

Д.А. Кошаев

# ИССЛЕДОВАНИЕ ТОЧНОСТИ ПОЗИЦИОНИРОВАНИЯ ПО ДАННЫМ ПРИЕМНИКОВ СПУТНИКОВОЙ НАВИГАЦИИ ПРИ РАЗЛИЧНЫХ УСЛОВИЯХ РАДИОВИДИМОСТИ СПУТНИКОВ



РЕКОМЕНДОВАНО К ИСПОЛЬЗОВАНИЮ В УНИВЕРСИТЕТЕ ИТМО

по направлению подготовки (специальности)

24.04.02 «Системы управления движением и навигация»

в качестве учебного пособия для реализации основных профессиональных образовательных программ высшего образования магистратуры

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

УНИВЕРСИТЕТ ИТМО

**Д.А. Кошаев**

**ИССЛЕДОВАНИЕ ТОЧНОСТИ ПОЗИЦИОНИРОВАНИЯ ПО  
ДАНЫМ ПРИЕМНИКОВ СПУТНИКОВОЙ НАВИГАЦИИ  
ПРИ РАЗЛИЧНЫХ УСЛОВИЯХ РАДИОВИДИМОСТИ  
СПУТНИКОВ**

РЕКОМЕНДОВАНО К ИСПОЛЬЗОВАНИЮ В УНИВЕРСИТЕТЕ ИТМО

по направлению подготовки (специальности)

24.04.02 «Системы управления движением и навигация»

в качестве учебного пособия для реализации основных профессиональных  
образовательных программ высшего образования магистратуры

Санкт-Петербург

2021

Кошаев Д.А. Исследование точности позиционирования по данным приемников спутниковой навигации при различных условиях радиовидимости спутников. — СПб.; Университет ИТМО, 2021. – 18 с.

**Рецензент:**

**Аннотация:** Настоящее пособие предназначено для практической подготовки магистров в области технологий спутниковой навигации. При выполнении заданий учащиеся должны приобрести навыки работы с реальной аппаратурой спутниковой навигации, включая контроль навигационной обстановки, управление режимами, а также научиться анализировать точность навигационных решений в зависимости от характеристик рабочего созвездия космических аппаратов. Предусматривается имитация ограничений видимости космических аппаратов. Работа предназначена для магистров, обучающихся в рамках программы "Системы управления движением и навигации" по дисциплине «Интегрированные инерциально-спутниковые системы ориентации и навигации» (профильный профессиональный модуль), получивших базовые знания о принципах спутниковой навигации и методах оценивания неизвестных параметров, обладающих навыками работы с электронной измерительной техникой, владеющих английским языком и основами программирования, позволяющими строить графики и анализировать результаты испытаний. Практикум рассчитан на 6 академических часов, из которых 2 академических часа отводится на оценку выполненной работы преподавателем.

**Университет ИТМО** — ведущий вуз России в области информационных и фотонных технологий, один из немногих российских вузов, получивших в 2009 году статус национального исследовательского университета. Цель Университета ИТМО — становление исследовательского университета мирового уровня, предпринимательского по типу, ориентированного на интернационализацию всех направлений деятельности.

©Университет ИТМО, 2021  
©Кошаев Д.А., 2021

## Содержание

Список использованных сокращений .....	4
Введение .....	4
1. Основные сведения о современных ГНСС .....	5
2. Сведения об используемом оборудовании, руководствах и программном обеспечении .....	7
2.1. Приемная аппаратура.....	7
2.2. Программное обеспечение для работы с приемниками спутниковой навигации .....	8
3. Порядок выполнения работы .....	10
3.1. Работа с аппаратурой .....	10
3.2. Камеральная обработка данных.....	13
4. Контрольные вопросы.....	15
5. Литература .....	16

## Список использованных сокращений

ГНСС — глобальная навигационная спутниковая система  
КА — космический аппарат  
МНК — метод наименьших квадратов  
ПО — программное обеспечение  
ПК — персональный компьютер  
СКП — среднеквадратическая погрешность  
ШВ — шкала времени  
EGNOS — European Geostationary Navigation Overlay Service  
NMEA — National Marine Electronics Association  
PDOP / HDOP / VDOP — Position / Horizontal / Vertical Dilution of Precision  
SBAS – Satellite Based Augmentation Systems  
UTC – не имеет дословной расшифровки, означает Coordinated Universal Time

## Введение

Работа выполняется в рамках магистерской программы "Системы управления движением и навигации" по дисциплине «Интегрированные инерциально-спутниковые системы ориентации и навигации» (профильный профессиональный модуль). Ее целью является приобретение навыков работы с аппаратурой спутниковой навигации, практическое исследование точности навигационных решений в зависимости от характеристик рабочего созвездия КА ГНСС. Выполнение данной работы позволит студентам непосредственно познакомиться с возможностями современных технологий спутниковой навигации.

Современный приемник спутниковой навигации не бытового класса является достаточно сложным высокотехнологическим устройством, предоставляющим потребителю возможности работы в различных режимах, управления настройками получаемого решения, вывода информации для интеграции с другими навигационными системами, а также регистрации этой информации с целью последующей камеральной обработки.

В работе особое внимание уделяется исследованию особенностей спутниковой навигации в стесненных условиях, когда часть КА в верхней полусфере оказываются заблокированными. При этом погрешности навигационных решений могут существенно превышать указанные в спецификации приемника точностные характеристики. С данной проблемой приходится сталкиваться, например, в условиях плотной городской застройки.

Работа состоит из двух этапов. На первом этапе студенты непосредственно работают с приемниками ГНСС – с помощью команд устанавливают требуемые режимы; создают сценарии с ограниченной видимостью КА; регистрируют результаты навигационных решений, характеристики их точности и данных о КА. Второй этап предполагает обработку зарегистрированных данных в камеральном режиме. На данном этапе определяются погрешности навигационных решений и проводится их сопоставление с расчетными

характеристиками точности, которые вырабатываются приемником. Кроме того, здесь по данным об используемых в решении КА выполняется расчет геометрических факторов рабочего созвездия, среднеквадратических погрешностей трех координат и параметров эллипса погрешностей горизонтальных координат, которые сопоставляются с соответствующими значениями от приемника.

Результаты работы оформляются в виде отчета. В него включаются скриншоты, отражающие состояние приемника ГНСС в заданных режимах, и графики рассчитанных самостоятельно характеристик точности с соответствующими формулами. Формулируются выводы о возможностях использования ГНСС в условиях ограниченной радиовидимости КА.

Предполагается, что исполнители работы обладают базовыми знаниями о принципах спутниковой навигации и методах оценивания неизвестных параметров, имеют опыт работы с электронной измерительной техникой, владеют английским языком и основами программирования, позволяющими строить графики и анализировать результаты экспериментов. Для детальной проработки рассматриваемых в работе вопросов в дополнение к соответствующим курсам лекций можно использовать источники, приведенные в списке литературы.

## **1. Основные сведения о современных ГНСС**

Приведем кратко некоторые принципиальные сведения о спутниковой навигации. Основным источником информации здесь являются ГНСС. КА, находясь на круговых орбитах с высотой порядка 20 000 км, излучают необходимые для навигационных целей радиосигналы. Передаваемые от ГНСС гражданские сигналы могут быть обработаны любым потребителем на бесплатной основе. Под глобальностью в ГНСС понимается возможность решения с их помощью навигационной задачи практически в любой точке Земли. На данный момент полноценно функционируют две ГНСС — ГЛОНАСС (РФ) и GPS (США), которые эксплуатируются десятки лет. На стадии развертывания и апробации сейчас находятся новые ГНСС — Galileo (ЕС) и BeiDou (КНР). Несмотря на их появление, ГЛОНАСС и GPS нельзя рассматривать как устаревшие. Они проходят глубокую модернизацию: наряду с традиционными частотами диапазонов L1 и L2, вводятся в действие сигналы на дополнительных частотах, повышается точность определения параметров КА — эфемерид, улучшается стабильность бортовых шкал времени, увеличивается срок службы КА. При этом в модернизированной ГЛОНАСС будет использоваться кодовое разделение сигналов для разных КА, по аналогии с GPS, притом, что используемые сейчас сигналы с частотным разделением сохраняются.

Приемники спутниковой навигации могут быть односистемными — работать только по сигналам GPS или ГЛОНАСС и др., или многосистемными — одновременно использовать сигналы ГЛОНАСС, GPS, Galileo, BeiDou и региональных систем в различных сочетаниях; одночастотными —

работающими только по сигналам на частотах диапазона L1, а также двухчастотными (L1 и L2) или мультимчастотными. Стоимость приемника и антенн существенно зависит от ГНСС и частот, с которыми они работают. Приемники, оперирующие с различными ГНСС и/или мультимчастотными сигналами, обеспечивают более высокую точность навигационных решений, особенно в условиях ограниченной радиовидимости, а также позволяют повысить вероятность обнаружения отказа – события, когда погрешность навигационных решений превышает установленный уровень (25м) в течение заданного времени (3с).

Навигационный приемник обеспечивает выработку координат и составляющих скорости потребителя. Для координат могут использоваться различные референц-эллипсоиды, в подавляющем большинстве случаев это ПЗ-90.02, ПЗ-90.11 и WGS-84. Пользователь может установить желаемую ШВ, в которой вырабатываются показания. Обычно выбор ограничивается четырьмя ШВ: UTC, UTC(SU) - российская, системная ГЛОНАСС, системная GPS. Частота выработки показаний у современных приемников высокой ценовой категории может достигать 100 Гц, но обычными для подвижного потребителя на сегодняшний день являются частоты 1,2,5,10 Гц.

Текущие решения приемника сопровождаются характеристиками точности. Это могут быть среднеквадратические погрешности и/или геометрические факторы [1 – 5]. Геометрический фактор говорит о том, насколько благоприятно с точки зрения данного потребителя расположены КА. По существу, геометрический фактор представляет собой отношение уровня погрешности навигационного решения к уровню погрешности одного измерения.

Приемники формируют три вида измерений для каждого наблюдаемого КА — кодовые, фазовые и доплеровские [6]. Кодовые и фазовые измерения представляют собой оценки задержки прохождения радиосигнала от КА до антенны потребителя. Задержки определяются путем сопоставления принятого от КА сигнала с образцом, который генерируется в приемнике. Кодовые измерения или псевдодальности определяются как задержка псевдослучайной кодовой последовательности, которая модулирует высокочастотную несущую сигнала. Фазовые измерения – это задержка несущей. Доплеровские измерения или измерения интегрального Доплера – это оценка доплеровского сдвига частоты сигнала, идущего от КА к потребителю, которые определяются по временному приращению фазы несущей. Кодовые и фазовые измерения используются для целей позиционирования потребителя, доплеровские — для определения линейной скорости.

Измерения содержат ряд погрешностей, которые обусловлены рядом причин.

Погрешность, вызванная несогласованностью шкалы времени приемника и системной ШВ ГНСС, одинакова для одномоментных измерений от разных КА одной ГНСС. Рассогласование ШВ приемника и ГНСС представляет собой неизвестный параметр, наряду с тремя неизвестными координатами, при

решении навигационной задачи. Поскольку ШВ у разных ГНСС не имеют жесткой связи друг с другом, следует учесть рассогласования ШВ приемника и каждой используемой ГНСС, поэтому количество неизвестных параметров при решении навигационной задачи составляет 3 плюс число ГНСС, используемых при решении навигационной задачи.

Аппаратурные флуктуационные погрешности кодовых измерений составляет единицы метров, а фазовых – единицы миллиметров.

Значительная доля погрешностей измерений связана с прохождением сигнала через ионосферу, тропосферу и с неточностью эфемеридной информации, по которой рассчитывается положение КА на момент излучения сигнала. Эти погрешности могут быть полностью или частично скомпенсированы при организации дифференциального режима обработки измерений [7]. Такой режим предполагает использование не только измерений, полученных приемником потребителя, но и данных от одного или нескольких базовых приемников, расположенных поблизости. В разностях между измерениями приемника потребителя и базовых приемников одинаковые погрешности исключаются, тем самым открывая возможность потребителю определить свои координаты относительно базового приемника с более высокой точностью, чем в автономном (недифференциальном) режиме. Отметим, что дифференциальный режим не позволяет исключить погрешности, связанные с приемом переотраженных сигналов. Дифференциальный режим в реальном времени может быть организован путем трансляции с базовых станций поправок к измерениям для различных КА. Поправки формируются на основе измерений базовых приемников и известных координат их антенн. Поправки могут транслироваться по различным радиоканалам и через интернет на бесплатной и коммерческой основе. Сформированные по сети базовых станций поправки могут передаваться и через геостационарные спутники (высота орбиты которых 36 000км [2, 7]. Именно так работают широкозонные дифференциальные спутниковые подсистемы или SBAS [7]. К ним относятся российская система дифференциальной коррекции и мониторинга – СДКМ, европейская EGNOS, североамериканская WAAS, японская MSAS. Дифференциальные поправки этих систем могут приниматься в значительном по площади регионе, но не глобально. На территории европейской части РФ помимо СДКМ могут приниматься сигналы EGNOS. Геостационарные КА SBAS могут служить не только как источник корректирующей информации, но и как дополнительные навигационные КА, поскольку они способны излучать такие же навигационные сигналы, как и ГНСС.

## **2. Сведения об используемом оборудовании, руководствах и программном обеспечении**

### **2.1. Приемная аппаратура**

Для работы используется комплект аппаратуры спутниковой навигации из двух приемников NovAtel — одного из ведущих разработчиков в данной

области. Это показанные на рисунке 1 двухчастотные (работающие в диапазонах L1 и L2) GPS/ГЛОНАСС приемники: SE-D-RT2-G-J-Z и DL-V3-L1L2-G. Далее для упрощения приемники называются SE и DL-V3, соответственно. Приемники принимают сигналы от антенны NovAtel GPS-702GG (см. рисунок 1). При выполнении работы одна и та же антенна подключается к обоим приемникам. Антенна устанавливается на крыше здания, где имеется открытый обзор верхней полусферы.



Рисунок 1. Приемники NovAtel SE-D-RT2-G-J-Z, DL-V3-L1L2-G и антенна GPS-702GG

Подробные инструкции по эксплуатации приемников содержатся в документах SPAN-SE User Manual и DL-V3 User Manual, электронные версии которых доступны студентам (файлы om-20000124.pdf и om-20000119.pdf).

Оба приемника могут быть подключены к одному ПК. Однако для сокращения времени на настройку представляется целесообразным подключение приемников к разным ПК и управление их работой разными исполнителями. Подключение приемников выполнено следующим образом: антенный кабель, ведущий к антенне, соединен с высокочастотным разветвителем; один из идущих от него коротких кабелей подключен к разъему GPS1 приемника SE, а другой к единственному антенному разъему приемника DL-V3. При таком подключении сигналы от одной и той же антенны одновременно используются двумя приемниками.

Для работы приемников требуется постоянное напряжение 9-28В. При работе с аппаратурой ГНСС следует руководствоваться ГОСТ Р 12.1.019-2009 «Электробезопасность. Общие требования и номенклатура видов защиты» и ГОСТ 12.1.004-91 «Пожарная безопасность. Общие требования».

## **2.2. Программное обеспечение для работы с приемниками спутниковой навигации**

Управление, контроль и регистрация данных приемников выполняется посредством бесплатной программы NovAtel Connect (возможны различные версии). После запуска NovAtel Connect и соединения приемников с ПК коммуникационными кабелями программа предлагает выбрать тип подключения. Для подключения приемников к ПК обычно используется интерфейс USB. После подключения приемника появятся окна, например, с расположением видимых КА ГЛОНАСС и GPS на небесной полусфере (рисунок 2 а), координатами потребителя, их точностью и режимом обработки измерений (рисунок 2б). Кроме того, имеется вызываемое из меню окно для

регистрации разнообразных выходных данных (рисунок 2 г), а также диалоговое окно для ввода команд и получения ответной реакции приемника (рисунок 2 д). Основные действия в программе NovAtel Connect, необходимые при выполнении работы, будут поясняться далее по тексту. Подробно с возможностями NovAtel Connect можно ознакомиться в справочной системе программы.

Подробное описание команд управления приемниками, вводимых в диалоговом окне, а также формата выходных сообщений приемника, содержится в электронном документе OEM6 Family Firmware Reference Manual (файл om-20000129.pdf). В краткой форме команды управления и сообщения представлены также в бумажной брошюре OEMV Quick Reference Guide.

Приемники и программное обеспечение NovAtel предусматривают выработку и сохранение стандартных сообщений в формате NMEA. Для чтения файла данных в этом формате студентам предлагается специальный конвертер, который позволяет загрузить информацию из файла в рабочее пространство Matlab.



Рисунок 2. Окна программы NovAtel Connect:  
а), б) - информационные, в) – регистрационное, г) командное.

### 3. Порядок выполнения работы

Работа состоит из двух этапов. Первый этап предполагает непосредственное взаимодействие студентов с аппаратурой — управление режимами и видимостью КА, участвующих в навигационном решении, с регистрацией данных. На втором этапе в камеральном режиме в среде Matlab выполняется обработка зарегистрированных на первом этапе данных.

#### 3.1. Работа с аппаратурой

1. Проверить подключение приемников к антенне или выполнить такое подключение. Каждый из двух приемников подключить к отдельному ПК USB-кабелем. Группе студентов разделиться на две подгруппы, каждая из которых далее работает с одним приемником. Включить приемники, обеспечив их электропитанием постоянного напряжения 9-28В.

2. Запустить программу NovAtel Connect и выбрать соответствующее соединение в диалоговом окне. После удачного распознавания приемника в NovAtel Connect появятся окна для контроля за его работой и управлением. К числу наиболее важных относятся показанные выше на рисунке 2 окна Constellation, Position и Console window.

В окне Constellation отображается положение КА ГЛОНАСС (квадраты), GPS (круги) и SBAS (шестиугольники) на небесной полусфере. Имеется в виду угловое положение КА относительно антенны приемника, см. рисунок 3. По дуге откладывается азимут  $\alpha$  — угол между направлением на Север и направлением на КА, в радиальном направлении откладывается угол восхождения  $\varepsilon$  — угол между горизонтальной плоскостью и направлением на КА. Смысл этих углов в трехмерном пространстве дополнительно поясняется на рисунке 3 справа. При этом центр окружности в окне Constellation соответствует вертикальной оси антенна-зенит  $\varepsilon=90^\circ$ .

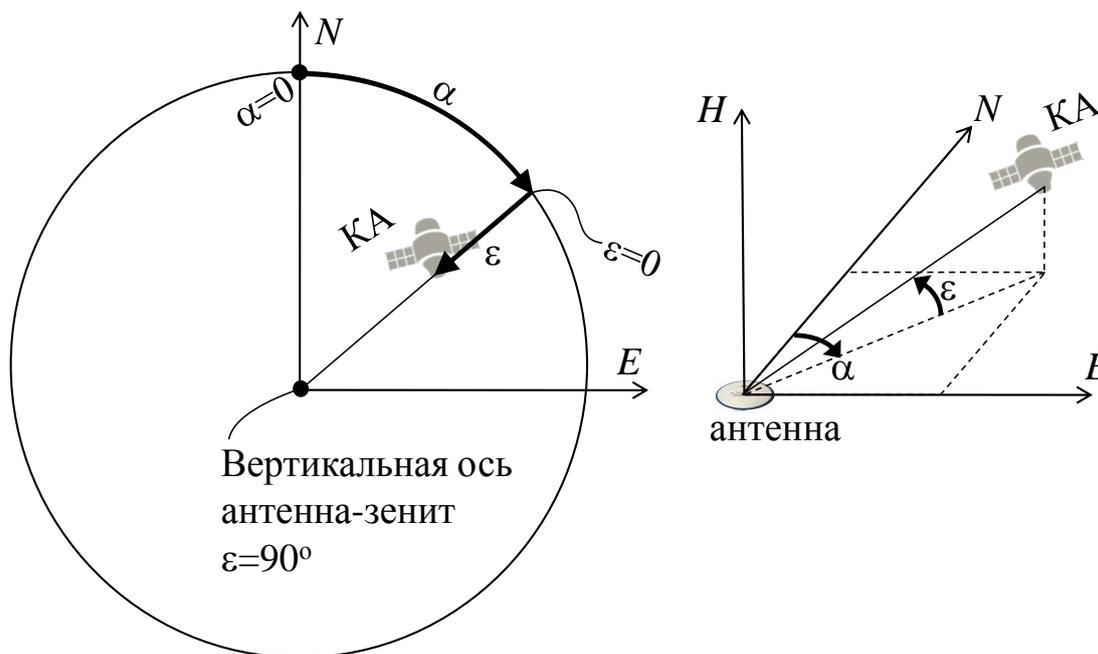


Рисунок 3. Угол восхождения  $\varepsilon$  и азимут  $\alpha$  КА на небесной полусфере

Отметим, что в качестве SBAS в западной части России выступает система EGNOS. Геостационарные КА EGNOS передают дифференциальные поправки для измерений GPS. В нижней части окна Constellation можно устанавливать маску – минимальный угол восхождения, ограничивающий используемые в навигационном решении КА.

В окне Position представлены географические координаты с пределами их погрешностей, режимами обработки данных, общим количеством используемых в решении КА и их принадлежностью к GPS и/или ГЛОНАСС.

3. Проверить или установить для приемника SE режим совместного использования в навигационном решении ГЛОНАСС и GPS, а для приемника DL-V3 – режим GPS с поддержкой от SBAS. Для разрешения/запрета на использование спутниковой системы используйте команды `lockoutsystem`, `unlockoutsystem` или `sbascontrol` (для SBAS), которые вводятся в диалоговом окне Console Window (рисунок 2г). Например, команда `lockoutsystem glonass` – накладывает запрет на использование ГЛОНАСС, `unlockoutsystem glonass` – вновь дает разрешение работать с ГЛОНАСС, `sbascontrol enable` – разрешает учитывать дифференциальные поправки SBAS, `sbascontrol disable` – запрещает использование SBAS. Убедиться в том, что приемник работает с теми системами, которые разрешил пользователь, можно по информации в левом верхнем углу окна Constellation (рисунок 2а), где указано число используемых КА для разных систем. При этом в числителе отображается число участвующих в навигационном решении КА, а в знаменателе – число отслеживаемых КА. Измерения КА SBAS в навигационном решении не применяются (учитываются только поправки), поэтому числитель для SBAS нулевой. То, что дифференциальные поправки SBAS действительно используются в навигационном решении, можно проверить в окне Position (рисунок 2б) в строке Solution type. Здесь же в строке Differential age можно увидеть возраст используемых поправок, т. е. время, прошедшее с момента, на которое поправки были рассчитаны.

Далее следует обеспечить маску углов восхождения для КА ГЛОНАСС и GPS в  $10^\circ$ . Установить маску можно либо слайдерами в окне Constellation (рисунок 2а), либо с помощью команд `scutoff`— для GPS, `glocutoff`— для ГЛОНАСС.

В приемнике SE, работающем в режиме совместного использования ГЛОНАСС и GPS, проверить или установить с помощью команды `nmeatalker` режим auto. Это необходимо для вывода в сообщениях NMEA данных по ГЛОНАСС.

4. Настроить и запустить регистрацию данных на жесткий диск ПК в диалоговом окне Logging Control Window (рисунок 2в), вызываемом из меню Tools главного окна программы. Регистрации подлежат 4 NMEA-сообщения: GPGGA – время, навигационные решения, число используемых КА; GPGST – время, точностные характеристики навигационного решения; GPGSA – номера используемых КА и геометрические факторы, GPGSV – азимуты и углы восхождения видимых КА с их системными номерами. В перечне

регистрируемых сообщений первые два сообщения должны быть именно GPGGA, GPGST, которые содержат время. Дискретность поступления всех указанных сообщений установить равной 1 с. Регистрацию производить непрерывно в один файл (для каждого приемника), независимо от изменений режимов и параметров работы приемников. Следует периодически контролировать ход выполнения регистрации. Количество сообщений и размер записанного файла (значения полей Logs и Size в окне Logging Control Window) должны регулярно увеличиваться. Затраченное время – значение поля Elapsed – иногда выводится некорректно, что не является признаком сбоя записи файла. В случае аварийной остановки регистрации, например, из-за потери связи с приемником, ее нужно возобновить, указав новое имя файла.

5. С помощью команд управления приемником lockout, unlockout, unlockoutall, а также слайдеров в окне Constellation или команд ecutoff, gloecutoff реализовать указанные в таблице 1 сценарии с исключением части КА из навигационных решений. Исключаются те КА, положение которых на небесной полусфере не позволяет их наблюдать по условиям рассматриваемого сценария. Отследить положение КА и определить их системные номера можно в окне Constellation. Исключать КА можно только по одному. Например, для исключения КА с системными номерами 1 и 2 нужно последовательно ввести команды lockout 1 и lockout 2. Для разблокировки всех КА можно использовать одну команду – unlockoutall.

Таблица 1. Содержание сценариев по ограничению рабочего созвездия КА

Сценарий	Ограничение по углу $\epsilon$ восхождения	Ограничение по азимуту $\alpha$	Примечание
А	$\epsilon \geq 10^\circ$	Нет	Открытая полусфера
Б	$\epsilon \geq 40^\circ$	Нет	Тесный двор
В	$\epsilon \geq 10^\circ$	$\alpha \leq 90^\circ$ и $\alpha \geq 270^\circ$	Открыта северная часть полусферы (южная блокируется стеной здания)
Г	$\epsilon \geq 10^\circ$	$90^\circ \leq \alpha \leq 270^\circ$	Открыта южная часть полусферы (северная блокируется стеной здания)
Д	$\epsilon \geq 10^\circ$ , дополнительно $\epsilon$ и $\alpha$ ограничены условиями видимости, как показано на рисунке 4		Городской каньон в направлении Север-Юг

Запись данных для каждого сценария длится не менее 3 минут. Для всех сценариев сохраняются скриншоты окна Constellation с конфигурацией рабочих КА. Для сценария Д, соответствующего городскому каньону, схематично показанному на рисунке 4, студенты самостоятельно определяют границы зоны видимости КА на небесной полусфере (см. рисунок 3) в зависимости от

параметров  $h_1$ ,  $h_2$ ,  $b_1$ ,  $b_2$ , значение которых задает преподаватель. Данные всех сценариев, как уже отмечалось, записываются в единый файл.

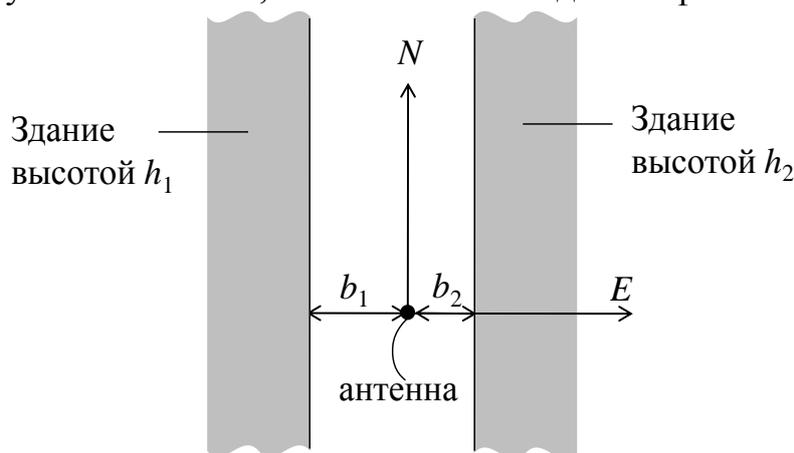


Рисунок 4. Условия видимости КА в сценарии Д (вид сверху).

6. Остановить регистрацию данных. Проверить содержимое файла, открыв его в любом текстовом редакторе. Скопировать файл на сменный носитель.

### 3.2. Камеральная обработка данных

1. Данные из файлов для обоих приемников конвертировать в Matlab-структуры с помощью Matlab-функции `nmea_conv`, вызов которой имеет вид:  
`[gga,gsa,gsv,gst]=nmea_conv(fileID,'gga','gsa','gsv','gst'),`  
 где `fileID` – строка с именем файла, содержащего NMEA-сообщения (\*.gps), например, `fileID='G:\017\gga_gsa_gsv_gst_new.gps'`,  
`gga`, `gsa`, `gsv`, `gst`—матлаб-структуры с полями, соответствующими данным в сообщениях GPGGGA, GPGSA, GPGSV, GPGST. Детальное описание NMEA-сообщений представлено в файле `om-20000129.pdf`.

Поля структур `gga`, `gsa`, `gsv`, `gst` представляют собой векторы или матрицы. Строки матриц и компоненты векторов соответствуют различным моментам времени, а столбцы (там, где поля представлены матрицами) – различным КА. Значения поля `utc` указаны в сек; `lat` и `lon` – в радианах; `alt` – в м; `elev` и `azimuth` – в градусах; `lat_std`, `lon_std`, `alt_std`, `smjr_std`, `smnr_std` – в м; `orient` – в градусах. Некоторые элементы полей структур имеют неопределенное значение – NaN. Значения NaN встречаются в последних элементах строки. Это происходит, когда количество КА, о которых в данный момент имеется информация, меньше числа столбцов матрицы. Число столбцов фиксировано для данной реализации данных и определяется максимальным для всей реализации количеством КА на один момент времени.

2. По данным NMEA-сообщений построить графики следующих величин: погрешностей координат по осям географического сопровождающего трехгранника в м; большой и малой полуосей эллипса погрешности горизонтальных координат с углом наклона большой полуоси; среднеквадратической погрешности высоты; геометрических факторов; числа используемых в навигационном решении КА. Для определения погрешностей

координат следует использовать эталонные координаты антенны. Если они специально не оговариваются преподавателем, принимаются значения широты  $\varphi = 59^\circ 57' 35.60''$ , долготы  $\lambda = 30^\circ 19' 44.19''$  и высоты  $h=50.234$  м.

Рекомендуется располагать графики один под другим. Под графиками привести скриншоты окна Constellation с конфигурацией рабочего созвездия КА, расположенные на соответствующих интервалах времени. Дать объяснение зависимости точности позиционирования от конфигурации используемых КА.

3. Пользуясь данными из структур `gsa` и `gsv` определить углы восхождения и азимуты активных КА, т.е. КА, задействованных в навигационном решении. Ниже приводятся некоторые рекомендации, как это сделать.

Сначала следует связать друг с другом строки полей `gsa` и `gsv`, которые соответствуют одинаковым моментам времени – значениям поля `utc`. Установить такую связь можно с помощью стандартной Matlab-функции `intersect`. Должны быть получены пары индексов  $j$  и  $k$  таких, что `gsa.utc(j)=gsv.utc(k)`. Исключив значения NaN из `gsa.prn(j,:)`, получить номера активных КА на данный момент времени. Далее, найти номера активных КА среди элементов `gsv.prn(k,:)`, для чего целесообразно воспользоваться уже упомянутой функцией `intersect`. Наконец, из тех элементов строк `gsv.elev(k,:)` и `gsv.azimuth(k,:)`, на месте которых в `gsv.prn(k,:)` расположены активные КА, извлечь соответствующие этим КА углы восхождения и азимуты.

С помощью полученных углов восхождения и азимута КА определить направляющие косинусы активных КА. Имеются в виду косинусы углов между направлением на КА относительно антенны и географическими осями E, N, H, также идущими от антенны.

Сформировать матрицы наблюдения для псевдодальностей. При этом следует учесть наличие в псевдодальностях погрешности из-за рассогласования ШВ приемника и системной ШВ ГНСС. Для режима совместного использования ГЛОНАСС и GPS должны учитываться два рассогласования для каждой ГНСС, для режима GPS с поддержкой SBAS – одно рассогласование. Принадлежность КА к GPS или ГЛОНАСС можно установить по его номеру в полях `gsa.prn` и `gsv.prn` соответствующих структур. Номера КА GPS находятся в диапазоне 1–32, а номера КА ГЛОНАСС — в диапазоне 65–96.

Рассчитать геометрические факторы HDOP, VDOP, PDOP [1–5] и сравнить их со значениями, приведенными в сообщении GPGSA.

В соответствии с МНК [3] независимо для каждого момента времени вычислить ковариационные матрицы погрешностей навигационного решения, исходя из СКП измерений псевдодальности в 2м. Определить параметры эллипса погрешностей горизонтальных координат и СКП определения высоты. Это можно сделать с помощью стандартной Matlab-функции определения собственных чисел и собственных векторов — `eig`, применив ее к  $2 \times 2$  ковариационной матрице погрешностей горизонтальных координат. Сравнить полученные параметры эллипса с соответствующими значениями из сообщения GPGST. Здесь могут быть отличия из-за использования разных СКП измерений псевдодальности, но эти отличия не должны быть принципиальными.

4. На основе матриц наблюдения, сформированных в п. 3, пользуясь МНК, рассчитать ковариационные матрицы погрешностей позиционирования с учетом статичности антенны приемника. Определить параметры эллипса погрешностей горизонтальных координат и СКП определения высоты. Сравнить их с полученными в п. 3 значениями.

Отчет о проделанной работе, должен содержать скриншоты и самостоятельно построенные графики с поясняющими надписями (что на них изображено, при каких условиях и режимах это получено, что отложено по координатным осям), основные формулы, используемые в расчетах, а также выводы, представляющие практический интерес для пользователей информации ГНСС.

#### **4. Контрольные вопросы**

1. Что означает термин двух- или мультислотный приемник ГНСС? Какое преимущество такие приемники имеют перед аналогичными одночастотными, и насколько они дороже?

2. Какие важные функциональные возможности могут отличать разные модели приемников спутниковой навигации?

3. Чем полезно для потребителя ГНСС использование широкозонных дифференциальных подсистем – SBAS? Везде ли они эффективны? Имеет ли смысл использовать в навигационных решениях данные локальной базовой станции при возможности принимать сигналы SBAS?

4. Что означает геометрический фактор рабочего созвездия КА? Какие бывают геометрические факторы? Как они связаны друг с другом и со среднеквадратическими погрешностями определения координат и скорости?

5. Если потребитель ГНСС приближается к зданию, какой геометрический фактор пострадает больше?

6. Как искусственно улучшают геометрический фактор рабочего созвездия спутников?

7. Свойства погрешностей навигационных определений можно охарактеризовать следующими величинами: СКП координат; ковариационной матрицей погрешностей координат; длиной полуосей эллипса погрешностей горизонтальных координат, углом большой полуоси и СКП вертикальной координаты; сферической СКП координат; геометрическими факторами используемого созвездия КА. Упорядочите этот перечень по мере полноты характеристики.

8. Зачем устанавливается минимальный порог (маска) углов восхождения КА, используемых в навигационном решении?

9. Где вблизи от многоэтажного здания точность позиционирования будет выше: у северной стены здания или у южной? Расстояния от стен в обоих случаях одинаковы.

10. Почему кодовые измерения приемника ГНСС называются псевдодальностями?

11. В чем заключаются особенности и возможности закрытого кода ГНСС?

12. Как по псевдодальностям решается навигационно-временная задача в приемнике ГНСС? Какая информация, помимо псевдодальностей, здесь еще необходима?

13. Полное созвездие КА означает, что измерения от входящих в него КА позволяют решить навигационно-временную задачу по одномоментным измерениям. Приведите обоснованные варианты полного созвездия – из какого числа КА GPS и/или ГЛОНАСС оно может состоять?

14. Совпадает ли статическое навигационное решение с осредненным кинематическим (предполагающим подвижность антенны приемника)? Стремится ли погрешность статического решения к нулю по мере увеличения длительности решения?

15. Сформулируйте требования к доступным КА для получения статического навигационного решения на определенном интервале времени.

16. Какой универсальный формат выходных данных используется в приемниках ГНСС? Какие данные (помимо собственно координат) он позволяет получить, и чем они могут быть полезны навигационному потребителю? В чем вы видите основные ограничения/недостатки этого формата?

17. В чем заключается происходящая сейчас модернизация ГЛОНАСС? Назовите основные качественные и количественные изменения.

18. Что помимо увеличения числа используемых КА позволяет улучшить точность навигационных определений?

## 5. Литература

1. ГЛОНАСС. Принципы построения и функционирования / Под ред. А.И. Перова, В.Н. Харисова. Изд. 4-е, перераб. и дополнен. - М.: Радиотехника. 2010. 800 с.

2. Соловьев, Ю.А. Спутниковая навигация и ее приложения / Ю.А. Соловьев. - М.: Эко-Трендз, 2003. – 325 с.

3. Степанов, О.А. Методы обработки навигационной измерительной информации: учеб. пособие. / О.А. Степанов. - СПб.: Университет ИТМО, 2017. – 196 с.

4. Hoffman-Wellenhof, B. GPS: Theory and Practice / B. Hoffman-Wellenhof, H. Lichtenegger, J. Collins Third, revised edition. Springer-Verlag. 2<sup>nd</sup> edition, 2001.

5. Global Positioning System: Theory and Applications / Edited by B.W. Parkinson, J.J. Spilker Jr. - American Institute of Aeronautics and Astronautics, Inc. 1996. V. I.

6. Антонович К.М. Использование спутниковых радионавигационных систем в геодезии. В 2 т. Т. 1. Монография / ГОУ ВПО «Сибирская государственная геодезическая академия». – М.: ФГУП «Картгеоцентр», 2005.

7. Антонович К.М. Использование спутниковых радионавигационных систем в геодезии. В 2 т. Т. 2. Монография / ГОУ ВПО «Сибирская государственная геодезическая академия». – М.: ФГУП «Картгеоцентр», 2006.

Кошаев Дмитрий Анатольевич

**ИССЛЕДОВАНИЕ ТОЧНОСТИ  
ПОЗИЦИОНИРОВАНИЯ ПО ДАННЫМ ПРИЕМНИКОВ  
СПУТНИКОВОЙ НАВИГАЦИИ ПРИ РАЗЛИЧНЫХ  
УСЛОВИЯХ РАДИОВИДИМОСТИ СПУТНИКОВ**

**Учебное пособие**

Редакционно-издательский отдел Университета ИТМО

Редактор В.П. Золотаревич

Зав. РИО Н.Ф. Гусарова

Подписано к печати

Заказ №

Тираж

Отпечатано на ризографе

**Редакционно-издательский отдел**  
**Университета ИТМО**  
197101, Санкт-Петербург, Кронверкский пр., 49