

ЭВОЛЮЦИЯ ТЕХНИЧЕСКИХ РЕШЕНИЙ В ПОСТРОЕНИИ СИСТЕМ АСТРОИНЕРЦИАЛЬНОЙ НАВИГАЦИИ

А.С. Болотнов
Г.В. Кондрашкин

bolotnov.a@bmstu.ru
kondrashkingv@bmstu.ru

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация

Аннотация

Рассмотрены преимущества автономных астроинерциальных навигационных систем, показана перспектива их создания. Сформулирован круг задач. Приведены основные стадии развития астроинерциальных навигационных систем зарубежного и отечественного производств для объектов авиационного и морского применения. Перечислены традиционные морские астронавигационные приборы. Выполнен анализ развития и принципов построения астроинерциальных навигационных систем, приведены описание, классификация, а также функциональные и конструктивные схемы систем. Рассмотрены предпосылки для построения высокоточных перспективных астроинерциальных навигационных систем нового поколения. Проанализированы конструкция астроинерциальной навигационной системы нового поколения и ее преимущества по сравнению с существующими. Показана возможность применения указанной системы в морских условиях. Рассмотрена гиросtabilизированная астроинерциальная навигационная система со спутниковым приемником. Обобщены результаты и приведены выводы о перспективности астроинерциальных навигационных систем нового поколения в авиационных и морских объектах

Ключевые слова

Астронавигация, астроинерциальная навигационная система, астродатчик, БИНС, инерциальная навигационная система, навигация

Поступила 28.08.2023

Принята 06.03.2024

© Автор(ы), 2024

Введение. Одним из перспективных направлений развития навигационных комплексов мобильных объектов [1] является создание интегрированных астроинерциальных навигационных систем (АИНС), в которых системы инерциальной навигации связаны с астрономическими средствами измерения навигационных параметров. Астрономические системы автономны и помехоустойчивы, имеют неограниченную дальность действия, их можно

применять в любой точке земного шара [2]. Точность решения навигационных задач с помощью астрономических средств измерения не зависит ни от времени измерения, ни от дальности пути следования объекта. Совместное применение средств астрономической, инерциальной навигации и ориентации позволяет определять угловые положения объекта с точностью десятков угловых секунд.

В России астронавигация долгое время являлась основным навигационным средством для авиационных и морских объектов. Однако достижения в области инерциальных навигационных систем (ИНС), комплексированных с радионавигационными системами, в первую очередь с глобальными спутниковыми системами GPS и ГЛОНАСС, свели роль астронавигации к минимуму, к роли вторичных навигационных систем.

Наряду с высокой точностью, спутниковым навигационным системам (СНС) остаются присущи неавтономность, высокая вероятность подавления сигнала помехами или его увода, отсутствие надежного приема информации в ряде географических районов. В связи с этим закономерным является особое внимание к применению автономных систем коррекции на базе астрономических средств измерения, как самым надежным для контроля бортовых и корабельных навигационных систем. Этому способствуют следующие преимущества астрономических средств измерения:

- возможность определения местоположения объекта и поправки системы указания курса в любой точке земного шара;
- помехозащищенность;
- возможность выполнения астрономических и навигационных измерений даже при кратковременном наблюдении ограниченного участка небесной сферы;
- автономность;
- независимость точности решения навигационных задач с применением астрономических средств от времени измерения и дальности пути следования объекта.

В настоящее время существуют предпосылки для создания нового поколения астрономических навигационных систем, удовлетворяющих требованиям заказчика по точности решения навигационных задач, имеющих повышенные эксплуатационные характеристики, меньшие габаритные размеры и массу, базирующихся на идее соединения методов инерциальной навигации и астрономической обсервации небесных светил.

Цель настоящей работы — определение основных направлений развития АИНС. К ним относятся:

- анализ используемых в прошлом и настоящем технических средств систем авиационных и морских объектов;
- изучение истории развития систем, применяемых на авиационных и морских объектах;
- анализ принципов построения АИНС;
- определение наиболее перспективных направлений развития астрономических систем.

Астрономические навигационные средства, применяемые на авиационных объектах. До появления средств радиотехнической и спутниковой навигации задачи определения местоположения и указания курса решали с помощью механических и оптико-механических астрономических приборов. Например, в конце 1950-х годов для самолета Vickers VC-10 был разработан специализированный секстант с оптическим наведением [3], в 1960-е годы такой же прибор спроектирован для Boeing 737. К моменту массового выпуска эти технические средства устарели, поскольку разработанные в то время радионавигационные, а затем и СНС стали более точными и широко распространенными.

В послевоенные годы в СССР бурное развитие получили технологии двойного назначения, к которым относится и астронавигация. С началом холодной войны возникла необходимость в проектировании средств доставки на большие расстояния с высокой скоростью, а также

в коррекции ошибок инерциальных систем, входивших в контур управления ракетами. Результатом решения стала АИНС.

Идея разработанной АИНС (рис. 1) заключалась в сравнении положения объекта, определяемого ИНС, с положением объекта относительно звезд. Это значительно повысило общую точность системы и позволило скорректировать ошибки навигационных параметров ИНС. Впервые эта возможность реализована на крылатой ракете SM-62 Snark (США).

Первые испытания ракеты в 1957 г. показали, что при полете в район цели на тысячи километров с высокими до-



Рис. 1. Модернизированная астрономическая система для ракеты SM-62 Snark

звуковыми скоростями вероятность круговой ошибки составила 27 км, что было неприемлемо даже для ядерного заряда. Испытания, проведенные с модернизированной астрономической системой в 1958 г., показали результат 7 км, что явилось огромным достижением для того времени.

В последующие годы концепция была радикально усовершенствована и блоки астрономических систем стали устанавливать на мобильные объекты дальнего радиуса действия, включая практически все межконтинентальные баллистические ракеты, а также стратегический самолет-разведчик SR-71 Blackbird. На самолете, максимальная скорость которого 3 М, была установлена АИНС NAS-14V2 фирмы Nortronics с астрономическим блоком (рис. 2) [4]. Блок-схема АИНС NAS-14V2 приведена на рис. 3.



Рис. 2. Астроинерциальная навигационная система NAS-14V2 (а) и астрономический блок (б)

Звездный (астрономический) датчик, представляющий собой узкопольный телескоп, установлен на карданном подвесе (см. рис. 3). С помощью своей системы позиционирования датчик, вращаясь, осуществляет круговое сканирование, постепенно изменяя угол возвышения относительно платформы. В процессе сканирования система определяет положение трех из 64 звезд, занесенных в память компьютера. В режиме синхронизации с системой единого времени происходит сравнение координат звезд в связанной и инерциальной системах координат, уточнение местоположения и курса самолета на высоте до 29 тыс. м и скорости 3 М. Одновременно с этим носитель получает информацию от радиостанций, чтобы переключиться на запасной режим радионавигации в случае потери оптического сигнала звездного датчика.

Усовершенствованные АИНС NAS-14V2 нашли применение и на других стратегических самолетах, в первую очередь на бомбардировщике-невидимке В-2 Spirit. Система установлена слева от кабины возле воздухозаборника В-2 Spirit (рис. 4).

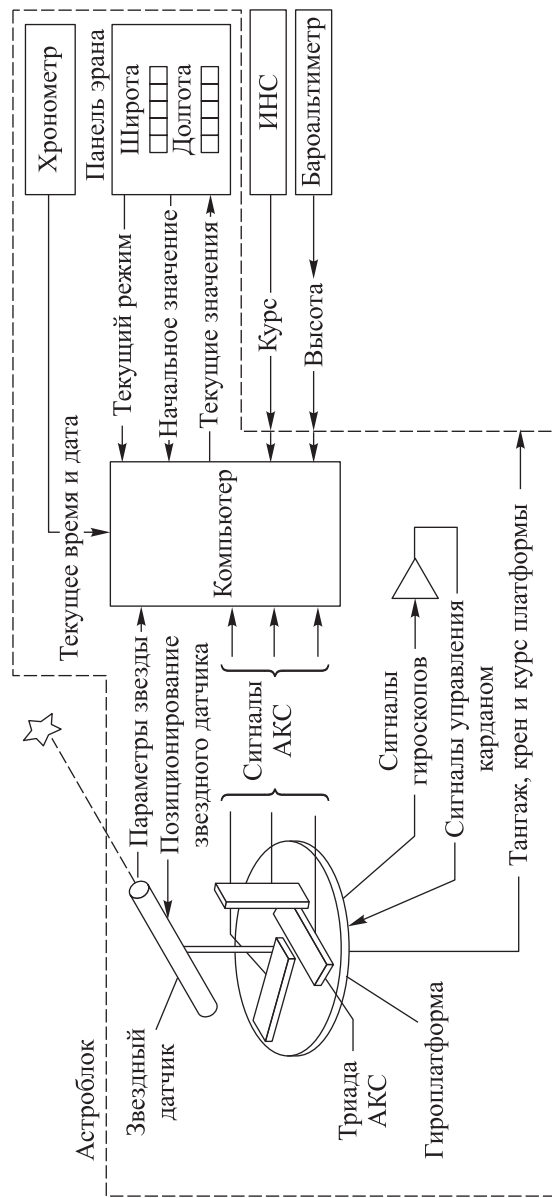


Рис. 3. Блок-схема АИНС NAS-14V2 (АКС — акселерометр)

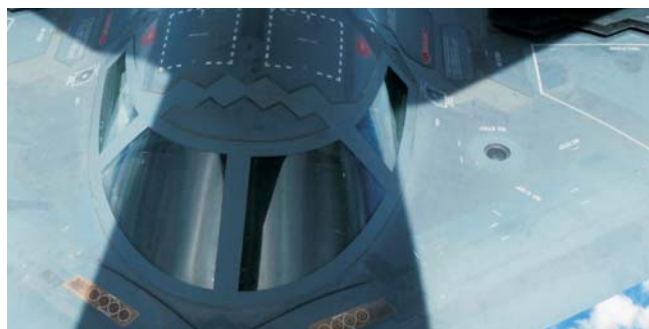


Рис. 4. Расположение АИНС NAS-14V2 на борту B-2 Spirit

Для обсервации небесных светил астрономические корректоры нового поколения используют датчик с достаточно большим полем зрения. Это направление начало развиваться в 1990-е годы в виде систем с оптическим широкоугольным объективом Startracker (OWLS) и голографической линзой с многопиксельной матрицей, на которую проецируются обнаруженные светила (рис. 5) [5].

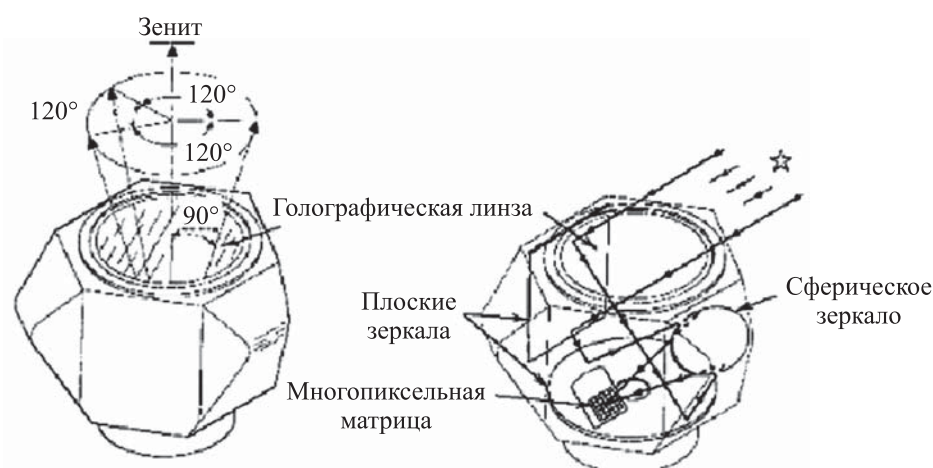


Рис. 5. Система с оптическим широкоугольным объективом Startracker (OWLS) и голографической линзой

Судя по тому, что практически настоящая система не применяется, остается предполагать, что дальше лабораторного макета эта разработка не пошла.

Перейдем к описанию ИНС. Конструкции таких систем можно классифицировать следующим образом [6].

1. Платформенная ИНС, связанная со звездным датчиком, находящимся на гиropлатформе.

2. Платформенная ИНС, соединенная с отдельно расположенным звездным датчиком.

3. Бесплатформенная ИНС (БИНС), связанная со звездным датчиком, находящимся на гиropлатформе.

4. Бесплатформенная ИНС, соединенная с отдельно расположенным звездным датчиком.

Конструкция ИНС первого типа используется на американской ракете Trident 2. В ней для определения ориентации носителя узкопольный звездный датчик (поле зрения 3°) отслеживает конкретную звезду путем наведения с помощью системы карданов. Таким образом, вибрация ракеты не влияет на звездный датчик. Поскольку звездный датчик и инерциальный модуль установлены на отдельных платформах, структура системы управления получается достаточно сложной, а сама конструкция дорогой.

Конструкция ИНС второго типа применяется в системе управления космического корабля «Колумбия». Ввиду того, что наведение на светило отсутствует, для идентификации звездной карты датчик построен по схеме с широким полем зрения (более 10°). Ориентация носителя в системе координат звездного датчика сравнивается с ориентацией в системе координат платформы, вследствие чего ошибки измерения датчиков угла платформы могут быть скорректированы. В описываемой конструкции звездный датчик напрямую соединен с носителем, что приводит к снижению точности обсервации вследствие воздействия вибрации объекта. В этой связи возрастают требования к динамическим характеристикам датчика.

В конструкции ИНС третьего типа используются БИНС и звездный датчик, наводимый на конкретную звезду. Система управления при этом похожа на систему управления в конструкции первого типа, за исключением того, что вычислитель БИНС строит свою платформу виртуально. Конструкция получается дешевле и надежнее, однако возрастают требования к гироскопам и АКС.

Конструкция ИНС четвертого типа имеет серьезные преимущества не только вследствие простоты и дешевизны, но и из-за своих эксплуатационных характеристик: надежности, прочности, стойкости и др. Возрастают требования к техническим характеристикам, чувствительным элементам и звездному датчику. Решение этой проблемы становится возможным с развитием новых технологий и, в первую очередь, с появлением КМОП-технологии (комплементарная структура металл–оксид–полупроводник).

С точки зрения будущих тенденций развития АИНС бесплатформенного типа имеет лучшие перспективы и является важнейшей в развитии астрономических навигационных систем.

Самая распространенная в мире АИНС фирмы Northrop Grumman LN-120G Stellar-Inertial-GPS (рис. 6) относится к третьему типу конструкции АИНС. В основном она используется на самолетах-разведчиках



Рис. 6. Астронерциальная навигационная система фирмы Northrop Grumman LN-120G Stellar-Inertial-GPS

RC-135 [7]. Конструктивно система построена на базе астрономического следающего блока БИНС LN-20 и лазерной БИНС LN-100 со встроенным приемником СНС [8], имеет встроенный каталог звездного неба на 57 звезд, положение которых определяется в любое время суток.

Принцип работы АИНС следующий: астровизирующее устройство (АВУ) с узким полем зрения вращается в двухосевом кардановом подвесе относительно инерциального измерительного блока (рис. 7). При такой конструкции в дополнение к ошибкам БИНС, звездного датчика и взаимной юстировки между ними появляются ошибки механических приводов, а также карданова подвеса АВУ. Режимы работ и основные параметры системы приведены



Рис. 7. Конструкция АИНС LN-120G

в таблице (масса системы составляет 47,2 кг без блока управления, габаритные размеры — $462 \times 363 \times 366$ мм³, наработка на отказ — 4000 ч).

Режимы работы и основные параметры АИНС на базе БИНС LN-20 и БИНС LN-100 [8]

Параметр	Астроинерциальный режим (СКО)	Астроинерциальный режим + GPS + БИНС (СКО)
Долгота, широта	$300 + 300t^{1/2} \text{ (ч) м}$	$\leq 20 \text{ м}$
Скорость	$0,37 + 0,12t^{1/2} \text{ (ч) м/с}$	$0,2 \text{ м/с}$
Курс	24 с (угл.)	$\leq 20 \text{ с (угл.)}$
Крен, тангаж	$12 + 0,15t^{1/2} \text{ (ч) мин (угл.)}$	$1,2 \text{ мин (угл.)}$

К настоящему времени АИНС LN-120G остается наиболее распространенной в США и считается лучшей системой для навигационного обеспечения задач разведки, мониторинга земной поверхности и звездного неба. Однако появилась информация, что на носителе F-35 установлена оптическая система с распределенной апертурой [3], которая может использоваться как средство высокоточной астронавигации. Каждый элемент оптической системы может хранить в памяти устройства определенное число светил. В этом случае благодаря распределенной системе общее число звезд может увеличиться до нескольких тысяч и тем самым увеличить общую точность распознавания.

Завершая анализ зарубежных средств астронавигации, следует сказать, что в настоящее время в ряде зарубежных работ [3] обсуждается следующая идея. В качестве компенсации СНС предлагается создать виртуальную систему СНС, используя высоколетящие самолеты с астрономическими навигационными системами, не поддерживающими спутниковые стандарты. Такая концепция могла бы обеспечить централизованную замену спутниковых станций и теоретически навигацию для авиационной техники, по крайней мере, в течение конечного периода времени и в ограниченном географическом районе. Другими словами, благодаря высоколетящим носителям, оснащенным астрономическими навигационными системами, ведомые ими самолеты получают всю необходимую навигационную информацию.

Одновременно с этим в СССР шли аналогичные разработки авиационной и космической техники, включая астронавигацию. От успехов

в области ракетостроения и стратегического самолетостроения в 1960-е годы во многом зависела обороноспособность СССР. Первые технические средства астронавигации были разработаны и проверены на самолетах в 1948–1955 годы, а несколько позже, в 1963 г., и на крылатой магистральной ракете [9]. Для создания новой системы навигации сформулированы следующие задачи: разработка автономной системы, следящей за звездами, создание на подвижном объекте искусственной вертикали, построение бортового вычислителя.

В 1962–1967 гг. в Московском институте электромеханики и автоматики разработана первая авиационная астрономическая инерциальная система (МАИС) для сверхзвукового бомбардировщика-ракетоносца. Система МАИС не прошла производственную проверку, но многие принципиальные решения были использованы при разработке системы Л-14МА. Система Л-14МА находится в эксплуатации с 1979 г., изготовлено порядка 200 комплектов [10].

Система Л-41 имеет точностные показатели более высокого уровня по отношению к астроинерциальной системе первого поколения Л-14 при меньшей массе и более высоких показателях надежности. Конструктивной особенностью системы Л-41 является расположение астрономического корректора на азимутальной оси гироплатформы.

В 1980-е годы была разработана и серийно выпускалась астроинерциальная система АВ-1СМ (рис. 8) для определения совместно с гироскопической инерциальной системой и бортовым вычислительным устройством координат местоположения самолета при длительной продолжительности полетов [11].



Рис. 8. Астроинерциальная система АВ-1СМ

Астроинерциальным системам первого и второго поколения присущи недостатки, сужающие область их применения. Точность и надежность систем Л-14 и Л-41 ограничиваются большим числом вращающихся рамок, необходимостью высокой точности от преобразователей углов поворота, а также требованием регулярных наземных регулировок. Число указанных ограничений существенно уменьшается при проектировании системы астронавигации на базе лазерной БИНС. Так реализована астрономическая навигационная система АНС-2009 [12], в которой

БИНС и АВУ объединены в единую конструкцию, а иллюминатор АВУ при установке на борт закрывает отверстие в обшивке фюзеляжа. Системы приборных координат БИНС-СП и АВУ согласуются устройством оптико-электронной привязки [13]. Блок-схема АНС-2009 приведена на рис. 9.

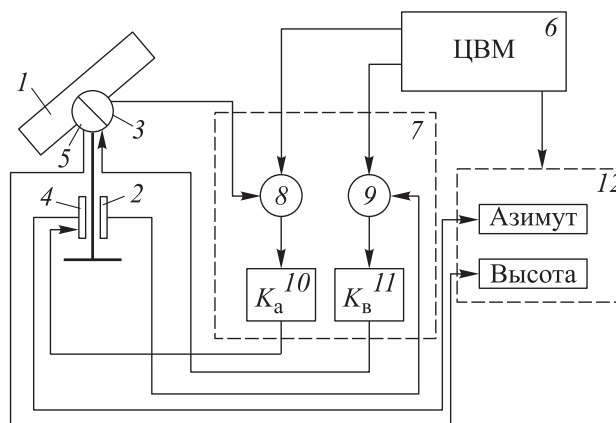


Рис. 9. Блок-схема АНС-2009:

- 1 — телеблок в кардановом подвесе; 2, 3 — датчики углов по азимуту и высоте;
4, 5 — двигатели отработки углов по азимуту и высоте; 6 — центральная
вычислительная машина; 7 — блок следящих систем отработки углов
наведения визирной оси телеблока; 8, 9 — разностные схемы по азимуту
и высоте; 10, 11 — блоки коррекции по азимуту и высоте (K_a и K_b);
12 — блок вычисления угловых поправок

Несмотря на то, что в качестве построителя инерциальной вертикали в системе АНС-2009 использована БИНС, совсем отказаться от механических вращающихся частей в АИНС не удалось. Конструкция системы содержит двухосевой кардан, который является источником погрешностей измерения. Кроме того, бортовые вычислители астроинерциальных систем карданного типа содержат неполный перечень данных небесных светил, что является ограничением применения.

Объединение современных оптических звездных датчиков и прецизионных БИНС с использованием развитой вычислительной среды создало новые возможности для построения высокоточных АИНС.

К такому решению привело несколько факторов. Во-первых, разработаны многопиксельные матричные фотоприемники на основе приборов с зарядовой связью и КМОП-структур. Во-вторых, на базе таких матриц разработаны приборы звездной ориентации с широким полем зрения. В-третьих, разработаны малогабаритные прецизионные БИНС.

Жесткое соединение приборов звездной ориентации с широким полем зрения и малогабаритных прецизионных БИНС на одной механической платформе, при котором оба приборных базиса постоянно и неизменно ориентированы относительно друг друга, привело к созданию нового поколения АИНС.

По сравнению с предыдущим поколением такие системы имеют более высокую точность. Отсутствие подвижных механических частей приводит к снижению массогабаритных показателей, повышенной надежности и простоте эксплуатации. Примером такой системы служит АИНС нового поколения [14], приведенная на рис. 10.



Рис. 10. Астроинерциальная система нового поколения

Благодаря широкому полю зрения оптического звездного датчика не требуется его наведение на отдельные светила. Параметры оптической системы и светочувствительной матрицы подобраны таким образом, что обеспечивается гарантированное попадание не менее четырех различных звезд в его поле зрения [15, 16]. Звездный датчик выполнен на основе радиационностойких (при низких температурах), крупноформатных, малошумящих, высокоскоростных КМОП-матриц. Указанная конструкция полностью удовлетворяет требованиям заказчиков по своим техническим и эксплуатационным характеристикам и имеет значительные перспективы при разработке новых образцов авиационной техники.

Астрономические навигационные средства, применяемые на морских объектах. Традиционно в качестве ориентиров использовались навигационные звезды. Мореплаватели и путешественники ориентировались по единственному и доступному им источнику информации — звездному небу или Солнцу. В процессе развития средств и методов астронавигации применялись такие средства морской навигации, как гномон, градшток, квадрант, астролябия, которые позволяли судам ориентироваться в море.

Важной вехой в развитии средств морской астронавигации явилось изобретение секстана — прибора для измерения высот небесных светил (Солнца, Луны, планет, звезд). Работа секстана основана на принципе совмещения двойного отражения одного предмета (светила) с прямым изображением другого (горизонта).

В дальнейшем в течение многих лет секстан совершенствовался, улучшалась его конструкция, возрастала точность измерения углов. Вместе с тем опыт применения выявил существенный недостаток в использовании секстана на подводных лодках: во время определения местоположения значительно снижалась их скрытность. Возникла идея создания перископного надводного секстана, которая была реализована в послевоенный период. В 1949 г. создан и принят на вооружение подводных лодок универсальный перископ с гиригоризонтом, положивший начало подводной астронавигации. Через перископ с подводной лодки, находящейся в подводном положении, можно наблюдать за поверхностью моря и воздушной обстановкой, а также измерять высоты и азимуты небесных светил в целях уточнения местоположения. В 1955–1958 гг. разработаны навигационные комплексы «Плутон-1», «Север-Н», «Сила-Н», высокоточные двухканальные перископы «Лира», «Сегмент», которые позволяли одновременно измерять высоты и азимуты небесных светил, что сокращало время нахождения головной части перископа над поверхностью воды [17, 18].

В 1964–1969 гг. был разработан новый тип астрономических навигационных систем — астрономический корректор «Волна» — прецизионный оптический перископный астрономический корректор с жесткими оптико-механическими связями внутренних отчетных баз с контрольными базовыми элементами, служащими связующим элементом привязки палубной системы координат с навигационным комплексом корабля.

В отличие от подводных лодок работы по созданию астрономических навигационных систем надводных кораблей ВМФ не носили столь направленного и последовательного характера. За основу астрономических навигационных систем надводных кораблей брались их перископные аналоги для подводных лодок. Первые астрономические навигационные системы надводных кораблей были разработаны в 1960-е годы. Исключение представляет оптический астрономический пеленгатор (ОАП) «Чакон-Б», разработанный специально для надводного корабля [19]. Аналог такого пеленгатора приведен на рис. 11 [20].

В 1990-е годы в связи с финансовыми проблемами наметилась тенденция на исключение дорогостоящих астрономических навигационных систем из состава навигационного вооружения кораблей ВМФ. Основное внимание при этом было сосредоточено на развитии ИНС и СНС. Однако ИНС требует постоянной коррекции, особенно часто в высоких широтах, а СНС является системой мирного времени, поскольку подвержена влиянию средств радиоэлектронного противодействия противника, и используется исключительно для коррекции местоположения, но не курса корабля.

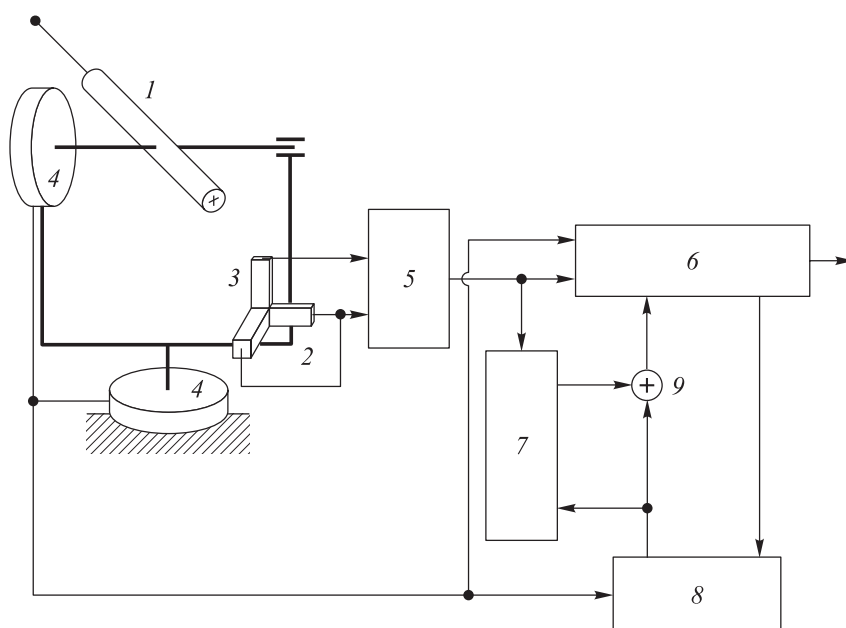


Рис. 11. Оптический пеленгатор надводного корабля:

1 — визирующее устройство в кардановом подвесе; 2, 3 — акселерометры с горизонтальной и вертикальной осями чувствительности; 4 — датчики нестабилизированных углов места и курса; 5 — блок первичной выработки углов качки; 6 — блок прямого преобразования; 7 — фурье-анализатор (для выработки поправок на ускорение орбитального движения); 8 — блок обратного преобразования (для выработки углов качки); 9 — суммирующее устройство (для добавления поправок, выработанных фурье-анализатором)

Начиная с 2018 г. в связи с нестабильностью и недостаточной технической надежностью приемоиндикаторов СНС в ВМФ возобновился интерес к астрономическим средствам коррекции навигационных комплексов, или ИНС. Новые технологии и передовая современная элементная база позволяют существенно повысить эффективность астрономических навигационных систем, уменьшить стоимость их разработки и сделать их привлекательными для включения в состав навигационного вооружения перспективных кораблей ВМФ.

В настоящее время разработан перспективный экспериментальный образец астроинерциальной системы для применения на морских объектах (рис. 12) [21].

Указанное изделие — гиростабилизированная астрономическая навигационная система с навигационным приемником сигналов СНС. Астрономическая навигационная система включает в себя АБУ, состоящее из звездного и солнечного датчиков, позволяющее круглосуточно наблюдать

за небесными светилами. Бесплатформенная инерциальная система предназначена для выработки инерциальной вертикали, необходимой для пересчета угловых координат небесных светил из инерциальной второй экваториальной системы координат в местную. Приемник СНС служит для получения метки единого времени.



Рис. 12. Перспективный экспериментальный образец астроинерциальной системы на борту судна во время корабельных испытаний

Отличительной особенностью конструкции астроинерциального блока разработанной системы является жесткое соединение оптических датчиков с инерциальной системой на единой платформе. Это позволяет обеспечить неподвижное соединение базисов приборов и сводит к минимуму погрешности пересчета углов пространственной ориентации, измеренных этими приборами.

Астроинерциальный блок помещен в трехосный карданный механизм. При этом заданное угловое положение блока обеспечивают электромеханические исполнительные устройства. Такой блок может функционировать в условиях качки, при наведении на светила, находящиеся далеко от зенита, и при работе с отдельными участками неба, свободными от облаков.

Астроинерциальный блок (изделие) обеспечивает непрерывное автономное определение параметров ориентации измерительных осей объекта, их местоположения в географической системе координат и выдачу их потребителю независимо от пространственного и углового положений объекта.

В заключение раздела отметим следующее. В зарубежной открытой печати нет сведений о новейшем применении морских астрономических навигационных систем для навигационного обеспечения решения кораблями боевых задач.

Обобщение результатов работы и выводы. Астрономические средства и методы определения направлений и координат используются в объектах двойного назначения как авиационного, так и морского исполнения. В отличие от ИНС и систем наведения, астрономическая навигационная система не имеет ограничений по географической широте места применения, т. е. применяется глобально.

В результате анализа современного состояния астрономических средств двойного назначения выявлено, что зарубежные страны являются лидерами в этих вопросах. Например, АИНС LN-120G серийно производится уже более 15 лет. Те немногочисленные образцы астрономических систем, которые выпускаются в России, только приближаются по своим техническим параметрам к зарубежным аналогам. Очевидно, что спутниковая навигация имеет существенные недостатки, поэтому тематике астронавигации будет уделяться все большее значение.

В настоящей работе рассмотрены основные направления развития АИНС для применения на авиационных и морских объектах. Выполнен анализ используемых ранее и в настоящее время технических средств АИНС, рассмотрена история развития таких систем и проанализированы принципы их построения.

На основе проведенного анализа можно сделать вывод о том, что за последние несколько десятков лет АИНС обеспечили развитие навигационных комплексов ряда мобильных объектов. Прогресс в области оптических технологий позволил создать астрономические системы нового поколения, сочетающие широкопольные звездные датчики на основе КМОП-структур с малогабаритными прецизионными БИНС. Применение упомянутых перспективных систем в объектах авиационной и морской техники позволит решать задачи автономного определения навигационных параметров с требуемой точностью.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Болотнов А.С., Чепурнов И.А., Потапов В.А. Перспективные направления развития навигационных систем подвижных наземных комплексов военного назначения. *75-летие Великой Победы: исторический опыт и современные проблемы военной безопасности России. Матер. 5-й Междунар. науч.-практ. конф.* Т. 1. М., Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2020, с. 428–436. EDN: LELWHW
- [2] Воробьев Л.М. Астрономическая навигация летательных аппаратов. М., Машиностроение, 1968.
- [3] Harrison N.F.G. The Super VC-10. *Flight International*, 1965, no. 2925, pp. 494–498.

- [4] Graham R.H. SR-71. Blackbird. Stories, tales, and legends. Minneapolis, Zenith Press, 2002.
- [5] Miller R., Coulter J.E., Levine S. Miniature optical wide-angle-lens Startracker (mini-OWLS). *Estimation Theory Symposium*, 1992, pp. 499–504.
- [6] Quan W., Li J., Gong X., et al. INS/CNS/GNSS integrated navigation technology. Beijing, Springer, 2015.
- [7] Quan W., Diao M., Gao W., et al. Integrated navigation method of a marine strapdown inertial navigation system using a star sensor. *Meas. Sc. Technol.*, 2015, vol. 26, no. 11, art. 115101. DOI: <https://doi.org/10.1088/0957-0233/26/11/115101>
- [8] Palmeri Ch., Stan Cr. Northrop: a top gun in the defense buildup. *Businessweek*, 2001. URL: <https://www.bloomberg.com/news/articles/2001-09-30/northrop-a-top-gun-in-the-defense-buildup> (дата обращения: 16.05.2024).
- [9] Аванесов Г.А., Форш А.А., Бессонов Р.В. и др. Звездный координатор БОКЗ-М и перспективы его развития. XIV Санкт-Петербургская Междунар. конф. по интегрированным навигационным системам. СПб., ЦНИИ Электроприбор, 2007, с. 3–14.
- [10] Кан С.Г., Кузнецов А.Г., Портнов Б.И. и др. История образования и развития МИЭА — история становления отечественного авиаприборостроения. *История науки и техники*, 2016, № 9, с. 3–18. EDN: WMUWAD
- [11] Grewal M., Weil L., Andrews A. Global positioning systems, inertial navigation and integration. Hoboken, John Wiley & Sons, 2001.
- [12] Черенков С.Г., Чесноков Г.И. Астроинерциальные навигационные системы: прошлое, настоящее, будущее. *История науки и техники*, 2016, № 9, с. 26–35. EDN: WMUWAD
- [13] Бабурин С.М., Силина В.В., Данилов О.Ю. и др. Способ построения астроинерциальной навигационной системы. Патент РФ 2641515. Заявл. 02.06.2012, опубл. 17.01.2018.
- [14] Аванесов Г.А., Бессонов Р.В., Куркина А.Н. и др. Принципы построения астроинерциальной системы авиационного применения. *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса*, 2013, т. 10, № 2, с. 9–29. EDN: QZNBNI
- [15] Болотнов С.А., Брайткрайц С.Г., Герасимчук Ю.Н. и др. Астронавигационная система. Патент РФ 2607197. Заявл. 26.12.2014, опубл. 10.01.2017.
- [16] Герасимчук Ю.Н., Брайткрайц С.Г., Болотнов С.А. и др. Основы определения корректирующих поправок в бесплатформенной астроинерциальной навигационной системе. *Новости навигации*, 2011, № 4, с. 33–39. EDN: RBHKZT
- [17] Милерис Л.Л., Мулина Е.В., Сидоренко В.С. и др. Обоснование необходимости использования на морских судах астронавигационных систем. *Вестник молодежной науки*, 2020, № 1, с. 30–42. EDN: YVNIRU
- [18] Измайлов А.П. Развитие навигационных комплексов ракетных подводных лодок стратегического назначения в период создания и становления Морских стратегических ядерных сил. *Навигация и гидрография*, 2019, № 57, с. 7–17. EDN: VMXWOL

[19] Костин В.Н. История развития отечественных морских астронавигационных систем. *Навигация и гидрография*, 2000, № 11, с. 133–137.

[20] Корниенко В.Я., Маковеев В.Б., Попов А.Б. и др. Астронавигационная система. Патент РФ 2378616. Заявл. 03.07.2008, опубл. 10.01.2010.

[21] Болотнов С.А., Герасимчук Ю.Н., Шкатов М.Ю. и др. Астрономические инерциальные системы для применения в морских навигационных комплексах. *Прикладная фотоника*, 2023, т. 10, № 4, с. 89–101.

DOI: <https://doi.org/10.15593/2411-4375/2023.4.06>

Болотнов Альберт Сергеевич — инженер кафедры «Технологии приборостроения» МГТУ им. Н.Э. Баумана (Российская Федерация, 105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1).

Кондрашкин Георгий Викторович — инженер кафедры «Приборы и системы ориентации, стабилизации и навигации» МГТУ им. Н.Э. Баумана (Российская Федерация, 105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1).

Просьба ссылаться на эту статью следующим образом:

Болотнов А.С., Кондрашкин Г.В. Эволюция технических решений в построении систем астроинерциальной навигации. *Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Приборостроение*, 2024, № 4 (149), с. 4–24. EDN: ZFTCVE

EVOLUTION OF TECHNICAL SOLUTIONS IN CONSTRUCTING A STELLAR INERTIAL NAVIGATION SYSTEM

A.S. Bolotnov

G.V. Kondrashkin

bolotnov.a@bmstu.ru

kondrashkingv@bmstu.ru

Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation

Abstract

The paper shows prospects in creating an integrated stellar inertial navigation system. It considers advantages of the autonomous stellar inertial navigation aids and formulates the range of tasks. Main stages of the foreign and domestic stellar inertial navigation systems design and development are presented for aviation and marine application. Traditional marine stellar navigation devices are listed in regard to the marine systems. Design, development and principles of construction of the stellar inertial navigation systems are analyzed. Their description and classification are provided, as well as examples of the system design

Keywords

Stellar navigation, stellar inertial navigation system, stellar sensor, SINS, inertial navigation system, navigation

according to the classification. The paper presents functional and design schemes of the stellar inertial navigation systems. It considers prerequisites for constructing high-precision promising stellar inertial navigation systems of a new generation. Design of a new generation stellar inertial system is analyzed, its advantages compared to the existing ones are demonstrated. Possibility of using this system in marine conditions is indicated. A gyrostabilized stellar inertial navigation system with a satellite receiver is analyzed. The results are summarized and conclusions are made on the prospects of a new generation stellar inertial navigation system in aviation and marine applications

Received 28.08.2023

Accepted 06.03.2024

© Author(s), 2024

REFERENCES

- [1] Bolotnov A.S., Chepurnov I.A., Potapov V.A. [Perspective directions of development a navigation systems of military ground mobile complexes]. *75-letie Velikoy Pobedy: istoricheskiy opyt i sovremennye problemy voennoy bezopasnosti Rossii. Mater. 5-y Mezhdunar. nauch.-prakt. konf.* T. 1 [75th Anniversary of the Great Victory: Historical Experience and Modern Problems of Military Security of Russia]. Proc. 5th Int. Sc.-Pract. Conf. Vol. 1]. Moscow, Bauman MSTU Publ., 2020, pp. 428–436 (in Russ.). EDN: LELWHW
- [2] Vorobyev L.M. *Astronomicheskaya navigatsiya letatelnykh apparatov* [Astronomical navigation of aircrafts]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1968.
- [3] Harrison N.F.G. The Super VC-10. *Flight International*, 1965, no. 2925, pp. 494–498.
- [4] Graham R.H. *SR-71. Blackbird. Stories, tales, and legends*. Minneapolis, Zenith Press, 2002.
- [5] Miller R., Coulter J.E., Levine S. Miniature optical wide-angle-lens Startracker (mini-OWLS). *Estimation Theory Symposium*, 1992, pp. 499–504.
- [6] Quan W., Li J., Gong X., et al. *INS/CNS/GNSS integrated navigation technology*. Beijing, Springer, 2015.
- [7] Quan W., Diao M., Gao W., et al. Integrated navigation method of a marine strapdown inertial navigation system using a star sensor. *Meas. Sc. Technol.*, 2015, vol. 26, no. 11, art. 115101. DOI: <https://doi.org/10.1088/0957-0233/26/11/115101>
- [8] Palmeri Ch., Stan Cr. Northrop: a top gun in the defense buildup. *Businessweek*, 2001. Available at: <https://www.bloomberg.com/news/articles/2001-09-30/northrop-a-top-gun-in-the-defense-buildup> (accessed: 16.05.2024).
- [9] Avanesov G.A., Forsh A.A., Bessonov R.V., et al. [BOKZ-M star coordinator and prospects of its development]. *XIV Sankt-Peterburgskaya Mezhdunar. konf. po integrirovannym navigatsionnym sistemam* [XIV Sankt-Petersburg Int. Conf. on Integrated Navigation Systems]. St. Petersburg, TsNII Elektropribor Publ., 2007, pp. 3–14 (in Russ.).

- [10] Kan S.G., Kuznetsov A.G., Portnov B.I., et al. MIEA foundation and development history — the history of russian instrument engineering industry evolution. *Istoriya nauki i tekhniki* [History of Science and Engineering], 2016, no. 9, pp. 3–18 (in Russ.). EDN: WMUWAD
- [11] Grewal M., Weil L., Andrews A. Global positioning systems, inertial navigation and integration. Hoboken, John Wiley & Sons, 2001.
- [12] Cherenkov S.G., Chesnokov G.I. Stellar-inertial navigation systems: past, real, future. *Istoriya nauki i tekhniki* [History of Science and Engineering], 2016, no. 9, pp. 26–35 (in Russ.). EDN: WMUWAD
- [13] Baburin S.M., Silina V.V., Danilov O.Yu., et al. Sposob postroeniya astroinertsialnoy navigatsionnoy sistemy [Method for construction of astroinercial navigation system]. Patent RU 2641515. Appl. 02.06.2012, publ. 17.01.2018 (in Russ.).
- [14] Avanesov G.A., Bessonov R.V., Kurkina A.N., et al. The principles of creating airborne stellar-inertial system. *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa* [Current Problems in Remote Sensing of the Earth from Space], 2013, vol. 10, no. 2, pp. 9–29 (in Russ.). EDN: QZNBNI
- [15] Bolotnov S.A., Braytkrayts S.G., Gerasimchuk Yu.N., et al. Astronavigatsionnaya sistema [Astronomical navigation system]. Patent RU 2607197. Appl. 26.12.2014, publ. 10.01.2017 (in Russ.).
- [16] Gerasimchuk Yu.N., Braytkrayts S.G., Bolotnov S.A., et al. The basics of the strapdown astro-inertial navigation system correction determination. *Novosti navigatsii* [Navigation News], 2011, no. 4, pp. 33–39 (in Russ.). EDN: RBHKZT
- [17] Mileris L.L., Mulina E.V., Sidorenko V.S., et al. Substantiation of the need to use the astronavigation system in marine vessels. *Vestnik molodezhnoy nauki*, 2020, no. 1, pp. 30–42 (in Russ.). EDN: YVNIRU
- [18] Izmaylov A.P. Development of navigation complexes missile submarines of strategic in the period of creation and formation of naval strategic nuclear forces. *Navigatsiya i gidrografiya* [Navigation and Hydrography], 2019, no. 57, pp. 7–17 (in Russ.). EDN: VMXWOL
- [19] Kostin V.N. History of development of domestic marine astronomical systems. *Navigatsiya i gidrografiya* [Navigation and Hydrography], 2000, no. 11, pp. 133–137 (in Russ.).
- [20] Kornienko V.Ya., Makoveev V.B., Popov A.B., et al. Astronavigatsionnaya sistema [Celestial guidance system]. Patent RU 2378616. Appl. 03.07.2008, publ. 10.01.2010 (in Russ.).
- [21] Bolotnov S.A., Gerasimchuk Yu.N., Shkatov M.Yu., et al. Astronomical inertial systems for use in marine navigation complexes. *Prikladnaya fotonika* [Applied Photonics], 2023, vol. 10, no. 4, pp. 89–101 (in Russ.).
DOI: <https://doi.org/10.15593/2411-4375/2023.4.06>

Bolotnov A.S. — Engineer, Department of Instrument Production Techniques, Bauman Moscow State Technical University (2-ya Baumanskaya ul. 5, str. 1, Moscow, 105005 Russian Federation).

Kondrashkin G.V. — Engineer, Department of Instruments and Systems of Orientation, Stabilization and Navigation, Bauman Moscow State Technical University (2-ya Baumanskaya ul. 5, str. 1, Moscow, 105005 Russian Federation).

Please cite this article in English as:

Bolotnov A.S., Kondrashkin G.V. Evolution of technical solutions in constructing a stellar inertial navigation system. *Herald of the Bauman Moscow State Technical University, Series Instrument Engineering*, 2024, no. 4 (149), pp. 4–24 (in Russ.).

EDN: ZFTCVE