

На правах рукописи

ГОРШКОВ АЛЕКСЕЙ АНАТОЛЬЕВИЧ

**МЕТОД ОПТИМАЛЬНОГО РАЗМЕЩЕНИЯ TV-МОДУЛЕЙ  
ДЛЯ РАСПРЕДЕЛЕННОГО КОНТРОЛЯ ОБЪЕКТОВ  
В ДИСПЕРСНОЙ СРЕДЕ**

05.11.13 – Приборы и методы контроля природной среды,  
веществ, материалов и изделий

Автореферат диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Орел 2013

Работа выполнена в государственном казенном образовательном учреждении высшего профессионального образования Академия Федеральной службы охраны Российской Федерации

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор  
Ларкин Евгений Васильевич

Официальные оппоненты: Иванов Юрий Владимирович,  
доктор технических наук, профессор  
ФГБОУ ВПО "ТулГУ", профессор  
кафедры "Приборы управления"

Иванов Юрий Борисович,  
кандидат технических наук,  
Академия ФСО России,  
доцент кафедры

Ведущая организация: ОАО "Московский научно-исследовательский  
радиотехнический институт"  
(ОАО "МНИРТИ")

Защита состоится 24 декабря 2013 г. в 15.30 на заседании диссертационного совета Д 212.182.01 при Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего профессионального образования "Государственный университет – учебно-научно-производственный комплекс" по адресу: 302020, г. Орел, Наугорское шоссе, д. 29, аудитория 212.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего профессионального образования "Государственный университет – учебно-научно-производственный комплекс".

Автореферат разослан «22» ноября 2013 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета  
Д 212.182.01

Волков Вадим Николаевич

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность темы.** Комплексы аппаратуры распределенного контроля, в которых конечным потребителем видеоинформации является человек-оператор, выполняющий функции наблюдения зоны контроля и принятия решений при возникновении на ней нештатных ситуаций, в настоящее время применяются в различных областях народного хозяйства, в частности, в промышленных системах контроля технологических процессов. В качестве сенсоров в подобных системах используют *TV*-модули, которые содержат телекамеры, размещаемые на подвижном или неподвижном основании по наблюдаемой площади. *TV*-модули формируют видеосигналы, которые передаются по линиям связи на центральный пункт наблюдения и управления. На экране монитора видеосигналы с разных модулей мультиплексируются, и из отдельных составляющих формируется общее изображение контролируемой зоны, отдельные фрагменты которой могут быть показаны под разными ракурсами.

Эффективность подобной аппаратуры во многом определяется техническими характеристиками применяемых *TV*-модулей, которые, во-первых, должны быть адаптированы к условиям освещения зоны контроля, во-вторых, должны обеспечивать поле зрения, согласованное с возможностями восприятия изображений человеком-оператором, а в-третьих, при заданных параметрах зоны контроля обеспечивать требуемое покрытие всей наблюдаемой территории.

Вопросы проектирования подобных систем, включая вопросы согласования технических характеристик отдельных модулей с возможностями оператора с целью обеспечения требуемого уровня восприятия, а также размещение *TV*-модулей в зоне наблюдения с минимизацией длины коммуникаций, к настоящему времени проработаны только для частных случаев и недостаточно полно учитывают свойства среды и расположение контролируемых объектов. Все это делает задачу разработки метода оптимального размещения *TV*-модулей при распределенного технологического контроля в дисперсной среде весьма **актуальной**.

**Объектом исследования** в диссертационной работе является система распределенного контроля объектов, функционирующих в дисперсной среде.

**Предметом исследования** диссертационной работы являются показатели эффективности применения *TV*-модулей в системах распределенного контроля и методы, обеспечивающие улучшение восприятия изображений при различном состоянии атмосферы и конфигурации объектов контроля.

Общей теорией создания оптико-электронной аппаратуры распределенного контроля занимались отечественные и зарубежные ученые: Р. Гонсалес, Г. Н. Грязин, В. В. Еремеев, В. К. Злобин, Р. Е. Быков, А. Папулис, У. Прэтт, М. Птачек, В. А. Сойфер, В. С. Титов и др. В известных трудах по теме исследования разработаны методы математического моделирования различных элементов оптико-электронных преобразователей и аппаратуры на их основе.

Предлагаемый общий подход к исследованию аппаратуры распределенного контроля опирается на **аналитические методы** математического моделирования элементов оптических систем и оптико-электронных преобразователей *TV*-модулей и их применения в составе аппаратуры контроля. Математические модели оптико-

механической части системы сформированы по законам геометрической оптики, а пространственно-частотные характеристики получены путем приложения корреляционной теории сигналов к оптическим системам. Общий метод проектирования аппаратуры распределенного контроля разработан на основе теории принятия оптимальных решений.

**Целью диссертационной работы** является повышение уровня восприятия изображений оператором и расширение зоны распределенного контроля в условиях дисперсной среды и при наличии загромождающих объектов с минимизацией аппаратных затрат и стоимости коммуникаций.

**Основные задачи исследований.**

1. Анализ структур распределенного контроля и обоснование общих требований к характеристикам *TV*-модулей, используемых в качестве сенсоров в аппаратуре технологического контроля исследуемого класса.

2. Разработка математических моделей пространственной динамики *TV*-модулей на объектах контроля, основанных на корреляционной теории изображений с учетом фотометрических и динамических характеристик модулей.

3. Получение функций рассеяния *TV*-модуля в виде кривых Гаусса с учетом сферических аберраций объектива, реакции фотоэлементов и свойств среды распространения.

4. Разработка методик аналитической оценки и экспериментального определения границ зоны контроля *TV*-модуля на основе критерия Джонсона с учетом реальных параметров системы зрительного восприятия человека-оператора.

5. Определение параметров поля зрения *TV*-модуля в земной системе координат с учетом местоположения и его ориентации в пространстве.

6. Разработка методики определения общей площади распределенного контроля на основе *TV*-модулей с учетом перекрытия полей зрения, эффекта загромождавания и появления динамических "мертвых зон".

7. Разработка методики оптимального распределения *TV*-модулей по территории с учетом конфигурации и площади зоны контроля при одновременной минимизации общей длины кабельной сети.

**Научная новизна** диссертации заключается в следующем.

1. Разработан метод оценки суммарной функции рассеяния *TV*-модуля по основным параметрам его элементов, основанный на аппроксимации функции рассеяния кривыми Гаусса, отличающийся учетом особенностей распространения света в дисперсной среде, что позволяет увеличить информативность формируемого видеосигнала за счет минимизации среднеквадратичной ошибки аппроксимации.

2. Разработана методика определения границ поля зрения *TV*-модулей в аппаратуре распределенного контроля, основанная на использовании критериев восприятия Джонсона, отличающаяся учетом распределения модулей по наблюдаемой территории и ориентации их в пространстве, что позволяет повысить уровень восприятия изображения оператором при наличии загромождающих объектов в контролируемой зоне.

3. Предложена методика оптимального размещения *TV*-модулей в зоне распределенного контроля, основанная на плане размещения и параметрах контролируемых объектов, отличающаяся учетом механизма возникновения и параметров ди-

намических "мертвых зон", что позволяет обеспечить максимальную площадь зоны наблюдения и минимизировать стоимость коммуникаций.

**Практическая ценность** работы заключается в том, что разработанный метод размещения *TV*-модулей при распределенном контроле объектов позволяет снизить трудоемкость проектных работ и повысить качество проектирования аппаратуры распределенного контроля.

**Достоверность** полученных теоретических результатов подтверждается корректным применением аналитических моделей оптических и оптико-электронных блоков, существующих подходов к определению уровней восприятия и структурно-параметрической оптимизации, а также экспериментальными исследованиями параметров *TV*-модулей аппаратуры распределенного контроля.

**Научные положения, выносимые на защиту.**

1. Метод определения суммарной функции рассеяния *TV*-модуля с аппроксимацией функции рассеяния элементов кривыми Гаусса по критерию минимума среднеквадратичной ошибки, позволяющий увеличить информативность формируемого видеосигнала в условиях дисперсности контролируемой среды.

2. Методика определения границ поля зрения *TV*-модуля с известными координатами его размещения и ориентацией в пространстве на основании критериев восприятия Джонсона, позволяющая повысить уровень восприятия контролируемых объектов оператором с учетом наличия загромождающих объектов в зоне контроля.

3. Методика оптимального размещения *TV*-модулей при распределенном контроле, позволяющая обеспечить максимальную площадь зоны наблюдения и минимальную стоимость коммуникаций за счет учета механизма возникновения и параметров динамических "мертвых зон".

**Реализация и внедрение результатов.** Предложенные в диссертации метод и реализующие его методики распределенного контроля объектов внедрены на ЗАО "Научприбор" (г. Орел), а также используются в учебном процессе на кафедре "Робототехника и автоматизация производства" ТулГУ (г. Тула) при преподавании дисциплин "Основы информационных устройств роботов" и "Основы технического зрения и цифровой обработки изображений".

**Апробация работы.** Основные положения диссертации докладывались на следующих научных конференциях.

1. XXX Научная сессия, посвященная Дню радио. – Тула: Тульский государственный университет, 2012.

2. Шестая Всероссийская научно-практическая конференция "Системы управления электротехническими объектами "СУЭТО-62". – Тула: Тульский государственный университет, 2012.

3. Научно-технические конференции профессорско-преподавательского состава Тульского государственного университета 2011 – 2013 гг.

По теме диссертации опубликовано 14 статей, в том числе 2 статьи в научных изданиях, рекомендуемых ВАК для публикаций материалов диссертаций.

**Структура и объем работы.** Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, изложенных на 164 страницах машинописного текста и включающих 56 рисунков и 8 таблиц, заключения, списка использованной литературы из 170 наименования.

## КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** приведено обоснование актуальности темы исследования, сформулированы цели и основные научные задачи диссертационной работы, дано краткое изложение полученных результатов по основным разделам.

В **первой главе** проанализировано назначение и свойства аппаратуры распределенного контроля на основе *TV*-модулей.

Показано, что разработка и эксплуатация аппаратуры распределенного контроля на базе *TV*-модулей связана с затратами, зависящими от объема информации, представляемой на пункт наблюдения, что приводит к необходимости минимизации количества источников первичной информации за счет их рационального размещения по контролируемой территории.

Аппаратура распределенного контроля представлена в виде графа, ребра которого являются моделями коммуникаций, а вершины моделируют *TV*-модули и пункт сбора информации и управления. Приведена функциональная схема модулей, формирующих видеосигнал при наблюдении за зоной контроля, описаны этапы преобразования сигнала в *TV*-модулях, в том числе в твердотельных фотоэлектронных преобразователях.

Установлено, что для расширения поля зрения в *TV*-модулях применяют датчики, имеющие до двух степеней свободы относительно неподвижного основания. В этом случае с помощью механических приводов горизонтального и вертикального наведения обеспечивается пространственное перемещение оптической оси прибора по углам азимута  $\psi(t)$  и места  $\vartheta(t)$ , соответственно. Кроме того, объектив датчика может иметь изменяемое фокусное расстояние и диафрагму, которые также меняются с помощью электромеханических узлов.

По классификации аппаратуры распределенного контроля с *TV*-модулями определен ее тип: это пассивная (без подсветки) и без оптической коррекции монохромная многомодульная система с твердотельными фотоэлектронными преобразователями и восприятием изображения оператором.

Определены системы координат, в которой функционируют *TV*-модули. Земная система координат  $Oxyz$  связана с цифровой картой местности или с планом охраняемой территории, а система координат пространственного положение оптической оси  $n$ -го модуля задается в виде углов азимута  $\psi_n$  и места  $\vartheta_n$ .

Формирование цифровой модели изображения  $[D_{jk}]$  сводится к последовательным преобразованиям двумерного пространственного сигнала

$$0 = F(\zeta_{\text{ВХ}}(\xi), \zeta_{\text{ВЫХ}}(\xi), \nabla \zeta_{\text{ВЫХ}}(\xi), \nabla^2 \zeta_{\text{ВЫХ}}(\xi), \dots), \quad (1)$$

где  $\xi = (\xi_1, \dots, \xi_L)$  – вектор обобщенных пространственных координат;  $\zeta$  – один из параметров света, имеющий пространственную модуляцию  $\zeta_{\text{ВХ}}$  на входе и  $\zeta_{\text{ВЫХ}}$  – на выходе из элемента;  $F$  – некоторая скалярная функция; при этом  $\nabla_Z = \left( \frac{\partial}{\partial x_1}, \dots, \frac{\partial}{\partial x_L} \right) V$ ,  $\nabla^2 V = \left( \frac{\partial^2}{\partial^2 x_1}, \dots, \frac{\partial^2}{\partial^2 x_L} \right) V, \dots$

Выражение (1) описывает пространственную динамику элементов *TV*-модуля, которая изменяет разрешение, резкость и контраст изображения в зависимости от решений дифференциальных уравнений.

В спектральной области решение имеет вид произведения спектра сигнала  $\zeta_{\text{ВХ}}(\omega_{\xi l})$  на передаточную функцию  $W_l(\omega_{\xi l})$ :  $\zeta_{\text{ВЫХ}}(\omega_{\xi l}) = \zeta_{\text{ВХ}}(\omega_{\xi l}) \cdot W_l(\omega_{\xi l})$ .

Показано, что частотные характеристики  $TV$ -модулей, применяемых в аппаратуре распределенного контроля, оказывают существенное влияние на информативность формируемого видеосигнала и количество применяемых устройств. Ухудшение разрешающей способности приводит к сокращению контролируемой зоны зрения  $TV$ -модулей при сохранении уровня восприятия. Это, в свою очередь, приводит к увеличению количества  $TV$ -модулей, необходимого для покрытия той же площади и увеличением коммуникаций, а также согласованием параметров отдельных  $TV$ -модулей в составе распределенной аппаратуры.

Сформулирован общий подход к оптимизации размещения  $TV$ -модулей в зоне контроля с учетом их технических характеристик.

Во *второй главе* проведен анализ основных параметров элементов тракта прохождения сигнала и тракта аппаратуры распределенного контроля в целом.

На оптической схеме формирования модулированного светового потока определена освещенность фоточувствительных ячеек фотоэлектронного преобразователя  $E_{K'}$  по освещенности наблюдаемой поверхности  $E_K$  в виде

$$E_{K'} = \frac{E_K k}{4(1 + k_o)^2} (o_d / f)^2,$$

где  $0 \leq k \leq 1$  – коэффициент пропускания;  $(o_d / f)$  – относительное отверстие объектива;  $k_o$  – его кратность.

Освещенность элемента изображения в точке, удаленной и наблюдаемой под углом  $\varphi$  от главной оптической оси, определяется по зависимости:

$$E_1 = E_0 k_B(\varphi) \cos^4 \varphi,$$

где  $E_0$  – освещенность в центре поля зрения объектива;  $E_1$  – освещенность в наблюдаемой точке;  $k_B(\varphi)$  – коэффициент виньетирования.

Первым приближением изображения геометрической точки в виде кружка рассеяния объектива, имеющего диаметр  $d_{\text{кр}} = h \cdot o_d / f$ , зависит от глубины резкости  $h$ , будет первая производная от площади сегмента круга с диаметром, равным диаметру кружка рассеяния (изображение с резкой границей). Точным приближением (изображение с размытой границей) является функция Гаусса

$$w_o(\xi) = \frac{k}{4\sqrt{2\pi}(1 + k_o)^2 b(d_{\text{кр}})} \left(\frac{o_d}{f}\right)^2 \exp\left(-\xi^2 / 2bd_{\text{кр}}^2\right), \quad (2)$$

где  $b(d_{\text{кр}}) = 0,33 d_{\text{кр}}$  определяется из минимума среднеквадратичной ошибки двух приближений;  $k_o = \frac{k}{4(1 + k_o)^2} \cdot (o_d / f)^2$  – статический коэффициент передачи.

Передаточная функция объектива для функции (2) имеет вид кривой Гаусса:

$$W_o(\omega_{\xi}) = \frac{k}{4(1 + k_o)^2} \left(\frac{o_d}{f}\right)^2 \exp\left(-2(0,33d_{\text{кр}})^2 \pi^2 \omega_{\xi}^2\right). \quad (3)$$

При эксплуатации аппаратуры распределенного контроля зона наблюдения располагается на открытом воздухе. В этих условиях туман, часто встречающийся на пути распространения света, влияет на параметры поля зрения  $TV$ -модуля. Каждая частица диспергента формирует усредненную индикатрису рассеяния, что приводит к появлению дополнительного кружка рассеяния с диаметром  $d'_{кр}$  и изменению освещенности изображения точки в фокальной плоскости объектива:

$$E_{тд}(x) = \frac{E_{зр} k o_d^2 (4 - c_d p \Delta_{L_n} r_d^2)}{4\sqrt{2p} \cdot (0,33d_{кр})^2 d_{кр}^2} \exp\left(-\frac{x^2}{2 \cdot (0,33d_{кр})^2}\right) + \frac{c_d p o_d^2 \Delta_{L_n} k o_d^2 \iint \Phi_n i(\sqrt{J_n^2 + y_n^2}) dJ_n dy_n}{4\sqrt{2p} \cdot (0,33d'_{кр})^2 d_{кр}'^2} \exp\left(-\frac{x^2}{2 \cdot (0,33d'_{кр})^2}\right) \quad (4)$$

где  $r_d$  – радиус частицы диспергента;  $\sqrt{\vartheta_n^2 + \psi_n^2} \leq o_d/2L_n$  телесный угол, под которым наблюдается входной зрачок объектива из средне удаленной частицы диспергента;  $L_n$  – расстояние от входного зрачка объектива до центра рассеивающей среды,  $\Delta_{L_n}$  – длина отрезка оптической оси, вдоль которого распределен диспергент;  $c_d$  – концентрация диспергента.

Предложен метод оптимальной аппроксимации сложной функции (4) на кривую Гаусса вида  $E''_{тд}(\xi) = \frac{C(c_d)}{\sqrt{2\pi}(0,33d''_{кр})} \exp\left[-\xi^2/2 \cdot (0,33d''_{кр})^2\right]$  для упрощения расчетов по критерию минимума среднеквадратичного отклонения.

Показано, что ячейка матричного фотоэлектронного преобразователя имеет импульсный отклик и передаточную функцию соответственно такого вида

$$w_{я}(\xi) = \frac{k_{я}}{\sqrt{2\pi}(0,85\beta)} \exp\left(-\frac{\xi^2}{2(0,85\beta)^2}\right), \quad W_{я}(\omega_{\xi}) = k_{я} \exp\left(-2(0,85\beta)^2 \pi^2 \omega_{\xi}^2\right),$$

где  $2\beta \times 2\beta$  – апертура окна ячейки;  $k_{я}$  – статический коэффициент передачи.

Показано, что суммарная передаточная функция  $TV$ -модуля и суммарная функция рассеяния определяются выражениями

$$W_{\Sigma}(\omega_{\xi}) = \tilde{k}_{\Sigma} \exp(-b_{\Sigma}^2 \omega_{\xi}^2), \quad w_{\Sigma}(\xi) = \frac{\tilde{k}_{\Sigma}}{\sqrt{2\pi}b_{\Sigma}} \exp\left(-\frac{\xi^2}{2b_{\Sigma}^2}\right), \quad (5)$$

где  $b_{\Sigma}^2 = b_d^2 + b_o^2 + b_{я}^2$ ; причем  $b_d, b_o, b_{я}$  – параметры кривых Гаусса среды распространения, объектива и фотоэлектронного преобразователя, соответственно;  $\tilde{k}_{\Sigma} = \tilde{k}_d \tilde{k}_o \tilde{k}_{я}$ ;  $\tilde{k}_d, \tilde{k}_o, \tilde{k}_{я}$  – статические коэффициенты среды распространения, объектива и фотоэлектронного преобразователя.

Логарифм от обеих частей суммарной передаточной функции представляет собой логарифмическую частотную характеристику (ЛЧХ)  $TV$ -модуля:

$$\ln[W_{\Sigma}(\omega_{\xi})] = \ln k_d + \ln k_o + \ln k_{я} - (b_d^2 + b_o^2 + b_{я}^2) \omega_{\xi}^2. \quad (6)$$



ЛЧХ отдельных элементов и суммарная ЛЧХ имеют вид квадратичных парабол, симметричных относительно оси ординат (рис. 1).

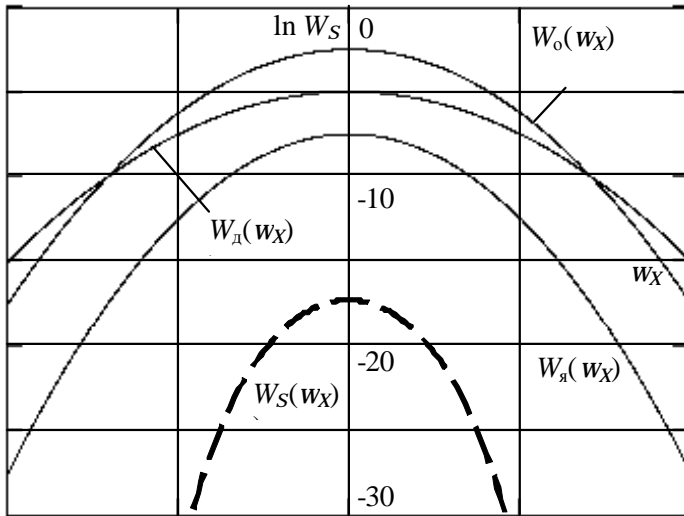


Рис. 1. Графики логарифмических частотных характеристик

В *третьей главе* на основе критерия Джонсона разработаны методики экспериментального и аналитического определения дальней границы поля зрения *TV*-модуля, обеспечивающие заданный уровень восприятия изображения.

Показано, что автоматизация процесса идентификации контролируемых объектов включает этап видеомониторинга наблюдаемой зоны оператором, поэтому аппаратура распределенного контроля должна проектироваться с учетом эргономических особенностей человека-оператора.

Для оценки видеопараметров *TV*-модуля по критерию визуального вос-

приятия Джонсона применен расчет параметров изображения количества периодов миры на пределе разрешения и сопоставление этого количества с размерами соответствующего изображения, формируемого той же системой контроля.

При соответствии размеров изображения и миры требуемый уровень восприятия (обнаружение –  $1,0 \pm 0,25$  пар линий, ориентация –  $1,4 \pm 0,35$  пар линий, распознавание –  $4,0 \pm 0,8$  пар линий, идентификация –  $6,4 \pm 1,5$ ) может быть достигнут.

При оценке разрешающей способности человеческого глаза от ряда параметров установлено, что теоретический предел разрешающей способности глаза находится в зеленой области спектра света и равен  $0,03'$ , а с учетом фокусного расстояния хрусталика и размеров палочек его разрешение ухудшается до  $0,06'$ .

Разработана методика определения дальней границы поля зрения *TV*-модуля, предусматривающая:

- съемку миры максимального контраста с помощью *TV*-модуля, наблюдение изображения штриховой миры на мониторе и определение группы штрихов, для которой пространственная модуляция при ориентации  $0^\circ$ ,  $90^\circ$  и  $\pm 45^\circ$  еще устойчиво различима;

- определение по таблице Джонсона размеров области изображения (в пикселях) или количества пар штрихов для выбранного уровня восприятия;

- для выбранного объекта восприятия определена дальность, на которой его проекция на плоскость фотоэлементов *TV*-модуля вписывается в область, определенную по штриховой миры таблицей Джонсона.

Полученный передний отрезок будет являться граничным значением поля зрения объектива, обеспечивающим требуемый уровень восприятия.

Сформирована математическая модель поперечного сечения штрихов стандартной штриховой миры максимального контраста, нормированной в интервале значения модулируемого параметра  $\tilde{D} = 0 \div 1$ :

$$\tilde{D}(\xi) = \sum_{j=-2}^1 \eta(\xi - T - 4jT) \cdot \eta(3T + 4jT - \xi), \quad (7)$$

где  $2T$  – период следования штрихов;  $\eta(\xi)$  – единичная функция Хевисайда.

Выходной аналоговый сигнал  $TV$ -модуля определяется интегралом свертки его функции рассеяния (5) с входным сигналом (7):

$$D(\xi) = w_{\Sigma}(\xi) \cdot \tilde{D}(\xi) = \sum_{j=-2}^1 \zeta(\xi - T - 4jT) - \zeta(\xi - 3T - 4jT), \quad (8)$$

где  $\zeta(\xi) = \frac{k_{\Sigma}}{\sqrt{2\pi}b_{\Sigma}} \int_{-\infty}^{\xi} \exp(-\tau^2/2b_{\Sigma}^2) d\tau$ .

Вид функции (8) для различных значений  $b_{\Sigma}$  показан на рисунке 2.

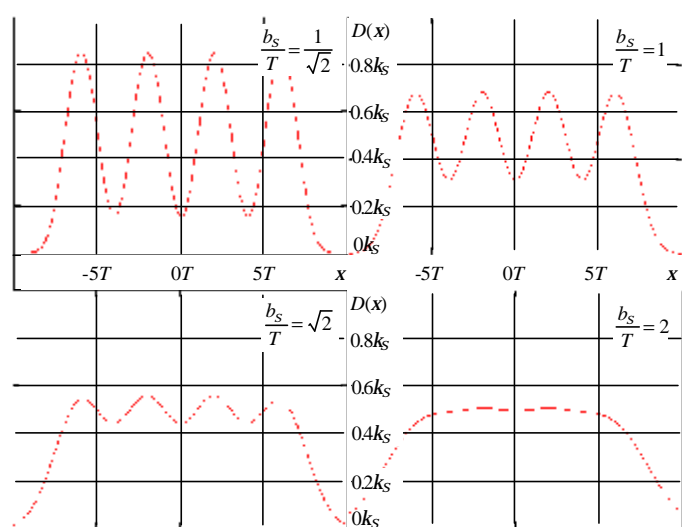


Рис. 2. Графическое представление сигнала  $TV$ -модуля по (8)

Согласно графикам (рис. 2), увеличение параметра  $b_{\Sigma}$  функции рассеяния, описываемой кривой Гаусса, приводит к уменьшению модуляции изображения мира. При  $b_{\Sigma}/T = 2$  изображение мира практически не имеет пространственной модуляции. Среднее значение порога для обнаружения перепада освещенности составляет 6,3 %. Для устойчивой идентификации необходимо, чтобы глубина модуляции составляла 3÷4 пороговых значения перепада, что согласуется с критерием Релея, согласно которому провал между пиковыми значениями изображения должен составлять около 27 %.

Методика аналитического определения дальней границы поля зрения:

- по заданным параметрам объектива, фотоэлектронного преобразователя и условиям эксплуатации выполняется расчет параметра  $b_{\Sigma}$ ;
- для рассчитанного значения  $b_{\Sigma}$  по зависимостям выполняется подбор параметра  $T$ , обеспечивающего глубину модуляции 27 % в функции (8);
- по требуемому уровню восприятия определение по таблице Джонсона размеров области изображения (в пикселях) выбранного количества пар штрихов;
- определение дальности для выбранного объекта восприятия, на которой его проекция на плоскость фотоэлементов  $TV$ -модуля вписывается в область, определенную по штриховой мире и таблице Джонсона.

Показано, что поле зрения  $TV$ -модуля представляет собой трапецию, боковые стороны которой формируются сторонами угла зрения объектива  $2\phi_{ou}$ , меньшая сторона перпендикулярна главной оптической оси и находится на расстоянии наименьшего переднего отрезка объектива, а большая сторона определяется по критерию Джонсона в соответствии с заданным уровнем восприятия.

Если  $TV$ -модуль поднимается выше уровня объектов контроля и наклоняется на угол места  $\vartheta_n$ , то высота  $h$  нерелевантной части наблюдаемого объекта входит в зависимость для дальней границы контролируемой зоны.

Ближняя и дальняя границы зоны контроля определяются по выражениям

$$L_0 = (r_{zn} - h) \operatorname{ctg}(\varphi_{oz} + \vartheta_n), \quad L_j = (h - r_{zn} + L'_j \sin \vartheta_n) \operatorname{tg} \vartheta_n + L'_j \cos \vartheta_n, \quad (9)$$

где  $j = 1, 2, 3, 4$  – уровни восприятия;  $r_{zn}$  – высота подъема модуля над Землей,  $L'_j$  – положение дальней границы в соответствии с заданным уровнем восприятия без учета подъем модуля;  $2\varphi_{oz}$  – угол зрения объектива по вертикали.

Для общего случая расположения  $TV$ -модуля со смещением точки установки  $O_n$  на величины  $r_{xn}$ ,  $r_{yn}$  и поворотом модуля на угол азимута  $\psi_n$  определены координаты угловых точек трапеции поля зрения.

Получены условия попадания произвольной точки с координатами  $x, y$  внутрь трапеции поля зрения в виде систем неравенств для шести случаев:

$0^\circ < \psi_n < 90^\circ - \varphi_{oy}$ ;  $90^\circ - \varphi_{oy} < \psi_n < 90^\circ + \varphi_{oy}$ ;  $90^\circ + \varphi_{oy} < \psi_n < 180^\circ$ ;  $180^\circ < \psi_n < 270^\circ - \varphi_{oy}$ ;  $270^\circ - \varphi_{oy} < \psi_n < 270^\circ + \varphi_{oy}$ ;  $270^\circ + \varphi_{oy} < \psi_n < 360^\circ$ , где  $2\varphi_{oy}$  – угол зрения объектива по горизонтали;  $\psi_n$  – угол азимута расположения  $n$ -го модуля.

Определена площадь перекрывающихся полей зрения на основе двух выпуклых четырехугольников  $A_{11}A_{12}A_{13}A_{14}$  и  $A_{21}A_{22}A_{23}A_{24}$  общего вида и самого общего расположения, которые имеют координаты угловых точек  $X_1 = \{(x_{11}, y_{11}), (x_{12}, y_{12}), (x_{13}, y_{13}), (x_{14}, y_{14})\}$ ,  $X_2 = \{(x_{21}, y_{21}), (x_{22}, y_{22}), (x_{23}, y_{23}), (x_{24}, y_{24})\}$  и могут перекрываться.

Разработана методика определения площадей пересечения выпуклых четырехугольников, исходными данными которой являются:

- два множества координат угловых точек полей зрения;
- два множества  $Q_1 = \{q_{11}, q_{12}, q_{13}, q_{14}\}$ ,  $Q_2 = \{q_{21}, q_{22}, q_{23}, q_{24}\}$ , каждый из четырех элементов которого представляет собой неравенство, выбираемое по условию попадания произвольной точки с координатами  $x, y$  внутрь трапеции поля зрения;
- два множества  $P_1 = \{p_{11}, p_{12}, p_{13}, p_{14}\}$  и  $P_2 = \{p_{21}, p_{22}, p_{23}, p_{24}\}$  из четырех уравнений, описывающих граничные прямые полей зрения  $TV$ -модулей.

Методика предусматривает определение всех угловых точек выпуклого многоугольника перекрытия, его разбиение на неперекрывающиеся треугольники с определением площадей треугольников по формуле Герона и суммированием полученных площадей.

Получены зависимости для сокращения поля зрения  $TV$ -модуля загромождающими предметами, представленными на плане в виде отрезка прямой общего расположения с координатами крайних точек  $(x_{11}, y_{11})$  и  $(x_{12}, y_{12})$  соответственно и отрезка кривой, заданной в параметрической форме как  $[x(t), y(t)]$ .

Считается, что ненаблюдаемой "мертвой зоной" является часть зоны контроля, ограниченная многоугольником, одной из сторон которого является дальняя граница поля зрения. "Мертвая зона" формируется в виде многоугольника, максимальное количество вершин у которого равно 5. Для многоугольника известны координаты углов, поэтому площадь "мертвой зоны" может быть определена по методике, аналогичной расчету площади перекрытия полей зрения.

В *четвертой главе* изложены методики проектирования аппаратуры распределенного контроля, описан механизм возникновения и параметры динамических "мертвых зон", методики оптимального распределения *TV*-модулей по территории зоны контроля и оптимального проектирования коммуникаций.

Расширение функциональных возможностей *TV*-модуля может быть достигнуто за счет изменения пространственного положения главной оптической оси, фокусного расстояния и диафрагмы объектива с помощью оптико-механических узлов.

Показано, что "мертвые зоны" контроля в системе с динамическими *TV*-модулями могут быть разделены на два типа: зоны, которые возникают только во время переходных процессов за счет явления "смаза", и зоны, в которых при разных состояниях *TV*-модулей наблюдаются разные части пространства.

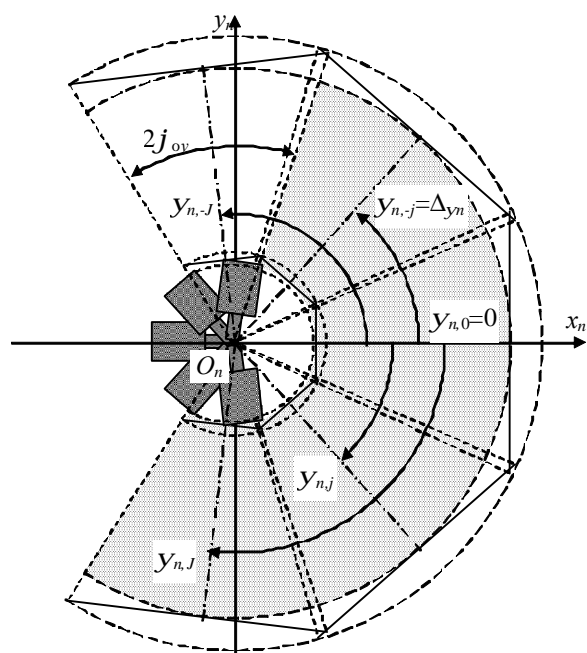


Рис. 3. Форма "мертвой зоны" при вращении *TV*-модуля по азимуту

Разработана методика определения "мертвой зоны" первого типа по максимальной скорости вращения  $\omega_{n \max}$  *TV*-модуля и расчета динамической апертуры ячейки фотоэлектронного преобразователя с учетом времени  $t_H$  накопления заряда  $\beta_D = \omega_{n \max} t_H$ . Увеличение апертуры ячейки приводит к приближению дальней границы поля зрения в соответствии с критерием Джонсона.

Общая наблюдаемая площадь при вращении оптической оси по углу азимута при неизменном фокусном расстоянии и угле места определяется как

$$S_{\text{дмз}} = [(2J + 1)\Delta\psi_n + 2\varphi_0 - \Delta\psi_n] \cdot (L_j - L_0). \quad (10)$$

Величина "мертвой зоны" второго типа определяется как площадь сектора, заштрихованного на рисунке 3.

$$S_{\text{дмз}} = \left[ 2J\Delta\psi_n - \left( \varphi_0 - \frac{\Delta\psi_n}{2} \right) \right] \cdot \begin{cases} 2, & \text{если } j = 0; \\ 1, & \text{если } j \neq 0, \end{cases} \cdot (L_j - L_0),$$

где  $J$  – количество кадров наблюдения.

"Мертвые зоны" первого типа исчезают в статическом режиме наблюдения, а для компенсации "мертвых зон" второго типа необходимо постоянное сканирование пространства.

Формирование динамической "мертвой зоны" при вращении *TV*-модуля в зоне контроля по углу азимута приведено на рисунке 3. На этом рисунке 3 наблюдаемая зона делится на кадры с номерами  $-J, \dots, j, \dots, 0, \dots, j, \dots, J$ , а ориентация  $j$ -го кадра определяется углом  $\psi_{n,j}$ .

При формировании кадра с номером  $j = 0$  главная оптическая ось *TV*-модуля совпадает с направлением оси  $O_n x_n$ .

Соседние положения оптической оси формируются с шагом  $\Delta\psi_n$ . Перекрытие кадров по углу  $\psi_n$  на 3 ÷ 5 % требуется для исключения статических «мертвых зон».

Вращение оптической оси по углу места  $\vartheta_n$  приведено на рисунке 4.

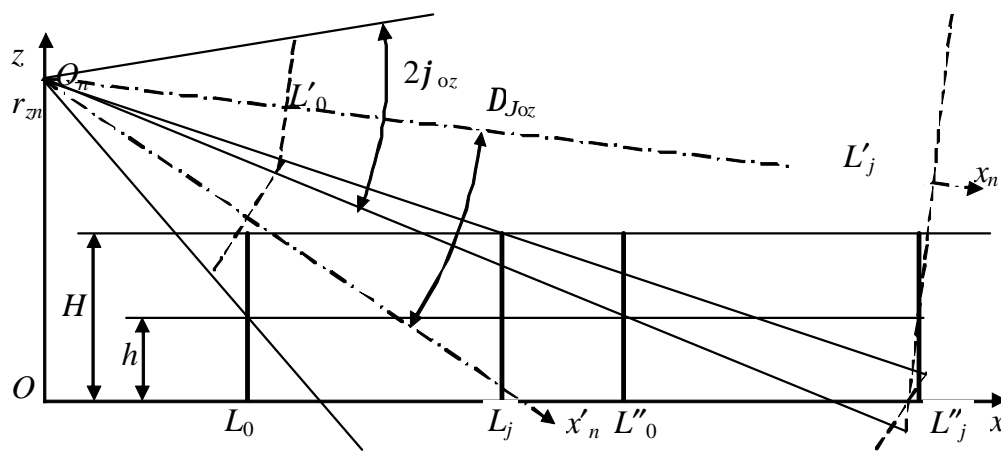


Рис. 4. «Мертвые зоны» при вращении TV-модуля по углу места

При крайних углах  $\vartheta_n$  местоположение точек дальних границ поля зрения  $L'_j$  и  $L''_j$  вычисляется по зависимостям  $L'_j = (r_{zn} - H) \cdot \cos(\vartheta_n + \varphi_{oz})$  и (10), соответственно.

Местоположение ближних границ поля зрения  $L_0$  и  $L''_0$  определяется по (9) для разных значений угла  $\vartheta_n$ . «Мертвая зона» первого типа рассчитывается по такой же методике, в формулы которой вместо угла  $\psi_n$  подставляется угол  $\vartheta_n$ . Общая наблюдаемая площадь и площадь «мертвой зоны» контроля определяются по выражениям:

$$S_{n\Sigma} = (L''_{j\max} + L_{0\min}) (L''_{j\max} - L_{0\min}) \operatorname{tg} \varphi_{oy};$$

$$S_{\text{ДМЗ}} = S_{n\Sigma} - (L'_{j\text{тек}} + L'_{0\text{тек}}) (L'_{j\text{тек}} - L'_{0\text{тек}}) \operatorname{tg} \varphi_{oy},$$

где  $L_{0\min}$  – ближняя граница поля зрения, получающаяся при минимальном угле места  $\vartheta_{n\min}$ , обеспечивающая  $j$ -й уровень восприятия;  $L''_{j\max}$  – дальняя граница поля зрения, которая получается при максимальном угле места  $\vartheta_{n\max}$ .

Появление динамических «мертвых зон» при изменении фокусного расстояния объектива определяется через общее поле зрения по формуле

$$S_{n\Sigma} = (L'_j + L'_0) (L'_j - L'_0) \operatorname{tg} \varphi'_{oy} + L'_j (L''_j - L'_j) \operatorname{tg} \varphi'_{oy}.$$

Динамическая «мертвая зона» определяется по формуле

$$S_{\text{ДМЗ}} = S_{n\Sigma} - (L'_{j\text{тек}} + L'_{0\text{тек}}) (L'_{j\text{тек}} - L'_{0\text{тек}}) \operatorname{tg} \varphi'_{оутек}.$$

Изменение диафрагмы объектива приводит к изменению кружка рассеяния, что, в свою очередь, приводит к изменению местоположения дальней границы наблюдаемой зоны для заданного уровня восприятия.

Показано, что динамическое наблюдение можно проводить как при регулярном, так и при случайном режимах сканирования контролируемой зоны.

В первом случае время достижения требуемого состояния  $m_d$  из текущего значения  $n_d$  зависит от количества  $N_d$  интервалов сканирования и определяется по следующим зависимостям

В отличие от вращения по углу азимута динамическое поле зрения не разбивается на отдельные кадры, поэтому можно оценить только общее изменение поля зрения при крайних угловых положениях главной оптической оси.

$$T_{m_d n_d} = \begin{cases} (m_d - n_d)T_{MЗ} + (m_d - n_d - 1)T_H, & \text{если } m_d > n_d \text{ и } g_d = 0; \\ (n_d - m_d)T_{MЗ} + (n_d - m_d - 1)T_H, & \text{если } m_d < n_d \text{ и } g_d = 0; \\ [(N_d - n_d) + (N_d - m_d)]T_{MЗ} + [(N_d - n_d) + (N_d - m_d) - 1]T_H, & \\ \text{если } m_d < n_d \text{ и } g_d = 0; \\ [(n_d - 1) + (m_d - 1)]T_{MЗ} + [(n_d - 1) + (m_d - 1) - 1]T_H, & \\ \text{если } m_d > n_d \text{ и } g_d = 1, \end{cases} \quad (10)$$

где  $T_{MЗ}$  – время «мертвой зоны» первого типа;  $T_H$  – время наблюдения ( $TV$ -модуль находится в неизменяемом состоянии);  $g_d = \begin{cases} 0, & \text{если } 1 \rightarrow n_d \rightarrow N_d; \\ 1, & \text{если } N_d \rightarrow n_d \rightarrow 1. \end{cases}$  –

направление изменения состояния  $TV$ -модуля.

Решена задача оптимального размещения  $TV$ -модулей при наличии в зоне контроля загораживающих предметов с определением наблюдаемой площади для общего количества  $N$  размещаемых модулей по зависимости

$$S_{\Sigma} = \sum_{n=1}^N S_n - \sum_{\substack{j=1, \\ n=1, \\ j \neq n}}^N (S_j \cap S_n) + \dots + (-1)^{m-1} \sum_{\substack{j=1, \dots, \\ n=1, \dots, \\ m=1, \dots, \\ j \neq \dots \neq n \neq \dots \neq m}}^N (S_j \cap \dots \cap S_n \cap \dots \cap S_m) + \dots + (-1)^{N-1} \mathbf{I} S_n,$$

где  $\cap$  – знак пересечения (перекрытия) площадей;  $\mathbf{I}$  – знак группового перекрытия площадей;  $S_n$  – площадь поля зрения  $n$ -го  $TV$ -модуля.

Ограничениями в задаче оптимизации являются: план контролируемой территории, координаты точек потенциальной установки модулей, план размещения коммуникаций, местоположение пульта наблюдения и управления, информация об условиях эксплуатации, перечень  $TV$ -модулей, время существования динамических "мертвых зон", условия наблюдения особо охраняемых объектов на территории, ограничение на суммарную длину кабельной сети, ограничения на суммарную стоимость и стоимость эксплуатации аппаратуры распределенного контроля. Варьируемыми параметрами в данной задаче являются: общее количество  $TV$ -модулей  $N$ , тип  $TV$ -модулей, координаты  $r_{xn}$ ,  $r_{yn}$ ,  $r_{zn}$ ,  $\psi_n$  и  $\vartheta_d$  размещения  $n$ -го  $TV$ -модуля.

На первом этапе задача решается методом структурно-параметрической оптимизации, по которому выполняется размещение  $TV$ -модулей по территории контроля и определяются углы разворота  $\psi_n$  и  $\vartheta_n$ . На втором этапе решается задача оптимальной трассировки кабельной сети методом "ветвей и границ".

## ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

В диссертации решена научно-техническая задача, заключающаяся в разработке методов проектирования аппаратуры распределенного контроля с  $TV$ -датчиками видеонаблюдения. В целом по работе сделаны следующие **выводы**.

1. В результате анализа характеристик  $TV$ -модулей определены подходы к построению их математических моделей и сформирована обобщенная структура  $TV$ -модуля, используемого в аппаратуре распределенного контроля.

2. Разработаны математические модели пространственной динамики *TV*-модулей на объектах контроля, основанные на корреляционной теории изображений с учетом фотометрических и динамических характеристик модулей.

3. Определены основные фотометрические характеристики пространственной модуляции светового потока и освещенности фоточувствительных элементов. Показано, что пространственная динамика преобразований светового потока элементами *TV*-модуля может быть охарактеризована функцией рассеяния в виде кривой Гаусса, зависящей от параметров применяемых элементов, с использованием критерия минимума среднеквадратичной ошибки.

4. Получено выражение для определения параметров кривой Гаусса, определяющей функцию рассеяния *TV*-модуля в целом, при этом учтены основные параметры зрительного рецептора человека, влияющие на восприятие зоны контроля, такие, как острота зрения, различимость, кажущаяся четкость, разностный порог раздражения, и показано, что данные параметры могут быть использованы для определения поля зрения *TV*-модуля.

5. Разработаны методики определения дальней границы поля зрения *TV*-модуля, обеспечивающей заданный уровень восприятия по критерию Джонсона.

6. Разработана методика определения общей площади распределенного контроля, при этом решены следующие задачи:

- получены расчетные зависимости для определения параметров *TV*-модулей по координатам и пространственному положению с учетом перекрывающихся полей зрения разных модулей и наличия в зоне контроля загораживающих предметов;

- приведены зависимости для определения временных характеристик "мертвой зоны" при сканировании зоны контроля в возвратном старт-стопном режиме.

7. Предложена и обоснована методика оптимального размещения *TV*-модулей в зоне контроля с учетом плана размещения и параметров контролируемых объектов, а также влиянием дисперсности воздушной среды, позволяющая увеличить площадь покрытия с 80 % до 90 %.

8. Решена задача оптимального проектирования кабельной сети в системе распределенного контроля с *TV*-модулями и минимизацией стоимости коммуникаций.

#### **Основные публикации по теме диссертации в рецензируемых научных изданиях, рекомендованных ВАК**

1. Горшков, А.А. Расчет наблюдаемой площади в системе с множеством видеокамер [Текст] / А.А. Горшков, Е.В. Ларкин // *Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии*. – Орел: ГУ УНПК, № 4, 2012. – С. 150 – 154. (Личное участие – 50 %)

2. Горшков, А.А. Пространственная динамика *TV*-модуля в распределенных измерительных системах [Текст] / А.А. Горшков, Т.Р. Кузнецова // *Известия ТулГУ. Сер. Технические науки*. Вып. 4. – Тула: Изд-во ТулГУ, 2012. – С. 200 – 205. (Личное участие – 50 %)

#### **Список работ, опубликованных в журналах и материалах конференций**

3. Горшков, А. А. Поле зрения ТВ-камеры, поднятой над наблюдаемой сценой [Текст] / А.А. Горшков // *Сборник научных трудов 6 Всероссийской научно-*

практической конференции "Системы управления электротехническими объектами "СУЭТО-6". – Тула: Изд-во ТулГУ, 2012. – С. 225 – 227.

4. Горшков, А. А., Ларкин Е.В. Использование критерия Джонсона для автоматической идентификации объектов [Текст] / А.А. Горшков, Е.В. Ларкин // Сборник научных трудов Шестой Всероссийской научно-практической конференции «Системы управления электротехническими объектами «СУЭТО-6». – Тула: Изд-во ТулГУ, 2012. – С. 4 – 7. (Личное участие – 50 %)

5. Горшков, А.А. Динамические аберрации в CMOS-матрицах [Текст] / С.А. Будков, А.А. Горшков // Приборы и управление. – Тула: Изд-во ТулГУ, 2012. – С. 22 – 27. (Личное участие – 50 %)

6. Горшков, А.А. Использование критерия Джонсона при наблюдении сцены поднятой камерой [Текст] / А.А. Горшков // Приборы и управление. – Тула: Изд-во ТулГУ, 2012. – С. 31 – 36.

7. Горшков, А.А. Восприятие изображения на экране монитора [Текст] / А.А. Горшков, С.Н. Клещарь, Т.Р. Кузнецова // Приборы и управление. – Тула: Изд-во ТулГУ, 2012. – С. 36 – 43. (Личное участие – 35 %)

8. Горшков, А.А. Передаточная функция многоэлементных фотоэлектронных преобразователей [Текст] / А.А. Горшков, Е.В. Ларкин // Сборник материалов всероссийской научно-технической конференции «XXIX Научная сессия, посвященная Дню радио» – Тула: НТО РЭС им. А.С. Попова, 2012. – С. 14 – 20. (Личное участие – 50 %)

9. Горшков, А.А. Динамические "мертвые зоны" при вращении TV-модуля по углу азимута [Текст] / А.А. Горшков // Сборник материалов всероссийской научно-технической конференции «XXIX Научная сессия, посвященная Дню радио» – Тула: НТО РЭС им. А.С. Попова, 2012. – С. 211 – 215.

10. Горшков, А.А. Наблюдение сцены в дисперсной среде [Текст] / Т.А. Акименко, А.А. Горшков, Е.В. Ларкин // Сборник материалов всероссийской научно-технической конференции «XXIX Научная сессия, посвященная Дню радио» – Тула: НТО РЭС им. А.С. Попова, 2012. – С. 58 – 63. (Личное участие – 35 %)

11. Горшков, А.А. Формирование изображений подвижных объектов с использованием CMOS-матриц [Текст] / А.А. Горшков // Вестник ТулГУ. Серия «Системы управления». Вып. 1. – Тула: Изд-во ТулГУ, 2013. – С. 80 – 84.

12. Горшков, А.А. Поле зрения TV-модуля с изменяемым фокусным расстоянием [Текст] / А.А. Горшков, Нгхиа Ву Зуй // Вестник ТулГУ. Серия «Системы управления». Вып. 1. – Тула: Изд-во ТулГУ, 2013. – С. 84 – 89. (Личное участие – 50 %)

13. Горшков, А.А. Задача оптимизации сети телекамер [Текст] / А.А. Горшков // Приборы и управление. Вып. 11. – Тула: Изд-во ТулГУ, 2013. – С. 31 – 36.

14. Горшков, А.А. Использование аппаратуры видеоконтроля окружающей среды в системах безопасности [Текст] / А.А. Горшков // Приборы и управление. Вып. 11. – Тула: Изд-во ТулГУ, 2013. – С. 31 – 36.

Подписано в печать 20.11.2013 г. Формат 60×84/16. Печать офсетная.

Бумага офсетная. Гарнитура «Times New Roman».

Усл. печ. л. 1. Тираж 100 экз. Заказ № 315.

Отпечатано в типографии Академии ФСО России  
302034, г. Орел, ул. Приборостроительная, 35.