

4. Поварков В.И., Самков В.М., Соловьев В.И. К вопросу о создании цветного тепловизора. Юбилейная научно-практическая конференция ХК «Ленинец» «Перспективные многофункциональные электронные комплексы в интересах развития В и ВСТ», 2001.
5. Каманина Н.В., Богданов К.Ю., Васильев П.Я., Студенов В.И. Повышение поверхностной механической прочности «мягких» материалов УФ и ИК диапазонов спектра и увеличение их спектра пропускания: модельная система MgF<sub>2</sub>-нанотрубки. Оптический журнал. – 2010. – Т. 77. – № 2.

**Тупиков Владимир Алексеевич**  
ФГУП «НПК «ГОИ им. С.И. Вавилова».  
199034, Санкт-Петербург, Биржевая линия, 12.  
E-mail: Leader@soi.spb.ru.  
Тел.: 88123284892.

**Tupikov Vladimir Alekseevich**  
«S.I. Vavilov State Optical Institute».  
12, Birzhevaya line, St. Petersburg, 199034, Russia.  
E-mail: Leader@soi.spb.ru.  
Phone: 88123284892.

УДК 629.05

**Н.Ш. Хусайнов, В.В. Щербинин, П.П. Кравченко, А.Б. Шаповалов**

**АНАЛИЗ СОСТАВЛЯЮЩИХ ОШИБКИ НАВИГАЦИИ И НАВЕДЕНИЯ  
ЛЕТАТЕЛЬНОГО АППАРАТА, ИСПОЛЬЗУЮЩЕГО ДЛЯ КОРРЕКЦИИ  
ДВИЖЕНИЯ АВТОНОМНУЮ СИСТЕМУ БЛИЖНЕЙ  
РАДИОНАВИГАЦИИ**

*В работе рассматриваются вопросы оценки влияния составляющих ошибок навигации и наведения беспилотных летательных аппаратов с баллистической траекторией полета, использующих для коррекции движения автономную систему ближней радионавигации, на рассеивание координат точки приземления. Приводятся результаты математического моделирования. Сформулированы рекомендации по выбору параметров системы коррекции, обеспечивающих уменьшение рассеивания ЛА.*

*Автономная система ближней радионавигации; составляющие ошибки рассеивания; ошибка местоопределения; математическое моделирование.*

**N.Sh. Khusainov, V.V. Scherbinin, P.P. Kravchenko, A.B. Shapovalov**

**ANALYSIS OF NAVIGATION AND GUIDANCE ERROR COMPONENTS  
OF AIRBONE VEHICLE'S USING FOR MOTION CORRECTION  
AUTONOMOUS LOCAL RADIO NAVIGATION SYSTEM.**

*Impact of component to result guidance dispersion for perspective high-speed unmanned vehicle is described. Simulation results are discussed. Recommendations for coordinate correction mode aiming to guidance dispersion reduction are given.*

*Autonomous local radio navigation; parts of guidance dispersion; positioning error; mathematical modelling.*

**Введение.** В настоящее время все большую актуальность приобретают вопросы разработки высокоточных систем навигации для управления и наведения перспективных высокоскоростных беспилотных летательных аппаратов (ЛА) с баллистической траекторией полета. Оценкой точности в данном случае является размер области рассеивания точки приземления ЛА в заданной (на земной поверхности) точке.

Традиционно решение задачи повышения точности навигации и наведения достигается на основе комплексирования инерциальной навигационной системы (ИНС) ЛА с системой коррекции. В качестве системы коррекции, используемой одноразово или периодически, наиболее часто используется одна из современных радиотехнических систем навигации. Для рассматриваемого в данной работе класса летательных аппаратов коррекция пространственных координат выполняется на конечном участке траектории по искусственному навигационному полю (ИНП) с использованием автономной системы ближней радионавигации (АСБРН).

**Постановка задачи.** Задача определения местоположения ЛА относительно заданной (на земной поверхности) точки посредством АСБРН решается с помощью нескольких разнесенных в пространстве радиомаяков, расположенных на относительно близком расстоянии от заданной точки. Каждый радиомаяк представляет собой устройство, активно переизлучающее совокупность разнесенных по частоте сигналов, поступающих от источника излучения, размещенного на борту ЛА. Радиоприемное устройство, расположенное на борту, осуществляет прием совокупности излученных радиомаяками сигналов и осуществляет соответствующую обработку для определения геометрических дальностей до них. Полученная информация совместно с предварительно введенными в бортовую ЭВМ ЛА данными о местоположении радиомаяков и заданной точке позволяет получить навигационные определения в стандартном для дальномерных навигационных систем виде [1]:

$$(x_i - x)^2 + (y_i - y)^2 + (z_i - z)^2 = D_i^2.$$

Здесь  $x, y, z$  – координаты ЛА;  $x_i, y_i, z_i$  – координаты  $i$ -го радиомаяка в выбранной локальной системе координат (ЛСК) с центром в заданной точке прицеливания;  $D_i$  – дальность до  $i$ -го радиомаяка.

В соответствии с принятой методологией анализа точностных характеристик рассеивания к основным составляющим ошибки рассматриваемого класса ЛА относятся [2, 3]: методические ошибки управления, динамические ошибки управления, инструментальная составляющая рассеивания (в том числе ошибки вычисления бортовой ЭВМ вследствие ограничения разрядной сетки), ошибки подготовки полетного задания для системы автоматического управления (САУ) ЛА, ошибки пассивного участка траектории, ошибки топопривязки места старта ЛА и выбора направления на заданную точку.

Решение задачи анализа вклада различных составляющих в комплексную ошибку рассеивания целесообразно выполнять с использованием метода статистических испытаний. Для моделирования процессов обработки навигационных измерений разработаны программные модели функционирования наземной части АСБРН (выполняющей подготовку полетных данных для решения навигационной задачи) и бортовой интегрированной системы управления и навигации ЛА для конечного участка траектории движения.

**Анализ структуры комплексной ошибки рассеивания.** Рассмотрим составляющие комплексной ошибки рассеивания как отдельные независимые величины, связанные с функционально разнотипными структурными подсистемами ЛА, оценка вклада которых в суммарную ошибку рассеивания является предметом исследования в данной работе.

В ходе решения навигационной задачи средствами АСБРН следует выделить следующие составляющие ошибки местоопределения ЛА:

- ♦ ошибки измерения дальности от ЛА до радиомаяков, обусловленные неидеальными условиями распространения радиоволн, несовершенством измерительных приборов, методической и инструментальной ошибками методов первичной обработки и фильтрации принятого сигнала радиодальномера;

- ◆ ошибки топопривязки опорных навигационных устройств (ИНП) вследствие погрешностей измерительных приборов и инструментальных (вычислительных) ошибок преобразования координат радиомаяков в ЛСК. Анализ точностных характеристик АСБРН существенно упрощается при замещении ошибки топопривязки радиомаяка "эквивалентной ошибкой измерения дальности", получаемой путем функционального преобразования статистических величин, описывающих погрешности измерения координат радиомаяков в ЛСК;
- ◆ методические и инструментальные (вычислительные) ошибки методов вычисления координат ЛА (с учетом погрешностей, вызванных неоптимальностью геометрической конфигурации ИНП). Использование специальных математических и алгоритмических подходов позволяет свести ошибки данного рода к пренебрежительно малым;
- ◆ методические ошибки, связанные со способом учета геофизических факторов при решении навигационной задачи. Для расстояний более 1 км целесообразно использовать известные поправочные коэффициенты и соотношения;
- ◆ ошибки, вызванные отказом радиомаяка(ов) и необходимостью использования субоптимальной подгруппы радиомаяков для определения местоположения ЛА (только в случае избыточности ИНП);
- ◆ ошибки подготовки полетных данных для функционирования бортовой части АСБРН, зависящие от метода их подготовки и способа передачи данных в бортовую ЭВМ. Ошибки данной категории также могут быть сведены к пренебрежимо малым.

**Результаты моделирования.** Как показывают результаты математического моделирования, ключевыми характеристиками АСБРН, задающими точность местоопределения ЛА, являются ошибки измерения дальности (в том числе "эквивалентная ошибка измерения дальности", учитывающая ошибки топопривязки радиомаяков) и фактор геометрической конфигурации ИНП (относительно данных составляющих ошибки местоопределения см. работы [4, 5] в этом же сборнике).

Динамические возможности САУ ЛА определяются алгоритмами управления, аэродинамическими свойствами, а также характеристиками рулевых приводов ЛА. Синтез алгоритмов управления на заключительном участке траектории для рассматриваемого типа ЛА выполнен на основе теории оптимизированных дельта-преобразований второго порядка [6]. Оценка динамических возможностей ЛА на практике, как правило, связана с оценкой длительности процесса отработки отклонения ЛА от прицельной траектории. По результатам математических экспериментов оказалось, что примерная оценка скорости отработки ошибки отклонения от эталонной траектории при использовании рассматриваемых алгоритмов управления для рассматриваемого объекта составляет  $\sim 0,1$ м за 1м пути.

Ошибки инерциальной навигационной системы ЛА характеризуются величиной "ухода" за единицу времени. С точки зрения коррекции показаний ИНС по информации от АСБРН представляет интерес для анализа как размер области рассеяния в момент включения АСБРН (вызванный как накоплением ошибки ИНС до начала участка коррекции, так и другими факторами), так и скорость "ухода" ИНС в единицу времени, характеризующая накопление ошибки с момента завершения коррекции до касания ЛА с земной поверхностью.

Наконец, в случае коррекций показаний ИНС по АСБРН на итоговое рассеивание оказывают влияние используемый режим коррекции (одиночная или множественная коррекция) и удаленность области коррекции от заданной (на земной поверхности) точки, а также ошибки, вызванные временными задержками выполнения расчетов в бортовой части АСБРН.

При проведении математического моделирования осуществлялось независимое варьирование каждого исследуемого параметра. Выполненные с использованием разработанных программных моделей эксперименты позволили сделать следующие выводы:

- ♦ размер области рассеивания в зоне коррекции оказывает заметное влияние на точность определения местоположения ЛА средствами АСБРН (и, как следствие, на итоговое рассеивание) только вблизи заданной точки. Это связано с тем, что при малых расстояниях между ЛА и указанной точкой влияние смещения ЛА в пространстве приводит к более значимому изменению геометрического фактора, чем на больших расстояниях;
- ♦ геометрический фактор (включающий взаимное расположение и удаленность ИНП и ЛА) оказывает существенное влияние на точность определения местоположения ЛА средствами АСБРН. При уменьшении расстояния между ЛА и заданной точкой ошибка местоопределения ЛА уменьшается, однако после прохождения некоторой точки на траектории ошибка АСБРН резко возрастает, что подтверждает наличие некоторой оптимальной для каждой конфигурации ИНП области коррекции с минимальной ошибкой местоопределения ЛА. Выполнение коррекции координат в данной точке пространства необязательно приведет к уменьшению итоговой ошибки рассеивания вследствие ограниченности динамических возможностей ЛА;
- ♦ наименьшее значение комплексной ошибки рассеивания ЛА достигается в режиме множественной коррекции (см. рис. 1), при котором компенсация отклонения ЛА от "прицельной" траектории выполняется последовательно – за несколько шагов. В случае одиночной коррекции оптимальное местоположение зоны коррекции выбирается с учетом ошибки АСБРН и динамических возможностей САУ ЛА.

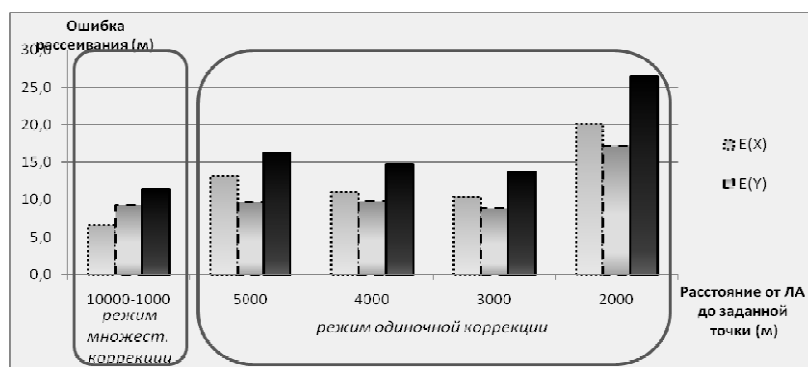


Рис. 1. Характер влияния режима коррекции и удаленности зоны коррекции от заданной точки на итоговую ошибку рассеивания ( $3\sigma$ ) ЛА (вертикальная ось) по каждой координате ( $E(X)$  и  $E(Y)$ ) и на плоскости ( $E(XY)$ ) в режиме множественной и одиночной коррекций

**Заключение.** Таким образом, точность приземления беспилотных летательных аппаратов с баллистической траекторией полета, использующих для коррекции движения АСБРН, имеет сложную структуру составляющих ошибок, что необходимо учитывать как на этапе выбора конфигурации радиомаяков относительно заданной точки (структуры ИНП), так и на этапе подготовки полетного задания системе коррекции ИНС ЛА (которая включает диапазон высот коррекции, тип коррекции – множественная или одноразовая, и др.).

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Сетевые спутниковые радионавигационные системы /В.С. Шебшаевич, П.П. Димтриев, Н.В. Иванцевич и др. / Под ред. В.С. Шебшаевича. – М.: Радио и связь, 1993. – 408 с.
2. Основы теории систем управления высокоточных ракетных комплексов Сухопутных войск. Б.Г. Гурский, М.А. Лющанов, Э.П. Спирин / Под ред. В.Л. Солунина. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2001. – 332 с.
3. *Лысенко Л.Н.* Наведение и навигация баллистических ракет: Учебное пособие – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2007. – 672 с.
4. *Смирнов С.В., Шаповалов А.Б., Щербинин В.В.* Анализ влияния ошибок радиодальномера и позиционирования радиомаяков на точность определения местоположения летательного аппарата, использующего для коррекции движения автономную систему ближней радионавигации – в этом же издании.
5. *Хусаинов Н.Ш.* Выбор участка коррекции местоположения летательного аппарата с учетом геометрического фактора навигационного поля для автономной системы ближней радионавигации – в этом же издании.
6. *Кравченко П.П.* Основы теории оптимизированных дельта-преобразований второго порядка. Цифровое управление, сжатие и параллельная обработка информации: Монография. – Таганрог: Изд-во ТТИ ЮФУ, 2008. – 192 с.

**Хусаинов Наиль Шавкятovich**

Технологический институт федерального государственного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Южный федеральный университет» в г. Таганроге.

E-mail: KhussainovNSh@mopevm.tsure.ru.

347928, г. Таганрог, Некрасовский, 44.

Тел.: 88634371746.

**Кравченко Павел Павлович**

E-mail: kravch@tsure.ru.

Тел.: 88634314945.

**Щербинин Виктор Викторович**

Московский авиационный институт (технического университета).

E-mail: mail\_to\_dv@mail.ru.

127018, г. Москва, ул. Советской Армии, д. 5.

Тел.: 84956006317.

**Шаповалов Анатолий Борисович**

ФГУП "ЦНИИ АГ".

E-mail: cniiaag@cniiaag.ru.

127018, г. Москва, ул. Советской Армии, д. 5.

Тел.: 84956317191.

**Xusainov Nail Shavkyatovich**

Taganrog Institute of Technology – Federal State-Owned Educational Establishment of Higher Vocational Education “Southern Federal University”.

E-mail: KhussainovNSh@mopevm.tsure.ru.

44, Nekrasovskiy, Taganrog, 347928, Russia.

Phone: 88634371746.

**Kravchenko Pavel Pavlovich**

E-mail: kravch@tsure.ru.

Phone: 88634314945.

**Scherbinin Victor Victorovich**

Moscow Aviation Institute (Technical University).

E-mail: mail\_to\_dv@mail.ru.

5, Sovetskaya Army street, 127018, Moscow, Russia.

Phone: 84956006317.

**Shapovalov Anatoly Borisovich**  
Vice of Chief Executive officer of "CNI AG".  
E-mail: cniag@cniag.ru.  
5, Sovetskaya Army street, 127018, Moscow, Russia.  
Phone: 84956317191.

УДК 629.05

**Н.Ш. Хусайнов**

**ВЫБОР УЧАСТКА КОРРЕКЦИИ МЕСТОПОЛОЖЕНИЯ ЛЕТАТЕЛЬНОГО  
АППАРАТА С УЧЕТОМ ГЕОМЕТРИЧЕСКОГО ФАКТОРА  
НАВИГАЦИОННОГО ПОЛЯ ДЛЯ АВТОНОМНОЙ СИСТЕМЫ БЛИЖНЕЙ  
РАДИОНАВИГАЦИИ**

*В работе рассматриваются вопросы влияния геометрической конфигурации искусственного навигационного поля системы ближней радионавигации на точность местоопределения ЛА. Описаны подходы к оценке ошибки местоопределения на основе взаимного положения поверхностей положения и фактора DOP. Выполнена постановка задачи поиска оптимальной точки коррекции координат ЛА с учетом геометрической конфигурации искусственного навигационного поля и предложены пути ее численного решения.*

*Автономная система ближней радионавигации; поверхность положения, ошибка определения местоположения; геометрический фактор потери точности; нелинейная оптимизация; математическое моделирование.*

**N.Sh. Khusainov**

**CHOOSING OF CORRECTION REGION LOCATION FOR AIRBORNE  
VEHICLE SUBJECT TO DILUTION OF PRECISION SYSTEM FOR AUTONOMOUS  
LOCAL RADIO NAVIGATION SYSTEM**

*The influence of geometry to accuracy of localization of unmanned flying vehicle are described. The approaches to estimation of localization error based on Dilution-of-Precision (DOP) are described. The problem of searching of optimal correction field subject to DOP is stand. The ways for numerical solving are proposed.*

*Autonomous local radio navigation; position surface; positioning error; dilution of precision; nonlinear optimization; mathematical modelling.*

**Введение.** В [1] выполнен анализ составляющих ошибки навигации и наведения летательного аппарата (ЛА), для которого задача определения местоположения решается посредством автономной системы ближней радионавигации (АСБРН) с помощью нескольких разнесенных в пространстве радиомаяков, расположенных на относительно близком расстоянии от заданного объекта и образующих искусственное навигационное поле (ИНП). Радиотехническая часть бортовой части АСБРН измеряет расстояние от ЛА до каждого из маяков и осуществляет их соответствующую обработку для определения геометрических дальностей.

В [1] показано, что одной из ключевых характеристик, задающих точность местоопределения ЛА, является фактор геометрической конфигурации ИНП. Рассмотрим данную характеристику подробнее.

**Подходы к оценке точности определения местоположения ЛА с учетом геометрического фактора.** Поскольку измеряемым навигационным параметром  $p$  в АСБРН является расстояние между ЛА и  $i$ -м радиомаяком (т.е. уравнение параметра есть  $p = R_i$ ), то поверхность положения, соответствующая  $i$ -му радиомаяку,