

УДК 629.73

**Н.Ш. Хусаинов****ОЦЕНКА ТОЧНОСТИ ОПРЕДЕЛЕНИЯ МЕСТОПОЛОЖЕНИЯ ОБЪЕКТА  
СРЕДСТВАМИ АВТОМАТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ БЛИЖНЕЙ  
РАДИОНАВИГАЦИИ С ПОМОЩЬЮ ИМИТАЦИОННОГО  
МОДЕЛИРОВАНИЯ**

**Введение.** Основной задачей навигационной системы является получение вектора навигационных определений, содержащего данные о текущих координатах (и скорости) объекта – летательного аппарата (ЛА) относительно выбранной системы координат. При обеспечении навигации только бортовыми средствами ЛА, работающими независимо от наземных систем и средств связи, говорят об автономном режиме навигации. Если же для определения координат ЛА используются наземные средства, то процесс навигации является неавтономным и требует навигационного обеспечения полета [1, 2].

В автономных средствах навигации, таких как инерциальные навигационные системы (ИНС), вектор навигационных определений формируется путем интегрирования показаний датчиков угловых скоростей, ускорений и т.п. [3] Современные ИНС характеризуются высокой частотой формирования вектора навигационных определений, помехозащищенностью, их использование не приводит к обнаружению ЛА радиотехническими средствами наблюдения и разведки. Однако принципиальной особенностью ИНС является накопление ошибки при выполнении интегрирования и, как следствие, снижение точности позиционирования со временем, что осложняет решение целого ряда задач гражданского и военного назначения (управление движением ЛА по маршруту, посадка ЛА и т.д.) средствами исключительно автономной системы управления.

Для определения местоположения объекта с точностью, не зависящей от времени движения, используются радиотехнические навигационные системы (РНС), в которых положение ЛА оценивается относительно опорных навигационных точек (ОНТ) с заранее известными координатами: радиомаяков (например, для систем посадки) или космических спутников (для управления движением по маршруту воздушных и морских судов, спасения терпящих бедствие, автомобильной навигации и т. д.). Спутниковые навигационные системы (СНС) GPS (в том числе дифференциальный режим), ГЛОНАСС позволяют получить вектор навигационных определений с высокой точностью, однако низкая частота формирования вектора координат и слабая помехозащищенность спутникового сигнала обуславливают возможность их применения в системах управления высокоскоростными маневренными ЛА только в сочетании с ИНС [4]. Существующие радионавигационные системы наземного базирования, в частности, системы ближней навигации и посадки ГРАС, Крабик, ИЛС и др., решают задачу определения местоположения и/или направления движения ЛА на расстоянии в пределах десятков километров от наземных ОНТ.

Точность большинства наземных РНС несколько хуже, чем у спутниковых навигационных систем, а высокая стоимость комплекса наземного оборудования, зависимость от энергоснабжения, необходимость предварительной высокоточной геодезической привязки наземных ОНТ и открытость их функционирования ограничивает область применения существующих наземных РНС крупными аэродромами, как правило, гражданского назначения [5].

В работе затрагиваются вопросы разработки навигационного обеспечения для разрабатываемой автоматической системы ближней радионавигации (АСБРН), которая за счет:

- ◆ малогабаритности, скрытности установки, скрытности функционирования в режиме ожидания, автономности и низкого энергопотребления наземных ОНТ;
- ◆ разрабатываемого информационно-алгоритмического обеспечения, поддерживающего расчет вектора навигационных определений в условиях избыточности информационной схемы, отказов наземных ОНТ, жестких ограничений вычислительных ресурсов бортовой части системы должна обеспечивать возможность определения местоположения пилотируемых ЛА малой авиации, вертолетов, беспилотных высокоскоростных маневренных ЛА для решения широкого спектра задач гражданского и военного назначения.

**Задача оценки точности определения вектора координат ЛА средствами АСБРН.** Наземная часть разрабатываемой АСБРН включает набор ОНТ, устанавливаемых в области требуемого определения координат ЛА, и информационно-вычислительный комплекс, который выполняет подготовку навигационного обеспечения полета для бортовой части системы. Бортовой модуль АСБРН функционирует в рамках бортовой интегрированной системы управления ЛА (БИСУ ЛА) и по дальномерным измерениям до ОНТ с использованием навигационного обеспечения формирует вектор координат ЛА в системе координат, связанной с ОНТ, в текущий момент времени и передает его в систему управления.

Исходными данными для функционирования комплекса АСБРН являются:

- ◆ конфигурация ОНТ с оценками уровней ошибки позиционирования радиомаяков, а также уровни ошибок измерения дальности от ЛА до ОНТ радиотехническим оборудованием АСБРН;
- ◆ границы пространственной области решения задачи вычисления вектора навигационных определений средствами АСБРН;
- ◆ требования и ограничения по трудоемкости алгоритмов расчета координат ЛА с учетом ресурсов бортового вычислителя;
- ◆ измеренные дальности до ОНТ (только для бортового модуля АСБРН).

Априорная (до полета ЛА) оценка точности определения местоположения ЛА средствами информационно-вычислительного комплекса наземной части АСБРН позволяет:

- ◆ выбрать типовую траекторию и направление подлета ЛА к точке касания с землей (приземления) на завершающем участке траектории;
- ◆ сформировать множество оптимальных алгоритмов, обеспечивающих предельно возможную точность решения навигационной задачи при минимизации вычислительных затрат (в том числе с учетом вероятности отказов ОНТ и ограничений ресурсов бортового вычислителя);
- ◆ рассчитать вероятностные точностные оценки систем автоматического управления ЛА с учетом их динамических характеристик;
- ◆ подготовить навигационное обеспечение полета для загрузки его в бортовой модуль АСБРН ЛА.

**Решение задачи оценки точности определения местоположения ЛА средствами имитационного моделирования.** На точность определения координат ЛА средствами рассматриваемой АСБРН решающее влияние оказывают точности задания исходных данных измерений (точность позиционирования ОНТ и точность измерения дальности от ОНТ до ЛА), геометрический фактор ухудшения

точности в зависимости от конфигурации ОНТ (GDOP) и взаимное положение ЛА и группы ОНТ.

Использование аналитических подходов к решению задачи априорной оценки точности определения координат объекта средствами РНС связано с рядом ограничений. Во-первых, существующие РНС изначально ориентированы на использование единственного алгоритма для расчета всех составляющих вектора навигационных определений по измеренным сигналам дальности (псевдодальности), поэтому известные математические подходы к априорной оценке точности определения координат объекта связаны с конкретным алгоритмом расчета, а не носят характер "предельных оценок" [6]. Во-вторых, методы оценки влияния геометрического фактора ухудшения точности (GDOP), а также взаимного положения ЛА и группы ОНТ, достаточно хорошо проработаны для случая использования конфигурации из 4-х или 3-х ОНТ. Для случая избыточности конфигурации ЛА представляет интерес выбор такого подмножества ОНТ (мощность подмножества заранее неизвестна), которое характеризуется минимальным показателем GDOP. В-третьих, при выборе оптимальных (с точки зрения возможности получения координат ЛА с предельной точностью) подгрупп ОНТ необходимо принимать во внимание разброс ошибок позиционирования различных радиомаяков.

Получить универсальную аналитическую комплексную оценку одновременного влияния всех рассмотренных выше факторов на итоговую точность вектора навигационных определений представляется проблематичным, поэтому в информационно-алгоритмическом обеспечении разрабатываемой АСБРН априорная оценка точности определения местоположения ЛА выполняется посредством имитационного моделирования.

**Методика оценки точности определения местоположения ЛА посредством имитационного моделирования.** Моделирование выполняется в некоторой пространственной области, называемой областью решения навигационной задачи. Положение области решения задается в локальной системе координат с центром в точке предполагаемого касания ЛА с Землей. Размер и форма области решения зависят от специфики решаемой задачи:

*Вариант 1.* В случае необходимости выбора направления движения ЛА, при котором вектор навигационных определений АСБРН формируется с наибольшей точностью, область решения имеет вид параллелепипеда и описывается вокруг требуемой точки касания ЛА с землей. При моделировании область решения разбивается на множество регулярных непересекающихся подобластей. Оценка точности определения координат ЛА выполняется для каждой подобласти независимо. Анализ результатов моделирования позволяет выбрать направление и параметры движения ЛА, при которых его траектория будет проходить через наиболее "благоприятные" для работы АСБРН подобласти.

*Вариант 2.* Для оценки точности определения координат ЛА при движении вдоль заданной траектории область решения охватывает пространственный "коридор" сложной формы (похожий на изогнутый конус), который образуется вокруг заданной идеальной траектории вследствие накопления ошибки ИНС при движении ЛА. Подобласти в этом случае "накрывают" отдельные участки траектории и могут для простоты описываться цилиндрами.

При имитационном моделировании рассматривается задаваемый оператором (с учетом ресурсов бортового вычислителя ЛА) набор разрешенных алгоритмов вычисления координат объекта. Для каждого алгоритма известны размерность вектора входных параметров (измерений дальностей до ОНТ) и трудоемкость в условных единицах.

В каждой подобласти решения случайным образом по равномерному (для варианта 1) или нормальному (для варианта 2) закону многократно генерируется истинное положение ЛА. От каждого положения ЛА рассчитывается расстояние до искаженных (в соответствии с сигмой ошибки позиционирования) координат ОНТ, на которое накладывается значение случайной величины, соответствующей сигме ошибки измерения дальности. Полученные искаженные дальности используются для расчета координат ЛА тем или иным алгоритмом. По результатам вычисления координат ЛА формируются статистические оценки (математическое ожидание и сигма) точности определения каждой пространственной координаты объекта в рассматриваемой подобласти каждым алгоритмом. В случае избыточности конфигурации варьируются не только алгоритмы, но подгруппы используемых радиомаяков. Рассмотренные кортежи <алгоритм, подгруппа\_ОНТ> ранжируются по возрастанию сигмы ошибки. Минимальный уровень ошибки для каждой координаты является итоговой оценкой точности расчета вектора навигационных определений в данной подобласти.

При необходимости минимизации ресурсов бортового вычислителя на расчет координат объекта по информации от АСБРН используется некоторый параметр допуска ошибки, зависящий от расстояния от ЛА до центра локальной системы координат. Среди кортежей, отличающихся по уровню точности от "лучшего" кортежа на величину, не превышающую заданного значения параметра допуска, выбирается тот кортеж, алгоритм в котором имеет наименьшую условную трудоемкость.

Ранжированный список кортежей используется для построения дерева отказов. Поочередно каждый из ОНТ признается "отказавшим" и из списка выбирается кортеж с наименьшим уровнем ошибки, в котором не использован отказавший радиомаяк. Результатом выполнения данной процедуры является первый уровень дерева отказов, содержащего указания для бортового вычислителя по выбору кортежа <алгоритм, подгруппа\_ОНТ> при обнаружении отказа того или иного маяка. Затем "отказавшими" признаются одновременно два радиомаяка и выполняются аналогичные действия для формирования второго уровня дерева отказов. Процесс повторяется до тех пор, пока не будет исчерпана информационная избыточность конфигурации ОНТ.

Рассмотренная методика положена в основу разработанной программной модели информационно-вычислительного комплекса наземной части АСБРН.

Проверка достоверности результатов, полученных в ходе имитационного моделирования, осуществляется с помощью другой программной модели, имитирующей движение ЛА по заданной траектории с множественными измерениями дальностей до ОНТ, вычислением координат ЛА по информации от АСБРН и коррекцией координат в БИСУ ЛА.

**Основные результаты моделирования.** Проведенные эксперименты подтверждают адекватность оценок точности определения местоположения ЛА, получаемых на основе имитационного моделирования: бортовой модуль АСБРН в программной модели имитации движения ЛА в 90-95% выдавал координаты ЛА с ошибкой, не превышающей величины  $3\sigma$  для соответствующей подобласти решения.

По результатам исследований также отмечено, что на точность решения навигационной задачи количество радиомаяков влияет в меньшей степени, чем геометрический фактор конфигурации (точность решения навигационной задачи при 9 маяках, расположенных вблизи одной прямой, будет ниже, чем при 3 маяках, расположенных в углах равностороннего треугольника). Возможность повышения

точности вычисления координат ЛА при увеличении избыточности связано, в первую очередь, с вероятностью появления более "удобных" конфигураций подгрупп маяков, которые и должны выбираться для решения навигационной задачи.

Несмотря на универсальность такого алгоритма вычисления вектора навигационных определений, как итерационный метод наименьших квадратов (МНК), в подавляющем большинстве случаев с учетом параметра допуска удавалось выбрать какой-либо аналитический алгоритм решения навигационной задачи, уступающий МНК по точности не более, чем на 5-10% при существенно (в несколько раз) более низкой трудоемкости реализации.

Использование набора различных алгоритмов и возможность независимого определения каждой координаты ЛА приводят к существенному (до 1,2-1,3 раза) повышению точности определения местоположения объекта.

**Заключение.** Предложенная методика решения навигационной задачи, основанная на возможностях независимого вычисления каждой из координат ЛА, выборе оптимальных подгрупп радиомаяков и алгоритмов для каждой из областей коррекции позволила получить по результатам моделирования точностные характеристики, соответствующие требованиям определения координат для современных беспилотных маневренных ЛА.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Карташкин А.С.* Авиационные радиосистемы. – М.: ИП РадиоСофт, 2007.
2. *Лысенко Л.Н.* Навигация и наведение баллистических ракет: Учебное пособие. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э.Баумана, 2007.
3. *Пешехонов В.Г.* Навигационные системы // Вестник РАН, № 1, 1997.
4. Управление и наведение беспилотных маневренных летательных аппаратов на основе современных информационных технологий / Под ред. М.Н.Красильщикова и Г.Г. Серебрякова. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2005.
5. Межгосударственная радионавигационная программа государств-участников сотрудничества независимых государств на 2001-2005 годы (Концепция развития радионавигационных систем). – М., 2001.
6. Сетевые спутниковые радионавигационные системы / В.С. Шибшаевич, П.П. Дмитриев, Н.В. Иванцевич и др.; Под ред. В.С. Шибшаевича. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Радио и связь, 1993.

УДК 654.19:621.391.83

**А.С. Мкртумов**

#### **ИМИТАЦИОННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРИМЕНЕНИЯ РАЗМЫВАЮЩЕЙ НАСАДКИ (DITHER) ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ ВИДЕОПАРАМЕТРОВ В МЕТОДЕ УТФ**

Точность измерений ряда видеопараметров зависит от погрешности квантования, которая может быть существенной при широко применяемой в трактах формирования и передачи программ разрядности  $Q = 8$  [1]. Коэффициент нелинейных искажений, определяемый отношением амплитуд ступеней сигнала яркости, занимающих согласно [2] число уровней  $220 \times 0,2 = 44$ , может быть измерен со ошибкой:  $\delta = (1 - 43/45) = 4,4\%$ .