

## Определение координат и времени пункта по локальным радиосигналам

© С. С. Смирнов<sup>1</sup>, С. Д. Петров<sup>1</sup>, Д. А. Трофимов<sup>1</sup>, И. В. Чекунов<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Санкт-Петербургский государственный университет, г. Санкт-Петербург, Россия

<sup>2</sup>Московский государственный технический университет им. Н. Э. Баумана, г. Москва, Россия

### Реферат

Работа посвящена альтернативным по отношению к глобальным навигационным спутниковым системам (ГНСС) способам определения координат и времени локального пункта. В настоящее время ГНСС являются практически безальтернативным средством определения координат и времени на транспорте и в беспилотной технике. В то же время ГНСС уязвимы к средствам радиоэлектронной борьбы (РЭБ), которые могут применяться как злоумышленниками или противниками, так и органами обеспечения правопорядка. На основе обзора существующих подходов к решению подобных проблем предложена локальная радионавигационная система, базирующаяся на компактных транспортируемых радиомаяках, которая может быть альтернативой ГНСС.

Описаны преимущества подобной локальной радионавигационной системы над другими альтернативными средствами навигации. Основные преимущества заключаются в возможности быстрого развертывания и сворачивания данной системы, за счет массогабаритных характеристик маяков, обеспечивающих их ручную переноску, а также в возможности обеспечения в перспективе селективного доступа за счет быстрой смены несущей частоты по заранее оговоренному правилу. Также подобная быстрая смена частот повышает устойчивость системы к средствам РЭБ, предназначенным как для глушения сигнала, так и для его подмены. Рассмотрены общие принципы построения локальной радионавигационной системы, существующие аналоги. Основная идея заключается в использовании дальномерного псевдослучайного кода, аналогичного кодам, используемым в ГНСС. Данный подход упрощает работу, позволяя использовать уже отработанные алгоритмы. Описана реализация макета локальной радионавигационной системы на основе имеющихся на рынке доступных технических решений. Был выполнен эксперимент по определению координат движущегося объекта, приведены условия выполнения эксперимента и его результаты.

На данный момент основная проблема в части аппаратного обеспечения — отсутствие встроенного хранителя времени и частоты, в дальнейшем планируется его включение в состав аппаратуры. Основной проблемой при обработке измерений с целью получения координат являются многочисленные переотражения, вызванные зданиями и деталями рельефа. Возможными решениями данной проблемы может стать использование приемных антенн, аналогичных ГНСС-антеннам с технологией Choke-ring, а также модификация программного обеспечения по обработке сигнала, которая позволит производить фильтрацию переотраженных сигналов.

**Ключевые слова:** ГНСС, радионавигация, локальная радионавигация.

*Контакты для связи:* Смирнов Сергей Сергеевич ([s.s.smirnov@spbu.ru](mailto:s.s.smirnov@spbu.ru)).

**Для цитирования:** Смирнов С. С., Петров С. Д., Трофимов Д. А., Чекунов И. В. Определение координат и времени пункта по локальным радиосигналам // Труды ИПА РАН. 2024. Вып. 71. С. 18–25.

<https://doi.org/10.32876/AplAstron.71.18-25>

## Determination of the Coordinates and Time of the Point by Local Radio Signals

S. S. Smirnov<sup>1</sup>, S. D. Petrov<sup>1</sup>, D. A. Trofimov<sup>1</sup>, I. V. Chekunov<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Saint-Petersburg State University, Saint-Petersburg, Russia

<sup>2</sup>Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russia

### Abstract

The work is concerned with the alternative methods of determining the coordinates and time of a local point with-outglobal navigation satellite systems (GNSS). Currently, GNSS are practically non alternative methods of determining coordinates and time in transport and unmanned vehicles. At the same time, GNSS are vulnerable to electronic warfare (EW), which can be used by both intruders or opponents, and by law enforcement agencies. Based on a review of existing approaches to solving such problems, a local radio navigation system based on compact transportable radio beacons is proposed, which can be an alternative to GNSS.

The advantages of a local radio navigation system over other alternative methods of navigation are described. The main advantages are the ability to deploy this system quickly, due to the mass and size characteristics of the beacons, ensuring their manual transportation, as well as the possibility of providing selective access due to a quick change of the carrier frequency according to a pre-agreed rule in the future. Also, such a rapid change of frequencies increases the sys-

tem's resistance to EW equipment designed for both jamming and spoofing a signal. The general principles of constructing a local radio navigation system and the existing analogs are considered. The main idea is to use a rangefinder pseudo-random code similar to the codes used in GNSS. This approach simplifies the work allowing the use of already developed algorithms. The implementation of a local radio navigation system model based on the technical solutions available on the market is described. An experiment to determine the coordinates of a moving object was carried out, the conditions for performing the experiment and its results are given.

Currently, the main problem in terms of hardware is the lack of a built-in time and frequency keeper, in the future it is planned to be included in the equipment. The main problem in processing measurements in order to obtain coordinates are numerous re-reflections caused by buildings and terrain details. Possible solutions to this problem may include the use of receiving antennas similar to GNSS antennas with Choke-ring technology, as well as modification of the signal processing software which will allow to filter the signals reflected.

**Keywords:** GNSS, radionavigation, local radionavigation.

*Contacts: Sergey S. Smirnov (s.s.smirnov@spbu.ru).*

**For citation:** Smirnov S. S., Petrov S. D., Trofimov D. A., Chekunov I. V., Determination of the coordinates and time of the point by local radio signals // Transactions of IAA RAS. 2024. Vol. 71. P. 18–25.

<https://doi.org/10.32876/ApplAstron.71.18-25>

## Введение

Проблема надежного прикладного координатно-временного обеспечения до сих пор остается нерешенной. В настоящее время такие ГНСС, как американская GPS, российская ГЛОНАСС, европейская Galileo или китайская BeiDou, применяются для определения координат и времени, практически монополизировав данную область. Все эти системы сходны между собой, построены по одному принципу и имеют известный ряд проблем. Они создавались по прямому заказу оборонных ведомств соответствующих государств или с учетом их пожеланий. От доступности сигнала ГНСС очень сильно зависят беспилотные летательные аппараты (БПЛА) и системы управляемого оружия. В связи с этим с целью противодействия ГНСС активнейшим образом развиваются технологии радиоэлектронной борьбы (РЭБ). Эти технологии можно разделить на два направления. Первое — это глушение сигнала, то есть полоса передачи навигационного сигнала забивается шумом, прием навигационного сигнала становится невозможным. Второе — это подмена сигнала (также широко применяется английский термин «спуфинг»), когда на рабочей частоте ГНСС передается ложный сигнал, обработка которого выдаст навигационное решение с координатами, отличными от реальных, которые необходимы тому, кто передает подменяющий сигнал. Подобное оборудование находится в доступе не только у государственных организаций, но и у криминальных структур. Кроме того, подавление сигнала ГНСС может выполняться органами охраны правопорядка с целью предотвращения противоправной активности с применением беспилотных средств. Однако эти мероприятия проводятся, как правило, возле важных инфраструктурных объектов, таких как хранилища горюче-смазочных материалов, железнодорожные станции, портовая инфраструктура, а осуществление хозяйственной деятельности, для которой эти объекты были построены,

требует стабильного и надежного координатно-временного обеспечения.

Последнее время активно развиваются технологии противодействия РЭБ ([Meng et al., 2022](#); [Radoš et al., 2024](#)). Они основываются на новых технологиях обработки сигналов и на создании новых типов антенн. В развитии данной техники есть несомненные успехи, но говорить о получении надежного решения пока не приходится. Основная причина отсутствия стабильного результата заключается в слабости сигнала ГНСС, который существенно ниже уровня шума, мощность сигнала определяется мощностью источника энергии, а на навигационном космическом аппарате (НКА) таким источником являются солнечные батареи.

Таким образом, становится актуальной задача создания резервного способа определения координат и времени, устойчивого к средствам РЭБ и сопоставимого по точности с ГНСС.

Можно определить следующие методы:

— устройства, построенные на принципах традиционной астрооптической навигации ([Болотнов и др., 2023](#)), которые обладают абсолютной устойчивостью к РЭБ, но в то же время являются метеозависимыми;

— экстремально-корреляционные методы определения координат ([Баклицкий и др., 2009](#)), то есть ориентирование по точным картам магнитного и/или гравитационного поля, а также по точным картам рельефа. Данные методы также не уязвимы для средств РЭБ, но они требуют таких точных карт и датчиков, которых пока не существует;

— инерциальные навигационные системы. Они обладают полной автономностью, однако их точность уже не соответствует нынешним требованиям, кроме того они требуют точной начальной выставки;

— в качестве альтернативы всем вышеперечисленным методам можно предложить средства наземной радионавигации ([Sauta et al., 2019](#)), как

глобальные, так и локальные. С одной стороны, данные системы подвержены воздействию РЭБ, с другой стороны, они обладают преимуществом работы в любых погодных условиях с опорой на существующие технологии. Также необходимо отметить, что мощность сигнала наземного передатчика можно сделать на несколько порядков выше, чем мощность передатчика на НКА, что затруднит подавление. Также стоит отдельно выделить локальные радионавигационные системы: их можно быстро разворачивать и сворачивать под определенную задачу, средства РЭБ противника могут не успеть прибыть на место и развернуться до выполнения задачи. Свернутая же система, будучи выключенной, никак о себе не заявляет. Кроме того, на локальной системе можно реализовать быструю смену частот и иные методы противодействия РЭБ. Необходимость обеспечить навигационное решение локально в небольшой области дает возможность использовать достаточно маломощные передатчики для обеспечения нужного уровня сигнала. Алгоритмы смены частот можно менять от задачи к задаче, что повышает результативность работы. Помимо применения в оборонных целях, данные системы могут быть развернуты в условиях, когда доступность ГНСС затруднена: в условиях пересеченной горной местности и плотной высотной застройки в городах. Также подобные системы могут быть размещены в зонах, где осуществляется превентивное подавление ГНСС, а широкие параметры настройки и шифрования сигнала могут сделать доступными навигационные услуги для выделенной категории потребителей.

### Обзор существующих локальных радионавигационных систем

Рассмотрим существующие локальные радионавигационные системы. Стоит исключить из обзора наземные системы первого поколения, такие как LORAN и Чайка. Наравне с тем, что они хорошо отработаны и описаны, требуется обширная развитая наземная инфраструктура. Маяки данных систем расположены в хорошо известных местах и уязвимы, кроме того создание таких систем требует больших вложений. Локальные аэронавигационные системы аэропортов нуждаются в особом внимании, чтобы их частотный диапазон не был перекрыт рабочими частотами нашей системы.

Имеет смысл обратить внимание на проект STOIC, рассмотреть систему DORIS ([Debaisieux et al, 1985](#); [Laborde, 1987](#)) и локальные радионавигационные системы наподобие Locata.

В США в рамках программы «Информация о пространстве, времени и ориентации в оспариваемых условиях» (Spatial, Temporal, and Orientation Information in Contested Environments — STOIC) ([Kramer, 2014](#)), поддерживаемой Агентством перспективных исследовательских проектов Мини-

стерства обороны (DARPA), разрабатывается наземная радионавигационная система, работающая в диапазоне очень низких частот. О данной программе очень мало публикаций, т. к. в её рамках создаются технические средства, которые в первую очередь предусмотрены для военного применения. Считается, что именно диапазон очень низких частот затруднит подавление навигационного сигнала, в то же время он требует специальной передающей аппаратуры. Насколько можно судить из источников, зона действия данной наземной радионавигационной системы будет охватывать крупные регионы земного шара, возможен даже глобальный или почти глобальный охват.

Примером действующей наземной радионавигационной системы является DORIS. Передающий сегмент данной системы, формирующий навигационное поле, состоит из сети наземных передатчиков, расположенных на поверхности Земли. Приемная аппаратура размещается на ИСЗ, как правило, научного назначения. Измеряется доплеровское изменение частоты принятого сигнала, на основании чего можно определить радиальную скорость приёмника относительно передатчика. Из обработки высокоточных доплеровских измерений получают точные орбиты, также возможно определение координат передающих пунктов. В нашем случае для целей оперативного и надежного определения координат система DORIS обладает следующими недостатками: длительное время между наблюдениями и получением итогового результата, кроме того, измерение доплеровского смещения для объектов, перемещающихся в атмосфере, может не дать нужную точность.

В качестве примера реализованных радионавигационных систем можно представить системы типа Locata ([Barnes et al., 2005](#); [Rizos et al., 2010](#); [Rizos, Yang, 2019](#)) или NextNav ([Meiyappan et al., 2013](#)). Данные коммерческие системы гражданского назначения используются для обеспечения навигации в условиях плотной городской застройки высотными зданиями. Системы локальной навигации Locata основаны на сети наземных опорных приемопередатчиков (LocataLites), размещенных на интересующих пользователя территориях. В качестве одного из преимуществ данной технологии отмечается отсутствие необходимости использования сложных систем с атомными стандартами частоты за счет использования специальной беспроводной технологии временной синхронизации, обеспечивающей точность синхронизации шкал времени опорных приемопередатчиков в 30 пкс. В то же время для работоспособности системы необходимо, чтобы опорные приемопередатчики размещались так, чтобы от каждого из них в зоне прямой видимости был другой приемопередатчик. Приемопередатчики передают сигнал с дальномерным кодом, реализовано кодовое разделение

сигналов. Сигнал от опорного приемопередатчика может быть принят мобильным приемником и его результаты могут быть обработаны как совместно с сигналами ГНСС, так и независимо от них. Locata является примером успешно реализованной локальной радионавигационной системы. В то же время у этой системы, как у системы, помогающей и/или заменяющей ГНСС, есть недостатки. Такая система активно использует ГНСС в своей работе для временной синхронизации в тех случаях, когда трудности в использовании ГНСС вызваны не активным противодействием (использованием средств РЭБ или спуфинга), а условиями среды, затрудняющими использование ГНСС, например, при высокой плотности городской застройки. Поэтому отсутствие сигнала ГНСС в местах установки опорных приемопередатчиков приведет к неработоспособности Locata. Необходимость прямой видимости между приемопередатчиками также накладывает ограничение, которое может оказаться критическим в случае развертывания подобной системы в зоне боевых действий. Перспективная локальная радионавигационная система должна быть полностью независимой от работы ГНСС и иметь минимальные ограничения на размещение опорных радиомаяков.

### **Принципы построения локальной радионавигационной системы**

Заданные нами условия применения локальной радионавигационной системы как альтернативы ГНСС в ситуации её активного подавления накладывают определенные требования. Система должна быть полностью автономной по отношению к ГНСС, устойчивой к воздействию средств РЭБ, также должны быть предусмотрены штатные механизмы. При этом желательно, чтобы она была недорогой в финансовом отношении и простой в применении. На основе этих условий при построении локальной радионавигационной системы необходимо принять за основу следующие принципы:

1. Система должна быть основана на компактных автономных радиомаяках, габариты и весовые характеристики которых должны позволять ручную переноску.
2. Определение координат должно осуществляться на основе приема и обработки сигналов с дальномерным кодом.
3. Каждый маяк должен быть оснащен автономным компактным стандартом времени и частоты для независимого хранения временной шкалы.
4. Частота навигационного сигнала и характеристики его кода должны настраиваться в широких пределах для возможности их смены, в том числе автоматической, по некоторому заранее установленному правилу.

Общие принципы работы системы основываются на принципах работы современных ГНСС. Радиомаяки неподвижно закрепляются на поверхности Земли на специально подготовленных пунктах, таких как бетонные столбы, здания или иные инженерные сооружения (в условиях застройки), либо на специально закрепленных марках. Координаты точек установки маяков должны быть известны в распространяемой системе координат. Предусматривается кодовое разделение сигналов, когда каждый маяк использует свой код, передача ведётся на одной общей частоте. Мобильный приемник принимает сигналы от всех маяков, производит их демодуляцию и соотносит с дальномерными кодами, которые генерируются в приемнике. На основе корреляционного анализа определяется время излучения сигнала и время его приёма, разность этих времён даст нам время прохождения сигнала. Это время прохождения, умноженное на скорость света, даёт псевдодальности между маяками и приемником, данные псевдодальности полностью аналогичны псевдодальностям, которые измеряются в ходе ГНСС-наблюдений. По этим псевдодальностям координаты приемника вычисляются методами, аналогичными методам, применяемым при получении навигационного решения в ГНСС.

Обоснуем выдвинутые принципы построения системы. Использование компактных переносимых маяков сократит количество людей и техники, необходимое для развертывания и обслуживания системы. Также оно упростит доставку/размещение маяков, количество мест для потенциальной установки которых станет больше, чем в случае применения массивного оборудования. Всё это должно снизить потенциальную стоимость системы. Применение дальномерного кода позволит использовать уже апробированные алгоритмы обработки, что сократит время на разработку и, возможно, позволит использовать электронные компоненты, предназначенные для использования в ГНСС-оборудовании, что также положительно скажется на стоимости разработки и производства. Автономный компактный стандарт времени и частоты сделает систему полностью независимой от ГНСС. Теперь обоснуем необходимость широкой настройки и смены частоты. Возможность динамической смены частоты повысит устойчивость к устройствам РЭБ, увеличит время обнаружения работы системы и затруднит её подавление. Для подавления необходимо будет либо подавить весь диапазон частот, в котором работает система, либо вскрыть последовательность смены частот, что требует времени. В условиях, когда подавление ГНСС осуществляется органами правопорядка, динамическая смена частоты работы локальной радионавигационной системы позволит обеспечить её работоспособность, а закрытость алгоритма



смены частоты — доступ к навигационным определениям только для выделенных потребителей.

Необходимо сформировать технические требования к системе. Полные и окончательные требования будут сформированы заказчиком, но необходима итоговая точность определения координат около 0.1 м, поскольку использование системы предусмотрено для нужд беспилотного водного и воздушного транспорта в близости от инфраструктурных сооружений. Размер района развертывания можно принять равным  $10 \times 10$  км, т. к. данные размеры соответствуют акватории многих отечественных портов. Соответственно, расстояния между базовыми маяками системы могут иметь подобные величины, около 10 км, хотя конкретные значения будут определяться задачей, под которую развернута система, и рельефом местности, на которой производится развертывание. Так как система построена по дальномерному принципу, аналогичному ГНСС, то минимальный состав системы должен включать не менее 3 базовых станций, если приемная аппаратура оснащена блоком хранения временной шкалы, которая синхронизирована с временной шкалой системы, и не менее 4 базовых станций, если в приемной аппаратуре такого блока нет и смещение временной шкалы приемника определяется в ходе навигационного решения как один из параметров. В случае плотной застройки или естественного рельефа местности, экранирующего некоторые из базовых станций, количество станций должно быть увеличено.

Сама система должна включать в себя сегмент управления, сегмент базовых станций и пользовательский сегмент. Сегмент управления включает в себя управляющий компьютер и аппаратуру частотно-временной синхронизации для обеспечения синхронизации шкал базовых станций между собой. Через сегмент управления должны задаваться рабочая частота системы или алгоритм её динамической смены и координаты базовых станций. Сегмент базовых станций состоит из набора базовых станций. Каждая базовая станция должна включать в себя следующие компоненты: блок хранения времени и частоты (который состоит из стандарта времени и частоты и аппаратуры временной коррекции), вычислительный модуль, с помощью которого производится управление работой станции и формирование дальномерного кода, и радиопередатчик с антенной для передачи сигнала. При необходимости базовая станция может быть оснащена блоком питания для независимости от сети электроснабжения. Пользовательский сегмент состоит из приемной аппаратуры, которая получает навигационное решение. Приемник должен включать в себя радиоприемник с антенной для принятия навигационного сигнала, вычислительный модуль для получения навигационного решения. При необходимости приемная ап-

паратура может быть оснащена собственным блоком хранения времени и частоты, что повысит надежность навигационного решения в случае малого количества базовых станций. Также в приемной аппаратуре должна быть настройка рабочей частоты и алгоритма её динамической смены (в случае реализации данной возможности).

### **Макет локальной радионавигационной системы**

Для проверки работоспособности предложенных нами идей был реализован макет локальной радионавигационной системы. Макет состоит из передающего модуля-маяка и приемного модуля. Приемный и передающий модули по составу оборудования унифицированы между собой. Так как сейчас стоит задача убедиться прежде всего в работоспособности предложенной схемы и оценить на практике полученную точность, принято решение отказаться от некоторых дорогостоящих частей, таких как блоки хранения времени и частоты. Сегмент управления был реализован на переносном персональном компьютере (ноутбуке). Рассмотрим состав оборудования радионавигационного маяка.

Радионавигационный маяк смонтирован в пластмассовом корпусе с габаритами  $240 \times 160 \times 90$  мм. Его радиооборудование представлено дипольной антенной и программно-определяемой радиосистемой LimeSDR, работающей в частотном диапазоне от 100 кГц до 3.8 ГГц с возможностью генерации радиосигнала с шириной полосы до 61.44 МГц в двух независимых каналах. Основные характеристики данной системы представлены в табл. 1. Для обеспечения синхронизации шкал времени и частоты маяки комплектуются ГНСС-модулями с выходом синхросигнала 1 Гц. Предусматривается, что корреляционная обработка, а также решение навигационной задачи и общее управление работой маяка осуществляется посредством вычислительного модуля Raspberry Pi 4. Принципиальная электрическая схема маяка представлена на рис. 1. На рис. 2 показан внешний вид радиомаяка, а на рис. 3 можно видеть его внутреннее устройство. В составе маяка также предусмотрена система независимого аккумуляторного питания.

Приемная аппаратура также сформирована на основе программно-определяемой радиосистемы LimeSDR. Как сказано выше, для корреляционной обработки и получения навигационного решения планируется использовать встроенный компьютер Raspberry Pi 4. По причине того, что на данном этапе программное обеспечение выполнено в предварительной тестовой версии, которая на Raspberry Pi 4 работает медленно, в качестве вычислительного модуля был использован переносной персональный компьютер (ноутбук).

Программное обеспечение состоит из подпрограмм управления, корреляционного анализа

Таблица 1  
Характеристики программно-определяемой радиосистемы LimeSDR

Аппаратура ВЧ части	Lime Microsystems LMS7002M MIMO FPRF
Частотный диапазон	100 кГц – 3.8 ГГц
Максимальная ширина полосы	61.44 МГц (120 МГц внутренняя)
Разрядность АЦП	12 бит
ВЧ разъёмы	10 U.FL разъёмов (6 приём, 4 передача)
Выборка	61.44 миллионов выборок в сек
Выходная мощность	10 dBm
Мультиплексирование	2×2 MIMO
Приёмных ВЧ трактов	2
Передающих ВЧ трактов	2
Кварцевый генератор	Rakon RPT7050A @30.72 MHz
Стабильность частоты	2.5 ppm

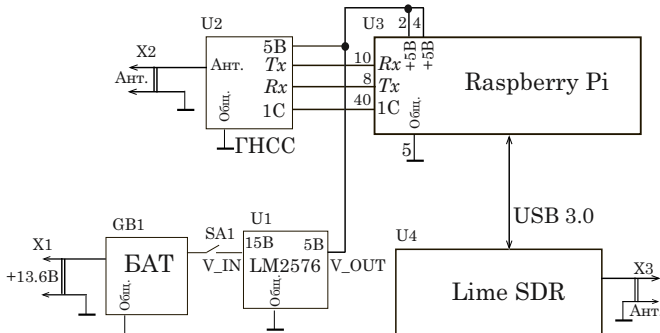


Рис. 1. Принципиальная электрическая схема маяка



Рис. 2. Внешний вид радионавигационного макета маяка локальной радионавигационной системы

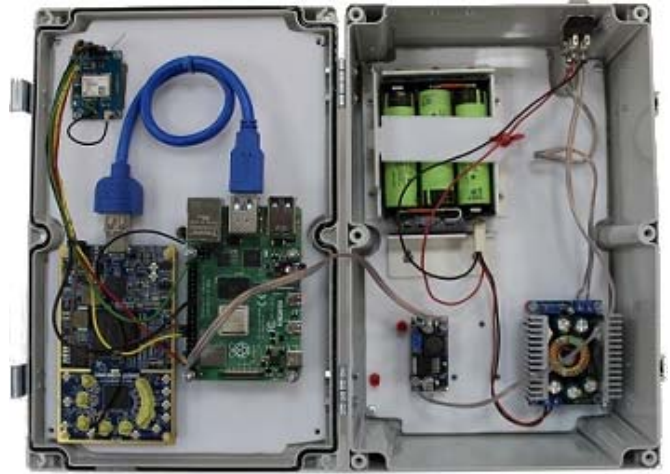


Рис. 3. Фотография радионавигационного маяка макета локальной радионавигационной системы

и решения навигационной задачи, которые выполняются на вычислительном модуле, а также подпрограмм модуляции/демодуляции и сопровождения по задержке, которые выполняются на радиомодуле. Программа управления на основе M-последовательности 7-ого порядка формирует дальномерный код, который передается в радиомодуль. Далее подпрограмма модуляции на основе опорного сигнала с частотой 2485 МГц посредством двоичной фазовой манипуляции формирует выходной навигационный радиосигнал, который подается на выходной тракт радиомодуля. В приемном устройстве осуществляется демодуляция радиосигнала на основе уникальных для каждого маяка M-последовательностей, формируются синфазная и квадратурная компоненты дальномерного кода для каждого из принятых сигналов. Далее синфазная и квадратурная компоненты кода передаются в вычислительный модуль, где осуществляется их корреляционная обработка, на основе которой вычисляются задержка и псевдодальность. Вычисленная задержка передается обратно в радиомодуль, где учитывается при дальнейшей корреляционной обработке принятого сигнала.

### Тестовый эксперимент

Макет локальной радионавигационной системы был испытан в рамках тестового эксперимента, проведенного осенью 2022 г. в Новороссийске на базе Государственного морского университета. Определялось положение подвижного приемника относительно стационарных пунктов, на которых были установлены маяки. Были выбраны стационарные пункты, на которых были проведены сеансы ГНСС-измерений. Точные координаты были определены в WGS-84 относительно базовой станции NVR2, входящей в сеть EFT-CORS. На каждом из пунктов был установлен маяк макета радионавигационной системы. Расположение пунктов показано на схеме рис. 4.

Далее приемное устройство было последовательно установлено в девяти пунктах в окрестности маяков, удаление от маяков не превышало 1000 м. На каждом из девяти подвижных пунктов проводился сеанс измерений. На протяжении каждого сеанса измерений производилась запись синфазных и квадратурных компонент всех принимаемых навигационных радиосигналов. Корреляционная обработка измерений, а также решение навигационной задачи выполнялись в режиме постобработки.

Результаты эксперимента приведены в табл. 2. Приведены точности определения координат для пунктов из радиосигналов макета и разности между координатами, определенными из ГНСС-измерений и тестовых наблюдений. Макет локальной радионавигационной системы на основе экспериментальных измерений дал следующие результаты: погрешность измерения местоположения при направлении на измерительную базу под углом от  $60\text{--}120^\circ$  (на дистанции 500 м) не более 0.3 м; погрешность измерения местоположения при направлении на измерительную базу под углом от  $30\text{--}60^\circ$  (на дистанции 500 м) не более 0.7 м; погрешность измерения местоположения при направлении на измерительную базу под углом от  $15\text{--}30^\circ$  (на дистанции 500 м) не более 1 м. Измерения на первом из подвижных пунктов обработать не удалось, поскольку во время выполнения измерений в эфире был зафиксирован мощный сигнал 1575 и 1602 МГц (спуфинг), что вывело из строя ГНСС-модули как на маяках, так и на приемном устройстве, и сделало невозможным привязку шкал времени и опорных частот. Измерения на остальных восьми пунктах удалось обработать лишь в камеральном режиме в силу наличия многочисленных переотраженных сигналов от окрест-



Рис. 4. Расположение пунктов

ных зданий и сооружений и от рельефа местности. Под камеральным режимом подразумевается постобработка с ручным удалением переотраженных сигналов.

### Заключение

Разработан макет локального радионавигационного комплекса на основе унифицированного блока радиомаяка и приемного устройства. Комплекс возможно оперативно развернуть на местности для формирования навигационного поля в окрестности нескольких километров. Результаты тестового эксперимента показали принципиальную возможность определения координат мобильных пунктов с точностью не хуже нескольких дециметров.

Таблица 2

Точность определения координат пунктов в ходе тестового эксперимента в сравнении с ГНСС

Наблюдательный пункт	$\Delta$ по широте, мм	СКО, широта, мм	$\Delta$ по долготе, мм	СКО, широта, мм	$\Delta$ по высоте, мм	СКО, высота, мм
T2	-692	1023	415	1023	720	1023
T3	808	923	-825	923	965	923
T4	578	839	613	839	981	839
T5	892	1107	937	1107	623	1107
T6	291	538	374	538	598	538
T7	322	413	-385	413	-674	413
T8	439	534	521	534	625	534
T9	-603	680	563	680	-729	680

Основным недостатком комплекса на текущем этапе его реализации является отсутствие хранителя времени и частоты, в силу чего радионавигационный комплекс зависит от встроенных ГНСС-модулей, с помощью которых осуществляется синхронизация опорных шкал частот и времени маяков. В такой конфигурации сохраняется тот же уровень уязвимости для устройств РЭБ, что и в случае с использованием ГНСС. Однако данный недостаток будет устранен после включения в состав маяков компактных хранителей времени и частоты.

Другим препятствием к работоспособности комплекса в ходе эксперимента оказалось переотражение сигналов. Возможные решения данной проблемы могут заключаться в использовании приемных антенн, аналогичных ГНСС-антеннам с технологией Choke-ring, с программным обеспечением по обработке сигнала в модификации, которая позволит производить фильтрацию переотраженных сигналов.

## Литература

- Баклицкий В. К. Корреляционно-экстремальные методы навигации и наведения. Тверь: ТО «Книжный клуб», 2009. 360 с.
- Болотнов С. А., Герасимчук Ю. Н., Шкатов М. Ю. и др. Астрономические инерциальные системы для применения в морских навигационных комплексах // Прикладная фотоника. 2023. Т. 10, № 4. С. 89–101. <http://doi.org/10.15593/2411-4375/2023.4.06>.
- Barnes J., Rizos C., Kanli M., et al. High accuracy positioning using Locata's next generation technology // Proceedings of the 18th International Technical Meeting of the Satellite Division of The Institute of Navigation (ION GNSS 2005), Long Beach, CA. 2005. P. 2049–2056.
- Debaisieux A., Aubry J. P., Gerard E., Brunet M. A satellite oscillator for very precise orbitography: the Doris program // 39th Annual Symposium On Frequency Control. 1985. P. 202–211. Doi: 10.1109/FREQ.1985.200846.
- Kramer D. DARPA looks beyond GPS for positioning, navigating, and timing // Physics Today. 2014. Vol. 67, no. 10. P. 23–26.
- Laborde B. The DORIS orbitography and positioning system: The DORIS SPOT2 mission // Acta Astronautica. 1987. Vol. 1. P. 193–198. Doi: 10.1016/0094-5765(87)90105-6.
- Meiyappan S., Raghupathy A., Pattabiraman G. Positioning in GPS challenged locations – the nextnav terrestrial positioning constellation // Proceedings of the 26th International Technical Meeting of The Satellite Division of The Institute of Navigation (ION GNSS+ 2013). 2013. P. 426–431.
- Meng L., Yang L., Yang W., Zhang L. A survey of GNSS spoofing and anti-spoofing technology // Remote Sensing. 2022. Vol. 14, no. 19. P. 4826.
- Radoš K., Brkić M., Begušić D. Recent advances on jamming and spoofing detection in GNSS // Sensors. 2024. Vol. 24, no. 13. P. 4210.
- Rizos C., Roberts G., Barnes J., et al. Experimental results of Locata: a high accuracy indoor positioning system // 2010 International Conference on Indoor Positioning and Indoor Navigation, Zurich, Switzerland. 2010. P. 1–7.
- Rizos C., Yang L. Background and recent advances in the Locata terrestrial positioning and timing technology // Sensors. 2019. Vol. 19, no. 8. P. 1821. Doi: 10.3390/s19081821.
- Sauta O. I., Shatrakov A. Y., Shatrakov Y. G., Zavalishin O. I. Principles of radio navigation for ground and ship-based aircrafts. Springer, Aerospace Technology, 2019. 136 p.