

# СТРУКТУРНАЯ СХЕМА МОДУЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ МЕСТОПОЛОЖЕНИЯ МАЛЫХ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ

**Титенко Евгений Анатольевич,**  
Юго-Западный государственный университет, г. Курск, Россия,  
[johntit@mail.ru](mailto:johntit@mail.ru)

**Сизов Александр Семенович,**  
Юго-Западный государственный университет, г. Курск, Россия

**Щитов Алексей Николаевич,**  
Юго-Западный государственный университет, г. Курск, Россия,  
[a.n.schitov@mail.ru](mailto:a.n.schitov@mail.ru)

**Шевцов Алексей Николаевич,**  
Юго-Западный государственный университет, г. Курск, Россия,  
[aleksey\\_shevtsov95@mail.ru](mailto:aleksey_shevtsov95@mail.ru)

**Щитова Екатерина Николаевна,**  
Юго-Западный государственный университет, г. Курск, Россия,  
[e.n.schitova@mail.ru](mailto:e.n.schitova@mail.ru)

**Скрипкина Елена Васильевна,**  
Юго-Западный государственный университет, г. Курск, Россия

DOI: 10.36724/2072-8735-2021-15-4-28-34

**Manuscript received** 15 February 2021;

**Revised** 04 March 2021;

**Accepted** 22 March 2021

**Ключевые слова:** микроконтроллер, блок поиска, декодирование, координаты судна, триангуляция

**Актуальность.** Известные модели, алгоритмы и технические решения определения координат воздушных судов частично подходят для определения местоположения малых космических аппаратов, так как последние не имеют собственных средств определения и передачи координат. Данное ограничение не позволяет вести непрерывное управления малым космическим аппаратом и снижает его функциональные возможности. Предлагается использовать активно развиваемую систему автоматического зависящего наблюдения-вещания, устанавливаемую на воздушных судах и позволяющую передавать их координаты, в том числе на малые космические аппараты. Такие воздушные суда считаются своеобразными подвижными эталонными объектами в воздушном пространстве Земли. В исследовании ставится и решается модифицированная задача триангуляции – определение координат малого космического аппарата по координатам эталонных подвижных объектов (воздушных судов). **Цель** Разработка структурной схемы модуля, вычисляющего координаты подвижного космического аппарата при помощи математической модели обработки сигналов, получаемых с эталонных воздушных судов, передающих собственные координаты. **Методы.** В рамках статьи рассматриваются основные физические (эффект Доплера) и геометрические соотношения передачи сообщений между приемниками и передатчиками, а также аппаратно-программные решения, предназначенные для получения обработки координат передатчиков сообщений на борту малого космического аппарата. Полученные результаты позволяют определить местоположение ма-

лого космического аппарата. **Общая структурная схема модуля определения координат имеет параллельную организацию и может применяться в высокопроизводительных вычислительных системах. Результаты.** На основе математической модели получены алгоритм определения области нахождения аппарата и структурная схема модуля обработки координат, отличающаяся наличием специализированного блока параллельного поиска. Моделирование алгоритма на эталонных данных показало необходимую точность определения области нахождения аппарата в результате решения модифицированной задачи. Полученные значения дисперсии расчетной области свидетельствуют о работоспособности данного подхода и оправдывают аппаратное решение задачи определения координат малого космического аппарата. **Заключение.** Структурная схема модуля определения местоположения МКА на основании сигналов АЗН-В является наиболее компактным и энергетически менее затратным решением, нежели GPS, позволяющим вычислять координаты МКА при помощи приемного устройства, расходую запас АКБ только лишь на прием и обработку данных. В отличие от представленной схемы приема-обработки и вычисления координат МКА, существующие подобные решения в ряде наноспутников стандарта CubeSat используют помимо алгоритма обработки и приемного тракта, еще и передающее оборудование, которое является в разы более энергетически затратным, нежели оборудование представленное в виде структурной схемы модуля определения местоположения МКА в данной статье.

#### Информация об авторах:

**Титенко Евгений Анатольевич,** Юго-Западный государственный университет, в.н.с. Центра перспективных исследований и разработок, г. Курск, Россия

**Сизов Александр Семенович,** Юго-Западный государственный университет, д.т.н. профессор кафедры Программной инженерии г. Курск, Россия

**Щитов Алексей Николаевич,** Юго-Западный государственный университет, м.н.с. Центра перспективных исследований и разработок, г. Курск, Россия

**Шевцов Алексей Николаевич,** Юго-Западный государственный университет, аспирант 2-го курса, г. Курск, Россия

**Щитова Екатерина Николаевна,** Юго-Западный государственный университет, студентка, г. Курск, Россия

**Скрипкина Елена Васильевна,** Юго-Западный государственный университет, к.т.н., доцент кафедры высшей математики г. Курск, Россия

#### Для цитирования:

Титенко Е.А., Сизов А.С., Щитов А.Н., Шевцов А.Н., Щитова Е.Н., Скрипкина Е.В. Структурная схема модуля определения местоположения малых космических аппаратов // Т-Comm: Телекоммуникации и транспорт. 2021. Том 15. №4. С. 28-34.

#### For citation:

Titenko E.A., Sizov A.S., Schitov A.N., Shevtsov A.N., Schitova E.N., Skripkina E.V. (2021) Structural diagram of the module for determining the location of small space vehicles. T-Comm, vol. 15, no.4, pp. 28-34. (in Russian)

**Введение**

Для обеспечения безопасности полетов Международная организация гражданской авиации активно использует стандарты и рекомендации для воздушных судов (ВС) и получения их важнейших летных данных. В качестве системы, способной без значительных финансовых и временных затрат обеспечить выполнение требований по мониторингу местоположения воздушного судна в нормальных условиях полета каждые 15 минут, является система спутникового автоматического зависимого наблюдения-вещания (АЗН-В). Министерством транспорта РФ в интересах развития навигационно-информационного обеспечения ВС были выработаны рекомендации по созданию систем обеспечения безопасности на базе российских космических комплексов с полезной нагрузкой АЗН-В.

Автоматическое зависимое наблюдение-вещание (Automatic dependent surveillance-broadcast – ADS-B) – эта система наблюдения за воздушным судном (ВС), основана на передаче информации о состоянии и характеристиках ВС в наземный пункт управления. Постоянно передаваемые координаты, скорость и курс ВС являются важнейшими летными характеристиками ВС, используемыми в информационно-технических системах обеспечения безопасности полетов. Кроме того, сигналы АЗН-В могут приниматься и обрабатываться не только в наземном пункте управления, но и на борту другого ВС или космического аппарата. Тем не менее, в настоящее время оригинальных отечественных схем и алгоритмических решений, полноценно использующих систему АЗН-В с учетом ограниченных вычислений на борту малых космических аппаратов нет [1, 2].

Главный замысел и актуальность исследования связаны с разработкой структурной схемы модуля определения местоположения малых космических аппаратов на основе сигналов АЗН-В. Совмещение процессов приема, декодирования сообщений и накопления данных от АЗН-В передатчиков, а при необходимости – передачи данных о ВС в наземные пункты управления позволяет существенно повысить использования МКА. Создание структурной схемы модуля определения координат на борту МКА позволит:

- получать координаты и иные характеристики воздушных судов;
- уточнять собственные координаты МКА;
- накапливать принимаемые данные от передающих судов и в установленных точках земной поверхности, по запросу, передавать данные на наземные пункты, используя возможности группировок МКА;
- выполнять функции космических ретрансляторов в зонах без возможности приема сигналов наземными станциями АЗН-В.

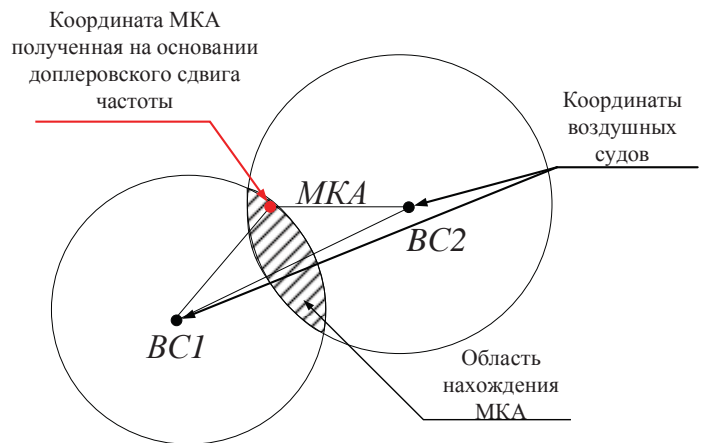
**Постановка задачи**

В исследовании развивается подход к задаче непрерывного определения координат МКА по сообщениям от датчиков АЗН-В, установленных на воздушных судах. Особенность данного перехода заключается в том, что эталонные объекты (воздушные суда) являются подвижными, но скорость космических аппаратов является гораздо более высокой, что позволяет говорить об определении области нахож-

дения космического аппарата с учетом погрешности расчетов.

Пусть в воздушном пространстве имеется  $n$  воздушных судов, движущихся на высотах 6-10 км и передающих свои координаты, скорость, курс и др. всем потенциальным приемникам, в том числе низкоорбитальному малому космическому аппарату, находящемуся на высоте 500-600 км. Среди  $n$  воздушных судов выделяется как минимум 2 максимально удаленных друг от друга судна, в проекции между которыми находится МКА с неизвестными координатами.

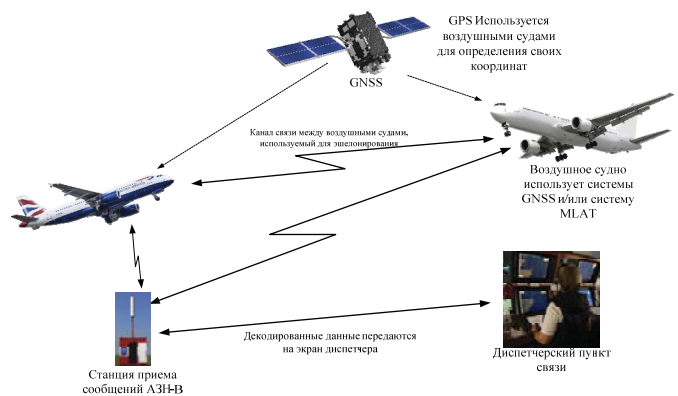
Задача определения координат (области координат) МКА на основе известных координат ВС имеет запись в виде планиметрической задачи нахождения вершины треугольника с известными внутренними углами и расстояниями от 2-х эталонных точек, рисунок 1.



**Рис. 1.** Определение местоположения МКА

Здесь представлены выделенные 2 эталонных воздушных судна с координатами  $(x_1, y_1)$ ,  $(x_2, y_2)$ . Неизвестные координаты МКА обозначены  $(space\_x, space\_y)$ . На основании применяемых сообщений на частоте ответа 1090 МГц и распаковки пакета, становится возможным, используя математический аппарат, определить местоположения МКА.

Технически сообщения от системы АЗН-В передаются в режиме радиовещания, что позволяет его получать и обрабатывать любым приёмником чувствительностью минус 100 дБ/Вт. Это могут быть воздушные суда или МКА, оборудованные системой АЗН-В. На рисунке 2 приведена схема приема-обработки сигналов АЗН-В.



**Рис. 2.** Общая схема приема-обработки сигналов АЗН-В

В рамках системы АЗН-В могут использоваться различные каналы и стандарты передачи сообщений (стандарт 1090 ES, стандарт UNA, стандарт 4 VDL). В работе используется стандарт 1090 ES, предназначенный для наблюдения за воздушными судами и транспортными средствами, оснащенными ответчиками АЗН-В 1090 ES, а также для цифровой обработки информации и передачи данных наблюдения в центры ОВД. Сообщение АЗН-В как структура данных имеет длину 112 бит и состоит из пяти частей (табл. 1).

Таблица 1

Структура сообщения ADS-B

DF 5	** 3	ICAO 24	DATA 56	PI 24
------	------	---------	---------	-------

В начале сообщения всегда передается кодовый идентификатор начала сеанса (префикс-преамбула длительностью 8 мкс). Кодовое поле DF содержит признак, позволяющий приемнику идентифицироваться и синхронизироваться с передатчиком. Для расширенной формы передачи это поле имеет кодовое значение 10001<sub>2</sub> – так называемый тип DF17, содержащий координаты воздушного судна. Следующее поле занимает 3 бита. В них закодированы возможности приемоответчика, которые зависят от используемого подтипа АЗН-В [1, 2, 10].

Поле ICAO содержит закодированный в 24 битах международный уникальный код или идентификатор воздушного судна.

Поле DATA содержит закодированный в 56 битах собственно пакет данных. Первые 5 бит данных – это поле TC (Type Code), содержащее подтип хранящихся данных. Поле TC определяет вид передаваемой информации, хранящейся в пакете поля DATA. В оставшемся 51 бите пакета содержится информация о высоте, курсе, местоположении и т.д., в зависимости от подтипа хранящихся данных TC.

В таблице 2 приведен пример структуры поля DATA, содержащего информацию о координатах ВС в воздухе с барометрической высотой (табл. 2).

Таблица 2

Структуры поля DATA

Порядок следования бит в пакете DATA	Описание полей
1-5	Код типа формата (Type Code)
6-7	Статус наблюдения (Surveillance Status)
8	Признак одной антенны (NIC supplement-B)
9-20	Высота (Altitude)
21	Время (Time UTC)
22	Формат (CPR)
23-39	Кодированная ширина в формате CPR (Latitude)
40-56	Кодированная ширина в формате CPR (Latitude)

Поле PI (24 бита) содержит информацию для детектирования ошибок в полученных сообщениях. Контрольная сумма АЗН-В использует циклический контроль избыточности для проверки правильности полученного сообщения, где последние 24 бита являются битами четности

Чтобы определить, какая информация содержится в сообщении ADS-B, необходимо обратиться к коду сообщения, указанному в битах 33-37 сообщения ADS-B (или первых 5 битах сегмента DATA).

В таблице 3 показаны отношения между каждым кодом типа и его информацией, содержащейся в сегменте DATA.

Таблица 3

Информация, содержащаяся в коде каждого сообщения ADS-B

Содержание	Код
Опознавательный знак самолета	1 – 4
Положение на поверхности	5 – 8
В воздухе позиция (с высотой Баро)	9 – 18
Скорости в воздухе	19
Позиция в воздухе (по GNSS)	20 – 22
Зарезервировано	23 – 27
Статус самолета	28
Целевое состояние и информация о состоянии	29
Состояние эксплуатации ВС	31

Данное описание полей АЗН-В позволяет задать алгоритмические процессы и математические выражения обработки сообщений АЗН-В и, соответственно, уточнить требования к структурной схеме модуля АЗН-В для приема и декодирования на борту МКА.

**Метод решения**

Известен достаточно стандартный подход проектирования модуля приема-передачи сигналов АЗН-В. Он заключается в реализации функции трансляции данных в стационарный пункт для последующей обработки. Требования on-line обработки сообщений АЗН-В не предъявляются, что является критичным для функционирования системы обеспечения безопасности ВС. Типовая структурная схема модуля приема-передачи приведена на рисунке 3.



Рис. 3. Структурная схема приемника АЗН-В

Схема, представленная на рисунке 3, предназначена для приема, декодирования и дальнейшей передачи информации другим МКА. В схеме отсутствует блок обработки данных, так как МКА фактически выступает ретранслятором для наземных пунктов приема и управления. Главным недостатком данной схемы является невозможность выполнения декодирования на борту МКА, что снижает оперативность обработки и определения местоположения.

В рамках создания модуля определения местоположения МКА работающего на частоте режима VDL-4 разработана структурная схема модуля приема-обработки-определения местоположения МКА, представленная на рисунке 4.



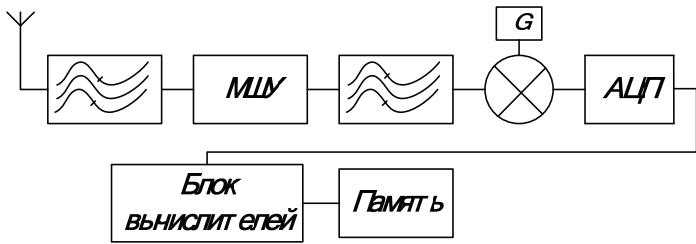


Рис. 4. Структурная схема модуля определения местоположения МКА

Новизна предлагаемой схемы обработки сообщений АЗН-В заключается в возможности их полного декодирования на борту МКА и накоплении полей полезной информации в энергонезависимой памяти. Такой инженерно-конструкторский подход позволяет:

- выделить на борту требуемую информацию из принимаемого пакета;
- сэкономить энергию для жизнеобеспечения МКА;
- вести практически непрерывный мониторинг воздушной обстановки;
- выполнить передачу данных в наиболее подходящих пространственно-временных координатах орбиты и погодных условиях.

Основное практическое преимущество электронного модуля определения местоположения МКА – обеспечение непрерывности сбора и временного накопления информации о параметрах и положении МКА.

Научно-техническая задача проекта заключается в проектировании архитектуры модуля приема-декодирования-хранения сообщений АЗН-В, имеющего в своём составе блок вычислений. Совмещение блоков приема, преобразования, декодирования и хранения в одном модуле представляет научный и прикладной интерес.

Согласно схеме (рис. 3), сигнал, принимаемый антенно-фидерным оборудованием, попадает через фильтры, МШУ и смеситель в АЦП, где он переводится в цифровую форму. Далее полученный цифровой сигнал с помощью алгоритма обрабатывается в блоке вычислений, после чего выделенные поля полезной информации сохраняются в энергонезависимой памяти модуля.

Таким образом, разрабатываемый модуль, за счет реализации основных и дополнительных функциональных возможностей, позволяет повысить интеллектуальные возможности низкоорбитального МКА, имеющего функции сбора, селекции и хранения информации.

Работа блока вычислителей в составе созданной схемы (рис.3) основана на оригинальной математической модели определения местоположения МКА, использующей достаточно тривиальные выкладки, но обеспечивающей решения поставленной задачи – определить область нахождения МКА в пространстве на основе комбинации доплеровского эффекта и тригонометрических зависимостей.

Основной математической модели определения координат МКА при помощи доплеровского сдвига частоты, является формула зависимости длины волны от частоты сигнала, где  $\lambda = c / f$  (здесь  $c$  – скорость света,  $f_0$  – частота испускаемых источником волн) [4, 12].

Если источник приближается к неподвижному наблюдателю со скоростью  $v$  относительно среды, то  $\lambda = (c - v) / f$ . Отсюда частота, которую будет регистрировать неподвижный приёмник, равна:

$$f_{\partial} = \frac{f_0}{\left(1 - \frac{v_{BC}}{c}\right)} \quad (1)$$

Если же источник и приёмник движутся относительно друг друга, то:

$$f_{\partial} = f_0 \frac{\left(1 + \frac{v_{BC}}{c}\right)}{\left(1 - \frac{v_{MKA}}{c}\right)} \quad (2)$$

Для определения местоположения МКА из формулы доплеровского сдвига частоты (1) выражается скорость движущегося объекта:

$$v_{BC} = c \cdot \left(1 - \frac{f_0}{f_{\partial}}\right) \quad (3)$$

где  $f_{\partial}$  – частота, полученная от доплеровского измерителя частоты.

Для (2) при известной величине скорости ВС, скорость МКА равна:

$$v_{MKA} = c - \frac{f_0 \cdot (c + v_{BC})}{f_{\partial}} \quad (4)$$

Для формул (3), (4) берется интеграл по скорости и определяется расстояние от источника до приемника. Следует заметить, что расстояние будет постоянно изменяться ввиду движения объектов. Для этого считают расстояние от источника до приемника в определенный момент времени:

$$S = \int_{t_0}^{t_1} c \cdot \left(1 - \frac{f_0}{f_{\partial}}\right) dt = c \left(1 - \frac{f_0}{f_{\partial}}\right) \Big|_{t_0}^{t_1} = c \left(1 - \frac{f_0}{f_{\partial}}\right) (t_1 - t_0) = \left(c - c \cdot \frac{f_0}{f}\right) (t_1 - t_0) = ct_1 - \frac{cf_0}{f} t_1 - ct_0 + \frac{cf_0}{f} t_0 \quad (5)$$

Как итог, расстояние  $S$  до подвижного объекта равно:

$$S = \int_{t_0}^{t_1} c - \frac{f_0 \cdot (c + v_{BC})}{f_{\partial}} dt = c - \frac{f_0 \cdot (c + v_{BC})}{f_{\partial}} \Big|_{t_0}^{t_1} = c - \frac{f_0 \cdot (c + v_{BC})}{f_{\partial}} (t_1 - t_0) = c - \frac{f_0 \cdot (c + v_{BC})}{f_{\partial}} (t_1 - t_0) = f_{\partial} \cdot c - f_0 \cdot (c + v_{BC}) (t_1 - t_0) = f_0 \cdot c \cdot t_1 - f_0 \cdot c \cdot t_0 + f_0 \cdot v_{BC} \cdot t_1 - f_0 \cdot v_{BC} \cdot t_0 = [m.k.S \cong vt] \Rightarrow S \quad (6)$$

Полученное расстояние для подвижного и неподвижного объектов позволяет применять к ним известные тригонометрические формулы.

Ввиду того, что расстояние от ВС до неподвижного объекта известно, а также известны координаты ВС, становится возможным определить координату приемника методом обратной угловой засечки (рис. 5) [3-6, 11].

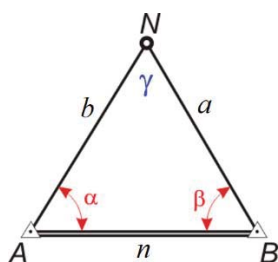


Рис. 5. Определение координат точки N методом обратной угловой засечки

Используя формулы Юнга, далее вычисляются координаты неизвестной точки N -  $X_N, Y_N$ :

$$x_N = \frac{x_A \operatorname{ctg} \beta + x_B \operatorname{ctg} \alpha + y_B - y_A}{\operatorname{ctg} \alpha + \operatorname{ctg} \beta} \quad (7)$$

$$y_N = \frac{y_A \operatorname{ctg} \beta + y_B \operatorname{ctg} \alpha - x_B + x_A}{\operatorname{ctg} \alpha + \operatorname{ctg} \beta}$$

Для определения углов  $\alpha$  и  $\beta$  используется теорема косинусов:

$$\cos \gamma = \frac{a^2 + b^2 - n^2}{2 \cdot b \cdot a} \quad (8)$$

Определение местоположения неподвижного приемника накладывает ограничения, связанные с аппроксимацией кривизны поверхности Земли между координатами эталонных объектов [7-9].

На рисунке 6 изображено три эталонных объекта, отмеченных буквами B, C, D и приемник A. Пунктирными линиями выделены радиус кривизны Земли и разница высот воздушных судов, которые оказывают влияние на точность определения координат МКА.

Определение местоположения МКА выполняется, предположив, что МКА и ВС передвигаются с различными скоростями.

### Результаты и обсуждения

Для обеспечения точности эксперимента, состоящего из серии измерений в момент полёта ВС необходимо учитывать доплеровское смещение частоты, влияющее на измерение координат МКА. Были произведены вычисления от точек местности, примерно одинаково удалённых друг от друга на одном и том же доплеровском смещении частоты, с условием, что через 24 часа спутник пройдёт на той же местности и ВС будут находиться в том же положении.

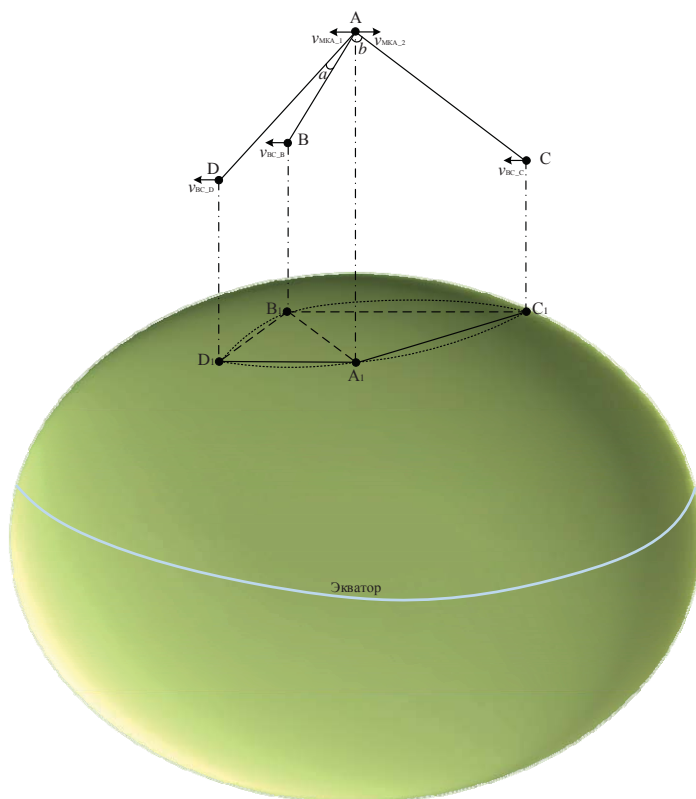


Рис. 6. Размещение и пропорции между подвижными эталонными объектами

В таблице 6 представлены исходные данные, получаемые с воздушных судов для расчёта местоположения МКА, где  $H_{BC}$  – высота ВС над поверхностью моря,  $V_{BC}$  – скорость ВС, R – радиус зоны покрытия передатчиком АЗН-В (зависит от типа ВС).

Таблица 6

Расчетные данные местоположения МКА, находящихся над РФ (получены при помощи доплеровского сдвига частоты)

№ п/п	Нахождение ВС	(X;Y) <sub>МКА</sub> рассчитанные по доплеровскому сдвигу частоты				Дисперсия
		1	2	3	4	
1	Орёл-Измалково	(51,58; 39,11)	(51,59; 39,10)	(51,58; 39,10)	(51,59; 39,10)	(3,3 · 10 <sup>-5</sup> ; 2,5 · 10 <sup>-5</sup> )
2	Курск-Орел	(52,63; 37,65)	(52,63; 37,65)	(52,63; 37,65)	(52,63; 37,65)	(0; 0)
3	Курск-Воронеж	(52,32; 37,65)	(52,33; 37,65)	(52,32; 37,65)	(52,32; 37,65)	(2,5 · 10 <sup>-5</sup> ; 0)
4	Орел-Архангельское	(52,59; 37,94)	(52,59; 37,94)	(52,59; 37,94)	(52,59; 37,94)	(0;0)
5	Липецк-Данково	(52,70; 36,80)	(52,70; 36,79)	(52,70; 36,79)	(52,70; 36,79)	(0; 2,5 · 10 <sup>-5</sup> )

В таблице 6 была определена мера разброса значений величины относительно её математического ожидания.

## Выводы

1. Предложена структурная схема устройства, имеющая параллельную организацию и аппаратно поддерживающая основные операции вычисления координат.
2. Математический аппарат определения области нахождения МКА на основе геометрических принципов позволяет определить область, в которую попадает серия координат, полученных с помощью доплеровского сдвига частоты.
3. Положительный результат применения модели определения местоположения МКА на основании доплеровского сдвига частоты состоит в том, что координаты определяются от различных ВС, принятых в единицу времени, относительно чего становится возможным получить область точек, в которой находится МКА.
4. Моделирование и расчеты показали, что статистическая обработка смещения координат относительно построенной области при повторных измерениях на следующих витках движения МКА подтверждает достижение необходимой точности расчетов. Дисперсия, вычисленная для серии измерений координат, показывает значительную точность определения местоположения МКА методом доплеровского смещения частоты (порядок оценок дисперсии составляет  $10^{-5}$ ).

## Литература

1. Авиационное наблюдение в реальном времени (отслеживание самолетов) доступно каждому. Электронный ресурс URL: (<https://adsbradar.ru/ads-b-for-beginners>).
2. Распоряжение № МС-68-Р Об утверждении Концепции внедрения автоматического зависимого наблюдения на основе единого стандарта с развитием до функционала многопозиционных систем наблюдения в Российской Федерации и плана мероприятий по ее реализации. 41 с.
3. Щитов А.Н., Титенко Е.А., Сизов А.С. Модель вычисления координат малого космического аппарата на основе датчиков подвижных объектов // В сборнике: Интеллектуальные системы 4-й промышленной революции. Сборник материалов III Международного форума. Под редакцией В.И. Сырякина. 2020. С. 53-57.
4. Шиленков Е.А., Титенко Е.А., Фролов С.Н., Щитов А.Н., Зарубин Д.М., Ханис А.Л., Добросердов Д.Г., Горбунов А.А. Подход к области определения подвижного объекта на основании идеализированных сигналов // В сборнике: Инфокоммуникации и космические технологии: состояние, проблемы и пути решения. Сборник научных статей по материалам IV Всероссийской научно-практической конференции. 2020. С. 101-106.
5. Титенко Е.А., Фролов С.Н., Щитов А.Н., Щитова Е.Н. Математическая модель определения местоположения наноспутника формата CubeSat // В сборнике: Инфокоммуникации и космические технологии: состояние, проблемы и пути решения. Сборник научных статей по материалам IV Всероссийской научно-практической конференции. 2020. С. 107-112.
6. Шевцов А.Н., Щитов А.Н., Щитова Е.Н. Повышение качества передачи информации при помощи автономной системы определения координат // В сборнике: Инфокоммуникации и космические технологии: состояние, проблемы и пути решения. Сборник научных статей по материалам IV Всероссийской научно-практической конференции. 2020. С. 274-278.
7. Захаренков А.И., Тетерин Д.П., Добросердов О.Г., Титенко Е.А., Фролов С.Н., Щитов А.Н., Передельский Г.И. Модель и алгоритм вычисления координат летательных аппаратов на основе датчиков местоположения // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Управление, вычислительная техника, информатика. Медицинское приборостроение. 2019. Т. 9. № 4 (33). С. 163-180.
8. Freire Carrera F., Shilenkov E., Titenko E., Frolov S., Shitov A. Mathematical model of the earth's magnetic anomalies // Revista Tecnica de la Facultad de Ingenieria Universidad del Zulia. 2020. Т. 43. № S1. С. 35-39.
9. Frolov S., Chadrina O., Titenko E., Shitov A., Andrey Kh., Dmitry T., Andrey G. Development of a method to determine the location of a nanosatellite using ADS-B // Revista Tecnica de la Facultad de Ingenieria Universidad del Zulia. 2020. Т. 43. № S1. С. 48-55.
10. Атакицев И.В., Емельянов С.Г., Жижина С.В., Семенов А.К., Мудрик В.Ю., Титенко Е.А. Эталонная модель двойственно-атрибутной транслирующей метаграмматики и структурно-лингвистический способ обработки сложноорганизованных данных // Известия Тульского государственного университета. Серия: Технологическая системотехника. 2006. № 14. С. 24-27.
11. Мирталибов Т.А., Фролов С.Н., Ханис А.Л., Титенко Е.А. Многоагентные системы в технической диагностике сложных технических объектов // Известия Юго-Западного государственного университета. 2015. № 3 (60). С. 18-25.
12. Титенко Е.А., Тутов Е.Б. Модифицированный алгоритм поиска с итерационным заглублением на графовых структурах // Известия Юго-Западного государственного университета. 2011. №3 (36). С. 82-89.

## STRUCTURAL DIAGRAM OF THE MODULE FOR DETERMINING THE LOCATION OF SMALL SPACE VEHICLES

**Evgeny A. Titenko**, The Southwest State University, Kursk, Russia, [johnit@mail.ru](mailto:johnit@mail.ru)

**Alexander S. Sizov**, The Southwest State University, Kursk, Russia

[a.n.schitov@mail.ru](mailto:a.n.schitov@mail.ru)

**Alexey N. Shevtsov**, The Southwest State University, Kursk, Russia, [aleksey\\_shevtsov95@mail.ru](mailto:aleksey_shevtsov95@mail.ru)

**Ekaterina N. Schitova**, South-Western State University, Kursk, Russia, [e.n.schitova@mail.ru](mailto:e.n.schitova@mail.ru)

**Elena V. Skripkina**, South-Western State University, Kursk, Russia

### Abstract

**Relevance.** Known models, algorithms and technical solutions for determining the coordinates of aircraft are partially suitable for determining the location of small spacecraft, since the latter do not have their own means of determining and transmitting coordinates. This limitation does not allow continuous control of a small spacecraft and reduces its functionality. It is proposed to use the actively developing system of automatic dependent surveillance-broadcasting, installed on aircraft and allowing transmission of their coordinates, including to small spacecraft. Such aircraft are considered to be a kind of mobile reference objects in the airspace of the Earth. The study poses and solves a modified triangulation problem - determining the coordinates of a small spacecraft by the coordinates of reference moving objects (aircraft). **Purpose.** Development of a block diagram of a module that calculates the coordinates of a mobile spacecraft using a mathematical model for processing signals received from reference aircraft transmitting their own coordinates. **Methods.** Within the framework of the article, the main physical (Doppler effect) and geometric relationships of message transmission between receivers and transmitters and hardware and software solutions are considered, designed to obtain the processing of coordinates of message transmitters on board a small spacecraft. **The results** obtained make it possible to determine the location of the small spacecraft. The general block diagram of the coordinate determination module has a parallel organization and can be used in high-performance computing systems. On the basis of a mathematical model, an algorithm for determining the area of finding the apparatus and a block diagram of the coordinate processing module are obtained, characterized by the presence of a specialized parallel search unit. Modeling the algorithm on the reference data has shown the required accuracy in determining the area of the vehicle as a result of solving the modified problem. The obtained values of the variance of the computational domain indicate the efficiency of this approach and justify the hardware solution of the problem of determining the coordinates of a small spacecraft. **Conclusion.** The block diagram of the module for determining the position of the small spacecraft based on the ADS-B signals is the most compact and energetically less expensive solution than the GPS, which allows calculating the coordinates of the small spacecraft using a receiver, the consumption of the battery is only for receiving and processing data. In contrast to the presented scheme for receiving-processing and calculating the coordinates of the small spacecraft, existing similar solutions in a number of nanosatellites of the CubeSat standard are used, in addition to the processing algorithm and the receiving path, also transmitting equipment, which is many times more energy-intensive than the equipment presented in the form of a structural diagram of the position determination module ICA, in this article.

**Keywords:** microcontroller, search unit, decoding, ship coordinates, triangulation

### References

1. viation surveillance in real time (aircraft tracking) is available to everyone. Electronic resource URL: (<https://adsbradar.ru/ads-b-for-beginners>).
2. Order No. MS-68-R On approval of the Concept for the introduction of automatic dependent surveillance based on a single standard with the development of multi-position surveillance systems in the Russian Federation to the functional level and an action plan for its implementation. 41 p.
3. Shchitov A.N., Titenko E.A., Sizov A.S. (2020) Model for calculating the coordinates of a small spacecraft based on sensors of moving objects. In the collection: *Intelligent systems of the 4th industrial revolution. Collection of materials of the III International Forum*. Edited by V.I. Sryamkina. P. 53-57.
4. Shchitov E.A., Titenko E.A., Frolov S.N., Shchitov A.N., Zarubin D.M., Khanis A.L., Dobroserdov D. G., Gorbunov A.A. (2020) Approach to the field of determining a moving object based on idealized signals. In the collection: *Infocommunications and space technologies: state, problems and solutions. Collection of scientific articles based on the materials of the IV All-Russian scientific-practical conference*. P. 101-106.
5. Titenko E.A., Frolov S.N., Shchitov A.N., Shchitova E.N. (2020) Mathematical model for determining the location of a nanosatellite of the CubeSat format. In the collection: *Infocommunications and space technologies: state, problems and solutions. Collection of scientific articles based on the materials of the IV All-Russian scientific-practical conference*. P. 107-112.
6. Shevtsov A.N., Shchitov A.N., Shchitova E.N. (2020) Improving the quality of information transfer using an autonomous coordinate determination system. In the collection: *Infocommunications and space technologies: state, problems and solutions. Collection of scientific articles based on the materials of the IV All-Russian scientific-practical conference*. P. 274-278.
7. Zakharenko A.I., Teterin D.P., Dobroserdov O.G., Titenko E.A., Frolov S.N., Shchitov A.N., Peredelsky G. (2019) Model and algorithm for calculating the coordinates of aircraft based on location sensors. *Bulletin of the South-West State University. Series: Management, computer technology, informatics. Medical instrumentation*. Vol. 9. No. 4 (33). P. 163-180.
8. Freire Carrera F., Shchitov E., Titenko E., Frolov S., Shchitov A. (2020) Mathematical model of the earth's magnetic anomalies. *Revista Tecnica de la Facultad de Ingenieria Universidad del Zulia*. Vol. 43. No. S1. P. 35-39.
9. Frolov S., Chadrina O., Titenko E., Shchitov A., Andrey Kh., Dmitry T., Andrey G. (2020) Development of a method to determine the location of a nanosatellite using ADS-B. *Revista Tecnica de la Facultad de Ingenieria Universidad del Zulia*. Vol. 43. No. S1. P. 48-55.
10. Takishev I.V., Emelyanov S.G., Zhizhina S.V., Semenov A.K., Mudrik V.Yu., Titenko E.A. (2006) The reference model of the dual-attribute translating metagrams and the structural-linguistic method of processing complex data. *Bulletin of the Tula State University. Series: Technological systems engineering*. No. 14. P. 24-27.
11. Mirtalibov T.A., Frolov S.N., Khanis A.L., Titenko E.A. (2015) Multiagent systems in technical diagnostics of complex technical objects. *Bulletin of the South-West State University*. No. 3 (60). P. 18-25.
12. Titenko E.A., Tutov E.B. (2011) Modified search algorithm with iterative deepening on graph structures / *Bulletin of the South-West State University*. No. 3 (36). P. 82-89.

### Information about authors:

**Evgeny A. Titenko**, Southwest State University, Senior Researcher, Center for Advanced Research and Development, Kursk, Russia

**Alexander S. Sizov**, Southwest State University, Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department of PI Kursk, Russia

**Alexey N. Schitov**, Southwest State University, junior researcher Center for Advanced Research and Development, Kursk, Russia

**Alexey N. Shevtsov**, Southwest State University, 2nd year postgraduate student, Kursk, Russia

**Ekaterina N. Schitova**, South-Western State University, 1st year student, Kursk, Russia

**Elena V. Skripkina**, Southwestern State University, Ph.D., Associate Professor of the Department of Higher Mathematics, Kursk, Russia