

УДК 629.05

ИССЛЕДОВАНИЕ СИСТЕМЫ НАВИГАЦИИ ПО ГРАВИТАЦИОННОМУ ПОЛЮ ЗЕМЛИ ПРИ ДВИЖЕНИИ ПО РАЗЛИЧНЫМ МАРШРУТАМ

Е.А. Рыбаков

*ФГУП «ВНИИФТРИ», Менделеево, Московская обл.
rybakov@vniiftri.ru*

В статье представлено описание программно-математической модели комплексированной помехоустойчивой аппаратуры на основе НАП и технологий экстремальной корреляционной навигации по гравитационному полю. На основе этой модели показывается, что в отличие от спутниковых систем навигации, погрешность перемещения объекта навигации из точки «А» в точку «Б» с использованием корреляционно-экстремальных систем по гравитационному полю сильно зависит от маршрута движения. При этом самый короткий маршрут не всегда будет иметь наименьшую погрешность навигации в конечной точке движения. Таким образом, для потребителей, использующих такую аппаратуру, необходимо заранее выбирать маршруты, минимизирующие не только времена движения, но и итоговую ошибку навигации.

Ключевые слова: гравитационное поле Земли, помехозащищенная навигация, ускорение свободного падения, программно-математическая модель системы навигации.

FEATURES OF GRAVITY NAVIGATION SYSTEMS WHILE MOVING ALONG VARIOUS ROUTES

E.A. Rybakov

*FSUE «VNIIFTRI», Mendeleevo, Moscow region
rybakov@vniiftri.ru*

The article presents a program-mathematical model of consumer navigation equipment including a satellite navigation receiver, IMU and system based on gravity field navigation. Based on this model, the article presents the simulation of the movement of a navigation object from a fixed start point to a fixed endpoint along different routes and the endpoint accuracy is highly dependent on the route. Moreover, the time-optimal travel route will not be always optimal in terms of navigation accuracy. Thus, it is necessary to preselect the optimal driving routes in terms of navigation accuracy, for consumers using navigation equipment based on satellite navigation receiver, IMU and system based on gravity field navigation.

Key words: Earth's gravity field, noise-immune navigation, gravity acceleration, program-mathematical model of consumer navigation equipment.

Введение

Основным требованием, предъявляемым к системам навигации, является высокая точность и автономность определения пространственного положения независимо от условий применения. Методы навигации, основанные на

использовании радионавигационных полей глобальных спутниковых систем навигации (ГНСС) и систем радиомаяков, нашли широкое применение в повседневной жизни. Они позволяют потребителям получить высокие точности определения координат и скорости [1]. Но у глобальных навигационных спутниковых систем есть ряд недостатков [2-5], таких как:

- снижение точности навигации в условиях радиопомех и в условиях снижения уровня принимаемых сигналов;
- невозможность определения местоположения потребителя на территориях, недоступных для распространения сигналов ГНСС: под водой, под землей и в закрытых помещениях.

Ввиду ограничений навигации наземных объектов в сложных условиях для решения этих задач целесообразно использовать комплексированную навигационную аппаратуру, включающую бесплатформенную инерциальную навигационную систему (БИНС), систему коррекции по геофизическим полям (ГФП) и навигационную аппаратуру потребителя (НАП) ГНСС.

Когда внешние условия не влияют на работу НАП ГНСС, используется классический режим комплексирования «БИНС+НАП». В данном режиме высокочастотный шум радиотехнических измерений, снимаемых с выхода НАП, фильтруется с помощью БИНС. В свою очередь, низкочастотный временной уход БИНС (дрейф нуля), вызванный неточностью измерений ускорений, угловых скоростей и других параметров, компенсируется за счет высокоточных текущих измерений НАП. В тех случаях, когда НАП не способна решать навигационную задачу, для коррекции БИНС используется коррекция по ГФП.

Методы и средства навигации по геофизическим полям в нашей стране рассматриваются с начала шестидесятых годов [6]. Эта задача также решалась за рубежом [7]. Так, Управление перспективных исследовательских проектов Министерства обороны США DARPA (Defense Advanced Research Projects Agency) исследовало возможности повышения надежности системы навигации в условиях отсутствия сигналов от ГНСС на основе повышения точности инерциальных навигационных систем и систем их коррекции по различным геофизическим полям [8].

Среди всех ГФП, таких как гравитационное и магнитное поле, поле рельефа, радиолокационное и оптическое изображение участков местности в различных диапазонах длин волн, радиотепловое изображение, только гравитационное поле не подвержено влиянию помех. Кроме того, гравитационное поле имеет наивысшую стабильность во времени. В этой связи целесообразно рассматривать комплексирование НАП системой навигации по гравитационному полю Земли.

Программно-математическая модель корреляционно-экстремальной системы навигации

Вследствие уникальности характеристик гравитационного поля алгоритмы работы систем навигации имеют резко выраженную специфику. Бортовой вычислитель производит сопоставление наблюдаемого геофизического поля с опорной картой. Исторически сопоставление определялось путем поиска максимума корреляционной функции. По этой причине такие системы получили название корреляционно-экстремальных навигационных систем (КЭНС).

Для моделирования комплексированной системы была создана ее программно-математическая модель (ПММ). Она включает в себя модели следующих блоков (рис. 1):

1) «Объект навигации». В данном блоке задаются параметры движения объекта навигации, такие как начальные координаты, скорость и направления движения и другие параметры.

2) «Бесплатформенная инерциальная навигационная система (БИНС)». В данном блоке задаются параметры датчиков, на основе которых происходит обработка ускорений и угловых скоростей, полученных от блока «Объект навигации». Кроме того, по данным об истинной траектории вводятся дополнительные помехи, вызванные неоднородностью гравитационного поля Земли. На выходе блока «БИНС» получается навигационное решение, в котором ошибка нарастает пропорционально временному интервалу, прошедшему с момента коррекции.

3) «Навигационная аппаратура потребителя». В данном блоке по данным истинной траектории формируются измерения НАП, которые, в свою очередь, попадают в бортовую цифровую вычислительную машину для получения общего решения навигационной задачи, формируемого на основе БИНС и НАП.

4) «Измеритель ускорения свободного падения (УСП)» и «Карта УСП» на область движения объекта навигации. В блоке «Измеритель УСП» формируются измерения УСП с учетом помех, действующих на измерители, а в блоке карт задаются погрешности их съемки.

5) «Бортовая цифровая вычислительная машина». В данном блоке формируется итоговое решение навигационной задачи. Когда отсутствуют внешние воздействия на работу НАП, для навигации используется классический режим комплексирования «БИНС+НАП». Если НАП вследствие внешних воздействий не решает задачу навигации, то для коррекции дрейфа БИНС на маршруте движения используются измерения параметров гравитационного поля Земли.

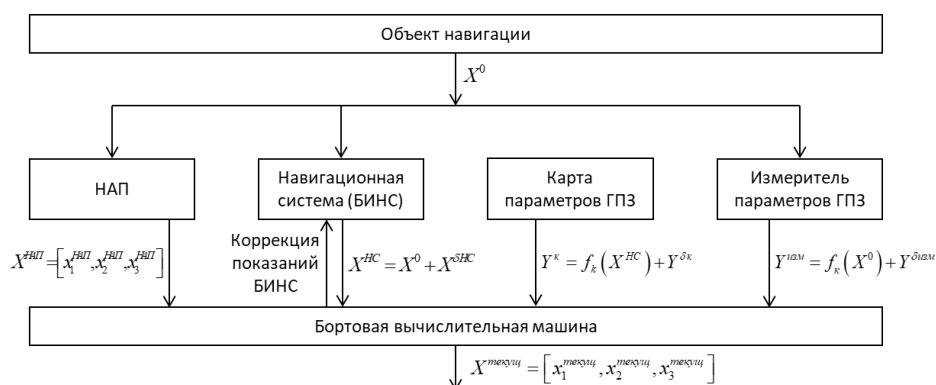


Рис.1. Структура программно-математической модели

ПММ позволяет:

- Исследовать точностные характеристики комплексированной помехоустойчивой аппаратуры на основе НАП ГНСС и КЭНС(УСП) при движении по маршрутам с разной аномальностью ГПЗ.
- Исследовать влияния точности карт и точности измерителей на итоговую точность навигации.
- Исследовать варианты комплексирования НАП различным набором измерителей.

Результаты моделирования корреляционно-экстремальной системы навигации

Переходя к моделированию комплексированной системы в составе БИНС + КЭНС, условимся, что КЭНС на основе измерений ускорения свободного падения будем называть КЭНС(УСП).

С помощью ПММ, представленной выше, было оценено влияние выбора маршрута движения объекта навигации на точность выхода подвижного объекта в заданную область пространства в отсутствие сигналов ГНСС. В моделировании использовалась комплексированная система БИНС + КЭНС(УСП). Для этого на карте УСП (рис. 2) возьмем две точки в пространстве.

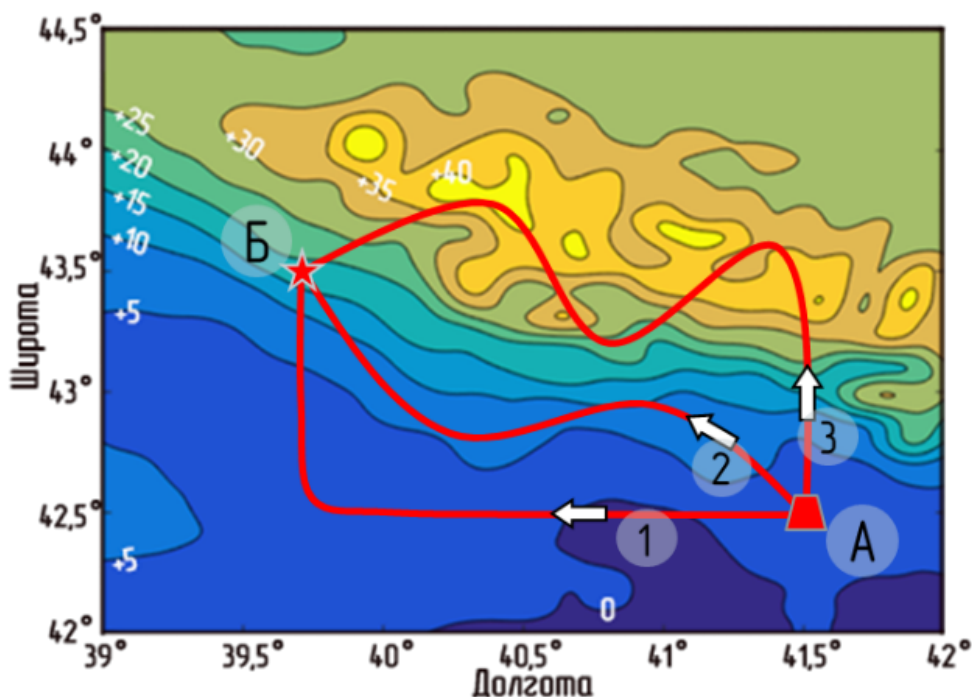


Рис.2. Карта УСП, на которой производилось моделирование

Обозначим точку начала движения как «А», а конечную точку маршрута как «Б». При движении из точки «А» в точку «Б» выберем три различных маршрута:

1. Маршрут 1 (рис. 2, кривая 1). Средний градиент ускорения свободного падения по маршруту 1 составляет 0,3 мГал/км, что соответствует слабо-аномальному району:
2. Маршрут 2 (рис. 2, кривая 2). Средний градиент ускорения свободного падения по маршруту 2 составляет 1,5 мГал/км, что соответствует средне-аномальному району.
3. Маршрут 3 (рис. 2, кривая 3). Средний градиент ускорения свободного падения по маршруту 3 составляет 2,5 мГал/км, что соответствует высоко-аномальному району.

В моделировании погрешность карты и измерителя УСП составляет 0.1 мГал, уход нуля БИНС не более 1,8 км/ч. Текущая ошибка местоположения объекта навигации при движении из точки «А» в точку «Б» по маршруту 1 представлена на рис. 3, по маршруту 2 и 3 соответственно на рис. 4 и рис. 5.

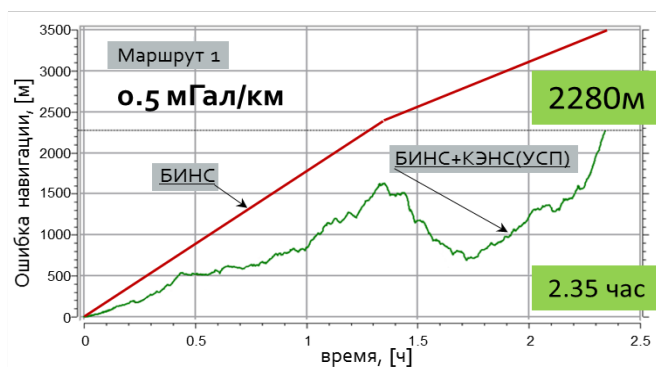


Рис. 3. Текущая ошибка местоположения по маршруту 1



Рис. 4. Текущая ошибка местоположения по маршруту 2



Рис. 5. Текущая ошибка местоположения по маршруту 3

По результатам моделирования (рис. 3-5) видно, что в данном примере при движении по слабо аномальному маршруту 1 погрешность перемещения в заданную точку пространства составила 2280 м. При движении по средне-аномальному маршруту 2 погрешность итогового местоположения состави-

ла 700 м, а по маршруту 3 с наибольшим градиентом поля погрешность составила 490 м.

Также следует обратить внимание, что кратчайший маршрут не всегда будет приемлемым с точки зрения точности навигации. Время движения по маршруту 3 на час превышает время движения по маршруту 1, однако точность навигации по маршруту 3 существенно выше.

Заключение

В отличие от спутниковых систем навигации, погрешность перемещения объекта навигации из точки «А» в точку «Б» с использованием комплексированной системы БИНС+КЭНС сильно зависит от маршрута движения, при этом самый короткий маршрут не всегда будет обладать наименьшей погрешностью навигацией в конечной точке движения. Таким образом, для потребителей, использующих комплексированную помехоустойчивую аппаратуру на основе НАП и технологий экстремальной корреляционной навигации по гравитационному полю, необходимо заранее выбирать приемлемые с точки зрения точности навигации маршруты движения.

Литература

1. ГЛОНАСС. Принципы построения и функционирования / Под ред. А.И. Перова, В.Н. Харисова. Изд. 4-е, перераб. и доп. -М.: Радиотехника, 2010. 800 с.
2. Денисенко О.В., Фатеев В.Ф. Дорожная карта: методы и средства автономной навигации по гравитационному полю. В сб.: Навигация по гравитационному полю Земли и ее метрологическое обеспечение. Доклады научно-технической конференции, 14-15 февраля 2017, Менделеево. – Менделеево: ФГУП «ВНИИФТРИ», 2017, ил 185, табл. 41, библи. 297, 360 с.
3. Kinsey J. C., Eustice R. M. & Whitcomb L. L. (2006). Survey of underwater vehicle navigation: Recent advances and new challenges. IFAC Conference of Manoeuvring and Control of Marine Craft (MCMC 06').
4. Stutters L. Navigation technologies for autonomous underwater vehicles / L. Stutters, H. Liu, C. Tiltman, D.J. Brown // IEEE Transactions on Systems Man and Cybernetics Part C: Applications and Reviews. 38 (4). 2008. P. 581-589.
5. Paull L. AUV Navigation and Localisation - A Review/ L. Paull, S. Saeedi, M. Seto, H. Li//IEEE Journal of Oceanic Engineering. 2014. 39(1). P. 131-149.
6. Августов Л.И., Бабиченко А.В., Орехов М.И., Сухоруков С.Я., Шкред В.К. Навигация летательных аппаратов в околоземном пространстве. Под редакцией д.т.н., проф., Г.И. Джанджгавы.- М.: ООО «Научиздатлит». 2015. 592 с.

7. Белоглазов И.Н., Джанджгава Г.И., Чигин Г.П. Основы навигации по геофизическим полям.-М.: Наука. Главная редакция физико-математической литературы. 1985. 328 с.

8. DARPA: Adaptable Navigation Systems (ANS) [Электронный ресурс] // URL: <http://www.darpa.mil/program/adaptable-navigation-systems> (дата обращения: 01.11.2019).