

На правах рукописи
УДК 681.783



Левкович Александр Дмитриевич

**ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННЫЕ СИСТЕМЫ ОБНАРУЖЕНИЯ И
ДИСТАНЦИОННОГО ОПРЕДЕЛЕНИЯ ГЕОГРАФИЧЕСКИХ
КООРДИНАТ ОБЪЕКТОВ С ПОДВИЖНЫХ ТРАНСПОРТНЫХ
СРЕДСТВ**

05.11.07 – Оптические и оптико-электронные
приборы и комплексы

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Москва – 2016

Работа выполнена в открытом акционерном обществе «Научно – производственное объединение «ГЕОФИЗИКА–НВ»

Научный руководитель:

Грузевич Юрий Кириллович,
кандидат технических наук, заместитель
генерального директора по научной работе
ОАО «НПО ГЕОФИЗИКА–НВ»

Официальные оппоненты:

Бездидько Сергей Николаевич,
доктор технических наук, заместитель
директора научно-технического центра ПАО
«Красногорский завод им. С.А.Зверева» по
науке.

Бажанов Юрий Вадимович

доктор технических наук, главный
конструктор оптических систем АО «НПК
«СПП», г. Москва

Ведущая организация:

**АО «Центральный научно-иссле-
довательский институт автоматики и
гидравлики», г. Москва**

Защита диссертации состоится 18 мая 2016 года в 10 часов 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

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке МГТУ им. Н. Э. Баумана и на сайте www.bmstu.ru

Отзыв в одном экземпляре, заверенный печатью организации, просим направить по адресу: 105005, г. Москва, 2-ая Бауманская ул., д. 5, стр. 1, МГТУ им. Н. Э. Баумана, ученому секретарю диссертационного совета Д212.141.19.

Автореферат разослан «_____» «_____» 2016 г.

Ученый секретарь диссертационного совета,
к.ф.-м.н.

Семеренко Денис Алексеевич

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы Для документирования фактов несанкционированного пребывания объектов в запрещенных зонах, в том числе, при охране национальных биологических ресурсов, существует задача обнаружения и регистрации изображения удаленных объектов с определением и отображением их географических координат (ГК). Сложность задачи документирования фактов несанкционированного пребывания объектов в запрещенных зонах обусловлена тем, что в большинстве случаев требуется обнаруживать удаленные объекты и определять их географические координаты днем и ночью, в сложных метеорологических условиях и, как правило, с подвижных транспортных средств. В наибольшей степени этим требованиям удовлетворяют оптико-электронные приборы, оснащенные малогабаритными комплексированными бесплатформенными инерциальными навигационными системами (КБИНС). Достижения в области техники ночного видения, а также создание высокоточных малогабаритных микромеханических датчиков угловой скорости и ускорения, приемников спутниковых систем навигации, позволяют создать малогабаритные оптико-электронные системы (ОЭС), объединяющие в себе функции обнаружения и наблюдения за удаленным объектом днем и ночью, а также дистанционного определения их географических координат с подвижных транспортных средств (ТС). В то же время методика проектирования таких ОЭС до сих пор не разработана, а также не исследовано влияние погрешностей определения первичных параметров для определения ГК объекта на погрешность определения ГК объекта дистанционными методами с подвижных транспортных средств.

Большой вклад в исследование и разработку измерительных оптико-электронных приборов и систем внесли русские ученые, в том числе: Ю.Г. Якушенков, В.К. Кирилловский, Г.В. Креопалова, Б.Н. Родионов, Л.П. Пеллинен, В.А. Афанасьев, Г.М. Мосягин, В.Я. Колючкин, Ф.Н. Красовский, Ю.Ф. Застрогин. Среди зарубежных учёных можно отметить D. Blake Barber, Joshua D. Redding, Madison R. и др.

В России наиболее интенсивно в области построения оптико-электронных приборов работают ОАО «КМЗ», ОАО «ЛЗОС», ОАО ПО «НПЗ», ОАО «НПО «Альфа», ОАО «ЗОМЗ» и другие, при этом, основное внимание уделяется приборам для визуализации изображения и измерения расстояния до объекта, а задача дистанционного определения ГК объекта остается не решенной.

На основании изложенного выше диссертационная работа представляется весьма актуальной.

Целью диссертации является разработка функциональных схем и методики проектирования малогабаритных оптико-электронных систем, установленных на подвижных транспортных средствах и предназначенных для обнаружения удаленных объектов, а также дистанционного определения их географических координат.

Для достижения названной цели были сформулированы и решены следующие задачи:

1. Проведен сравнительный анализ известных методов и алгоритмов дистанционного определения географических координат удалённых объектов.

2. Разработаны и исследованы структурная и функциональная схемы оптико-электронных систем, предназначенных для обнаружения и регистрации удаленных объектов с дистанционным определением их географических координат с подвижных транспортных средств.

3. Определены требования к погрешностям определения углов места и азимута, а также дальности до объекта для определения его географических координат с требуемой погрешностью.

4. Разработана методика проектирования ОЭС обнаружения и регистрации с подвижных ТС изображения удаленных объектов с дистанционным определением их географических координат.

5. Разработана методика проведения наземных и летных испытаний разработанной ОЭС, а также проведены испытания образца ОЭС по разработанной методике с целью подтверждения основных теоретических положений диссертационной работы.

Научная новизна работы заключается в следующем

- разработаны два метода дистанционного определения географических координат удаленного объекта – при однократном измерении дальности и в результате измерения расстояния до объекта с трёх и более точек, при этом второй метод позволяет исключить необходимость измерения азимута объекта и основан на известном в геодезии способе линейных засечек, реализованном применительно к компактным ОЭС, устанавливаемым на подвижных транспортных средствах, новизна обоих методов подтверждается патентами РФ на изобретения (№2486467, №2381447) и полезную модель (№116224);

- разработана методика проектирования ОЭС обнаружения и дистанционного определения географических координат объектов с подвижных транспортных средств.

Практическая ценность работы заключается в разработке инженерной методики проектирования малогабаритных ОЭС обнаружения объектов с одновременным определением их географических координат с подвижных транспортных средств. В ходе выполнения работы также:

- с помощью разработанной методики созданы образцы малогабаритных ОЭС, которые отличаются высокими оптическими и точностными характеристиками и могут использоваться в условиях дневной и ночной освещенности для решения задач по охране природных и биологических ресурсов;

- разработаны алгоритмы и программное обеспечение для ОЭС обнаружения удаленных объектов, позволяющие существенно упростить процесс вычисления их географических координат по результатам измерений данной ОЭС, установленной на подвижном транспортном средстве;

- разработана методика проведения натурных экспериментальных исследований с подвижных транспортных средств для проверки степени адекватности разработанных в работе алгоритмов и оценки погрешностей определения географических координат объектов с подвижных транспортных средств.

Опытный образец и макет прибора демонстрировались на выставках Комплексная безопасность–2010, Макс–2011, Архимед–2013, 9th Taipei International Invention Show & Technomart, Optix-Expo-2014. На выставке Комплексная безопасность–2010 опытный образец прибора был отмечен дипломом. На выставке Архимед–2013 опытный образец прибора отмечен золотой медалью. На выставке 9th Taipei International Invention Show & Technomart были получены дипломы «Excel lent Idea», «Special Award» и «The Best Invention Award».

Основные результаты и положения, выносимые на защиту.

1. Методика дистанционного определения географических координат объектов в дневное время суток и в условиях естественной ночной освещенности с подвижных транспортных средств, основанная на однократном измерении дальности до объекта и на измерении дальности до объекта с трёх и более точек без необходимости определения азимута объекта.

2. Методика определения конструктивных параметров оптико-телевизионных каналов и лазерного дальномера, входящих в состав ОЭС.

3. Методика оценки погрешностей вычисления географических координат объекта с подвижных транспортных средств при однократном и многократном измерении дальности до объекта.

4. Структурная схема ОЭС обнаружения объекта и дистанционного определения его географических координат с подвижного транспортного средства, включающая КБИНС для определения географических координат и угловой ориентации ОЭС, лазерный дальномер, дневной и ночной оптико-телевизионные каналы.

Достоверность результатов работы обеспечивается корректностью постановки задач исследования, использованием методов исследований на основе математического моделирования, применением современных пакетов программ для математических расчётов и современной элементной базы при разработке макета и опытного образца ОЭС, а также согласованностью полученных теоретических результатов с экспериментальными исследованиями.

Апробация работы. Основные положения и результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на конференциях: на XVII и XVIII международных Санкт–Петербургских конференциях по интегрированным навигационным системам (г. Санкт-Петербург, 2010,2011); на международной молодежной конференции Московского отделения Академии навигации и управления движением ФГУП ЦНИИАГ (г. Москва, 2011); на IV Всероссийской научно-технической конференции «Радиовысотометрия - 2013» (г. Каменск-Уральский, 2013); на III тематической научно-технической конференции «Новые разработки оптико-электронных и лазерно-локационных систем и технологий для летательных аппаратов» (г. Москва, 2014).

Внедрение результатов диссертационной работы.

Основные результаты диссертационной работы использованы при разработке оптико-электронных приборов для дистанционного определения географических координат объекта на предприятии ОАО «НПО ГЕОФИЗИКА-НВ» и методики испытаний на полигонах Управления авиации ФСБ, что подтверждено соответствующими актами.

Публикации результатов. Результаты, изложенные в диссертации, содержатся в 12 публикациях, в том числе в 3 рецензируемых научных журналах и изданиях, входящих в Перечень ВАК РФ и 3 патентах Российской Федерации.

Структура и объем работы.

Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения, библиографического списка, включающего 40 наименований. Общий объем работы составляет 132 страниц. Работа содержит 78 рисунков и 10 таблиц.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы диссертации, сформулированы цель и задачи работы, раскрыта научная новизна и практическая ценность работы, сформулированы научные положения, выносимые на защиту.

В первой главе для обоснования цели и задачи диссертации проводится анализ существующих технических решений и известных методов дистанционного определения географических координат объекта. Среди распространенных на практике методов определения координат можно выделить геодезических методы (методы линейной засечки, триангуляции и др.) и основанные на них радиолокационные методы (дальномерный метод, разностно-дальномерный и др.). Анализ этих методов и основанных на них технических решений показал, что их прямая реализация малогабаритными ОЭС невозможна, поскольку необходимо учитывать специфику применения на подвижных ТС, что требует их модификации для работы с подвижных ТС, в том числе при измерении расстояния до объекта с нескольких точек.

Структурная схема ОЭС представлен на Рис. 1, а на Рис. 2 представлена оптическая схема ОЭС. В состав ОЭС входят следующие компоненты:

- оптико-электронный канал, формирующий изображения объекта, в состав которого входят дневная телевизионная камера и ночная низкоуровневая телевизионная камера на основе электронно-оптического преобразователя (ЭОП), а также лазерный дальномер (следует отметить, что дальность до объекта может быть измерена и косвенным способом – с использованием радиовысотомера или базы данных о высотах местности);
- комплексированная бесплатформенная инерциальная навигационная система (КБИНС), определяющая географические координаты и угловую ориентацию оптической оси ОЭС;
- малогабаритный специализированный вычислитель, предназначенный для вычисления географических координат объекта;

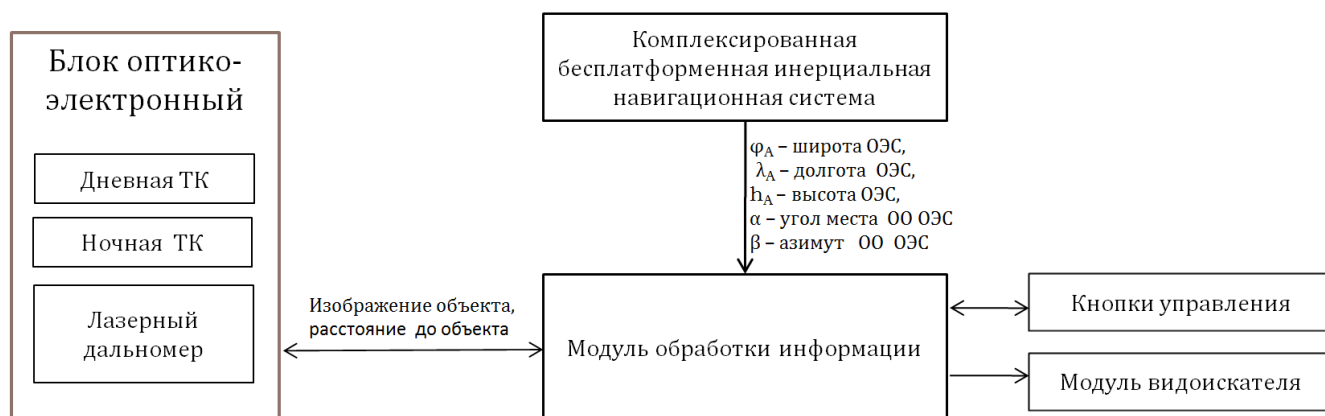


Рис. 1.

Структурная схема ОЭС дистанционного определения ГК объекта

- видеоискатель на основе микродисплея для обнаружения объекта и отображения результатов определения его географических координат.

Для обнаружения объекта в условиях естественной ночной освещенности в состав ОЭС входит ночная телевизионная камера, которая строится на основе фотоприемного модуля (ФПМ), состоящего из бипланарного ЭОПа 3 поколения, волоконно-оптического фокона и фотоприемной матрицы. Такая компоновка модуля позволяет уменьшить габариты и повысить отношение сигнал/шум.

Вторая глава посвящена разработке методов дистанционного определения географических координат объектов с подвижных транспортных средств. В работе разработаны 2 метода дистанционного определения ГК объекта, основанные на известных геодезических методах и позволяющие определять ГК на местности и с борта подвижного транспортного средства, при этом ГК объекта вычисляются в той системе координат, в которой определены ГК ОЭС.

Значение наклонной дальности до объекта l и угол места α оптической оси ОЭС относительно горизонтальной плоскости позволяют найти проекцию наклонной дальности на плоскость расположения объекта. Высота объекта H_B в обоих методах определяется по формуле $H_B = H_A + l \cdot \sin \alpha + \frac{(l \cos \alpha)^2}{2R_3}$, где H_A – высота ОЭС, R_3 – радиус Земли.

Метод определения ГК объекта в результате однократного измерения дальности, реализующий решение прямой геодезической задачи и разработанный применительно к аппаратной реализации малогабаритной ОЭС, позволяет по известным географическим координатам ОЭС (широта φ_A , долгота λ_A , высота H_A), наклонной дальности l , углу места α и азимуту β объекта вычислить его координаты согласно выражениям:

$$\lambda_B = \begin{cases} \lambda_A + \arccos \left(1 - \frac{(l \cos \alpha \sin \beta)^2}{2((R_3 + H_A) \cos \varphi_A)^2} \right) & \text{при } 0 \leq \beta < 180^\circ, \\ \lambda_A - \arccos \left(1 - \frac{(l \cos \alpha \sin \beta)^2}{2((R_3 + H_A) \cos \varphi_A)^2} \right) & \text{при } 180 \leq \beta \leq 360^\circ, \end{cases} \quad (1)$$

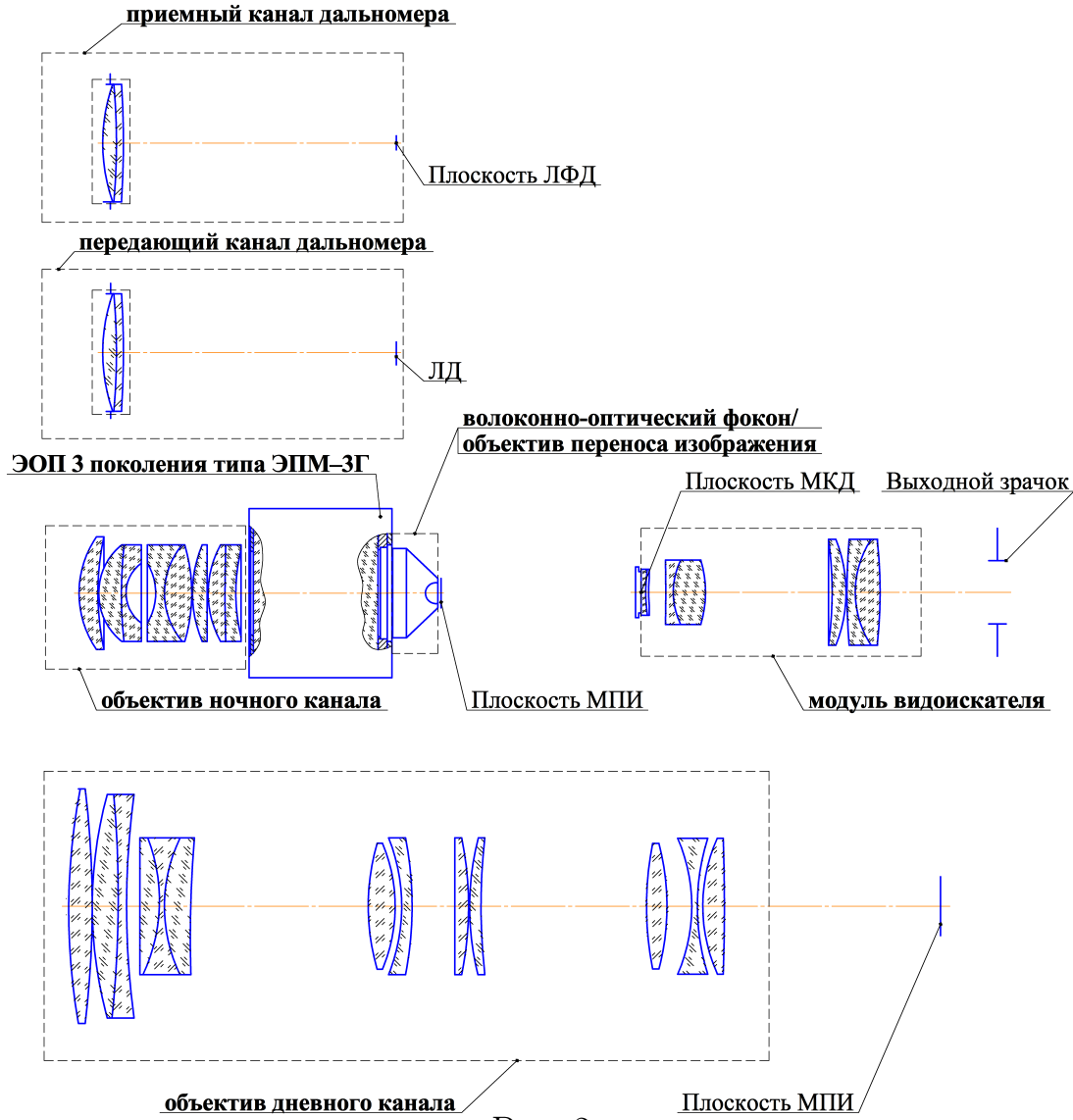


Рис. 2.

Оптическая схема ОЭС дистанционного определения ГК объекта
 ЛФД – лавинный фотодиод; ЛД – лазерный диод; МКД – микродисплей;
 МПИ – матричный приемник излучения

$$\varphi_B = \begin{cases} \varphi_A + \arccos \left(1 - \frac{(l \cos \alpha \cos \beta)^2}{2(R_3 + H_A)^2} \right) & \text{при } 0 \leq \beta < 90^0, \\ \varphi_A - \arccos \left(1 - \frac{(l \cos \alpha \cos \beta)^2}{2(R_3 + H_A)^2} \right) & \text{при } 90 \leq \beta < 270^0, \\ \varphi_A + \arccos \left(1 - \frac{(l \cos \alpha \cos \beta)^2}{2(R_3 + H_A)^2} \right) & \text{при } 270 \leq \beta \leq 360^0. \end{cases} \quad (2)$$

Погрешность определения ГК объекта зависит от дальности до объекта l , координат ОЭС (широты φ_A , долготы λ_A и высоты h_A), азимута β , угла места α объекта, погрешностей определения координат ОЭС $\Delta\varphi_A$, $\Delta\lambda_A$, Δh_A , погрешности определения угла места $\Delta\alpha$, погрешности определения азимута объекта $\Delta\beta$ и погрешности измерения дальности до объекта Δl . Для оценки возможности прак-

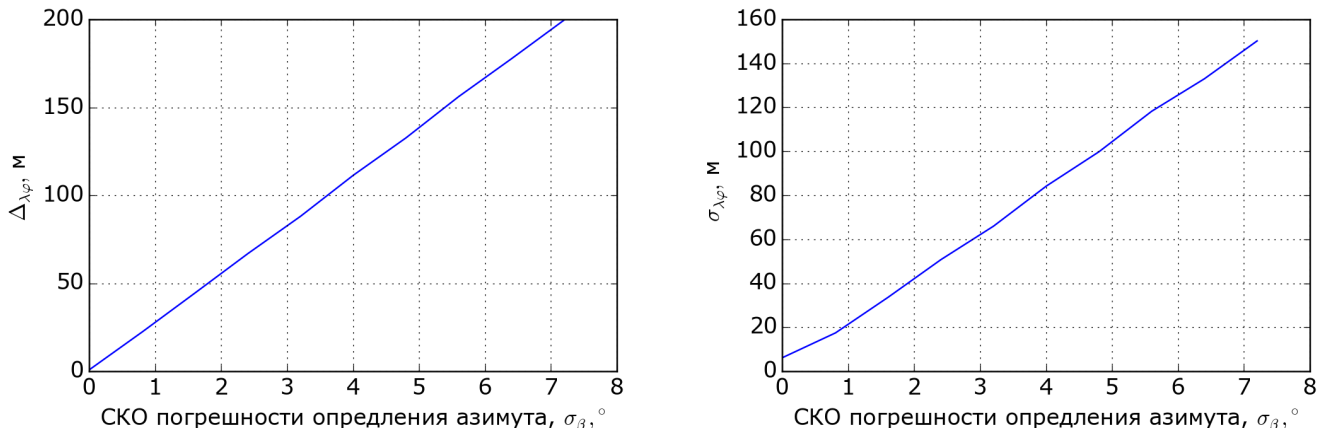


Рис. 3.

Зависимость среднего значения $\Delta_{\lambda\varphi}$ и среднего квадратического отклонения (СКО) $\sigma_{\lambda\varphi}$ от погрешности определения ГК объекта от СКО погрешности определения угла азимута при $l = 2$ км, $\alpha = 0^\circ$, $\beta = 90^\circ$, $\sigma_{\lambda_A} = \sigma_{\varphi_B} = 0,0001^\circ$

тического применения метода в работе получены математические выражения 3–5, позволяющие оценить погрешности определения географических координат объекта по результатам однократного измерения дальности

$$\Delta\varphi_B(\alpha, \beta, \Delta\alpha, \Delta\beta, \Delta\varphi_A, \Delta l) = \Delta\varphi_A + \arccos \left(1 - \frac{(l \cos \alpha \cos \beta)^2}{2(R_3 + H_A)^2} \right) - \arccos \left(1 - \frac{((l + \Delta l) \cos(\alpha + \Delta\alpha) \cos(\beta + \Delta\beta))^2}{2(R_3 + H_A)^2} \right), \quad (3)$$

$$\Delta\lambda_B(\alpha, \beta, \Delta\alpha, \Delta\beta, \Delta\lambda_A, \varphi_A, \Delta l) = \Delta\lambda_A + \arccos \left(1 - \frac{(l \cos \alpha \sin \beta)^2}{2((R_3 + H_A) \cos \varphi_A)^2} \right) - \arccos \left(1 - \frac{((l + \Delta l) \cos(\alpha + \Delta\alpha) \sin(\beta + \Delta\beta))^2}{2((R_3 + H_A) \cos \varphi_A)^2} \right), \quad (4)$$

$$\Delta h_B(l, \Delta l, \alpha, \Delta\alpha, \Delta h_A) = \Delta h_A + l \cdot \sin \alpha - (l + \Delta l) \cdot \sin(\alpha + \Delta\alpha). \quad (5)$$

Наибольшее влияние на погрешность определения координат объекта оказывают погрешности определения углов места и азимута. Проведенные статистические испытания показали (см. Рис. 3), что если среднее квадратическое отклонение (СКО) погрешности определения углов азимута и места не превышает $1,5^\circ$ при дальности до объекта 2 км и $\alpha = 0^\circ$, $\beta = 90^\circ$, $\sigma_{\lambda_A} = \sigma_{\varphi_B} = 0,0001^\circ$, то СКО погрешности определения координат объекта не превышает 50 м.

Основным достоинством данного метода определения ГК объекта является необходимость проведения однократного измерения расстояния, но его основным недостатком является необходимость определения азимута объекта с высокой точностью, что на практике не всегда возможно. Для устранения указанного недостатка был разработан и исследован второй способ определения географических

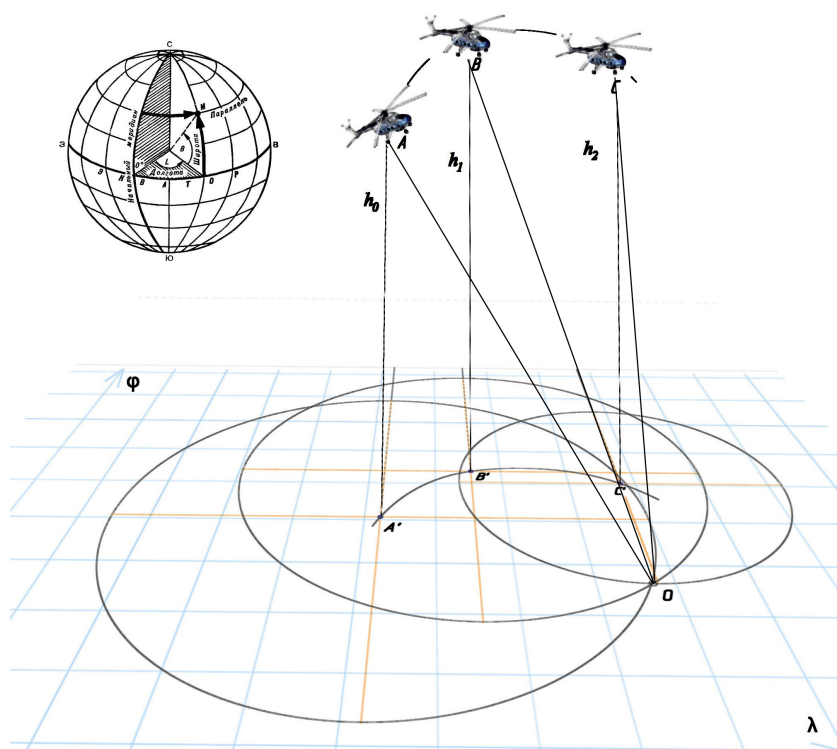


Рис. 4.

Определение ГК объекта в результате измерения расстояния с нескольких точек координат объектов, основанный на известном в геодезии способе линейных засечек и защищенный патентом на изобретение и полезную модель РФ. Идея, лежащая в основе этого способа, поясняется Рис. 4. Расстояние до объекта измеряется с нескольких точек, обозначенных на Рис. 4 А, В и С. Как видно из Рис. 4, определение координат объекта сводится к вычислению координат точки, в которой пересекаются окружности, радиусы которых равны проекциям наклонной дальности с центром в проекциях точек А, В, С на горизонтальную плоскость. Выполнив измерение дальности до объекта из разных точек, получим совокупность окружностей, точки пересечения которых покажут возможное положение объекта.

Как показали проведенные теоретические и экспериментальные исследования, погрешность определения координат этим методом зависит не только от погрешностей определения ГК ОЭС, угла места, дальности, но и от взаимного расположения точек, в которых измеряется расстояние до объекта. В общем случае точки пересечения окружностей можно разбить на две группы, при этом, область расположения объекта относится только к одной из этих групп. В работе был разработан алгоритм и математические выражения, реализующие этот метод. Существенным отличием разработанного алгоритма и формул для преобразования координат от известных является то, что начало декартовой системы координат располагается в первой точке измерения расстояния до объекта, что позволяет уменьшить вычислительную ошибку, возникающую при преобразовании систем координат из-за ограниченной разрядности вычислителей, при этом, вычисление географических координат объекта происходит в той географической системе координат, в которой определены координаты ОЭС.

При малом расстоянии между точками измерения дальности и малом остром угле между прямыми, соединяющими три крайние точки измерения расстояния, невозможно определить группу точек, к которой относится объект, по указанному выше методу, поэтому для однозначного определения координат объекта должно выполняться два условия: расстояние между точками Δ должно быть больше установленного порога $\Delta_{\text{пор}}$ и острый угол γ между прямыми, соединяющими последние три точки измерения расстояния, должен быть не менее определенного порогового значения $\gamma_{\text{пор}}$. Пороговые значения $\Delta_{\text{пор}}$, $\gamma_{\text{пор}}$ определяются на основе требований к погрешностям определения ГК объекта для заданной дальности до объекта.

Выражение 6 связывает расстояние $\delta_{\lambda\varphi}$ между крайними точками пересечения трех окружностей со значением острого угла γ между прямыми, соединяющими их центры, расстоянием между первой и второй точками измерения дальности Δ_1 , с учетом погрешности определения ГК ОЭС, расстоянием между второй и третьей точками измерения дальности Δ_2 , с учетом погрешности определения ГК ОЭС, измеренными дальномером дальностями до объекта l_i , с учетом погрешностей их измерения, значениями углов места объекта α_i , с учетом погрешностей их измерения:

$$\begin{aligned} \delta_{\lambda\varphi}(\gamma, \Delta_1, \Delta_2, l_1, l_2, l_3, \alpha_1, \alpha_2, \alpha_3) = \\ = l_2 \cos \alpha_2 \left[2 \left(1 + \cos \left(\gamma \pm \arccos \left(\frac{(l_2 \cos \alpha_2)^2 + \Delta_1^2 - (l_1 \cos \alpha_1)^2}{2l_2 \cos \alpha_2 \Delta_1} \right) \right) \pm \right. \right. \\ \left. \left. \pm \arccos \left(\frac{(l_2 \cos \alpha_2)^2 + \Delta_2^2 - (l_3 \cos \alpha_3)^2}{2l_2 \cos \alpha_2 \Delta_2} \right) \right) \right]^{1/2}. \end{aligned} \quad (6)$$

В формуле 6 знак «+» или «-» берется в зависимости от группы точек, к которой относится объект. Для определения $\gamma_{\text{опт}}$ при заданных расстояниях до объекта l_i и расстояниях между точками измерения расстояния Δ_i должно выполняться условие экстремума

$$\frac{\partial \delta_{\lambda\varphi}(\gamma, \Delta_1, \Delta_2, l_1, l_2, l_3, \alpha_1, \alpha_2, \alpha_3)}{\partial \gamma} = 0.$$

Решение этого уравнения позволяет получить выражение для значений оптимального угла $\gamma_{\text{опт}}$ между прямыми, соединяющими 3 точки измерения дальности:

$$\begin{aligned} \gamma_{\text{опт}}(\Delta_1, \Delta_2, l_1, l_2, l_3, \alpha_1, \alpha_2, \alpha_3) = \pm \arccos \left(\frac{(l_2 \cos \alpha_2)^2 + \Delta_1^2 - (l_1 \cos \alpha_1)^2}{2l_2 \cos \alpha_2 \Delta_1} \right) \pm \\ \pm \arccos \left(\frac{(l_2 \cos \alpha_2)^2 + \Delta_2^2 - (l_3 \cos \alpha_3)^2}{2l_2 \cos \alpha_2 \Delta_2} \right) \mp \pi. \end{aligned} \quad (7)$$

На Рис. 5 представлены зависимости $\gamma_{\text{опт}}$ от расстояния между точками измерения расстояния и от величины радиуса окружностей, соответствующим проекциям наклонной дальности.

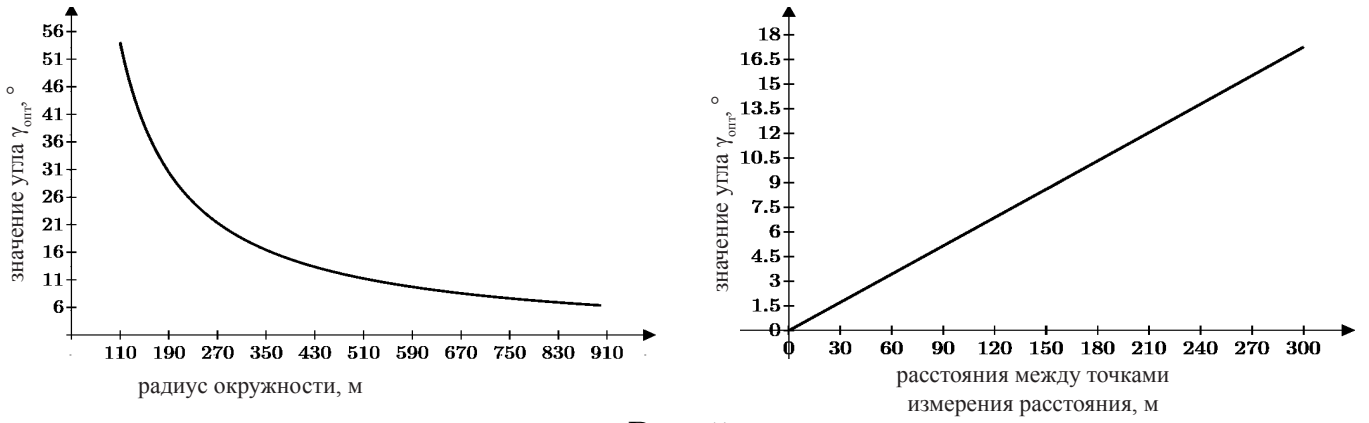


Рис. 5.

Зависимости $\gamma_{\text{опт}}$ от радиусов окружностей (при расстоянии между точками 100 м) и от расстояния между точками измерения расстояния (при радиусах окружностей 1000 м)

Решение уравнения $\frac{\partial \delta_{\lambda\varphi}(\gamma, \Delta, \Delta, l_1, l_2, l_3, \alpha_1, \alpha_2, \alpha_3)}{\partial \Delta} = 0$ определяет оптимальные расстояния $\Delta_{1\text{opt}}$ и $\Delta_{2\text{opt}}$ между точками измерения расстояния до объекта. Вводя обозначения $R_1 = l_1 \cos \alpha_1$, $R_2 = l_2 \cos \alpha_2$, $R_3 = l_3 \cos \alpha_3$ и отбрасывая тривиальные решения ($\Delta_{1\text{opt}1,2} = \pm \sqrt{R_2^2 - R_1^2}$, $\Delta_{2\text{opt}1,2} = \pm \sqrt{R_2^2 - R_3^2}$), находим два корня

$$\Delta_{1\text{opt}3,4} = \frac{(2R_2 \cos \zeta_1)^2 \pm \sqrt{R_2^2 \cos^2 \zeta_1 - 4(R_2^2 - R_1^2)}}{2}, \quad \zeta_1 = \mp \arccos\left(\frac{R_2^2 + \Delta_2^2 - R_3^2}{2R_2\Delta_2}\right) - \gamma,$$

$$\Delta_{2\text{opt}3,4} = \frac{(2R_2 \cos \zeta_2)^2 \pm \sqrt{R_2^2 \cos^2 \zeta_2 - 4(R_2^2 - R_3^2)}}{2}, \quad \zeta_2 = \mp \arccos\left(\frac{R_2^2 + \Delta_1^2 - R_1^2}{2R_2\Delta_1}\right) - \gamma,$$

где знак «+» или «-» выбирается в зависимости от группы точек, к которой относится объект.

СКО погрешности определения ГК объекта зависит также и от количества точек, в которых измеряется расстояние до объекта, что иллюстрируется Рис. 6.

Таким образом, значения оптимального расстояния между точками измерения расстояния $\Delta_{\text{опт}}$ и угла $\gamma_{\text{опт}}$ зависят от расстояния до объекта l и от значений друг друга. Например, при $l = 1000\text{м}$, $\Delta_{\text{опт}} = 100\text{м}$, $\gamma_{\text{опт}} = 6^\circ$.

Третья глава посвящена разработке методики проектирования малогабаритных ОЭС обнаружения, регистрации изображения и дистанционного определения ГК объектов, а также методике электронной стабилизации изображения, выводимого в видоискатель прибора. Исходным условием для проектирования ОЭС является дальность l , с которой обеспечивается измерение расстояния до объекта и обнаружение объекта на фоне помех с требуемой вероятностью P , угловое поле зрения прибора ϑ , размеры объекта и СКО погрешностей определения ГК объекта $\sigma_{\Delta\varphi}$, $\sigma_{\Delta\lambda}$, $\sigma_{\Delta h}$. Чтобы определить требования к погрешностям КБИНС, погрешности измерения дальности и погрешности параллельности оптических осей оптико-телевизионных каналов и лазерного дальномера, в работе разработана методика

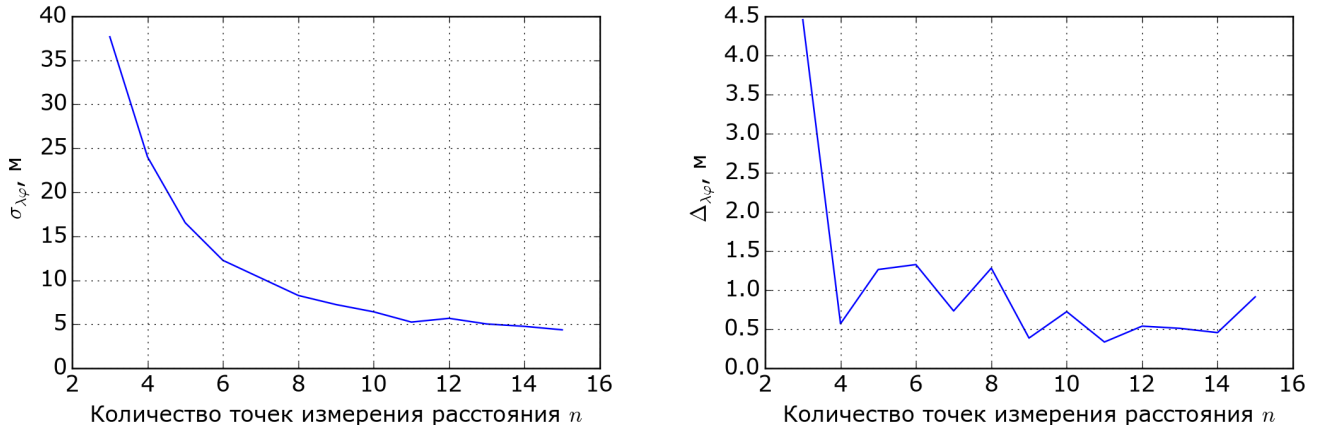


Рис. 6.

Зависимость среднего значения $\Delta_{\lambda\varphi}$ и СКО $\sigma_{\lambda\varphi}$ погрешности определения координат объекта от количества измерений расстояния до объекта при $\alpha = 0^\circ$, $l = 2$ км, $\Delta = 350$ м, $\alpha = 0^\circ$, $\sigma_{\lambda_A} = \sigma_{\varphi_A} = 0,0001^\circ$

оценки влияния этих погрешностей на погрешность определения координат объекта. При проектировании ОЭС осуществляется следующая последовательность процедур.

1. Анализ технического задания и определение начальных значений переменных проектирования, к которым относятся конструктивные параметры оптико-телевизионных каналов и лазерного дальномера, СКО погрешности измерения дальности σ_l , СКО погрешности определения ГК ОЭС σ_{φ_A} , σ_{λ_A} , σ_{h_A} , СКО погрешностей определения углов ориентации σ_α , σ_β , допуск параллельности η оптических осей дальномера и оптико-телевизионных камер.

2. Определение конструктивных параметров лазерного дальномера и оптико-телевизионных каналов, при которых обеспечивается обнаружение объекта с заданного расстояния и измерение дальности.

3. Многовариантный анализ на основе статистических испытаний в результате которого определяются значения переменных проектирования σ_l , σ_{φ_A} , σ_{λ_A} , σ_{h_A} , σ_α , σ_β , η , при которых обеспечиваются требуемые СКО погрешностей определения ГК объекта σ_{φ_B} , σ_{λ_B} , σ_{h_B} , который проводится следующим образом. На основе заданной последовательности значений исходных величин для определения координат $\{\alpha_i, \beta_i, \lambda_i, \varphi_i, l_i, h_i\}$, заданных так, чтобы их СКО соответствовали значениям переменных проектирования:

$$\sigma_\alpha = \sqrt{\frac{\sum_i (\alpha_i - \bar{\alpha})^2}{n}}; \sigma_\beta = \sqrt{\frac{\sum_i (\beta_i - \bar{\beta})^2}{n}}; \sigma_{\lambda_A} = \sqrt{\frac{\sum_i (\lambda_{Ai} - \bar{\lambda}_A)^2}{n}};$$

$$\sigma_{\varphi_A} = \sqrt{\frac{\sum_i (\varphi_{Ai} - \bar{\varphi}_A)^2}{n}}; \sigma_l = \sqrt{\frac{\sum_i (l_i - \bar{l})^2}{n}}; \sigma_h = \sqrt{\frac{\sum_i (h_i - \bar{h})^2}{n}}.$$

Эта последовательность значений подставляется в алгоритм расчета ГК объекта, рассчитанные координаты объекта формируют последовательность $\{\varphi_{Bi}, \lambda_{Bi}, H_{Bi}\}$, по которой оцениваются СКО погрешностей определения ГК объекта и сравниваются с требуемыми значениями $\sigma_{\varphi_B}, \sigma_{\lambda_B}, \sigma_{h_B}$ и делается вывод о необходимости корректировки значений переменных проектирования $\sigma_l, \sigma_{\varphi_A}, \sigma_{\lambda_A}, \sigma_{h_A}, \sigma_{\alpha}, \sigma_{\beta}, \eta$ для достижения требуемых значений $\sigma_{\varphi_B}, \sigma_{\lambda_B}, \sigma_{h_B}$.

4. Выбор элементной базы ОЭС, обеспечивающей требуемые значения переменных проектирования. Если элементную базу подобрать не удастся, необходимо изменить значения $\sigma_{\varphi_B}, \sigma_{\lambda_B}, \sigma_{h_B}$ и повторить многовариантный анализ.

Статистическое моделирование проводится для каждого метода определения ГК объекта отдельно и выбираются минимальные значения СКО погрешностей $\sigma_{\alpha}, \sigma_{\lambda_A}, \sigma_{\varphi_A}, \sigma_l, \sigma_h$ при которых достигается требуемое СКО погрешности определения ГК объекта $\sigma_{\lambda_{\varphi_B}} = \sqrt{\sigma_{\lambda_B}^2 + \sigma_{\varphi_B}^2}$. Результаты моделирования представлены на Рис. 3 и 7 в виде зависимостей СКО погрешностей определения ГК объекта от СКО $\sigma_{\lambda_{\varphi_A}}$ и σ_{α} при дальностях до объекта 1 км и 2 км для различных значений угла места. Как видно из Рис. 7, чтобы СКО погрешности определения ГК объекта не превышало 25 м СКО погрешностей определения угла места не должно превышать $0,7^\circ$ при $\alpha = 40^\circ$ и $l = 2000$ м, СКО определения ГК ОЭС не более $0,0001^\circ$ (11 м), и СКО погрешности определения азимута не более $1,2^\circ$, что обеспечивается современными КБИНС. На погрешность определения ГК объекта также влияет погрешность выставки параллельности η оптических осей телевизионных камер и лазерного дальномера. Погрешность Δ_R определения проекции наклонной дальности Δ_R определяется по формуле $\Delta_R = \frac{l \sin(\eta)}{\sin(\alpha + \eta)}$. Например, при погрешности параллельности каналов $\eta = 0,25'$, СКО погрешности определения ГК объекта при дальности до объекта 2000 м составит 10 м, при определении ГК в результате однократного измерения дальности до объекта.

Чтобы обеспечить обнаружение объекта с требуемого расстояния $l_{\text{зад}}$ при заданных условиях наблюдения необходимо, чтобы отношение сигнал/шум μ на изображении объекта для пространственной частоты ν_{max} , соответствующей минимально возможному размеру объекта, составляло не менее порогового значения μ_{th} , определяемому на основе требуемой вероятности обнаружения объекта P . При проектировании ночной телевизионной камеры на основе заданного углового поля ϑ и размера фотоприемной матрицы $(N_x \cdot T_x, N_y \cdot T_y)$ рассчитывается фокусное расстояние объектива $f_{\text{об}}$ с учетом увеличения ЭОПа ГЭОП и оптики переноса Γ_{tr} . После этого определяются приближенные значения функций передачи модуляции (ФПМ) объектива $H_{\text{об}}(\nu)$ и его коэффициента пропускания $\tau_{\text{об}}$. Последовательность проектных процедур при проектировании изображающей подсистемы ОЭС следующая:

1. Задать условия наблюдения (освещенность E_v , спектральную яркость ночного неба $B_s(\lambda)$, показатель ослабления излучения атмосферой $\varepsilon(\lambda)$) и параметры

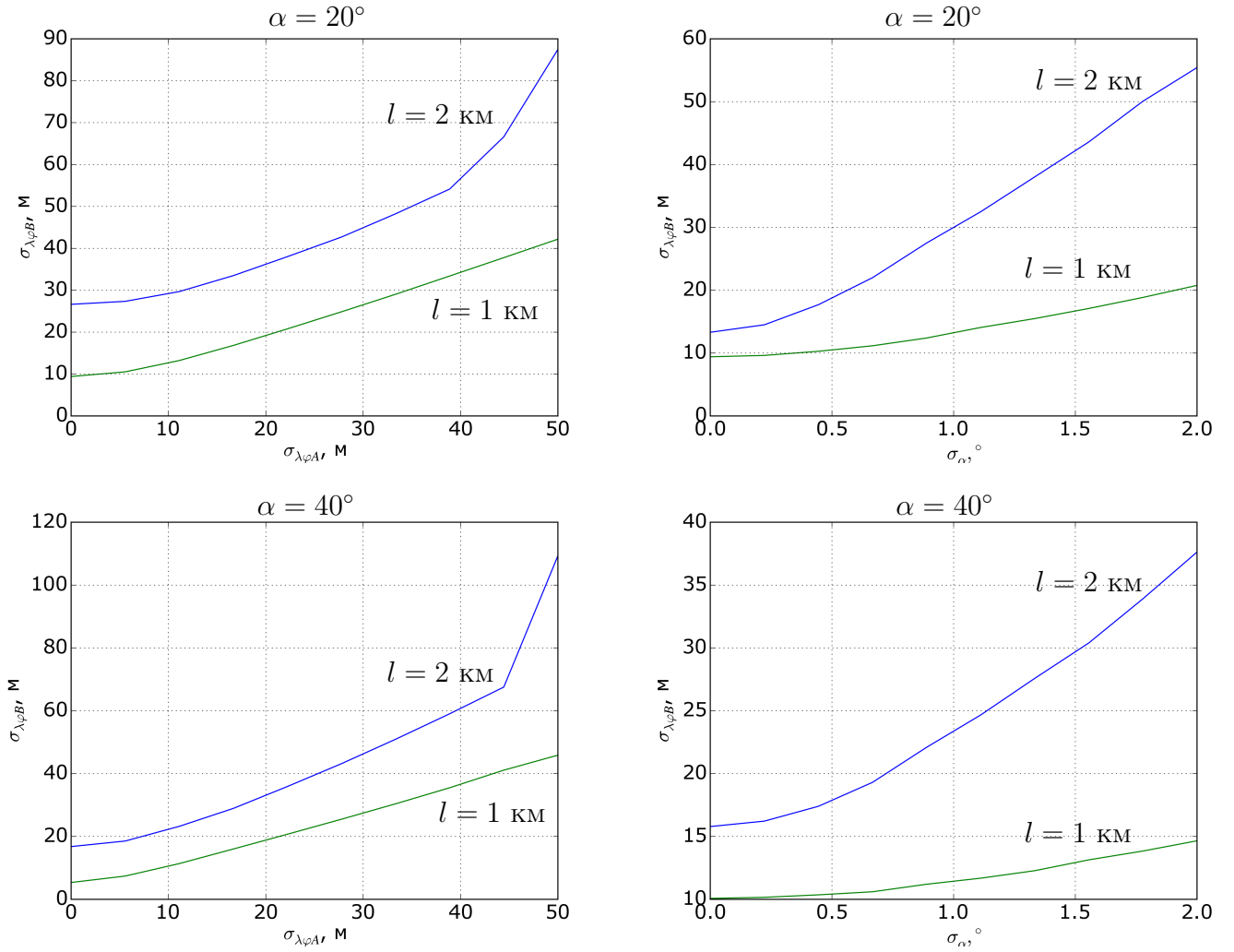


Рис. 7.

Зависимость СКО $\sigma_{\lambda\varphi_B}$ погрешности определения ГК объекта от СКО погрешностей ГК ОЭС $\sigma_{\lambda\varphi_A}$ при $\sigma_\alpha = 1^\circ$ и от СКО угла места σ_α при $\sigma_{\lambda_A} = \sigma_{\varphi_A} = 0,0001^\circ$ в результате измерения расстояния из 6 точек при дальностях до объекта $l = 1$ км и 2 км для углов места $\alpha = 40^\circ, 20^\circ$

формализованной фоноцелевой обстановки (коэффициенты отражения объекта $\rho_o(\lambda)$, фона $\rho_f(\lambda)$, площадь эквивалентной миры S_{mir}).

2. Рассчитать фокусное расстояния объектива $f_{об} = \frac{\sqrt{(N_x \cdot T_x)^2 + (N_y \cdot T_y)^2}}{2 \operatorname{tg}(\vartheta/2) \Gamma_{эоп} \Gamma_{tr}}$,

задать его приближенную ФМП $H_{об}(\nu)$ и коэффициент пропускания $\tau_{об}$, задать параметры ЭОПа (ФМП $H_{эоп}(\nu)$, коэффициент усиления G , спектральная чувствительность $s_{pc}(\lambda)$, шум-фактор F_n , плотность темнового тока J_{th} , $\Gamma_{эоп}$), фотоприемной матрицы (интегральная чувствительность S_{ccd} , коэффициент спектрального соответствия люминофора экрана ЭОПа чувствительности матрицы K_{tr} , количество N_y, N_x , размеры d_x, d_y , и периоды T_x, T_y элементов, темновой ток I_{dk}), оптической системы переноса изображения (ФПМ $H_{tr}(\nu)$, коэффициент преобразования плотности излучения экрана K_{tr}^E, Γ_{tr}), определить минимальное отношение сигнала к шуму $\mu_{треб}$, исходя из требуемой вероятности P принятия

решения об обнаружения объекта на изображении;

3. Построить зависимость дальности $l(D)$ от диаметра входного зрачка D и определить его значение, при котором обеспечивается $l_{\text{зад}}$.

4. Синтезировать объектив ночной оптико-телевизионной камеры с найденными $f_{\text{об}}$ и D , и повторить расчет дальности обнаружения с учетом его реальной функции передачи модуляции $H_{\text{об}}(\nu)$ и коэффициента пропускания $\tau_{\text{об}}$.

5. Определить значения фокусных расстояний приемного и передающего объективов лазерного дальномера, диаметры входных зрачков и мощность лазерного излучателя при которых отношение сигнал/шум на выходе фотоприемника будет не меньше требуемого значения (определяемого алгоритмом измерения дальности) для заданных условий проведения измерения.

Специфика применения малогабаритных ОЭС на подвижных ТС потребовала разработки метода электронной стабилизации изображения, который позволяет удерживать объект в угловом поле ОЭС в условиях вибрации. В основе метода лежит идея определения углового перемещения оптической оси по двум осям, лежащим в плоскости фотоприемной матрицы на основе информации с микромеханических датчиков угловой скорости, входящих в состав КБИНС. Стабилизированное изображение формируется как прямоугольный фрагмент изображения на фотоприемной матрице, который смещён относительно центрального положения на некоторую величину. Величины этого смещения вычисляются по формулам 8 и 9:

$$\Delta x = f \frac{\text{tg} \left(\int_{N\Delta t} \omega^z(t) dt \right)}{b} \approx f \frac{\text{tg} \left(\left((\omega_1^z + \omega_N^z)/2 + \sum_{i=2}^{N-1} \omega_i^z \right) \Delta t \right)}{b}, \quad (8)$$

$$\Delta z = f \frac{\text{tg} \left(\int_{N\Delta t} \omega^x(t) dt \right)}{b} \approx f \frac{\text{tg} \left(\left((\omega_1^x + \omega_N^x)/2 + \sum_{i=2}^{N-1} \omega_i^x \right) \Delta t \right)}{b}, \quad (9)$$

где ω_i^x, ω_i^z – мгновенные угловые скорости, рад./с поступающие с микромеханических датчиков угловых скоростей по осям X и Z в моменты времени $m \cdot \Delta t$, $m = 1, 2, \dots, N$; N – количество отсчётов угловых скоростей, за межкадровое время; Δt – время между отсчётами угловой скорости, с; f – фокусное расстояние объектива, мм; b – размер пикселя на фотоприемной матрице, мм.

Четвертая глава посвящена разработке методики проведения наземных и летных испытаний ОЭС, а также анализу результатов испытаний по предложенной методике.

Результаты определения ГК методом однократного измерения расстояния показали, что погрешность определения ГК существенно зависит от погрешности определения углов азимута $\Delta\beta$ и места $\Delta\alpha$, например при $l = 2460$, $\Delta\beta = 5^\circ$ и $\beta = 353^\circ$ погрешность составляет 223 м. Результаты определения координат объекта при проведении летных испытаний представлены в Таблице 1.

Таблица 1.

Результаты определения координат объекта при проведении летных испытаний

№ измерения	Дальность до объекта, м	Угол места, °	Широта ОЭС, °	Долгота ОЭС, °	Широта объекта, °	Долгота объекта, °
1	510	-10	56,1151	38,1758	—	—
2	580	-9	55,1151	38,1781	—	—
3	639	-8	56,1153	38,1806	56,1191	38,1733
4	694	-8	56,1172	38,1842	56,1195	38,1737
5	645	-8	56,1183	38,1847	56,1195	38,1738

Анализ результатов наземных и летных испытаний показал:

1. Качество изображения объекта, получаемое ОЭС, позволяет различать алфавитно-цифровые символы на изображении объекта при высоте символа 0,6 м в дневное время суток с расстояния до 1200 м, в ночное время с расстояния до 800 м.

2. При определении ГК объекта методом однократного измерения расстояния погрешность определения ГК сильно зависит от погрешности определения угла азимута.

3. При проведении наземных испытаний погрешность определения координат объекта методом измерения расстояния с нескольких точек при дальности до объекта 700 м составила 23 м, что составляет 3,3% от измеряемой дальности.

4. Погрешность определения координат объекта методом измерения расстояния с нескольких точек при проведении летных испытаний при дальности до объекта 510 м составила 50 м.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЫ

В диссертации получены следующие научные и практические результаты:

1. На основе проведенного сравнительного анализа методов и алгоритмов дистанционного определения географических координат удалённых объектов были обоснованы методы и разработаны структурные и функциональные схемы информационно-измерительных ОЭС для обнаружения удаленных объектов с определением их географических координат с подвижных транспортных средств. Данные методы являются дальнейшим развитием известных геодезических методов определения координат с учетом специфики их аппаратной реализации малогабаритной ОЭС. Новизна обоих методов подтверждена патентами РФ на изобретения (№2486467 и №2381447) и полезную модель (№116224).

2. Для разработанных структурных и функциональных схем информационно-измерительных ОЭС и методов определения географических координат удаленного объекта при однократном измерении дальности до объекта и из трёх и более точек, были получены математические выражения для дистанционного определе-

ния географических координат удаленного объекта с подвижных транспортных средств.

3. На основе теоретических и экспериментальных исследований были получены математические соотношения для оценки погрешности определения географических координат удаленных объектов предложенными методами с использованием информационно-измерительных ОЭС, установленных на подвижных транспортных средствах, корректность которых подтверждена результатами натурных испытаний.

4. Разработана методика проектирования информационно-измерительных ОЭС для обнаружения удаленных объектов с определением их географических координат с подвижных транспортных средств.

5. Разработана оригинальная схема и создан опытный и макетный образцы информационно-измерительных ОЭС для обнаружения и регистрации изображения удаленных объектов с определением их географических координат с подвижных транспортных средств. По разработанной методике проведения наземных и летных испытаний в реальных условиях эксплуатации ОЭС были проведены испытания, которые подтвердили корректность разработанных методов, эффективность предложенных технических решений и правильность разработанных методик проектирования.

6. Хорошее совпадение теоретических и экспериментальных результатов подтверждает решение поставленной задачи диссертационной работы.

ПУБЛИКАЦИИ, СОДЕРЖАЩИЕ ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЫ

1. Оптико-электронный прибор для наблюдения, регистрации изображения и определения географических координат удаленных объектов /Левкович А.Д.[и др.] // Оптический журнал. 2012. Т. 78, №7. С. 35-40. (0,31п.л./0,10 п.л.)

2. Системы позиционирования для оптико-электронных систем наблюдения и ориентации /Левкович А.Д.[и др.] //Вестник Московского государственного университета леса. 2009. №6(69). С. 52-57. (0,19п.л./0,05 п.л.)

3. Устройство наблюдения для определения географических координат удаленного объекта /Левкович А.Д.[и др.] // Вестник Московского государственного университета леса. 2012. №6(89). С. 139–144. (0,37п.л./ 0,13п.л.)

4. Левкович А.Д., Ачильдиев В.М., Грузевич Ю.К.[и др.] Оптико- электрон- ный прибор для определения географических координат объекта с комплексиро- ванной микромеханической беспилотформенной навигационной системой // Сб. трудов XVI Санкт-Петербургской международной конференции по интегриро- ванным навигационным системам. Санкт-Петербург. 2010. С. 269-276. (0,44п.л./ 0,13п.л.)

5. Ачильдиев В.М., Грузевич Ю.К., Левкович А.Д. Использование микроме- ханических гироскопов для электронной стабилизации видеоизображения // Сб.

трудов XVIII Санкт-Петербургской международной конференции по интегрированным навигационным системам. Санкт-Петербург. 2011. С.102-104 (0,13п.л./0,05п.л.)

6. Литвак Э. С., Попов А. Ю., Левкович А. Д. Система на кристалле и алгоритм определения координат объекта в оптико-электронном устройстве // Вопросы оборонной техники. 2012. Серия 9, выпуск 258. С. 120–124 (0,25п.л./0,06п.л.)

7. Левкович А.Д., Солдатенков В.А., Грузевич Ю.К. Оптико-электронный прибор для наблюдения и регистрации изображения объекта и определения его географических координат // Сб. трудов IV Всероссийской научно-технической конференции «Радиовысотометрия-2013». Каменск-Уральский. 2013. С. 35-40. (0,31 п.л./0,1п.л.)

8. Устройство для измерения и регистрации сферических координат удаленного объекта и способ определения сферических координат удаленного объекта на местности:п.2381447 РФ /Левкович А.Д.[и др.]; заявл.01.10.2008; опубл.10.02.2010. Бюлл.№4.(0,81п.л./0,3п.л.)

9. Устройство для измерения и регистрации сферических координат удаленного объекта:п.п.м.116224 РФ /Левкович А.Д.[и др.]; заявл.14.10.2011;опубл. 20.05.2012.Бюлл.№14. (0,13п.л./0,06п.л.)

10. Устройство для измерения и регистрации сферических координат удаленного объекта и способ определения сферических координат удаленного объекта на местности:п.2486467 РФ /Левкович А.Д.[и др.]; заявл.14.10.2011;опубл.27.06.2013. Бюлл.№18. (1,06п.л./0,3п.л.)