

На правах рукописи

БУДКОВ Сергей Анатольевич

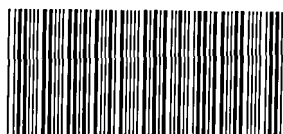


СКАНИРУЮЩИЕ ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ СИСТЕМЫ  
ДИСТАНЦИОННОГО ОПРЕДЕЛЕНИЯ КООРДИНАТ  
ТОЧЕЧНЫХ ИСТОЧНИКОВ

Специальность: 05.11.16 - Информационно-измерительные  
и управляющие системы (в промышленности)

Автореферат диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

5 ДЕК 2013



005542763

Тула 2013

Работа выполнена в ГОУ ВПО «Тульский государственный университет»

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор  
ЛАРКИН Евгений Васильевич

Официальные оппоненты: Доктор технических наук, профессор  
Румянцев Владимир Львович,  
ОАО «Центральное конструкторское бюро  
аппаратостроения», заместитель начальника  
отдела

Кандидат технических наук, доцент  
Понятский Валерий Мариафович,  
ОАО «Конструкторское бюро  
приборостроения», начальник сектора

Ведущее предприятие: ОАО «Научно-исследовательский институт  
«Стрела»»

Защита состоится « \_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2013 г. в \_\_\_\_ часов на заседании диссер-  
тационного совета Д 212.271.07 на при ФГБОУ ВПО «Тульский государственный  
университет» (300012, г. Тула, проспект Ленина, 95, 1-117).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВПО «Тульский  
государственный университет» (300012, г. Тула, проспект Ленина, 92).

Автореферат разослан « \_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2013 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета



Данилкин Федор  
Алексеевич

## ВВЕДЕНИЕ

*Актуальность темы.* Сканирующие системы дистанционного определения пространственного положения объектов являются весьма важным классом информационно-измерительных систем, достаточно широко используемым при проведении мониторинга (экологическая обстановка, разведка, ликвидация последствий техногенных катастроф), полигонных испытаниях баллистических и управляемых боеприпасов, управлении воздушным движением вблизи аэродромов и т.п. Решение о применении в практике измерений подобных систем обусловлено тем, что помимо решения прямой задачи, они позволяют также регистрировать характерные и нештатные ситуации, сопровождающие пространственное перемещение наблюдаемого объекта.

Несмотря на значительный рост уровня элементной базы, ориентированной на решение технических задач проектирования и производства подобных систем, в промышленности дистанционные измерители пространственного положения объектов используются недостаточно. Это обусловлено целым рядом причин, важнейшей из которых является в целом невысокая точность измерения, обусловленная как инструментальными ошибками, вносимыми трактом прохождения сигнала, так и методическими ошибками, возникающими при селекции измеряемого объекта, ограничении области его локализации, и оценке местоположения его центра. В настоящее время в качестве решающего правила селекции используется амплитудная дискриминация сигнала от малоразмерных целей, позволяющая с достаточной для практических целей точностью выделять высококонтрастные объекты, и совершенно неприемлемая в случаях, когда сигнал является слабоконтрастным, нестационарным, и/или поступает в дистанционный измеритель пространственного положения в сопровождении естественных или искусственно созданных помех.

В этих случаях решение задачи повышения точности измерения пространственных координат дистанционно удаленных объектов связано с формированием адекватной модели наблюдаемого объекта как точечного источника, описанием трансформации модели после прохождения сигнального тракта и разработкой методов оценки пространственного положения объекта по его наблюдаемой цифровой модели. В комплексе данные методы разработаны недостаточно, что делает задачу разработки методов дистанционного определения пространственного положения точечных объектов с помощью сканирующих информационно-измерительных систем весьма *актуальной*.

*Объектом исследования* диссертационной работы является сканирующая информационно-измерительная система дистанционного определения координат, использующая для дистанционного измерения пространственного положения точечного источника испускаемое или отраженное им электромагнитное излучение, которое может лежать в видимой, инфракрасной, или радиочастотной области спектра.

*Предметом исследования* диссертационной работы являются модели точечного источника, элементов тракта прохождения сигнала, а также методы использования моделей для повышения точности оценки пространственных координат наблюдаемых точечных источников.

Общей теорией создания систем дистанционного определения координат точечных источников занимались отечественные и зарубежные ученые Б.А.Алпатов, Р. Гонсалес, Г.Н. Грязин, В.В. Еремеев, В.К. Злобин, Ю.Б. Зубарев, Г.П. Катус, С.М. Латыев, А. Папулис, У. Прэтт, В.С. Титов, Л.П. Ярославский и др. В известных трудах по объекту исследования разработаны методы математического моделирования систем дистанционного определения координат и обработки сигналов, сформированных сенсорами подобных систем.

*Цель работы* заключается в повышении точности определения пространственного положения объектов, наблюдаемых в оптическом, ближнем ИК и радиочастотном диапазоне электромагнитного излучения.

Ниже предлагается общий подход к достижению цели, основанный на *аналитических методах* математического моделирования элементов тракта прохождения сигнала. Математические модели сформированы с применением законов проекционной оптики, пространственно-частотной и пространственно-корреляционной теории сигналов, теории функций чувствительности. Для получения оценок пространственных координат объектов использовались методы обработки измерительной информации.

*Реализация поставленной цели включает решение следующих задач.*

1. Анализ существующих информационно-измерительных систем дистанционного определения пространственного положения объектов, а также разработка по результатам анализа обобщенной функциональной схемы систем исследуемого класса.

2. Определение факторов, влияющих на точность дистанционного измерения пространственного положения объектов, и получение зависимостей, позволяющих оценить точность измерения по статическим и пространственно-динамическим характеристикам элементов тракта прохождения сигнала.

3. Построение адекватной модели наблюдаемого объекта, как точечного источника сигнала.

4. Аналитическое моделирование этапов формирования цифрового образа сцены, включая этап прохождения электромагнитного излучения через дисперсную среду, и получение типовой математической модели изображения точечного источника, поступающей на программную обработку.

5. Разработка метода выделения релевантной составляющей наблюдаемого сигнала в условиях наблюдения точечного объекта на фоне помех и его разделения на части.

6. Разработка методик расчета центра гауссиана по наблюдаемому сигналу.

7. Разработка методики оценки скорости движения точечного источника.

8. Применение методов обработки сигналов в сканирующих информационно-измерительных системах для дистанционного определения координат рабочего органа комплекса тоннелепроходческого механизированного (объект измерения).

*Научная новизна* диссертации заключается в следующем.

1. Разработана комплексная математическая модель формирования сигнала точечным источником и прохождения сигнала через элементы информа-

ционно-измерительной системы, позволяющая оценить параметры сигнала, поступающего на компьютерную обработку, по которому оцениваются координаты точечного источника.

2. Получены зависимости для оценки погрешностей измерения координат точечного источника, возникающих из-за нестабильности параметров компонентов тракта прохождения сигнала, в частности, появления на пути распространения электромагнитного излучения среды, содержащей диспергент.

3. Разработан метод определения координат центра изображения точечного источника, основанный на согласованной фильтрации факсимильной цифровой модели изображения и итерационной процедуре поиска центра тяжести образа точечного источника внутри строка.

4. Разработан датчик движения точечного источника сигнала, наблюдаемого в условиях помех, основанный на анализе и оценке параметров фазовой составляющей пространственно-частотной характеристики изображения.

*Достоверность* полученных теоретических результатов подтверждается корректным применением аналитических моделей элементов тракта прохождения сигнала, а также практическим использованием предложенных методов для решения задачи определения пространственного положения рабочего органа комплекса тоннелепроходческого механизированного.

*Положения, выносимые на защиту.*

1. Математическая модель формирования сигнала точечным источником и прохождения сигнала через элементы информационно-измерительной системы.

2. Зависимости для оценки погрешностей измерения координат точечного источника, по разбросу параметров компонентов тракта прохождения сигнала, включая среду распространения, содержащую диспергент.

3. Метод определения координат центра изображения точечного источника.

4. Фазовый датчик движения точечного источника сигнала, наблюдаемого в условиях помех.

*Достоверность* полученных теоретических результатов подтверждается корректным применением аналитических моделей тракта прохождения сигнала, а также натурными испытаниями системы дистанционного измерения пространственного положения объектов в составе комплекса тоннелепроходческого механизированного.

*Практическая ценность.* Разработанные методики определения пространственного положения точечных источников и учета погрешностей параметров систем при проектировании снижают трудоемкость разработки информационно-измерительных систем исследуемого класса, повышают качество проектирования за счет снижения объемов экспериментальных работ, а также позволяют повысить точность разрабатываемых систем.

*Реализация и внедрение результатов.* Предложенные в диссертации методы и методики реализованы автором при выполнении НИОКР в ОАО «СОЭЗ» (акт внедрения прилагается). Результаты внедрены также в учебный процесс кафедры «Робототехника и автоматизация производства» ФГБОУ ВПО

«Тульский государственный университет» при преподавании следующих дисциплин: «Основы информационных устройств роботов», «Основы технического зрения и цифровой обработки изображений».

*Апробация работы.* Основные положения диссертации докладывались на следующих конференциях и семинарах.

1. Всероссийская конференция «XXX Научная сессия, посвященная Дню радио», Тула, Тульский государственный университет, 2012.

2. Всероссийская конференция «XXXI Научная сессия, посвященная Дню радио», Тула, Тульский государственный университет, 2013.

3. Всероссийская конференция «Интеллект-2013», Тула, Тульский государственный университет, 2013.

*Публикации.* По теме диссертации опубликовано 25 работ, включенных в список литературы, в том числе: 4 статьи, представляющие собой материалы всероссийских научно-технических конференций, 7 статей в сборниках, рекомендуемых ВАК РФ, один патент на полезную модель, одно свидетельство о регистрации программы для ЭВМ.

*Структура и объем работы.* Диссертация состоит из введения, 4 разделов, заключения, изложенных на 140 страницах машинописного текста, включающих 40 рисунков и 3 таблицы, списка использованной литературы из 213 наименований и приложения с актами внедрения.

#### КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

*Во введении* содержится обоснование актуальности темы, сформулированы цели и задачи диссертации, дано краткое изложение основных разделов.

*В первом разделе* диссертации проанализированы существующие сканирующие информационно-измерительные системы дистанционного определения координат (СИИС ДОК).

Построена общая функциональная схема СИИС ДОК, включающая тракт прохождения сигнала, ЭВМ для обработки результатов измерений и механические средства для изменения пространственного положения оси визирования сенсора.

Дана классификация СИИС ДОК по следующим признакам: спектральный диапазон; информативный параметр, тип измеряемых объектов, размерность пространства, наличие или отсутствие дополнительного управляемого источника излучения, принцип действия фотоэлектронного преобразователя (ФЭП), количество элементов в сенсоре, наличие или отсутствие адаптации к измеряемым параметрам, принцип получения результата, тип носителя, на который установлены СИИС ДОК, тип наблюдаемых точечных источников. Определены основные параметры, по которым оцениваются потребительские свойства СИИС ДОК.

Показано, что параметры формируются в результате прохождения сигнала через элементы, причем  $m$ -й элемент реализует функцию  $\zeta_m = F_m(\xi_m, a_m)$ ,  $\xi_{m-1} = \zeta_m$ ,  $\xi_m$  - обобщенный входной сигнал;  $\zeta_m$  - обобщенный выходной сигнал;  $a_m = (a_{m1}, \dots, a_{mn(m)}, \dots, a_{mN(m)})$  -  $N(m)$ -мерный вектор параметров;

$1 \leq m \leq M$ , описывающую статическую или пространственно-динамическую передаточную функцию элемента. При прохождении сигнала через  $M$  элементов тракт суммарная функция, его описывающая, принимает вид:

$$\zeta_M = F_{\Sigma}(\xi_1, a_1, \dots, a_m, \dots, a_M) = F_M(\dots F_m(\dots (F_2(F_1(\xi_1, a_1)), a_2), \dots, a_m), \dots, a_M).$$

Получена оценка  $\varepsilon_{\Sigma} = \sum_{m=1}^M \sum_{n(m)=1}^{N(m)} \sigma_{\Sigma mn(m)}^* \cdot |\varepsilon_{mn(m)}|$  относительной погрешности выходной величины  $\zeta_{\Sigma}$  к изменению параметров векторов  $a_1, \dots, a_m, \dots, a_M$ , где  $\varepsilon_{mn(m)}$  - относительная погрешность реализации параметра  $a_{mn(m)}$  вектора  $a_m$ ;  $\sigma_{\Sigma mn(m)}^*$  - коэффициенты чувствительности.

Сделан вывод о том, что для управления показателями точности на этапе проектирования СИИС ДОК необходимо иметь его аналитическую математическую модель. Приведены подходы к разработке модели элемента, основанные на описании статического преобразования сигнала, которое описывается алгебраической функцией, и пространственно-динамического преобразования, которое принимает вид дифференциального уравнения. Показано, что статическая характеристика влияет на точность определения пространственных координат точечного источника непосредственно, а динамическая характеристика - опосредованно, через решающее правило оценки.

Во втором разделе диссертации разработана математическая модель прохождения сигнала через элементы СИИС ДОК.

Определены системы координат, в которых описывается процесс: Земная  $x'O'y'z$ , в которой точка  $O'$  совпадает с началом картографической системы; связанная линейная,  $xOuz$ ; связанная сферическая,  $\psi O\vartheta\rho'$ , где  $\psi$  - угол азимута,  $\vartheta$  - угол места; плоскостная (двумерная)  $YO''Z$ , центр  $O''$  входной апертуры сканирующего фотозлектронного преобразователя (СФЭП); дискретная система координат  $mO''n$ , каждая дискретная координата которой определяет соответствующий фоточувствительный элемент СФЭП. Приводятся зависимости для пересчета координат точечного источника из одной системы в другую.

Процесс генерации сигнала точечным источником рассмотрен в двух аспектах: когда точечный источник является активным, и когда точечный источник является пассивным и модулирует внешний световой поток. Получены зависимости для световых потоков, попадающих во входной зрачок объектива: от излучающего источника

$$\Phi_1(\lambda, \phi_p) = \kappa_{\Phi} \iint_{x=0, \substack{Q_0(\hat{x}, \hat{y}, \hat{z})=0, \\ x^2+y^2 \leq r}} \iiint I_0(\alpha_0, \lambda, \phi_p) d\hat{x}d\hat{y}d\hat{z} \cdot dydz,$$

и отражающего источника

$$\Phi_2(\lambda, \phi_p) = \kappa_{\Phi} \iint_{x=0, \substack{Q_1(\hat{x}, \hat{y}, \hat{z})=0, -\infty < Q_1(\hat{x}, \hat{y}, \hat{z}) \leq 0 \\ x^2+z^2 \leq r^2 \\ b_1(\hat{x}, \hat{y}, \hat{z}) \leq 0}} \iiint I_1(\beta_1, \lambda, \phi_p) d\hat{x}d\hat{y}d\hat{z} \\ \times I_0(\alpha_0, \lambda, \phi_p) d\hat{x}d\hat{y}d\hat{z} \cdot dydz,$$

где  $I_{\alpha_e}(\alpha_e, \lambda, \phi_p)$  - индикатриса излучения;  $\alpha_e$  - угол, зависящий от пространственного положения источника и входного зрачка;  $r$  - радиус входного зрачка объектива;  $Q_e(x, y, z) = 0, b_e(x, y, z) \leq 0$  - описание излучающей поверхности;  $\kappa_{\Phi}$  - коэффициент пропорциональности;  $I_i(\beta_i, \lambda, \phi_p)$  - индикатриса излучения точки пространства, наблюдаемой из заданной точки отражающей поверхности под углом  $\beta_i$ ;  $I_o(\alpha_o, \lambda, \phi_p)$  - индикатриса отражения от поверхности в заданной точке для различных длин волн  $\lambda$  и углов поляризации  $\phi_p$ ;  $Q_i(x, y, z) = 0, b_i(x, y, z) \leq 0$  - уравнение отражающей поверхности;  $Q(\tilde{x}, \tilde{y}, \tilde{z}) < 0$  - область пространства, из которого поступает внешнее излучение.

Приведена зависимость для расчета освещенности площади расположения фоточувствительных элементов. Показано, что в центр фоточувствительного элемента с размерами  $2\zeta \times 2\zeta$  и дискретными координатами  $m$  и  $n$  проецируется луч, имеющий угловые координаты  $\psi_m = \arctg \frac{(2m - M + 1) \cdot \zeta}{f'}$ ,

$\vartheta_{m,n} = \arctg \frac{(2n - N + 1) \cdot \zeta}{\sqrt{f'^2 + [(2m - M + 1) \cdot \zeta]^2}}$ , где  $M \times N$  - количество элементов. Элемент аккумулирует световой поток из области пространства, с угловыми размерами  $\frac{(2m + 2 - M) \cdot \zeta}{f'} \leq \psi(m) \leq \frac{(2m - M) \cdot \zeta}{f'}$ ;  $\frac{(2n + 2 - N) \cdot \zeta}{f'} \leq \vartheta(n) \leq \frac{(2n - N) \cdot \zeta}{f'}$ .

При наличии дисторсии, определяемой системой  $\begin{cases} \Delta_Y = \Delta_Y(Y, Z); \\ \Delta_Z = \Delta_Z(Y, Z); \end{cases}$  где  $\Delta_Z(Y, Z)$  - функция смещения, местоположение лучей в пространстве зависит, как для строк, так и для столбцов и от номера строки и от номера столбца местоположения фоточувствительного элемента. Зависимости для углов местоположения луча принимают вид

$$\psi_{m,n} = \arctg \frac{(2m - M + 1) \cdot \zeta + \Delta_Y[(2m - M + 1) \cdot \zeta, (2n - N + 1) \cdot \zeta]}{f'}$$

$$\vartheta_{m,n} = \arctg \frac{(2n - N + 1) \cdot \zeta + \Delta_Z[(2m - M + 1) \cdot \zeta, (2n - N + 1) \cdot \zeta]}{\sqrt{f'^2 + \{[(2m - M + 1) \cdot \zeta] + \Delta_Y[(2m - M + 1) \cdot \zeta, (2n - N + 1) \cdot \zeta]\}^2}}$$

Получены зависимости для области пространства, из которой  $(m, n)$ -й элемент аккумулирует световой поток.

Показано, что сферические aberrации формируют пространственную динамику оптического тракта и СФЭП. Пространственная динамика всех элементов описана функцией Гаусса  $w_{O,CO,P}(Y, Z) = \frac{\kappa_{O,CO,P}}{2\pi b_{O,CO,P}^2} \exp\left(-\frac{Y^2 + Z^2}{2b_{O,CO,P}^2}\right)$ , где  $w_O(Y, Z), w_{CO}(Y, Z), w_P(Y, Z)$  - соответственно импульсные отклики объектива, объектива при наличии диспергента, фотозлектронного преобразователя;  $\kappa_O, \kappa_{NO}, \kappa_P$  - статические коэффициенты передачи,  $b_O, b_{CO}, b_P$  - парамет-



ры, определяющие ширину импульсного отклика тех же элементов. Для элементов получены пространственные передаточные функции:

$$W_{O,CO,P}(\omega_Y, \omega_Z) = \kappa_{OO,CO,P} \exp\left[-\frac{b_{OO,CO,P}^2}{2}(\omega_Y^2 + \omega_Z^2)\right], \text{ где } \omega_Y, \omega_Z - \text{ круговые}$$

пространственные частоты по координатам  $Y, Z$ , соответственно.

Показано, что ширина функции Гаусса, описывающей передаточную функцию объектива, определяется кружком Эри (объективы сверхвысокого разрешения), или кружком рассеяния. Параметр  $b_O$  объектива предложено определять по зависимости  $b_O(\rho_{\delta\delta}) = 0,707\rho_{\delta\delta}$ , где  $\rho_{\delta\delta}$  - паспортный радиус кружка рассеяния. Зависимость получена из условий, что в центре кружка рассеяния освещенности аппроксимирующей и аппроксимируемой функций совпадают и объемы импульсных откликов равны единице. Исходя из тех же условий, параметр  $b_P$  фоточувствительной ячейки определен как  $b_P(\zeta) = 0,798\zeta$ .

Импульсный отклик пары дисперсная среда/объектив, нормированный по объему, определен в виде:

$$\tilde{w}_{NO}(Y, Z) = \frac{\kappa_{CO}}{\pi(\rho_{\delta\delta}^2 E'_{K\delta\delta} + \rho_{\delta\delta}'^2 E'_{K\delta\delta})} \begin{cases} E'_{K\delta\delta} + E'_{K\delta\delta} \text{ i}\delta\delta \text{ } Y^2 + Z^2 \leq \rho_{\delta\delta}'^2; \\ E'_{K\delta\delta} \text{ i}\delta\delta \text{ } \rho_{\delta\delta}^2 \leq Y^2 + Z^2 \leq \rho_{\delta\delta}'^2; \\ 0 \text{ i}\delta\delta \text{ } Y^2 + Z^2 > \rho_{\delta\delta}'^2, \end{cases}$$

где  $\rho_{\delta\delta}'$  - радиус кружка рассеяния, определяемый индикатрисой рассеяния луча после прохождения микрочастицы диспергента, диаметром входного зрачка объектива и расстоянием от входного зрачка до центра слоя среды, содержащей

$$\text{диспергент; } E'_{K\delta\delta} = \frac{\Phi \kappa_{\Phi} \exp(-\kappa_{\mu} \mu)}{\pi \rho_{\delta\delta}^2}, E'_{K\delta\delta} \text{ i}\delta\delta = \frac{\Phi \kappa_{\Phi} [\exp(-\kappa_{\mu} \kappa_{\Phi 1} \mu) - \exp(-\kappa_{\mu} \mu)]}{\pi \rho_{\delta\delta}'^2} -$$

освещенности, создаваемые лучами, попавшими во входной зрачок, минуя диспергент, и лучами, прошедшими через частицы диспергента, соответственно;  $\mu$  - концентрация диспергента;  $\Phi$  - исходный световой поток;  $\kappa_{\Phi}$  - коэффициент потерь в объективе;  $0 \leq \kappa_{\Phi 1} \leq 1$  - коэффициент потерь в микрочастице диспергента;  $\kappa_{\mu}$  - коэффициент пропорциональности.

Ширина аппроксимирующего гауссиана, пары среда распространения/объектив,  $b_{NO}(\rho_{\delta\delta}, \rho_{\delta\delta}', \mu) = 0,707 \cdot \sqrt{\rho_{\delta\delta}'^2 E'_{K\delta\delta} + \rho_{\delta\delta}^2 E'_{K\delta\delta} \text{ i}\delta\delta}$ , определена по критериям равенства освещенностей в центре и равенства объемов гауссианов.

В третьем разделе диссертации разработана математическая модель точечного источника, которая в общем виде представлена как функция  $u = u(\psi, \vartheta)$ , зависящая от угловых координат  $\psi$  и  $\vartheta$ ,

Показано, что из исследованных функций ( $\delta$ -функция Дирака, цилиндр с круговым основанием, гауссиан) для моделирования точечного источника в наибольшей степени подходит функция Гаусса, поскольку ее спектр также представляется гауссианом, и в любом сечении двумерного гауссиана плоско-

стью, параллельной оси значений, формируется одномерный гауссиан. Источник произвольной формы может быть описан в виде

$$u(\psi, \vartheta) = \exp \left\{ -\frac{1}{2} \cdot [(\psi - \psi_K)^2 + (\vartheta - \vartheta_K)^2] \cdot \sigma^{-2} \left[ \arccos \frac{(\psi - \psi_K)}{\sqrt{(\psi - \psi_K)^2 + (\vartheta - \vartheta_K)^2}} \right] \right\},$$

где  $\sigma \left[ \arccos \frac{(\psi - \psi_K)}{\sqrt{(\psi - \psi_K)^2 + (\vartheta - \vartheta_K)^2}} \right]$  - параметр, определяющий ширину гауссиана,

представляющий собой некоторую положительную функцию от угла поворота вектора  $[(\psi - \psi_K), (\vartheta - \vartheta_K)]$  относительно вектора  $[(\psi - \psi_K), 0]$ , а область значений гауссиана во всем диапазоне углов поворота вектора  $[(\psi - \psi_K), (\vartheta - \vartheta_K)]$  лежит в интервале  $0 \leq u_{G2}(\psi, \vartheta) \leq 1$ .

Для модели источника сигнала получена зависимость, описывающая двумерный пространственный спектр:

$$\tilde{u}_{G5}(\omega_\psi, \omega_\vartheta) = 2\pi\sigma_\psi\sigma_\vartheta \cdot \exp \left\{ -\frac{1}{2} \left[ \sigma_\psi^2 (\omega_\psi \cos \varphi_G + \omega_\vartheta \sin \varphi_G)^2 + \sigma_\vartheta^2 (-\omega_\psi \sin \varphi_G + \omega_\vartheta \cos \varphi_G)^2 \right] \right\} \cdot \exp[-i(\omega_\psi \psi_K + \omega_\vartheta \vartheta_K)]$$

Отмечено, что спектры несмещенных двумерных функций Гаусса относятся к спектрам с нулевым фазовым сдвигом. Их спектральная характеристика представляет собой действительную функцию действительного аргумента. Спектры смещенных на величину  $\psi_K, \vartheta_K$  функций Гаусса имеют фазовый сдвиг, определяемый направлением и величиной смещения:

$$\tilde{u}(\omega_\psi, \omega_\vartheta) = A(\omega_\psi, \omega_\vartheta) \cdot \exp[-i(\omega_\psi \psi_K + \omega_\vartheta \vartheta_K)],$$

где  $A(\omega_\psi, \omega_\vartheta)$  - амплитудная составляющая, совпадающая с пространственно-частотной характеристикой несмещенного гауссиана;  $\exp[-i(\omega_\psi \psi_K + \omega_\vartheta \vartheta_K)]$  - комплексная функция, действительная и мнимая части которой определяют фазовую составляющую пространственно-частотной характеристики сигнала.

При необходимости может быть произведен пересчет круговых угловых пространственных частот  $\omega_\psi, \omega_\vartheta$  [лин./рад] в круговые линейные пространственные частоты  $\omega_Y, \omega_Z$  [лин./М] по зависимости  $\begin{pmatrix} \omega_\psi \\ \omega_\vartheta \end{pmatrix} = f' \begin{pmatrix} \omega_Y \\ \omega_Z \end{pmatrix}$ , где  $f'$  -

фокусное расстояние объектива. Пересчет параметров  $\sigma_\psi, \sigma_\vartheta$ , определяющих ширину спектра сигнала, из угловых значений в линейные,  $\sigma_Y, \sigma_Z$ , производится по зависимости  $\begin{pmatrix} \sigma_Y \\ \sigma_Z \end{pmatrix} = f' \begin{pmatrix} \sigma_\psi \\ \sigma_\vartheta \end{pmatrix}$ .

Показано, что суммарная передаточная функция  $W_\Sigma(\omega_Y, \omega_Z)$  является функцией с нулевым фазовым сдвигом, поэтому фазовый сдвиг, определенный смещением наблюдаемого источника в спектре сигнала, формируемого на вы-

ходе оптического тракта, не изменяется по сравнению с начальным фазовым сдвигом. Сделан вывод о том, что по фазовому сдвигу спектра обрабатываемого сигнала можно определять смещение точечного источника относительно начала координат.

Определено, что твердотельные СФЭП, используемые в СИИС ДОК понижают точность определения координат точечного источника за счет динамических aberrаций, возникающих при его движении. В СФЭП типа CCD (Charge Coupled Device) aberrации носят характер «смаза», величина которого определяется временем накопления и скоростью движения источника. В СФЭП типа CMOS (Complementary Metal-Oxide Semiconductor) aberrации приводят к искажению формы. Динамическая aberrация данного типа была исследована на примере сканирования точечного источника, изображение которого представляет собой круг, перемещающийся в плоскости  $YO''Z$  по координате  $Y$  со скоростью  $\dot{Y}$ , по координате  $Z$  со скоростью  $\dot{Z}$ . Сканирование по координате  $Y$  осуществляется непрерывно со скоростью  $\theta$  элементов в секунду, по координате  $Z$  - со скоростью  $M\theta$  элементов в секунду. Круг в результате сканирования преобразуется в эллипс, сжатый/растянутый по оси  $O''Y$  на величину  $\Delta Y = \frac{\dot{Y}}{\theta\zeta - \dot{Y}}$ , а

по оси  $O''Z$  - на величину  $\Delta Z = \frac{M\dot{Z}}{\theta\zeta - M\dot{Z}}$ . Оси эллипса составляют, с осями  $O''Y$

и  $O''Z$  углы, тангенсы которых определяются выражениями  $\text{tg}(b_Z)Z = \frac{M\dot{Y}}{\theta\zeta - \dot{Y}}$  и

$\text{tg}(b_Y)Y = \frac{\dot{Z}}{\theta\zeta}$ , где  $b_Z)Z$ ,  $b_Y)Y$  - угол между осью эллипса и осью системы координат.

Исследованы ошибки, возникающие при дискретизации и оцифровке сигнала.

В четвертом разделе диссертации исследуется вопрос определения координат точечного источника по результатам его наблюдения в СИИС ДОК.

Отмечается, что в процессе функционирования СИИС ДОК формируется факсимильная цифровая модель изображения, представляющая собой матрицу пикселей, в которой содержится: информация о наличии в сигнале изображения точечного источника, информация о других предметах сцены, шум. Сигнал представлен в виде  $E(Y, Z) = E'(Y, Z) + h(Y, Z)$ , где  $E'(Y, Z)$  - распределение освещенности, создаваемое только точечным источником;  $h(Y, Z)$  - аддитивный шум. Задача фильтрации  $E''(Y, Z) = \eta[E(Y, Z)]$  заключается в получении оценки  $E''(Y, Z)$ , приближающейся к распределению освещенности  $E'(Y, Z)$ .

Предложено идентификацию точечного источника проводить согласованным фильтром, который в данном случае имеет вид гауссиана. Показано, что свойство согласованного фильтра в форме гауссиана при выделении функций Гаусса сохраняется, если параметр, определяемый ширину фильтра, не равен параметру, определяющему ширину выделяемого сигнала.

Разработана методика определения местоположения точечного источника, основанная на последовательном выделении центров сечения гауссиана плоскостями, параллельными плоскостям  $E'OY$  и  $E'OZ$  с помощью одномерных фильтров, лежащих в соответствующих плоскостях, что обеспечивает по координатное приближение к центру двумерного гауссиана.

Для повышения точности оценки предложена итерационная методика, основанная на построении вокруг предполагаемого центра точечного источника строба  $S(Y, Z) = 1(Y_S - Y) \cdot 1(Y_S + Y) \cdot 1(Z_S - Z) \cdot 1(Z_S + Z)$ , где  $1(\dots)$  - единичная функция Хевисайда;  $Y_S, Z_S$  - границы области и смещения центра строба  $Y_{CS}, Z_{CS}$  в направлении, определяемом разностью  $Y_{GK} - Y_{CS}, Z_{GK} - Z_{CS}$  с оценкой текущих погрешностей слежения строба за положением функции Гаусса,  $|Y_G - Y_{CS}| = \varepsilon_{YG}, |Z_G - Z_{CS}| = \varepsilon_{ZG}$ . Расчет местоположения строба завершается, если текущие погрешности,  $\varepsilon_{YG}, \varepsilon_{ZG}$ , становятся меньше, чем допустимые значения. Величины  $Y_G, Z_G$  представляют собой координаты центра тяжести части гауссиана, попавшего внутрь строба. В диссертации показана сходимость предложенной методики. Методика обладает повышенной помехозащищенностью, поскольку оценка местоположения гауссиана производится с помощью квазистатистических расчетов, позволяющих сгладить погрешности воспроизведения формы гауссиана, связанные с наличием помехи.

Следующей задачей, решенной в диссертации, является задача построения датчика движения, в котором использован принцип оценки разности фазовых составляющих спектра изображения в стробах соседних кадров:  $P_G^{l+1}(\omega_Y, \omega_Z) - P_G^l(\omega_Y, \omega_Z) = \omega_Y (Y_K^{l+1} - Y_K^l) + \omega_Z (Z_K^{l+1} - Z_K^l)$ , где  $P_G^{l+1}(\omega_Y, \omega_Z)$  и  $P_G^l(\omega_Y, \omega_Z)$  - фазовые составляющие пространственного спектра, части сигнала, попавшего в строб в  $(l+1)$ -м и  $l$ -м кадрах;  $Y_K^{l+1}, Y_K^l$  и  $Z_K^{l+1}, Z_K^l$  - координаты центра функции Гаусса в  $(l+1)$ -м и  $l$ -м кадрах. Скорость и направление движения точечного источника определяется градиентом наклона фазовой характеристики  $\nabla_P = \frac{1}{\sqrt{(Y_K^{l+1} - Y_K^l)^2 + (Z_K^{l+1} - Z_K^l)^2}} \left[ (Y_K^{l+1} - Y_K^l), (Z_K^{l+1} - Z_K^l) \right]$  в плоскости

$\omega_Y \omega_Z$ . Скорости смещения изображения определяются зависимостью

$$\begin{pmatrix} \dot{Y}_K \\ \dot{Z}_K \end{pmatrix} = \frac{1}{MN\theta} \begin{pmatrix} Y_E^{l+1} - Y_E^l \\ Z_E^{l+1} - Z_E^l \end{pmatrix},$$

Разработанная процедура не требует дополнительной нормализации изображения, поскольку фазовая составляющая спектра не зависит от амплитуды сигнала.

Решена задача различения двух точечных источников, и по глубине модуляции идентифицированы случаи, когда два источника сливаются в один, или когда один источник разделяется на два.

Показано, что наличие импульсных помех затрудняет идентификацию движения. Разработана математическая модель фазового спектра импульсной

помехи. В сигнальной области аддитивная импульсная помеха представлена в виде суммы гауссианов, имеющих случайную величину и смещение. Показано, что фазовая составляющая пространственного спектра сигнала с шумом представляется в виде  $p_{h_a}(\omega_Y, \omega_Z) = \sum_{n=1}^N \alpha_n \sin[\omega_Y(Y_K - Y_n) + \omega_Z(Z_K - Z_n)]$ , где

$\alpha_n$  - случайная величина, характеризующая отношение амплитуд  $n$ -го импульса шума и полезного сигнала;  $Y_K, Z_K$  - координаты точечного источника;  $Y_n, Z_n$  - случайные координаты  $n$ -го импульса шума. Предложено градиент наклона фазовой характеристики полезной составляющей из общей фазовой характеристики определять по регрессионной методике.

Разработанные методы определения координат точечных источников были использованы в аппаратно-программном комплексе измерения пространственной ориентации Комплекса ТоннельПроходческого Механизированного КТПМ-5,6. Предложена измерительная схема определения пространственного положения корпуса относительно осевой линии тоннеля. Определены координаты точечного источника, размещенного на корпусе, и СИИС ДОК, установленной на платформе, которая может поворачиваться по углам азимута и места. Установлены зависимости, связывающие пространственное положение корпуса КТПМ-5,6 с пространственным положением точечного источника, поворота СИИС ДОК с координатами точечного источника в Земной системе координат. Описан алгоритм обработки измерительной информации и оценена точность определения координат.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

По проведенным исследованиям могут быть сделаны следующие выводы.

1) Проведен анализ систем для определения пространственного положения точечных источников сигнала, на основании которого определены их общие признаки, составлена обобщенная структурная схема и дана классификация.

2) Определены параметры и характеристики сканирующих информационно-измерительных систем дистанционного определения координат, показано, что на точность дистанционных измерений в системах исследуемого класса существенное влияние оказывает тракт прохождения сигнала, где сигнал подвергается последовательному преобразованию, каждый этап которого вносит как статические, так и пространственно-динамические искажения в изображение точечного источника.

3) С использованием понятия функций чувствительности получена зависимость, позволяющая оценить погрешность измерения, вносимую одним из элементов тракта прохождения сигнала при отклонении его параметров от номинальных значений, а также погрешность преобразования сигнала трактом в целом.

4) Сформулировано понятие точечного источника сигнала, проведен анализ различных моделей точечных источников, учитывающих реальное создаваемое распределение освещенности в плоскости расположения фоточувстви-

тельных элементов фотоэлектронного преобразователя, показано, что наиболее простой моделью, пригодной для дальнейшего аналитического и практического использования является двумерная функция Гаусса, на основании которой может быть получен широкий класс моделей.

5) Исследованы свойства функции Гаусса, использованной для моделирования сигнала, и показано, что подобные функции:

в любом сечении плоскостью дают также функцию Гаусса, что позволяет упростить задачу анализа сигналов, формируемых точечными источниками, смещенными относительно оси визирования системы;

имеют пространственно-частотную функцию, амплитудная составляющая которой также представляет собой функцию Гаусса (является действительной функцией действительных аргументов), а фазовая составляющая полностью определяется местоположением точечного источника, в поле зрения СИИС ДОК.

6) Проведено аналитическое моделирование этапов формирования цифровой модели сигнала и оценены ошибки дискретизации и квантования по уровню, с учетом того, что гауссиан имеет бесконечную область определения.

7) С применением принципа согласованной фильтрации найдена форма фильтра, ориентированного на выделение точечного источника в условиях его наблюдения на фоне помех, показано, что принцип оптимальной фильтрации сохраняется, если параметры выделяющего гауссиана не совпадают с параметрами выделяемой функции Гаусса.

8) Разработаны методики определения координат центра гауссиана, основанные на:

покоординатном приближении выделяющих одномерных функций Гаусса к центру идентифицируемого гауссиана;

итерационной процедуре, связанной с поиском центра масс выделяемого наблюдаемого источника внутри строка с заданными параметрами.

9) Предложено для определения движения точечного источника использовать фазовый датчик движения, получены зависимости для определения скорости по межкадровой разности фазовых составляющих пространственно-частотного спектра, показано, что фазовый датчик движения остается работоспособным при наличии на сцене помех и других точечных источников.

10) Результаты диссертации внедрены в учебный процесс Тульского государственного университета и в промышленность, в ОАО «Скуратовский опытно-экспериментальный завод».

#### *Публикации по теме диссертации*

1. Будков С.А. Измерение пространственных координат точечного источника в оптико-электронном пеленгаторе [Текст] / С.А. Будков, А.А. Аршакиан // Приборы и управление. Вып. 10. - Тула: Изд-во ТулГУ, 2012. - С. 14 - 18.

2. Будков С.А. Математические модели точечных источников сигнала [Текст] / С.А. Будков, А.А. Аршакиан // Приборы и управление. Вып. 10. - Тула: Изд-во ТулГУ, 2012. - С. 18 - 22.

3. Будков С.А. Динамические aberrации в CMOS-матрицах [Текст] / С.А.Будков, А.А.Горшков // Приборы и управление. Вып. 10. - Тула: Изд-во ТулГУ, 2012. - С. 22 - 27.
4. Будков С.А. Математические модели точечных источников сигнала в полярной системе координат [Текст] / С.А.Будков, А.А.Аршакян, Е.В.Ларкин // Известия ТулГУ. Сер. Технические науки. Вып. 10. - Тула: Изд-во ТулГУ, 2012. - С. 163 - 168.
5. Будков С.А. Эффективность селекции точечных сигналов, сопровождаемых импульсной помехой [Текст] / С.А.Будков, А.А.Аршакян, Е.В.Ларкин // Известия ТулГУ. Сер. Технические науки. Вып. 12. - Тула: Изд-во ТулГУ, 2012. - С. 198 - 204.
6. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2012618339 (РФ) / С.А.Будков, А.А.Аршакян, Н.В.Комаревцев. Программа статистического анализа информации, полученной от бортового регистратора летательного аппарата.
7. Будков С.А. Различение точечных источников в оптическом пеленгаторе [Текст] / С.А.Будков // XXX Научная сессия, посвященная Дню радио. - Тула: НТО РЭС им. А.С. Попова, 2012. - С. 70 - 72.
8. Будков С.А. Описание точечного источника в полярной системе координат [Текст] / С.А.Будков // XXX Научная сессия, посвященная Дню радио. - Тула: НТО РЭС им. А.С. Попова, 2012. - С. 23 - 27.
9. Будков С.А. Статическая передаточная характеристика канала измерения пространственных координат [Текст] / С.А.Будков, С.Н.Клещарь // XXX Научная сессия, посвященная Дню радио. - Тула: НТО РЭС им. А.С. Попова, 2012. - С. 20 - 23.
10. Будков С.А. Методика оценки качества функционирования сканирующих систем [Текст] / С.А.Будков, С.Н.Клещарь, В.В.Котов, Н.А.Котова // Известия ТулГУ. Сер. Технические науки. Вып. 1. - Тула: Изд-во ТулГУ, 2013. - С. 299 - 306.
11. Будков С.А. Использование фазовой составляющей спектра сигнала для идентификации движения [Текст] / С.А.Будков, А.А.Аршакян, Е.В.Ларкин // Известия ТулГУ. Технические науки. Вып. 3. - Тула: Изд-во ТулГУ, 2013. - С. 315 - 320.
12. Будков С.А. Математическая модель сложного мехатронного комплекса [Текст] / С.А.Будков, Г.Н.Клинецов, Е.В.Ларкин // Известия ТулГУ. Технические науки. Вып. 3. - Тула: Изд-во ТулГУ, 2013. - С. 320 - 328.
13. Будков С.А. Информационные потери, связанные с пространственной динамикой сканера [Текст] / С.А.Будков, А.А.Аршакян, С.Н.Клещарь // Известия ТулГУ. Технические науки. Вып. 3. - Тула: Изд-во ТулГУ, 2013. - С. 383 - 388.
14. Патент на полезную модель № 126648 (РФ) / С.А.Будков, Т.А.Акименко, А.А.Аршакян, Е.В.Ларкин. Модуль промышленного робота с информационной системой управления. - В 25 J 9/08. Оpubл. 10.04.2013, Бюл. № 10.

15. Будков С.А., Итерационный метод определения координат точечного источника [Текст] / С.А.Будков, А.А.Аршакян // Приборы и управление. Вып. 11. - Тула: Изд-во ТулГУ, 2013. - С. 33 - 38.
16. Будков С.А. Точность функционирования оптико-электронных измерителей координат [Текст] / С.А.Будков, А.А.Аршакян, Т.Р.Кузнецова // Приборы и управление. Вып. 11. - Тула: Изд-во ТулГУ, 2013. - С. 38 - 44.
17. Будков С.А. Пространственная динамика пары «среда распространения/объектив» [Текст] / Будков С.А. // Приборы и управление. Вып. 11. - Тула: Изд-во ТулГУ, 2013. - С. 49 - 56.
18. Будков С.А. Динамические потери информации в сканирующих устройствах [Текст] / С.А.Будков, А.А.Аршакян, С.Н.Клещарь // Вестник ТулГУ. Сер. Системы управления. Вып. 1. - Тула: Изд-во ТулГУ, 2013. - С. 89 - 94.
19. Будков С.А. Статические потери информации в сканирующих устройствах [Текст] / С.А.Будков, А.А.Аршакян, С.Н.Клещарь // Вестник ТулГУ. Сер. Системы управления. Вып. 1. - Тула: Изд-во ТулГУ, 2013. - С. 94 - 102.
20. Будков С.А. Фотозлектронное устройство определения угловых координат точечного источника [Текст] / С.А.Будков, А.А.Аршакян, Е.В.Ларкин // Вестник ТулГУ. Сер. Системы управления. Вып. 1. - Тула: Изд-во ТулГУ, 2013. - С. 102 - 107.
21. Будков С.А. Аберрации изображений при наблюдении динамических сцен [Текст] / С.А.Будков, А.А.Аршакян, Е.В.Ларкин // Состояние и развитие систем физзащиты: Сборник научных трудов. - М.: ПРО-практик, 2013. - С. 9 - 13.
22. Будков С.А. Идентификация наземных объектов, перемещающихся по сцене [Текст] / С.А.Будков, А.А.Аршакян, В.В.Котов // Состояние и развитие систем физзащиты: Сборник научных трудов. - М.: ПРО-практик, 2013. - С. 100 - 104.
23. Будков С.А., Аршакян А.А. Определение пространственных координат точки в оптико-электронном измерителе [Текст] / С.А.Будков, А.А.Аршакян // Известия ТулГУ. Сер. Технические науки. Вып. 9. Ч. 1. - Тула: Изд-во ТулГУ, 2013. - С. 224 - 229.
24. Будков С.А., Аршакян А.А. Аберрации изображения перемещающегося точечного источника [Текст] / С.А.Будков, А.А.Аршакян // XXXI Научная сессия, посвященная Дню радио. - Тула: НТО РЭС им. А.С. Попова, 2013. - С. 128 - 133.
25. Будков С.А. Дистанционный контроль осевой линии тоннеля [Текст] / С.А.Будков // Интеллект-2013: Материалы Всероссийской научно-технической конференции. - Тула: Изд-во ТулГУ, 2013. - С. 23 - 29.

Изд.лиц.ЛР № 020300 от 12.02.97. Подписано в печать 20.11.2013

Формат бумаги 60x84 <sup>1</sup>/<sub>16</sub>. Бумага офсетная.

Усл.печ. л.0,9 Уч.изд. л. 0,8 Тираж 100 экз. Заказ 088

Тульский государственный университет. 300012, г. Тула, просп.Ленина, 92.

Отпечатано в Издательстве ТулГУ. 300012, г. Тула, просп.Ленина, 95.

16