

## АНАЛИЗ МЕТОДОВ ПОВЫШЕНИЯ ТОЧНОСТИ И НАДЕЖНОСТИ ДАННЫХ О ПАРАМЕТРАХ ДВИЖЕНИЯ АЭРОДИНАМИЧЕСКОГО ЛЕТАТЕЛЬНОГО АППАРАТА

Дорожкин А.Д., Джусь О.А.

*ФГКУ ВПО «Военная академия воздушно-космической обороны имени Маршала Советского Союза Г.К.Жукова», Тверь, Россия, (170022, Тверь, ул. Жигарева, 50), e-mail: oleg310775@mail.ru*

В существующих инерциальных навигационных системах (ИНС) происходит значительное увеличение ошибок определения местоположения летательного аппарата (ЛА) во времени из-за инструментальных погрешностей. Данный факт не позволяет достичь высокой эффективности боевых действий без осуществления периодической коррекции ИНС, как правило, с помощью позиционных систем навигации (РСБН, РСДН). Объединение навигационно-пилотажных приборов и отдельных систем в пилотажно-навигационный комплекс (ПНК) и совместное использование их информации позволило увеличить точность и надежность данных о параметрах движения и состоянии систем. Одним из наиболее сложных режимов работы ПНК является режим коррекции, в течение которого задействованы практически все системы ПНК и связи между ними. Приведен анализ эффективности методов повышения точности применительно к инерциальным навигационным системам (ИНС). Так как именно они, обладая свойствами автономности, помехозащищенности, скрытности работы, являются основными и наиболее сложными источниками пилотажно-навигационной информации в современных ПНК. Сделан вывод о том, что перспективными являются применение схемы волновых твердотельных гироскопов (ВТГ) в общей структуре ПНК.

Ключевые слова: инерциальные навигационные системы (ИНС), пилотажно-навигационный комплекс (ПНК), волновые твердотельные гироскопы (ВТГ).

## ANALYSIS OF METHODS FOR IMPROVING THE ACCURACY AND RELIABILITY OF DATA ON PARAMETERS OF MOVEMENT AIRCRAFT AERODYNAMIC

Dorozhkin A.D., Dzhus O.A.

*FGKU VPO "Military Academy of Aerospace Defense named after Marshal Zhukov", Tver, Russia, (170022, Tver, street Zhigareva, 50), e-mail: svetlanadorozhkina71@mail.ru*

In existing inertial navigation systems (INS) is a significant increase of position errors of the aircraft (LA) in time because of instrumental errors. This fact does not allow to achieve high efficiency of combat actions without the implementation of the periodic adjustment of ins, usually using positional navigation systems (RSBN, RSDN). Association navigation devices and individual systems in flight and navigation complex (NCP) and the sharing of their information has allowed to increase accuracy and reliability of data on parameters of movement and system status. One of the most difficult operating modes, the NCP is a correction mode, during which involved almost all the NCP system and links between them. The analysis of efficiency of methods of increase of accuracy with respect to inertial navigation systems (ins). As they have the features of the autonomy, noise immunity, secrecy of work, are the main and most complex springs flight and navigation information in modern NCP. The conclusion is that the perspective is the application of the scheme wave solid-state gyroscopes (VTG) in the general structure of the NCP.

Keywords: inertial navigation system (INS), flight-navigation complex (NCP), wave solid-state gyroscopes (WTG).

В статье рассмотрены основные методы повышения точности навигационного комплекса в режиме коррекции.

Объединение навигационно-пилотажных приборов и отдельных систем в пилотажно-навигационный комплекс (ПНК) и совместное использование их информации позволило увеличить точность и надежность данных о параметрах движения и состоянии систем. Основным назначением ПНК является автоматическое управление ЛА с целью движения его

по заданной пространственно-временной траектории. Получение информации о координатах местоположения самолета в процессе решения задачи управления занимает центральное место. А поскольку эти координаты непосредственно измеряться не могут, то процесс управления ЛА всегда связан с обработкой информации. Конечной целью обработки информации в ПНК является определение ПНПП с наибольшей точностью, надежностью и помехозащищенностью.

Основным направлением совершенствования навигационного оборудования самолетов является создание комплексных навигационных систем.

Это обусловлено тем, что на борту ЛА работают устройства, предназначенные для измерения одних и тех же либо близких друг к другу параметров полета. Например, инерциальные системы и доплеровские системы одновременно измеряют вектор путевой скорости самолета; системы счисления пути и радиосистемы ближней и дальней навигации измеряют координаты текущего местоположения самолета и т.д. Использование приборов, работающих на различных физических принципах, для измерения одних и тех же параметров объясняется тем, что каждый измерительный прибор в отдельности не удовлетворяет требованиям, которые предъявляются к измерению этих параметров. Так, инерциальная система не отвечает условиям точности, радиосистемы ближней и дальней навигации не отвечают требованиям помехозащищенности, доплеровские системы – требованию применимости в любых районах, в том числе и над водными пространствами.

Как правило, обеспечить точность ПНПП, помехозащищенность и надежность их получения становится возможным благодаря объединению нескольких датчиков (систем) навигационной информации, с помощью вычислительных устройств, в единую (комплексную) навигационную систему. Сущность комплексирования заключается в использовании информационной и структурной избыточности для повышения точности, надежности и помехозащищенности измерений при измерении одних и тех же или функционально-связанных навигационных параметров. Информационная избыточность заключается в том, что на борту самолета обеспечивается получение однородной информации от нескольких навигационных датчиков различной физической природы с последующей совместной обработкой этой информации в специализированном вычислителе. Избыточность структуры комплекса обеспечивает его работоспособность при отказе, особенно кратковременном, одного из датчиков. Комплексирование отдельных навигационных систем (датчиков) позволяет решать следующие задачи: повышение точности определения навигационных параметров; повышение надежности измерений за счет обмена информацией и сравнения показаний отдельных навигационных датчиков; расширение географических зон работы навигационного комплекса; обеспечение

непрерывности поступления точной навигационной информации во времени. Кроме того, комплексная измерительная система всегда обладает качествами, превосходящими качество каждого входящего в нее датчика информации. В некоторых случаях она приобретает качества, которые принципиально не могут быть достигнуты каждым датчиком в отдельности. Например, КНС может обеспечивать измерения практически без динамических запаздываний, в то время как отдельные датчики такие запаздывания имеют, может обеспечивать устойчивое измерение параметров, тогда как отдельные датчики такими свойствами не обладают.

В настоящее время существуют следующие способы повышения точности определения ПНПП:

- повышение точности датчиков первичной информации;
- автономная коррекция погрешностей датчиков и систем информации;
- статистическая обработка выходных сигналов систем;
- комплексирование систем навигационного комплекса.

Одним из наиболее сложных режимов работы ПНК является режим коррекции, в течение которого задействованы практически все системы ПНК и связи между ними. Кроме того, функционирование ПНК в режиме коррекции предъявляет серьезные требования к точности и скорости выполнения расчетов в БЦВМ. Исходя из этого, выделяют следующие направления повышения точности определения навигационных параметров при работе ПНК в режиме коррекции:

- 1) конструктивное совершенствование задействованных систем;
- 2) структурно-алгоритмическое совершенствование отдельных систем и всего комплекса в целом.

Анализ эффективности методов в данной статье проводится применительно к инерциальным навигационным системам (ИНС). Так как именно они, обладая свойствами автономности, помехозащищенности, скрытности работы, являются основными и наиболее сложными источниками пилотажно-навигационной информации в современных ПНК.

В рамках первого направления выделяют три основных пути:

- доработка существующих элементов, датчиков, систем (улучшение применяемых материалов, изменение конструкции);
- совершенствование технологии производства;
- разработка и использование принципиально новых элементов, датчиков, систем.

Данное направление является наиболее трудоемким и требует больших экономических затрат. К тому же, на эффективность путей данного направления свои ограничения накладывают достижения науки, а также возможности и современное состояние

промышленности. В качестве примера рассмотрим современные ИНС. Современные ИНС среднего класса имеют значения ошибки определения местоположения ЛА порядка  $6\div 8$  км за час полета. За счет использования высокоточных чувствительных элементов – гироскопов, акселерометров, а также монтажа и юстировки погрешность удается уменьшить до значения 1,85 км за час полета и надежность более 10000 часов (LN30 (США)). Однако подобные ИНС являются весьма неэкономичными из-за их высокой стоимости и, кроме того, при полете на большие расстояния ошибки в определении координат все равно являются недопустимо большими. Проведенный в работе [2] анализ точностных характеристик различных типов современных гироскопов позволяет достаточно точно оценить эффективность методов конструктивного совершенствования систем. Так, точностные характеристики гироскопа с электростатическим подвесом ротора (ЭСГ) не менее чем на порядок превосходят точностные характеристики всех остальных инерциальных приборов. Например, при использовании ЭСГ на космических аппаратах, находящихся на стационарной орбите, его дрейф равен порядка  $10^{-6}$  град/ч, а нелинейность и нестабильность масштабного коэффициента практически отсутствуют.

Однако ЭСГ и большинство других видов электромеханических приборов имеют слишком большую массу и не выносят сильных перегрузок. Кроме того, это достаточно дорогие устройства.

На современном этапе все более широкое распространение получают волоконно-оптические гироскопы (ВОГ) и кольцевые лазерные гироскопы (КЛГ). Основным преимуществом ВОГ является простота, малая стоимость, габаритные размеры и энергопотребление. Ожидается значительное повышение показателей их качества по мере совершенствования технологии волоконно-оптической связи.

В настоящее время основные усилия разработчиков направлены на совершенствование КЛГ. Данные гироскопы характеризуются очень высоким качеством, но в работах по их изготовлению важное место занимают процессы точной механической обработки и требования в отношении выставки, вследствие чего стоимость их остается относительно высокой.

Анализ работ показывает, что современные кольцевые лазерные гироскопы обладают следующими точностными характеристиками: смещение нуля от 0,02град/ч до 0,05град/ч; нестабильность масштабного коэффициента  $10^{-5}$ .

Перспективными являются схемы волновых твердотельных гироскопов (ВТГ). Имея преимущества по массогабаритным, надежностным, стоимостным параметрам ВТГ обладает способностью сохранения инерциальной информации при перерывах питания. Помимо этого, основными преимуществами ВТГ по сравнению с традиционным

гироскопом следующие: отсутствие вращающихся частей, малое время готовности, возможность работы в условиях больших перегрузок, возможность кратковременной работы при отключенной системе возбуждения, малая масса прибора.

Таким образом, методы и пути конструктивного совершенствования являются весьма эффективными, хотя имеют и свои недостатки. В качестве последних отметим: большие трудозатраты, ограничения, налагаемые возможностями промышленности, а также то, что некоторые из них требуют для своей реализации значительного временного промежутка, в частности – процесс разработки и внедрения новых образцов.

В настоящее время ведутся активные работы по развитию и совершенствованию структурно-алгоритмических методов повышения точности. Все структурно-алгоритмические методы подразделяют на следующие группы:

- 1) алгоритмическая компенсация погрешностей измерителей;
- 2) статистическая обработка выходных сигналов систем;
- 3) автокомпенсация инструментальных погрешностей ИД;
- 4) использование структурной избыточности.

Наиболее распространенные методы компенсации погрешностей навигационных систем предполагают использование различных алгоритмов оценивания. Оценка погрешностей инерциальных измерений и их источников строится, как принято на практике, с применением алгоритмов оптимального последовательного линейного и нелинейного оценивания (фильтрации) и их модификаций.

Учитывая специфику реализации алгоритмического обеспечения на борту динамического объекта, которым является аэродинамический ЛА, в условиях дефицита объема машинной памяти выделяют, среди многообразия алгоритмов оценивания, лишь компактные и робастные алгоритмы. Таковым в частности является алгоритм оптимальной фильтрации Калмана (ФК). Этот метод обладает существенными достоинствами, основными из которых являются:

- исходя из известных вероятностных характеристик входных переменных и ошибок измерений, дает наилучшие в смысле минимума погрешностей возможные оценки;
- оценивание является последовательным, т.е. данные измерений обрабатываются по мере их получения;
- в результате решения оптимальной задачи позволяет получить структуру оптимального фильтра, причем данная структура может быть осуществлена практически;
- уравнения фильтра Калмана очень удобны для реализации в бортовой цифровой вычислительной машине, так как просты в вычислительном плане и не требуют большого объема машинной памяти;

- при помощи фильтра Калмана осуществляется не только восстановление всего вектора состояния системы, но и подавляется влияние измерительного шума.

Задача фильтрации требует на основе математического ожидания объекта и априорной информации о статистических характеристиках входных и измерительных шумов, осуществляя измерения части вектора состояния, оценить вектор состояния так, чтобы функционал, имеющий следующий формализованный вид  $J$ , принимал минимальное значение:

$$J = M \left[ \left( x_k - \hat{x}_k \right)^T \left( x_k - \hat{x}_k \right) \right] = \min,$$

где  $\hat{x}_k$  – оценка вектора состояния,

$x_k - \hat{x}_k$  – вектор ошибки оценки.

В соответствии с условием фильтр Калмана описывается следующими уравнениями: оптимальной оценки фильтра

$$\delta \hat{X}(t) = F(t) \delta \hat{X}(t) + K(t) [Z(t) - H(t) \delta \hat{X}(t)],$$

оптимального коэффициента передачи фильтра

$$K(t) = P(t) H^T(t) R^{-1}(t),$$

ковариационной матрицы ошибок оптимальных оценок фильтра

$$\dot{P}(t) = F(t)P(t) + P(t)F^T(t) + G(t)QG^T(t); P(t_0) = P_0,$$

где  $P(t)$  – дисперсионная матрица ошибок ИНС с вращением БЧЭ;

$F(t)$  – матрица динамики ошибок ИНС с вращением БЧЭ;

$G(t)$  – матрица возмущений ИНС с вращением БЧЭ;

$Q$  – матрица интенсивностей белого шума.

Эффективность использования фильтрации Калмана во многом определяется соответствием вероятностного описания поведения измеряемых параметров и ошибок измерений их действительным значениям.

Алгоритмическая компенсация погрешностей требует, как правило, значительного усложнения алгоритмов обработки информации и, в большинстве случаев, наличия избыточной информации. Избыточная информация может быть получена следующими способами:

- построением наиболее полных и достоверных математических моделей погрешностей используемых датчиков, усовершенствованных алгоритмов управления;
- использованием алгоритмической избыточности;
- использованием структурной избыточности.

Общим недостатком обозначенных выше способов алгоритмической компенсации является значительное увеличение объема вычислений при сравнительно небольшом повышении точности.

Хорошо разработаны и широко освещены способы повышения точности систем путем статистической обработки информации. Они, как правило, также требуют наличия избыточной информации. Кроме того, практическая реализация встречает большие трудности, связанные прежде всего с невозможностью реализовать полные математические модели погрешностей из-за больших вычислительных затрат, особенно для сложных многомерных систем, которыми являются ИНС, а также с отсутствием априорной информации о характере погрешностей.

Этого недостатка лишены способы так называемой автокомпенсации погрешностей устройств, основанные на преобразовании постоянных возмущений в периодические функции времени.

Эти способы позволяют добиться повышения точности гироскопических устройств с минимальными экономическими затратами, поскольку они базируются на операциях с технологически отработанными элементами приборостроительной техники.

Среди существующих методов автономной компенсации погрешностей чувствительных элементов можно выделить следующие:

1. Использование дополнительного гироскопа в качестве тест-прибора;
2. Метод автокомпенсации погрешностей с непрерывной предварительной обработкой показаний гироскопов;
3. Метод, основанный на использовании пространственного вращения БЧЭ с аналитическим формированием опорной системы координат.

Дальнейшего повышения точности измерительных устройств или систем можно добиться использованием структурной избыточности. Принципиальная возможность использования структурной избыточности для повышения точности, в платформенных ИНС, ограничены. Эти ограничения обусловлены следующими факторами:

- гиросtabilизированные платформы являются весьма сложными устройствами, поэтому избыточность приводит к ухудшению массогабаритных и экономических характеристик системы, сложность платформ вызывает затруднение в согласовании их работы по входам, выходам и другим параметрам;
- увеличение числа измерителей, размещаемых на платформе, приводит к увеличению дрейфа платформы.

Таким образом, с учетом возрастающего значения экономического фактора, в настоящее время наиболее актуальными остаются структурно-алгоритмические методы

повышения точности навигационного комплекса в режиме коррекции и, как следствие, в остальных режимах функционирования ПНК. К тому же, разработка и совершенствование алгоритмического обеспечения позволяет более гибко и эффективно использовать существующие и новые системы и датчики пилотажно-навигационной информации.

### Список литературы

1. Авиационные приборы и навигационные системы / Под ред. О.А. Бабича. – М.: Издание ВВИА им. проф. Н.Е. Жуковского, 1981. – 647с.
2. Автокомпенсация ошибок дрейфа гироскопа в инерциальных навигационных системах /ВЦП. - № Г-25777. - М., 1981. - 15 с. Авиационные приборы и навигационные системы / Под ред. О.А. Бабича. – М.: Издание ВВИА им. проф. Н.Е. Жуковского, 1981. – 647с.
3. Бакулев П.А., Сосновский А.А. Радиолокационные и радионавигационные систем. – М.: Радио и связь, 1994. – 296 с.
4. Бражнев СМ. Пилотажно-навигационные комплексы. – Даугавпилс: ДВВАИУ, 1990. – 326 с.
5. Дорожкин А.Д., Нестерков А.П., Юдин А.В. Модель погрешностей комплекса измерительных устройств управляемой инерциальной навигационной системы: Сборник материалов 16-ой военно-научной конференции. – Смоленск: Изд. ВА В ПВО ВС РФ им. А. М. Василевского, 2008.
6. Пешехонов В.Г. Перспективы инерциальной навигации. // Гироскопия и навигация. – 1995. №1 (8). – С.13-20.
7. Юдин А.В. Способы повышения точности определения навигационных параметров полета аэродинамического летательного аппарата: Материалы всероссийской научно-технической конференции «VIII Научные чтения по авиации, посвящённые памяти Н.Е. Жуковского». – Москва: Изд. ВВИА им. Н.Е. Жуковского, 2007.

### Рецензенты:

Страхов Е.В., д.т.н., ведущий научный сотрудник ОАО «ГСКБ Алмаз-Антей» НТЦ «НИЭМИ», г. Москва.

Рулин В.И., д.т.н., профессор кафедры «Технологии проектирования и эксплуатации летательных аппаратов в ФГБОУ ВПО (МАТИ)» Российского государственного технологического университета К. Э. Циалковского, г.Москва.