

СУВОРОВ Сергей Витальевич

АЛГОРИТМЫ ОБРАБОТКИ ИНФОРМАЦИИ  
В ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННЫХ ПАССИВНЫХ СИСТЕМАХ

Специальность 05.13.01 – Системный анализ, управление и обработка  
информации (в технических системах)



АВТОРЕФЕРАТ  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Москва, 2013

Работа выполнена в Московском государственном техническом университете имени Н.Э. Баумана на кафедре «Автономные информационные и управляющие системы».

Научный руководитель: Шахтарин Борис Ильич,  
доктор технических наук, профессор,  
заслуженный деятель науки и техники РФ,  
лауреат государственной премии СССР

Официальные оппоненты: Козлов Анатолий Иванович – доктор физико-математических наук, профессор, советник ректора МГТУ ГА.

Антипов Владимир Никитович – доктор технических наук, профессор, заведующий аспирантурой ОАО «Корпорация «Фазотрон – НИИР» г. Москва.

Ведущая организация: ФГУП НПП «Дельта» г. Москва.

Защита состоится « 18 » июня 2013 г. в 14 час. 30 мин.  
на заседании диссертационного совета Д 212.141.02 при Московском государственном техническом университете им. Н.Э. Баумана по адресу:  
105005, Москва, Госпитальный пер., д.10, ауд. 613.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Московского государственного технического университета им. Н.Э. Баумана.

Автореферат разослан «14» мая 2013 г.

Отзывы и замечания по автореферату в двух экземплярах, заверенные печатью, просьба выслать по вышеуказанному адресу на имя ученого секретаря диссертационного совета

Ученый секретарь  
диссертационного совета,  
к.т.н., доцент



Муратов И.В.



**Актуальность темы.** Оптико-электронные системы инфракрасного (ИК) диапазона широко используются для охраны объектов, помещений и рубежей, технического контроля, анализа среды, в космическом зондировании, медицине, системах наведения и обнаружения целей. В общем случае такие системы состоят из четырех основных частей: оптической системы, приемника излучения с усилителем, устройства обработки информации, устройства исполнения или выдачи информации. Степень сложности каждой из частей может быть существенно различной и зависит от масштаба решаемой задачи.

В системах охраны и технического контроля применяются как простейшие датчики теплового излучения, так и сложные тепловизионные системы, составные части которых имеют повышенную конструктивную сложность и алгоритмы обработки информации. Весьма широк перечень ИК устройств, применяемых в медицине, военных разработках, космических исследованиях. В этих системах ИК излучение является носителем информации о собственном излучении объектов исследования, обусловленном его температурой и свойствами, и отраженном излучении естественного и искусственного происхождения. При анализе среды используется свойство избирательного поглощения проходящего через неё излучения.

Оптические системы формируют поле зрения, могут осуществлять фильтрацию и модуляцию излучения и, в конечном итоге, фокусируют поток излучения на приемнике. Приемник излучения преобразует ИК излучение в электрический сигнал, может быть одно- или многоэлементным. Устройства обработки информации реализуют обусловленные решаемой задачей алгоритмы, могут иметь разнообразный элементный состав, в случае наличия бортовой и наземной частей могут содержать линию связи. Результат обработки в зависимости от решаемой задачи может выдаваться в виде команды, непрерывных сигналов, цифровых кодов, изображений.

Совершенствование оптико-электронных систем ИК диапазона является актуальной задачей и происходит путем повышения эффективности всех четырех составных частей с учетом их взаимовлияния. Одним из направлений такого совершенствования является разработка алгоритмов обработки информации, повышающих показатели эффективности систем по тем или иным критериям. В качестве критериев эффективности могут использоваться точность и достоверность измерения, вероятность правильного обнаружения, стоимость системы в целом, требуемый объем оперативной памяти, снижаемый за счет рекуррентной обработки, и др.

Простая оптическая система (ОС) формирует поле зрения в виде конуса с углом  $\alpha$  при вершине и имеет приёмники излучения с одним чувствительным элементом. Несмотря на простоту, такой вариант получения измерительной информации находит широкое применение, а разработка алгоритмов обработки сигналов для таких систем во многих случаях актуальна.

Проблема обнаружения слабоконтрастных объектов, к которым, в первую очередь, относятся объекты техники (ОТ) с двигателем внутреннего сгорания, разрабатывалась в России несколькими коллективами. Исследования яркостных характеристик ОТ в различных климатических условиях в течение ряда лет про-

водились в ЦНИИХМ под руководством Рахматуллина Р.Ш., в ОАО «Импульс» под руководством Котова Г.И., на кафедре СМ-5 МГТУ им. Н.Э. Баумана под руководством Мусьякова М.П. с участием автора.

Задачи исследований заключались в выявлении теплового и отражательно-го контраста ОТ на подстилающей поверхности, в выборе рабочих спектральных диапазонов принимаемого излучения с точки зрения его интенсивности, информативности и зависимости от атмосферных факторов, в выработке рекомендаций по повышению скрытности ОТ в ИК диапазоне, в разработке общих принципов разделения в признаковой системе координат двух классов: объектов и фоновых поверхностей.

Известна работа авторов Сафронова Ю.П. и Эльмана Р.И. по инфракрасным распознающим устройствам, не содержащая, однако, конкретных алгоритмов обработки сигналов.

Задача получения алгоритмов обработки сигналов в системах обнаружения слабоконтрастных объектов, учитывающих особенности применения и свойства объектов остается по-прежнему актуальной, а в литературе широкого применения в достаточной мере не отражена.

В основе абсорбционного газоанализа лежит свойство избирательного поглощения излучения анализируемой средой, описываемое законом Бугера. Общие принципы и особенности абсорбционного метода измерения концентраций паров и газов в атмосфере изложены в работах Салля А.О., Чулановского В.М. статьях ряда авторов: Меликова Н.Ю., Голубева О.А., Рыжова В.В. и др. В ряде случаев практического применения возникает необходимость в относительно простом переносном приборе бездисперсионного типа, выделяющем рабочие участки спектра за счет интерференционных фильтров и способном измерять предельно малые концентрации, когда ввиду большого усиления в системе сигналы, несущие полезную информацию, становятся не центрированными случайными величинами. Разработка алгоритмов обработки сигналов для таких приборов является актуальной задачей.

**Цель работы.** Целью работы является разработка алгоритмов обработки информации в оптико-электронных системах ИК диапазона с одноэлементными пироприемниками излучения для частных случаев применения в областях обнаружения слабоконтрастных объектов, контроля рубежа охраны, абсорбционного газоанализа.

Объединяющим началом областей работы объекта является поиск и фиксация разницы между фоновым (обнаружение) или опорным (газоанализ) сигналом и сигналом информативным.

#### **Решаемые задачи:**

1. Анализ признаков объектов техники и подстилающих поверхностей в ИК области спектра и разработка алгоритма получения их классификационных признаков.

2. Анализ возможностей временной обработки сигналов в системах с одноэлементными приемниками.

3. Разработка алгоритма обработки сигналов в сканирующей двухспектральной системе ИК диапазона для обнаружения слабоконтрастных объектов.

4. Разработка алгоритмов обработки сигналов для системы контроля рубежа

охраны на основе пространственно-временной селекции ОТ.

5. Разработка алгоритма обработки сигналов для абсорбционного газоанализатора, измеряющего малые концентрации паров и газов в атмосфере, использующего интерференционные фильтры для формирования рабочих спектральных участков в инфракрасном диапазоне и обеспечивающего заданную точность.

При решении поставленных в работе задач объектом исследований являлась оптико-электронная система ИК диапазона с одноэлементными пироэлементами излучения. Предмет исследований – информативные признаки и алгоритмы работы объекта в областях обнаружения ОТ на подстилающей поверхности, контроля рубежа охраны и абсорбционного газоанализа.

Варианты использования систем с одноэлементным приёмником в соответствии с решаемыми задачами приведены на рисунке 1. Варианты а, б, в рисунка иллюстрируют примеры обнаруживающих систем, вариант г – применение в абсорбционном газоанализе.

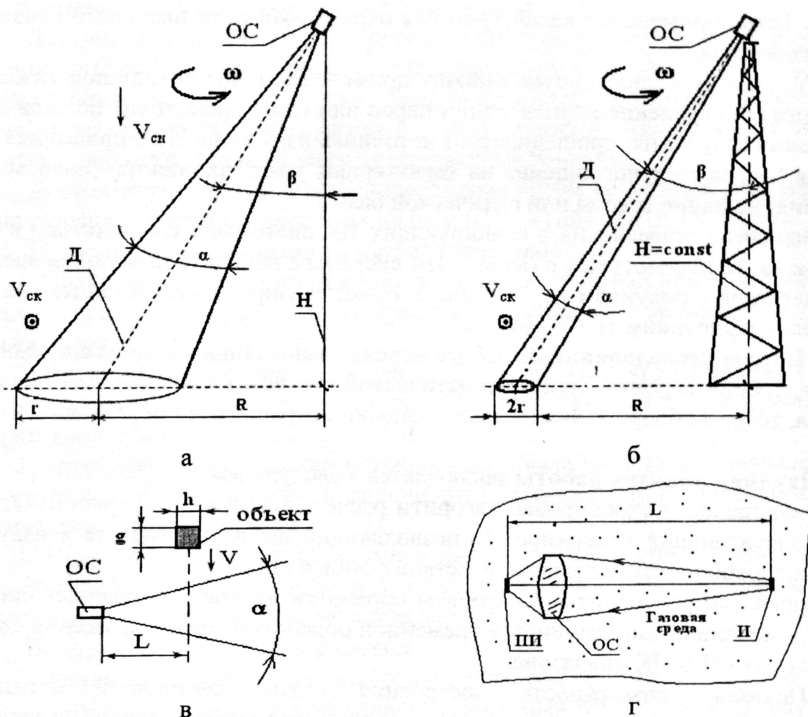


Рисунок 1.

#### Применение систем с одноэлементными приемниками

Рисунок 1а иллюстрирует вариант применения, когда ОС, находясь на каком-то носителе, снижается с высоты  $H$  со скоростью  $V_{сн}$ , одновременно вращаясь вокруг вертикали с угловой скоростью  $\omega$ . Оптическая ось системы направлена под углом  $\beta$  к вертикали. Поле зрения при этом описывает по поверхности сходящуюся спираль с текущим радиусом  $R$  и текущим радиусом пятна

поля зрения  $\gamma$ .  $V_{\text{ск}}$  – линейная скорость сканирования по поверхности,  $D$  – наклонная дальность,  $\alpha$  – угол поля зрения ОС.

В реальных условиях применения система должна осуществлять захват цели при равномерном спуске (или подъёме) ОС и сканировании полем зрения по поверхности с постоянной скоростью. При этом имеет место значительный перепад высот локации и случайный характер первичных признаков целей и фонов, что делает обнаружитель вероятностным автоматом.

Рисунок 1б иллюстрирует похожий вариант, но с одним принципиальным отличием: высота размещения ОС является величиной постоянной. Например, ОС может находиться на вышке, крыше здания, склоне горы, носителе, движущемся на стабильной высоте.

Рисунок 1в иллюстрирует случай неподвижного размещения ОС, когда система предназначена для обнаружения движущихся объектов ( $g$  и  $h$  – размеры объекта,  $V$  – линейная скорость,  $L$  – расстояние до объекта), попадающих в поле зрения. Такое применение характерно для охранно-контрольных систем различного назначения.

Рисунок 1г иллюстрирует вариант применения в абсорбционном газоанализе, когда определение концентрации паров или газов происходит по величине ослабления излучения, прошедшего от источника излучения И до приёмника излучения ПИ, за счёт поглощения на характерных участках спектра (полосы поглощения) на длине трассы или оптической базы  $L$ .

Варианты применения в сканирующих ИК системах в соответствии с рисунками 1а, 1б рассмотрены в главе 2, ИК системы с неподвижным полем зрения в соответствии с рисунком 1в – в главе 3, газоанализирующей ИК системы в соответствии с рисунком 1г – в главе 4.

**Методы исследований.** В работе использованы общие методы системного анализа, теории вероятностей, математической статистики, численного моделирования, теории обнаружения сигналов, оценки погрешностей результатов измерений.

**Научная новизна работы** заключается в следующем:

1. Представлен и апробирован алгоритм расчёта спектральной яркости ОТ на фоне подстилающих поверхностей, позволяющий выявить различия в излучательных способностях отдельных участков фонов и объектов.

2. Разработан рекуррентный алгоритм обработки дискретизированных сигналов с применением амплитудной и временной обработки для обнаружения слабо контрастных ОТ в ИК диапазоне.

3. Показана возможность построения оптико-электронной охранно-контрольной системы, использующей пространственно-временную селекцию объектов. Разработаны два варианта организации рубежа и алгоритмы обработки информации для каждого из них.

4. Разработан рекуррентный алгоритм обработки сигналов применительно к оптико-электронной системе абсорбционного газоанализа с использованием интерференционных фильтров для измерения малых концентраций паров и газов в атмосфере.

5. Проведен анализ случайных и систематических погрешностей, возникающих при измерении малых концентраций абсорбционным газоанализатором ИК

диапазона с интерференционными фильтрами.

#### **Положения, выносимые на защиту:**

1. Алгоритм расчёта спектральной яркости ОТ и подстилающих поверхностей в среднем ИК диапазоне.
2. Рекуррентный алгоритм обнаружения слабоконтрастных ОТ для сканирующей системы ИК диапазона в условиях параметрической априорной неопределённости.
3. Алгоритмы пространственно-временной обработки информации в оптико-электронной охранно-контрольной системе, использующих декомпозицию исследуемых объектов и условий наблюдения.
4. Способ предварительной оценки погрешности в измерении малых концентраций для абсорбционного газоанализатора, использующего интерференционные фильтры для выделения рабочих участков спектра.
5. Рекуррентный алгоритм обработки сигналов применительно к оптико-электронной системе абсорбционного газоанализа.

**Достоверность результатов работы** определяется корректностью используемого математического аппарата, сопоставлением результатов, полученных в рамках данного аппарата, с результатами численного компьютерного моделирования, с результатами других авторов, с показателями разработанных автором макетных образцов, реализующих предложенные решения.

Достоверность результатов подтверждена актом испытаний макетного образца газоанализатора проведенных на базе НПО «Тайфун» (г. Обнинск).

#### **Практическая значимость результатов работы:**

1. Полученные в диссертации числовые характеристики признаков объектов в виде спектральной яркости подтверждают и расширяют аналогичные данные других авторов.
2. Алгоритмы на основе рекуррентной обработки сокращают время, необходимое для принятия решения или выдачи результата, а также потребности в оперативной памяти системы.
3. Предварительная оценка погрешности абсорбционного газоанализатора позволяет сделать обоснованное заключение о возможности и целесообразности измерения в текущих условиях.
4. Использование двух объективов вместо четырех при сохранении всех возможностей охраны (контроля) рубежа существенно сокращает затраты на изготовление, юстировку и эксплуатацию системы.

#### **Внедрение результатов работы:**

1. Результаты диссертации внедрены в учебный процесс на кафедре «Автоматизированные информационные и управляющие системы» МГТУ им. Н.Э. Баумана в рамках читаемого автором курса «Автоматизированные измерительные системы».
2. Результаты диссертации использованы в НИР «Фундаментальные проблемы создания АУИС», шифр «КЕДР-5», ГРН: 01200964825.
3. Рекуррентный алгоритм обработки сигналов в области абсорбционного газоанализа использован в ОКР СМ2-258 по созданию макетного образца прибора для измерения малых концентраций несимметричного диметилгидразина.
4. Предложенные в диссертации алгоритмы и результаты моделирования

востребованы и могут быть использованы в НИР и ОКР при разработке перспективных оптико-электронных систем в ОАО «Импульс», ФГУП НПП «Дельта», ОАО «Концерн «Созвездие», ОАО «Корпорация «Фазотрон – НИИР» и в учебном процессе в МГТУ им. Н.Э. Баумана.

**Апробация работы.** Основные положения и результаты диссертации докладывались и обсуждались: на Второй Международной научно-технической конференции «Актуальные проблемы фундаментальных наук» (1997 г.), на научно-технических семинарах в ЦНИИХМ, ОАО «Импульс», ФГУП НПП «Дельта», «Корпорация «Фазотрон – НИИР», на кафедрах физики и «Автономные информационные и управляющие системы» МГТУ им. Н.Э. Баумана (2011 – 2013 гг.).

**Публикации.** Основные научные положения, изложенные в диссертации и выносимые на защиту, опубликованы в 11 работах, из них: 4 статьи по перечню ВАК, 1 сборник научных трудов кафедры СМ-5 «Автономные информационные и управляющие системы», 1 статья – Труды Второй Международной научно-технической конференции “Актуальные проблемы фундаментальных наук”, 3 отчета по НИР; 3 статьи подготовлены лично автором.

**Структура и объем работы.** Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, трёх приложений, списка использованных источников и изложена на 195 страницах, включая 62 рисунка и 21 таблицу. Список использованных источников содержит 52 наименования.

### **Содержание работы**

**Во введении** обоснована актуальность темы, определены цель и решаемые задачи, объект, предмет и методы исследований, сформулированы положения, выносимые на защиту, научная новизна работы, её достоверность и практическая значимость, приведены сведения о внедрении результатов и апробации работы, о имеющихся публикациях, указано распределение материала диссертации по разделам в соответствии с решаемыми задачами.

**В первой главе** с помощью многоспектрального радиометра и измерительного комплекса инфракрасного (ИК) диапазона с узкими полями зрения ( $\approx 1^\circ$ ), разработанных в МГТУ им. Н.Э. Баумана с участием автора, исследованы первичные и вторичные признаки объектов техники (ОТ), находящихся на случайном фоне (подстилающей поверхности).

Первичный признак – яркость излучения поверхности в некотором спектральном диапазоне; вторичный признак – реальный электрический сигнал, пропущенный через усилитель с согласованным фильтром и поступающий на вход блока принятия решений.

Полученные в процессе натурных экспериментов амплитуды выходных сигналов радиометра были пересчитаны в яркостные характеристики излучающих поверхностей методом сравнения с эталоном (черным телом) по разработанному автором алгоритму с учетом температуры среды. Использовались одиннадцать интерференционных ИК фильтров шириной 0,5...1,5 мкм, центры полос пропускания которых разнесены по спектру на участке от 5 до 13 мкм, что позволило получить оценку распределения яркости по спектру. В таблице 1 приведены спектральные поверхностные яркости для некоторых фоновых поверхностей, полученные в определенной метеорологической ситуации: : трава – об-



лично,  $T=26^{\circ}\text{C}$ ; асфальт – на солнце,  $T=17^{\circ}\text{C}$ ; песок – ночью,  $T=15^{\circ}\text{C}$ ; бетон – в тени,  $T=17^{\circ}\text{C}$ ; шифер – на солнце,  $T=17^{\circ}\text{C}$ ; жёсть – солнце сквозь дымку,  $T=17^{\circ}\text{C}$ .

Таблица 1.  
Спектральные яркости поверхностей,  $\text{мВт} / \text{см}^2 \cdot \text{ср} \cdot \text{мкм}$

| Тип поверхности | Длина волны, мкм |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |
|-----------------|------------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
|                 | 5,4              | 7,3  | 7,5  | 8,0  | 8,7  | 9,4  | 9,6  | 9,7  | 11,0 | 12,2 | 12,8 |
| Трава           | 0,42             | 0,85 | 0,81 | 0,81 | 0,85 | 0,85 | 0,85 | 0,80 | 0,78 | 0,82 | 0,76 |
| Асфальт         | 0,61             | 1,16 | 0,98 | 1,05 | 0,98 | 1,09 | 1,09 | 0,95 | 0,89 | 0,91 | 0,83 |
| Песок           | 0,16             | 0,37 | 0,62 | 0,60 | 0,68 | 0,70 | 0,67 | 0,74 | 0,65 | 0,69 | 0,68 |
| Бетон           | 0,26             | 0,69 | 0,65 | 0,70 | 0,70 | 0,71 | 0,75 | 0,69 | 0,70 | 0,75 | 0,70 |
| Шифер           | 0,57             | 1,18 | 0,99 | 1,06 | 1,02 | 1,09 | 1,15 | 0,94 | 0,87 | 0,95 | 0,85 |
| Жесть           | 0,30             | 0,82 | 0,70 | 0,75 | 0,78 | 0,81 | 0,86 | 0,80 | 0,79 | 0,81 | 0,74 |

Аналогичные измерения и пересчет в яркостные характеристики были проведены для нагретых поверхностей объектов техники (ОТ) с двигателем внутреннего сгорания. На рисунке 1 приведено усредненное спектральное распределение яркости для наиболее нагретых поверхностей ОТ (1) и фонов (2) с разбросом в пределах трёх среднеквадратических отклонений; усреднение проводилось как по группам фоновых поверхностей (трава, асфальт, песок и т.д.), так и по времени (несколько дней с разными метеоусловиями).

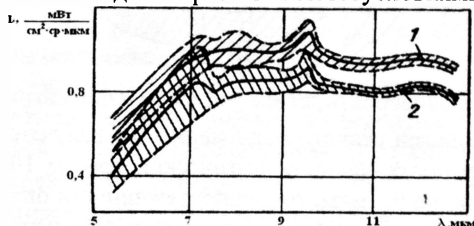


Рисунок 1. Зависимость спектральной яркости от длины волны

Вторичные признаки анализировались по реализациям, полученным с помощью сканирующего двухспектрального ИК комплекса при натурных измерениях в разнообразных фоновых и температурных ситуациях. На рисунке 2 приведен фрагмент синхронной записи сигналов на выходе усилителей с согласованными фильтрами для двух каналов, воспринимающих узкополосное излучение с максимумом в районе 0,9 мкм и широкополосное в диапазоне 7-14 мкм, при попадании в поле зрения поверхности ОТ.

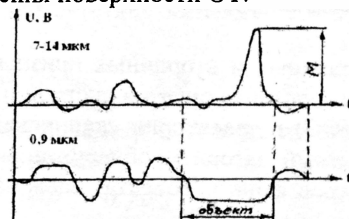


Рисунок 2. Двухканальная запись сигналов

Величина всплеска М зависит от нескольких факторов: типа объекта, угла визирования, ракурса объекта, степени его прогрева, степени попадания объекта

в пятно поля зрения, температуры окружающего воздуха, направления и силы ветра. Небольшой отрицательный контраст в диапазоне 0,9 мкм также зависит от ряда параметров: положения солнца относительно объекта и измерительного комплекса, уровня облачности, загрязненности объекта, характера соседствующих с объектом фонов, замутнённости атмосферы.

По выборочным значениям реализаций, подобных приведенным на рисунке 2, проводилась статистическая обработка с целью определения степени пересечения областей существования полезных и помеховых сигналов на плоскости вторичных признаков. При этом определялись усредненные по нескольким выборкам значения математических ожиданий, дисперсий, корреляционного момента и угла наклона осей рассеивания, а объект локализовался в пределах действия импульса амплитудой  $M$  (рис. 2).

На рисунке 3 приведены области равных вероятностей распределений сигналов (в пределах трех среднеквадратических отклонений) в летних условиях.

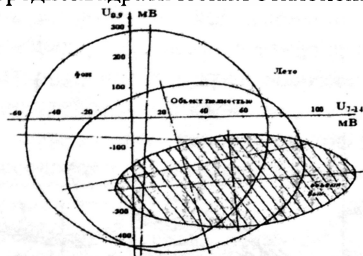


Рисунок 3. Равновероятностное распределение сигналов (лето)

Кроме того, проведен расчет пропускания ИК излучения атмосферой. Показано, что, если для протяжённости оптической трассы 10м существенно поглощение только в районе 6,3 мкм, то для протяжённости оптической трассы 200 м ослабление даже в окнах прозрачности достигает 40% и зависит от метеорологической ситуации.

Один из выводов по главе: в среднем ИК диапазоне наблюдается устойчивый положительный контраст ОТ по сравнению с фоном, в ближнем ИК диапазоне – менее устойчивый отрицательный.

**Во второй главе** решалась задача обнаружения слабоконтрастных в ИК области спектра объектов типа ОТ с помощью оптико-электронной системы, осуществляющей сканирование поверхности из верхней полусферы пространства и имеющей простой объектив, формирующий поле зрения в виде конуса с углом  $\alpha$  при вершине.

На базе анализа первичных и вторичных признаков ОТ и проведенного анализа временного отклика, возникающего в системе и зависящего от параметров оптической системы (ОС) и траектории сканирования (строчная, спиральная), разработан рекуррентный алгоритм обнаружения в условиях априорной неопределённости параметров фона и объекта, инвариантный к сдвигу и масштабу.

Обоснуем алгоритм для одноканальной системы (средний ИК диапазон). Реализацию, подобную приведенным на рисунке 2, представим в виде выборочных значений и обозначим как выборку  $\bar{Z}$ . Каждую выборку  $\bar{Z}$  можно предста-

вить в виде сигнальной  $\vec{x} = (x_1, \dots, x_n)$  и помеховой (фоновой)  $\vec{y} = (y_1, \dots, y_m)$  выборок, где  $n$  и  $m$  – объёмы сигнальной и помеховой выборок. Будем предполагать выборки независимыми с независимыми внутри них выборочными значениями, имеющими гауссовское распределение вероятностей, как это принято в ряде работ. В этом случае многомерная плотность распределения вероятностей (ПРВ) выборки  $\vec{Z}$  при наличии сигнала представляется в виде:

$$W(\vec{Z}) = \frac{1}{\sqrt{(2\pi\sigma^2)^{n+m}}} \times \exp \left\{ -\frac{1}{2\sigma^2} \left[ \sum_{i=1}^n (x_i - A - \Delta A S_i)^2 + \sum_{k=1}^m (y_k - A)^2 \right] \right\}, \quad (1)$$

где  $A$  и  $\sigma^2$  – математическое ожидание и дисперсия помехи;  $\Delta A$  – интенсивность сигнала;  $S_i$  – параметры, характеризующие форму сигнала. В отсутствие сигнала многомерная ПРВ  $W_0(\vec{Z})$  имеет вид (1) при  $\Delta A = 0$ .

Обнаружение сигнала в среднем ИК диапазоне эквивалентно проверке гипотезы  $H_0: \Delta A = 0$  против альтернативы:  $H_1: \Delta A > 0$ . Оптимальное решающее правило (РП) обнаружения сигнала, основанное на отношении правдоподобия, имеет вид

$$\ln \Lambda(\vec{Z}) > C, \quad (2)$$

где  $\Lambda(\vec{Z}) = \frac{W(\vec{Z})}{W_0(\vec{Z})}$  – отношение правдоподобия;  $C$  – пороговый параметр, определяемый критерием оптимизации.

В качестве критерия оптимизации чаще всего используется критерий Неймана-Пирсона, не требующий знания априорных вероятностей появления сигнала в каналах и штрафов за ошибочные решения. Этот критерий требует максимума вероятности правильного обнаружения  $D$  при постоянстве вероятности ложной тревоги  $\alpha$ , которая и определяет параметр  $C$  в РП (2).

Подставив ПРВ (1) в РП (2), после исключения членов, не зависящих от выборки, получим следующее решающее правило:

$$\Psi = \frac{\Delta A}{\sigma^2} \sum_{i=1}^n S_i (x_i - A) > C. \quad (3)$$

Решающая статистика (статистика  $\Psi$ , сравниваемая с пороговым уровнем  $C$ ) в выражении (3) имеет нормальное распределение вероятностей с математическим ожиданием  $\bar{\Psi} = 0$  в отсутствие сигнала и  $\bar{\Psi} = \bar{\Psi}_c = \frac{\Delta A^2 \sum_{i=1}^n S_i^2}{\sigma^2}$  при нали-

чии сигнала и с дисперсией  $\sigma_\Psi^2 = \frac{\Delta A^2}{\sigma^2} \sum_{i=1}^n S_i^2$ .

Для РП (3) пороговый параметр  $C$  и вероятность правильного обнаружения определяются соотношениями ( $\beta = 1 - D$  – вероятность пропуска цели):

$$\left. \begin{aligned} C &= \Phi^{-1}(\alpha) \sigma_\Psi, \\ \beta &= \Phi \left( \frac{C - \bar{\Psi}_c}{\sigma_\Psi} \right) = \Phi \left[ \Phi^{-1}(\alpha) - \frac{\bar{\Psi}_c}{\sigma_\Psi} \right]. \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

Как видно из выражений (3) – (4), для установки порогового уровня по

критерию Неймана-Пирсона необходимо знание параметров помехи  $A$  и  $\sigma^2$ . Параметры сигнала  $\Delta A$  и  $S$ , входящие в выражение (3) также должны устанавливаться на основе априорных данных. Параметры помехи, как правило, априорно неизвестны. В этом случае для преодоления априорной неопределённости используются адаптивный байесовский подход, метод отношения максимально правдоподобия, принципы инвариантности к сдвигу и масштабу и т.п.

При использовании байесовского подхода необходимо провести оценки неизвестных параметров и подставить их в РП (3). Максимально правдоподобными (МП) оценками параметров помехи  $A$  и  $\sigma^2$  являются точечные оценки в виде выборочного среднего и выборочной дисперсии. Параметры сигнала  $\Delta A$  и  $S$ , применительно к условиям сканирования также априори неизвестны. Вместо них могут быть использованы их максимально правдоподобные оценки, имеющие вид  $x_i - \tilde{A}$ . В этом случае решающее правило (3) принимает вид

$$\Psi = \frac{1}{\tilde{\sigma}^2} \sum_{i=1}^n (x_i - \tilde{A})^2 \geq C \quad (5)$$

и является инвариантным к сдвигу и масштабу. При  $m \gg 1$  распределение каждого слагаемого в (5) подчиняется закону  $\chi^2$  с одной степенью свободы.

Статистика (5) является основой разработанного алгоритма. Оценки параметров помехи  $\tilde{A}$  и  $\tilde{\sigma}^2$  формируются на начальном участке траектории сканирования в рекуррентном режиме в соответствии с выражениями

$$\begin{aligned} \tilde{A}_{(k)} &= \tilde{A}_{(k-1)} + \frac{1}{k} [y_k - \tilde{A}_{(k-1)}]; \quad \tilde{A}_{(0)} = 0; \\ \tilde{D}_{(k)} &= \tilde{\sigma}_{(k)}^2 = \frac{1}{k-1} [Q_{(k)} - k \cdot \tilde{A}_{(k)}^2]; \quad k \geq 2; \\ Q_{(k)} &= Q_{(k-1)} + y_k^2; \quad Q_{(0)} = 0, \quad Q_{(1)} = y_1^2. \end{aligned} \quad (6)$$

В выражениях (6)  $y_k$  – текущее выборочное значение сигнала.

Таким образом, решающее правило (5) приобретает вид:

$$\Psi = \sum_{p=1}^n \Psi_k = \sum_{p=1}^n \left( \frac{y_k - \tilde{A}_k}{\tilde{\sigma}_k} \right)^2 > \chi_\alpha^2(n) = C_n, \quad (7)$$

где  $\chi_\alpha^2(n)$  – пороговое значение; определяется по таблице квантилей в зависимости от уровня значимости  $\alpha$  и числа степеней свободы  $n$ , равного количеству слагаемых в (7).

После начального участка устанавливается порог  $C = \chi_\alpha^2(1)$ , определяющий уровень значимости для РП (7) и уровень сигнала, начиная с которого он будет подвергаться анализу. Уровень значимости  $\alpha$  устанавливается в соответствии с желаемой функцией потерь; продолжается рекуррентное формирование  $\tilde{A}$  и  $\tilde{\sigma}$ .

С приходом первого импульса ( $p=1$ ), удовлетворяющего условию (7) и условию  $(y_k - \tilde{A}) > 0$  (положительный контраст), устанавливается новый порог  $C = \chi_\alpha^2(2)$ . Если и он преодолевается следующим выборочным значением сигнала ( $p=2$ ), то устанавливается следующий порог  $C = \chi_\alpha^2(3)$  и т.д. С оконча-

нием анализируемого импульса устанавливается начальное пороговое значение. Таким образом, становится известной продолжительность импульса в виде количества периодов выборки  $n$ .

При согласовании размеров объекта, параметров сканирования и периода выборки становится возможной селекция объектов по размерам. Например, могут быть отброшены короткие импульсы, возникающие в системе при попадании в поле зрения ОС точечных нагретых объектов и помехах иного характера, а также длительные импульсы, характерные для протяженных объектов, имеющих существенный температурный градиент. Приведено обоснование такого согласования для спиральной траектории.

В случае двухканальной (двухспектральной) системы используется то же РП (7) с добавлением к сумме членов, образованных из второй выборки (ближний ИК диапазон) при условии  $(y_k - \tilde{A}) < 0$  (отрицательный контраст) в силу инвариантности РП (7). При этом вырастает вероятность преодоления заданного порога  $\chi_a^2$  за счет дополнительных членов, входящих в статистику  $\Psi$ , т.е. повышается вероятность обнаружения более слабых по амплитуде сигнальных импульсов.

В третьей главе показана возможность построения оптико-электронной охранно-контрольной системы, осуществляющей пространственно-временную селекцию наблюдаемых объектов и сохраняющей все свои свойства, используя не четыре, как у прототипа, а два объектива. На основе пространственно-временного анализа для двух вариантов организации рубежа разработаны алгоритмы оценки параметров объекта: его продольного и поперечного размеров, скорости движения и положения траектории относительно сторон рубежа охраны (контроля).

Прототип (патент 2058593 РФ) содержит четыре объектива с одноэлементными тепловыми приёмниками – по два на каждой стороне рубежа напротив друг друга – 1,2,3,4 (рисунок 4).

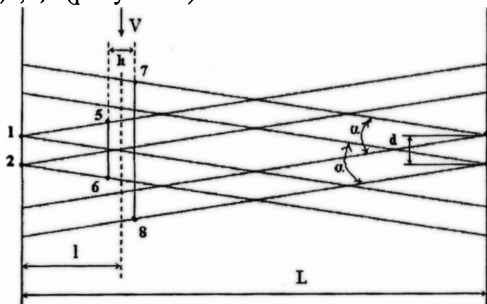


Рисунок 4. Схема организации рубежа (прототип)

На каждой из сторон рубежа протяжённостью  $L$  приёмники разнесены в горизонтальной плоскости на расстояние  $d$ . Тело, имеющее поперечный размер  $h$ , движется через рубеж со скоростью  $V$  и пересекает его на расстоянии  $l$ , например, от приёмников 1 и 2, своими краями отсекая отрезок (5-6), ограниченный образующими зон чувствительности приёмников 1 и 2, и отрезок (7-8), ограниченный образующими зон чувствительности приёмников 3 и 4. По времен-

ным откликом, возникающим на четырех приемниках при пересечении рубежа объектом, определяется его поперечный размер  $h$ .

Предложены два варианта организации рубежа, когда на каждой из его сторон установлено по одному объективу.

Решена задача разделения генеральной совокупности, состоящей из множества вариантов пересечения рубежа, отличающихся соотношением поля зрения объектива и продольного размера объекта, на минимально возможное число несовместных классов, составляющих полную группу множеств. Синтез алгоритма разбиения на классы в области реальных событий основан на поиске соответствующих признаков в области временных откликов, возникающих на приемниках излучения. Для обоих вариантов организации рубежа разработаны экспертные модели в виде набора этих признаков, отличающихся дискриминантными функциями.

На рисунке 5 приведены два предложенных варианта организации рубежа с объективами 1,2.

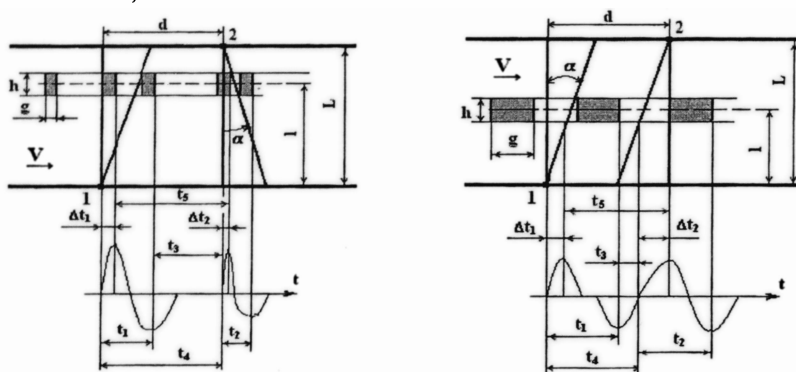


Рисунок 5. Схемы двух вариантов организации рубежа и отклики на приемниках

Пространственно-временная селекция объекта реализуется с помощью пяти логических функций, принимающих только два возможных значения (0 или 1), аргументами которых являются временные соотношения между откликами приемников (временные отрезки  $t_1, t_2, t_3, t_4, t_5, \Delta t_1, \Delta t_2$  на рисунке 5), а каждый несовместный класс представлен своей булевой функцией, в качестве аргументов которой служат введенные логические функции. При пересечении рубежа только одна из булевых функций принимает единичное значение, определяя тем самым вариант (класс) пересечения рубежа, что приводит к однозначности выражений, определяющих оценки размеров объекта  $g$  и  $h$ , его скорости  $V$  и расстояния  $l$ .

**В четвертой главе** исследован абсорбционный метод измерения малых концентраций паров и газов в атмосфере, имеющих полосы поглощения в ИК диапазоне, основанный на применении интерференционных фильтров и использующий дифференциальный метод обработки сигналов. Показано, что при обработке детерминированных сигналов дифференциальная обработка позволяет на порядок повысить точность измерения.

При малой оптической плотности анализируемой среды, когда малы длина пути, преодолеваемого излучением в анализируемой среде, и концентрация исследуемого вещества, становится малой и разность сравниваемых лучистых потоков, определяющая результат измерения. Это требует увеличения усиления электронного тракта и приводит к тому, что обрабатываемые сигналы становятся не центрированными случайными величинами.

На рисунке 6 приведена структурная схема прибора, где введены следующие обозначения:

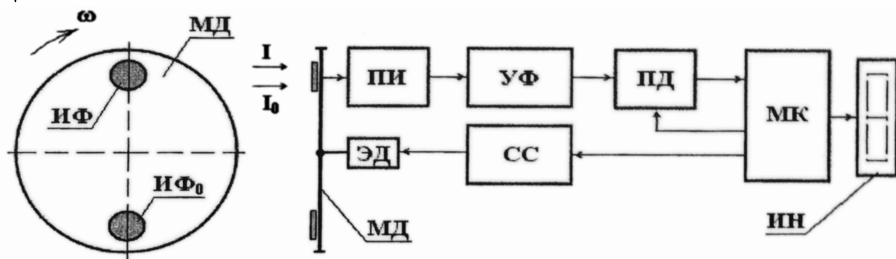


Рисунок 6. Структурная схема прибора

МД – модуляционный диск; ИФ – интерференционный фильтр;  $\omega$  – угловая скорость вращения МД; ПИ – приемник излучения; УФ – усилитель формирования; ПД – пиковый детектор; ЭД – электродвигатель; СС – схема стабилизации угловой скорости вращения МД; МК – микроконтроллер; ИН – индицирующее устройство.

В рабочем режиме при вращающемся МД и нагретом излучателе на ПИ формируется последовательность чередующихся импульсов, вызванная прохождением через интерференционные фильтры потоков излучения от излучателя. Сформированный после УФ сигнал подается на ПД для выделения максимума. Выделенный максимум каждого импульса заносится в память МК. ПД после каждого выделения максимума обнуляется. МК управляет СС, задавая режим вращения ЭД. Кроме того, МК управляет режимом работы излучателя (на схеме не показано) и формирует результирующий сигнал для ИН. Таким образом, импульсы напряжений  $U$  и  $U_0$ , вызванные воздействиями потоков излучения с интенсивностями  $I$  и  $I_0$  и проходящими соответственно через фильтры ИФ и ИФ<sub>0</sub>, поступают для записи в память МК через одну и ту же цепочку: ПИ – УФ – ПД. Это позволяет избежать отклонений сигналов, вызванных разбросом параметров цепочек, в случае отдельного формирования.

В МК можно накапливать выборки напряжений  $U$  и  $U_0$ , которые поступают с частотой вращения МД. Представим выборку последовательных значений  $U$  в виде случайной величины  $X = (x_1, \dots, x_n)$ , а выборку последовательных значений  $U_0$  в виде случайной величины  $Y = (y_1, \dots, y_m)$ . Будем полагать эти выборки нормально распределенными и независимыми, с независимыми выборочными значениями в них. Для структурной схемы прибора, изображенной на рисунке 6, вполне удобно принять  $n = m$ .

Показано, что с точки зрения минимизации случайных погрешностей для вычисления концентрации следует использовать выражение

$$c = k_n \cdot (Y - X) \cdot Z = k_n \cdot QZ,$$

где  $Q = Y - X$ ;  $k_n$  – нормировочный коэффициент; вспомогательная выборка элементов случайной величины  $Z$  при этом формируется как  $z_1 = y_1^{-1}, z_2 = y_2^{-1}, \dots, z_m = y_m^{-1}$  или  $z_i = y_i^{-1}$ . Показано, что при этом дисперсия результата определяется коэффициентом вариации опорного сигнала  $\gamma_Y$ :

$$D_{QZ} = \gamma_Y^2 \cdot [2\gamma_Y^2 + (r + \sqrt{2} - 1)^2]. \quad (8)$$

Исследуемая концентрация находится из выражения

$$\bar{c} = k_n \cdot \bar{c}_0 = k_n \cdot [(\bar{y} - \bar{x}) \cdot \bar{z} + K_{ZY} \cdot (1 - r)],$$

где  $K_{ZY} = 1 - \bar{z} \cdot \bar{y}$  – оценка корреляционного момента между случайными величинами  $Z$  и  $Y$ ;  $r = \frac{\bar{x}}{\bar{y}}$  – близкое к единице при измерении малых концентраций

отношение средних величин информативного и опорного каналов.

Закон распределения  $\bar{c}_0$  при  $n \geq 30$  близок к нормальному при любом законе распределения исходных данных, поэтому абсолютная погрешность

$$\Delta_{P_d}(\bar{c}_0) = t_n \sigma_{\bar{c}_0} = t_n \frac{\sigma_{QZ}}{\sqrt{n}}, \quad (9)$$

где  $t_n$  – нормированная квантиль нормального распределения для заданной вероятности  $P_d$ , в частности при  $P_d = 0,9$  её значение равно  $t_n = 1,64$ .

Вычисление средних значений и дисперсии опорного напряжения рационально проводить рекуррентным методом по аналогии с (6).

Из выражений (8), (9) следует, что повышения точности измерения можно достигнуть только увеличением выборки (числа замеров  $n$ ). Результат измерения зависит от небольшой разности средних значений случайных величин  $\bar{y} - \bar{x}$ , и с точки зрения достоверности измерения необходимо убедиться, что эта разность имеет место с допустимой вероятностью. Это задача сравнения выборочных средних значений, для решения которой существует несколько критериев. Уверенное различие средних значений также требует увеличения выборки. Показано, что требование, обусловленное вариацией опорного сигнала более жесткое и требует большей длины выборки для достижения заданной точности измерения.

После различения средних значений  $\bar{y}$  и  $\bar{x}$  с заданным уровнем значимости по короткой выборке (несколько десятков значений) дальнейшая длина выборки задается выражением, определяемым требуемой точностью измерения:

$$n_T \geq \frac{t_n^2 \cdot D_{U_0}}{\delta_{\text{зад}}^2 \cdot \left[ (\bar{U}_0 - \bar{U}) \cdot \bar{U}_Z + (1 - \bar{U}_Z \cdot \bar{U}_0) \cdot \left( 1 - \frac{\bar{U}}{\bar{U}_0} \right) \right]^2},$$

где  $\bar{U}_0$  и  $\bar{U}$  – средние значения напряжений опорного и информативного каналов;  $\bar{U}_Z$  – среднее значение выборки, каждый член которой образуется как  $U_{Zj} = \frac{1}{U_{0j}}$ ;  $\delta_{\text{зад}}$  – заданная относительная точность измерения;  $D_{U_0}$  – дисперсия



сигнала опорного канала.

Разработанный алгоритм обработки сигналов предусматривает сравнение средних значений  $\bar{U}_0$  и  $\bar{U}$  и устанавливает длину выборки в зависимости от требуемой точности. Показано, что при коэффициенте вариации опорного сигнала больше, чем 0,1, время одного измерения, зависящее от угловой скорости вращения МД (рисунок 6), возрастает до десятков секунд при количестве обрабатываемых отсчетов больше тысячи (для доверительной вероятности  $P_d = 0,9$ ). При снижении значения доверительной вероятности два этих показателя существенно снижаются.

Показана необходимость поддержания на стабильном уровне среднего значения опорного сигнала  $\bar{U}_0$  с точностью, превышающей на порядок требуемую точность измерения.

Кроме того, исследована систематическая температурная погрешность измерения, характерная для длительного режима. Алгоритм предусматривает введение температурной поправки для её компенсации. В состав прибора при этом должен входить измеритель температуры.

### **Основные результаты работы и выводы**

Разработаны алгоритмы:

- для обнаружения слабоконтрастных в ИК области спектра объектов, находящихся на естественном фоне;
- для охранно-контрольной системы с использованием не четырех, как у прототипа, а двух объективов с выигрышем по критерию цена–качество;
- для прибора абсорбционного типа, предназначенного для измерения малых концентраций компонентов, имеющих полосы поглощения в ИК диапазоне;
- для получения яркостных характеристик объектов в ИК диапазоне по показаниям радиометра методом сравнения с эталоном.

Использование рекуррентного метода вычислений статистических характеристик сокращает потребности системы в оперативной памяти и время, затрачиваемое на вычислительные операции.

Получено соотношение, позволяющие оценивать погрешность измерения по коэффициенту вариации опорного сигнала.

Введение в алгоритм обнаружения критерия длительности импульса повышает помехозащищенность оптико-электронной системы, позволяя отсеивать короткие импульсы, возникающие в системе при попадании в поле зрения ОС точечных нагретых объектов и помех иного характера, а также длительные импульсы, характерные для протяженных объектов, имеющих существенный температурный градиент.

Численное моделирование и натурные испытания разработанных автором макетных образцов подтвердили работоспособность алгоритмов обнаружения.

Общей задачей, решаемой при обнаружении цели и измерении степени абсорбции, является поиск и фиксация разницы между фоновым (обнаружение) или опорным (газоанализ) сигналом и сигналом информативным.

Оптическая схема абсорбционного газоанализатора позволяет оснастить прибор дополнительными интерференционными фильтрами с целью использования нескольких полос поглощения, обеспечивая возможности применения

прибора при анализе многокомпонентной среды за счет увеличения количества первичных признаков.

### **Список научных работ**

1. Суворов С.В. Вопросы построения ИК-высотомеров с учетом влияния атмосферы // Труды МВТУ. – 1984. – №426. – С. 3-11.

2. Дмитриенко А.Н., Суворов С.В. Применение адаптивного байесовского подхода для двухспектрального обнаружения слабоконтрастных объектов в инфракрасном диапазоне // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Приборостроение. – 2002. – №2(47). – С. 37-46.

3. Мусьяков М.П., Шахтарин Б.И., Ванеев Г.Г., Суворов С.В. Некоторые особенности пьезоэлектрических преобразователей на полимерных сегнетоэлектриках // Электричество. – 1998. – №9. – С. 46-51.

4. Musyakov M.P., Shakhtarin B.I., Vaneyev G.G., Suvorov S.V. Some features of pyroelectric converters based on polymer ferroelectric materials // Electrical Technology Russia. – 1998. – No 3. – P. 107-116.

5. Суворов С.В. Амплитудная и временная селекция объектов в оптических системах с одноэлементными приемниками // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Приборостроение. – 2010. – №4(81). – С. 62-69.

6. Суворов С.В. Двухканальная оптико-электронная система контроля и селекции объектов по их размерам // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Приборостроение. – 2011. – №4(85). – С. 3-16.

7. Автономные информационные и управляющие системы: В 4 т. / Ю.М. Астапов [и др.]: Под ред. А.Б. Борзова – М.: ООО НИЦ «Инженер», ООО «Оникс-М». – 2011. – Том 3. – 528 с.

8. Мусьяков М.П., Ванеев Г.Г., Суворов С.В. Новый метод определения ПДК экологически вредных паров и газов в атмосфере // Актуальные проблемы фундаментальных наук: Труды Второй Международной научно-технической конференции; В 7-ми тт. / Под ред. И.Б. Федорова, К.С. Колесникова, А.О. Карпова. Симпозиум “Химия и экология в техносфере”. – М., 1994. – Том 4. – С. 91-99.

9. Оптико-электронная система селекции объектов по размерам: ТО по НИР «Фундаментальные проблемы создания автономных информационных и управляющих систем (АИУС)» Шифр «Кедр-5» / МГТУ им. Н.Э. Баумана. – ГР 01200964825 Инв. № 02201053774М. – Рук. В.К. Хохлов, исп. С.В. Суворов [и др.] – М., 2010. – С. 159-165.

10. Вариант организации рубежа для двухканальной оптико-электронной системы контроля и селекции объектов по их размерам: ТО по НИР «Фундаментальные проблемы создания автономных информационных и управляющих систем (АИУС)» Шифр «Кедр-5» / МГТУ им. Н.Э. Баумана. – ГР 01200964825 Инв. № 02201053782М. – Рук. А.Б. Борзов, исп. С.В. Суворов [и др.] – М., 2012. – С. 155-172.

11. Помехоустойчивость и синхронизация систем передачи информации: ТО по НИР / НИИ СМ МГТУ им. Н.Э. Баумана. – ГР 01201262971 Инв. № . – Рук. Б.И. Шахтарин, зав. отд. С.В. Суворов, исп. Ю.А. Сидоркина [и др.] – М., 2012. – 215 с.