

<https://doi.org/10.51301/ejsu.2023.i1.05>

## Development of a simulation model for determining the coordinates of air objects based on the GNSS navigation signal reflected from the air object and received on the antenna of the navigation receiver

D.Sh. Akhmedov\*, N.B. Boguspaev, A.S. Raskaliev, A.I. Samsonenko, S.Zh. Zhumagali

*Institute of Space Engineering and Technology, Almaty, Kazakhstan*

\*Corresponding author: [ajgerim.azimbaeva@mail.ru](mailto:ajgerim.azimbaeva@mail.ru)

**Abstract.** This article is devoted to the development of a simulation model for determining the coordinates of air objects based on the GNSS navigation signal reflected from the air object and received on the antenna of the navigation receiver. To solve the problem of radar of aerial objects using bistatic location based on the use of GNSS satellites, it was necessary to pre-evaluate the energy or energy potential of the satellite navigation signal reflected from the aerial object, which then comes to the receiving antenna of the navigation equipment of consumers. The results obtained in the form of the developed computational schemes will form the basis of the algorithmic and software of the passive radar system and will allow determining the requirements for its technical support carried out within the framework of the grant project of the Ministry of Education and Science of the Republic of Kazakhstan No. AP09260581. In this paper, simulation modeling is understood as such an approach to modeling complex systems, which allows us to develop a single meta-model that combines into an integral set of models of objects and processes of their interaction based on a single information and event space in a single discrete time scale, and implement the resulting meta-model in an electronically equivalent form on an electronic computer. One of the main tasks of the study of complex radio engineering systems by modeling is the choice of modeling principles that should allow the construction of the simulated system in accordance with the goals and objectives of the study in such a way that the model adequately reflects the processes and patterns of behavior of the system under study with the necessary degree of reliability and detail. One of the most productive methods of developing a software and hardware complex of simulation modeling is object-oriented modeling.

**Keywords:** GNSS, Global Positioning System, TLE, electronic computer, ground receiver, satellite.

### 1. Введение

Имитационная модель определения координат воздушных объектов по отраженному от воздушного объекта и принятому на антенну навигационного приемника навигационному сигналу ГНСС представляет собой сложную динамическую многопараметрическую систему, в которой одновременно (параллельно) происходят процессы, различные по своей физической природе, но имеющие непосредственное отношение к процессам бистатической локализации воздушных объектов. Для такой сложной системы создать единую аналитическую модель не представляется возможным. Поэтому исходя из принципа многомодельности представления сложной системы, необходимо спроектировать такую совокупность математических и иных моделей объектов и процессов их функционирования и взаимодействия, которая позволила бы объединить их в рамках единой концепции моделирования.

Данная научно-исследовательская работа имеет существенную особенность, связанную с приемом и обработкой переотраженных от воздушной цели или объекта спутниковых радионавигационных сигналов ГНСС. Для этого необходимо разработать имитационную модель на основании вычислительных схем решения задачи оценки энергии отраженного от воздушного объекта навигацион-

ного сигнала, определения координат воздушного объекта, разработать программные модули для имитационных моделей оценки энергии отраженного от воздушного объекта навигационного сигнала и определения координат воздушного объекта.

Другим важным аспектом моделирования таких сложных систем является то, что процесс моделирования таких сложных процессов невозможно без использования средств вычислительной техники. Как правило, моделирование реальных сложных систем предполагает достаточно сложные математические вычисления, оперируют большими объемами хранимых и обрабатываемых данных, что накладывает дополнительные ограничения и требования на процесс построения модели. Использование компьютеров для осуществления процесса моделирования предполагает в свою очередь наличие некоторой упорядоченной последовательности процесса разработки, адаптации и реализации моделей и алгоритмов их моделирования в виде интегрированного программного комплекса, который должен осуществлять процесс реализации метамоделей сложной системы на машинном языке в компьютере, или, используя другой термин, в электронно-эквивалентной форме.

В настоящее время основным методом исследования таких сложных систем, как бистатическая радиолокация-

онная система на основе использования спутниковых навигационных сигналов ГНСС, позволяющим изучать функционирование объекта и его частей на ЭВМ с учетом практически всех основных и второстепенных влияющих факторов, в условиях, наиболее полно отражающие реальные условия функционирования, является метод имитационного моделирования. По существу, имитационное моделирование является одним из немногих подходов в настоящее время, на основе которого можно построить адекватную структуру системы и определить ее основные технические и функциональные спецификации.

Моделирование сложных систем на современных компьютерах по своей сути является дискретным. Это также требует своего учета при формировании имитационной модели и реализации ее на ЭВМ. В настоящее время для формального описания процессов дискретного моделирования стандартом de facto стала «диаграмма состояний» (statechart diagram) объектов исследуемой системы, введенная Д. Харелом для описания процессов дискретного моделирования. В настоящее время «диаграмма состояний» нашла свое отражение в стандарте языка UML, основной формы объектно-ориентированного моделирования [1].

«Диаграмма состояний» представляет собой простую и очень наглядную форму визуального представления динамического поведения объектов.

Имитационная модель сложной системы рассматривается как совокупность математических моделей составляющих ее элементов, в которой декомпозиция исследуемой системы на компоненты производится с учетом структуры проектируемой или изучаемой системы; в качестве законов поведения могут использоваться как строгие математические зависимости, так и экспериментальные данные, полученные в результате натурных экспериментов; поведение системы во времени иллюстрируется заданными динамическими образами. Имитационное моделирование на цифровых вычислительных машинах является одним из наиболее мощных средств исследования, в частности, сложных динамических систем. Как и любое компьютерное моделирование, оно дает возможность проводить вычислительные эксперименты с еще только проектируемыми системами и изучать системы, натурные эксперименты с которыми, из-за соображений безопасности или дороговизны, не целесообразны. В тоже время, благодаря своей близости по форме к физическому моделированию, это метод исследования доступен более широкому кругу пользователей [2].

## 2. Методы и материалы

В данной работе под имитационным моделированием понимается такой подход к моделированию сложных систем, позволяющий разработать единую метамодель, объединяющую в целостную совокупность модели объектов и процессов их взаимодействия на основе единого информационно-событийного пространства в единой дискретной шкале времени, и реализовать полученную метамодель в электронно-эквивалентной форме на ЭВМ.

Одним из наиболее продуктивных методик разработки программно-технического комплекса имитационного моделирования является объектно-ориентированное моделирование. Использование объектно-ориентированного моделирования позволяют объединить множество моде-

лей объектов и процессов сложной системы в единую имитационную метамодель, которая затем реализуется в электронно-эквивалентном виде на компьютере.

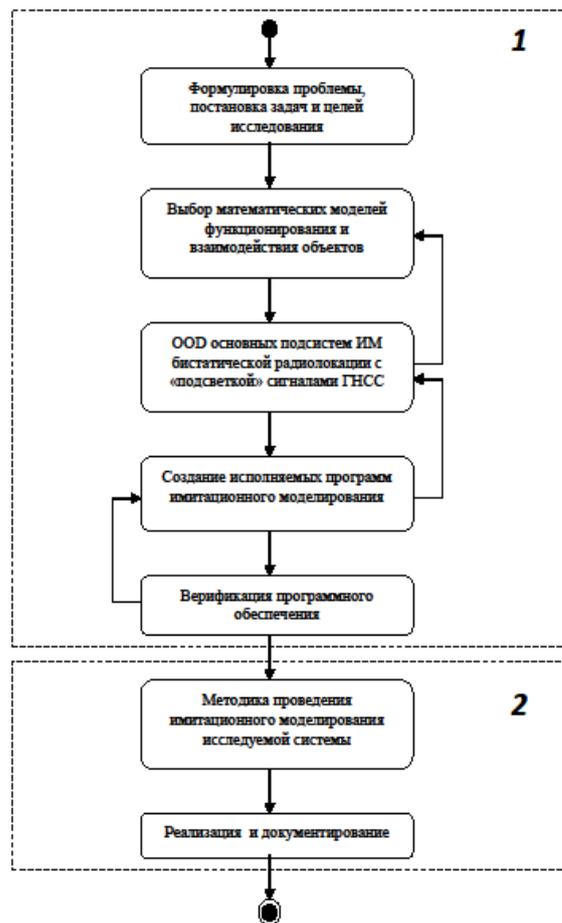


Рисунок 1. Общий алгоритм построения имитационной модели системы бистатической радиолокации с использованием в качестве «подсветки» навигационных сигналов ГНСС

Основным принципом определения координат воздушного объекта является возможность использования спутниковых навигационных сигналов ГНСС для «подсветки» воздушных объектов.

Исходя из этого, основным первичным источником информации для бистатической радиолокации воздушных объектов является использование навигационных сигналов ГНСС. На текущий момент в состав глобальной навигационной спутниковой системы ГНСС входят: GPS NAVSTAR, ГЛОНАСС, Beidou, Galileo. Поэтому использование спутниковых навигационных сигналов ГНСС позволит использовать спутниковые навигационные приемники практически всех мировых производителей [3].

Следующая подсистема, которая непосредственно принимает навигационные сигналы ГНСС - это GPS-приемник с антенной. Для реализации концепции, заложенной в математические модели, необходимы GPS-приемники с антеннами двух типов:

- антенна с узкой диаграммой направленности;
- антенна с круговой диаграммой направленности.

Это позволит получить на первую антенну (с узкой диаграммой направленности) переотраженные от воздушных объектов (ВО) навигационные сигналы ГНСС, и

определить псевдодальности ( $P_{плдj}$ ), являющиеся оценкой расстояния распространения навигационного сигнала от  $i$ -го навигационного космического аппарата - так называемые «невидимые» НКА, до ВО и далее от ВО до антенны. Под «невидимыми» НКА понимаются навигационные спутники, от которых на антенну с узкой диаграммой направленности не приходят навигационные сигналы при отсутствии в зоне видимости этой антенны воздушных объектов. Как только в зоне видимости появляются ВО, то навигационные сигналы от «невидимых» НКА, отражаясь от ВО, попадают в зону видимости узконаправленной антенны с GPS-приемником.

Вторая антенна позволит получить «сырые» данные, по которым можно будет определить координаты «невидимых» спутников, которые имеют обозначения как координаты  $j$ -го НКА ( $x_j, y_j, z_j$ ).

Для увеличения надежности определения координат  $j$ -го НКА ( $x_j, y_j, z_j$ ), предусматривается получение координат «невидимых» спутников, используя TLE-данные. TLE данные можно получить по запросу с TLE-сервера службы NORAD [4].

После приема и предварительной обработки полученных данных, вся эта информация передается в вычислительное устройство для последующего анализа и определения координат воздушного объекта по отраженному от воздушного объекта и принятому на антенну навигационного приемника радиосигналов ГНСС на основе эллипса решений [4].

От GPS-приемника с узкой диаграммы направленности будет поступать информация о номерах спутников, которые попадают в зону видимости этой антенны, и если в зону видимости этой антенны попадает ВО, то и номера «невидимых» НКА и псевдодальности до них. Со второго GPS-приемника с круговой диаграммой направленности в этот блок будут поступать данные о номерах всех спутников, которые видит данная антенна, орбитальные параметры, по которым можно рассчитать координаты спутников.

С TLE-сервера, по запросу, поступает информация, необходимая для расчета движения НКА, представленная в виде TLE-файла.

Общая структура бистатической системы радиолокации воздушных объектов с использованием спутниковых навигационных сигналов ГНСС для «подсветки» воздушных объектов в виде диаграммы пакетов UML представлена на рисунке 2.

Рассмотрим структуру пакета, содержащего GPS-приемник с узконаправленной антенной. Назовем этот пакет – RecGPSNarrowBeam. В состав данного пакета должен входить GPS-приемник с антенной с узкой диаграммой направленности. На вход этой антенны могут поступать:

- навигационные сигналы НКА, которые попадают в зону видимости этой антенны, при этом навигационные сигналы других НКА не могут попасть в этот пакет;
- навигационные сигналы НКА, сигналы от которых поступают на GPS-приемник этого пакета только потому, что эти навигационные приемники отражены от ВО.

Выходные данные этого пакета содержат:

- номера НКА, сигналы от которых попадают на антенну этого пакета;
- псевдодальности до этих НКА;
- углы места, азимуты, уровни сигналов «видимых» НКА.

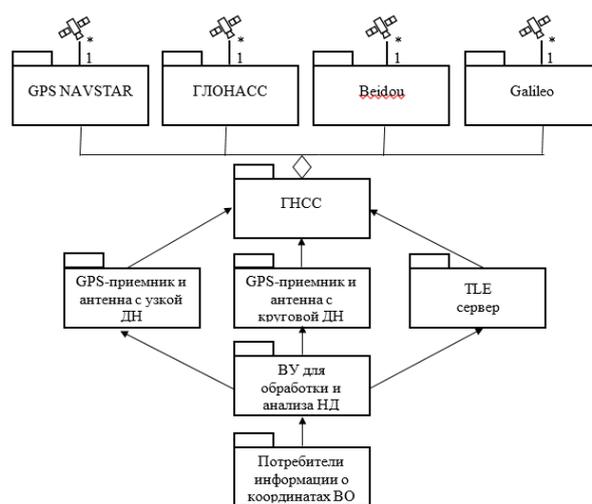


Рисунок 2. Структура бистатической системы радиолокации воздушных объектов с использованием спутниковых навигационных сигналов ГНСС для «подсветки» воздушных объектов в виде диаграммы пакетов UML

На рисунке 3 представлена структура пакета «RecGPSNarrowBeam».



Рисунок 3. Структура пакета «RecGPSNarrowBeam»

Рассмотрим структуру следующего пакета, содержащего GPS-приемник с антенной, имеющей круговую диаграмму направленности. Назовем этот пакет – RecGPSOmniDir. В состав данного пакета должен входить GPS-приемник с антенной с круговой диаграммой направленности. На вход этой антенны могут поступать навигационные сигналы всех видимых НКА.

Выходные данные этого пакета содержат:

- номера видимых НКА, сигналы от которых попадают на антенну этого пакета;
- псевдодальности до этих НКА;
- орбитальные параметры видимых НКА для возможности определения координат этих НКА.

После приема и обработки спутниковых навигационных данных, вся предварительно обработанная информация поступает обработчику навигационных данных, который обозначен на рисунке 2 как пакет «NavDataHandler».

В состав данного пакета входят четыре основных модуля:

- 1) Обработка данных NMEA, анализ и выявление «невидимых» НКА и определение для них отраженных псевдодальностей.

- 2) Обработка «сырых» данных, определение для перечня «невидимых» спутников их координат и прямых псевдодалностей.
- 3) Расчет орбитальных параметров и их координат для перечня «невидимых» спутников по данным TLE.
- 4) Решение навигационной задачи определения координат воздушного объекта на основе эллипса решений.



Рисунок 4. Структура обработчика навигационных данных пакета «NavDataHandler»

В первом модуле происходит прием, обработка и анализ входных данных с пакета «RecGPSNarrowBeam». В этом модуле происходит обработка и анализ строк протокола NMEA. Определяются номера НКА, участвующие в расчете координат, по каждому спутнику определяются данные: угол места, азимут, уровень сигнала. К этим данным добавляются псевдодалности по каждому видимому НКА, которые выбираются их «сырых» данных. При этом после получения из второго модуля списка номеров, видимых круговой антенной, определяются номера потенциально «невидимых» спутников.

Во втором модуле также определяются номера НКА, участвующие в расчете координат, по каждому спутнику определяются данные: угол места, азимут, уровень сигнала. К этим данным добавляются псевдодалности по каждому видимому НКА, которые выбираются их «сырых» данных. Формируется список «видимых» НКА, который передается в первый модуль.

В третьем модуле, в зависимости от частоты обновления информации на сервере TLE-файлов, формируется запрос на обновление TLE-файлов. После получения TLE-файлов происходит расчет орбитальных параметров по каждому НКА для прогноза параметров его движения.

В четвертом модуле происходит непосредственное решение навигационной задачи на основе эллипса решения и определяются координаты воздушного объекта. После решения этой навигационной задачи происходит передача полученных координат ВО потенциальных потребителей.

На рисунке 4 представлена структура обработчика навигационных данных пакета «NavDataHandler».

Таким образом в данном разделе представлена статическая структура бистатической системы радиолокации воздушных объектов с использованием навигационных сигналов ГНСС.

### 3. Результаты и обсуждение

Для моделирования динамических аспектов функционирования программно-технической системы определения координат воздушных объектов по отраженному от воздушного объекта и принятому на антенну навигационного приемника навигационному сигналу ГНСС используем следующие диаграммы языка визуального моделирования UML:

- диаграммы перехода состояний;
- диаграммы последовательности взаимодействия объектов системы.

Анализ функционирования подсистем исследуемой системы позволил построить следующие диаграммы.

Рассмотрим составную диаграмму перехода состояний первого модуля пакета «NavDataHandler», реализующую две функции – обработка и анализ данных протокола NMEA и обработка, и анализ «сырых» данных, представленную на рисунке 5.

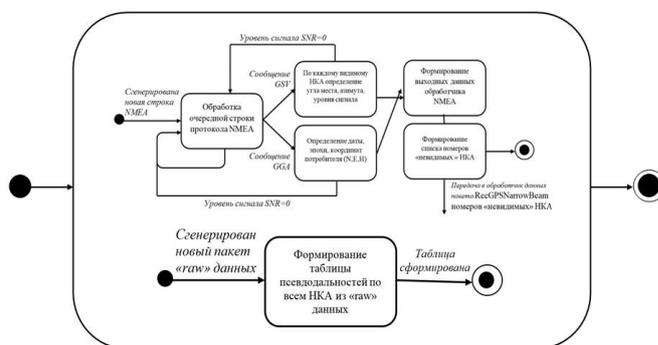


Рисунок 5. Составная диаграмма перехода состояний первого модуля пакета «NavDataHandler»

Рассмотрим первую из них – обработка и анализ данных протокола NMEA. После генерации очередной строки данных NMEA, начинается ее обработка. Рассматривается первое слово. Покажем обработку на примере обработки сообщения по ГНСС GPS NAVSTAR. Рассматриваем только сообщения типа \$GPGSV и \$GPGGA, другие сообщения игнорируются. Сообщение \$GPGSV передает подробную информацию по всем НКА рабочего созвездия, включая: номер спутника, угол места и азимут нахождения НКА, уровень принимаемого навигационного сигнала в дБ, из сообщения \$GPGGA выделяются геодезические координаты местонахождения GPS-приемника (N, E, H). Эти сформированные выходные данные сохраняются в соответствующей таблице. Кроме того, с модуля обработки «сырых» данных в данный модуль передаются номера всех «видимых» в данную эпоху НКА, что позволяет в модуле обработки данных протокола NMEA определить множество номеров «невидимых» НКА [5].

Вторая функция составной диаграммы – обработка и анализ поступивших «сырых» данных. Как только сформирован новый пакет «сырых» данных, начинается его обработка и анализ, целью которого является выделение псевдодалностей  $P_{пщ}$ . Наряду с выделением псевдодалностей «видимых» спутников формируется таблица номеров «видимых» НКА, которая по завершению анализа передается в блок обработки и анализа данных с пакета с GPS-приемником, сопряженным с узконаправленной диаграммой, что позволяет этому модулю выделить список номеров «невидимых» НКА.

После окончания процесса формирования выходных данных первого модуля пакета «NavDataHandler», они передаются в четвертый модуль пакета «NavDataHandler».

Рассмотрим функции второго модуля пакета «NavDataHandler». В целом он идентичен функционированию первого модуля пакета «NavDataHandler», за исключением того, что в данном модуле рассматриваются все «видимые» в данном полушарии НКА. Эта составная диаграмма представлена на рисунке 6.

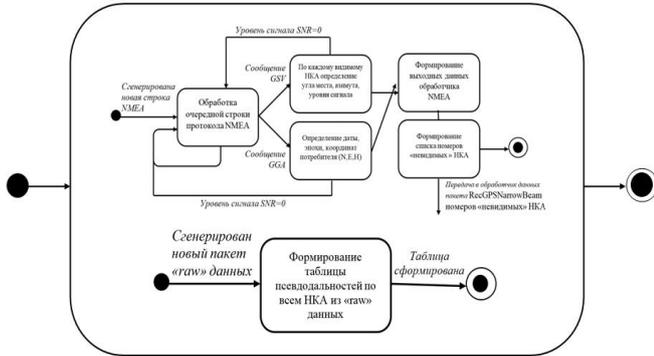


Рисунок 6. Составная диаграмма перехода состояний второго модуля пакета «NavDataHandler»

Входными данными для четвертого модуля являются псевдодальности  $R_{плц}$  списка «невидимых» НКА, координаты «невидимых» НКА, координаты местонахождения фазового центра приемной антенны с узкой диаграммой направленности. Диаграмма перехода состояний четвертого модуля пакета «NavDataHandler» приведена на рисунке 7.

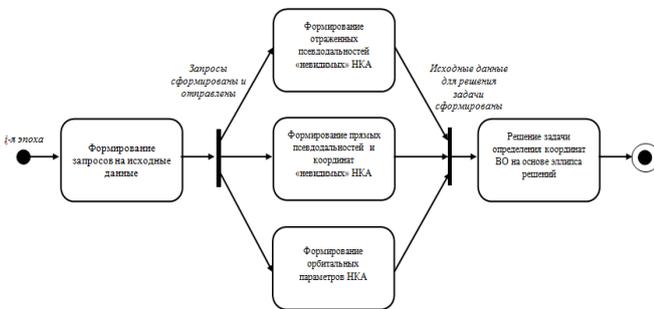


Рисунок 7. Диаграмма перехода состояний четвертого модуля пакета «NavDataHandler»

Эти данные подаются на вход программного обеспечения решения задачи бистатической локации воздушного объекта. После решения задачи определения координат ВО они передаются потребителям.

Для представления общей картины взаимодействия объектов и подсистем этой программно-технической системы, разработана диаграмма последовательности взаимодействия объектов программно-технической системы, которая приведена на рисунке 8.

Данная диаграмма показывает, как во временной шкале осуществляется один цикла обработки, последовательно или параллельно взаимодействуют подсистемы и модули программно-технической системы бистатической радиолокации. Из представленных на рисунке 8 семи пакетов, четыре: модуль определения координат ВО, обработчик TLE-файла, а также их обработчики

данных модулей RecGPSNarrowBeam и RecGPSOmniDir имеют конечное время существования, тогда как модули ГНСС, RecGPSNarrowBeam и RecGPSOmniDir не ограничены временными рамками. Это связано с тем, что НКА ГНСС работают практически непрерывно, соответственно данных навигационных сигналов также вынуждены функционировать практически без остановок, по крайней мере в рамках одного цикла работ.

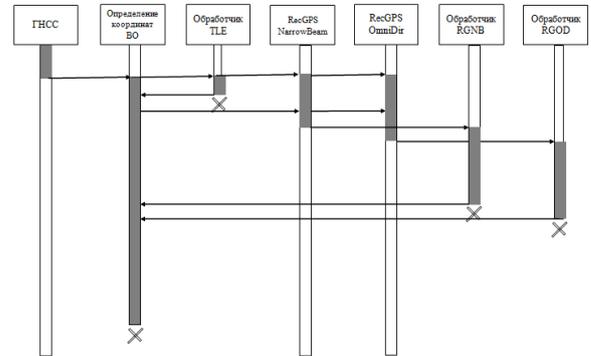


Рисунок 8. Диаграмма последовательности взаимодействия объектов программно-технической системы определения координат воздушных объектов по отраженному от воздушного объекта и принятому на антенну навигационного приемника навигационному сигналу ГНСС

Таким образом, в соответствии с общим алгоритмом построения имитационной модели системы бистатической радиолокации с использованием в качестве «подсветки» навигационных сигналов ГНСС, спроектированы основные статические и динамические диаграммы, описывающие работу имитационной модели. На основе разработанных диаграмм теперь перейдем к разработке программных модулей программного обеспечения имитационного моделирования процесса определения координат воздушного объекта по отраженному от воздушного объекта и принятому на антенну навигационного приемника навигационных сигналов ГНСС.

#### 4. Выводы

Разработана имитационная модель определения координат воздушного объекта по отраженному от воздушного объекта и принятому на антенный навигационный приемник радиосигналов ГНСС. Новизна исследования заключается в построении имитационной модели определения координат воздушной цели по отраженному от нее навигационному радиосигналу на основе применения эллипса растворов. Полученные результаты в виде разработанной имитационной модели составляют основу алгоритмического и программного обеспечения пассивной радиолокационной системы, позволяющей определять требования к ее техническому обеспечению. Значимость работы определяется целью проводимого исследования - создание пассивной радиолокационной технологии обнаружения воздушных объектов как в интересах сил ПВО, так и для гражданской авиации.

#### Финансирование

Данная работа выполнена при финансовой поддержке Комитета науки Министерства науки и высшего образования Республики Казахстан (грант № AP09260581).

## Литература / References

- [1] GOST 32448. (2013). Global'naja navigacionnaja sputnikovaja sistema. Apparatura potrebitelej navigacionnaja grazhdanskogo naznacheniya dlja raket-nositelej, razgonnyh blokov i kosmicheskikh apparatov. Tehnicheskie trebovaniya. M.: Izdatel'stvo standartov
- [2] Solov'ev, Ju.A. (1998). Tochnost' opredelenija odnositel'nyh koordinat i sinhronizacii shkal vremeni ob'ektov pri ispol'zovanii sputnikovyh radionavigacionnyh sistem. Radiotekhnika, IPRZhR
- [3] Global'naja navigacionnaja sputnikovaja sistema GLONASS Interfejsnyj kontrol'nyj dokument. (2016). Retrieved from: <https://russianspacesystems.ru/wp-content/uploads/2016/08/IKD.-Obshh.-opis.-Red.-1.0-2016.pdf>
- [4] Kozlov, I.N., Vostretsov, A.G. (2019). About the possibility of using satellite navigation systems as illumination signals in passive radar stations. *Proceedings of the Russian higher school Academy of sciences*, 2019, 43(2), 27–37. <http://dx.doi.org/10.17212/1727-2769-2019-2-27-37>
- [5] Kiryushkin, V.V.; Cherepanov, D.A. (2016). Coordinates Estimation of the Air Target in the Multiitem Observation System «Navigation Satellites – the Air Target – the Ground Receiver». *Journal of Siberian Federal University: Engineering & Technologies*, 2016, 9(8), 1171-1182. <http://doi.org/10.17516/1999-494X-2016-9-8-1172-1182>
- [6] Barhatov, A.V., Verem'ev, V.I., Kovalev, D.A., Kononov, A.A. & Mihajlov, V.N. (2013). Radars with Transmitters-of-Opportunity. Part 1: State-of-the-Art. *Innovations*, 9(179), 114-119
- [7] Voskresenskii, D.I. (2012). Microwave devices and antennas. Phased array design (4th edition). Moscow, Radiotekhnika Publ.
- [8] China Satellite Navigation Office. (2019). BeiDou Navigation Satellite System Signal In Space Interface Control Document. Retrieved from: <http://en.beidou.gov.cn/SYSTEMS/Officialdocument/201902/P020190227601370045731.pdf>
- [9] Bhuiyan, M.Z.H., Söderholm, S., Thombre, S., Ruotsalainen, L. & Kuusniemi, H. (2014). Implementation of a Software-defined BeiDou Receiver. *Lecture Notes in Electrical Engineering*, Springer. [https://doi.org/10.1007/978-3-642-54737-9\\_65](https://doi.org/10.1007/978-3-642-54737-9_65)

# Әуе объектісінен шағылысқан және антеннаға қабылданған навигациялық қабылдағыш ГНСС навигациялық сигналы бойынша әуе объектілерінің координаттарын айқындаудың имитациялық моделін әзірлеу

Д.Ш. Ахмедов\*, Н.Б. Богуспаев, А.С. Раскалиев, А.И. Самсоненко, С.Ж. Жұмағали

Ғарыштық техника және технологиялар институты, Алматы, Қазақстан

\*Корреспонденция үшін автор: [ajgerim.azimbaeva@mail.ru](mailto:ajgerim.azimbaeva@mail.ru)

**Андатпа.** Бұл мақала әуе объектісінен шағылысқан және антеннаға қабылданған навигациялық қабылдағыш ГНСС навигациялық сигналы бойынша әуе объектілерінің координаттарын анықтаудың имитациялық моделін әзірлеуге арналған. ГНСС спутниктерін пайдалану негізінде бистатикалық орынды пайдалана отырып, әуе объектілерін радиолокациялау міндетін шешу үшін әуе объектісінен шағылысқан спутниктік навигациялық сигналдың энергиясын немесе энергетикалық әлеуетін алдын ала бағалау қажет болды, содан кейін ол тұтынушылардың навигациялық аппаратурасының қабылдау антеннасына келеді. Өзірленген есептеу схемалары түріндегі алынған нәтижелер пассивті радиолокация жүйесінің алгоритмдік және бағдарламалық қамтамасыз етілуіне негіз болады және ҚР БҒМ № АР09260581 гранттық жобасы шеңберінде жүргізілетін оны техникалық қамтамасыз етуге қойылатын талаптарды айқындауға мүмкіндік береді. Бұл жұмыста Имитациялық модельдеу дегеніміз-біртұтас дискретті уақыт шкаласында біртұтас ақпараттық-оқиға кеңістігі негізінде объектілер мен олардың өзара әрекеттесу процестерінің модельдерін біртұтас жиынтыққа біріктіретін және алынған метамодельді электронды есептеу машинасында электронды-эквивалентті түрде жүзеге асыратын біртұтас метамодельді жасауға мүмкіндік беретін күрделі жүйелерді модельдеуге деген көзқарас. Модельдеу арқылы күрделі радиотехникалық жүйелерді зерттеудің негізгі міндеттерінің бірі модельдеу принциптерін таңдау болып табылады, олар модельденген жүйені зерттеудің мақсаттары мен міндеттеріне сәйкес құруға мүмкіндік беруі керек, осылайша модель зерттелетін жүйенің мінез-құлқының процестері мен заңдылықтарын қажетті сенімділік пен егжей-тегжейлі көрсетеді. Имитациялық модельдеудің бағдарламалық-техникалық кешенін әзірлеудің ең өнімді әдістерінің бірі объектіге бағытталған модельдеу болып табылады. Объектіге бағытталған модельдеуді қолдану күрделі жүйенің көптеген объектілері мен процестерін біртұтас Имитациялық метамодельге біріктіруге мүмкіндік береді, содан кейін ол компьютерде электронды эквивалентті түрде жүзеге асырылады.

**Негізгі сөздер:** ЖНСЖ, жаһандық позициялау жүйесі, TLE, электронды есептеу машинасы, жер қабылдағыш, жерсерік.

## **Разработка имитационной модели определения координат воздушных объектов по отраженному от воздушного объекта и принятому на антенну навигационного приемника навигационному сигналу ГНСС**

Д.Ш. Ахмедов\*, Н.Б. Богуспаев, А.С. Раскалиев, А.И. Самсоненко, С.Ж. Жұмағали

*Институт космической техники и технологии, Алматы, Казахстан*

\*Автор для корреспонденции: [ajgerim.azimbaeva@mail.ru](mailto:ajgerim.azimbaeva@mail.ru)

**Аннотация.** Данная статья посвящена разработке имитационной модели определения координат воздушных объектов по отраженному от воздушного объекта и принятому на антенну навигационного приемника навигационному сигналу ГНСС. Для решения задачи радиолокации воздушных объектов с использованием бистатической локации на основе использования спутников ГНСС, необходимо было предварительно оценить энергию или энергетический потенциал спутникового навигационного сигнала, отраженного от воздушного объекта, который затем приходит на приемную антенну навигационной аппаратуры потребителей. Полученные результаты в виде разработанных вычислительных схем лягут в основу алгоритмического и программного обеспечения системы пассивной радиолокации и позволят определить требования к ее техническому обеспечению, проводимых в рамках грантового проекта МОН РК № AP09260581. В данной работе под имитационным моделированием понимается такой подход к моделированию сложных систем, позволяющий разработать единую метамоделю, объединяющую в целостную совокупность модели объектов и процессов их взаимодействия на основе единого информационно-событийного пространства в единой дискретной шкале времени, и реализовать полученную метамоделю в электронно-эквивалентной форме на электронной вычислительной машине. Одной из основных задач исследования сложных радиотехнических систем путем моделирования является выбор принципов моделирования, которые должны позволить осуществить построение моделируемой системы в соответствии с поставленными целями и задачами исследования таким образом, чтобы модель адекватно отражала процессы и закономерности поведения исследуемой системы с необходимой степенью достоверности и детализации. Одним из наиболее продуктивных методик разработки программно-технического комплекса имитационного моделирования является объектно-ориентированное моделирование. Использование объектно-ориентированного моделирования позволяют объединить множество моделей объектов и процессов сложной системы в единую имитационную метамоделю, которая затем реализуется в электронно-эквивалентном виде на компьютере.

**Ключевые слова:** ГНСС, система глобального позиционирования, TLE, электронная вычислительная машина, наземный приемник, спутник.

Received: 02 November 2022

Accepted: 15 February 2023

Available online: 28 February 2023