На правах рукописи
УДК 621.398

Бондаренко Дмитрий Анатольевич

ЛАЗЕРНЫЕ СКАНИРУЮЩИЕ СИСТЕМЫ ТЕЛЕОРИЕНТАЦИИ НА ОСНОВЕ АКУСТООПТИЧЕСКИХ ДЕФЛЕКТОРОВ

05.11.07 - Оптические и оптико-электронные приборы и комплексы

Автореферат диссертации на соискание
ученой степени кандидата технических наук

Москва – 2012

Работа выполнена в Московском государственном техническом университете имени Н.Э. Баумана на кафедре лазерных и оптико-электронных систем.

Научный руководитель: Карасик Валерий Ефимович, доктор технических наук, профессор

Официальные оппоненты: Магдич Леонид Николаевич, доктор технических наук, начальник лаборатории ФГУП «НИИ «Полюс» им. М.Ф. Стельмаха»

Тельчак Анатолий Семенович, кандидат технических наук, начальник-главный конструктор СКБ-2 ФНПЦ ОАО «Красногорский завод им. С.А. Зверева»

Ведущая организация: ОАО "Конструкторское бюро точного машиностроения имени А.Э. Нудельмана", г. Москва

Защита диссертации состоится «13» февраля 2013 г. в 10:00 час. на заседании диссертационного совета Д 212.141.19 в Московском государственном техническом университете имени Н.Э. Баумана по адресу: 105005, г. Москва, 2-ая Бауманская ул., д. 5, стр.1, зал Ученого совета.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке МГТУ им. Н.Э. Баумана.

Отзыв в двух экземплярах, заверенных печатью организации, просим направлять по адресу: 105005, г. Москва, 2-я Бауманская ул., 5, стр. 1, МГТУ им. Н.Э. Баумана, учёному секретарю диссертационного совета Д212.141

Автореферат разослан «28» декабря 2012 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета Д 212.141.19,
д.т.н., профессор Бурдин [illegible]

НТБ МГТУ им. Н.Э. Баумана
2015662
Бондаренко Д.А. Лазерные с

2670

ОНГУИ

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность. Системы телеориентации, используемые для управления удаленными движущимися объектами, нашли широкое применение в ряде областей науки и техники: для сопровождения быстродвижущихся объектов и проводки судов по фарватеру, в системах посадки летательных аппаратов, робототехнике и др. Принцип действия таких систем основан на формировании пространственно-временного распределения интенсивности лазерного излучения – опорного поля, в котором управляемый удаленный объект может автономно определять свое пространственное положение.

Среди различных типов систем телеориентации наибольшее предпочтение отдается системам сканирующего типа, осуществляющим формирование опорного поля с помощью быстродействующих акустооптических дефлекторов (АОД). Основными преимуществами таких систем являются: высокая скорость развертки лазерного пучка, линейность преобразования частота-угол отклонения, гибкий программный алгоритм управления АОД, отсутствие механических узлов, малые габариты и энергопотребление.

При создании систем телеориентации сканирующего типа важнейшей задачей является разработка методов управления АОД, обеспечивающих повышение тактико-технических характеристик систем телеориентации. Работы в данном направлении в настоящее время ведутся в Конструкторском бюро приборостроения, ОАО «Государственный Рязанский приборный завод», МГТУ им. Н.Э. Баумана, ЛЭТИ, МГУ им. М.В. Ломоносова, ФГУП НПО «Астрофизика». Известны работы отечественных ученых: С.Н. Антонова, В.И. Балакшия, Л.Н. Магдича, В.В. Молебного, В.Я. Молчанова, В.П. Семенкова и зарубежных авторов: Р. Диксона, А. Корпела, М. Хиггинса и др. В этих работах основное внимание уделялось рассмотрению акустооптического взаимодействия и вопросам реализации конкретных схемотехнических решений при построении систем телеориентации.

Однако ряд важных вопросов до настоящего времени остались нерешенными в полной мере. Отсутствие математической модели, учитывающей конкретный вид управляющих сигналов АОД и их влияние на выходные характеристики системы телеориентации, сдерживает разработку общей методики расчета систем телеориентации с АОД и ограничивает возможности их совершенствования. Недостаточное внимание уделялось учету особенностей расчета систем телеориентации, предназначенных для управления высокоскоростными объектами.

Таким образом, тема диссертационной работы представляется актуальной.

Цель и задачи исследования. Цель работы заключалась в обосновании принципов построения и разработке методики расчета системы телеориентации сканирующего типа с АОД. Указанная цель была достигнута в результате решения следующих задач:

- разработана математическая модель системы телеориентации с АОД;
- установлены оптимальные способы формирования опорного поля системы телеориентации;

МГТУ
им. Н.Э. Баумана
Библиотека

- разработана методика расчета углового распределения интенсивности лазерного пучка, дифрагированного на линейно частотно-модулированной (ЛЧМ) акустической волне;

- обоснована методика расчета управляющих сигналов для получения квазиравномерных по интенсивности опорных полей;

- разработана функциональная схема системы телеориентации с АОД, обеспечивающая высокоточное измерение пространственного положения объекта в опорном поле;

- выполнены экспериментальные исследования созданного макетного образца системы телеориентации с АОД с целью проверки основных теоретических положений и расчетных соотношений.

Объектом исследования в работе является лазерная система телеориентации с АОД, а **предметом** – процесс формирования пространственно-временного распределения интенсивности лазерного излучения под действием управляющих сигналов двухкоординатного АОД, формирующих опорное поле системы телеориентации.

При решении поставленных задач использованы методы математического и численного моделирования, методы теории вероятностей, а также спектральный метод анализа.

Научная новизна работы заключается в следующем:

1. Создана математическая модель лазерной системы телеориентации с АОД, на основе которой осуществляется выбор оптимальных параметров сигналов управления АОД при формировании опорного поля системы телеориентации.

2. Впервые детально исследовано угловое распределение интенсивности дифрагированного гауссова пучка на ЛЧМ акустической волне. Получены соотношения, устанавливающие связь характеристик дифрагированного пучка со скоростью изменения частоты ЛЧМ сигнала.

3. Предложен и апробирован метод расчета динамического пространственного спектра дифрагированного пучка, основанный на преобразовании Габора управляющего сигнала АОД, позволяющий анализировать управляющие сигналы с нестационарным спектром.

4. Впервые исследовано угловое распределение интенсивности дифрагированного пучка при частотно-манипулированном управляющем сигнале АОД. Предложена методика расчета параметров частотной манипуляции управляющих сигналов, обеспечивающих получение квазиравномерных по интенсивности опорных полей.

5. Представлены результаты экспериментальных исследований созданного макетного образца системы телеориентации с АОД, проведенных в лабораторных и полевых условиях, подтверждающие полученные в работе теоретические положения и расчетные соотношения.

Практическая ценность работы заключается в использовании полученных результатов для повышения технических характеристик систем телеориентации с АОД. Предложенная в работе методика по созданию квазиравномерных полей позволила снизить вероятность пропуска регистрируемого фотоприемной системой сигнала в процессе формирования опорного поля и увеличить точность наведения

высокоскоростных управляемых объектов. Предложенные методы анализа углового распределения интенсивности пучка в формируемом опорном поле позволяют выполнить расчет оптимальных управляющих сигналов для широкого класса объектов управления.

Кроме того, методика получения квазиравномерных опорных полей, предложенная в работе, может быть использована для повышения разрешающей способности и равномерности распределения интенсивности в лазерных системах маркировки и других устройствах, предназначенных для технологических процессов обработки материалов, в составе которых применяются АОД.

Основные научные положения, выносимые на защиту:

1. Наибольшая точность измерения координат объекта достигается при способе формирования опорного поля с чередующимися прямыми и обратными проходами лазерного пучка по строке при условии выбора оптимальной скорости развертки пучка.

2. Реализация предложенного способа «быстрой» развертки при дифракции лазерного пучка на ЛЧМ акустической волне позволяет повысить угловую скорость развертки до 1000 рад/с, причем существует оптимальное значение угловой скорости для данного дефлектора, обеспечивающее минимальное СКО измеренной координаты положения управляемого объекта в опорном поле.

3. Разработанная методика расчета мгновенного углового распределения интенсивности дифрагированного пучка позволяет определять параметры сигналов управления АОД, обеспечивающие формирование квазиравномерных по интенсивности опорных полей системы телеориентации.

Апробация работы. Результаты, полученные в работе, докладывались на Третьей научно-практической конференции «Перспективные системы и задачи управления», Таганрог, 2008 г. и Всероссийской научно-практической конференции «Устройства измерения, сбора и обработки сигналов в информационно-управляющих комплексах», Ульяновск, 2011 г. Неоднократно заслушивались научные доклады по теме работы на заседаниях кафедры лазерных и оптико-электронных систем МГТУ имени Н.Э. Баумана.

Публикации: результаты работы опубликованы в 6 научных работах, три из которых в журналах, входящих в перечень ВАК РФ, в 2 сборниках тезисов докладов научных конференций, получены 5 патентов.

Структура и объем диссертации. Работа состоит из введения, четырех глав, включающих 17 разделов, заключения, четырех приложений и списка литературы. Диссертация изложена на 183 страницах машинописного текста, содержит 69 рисунков и 32 таблицы. Список литературы содержит 45 наименований.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** обоснована актуальность темы диссертации, сформулированы цель и задачи проводимого исследования, приведены положения, выносимые на защиту. Под телеориентацией понимают способ дистанционного управления, при котором управляемый объект измеряет свое пространственное положение в формируемом системой телеориентации опорном поле, а затем смещается в его центр.

Первая глава работы посвящена созданию математической модели лазерной системы телеориентации с АОД. Проведена классификация систем дистанционного управления движущимися объектами, сделан сравнительный анализ характеристик систем телеориентации, построенных на различных принципах функционирования. Показаны преимущества системы с телеориентации с АОД. В результате анализа предложена функциональная схема лазерной сканирующей системы телеориентации (ЛССТ) с АОД, изображенная на рисунке 1, включающая формирователь опорного поля, область управления и измеритель положения объекта.

Излучение от лазера через афокальную систему (АС) попадает на акустооптические дефлекторы АОД 1 и АОД 2, осуществляющие развертку лазерного пучка в процессе формирования опорного поля под действием управляющих сигналов $s_x(t)$ и $s_y(t)$. Особенностью предложенной функциональной схемы является применение, помимо генератора ЛЧМ сигнала, используемого для развертки пучка, генератора частотно-манипулированного (ЧМ) сигнала, используемого для управления диаграммой пучка в ортогональной плоскости, а также мультиплексора, переключающего генераторы сигналов с одного АОД на другой при формировании горизонтальных и вертикальных строк соответственно. Управляемый объект, расположенный в области управления, где формируется опорное поле, при помощи измерителя положения, включающего фотоприемное устройство (ФПУ) и вычислитель, измеряет свое пространственное положение.

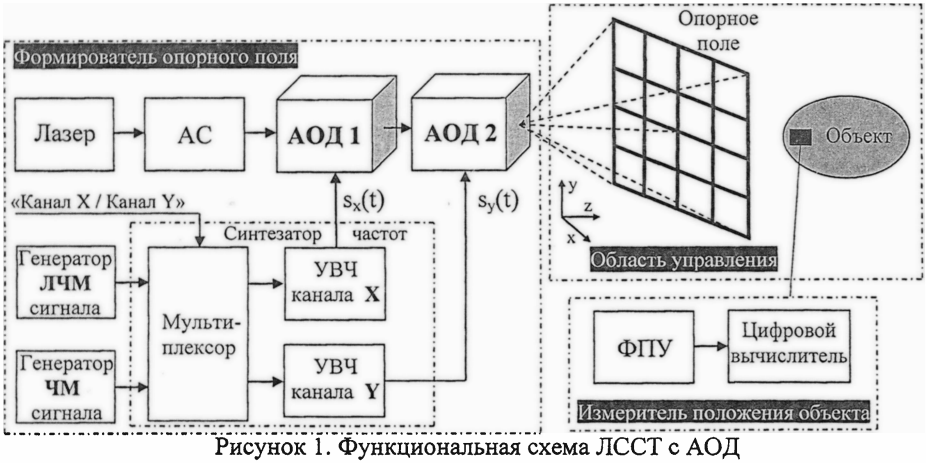

Рисунок 1. Функциональная схема ЛССТ с АОД

Изложена общая методика расчета углового распределения интенсивности дифрагированного пучка на выходе АОД на основе спектрального метода анализа. Обоснована конструкция анизотропного АОД на парателлурите с неаксиальной геометрией акустооптического взаимодействия.

Исследованы различные способы формирования опорного поля, включающие циклы с прямым (*F*) и обратным (*R*) направлениями развертки пучка по одной строке опорного поля. На основе анализа относительных критериев точности и быстродействия показано, что для двухкоординатной системы телеориентации с АОД

использование *FRF*-способа формирования опорного поля позволяет уменьшить СКО измеренной координаты объекта в 1,4 раза по сравнению с известным способом. Временная диаграмма развертки строки при *FRF*-способе представлена на рисунке 2, где $H(t)$ – координата центра движущегося лазерного пучка в опорном поле, $s_R(t)$ – сигнал, регистрируемый измерителем положения объекта, Y_0 – координата положения объекта в опорном поле.

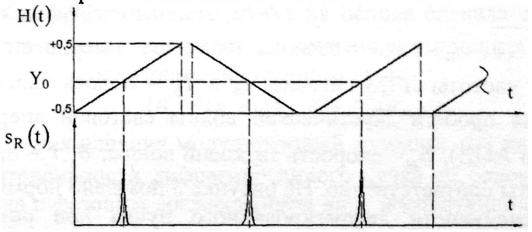

Рисунок 2. Временная диаграмма *FRF*-способа формирования опорного поля

Введен оператор $\mathcal{P}_{\text{ЛССТ}}$ системы телеориентации с АОД, преобразующий вектор пространственного положения управляемого объекта (x_0, y_0, z_0) в вектор измеренных координат (x_k, y_k):

$$(x_k, y_k) = \mathcal{P}_{\text{ЛССТ}} \left\{ (x_0, y_0, z_0) \middle| \; s_x(t), s_y(t), U \right\}, \tag{1}$$

где $s_x(t)$ и $s_y(t)$ – управляющие сигналы, под действием которых формируется опорное поле, U – вектор внутренних параметров системы, включающий величину мощности излучения лазера, площадь входного зрачка фотоприемного устройства, чувствительность приемника излучения и др. На основе анализа математической модели и идентификации операторов структурных элементов системы получены выражения, последовательно описывающие этапы преобразования сигнала в системе телеориентации с АОД. Однако использование численной модели на практике затруднено в силу большого объема вычислений. Поэтому была также разработана упрощенная аналитическая модель системы телеориентации с АОД, позволяющая выбирать оптимальные сигналы управления АОД при формировании опорных полей с заданными свойствами на основе относительной величины СКО измеряемой координаты положения объекта в опорном поле

$$\sigma_{\Delta Y} = 1{,}2\, k_s \frac{\tau_p}{T_a\, SNR}, \tag{2}$$

где k_s – коэффициент, зависящий от выбранного способа формирования опорного поля, $k_s = (1; 0{,}71; 0{,}5)$ для *FR*, *FRF*, *FRFR*-способов соответственно. $SNR = A_0/y_{\text{ГБШ}}$ – отношение сигнал/шум, A_0 – амплитуда принятого импульса, $y_{\text{ГБШ}}$ – СКО амплитуды белого гауссова шума, τ_p – длительность импульса, период однократной развертки строки T_a .

Вторая глава посвящена исследованию режимов управления АОД, обеспечивающих формирование опорных полей ЛССТ с заданными свойствами.

Рассмотрен режим «быстрой» развертки пучка при линейной частотной модуляции (ЛЧМ) управляющего сигнала. В ходе анализа было получено выражение для нормированного углового распределения интенсивности дифрагированного пучка в виде

$$I_d(\theta_x,t)=\frac{1}{b}\exp\left\{-\frac{1}{2}\left(\frac{w_0}{b}\right)^2\left[\frac{2\pi}{\lambda}\left(\theta_x+\frac{\lambda\alpha}{v_{зв}}\mathrm{t}\right)\right]^2\right\}, \tag{3}$$

где $b=\sqrt{1+\pi^2\alpha^2\tau_d^4/16}$, w_0 – радиус сечения перетяжки лазерного пучка, $\alpha=\Delta f/T_a$ – скорость изменения частоты ЛЧМ сигнала, Δf и T_a – полоса частот и период ЛЧМ сигнала, τ_d – время пробега акустической волны световой апертуры дефлектора (постоянная времени АОД), $v_{зв}$ – скорость звуковой волны, θ_x, t – пространственная и временная координаты соответственно. На рисунке 3 показано нормированное угловое распределение интенсивности дифрагированного пучка при различной величине параметра α по относительной расходимости $\Theta=\theta_0(b)/\theta_0|_{b=1}$.

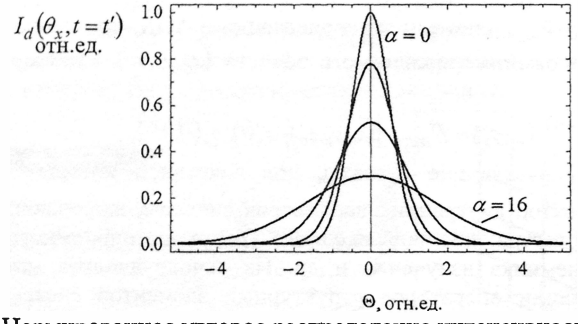

Рисунок 3. Нормированное угловое распределение интенсивности дифрагированного пучка при $\alpha=(0,4,8,16)\times10^9\ \mathrm{c}^{-2}$

Из (3) следует, что угловая скорость развертки пучка в данном режиме определяется выражением

$$V_d=\lambda\alpha/v_{зв} \tag{4}$$

и может достигать при $\lambda=1{,}064$ мкм и $v_{зв}=657\ \mathrm{м\cdot c^{-1}}$ более 1000 рад$\cdot$с$^{-1}$. При этом установлено, что оптимальной величиной V_d, обеспечивающей минимум СКО измеряемой координаты положения объекта, является значение:

$$V_d^{\text{опт}}=\frac{4}{\pi}\frac{\lambda}{v_{зв}\,\tau_d^2}. \tag{5}$$

Исследована возможность управления угловым распределением интенсивности дифрагированного пучка при помощи частотно-манипулированных (ЧМ) сигналов с целью получения квазиравномерных по интенсивности опорных полей ЛССТ. Для анализа данного режима было получено выражение для динамического пространственно-частотного спектра дифрагированного пучка

$$\widetilde{E}_d(k_x, t') \cong \int_{-\infty}^{+\infty} s(t) \exp(-i\omega t) \exp\left[-\frac{4(t-t')^2}{\tau_{eff}^2}\right] dt, \qquad (6)$$

описывающее процесс акустооптического взаимодействия при помощи преобразования Габора модулирующего сигнала $s(t)$. В отличие от известных подходов данное выражение позволяет вычислять динамический пространственно-частотный спектр дифрагированного пучка на основе сигнала $s(t)$, а не его фурье-образа, т.е. работать в реальном масштабе времени и вычислять мгновенное угловое распределение интенсивности дифрагированного пучка

$$I_d(\theta_x, t') \cong \widetilde{E}_d(k_x, t') \times \widetilde{E}_d^*(k_x, t')$$

Для исследования влияния модулирующей функции $s(t)$ на мгновенное угловое распределение интенсивности дифрагированного пучка на основе (6) была получена модель ЧМ сигнала с фазовым согласованием двух последующих временных частот в виде:

$$s(t) = \sum_{m=0}^{M-1} \sum_{n=1}^{N} \exp\left\{-i2\pi f_k \left[t-(n-1)T_f - mT_0 + \psi_{0,k}\right]\right\} \times \\ \times \operatorname{rect}\left\{\frac{1}{T_0}\left[t-(n-0{,}5)T_f - mT_0\right]\right\}, \qquad (7)$$

где $f_k \in (f_1, f_2, ..., f_n, f_{n+1}, ..., f_{N\times M})$ – k-ая частота сигнала, $n \in (1,2,...,N)$, N – число частот на периоде модулирующей функции T_0, $k = (m+1)n$ – порядковый номер частоты сигнала, T_f – период одной частоты f_k, $\psi_{0,k}$ – начальная фаза для каждой частоты, определяемая из рекурсивного соотношения $\psi_{0,k} = (T_f + \psi_{0,k-1}) f_{k-1} / f_k$, $m \in (0,1,2,..., M-1)$ – число периодов модулирующего сигнала.

С использованием (6-7) продемонстрировано, что при периоде частотной манипуляции $T_0 \approx \tau_{eff}$, где τ_{eff} – эффективная величина постоянной времени АОД, дифрагированный пучок можно представить набором пространственных компонент с постоянной составляющей интенсивности, число которых определяется индексом частотной манипуляции $M_{mp} = \Delta f_{mp} \times T_0$ из расчета $2M_{mp}$, где Δf_{mp} – девиация частоты ЧМ сигнала, с угловым шагом в радианах

$$\Delta\theta = \frac{\lambda}{\upsilon_{зв}} \frac{1}{T_0}. \qquad (8)$$

На рисунке 4 показано угловое распределение интенсивности дифрагированного пучка $I_d(\theta_x, t')$ в некоторый момент времени t' при $T_0 = 7$ мкс, $M_{mp} = 5{,}4$, вычисленное на основе (6-7), как наиболее эффективное для создания квазиравномерных по интенсивности опорных полей ЛССТ, где $\Delta\theta = 0{,}23$ мрад.

Рассмотрен вопрос дискретизации сигналов управления АОД при разработке электронных устройств синтеза управляющих частот. Поскольку в реальных устройствах частота меняется через небольшой, но конечный интервал времени, актуальной задачей являлось определение допустимых значений шага квантования частоты $\Delta f_{кв}$ и периода дискретизации $\Delta t_{кв}$ сигнала, не приводящих к появлению в

мгновенном угловом распределении интенсивности дифрагированного пучка периодических локальных неоднородностей, вызванных дискретизацией сигнала.

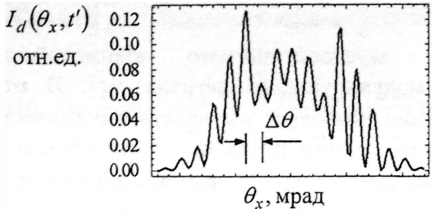

Рисунок 4. Мгновенное угловое распределение интенсивности дифрагированного пучка при $T_0 \approx \tau_{eff}$

Как было показано выше, пространственно-частотный спектр дифрагированного пучка может быть вычислен при помощи преобразования Габора управляющего сигнала АОД. При этом сигнал локализуется в частотно-временном окне с относительным размером

$$S_{window} = (4\pi)^{-1} \cong 0{,}08, \tag{9}$$

определяющим предельное разрешение АОД и позволяющим сформулировать условие влияния параметров дискретизации управляющего сигнала $\Delta f_{кв}$ и $\Delta t_{кв}$ на спектр дифрагированного пучка в виде

$$\Delta f_{кв}\, \Delta t_{кв} \le 0{,}08. \tag{10}$$

Если (10) выполняется, параметры дискретизации сигнала не влияют на пространственно-частотный спектр дифрагированного пучка и при дальнейшем анализе можно не учитывать дискретный характер управляющего сигнала.

Выполнен анализ переходных процессов, возникающих в АОД в первые моменты после подачи управляющего сигнала, когда осевая интенсивность дифрагированного пучка возрастает постепенно по мере заполнения апертуры ячейки акустической волной. На основе приближения (6) вычислялась осевая интенсивность дифрагированного пучка на краю строки опорного поля при $T_a = 16$ мкс как функция текущего времени заполнения апертуры ячейки t' (рисунок 5, (а)). С учетом соотношения $\theta_x = \lambda\alpha\, t' / v_{зв}$, на рисунке 5,(б) показано изменение осевой интенсивности дифрагированного пучка в зависимости от угловой координаты θ_x.

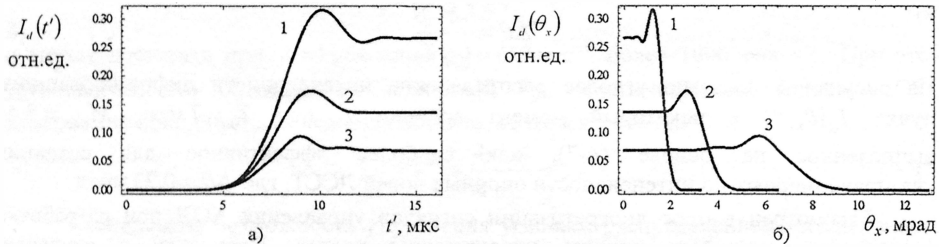

Рисунок 5. Изменение осевой интенсивности дифрагированного пучка для ЛЧМ сигнала с $\Delta f = 2$ МГц (1), 4 МГц (2) и 8 МГц (3)

Полученные зависимости позволяют по заданному уровню интенсивности определять физический размер опорного поля, в том числе при расчете изменения СКО измеряемой координаты при положении объекта на краю опорного поля.

Третья глава посвящена разработке методов формирования опорных полей с заданными свойствами. Рассмотрен метод формирования опорного поля, при котором на первый АОД поступает ЛЧМ сигнал, а на второй АОД сигнал с постоянной частотой. При этом расходимость пучка в одной из плоскостей остается постоянной. Показано, что в зависимости от угловых размеров опорного поля $\Delta\theta_{ОП} = \upsilon_{зв} / \lambda \Delta f$ и числа строк N уровень перекрытия угловых распределений интенсивности двух соседних строк ε определяется выражением

$$\varepsilon = \exp\left(-\frac{\Delta\theta_{ОП}^2}{2\left(N-1\right)^2 \theta_0^2} \right), \tag{11}$$

где θ_0 – расходимость лазерного пучка. При $N = const$ увеличение $\Delta\theta_{оп}$ приводит к появлению в опорном поле сильной неравномерности интенсивности, что вызывает в свою очередь падение отношения сигнал/шум в измерителе положения объекта в областях опорного поля, расположенных между центрами соседних строк. В соответствии с (2) на рисунке 6 показаны максимальное (сплошной) и минимальное (пунктиром) значения СКО измеряемой координаты $\sigma_{\Delta Y}$, нормированные на максимальное отношение сигнал/шум $SNR_{\max}$, как функция размера опорного поля $\Delta\theta_{оп}$ при $T_a = 128$ мкс и числе строк $N = (16, 32, 64)$. Можно отметить, что при данном методе формирования поля изменения $\sigma_{\Delta Y}$ в зависимости от положения объекта в опорном поле могут достигать нескольких порядков. На основе анализа полученных результатов сделан вывод о целесообразности перехода к управляемому многолучевому дифракционному порядку для сигнала с частотной манипуляцией с целью получения более равномерного распределения интенсивности в опорном поле.

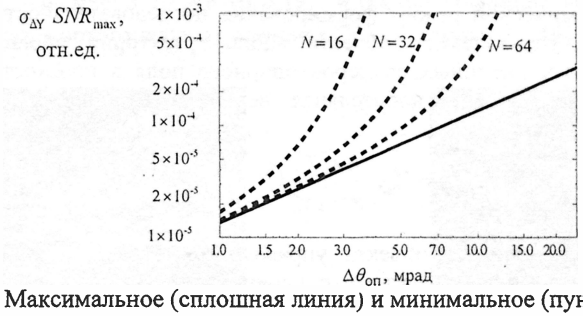

Рисунок 6. Максимальное (сплошная линия) и минимальное (пунктир) значения СКО измеренной координаты положения объекта при $T_a = 128$ мкс

Изложен метод формирования опорных полей с квазиравномерным распределением интенсивности излучения на основе ЧМ сигнала. Получено выражение, определяющее оптимальное значение индекса ЧМ $M_{тр}^{опт}$:

$$M_{mp}^{опт} = \frac{1}{N-1}\frac{\Delta f}{f_{mp}}, \qquad (12)$$

где f_{mp} – частота манипуляции сигнала, обеспечивающее формирование квазиравномерного по интенсивности опорного поля при заданных Δf и N. Для этого случая зависимость $\sigma_{\Delta Y}$ от размеров поля $\Delta\theta_{оп}$ представлена на рисунке 7 при $M_{mp} = M_{mp}^{опт}$, $N = 32$, $T_a = 128$ мкс (сплошная линия). Для сравнения там же пунктирной линией показано максимальное $\sigma_{\Delta Y,\min}$ и минимальное $\sigma_{\Delta Y,\max}$ значения при тех же допущениях, но без формирования многолучевого порядка. Как видно из рисунка, при формировании опорного поля с использованием ЧМ сигнала удается существенно расширить рабочий диапазон опорных полей $\Delta\theta_{оп}$ за счет уменьшения неравномерности распределения интенсивности излучения в опорном поле.

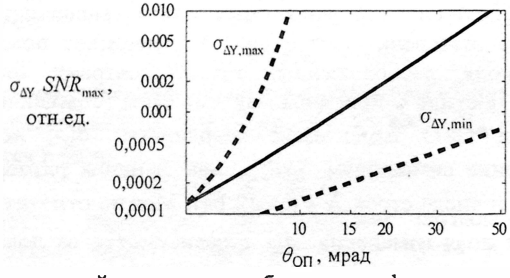

Рисунок 7. СКО измеренной координаты объекта при формировании поля с помощью многолучевого дифракционного порядка (сплошная) и в случае только ЛЧМ сигнала (пунктир)

Рассмотрен динамический режим формирования последовательности опорных полей при движении управляемого объекта вдоль траектории управления при поддержании постоянных линейных размеров опорного поля в плоскости объекта. Показано, что в этом случае относительная величина отношения сигнал/шум фиксируется на уровне

$$SNR_0 = L_{\min}^2 \frac{4\lambda^2 T_a}{\pi v_{зв}^2 \tau_d^2}(N-1) f_{mp}, \qquad (13)$$

и не зависит от дальности до объекта управления, поскольку дефлектор под действием ЛЧМ сигнала подобен системе с переменным увеличением, в которой расходимость излучения и угловое поле жестко связаны.

Исследовано вращение опорного поля и его влияние на динамическую точность ЛССТ. Предложен метод диагональной развертки поля, позволяющий также формировать квазиравномерные по интенсивности опорные поля, путем одновременной подачи на оба АОД одинаковых по модулю ЛЧМ сигналов. При этом пучок движется под углом 45^0 по отношению к направлению развертки каждого из дефлекторов. Показано, что в этом случае выбором длительности ЛЧМ сигнала

$$T_a = (\pi/4)(v_{зв}/\lambda)\theta_0 \tau_d^2 (N-1)\sqrt{-\ln\varepsilon} \qquad (14)$$

можно добиться требуемого уровня перекрытия соседних строк поля ε независимо от размеров опорного поля $\Delta\theta_{ОП}$

Глава 4 посвящена разработке и исследованию экспериментального макетного образца ЛССТ и проверке рассмотренных выше режимов управления АОД. Внешний вид макетного образца ЛССТ и АОД представлен на рисунке 8 (а б) соответственно

Разработана экспериментальная методика и стендовая аппаратура для исследования управляющих сигналов АОД и измерения СКО координат объекта обеспечиваемой ЛССТ в различных условиях формирования опорного поля созданного макетного образца

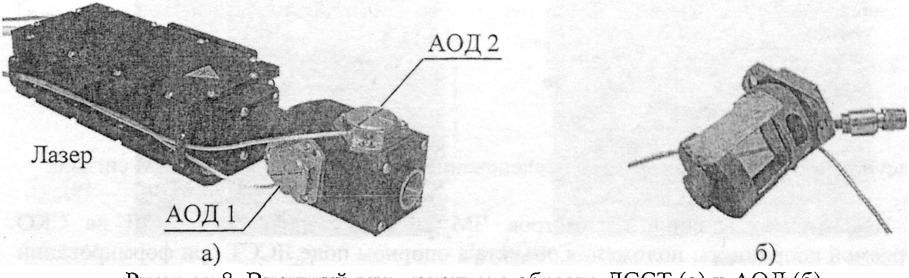

Рисунок 8 Внешний вид макетного образца ЛССТ (а) и АОД (б)

Экспериментально исследовано влияние параметров ЛЧМ сигнала на угловое распределение интенсивности дифрагированного пучка и СКО измеренной координаты объекта На рисунке 9 представлены усредненное во времени изображение строки опорного поля зарегистрированное ПЗС-камерой для ЛЧМ сигнала с $T_a = 64$ мкс и $\Delta f = 8$ МГц (а) и соответствующие угловые распределения интенсивности в ортогональных сечениях (X и Y) строки $I_{d,x}(\theta)$ и $I_{d,y}(\theta)$ (б).

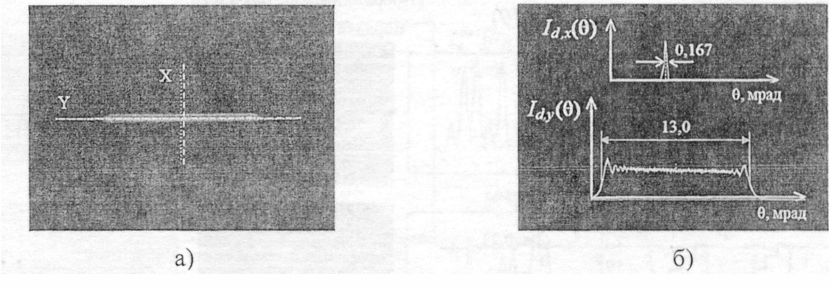

Рисунок 9 Изображение строки опорного поля зарегистрированное ПЗС-камерой (а), и соответствующие распределения интенсивности в ортогональных сечениях (б)

Проведенные измерения показали удовлетворительное совпадение результатов эксперимента и выводов теоретического анализа (рисунок 10), где представлены типичный вид импульса, регистрируемого измерителем положения (а), и коэффициент b как функция параметров ЛЧМ сигнала Δf и T_a (сплошные линии – теория, точки – эксперимент) при $T_a = 16 \div 128$ мкс.

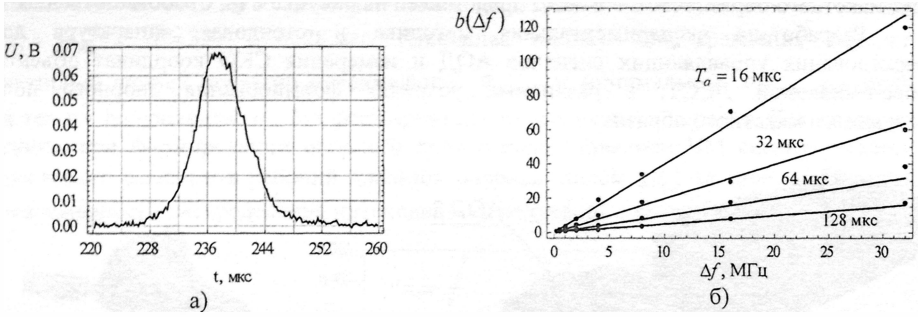

Рисунок 10. Экспериментальное исследование коэффициента b для ЛЧМ сигнала

Исследовано влияние параметров ЧМ сигналов управления АОД на СКО измеряемой координаты положения объекта в опорном поле ЛССТ при формировании квазиравномерных по интенсивности опорных полей. Экспериментальное подтверждены выводы теоретического анализа, что при периоде ЧМ сигнала $T_0 \approx \tau_{eff}$ неравномерность распределения интенсивности в опорном поле минимальна независимо от угловых размеров опорного поля, что проиллюстрировано на рисунке 11, где представлен вид управляющих ЧМ сигналов при $T_0 = 6$ и 7 мкс, расчетное $I_d^{расч}(\theta)$ и экспериментальное $I_d^{эксп}(\theta)$ угловые распределения интенсивности дифрагированного пучка и полученное с помощью измерительной ПЗС-камеры изображение в многолучевом дифракционном порядке.

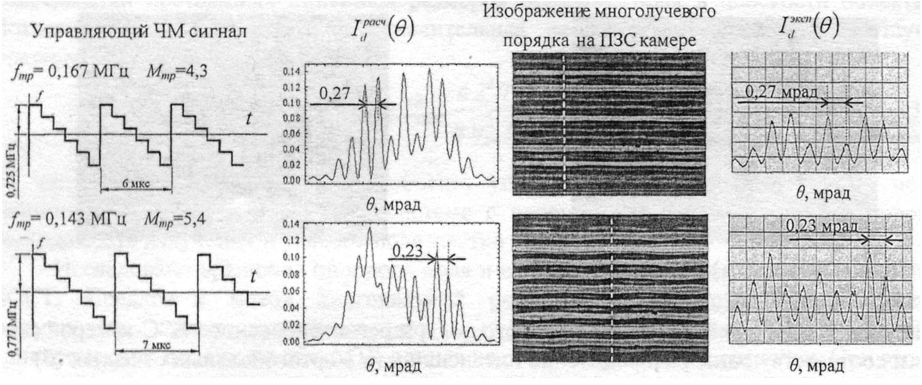

Рисунок 11. Экспериментальное исследование параметров ЧМ сигнала

Использование описанной методики формирования квазиравномерных по интенсивности опорных полей с использованием ЧМ сигнала позволило существенно снизить неравномерность распределения интенсивности в опорном поле, что продемонстрировано на рисунке 12, (б), на котором представлено изображение фрагмента опорного поля, зарегистрированного ПЗС-камерой, с наложением распределений интенсивности в ортогональных сечениях (X и Y) $I_{d,x}(\theta)$ и $I_{d,y}(\theta)$ при расположении плоскостей сечений, указанном пунктирными линиями. Для сравнения на рисунке 12, (а), представлено изображение фрагмента поля, сформированного без использования ЧМ сигнала.

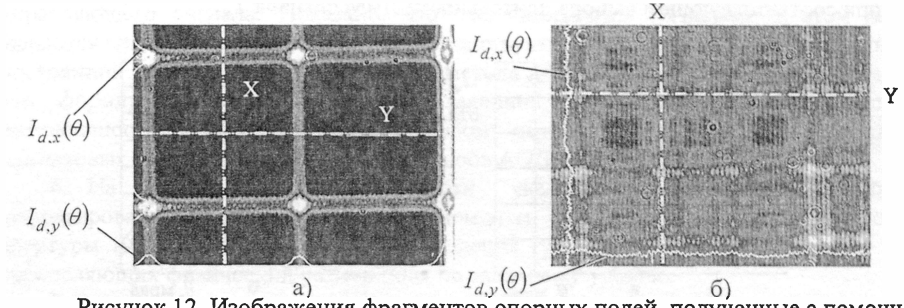

Рисунок 12. Изображения фрагментов опорных полей, полученные с помощью ПЗС-камеры: без ЧМ сигнала (а), при ЧМ сигнале (б)

Экспериментально исследованы переходные процессы в АОД и изменение СКО измеряемой координаты положения объекта на краю опорного поля. Показано (рисунок 13), что предложенная методика расчета переходных процессов, возникающих на начальном этапе заполнения акустической волной апертуры АОД, позволяет определять физические размеры опорного поля по заданному уровню и увеличение СКО измеряемой координаты положения при нахождении объекта управления на краю опорного поля.

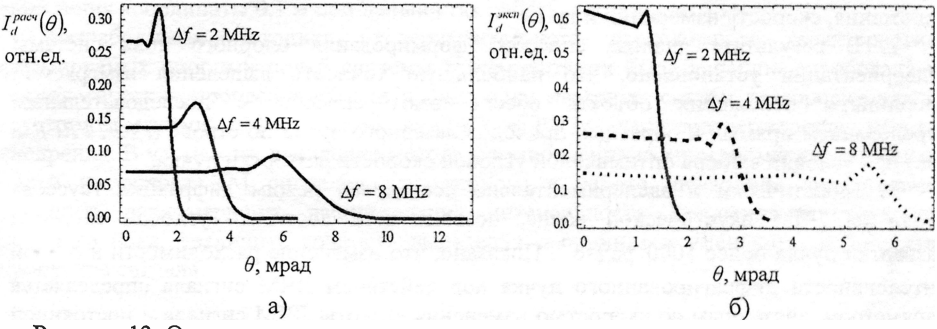

Рисунок 13. Осевая интенсивность на краю строки опорного поля при различных параметрах ЛЧМ сигнала ($T_a = 16$ мкс): (а) – расчет, (б) – эксперимент

Рассмотрено влияние вращения опорного поля на СКО измеряемой координаты положения объекта. Экспериментально продемонстрировано, что в режиме диагональной развертки опорного поля, т.е. при одновременной подаче одинаковых ЛЧМ сигналов на два АОД, расходимость увеличивается пропорционально b, что позволяет использовать такой режим для уменьшения неравномерности интенсивности в пределах опорного поля. На рисунке 14 показаны угловые распределения интенсивности при подаче ЛЧМ сигнала с $\Delta f = 32$ MHz только на один АОД (а) и одновременно на два дефлектора (б). Как видно из рисунка 14, (б), пучок уширяется в 17 раз, что позволяет максимально эффективно использовать частотный диапазон АОД при формировании квазиравномерных по интенсивности опорных полей при соответствующем выборе длительности ЛЧМ сигнала T_a.

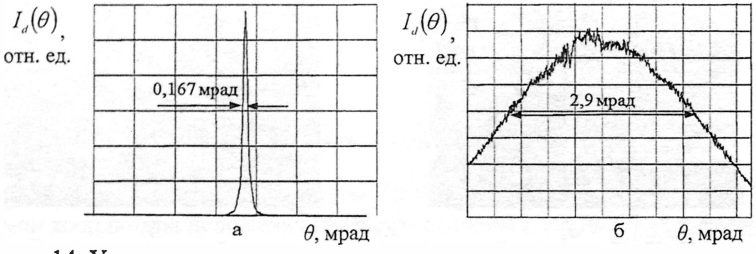

Рисунок 14. Увеличение расходимости пучка в режиме вращения опорного поля

В **заключении** сформулированы наиболее важные результаты, полученные в ходе проведенного исследования:

1. Разработана математическая модель системы телеориентации с АОД, представляющая в численном виде все этапы процесса преобразования сигнала в системе. Предложена упрощенная аналитическая модель системы телеориентации с АОД, позволяющая выбирать оптимальные сигналы управления АОД при формировании опорных полей с заданными характеристиками (размер опорного поля, неравномерность интенсивности, точность определения пространственного положения, скорость измерений и др.).

2. В результате анализа способов формирования опорного поля системы телеориентации установлено, что наибольшую точность выделения измеряемой координаты положения объекта обеспечивают способы с последовательным чередованием прямых и обратных проходов лазерного пучка по строке (*FRF*, *FRFR* и т.д.) при условии выбора оптимальной угловой скорости развертки пучка.

3. Теоретически и экспериментально исследован режим дифракции гауссова пучка на ЛЧМ акустической волне, позволяющий достигать угловой скорости развертки пучка более 1000 $\text{рад} \cdot \text{с}^{-1}$. Показано, что изменение расходимости и осевой интенсивности дифрагированного пучка под действием ЛЧМ сигнала определяется параметром, связанным со скоростью изменения частоты ЛЧМ сигнала и постоянной времени акустооптического дефлектора. Получено условие для выбора оптимальной

угловой скорости развертки, что позволяет минимизировать СКО измеряемой координаты положения объекта.

4. Предложен новый метод расчета пространственного спектра дифрагированного пучка, основанный на преобразовании Габора управляющего сигнала АОД, который обобщает известные методы анализа акустооптического взаимодействия на случай сигналов с нестационарными спектрами. Показано, что данный метод особенно эффективен при исследованиях пространственного распределения интенсивности дифрагированного пучка для управляющих сигналов с нестационарными спектрами, а также при расчете переходных процессов в акустооптической ячейке.

5. Предложена и апробирована методика формирования опорного поля с квазиравномерным распределением интенсивности при частотной манипуляции управляющего сигнала. Показано, что оптимальными сигналами в этом случае являются сигналы с периодом частотной манипуляции, равным эффективной величине постоянной времени АОД. При анализе метода диагональной развертки установлено, что формировать опорные поля с заданной величиной неравномерности по интенсивности также возможно выбором периода ЛЧМ сигнала при подаче одинаковых по модулю ЛЧМ сигналов на оба АОД.

6. На основе расчета скорости увеличения осевой интенсивности дифрагированного пучка в первые моменты заполнения акустической волной апертуры АОД предложен метод определения граничных размеров опорного поля, определяющих физический размер поля по заданному уровню.

7. Разработана методика расчета лазерных систем телеориентации сканирующего типа с АОД, позволяющая на основе заданных технических требований к системе телеориентации (точности, быстродействия, максимальной дальности и др.) определять параметры управляющих сигналов АОД, формирующих опорные поля, реализующие требуемые выходные характеристики системы.

8. Достоверность основных теоретических положений и расчетных соотношений подтверждается результатами экспериментальных исследований созданного макетного образца ЛССТ с АОД, выполненных в лабораторных и полевых условиях. В частности, при полевых испытаниях макетного образца системы телеориентации, выполненных в рамках НИОКР «Пальма» и «ЛСН-296», было получено СКО выделения координаты 0,1 м при дальностях работы системы до 5 км.

Разработанная методика экспериментального исследования характеристик формируемых опорных полей системы телеориентации была успешно опробована в технологических процессах сборки и настройки лазерных систем телеориентации с акустооптическими дефлекторами в ОАО «ГРПЗ», что подтверждается актами внедрения. В частности, внедрение метода формирования квазиравномерных опорных полей на основе ЧМ сигналов, изложенного в работе, позволило существенно улучшить равномерность распределения интенсивности излучения в структуре опорного поля, увеличить точность выделения координат и уменьшить количество пропусков сигнала.

Основные результаты работы изложены в следующих публикациях:

1. Бондаренко Д.А., Карасик В.Е., Семенков В.П. Методы увеличения пропускной способности канала управления лазерной сканирующей системы телеориентации // Вестник МГТУ им.Н.Э.Баумана. Сер. Приборостроение. 2011. №3(84). С. 3-16.
2. Бондаренко Д.А., Карасик В.Е., Семенков В.П. Исследование режима дифракции лазерного пучка на линейно частотно-модулированной акустической волне в анизотропном акустооптическом дефлекторе // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Спец. выпуск «Современные проблемы оптотехники». 2011. С. 31-41.
3. Бондаренко Д.А., Карасик В.Е., Семенков В.П. Управление пространственным спектром лазерного пучка с помощью частотно-манипулированных сигналов в лазерных сканирующих системах телеориентации // Вестник МГТУ им.Н.Э. Баумана. Сер. Приборостроение. 2012. №3 (88). С. 38-53.
4. Лазерная система телеориентации: пат. № 2267734 РФ / Семенков В.П., Бондаренко Д.А., Бутаев А.Б., Костяшкин Л.Н., Стрепетов С.Ф.; заявл. 17.12.2003; опубл. 27.05.2005. Бюл. № 01.
5. Твердотельный лазер с продольной накачкой: пат. № 2266594 РФ / Семенков В.П., Бондаренко Д.А., Котляревский А.Н., Чешев Е.А., Костяшкин Л.Н. Скотников И.Н., Стрепетов С.Ф.; заявл. 16.07.2004; опубл. 20.12.2005. Бюл. №35.
6. Лазерная система телеориентации с каналом обратной связи: пат. № 2410722 РФ / Зеленюк Ю.И., Семенков В.П., Костяшкин Л.Н., Стрепетов С.Ф., Котляревский А.Н., Бондаренко Д.А., Головков О.Л., Лаюк А.М.; заявл. 08.06.2009; опубл. 27.01.2011. Бюл. №3.
7. Оптический прицел со следящим дальномером: пат. № 2410629 РФ / Зеленюк Ю.И., Семенков В.П., Костяшкин Л.Н., Стрепетов С.Ф., Котляревский А.Н., Бондаренко Д.А., Лаюк А.М, Гладышев В.В., Комиков А.В., Соловьев В.В.; заявл. 08.06.2009; опубл. 27.01.2011. Бюл. №3.
8. Способ прицеливания и наведения управляемых объектов: пат. № 2413159 РФ / Зеленюк Ю.И., Семенков В.П., Костяшкин Л.Н., Стрепетов С.Ф., Бондаренко Д.А., Шапка С.В., Скотников И.Н.; заявл. 08.06.2009; опубл. 27.02.2011. Бюл. №6.
9. Лазерно-лучевая система наведения управляемого оружия / Д.А. Бондаренко [и др.] // Перспективные системы и задачи управления: мат-лы Третьей науч-практ. конф. Таганрог. 2008. Т.1. С. 110-112.
10. Новое поколение систем лазерно-лучевой телеориентации управляемого оружия ближнего боя / Д.А. Бондаренко, Семенков В.П., Стрепетов С.Ф. // Устройства измерения, сбора и обработки сигналов в информационно-управляющих комплексах: Тез. докл. Всеросс. науч.-практ. конф. Ульяновск. 2011. С. 52-55.
11. Лазерно-лучевая система наведения управляемого оружия / Ю.И. Зеленюк [и др.] // Мир авионики. 2008. №1. С.48-50.
12. Частотный лазерный дальномер / Ю.И. Зеленюк [и др.] // Мир авионики. 2009. №6. С.38-40.
13. Высокоточное наведение управляемого оружия в лазерном лучевом канале оружия / Ю.И. Зеленюк [и др.] // Обозрение армии и флота. 2011 . №5. С.8-9.