического мониторинга». По результатам работы получено звание лауреата конкурса научно-технического творчества молодежи Приволжского федерального округа (2016 г.) и медаль «За успехи в научно-техническом творчестве и научно-исследовательской работе».

Результаты работы внедрены в ООО «Энерготехсервис» (г. Ульяновск), Ульяновском филиале АО «ЦентрИнформ» (г. Ульяновск). Реализация результатов работы подтверждена соответствующими актами.

Апробация работы. Основные результаты работы обсуждались и получили положительную оценку на международных конференциях: «Pattern Recognition and Image Analysis: New Information Technologies» (Самара, 2013), «Open German-Russian Workshop on Pattern Recognition and Image Understanding» (Koblenz, Germany, 2014), «International Workshop on Radio Electronics and Information Technologies, REIT 2017» (Екатеринбург, 2017), «International Conference on Information Technology and Nanotechnology – 2017 (Самара, 2017), «Математические методы и модели: Теория, приложения и роль в образовании» (Ульяновск, 2014), «Цифровая обработка сигналов и ее

применение – DSPA» (Москва, 2014, 2015), «NEW2AN 2015 Conference» (Санкт-Петербург, 2015), Международная Крымская конференция «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии – КрыМиКо’2016» (Севастополь, 2016), Научных сессиях, посвященных дню радио (Москва, 2016, 2017); и всероссийских конференциях: «Современные проблемы проектирования, производства и эксплуатации радиотехнических систем» (Ульяновск, 2013, 2015), «Радиоэлектронные средства получения, обработки и визуализации информации – РСПОВИ» (Москва, 2015); а также на конференциях профессорско-преподавательского состава Ульяновского государственного технического университета (2014, 2016, 2017) и других. Кроме того, на международном «Молодежном инновационном форуме» (Ульяновск, 2016) проект по тематике диссертационного исследования был удостоен медали.

Публикация результатов работы. Основные научные результаты диссертационной работы отражены в 27 научных работах (из них 8 без соавторов), в том числе в 6 статьях в журналах из перечня ВАК. Получено 3 свидетельства о государственной регистрации программы для ЭВМ.

Личный вклад автора. Постановка задач исследования осуществлялась совместно с научным руководителем. Все основные теоретические и практические исследования проведены автором диссертационной работы самостоятельно.

Структура и объем работы. Основное содержание диссертационной работы изложено на 186 страницах машинописного текста, содержит 75 рисунков, 9 таблиц и состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы из 157 наименований и приложения.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность работы, сформулированы цели и основные задачи, показана научная новизна и практическая ценность работы, выбраны методы исследования, приведены положения, выносимые на защиту.

В первой главе проведен аналитический обзор известных математических моделей изображений, рассмотрены известные алгоритмы фильтрации изображений и обнаружения аномалий, проанализированы проблемы описания неоднородных в пространстве изображений и сформулированы основные задачи исследований.

Установлено, что, несмотря на многообразие существующих моделей МИ, они все имеют недостатки, главными из которых являются:

– отсутствие удовлетворительного решения задачи адекватного описания пространственно-неоднородных изображений и их последовательностей;

– существенное увеличение вычислительных затрат при повышении порядков АР моделей изображений;

– значительные трудности статистического анализа МИ, полученных при использовании неавторегрессионных моделей СП.

В связи с этим возникает задача разработки и исследования новых математических моделей СП, а именно дважды стохастических моделей СП, на базе которых могут быть сформированы квазинеоднородные МИ, повышены эффективности фильтрации МИ и обнаружения сигналов на МИ. В основе таких моделей изображений лежит идея случайного изменения их параметров в каждой точке МИ. При этом для получения СП параметров необходимо также задаться какой-либо математической моделью СП.

Во второй главе для описания реальных неоднородных изображений и их последовательностей предложено использование моделей СП с изменяющимися параметрами, получены аналитические выражения для расчета их вероятностных характеристик, выполнено обобщение моделей на многомерный случай, рассмотрены возможности аппроксимации реальных изображений с помощью моделей с изменяющимися параметрами, синтезирован алгоритм имитации последовательности дважды стохастических СП яркости.

Рассмотрим дважды стохастическую АР модель СП:

$$x_{ij} = \rho_{xij} x_{i-1,j} + \rho_{yij} x_{i,j-1} - \rho_{xij}\rho_{yij} x_{i-1,j-1} + \sigma_x \sqrt{(1-\rho_{xij}^2)(1-\rho_{yij}^2)}\xi_{ij} \qquad (1)$$

где x_{ij} – моделируемое СП с $M\{x_{ij}\} = 0$, $M\{x_{ij}^2\} = \sigma_x^2$; ξ_{ij} – СП независимых стандартных гауссовых СВ с $M\{\xi_{ij}\} = 0$, $M\{\xi_{ij}^2\} = \sigma_\xi^2 = 1$; ρ_{xij} и ρ_{yij} – изменяющиеся корреляционные параметры, имеющие смысл коэффициентов корреляции по строке и столбцу соответственно.

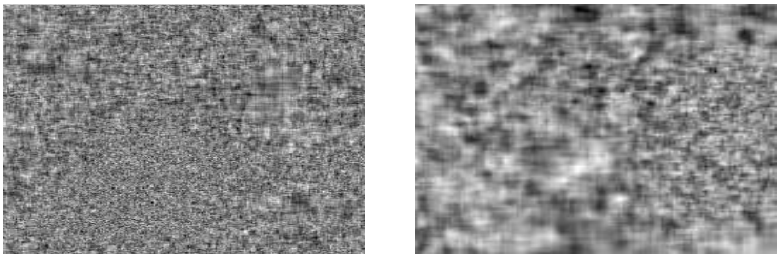
Параметры ρ_{xij} и ρ_{yij} дважды стохастической модели (1) представим в виде АР уравнений:

$$\begin{aligned} \tilde{\rho}_{xij} &= r_{1x}\tilde{\rho}_{x(i-1)j} + r_{2x}\tilde{\rho}_{xi(j-1)} - r_{1x}r_{2x}\tilde{\rho}_{x(i-1)(j-1)} + \sigma_{\rho_x}\sqrt{(1-r_{1x}^2)(1-r_{2x}^2)}\varsigma_{\rho_x ij}, \\ \tilde{\rho}_{yij} &= r_{1y}\tilde{\rho}_{y(i-1)j} + r_{2y}\tilde{\rho}_{yi(j-1)} - r_{1y}r_{2y}\tilde{\rho}_{y(i-1)(j-1)} + \sigma_{\rho_y}\sqrt{(1-r_{1y}^2)(1-r_{2y}^2)}\varsigma_{\rho_y ij}, \end{aligned} \qquad (2)$$

где $r_{1x} = M\{\tilde{\rho}_{xij}\tilde{\rho}_{x(i-1)j}\}$, $r_{2x} = M\{\tilde{\rho}_{xij}\tilde{\rho}_{xi(j-1)}\}$ – коэффициенты корреляции случайного параметра $\tilde{\rho}_{xij}$; $r_{1y} = M\{\tilde{\rho}_{yij}\tilde{\rho}_{y(i-1)j}\}$, $r_{2y} = M\{\tilde{\rho}_{yij}\tilde{\rho}_{yi(j-1)}\}$ – коэффициенты корреляции случайного параметра $\tilde{\rho}_{yij}$; $\sigma_{\rho x}^2$ и $\sigma_{\rho y}^2$ – дисперсии СП изменения параметров; $\varsigma_{\rho_x ij}$ и $\varsigma_{\rho_y ij}$ – нормально распределённые СВ с $M\{\varsigma_{\rho_x ij}\} = M\{\varsigma_{\rho_y ij}\} = 0$, $M\{\varsigma_{\rho_x ij}^2\} = M\{\varsigma_{\rho_y ij}^2\} = \sigma_\varsigma^2 = 1$.

Поскольку СП корреляционных параметров (2) имеют нулевое математическое ожидание, были введены дополнительные величины, характеризующие средние значения коэффициентов корреляции по осям x и y в модели (1).

На рис. 1 показан пример имитации дважды стохастических изображений с использованием модели (1,2): а – со средним коэффициентом корреляции (0.8), б – с более сильной корреляцией (0.9).

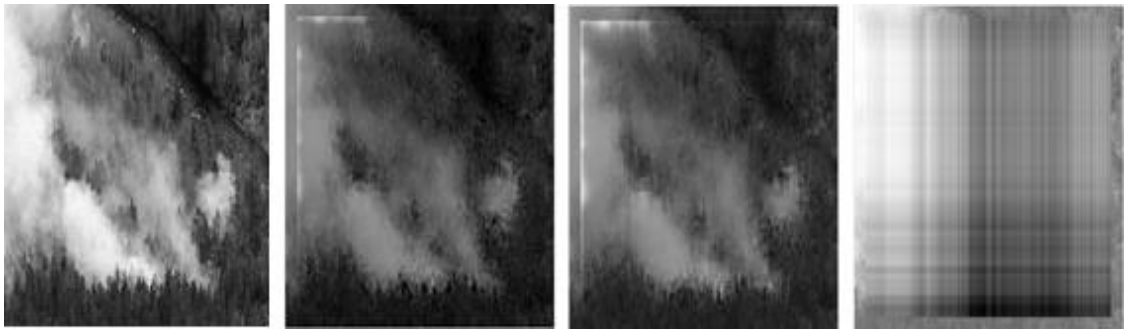


а) (0.8;0.8) б) (0.9;0.9)

Рис. 1. Реализации дважды стохастических СП с разными корреляционными параметрами

При описании реальных изображений необходимо подобрать изменяющиеся параметры дважды стохастической модели так, чтобы формируемое СП имело характеристики реального изображения $\{Z_{ij}\}$ с полем значений яркости $\{z_{ij}\}, i = 1,...,M_1; j = 1,...,M_2$. Рассмотрим методику формирования изображения, базирующуюся на оценивании изменяющихся параметров модели СП в скользящем окне. При этом в каждой точке выполним оценку четырёх параметров: математического ожидания, дисперсии, корреляции по строке и столбцу. Первые два параметра находим по выборке пикселей в скользящем окне, оценка двух последних будет зависеть от выбранной для аппроксимации модели изображения.

Для сравнения выполним также подгонку параметров обычной АР модели первого порядка. На рис. 2 представлен пример использования предложенной методики имитации реального изображения: а – реальное изображение размером *250×250*; б – реализация СП, порождённого дважды стохастической моделью на основе АР с кратными корнями характеристических уравнений; в – реализация СП, порождённого дважды стохастической моделью на основе АР модели первого порядка; г – реализация СП, порождённого АР моделью первого порядка. Статистическая оценка параметров имеющегося изображения проводилась в скользящем окне размером *11×11*. Дисперсии ошибок подгонки, найденные как средняя величина квадратов расхождения значений яркости реального изображения и реализаций СП, составили: б – 0,49; в – 0,37; г – 0,96.



а) б) в) г)

Рис. 2. Формирование изображения с изменяющимися свойствами

Таким образом, предложенная методика позволяет повысить эффективность описания неоднородных изображений в 2–2.5 раза по сравнению с АР моделями в смысле относительного среднего квадрата отклонений значений яркости.

В третьей главе синтезированы и исследованы алгоритмы фильтрации, процедуры идентификации параметров моделей по имеющимся наблюдениям, рассмотрены возможности восстановления участков изображений, а также алгоритмы обнаружения точечных и протяжённых сигналов.

В одномерном случае может быть использован следующий рекуррентный фильтр:

Для фильтрации плоского изображения на основе модели (1) необходимо оценивать как основное СП, так и СП параметров. В таком случае можно воспользоваться векторным (построчным) рекуррентным фильтром. Для этого объединим элементы строки изображения в вектор $\bar{x}_i = (x_{i1}, x_{i2}, \ldots, x_{iN})^T$. Тогда модель изображения может быть записана в виде:

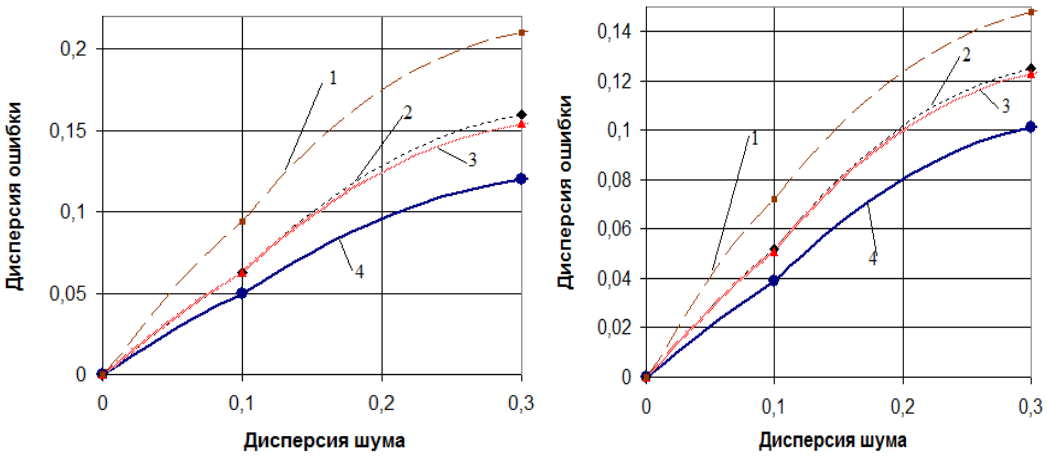
$$\bar{x}_i = diag(\bar{\rho}_{xi})\bar{x}_{i-1} + \upsilon(\bar{\rho}_{xi}, \bar{\rho}_{yi})\bar{\xi}_i, \quad \bar{\rho}_{xi} = r_{1x}\bar{\rho}_{x(i-1)} + \upsilon_{\rho x}\bar{\xi}_{xi}, \quad \bar{\rho}_{yi} = r_{1y}\bar{\rho}_{y(i-1)} + \upsilon_{\rho y}\bar{\xi}_{yi},$$

где $diag(\bar{\rho}_{xi})$ – диагональная матрица с элементами $\bar{\rho}_{xi}$ на главной диагонали; нижнетреугольная матрица υ определяется разложением матрицы ковариаций: $V_x = \upsilon\upsilon^T$.

Очевидно, процесс построчного оценивания может быть реализован в виде рекуррентного фильтра, выполняющего оценку коэффициентов корреляции и основного СП параллельно. При этом необходимо при оценке коэффициентов корреляции учитывать ограничения, которые могут привести к расхождению оценок основного СП, т.е. они не могут достигать или превышать единичного значения.

Сравнительный анализ работы известных и предложенных алгоритмов фильтрации показал, что для дважды стохастических моделей наименьшую дисперсию ошибки фильтрации обеспечивает фильтр Винера в случае, если параметры известны заранее. Результаты фильтрации при различных

параметрах приведены на рис. 3: 1 – фильтр Калмана для АР, 2 – фильтр Винера для АР, 3 – нелинейный векторный фильтр для дважды стохастического процесса, 4 – фильтр Винера для дважды стохастического процесса.



а) б)

Рис. 3. Дисперсии ошибки фильтрации процессов: с большой дисперсией изменения параметров ($\rho_0 = 0, \sigma_\rho^2 = 0.57, r = 0.2$) (а) и близкого к АР ($\rho_0 = 0.9$, $\sigma_\rho^2 = 0.0001, r = 0.99$) (б)

Анализ кривых на рис. 3 показывает, что в случае, когда исходная последовательность имеет большой разброс параметров (а), фильтр Винера с известными коэффициентами корреляции обеспечивает выигрыш в 1.3–1.7 раза по сравнению с рассмотренными алгоритмами 1–3. В случае фильтрации процесса, параметры которого изменяются медленно и незначительно, дисперсии ошибок близки для всех рассматриваемых фильтров. Выигрыш по дисперсии ошибки для фильтра Винера при дважды стохастической модели составляет 1.2–1.4 раза по сравнению с фильтром Калмана для АР.

На рис. 4 показаны результаты фильтрации реального изображения при единичной дисперсии шума: первый ряд – исходное изображение, зашумлённое изображение, результат фильтрации Калмана для АР без интерполяции; второй ряд – результат фильтрации Винера для АР, результат фильтрации Калмана для АР с интерполяцией, результат нелинейной векторной фильтрации для дважды стохастической модели. При этом корреляционные параметры были неизвестны, поэтому реализация фильтра Винера для дважды стохастической модели не выполнена. Отметим, что наименьшую дисперсию ошибки

обеспечивает нелинейный векторный фильтр для дважды стохастической модели СП.

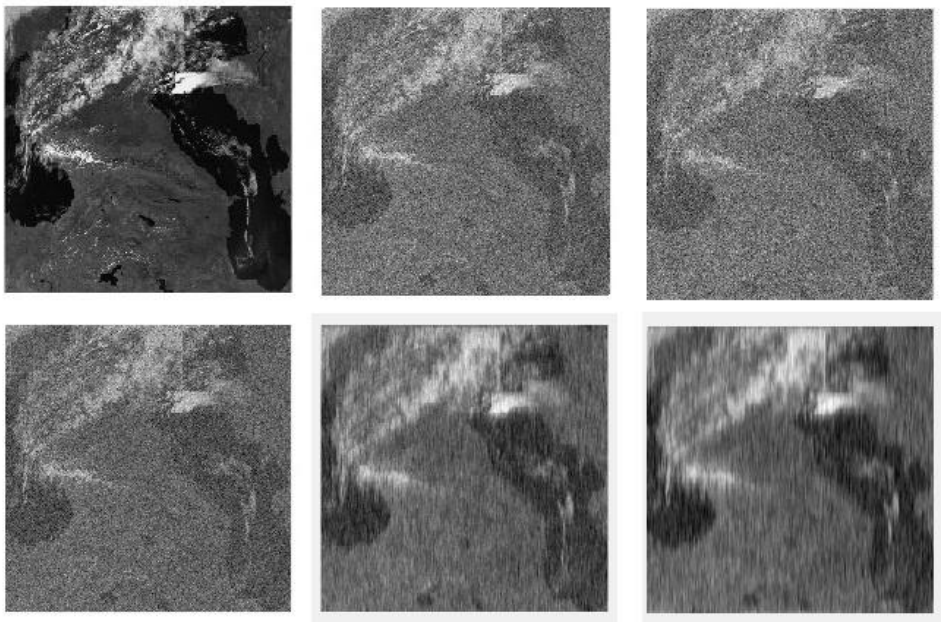


Рис. 4 Фильтрация реального изображения

Анализ полученных результатов показывает, что максимальный выигрыш достигается при дисперсии шума, сопоставимой с дисперсией сигнала. С дальнейшим увеличением шума выигрыш стремится к постоянному значению. Так, например, по сравнению с фильтром Винера для АР и фильтром Калмана для АР с интерполяцией выигрыш составляет порядка 35% при значениях отношения сигнал/шум 0,1 и меньше.

В случае применения дважды стохастических моделей достаточно сложной представляется процедура идентификации корреляционных параметров базовых моделей r_{1x}, r_{2x}, r_{1y}, r_{2y}. Для получения их адекватных оценок предлагается использовать ПГ процедуры поиска. В этом случае на каждой итерации выполняется сравнение ошибок (минимум целевой функции) и поиск оптимального направления движения при переходе от шага с номером *(s-1)* к шагу с номером *s*. Запишем условие выбора направления ПГ поиска в следующем виде:

$$\begin{aligned} \{\tilde{\rho}_{xij}\} &= \min_{(\hat{B}_1-B_{01})^2+(\hat{B}_2-B_{02})^2}\left(a_x \quad b_x \quad c_x \quad d_x \quad e_x \quad f_x \quad g_x \quad h_x \quad k_x\right), \\ \{\tilde{\rho}_{yij}\} &= \min_{(\hat{B}_1-B_{01})^2+(\hat{B}_2-B_{02})^2}\left(a_y \quad b_y \quad c_y \quad d_y \quad e_y \quad f_y \quad g_y \quad h_y \quad k_y\right), \end{aligned} \qquad (3)$$

где $a_x - k_x$ – перебор по всем возможным направлениям изменения корреляционных параметров СП $\{\tilde{\rho}_{xij}\}$, $a_y - k_y$ – перебор по всем возможным направлениям изменения корреляционных параметров СП $\{\tilde{\rho}_{yij}\}$, при этом для каждой пары параметров реализуется СП $\tilde{x}_{ij}$, на основе которого считаются статистики $\hat{B}_1 = \frac{1}{M(N-2)} \sum_{j=1}^{M} \sum_{i=2}^{N-1} \left(\frac{\tilde{x}_{i,j}\tilde{x}_{i+1,j}}{\hat{\sigma}_x^2} - \frac{\tilde{x}_{i-1,j}\tilde{x}_{ij}}{\hat{\sigma}_x^2} \right)^2$ и $\hat{B}_2 = \frac{1}{N(M-2)} \sum_{j=2}^{M-1} \sum_{i=1}^{N} \left(\frac{\tilde{x}_{i,j}\tilde{x}_{i,j+1}}{\hat{\sigma}_x^2} - \frac{\tilde{x}_{i,j-1}\tilde{x}_{ij}}{\hat{\sigma}_x^2} \right)^2$. Считается, что они должны быть максимально близки к аналогичным статистикам, полученным по наблюдаемому изображению.

Найденные параметры r_{1x}, r_{2x}, r_{1y}, r_{2y} могут быть в дальнейшем использованы при векторной фильтрации. Предложенные алгоритмы оценивания обеспечивают выигрыш в 1.5 раза по дисперсии ошибки и могут быть также использованы при решении задач обнаружения сигналов с целью повышения эффективности.

Для обнаружения сигналов на фоне коррелированных помех составим отношение правдоподобия

$$\Lambda = \frac{w(\bar{z}_S, \bar{z}_0 / H_1)}{w(\bar{z}_S, \bar{z}_0 / H_0)},$$

где $\bar{z}_S = \{z_i, i \in I_s\}$ – наблюдение в области I_s предполагаемого сигнала; $\bar{z}_0 = \{z_i, i \in I_0\}$ – наблюдения в области помехи.

В таком случае можем воспользоваться следующим оптимальным алгоритмом

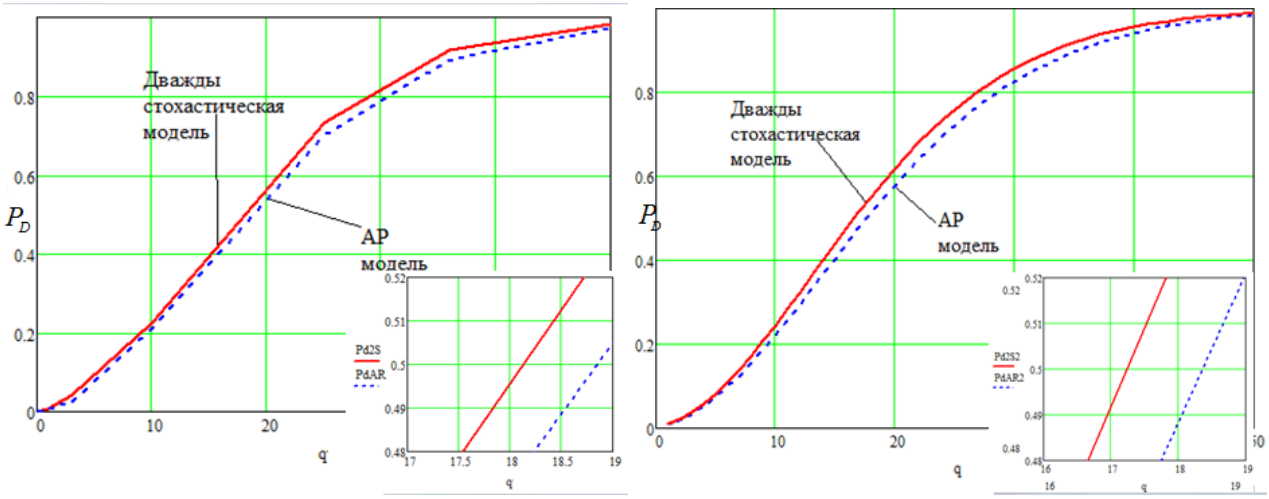
$$L = \sum_{\bar{l}} \sum_{\bar{i}} s_{\bar{l}} V_{n\bar{l}\bar{i}}^{-1} (z_{\bar{i}} - \tilde{x}_{\bar{i}}) \begin{cases} > L_0 - \textit{есть} \quad \textit{сигнал}, \\ \le L_0 - \textit{нет} \quad \textit{сигнала}, \end{cases} \tag{4}$$

где s – детерминированный сигнал, L_0 – порог обнаружения, $V_{n\bar{l}\bar{i}}$ – диагональная матрица со значениями дисперсий σ_n^2, $\tilde{x}_{\bar{i}}$ – оптимальные оценки СП.

Сравнительные характеристики работы алгоритма (4) при обнаружении точечных сигналов с использованием дважды стохастических и АР моделей СП приведены на рис. 5 и рис. 6, где по оси X отложено отношение сигнал/шум, по

оси Y – вероятность правильного обнаружения. Сплошной линией показан случай использования алгоритмов обнаружения для дважды стохастической модели, штриховой – использование алгоритмов обнаружения для обычной АР модели. Графики рис. 5а соответствует случаю, когда обнаружение выполняется на основе прогноза по одной точке, рис. 5б – когда обнаружение выполняется на основе прогноза по двум точкам.

Анализ кривых на рис. 5 показывает, что при прогнозе на основе одной точки выигрыш для алгоритма обнаружения при дважды стохастической модели по отношению сигнал/шум составляет порядка 1.03 (3%) на уровне $P_D = 0.5$. Дополнительное повышение эффективности обеспечивается увеличением числа точек для прогноза. Так, например, использование двух точек приводит к уменьшению отношения сигнал/шум в 1.06 (4,9%) раза. При этом выигрыш по отношению к АР модели составляет 1.07 (6,3%).



а) б)

Рис. 5. Вероятность правильного обнаружения при разных прогнозах

На рис. 6 показаны графики зависимости вероятности правильного обнаружения от отношения сигнал/шум: 1 – при алгоритме для дважды стохастического СП и r=0.99, 2 – при алгоритме для дважды стохастического СП и r=0.8, 3 – при алгоритме для АР СП и r=0.99, 4 – при алгоритме для АР СП и r=0.8.

Анализ кривых показывает, что использование дважды стохастической модели СП в качестве основы обнаружителя приводит к выигрышу по уровню сигнала. Это объясняется тем, что нелинейный фильтр позволяет оценивать

процесс изменения параметров модели. Однако при увеличении параметра внутренней АР модели r и его приближении к единице выигрыш обнаружения на фоне дважды стохастической помехи уменьшается. Это объясняется тем, что при $r \to 1$ дважды стохастическая модель стремится к обычной АР модели.

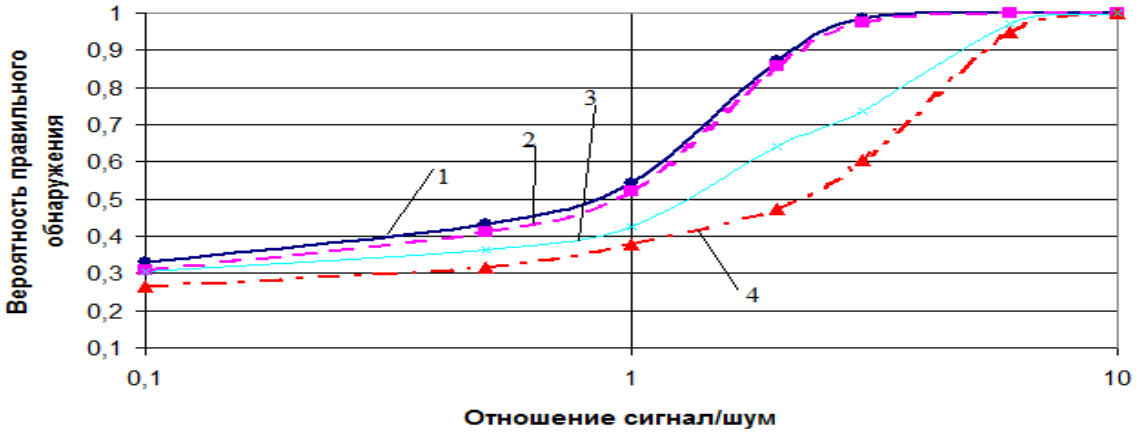
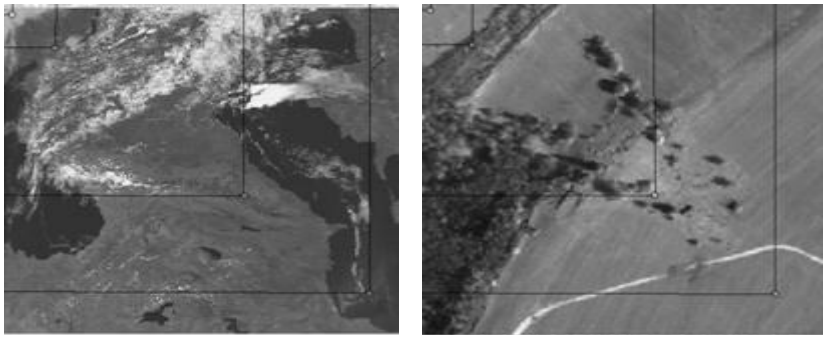


Рис. 6. Вероятность правильного обнаружения в зависимости от отношения сигнал/шум

Проверка адекватности использования рассмотренных алгоритмов применительно к реальным изображениям (рис. 7) показала, что для изображений со сложной структурой они обеспечивают, как правило, более эффективное обнаружение, чем известные АР. На рис. 7 показаны четыре области, в которых выполняется обнаружение детерминированного сигнала. Вероятности обнаружения при отношении сигнал/шум, равном 0.5 для алгоритма на основе дважды стохастической модели в позициях 1–4 составили: (0.03 0.87 0.87 0.95) для рис. 7а и (0.26 0.95 0.21 0.83) для рис. 7б, а для алгоритма на основе АР модели – соответственно (0.01 0.87 0.87 0.91) и (0.21 0.91 0.00 0.79).



а) б)

Рис. 7. Обнаружение протяженных сигналов на изображениях на различных участках

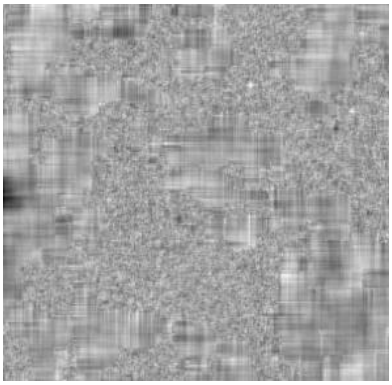
Таким образом, алгоритмы обнаружения на основе дважды стохастических моделей обеспечивают вероятность правильного обнаружения в среднем в 1.1-1.15 раза выше, чем алгоритмы на основе АР моделей.

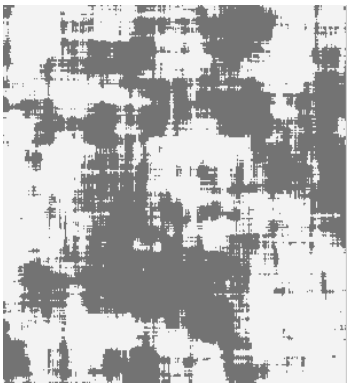
Четвёртая глава посвящена исследованию возможности применения дважды стохастических моделей для решения прикладных задач, связанных с сегментацией изображений и идентификацией на них объектов разной формы, разработке алгоритмического и программного обеспечения для реализации и оценки эффективности использования дважды стохастических моделей СП в задачах обработки изображений.

Использование смешанных моделей изображений позволяет производить сегментацию не только на основе яркостных характеристик изображения, но и на основе оценки СП параметров такого изображения. Рассмотрим алгоритм сегментации дважды стохастического изображения, корреляционные параметры которого принимают одно из двух возможных значений. Для выделения однородных областей необходимо найти оценку коэффициентов корреляции. Эту задачу можно решить с использованием скользящего окна так же, как при решении задачи формирования изображения. Затем необходимо построить гистограммы этих коэффициентов. После этого найдём максимумы гистограмм, которые должны соответствовать используемым коэффициентам. Учитывая, что при таком формировании у гистограммы должно быть два пика, пороговое значение коэффициента корреляции может быть найдено в соответствии с выражением $\rho_{x\,пор} = \dfrac{\rho_{x\max 1} + \rho_{x\max 2}}{2}$. Затем в зависимости от того, с какой стороны от порога находится оценка, происходит преобразование СП оценок параметров изображения $\{\hat{\rho}_{xij}\}$, имеющего множество возможных принимаемых значений, в изображение $\{y_{ij}\}$, имеющее 2 градации яркости, т.е. бинаризация полученного изображения.

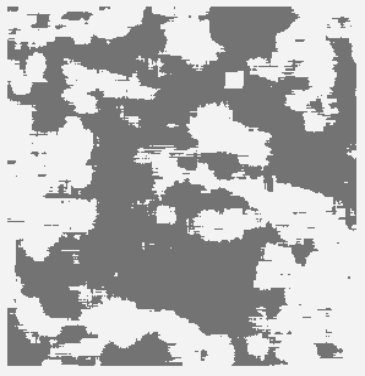
На рис. 8 представлен результат работы алгоритма сегментации для изображения, сформированного в соответствии с предложенной моделью без

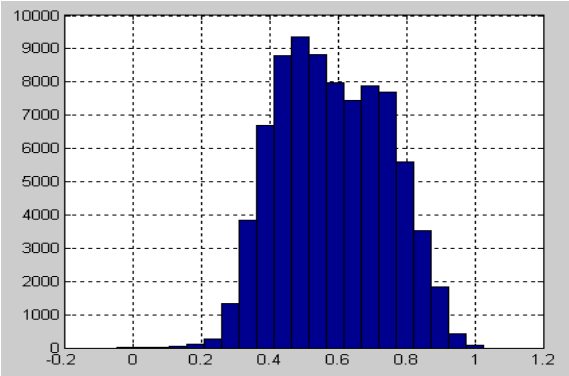
повышения разности по яркости в разных областях: а – сформированное изображение; б – коэффициенты корреляции (базовое СП); в – результат сегментации; г – гистограмма. Размер изображения 300×300. Оценка параметров имеющегося изображения проводилась в скользящем окне размером 15×15.





а) (0.95;0.45) б)





в) 84.5% г)

Рис. 8. Сегментация изображения с изменяющимися корреляционными свойствами

Для решения рассмотренных задач разработан программный комплекс, состоящий из следующих блоков:

– GUI-приложение MATLAB для моделирования и формирования дважды стохастических моделей СП и случайных процессов (рис. 9);

– Скрипт-приложение MATLAB, реализующее сложные алгоритмы обработки изображений, основанные на дважды стохастических моделях СП.

– Windows-приложение, позволяющее демонстрировать основные возможности имитации и обработки АР и дважды стохастических моделей СП.

Разработанный пакет программ для исследования алгоритмов моделирования изображений позволяет моделировать многомерные СП на

основе дважды стохастических моделей с различными корреляционными параметрами. Имеется возможность получения ковариационной функции исследуемых СП, подбора подходящих параметров модели. Также реализованы предложенные алгоритмы фильтрации, сегментации дважды стохастических СП и обнаружения сигналов на их фоне. Для одномерного случая реализован алгоритм идентификации параметров случайного процесса, позволяющий производить сравнение действительных параметров с их оценками.

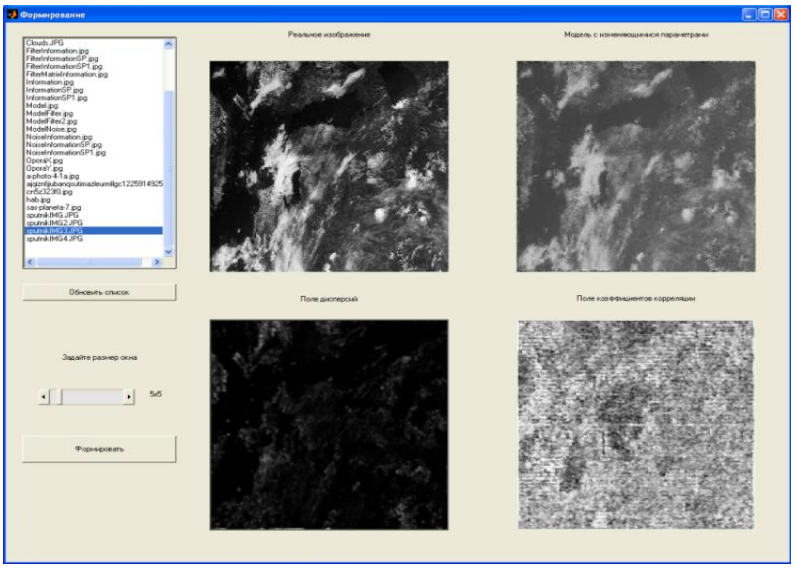


Рис. 9. Пример внешнего вида разработанного модуля формирования

Таким образом, предложенные в диссертационной работе и реализованные в программном комплексе алгоритмы моделирования, оценивания и фильтрации СП, обнаружения сигналов на МИ могут найти применение в различных прикладных областях.

В заключении сформулированы основные научные и практические результаты диссертационной работы.

Основными результатами диссертационной работы являются следующие:

1. Для описания пространственно неоднородных изображений предложено использование смешанных дважды стохастических моделей СП, базирующихся на АР моделях. Установлено, что разработанные модели при незначительном увеличении вычислительных затрат по сравнению с АР позволяют имитировать разного рода МИ со сложной структурой, а также последовательности таких изображений.

2. Синтезированы алгоритмы имитации МИ и их последовательностей, в основу формирования которых положен трёхступенчатый алгоритм: формирование базовых СП, преобразование базовых СП в поля параметров, формирование основного СП.

3. Предложена методика оценивания изменяющихся параметров дважды стохастических моделей МИ, позволяющая улучшить описание реальных изображений по сравнению с АР моделью первого порядка в среднем в **1.7 раза** в смысле среднего квадрата разности яркости.

4. На базе ПГ процедур поиска синтезирован численный метод идентификации параметров, позволяющий получить выигрыш при оценивании параметров модели в **1.5 раза** (в среднем) по сравнению с оцениванием в скользящем окне.

5. Разработанный алгоритм нелинейной векторной фильтрации обеспечивает выигрыш по дисперсии ошибки фильтрации порядка **25–30%** по сравнению с фильтрами для АР изображений.

6. Синтезированы алгоритмы обнаружения точечных и протяжённых сигналов, использующие дважды стохастические АР модели СП. Проведённый сравнительный анализ показал, что выигрыш при обнаружении точечных сигналов по отношению сигнал/шум на уровне вероятности правильного обнаружения, равной 0.5, составляет порядка **10%** по сравнению с алгоритмами, использующими в основе механизма оценивания обычные АР модели. Выигрыш по вероятности правильного обнаружения протяженных сигналов при единичном отношении сигнал/шум составляет порядка **10–20%** и зависит от параметров моделей.

7. Разработан пакет программ для исследования адекватности предложенных моделей и эффективности алгоритмов их обработки на ЭВМ на основе статистического моделирования. Разработанное программное обеспечение может быть непосредственно использовано при решении различных прикладных задач обработки последовательностей МИ: при

обработке данных ДЗЗ, при навигации и позиционировании автономного транспортного средства, в робототехнике, медицине и т.д.

Основные результаты диссертации изложены в следующих публикациях

В изданиях из списка ВАК РФ:

1. Васильев К. К. Оценивание параметров дважды стохастических случайных полей / К. К. Васильев, В. Е. Дементьев, Н. А. Андриянов // Радиотехника, 2014, №7. - С. 103-106.

2. Vasil'ev K. K., Dement'ev V. E., Andriyanov N. A. Doubly stochastic models of images // Pattern Recognition and Image Analysis. January 2015. V. 25(1). - P. 105-110.

3. Васильев К. К. Анализ эффективности оценивания изменяющихся параметров дважды стохастической модели / К. К. Васильев, В. Е. Дементьев, Н. А. Андриянов // Радиотехника, 2015, №6. - С. 12-15.

4. Васильев К. К. Исследование точности обнаружения и распознавания сигналов простейших геометрических форм на фоне дважды стохастической модели / К. К. Васильев В. Е. Дементьев, Н. А. Андриянов // Вопросы радиоэлектроники, серия Техника телевидения, 2015 г., №6 (23). - С. 67-71

5. Vasil'ev K. K., Dement'ev V. E., Andriyanov N. A. Application of mixed models for solving the problem on restoring and estimating image parameters // Pattern Recognition and Image Analysis. January 2016. V. 26(1). - P. 240-247.

6. Васильев К. К. Обнаружение протяженных сигналов на фоне дважды стохастических изображений / К. К. Васильев, В. Е. Дементьев, Н. А. Андриянов // Радиотехника, 2016, №9. - С. 23-27

В других изданиях:

7. K. Vasiliev, V. Dementiev, N. Andriyanov Twice stochastic models of images // The 11th International Conference «PATTERN RECOGNITION and IMAGE ANALYSIS: NEW INFORMATION TECHNOLOGIES» (PRIA-11-2013). Samara, the Russian Federation. 2013.V.1. - P. 334-337

8. Андриянов Н. А. Идентификация параметров дважды стохастических авторегрессионных моделей случайных процессов / Н. А. Андриянов, К. К. Васильев, В. Е. Дементьев // Доклады 16-й Международной конференции "Цифровая обработка сигналов и ее применение - DSPA-2014". Москва, 2014. - т. 1, С. 109-113

9. Андриянов Н. А. Фильтрация дважды стохастических полей / Н. А. Андриянов, К. К. Васильев, В. Е. Дементьев // Докл. РНТОРЭС им. А.С. Попова. сер. Науч. конф., посвящ. Дню радио. — 2014 № 69.— С.34-36

10. K. Vasiliev, V. Dementiev, N. Andriyanov Application of mixed models to solve the problems of restoration and estimation of image parameters // Proceedings

of the 9th Open German-Russian Workshop on Pattern Recognition and Image Understanding, Koblenz, Germany, 2014. - P. 38-42

11.Андриянов Н. А. Дважды стохастические последовательности изображений / Н. А. Андриянов, К. К. Васильев, В. Е. Дементьев // Доклады 18-й Международной конференции "Цифровая обработка сигналов и ее применение - DSPA-2016". Москва, 2016. - т. 1, С. 307-310

12.Андриянов Н. А. Псевдоградиентные процедуры в задачах оценивания параметров моделей изображений // 26-я Международная Крымская конференция «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии» (КрыМиКо’2016). Севастополь, 4 – 10 сентября 2016 г.: материалы конф. в 2 т. – Севастополь, 2015. – С. 2705 – 2710.

13.Vasiliev K. K., Dementiev V. E., Andriyanov N. A. Filtration and restoration of satellite images using doubly stochastic random fields // 1st International Workshop on Radio Electronics and Information Technologies, REIT 2017; Yekaterinburg; Russian Federation; 15 March 2017. CEUR Workshop Proceedings, Volume 1814, 2017, P. 10-20

14.Андриянов Н.А. Обнаружение аномалий на пространственно-неоднородных многозональных изображениях / Н.А. Андриянов, К.К. Васильев, В.Е. Дементьев // Сборник трудов III международной конференции и молодежной школы "Информационные технологии и нанотехнологии" (ИТНТ-2017) 25-27 апреля, Самара: Новая техника. 2017 - С. 529-534

Свидетельства о регистрации программы для ЭВМ:

15. Свид. 2016616596 Российская Федерация. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ. Цифровая обработка и моделирование авторегрессионных и дважды стохастических случайных полей. / Н. А. Андриянов, К. К. Васильев, В. Е. Дементьев; заявитель и правообладатель ФГБОУ ВПО УлГТУ (RU). - №2016616596; заявл. 19.04.2016; опубл. 20.07.2016, Реестр программ для ЭВМ. - 1 с