

Бесплатформенная инерциальная навигационная система для средств выведения: точность начальной выставки и периодическая калибровка*

Л. Н. Бельский, Л. В. Водичева, Ю. В. Парышева
АО НПО автоматики
им. академика Н.А. Семихатова
Екатеринбург, Россия
avt@npoa.ru

Аннотация—Рассматриваются вопросы обеспечения точности начальной выставки и реализации периодической калибровки, являющиеся проблемными с точки зрения внедрения БИНС в системы управления изделий ракетно-космической техники. Предлагаются пути решения этих проблем. Эффективность предлагаемых технических решений подтверждается методом математического моделирования и результатами экспериментальных исследований с блоком чувствительных элементов БЧЭ-501 разработки НПК «Оптолинк».

Ключевые слова—бесплатформенная инерциальная навигационная система, ракета-носитель, датчик угловой скорости, начальная выставка, калибровка

1. ВВЕДЕНИЕ

Общей тенденцией развития инерциальных навигационных систем, в том числе для изделий ракетно-космической техники (РКТ), является переход к платформенным ИНС, имеющим в сравнении с платформенными ряд преимуществ. В НПО автоматики им. академика Н.А. Семихатова расчетно-теоретические и экспериментальные исследования по созданию и внедрению БИНС в системы управления (СУ) изделий РКТ проводятся начиная с 70-х годов прошлого века.

НПО автоматики им. академика Н.А. Семихатова, основанное в 1952 году, является одним из ведущих российских предприятий в области разработки и производства систем управления для баллистических ракет и ракет-носителей (РН). С 1952 по 1992 годы главным конструктором предприятия был выдающийся инженер и ученый Николай Александрович Семихатов, 100-летие которого отмечается в 2018 году. НПО автоматики было первым предприятием в Советском Союзе, внедрившим в систему управления баллистической ракеты цифровую вычислительную машину (1960-е годы), систему астрокоррекции (середина 1970-х), аппаратуру спутниковой навигации (середина 1980-х).

В 1993 году в НПО автоматики началось создание СУ для модернизированной РН среднего класса Союз-2, разра-

ботанной в ракетно-космическом центре «Прогресс» (Самара), первый пуск которой состоялся в 2004 году. Затем в результате сотрудничества с Национальным центром космических исследований Франции и Европейским космическим агентством появилась модификация Союза-2, предназначенная для пусков с космодрома Куру на территории Французской Гвианы. В настоящее время Союз-2 выводит на различные орбиты спутники глобальных навигационных систем, спутники для дистанционного зондирования Земли и для научных исследований, а также корабль «Прогресс» с грузом для МКС. С 2004 года состоялось 75 успешных пусков, в том числе с космодрома Куру – 18 пусков.

Точность инерциальной навигации в РН Союз-2 обеспечивается платформенной ИНС, инерциальный измерительный блок (ИИБ) для которой разработан в НПО Электромеханики (г. Миасс). На этапе определения технического облика СУ РН Союз-2 этот платформенный ИИБ по совокупности характеристик имел явные преимущества в сравнении с платформенными инерциальными измерительными блоками (БИИБ), производимыми в России. Прогресс в разработке и производстве российских инерциальных датчиков навигационного класса точности создает предпосылки для перехода от традиционных платформенных ИНС к БИНС для СУ перспективных РН.

В настоящее время в НПО автоматики проводится разработка высокоточных БИНС для перспективных средств выведения – в рамках Федеральной космической программы на 2016–2025 годы; для многоорбитального суборбитального космического комплекса для космического туризма – по техническому заданию ООО «Космокурс». Некоторые проблемы построения таких БИНС рассматривались в докладах представителей НПО автоматики на предыдущих Санкт-Петербургских конференциях. В данном докладе рассматриваются проблемные вопросы, связанные с предполетной подготовкой. Один из них – это обеспечение точности начальной выставки, второй – реализация периодической калибровки БИИБ в процессе эксплуатации системы.

II. ОБЕСПЕЧЕНИЕ ТОЧНОСТИ НАЧАЛЬНОЙ ВЫСТАВКИ

Средства выведения, особенно для пилотируемых аппаратов, предъявляют достаточно жесткие требования к точности начальной выставки ИНС, что приводит к жестким требованиям к точностным параметрам ИИБ и их стабильности как от запуска к запуску, так и в запуске. Для платформенных ИНС точность начальной выставки достигается двухпозиционным гирокомпасированием и при необходимости – предполетной калибровкой. Погрешности начальной выставки (3σ , σ – среднее квадратическое отклонение) платформенной ИНС Союза-2 по горизонтированию имеют уровень 6-7 угл. с, по азимутальной выставке – 1,7 угл. мин, что обеспечивает требуемую точность выведения, в том числе и в инерциальном режиме.

Требования к точности горизонтирования корректируемых БИНС для перспективных изделий РКТ составляют (3σ) 15-30 угл. с, азимутальной выставки – от 5 до 30 угл. мин. Точность горизонтирования может быть обеспечена акселерометрами с точностными характеристиками, определяемыми требованиями полета: смещение нуля $(3-10) \cdot 10^{-4}$ м/с², погрешность масштабного коэффициента 0,002-0,01%, что при современном состоянии разработки акселерометров проблемы не представляет.

Требования к смещениям нуля датчиков угловой скорости (ДУС), определяющим точность гирокомпасирования, для начальной выставки могут оказаться более жесткими, чем это требуется для полета. Для обеспечения точности азимутальной выставки на уровне 5 угл. мин эти погрешности должны быть не более 0,015 угл. с/с (на широте 45°), тогда как для полета достаточно 0,05-0,1 угл. с/с. Анализ различных путей решения этой проблемы (в частности, использование высокоточных дорогостоящих ДУС, которые могут не удовлетворять заданным требованиям по массе и габаритам, либо выставка в азимуте с помощью оптических средств, что также является дорогостоящим решением) показал, что наиболее эффективным может оказаться применение простого поворотного устройства, на котором закрепляется БИИБ – известный способ автокомпенсации уходов в бесплатформенных системах курсоуказания. Точность азимутальной выставки БИНС аналогично платформенным ИНС может быть повышена с помощью двухпозиционного гирокомпасирования. Обработка информации БИИБ в процессе предстартовой подготовки осуществляется в двух положениях, развернутых друг относительно друга вокруг вертикальной оси; после разворота поворотное устройство и БИИБ жестко арретировуются.

При реализации двухпозиционного гирокомпасирования возникает задача выбора оптимального угла разворота. В работе [1] показано, что, если определяющим фактором, влияющим на точность гирокомпасирования, является нестабильность смещений нуля ДУС (либо уходов платформы) в запуске и разворот реализуется достаточно точно, оптимальным является угол разворота, равный 180°. В платформенных ИИБ точность разворота высока – датчики углов, установленные по осям карданова подвеса, имеют погрешности на уровне единиц секунд, поэтому двухпозиционное гирокомпасирование в Союзе-2 реализуется с разворотом на угол 180°.

Если необходимо исключить влияние погрешностей разворота на точность азимутальной выставки, измерительный блок нужно разворачивать на 90°. В работе [2] предложены процедура и методика определения азимутального угла и предстартовой калибровки смещений нуля всех ДУС, входящих в БИИБ, с помощью двухпозиционного гирокомпасирования с использованием достаточно грубого поворотного устройства. Методика предусматривает этапы грубой и точной выставки, которая при достаточном времени предстартовой подготовки может быть реализована двумя итерациями. Результаты математического моделирования показали, что при условии достаточной стабильности погрешностей БИИБ в запуске точность азимутальной выставки повышается на порядок, а погрешности смещений нуля ДУС уменьшаются в 10-20 раз. Требования к точности привязки оси разворота к приборным осям БИИБ и самому углу разворота составляют 1-2°.

Методика была подтверждена как математическим моделированием, так и стендовыми испытаниями с реальным БИИБ, в качестве которого был использован БЧЭ-501 разработки НПК «Оптолинк», построенный на базе трех волоконно-оптических гироскопов (ВОГ) и трех кварцевых маятниковых акселерометров с ортогональной ориентацией осей чувствительности (ОЧ) датчиков. Результаты испытаний, проведенных на стендах НПО автоматики, не только подтвердили, но по ряду параметров оказались даже лучше точностных характеристик, приведенных в спецификации разработчика. В частности, по результатам испытаний нестабильность от запуска к запуску смещений нуля акселерометров (3σ , по 10 запускам) составила 0,06±0,08 мг (согласно спецификации разработчика 0,1 мг); ВОГ – 0,015±0,045 угл. с/с (согласно спецификации 0,09 угл. с/с). БИИБ с такими точностными характеристиками позволяет реализовать горизонтирование с точностью 13-17 угл. с, определение азимутального угла – с точностью $(3,4-10,3) \cdot (\cos\varphi)^{-1}$ угл. мин (φ – широта места старта), что для ряда применений является достаточным.

При оценке смещений нуля ДУС по методике гирокомпасирования было проведено 7 запусков, в каждом из которых БЧЭ-501 выставлялся последовательно в 5 ориентаций, развернутых одна относительно другой на угол 90°. После второй итерации максимальное значение погрешности смещения нуля ДУС (3°) составило $2,6 \cdot 10^{-4}$ угл. с/с, что дает погрешность оценки азимутального угла на уровне $3,6 \cdot (\cos\varphi)^{-1}$ угл. с. Таким образом, даже с учетом остальных факторов (погрешности акселерометров, неточность поворотного устройства, ветровые колебания в процессе предстартовой подготовки) можно обеспечить погрешность азимутальной выставки на уровне платформенной ИНС.

Если в процессе предстартовой подготовки подъем РН из горизонтального в вертикальное положение осуществляется при включенной навигационной системе, точность гирокомпасирования может быть повышена за счет использования двухпозиционной схемы с разворотом вокруг горизонтальной оси. В первом положении при горизонтальной ориентации изделия калибруется ДУС, ориентированный вертикально; после разворота в вертикальное положение этот ДУС ориентируется горизонтально и по

нему определяется азимутальный угол. Если угол между осью разворота и восточной осью более 10° , этот способ позволяет повысить точность гирокомпасирования на один-два порядка [3].

III. КОНТРОЛЬ ТОЧНОСТИ И КАЛИБРОВКА БИИБ

В процессе эксплуатации системы необходимо контролировать точностные характеристики и периодически проводить калибровку БИНС, что требует специальных ориентаций и разворотов БИИБ относительно географической системы координат. Для платформенных ИНС организация таких разворотов трудности не представляет, калибровка реализуется в составе изделия в процессе предстартовой подготовки на стартовом комплексе либо в процессе регламентных проверок на техническом комплексе, где изделие находится в горизонтальном положении.

Контроль точностных характеристик БИИБ в составе изделия может быть проведен только косвенно: по модулям измеряемых векторов кажущегося ускорения и угловой скорости и углу между ними. Калибровка БИИБ с целью уточнения параметров модели погрешностей, обусловленных старением, а также межполетная калибровка при его многократном использовании, может быть осуществлена только при возможности демонтажа и последующей установки БИИБ либо БИНС в целом на изделие. Такая возможность закладывается в перспективные изделия РКТ. В частности, по требованию заказчика многократного суборбитального космического комплекса технические решения по системе управления должны обеспечивать удобство обслуживания и оперативную замену отказавших элементов и агрегатов на этапе подготовки.

Известно [4], [5], что для стендовой калибровки основных точностных параметров БИИБ достаточно простого двух- или трехосного поворотного стола с точностью на уровне $1-2^\circ$. Этот стол должен входить в состав аппаратуры технического комплекса вместе с контрольно-проверочной аппаратурой, включающей технологический интерфейс для считывания выходной информации БИИБ, вычислительные средства и программное обеспечение для реализации первичной и вторичной обработки. Это позволит проводить калибровку и техническое обслуживание БИИБ на месте без отправки на завод. Результаты калибровки могут использоваться при последующих пусках в качестве паспортных параметров БИИБ.

Разработанное в НПО автоматики методическое и математическое обеспечение стендовой калибровки не требует прецизионных вращающихся стенов, позволяя при этом откалибровать все основные погрешности БИИБ, включая масштабные коэффициенты и углы привязки ОЧ ДУС. Исходя из физического смысла, процесс калибровки разбивается на три этапа: 1) калибровка масштабных коэффициентов, смещений нулей и углов взаимной привязки

ОЧ акселерометров; 2) калибровка смещений нуля ДУС; 3) калибровка масштабных коэффициентов и углов привязки ОЧ ДУС.

Первые два этапа реализуются в статическом режиме по прямым измерениям проекций векторов нормальной реакции опоры на ускорение силы тяжести и скорости вращения Земли в различных программных ориентациях БИИБ. После анализа существующих методик прямой калибровки, включая скалярный способ [4], была разработана методика, обеспечивающая точность на уровне скалярного способа, не требующая точной выставки в программные положения и имеющая более простую алгоритмическую реализацию. Методика использует программные ориентации, обеспечивающие максимальную наблюдаемость различных групп параметров, с внесением поправок на физические углы «негоризонта», формируемых по показаниям горизонтальных акселерометров. На первом этапе БИИБ разворачивается в 9 программных ориентациях с длительностью обработки информации 5 мин в каждой; на втором этапе – в 3 программные ориентации с длительностью обработки информации 10-15 мин.

По аналитическим оценкам методические погрешности калибровки акселерометров имеют уровень произведения физического угла «негоризонта» на погрешность акселерометра и составляют 1-2% от величины оцениваемых параметров. Эти погрешности могут быть уменьшены еще на порядок применением итерационной процедуры. Результаты оценки нестабильности точностных параметров от запуска к запуску (по 7 запускам) акселерометров БЧЭ-501 приведены в табл. 1. При расчетах во второй итерации учитывались средние в запуске оценки параметров, полученные в первой итерации, то есть оценки, полученные во второй итерации, характеризуют погрешности первой итерации. Как видно из табл. 1, экспериментальные оценки близки к аналитическим. В результате погрешности калибровки акселерометров будут определяться в основном нестабильностью оцениваемых параметров в запуске.

При калибровке смещений нуля ДУС на втором этапе учитываются погрешности акселерометров, оцененные на первом этапе. По аналитическим оценкам, погрешности оценки смещений нуля ДУС представляют собой сумму двух составляющих: 1) произведения физического угла «негоризонта» вокруг восточной оси на погрешность эквивалентного северного акселерометра; 2) произведения физического угла «негоризонта» вокруг северной оси на погрешность эквивалентного восточного ДУС. Поскольку акселерометры предварительно откалиброваны, определяющей является погрешность смещения нуля ДУС. Погрешность калибровки также составляет 1-2% от оцениваемой величины. Аналитические оценки подтверждаются результатами оценки нестабильности смещения нуля ДУС БЧЭ-501 от запуска к запуску (по 7 запускам), которые приведены в табл. 2.

ТАБЛИЦА I

Нестабильность (3σ) точностных параметров акселерометров БЧЭ-501 от запуска к запуску					
Масштабные коэффициенты, %		Смещения нуля, m/s^2		Углы взаимной привязки ОЧ, угл. с	
1-ая итерация	2-ая итерация	1-ая итерация	2-ая итерация	1-ая итерация	2-ая итерация
$(5,0 \div 7,7) \cdot 10^{-3}$	$(2,1 \div 6,1) \cdot 10^{-5}$	$(5,5 \div 8,3) \cdot 10^{-4}$	$(1,4 \div 6,7) \cdot 10^{-5}$	13,2 \div 14,0	0,3 \div 1,0

ТАБЛИЦА II

Нестабильность (3σ) смещений нуля ДУС БЧЭ-501 от запуска к запуску, угл. сек/с					
По оси X		По оси Y		По оси Z	
1-ая итерация	2-ая итерация	1-ая итерация	2-ая итерация	1-ая итерация	2-ая итерация
$3,42 \cdot 10^{-2}$	$1,83 \cdot 10^{-4}$	$2,14 \cdot 10^{-2}$	$1,69 \cdot 10^{-4}$	$2,73 \cdot 10^{-2}$	$2,74 \cdot 10^{-4}$

На третьем этапе реализуется косвенный метод калибровки, состоящий из серии поворотов, каждый из которых ограничен парой фиксированных ориентаций. Метод аналогичен методу, внедренному и широко используемому в США и Европе для калибровки в полевых условиях авиационных БИНС [5]. Метод позволяет оценить все точностные параметры БИИБ, кроме масштабных коэффициентов акселерометров и смещений нуля ДУС. Эти параметры оцениваются на первом и втором этапе и учитываются на третьем этапе. Результаты калибровки смещений нуля и углов привязки ОЧ акселерометров БЧЭ-501 с помощью косвенного метода близки к оценкам, полученным прямой калибровкой (табл. 1). Оценки нестабильности масштабных коэффициентов и углов привязки ОЧ ДУС от запуска к запуску, полученные косвенным методом, приведены в табл. 3.

ТАБЛИЦА III

Нестабильность (3σ) точностных параметров ДУС БЧЭ-501 от запуска к запуску			
Масштабные коэффициенты, %		Углы взаимной привязки ОЧ, угл. с	
1-ая итерация	2-ая итерация	1-ая итерация	2-ая итерация
$(0,6 \div 1,6) \cdot 10^{-2}$	$(0,15 \div 1,25) \cdot 10^{-3}$	$(0,6 \div 1,6) \cdot 10^{-2}$	$(0,15 \div 1,25) \cdot 10^{-3}$

IV. Выводы

Проведенные исследования показывают принципиальную возможность обеспечения заданной точности начальной выставки и периодической калибровки БИНС для из-

делий ракетно-космической техники с помощью достаточно простого и недорогого оборудования.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Бельский, Л.Н. Повышение точности гирокомпасирования за счет выбора ориентаций осей чувствительности измерителей / Л.Н. Бельский, Л.В. Водичева // Гирокоспия и навигация. 2000. № 3(30). С. 21–34.
- [2] Водичева, Л.В. Предстартовая выставка и калибровка гибридной инерциальной измерительной системы / Л.В. Водичева, Ю.В. Парышева, Е.Л. Алиевская // XXI Санкт-Петербургская международная конференция по интегрированным навигационным системам. СПб.: ОАО «Концерн «ЦНИИ Электроприбор», 2014. С. 316–318.
- [3] Бельский, Л.Н. Повышение точности гирокомпасирования бесплатформенной инерциальной навигационной системы при предстартовом подъеме летательного аппарата / Л.Н. Бельский, Л.В. Водичева, Ю.В. Парышева, Е.Л. Алиевская // XIX Санкт-Петербургская международная конференция по интегрированным навигационным системам. СПб.: ОАО «Концерн «ЦНИИ Электроприбор», 2012. С. 104–106.
- [4] Измайлов, Е.А., Скалярный способ калибровки и балансировки бесплатформенных инерциальных навигационных систем / Е.А. Измайлов, С.Н. Лепе, А.В. Молчанов, Е.Ф. Поликовский // XV Санкт-Петербургская международная конференция по интегрированным навигационным системам. СПб.: ОАО «Концерн «ЦНИИ Электроприбор», 2008. С. 145–154.
- [5] Diesel J.W. Calibration of a Ring Laser Gyro Inertial navigation System // 13th Biennial Guidance Test Symposium, Holloman AFB, New Mexico, V. 1, 1987. 38 pp.