

Кравченко Павел Павлович – Южный федеральный университет; e-mail: kravchenkopp@sfedu.ru; 347928, г. Таганрог, пер. Некрасовский, 44; тел.: 88634314945; кафедра математического обеспечения и применения ЭВМ; д.т.н.; профессор.

Хусайнов Наиль Шавкятovich – e-mail: khusainov@sfedu.ru; кафедра математического обеспечения и применения ЭВМ; к.т.н.; доцент.

Щербинин Виктор Викторович – "ЦНИИАГ", г. Москва; e-mail: mail_dv@mail.com; 127018, Москва, ул. Советской армии, 5; тел.: 84956006317; д.т.н.; начальник научно-технического отделения.

Kravchenko Pavel Pavlovich – Southern Federal University; e-mail: kravchenkopp@sfedu.ru; 44, Nekrasovskiy, Taganrog, 347928, Russia; phone: +78634314945; the department of software engineering; dr. of eng. sc.; professor.

Khusainov Nail' Shavkyatovich – e-mail: khusainov@sfedu.ru; the department of software engineering; cand. of eng. sc.; associate professor.

Scherbinin Victor Victorovich – Central Research Institute of Automatics and Hydraulics; e-mail: mail_dv@mail.com; 5, Sovetskaya Army street, Moscow, 127018, Russia; phone: +74956006317; dr. of eng. sc.; head of research department.

УДК 681.518.3

В.В. Щербинин, А.В. Связов, С.В. Смирнов, Г.А. Кветкин

АВТОНОМНЫЙ НАВИГАЦИОННЫЙ КОМПЛЕКС ДЛЯ РОБОТИЗИРОВАННЫХ НАЗЕМНЫХ И ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ

Статья посвящена навигационному комплексу на основе автономной системы ближней радионавигации. Комплекс обеспечивает точное определение местоположения объекта при отсутствии сигналов спутниковых радионавигационных систем. Принцип работы автономной системы ближней радионавигации заключается в одновременном измерении дальностей от подвижного объекта до нескольких опорных навигационных устройств с известными координатами. Дальномерная аппаратура включает бортовой радиоэлектронный модуль и комплект неподвижных модулей (радиомаяков). При обработке измеренных дальностей в вычислителе навигационного комплекса определяются координаты подвижного объекта. В зависимости от типа подвижного объекта состав навигационного комплекса дополнительно включает бесплатформенную инерциальную навигационную систему на микромеханических элементах, барометрический и лазерный (для летательных аппаратов) высотомеры. Основными достоинствами предлагаемого комплекса являются автономность, помехозащищенность и высокий темп измерений. В статье рассматриваются предварительные процедуры рекогносцировки местности для рационального размещения радиомаяков, калибровки дальномерной аппаратуры, а также схемы и алгоритмы комплексирования навигационной информации от различных систем. Приводятся результаты натурных испытаний макетного образца, на основании которых делается вывод об удовлетворительной точности навигационного комплекса без использования спутниковых радионавигационных систем.

Автономная навигация; система ближней радионавигации; комплексирование информации.

V.V. Shcherbinin, A.V. Sviyazov, S.V. Smirnov, G.A. Kvetkin

AUTONOMOUS NAVIGATION COMPLEX FOR GROUND AND FLYING ROBOTIC VEHICLES

The article is devoted to navigation complex based on autonomous short-range radio navigation system. The complex provides precise definition of object location without satellite radio navigation system signals. Operation principle of short-range radio navigation system lies in simultaneous measurement of ranges between the object and several reference navigation devices with known coordinates. Range-finding equipment includes on-board radio electronic module and set of fixed modules (beacons). The processing of the measured ranges in the navigation complex computer allows for the moving vehicle coordinates. Depends on moving vehicle type configuration of the navigation complex involves additionally MEMS-based strapdown inertial navigation system, barometric and laser (for aerial vehicles) altimeters. Autonomy, noise immunity and high rate of measurements are among the main advantages of suggested complex. Preliminary procedures of terrain reconnaissance for rational beacons installation, range-finding equipment calibration and also schemes and algorithms of integrated processing of different systems navigational data are observed in the paper. The results of field test with model pattern provided conclusion about satisfactory precision of the navigation complex without the use of satellite radio navigation systems are given.

Autonomous navigation; short-range radio navigation system; complex processing

Динамичное развитие робототехнических систем характерно в настоящее время для широкого спектра отраслей промышленности. Как правило, ставится задача частичной или полной автоматизации операций, выполняемых человеком. Особенно важным представляется круг задач, сопряженных с выполнением целевой функции в неблагоприятных условиях, при которых наиболее распространенный в робототехнике способ навигации с помощью технического зрения теряет свою эффективность и не обеспечивает заданной точности определения локальных координат. Решение подобных задач с использованием спутниковых радионавигационных систем (СРНС) не обеспечивает выполнения необходимых для ряда применений требований автономности и помехозащищенности функционирования навигационного комплекса.

ОАО «ЦНИИАГ» предлагает вариант решения навигационной задачи при движении наземного или воздушного объекта по маршруту с использованием автономной системы ближней радионавигации (АСБРН). АСБРН включает в себя радиодальномерную аппаратуру (РДА), с помощью которой производится одновременное измерение дальностей от объекта до нескольких наземных опорных навигационных устройств (радиомаяков) с известными координатами в локальной системе координат (СК). В результате обработки измеренных дальностей в вычислителе АСБРН определяется местоположение в локальной СК: для наземного объекта – две координаты на плоскости, для БПЛА – три координаты. Точность этого решения зависит от точности топoprивязки радиомаяков, точности измерения дальностей и так называемого геометрического фактора (более строго этот параметр можно описать как фактор ухудшения точности (Dilution Of Precision – DOP), обусловленный геометрией взаимного положения объекта и опорных навигационных устройств).

Ключевыми задачами, решаемыми с помощью предлагаемого комплекса, являются навигация наземного подвижного объекта на маршруте, а также навигация БПЛА на маршруте и этапе посадки.

Анализ предметной области показал, что в зависимости от типа подвижного объекта целесообразно варьировать состав комплекта оборудования, основой которого является АСБРН (рис. 1).

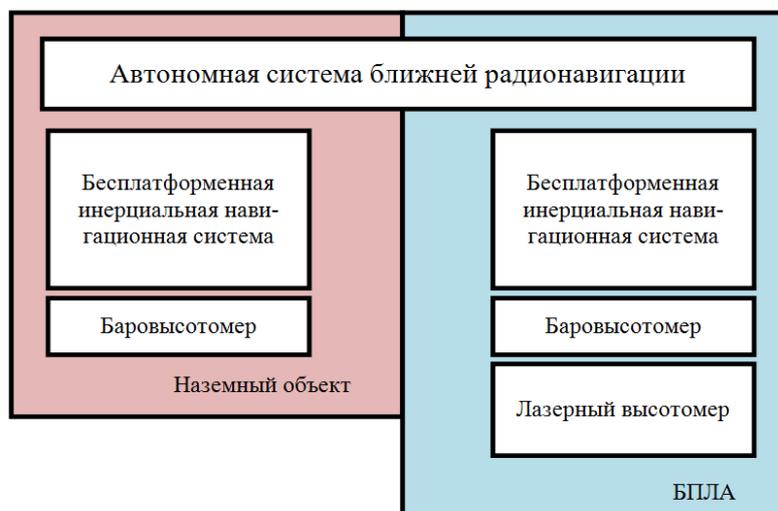


Рис. 1. Варианты комплектования навигационного комплекса

Так, навигационный комплекс (НК) наземного объекта включает в себя БИНС на микромеханических чувствительных элементах и баровысотомер, а для применения на БПЛА комплекс необходимо дополнить лазерным высотомером. Баровысотомер в НК наземного объекта требуется для оценки изменения высоты движения относительно уровня установки радиомаяков для коррекции данных АСБРН.

В работе представлен анализ результатов предварительных испытаний навигационного комплекса на основе АСБРН для наземного подвижного объекта (автомобиля). Эксперимент проводился на относительно ровной поверхности, поэтому баровысотомер в рассмотрение не вводился. Ниже представлены фотографии элементов макета РДА: наземный радиомаяк (рис. 2,а), установленный в стороне от траектории движения автомобиля, и бортовая аппаратура (рис. 2,б), установленная на высоте около 0,5 м от крыши автомобиля с целью снижения влияния отражений луча.



а



б

Рис. 2. Элементы макетного образца аппаратуры АСБРН

При проведении эксперимента дополнительно использовался бюджетный приемник СРНС для сравнительного анализа автономных и неавтономных навигационных решений. Для регистрации эталонных траекторных измерений использовалась высокоточная аппаратура СРНС, функционирующая в относительном режиме.

Основными преимуществами рассматриваемого навигационного комплекса являются:

- ◆ автономность (точное решение навигационной задачи при отсутствии СРНС);
- ◆ помехозащищенность;
- ◆ малое запаздывание навигационного решения по сравнению с СРНС вследствие высокой частоты выдачи информации (частота работы РДА составляет 50 Гц с возможностью увеличения до 200 Гц).

Применение АСБРН требует предварительной топогеодезической подготовки местности в районе движения подвижного объекта: определение начала и направлений осей локальной СК, вычисление координат радиомаяков. В реализованном эксперименте данная подготовка заключалась в определении точных географических координат шести точек на местности: 4 места размещения радиомаяков и 2 точки на траектории движения для определения азимута для начальной выставки БИНС. Для этого использовалась та же высокоточная аппаратура СРНС, что и для эталонирования траектории движения. Вся подготовка, включая камеральную обработку данных СРНС и определение локальных координат, занимает не более часа. На рис. 3 показаны данные, полученные в процессе проведения подготовительных работ.

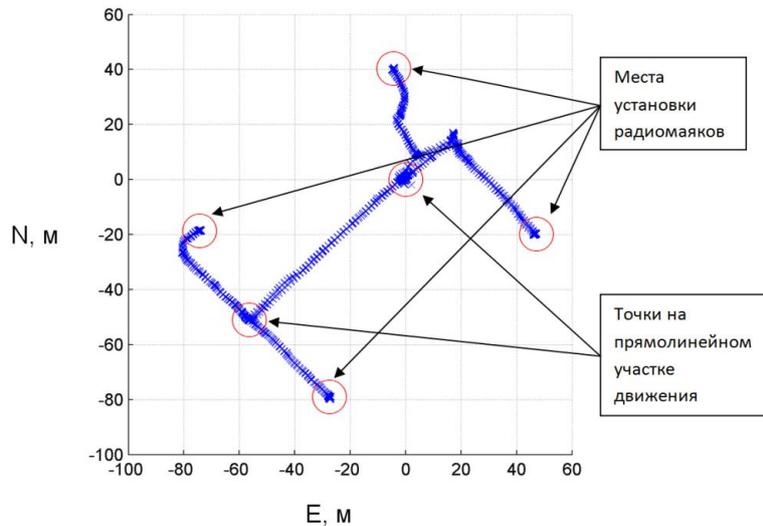


Рис. 3. Координаты характерных точек на местности в локальной СК

В общем случае применения навигационного комплекса без использования СРНС процедура рекогносцировки местности должна выполняться с помощью топогеодезического оборудования, которое позволяет сразу получить локальные координаты заданных точек. И в первом, и во втором случаях достижимая погрешность привязки (СКО) не превышает 5–10 см.

Начальная стадия работы НК включает в себя калибровку и выставку подсистем. Предстартовой калибровке подвергаются датчики с наиболее существенными и изменяющимися от запуска к запуску систематическими составляющими по-

грешности: микромеханические датчики угловых скоростей (ДУС) и РДА. Процедура начальной выставки проводится для БИНС и баровысотомера в автономном режиме с учетом заданного начального курса. Калибровка ДУСов представляет собой классическое списание накопленной погрешности в неподвижном состоянии и особого внимания читателя не требует.

Необходимость калибровки РДА обуславливается существенными значениями нулевого сигнала, который определяется быстродействием электронной аппаратуры при обработке временных задержек отраженного сигнала. По этой же причине ограничена минимальная дальность работы РДА (10м), но на применение АСБРН это не накладывает существенных ограничений. Результаты калибровки записываются в память НК и впоследствии используются для соответствующей пары запросчик-ответчик. Определение смещения нуля РДА возможно двумя способами:

- ◆ разомкнутый;
- ◆ замкнутый.

Первый способ заключается в расстановке маяков на некотором эталонном расстоянии от бортового модуля и определении отклонения полученных измерений от реальной дальности. Такой способ требует дополнительного времени и замеров эталонных трасс, длиной не меньше 50 метров.

Замкнутый метод заключается в использовании информации о топопривязке мест установки маяков и точки начала движения объекта. По этим данным определяются с высокой точностью дальности до каждого из уже расставленных согласно конфигурации радиомаяков и объектом. Тогда в процессе начальной выставки БИНС (не более 1 мин) накапливаются данные о дальностях до радиомаяков и определяются смещения нулей каждой пары запросчик-ответчик. Данный способ не требует дополнительных предварительных процедур, но требует наличия связи между бортовым и наземным радиомодулями. Это условие выполнимо для наземных объектов и более затруднительно для решения задачи автоматизированной посадки БПЛА при взлете с другого аэродрома. В этом случае необходимо воспользоваться разомкнутым способом, результаты которого должны быть записаны в памяти НК.

Схема алгоритма комплексирования представлена на рис. 4.

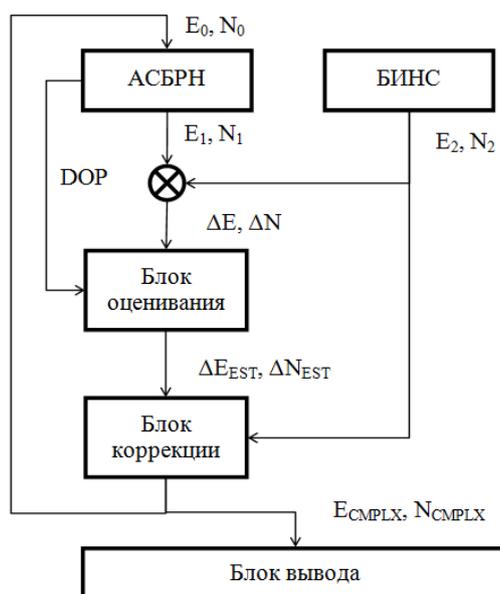


Рис. 4. Схема алгоритма комплексирования

Ниже представлены применяемые методики комплексирования. Для определения плановых координат в АСБРН применяется широко известный итерационный метод наименьших квадратов [1]:

$$\hat{\mathbf{K}} = \hat{\mathbf{K}}_0 + (\mathbf{H}^T \mathbf{H})^{-1} \mathbf{H}^T [\mathbf{D} - \mathbf{D}(\hat{\mathbf{K}}_0)],$$

где $\mathbf{K} = (E_1 \quad N_1)$ – координаты объекта в локальной СК.

Для получения решения необходимо задать приближенное значение координат объекта K_0 , которое затем уточняется. Как правило, для получения решения на новом шаге в качестве исходных данных выбираются значения координат на предшествующем шаге. При отсутствии сбоев в работе РДА такой метод позволяет ограничиться 3–4 итерациями при определении координат с величиной невязки порядка 5 см. Однако на практике измерения РДА представляют собой сигнал с дискретностью 1,5 м и наличием выбросов, обусловленных подстройкой СВЧ-тракта (рис. 5).

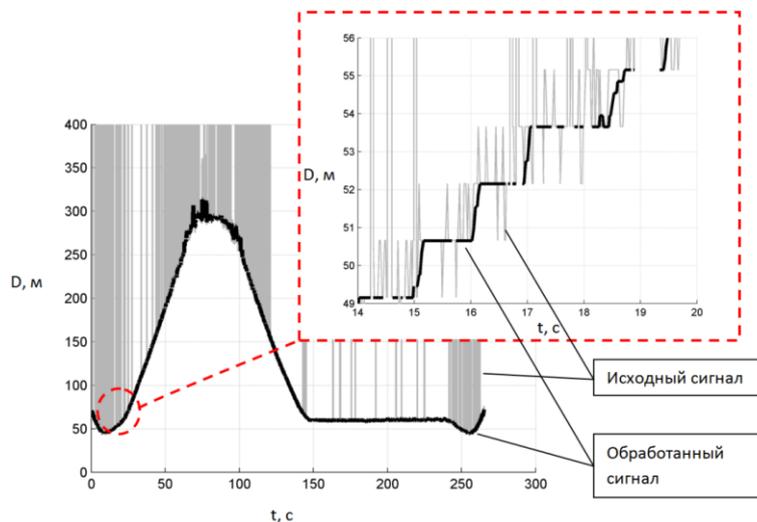


Рис. 5. Измерения РДА до и после предварительной фильтрации

Предварительная фильтрация заключается в применении медианного фильтра, с помощью которого были отброшены выбросы и сглажен сигнал с минимальными временными задержками (0,15 с). Варианты применения более плавного сглаживания показали свою неэффективность ввиду увеличивающихся ошибок, обусловленных задержками измерений. Более эффективным оказалось получение высокочастотных измерений РДА с последующим сглаживанием с использованием измерений БИНС.

Дальнейшая проверка валидности измеренных дальностей заключалась в проверке геометрических соотношений между измерениями до соседних маяков, наложении ограничений на скачок значения дальности за один такт с учетом максимальной скорости объекта. В результате получалась маска валидности измерений РДА на каждом такте, согласно которой производился расчет новых координат АСБРН. Выходными параметрами алгоритма АСБРН помимо координат являются также значения количества шагов, на протяжении которых невязка измерений достигает заданной величины, а также значение горизонтального геометрического фактора (HDOP или DOP). Первый параметр позволяет оценить достовер-

ность поступающих на вход МНК дальностей, и по его значению делается вывод о применимости решения АСБРН в целом. Второй же параметр с поправкой на точность измерения дальностей позволяет оценить погрешность полученного навигационного решения, что впоследствии учитывается при тонкой автоматической настройке алгоритмов комплексирования [2].

Схема комплексирования навигационной информации основана на фильтре Калмана (ФК) и является аналогом широко известной схемы каскадного комплексирования БИНС/СРНС [3]. Вектор состояния такого фильтра включает в себя два независимых подвектора ошибок НК по координатам, скоростям, параметрам углового рассогласования вычислительного и действительного навигационных трехгранников, а также дрейфы ДУСов в запуске (независимо для двух координат).

Вектор состояния, матрицы динамики, входных шумов и измерений навигационного фильтра для восточной координаты имеют общепринятый вид

$$\mathbf{X} = \begin{pmatrix} dE \\ dV_E \\ \Phi_N \\ \omega_{drN} \end{pmatrix}, \quad \mathbf{\Phi} = \begin{pmatrix} 1 & dT & 0 & 0 \\ 0 & 1 & -g \cdot dT & 0 \\ 0 & dT / R_3 & 1 & dT \\ 0 & 0 & 0 & (1 - \beta \cdot dT) \end{pmatrix}, \quad \mathbf{G} = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ A\sqrt{2\beta} \cdot dT \end{pmatrix},$$

$$\mathbf{H} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}.$$

В качестве измерений используются невязки навигационных решений АСБРН (E_1, N_1) и БИНС (E_2, N_2):

$$\mathbf{Z} = (\Delta E) = (E_1 - E_2).$$

Полученные оценки вектора состояния используются для коррекции показаний БИНС:

$$E_{CMPLX} = E_2 + \Delta E_{EST} = E_2 + \hat{x}_{11}.$$

Итоговое комплексное решение (E_{CMPLX}, N_{CMPLX}) поступает в блок вывода и на вход АСБРН в качестве начальных данных $\mathbf{K}_0 = (E_0, N_0)$ для инициализации первой итерации МНК на следующем шаге вычислений.

В то же время имеет место ряд существенных отличий:

- ♦ высокая частота измерений АСБРН (50–200 Гц) по сравнению с СРНС (1–5 Гц);
- ♦ нестационарность матрицы ковариаций шумовой составляющей измерений АСБРН ввиду зависимости геометрического фактора от положения объекта.

На практике первый фактор является явным преимуществом, так как позволяет обеспечить минимальную временную задержку оценки вектора состояния ФК без применения экстраполяции в отличие от случаев комплексирования БИНС с СРНС, которая в подавляющем большинстве случаев имеет задержку порядка 1 с.

Для учета второго фактора необходимо обеспечивать ФК информацией об изменении матрицы ковариации шумов АСБРН, которые, по сути, являются измерительными шумами в алгоритме ФК. Для этого на каждом такте производится оценка геометрического фактора АСБРН, которая с учетом погрешностей измерения дальностей ($\sigma_D \approx 1,5\text{м}$) и привязки точек размещения маяков ($\sigma_B \approx 0,1\text{м}$) определяет значения матрицы измерительных шумов:

$$\mathbf{R} = HDOP \cdot \sqrt{\sigma_D^2 + \sigma_B^2}.$$

В результате удается оперативно подстраивать матрицу усиления ФК для получения оптимальной оценки погрешностей БИНС.

С целью подтверждения заявленных преимуществ на основе экспериментальных данных проведено сравнение навигационных решений для различных режимов работы комплекса:

- 1) «БИНС» (полностью автономное);
- 2) «СРНС» (наиболее доступное);
- 3) «БИНС/СРНС» (наиболее распространенное);
- 4) «БИНС/АСБРН» (предлагаемое, локально автономное);
- 5) «БИНС/СРНС/АСБРН» (опциональное решение с существенной избыточностью навигационной информации).

Следует сделать ряд замечаний:

- ◆ в качестве режима «БИНС/СРНС» рассматривалась схема каскадного комплексирования с соответствующей настройкой линейного ФК и дополнительной коррекцией угла курса объекта по путевому углу СРНС при движении без маневров;
- ◆ режимы 4 и 5 отличаются тем, что в первом для сглаживания измерений АСБРН используются показания автономного решения БИНС, а для второго – комплексированного с СРНС;
- ◆ введение в рассмотрение режима 5 обусловлено тем фактом, что в настоящее время сигналы СРНС и приемники потребительского класса широко доступны, и использование дополнительно их данных позволит повысить надежность работы НК, но не является необходимым.

В результате получены следующие ошибки определения координат автомобиля по траектории в окрестности маяков (рис. 6, 7).

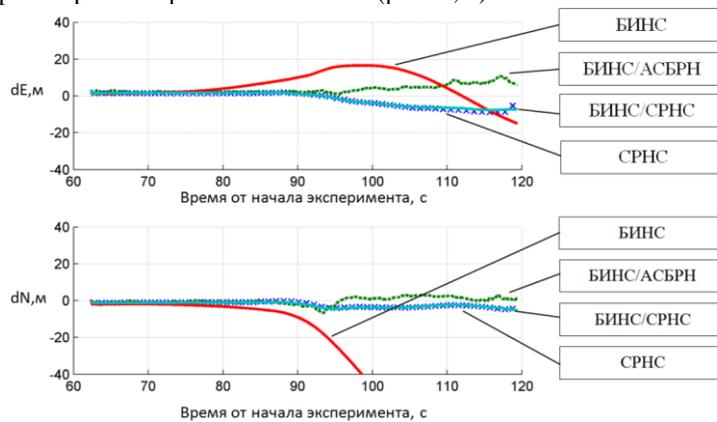


Рис. 6. Погрешности определения координат в различных режимах работы НК в начальный момент движения

Как и следовало ожидать, автономное навигационное решение с помощью БИНС на микромеханических чувствительных элементах характеризуется существенным ростом ошибки за короткое время. Заводская и предстартовая калибровки БИНС рассматриваемого класса не позволяют значительно уменьшить ошибки автономной навигации вследствие существенных нестабильностей погрешностей инерциальных датчиков. Именно поэтому как отечественные, так и зарубежные разработчики навигационных систем применяют в этом случае комплексированные схемы обработки измерений с оценчиванием навигационных ошибок и идентификацией погрешностей чувствительных элементов при движении объекта.

Комплексированный режим «БИНС/СРНС», как и простой режим «СРНС», характеризуются ошибками, обусловленными существенным запаздыванием измерений, переотражениями и медленно меняющимися атмосферными ошибками СРНС.

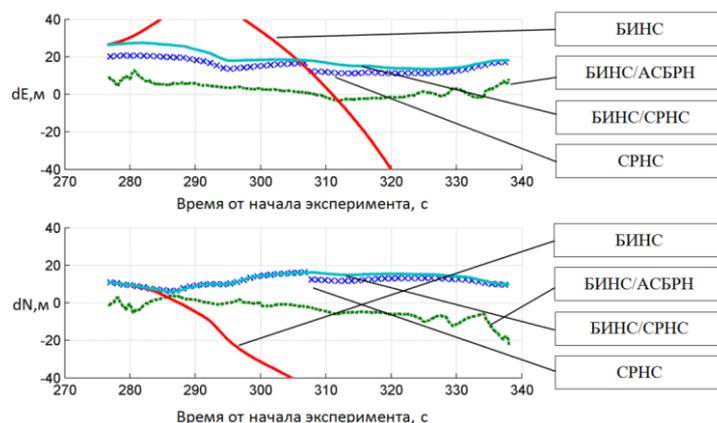


Рис. 7. Погрешности определения координат в различных режимах работы НК при движении в обратном направлении

Наименьшее значение ошибки получено для режима на основе АСБРН. Это объясняется тем, что как случайные, так и систематические ошибки АСБРН с учетом калибровки, как правило, существенно меньше ошибок СРНС. Поэтому предпочтение при комплексировании отдается АСБРН, а измерения БИНС на основе микромеханических чувствительных элементов в этом случае позволяют сглаживать шумы радиодальномерной части и прогнозировать параметры движения при частичном или полном отсутствии сигналов АСБРН.

Ниже представлены (рис. 8) распределения ошибок определения координат за отрезок времени порядка нескольких минут работы.

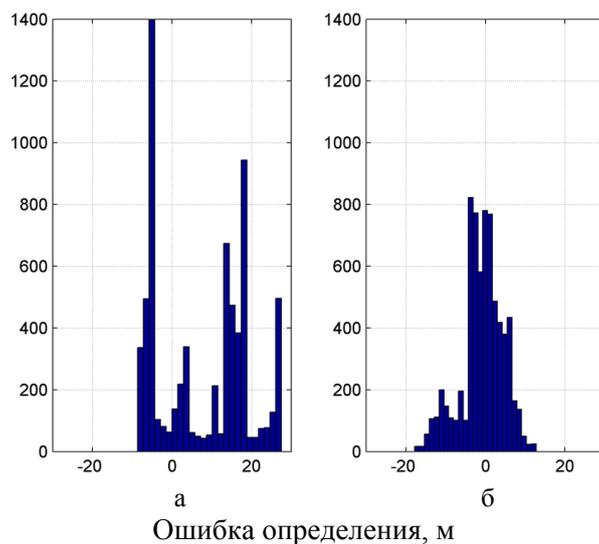


Рис. 8. Распределение ошибок определения координат для режимов «БИНС/СРНС» (а) и «БИНС/АСБРН» (б)

Согласно представленной иллюстрации распределение ошибок для режима «БИНС/СРНС» гораздо более явно группируется в окрестности нулевых значений.

Режим «БИНС/СРНС/АСБРН» рассматривался как вспомогательный при проведении эксперимента и не предполагается штатным для рассматриваемого НК. Следует отметить:

- ◆ точность работы режимов «БИНС/АСБРН» и «БИНС/СРНС/АСБРН» соизмерима, т.е. учет данных СРНС не приводит к существенному снижению погрешности НК при работе в зоне действия РДА;
- ◆ применение доступного (в большинстве не критичных ситуаций) сигнала СРНС обеспечивает существенную избыточность навигационной информации и позволяет осуществить навигацию объекта вне зоны действия РДА (например, при проведении испытаний НК в составе более крупных систем при отсутствии требования автономности функционирования на всех этапах движения).

В результате работы:

1. Разработано алгоритмическое обеспечение автономного навигационного комплекса для роботизированных наземных и летательных аппаратов.
2. Создан макет навигационного комплекса и проведены его предварительные натурные испытания.
3. Экспериментально подтверждена возможность получения точного навигационного решения в отсутствии сигналов СРНС с достаточной для большинства применений частотой.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Глобальная спутниковая радионавигационная система ГЛОНАСС / Под ред. Харисова В.Н., Перова А.И., Болдина В.А. – М.: ИПРЖР, 1998. – 400 с.
2. *Степанов О.А.* Основы теории оценивания с приложениями к задачам обработки навигационной информации. Ч. 1. Введение в теорию оценивания. – СПб.: ГНЦ РФ ЦНИИ «Электроприбор», 2009. – 496 с.
3. *Salychev O.* Applied inertial navigation: problems and solutions. – М.: VMSTU Press, 2004. – 304 p.

Статью рекомендовал к опубликованию д.т.н. П.П. Кравченко.

Щербинин Виктор Викторович – ОАО «Центральный научно-исследовательский институт автоматики и гидравлики»; e-mail: cniiag@cniiag.ru; 127018, г. Москва, ул. Советской армии, 5; тел.: 84956006317; начальник научно-технического отделения; д.т.н.; с.н.с.

Связов Андрей Владимирович – тел.: 84997631119; начальник отдела; к.т.н.

Смирнов Сергей Викторович – начальник лаборатории; к.т.н.

Кветкин Георгий Алексеевич – ведущий научный сотрудник; к.т.н.

Scherbinin Victor Victorovich – Joint Stock Company «Central Scientific & Research Institute of Automatics and Hydraulics»; e-mail: cniiag@cniiag.ru; 5, Sovetskaya Army street, Moscow, 127018, Russia; phone: +74956006317; head of scientific & technical department; dr. of eng. sc.; senior researcher.

Sviyazov Andrey Vladimirovich – phone: +74997631119; head of section; cand. of eng. sc.

Smirnov Sergey Victorovich – head of laboratory; cand. of eng. sc.

Kvetkin Georgy Alekseevich – Leader researcher; cand. of eng. sc.