

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО ПО ОБРАЗОВАНИЮ

ИЗВЕСТИЯ ВЫСШИХ УЧЕБНЫХ ЗАВЕДЕНИЙ

ПРИБОРОСТРОЕНИЕ

ИЗДАНИЕ ГОСУДАРСТВЕННОГО ОБРАЗОВАТЕЛЬНОГО УЧРЕЖДЕНИЯ
ВЫСШЕГО ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ
«САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
ИНФОРМАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ, МЕХАНИКИ И ОПТИКИ»

Журнал издается с января 1958 г.

ТОМ 52

АВГУСТ 2009

№ 8

СПЕЦИАЛЬНЫЙ ВЫПУСК

ПРИМЕНЕНИЕ ЦИФРОВОЙ ОБРАБОТКИ ИЗОБРАЖЕНИЙ В ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННЫХ СИСТЕМАХ

Под редакцией доктора технических наук, профессора Ю. И. Белоусова

СОДЕРЖАНИЕ

ПРЕДИСЛОВИЕ	5
АППАРАТНАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ АЛГОРИТМОВ ЦИФРОВОЙ ОБРАБОТКИ ИЗОБРАЖЕНИЙ В ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННЫХ СИСТЕМАХ	
Белоусов Ю. И., Фисенко В. Т. Особенности алгоритмов цифровой обработки изображений в оптико-электронных системах нового поколения.....	7
Фисенко В. Т., Вилесов Л. Д., Можейко В. И., Фисенко Т. Ю. Обнаружение маневра объекта и прогнозирование его траектории в телевизионной следящей системе.....	12
Можейко В. И., Обухова Н. А., Тимофеев Б. С., Фисенко В. Т., Фисенко Т. Ю. Телевизионные методы сопровождения объектов в сложных условиях наблюдения	20
Можейко В. И., Фисенко В. Т., Фисенко Т. Ю. Адаптивный метод ранговой многоканальной фильтрации для подавления шумов в цветных изображениях.....	30
Сергунов А. А. Методы коррекции неравномерности чувствительности инфракрасных матричных фотоприемников	38
МОДЕЛИРОВАНИЕ ФОНОЦЕЛЕВОЙ ОБСТАНОВКИ В ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННЫХ СИСТЕМАХ РАЗЛИЧНОГО НАЗНАЧЕНИЯ	
Белоусов Ю. И., Иванов Д. В. Учет характеристик флуктуаций фонового излучения пригоризонтной области моря в алгоритмах обработки сигналов инфракрасных приборов.....	43
Кудрявцев А. С. Система отображения и наблюдения для тренажерного комплекса	49

Шмидт В. К., Галикеев Г. Б., Горбацевич Ф. Ф., Кудрявцев А. С. Моделирование и визуализация локальных областей на поверхности Земли при наблюдении со спутника.....	53
ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ В БИОМЕДИЦИНЕ	
Куприянов А. С. Методы обработки и анализа пупиллограмм.....	58
Смирнов М. З., Пушкарева А. Е. Особенности использования уравнения теплопроводности для моделирования воздействия лазерного излучения на кожу.....	64
Шереметьева Т. А., Малов А. М., Филиппов Г. Н. Обработка изображений и морфометрические измерения объектов в микроскопии.....	68
Малов А. М., Шереметьева Т. А., Филиппов Г. Н., Филиппов В. Г. Компьютерная обработка биомедицинских многоканальных изображений с использованием визуализации меры сходства с эталоном.....	74
SUMMARY	81

SPECIAL ISSUE

APPLICATION OF DIGITAL IMAGE PROCESSING IN OPTIC-ELECTRONIC SYSTEMS

By Edition Yu. I. Belousov, Doctor of Technical Science, Professor

CONTENTS

INTRODUCTION	5
HARDWARE REALIZATION OF DIGITAL IMAGE PROCESSING ALGORITHMS IN OPTIC-ELECTRONIC SYSTEMS	
Belousov Yu. I., Fissenko V. T. Special Features of Digital Processing Algorithms in Optoelectronic Systems of the New Generation.....	7
Fissenko V. T., Vilesov L. D., Mojeiko V. I., Fissenko T. Yu. Maneuver Detection and Object Track Prediction using Television Surveillance System.....	12
Mojeiko V. I., Obukchova N. A., Timofeev B. S., Fissenko V. T., Fissenko T. Yu. Television Techniques of Objects Tracking in Hard Observation Conditions.....	20
Mojeiko V. I., Fissenko V. T., Fissenko T. Yu. An Adaptive Method of Multi-Channel Rank Filtering for Noise Removal in Color Images.....	30
Sergunov A. A. Methods for Correction of Not Uniform Sensivity of Infrared Focal-Plane Arrays.....	38
MODELING OF OBJECTS AND BACKGROUND ENVIRONMENT IN OPTIC-ELECTRONIC SYSTEMS OF VARIOUS PURPOSES	
Belousov Yu. I., Ivanov D. V. An Account for Fluctuation Characteristics of Background Radiation from Near-Horizon Sea Area in Algorithms of Signal Processing for Infrared Instruments.....	43
Kudrjavitsev A. S. Mapping and Supervision System for a Simulating Complex.....	49
Shmidt V. K., Galikeev G. B., Gorbatsевич F. F., Kudrjavitsev A. S. Approaches to Modeling and Visualization of Local Surface Areas Observed from a Satellite.....	53
OPTOELECTRONIC TECHNOLOGIES IN BIOMEDICINE	
Kupriyanov A. S. Methods of Pupillogram Processing and Analysis.....	58
Smirnov M. Z., Pushkareva A. E. On Application of Heat Transfer Equation to Modelling the Effect of Laser Radiation on Human Skin.....	64

Sheremet'eva T. A., Malov A. M., Filippov G. N. Image Processing and Object Morfometry in Microscopy	68
Malov A. M., Sheremet'eva T. A., Filippov G. N., Filippov V. G. Computer Processing of Biomedical Multichannel Images by Visualization of Similarity Measure with Standard Image	74
SUMMARY (перевод Ю. И. Копилевича).....	81

Editor-in-Chief E. B. Yakovlev

ПРЕДИСЛОВИЕ

В разрабатываемых оптико-электронных системах (ОЭС) алгоритмы обработки информации, обеспечивающие оптимальное решение задачи комплекса в целом, должны определять технические особенности построения оптико-электронных каналов и варианты их конструктивного совмещения. Поэтому создание базы алгоритмов как необходимого инструментария для разработки ОЭС нового поколения должно иметь опережающий характер. С такой точки зрения настоящее состояние оптико-электронного приборостроения можно охарактеризовать как период накопления первичных знаний о том, какие требования к алгоритмам обработки телевизионных и тепловизионных изображений выдвигает практика и как отвечают этим требованиям реализованные к настоящему времени алгоритмы. Участвуя в таком процессе, необходимо особенно учитывать необходимость разработки общепринятого способа оценки качества алгоритмов обработки информации, рассматривая эти алгоритмы как обязательную функциональную составляющую ОЭС, в существенной степени определяющую эффективность соответствующих комплексов в целом. Также требуется обеспечивать достоверность тех исходных данных, которые в качестве априорных используются при разработке алгоритмов; следует адаптировать алгоритмы обработки и представления информации, с одной стороны — к условиям работы ОЭС, с другой — к текущим требованиям оператора, принимающего решения более высокого иерархического уровня. Исходя из сказанного требуются конкретно ориентированные фоноцелевые исследования и исследования биофизического плана.

Таковы общие идеи, послужившие основой для объединения статей в настоящем сборнике. Наиболее очевидна направленность статей, относящихся к разработке и аппаратной реализации алгоритмов цифровой обработки телевизионных изображений. Эта обработка нацелена на решение разных задач, но предметом статей в явном виде являются алгоритмы цифровой обработки сигналов от телевизионных или ИК-датчиков. Данную группу статей дополняют материалы, относящиеся к моделированию изображений как способу проверки полезности и эффективности различных вариантов обработки и представления изображений, материалы по обоснованию исходных данных для алгоритмов обработки в форме фоноцелевых моделей и результаты применения оптоэлектронных технологий в биомедицине.

*Доктор технических наук, профессор
Ю. И. БЕЛОУСОВ*

INTRODUCTION

Algorithms of information processing in perspective optics-electronic system (OES) must dictate technical details of optoelectronic channel construction and variants of their design. It necessitates priority development of algorithms as necessary instruments for design of new generation OES. From this point of view, the present stage may be characterized as a period of accumulation of preliminary knowledge on requirements imposed by practical tasks upon algorithms of TV and IR image processing, and how the algorithms now existing meet the requirements. To participate in this process, one has to take into account several principles, the basic one being development of a universally accepted method of estimation of quality of information processing algorithms regarded as an imperative component of the OES which determines to a large extent a system performance as a whole.

Other principles consist in provision of reliability of initial data used as a priori given when the algorithms are developed; in adaptation of data processing and data representation algorithms to the OES operational conditions, on the one hand, and, on the other hand, to current requirements from the system operator who has to reach decisions of a higher hierarchic level. The above principles call for special investigations oriented on environmental problems and for studies of biophysical nature.

The outlined ideas served as a basis for selection of papers included in this issue.

Orientation of papers concerning to development and hardware realization of algorithms for of imaging and processing is quite obvious. The processing is aimed at different tasks, but the common point in the papers is digital processing of signal obtained from television or termovision sensors.

The above group of papers is supplemented by materials related to image simulating as a means for testing and estimation of effectiveness of various methods of processing and representation of images, materials on justification of input data for the algorithms including background and object models, and results of application of optoelectronic processing technique in biomedicine.

*Doctor of Technical Science, Professor
Yu. I. BELOUSOV*

АППАРАТНАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ АЛГОРИТМОВ ЦИФРОВОЙ ОБРАБОТКИ ИЗОБРАЖЕНИЙ В ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННЫХ СИСТЕМАХ

УДК 621.383

Ю. И. БЕЛОУСОВ, В. Т. ФИСЕНКО

ОСОБЕННОСТИ АЛГОРИТМОВ ЦИФРОВОЙ ОБРАБОТКИ ИЗОБРАЖЕНИЙ В ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННЫХ СИСТЕМАХ НОВОГО ПОКОЛЕНИЯ

Представлен подход к обобщению требований к алгоритмам цифровой обработки изображений как к одному из обязательных функциональных элементов обработки сигнала, участвующих в преобразованиях информации в оптико-электронных системах нового поколения. Изложены общие идеи относительно разработки и аппаратной реализации алгоритмов цифровой обработки и синтеза изображений, выработки исходных данных для них в форме фоноцелевых моделей и обоснования методов оценки качества алгоритмов обработки.

Ключевые слова: цифровая обработка изображений, оптико-электронные системы.

Цифровая обработка изображений является одной из наиболее стремительно развивающихся областей знаний. Количество алгоритмов и компьютерных программ цифровой обработки изображений столь велико, что вряд ли можно назвать конкретных авторов наиболее распространенных алгоритмов обработки, например, телевизионных изображений. Зачастую одновременно появляются сообщения о разработке схожих процедур преобразований цифровых массивов, которые в самом общем виде можно отнести к алгоритмам обработки изображений. Учитывая разнообразие целей, методов и аппаратных средств, а также отсутствие общепризнанных количественных критериев качества обработки изображений, следует согласиться с мнением, что „обработка изображений в большей степени прикладная технология, чем теоретическая наука“.

И хотя действительно трудно найти бесспорный количественный критерий качества обработки изображений, необходимость решения практических задач современного оптико-электронного приборостроения заставляет разработчиков создавать или выбирать вполне определенные алгоритмы обработки телевизионных и тепловизионных изображений. Процедура обработки изображения уже не выступает как дополнительная опция (что характерно для оптико-электронных систем, ОЭС, предыдущих поколений), но является непременной составляющей общей процедуры обработки сигнала в цепочке преобразований информации от ее регистрации фотоприемным устройством до предъявления оператору. Так же как и другие основные составляющие ОЭС, „удачная“ обработка изображений может существенно повысить эффективность всей системы, либо, наоборот, свести на нет успех в разработке и конструировании других функциональных узлов. Поэтому практика заставляет оценивать и выбирать алгоритмы обработки изображений исходя из их системной полезности и пригодности.

Целесообразно определить роль и место самих ОЭС среди технических средств получения информации. В общих чертах задача ОЭС состоит в получении такой информации, которая позволила бы оператору делать надежный прогноз развития наблюдаемой ситуации, причем чем больше промежутков времени, на который дан надежный заблаговременный прогноз, тем лучше функционирует система в целом. Количественным критерием эффективности информационной системы может служить *время* такого прогноза, а *надежность* традиционно оценивается вероятностными характеристиками. Время заблаговременного прогноза развития ситуации должно быть больше, чем время, необходимое для принятия решения и выполнения оператором ответных упреждающих действий.

Такой подход годится для медицинских оптико-электронных приборов, для экологических дистанционных обследований и для военного применения ОЭС. Более того, такой подход применим и для большинства других технических средств, поэтому можно сравнивать эффективность различных по физическому принципу приборов, например, радиолокационных, гидроакустических и ОЭС обнаружения, ультразвуковых и тепловизионных приборов медицинской диагностики и т.д. Таким образом, обобщенным критерием эффективности информационных систем, и ОЭС в частности, можно принять *время и надежность прогноза* развития наблюдаемой ситуации или процесса.

Надежность прогноза обеспечивается в первую очередь достоверностью получаемой информации. Речь идет не о количественном (шенноновском) подходе к информации, а о содержательной структуре воспринимаемой оператором информации, которая понятна ему без дополнительной расшифровки, достоверна и не нуждается в перепроверке или уточнениях.

Понятие достоверности интерпретации информации наиболее просто можно представить в количественном виде в задачах, связанных с обнаружением, распознаванием и классификацией объектов, в которых может быть рассчитана или измерена соответствующая вероятность правильного решения задачи на данном иерархическом уровне принятия решений, время или дистанция, на которых такое решение принимается с заданной вероятностью. Более сложная трактовка понятия интерпретации информации присуща задачам, в которых оператор на основе содержательной структуры тепловизионного изображения выбирает один вариант решения из нескольких, и она характерна для медицинских, промышленных и экологических областей применения ОЭС.

В настоящее время повышение достоверности информации, получаемой с помощью современных ОЭС, напрямую связывается с увеличением их чувствительности и разрешающей способности. Однако для некоторых приложений этого уже сейчас недостаточно. В частности, для систем, имеющих несколько каналов, реализация потенциального преимущества (например, в многоспектральных ОЭС), наталкивается на проблему адаптации к текущим условиям приоритетов отличительных признаков, регистрируемых в разных каналах. Чаще всего выход находится в использовании дополнительной информации в виде количественных (радиометрических, фотометрических и др.) данных, которые непосредственным образом включаются в алгоритмы обработки информации.

В области военного применения ОЭС достоверность информации определяется не столько их пороговой чувствительностью, сколько помехозащищенностью, т.е. способностью выделять нужные объекты в присутствии сложных фоновых и организованных помех и маскировки целей. Поэтому прямое наращивание потенциальной пороговой чувствительности и разрешающей способности уже не дает пропорционального прироста эффективности ОЭС, поскольку одновременно возрастает вклад фоновых помех. Обработка изображений в этом случае чаще всего направлена на дискриминацию отображения тех деталей сюжета, которые априорно отнесены к помехам.

Благодаря малоальтернативному характеру принимаемых решений в области военного применения ОЭС существует возможность *количественно* оценивать эффективность обработки изображений вообще или сопоставлять между собой эффективность разных алгоритмов обработки изображений, например, телевизионных или тепловизионных. Критериями сравнения могут выступать либо *время*, требующееся оператору для принятия правильных решений по изображению без обработки и после обработки определенным способом, либо *совокупность вероятностей* правильных и ошибочных решений до и после обработки при прочих равных условиях и при использовании единых тестовых сюжетов. Поскольку исходно получение тепловизионных и телевизионных изображений ориентировано на их восприятие человеком, то для количественной оценки эффективности разных алгоритмов обработки изображений можно использовать все методы экспертных оценок времени и вероятности правильного обнаружения и распознавания тестовых объектов по их телевизионному изображению.

Два направления на пути создания ОЭС нового поколения можно очертить сегодня. Первое связано с расширением физических характеристик оптического поля, регистрируемых и привлекаемых к анализу отличительных признаков целей. Регистрация дополнительного устойчивого отличительного признака может дать качественный выигрыш в достоверности интерпретации получаемой информации. Именно таким путем может быть реализован переход к ОЭС следующего поколения.

Однако прямое наращивание количества объединяемых каналов многоспектральных ОЭС обуславливает столь существенное увеличение нагрузки на оператора, что при традиционных способах обработки и предъявления ему информации потенциальные возможности ОЭС не реализуются. Их эффективность ограничивается неспособностью оператора в течение длительного времени достоверно выделять нужные объекты в присутствии сложных естественных и искусственных помех, особенно при смене приоритета отличительных признаков целей и помех в изменяющихся условиях наблюдения. Преодоление этой проблемы составляет содержание второго направления при формировании облика ОЭС нового поколения.

Для реализации потенциальных возможностей перспективных ОЭС принципиально необходимо освободить оператора от рутинных операций и предъявлять ему необходимую и достаточную совокупность данных и прогнозов, на основании которой он с большей достоверностью принимает решения более высокого иерархического уровня в широком диапазоне изменяющихся условий наблюдения. Статьи [1, 2] в определенной степени описывают практические приемы, направленные на решение этой задачи. Ключевым моментом является процедура измерения скорости перемещения изображения цели в плоскости ее телевизионного изображения. Количественные данные позволяют прогнозировать (краткосрочно) маневры объекта и на основании совпадения или несовпадения результатов прогноза с текущим положением цели выносить решения более высокого уровня — от предварительной классификации до выработки параметров вектора движения цели.

В настоящее время технические возможности создания систем, получающих информацию об окружающей обстановке в разных диапазонах длин волн электромагнитного излучения, опережают теоретическую базу, обосновывающую наиболее эффективное использование этой информации. Современные системы ограничиваются лишь выбором того приоритетного спектрального канала, в котором в данный момент обеспечивается наибольшее отношение полезного сигнала к совокупности внешних и внутренних помех. Однако преимущества совместного автоматического анализа спектральных характеристик оптического поля потенциально значительно шире: он повышает помехоустойчивость многоспектральных ОЭС, позволяет оператору за более короткое время оценивать развитие наблюдаемой ситуации и более надежно прогнозировать ее развитие. Общая идея построения перспективной многоспектральной ОЭС состоит в том, чтобы вести непрерывную автоматическую обработку информации, поступающей по каждому из каналов, оповещать об отклонениях от нормы и

одновременно обеспечивать возможность предъявления оператору исходной „картинки“ от любого из каналов для общей ориентации оператора в текущей обстановке. Результаты автоматической обработки в символьном виде отображаются на мониторах одновременно с традиционным телевизионным/теповизионным изображением наблюдаемой обстановки. За счет этого резко снижается помеховая нагрузка на оператора, но не уменьшается надежность регистрации опасных целей или возникновения внештатных ситуаций. Кроме того, оператор сохраняет пространственную и временную ориентацию, может прогнозировать развитие ситуации. Качественное отличие от ОЭС предыдущего уровня состоит в том, что оператор может достоверно судить о степени возможной угрозы со стороны наблюдаемой цели при изменении условий наблюдения, когда изменяется приоритетность отличительных признаков целей в разных спектральных диапазонах.

Отличительная особенность ОЭС следующего поколения состоит в том, что при прочих равных условиях они позволяют решать более сложные задачи, т.е. принимать решения более высокого иерархического уровня. Если вопрос об обеспечении регистрации изображений, получаемых в разных спектральных каналах, может быть решен прямым конструктивным совмещением поля зрения и оптической оси различных каналов (как, например, в цветном телевидении), то обработка и представление этой информации традиционными способами принципиально не позволяют реализовать потенциальную эффективность ОЭС. Направленность статьи [3] свидетельствует о наличии резервов не только в элементной базе и схемотехнике, но и в области алгоритмов обработки сигналов при борьбе за повышение эффективности ОЭС.

Определяя место и роль процедуры обработки изображений как одной из ключевых функциональных составляющих ОЭС нового поколения, следует сделать вывод, что развитие алгоритмов обработки изображений должно иметь опережающий характер.

В настоящее время не существует общепринятых теоретически обоснованных методов создания алгоритмов обработки и предъявления оператору информации от нескольких спектральных каналов ОЭС с автоматической адаптацией критериев выбора и приоритетности отличительных признаков целей и помех в каждом из спектральных каналов при изменяющихся условиях наблюдения. Поэтому разработка цифровых алгоритмов автоматического распознавания с помощью многоспектральных оптико-электронных систем дистанционного зондирования динамических объектов сложной формы на фоне естественных и организованных помех носит характер экспериментальных поисков.

Оставляя в стороне (совершенно незаслуженно) проблемы творческого характера при разработке алгоритмов, следует обозначить еще три проблемы, несомненно, влияющие на реальное положение дел в данной области. Первая связана с качеством используемых исходных данных относительно тех изображений, которые должны обрабатываться новыми алгоритмами. Поскольку речь идет о перспективных системах, то разработчики алгоритмов не имеют возможности проверять свои решения на „реальных“ натуральных данных. Аналитические модели фоноцелевой обстановки являются редким исключением и не удовлетворяют в полной мере по форме и содержанию разработчиков алгоритмов. В наиболее удачных моделях сделан акцент на физические аспекты формирования оптического поля, и они непригодны для простой формализации.

Вторая проблема связана с количественной оценкой качества алгоритмов обработки изображений, которая позволила бы судить как об эффективности применения данного алгоритма при решении круга конкретных задач, так и сравнивать несколько разных алгоритмов между собой. Возвращаясь к исходной посылке о том, что алгоритмы разрабатываются для новых ОЭС, следует констатировать: в настоящее время не наблюдается опережающего характера создания алгоритмической базы и как необходимого инструмента для этого — способов количественного сравнения между собой разных алгоритмов.

Третья проблема носит комплексный характер, и ее можно было бы в самых общих чертах обозначить следующим образом: „аппаратная реализация разработанных алгоритмов и сроки/процедура/критерии модернизации алгоритмов в реальных ОЭС“. Трудно найти границы необходимой и достаточной избыточности аппаратных средств, рассчитанные на предполагаемую модернизацию и усовершенствование алгоритмов (без замены физических устройств обработки информации).

На решение вопросов, связанных с обозначенными проблемами, направлена другая группа статей настоящего сборника. В статье [4] развивается аналитическая модель ИК-излучения взволнованной поверхности моря. Предшествующие исследования установили существенно негауссов характер закона распределения флуктуаций ИК-излучения пригоризонтной области моря — обстоятельство, которое необходимо учитывать при разработке алгоритмов выделения пороговых сигналов в присутствии фоновых помех. Связь вида и параметров закона распределения флуктуаций фонового излучения с количественно измеряемыми параметрами условий наблюдения входит в совокупность исходных данных при разработке алгоритмов и моделировании работы ОЭС различного назначения.

Моделирование работы систем занимает важнейшее место при создании любых приборов и комплексов. На первоначальном этапе разработки систем нового поколения компьютерное моделирование работы ОЭС является единственным способом оценки эффективности тех или иных технических решений. Поэтому на разработчиков моделей такого рода воздействуют два обстоятельства. С одной стороны, ценность любой модели определяется ее достоверностью (валидностью), и удостовериться в степени соответствия модели реальным процессам можно лишь при сопоставлении с результатами натуральных экспериментов. С другой стороны, сама возможность проведения натурального эксперимента (по определению) имеется только в перспективе. Кроме того, исходные данные для модели получены с помощью технических средств предыдущего поколения, как правило, более грубых по техническим параметрам. Поэтому разработчики должны отчетливо представлять (и уведомлять потребителя) о соотношениях между качественными зависимостями и количественными параметрами, которые можно прогнозировать с помощью используемых моделей функционирования ОЭС.

Непременным требованием является возможность корректировки тех данных, которые могут измениться или уточниться в реальных условиях. Две статьи [5, 6] посвящены описанию законченных программных продуктов, позволяющих в интерактивном режиме исследовать как качественные закономерности особенностей наблюдения морского дна с подводного аппарата, так и поверхности Земли с космического носителя телевизионной аппаратуры. Хотя предметы и методы исследования (моделирования) этих работ различны, их объединяет то, что они позволяют как визуально наблюдать изменяющуюся ситуацию, так и оперировать количественными значениями текущих параметров модели. Последнее позволяет использовать данные модели в качестве составляющих блоков в более крупных моделях.

Таким образом, при всем различии содержания статей настоящего сборника они направлены на достижение общей цели — разработку цифровых алгоритмов автоматической обработки изображений, оперативно адаптирующихся к текущим условиям наблюдения за счет оптимизации выбора критериев принятия решений и приоритетности отличительных признаков целей и помех, обеспечивающих повышение надежности прогнозов развития наблюдаемой обстановки и принятия оператором решений высокого иерархического уровня с большей достоверностью.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Фисенко В. Т., Вилесов Л. Д., Можейко В. И., Фисенко Т. Ю. Обнаружение маневра объекта и прогнозирование его траектории в телевизионной следящей системе // Изв. вузов. Приборостроение. 2009. Т. 52, № 8. С. 12—19.

2. Можейко В. И., Обухова Н. А., Тимофеев Б. С., Фисенко В. Т., Фисенко Т. Ю. Телевизионные методы сопровождения объектов в сложных условиях наблюдения // Изв. вузов. Приборостроение. 2009. Т. 52, № 8. С. 20—29.
3. Можейко В. И., Фисенко В. Т., Фисенко Т. Ю. Адаптивный метод ранговой многоканальной фильтрации для подавления шумов в цветных изображениях // Изв. вузов. Приборостроение. 2009. Т. 52, № 8. С. 30—37.
4. Белоусов Ю. И., Иванов Д. В. Учет характеристик флуктуаций фонового излучения пригоризонтной области моря в алгоритмах обработки сигналов инфракрасных приборов // Изв. вузов. Приборостроение. 2009. Т. 52, № 8. С. 43—49.
5. Шмидт В. К., Галикеев Г. Б., Горбацевич Ф. Ф., Кудрявцев А. С. Моделирование и визуализация локальных областей на поверхности Земли при наблюдении со спутника // Изв. вузов. Приборостроение. 2009. Т. 52, № 8. С. 53—57.
6. Кудрявцев А. С. Система отображения и наблюдения подводных сцен для тренажерного комплекса // Изв. вузов. Приборостроение. 2009. Т. 52, № 8. С. 49—52.

Сведения об авторах

Юрий Иванович Белоусов

— д-р техн. наук, профессор; Центральный научно-исследовательский институт „Комета“, Научно-проектный центр оптоэлектронных комплексов наблюдения, Санкт-Петербург; зам. директора; E-mail: lab6@eoss.ru

Валерий Трофимович Фисенко

— канд. техн. наук, доцент; Центральный научно-исследовательский институт „Комета“, Научно-проектный центр оптоэлектронных комплексов наблюдения, Санкт-Петербург; директор; E-mail: valery@eoss.ru

Рекомендована кафедрой
оптико-электронных приборов

Поступила в редакцию
29.05.08 г.

УДК 621.383

В. Т. ФИСЕНКО, Л. Д. ВИЛЕСОВ, В. И. МОЖЕЙКО, Т. Ю. ФИСЕНКО

ОБНАРУЖЕНИЕ МАНЕВРА ОБЪЕКТА И ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ЕГО ТРАЕКТОРИИ В ТЕЛЕВИЗИОННОЙ СЛЕДЯЩЕЙ СИСТЕМЕ

Рассматриваются методы измерения координат объекта телевизионной следящей системой. Фильтрация ошибок измерения осуществляется с помощью адаптивного фильтра Калмана. Адаптация связана с возможностью маневра объекта в случайный момент времени и возможным последующим его пропаданием и появлением, например, из-за облачного покрова. Маневр объекта обнаруживается по оценкам скорости на выходе фильтра Калмана, адаптация осуществляется путем изменения коэффициентов фильтрации, а исчезновение объекта переводит фильтр в режим прогноза траектории. Синтезированы алгоритмы обнаружения маневра и пропадания цели, оценены динамические и флуктуационные ошибки прогноза траектории, вызванные выходом объекта из зоны затенения.

Ключевые слова: сопровождение при пропадании объекта, адаптивный фильтр Калмана.

При создании телевизионных систем наблюдения актуальной задачей является измерение координат объекта. Измерения всегда сопровождаются ошибками, поэтому оценки координат объекта на выходе телевизионного измерителя поступают на вход фильтра, который осуществляет их фильтрацию. В случае использования фильтра Калмана на его выходе выдается информация о сглаженных координатах цели, их прогнозе на следующий кадр наблю-

дения, а также в зависимости от порядка фильтра — скорость или скорость и ускорение объекта. Теория фильтра Калмана описана в многочисленной литературе, см., например, [1, 2].

Сопровождаемый объект может исчезать из области наблюдения, например, за счет облачного покрова. Но система сопровождения должна продолжать свою работу, прогнозируя траекторию объекта по последним полученным данным об измеренных параметрах движения объекта до момента его появления. Параметры движения объекта могут изменяться (объект совершает маневр), и необходимо за короткое время принять решение о наличии маневра, а фильтр Калмана должен адаптироваться к этим изменениям. Под маневром объекта будем понимать изменение его скорости в случайный момент времени. Маневр необходимо своевременно обнаружить для того, чтобы перестроить фильтр Калмана в соответствии с изменившимися параметрами движения цели.

Известно, что фильтр Калмана определяется рекурсивной процедурой [1, 2]:

$$\hat{\mathbf{x}}_{k+1} = \mathbf{F}\hat{\mathbf{x}}_k + \mathbf{K}_{k+1}(\mathbf{Z}_{k+1} - \mathbf{F}\hat{\mathbf{x}}_k), \quad (1)$$

где $\hat{\mathbf{x}}_k$ — оцениваемый вектор состояния для k -го кадра, размерность вектора определяется порядком фильтра; \mathbf{K}_{k+1} — вектор коэффициентов фильтра; \mathbf{F} — матрица прогноза; \mathbf{Z}_{k+1} — входные данные от измерителя координат, например, для фильтра третьего порядка

$$\hat{\mathbf{x}}_{k+1} = \begin{bmatrix} \hat{x} \\ \hat{v} \\ \hat{a} \end{bmatrix}_{k+1}, \quad \mathbf{K}_{k+1} = \begin{bmatrix} \kappa_1 \\ \kappa_2 \\ \kappa_3 \end{bmatrix}_{k+1}, \quad \mathbf{F} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 0,5 \\ 0 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad (2)$$

\hat{x} , \hat{v} , \hat{a} — соответственно оценки координаты, скорости и ускорения объекта.

Задача прогноза движения объекта решается также с помощью фильтра Калмана. При этом на его вход вместо координат с выхода телевизионного измерителя поступает информация о прогнозируемых координатах (работа фильтра с нулевыми коэффициентами). Прогноз на один кадр наблюдения определяется рекурсивной процедурой

$$\tilde{\mathbf{x}}_{k+1} = \mathbf{F}\hat{\mathbf{x}}_k.$$

Ошибка прогноза определяется ошибкой измерения компонентов вектора состояния на последний кадр наблюдения объекта. Для фильтра третьего порядка вектор ошибок, прогнозируемый на последующий кадр, равен

$$\Delta \mathbf{x}_{k+1} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 0,5 \\ 0 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \varepsilon_{xk} \\ \varepsilon_{vk} \\ \varepsilon_{ak} \end{bmatrix},$$

где ε_{xk} , ε_{vk} , ε_{ak} — соответственно ошибки измерения координаты, приращения координаты (скорости) и приращения скорости (ускорения) для k -го кадра изображения. Операция выполняется рекурсивно до появления пропавшего объекта.

Наличие маневра объекта (цели) приводит к динамическим ошибкам фильтрации, которые существенно влияют на прогноз траектории в случае, если до окончания отработки фильтром динамической ошибки происходит пропадание объекта. Кроме того, существенное влияние на результат прогноза оказывают и флуктуационные ошибки измерения координат телевизионной следящей системой.

Способ решения задачи обнаружения маневра существенно зависит от системы координат, в которой наблюдается движение объекта. Например, если объект движется с постоянной скоростью в декартовой системе координат, то при переходе к сферической системе координат в результате нелинейных преобразований проявляется нелинейность траектории цели как функции времени. Но если угол зрения телевизионного измерителя по азимуту и углу места ограничен областью $\pm 20^\circ$, то с приемлемой для прогноза точностью линейность траектории в

сферической системе сохраняется, так же как и в декартовой системе координат. Поэтому далее маневрирование объекта будем наблюдать в сферической системе координат, т.е. на выходе телевизионного измерителя.

Структурная схема телевизионной следящей системы с адаптивным фильтром Калмана представлена на рис. 1. Координаты объекта через коммутатор поступают на вход фильтра Калмана второго порядка, который работает с малой полосой пропускания для обеспечения заданного диапазона флуктуационной ошибки. При наличии маневра объекта фильтр Калмана переводится в режим третьего порядка, одновременно увеличиваются его коэффициенты, происходит расширение полосы пропускания для скорейшей компенсации динамической ошибки измерения. Поскольку значения коэффициентов матрицы \mathbf{K} зависят от порядка фильтра и номера кадра, то они могут быть вычислены заранее и храниться в памяти вычислителя. Затем после отработки динамической ошибки коэффициенты фильтра плавно уменьшаются до уровня, обеспечивающего заданную флуктуационную ошибку. В случае пропадания объекта на вход фильтра Калмана вместо координат поступают прогнозируемые координаты с выхода фильтра Калмана, что эквивалентно работе фильтра с нулевыми коэффициентами. При этом фильтр Калмана рекурсивно с частотой кадров воспроизводит траекторию объекта.

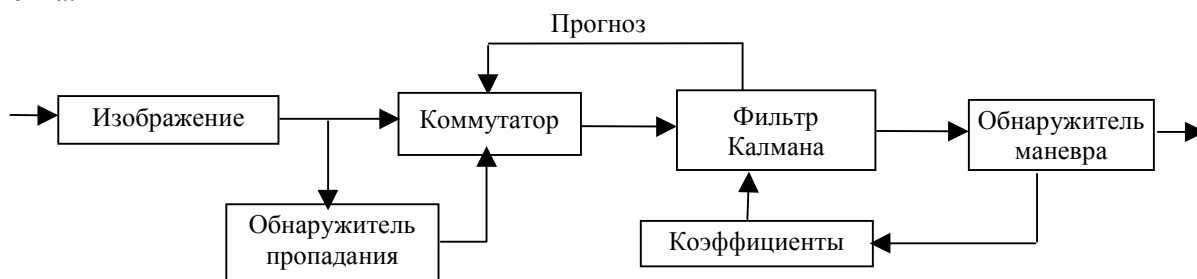


Рис. 1

Фильтр Калмана содержит два канала измерения (фильтрации) координат объекта. Маневр цели может быть обнаружен в одном из каналов или в двух каналах одновременно, поэтому обнаружение маневра необходимо выполнять в каждом из каналов и результаты принятия решения использовать для соответствующего канала.

Ниже задача обнаружения маневра решается для одного из каналов. Пусть на интервале времени длительностью $2T$ наблюдаются отсчеты скорости объекта на выходе фильтра Калмана, следующие с частотой повторения кадров изображения. Весь интервал $2T$ состоит из двух подынтервалов T_1 и T_2 , каждый из которых имеет длительность T .

С учетом ошибок измерения скорость на выходе фильтра Калмана представим в виде векторов—строк \mathbf{v}_1 и \mathbf{v}_2 , состоящих из n компонентов (выборочных данных), соответственно на интервалах T_1 и T_2 :

$$\begin{aligned} \mathbf{v}_1 &= \bar{\mathbf{v}}_1 + \mathbf{w}_1, \quad \mathbf{v}_2 = \bar{\mathbf{v}}_2 + \mathbf{w}_2, \\ \mathbf{v}_1 &= [v_{11}, v_{12}, \dots, v_{1n}], \quad \mathbf{v}_2 = [v_{21}, v_{22}, \dots, v_{2n}], \\ \bar{\mathbf{v}}_1 &= [\bar{v}_{11}, \bar{v}_{12}, \dots, \bar{v}_{1n}], \quad \bar{\mathbf{v}}_2 = [\bar{v}_{21}, \bar{v}_{22}, \dots, \bar{v}_{2n}], \\ \mathbf{w}_1 &= [w_{11}, w_{12}, \dots, w_{1n}], \quad \mathbf{w}_2 = [w_{21}, w_{22}, \dots, w_{2n}], \end{aligned} \quad (3)$$

где $\bar{\mathbf{v}}_1$ и $\bar{\mathbf{v}}_2$ — истинные (равные математическому ожиданию возможной траектории движения), но неизвестные векторы скорости, также состоящие из n компонентов каждый, \mathbf{w}_1 и \mathbf{w}_2 — соответствующие векторы ошибок измерения скорости на выходе фильтра Калмана для интервалов времени T_1 и T_2 .

Рассмотрим пары отсчетов скорости на выходе фильтра Калмана на интервалах T_1 и T_2 . Всего число таких пар n . Очевидно, что пары v_{1k} и v_{2k} ($k=1, \dots, n$) статистически независимы,

так как независимы приращения координат объекта $x_{1(k+1)} - x_{1k} = v_{1(k+1)}$ и $x_{2(k+1)} - x_{2k} = v_{2(k+1)}$ на входе фильтра Калмана. Независимость отсчетов скорости внутри интервалов T_1 и T_2 строго соблюдается через один отсчет и более, так как скорость есть приращение координаты, а приращения $x_{1(k+1)} - x_{1k} = v_{1(k+1)}$ и $x_{1k} - x_{1(k-1)} = v_{1k}$ ($k=1, \dots, n$) статистически зависимы через общий отсчет координаты x_{1k} . Но эта зависимость несущественна: коэффициент корреляции не более 0,5, и совместное распределение пар скоростей представим как произведение распределений отдельных пар. Для гауссовой аппроксимации распределения пар отсчетов скорости можно представить совместную плотность распределения вероятности (функцию правдоподобия) в виде

$$p(\mathbf{v}_1, \mathbf{v}_2 / \bar{\mathbf{v}}_1, \bar{\mathbf{v}}_2) = \prod_{k=1}^n p(v_{1k} / \bar{v}_{1k}) p(x_{2k} / \bar{v}_{2k}) = \frac{1}{(\sqrt{2\pi} \sigma)^{2n}} \exp \left\{ -\frac{1}{2\sigma^2} \sum_{k=1}^n (v_{1k} - \bar{v}_{1k})^2 + (v_{2k} - \bar{v}_{2k})^2 \right\}, \quad (4)$$

где σ — среднее квадратическое значение ошибки (СКО) измерения скорости на выходе фильтра Калмана — известно и для всех отсчетов принято одинаковым. Компоненты — средние значения \bar{v}_{1k} и \bar{v}_{2k} , $k=1, \dots, n$ — неизвестны.

Обозначим вектор параметров $\Theta = (\bar{\mathbf{v}}_1, \bar{\mathbf{v}}_2)$, который принадлежит пространству (области) $\Omega = R_{2n}$ (евклидово пространство $2n$ измерений), и вектор входных данных $(\mathbf{v}_1, \mathbf{v}_2)$, который принадлежит выборочному пространству также $2n$ измерений.

Задача обнаружения маневра объекта сводится к наблюдению за его скоростью на выходе фильтра Калмана на интервалах времени T_1, T_2 и принятию решения о наличии маневра, если скорости на указанных интервалах различаются. Сформулируем задачу обнаружения как проверку гипотез H_N (маневра нет) и H_M (имеет место маневр) относительно векторов скорости на интервалах времени T_1 и T_2 :

$$H_N: \Theta \in \{ \bar{\mathbf{v}}_1 = \bar{\mathbf{v}}_2 \} = \Omega_N; \quad H_M: \Theta \in \{ \bar{\mathbf{v}}_1 \neq \bar{\mathbf{v}}_2 \} = \Omega_M. \quad (5)$$

Области Ω_N и Ω_M образуют все параметрическое пространство неизвестных скоростей:

$$\Omega_N + \Omega_M = \Omega.$$

Так как значения $\bar{\mathbf{v}}_1$ и $\bar{\mathbf{v}}_2$ неизвестны, то измерения на выходе фильтра Калмана $\mathbf{v} = (\mathbf{v}_1, \mathbf{v}_2)$ подчиняются распределениям для вектора параметров Θ

$$\{ p(\mathbf{v} / \Theta) : \Theta \in \Omega \}. \quad (6)$$

Для решения задачи обнаружения необходимо преодолеть параметрическую априорную неопределенность относительно Θ . Для этого используем принцип инвариантности [3], который основан на представлении априорной неопределенности в виде некоторого преобразования g из группы G над входными данными \mathbf{v} . Под воздействием g преобразуются параметры исходного семейства распределений, т.е. преобразование g индуцирует в параметрическое пространство Ω некоторое преобразование g_* . Если совокупность g составляет группу: $\{g\} = G$, то $\{g_*\} = G_*$ есть также группа [3].

Для группы G должны быть выполнены следующие условия:

1) определена операция группового умножения, которая любым двум элементам $g_1, g_2 \in G$ ставит в соответствие элемент

$$g_3 = g_2 g_1 \in G;$$

2) групповое умножение ассоциативно

$$g_1(g_2g_3)=(g_1g_2)g_3;$$

3) существует единичный элемент $e \in G$ такой, что для всех $g \in G$

$$ge=eg=g;$$

4) каждому элементу $g \in G$ ставится в соответствие обратный элемент $g^{-1} \in G$ такой, что

$$gg^{-1}=g^{-1}g=e.$$

Группа G называется группой преобразований, если элементы g являются преобразованиями пространства входных реализаций на себя, и групповое умножение g_2g_1 определяется как последовательные преобразования g_1 и g_2 .

Для использования принципа инвариантности в задаче обнаружения необходимо выполнение следующих условий [3, 4].

1. Семейство распределений $\{p(\mathbf{x}/\Theta) : \Theta \in \Omega\}$ должно обладать свойством симметрии относительно группы G , т.е. каждому элементу $g \in G$ в G_* найдется такой элемент g_* , что $g_*\Theta \in \Omega$ и

$$p(g\mathbf{x}/g_*\Theta) \times \left| \frac{\partial g\mathbf{x}}{\partial \mathbf{x}} \right| = p(\mathbf{x}/\Theta), \quad (7)$$

где $\frac{\partial g\mathbf{x}}{\partial \mathbf{x}}$ — матрица Якоби.

2. Индуцированная группа G_* преобразований g_* в пространстве Ω должна сохранять гипотезы H_N и H_M : $g_*\Theta \in \Omega_i$; $i=N, M$ для всех $\Theta \in \Omega_i$ и $g_* \in G_*$.

Переходя к решению поставленной задачи, отметим, что преобразования сдвига

$$g\mathbf{v}=(\mathbf{v}_1-\Delta, \mathbf{v}_2-\Delta); \quad \Delta \in R_n, \quad (8)$$

где $\Delta=[\Delta_1, \Delta_2, \dots, \Delta_n]$ — вектор сдвигов в пространстве R_n описывает исходную априорную неопределенность относительно скорости. Нетрудно показать, что совокупность преобразований сдвига удовлетворяет условиям группы. Эта группа индуцирует в параметрическое пространство Ω группу G_* преобразований

$$g_*\Theta=(\bar{\mathbf{v}}_1-\Delta, \bar{\mathbf{v}}_2-\Delta). \quad (9)$$

При этом нетрудно проверить выполнение условия симметрии (7) семейства распределений (6) относительно группы G , а индуцированная группа сохраняет гипотезы H_N и H_M , определяемые из (5), для всех $\Theta \in \Omega_i$, $i=N, M$ и $g_* \in G_*$. Таким образом, выполнены необходимые условия, которые позволяют к данной задаче применить принцип инвариантности.

Следующим шагом решения задачи является определение максимального инварианта (МИ) групп G и G_* [4]. В рассматриваемом примере случайный вектор

$$\mathbf{z}=\mathbf{v}_1-\mathbf{v}_2 \quad (10)$$

является МИ группы G преобразований сдвига (8). МИ индуцированной группы G_* равен

$$\Theta_z=\Delta\bar{\mathbf{v}}=\bar{\mathbf{v}}_1-\bar{\mathbf{v}}_2. \quad (11)$$

Затем, следуя инвариантному методу, задачу обнаружения сформулируем как проверку гипотез относительно МИ группы G_* :

$$H_N : \{\Delta\bar{\mathbf{v}}=0\}=\Omega_{Nz}, \quad H_M : \{\Delta\bar{\mathbf{v}} \neq 0\}=\Omega_{Mz}.$$

При принятой гауссовой аппроксимации (4) функция правдоподобия для случайного вектора \mathbf{z} равна

$$p(\mathbf{z} / \Delta \bar{\mathbf{v}}) = \prod_{k=1}^n p(z_k / \Delta \bar{v}_k) = \frac{1}{(\sqrt{2\pi} \sigma)^n} \exp \left\{ -\frac{1}{2\sigma^2} \sum_{k=1}^n (z_k - \Delta \bar{v}_k)^2 \right\}, \quad (12)$$

где $z_k = v_{1k} - v_{2k}$; $\Delta \bar{v}_k = \bar{v}_{1k} - \bar{v}_{2k}$.

Решение принимается в результате сравнения логарифма отношения правдоподобия для МИ с пороговым значением. Поскольку гипотеза H_M относительно Θ_z является двусторонней, в соответствии с критерием Неймана—Пирсона сравнение осуществляется с двумя пороговыми значениями c_1 и c_2 :

$$c_2(\alpha) < \ln l_{\Theta_z} = \ln \frac{p(\mathbf{z} / \Delta \bar{\mathbf{v}} \neq 0)}{p(\mathbf{z} / \Delta \bar{\mathbf{v}} = 0)} < c_1(\alpha), \quad (13)$$

где α — вероятность ложной тревоги. Подставив (12) в (13) и свернув относительно нуля распределение для суммы случайных величин, получим правило принятия решения для порогового значения $c(\alpha)$

$$\left| \sum_{k=1}^n (v_{1k} - v_{2k}) \right| > c(\alpha), \quad (14)$$

где $c(\alpha)$ вычисляется по заданному значению α .

Полученное решающее правило является инвариантным (независимым от неизвестного вектора скоростей), равномерно наиболее мощным и несмещенным [3], т.е. оптимальным в классе инвариантных решающих правил.

Результаты моделирования одного канала телевизионной следящей системы в системе MatLab представлены на рис. 2—4. Смоделирована следующая ситуация: в поле зрения телевизионной системы 6° , что соответствует 712 элементам раstra, объект движется равномерно и прямолинейно со скоростью $0,02^\circ$, или 10 элементов раstra за кадр, затем на 5-й секунде совершает маневр с ускорением 0,2 элемента раstra за кадр. Обнаружение маневра произошло на 5,5-й секунде. На 12-й объект пропадает и вновь появляется на 22-й; СКО измерения координат объекта ε на входе фильтра Калмана равна $0,008^\circ$, что соответствует одному элементу раstra и распределена по нормальному закону (математическое ожидание равно нулю).

На рис. 2, а показана зависимость скорости объекта — истинная (1) и измеренная на выходе фильтра Калмана (2). На рис. 2, б представлены кривые зависимости ускорения объекта от времени (3 — сигнал на выходе обнаружителя маневра). Решение о наличии маневра принято на 5,5-й секунде.

На рис. 3 приведена зависимость ошибки по координате (1) и ошибки прогноза координаты (при потере объекта) от времени в следящем контуре фильтра Калмана. Кривая 2 — зависимость коэффициента κ_1 (первого компонента в векторе \mathbf{K}) фильтра Калмана от времени (см. формулы (1), (2)). Закон изменения коэффициентов позволил ускорить переходный процесс для динамической (неслучайной) ошибки и минимизировать значение СКО. При фильтрации значения коэффициентов фильтра \mathbf{K} плавно уменьшаются с увеличением номера кадра и, достигнув нижней границы, остаются постоянными.

На рис. 4 показана зависимость ошибок прогноза в элементах раstra от нижней границы коэффициентов фильтра Калмана за время пропадания объекта на 10-й секунде. Кривая 1 — зависимость динамической ошибки, 2 — СКО, 3 — сумма модуля динамической и СКО. Таким образом, по горизонтальной оси отложены значения, равные номеру кадра, на котором устанавливается нижняя граница коэффициентов фильтра.

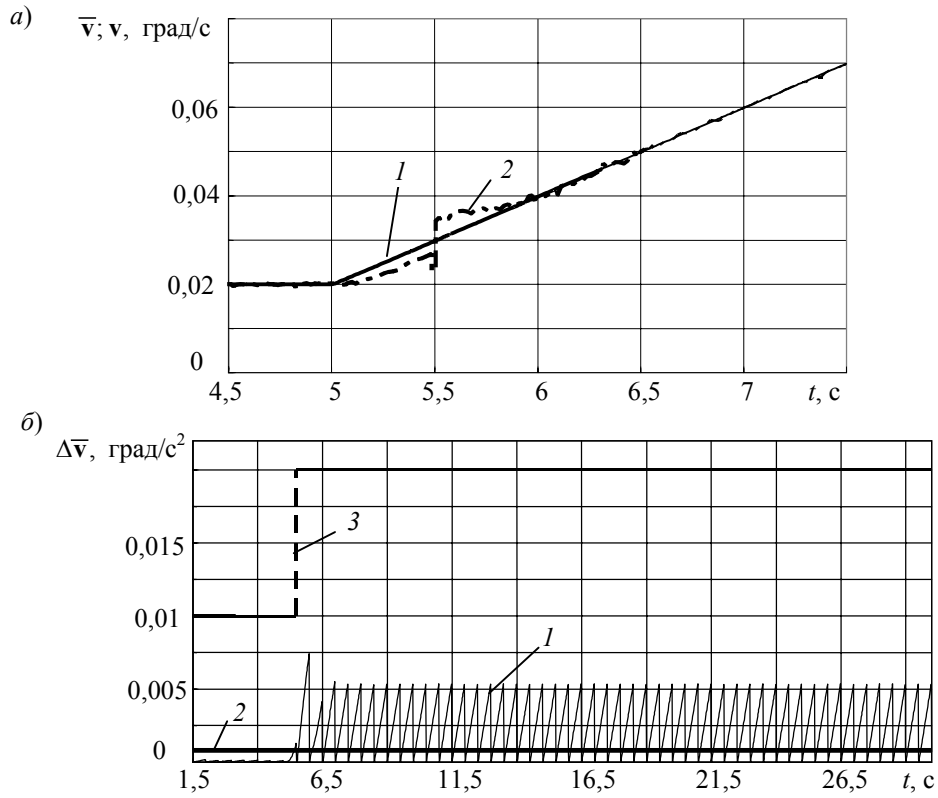


Рис. 2

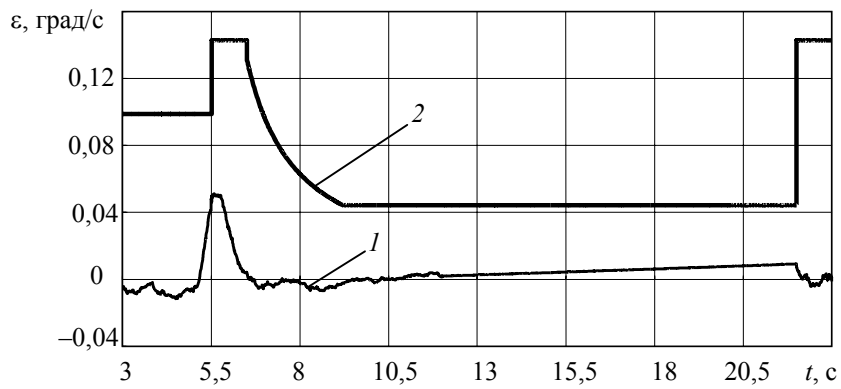


Рис. 3

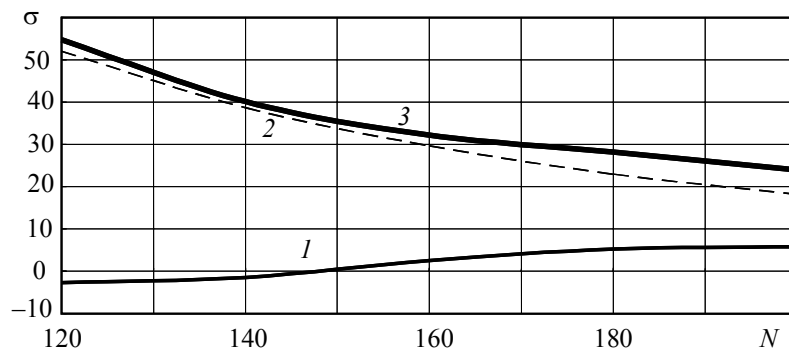


Рис. 4

Закключение. Представлена схема функционирования телевизионной следящей системы с адаптивными фильтрами Калмана. На основе статистического синтеза получен алгоритм обнаружения маневра объекта по его траектории на выходе фильтра Калмана, позволяющий управлять коэффициентами фильтра для минимизации ошибок переходного процесса в результате маневра и достижения необходимых флуктуационных ошибок измерения и ошибок прогнозирования координат в телевизионной следящей системе.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Айфичер Э. С., Джервис Б. У. Цифровая обработка сигналов: практический подход. М.: Вильямс, 2004.
2. Кузьмин С. З. Основы проектирования систем цифровой обработки радиолокационной информации. М.: Радио и связь, 1986. 352 с.
3. Леман Э. Проверка статистических гипотез. М.: Мир, 1979. 341 с.
4. Кокс Д., Хинкли Д. Теоретическая статистика. М.: Мир, 1978. 560 с.

Сведения об авторах

- Валерий Трофимович Фисенко** — канд. техн. наук, доцент; Центральный научно-исследовательский институт „Комета“, Научно-проектный центр оптоэлектронных комплексов наблюдения, Санкт-Петербург; директор;
E-mail: valery@eoss.ru
- Леонид Дмитриевич Вилесов** — канд. техн. наук, доцент; Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения, кафедра радиоэлектроники и телевидения; E-mail: vilesov@aanet.ru
- Владимир Иванович Можейко** — канд. техн. наук, доцент; Центральный научно-исследовательский институт „Комета“, Научно-проектный центр оптоэлектронных комплексов наблюдения, Санкт-Петербург; начальник сектора;
E-mail: Lab2@eoss.ru
- Татьяна Юрьевна Фисенко** — канд. техн. наук, доцент; Центральный научно-исследовательский институт „Комета“, Научно-проектный центр оптоэлектронных комплексов наблюдения, Санкт-Петербург; вед. науч. сотр.;
E-mail: tatiana@eoss.ru

Рекомендована кафедрой
оптико-электронных приборов

Поступила в редакцию
29.05.08 г.

В. И. МОЖЕЙКО, Н. А. ОБУХОВА, Б. С. ТИМОФЕЕВ,
В. Т. ФИСЕНКО, Т. Ю. ФИСЕНКО

ТЕЛЕВИЗИОННЫЕ МЕТОДЫ СОПРОВОЖДЕНИЯ ОБЪЕКТОВ В СЛОЖНЫХ УСЛОВИЯХ НАБЛЮДЕНИЯ

Рассмотрены методы автоматической сегментации и сопровождения нескольких объектов на сложном фоне. Разработаны алгоритмы адаптивного корреляционного сопровождения объекта при условии первоначального целеуказания, а также автоматического захвата и сопровождения многих объектов. В алгоритме корреляционного сопровождения осуществляется адаптация размеров следающего окна, производится учет формы объекта и динамическое накопление сигнала. Задачи автоматической сегментации и одновременного сопровождения нескольких объектов решены на основе векторов движения (оптического потока) и гауссовой модели формы. Приведены результаты экспериментальных исследований предложенных алгоритмов, позволяющие оценить их эффективность и надежность.

Ключевые слова: сегментация, сопровождение нескольких объектов интереса, автоматический захват, словое представление, корреляционные методы сопровождения, векторы движения.

Введение. Задача автоматического сопровождения объектов по последовательности изображений становится все более значимой при разработке телевизионных систем наблюдения. Основные трудности автоматического сопровождения связаны с многообразием форм объектов и условий наблюдения. Можно выделить два подхода к решению задачи обнаружения:

- 1) сегментация изображения с последующим измерением его признаков [1, 2];
- 2) корреляционная фильтрация [3—6].

Широкое распространение получили корреляционные фильтры, основанные на искусственных дискриминантных функциях, введенных Касасентом и др. [4], позволяющие разрабатывать фильтры, устойчивые к искажениям формы, изменению масштаба, повороту и др. К таким фильтрам относятся фильтры максимума средней корреляционной высоты (МАСН) [3]. Импульсная характеристика этих фильтров обеспечивает получение максимального отклика при воздействии на входе усредненного изображения обучающей выборки и подавление шума на выходе фильтра. На основе этих фильтров разрабатываются фильтры DCCF [4], которые обеспечивают максимальные межкластерные расстояния в среднем, при максимальной компактности кластеров. Эти фильтры строятся по априорной информации об объектах на основе обучающих наборов изображений объектов и помех. Разработаны и другие корреляционные фильтры, инвариантные к углу поворота и устойчивые к шумам в изображении [5, 6]. Обучающий набор должен включать выборки изображений всех обнаруживаемых классов объектов и помех. Эффективность корреляционных фильтров уменьшается при значительном отклонении изображений объекта и помех от изображений, включенных в обучающую выборку.

В настоящей работе рассматривается задача сопровождения объекта, выбранного оператором, причем устойчивое сопровождение обеспечивается не только при изменении формы объекта, например, вследствие поворота, но и в случае его заслонения, при наличии шума и помех.

Сегментируют объекты путем объединения в кластеры фрагментов изображения со значимой детальностью и когерентным движением [7]. Рациональным является предположение

о том, что вероятность принадлежности пиксела объекту тем выше, чем ближе пиксел находится к центру кластера. Это обуславливает использование гауссовой модели формы объекта

$$L(\xi) = \exp(-(\xi - \mu)^T \mathbf{K}^{-1} (\xi - \mu) / 2),$$

где $\xi = (x, y)^T$ — вектор координат элемента в плоскости изображения; μ — вектор координат центра тяжести объекта; матрица ковариаций $\mathbf{K} = \mathbf{R}^T(-\varphi) \text{diag} \begin{bmatrix} a^2 & b^2 \end{bmatrix} \mathbf{R}(-\varphi)$, $\mathbf{R}(-\varphi)$ — матрица поворота объекта на угол φ ; a, b — длина большой и малой полуосей эллипса рассеяния, описывающего форму объекта.

Под *энергией движения* понимают изменение яркости пикселей в соседних кадрах видеопоследовательности (производная яркостного сигнала по времени) [8]

$$dI(x, y; t) / dt \approx (I(x, y; t) - I(x, y; t - \Delta t)) / \Delta t,$$

где $I(x, y; t)$ — яркость пиксела с координатами (x, y) в любой момент времени t .

Более информативным для оценки является *поле векторов движения* (оптический поток). Предполагают, что вдоль траектории движения объекта его яркость остается постоянной:

$$\frac{d}{dt} I(x, y; t) = \frac{\partial I}{\partial x} \frac{\partial x}{\partial t} + \frac{\partial I}{\partial y} \frac{\partial y}{\partial t} + \frac{\partial I}{\partial t} = \langle \nabla \mathbf{I}, \mathbf{v} \rangle + \frac{\partial I}{\partial t} = 0,$$

где $\langle \cdot, \cdot \rangle$ — скалярное произведение векторов, $\nabla \mathbf{I} = (\partial I / \partial x, \partial I / \partial y)^T$ — вектор-градиент, $\mathbf{v} = (\partial x / \partial t, \partial y / \partial t)^T$ — вектор оптического потока (вектор движения).

Объединение признаков яркости, детальности и формы с признаком движения позволяет реализовать слоевое представление: каждому объекту и фону сопоставлен свой слой [9]. Это позволяет автоматически сегментировать объекты на сложном фоне, разрешить ситуации окклюзии, слияния и разделения объектов на этапе сопровождения.

В реальных условиях функционирования систем слежения возникает ряд проблем. Необходимо использовать экстраполяцию положения объекта в моменты перекрытия наблюдаемого объекта другими объектами или фрагментами фона. В корреляционных системах основной проблемой является возможность потери объекта на сложном фоне в условиях изменения свойств объекта. В системах слежения, использующих поле векторов движения, необходимо снизить влияние аномальных векторов [7], т.е. векторов, не отражающих реального движения.

Рассмотрим методы решения указанных проблем на примере системы адаптивного корреляционного сопровождения, а также системы сегментации и сопровождения на основе слоевого представления.

Адаптивный корреляционный метод сопровождения объектов. Основными процедурами адаптивного корреляционного метода являются:

- создание бинарной маски эталонного массива и формирование адаптивного окна эталонного массива для измерения межкадрового сдвига;
- измерение координат положения объекта в текущем кадре с помощью корреляционного алгоритма или согласованной с эталоном объекта фильтрации;
- предсказание положения сопровождаемого объекта в кадровой последовательности в случае срыва сопровождения (при заслонении объекта) по экстраполированным данным, полученным на выходе фильтра Калмана.

Метод реализуется следующим образом. Оператор задает первичное окно при захвате и начале автоматического сопровождения объекта, „набрасывая“ строб на объект. Внутри строга формируется контур объекта с помощью модифицированного оператора Собеля. Выполняется пороговое ограничение. Для заполнения контуров и расширения области высоких

пространственных частот используется дилатация. По бинарному изображению формируется окно эталонного массива.

Корреляционный алгоритм выполняется в двумерной пространственной области. Пусть задан эталон $\omega(x, y)$ при $x \in [0, J-1]$, $y \in [0, K-1]$ в окне W_0 . Корреляция используется как средство поиска окна W_0 , содержащего объект, соответствующий эталону на изображении кадра $f(x, y)$ при $x \in [0, N-1]$, $y \in [0, M-1]$. В качестве оценки корреляции используем сумму модулей разностей соответствующих отсчетов яркости изображения текущего кадра и эталонного массива в скользящем окне [10] при $x \in [J/2, N-1-J/2]$, $y \in [K/2, M-1-K/2]$:

$$r(x, y) = \sum_{t \in \omega_{\text{э}}} \sum_{s \in \omega_{\text{э}}} |\omega(s, t) - f(x+s, y+t)|, \quad (1)$$

где $\omega_{\text{э}}$ — бинарная область (маска), соответствующая эталону.

Положение эталона, при котором формируется минимальный отклик, определяет координаты объекта, соответствующего эталону.

В качестве единого критерия качества S используем характеристику подобия остроты минимума поверхности $r(x, y)$ в текущем кадре остроте минимума в кадре эталонного массива для двух координатных направлений x и y :

$$\begin{aligned} S_x &= \left(\min(r(x_0 - \varepsilon_x, y_0), r(x_0 + \varepsilon_x, y_0)) - \tau \right) r_{\max \text{ э}} / \\ &\quad \left(\left(\min(r_3(d - \varepsilon_x, d), r_3(d + \varepsilon_x, d)) - \tau_3 \right) r_{\max} \right) > T_x, \\ S_y &= \left(\min(r(x_0, y_0 - \varepsilon_y), r(x_0, y_0 + \varepsilon_y)) - \tau \right) r_{\max \text{ э}} / \\ &\quad \left(\left(\min(r_3(d, d - \varepsilon_y), r_3(d, d + \varepsilon_y)) - \tau_3 \right) r_{\max} \right) > T_y; S = \min(S_x, S_y), \end{aligned} \quad (2)$$

где $\varepsilon = (\varepsilon_x, \varepsilon_y)$ — смещение по осям координат от центра объекта (x_0, y_0) или эталона, τ , τ_3 — минимальное значение $r(x, y)$ для текущего и эталонного массивов; r_{\max} , $r_{\max \text{ э}}$ — максимальное значение $r(x, y)$ для текущего и эталонного массивов; $\mathbf{T} = (T_x, T_y)$ — пороговые значения.

Для повышения устойчивости сопровождения при изменении размера и формы объекта необходимо формировать адаптивное окно фильтрации. При отсутствии высокочастотной помехи оценка размеров бинарной области не вызывает затруднений. При наблюдении за объектом на сложном фоне необходимо определить границы объекта, не допуская их расширения, вызванного помехой. Для этого формируются две зоны относительно нового положения эталонного массива: зону расширения (охватывает окно эталонного массива) и зону защиты (охватывает зону расширения). Если бинарная область распространяется за пределы области расширения в зону защиты, то в этом направлении размер эталона не изменяется.

При формировании контурного изображения сигнала, как при любом дифференцировании, шумы усиливаются. Поэтому для лучшего формирования контура выполняется динамическое накопление полутонного сигнала изображения [10]. В каждом кадре производится управление накоплением в соответствии с мерой качества S . Поскольку она зависит как от изменения формы объекта, так и от фона, устанавливаются два порога. Первый порог — для разрешения обновления эталона, второй, более низкий, — для запрещения накопления в текущем кадре. Такое управление позволяет найти компромисс между разрешением обновления эталонного массива и сменой эталона в связи с изменением формы и размеров объекта.

Обновление эталонного массива приводит к разбиению последовательности изображений на группы локально квазистационарных последовательностей, что сопоставимо с нормализацией признаков для обеспечения их инвариантности к изменению масштаба объекта, проективным и аффинным преобразованиям.

В каждом кадре производится оценка меры качества и изменения среднего значения амплитуды сигнала объекта, на основании которых принимается решение о переходе к режиму предсказания траектории по фильтру Калмана.

Отличительными особенностями предлагаемого метода сопровождения объектов интереса являются:

- использование при согласованной фильтрации меры качества S ;
- уменьшение влияния помехи при формировании маски вследствие дифференцирования сигнала, накопленного в процессе сопровождения;
- повышение отношения сигнал/шум (ОСШ) за счет усреднения по всей области объекта, а не по его фрагменту (например, блоку), при оценке корреляции;
- использование адаптивного окна фильтрации, при формировании которого учитывается корреляция формы объекта;
- переключение на режим предсказания траектории объекта по данным фильтра Калмана при его заслонении на основании критерия качества.

Автоматическая сегментация и сопровождение объектов на основе слоевого представления. В методе используется совокупность признаков детальности, формы и движения. Это позволяет автоматически захватывать и сопровождать одновременно несколько объектов. В видеокadre тестового сюжета (рис. 1) автоматически определены и „ведутся“ объект с меткой „0“ — корабль,двигающийся справа налево, объект „1“ — корабль,двигающийся слева направо, „45“ — неподвижный корабль у пристани, объекты с метками „2“, „20“, „7“ — фрагменты фона.

Основными операциями метода являются [7]:

- предварительная классификация изображения с целью выделения областей, в которых с высокой вероятностью возможно присутствие объектов;
- сегментация объектов по признакам временной и пространственной корреляции;
- сопровождение объектов на основе определения степени соответствия фрагмента изображения (блока) b объекту g на основе математического аппарата теории нечетких множеств.

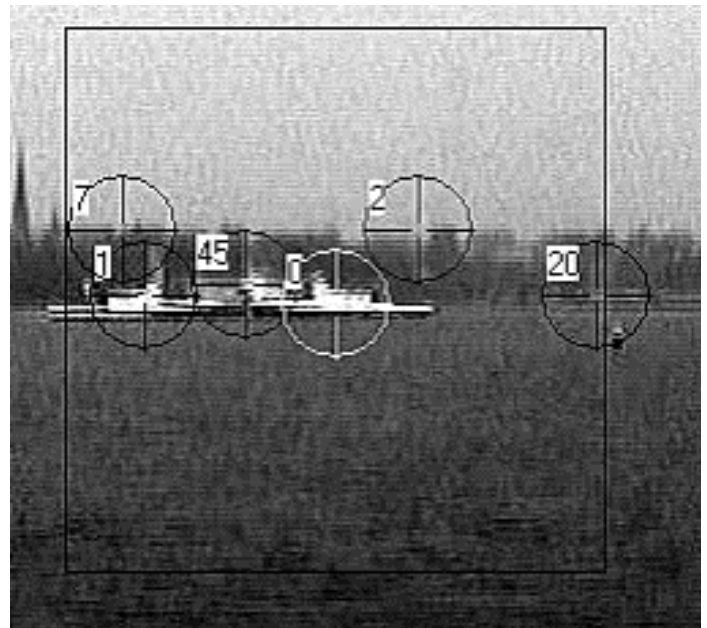


Рис. 1

Чтобы снизить влияние аномальных векторов в оптическом потоке, предложено дополнить двумерные векторы движения третьим компонентом — оценкой его достоверности p_{kl} :

$$\left(v_{kl}^x, v_{kl}^y, p_{kl} \right)^T,$$

где v_{kl}^x, v_{kl}^y — составляющие по направлениям x и y вектора движения для блока изображения с номерами k, l по горизонтали и вертикали.

Проведенные теоретические и экспериментальные исследования позволили предложить функцию достоверности вектора движения

$$p_{kl} = 1 - \exp\left[-\eta D_m^2(k, l)\right],$$

здесь η — параметр модели, численное значение которого найдено на основе экспериментальных данных; модифицированная оценка уровня детальности в блоке

$$D_m = (D(k, l) - D_{\min}) / D_{\min},$$

где собственно уровень детальности

$$D(k, l) = \sum_{j=1}^{N_b} \sum_{i=1}^{M_b} \Delta I(x_k + j, y_l + i),$$

причем ΔI — пространственная производная по яркости; x_k, y_l — координаты левого верхнего угла блока; N_b, M_b — число пикселей в блоке по горизонтали и вертикали соответственно.

Минимальный уровень детальности в блоке, обусловленный шумами

$$D_{\min} = \text{moda}\{D(k, l)\}, \quad k=1, \dots, KK, \quad l=1, \dots, LL,$$

где $KK \times LL$ — число блоков в изображении.

Введенная функция позволяет оставить для дальнейшей обработки блоки изображения с векторами движения, имеющими заданный уровень достоверности. Это существенно снижает влияние аномальных векторов и вычислительную сложность задачи: векторы движения для блоков с низким уровнем достоверности не определяют. Например, уровень достоверности 0,95 исключает из дальнейшей обработки до 90 % блоков [11].

В основу метода сегментации положены признаки детальности, связности и когерентности векторов движения. При жестких требованиях к достоверности векторов движения возникает дефицит блоков, разрешенных для кластеризации. Недостаточное число блоков приводит к неполной сегментации объектов. Качество сегментации оценивают с помощью коэффициента заполнения $k_3 = S_6 / S$, где S и S_6 — площадь проекции изображения объекта на экранную плоскость и блоков, отнесенных к объекту. Для сравнительно больших объектов k_3 может оказаться существенно меньше единицы, а малоразмерные объекты могут быть пропущены.

Следствием снижения уровня достоверности является увеличение числа аномальных векторов. Исправляют положение путем предварительной обработки исходных изображений, а также дальнейшей пространственной и временной фильтрации поля векторов движения. Пространственную фильтрацию реализуют путем вычисления векторной медианы внутри скользящего прямоугольного окна. Временную — на основе многомасштабной межкадровой разности, а также путем построения совокупности треков на этапе сопровождения (многотрековое сопровождение).

Использование многомасштабной межкадровой разности предполагает определение пакета векторов движения в Q кадрах

$$\mathbf{v}_q^0, \quad q=1, \dots, Q-1,$$

где \mathbf{v}_q^0 — вектор, найденный методом совмещения блоков по кадрам t и $t-q$. Для обеспечения соизмеримости полученные векторы пересчитывают: $\mathbf{v}_q = \mathbf{v}_q^0 / q$, где \mathbf{v}_q — q -й приведенный вектор пакета.

В кадре могут присутствовать объекты с различными значениями скорости движения, поэтому полученная на основе пакета совокупность значений векторов движения включает

три типа оценок. Первый тип \mathbf{v}_1 — нулевые векторы, полученные по расположенным близко кадрам пакета при медленном движении (расстояние между кадрами недостаточно для получения значимого вектора). Второй тип \mathbf{v}_2 — значимые корректные значения векторов движения. Третий тип \mathbf{v}_3 — аномальные оценки, полученные в удаленных друг от друга кадрах пакета в случае быстрого движения: объект выходит из зоны поиска. По совокупности \mathbf{v}_1 , \mathbf{v}_2 , \mathbf{v}_3 формируют субпиксельную оценку вектора движения, соответствующую реальному движению [12].

Предложено два варианта получения субпиксельной оценки $\mathbf{v}_s = (v_{sx}, v_{sy})^T$. В первом случае используют минимально отличающийся от других вектор пакета

$$\mathbf{R}_{vq} = \sum_{i=1}^{Q-1} \|\mathbf{v}_q - \mathbf{v}_i\|; \quad \mathbf{v}_s = \arg \min_{\mathbf{v}_q} \{\mathbf{R}_{vq}\},$$

во втором — медиану пакета

$$v_{sx} = v_{((Q-1)/2)x} \text{ при условии } v_{1x} < v_{2x} < \dots < v_{(Q-1)x}$$

$$v_{sy} = v_{((Q-1)/2)y} \text{ при условии } v_{1y} < v_{2y} < \dots < v_{(Q-1)y}.$$

Предложенные процедуры выполняют отдельно для проекций векторов, полученных по горизонтали и вертикали. Использование пакета векторов движения позволяет увеличить число достоверных векторов на 20 %.

Идея многотрекового сопровождения заключается в линейном предсказании на основе векторов движения, полученных в кадре с номером t_f , будущих положений блоков на Q_f кадров вперед, где Q_f — число треков [12]. Положение блока в кадре $t_f + n_f$ $\mathbf{s}_{t_f+n_f} = \mathbf{s}_{t_f} + \mathbf{v}_{t_f} n$, где $n_f = 1, \dots, Q_f$; \mathbf{v}_{t_f} — вектор скорости в кадре t_f ; $\mathbf{s}_{t_f} = (x_{t_f}, y_{t_f})^T$ — координаты центра блока.

После завершения цикла из Q_f кадров анализируют сечение из $Q_f - 1$ предсказанных и полученного в текущем кадре векторов (рис. 2). Векторы подвергают испытанию на сонаправленность (отклонения по направлению не должны превышать 10°) и значения норм (допустимые отклонения по норме не более 0,25 пикселей/кадр). Аномальные векторы исключают из рассмотрения. Местоположение блоков с сонаправленными векторами ограничивают окном 5×5 пикселей. Показано [12], что при совпадении векторов в 25 % кадрах из $Q_f = 12$ треков вероятность правильного обнаружения блоков с верными векторами движения составляет 82 % при практически нулевой ложной тревоге. Эти блоки группируют в кластеры по признаку связности. Каждому кластеру сопоставляют модель объекта, которой присваивают вектор движения, наименее отличающийся от правильно предсказанного значения.

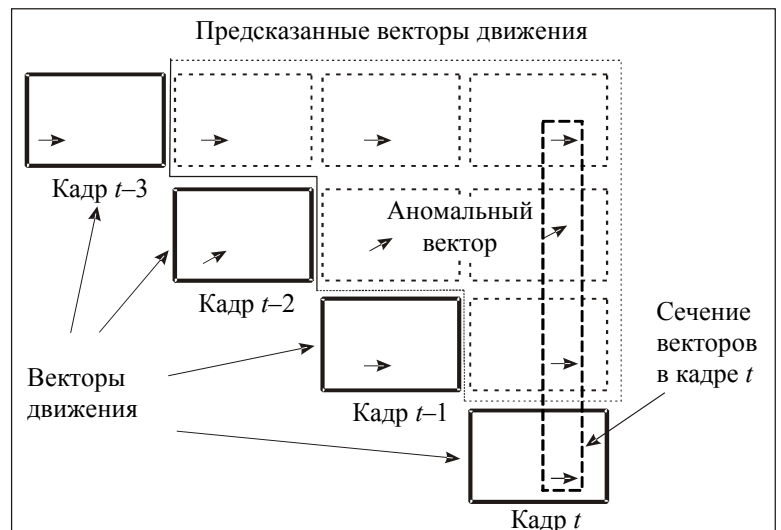


Рис. 2

Экспериментальные исследования выполнены по сериям последовательностей телевизионных кадров, полученных при натуральных испытаниях, а также по синтезированным последовательностям кадров. Размер изображений — 768×576 элементов при прогрессивной развертке и частоте кадров 50 Гц. При синтезе последовательность изображений формировалась из реальной последовательности, на которую аппликативно накладывалось полутоновое изображение объекта в соответствии с его бинарной маской. Для оценки точностных характеристик метода координаты объекта в каждом кадре задавались детерминированной траекторией движения. Для оценки устойчивости сопровождения в шумах на реальные или синтезированные последовательности накладывался нормальный шум с нулевым математическим ожиданием и задаваемым значением среднего квадратического отклонения (СКО) $\sigma_{\text{ш}}$.

Экспериментальные исследования эффективности адаптивного корреляционного метода сопровождения объектов. Оценивались устойчивость сопровождения объекта на сложном фоне при условии изменения его формы, точность определения координат и помехозащищенность метода. Исследования выполнялись как по сериям натуральных испытаний, так и по синтезированным последовательностям для линейных и квадратичных траекторий движения. Для оценки точности сопровождения при линейной траектории в качестве объекта использовано изображение корабля, размер которого составлял $\Delta x = 72$, $\Delta y = 18$ элементов, полезный размах сигнала ΔU равен 130 уровням квантования (при 8-разрядном квантовании). СКО фона $\sigma_{\text{ф}} = 5,66$; длина первой последовательности — 1000 кадров. ОСШ (ψ) оценивалось (в дБ) по формуле:

$$\psi = 20 \lg(\Delta U / \sigma),$$

где $\sigma = \sqrt{\sigma_{\text{ф}}^2 + \sigma_{\text{ш}}^2}$; $\sigma_{\text{ш}}^2$ — дисперсия аддитивного шума.

Вторая последовательность была получена для самолета размером от $\Delta x \times \Delta y = 15 \times 10$ элементов до 50×20 при нелинейной траектории движения; $\Delta U = 52$; $\sigma_{\text{ф}} = 4,03$; длина последовательности — 437 кадров. Третья последовательность была получена для самолета размером от 26×10 элементов до 49×41 при нелинейной траектории; $\Delta U = 78$; $\sigma_{\text{ф}} = 4,57$; длина последовательности — 400 кадров.

Были получены значения СКО координат центра тяжести объекта в каждом кадре относительно априорно заданных при синтезе (первая последовательность) или относительно определенных адаптивным фильтром при сопровождении без шумов (вторая, третья). Значения ОСШ, соответствующие значениям $\sigma_{\text{ш}}$, представлены в табл. 1, 2.

Таблица 1

Значение ОСШ, соответствующее $\sigma_{\text{ш}}$ для первой последовательности

$\sigma_{\text{ш}}$	0	10	20	30	40	50	60
ψ , дБ	27,2	21,1	15,9	12,6	10,2	8,24	6,7

Таблица 2

Значение ОСШ, соответствующее $\sigma_{\text{ш}}$ для второй и третьей последовательности

$\sigma_{\text{ш}}$	0	2	5	10	15	20	25
ψ_2 , дБ	25,8	24,6	21,7	17,25	14	11,6	9,8
ψ_3 , дБ	21	20,4	17,7	13,5	10,4	8,1	6,2

Исследования на различных тестовых видеопоследовательностях показали, что метод позволяет сопровождать объекты с изменяющейся формой на сложном фоне. Работоспособность метода сохраняется при низких значениях ОСШ — до 6—10 дБ.

На рис. 3 приведен график зависимости СКО оценки координат (значки) объекта σ от $\sigma_{\text{ш}}$ для первой последовательности; кривая 1 соответствует ошибке по координате y (σ_y), 2 — по координате x (σ_x). На рис. 4 представлен график зависимости СКО оценки координат объекта σ от $\sigma_{\text{ш}}$: для второй последовательности кривая 1 соответствует σ_x , 2 — σ_y ; для третьей последовательности: кривая 3 — σ_x , 4 — σ_y .

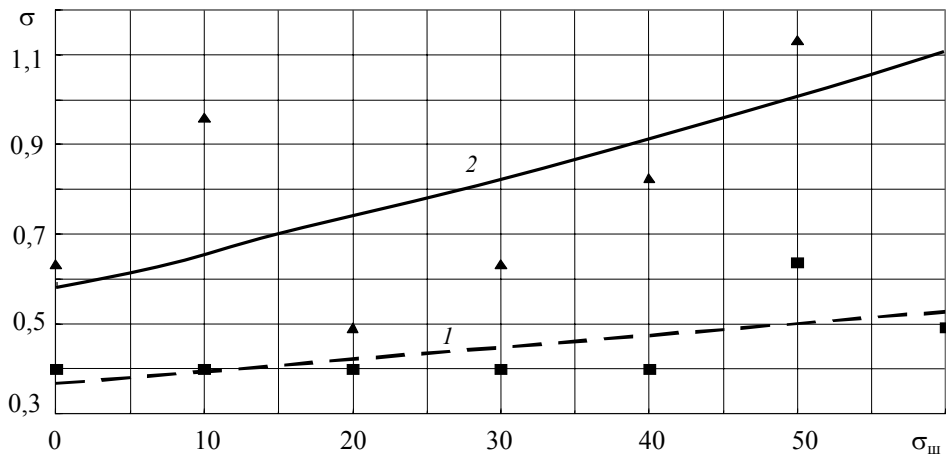


Рис. 3

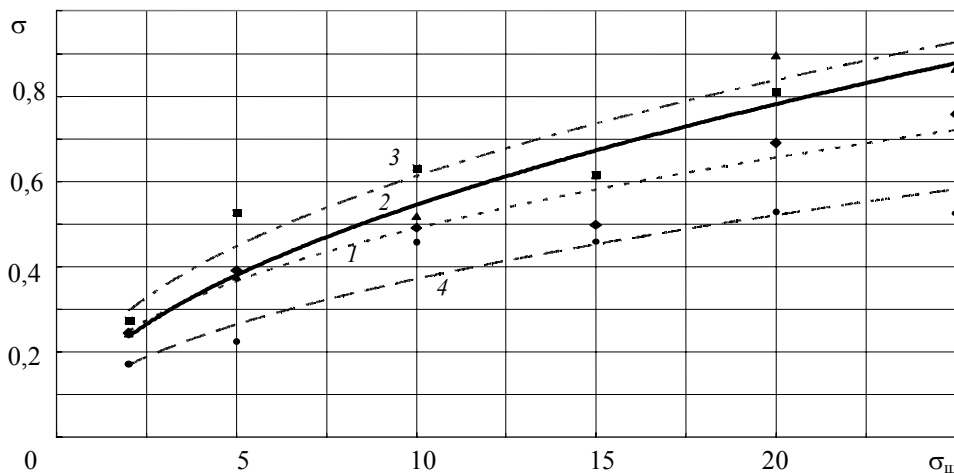


Рис. 4

Полученные данные (см. рис. 3, 4) позволяют сделать вывод о том, что точность определения координат объекта зависит от размера объекта и значения ОСШ. При уменьшении ОСШ до 8 дБ СКО ошибки увеличивается от десятых долей элемента до одного пиксела.

Экспериментальные исследования эффективности автоматической сегментации и сопровождения объектов на основе слоевого представления. Методика оценки соответствует описанной для корреляционного метода с использованием синтезированного видеоряда. На реальных тестовых сюжетах СКО измеренной траектории от регрессионной модели менее 1 пиксела. Все указанные характеристики получены для видеоданных при ОСШ 30 дБ. На основании экспериментальных исследований получены следующие данные, характеризующие метод слоевого представления:

- автоматический захват и одновременное сопровождение нескольких объектов на сложном фоне;
- устойчивое разрешение ситуации окклюзии, слияния и разделения объектов при сопровождении;
- ошибка сегментации $|1-k_3| \cdot 100\%$ для объектов размером до 5 блоков 15—20 %, для объектов большего размера 3—5 %;
- СКО определения центра тяжести при сопровождении объектов — 1,5 пиксела.

По мере снижения значения ОСШ число достоверных векторов движения резко уменьшается. При низких значениях ОСШ выполняют предобработку изображения на основе временного фильтра с импульсной характеристикой Гаусса. Дополнительно увеличивают пространственное усреднение за счет использования блока большего размера. В предельном случае размер блока соответствует размеру объекта интереса. Это уменьшает возможности слоевого представления сцены.

Заключение. Адаптивный корреляционный метод позволяет устойчиво сопровождать объекты при первоначальном целеуказании оператором вплоть до ОСШ 6—10 дБ. Среднее квадратическое отклонение полученной траектории от эталонной не превышает 1 пиксела. Ситуацию окклюзии разрешают за счет движения по предсказанию с использованием для расчета траектории фильтра Калмана. Момент окклюзии определяют по превышению мерой качества S некоторого заранее заданного порога.

В динамических сценах с несколькими быстродвижущимися объектами возможности оператора по наложению стробов ограничены. Слоеое представление обеспечивает автоматический захват и сопровождение одновременно нескольких объектов. Размещение объектов в разных слоях сохраняет возможность сопровождения не перекрытых объектов. Это исключает срыв сопровождения в случае маневра объекта. Эффективность определения векторов движения блоков изображения для слоевого представления заметно снижается при низких значениях ОСШ.

В реальных условиях наблюдения с широким диапазоном значения ОСШ, а также вариациях фоновой помехи для обеспечения устойчивой работы целесообразно использовать комбинацию предложенных подходов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Bal A. and Alam M.S. Automatic Target Tracking in FLIR Image Sequences // Automatic Target Recognition XIV. Proc. SPIE. 2004. Vol. 5426. Bellingham, WA. P 30—35.
2. McBride J. C., Stevens M. R., Eaton R. S., and Snorrason M. Adaptive Infrared Target Detection // Ibid. P. 305—315.
3. Sims S. R. F., Mahalanobis A. Performance Evaluation of Quadratic Correlation Filters for Target Detection, and Discription in Infrared Imagery // Optical Engineering. 2004. Vol 43, N 8. P. 1705—1711.
4. Mahalanobis A., Kumar B. V. K. Vijaya, Sims S.R.F. Distance-classifier correlation filters for multiclass target recognition // Applied Optics. 1996. Vol. 35, N 17. P. 3127—3133.
5. Topiwala P., Casasent D. Correlation-Based Target Detection for Navy's SHARP Sensor Suite // Automatic Target Recognition XIV. Proc. SPIE. 2004. Vol. 5426. P. 15—29.
6. Mahalanobis A., Kumar B. V. K. Vijaya. Optimality of the maximum average correlation height filter for detection of target in noise // Optical Engineering. 1997. Vol. 36, N 10. P. 2642—2648.
7. Обухова Н. А., Тимофеев Б. С. Сегментация объектов в последовательности видеок кадров методами нечеткой логики // Информационно-управляющие системы. 2006. № 3. С. 12—18.
8. Ричардсон Я. Видеокодирование. H.264 и MPEG-4 — стандарты нового поколения. М.: Техносфера, 2005. 368 с.

9. *Hai Tao, Harpreet S. Sawhney, Rakesh Kumar.* Object Tracking with Bayesian Estimation of Dynamic Layer Representations // IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence. 2002. Vol. 24, N 1. P. 75—88.
10. *Fissenko V. T., Mojeiko V. I., Zelentsov V. N.* Dynamic Accumulation Technique Increases the Underwater Viewing Distance // Proc. Int. Conf. "Current Problems in Optical of Natural Waters". St. Petersburg, Russia, 2001. P. 119—121.
11. *Обухова Н. А.* Априорная оценка векторов оптического потока (векторов движения) // Изв. вузов. Радиоэлектроника. 2006. № 3. С. 30—36.
12. *McCandless J. W.* Detection of aircraft in video sequences using a predictive optical flow algorithm // Optical Engineering. 1999. N 3. P. 523—530.

Сведения об авторах

- Владимир Иванович Можейко** — канд. техн. наук, доцент; Центральный научно-исследовательский институт „Комета“, Научно-проектный центр оптоэлектронных комплексов наблюдения, Санкт-Петербург; начальник сектора; E-mail: Lab2@eoss.ru
- Наталья Александровна Обухова** — канд. техн. наук, доцент; Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения, кафедра радиоэлектроники и телевидения; E-mail: natalia172419@yandex.ru
- Борис Семенович Тимофеев** — д-р техн. наук, профессор; Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения, кафедра радиоэлектроники и телевидения; E-mail: ipt k23@aanet.ru
- Валерий Трофимович Фисенко** — канд. техн. наук, доцент; Центральный научно-исследовательский институт „Комета“, Научно-проектный центр оптоэлектронных комплексов наблюдения, Санкт-Петербург; директор; E-mail: valery@eoss.ru
- Татьяна Юрьевна Фисенко** — канд. техн. наук, доцент; Центральный научно-исследовательский институт „Комета“, Научно-проектный центр оптоэлектронных комплексов наблюдения, Санкт-Петербург; вед. науч. сотр.; E-mail: tatiana@eoss.ru

Рекомендована кафедрой
оптико-электронных приборов

Поступила в редакцию
29.05.08 г.

В. И. МОЖЕЙКО, В. Т. ФИСЕНКО, Т. Ю. ФИСЕНКО

АДАПТИВНЫЙ МЕТОД РАНГОВОЙ МНОГОКАНАЛЬНОЙ ФИЛЬТРАЦИИ ДЛЯ ПОДАВЛЕНИЯ ШУМОВ В ЦВЕТНЫХ ИЗОБРАЖЕНИЯХ

Представлен адаптивный метод пространственной фильтрации цифрового цветного изображения, предназначенной для подавления импульсных шумов изображения. Метод основан на применении многоканальной ранговой (медианной) векторной фильтрации в двух окнах разного размера. Уменьшение аддитивного шума обеспечивается выбором канала с минимальной дисперсией сигналов отсчетов. Сохранение малоразмерных деталей и границ объектов изображения обеспечивается выбором минимального размера окна. Подавление импульсной помехи и сохранение характеристик цветности достигается подстановкой вектора отсчета, отстоящего на минимальное расстояние от оценки вектора медианы.

Ключевые слова: векторные фильтры, многоканальная обработка изображений, импульсная помеха, медианная фильтрация.

Введение. Медианный фильтр основан на порядковых статистиках и представляет собой нелинейный пространственный фильтр. Медианная фильтрация выполняется в скользящем окне. Значения яркости упорядочиваются по возрастанию (или убыванию), определяется значение 50 % перцентиля (медианы), и полученное значение отклика фильтра помещается в элемент изображения, координаты которого соответствуют центру окна фильтрации.

Известно, что медианные фильтры подавляют импульсные шумы. К таким шумам относится и шум типа „соль и перец“ [1], отсчеты которого имеют значения, соответствующие максимальному („соль“) и минимальному („перец“) уровням квантования в сигнале изображения. Цифровое цветное телевизионное изображение, представленное в *RGB* цветовом координатном пространстве, является трехкомпонентным двумерным сигналом. Каждый элемент цифрового растрового цветного изображения размера $L \times M$ может быть представлен вектором

$$C(l,m)=[R(l,m),G(l,m),B(l,m)],$$

где l — номер строки, m — номер столбца, $l \in [0, L-1]$; $m \in [0, M-1]$; $R(l,m)$, $G(l,m)$, $B(l,m)$ — компоненты элемента с координатами раstra (l,m) . При создании векторных медианных фильтров вводят меру расстояния между векторами [2]. Функция расстояния между двумя векторами с номерами i и j в пространстве *RGB* в общем виде задается формулой

$$d_{ij} = \|C_i - C_j\|_\gamma = \left(\sum_{n=1}^3 |C_i^n - C_j^n|^\gamma \right)^{1/\gamma},$$

где n — номер компонента вектора, γ — характеристика метрики.

В случае евклидова расстояния (метрика L_2 , $\gamma=2$)

$$d_{ij} = \|C_i - C_j\| = \sqrt{(R_i - R_j)^2 + (G_i - G_j)^2 + (B_i - B_j)^2}. \quad (1)$$

Множество входных векторов в скользящем окне фильтрации обозначим

$$W = \{C_0, C_1, \dots, C_{p-1}\}, \text{ где } C_i = (R_i, G_i, B_i), i \in [0, p-1].$$

Расстояние для j -го вектора оценивается как сумма расстояний от j -го вектора до каждого из векторов в окне:

$$D_j = \sum_{i=0}^{p-1} d_{ij}. \quad (2)$$

Последовательность расстояний $\{D_0, D_1, \dots, D_{p-1}\}$ упорядочивают по неубыванию, и в качестве отклика фильтра используют вектор C_i , соответствующий минимальному расстоянию $D_i = \min_j \{D_j\}$. Медианные векторные фильтры отличаются мерой расстояний и весовыми функциями, используемыми для взвешивания суммы в (2).

Применение медианного фильтра приводит к подавлению верхних частот изображения, вызывая размытие краев и текстур. В связи с этим в настоящее время получают все большее развитие схемы адаптивной фильтрации [1, 3], которые позволяют изменить импульсную характеристику фильтра в зависимости от обрабатываемого изображения. Один из алгоритмов адаптивной медианной фильтрации (АМФ) выполняется следующим образом [1]. В окне фильтрации оцениваются минимальное I_{\min} , максимальное значение I_{\max} и медиана I_{med} . Фильтрации подвергается только тот центральный элемент окна I_{xy} , для которого выполняется условие

$$A_1 = I_{\text{med}} - I_{\min}; \quad A_2 = I_{\text{med}} - I_{\max}; \quad A_1 > 0 \text{ и } A_2 < 0,$$

т.е. величина медианы больше минимального и меньше максимального значений в окне и не выполняется условие

$$B_1 = I_{xy} - I_{\min}; \quad B_2 = I_{xy} - I_{\max}; \quad B_1 > 0 \text{ и } B_2 < 0,$$

т.е. величина сигнала в центре окна больше минимального и меньше максимального значений в окне.

Применение такого фильтра позволяет удалить биполярную импульсную помеху, обеспечить сглаживание шумов и уменьшить подавление верхних пространственных частот в изображении.

Предлагаются переключающиеся медианные фильтры, схемы которых основаны на предварительном обнаружении искаженных помехой элементов [4, 5]. Фильтрации подвергаются только те элементы изображения, которые искажены шумом. В телевизионных системах сигнал импульсной помехи может иметь любую амплитуду. При этом наибольший интерес представляют те изображения, в которых число элементов, содержащих сигнал импульсной помехи, составляет до 10 % изображения. В этом случае она не формирует выраженного пика гистограммы распределения компонентов сигнала, что затрудняет определение отсчетов, содержащих помеху. Так, например, в изображении „Lena“ компоненты G и B не содержат отсчетов, равных 0 и 255, а в R компоненте всего 112 максимальных отсчетов и ни одного минимального. Наложение импульсной помехи типа „соль и перец“ позволяет простым квантованием определить эти элементы. В этом случае возможно применение самых разных методов интерполяции сигнала, не обязательно медианной фильтрации.

В настоящей работе предложен метод векторной медианной фильтрации (ВМФ), позволяющий подавить импульсную помеху неизвестной амплитуды, обеспечивающий сохранение информации о контурах объектов, которая является наиболее важным признаком при решении задач обнаружения объектов.

Векторная медианная фильтрация. Покомпонентная фильтрация в RGB -пространстве приводит к изменению цветовых характеристик изображения (тона и насыщенности). Это связано с тем, что при независимой фильтрации компонентов получаются некоторые новые значения этих компонентов. Значения медианы каждого компонента принадлежат одному из элементов окна:

$$\begin{aligned} & C_m (R_m, G_m, B_m), \\ & (R_0, R_1, \dots, R_{p-1} : R_m), \quad R_0 \leq R_1 \leq \dots \leq R_{p-1}; \quad m = p/2; \\ & (G_0, G_1, \dots, G_{p-1} : G_m), \quad G_0 \leq G_1 \leq \dots \leq G_{p-1}; \quad m = p/2; \end{aligned} \quad (3)$$

$$(B_0, B_1, \dots, B_{p-1} : B_m), B_0 \leq B_1 \leq \dots \leq B_{p-1}; m = p/2.$$

Результирующий вектор C_m может совпадать с элементом окна только в частном случае. Следовательно, при фильтрации элемент изображения заменяется некоторым другим с новыми характеристиками цветности, что эквивалентно генерированию некоторого цветного шума.

Поясним это на примере рис. 1. На нем представлены синтезированное тестовое изображение (*a*) и изображения на выходе линейного усредняющего и медианных фильтров (*б* — полученное после медианной фильтрации фильтром 3×3 (формула (3)); *в* — после линейной фильтрации 3×3 ; *г* — после каскадной многоканальной медианной фильтрации). Для сравнения характеристик цветности выполним преобразование цветового координатного пространства RGB в пространство Стрикленда — HLS [6]. Компонент тона (H -hue) исходного изображения (рис. 1, *a*) принимает семь дискретных значений: 0, 169, 77, 104, 40, 122, 125. После медианной фильтрации 5×5 , выполняемой в соответствии с формулой (3), компонент тона принимает 16 значений: 0, 169, 77, 104, 122, 125, 126, 114, 115, 137, 109, 45, 46, 105, 35, 32. После низкочастотной фильтрации 5×5 тоновый компонент имеет 238 значений, а при каскадной многоканальной фильтрации общее число составляющих тонового компонента и их значения совпадают со значениями тестового изображения. При подавлении шума в изображении наряду с задачей сохранения границ объектов и малоразмерных деталей изображения ставится задача сохранения цветовых характеристик изображения. В связи с этим предпочтительным представляется применение векторной медианной фильтрации. Оценка (2) требует большого объема вычислений. Оптимизация этого алгоритма достигается за счет того, что при $\gamma=2$ медианой является вектор, отстоящий на минимальное расстояние от среднего вектора $C_{cp}(R_{cp}, G_{cp}, B_{cp})$ [7], для которого

$$R_{cp} = \frac{1}{P} \sum_{i=0}^{p-1} R_i, \quad (4)$$

где p — общее число элементов в окне.

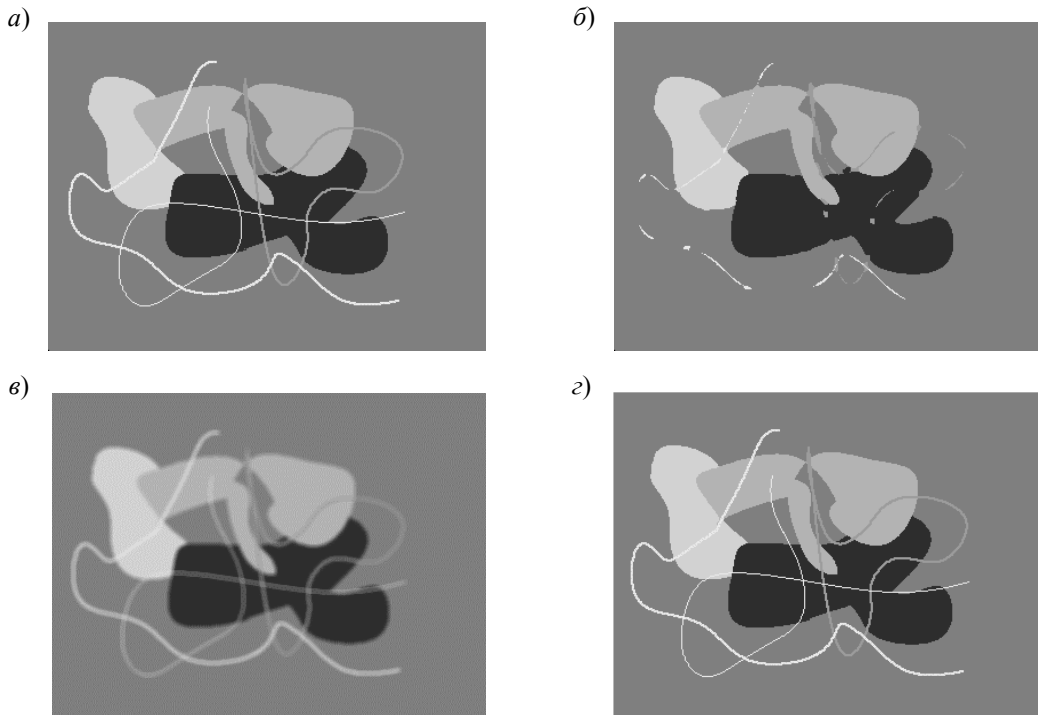


Рис. 1

В соответствии с формулой (4) получим оценки математических ожиданий RGB -компонентов в окне, найдем координаты вектора. Затем оценим расстояния (d) от каждого

элемента окна до вектора C_{cp} в соответствии с формулой (1) и расположим их в неубывающем порядке $d_0 \leq d_1 \leq \dots \leq d_{p-1}$

$$C_m(R_m, G_m, B_m): d_0. \quad (5)$$

Медианой будет вектор C_m из множества входных векторов, расстояние до среднего значения для которого минимально и равно d_0 . Однако такой метод не обеспечивает необходимой степени сохранения границ объектов.

Многоканальная векторная медианная фильтрация (ММФ). Предлагается производить каналную медианную фильтрацию. Каналы определяются как последовательность координат прямых линий, проходящих через центральный элемент окна под углом от 0 до 180°. Число каналов ограничивается дискретностью раstra. Назовем эти последовательности координат апертурами.

На рис. 2 представлены примеры апертур для размеров 3×1 и 5×1 , совмещенные в одном окне размером 5×5 относительно центрального элемента. В настоящей работе исследовано 12 каналов для апертуры 3×1 и 35 каналов для апертуры 5×1 . Сохранение информации о границах и текстурах достигается за счет того, что из всех каналов выбирается тот, в котором дисперсия минимальна. Откликом фильтра является вектор медианы канала с минимальной дисперсией. Вектор медианы определяется как вектор в канале, отстоящий от вектора C_m , полученного в соответствии с (3), на минимальное расстояние:

$$\min_{k \in [1, N_w]} \varepsilon_{wk} = \sum_{j \in [1, p_w]} \|C_j - C_{mk}\|, \quad (6)$$

где k — номер канала, w — номер окна фильтрации, N_w — число каналов в i -м окне, p_w — размер апертуры, C_{mk} — оценка C_m в k -й апертуре.

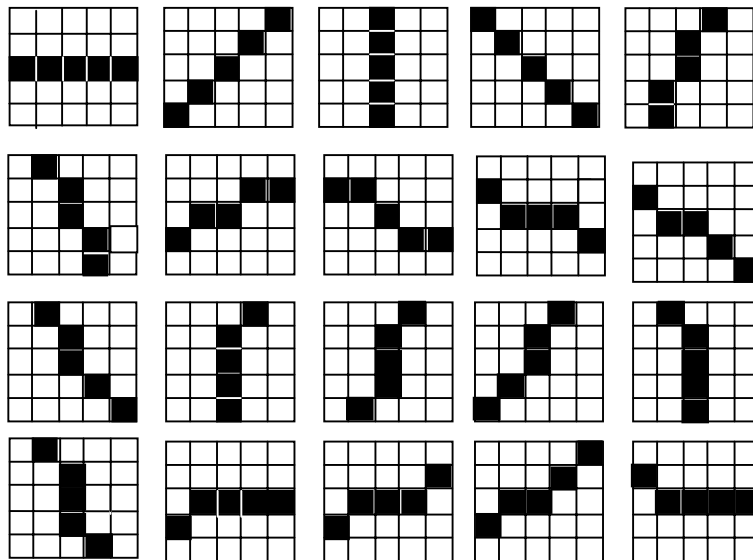


Рис. 2

Метод каскадной многоканальной медианной векторной фильтрации (КММФ). При медианной фильтрации подавляется помеха, размер которой меньше половины размера апертуры, исходя из этого выбираются два размера окна. В канале с минимальной дисперсией, выбранном на основании критерия (6), производится оценка медианы $C_{mk} = (R_{mk}, G_{mk}, B_{mk})$ для каждого окна. Производится сравнение расстояния между оценками медиан в каналах двух окон с некоторым пороговым значением $T = (R_t, G_t, B_t)$. Если расстояние больше него, то в качестве выходного элемента фильтра выбирается вектор из

апертуры большего размера W_2 , находящийся на минимальном расстоянии от медианы в этом канале. Если расстояние между медианами меньше порога, то оценивается расстояние между центральным элементом апертуры и оценкой медианы, полученной в окне меньшего размера W_1 . Если это расстояние меньше порога, то выходным элементом фильтра является центральный элемент апертуры, в противном случае — элемент апертуры, отстоящий на минимальное расстояние от медианы. В качестве порогового значения T выбирается ожидаемое среднее квадратическое отклонение (СКО) аддитивного шума

$$C_{\text{вых}} = \begin{cases} \arg \min_{C_i \in W_2} \|C_i - C_{m2}\|, \|C_{m1} - C_{m2}\| > T, \\ C_c, \|C_c - C_{m1}\| \leq T, \\ \arg \min_{C_i \in W_1} \|C_c - C_{m1}\|, \|C_c - C_{m1}\| \geq T, \end{cases} \quad (7)$$

где C_c — центральный элемент апертуры, $C_{\text{вых}}$ — выходной элемент фильтра, C_{m1} — медиана, рассчитанная по формуле (5) в апертуре меньшего размера, C_{m2} — медиана, рассчитанная по формуле (5) в апертуре большего размера.

Разработанный метод фильтрации обеспечивает лучшее сохранение границ, так как использует оценку медианы вдоль границы объекта. Подавление малоразмерных деталей определяется размером апертуры окна меньшего размера. Подавление импульсной помехи производится за счет медианной фильтрации в окне большего размера. Поскольку выходными элементами фильтра являются элементы исходного изображения, то такая фильтрация не приводит к появлению дополнительных составляющих цветных шумов в изображении.

Результаты экспериментальных исследований. Выполнены экспериментальные исследования методов медианной фильтрации на примерах синтезированных и известных цветных цифровых тестовых изображений. Моделирование шума и импульсной помехи выполнялось следующим образом. В качестве шума использовались реализации случайного процесса, распределенного по нормальному закону с параметрами $(0, \sigma_{\text{ш}})$. Сигнал шума $\mathbf{n}(l, m)$ накладывался независимо на каждый компонент. Импульсная помеха \mathbf{I} принимала некоторое задаваемое значение. Координаты отсчетов, содержащих импульсную помеху, выбирались по равномерному закону распределения. Число отсчетов определялось задаваемой вероятностью помехи P в изображении. Сигнал изображения генерировался в соответствии с уравнениями:

$$C(l, m) = \begin{cases} \mathbf{S}(l, m) + \mathbf{n}(l, m), & (1-P), \\ \mathbf{I}(l, m), & P, \end{cases} \quad (8)$$

где $\mathbf{S}(l, m)$ — исходное значение сигнала изображения.

Качество фильтрации оценивалось по объективному критерию СКО сигналов ошибок компонентов изображения ($\sigma_R, \sigma_G, \sigma_B$ соответственно). Изображение ошибок формировалось как разность изображения, полученного на выходе фильтра, и исходного (незашумленного) изображения.

Результирующее значение СКО было получено в соответствии с формулой

$$\sigma = \sqrt{\sigma_R^2 + \sigma_G^2 + \sigma_B^2}. \quad (9)$$

Кроме того, оценивалось пиковое отношение сигнал/шум. В случае использования восьмиразрядного квантования его значение вычисляется по формуле:

$$\psi = 20 \lg(255 / \sigma). \quad (10)$$

Получим качественную оценку потенциальной точности рассмотренных алгоритмов. В табл. 1 представлена оценка потенциальной точности алгоритмов медианной фильтрации,

полученная для изображения, содержащего в большей степени низкочастотную информацию. Использовано портретное изображение „Лена“.

Таблица 1

Фильтр	σ_R	σ_G	σ_B	σ	ψ , дБ
КММФ	1,05	1,47	1,55	2,38	40,6
АМФ 3×3	2,23	3,33	4,37	5,9	32,67
ММФ 3×1	2,88	3,8	4,04	6,24	32,2
ММФ 5×1	3,96	5,3	5,53	8,62	29,4
МФ 3×3	6,82	9,15	8,8	14,41	24,95
МФ 5×5	7,52	10,25	9,67	15,97	24,1

Из табл. 1 видно, что потенциально наименьшие ошибки преобразования можно получить при использовании АМФ и КММФ. Результаты исследования эффективности подавления импульсной помехи для изображения „Brick Wood“, из тестовых изображений фирмы Kodak под именем „kodim01.png“, подвергнуты изменению в соответствии с (8) при импульсной помехе, амплитуда которой представлена в таблице, и отсутствии аддитивного шума. Исследования выполнены для двух лучших методов фильтрации.

Таблица 2

P, %	Метод	Изображение „kodim01“									
		I = (100, 100, 100)					I = (200, 200, 200)				
		σ_R	σ_G	σ_B	σ	ψ , дБ	σ_R	σ_G	σ_B	σ	ψ , дБ
2	АМФ	14,3	14,9	13,9	24,9	20,2	14,3	14,8	13,8	24,8	20,2
	КММФ	8,43	8,67	8,28	12,4	26,3	8,57	9,04	8,46	15	24,6
5	АМФ	14,4	15	14	25,1	20,2	14,7	15,4	14,3	25,6	20
	КММФ	9,46	9,92	9,35	16,6	23,7	10,1	10,9	10,5	18,2	22,9
7	АМФ	15	15,7	14,6	26,2	19,7	14,7	15,3	14,2	25,5	20
	КММФ	10,1	10,7	10,1	17,8	23,1	11,6	11,7	11,5	20,1	22,1
10	АМФ	15,4	16,2	15	26,9	19,5	15	15,8	14,5	26,1	19,8
	КММФ	10,6	11,5	10,6	18,9	22,6	14,2	14	14,2	24,4	20,4

Из приведенных в табл. 2 данных следует, что алгоритм КММФ обеспечивает более эффективную фильтрацию. Высокая эффективность метода обусловлена прежде всего лучшим сохранением информации о верхних частотах изображения.

Получены оценки эффективности предлагаемого алгоритма при наличии аддитивного нормального шума. Исследования проведены на изображении „Лена“, результаты представлены в табл. 3.

Таблица 3

Уровень квантования	σ аддитивного нормального шума				
	σ_R	σ_G	σ_B	σ	ψ , дБ
5	1,28	1,68	1,81	2,78	39,2
10	3,31	3,55	3,81	6,17	32,3
15	7,22	7,35	7,74	12,89	25,9
20	11,14	11,37	11,79	19,8	22,2

Оценка эффективности нового метода в сравнении с другими методами фильтрации произведена также на примере тестового изображения, представленного на рис. 1, а. Результаты приведены в табл. 4.

Таблица 4

Шум (помеха)	КММФ	МФ 3×3	МФ 5×5	КМФ 3×1	КМФ 5×1
Без шума	0,39	18,74	20,09	0,78	3,74
	0,27	15,27	16,18	0,48	4,43
	0,42	15,95	16,79	0,46	4,61
	0,63	28,96	30,78	1,02	7,41
Нормальный (0,100)	9,70	19,13	21,28	7,11	7,58
	9,76	15,02	15,98	7,1	7,29
	9,71	15,74	16,86	7,1	7,41
	16,84	28,97	31,5	12,3	12,86
Импульсный (1 %)	2,72	18,46	20,22	6,82	3,99
	2,44	15,07	16,29	6,82	4,57
	2,21	15,72	16,9	6,91	4,87
	4,27	28,54	30,98	11,86	7,78
Нормальный + импульсный	10,06	19,94	20,74	7,34	7,68
	10,03	15,68	15,52	7,4	7,4
	9,97	16,4	16,41	7,52	7,54
	17,36	30,2	30,66	12,85	13,06

На рис. 3 представлены изображения ошибок, полученные при применении КММФ (б) и АМФ (в) к тестовому изображению (а) фирмы Kodak под именем „kodim04.png“ „Hats“. Из рисунка видно, что АМФ в большей степени подавляет контуры изображения, чем КММФ.

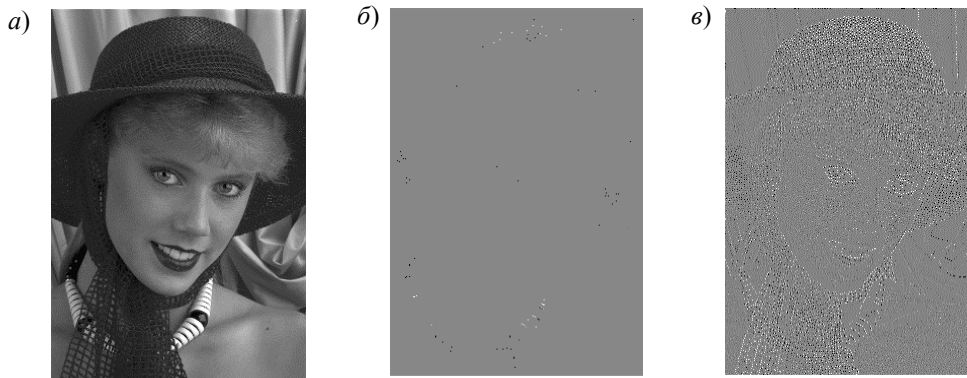


Рис. 3

На рис. 4 представлены примеры фильтрации исходного (а) изображения „Brick Woods“ разными фильтрами: б — МФ 3×3 (17,3 дБ), в — КММФ (24,6 дБ), г — АМФ (20,2 дБ).

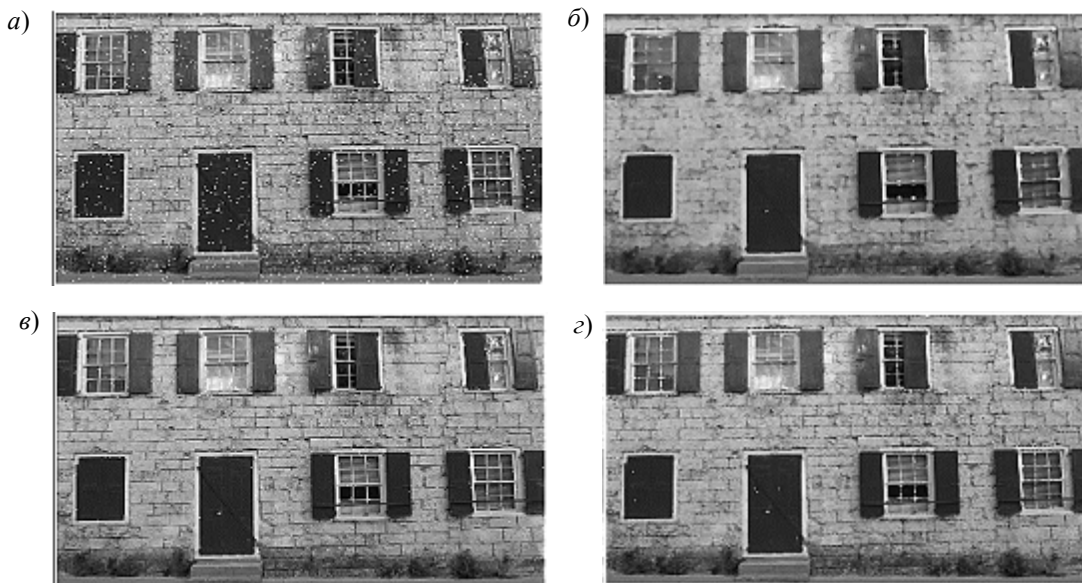


Рис. 4

Полученные оценки ошибок фильтрации по результатам статистического моделирования работы рассмотренных алгоритмов на идеальных изображениях и на изображениях, содержащих аддитивный шум и импульсную помеху, подтверждают эффективность предложенного метода.

Заключение. В статье представлен новый метод подавления импульсной помехи и уменьшения шумов. Каскадный многоканальный медианный фильтр является адаптивным векторным медианным фильтром, обеспечивающим сохранение границ объектов изображения малоразмерных деталей. Применение КММФ не изменяет цветовых характеристик изображения. Максимальная эффективность метода КММФ наблюдается при обработке изображений, искаженных импульсными помехами. При этом подавляются не только помехи типа „соль и перец“, но и помехи произвольной амплитуды. Подавление аддитивного шума производится за счет исключения максимальных выбросов шума в апертуре и за счет выбора канала с минимальной дисперсией. Метод можно использовать в задачах повышения качества изображений и их восстановления.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гонсалес Р., Вудс Р. Цифровая обработка изображений / Под ред. П. А. Чочиа. М.: Техносфера, 2005. 1072 с.
2. Lukac R., Smolka B. Application of the Adaptive Center-Weighted Vector Median Framework for the Enhancement of cDNA Microarray Images // Int. J. Appl. Math. Comput. Sci. 2003. Vol. 13, N 3. P 369—383.
3. Методы компьютерной обработки изображений / Под ред. В. А. Соифера. М.: Физматлит, 2001. 784 с.
4. Wang Z., Zhang D. Progressive Switching Median Filter for the Removal of Impulse Noise from Highly Corrupted Images // IEEE Transactions on Circuits and Systems. II. Analog and Digital Signal Processing. 1999. Vol. 46, N 1. P. 78—81.
5. Приоров А.Л., Апальков И.В., Бухтояров С.С., Хряцев В.В. Переключающийся медианный фильтр с блоком предварительного детектирования // Цифровая обработка сигналов. 2006. № 4. С. 2—7.
6. Фисенко В.Т., Фисенко Т.Ю. Метод автоматического анализа цветных изображений // Оптич. журн. 2003. Т. 79, № 9. С. 18—23.
7. Tang K., Astola J. Nonlinear Multivariate Image Filtering Techniques // IEEE Transactions on Image Processing. 1995. Vol. 4, N 6. P. 788.

Сведения об авторах

- Владимир Иванович Можейко** — канд. техн. наук, доцент; Центральный научно-исследовательский институт „Комета“, Научно-проектный центр оптоэлектронных комплексов наблюдения, Санкт-Петербург; начальник сектора;
E-mail: Lab2@eoss.ru
- Валерий Трофимович Фисенко** — канд. техн. наук, доцент; Центральный научно-исследовательский институт „Комета“, Научно-проектный центр оптоэлектронных комплексов наблюдения, Санкт-Петербург; директор;
E-mail: valery@eoss.ru
- Татьяна Юрьевна Фисенко** — канд. техн. наук, доцент; Центральный научно-исследовательский институт „Комета“, Научно-проектный центр оптоэлектронных комплексов наблюдения, Санкт-Петербург; вед. науч. сотр.;
E-mail: tatiana@eoss.ru

Рекомендована кафедрой
оптико-электронных приборов

Поступила в редакцию
29.05.08 г.

А. А. СЕРГУНОВ

МЕТОДЫ КОРРЕКЦИИ НЕРАВНОМЕРНОСТИ ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ ИНФРАКРАСНЫХ МАТРИЧНЫХ ФОТОПРИЕМНИКОВ

Проанализированы методы коррекции неравномерности параметров матричных фотоприемников в современных оптико-электронных приборах. Рассмотрены адаптивные методы цифровой обработки тепловизионных изображений в изменяющихся условиях наблюдения.

Ключевые слова: матричный фотоприемник, коррекция неравномерности, цифровая обработка.

Цель настоящей статьи — на основе анализа известных методов коррекции неравномерности характеристик матричных фотоприемников ИК-диапазона выработать рекомендации по применению этих методов для оптико-электронных систем сканирующего и „смотрящего“ типа.

В настоящее время в ИК-диапазоне широко используются матричные фотоприемники (МФП) вместо отдельных детекторов ИК-излучения и линеек фотоэлементов. Однако в силу ряда причин на получаемом с МФП изображении заметна неравномерность, которая выражается в виде светлых или темных полос — „геометрического шума“. Неравномерность обусловлена технологией изготовления приемников ИК-излучения и зависимостью отклика отдельного элемента в МФП от внешнего излучения.

Для борьбы с „геометрическим шумом“ используют методы коррекции неравномерности чувствительности приемников, которые можно разделить на три класса:

- 1) методы, использующие тест-объекты;
- 2) методы, использующие сигнал, поступающий от наблюдаемой сцены;
- 3) комбинированные.

Для характеристики метода коррекции можно использовать несколько параметров:

- источник сигнала для коррекции неравномерности;
- модель отклика элемента МФП;
- режим калибровки;
- инерционность коррекции;
- количество кадров, необходимых для компенсации;
- движение МФП;
- фильтрация сигнала сцены.

Существует два источника сигнала для коррекции: излучатель с известной температурой и сигнал сцены (расфокусированное изображение или наблюдаемое оператором).

Для коррекции используются линейные, полиномиальные, экспоненциальные, нелинейные (в том числе нейросети) модели отклика элемента МФП.

В ряде методов предполагается использование двух режимов работы МФП: калибровки (вычисление параметров модели или сигнала компенсации) и рабочего режима (компенсация неравномерности). В комбинированных методах оба режима могут быть совмещены.

Под инерционностью коррекции подразумевается возможность появления следа за изображением движущихся объектов.

Движение МФП может обеспечиваться как поворотом всей камеры, так и смещением МФП на один элемент.

Фильтрация сигнала предполагает использование для обработки сигнала временных, частотных и пространственных фильтров, например, временной ВЧ-фильтр, фильтр типа

„grid noise“, гомоморфный фильтр и др. [1]. Фильтрация может производиться перед компенсацией неравномерности.

Методы, использующие тест-объект. Основной принцип методов данной группы заключается в том, чтобы в плоскости МФП создать излучение с известным законом изменения интенсивности сигнала в пространстве. Чаще всего используют постоянную интенсивность излучения на всей площади МФП. При этом отклики от любого элемента должны быть одинаковыми. В качестве источников равномерного излучения используются эталонные ИК-излучатели с известной температурой или расфокусированное изображение наблюдаемой сцены. Также может использоваться предварительная калибровка МФП. На этапе изготовления устройства с МФП оценивается неравномерность чувствительности элементов на эталонных объектах. После этого строится параметрическая модель неравномерности темновых токов и чувствительности, а также временного дрейфа отклика элементов МФП, и на их основе делается оценка неравномерности при работе. В ходе наблюдения сцены из текущего кадра вычитается оценка [2].

Методы, использующие сигнал от наблюдаемой сцены. Поскольку эти методы требуют дополнительных средств и(или) времени для компенсации неравномерности, то используется дополнительная компенсация по самому сигналу наблюдаемой сцены. Можно выделить три группы методов:

- 1) статистические;
- 2) фильтрация;
- 3) использование движения МФП:
 - микросканирование — перемещение МФП с шагом, равным одному элементу [3];
 - движение камеры с МФП.

Кратко рассмотрим наиболее часто используемые методы, использующие сигнал от наблюдаемой сцены.

Алгоритм постоянной статистики (constant statistic algorithm) основан на том, что в течение длительного времени среднее значение и дисперсия отклика каждого элемента не изменяются, при этом предполагается, что МФП движется. Алгоритм очень прост и может быть использован в качестве эталонного для сравнения методов компенсации неравномерностей [4].

С помощью метода постоянного диапазона (constant-range) с линейной моделью отклика элемента МФП для вычисления параметров модели оценивают математическое ожидание и дисперсию отклика, истинного значения и временного шума [5]. Особенностью данного метода является задание постоянного диапазона от x_{\min} до x_{\max} для нескорректированных значений излучения. Если значение не принадлежит диапазону, то используется интерполяция. В модификации метода значения математических ожиданий и дисперсии оцениваются рекурсивно, а также учитывается тот факт, что временной дрейф параметров усиления и смещения сигнала незначителен [6].

В методе Скрибнера (Scribner's algorithm) используется линейная модель $y = Ax + b$. В каждом кадре для каждого элемента происходит адаптация коэффициента усиления и смещения. При вычислении параметров модели для следующего кадра используется нейросеть. Новые значения A и b рассчитываются по методу наискорейшего спуска.

Модификации метода заключаются в выборе целевой функции f и являются адаптивными (коэффициенты усиления и смещения адаптируются к сигналу сцены). Ошибки целевой функции оптимизируются по методу наименьших квадратов [7—10].

Для фильтрации по методу Калмана используется модель отклика $y = Ax + b + v$, где v — аддитивный временной шум считывания. В качестве вектора состояния используется вектор $\mathbf{X}_k = [A_k, b_k]$, где k — номер кадра. Предполагается, что значения коэффициента усиления и смещения от кадра к кадру изменяются незначительно и случайным образом [11, 12]. Фильтр

Калмана может использоваться для оценки глобального среднего значения входной последовательности изображений и служить заменой взвешивающей функции в методе Скрибнера [13]. Для оценки истинных значений X_k используется как классическая форма записи фильтрации Калмана, так и инверсная форма [14]. Преимуществом инверсной формы записи является большая стабильность компенсации [15, 16]. Модификация заключается в рекурсивном оценивании параметров состояния фильтра. Например, весовые коэффициенты для формирования оценки вектора состояния формируются по правилу Байеса [17, 18]. В другой модификации, прежде чем использовать классический фильтр Калмана, производится низкочастотная пространственная фильтрация в окне размером $N \times N$ [19].

Метод таблиц соответствия заключается в том, чтобы использовать для каждого элемента предварительно рассчитанные таблицы откликов на истинные значения интенсивности излучения. Таблица рассчитывается на основе экспоненциальной или полиномиальной модели высокого порядка [20].

В факетной модели для каждого элемента рассматривается область размером $N \times N$ и строится оценка истинного значения по откликам в этой области [21]. Используется полиномиальная модель:

$$x = \sum_{i=0}^{N-1} \sum_{j=0}^{N-1} b_{i,j} y_{i,j},$$

где $b_{i,j}$ — коэффициенты полинома.

Комбинированные методы основываются на интеграции методов первой и второй групп. Например, первичная калибровка МФП производится с использованием двух эталонных излучателей, а оставшуюся неравномерность, в том числе возникающую между калибровками, устраняют с использованием одного из методов второй группы.

К комбинированным методам относятся и алгебраические алгоритмы, использующие сигналы сцены [22—27]. Исходными предпосылками для работы этих алгоритмов является движение МФП с известными параметрами. По периметру МФП расположена полоса из элементов, которые подвергаются калибровке в каждом кадре. Коррекция неравномерности остальных элементов выполняется путем последовательного вычисления коэффициентов усиления и смещения сначала вдоль строк, затем вдоль столбцов. Алгебраический алгоритм применяется после выполнения двухточечной калибровки.

В таблице сравниваются характеристики методов компенсации неравномерности чувствительности МФП. Наиболее рациональным представляется использование комбинаций методов, поскольку любой метод в отдельности имеет ограничения по коррекции и полностью не решает задачи компенсации неравномерности.

Сравнительная характеристика методов коррекции неравномерности параметров МФП

Метод	Источник сигнала коррекции	Модель отклика элемента	Режим калибровки	Инерционность компенсации	Объем выборки, кадров	Движение МФП	Фильтрация сигнала сцены
Одноточечная коррекция	Излучатель T_1	Линейная	Да	Нет	1	Нет	Нет
Двухточечная коррекция	Излучатели T_1 и T_2	Линейная	Да	Нет	2	Нет	Нет
Расфокусировка	Сигнал сцены	Линейная	Да	Нет	1	Нет	Нет
Метод постоянной статистики		Линейная	Нет	Есть	∞	Есть	Нет

Продолжение таблицы

Метод	Источник сигнала коррекции	Модель отклика элемента	Режим калибровки	Инерционность компенсации	Объем выборки, кадров	Движение МФП	Фильтрация сигнала сцены
Метод постоянного диапазона	Сигнал сцены	Линейная	Нет	Есть	∞	Есть	Нет
Фильтрация Калмана		Линейная	Нет	Есть	∞	Есть	Да/нет
Временной ВЧ-фильтр		Линейная	Нет	Да	$N-\infty$	Нет	Да
Метод Скрибнера		Нелинейная	Нет	Есть	1	Есть	Нет
Метод таблиц соответствия		Полиномиальная Экспоненциальная	Да	Нет	1	Нет	Нет
Фацетная модель		Полиномиальная	Да	Есть	N	Да	Нет
Гомоморфная фильтрация		Мультипликативная	Нет	Нет	1	Нет	Да
Фильтр „grid noise“		Не используется	Нет	Нет	1	Нет	Да
Алгебраические алгоритмы		Линейная	Да	Нет	1	Да	Нет

Для оптико-электронных систем сканирующего типа рекомендуется использовать метод двухточечной коррекции и предварительную калибровку МФП. Для систем „смотрящего“ типа, где недопустимо прерывание работы для выполнения калибровки, целесообразно использовать алгебраические алгоритмы, использующие сигналы сцены и постоянно калибрующиеся элементы МФП.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Torle P.* Scene-based correction of image sensor deficiencies: Magister's thesis in image processing at Linköping Institute of Technology. 2003. [Электронный ресурс]: <www.diva-portal.org/diva/getDocument?urn_nbn_se_liu_diva-1752-1__fulltext.pdf>. 20.09.2007.
2. *Chen H.-W., Fontan F., Olson T.* A chopper-free measurement-based-parametric-fitting non-uniformity correction system // *Infrared Imaging Systems: Design, Analysis, Modeling, and Testing XV*. Proc. SPIE. 2004. Vol. 5407. P. 54—65.
3. *Соловьев В. И., Анисимов И. Ю.* Оценка качества выравнивания каналов тепловизионных приемников при использовании метода микросканирования // *Оптич. журн.* 2005. № 6. С. 47—50.
4. *Hart R., Thomas O.* A study of non-uniformity correction methods for staring array IR detectors // 1st EMRS DTC Technical Conference. Edinburgh, 2004.
5. *Torres S. N., Reeves R. A., Hayat M. M.* Scene-based nonuniformity correction method using constant-range performance and analysis // *Proc. SCI 2002/ISAS 2002*. 2002. Vol. IX.
6. *Pezoa J. E., Torres S. N., Córdova J. P., Reeves R. A.* An enhancement to the constant range method for nonuniformity correction of infrared image sequences // *ISSU 3287*. 2004. P. 525—532.
7. *Vera E. M., Torres S. N.* Fast adaptive non-uniformity correction for infrared focal-plane array detectors // *EURASIP J. on Applied Signal Proc.* 2005. Vol. 13. P. 1994—2004.
8. *Torres S. N., Vera E. M., Reeves R. A., Sobarzo S. K.* Adaptive scene-based nonuniformity correction method for infrared focal-plane arrays // *Infrared Imaging Systems: Design, Analysis, Modeling, and Testing XIV*. Proc. SPIE. 2003. Vol. 5076. P. 130—139.
9. *Vera E. M.* Corrección adaptiva de no-uniformidad en sistemas de imágenes infarrojas. Informe de tesis para optar al grado académico de magister en ciencias de la ingeniería con mención en ingeniería eléctrica. 2003. [Электронный ресурс]: <http://www.tsc.urjc.es/personal/alfonso/publicaciones/PhD_Thesis.pdf>. 20.09.2007.
10. *Vera E. M., Torres S. N.* Ghosting reduction in adaptive non-uniformity correction of infrared focal-plane array image sequences // *Proc. 2003 Int. Conf. on Image Processing*. Barcelona, Spain, 2003. Vol. 2. P. 1000—1004.

11. *Torres S. N., Hayat M. M.* Kalman filtering for adaptive nonuniformity correction in infrared focal-plane arrays // *J. Opt. Soc. Am. A.* 2003. Vol. 20, N 3.
12. *Torres S. N.* A Kalman-filtering approach for non-uniformity correction in infrared focal-plane array sensors: Thesis (PhD). Dayton: The University of Dayton, 2001. 94 p.
13. *Vera E. R., Reeves R. D., Torres S. I.* Adaptive bias compensation for non-uniformity correction on infrared focal plane array detectors // *Hybrid Intelligent Systems.* Santiago, Chile, 2002. P. 725—734.
14. *Torres S. I., Pezoa J. N.* Scene-based nonuniformity correction method using inverse covariance form of Kalman filter // *Hybrid Intelligent Systems.* Santiago, Chile, 2002. P. 715—724.
15. *Pezoa J. E.* Corrección en tiempo real del ruido especial en sensores infrarrojos usando la forma de covarianza inversa del filtro Kalman: Informe de tesis para optar al grado académico de magister en ciencias de la ingeniería con mención en ingeniería eléctrica. 2003. [Электронный ресурс]: <<http://nuc.die.udec.cl/publications/theses/2003-CorreccionTiempoRealRuidoEspacialSensoresIRUsandoCovInv.pdf>>. 20.09.2007.
16. *Torres S. I., Pezoa J. N., Hayat M. M.* Scene-based nonuniformity correction for focal plane arrays by the method of the inverse covariance form // *Applied Optics.* 2003. Vol. 42, N 29. P. 5872—5881.
17. *Pezoa J. E., Torres S. N.* Multi-model adaptive estimation for nonuniformity correction of infrared image sequences // *Image Analysis and Recognition: Int. Conf. Porto, Portugal,* 2004. P. 413—420.
18. *Pezoa J. E., Hayat M. M., Torres S. N.* Multi-model Kalman filtering for adaptive nonuniformity correction of infrared sensors // *J. Opt. Soc. Am. A.* 2006. Vol. 23. P. 1281—1291.
19. *Sobarzo S., Pezoa J. E., Torres S. N.* Real-time Kalman filtering for nonuniformity correction in infrared focal-plane arrays // *8th World Multiconference on Systemics, Cybernetics and Informatics.* Orlando, Florida, USA, 2004.
20. *LeSueur K. G., Jovanov E., Milenkovic A.* Lookup table based real-time non-uniformity correction of infrared scene projectors // *High Performance Computing User's Group Conf.* Austin, Texas, USA, 2002.
21. *Voigt M., Zarzycki M., LeMieux D.H., Ramesh V.* Scene-based non-uniformity correction for focal plane arrays using facet model // *Infrared Imaging Systems: Design, Analysis, Modeling, and Testing XVI.* Proc. SPIE. 2005. Vol. 5784. P. 331—342.
22. *Ratliff B. M., Hayat M. M., Hardie R. C.* Algebraic scene-based nonuniformity correction in focal plane arrays // *Infrared Imaging Systems: Design, Analysis, Modeling, and Testing XIV.* Proc. SPIE. 2001. Vol. 4372. P. 114—124.
23. *Ratliff B. M., Hayat M. M., Tyo J. S.* Generalized algebraic scene-based nonuniformity correction algorithm // *J. Opt. Soc. Am. A.* 2005. Vol. 22, N 2. P. 239—249.
24. *Ratliff B. M., Hayat M. M., Tyo J. S.* Radiometrically accurate scene-based nonuniformity correction for array sensors // *J. Opt. Soc. Am. A.* 2003. Vol. 20, N 10. P. 1890—1899.
25. *Ratliff B. M., Hayat M. M.* An algebraic algorithm for nonuniformity correction in focal-plane arrays // *J. Opt. Soc. Am. A.* 2002. Vol. 19, N 9. P. 1737—1747.
26. *Ratliff B. M., Hayat M. M., Tyo J. S.* Algorithm for radiometrically-accurate nonuniformity correction with arbitrary scene motion // *Infrared Imaging Systems: Design, Analysis, Modeling, and Testing XIV.* Proc. SPIE. 2003. Vol. 5076. P. 82—91.
27. *Hayat M. M., Ratliff B. M., Tyo J. S.* Generalized algebraic algorithm for scene-based nonuniformity correction // *Photonic Devices and Algorithms for Computing VI.* Proc. SPIE. 2004. Vol. 5556. P. 122—136.

Сведения об авторе

Андрей Анатольевич Сергунов

— Центральный научно-исследовательский институт „Комета“, Научно-проектный центр оптоэлектронных комплексов наблюдения, Санкт-Петербург; инженер 2-й категории; E-mail: sergunov-a-a@yandex.ru

Рекомендована кафедрой
оптико-электронных приборов

Поступила в редакцию
29.05.08 г.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ФОНОЦЕЛЕВОЙ ОБСТАНОВКИ В ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННЫХ СИСТЕМАХ РАЗЛИЧНОГО НАЗНАЧЕНИЯ

УДК 551.463.5:535.31

Ю. И. БЕЛОУСОВ, Д. В. ИВАНОВ

УЧЕТ ХАРАКТЕРИСТИК ФЛУКТУАЦИЙ ФОНОВОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ПРИГОРИЗОНТНОЙ ОБЛАСТИ МОРЯ В АЛГОРИТМАХ ОБРАБОТКИ СИГНАЛОВ ИНФРАКРАСНЫХ ПРИБОРОВ

Исследована зависимость закона распределения флуктуаций инфракрасной пригоризонтной области моря от условий наблюдения и параметров оптической системы применительно к разработке алгоритмов автоматической обработки сигналов в оптико-электронных системах. Даны рекомендации относительно выбора методов адаптации алгоритмов обработки к текущим условиям наблюдения.

Ключевые слова: обработка изображений, оптико-электронные системы, фоноцелевые модели.

В настоящее время повышение эффективности оптико-электронных систем (ОЭС) напрямую связывается с увеличением их чувствительности и разрешающей способности. Однако наращивание только потенциальной пороговой чувствительности оптических каналов уже не дает пропорционального прироста их эффективности. Одновременно с увеличением чувствительности каналов ОЭС снижается их помехозащищенность, поскольку возрастает вклад фоновых и организованных помех, на фоне которых необходимо выделять пороговые сигналы от целей.

При разработке алгоритмов обнаружения оптических сигналов необходимо в максимальной степени ориентироваться на реальные статистические характеристики фоновых помех, поскольку использование простейших моделей фоновых помех может привести к результату, который будет оптимален в абстрактном случае, но в реальных условиях приведет к снижению эффективности ОЭС в целом.

В настоящей статье рассматривается вопрос использования известной „модели ИК-излучения взволнованной поверхности моря“ [1] при оценке зависимости статистических характеристик флуктуаций фонового излучения от условий наблюдения пригоризонтной области моря с помощью ИК-приборов применительно к разработке алгоритмов автоматической обработки сигналов.

Общая сложность задачи состоит в том, что целый ряд параметров ИК-канала ОЭС зависит от того фона, на котором наблюдается цель. Эта зависимость неоднозначна и определяется как характеристиками условий наблюдения, так и характеристиками самого прибора. Например, в зависимости от фоновой засветки изменяется дисперсия шумов при регистрации сигнала, т.е. один и тот же по амплитуде оптический сигнал, наблюдаемый на различном

фоне, обуславливает разное отношение сигнала к внутреннему шуму на выходе фотоприемного устройства, причем статистические данные флуктуаций фонового излучения и внутренних шумов могут либо быть близкими, либо существенно различаться.

При этом преобладающими могут оказаться либо фоновые шумы, либо внутренние. Их совокупное воздействие заметным образом различается. Эта проблема становится все более существенной по мере повышения чувствительности ИК-прибора. Наиболее характерно ее проявление при наблюдении пространства вблизи линии морского горизонта.

Непосредственно у линии горизонта флуктуации фонового излучения относительно малы по амплитуде и соизмеримы с флуктуациями внутренних шумов прибора. Статистические характеристики суммарного шума соответствуют характеристикам суммы двух независимых случайных процессов с законами распределения, близкими к нормальному.

Периферийные зоны поля обзора в большинстве ситуаций отличаются от области линии горизонта как по среднему значению, так и по характеру и размаху флуктуаций яркости. Из-за этого изменяется соотношение вкладов внешних и внутренних шумов. Доминирующими становятся фоновые шумы, а их распределение отличается от нормального закона, и для них алгоритмы, оптимальные при выделении сигналов из шумов с нормальным законом распределения, могут давать существенный проигрыш по сравнению с другими. При изменении соотношения внутренних и внешних шумов вероятность правильного обнаружения может изменяться незначительно, в то время как вероятность ложных тревог изменяется на несколько порядков. Это положение в принципе характерно для всех ситуаций наблюдения в пригоризонтной области моря, но степень различия характеристик фоноцелевой обстановки в центре и на периферии поля зрения ИК-канала зависит от его величины и будет разной, например, при разной кратности увеличения оптической системы одного и того же прибора. В режиме наблюдения за надводной обстановкой в широком поле зрения амплитуда фоновых помех велика, а в режиме сопровождения и выработки координат цели в узком поле зрения флуктуации существенно сглаживаются. Кроме того, в ИК-приборах, как правило, сохраняется количество элементов в изображении. И тогда при изменении поля обзора происходит разное усреднение в пределах одного пиксела (элементарного поля зрения). Одновременно изменяются и амплитуда полезного сигнала, и характеристики воспринимаемых фоновых помех. Если в приборе производится автоматическая обработка сигналов, то она должна быть адаптивной, иначе приводит в каком-то случае к проигрышу.

Предметом исследования настоящей статьи являются вид и параметры закона распределения флуктуаций ИК-излучения взволнованной поверхности моря (ВПМ). В общем виде полученные результаты применимы как для сканирующих, так и для несканирующих ИК-приборов. Три особенности существенным образом влияют на применение разработанных для них в [1] аналитических выражений к оценкам для конкретных параметров ОЭС.

Первая особенность заключается в резкой зависимости вида и параметров закона распределения флуктуаций фонового ИК-излучения морской поверхности от угла места вблизи линии горизонта.

Вторая особенность связана с тем, что в реальных приборах происходит усреднение пространственных статистических характеристик в пределах конечного мгновенного поля зрения прибора, причем степень усреднения также зависит от угла места линии визирования. В общем случае для каждой строки изображения флуктуации фонового излучения моря имеют разные статистические характеристики, так как каждый элемент фотоприемника усредняет флуктуации ИК-излучения с разных по площади участков ВПМ, находящихся на различных расстояниях от прибора.

Третья особенность состоит в том, что при изменении углового поля обзора существенным образом изменяется гистограмма распределения яркости фонового сигнала в кадре как по количеству и положению максимумов, так и по ее ширине (динамическому диапазону).

В настоящей статье приводятся результаты исследования зависимости вида и параметров закона распределения флуктуаций ИК-излучения ВПМ от размеров мгновенного поля зрения (пиксела) прибора при различных углах места линии визирования пригоризонтной области моря.

Расчеты базируются на приведенных в [1—3] выражениях для плотности распределения вероятности $w(L)$ и параметров закона распределения флуктуаций спектральной энергетической яркости (СЭЯ) L [Вт/см²·ср·мкм] ИК-излучения участка ВПМ. Они получены в рамках стохастической фазетной модели в [1—3] и относятся к „точечным“ характеристикам излучения моря, т.е. описывают параметры оптического поля столь малого участка поверхности, что единственное требование к его размерам состоит в том, чтобы он содержал достаточное для применения статистических методов количество фазетов. В системе координат, связанной с ИК-прибором, этот участок наблюдается под углами Φ и α . Угол Φ отсчитывается в вертикальной плоскости относительно угла визирования линии горизонта Φ_r . Угол α в горизонтальной плоскости отсчитывается относительно главного направления распространения волнения.

Применительно к рассматриваемой задаче в пределах поля зрения прибора (δ_v — в вертикальной и δ_r — в горизонтальной плоскости) происходит оптическое усреднение статистических характеристик флуктуаций излучения ВПМ. Формально это можно выразить интегрированием значения СЭЯ в пределах углового мгновенного поля зрения $\omega = \delta_v \times \delta_r$, но тогда полученная величина имеет размерность спектральной энергетической светимости M [Вт/см²·мкм] в направлении (Φ, α) :

$$M(\Phi, \alpha) = \iint_{\omega} L(\Phi, \alpha) d\delta_v d\delta_r.$$

При малых значениях ω процедуру интегрирования с определенной погрешностью можно заменить умножением подынтегральной функции на значение области интегрирования $\delta_v \times \delta_r$. Для значений углов ω , в пределах которых подынтегральная функция изменяется заметно, необходимо осуществлять интегрирование без упрощений.

Из исследований [1] известно, что в горизонтальной плоскости характеристики флуктуаций излучения моря изменяются достаточно монотонно по характеру и весьма мало по значению при изменениях угла визирования α в довольно больших пределах. Поэтому для всех характеристик допустимо интегрирование по α заменить умножением на δ_r .

Однако в вертикальной плоскости все статистические параметры имеют сложный характер в зависимости от угла наблюдения Φ , а воспринимаемое наблюдателем ИК-излучение подстилающей поверхности — поверхности моря — $M_{\text{восп}}(\Phi, \alpha)$ ослабляется в $\tau(\lambda, \Phi)$ раз атмосферной трассой, длина которой также зависит от угла визирования Φ и высоты наблюдателя. Кроме того, собственное ИК-излучение этой трассы добавляется к ослабленному ею же излучению моря, причем коэффициент излучения атмосферы ε связан с коэффициентом ее пропускания

$$\varepsilon(\lambda, \Phi) = 1 - \tau(\lambda, \Phi),$$

поэтому при больших значениях δ_v необходимо осуществлять интегрирование без упрощений

$$M_{\text{восп}}(\Phi, \alpha) = \iint_{\omega} \left\{ L(\Phi, \alpha) \tau(\lambda, \Phi) + L_v^0 [1 - \tau(\lambda, \Phi)] \right\} d\delta_v d\delta_r,$$

где L_v^0 — яркость излучения абсолютно черного тела (АЧТ) с температурой воздуха.

Чем ниже расположена ОЭС над уровнем моря, тем сильнее зависят статистические характеристики наблюдаемого фона от угла места линии визирования. Например, для высоты 25 м над уровнем моря при изменении угла визирования непосредственно ниже линии горизонта на $0,2^\circ$ расстояние от поверхности моря до наблюдателя изменяется от 17 до 4 км.

Поэтому вариации характеристик фонового излучения этой зоны во многом обусловлены изменениями оптических свойств атмосферной трассы.

В зависимости от состояния небосвода, соотношения температуры моря (T_s) и воздуха (T_a), радиационная температура излучения морского фона может быть больше, равна или меньше температуры излучения АЧТ с температурой воды (L_s^0). Поэтому, например, слабо нагретая цель может изменять знак своего оптического контраста по мере сближения из-за того, что наблюдается на фоне разных по яркости фрагментов подстилающей поверхности — поверхности моря.

Анализ результатов расчетов статистических характеристик флуктуаций воспринимаемого ИК-излучения фона проводится для условий сплошной облачности (СО) и ясного небосвода (ЯН) при соотношениях $T_s < T_a$ и $T_s > T_a$.

Из совокупности статистических характеристик ИК-излучения ВПМ как фона наиболее просто выражается среднее значение флуктуаций ИК-излучения моря (первого момента) [3]:

$$M_{\text{восп}}^{\text{СО}}(\Phi, \alpha) = \omega \left\{ \left(L_s^0 - [L_s^0 - L_a^0] A(\Phi, \alpha) \right) \tau(\lambda, \Phi) + L_a^0 [1 - \tau(\lambda, \Phi)] \right\},$$

$$M_{\text{восп}}^{\text{ЯН}}(\Phi, \alpha) = \omega \left\{ \left(L_s^0 - [L_s^0 - L_a^0] A(\Phi, \alpha) - [L_a^0 - L_3] Z(\Phi, \alpha) \right) \tau(\lambda, \Phi) + L_a^0 [1 - \tau(\lambda, \Phi)] \right\}.$$

Здесь L_a^0 — СЭЯ АЧТ при температуре воздуха; L_3 — СЭЯ излучения небосвода в зените; $A(\Phi, \alpha)$ и $Z(\Phi, \alpha)$ — специальные функции, описывающие эффективное спектральное отражение ИК-излучения от ВПМ с учетом трехмерного характера волнения и эффекта затенения и в общем случае — поляризацию ИК-излучения.

Выражение для второго момента — дисперсии флуктуаций фонового излучения моря $D(L)$ — полученное в статье [1], преобразуется в соответствии с рекомендациями [4]: „постоянный множитель может быть вынесен за знак дисперсии, если этот множитель возвести при этом в квадрат“. Если не рассматривать (в первом приближении) флуктуации собственного излучения атмосферной трассы, то „постоянными множителями“ являются значения мгновенного поля зрения прибора и коэффициент спектрального пропускания атмосферы. Формально при преобразованиях они играют роль масштабных коэффициентов и не влияют на вид пространственно-временных зависимостей дисперсии флуктуаций воспринимаемого излучения $D[M_{\text{восп}}]$ при наблюдении объектов на фоне морской поверхности:

$$D[M_{\text{восп}}^{\text{СО}}(\Phi, \alpha)] = [\omega \tau(\lambda, \Phi)]^2 (L_s^0 - L_a^0)^2 D_1,$$

$$D[M_{\text{восп}}^{\text{ЯН}}(\Phi, \alpha)] = [\omega \tau(\lambda, \Phi)]^2 [(L_s^0 - L_a^0)^2 D_1 + 2(L_s^0 - L_a^0)(L_a^0 - L_3) D_2 + (L_a^0 - L_3)^2 D_3].$$

D_1 — D_3 — специальные функции [1], имеющие смысл дисперсий — флуктуаций коэффициентов отражения отдельных facets относительно „средних“ („эффективных“) коэффициентов отражения единичных участков ВПМ (D_1 и D_3) и второго смешанного момента (D_2) флуктуаций коэффициентов отражения facets относительно соответствующих средних значений с учетом трехмерного характера волнения и эффекта затенения скользящих лучей.

Следует отметить связанную с поляризацией ИК-излучения особенность оценки статистических характеристик оптического поля ВПМ. В расчетные выражения среднего значения СЭЯ входят формулы коэффициентов отражения для каждой из двух поляризационных составляющих, а выражение для „неполяризованного излучения“ записывается как полусумма модулей комплексных коэффициентов отражения воды. Для дисперсии флуктуаций яркости коэффициент отражения входит во второй степени, поэтому методически правильно рассчитывать по отдельности характеристики флуктуаций для каждой из составляющих поляризации, а дисперсию флуктуаций суммарного излучения определять как среднее геометрическое значение дисперсий флуктуаций поляризационных составляющих ИК-излучения ВПМ.

Наиболее сложные трансформации претерпевает выражение для закона распределения флуктуаций воспринимаемого ИК-излучения морского пригоризонтного фона $w(M_{\text{восп}})$ по отношению к найденному в [1] выражению для плотности распределения вероятности флуктуаций энергетической яркости ВПМ $w(L_{\text{восп}})$. Помимо введения масштабных множителей ω и $\tau(\lambda, \Phi)$ дополнительно нужно учесть собственное излучение атмосферной трассы. Полагая его независимым от физических факторов, обуславливающих флуктуации ИК-излучения ВПМ, оно формально трактуется как „сдвиг“ плотности распределения вероятности по оси абсцисс ($M_{\text{восп}}$). Причем в зависимости от соотношения значений температуры воздуха и воды этот „сдвиг“ может быть направлен как в сторону уменьшения, так и в сторону увеличения абсолютных значений $M_{\text{восп}}(\Phi, \alpha)$:

$$w[M_{\text{восп}}(\Phi, \alpha)] = w\{[l\tau^{-1} - L_a^0(1 - \tau(\lambda, \Phi))]\omega^{-1}\}(\tau(\lambda, \Phi)\omega)^{-1}.$$

Здесь l — нормированная СЭЯ для подансамбля облачности СО или ЯН [1, 2].

Приведенные выше аналитические выражения позволяют расчетным путем выявить особенности фоноцелевой обстановки применительно к выработке наиболее рациональных алгоритмов обработки ИК-изображений. Результаты расчетов, послужившие основой для анализа и выводов, представлены на рис. 1—4.

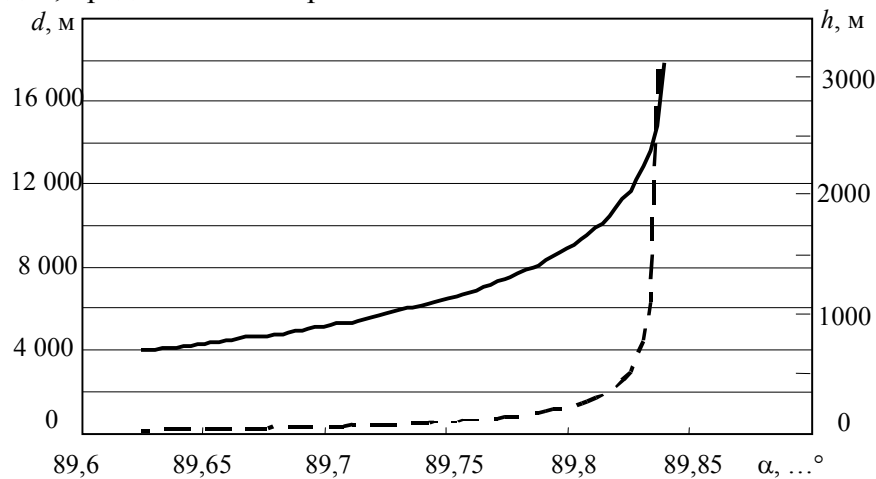


Рис. 1

На рис. 1 приведена зависимость расстояния (d , сплошная кривая) до наблюдаемого участка поверхности и продольного размера пиксела от угла места линии визирования (h , пунктир). Высота размещения прибора 25 м, мгновенное поле зрения 0,2 мрад.

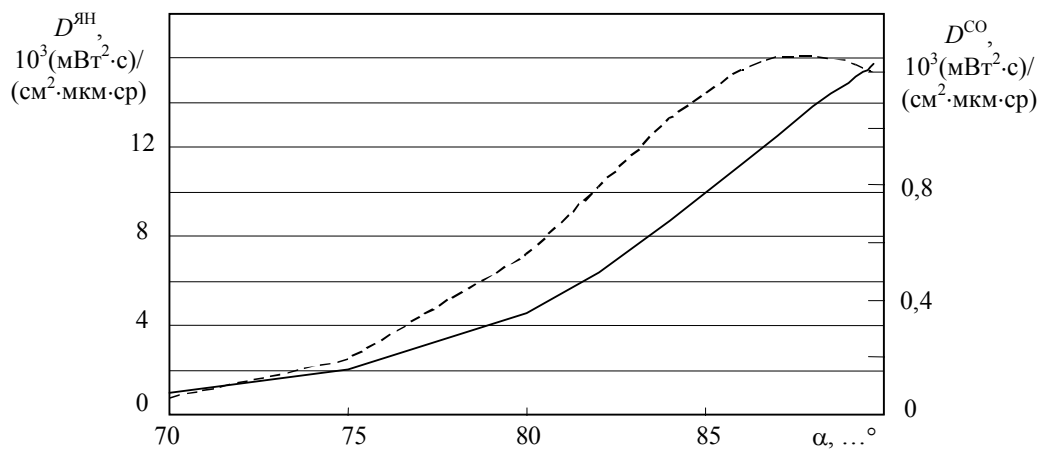


Рис. 2

На рис. 2 представлена зависимость дисперсии флуктуаций яркости от угла места линии визирования (сплошная кривая — $D^{\text{ЯН}}$, пунктир — $D^{\text{СО}}$).

На рис. 3 приведена зависимость плотности вероятности СЭЯ ИК-излучения ВПМ от угла места линии визирования при скорости ветра $5 \text{ м}\cdot\text{с}^{-1}$, ненаправленном волнении и сплошной облачности, $T_a = 285$, $T_s = 290 \text{ К}$ (Φ — 1 — 89, 2 — 85, 3 — 80, 4 — 70°).

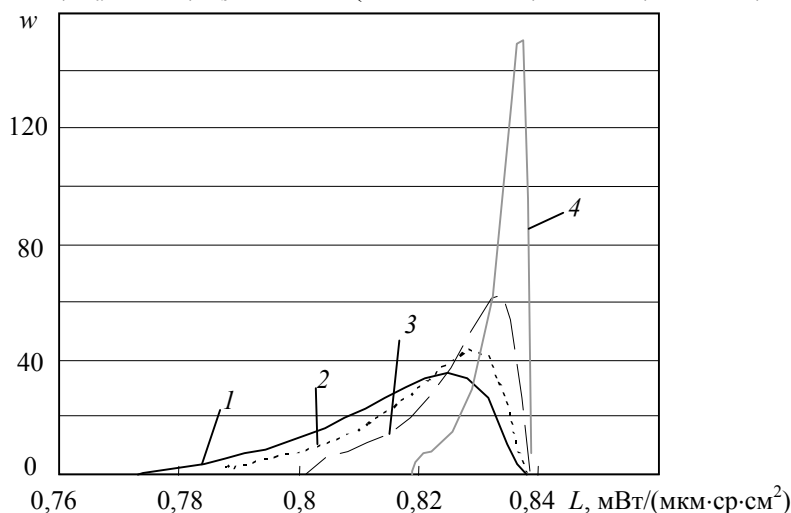


Рис. 3

На рис. 4 представлено распределение воспринимаемой яркости излучения ВПМ для различной длины атмосферной трассы (l — 0, 2 — 1, 3 — 2, 4 — 5 км). Сплошная облачность, $\Phi=85^\circ$.

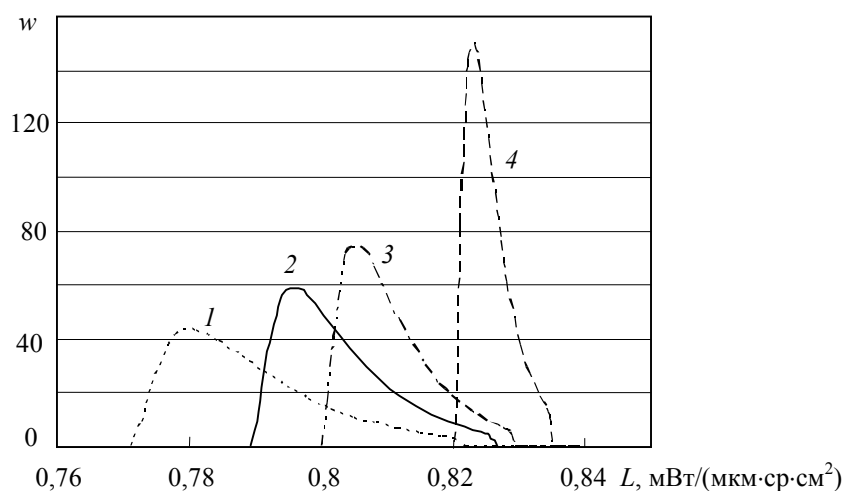


Рис. 4

Выводы можно сформулировать в следующем виде.

1. При наблюдении надводной поверхности с помощью дискретного ФПУ (матричного или сканирующего) для каждой строки изображения пригоризонтной области моря статистические характеристики флуктуаций излучения фона различны как по виду, так и по параметрам закона распределения флуктуаций.

2. В ОЭС с изменением углового поля зрения (дискретным или плавным) необходима адаптация алгоритмов обработки изображений к изменяющимся статистическим характеристикам флуктуаций излучения фона.

3. Поскольку большинство алгоритмов обработки сигналов ориентируется на гауссово распределение шумов, то важно количественное определение параметров условий, при которых они становятся негауссовыми и встроенные алгоритмы обработки сигналов становятся неоптимальными.

4. Для задач автоматического выделения сигналов на фоне внутренних и внешних шумов изменение закона распределения помех при выборе процедуры оптимальной фильтрации

и обработки сигналов или при выработке решающих правил обуславливает необходимость использования адаптивных алгоритмов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Белоусов Ю. И., Иванов Д. В., Утенков А. Б. Модель ИК излучения взволнованной поверхности моря // Оптич. журн. 1994. № 10. С. 22—26.
2. Белоусов Ю. И., Иванов Д. В., Утенков А. Б. Метод расчета плотности вероятности яркости ИК излучения взволнованной поверхности моря в диапазоне 3—14 мкм // Оптич. журн. 1999. № 8. С. 36—42.
3. Белоусов Ю. И., Демидов Е. Ф. Средняя составляющая ИК излучения моря // Изв. АН СССР. Сер. Физика атм. и океана. 1982. Т. 18, № 2. С. 206—211.
4. Левин Б. Р. Теоретические основы статистической радиотехники. М.: Сов. радио, 1969.

Сведения об авторах

Юрий Иванович Белоусов

— д-р техн. наук, профессор; Центральный научно-исследовательский институт „Комета“, Научно-проектный центр оптоэлектронных комплексов наблюдения, Санкт-Петербург; зам. директора;
E-mail: lab6@eoss.ru

Дмитрий Владимирович Иванов

— канд. техн. наук; Центральный научно-исследовательский институт „Комета“, Научно-проектный центр оптоэлектронных комплексов наблюдения, Санкт-Петербург; ст. науч. сотр.;
E-mail: lab6@eoss.ru

Рекомендована кафедрой
оптико-электронных приборов

Поступила в редакцию
29.05.08 г.

УДК 004.92

А. С. КУДРЯВЦЕВ

СИСТЕМА ОТОБРАЖЕНИЯ И НАБЛЮДЕНИЯ ДЛЯ ТРЕНАЖЕРНОГО КОМПЛЕКСА

Представлена система отображения и наблюдения в трехмерном виде пространственных сцен для тренажеров подводных аппаратов. Приведены основные возможности реализованной системы. Описывается одна из особенностей системы — наличие трех видов отображения подводной обстановки: трехмерный вид, приближенный к реальности; трехмерный вид, направленный на информативность представления; вид, аналогичный морской карте. Рассмотрены основы архитектуры системы отображения и наблюдения, построенной на иерархическом принципе.

Ключевые слова: система отображения и наблюдения, компьютерная графика, тренажер, подводный аппарат.

Введение. Безопасность и эффективность выполнения различных морских работ (поиск и обследование объектов на донной поверхности, проведение аварийно-спасательных операций, мониторинг шельфа) напрямую зависят от уровня подготовки операторов корабельных технических систем. Тренажерные комплексы (ТК) для выработки навыков управления сложными техническими устройствами в настоящее время получили широкое распространение. Это произошло во многом благодаря развитию вычислительной техники.

Увеличение производительности компьютеров позволяет синтезировать изображение трехмерной сцены в режиме реального времени. В связи с этим появилась возможность в

состав тренажерного комплекса включать систему отображения и наблюдения (СОН). С помощью СОН на мониторе компьютера отображается подводная сцена тренажерного комплекса в трехмерном виде. Это позволяет руководителю занятий отслеживать действия обучаемого экипажа. При разборе действий обучаемого экипажа будет полезен просмотр записи проведенных учений.

Система отображения и наблюдения подводной сцены. Идея создания СОН пространственной подводной сцены основывается на возможности получения координат всех объектов сцены в процессе учений или тренировочных занятий в режиме реального времени.

Размеры тренировочной акватории (100×100 км) ограничены, хотя они могут быть определены и изменены в процессе настройки системы. Рельеф дна и характер грунта могут быть заданы произвольно или соответствовать конкретному региону плавания. Основной профиль грунта задается опорными точками. Дополнительно можно модифицировать рельеф, добавляя холмы и впадины.

Карта-схема (рис. 1) обеспечивает возможность отображения всей подводной сцены в плане. При этом объекты представлены в виде пиктограмм. (За счет возможности активизации объектов СОН подводной сцены и введения соответствующих пиктограмм система позволяет выбирать объект и по названию в списке, и по пиктограмме.)

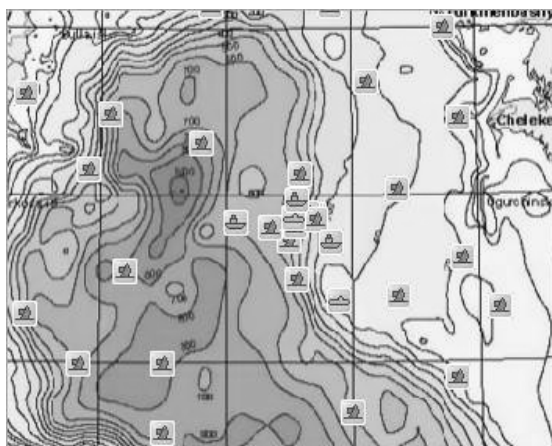


Рис. 1

В окне 3D-вида (рис. 2) отображается пространственная сцена, приближенная к реальному изображению. Можно в интерактивном режиме перемещать камеру над поверхностью тренировочной акватории, помещать в водную среду, задавать ориентацию и выбирать требуемый масштаб изображения.



Рис. 2

Использование соты (рис. 3) как некоторого ограниченного пространства, заданного условиями и задачами наблюдения, позволяет в произвольном масштабе отображать статиче-

ские и динамические объекты по отдельности и во взаимодействии. В пространстве соты осуществляется измерение отстояний объектов от дна и от поверхности водной среды, отображается взаимное расположение объектов и представляется возможность наблюдения объектов с большой степенью детализации с произвольной точки. За счет этого решается проблема большого динамического диапазона объектов в сцене и происходит слежение за перемещаемым объектом.

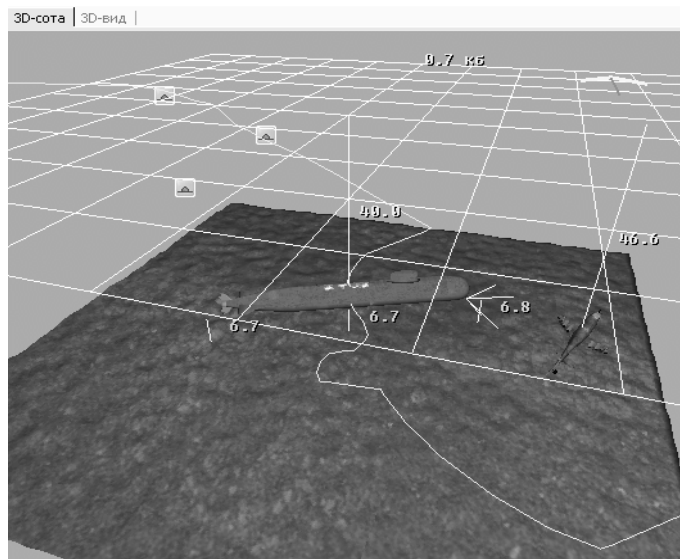


Рис. 3

При выборе фрагментов визуализации для удобства пользователя камеры отображаются с пирамидой видимости. Навигация в окне общего вида, в соте, на карте синхронизирована, что обеспечивает гибкость в работе с СОН подводной сцены и возможность ее полномасштабного представления.

Обеспечение полной спецификации объектов существенно расширяет информативность СОН подводной сцены.

Архитектура системы. СОН имеет дело с множеством достаточно сложных объектов. Возникает два вопроса: как описывать объекты и как представлять множество таких объектов. Основные графические API, т.е. ее графические интерфейсы (OpenGL, DirectX), предоставляют минимум основных примитивов (точки, линии, треугольники), позволяя самостоятельно конструировать из них более сложные объекты. Можно рассматривать объекты из базового набора как сущности, из которых строится модель.

Для отображения сцены программа должна иметь ее описание. Если такое описание неструктурировано и представляет собой простой массив элементов, описывающих геометрические примитивы, то затрудняется применение методов повышения эффективности отображения, например кэширования (буферизации), а также усложняется поиск объектов. Поэтому современные системы включают средства структуризации сцены. Наиболее простым и естественным принципом структуризации является иерархический, при котором отдельные примитивы, имеющие пространственную или функциональную близость, образуют группы, в свою очередь объединяющиеся в группы более высокого уровня и т.д. [1]. Применение иерархического принципа структуризации сцены восходит к графическому стандарту PHIGS. Этот же принцип был положен в основу графических библиотек Open Inventor [2] и Java3D [3]. На этом же принципе построена СОН. Иерархическая сцена представлена в виде графа — дерева, терминальные узлы (листья) которого — объекты, описывающие геометрические примитивы и устанавливающие режимы отображения примитивов. Кроме того, в граф включаются объекты, задающие общие условия отображения (камера и источники света).

Описанная в графе сцена отображается на экран средствами пакета OpenGL, применяемого к графу сцены. Отображение сцены сводится к обходу графа в соответствии с иерархией (от корня к листьям). С этой точки зрения граф сцены можно трактовать как непроцедурное представление программы на OpenGL, а его обход при отображении — как выполнение этой программы.

Граф сцены составляет базу данных сцены. Порядок наполнения базы данных может быть произвольным. Ее можно наполнять „вручную“ — конструируя объекты и включая их в иерархию, а можно загружать из файла. Базу в любой момент можно редактировать: добавлять и исключать объекты, связывать их друг с другом или модифицировать. В результате визуальный образ сцены всегда соответствует состоянию базы данных, редактируя которую определенным образом, можно получить эффект анимации.

СОН содержит средства интерактивного взаимодействия, базирующиеся на структурном описании сцены и реализующие обратную связь через частичное редактирование сцены, создавая тем самым эффект анимации. С помощью этих средств пользователь может выбирать ракурс и масштаб изображения.

Следует выделить особенности СОН по сравнению с распространенными системами Open Inventor и Java3D, построенными с использованием того же иерархического принципа. В первую очередь, это возможность создания нескольких вариантов отображения. В программе реализованы три варианта (3D-вид, сота, карта, см. рис. 1—3) с помощью узлов-вилки, которые в зависимости от текущего вида выполняют обход графа, только по одной из своих веток.

Два обхода графа дают возможность разделить операции обновления и отображения сцены. Это позволяет избегать рассогласования информации (например, координат), и иметь синхронизированные данные в полях узлов на момент отображения сцены.

В отличие от универсальных библиотек Open Inventor и Java3D, СОН помимо графических примитивов имеет в своем базовом наборе специализированные узлы для подводной сцены (рельеф дна, поверхность моря, линии отстояния от дна и от поверхности моря и т.п.). Разработчик приложения может расширить предлагаемый набор, создав собственный класс объектов. При этом разработчику предоставлена возможность наследовать реализации уже существующих классов, объединять в себе несколько объектов, а также применять различные вспомогательные операции, например, поиск в графе объекта по пути, имени или его типу.

Заключение. Система отображения и наблюдения по своей организации универсальна и инвариантна к характеру акватории, моделируемой сцены и типам подводных аппаратов. При ее использовании в новых проектах изменения вносятся только в модели трехмерных объектов и подсистему связи с тренажерным комплексом.

Рассмотренная система отображения и наблюдения установлена в двух тренажерных комплексах и активно используется в процессе тренировки экипажей подводных аппаратов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Эйнджел Э.* Интерактивная компьютерная графика. Вводный курс на базе OpenGL. 2-е изд. М.: Вильямс, 2001. 592 с.
2. *Wernecke J.* The Inventor Mentor: Programming Object-Oriented 3D Graphics with Open Inventor, Release 2. Addison-Wesley Professional, 1994. 560 p.
3. *Selman D.* Java 3D Programming. Manning Publications, 2002. 400 p.

Сведения об авторе

Алексей Сергеевич Кудрявцев

— Центральный научно-исследовательский институт „Комета“, Научно-проектный центр оптоэлектронных комплексов наблюдения, Санкт-Петербург; инженер-программист; E-mail: alexey_s_k@mail.ru

Рекомендована кафедрой
оптико-электронных приборов

Поступила в редакцию
29.05.08 г.

В. К. ШМИДТ, Г. Б. ГАЛИКЕЕВ, Ф. Ф. ГОРБАЦЕВИЧ, А. С. КУДРЯВЦЕВ

МОДЕЛИРОВАНИЕ И ВИЗУАЛИЗАЦИЯ ЛОКАЛЬНЫХ ОБЛАСТЕЙ НА ПОВЕРХНОСТИ ЗЕМЛИ ПРИ НАБЛЮДЕНИИ СО СПУТНИКА

Рассматривается система трехмерного отображения и наблюдения геопространственной обстановки, включающей земную поверхность, орбитальные спутники и динамические объекты на поверхности Земли. Представлен подход к проектированию подобной системы, а также описаны ее части, такие как орбитальные объекты и поверхность Земли. Перечислены возможные варианты применения системы.

Ключевые слова: система отображения и наблюдения, компьютерная графика, поверхность Земли, спутник.

Космическая съемка и зондирование поверхности Земли являются главным источником информации для воспроизведения геопространственной обстановки при решении задачи наблюдения.

Геопространство — географическая оболочка Земли со статическими и динамическими объектами, подлежащими изучению, отображению, моделированию в пределах ограниченной территории, периода времени, объектового состава (перечня и степени подробности его свойств), указанных потребителем геоинформации. Структурность геопространства проявляется в наличии и расположении его объектов, в том числе явлений и процессов, происходящих в геопространстве в каждый конкретный момент времени.

Геоинформационное обеспечение основывается на базовом понятии геоинформации — одной из разновидностей пространственной информации, востребованной и потребляемой обществом. Геопространственная информация — это исходный материал в цифровой компьютерно-воспринимаемой форме для моделирования в интересах конкретного потребителя, использующего геоинформационные системы.

За последнее десятилетие сформировалось несколько направлений оптико-электронных исследований Земли из космоса. Камеры наблюдения имеют несколько спектральных каналов, способных предоставить высококачественную информацию с различным пространственным и спектральным разрешением. Также информацию получают от радиометров, измеряющих тепловой поток, идущий от поверхности Земли, статических и динамических объектов.

Новые горизонты открывает применение радиолокационных методов дистанционного зондирования земной поверхности: для радиоволн атмосферный облачный слой совершенно прозрачен и на результаты съемки не влияет.

Орбитальные станции, оборудованные всеми современными средствами наблюдения, способны решать практически все задачи. Но все же основной поток данных наблюдений сейчас поступает от специализированных автоматических искусственных спутников Земли. Эти материалы используются для определения пространственного положения исследуемого объекта практически в режиме реального времени.

Благодаря многообразию вариантов оптико-электронных исследований Земли повышается разрешающая способность средств наблюдения. Это, в свою очередь, позволяет работать с локальными областями земной поверхности, но и создает проблемы для моделирования и визуализации локальных областей на поверхности Земли при наблюдении со спутников в геопространственной сцене.

Существенными оказываются вопросы наблюдения за зонами видимости камер спутников и их траекториями. Решением этих проблем становится проектирование и создание системы отображения и наблюдения (СОН) геопространственной сцены.

Подход к проектированию. При работе с искусственными орбитальными спутниками часто отсутствует визуальная демонстрация положения спутника, многие модельные расчеты осложнены необходимостью пересчета положения спутника из его численных координат в положение на карте, недостаточностью иллюстративного материала.

Для решения этих задач в лаборатории моделирования и визуализации была разработана система трехмерной визуализации земной поверхности, спутников, наземных объектов [1].

Термин ГеоСОН состоит из двух частей: „геопространство“ — Земля и окружающие объекты, и СОН — система, с помощью которой пользователь взаимодействует с моделью геопространства (объектами, точками наблюдения) и имеет возможность „управлять“ модельным временем. Самым известным примером ГеоСОН является программа Google Earth.

Программные системы отображения и наблюдения используют модельное представление реальных объектов, графическую систему визуализации. Информативность изображений, полученных с помощью СОН, доминирует над реалистичностью. С помощью СОН возможны управление точками наблюдения и управление временем (т.е. существует возможность выбора временного интервала и скорости воспроизведения изображения). Таким образом, эти системы заключают в себе динамическую интерактивную модель рассматриваемых объектов.

Отображение поверхности. С помощью системы ГеоСОН возможно отображение поверхности Земли; источниками данных для изображения являются результаты спутниковой съемки и аэрофотосъемки. Для воссоздания рельефа местности (горы, холмы, впадины), используются уточненные данные по высоте, появляющиеся при приближении камеры к поверхности (рис. 1). Уточнения дополняют геоид, т.е. модель Земли.

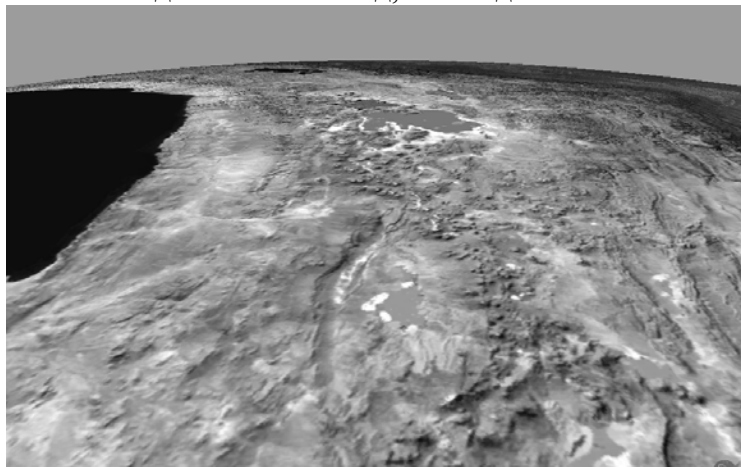


Рис. 1

Поскольку информация о текстуре и высоте занимает значительный объем, система подгружает данные из сети Интернет по мере рассмотрения тех или иных участков земной поверхности (архивы этих данных находятся в свободном доступе; возможно также использование локального архива).

В ГеоСОН используется либо реальное время (текущее), либо заданное — для воссоздания прошедших событий.

Для заданного ограниченного участка Земли возможно определить период времени, в течение которого данный участок будет находиться вне видимости спутников.

Система может использовать два режима: трехмерный и картографической проекции, при этом функциональность картографического режима (УТМ-проекция) идентична функциональности трехмерного [3]. Возможно отображение координатной сетки с указанием широты и долготы.

На рис. 2 представлено отображение Земли в режиме картографической проекции, при этом видны спутники и зоны видимости некоторых спутников (в виде полупрозрачных кругов).

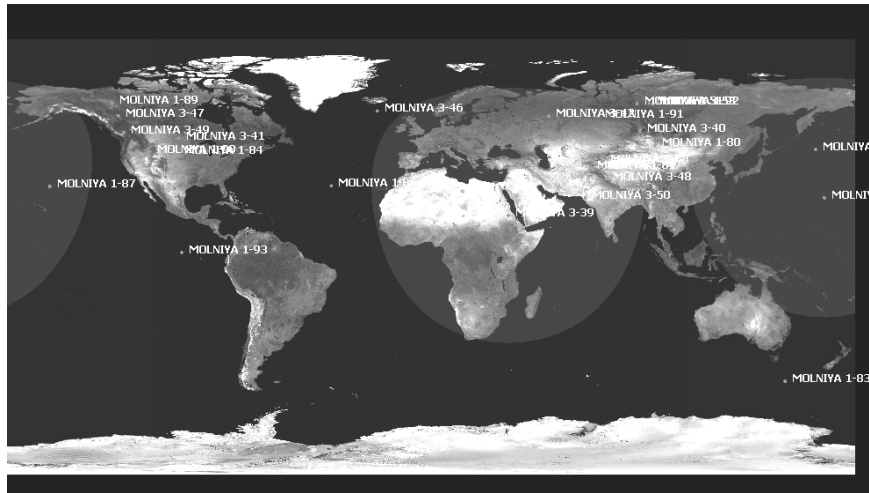


Рис. 2

В системе можно отобразить три вида объектов: динамические „наземные“ (самолеты, корабли), орбитальные (спутники) и космические (Солнце и Луна). Функциональность системы позволяет добавлять новые динамические „наземные“ и орбитальные объекты, производить оперативное слежение за такими объектами.

Источниками данных для динамических наземных объектов являются текстовые GPS-последовательности. Также создан редактор траекторий объектов для задания маршрута их модельных представлений.

Орбитальные объекты. Спутники в системе разделены в соответствии с назначением, например, спутники связи, погодные и частные спутники. Возможно показывать и скрывать как отдельные спутники, так и их группы. Существует возможность вводить в систему новые спутники, задавая параметры их движения.

Для отдельно выбранного спутника отображаются его параметры: угловые координаты, высота, число дней до свода, масса рабочего тела и прочие.

В системе есть возможность отображения траектории спутника, а также зоны видимости и обзора для спутника, последние представляются полупрозрачными конусами [2]. Таким образом, на задаваемые дату и время можно видеть ту область на Земле, которая попадает в поле зрения спутника. Возможно рассматривать покрытие отдельного спутника в динамике (в течение интервала времени), а также сконцентрировать внимание на отдельной области, отслеживая ее покрытие спутниками в течение суток или иного периода. Для двух заданных спутников определяется взаимная видимость, время начала и окончания видимости.

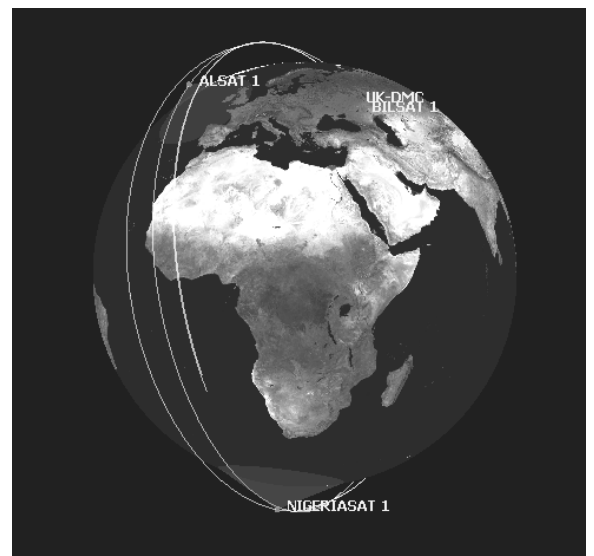


Рис. 3

Отображение спутников в системе показано на рис. 3; при этом движение спутников может быть заметным, если выбрана бóльшая скорость воспроизведения (если масштаб времени — реальный, то движение практически не заметно). Белыми линиями отображаются траектории, полупрозрачными конусами — зоны видимости спутников.

Возможные области применения системы. С помощью системы ГеоСОН можно решать следующие задачи:

— аэрокосмические (отображение орбитальной обстановки в центре управления полетами, отображение окружающей обстановки для членов экипажа МКС, проведение тренировочных занятий в учебных центрах);

— частные (задачи метеорологии, логистики, связи, безопасности, геологии и географии);

— оборонные (планирование и проведение операций, удаленное управление орбитальными объектами).

Планируются адаптация системы для работы с локальным участком земной поверхности размером 100×100 км и введение спутников с эллиптическими орбитами с целью подбора параметров их орбиты для круглосуточного наблюдения за выбранным участком. Предполагается, что система будет использоваться как для моделирования полета спутников на подготовительной стадии, так и для отслеживания и проецирования получаемых изображений со спутников в режиме реального времени.

Техническая реализация системы выполнена на языке C#, с использованием Managed DirectX в качестве графического слоя. Данный вариант реализации позволил воспользоваться существующими библиотеками отображения земной поверхности и задействовать удобные программные интерфейсы и базовые классы управляемого DirectX, распределенные по пакетам.

Также был создан прототип системы ГеоСОН на декларативном языке X3D с использованием языка Java. При относительно небольших временных затратах на реализацию прототипа на декларативном языке был получен работоспособный вариант системы для демонстрации основных возможностей.

Созданная программная система демонстрирует возможности технологий компьютерного моделирования и трехмерной графики применительно к предметной области околоземного и наземного пространства (геопространства). Отображение искусственных спутников Земли средствами созданной системы способно значительно улучшить восприятие информации.

Возможна интеграция системы с иными программными комплексами для решения различных предметных задач: подбора параметра запуска спутников, расчета времени нахождения на солнце и в тени для корректировки внутренних систем спутника, моделирования процесса спутниковой съемки и отображения результатов такой съемки в модели, слежения за положением спутника в реальном времени и др.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Горбацевич Ф. Ф., Шмидт В. К. Модель системы отображения и наблюдения в околоземном пространстве // Мат. 58-й науч.-технич. конф. профессорско-преподавательского состава ЛЭТИ. СПб: СПбГЭТУ, 2005.
2. Кудинов А. В. Проектирование и разработка модуля орбитальных объектов в геопространственной системе отображения и наблюдения. СПб: СПбГЭТУ, 2005.
3. Власов С. В., Шмидт В. К. Проектирование и разработка модуля картографических проекций в геопространственной системе отображения и наблюдения. СПб: СПбГЭТУ, 2005.

Сведения об авторах

Владимир Константинович Шмидт

— канд. техн. наук, профессор; Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет „ЛЭТИ“, кафедра вычислительной техники; E-mail: vks@peterlink.ru

Геннадий Борисович Галикеев

— канд. техн. наук; Центральный научно-исследовательский институт „Комета“, Научно-проектный центр оптоэлектронных комплексов наблюдения, Санкт-Петербург; E-mail: Lab3@eoss.ru

Феликс Феликсович Горбачевич

— аспирант; Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет „ЛЭТИ“, кафедра вычислительной техники; E-mail: gorbachevich@gmail.com

Алексей Сергеевич Кудрявцев

— аспирант; Центральный научно-исследовательский институт „Комета“, Научно-проектный центр оптоэлектронных комплексов наблюдения, Санкт-Петербург; E-mail: alexey_s_k@mail.ru

Рекомендована кафедрой
вычислительной техники

Поступила в редакцию
29.05.08 г.

ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ В БИОМЕДИЦИНЕ

УДК 004.93

А. С. КУПРИЯНОВ

МЕТОДЫ ОБРАБОТКИ И АНАЛИЗА ПУПИЛЛОГРАММ

Рассматриваются возможные методы анализа пупиллограмм: аппроксимационный, основанный на минимизации невязки между измеренной пупиллограммой и аналитической функцией; метод, основанный на классификации пупиллограмм с помощью экстремумов, рассмотрены преимущества и недостатки подхода, основанного на использовании нейронных сетей.

Ключевые слова: пупиллометрия, аппроксимация, классификация, дискриминантный анализ.

Известно, что площадь зрачка зависит от многих факторов, в том числе от эмоционального и физического состояния человека. В темноте зрачки расширяются, на свету — сужаются, таким образом регулируется освещенность сетчатки. На этом принципе основано пупиллометрическое обследование, которое заключается в стимулировании сетчатки обследуемого вспышкой света с последующей регистрацией изменения площади зрачка. Пупиллометрическое обследование (от лат. *pupilla* — зрачок) эффективно, неинвазивно и безвредно для обследуемого. Это делает пупиллометрию весьма ценным диагностическим методом, который применяется в настоящее время в офтальмологии, невропатологии, наркологии, в общей медицинской практике для диагностики некоторых классов общесоматических заболеваний, в токсикологии для ранней диагностики интоксикации некоторыми ксенобиотиками [1, 2]. Последнее из указанных направлений является особенно актуальным в связи с работами по уничтожению химического оружия, проводимыми в России в рамках Федеральной целевой программы.

Площадь зрачка регулируется двумя мышцами: сфинктером (сужающей мышцей) и дилататором (расширяющей мышцей). Эфферентный путь сфинктера проходит от среднего мозга через цилиарный ганглий, а дилататора — через спинной мозг и верхний шейный ганглий. Однако зрачковые реакции человека еще не до конца изучены, и математические модели, существующие на сегодняшний день, не описывают пупилломоторной системы полностью.

Современное пупиллометрическое обследование проводится с помощью электронно-оптического пупиллометра. На сетчатку глаза подается стимул в виде световой вспышки, затем регистрируются две последовательности цифровых изображений глаза (для каждого глаза — своя последовательность), которые поступают в компьютер. На каждом из кадров выделяется область зрачка, далее на каждом кадре производится оценка площади зрачка и ее изменений. На основании полученных данных строится график зависимости площади зрачка

по времени — пупиллограмма. В соответствии с ней принимается решение о наличии и характере патологий.

В настоящей работе рассмотрены различные подходы и алгоритмы, позволяющие описывать и классифицировать пупиллограммы.

Рассмотрены алгоритмы обработки пупиллограмм на примере пупиллометрического комплекса КСРЗРц-01, разработанного совместно Научно-исследовательским центром гигиены, профпатологии и экологии человека и научно-проектным центром „Оптико-электронные комплексы наблюдения“ (Санкт-Петербург).

В рассматриваемый пупиллометрический комплекс входят пупиллометр, персональный компьютер, программное обеспечение и принтер. Пупиллометр состоит из двух камер, импульсного газоразрядного источника света, системы инфракрасной подсветки, корпуса и набора микросхем, обеспечивающих управление и связь с компьютером.

На рис. 1 представлены типичные изображения зрачков. Последовательность кадров зарегистрирована в течение 3—6 с, со скоростью 50 кадров в секунду, формат кадра — 384×288, серое изображение 8 бит/пиксел.

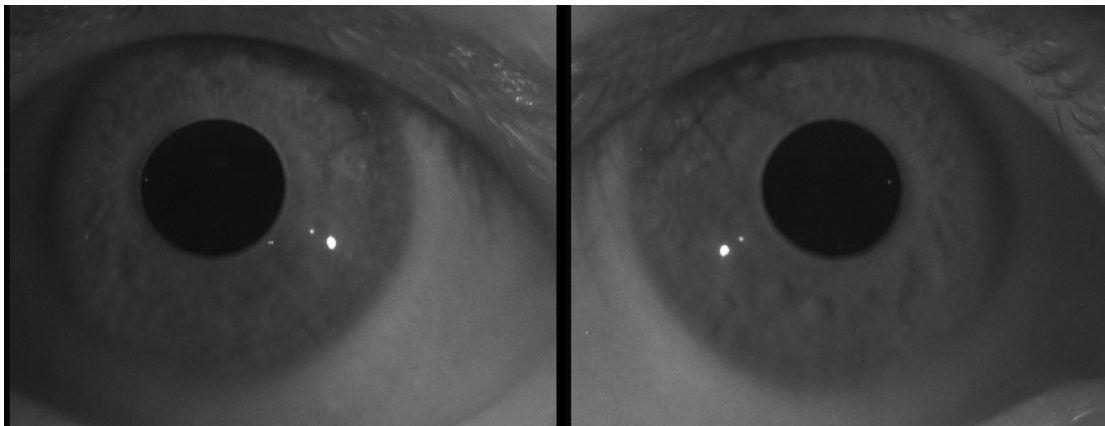


Рис. 1

Типичные примеры пупиллограмм, принадлежащих разным обследуемым, приведены на рис. 2 (d — диаметр зрачка, пунктир — момент вспышки).

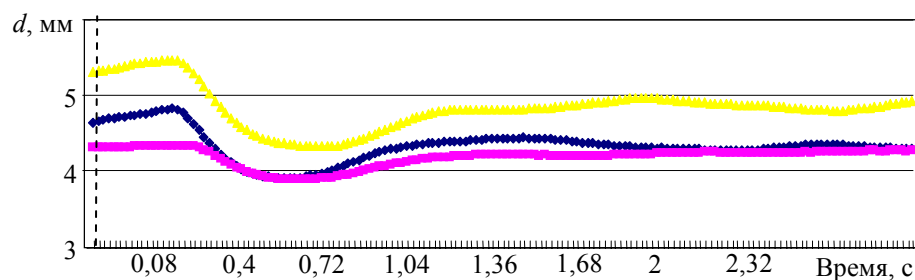


Рис. 2

До настоящего времени используется кусочно-линейная модель пупиллограммы, для которой вычисляются следующие параметры зрачка: диаметр начальный (ДН), диаметр конечный (ДК), амплитуда сужения (АС), скорость сужения (СС), скорость расширения (СР), латентное время реакции (ЛВ), время сужения (ВС), время расширения (ВР). Только некоторые из этих параметров (ДН, ДК, АС, СС, СР, ЛВ) измеряются непосредственно и являются независимыми, остальные (ВС и ВР) являются функцией первой группы параметров. Затем совокупность параметров сравнивается с индивидуальной нормой обследуемого (которая вычисляется заранее, в частности, до того как человек начал работать на вредном производстве) или с групповой нормой для его возрастной категории. Если хотя бы один параметр выходит

из диапазона двух средних квадратических отклонений (СКО), констатируется отклонение от нормы.

Точность аппроксимации кусочно-линейной модели невысока, кроме того, она весьма плохо описывает такие явления, как колебания на заднем фронте пупиллограммы, задержка перед началом расширения, оборонительный рефлекс и т. д. Использование подхода со СКО позволяет обнаруживать только наличие патологий, но не их характер.

Аппроксимационный метод. Один из подходов к решаемой проблеме заключается в аппроксимации пупиллограммы параметрической функцией и определении ее параметров с последующим дискриминантным анализом (рис. 3). Пусть есть некоторая аналитическая функция f (модель пупиллограммы), зависящая от времени и некоторого набора параметров, измеренная пупиллограмма и некоторый критерий невязки. Необходимо подобрать такие параметры аналитической функции, чтобы ее отклонение от измеренной пупиллограммы было минимальным с учетом критерия невязки. Параметры могут быть найдены с помощью одного из стандартных алгоритмов оптимизации.

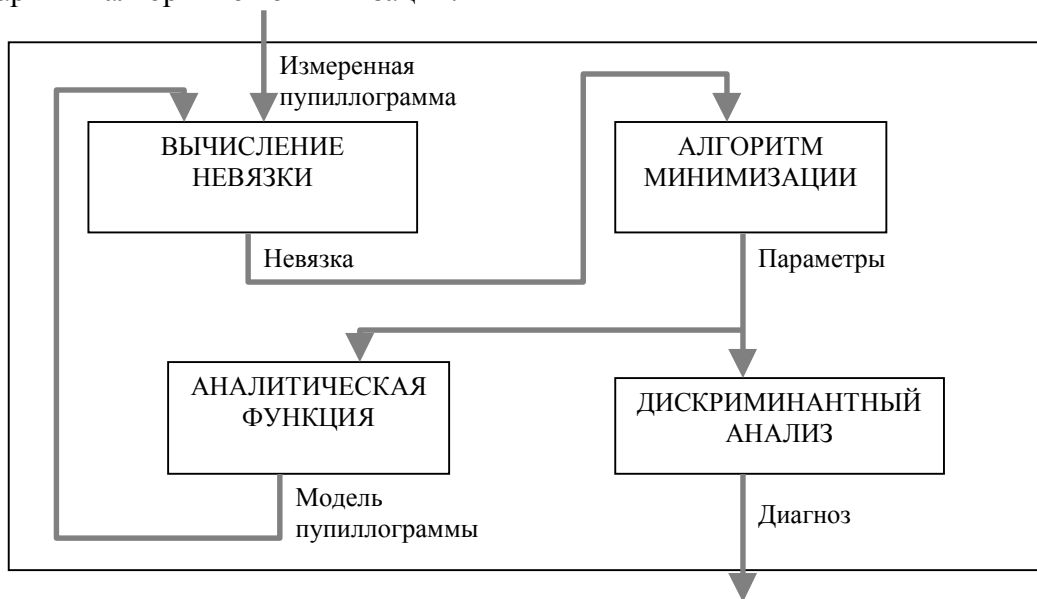


Рис. 3

Аналитическую функцию, аппроксимирующую пупиллограмму, можно выбрать исходя из следующих критериев: качество аппроксимации пупиллограммы данной функцией, устойчивость решения относительно параметров, статистическая корреляция между параметрами кривой и теми или иными патологиями и возможность интерпретации параметров модели (привязки того или иного параметра модели к параметру пупилломоторной системы). В качестве невязки используется СКО или взвешенное СКО.

Были использованы модели, в которых реакция зрачка на вспышку была представлена в виде реакции линейной системы на единичный импульс. Использовались линейные дифференциальные уравнения с искусственной задержкой сигнала. В качестве входных параметров выступали: корни характеристического уравнения, начальные условия и задержка. Было проведено множество вычислительных экспериментов по моделированию пупиллограмм линейными системами (моделями) разной степени с различным количеством ненулевых коэффициентов, как с искусственной задержкой, так и без нее.

В вычислительных экспериментах использованы десять различных пупиллограмм и двадцать две линейные модели. И хотя ни одна линейная модель не является полностью удовлетворительной, можно сделать некоторые обобщения. Модели пупиллограмм с двумя и более ненулевыми начальными условиями значительно точнее, чем модели с одним ненулевым начальным условием, так же как модели с задержкой точнее по сравнению с моделями

без задержки — в последних появляются колебания в моменты, когда у настоящей пупиллограммы колебаний нет. Модель второй степени с начальной задержкой и всеми ненулевыми начальными условиями представляет собой компромисс между приемлемой точностью и достаточной устойчивостью. Среди моделей третьей степени наилучшей представляется модель с задержкой, с ненулевой второй производной и ненулевой разностью между начальным и конечным диаметром. Модели четвертой степени, по-видимому, не имеют очевидных преимуществ перед моделями третьей степени. В целом, можно заключить, что линейные модели плохо аппроксимируют пупиллограммы, поскольку пупилломоторная система не является линейной.

Еще один возможный метод аппроксимации пупиллограмм — использование кривых Безье 3-го порядка. С помощью кривых Безье был смоделирован только небольшой участок пупиллограммы от момента начала съемки до получения минимального значения диаметра зрачка. При этом кривая аппроксимации состояла из двух фрагментов. Предполагается, что на первом участке идет процесс спонтанного низкочастотного колебания зрачка, он аппроксимируется отрезком; а на втором происходит процесс сокращения зрачка, он аппроксимируется одним участком кривой Безье 3-го порядка. К достоинствам модели можно отнести весьма малую невязку в большем количестве пупиллограмм, можно утверждать, что она хорошо описывает первую часть пупиллограммы. Главным недостатком модели является низкая устойчивость по большей части ее параметров. Другой существенный недостаток состоит в том, что данная модель описывает только фрагмент пупиллограммы.

Были разработаны две нелинейные модели исходя из следующих предположений: площадь зрачка регулируется двумя мышцами — сфинктером и дилататором, сфинктер работает только в том случае, когда диаметр зрачка больше „оптимального“, и может только сужать зрачок, дилататор, наоборот, работает только в том случае, когда диаметр зрачка меньше „оптимального“, и может только расширять зрачок, обе мышцы срабатывают с задержками, сила воздействия каждой пропорциональна свертке разности между площадью зрачка и „нормой“ с некоторой функцией, описывающей реакцию этой мышцы. В качестве такой функции используется экспонента. В модели первого порядка предполагается, что сила жидкого трения при сокращении зрачка пропорциональна скорости, а масса радужной оболочки пренебрежимо мала, поэтому скорость расширения или сокращения зрачка пропорциональна силе. В модели второго порядка учтено влияние массы радужной оболочки глаза. Тогда выражения для нее выглядят следующим образом:

$$x' = -A_s \int_{\tau_s}^{\infty} |x(t-\tau) + l(t-\tau)|_+ e^{-\beta_s \tau} d\tau + A_d \int_{\tau_d}^{\infty} |-x(t-\tau) - l(t-\tau)|_+ e^{-\beta_d \tau} d\tau,$$

$$x'' + kx' + A_s \int_{\tau_s}^{\infty} |x(t-\tau) + l(t-\tau)|_+ e^{-\beta_s \tau} d\tau - A_d \int_{\tau_d}^{\infty} |-x(t-\tau) - l(t-\tau)|_+ e^{-\beta_d \tau} d\tau = 0,$$

где $x(t)$ — площадь зрачка, $l(t)$ — функция освещенности сетчатки, A_s и A_d — „сила“ сфинктера и дилататора, τ_s и τ_d — время задержки отклика сфинктера и дилататора, β_s и β_d — эквивалентная „ширина“ окон свертки, k — коэффициент жидкого трения системы. Обе эти модели довольно плохо аппроксимируют пупиллограммы (СКО $\sim 0,3$ — $0,6$ мм). Это, вероятно, связано с тем упрощением, согласно которому в каждый момент времени работает либо сфинктер, либо дилататор. На самом деле в каждый момент времени работают и сфинктер, и дилататор.

Классификационный метод (рис. 4) основан на том предположении, что люди со схожими патологиями будут иметь схожие пупиллограммы. Тогда можно выбрать некоторое количество эталонных пупиллограмм, снятых у заведомо здоровых людей и людей с заранее известными патологиями, затем сравнивать пупиллограмму обследуемого с эталонными. Для реализации подобного подхода необходим критерий близости между пупиллограммами.

Метод включает три этапа: выделение на пупиллограмме последовательности особых („важных“ [3, 4]) точек, определения степени различия между двумя пупиллограммами и собственно дискриминантного анализа.

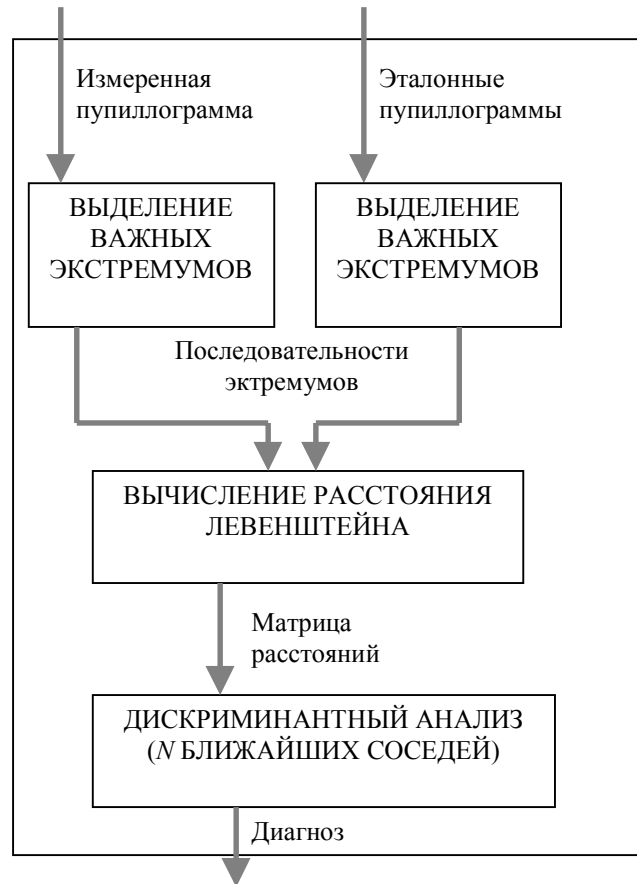


Рис. 4

На пупиллограмме выделяются „важные“ экстремумы и „важные“ экстремумы ее производной [4]. „Важным“ максимумом называется, в частности, такая точка P , которая строго больше точек некоторой своей окрестности Z , причем в этой окрестности и слева, и справа есть такие точки P_1 и P_r , что $P - P_1 \geq Q$ и $P - P_r \geq Q$, в этом случае Q называется мерой „важности“ точки P (в работе [4] предлагаются и другие меры „важности“). Таким образом, пупиллограмма представляется в виде последовательности „важных“ точек.

На втором этапе требуется задать расстояние (меру близости) между каждой парой кривых. Поскольку они представлены в виде строкоподобных объектов, т.е. последовательностей экстремумов, то вполне разумным представляется задать между ними расстояние редактирования, или расстояние Левенштейна [5], которое определяется как минимальное количество операций вставки, замены и удаления, необходимых для того, чтобы „превратить“ одну строку в другую.

На этапе дискриминантного анализа используется метод N ближайших соседей [6], наиболее приемлемый в условиях, когда известны только расстояния между образцами.

Данный подход показал неплохие результаты на небольшой выборке из 20 пупиллограмм, однако требуется дальнейшее тестирование и апробация; его основным недостатком является отсутствие модели пупилломоторного рефлекса.

Еще один подход (рис. 5) — это разложение пупиллограммы с помощью базисных функций, например дискретного косинусного преобразования или вейвлетов, и последующий анализ полученных коэффициентов с использованием нейронных сетей [6]. Такой подход,

однако, малоприменим, так как не позволяет эксперту интерпретировать пупиллограмму и не описывает процессы, происходящие в пупилломоторной системе.

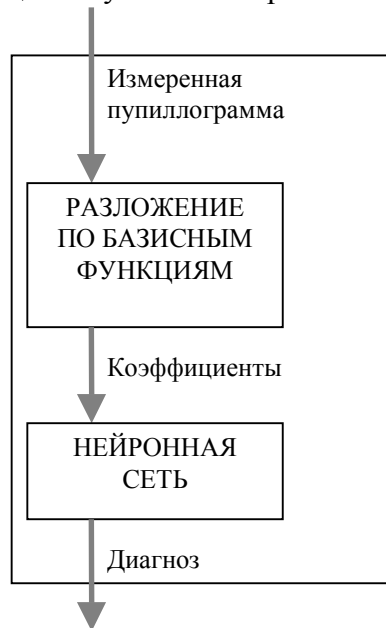


Рис. 5

В статье рассмотрен ряд подходов и методов, позволяющих анализировать, аппроксимировать пупиллограммы, выделять в них особые точки, классифицировать их с целью определения наличия, характера и степени патологии нервной системы. Аппроксимационный метод с линейными дифференциальными уравнениями, с кривыми Безье и нелинейными моделями, а также классификационный метод реализованы программно. В настоящее время проводится дальнейшая разработка и апробация вышеописанных методов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Шахнович А. Р., Шахнович В. Р. Пупиллометрия. М.: Медицина, 1964.
2. Вельховер Е. С., Ананин В. Ф. Пупиллодиагностика. М.: Изд-во УДН, 1991.
3. Knowledge Discovery from Sequential Data / F. Höppner. 2003. [Электронный ресурс]: <<http://citeseer.ist.psu.edu>>.
4. Important Extrema of Time Series: Theory and Applications / H. S. Gandhi. 2004. [Электронный ресурс]: <<http://citeseer.ist.psu.edu>>.
5. Левенштейн В. И. Двоичные коды с исправлением выпадений, вставок и замещений символов // ДАН СССР. 1965. Т. 163, № 4. С. 845—848.
6. Люгер Д. Ф. Искусственный интеллект. М.: Вильямс, 2005.

Сведения об авторе

Александр Сергеевич Куприянов — Центральный научно-исследовательский институт „Комета“, Научно-проектный центр оптоэлектронных комплексов наблюдения, Санкт-Петербург; инженер; E-mail: sector1@eoss.ru

Рекомендована кафедрой
оптико-электронных приборов

Поступила в редакцию
29.05.08 г.

М. З. СМОРНОВ, А. Е. ПУШКАРЕВА

ОСОБЕННОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ УРАВНЕНИЯ ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ ДЛЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ ВОЗДЕЙСТВИЯ ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ НА КОЖУ

Проведено моделирование воздействия лазерного излучения на кожу. Для учета влияния кровотока в уравнение теплопроводности добавлены источники тепла, обусловленные потоком крови. Показано, что учет температурной зависимости скорости кровотока приводит к появлению максимума температуры и дальнейшей ее стабилизации.

Ключевые слова: математическое моделирование, уравнение теплопроводности, кровоток, кожа.

Введение. Воздействие лазерного излучения на биологическую ткань, например кожу, обычно сопровождается локальным повышением ее температуры. Нагрев, в свою очередь, вызывает ответные реакции организма. В частности, отмечаются сосудистые реакции, проявляющиеся даже на некотором расстоянии от области воздействия. Происходит местное расширение сосудов, снижается вязкость крови, что приводит к увеличению скорости ее течения.

В норме линейная скорость кровотока в капиллярах (диаметр $d = 8$ мкм) очень низкая и составляет примерно 0,1 мм/с, а в мелких венах ($d = 0,75$ мм) — 0,05 м/с. При локальном нагреве она может возрасти в несколько раз. Кроме того, скорость кровотока не мгновенно реагирует на изменения температуры. Время задержки довольно велико и составляет, согласно [1], 60—90 с. Такие изменения скорости течения крови влияют на результат воздействия лазерным излучением, особенно если результат зависит от степени термического повреждения биоткани, поскольку кровоток может быть дополнительным и достаточно эффективным механизмом отведения тепла от области обработки. Оценка влияния данного эффекта может быть проведена с помощью численного моделирования динамики процессов, происходящих при воздействии лазерного излучения на кожу.

В настоящей работе проведено моделирование лазерного нагрева кожи для трех случаев. В первом случае расчеты проводились без принятия во внимание кровотока, во втором — задавалась постоянная скорость течения крови, в третьем учитывалась зависимость температуры от скорости кровотока. Результаты, полученные для этих трех случаев, позволяют оценить влияние кровотока на лазерный нагрев кожи.

Модель. В расчетах была воспроизведена обработка кожи лазерным излучением с длиной волны 810 нм. Рассматривался импульсный режим с длительностью одного импульса 1 с и частотой повторения 0,8 Гц. Плотность энергии импульса 1,6 Дж/см², диаметр пятна на коже 7,5 см, длительность обработки 250 с. Считалось, что начальная температура кожи равна 37 °С и в процессе обработки поверхность кожи охлаждается воздушным потоком, температура которого равна 20 °С. Такой режим представляется характерным для лазерной обработки жировой ткани.

С учетом строения кожи была разработана ее модель, включающая в себя четыре слоя — эпидермис (толщина 70 мкм), базальный слой (15 мкм), дерма, или истинная кожа (3 мм), и подкожная жировая клетчатка (5 мм). Тип кожи — наиболее распространенный — 2-й по Фицпатрику. Кровеносные сосуды располагаются в дерме и жире. Скорость течения крови в сосудах разного типа различна и зависит от диаметра сосуда. Для расчетов были приняты следующие значения плотности потока крови: в дерме 15 мл/(мин·100 г), в подкожной

жировой клетчатке 5 мл/(мин·100 г) [1]. Скорость кровотока практически неизменна при температуре меньше 41,5 °С и линейно возрастает при дальнейшем нагреве.

Моделирование динамики оптических и тепловых процессов диффузии при воздействии оптического излучения на кожу проводилось на основе теории переноса излучения, а также теории теплопроводности. Распределение освещенности в среде рассчитывалось при помощи уравнения переноса излучения в диффузионном приближении [2]:

$$\nabla^2 \varphi_s(\mathbf{r}) - 3\mu_a \mu_{tr} \varphi_s(\mathbf{r}) + 3\mu_s \mu_{tr} E(\mathbf{r}, \hat{s}_0) - 3\mu_s g \nabla(E(\mathbf{r}, \hat{s}_0) \hat{s}_0) = 0, \quad (1)$$

где $\varphi_s(\mathbf{r})$ — диффузная составляющая освещенности в точке $\mathbf{r} = (x, y, z)$, μ_a — коэффициент поглощения, μ_s — коэффициент рассеяния, $\mu_{tr} = \mu_a + (1-g)\mu_s$ — транспортный коэффициент затухания, $E(\mathbf{r}, \hat{s}_0)$ — коллимированная освещенность в точке \mathbf{r} , \hat{s}_0 — направление распространения первичного луча, g — фактор анизотропии рассеяния.

На основе распределения освещенности внутри кожи была рассчитана объемная плотность источников тепла в среде:

$$Q(\mathbf{r}) = \mu_a \varphi(\mathbf{r}) E_0 / \tau_p, \quad (2)$$

где $\varphi(\mathbf{r})$ — полная освещенность в точке \mathbf{r} , отнесенная к единичной плотности мощности излучения на поверхности кожи, E_0 — плотность энергии излучения, τ_p — длительность импульса.

Далее был проведен расчет распределения температуры в каждом слое (в эпидермисе и базальном слое), для чего использовалось уравнение теплопроводности:

$$\rho c \frac{\partial T(\mathbf{r}, t)}{\partial t} = \nabla(\kappa \nabla T(\mathbf{r}, t)) + Q(\mathbf{r}), \quad (3)$$

где ρ — плотность ткани, c — теплоемкость, t — время, $\kappa = \alpha \rho c$ — теплопроводность, α — температуропроводность, T — температура.

Данное уравнение применимо только для слоев, где нет кровотока — эпидермиса и базального слоя. Для дермиса и жира следует дополнительно учитывать источники тепла, обусловленные потоком крови, $Q_b(t, T)$. В этих слоях уравнение теплопроводности принимает следующий вид:

$$\rho c \frac{\partial T(\mathbf{r}, t)}{\partial t} = \nabla(\kappa \nabla T(\mathbf{r}, t)) + Q(\mathbf{r}) + Q_b(t, T). \quad (4)$$

Слагаемое $Q_b(t, T)$ можно записать следующим образом [2]:

$$Q_b(t, T) = \rho c [\rho_b f (T_b - T)], \quad (5)$$

где ρ_b — плотность крови, T_b — ее температура (36,5 °С), f — плотность потока крови в ткани, представляющая собой объем крови, переносимый в секунду в 1 грамме соответствующей ткани. В стационарных условиях плотность потока равна f_0 и различна для дермиса и жира. Кроме того, стационарная плотность потока зависит от температуры, т.е. можно записать $f_0 = f_0(T)$.

В настоящей работе рассматриваются нестационарные условия воздействия излучения на кожу. В этом случае f не равно $f_0(T)$. Как уже было отмечено выше, при изменении температуры поток крови изменяется не мгновенно, а с задержкой $t_{\text{delay}} = 60—90$ с. Для учета данной задержки используем следующее уравнение для потока крови:

$$\frac{\partial f}{\partial t} = \frac{f_0(T) - f}{t_{\text{delay}}}, \quad (6)$$

Таким образом, для расчета температуры кожи с учетом скорости кровотока и ее изменения вследствие нагрева, а также времени задержки этого изменения с использованием выражений (4)—(6) была получена система уравнений.

Результаты и их обсуждение. Как было указано выше, моделирование воздействия лазерного излучения на кожу проводилось для трех случаев. Для сравнения были получены графики зависимости температуры базального слоя (на глубине 83 мкм), дермы (на глубине 2 мм) и подкожной жировой клетчатки (на глубине 5 мм) от времени (рис. 1, 2), зависимости температуры от глубины для всех случаев (рис. 4) а также для третьего случая — зависимость плотности потока крови от времени (рис. 3).

На рис. 1, *а* приведены графики зависимости без учета кровотока, на рис. 1, *б* — с учетом постоянной скорости кровотока.

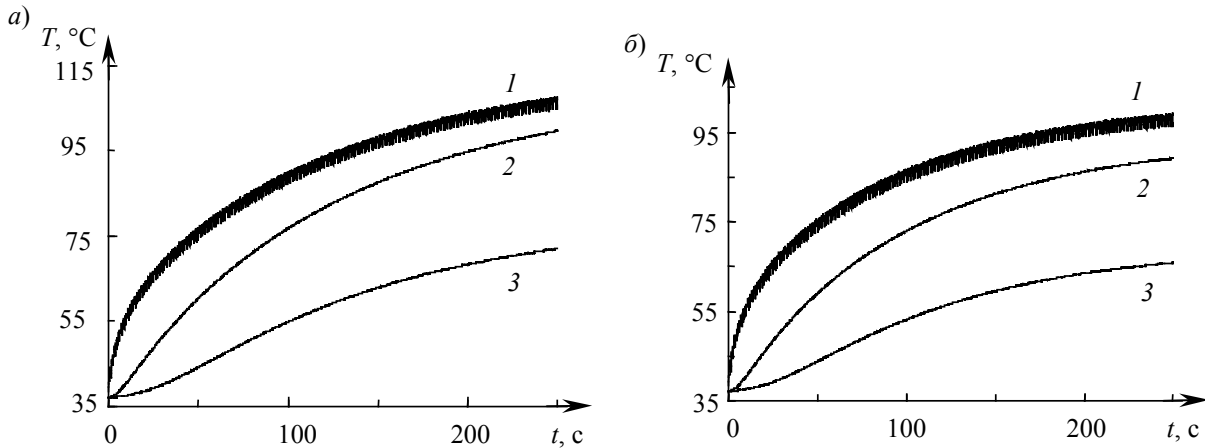


Рис. 1

Временная зависимость температуры базального слоя (1) представляет собой чередование максимумов и минимумов. Такой характер объясняется импульсным режимом обработки, а также малым временем тепловой релаксации базальной мембраны. Зависимости температуры дермы (2) и жировой клетчатки (3) от времени не показывают подобных колебаний, поскольку происходит их сглаживание вследствие большей глубины указанных слоев.

Введение в расчет постоянной скорости кровотока дает снижение температуры всех слоев на несколько градусов, однако не изменяет характера временной зависимости температуры относительно первого случая (рис. 1). Нарастание температуры базального слоя происходит сначала достаточно резко, затем более медленно.

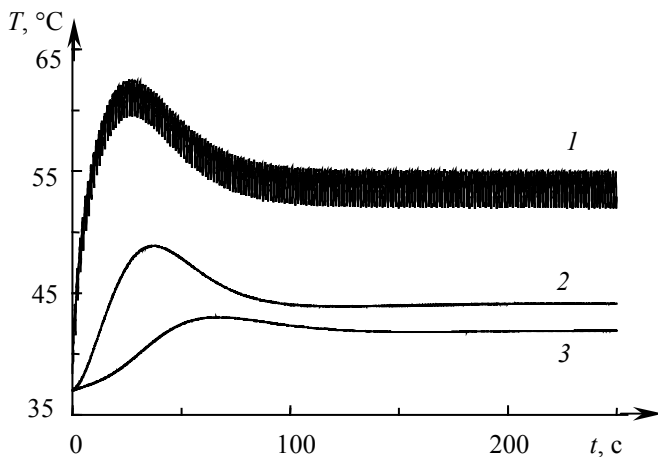


Рис. 2

В дерме скорость увеличения температуры меньше, а в подкожной жировой клетчатке начало обработки практически не сопровождается нагревом слоя.

Введение температурной зависимости скорости кровотока резко изменяет тепловую динамику кожи (рис. 2, здесь 1 — базальный слой, 2 — дерма, 3 — жировая клетчатка). Сначала нарастание температуры ничем не ограничено. После достижения температуры 41,5—42 °С начинает возрастать плотность потока крови (рис. 3, 1 — дерма, 2 — жировая клетчатка) и через некоторое время температура начинает снижаться, в дальнейшем приводя к ее стабилизации.

Это приводит в свою очередь к уменьшению и стабилизации скорости кровотока. Изменение температуры в дерме и подкожной жировой клетчатке вследствие

изменения потока крови оказывает влияние также на динамику температуры базального слоя (рис. 2). Максимальная температура данного слоя намного больше, чем дермы и жира, так как за счет содержащегося в нем меланина излучение поглощается сильнее. Поскольку поток крови в базальном слое отсутствует, не происходит непосредственного отведения тепла за счет кровотока.

Температурная зависимость потока крови также оказывает влияние и на распределение тепла по глубине (рис. 4, здесь 1 — без учета кровотока, 2 — скорость кровотока постоянна, 3 — скорость кровотока зависит от температуры). Видно, что характер охлаждения кожи при движении в глубь среды в третьем случае отличается от первых двух. Наибольшая скорость спада температуры в этом случае наблюдается в верхней части дермы, а не в подкожной жировой клетчатке. Интересно, что на глубине 8 мм температура одинакова и равна начальной температуре ткани 37 °С.

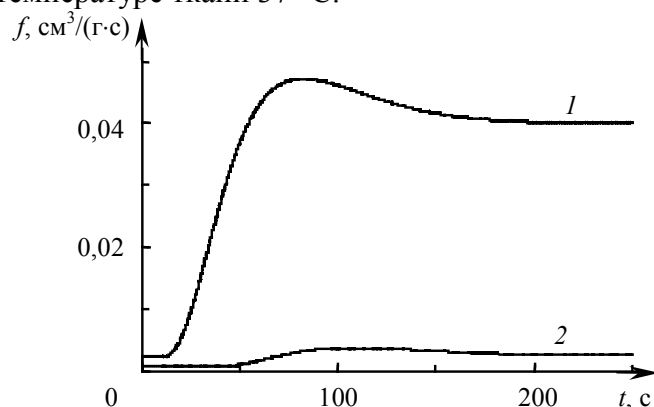


Рис. 3

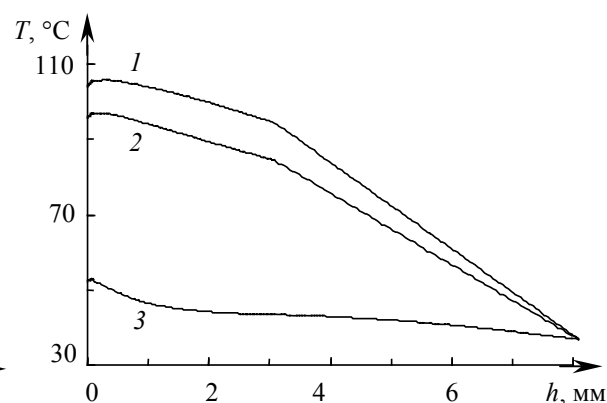


Рис. 4

Заключение. Таким образом, на основе полученных результатов можно сделать вывод о том, что для наиболее достоверного расчета температуры в коже необходимо учитывать как скорость кровотока, так и ее зависимость от температуры, поскольку это явление оказывает большое влияние на результат воздействия лазерного излучения. Учет данной особенности живых биологических тканей осуществляется посредством введения в уравнение теплопроводности источников тепла, обусловленных потоком крови. В отличие от моделей, принимающих во внимание скорость кровотока постоянной или не учитывающих ее вообще, модель, в которой скорость кровотока рассматривается как функция от температуры, позволяет дать наиболее полную оценку динамики температуры в коже.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Sekins K. M., Emery A. F.* Thermal Science for Physical Medicine. Therapeutic Heat and Cold / Ed. by *J. F. Lehmann* Baltimore: Williams & Wilkins, 1990. P. 62.
2. *Star W. M.* Diffusion theory of light transport // Optical-thermal response of laser-irradiated tissue / Ed. by *A. J. Welch and M. J. C. van Gemert*. NY: Plenum Press, 1995. P. 144.

Сведения об авторах

Михаил Захарович Смирнов

— канд. техн. наук, доцент; Palomar Medical Technologies Inc.;
E-mail: msmirnov@palomarmedical.com

Александра Евгеньевна Пушкарёва

— канд. техн. наук; Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, кафедра лазерной техники и биомедицинской оптики;
E-mail: alpulkareva@yandex.ru

Рекомендована кафедрой
оптико-электронных приборов

Поступила в редакцию
29.05.08 г.

Т. А. ШЕРЕМЕТЬЕВА, А. М. МАЛОВ, Г. Н. ФИЛИППОВ

ОБРАБОТКА ИЗОБРАЖЕНИЙ И МОРФОМЕТРИЧЕСКИЕ ИЗМЕРЕНИЯ ОБЪЕКТОВ В МИКРОСКОПИИ

Представлен способ обработки медико-биологических изображений с помощью их преобразования по принципу сходства с образцом в пространстве признаков. Эффективность метода показана на примерах выделения объектов и вычисления их морфометрических и денситометрических характеристик на медицинских изображениях.

Ключевые слова: обработка изображений, медико-биологические изображения, морфометрические и денситометрические измерения, микроскопия.

Новые медицинские технологии, одной из которых является технология компьютерного анализа изображений, имеют исключительное значение в диагностике заболеваний, проведении гистологических и цитологических исследований, ведении электронного архива препаратов, результатов морфометрии и диагностики.

Основной причиной, тормозящей широкое применение автоматизации компьютерного анализа медицинских изображений в компьютерной микроскопии, является высокая вариабельность и слабая контрастность большинства таких изображений. По этой причине большинство существующих методов [1—3] обработки медицинских изображений направлено на повышение качества изображения для визуального восприятия и интерактивного способа выделения объектов интереса.

Для предварительной интерактивной обработки медицинских изображений предлагается использовать новый метод, основанный на преобразовании изображений по принципу сходства с образцом [4], который позволяет упростить и ускорить процесс выделения объектов.

Суть метода заключается в визуализации меры сходства с эталоном в пространстве признаков. Каждый пиксел обрабатываемого изображения с конкретными пространственными координатами обладает также координатами в пространстве признаков. В качестве признаков могут быть выбраны яркостные (по всем имеющимся каналам), текстурные и другие характеристики.

В результате подобной обработки получают изображение в градации серого, у которого яркость каждого пиксела характеризует его сходство с эталоном. Таким образом, получают „целенаправленное“ визуализированное изображение. Такое изображение позволяет исследователю достаточно просто под визуальным контролем, с использованием своего опыта и контекстной информации, выбрать пороговые ограничения для выделения объектов интереса. Благодаря сочетанию вычислительной мощности компьютера и знаниям исследователя использование такого алгоритма приводит к хорошим результатам.

Варьировать реализацию метода, адаптируя его к конкретной задаче, можно при помощи изменения пространства признаков, меры сходства и способа выбора эталона.

Изменение пространства признаков осуществляется изменением каналов, участвующих в синтезе итогового изображения. Дополнительные каналы могут быть получены как привлечением дополнительных измерений, так и на основе имеющихся каналов путем применения к ним известных морфологических фильтров [5].

Из множества существующих мер сходства в пространстве признаков могут быть использованы, например, такие как: евклидово расстояние в многомерном пространстве; максимальная абсолютная разность координат; угол между векторами; расстояние Махаланобиса.

Представленный интерактивный метод предварительной обработки медицинских изображений обладает следующими преимуществами:

— позволяет осуществлять визуализацию с использованием большого числа каналов, что, в частности, дает возможность проводить обработку многоспектральных изображений, полученных, например, с помощью электронного микроскопа в нескольких спектральных диапазонах;

— не требует проведения предварительной классификации;

— позволяет использовать контекстную информацию при выделении объектов интереса;

— позволяет обрабатывать множество изображений одного препарата, полученных при разных условиях;

— может быть легко адаптирован для решения конкретной задачи по обработке изображений в компьютерной микроскопии.

Рассмотренный метод внедрен в модернизированное программное обеспечение „ДиаМорф Объектив 1.6“ аппаратно-программного комплекса „ДиаМорф“, предназначенного для проведения гистологических и цитологических исследований [www.diamorph.ru].

Продемонстрируем возможности способа визуализации меры сходства с эталоном при выделении различных участков изображения на примере цветного изображения кожи (рис. 1, использовано изображение с сайта <http://www.wolf.ru>). На этом рисунке представлены *RGB*-составляющие исходного цветного изображения препарата, полученного из кожи человека, результат визуализации с использованием яркостных и текстурных признаков (рис. 1, *а*) и результаты выделения различных компонентов этого препарата (рис. 1, *б*, *в*). Видно, что без использования текстурных признаков выделить компонент, представленный на рис. 1, *в*, практически невозможно.

Исходное цветное изображение, разложенное на *RGB*-составляющие



Результаты выделения различных компонент

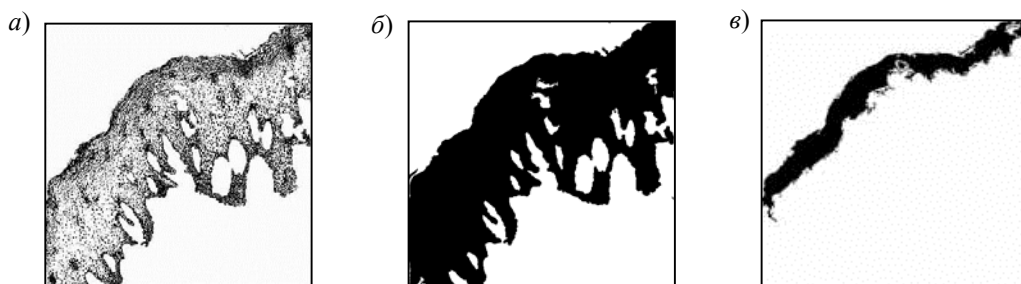


Рис. 1

Использование метода визуализации меры сходства программой „ДиаМорф Объектив 1.6“ позволило повысить достоверность обнаружения и увеличить точность измерений морфометрических параметров выделенных объектов.

Достоверность обнаружения обеспечивается возможностью использования всей доступной информации при целенаправленной визуализации. Точность морфометрических

измерений достигается за счет интерактивного выделения объектов, позволяющего исследователю использовать контекстную информацию.

В качестве морфометрических характеристик выделенных объектов в программе „ДиаМорф Объектив 1.6“ автоматически измеряются такие характеристики, как площадь, периметр; формфактор (ФФ); диаметр круга площадью, равной площади выделенного объекта; минимальный и максимальный размер; координаты „центра масс“; величина проекций на оси X и Y ; средняя интенсивность и оптическая плотность объектов.

Необходимость вычисления упомянутых выше характеристик обоснована потребностями медицины и биологии. Так, в работе [6] утверждается, что исходя из фундаментальных исследований, посвященных оценке более чем 196 качественных и количественных признаков ядра, клетки и общего фона препарата, наиболее значимы параметры, характеризующие морфологические особенности ядра. Например, с целью повышения диагностических возможностей цитологического метода при добро- и злокачественных опухолях молочной железы, при разработке прогностических критериев заболевания используются данные морфометрии и цитоспектрофотометрии. При объективизации цитологических препаратов исходят из информативности следующих признаков: диаметр, периметр и площадь ядра и цитоплазмы, ядерно-цитоплазматическое отношение. В работе [7] при диагностике папиллярного рака предлагается использовать такие характеристики ядер опухолевых клеток, как степень отличия от круглой формы, неровность контура ядерной мембраны, наличие в ядрах бороздок, наличие внутриядерных и цитоплазматических включений, ядерно-цитоплазматическое соотношение.

Для оценки формы объекта может быть использован такой морфометрический параметр, как ФФ, который определяется по формуле $4\pi S/P^2$, где S — площадь объекта, а P — его периметр. Хотя ФФ и является параметром, определяющим степень отличия фигуры от круга, этот параметр может быть использован как для оценки изменений формы в целом (при аппроксимации контура объекта гладкой кривой), так и для оценки локальных изменений границ объекта при обнаружении значительных неровностей границ.

Продемонстрируем способ оценки формы объекта на примере изображения, приведенного на рис. 2 (a — исходное изображение. Нормальные клетки (I и II) окружают апоптотизирующую клетку (III) с локальными изменениями границ (использовано изображение с сайта <<http://www.ccs.k12.in.us>>); b — преобразованное в бинарное изображение с выделенными объектами интереса). Нами были проведены измерения ФФ трех выделенных объектов, результаты которых приведены в таблице.

Объект	Площадь, пикселей	Периметр, у. е.	ФФ	ФФ _{ап}
I	11 692	525,91	0,50	0,97
II	11 881	562,98	0,46	0,98
III	14 881	687,31	0,39	0,75

Объекты I и II (рис. 2, a) визуально можно оценить как почти круглые. Но в силу того что их граница не является гладкой, значения ФФ оказались существенно занижены, что не позволяет судить о близости формы объектов к кругу по признаку ФФ.

Для разрешения данной проблемы предлагается вычислять ФФ_{ап} (аппроксимированный) с использованием сглаженного контура. Сглаженный контур может быть получен путем аппроксимации исходного контура сплайном, параметры которого могут регулироваться пользователем. Таким образом, становится возможным достичь визуального согласия с представлением специалиста об объекте измерения. В программе „ДиаМорф Объектив 1.6“ реализован алгоритм, в котором сглаженный контур получается путем аппроксимации исходного контура некоторым многоугольником, вершины которого лежат на исходном контуре. При этом максимальная длина сторон аппроксимирующего многоугольника определяется про-

центным отношением от значения минимального размера объекта. Это отношение принято равным 20 % от минимального размера объекта (определяется как ширина описывающего прямоугольника, ориентированного по основным осям инерции объекта).

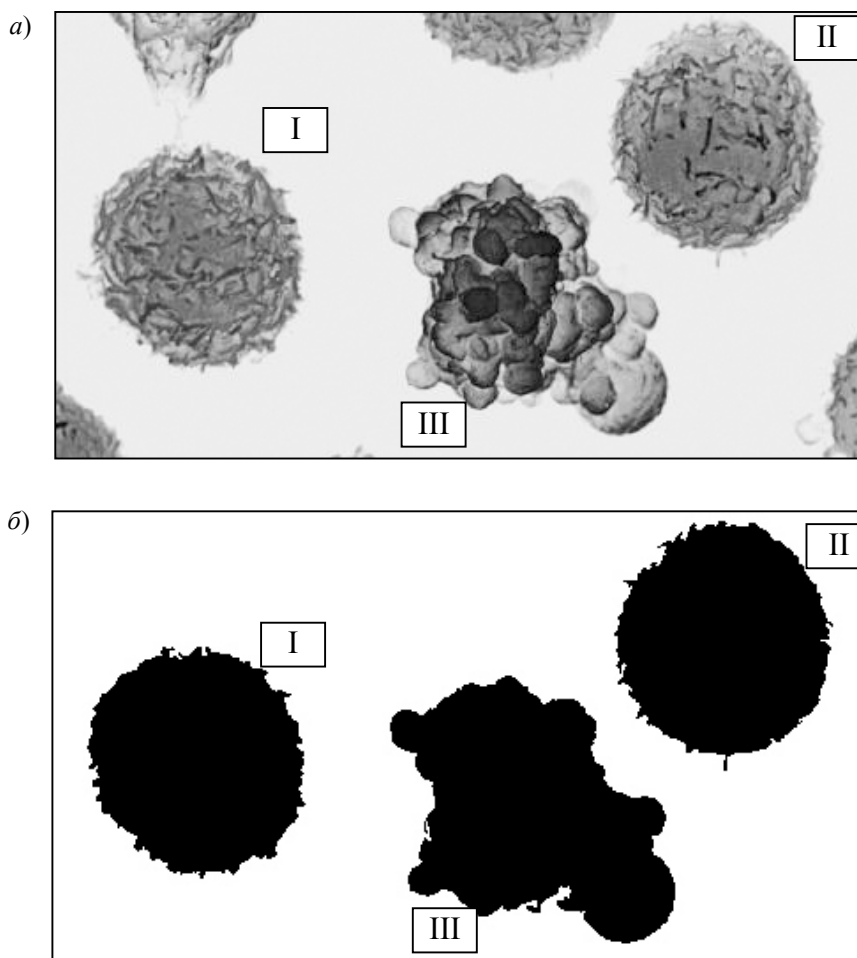


Рис. 2

Из таблицы видно, что для объектов I и II значение $\Phi\Phi_{ар}$ существенно возросло по сравнению со значением $\Phi\Phi$ и стало близким к единице, в то время как для объекта III значение $\Phi\Phi_{ар}$ увеличилось незначительно.

Результаты сравнения значений $\Phi\Phi$ и $\Phi\Phi_{ар}$ могут свидетельствовать о следующем:

— если значение $\Phi\Phi$ невелико, а значение $\Phi\Phi_{ар}$ существенно больше и близко к единице, то объект достаточно округлый, но имеет негладкую границу;

— если значение $\Phi\Phi$ невелико, а значение $\Phi\Phi_{ар}$ близко к $\Phi\Phi$, то объект не круглый, пузырчатый (в наличии признак "blebbing").

При проведении цитологических исследований анализ значений $\Phi\Phi$ и $\Phi\Phi_{ар}$ может оказаться полезным для выявления локальных изменений границ объекта.

Как было отмечено выше, помимо морфометрических параметров ПО „ДиаМорф Объектив 1.6“ позволяет вычислять и денситометрические параметры выделенных объектов, например, такие как оптическая плотность объекта. Данный параметр вычисляется как логарифм отношения средней интенсивности излучения/поглощения фона к средней интенсивности объекта. При проведении цитологических исследований на специальном образом подготовленном препарате полученные значения оптической плотности служат для определения плоидности ядра клетки — методики, перспективной для медицинской диагностики [8, 9].

На рис. 3 представлены результаты преобразования изображения для определения плоидности клеточных ядер (*a* — исходное цветное изображение препарата; *б* — бинарное

изображение с выделенными участками фона (фон обозначен черным цветом); *в* — бинарное изображение с выделенными ядрами (ядра обозначены черным цветом); *г* — гистограмма распределения клеточных ядер K по их плоидности P). При определении плоидности ядра для вычисления средней интенсивности излучения/поглощения фона производится интерактивное выделение областей, принадлежащих фону (рис. 3, *б*). По выделенным участкам подсчитывается значение средней интенсивности фона. Затем таким же образом производится выделение клеточных ядер (рис. 3, *в*) с последующим вычислением значений средней интенсивности и оптической плотности для каждого выделенного ядра. Плоидность ядра клетки вычисляется как произведение оптической плотности ядра на его площадь [8, 9].

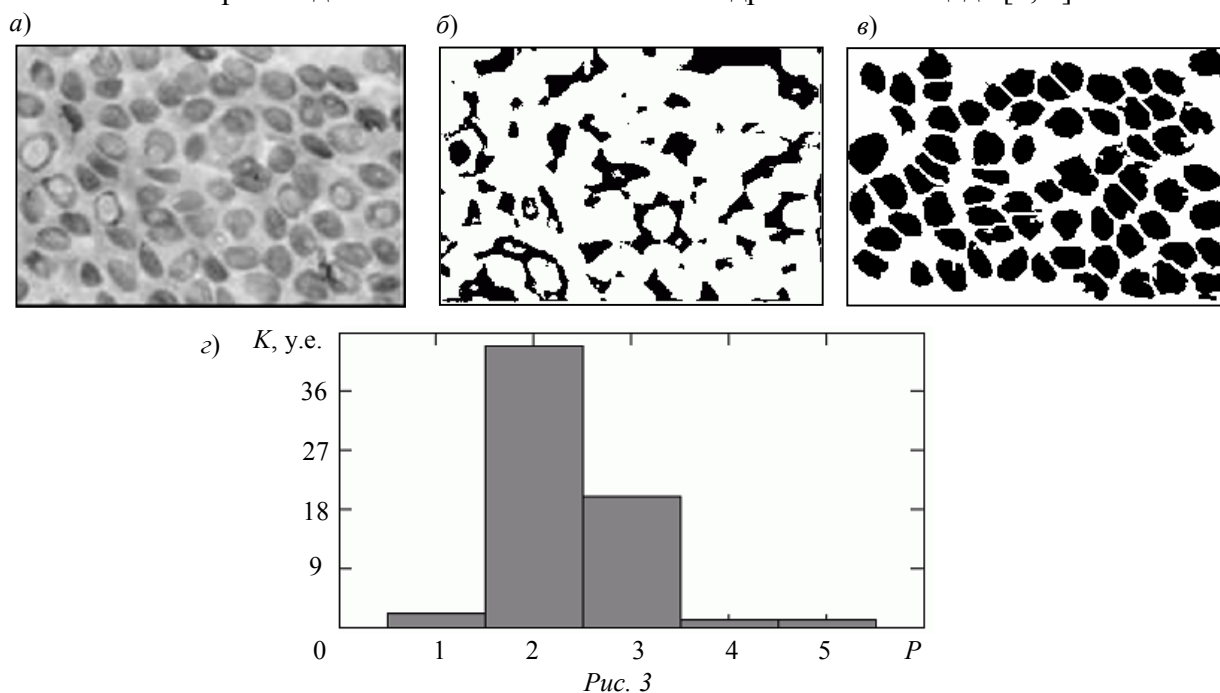


Рис. 3

Преимуществом способа, реализованного для вычисления плоидности ядра клетки, является более точное вычисление средней интенсивности фона за счет интерактивного его выделения с помощью описанного выше метода.

Заключение. Для предварительной интерактивной обработки изображений в компьютерной микроскопии предлагается использовать метод, основанный на преобразовании изображений по принципу сходства с образцом.

Использование метода позволяет повысить достоверность обнаружения и увеличить точность измерений морфометрических параметров выделенных объектов. Достоверность обнаружения обеспечивается возможностью использования всей доступной информации при целенаправленной визуализации. Точность морфометрических измерений достигается за счет интерактивного выделения объектов, позволяющего исследователю использовать контекстную информацию.

Эффективность метода обусловлена сочетанием вычислительной мощности компьютера с интеллектуальными возможностями человека. Метод пригоден для решения широкого круга задач в медицине и биологии и может быть легко адаптирован к конкретной задаче.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Прэтт У. Цифровая обработка изображений. Т. 2. М.: Мир, 1982.
2. Шапиро Л., Стокман Дж. Компьютерное зрение. М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2006.
3. Попова Г. М., Степанов В. Н. Анализ и обработка изображений медико-биологических микробиологических объектов // Автоматика и телемеханика. 2004. № 1. С. 131—142.

4. Патент РФ № 2267232. Способ преобразования изображений / Т. А. Шереметьева, Г. Н. Филиппов. 2005. Б.И. № 36.
5. Филонов А. С., Гаврилко Д. Ю., Яминский И. В. Руководство пользователя пакета программного обеспечения для управления сканирующим зондовым микроскопом и обработки изображений „FemtoScan“. Версия 4.8. М.: Центр перспективных технологий. С. 90.
6. Брамберга Б. М., Зитаре И. Я., Плегере Д. П., Смитниекс Э. Х. Терминологический словарь морфологических признаков клетки для автоматизации цитологической диагностики и оценки эффективности лечения. Рига, 1970.
7. Кондратьева Т. Т., Павловская А. И., Врублевская Е. А. Морфологическая диагностика узловых образований щитовидной железы // Практическая онкология. 2007. Т. 8, № 1. С. 9—16.
8. Автандилов Г. Г. и др. Отчет о научно-исследовательской и опытно-конструкторской работе „Создание видеокомпьютерных средств анализа данных для медицинской диагностики и медикобиологических исследований“. М.: ОАО „ГФПК «Элита»“, 2002.
9. Автандилов Г. Г. Плоидометрия — новое диагностическое направление в патогистологических исследованиях // Мат. науч. конф. Тирасполь: РИО ПГУ, 2001. Вып. 3.

Сведения об авторах

- Татьяна Анатольевна Шереметьева** — канд. физ.-мат. наук; Научно-исследовательский институт комплексных испытаний оптико-электронных приборов и систем, Сосновый Бор, Ленинградская обл.; E-mail: tsher@niiki.ru
- Андрей Михайлович Малов** — аспирант; Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, кафедра компьютерной фотоники; E-mail: amalov@sbor.net
- Геннадий Николаевич Филиппов** — Научно-исследовательский институт комплексных испытаний оптико-электронных приборов и систем, Сосновый Бор, Ленинградская обл.; ведущий инженер; E-mail: tsher@niiki.ru

Рекомендована кафедрой
компьютерной фотоники

Поступила в редакцию
29.05.08 г.

А. М. МАЛОВ, Т. А. ШЕРЕМЕТЬЕВА, Г. Н. ФИЛИППОВ, В. Г. ФИЛИППОВ

КОМПЬЮТЕРНАЯ ОБРАБОТКА БИМЕДИЦИНСКИХ МНОГОКАНАЛЬНЫХ ИЗОБРАЖЕНИЙ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ВИЗУАЛИЗАЦИИ МЕРЫ СХОДСТВА С ЭТАЛОНОМ

Представлена методика обработки многоспектральных изображений препаратов, используемых в медико-биологических исследованиях. Основой методики является целенаправленная визуализация и интерактивное выделение интересующих исследователей объектов. При целенаправленной визуализации используются все имеющиеся каналы многоспектрального изображения, кроме того могут быть использованы текстурные и градиентные признаки, а также априорная информация.

Ключевые слова: предварительная обработка, выделение объектов на изображении, медико-биологические изображения, микроскопия, многоканальные (многоспектральные) изображения.

Введение. Компьютерный анализ изображений — одна из новых медицинских технологий, имеющих немаловажное значение в проведении исследований и диагностике заболеваний. В связи со сложностью биомедицинских изображений практически невозможно полностью заменить компьютером человеческий мозг при их обработке. Вместе с тем системы анализа и обработки изображений позволяют при участии квалифицированного пользователя оперативно получать результаты высокого качества. Важной задачей компьютеризированных систем обработки изображений в медико-биологических исследованиях является визуализация информации — представление информации в удобном для зрительного восприятия виде, позволяющее выделять и измерять объекты интереса. В случае обработки многоспектральных (многоканальных) изображений задача визуализации особенно важна.

Известен метод [1], который преобразует совокупность попиксельно совмещенных многоканальных черно-белых изображений в одно изображение в псевдоцвете, присваивая отдельным каналам значение цвета и объединяя „раскрашенные“ каналы. Вариантов такой раскраски может быть множество. Но при этом заранее неизвестно, какой из вариантов окажется наиболее удачным.

Используют также 3D-куб — трехмерное представление данных, при котором в плоскости XY представлена пространственная информация, а по оси Z — спектральная [2]. Такое представление помогает понять структуру и состав исследуемых данных, выбрать наименее искаженные шумом каналы. Специальные инструменты позволяют вращать этот куб, рассматривать его сечения, перелистывать изображения слоев в режиме анимации. Заметить детали препарата в этом случае можно, но для дальнейшей обработки с измерением характеристик такой способ визуализации непригоден.

Универсальные пакеты прикладных программ, предназначенные для задач картографии (ESRI, ERDAS, LHS), позволяют визуализировать многоспектральные изображения с использованием кластеризации по совокупности признаков. Эта операция не является простой и однозначной и в случае сложных изображений может привести к значительным погрешностям.

С помощью известных программных продуктов, используемых в медицине, биологии, материаловедении, криминалистике (таких как ВидеоТест, МЕКОС), анализируются цветные изображения или изображения в тонах серого и автоматически выделяются объекты на изображении по яркости и цвету. Эти программные пакеты хорошо справляются с задачами при

работе с изображениями приемлемого качества и не предназначены для анализа сложных объектов и многоспектральных изображений.

Немецкая фирма „Leica Microsystems“ также предлагает ряд программных пакетов, предназначенных для исследования изображений, полученных с помощью флуоресцентной и световой микроскопии [3]. Например, программный пакет „LAS Image Overlay“ позволяет работать как с цветными *RGB*-изображениями, так и с многоканальными. Основные усилия разработчики направили на минимизацию действий пользователя по улучшению качества визуализации изображений исследуемых микропрепаратов. При этом автоматически настраиваются яркость, контрастность, производится гамма-коррекция и фильтрация. Возможность работы с многоканальными изображениями предусматривает автоматическое улучшение качества отдельных спектральных каналов и синтез цветного изображения с помощью упомянутого выше метода [1].

В программном обеспечении „The Spectral Assistant“ и „ICE“, разработанном специалистами Австралийского национального агентства CSIRO для анализа гиперспектральных изображений, используется методика „unmixing“ — разделение сложного спектра, обусловленного несколькими „чистыми компонентами“ (pure constituents), на его составляющие [4]. Разработчиками программы „The Spectral Assistant“ предполагается, что известны спектры „чистых компонент“, программы „ICE“ — что не известны, но известно их количество. В этих программах визуализируется концентрация „чистых компонент“. Эти методы относятся к методам автоматического анализа цветных и гиперспектральных изображений и не позволяют интерактивно влиять на результат.

В настоящей статье представлен интерактивный метод обработки многоканальных изображений для решения медико-биологических задач.

Методика обработки многоканальных изображений использует новый метод, основанный на преобразовании изображений по принципу сходства с образцом [5, 6]. В результате такой обработки получают изображение в градации серого, яркость каждого пиксела преобразованного изображения характеризует его сходство с эталоном по совокупности признаков, т.е. это преобразование производит „целевую визуализацию“. Преобразованное таким образом изображение позволяет исследователю достаточно просто с помощью визуального контроля, используя свой опыт и контекстную информацию, выбрать пороговые ограничения для выделения объектов интереса.

Метод универсален по общему построению алгоритма и может быть легко адаптирован к конкретным задачам обработки медико-биологических изображений с помощью выбора пространства признаков, меры сходства и эталона (образца).

В качестве пространства признаков может быть выбрано пространство спектральных признаков размерностью, равной числу спектральных каналов. Кроме того, размерность этого пространства может быть увеличена за счет привлечения текстурных, градиентных признаков и признаков смежности.

В качестве меры сходства могут быть использованы любые из известных расстояний, используемых, в частности, в задачах классификации.

Выбор образца (эталона) производится пользователем либо заданием априорно известных значений признаков, либо с помощью указания на один из выделяемых объектов. Такой метод позволяет подготовить изображение к выделению объектов в сложных случаях при наличии на изображении нескольких групп различных объектов.

Заметим, что при выделении объектов нет необходимости в переходе от относительных к абсолютным значениям свечения и энергии излучения. Для выделения объекта достаточно наличия образца, измеренного в тех же условиях.

На рис. 1 представлено многоспектральное изображение в 16 различных диапазонах длин волн легкого мыши с опухолью, отмеченной флуоресцирующим протеином. Исходное

изображение трудно визуально проанализировать (непросто заметить отличия), а на результирующих визуализированных изображениях, представленных на рис. 2, отчетливо выделяются различные участки исследуемого объекта. Для выделения этих участков используются все исходные изображения одновременно.

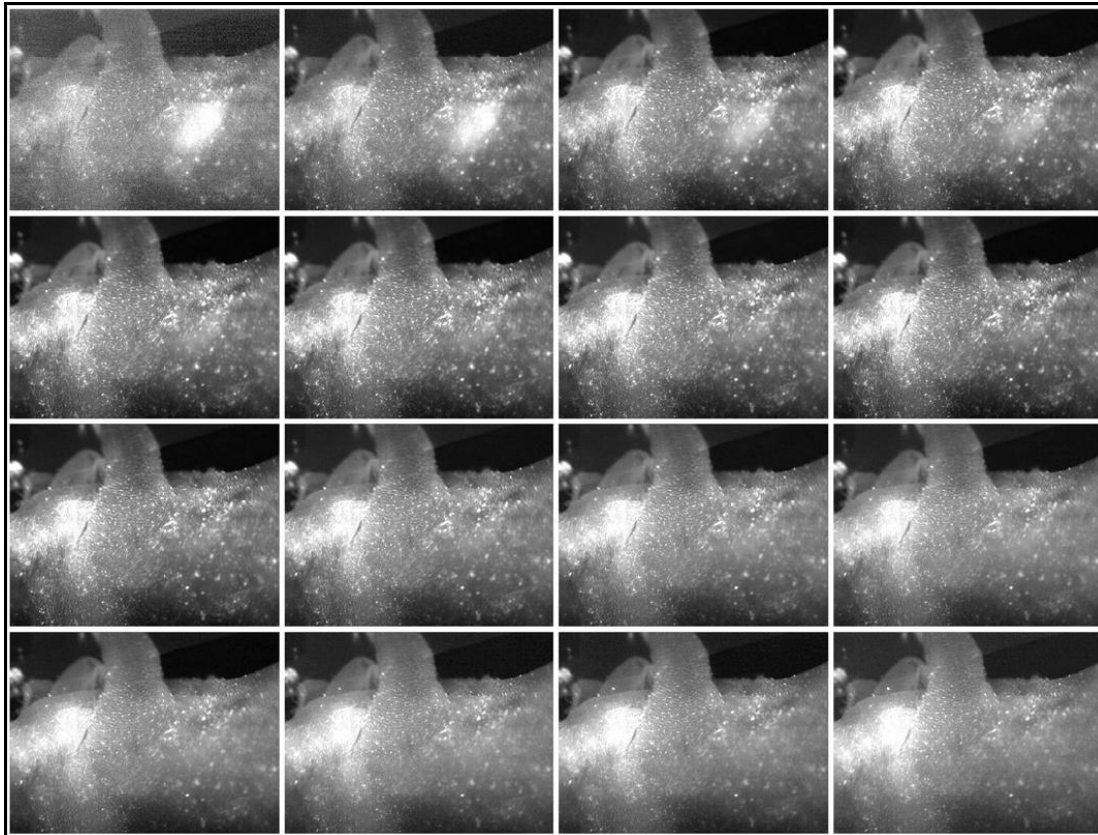


Рис. 1

Справа от каждого из этих изображений на рис. 2 представлена гистограмма, которая соответствует распределению расстояний (d) в пространстве признаков от эталона до каждого из пикселей, составляющих изображение (K — количество пикселей с одинаковыми признаками). Эта гистограмма позволяет получить информацию об уникальности выбранного эталона. С помощью гистограммы можно выбрать начальное значение порога для бинаризации изображения и выделения объектов, похожих на эталон.

На рис. 3 представлен результат выделения объектов для трех эталонов путем выбора пороговых значений, соответствующих первому минимуму гистограмм.

Изменяя значение порогового ограничения, можно варьировать результат визуализации в соответствии с контекстной информацией и опытом исследователя. Метод также позволяет выделить пиксели с редкими относительно признакового пространства свойствами. С этой целью можно использовать расстояние Махаланобиса, т.е. расстояние от вектора y до среднего вектора \mathbf{m}_x семейства векторов \mathbf{X} , которое задается выражением

$$d(y, \mathbf{m}_x) = (y - \mathbf{m}_x)^T C_x^{-1} (y - \mathbf{m}_x),$$

где C_x — ковариационная матрица семейства \mathbf{X} .

В нашем случае в качестве \mathbf{X} выбрано семейство векторов пространства признаков, которые соответствуют содержательной области изображения.

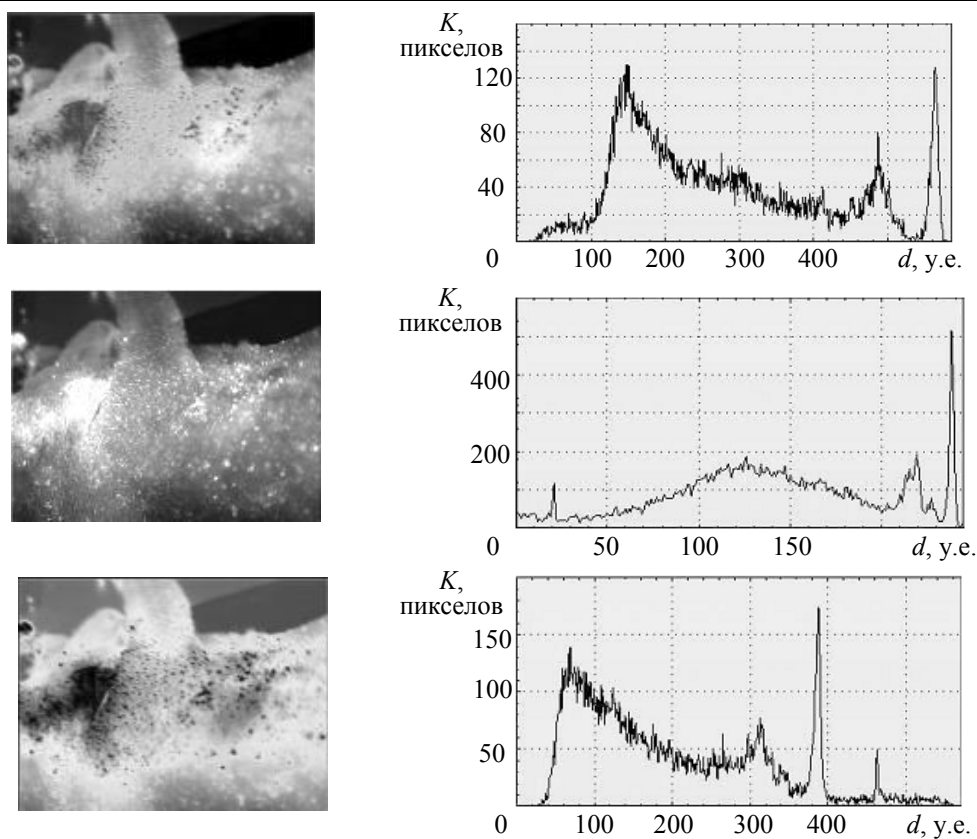


Рис. 2

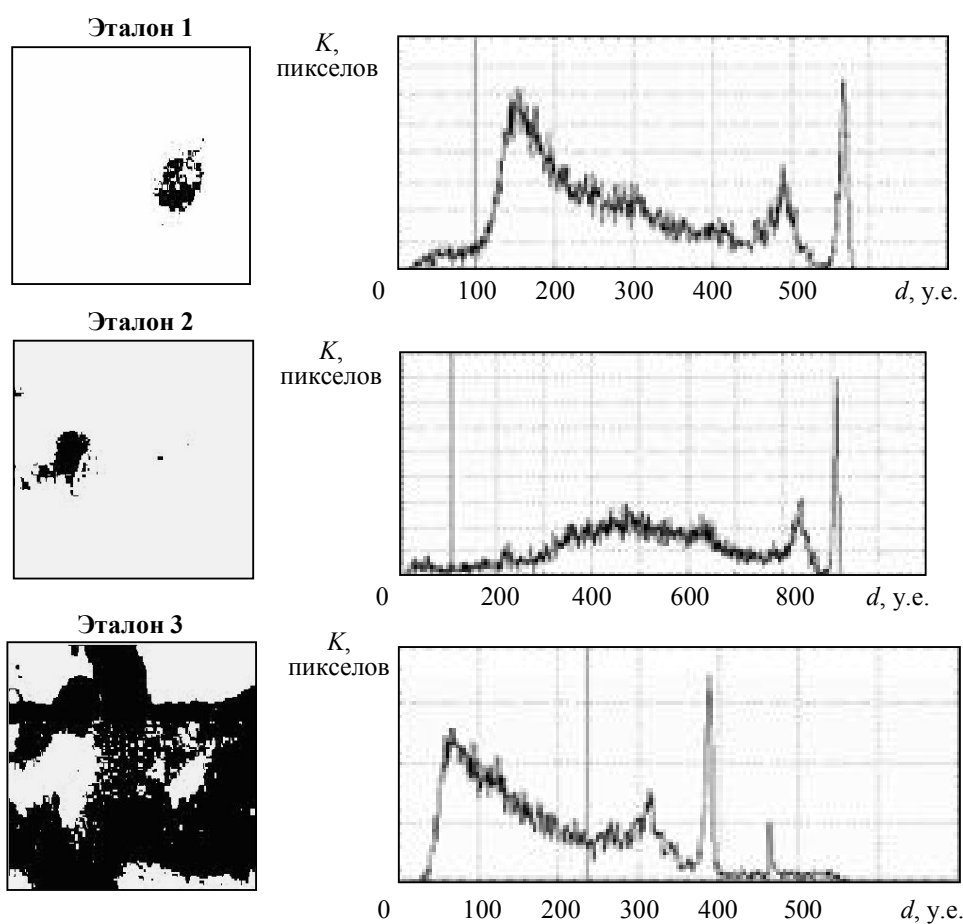


Рис. 3

На рис. 4, *а* эта область очерчена сплошной линией. На рис. 4, *б* представлен результат визуализации с использованием расстояния Махаланобиса, заданного семейством X . Все пиксели, близкие по спектральным характеристикам к m_x , имеют светлый оттенок, пиксели, существенно отличающиеся от m_x , — темный. Однако темные пиксели могут различаться спектральными характеристиками. Чтобы найти сходные по редким спектральным характеристикам участки изображения, следует выбрать на интересующем участке темный пиксел и использовать его спектральные характеристики в качестве эталона. На рис. 4, *в* представлен результат выделения одной из групп пикселей с редкими спектральными характеристиками.

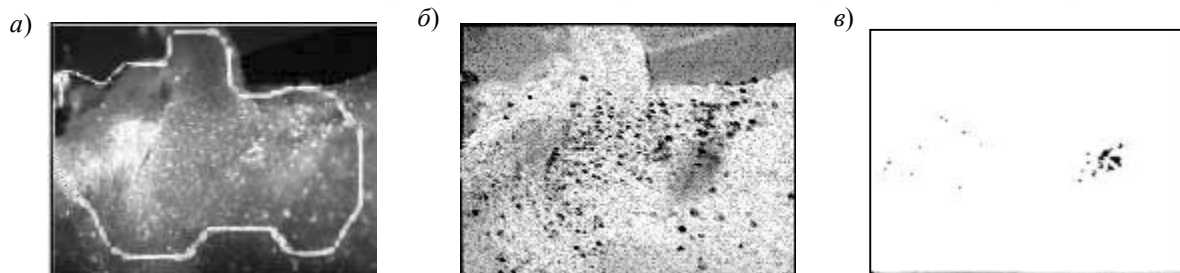


Рис. 4

После выделения объектов могут быть произведены измерения и рассчитаны морфометрические параметры: площадь, периметр, формфактор, минимальный и максимальный размеры, координаты „центра масс“, ориентация, средняя интенсивность, логарифм оптической плотности и др. Результаты таких измерений для объектов двух типов продемонстрированы на примере обработки изображения, приведенного на рис. 5 (*а* — исходное изображение, *б* — выделенное изображение первого типа, *в* — второго) с помощью предобработки. В таблице приведены результаты измерения некоторых морфометрических параметров выделенных объектов.

Выделенные объекты	Параметры объектов			
	периметр, мкм	диаметр круга, мкм	минимальный размер, мкм	максимальный размер, мкм
Первого типа	86,43	25,85	22,09	29,26
	64,53	16,43	10,67	25,70
	63,11	15,43	14,10	18,45
	49,21	14,80	14,14	16,08
	47,56	12,46	8,06	18,92
Второго типа	63,80	19,38	14,29	21,95
	43,90	10,82	4,87	18,99
	51,80	13,87	13,62	16,94
	49,56	12,51	7,14	20,99
	66,87	20,59	20,15	21,91
	65,94	20,37	17,47	21,92
	66,53	20,40	19,16	21,54
	67,45	20,31	16,26	22,38
	62,53	19,77	18,90	20,17
	67,70	20,59	16,79	24,02
62,28	19,41	17,07	19,97	



Рис. 5

Предлагаемый метод визуализации внедрен в программное обеспечение аппаратно-программного комплекса „ДиаМорф“, который применяется в медицине и биологии для проведения гистологических и цитологических исследований [7].

В основу программного обеспечения комплекса „ДиаМорф“ были положены следующие принципы:

- гибкость и возможность адаптации к конкретным практическим задачам;
- способность системы функционировать в условиях информационной неоднородности с использованием интерактивного управления;
- возможность непрерывной модернизации.

С помощью программного обеспечения комплекса „ДиаМорф“ осуществляются ввод изображений препаратов в цифровом виде, интерактивное выделение объектов исследования, автоматическое вычисление их морфометрических и денситометрических параметров, статистическая обработка и создается архив. Организация базы данных позволяет осуществлять запросы и передавать данные по сети для использования комплекса „ДиаМорф“ в телемедицине.

Заключение. Представлена методика компьютерной обработки медико-биологических многоспектральных изображений с использованием визуализации меры сходства с эталоном. Методика позволяет в интерактивном режиме подготовить к проведению автоматического измерения морфометрических параметров объектов в сложных случаях при наличии на изображении нескольких групп различных объектов. От известных способов она отличается целенаправленностью визуализации, позволяющей быстро выделить объекты интереса. Методика может быть адаптирована к конкретной задаче дешифрирования с помощью выбора признаков пространства, эталона и меры сходства. Мера сходства может быть подобрана в соответствии с заданными параметрами признаков исследуемого объекта, фона и шумовой компоненты. Выбор эталона может быть осуществлен с помощью известных численных значений признаков объекта или интерактивно пользователем, который выбирает характерный объект или характерную часть объекта на исходном изображении. Кроме того, методика позволяет обнаружить и выделить редкие по спектральным характеристикам объекты.

Методика внедрена в программное обеспечение аппаратно-программного комплекса „ДиаМорф“, который применяют в медицине и биологии.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Know H., Der S. Z., Nasrabadi N. M. Adaptive multisensor target detection using feature-based fusion // Opt. Eng. 2002. Vol. 41, N 1. P. 69—80.
2. Hyperspectral Image Analysis. Geomatica 10. [Электронный ресурс]: <www.pci-geomatics.com>.
3. [Электронный ресурс]: <www.leica-microsystems.com/Imaging_Systems>.
4. CSIRO, Australia's national science agency. [Электронный ресурс]: <www.cmis.csiro.au/iap>.
5. Sheremetyeva T. A., Filippov G. N., Malov A. M. Visualization of multispectral images. International Symposium OPTRO 2005, Paris, France.
6. Патент РФ № 2267232. Способ преобразования изображений / Т. А. Шереметьева, Г. Н. Филиппов. 2005. Б.И. № 36.
7. ЗАО „ДиаМорф“. [Электронный ресурс]: <www.diamorph.ru>.

Сведения об авторах

Андрей Михайлович Малов

- аспирант; Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, кафедра компьютерной фотоники; E-mail: amalov@sbor.net

- Татьяна Анатольевна Шереметьева** — канд. физ.-мат. наук; Научно-исследовательский институт комплексных испытаний оптико-электронных приборов и систем, Сосновый Бор, Ленинградская обл.; E-mail: tsher@niiki.ru
- Геннадий Николаевич Филиппов** — Научно-исследовательский институт комплексных испытаний оптико-электронных приборов и систем, Сосновый Бор, Ленинградская обл.; ведущий инженер; E-mail: tsher@niiki.ru
- Владимир Геннадьевич Филиппов** — Научно-исследовательский институт комплексных испытаний оптико-электронных приборов и систем, Сосновый Бор, Ленинградская обл.; научный сотрудник; E-mail: vlafy@gmail.com

Рекомендована кафедрой
компьютерной фотоники

Поступила в редакцию
29.05.08 г.

SUMMARY

P. 7—12.

SPECIAL FEATURES OF DIGITAL PROCESSING ALGORITHMS IN OPTOELECTRONIC SYSTEMS OF THE NEW GENERATION

An approach is proposed for formulation of general requirements imposed on algorithms of digital processing of images in optoelectronic systems of the new generation. Consideration is given to principles of development and hardware realization of digital processing and image synthesis algorithms, elaboration of initial background-target models for the algorithms, quality estimation methods for image processing algorithms.

Keywords: image processing, digital algorithms, optoelectronic imaging system.

Data on authors

- Yury I. Belousov** — Dr. Techn. Sci., Professor; Central Scientific Research Institute "Kometa", Scientific Design Center of Optoelectronic Surveillance Systems, St. Petersburg; Deputy Director; E-mail: lab6@eoss.ru
- Valery T. Fissenko** — Cand. Techn. Sci.; Central Scientific Research Institute "Kometa", Scientific Design Center of Optoelectronic Surveillance Systems, St. Petersburg; Director; E-mail: valery@eoss.ru

P. 12—19.

MANEUVER DETECTION AND OBJECT TRACK PREDICTION USING TELEVISION SURVEILLANCE SYSTEM

Methods of object coordinates measurement by television surveillance system are considered. The observation data errors are filtered out by means of an adaptive Kalman filter, adaptation is related to possible change of object trajectory at an unknown instant and subsequent loss and appearance of the object (e.g., because of a cloudy cover). Maneuver of object is detected from velocity estimation after Kalman filtering which is adapted with the use of variation of filter coefficients, while object disappearance switches the filter to trajectory prediction mode. Algorithms of maneuver detection accounting for loss of the object are designed; dynamic and fluctuation errors of trajectory prediction when the object appears from area of occlusion are estimated.

Keywords: occlusion tracking, adaptive Kalman filtering.

Data on authors

- Valery T. Fissenko** — Cand. Techn. Sci.; Central Scientific Research Institute "Kometa", Scientific Design Center of Optoelectronic Surveillance Systems, St. Petersburg; Director; E-mail: valery@eoss.ru
- Leonid D. Vilesov** — Cand. Techn. Sci.; St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation, Department of Radioelectronics and Television; E-mail: vilesov@aanet.ru
- Vladimir I. Mojeiko** — Cand. Techn. Sci.; Central Scientific Research Institute "Kometa", Scientific Design Center of Optoelectronic Surveillance Systems, St. Petersburg; Head of Department; E-mail: Lab2@eoss.ru
- Tatyana Yu. Fissenko** — Cand. Techn. Sci.; Central Scientific Research Institute "Kometa", Scientific Design Center of Optoelectronic Surveillance Systems, St. Petersburg; Senior Scientist; E-mail: tatiana@eoss.ru

P. 20—29.

TELEVISION TECHNIQUES OF OBJECTS TRACKING IN HARD OBSERVATION CONDITIONS

Methods of automatic segmentation and simultaneous tracking on several objects at inhomogeneous background are reviewed. Adaptive correlation algorithms of object tracking are developed for the case when initial target destination is secured. Several methods are proposed for automatic capture and tracking of numerical objects. The correlation tracking algorithm employs adaptation of the slide window size to the object shape and dynamic signal accumulation technique. The problems of automatic segmentation and simultaneous tracking of several objects are solved on the base of motion vectors (optical flow) and Gaussian shape model. Presented results of experimental testing of developed algorithms makes it possible to evaluate their efficiency and reliability.

Keywords: segmentation, multi-object tracking, automatic capture, layering representation, correlation tracking, motion vector.

Data on authors

- Vladimir I. Mojeiko* — Cand. Techn. Sci.; Central Scientific Research Institute "Kometa", Scientific Design Center of Optoelectronic Surveillance Systems, St. Petersburg; Head of Department; E-mail: Lab2@eoss.ru
- Natalia A. Obukchova* — Cand. Techn. Sci.; St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation, Department of Radioelectronics and Television; E-mail: natalia172419@yandex.ru
- Boris S. Timofeev* — Dr. Techn. Sci., Professor; St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation, Department of Radioelectronics and Television; E-mail: ipt k23@aanet.ru
- Valery T. Fissenko* — Cand. Techn. Sci.; Central Scientific Research Institute "Kometa", Scientific Design Center of Optoelectronic Surveillance Systems, St. Petersburg; Director; E-mail: valery@eoss.ru
- Tatyana Yu. Fissenko* — Cand. Techn. Sci.; Central Scientific Research Institute "Kometa", Scientific Design Center of Optoelectronic Surveillance Systems, St. Petersburg; Senior Scientist; E-mail: tatiana@eoss.ru

P. 30—37.

AN ADAPTIVE METHOD OF MULTI-CHANNEL RANK FILTERING FOR NOISE REMOVAL IN COLOR IMAGES

An adaptive spatial filtering method is developed for impulse noise removal in digital color images. The method is based on multi-channel rank (median) vector filtering in two slide windows of different size. Additive noise suppression is achieved by using a channel with minimal signal variation. Small image details and object edges are preserved due to minimal window size selection. Impulse noise removal and retention of color characteristics are provided by setting the vector with minimal distance from evaluated median vector.

Keywords: vector filters, multichannel image processing, impulse noise, median filtering.

Data on authors

- Vladimir I. Mojeiko* — Cand. Techn. Sci.; Central Scientific Research Institute "Kometa", Scientific Design Center of Optoelectronic Surveillance Systems, St. Petersburg; Head of Department; E-mail: Lab2@eoss.ru
- Valery T. Fissenko* — Cand. Techn. Sci.; Sci.; Central Scientific Research Institute "Kometa", Scientific Design Center of Optoelectronic Surveillance Systems, St. Petersburg; Director; E-mail: valery@eoss.ru
- Tatyana Yu. Fissenko* — Cand. Techn. Sci.; Central Scientific Research Institute "Kometa", Scientific Design Center of Optoelectronic Surveillance Systems, St. Petersburg; Senior Scientist; E-mail: tatiana@eoss.ru

P. 38—42.

METHODS FOR CORRECTION OF NOT UNIFORM SENSIVITY OF INFRARED FOCAL-PLANE ARRAYS

An analysis is presented of methods applied for correction for nonuniformity of sensitivity across infrared photodetector array in modern optoelectronic devices. Adaptive methods of digital processing of thermovision images in varying observation conditions are considered.

Keywords: photo detector array, correction for nonuniformity, digital processing.

Data on author

Andrey A. Sergunov — Central Scientific Research Institute "Kometa", Scientific Design Center of Optoelectronic Surveillance Systems, St. Petersburg; Engineer;
E-mail: sergunov-a-a@yandex.ru

P. 43—49.

AN ACCOUNT FOR FLUCTUATION CHARACTERISTICS OF BACKGROUND RADIATION FROM NEAR-HORIZON SEA AREA IN ALGORITHMS OF SIGNAL PROCESSING FOR INFRARED INSTRUMENTS

Dependence is investigated of distribution law for fluctuations of IR signal from near-horizon area of the sea on observation conditions and optical system parameters. The results are applied to development of automated signal processing in optoelectronic systems. Recommendations are formulated on selection of methods for processing algorithm adaptation to current observation conditions.

Keywords: image processing, electro-optical systems, phonotarget models.

Data on authors

Yury I. Belousov — Dr. Techn. Sci., Professor; Central Scientific Research Institute "Kometa", Scientific Design Center of Optoelectronic Surveillance Systems, St. Petersburg; Deputy Director;
E-mail: lab6@eoss.ru

Dmitry V. Ivanov — Cand. Techn. Sci.; Central Scientific Research Institute "Kometa", Scientific Design Center of Optoelectronic Surveillance Systems, St. Petersburg; Senior Scientist;
E-mail: lab6@eoss.ru

P. 49—52.

MAPPING AND SUPERVISION SYSTEM FOR A SIMULATING COMPLEX

A system designed for supervision and mapping of 3D spatial scenes in simulators of underwater vehicles is presented. Key features of the developed system are described. The system provides three types of mapping an underwater situation: three-dimensional view approximating the real scene; three-dimensional map affording an informational representation; view similar to a sea map. Principles of the system architecture based on a hierarchical principle are considered.

Keywords: system of observation and supervision, computer graphics, simulator, underwater vehicle.

Data on author

Alexey S. Kudryavtsev — Central Scientific Research Institute "Kometa", Scientific Design Center of Optoelectronic Surveillance Systems, St. Petersburg; Engineer-Programmer;
E-mail: alexey_s_k@mail.ru

P. 53—57.

APPROACHES TO MODELING AND VISUALIZATION OF LOCAL SURFACE AREAS OBSERVED FROM A SATELLITE

Systems of three-dimensional mapping and supervision of geo-space conditions including the Earth surface, orbital companions, and dynamic objects on the surface are considered. An approach to development of such a system is presented and its separate components (orbital objects and the Earth surface) are described. Possible applications of the systems are outlined.

Keywords: system of observation and supervision, computer graphic, surface of the Earth, satellite.

Data on authors

- Vladimir K. Schmidt* — Cand. Techn. Sci., Professor; St. Petersburg State Electrotechnical University "LETI", Department of Computer Technique; E-mail: vks@peterlink.ru
- Gennady B. Galikeev* — Cand. Techn. Sci.; Central Scientific Research Institute "Kometa", Scientific Design Center of Optoelectronic Surveillance Systems, St. Petersburg; E-mail: Lab3@eoss.ru
- Felix F. Gorbatsевич* — Post-Graduate Student; St. Petersburg State Electrotechnical University "LETI", Department of Computer Technique; E-mail: gorbatsевич@gmail.com
- Alexey S. Kudryavtsev* — Post-Graduate Student; Central Scientific Research Institute "Kometa", Scientific Design Center of Optoelectronic Surveillance Systems, St. Petersburg; E-mail: alexey_s_k@mail.ru

P. 58—63.

METHODS OF PUPILLOGRAM PROCESSING AND ANALYSIS

Possible methods to be applied to analysis of pupillograms are considered: approximation method based on minimization of disparity between analyzed pupillogram and an analytic function; pupillogram classification with the use of extremuma. Special consideration is given to advantages and disadvantages of approach based on neuron net employment.

Keywords: pupillometry, approximation, classification, discrimination analysis.

Data on author

- Alexander S. Kupriyanov* — Central Scientific Research Institute "Kometa", Scientific Design Center of Optoelectronic Surveillance Systems, St. Petersburg; Engineer; E-mail: sector1@eoss.ru

P. 64—67.

ON APPLICATION OF HEAT TRANSFER EQUATION TO MODELLING THE EFFECT OF LASER RADIATION ON HUMAN SKIN

Effects of human skin exposure to laser radiation are modeled both mathematically and digitally. Thermal sources caused by blood flow were introduced into heat transfer equation to account for the blood perfusion in tissue. Blood flow rate dependence on temperature is shown to affect significantly the effect of laser heating.

Keywords: mathematical modeling, heat transfer equation, blood perfusion, human skin.

Data on authors

- Michael Z. Smirnov* — Cand. Techn. Sci.; Palomar Medical Technologies Inc.; Senior Physicist; E-mail: msmirnov@palomarmedical.com
- Alexandra E. Pushkareva* — Cand. Techn. Sci.; St. Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Department of Laser Techniques & Biomedical Optics; E-mail: alpshkareva@yandex.ru

P. 68—73.

IMAGE PROCESSING AND OBJECT MORFOMETRY IN MICROSCOPY

A method is proposed for processing of biomedical object images based on analysis of the image similarity with a standard image in a feature space. Efficiency of the method is demonstrated by examples of object separation from medical image samples and determination of morphometric and densitometric properties of the objects.

Keywords: image processing, biomedical images, morphometry, densitometry, microscopy.

Data on authors

- Tatyana A. Sheremet'eva** — Cand. Phys.-Math. Sci.; Scientific-Research Institute of Complex Testing of Optoelectronic Instruments and Systems, Sosnoviy Bor, Leningrad Region;
E-mail: tsher@niiki.ru
- Andrey M. Malov** — Post-Graduate Student; St. Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics, and Optics, Department of Computer Photonics;
E-mail: amalov@sbor.net
- Gennady N. Filippov** — Scientific-Research Institute of Complex Testing of Optoelectronic Instruments and Systems, Sosnoviy Bor, Leningrad Region; Leading Engineer;
E-mail: tsher@niiki.ru

P. 74—80.

COMPUTER PROCESSING OF BIOMEDICAL MULTICHANNEL IMAGES BY VISUALIZATION OF SIMILARITY MEASURE WITH STANDARD IMAGE

A method for processing of multispectral images of biomedical preparation is proposed. The method is based on task-oriented visualization and interactive selection of examined objects. Every band of multispectral image is used for the visualization. Textural, gradient features and priory information may also be used for the visualization.

Keywords: preprocessing, selection of objects in images, biomedical images, microscopy, multispectral images.

Data on authors

- Andrey M. Malov** — Post-Graduate Student; St. Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics, and Optics, Department of Computer Photonics;
E-mail: amalov@sbor.net
- Tatyana A. Sheremet'eva** — Cand. Phys.-Math. Sci.; Scientific-Research Institute of Complex Testing of Optoelectronic Instruments and Systems, Sosnoviy Bor, Leningrad Region;
E-mail: tsher@niiki.ru
- Gennady N. Filippov** — Scientific-Research Institute of Complex Testing of Optoelectronic Instruments and Systems, Sosnoviy Bor, Leningrad Region; Leading Engineer;
E-mail: tsher@niiki.ru
- Vladimir G. Filippov** — Scientific-Research Institute of Complex Testing of Optoelectronic Instruments and Systems, Sosnoviy Bor, Leningrad Region; Scientist;
E-mail: vlafy@gmail.com