

Методические указания для выполнения лабораторных работ
По дисциплине «Моделирование систем»
На тему «Моделирование основных алгоритмов приемника ГНСС»

Содержание

ПЕРЕЧЕНЬ СОКРАЩЕНИЙ	3
1 Теоретическая часть.....	4
1.1 ГНСС и ее подсистемы.....	4
1.2 Типы приемников ГНСС, разновидности и режимы работы приемника ГНСС	7
1.3 Основные внешние факторы, влияющие на первичные навигационные измерения приемника ГНСС	14
1.4 Геометрический фактор	18
1.5 Структура навигационного сообщения на примере ГЛОНАСС	18
2 Используемые математические модели	21
2.1 Ввод систем координат и связи между ними	21
2.2 Структура и данные из альманаха на примере ГЛОНАСС	26
2.3 Моделирование траекторий движения НКА для ГЛОНАСС	27
2.4 Моделирование траекторий движения НКА для GPS.....	30
2.5 Математические модели погрешностей приемника ГНСС	32
2.4.1. Определение углов возвышения El и азимута Az	32
2.4.2 Условие видимости НКА приемником ГНСС.....	33
2.4.3 Модель ионосферной задержки	34
2.4.4 Модель тропосферной задержки	36
2.4.5 Определение геометрического фактора.....	37
2.6 Определение дальностей и псевдодальностей до НКА	37
2.7 Математический алгоритм определения координат приемника при помощи оценки ПД до НКА	39
3 Указания по выполнению лабораторных работ	41
4 Общие рекомендации по выполнению лабораторных работ.....	43
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	46

ПЕРЕЧЕНЬ СОКРАЩЕНИЙ

GDOP	-	геометрический фактор
GPS	-	глобальная система позиционирования
UTC	-	всемирное координированное время
АЦП	-	аналогово-цифровой преобразователь
ВТ	-	высокая точность
ГИС	-	геоинформационная система
ГЛОНАСС	-	глобальная навигационная спутниковая система
ГНСС	-	глобальная навигационная спутниковая система
ДГСК	-	декарто-гринвичская система координат
ИСК	-	инерциальная система координат
КА	-	космический аппарат
НАП	-	навигационная аппаратура потребителя
НКА	-	навигационный космический аппарат
НС	-	навигационное сообщение
ОГ	-	орбитальная группировка
ПД	-	псевдодальность
РБ	-	разгонный блок
РН	-	ракета-носитель
РЧБ	-	радиочастотный блок
СТ	-	стандартная точность
СЧ	-	синтезатор частот
ЦВ	-	цифровой вычислитель

1 Теоретическая часть

1.1 ГНСС и ее подсистемы

ГНСС – глобальная навигационная спутниковая система, предназначенная для определения пространственных координат и составляющих вектора скорости движения потребителя ГНСС в любой точке на поверхности Земли, акватории Мирового океана, воздушного и околоземного космического пространства [1]. В ГНСС заложены радиотехнические принципы получения навигационной информации.

С появлением технологии ГНСС начали работать многие вспомогательные технологии, известные как региональные навигационные системы (РНС). Концепция технологии такая же, как и у ГНСС, но охватывает меньше географических областей.

На сегодняшний день функционируют следующие ГНСС:

- 1) Глобальные (расположение НКА над всей планетой):
 - американская GPS (Global Positioning System);
 - российская ГЛОНАСС (ГЛОбальная НАвигационная Спутниковая Система);
 - китайская BeiDou;
 - европейская Galileo.
- 2) Региональные (характерны тем, что охватывают меньше географических областей (преимущественное расположение НКА над территорией страны-владельца)):
 - индийская IRNSS (Indian Regional Navigation Satellite System);
 - японская QZSS (Quasi-Zenith Satellite System).

К основным достоинствам и преимуществам ГНСС относятся:

- Круглосуточное определение координат потребителей;
- Сведение к минимуму ошибок измерений благодаря автоматизации измерений;
- Возможность сокращения сроков проведения работ по сравнению с прочими методами определения координат потребителя;
- Предоставление информации в цифровом виде, которая может быть экспортирована в геоинформационные системы (ГИС);
- Временная синхронизация за счет комплекса технических и программных средств, предназначенных для дискретизации информации о значении точного времени от эталонного источника;
- Доступность навигационного решения и низкая стоимость приемников ГНСС общего назначения.

Для достижения таких важнейших качеств как непрерывность и высокая точность навигационных определений, в составе современной ГНСС можно выделить три основных сегмента: космический сегмент, состоящий из НКА, контрольный сегмент, включающий наземные контрольные станции и сегмент потребителей, состоящий из приемников различных типов.

Космический сегмент любой ГНСС включает в себя собственное «созвездие» НКА, расположенных на орбитах, чтобы обеспечить желаемое покрытие поверхности Земли [5]. Формирование и излучение радиосигналов, необходимых для навигационных определений потребителей и контроля бортовых систем спутника – основные функции НКА [6, с.18]. Для выполнения этих функций в состав аппаратуры НКА входят такое радиотехническое оборудование, как передатчики навигационных сигналов, антенны, блоки ориентации, приемники данных и команд от наземного сегмента и т.п., а также бортовой компьютер, бортовой эталон времени и частоты и др.

Бортовые эталоны времени и частоты обеспечивают необходимое для реализации режима пассивных дальномерных измерений в аппаратуре потребителей практически синхронное излучение навигационных сигналов всеми НКА группировки.

Навигационные сигналы НКА содержат дальномерные компоненты и компоненты служебных сообщений. Дальномерные компоненты используют для определения в аппаратуре потребителей основных навигационных параметров – дальности, ее производных и др. Также дальномерные компоненты содержат две составляющие – стандартную и более высокую, отличающиеся в обеспечиваемой ими точностью навигационных определений. В аппаратуре гражданских потребителей принимаются и обрабатываются сигналы стандартной точности, более точные сигналы используются и доступны только с санкции военных органов [6, с.18].

В контрольный сегмент ГНСС входят наземная сеть, состоящая из координационно-вычислительного центра, станций траекторных данных и управления, системного эталона времени и частоты. Слежение за НКА и качеством функционирования их аппаратуры, непрерывный мониторинг спутниковых сообщений, калибровка спутниковых часов, периодическое обновление навигационных сообщений, управление режимами работы аппаратуры НКА – основные назначения контрольного сегмента. Синхронизация различных данных и процессов в ГНСС происходит благодаря высокостабильному (атомному) системному эталону времени и частоты.

При периодическом пролете НКА в зоне видимости наземных станций, начинается наблюдение за спутником, во время которого определяется и прогнозируется координатная информация и другие необходимые сведения, которые после передаются на бортовой

компьютер НКА и транслируются потребителям в служебном сообщении в виде кадров соответствующего формата.

Схема процесса управления системой НКА представлено на рисунке 1 [7]:

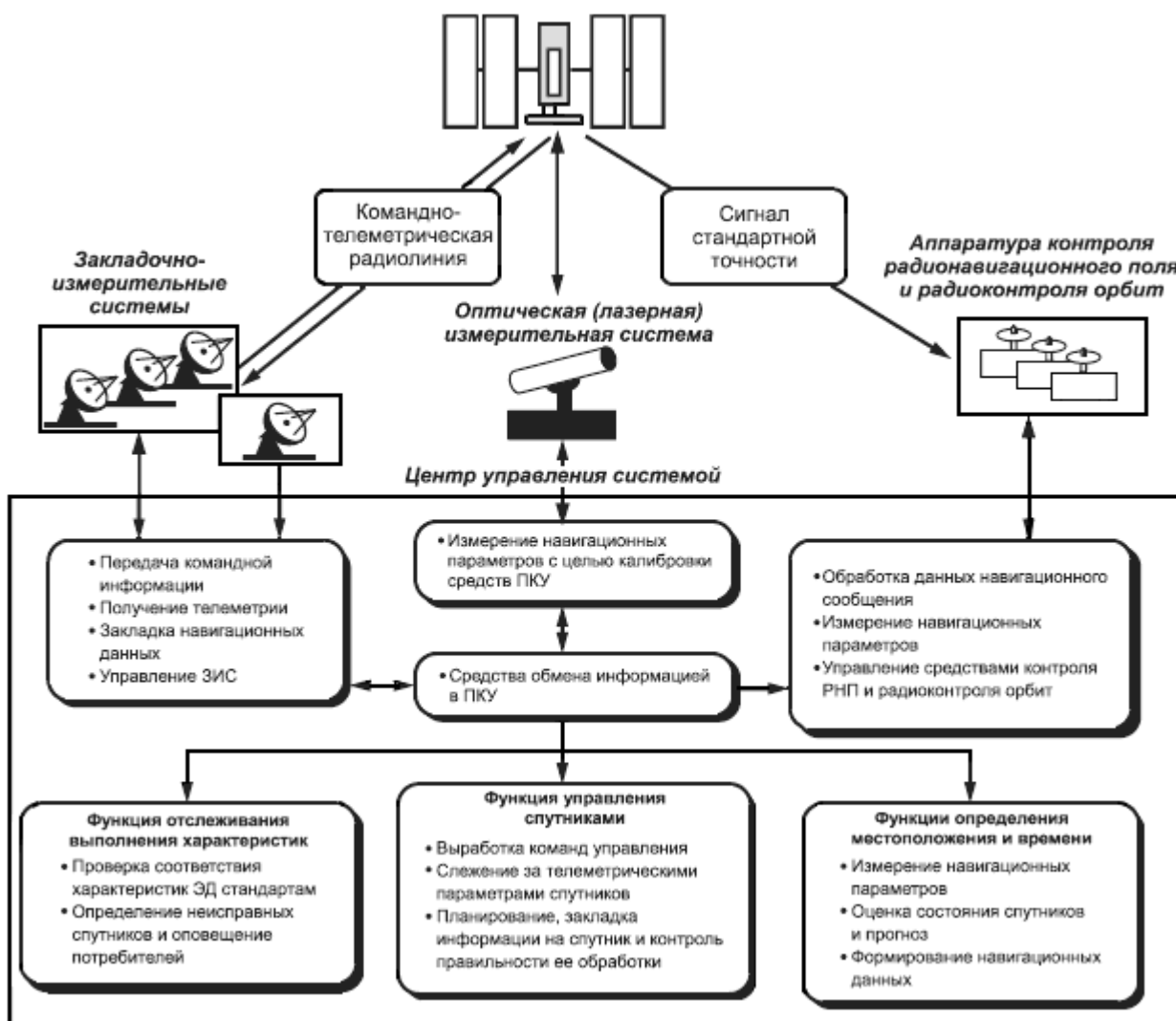


Рисунок 1 – Процесс управления системой НКА

Сегмент потребителей состоит из многочисленных пользователей, которые регистрируют измерения от нескольких спутников и решают задачи определения координат, скорости и времени. Сегмент потребителей в общем случае представляет из себя аппаратуру потребителей – приемоиндикатор, состоящий из приемника сигналов ГНСС и вычислителя. Приемоиндикаторы предназначены для приема, обработки навигационных сигналов НКА с целью определения необходимой для потребителей информации – координат, скорости и времени [3, с.15].

Пространственное положение потребителя обычно определяется в приемнике в два этапа: первично определяется текущее положение видимых НКА (их координаты) и

навигационные параметры, после этого рассчитываются вторичные – географическая долгота, широта и высота потребителя и т.д.

Пример структуры ГНСС GPS представлена в таблице 2 [3, с.12]:

Таблица 2 – Назначение и выходы основных подсистем GPS

Сегмент	Вход	Назначение	Выход
Космический	Навигационные сообщения	Генерация и передача кодовых и фазовых измерений, навигационных сообщений	P(Y) – код, C/A – код, L_1, L_2 – фазы, навигационные сообщения
Контрольный	P(Y)- код, данные наблюдений, время UTC	Формирование времени GPS, эфемерид, управление навигационными спутниками	Навигационные сообщения
Потребителей	Кодовые и фазовые измерения, навигационные сообщения	Решение навигационной задачи	Координаты, скорость, время

1.2 Типы приемников ГНСС, разновидности и режимы работы приемника ГНСС

Приемники ГНСС (они же навигационная аппаратура потребителей (НАП)) можно классифицировать по следующим признакам (Рисунок 2) [8]:



Рисунок 2 – Классификация приемников ГНСС

1) По типу используемых систем, ГНСС-приемники можно разделить на работающие:

- по сигналам только одной ГНСС (например, сигналам только ГЛОНАСС, GPS или Galileo и пр.);

- по сигналам нескольких ГНСС (например, приемники, работающие по сигналам GPS/ГЛОНАСС).

2) По области применения ГНСС-приемники различают:

- на летательных аппаратах (воздушных судах).

Один из примеров использования ГНСС-приемников в авиации - использование для навигации самолетов во время вылета, в полете и до момента посадки. Системы ГНСС облегчают навигацию воздушных судов в удаленных районах, которые плохо обслуживаются наземными навигационными средствами. ГНСС также является важным компонентом систем предотвращения столкновений и систем, используемых для улучшения подлетов к взлетно-посадочным полосам аэропортов.

- на морских (речных) судах.

Помимо высокоточной морской навигации, ГНСС-приемники также применяются в широком спектре морских приложений, таких как определение координат нефтяных вышек, прокладка и проверка подводных кабелей и трубопроводов, проведение спасательных операций, а также при дноуглубительных работах в портах и на водных путях.

- на космических объектах (КА, РН, РБ, и т.д.);

- на наземных подвижных объектах (автомобильный и железнодорожный транспорт).

К примеру, на железнодорожном транспорте ГНСС-приемники используются в сочетании с другими технологиями для отслеживания местоположения локомотивов и железнодорожных вагонов, автомобилей технического обслуживания и придорожного оборудования и отображения его на центральных пультах мониторинга. Знание точного местонахождения железнодорожного оборудования снижает количество несчастных случаев, задержек подвижного состава, эксплуатационные расходы, повышая безопасность, пропускную способность ж/д путей и качество обслуживания клиентов.

- для решения задач мониторинга.

Некоторые из возможных применений приемников ГНСС при помощи беспилотных транспортных средств - поисково-спасательные работы, мониторинг посевов, охрана дикой природы, аэрофотосъемка, исследования окружающей среды, инспекция инфраструктуры, батиметрия, обнаружение и обезвреживание наземных мин, предотвращение стихийных бедствий. По мере расширения рынка гражданских беспилотных устройств, на которых установлены ГНСС-приемники, будет расти и их использование в гражданских целях.

- для целей геодезического обеспечения задач различных потребителей.

Информация от ГНСС используется для эффективного управления разработкой рудных месторождений и перемещением отходов. Оборудование, установленное на экскаваторах и самосвалах, передает данные об их положении в управляемую компьютером диспетчерскую систему, для расчета оптимального маршрута движения самосвалов к каждому экскаватору и от него.

Информация о координатах также используется для отслеживания каждого бункера с материалом, извлеченным экскаватором, чтобы он был направлен в соответствующее место на шахте (дробилка, свалка отходов, площадка для выщелачивания). Данные о местоположении используется буровзрывными машинами для улучшения рыхлости горных пород и контроля глубины каждой пробуренной скважины для поддержания определенного уровня формируемых уступов.

Многоканальная спутниковая навигационная система особенно выгодна в условиях открытых горных выработок из-за отсутствия препятствий, создаваемых стенами шахты. Большее число принимаемых сигналов от НКА означает большую их доступность.

3) По условиям применения приемники ГНСС можно условно разделить на:

- стационарные (применительно к опорным станциям), т.е. устанавливаются на неподвижных объектах;
- портативные (носимые, переносные), используемые на подвижных объектах;
- интегрированные (бортовые), т.е. устанавливаемые на борт подвижных объектов различного назначения (воздушных, морских, наземных, космических).

4) По уровню специализации приемники ГНСС подразделяют на:

- бытовые (общего назначения), применяемые гражданскими потребителями для определения своих текущих координат, времени и скорости;
- специальные (применение в военных, геодезических и картографических целях).

5) По характеру динамичности потребителя:

- для низкодинамичных потребителей (диапазон скорости движения варьируется в пределах $2 \div 300$ км/ч);
- среднединамичных потребителей ($300 \div 900$ км/ч);
- высокодинамичных потребителей (выше 900 км/ч).

6) По используемым режимам измерений ГНСС-приемники делятся на:

- использующие кодовый (стандартный) режим.

В системе GPS используется кодовое разделение каналов, когда все НКА излучают сигнал на одной частоте, но каждый сигнал модулирован индивидуальным кодом, причем коды должны быть по возможности ортогональны между собой для уменьшения внутрисистемных помех, приводящих к ошибкам при разделении сигналов. Используемые в GPS коды обеспечивают относительно небольшой уровень внутрисистемных помех.

В ГЛОНАСС используется частотное разделение каналов, т.е. каждый НКА излучает сигнал на индивидуальной частоте. При этом для уменьшения внутрисистемных помех спектр сигнала должен быть ограниченным по ширине, что на практике реализовать не представляется возможным. Поэтому уровень внутрисистемных помех в системе ГЛОНАСС выше, чем в GPS.

- с возможностью приема дифференциальных поправок - корректирующих поправок, передаваемых контрольно-корректирующими станциями для повышения точности определения координат места. Такой режим работы приемника позволяет достигать в заданном районе прецизионной точности обсерваций при расчете координат [9].

- использующие фазовый режим.

Методы обработки фазы несущей сигнала требуют одновременной работы нескольких приемников ГНСС и имеют большую точность местоопределения. Фазовые приемники ГНСС требуют прямого прохождения сигнала со НКА.

7) По числу каналов обработки сигналов:

- одноканальный (с последовательной или мультиплексной обработкой) режим работы. Одноканальный ГНСС-приемник позволяет в каждый текущий момент времени вести прием и обработку радиосигнала только одного НКА [10].

- многоканальный режим работы. При многоканальном режиме работы приемник ГНСС одновременно принимает и обрабатывает сигналы нескольких НКА.

8) По функциональным возможностям определения параметров:

- координат, времени и скорости движения потребителя;
- угловых величин (путевого, азимутального и др. углов);
- дальности до заданного пункта;
- пересчет параметров из одной системы координат в другую;
- определение курсоуказания.

9) По точности (определения координат):

- до нескольких сантиметров;
- до нескольких дециметров;
- до нескольких единиц метров;
- до нескольких десятков метров;
- до нескольких сотен метров.

10) По виду отображения информации:

- только текстовая информация;
- графическая и текстовая информация.

11) по возможностям контроля целостности (способность системы обеспечить своевременное предупреждение о том, что при использовании ГНСС в качестве вспомогательного средства ее не следует применять для целей навигации) [11, с.113]:

- с автономным контролем;
- без автономного контроля;

12) По уровню интеграции приемники ГНСС делятся на:

- предназначенные только для определения координат местоположения;
- интегрированные (функционально) с другими техническими устройствами;
- интегрированные (конструктивно) с другими техническими устройствами.

13) По виду обрабатываемых сигналов, работающие в:

- одночастотном;
- двухчастотном;
- трехчастотном;
- режиме с обработкой открытых сигналов;
- режиме с обработкой закрытых сигналов.

Каждый НКА группировки ГНСС излучает навигационные сигналы двух типов:

- сигнал кода СТ (стандартной точности), достаточно легко обнаруживаемый и доступный любым пользователям;
- сигнал кода ВТ (высокой точности), трудно обнаруживаемый и доступный ограниченному кругу пользователей, прежде всего военным потребителям.

Каждый НКА излучает навигационные сигналы в двухчастотных диапазонах L1 ~ 1600 МГц и L2 ~ 1240 МГц. При этом в диапазоне L1 излучаются сигналы кодов СТ и ВТ, а в диапазоне L2 — только кода ВТ [12].

В случае использования приемников ГНСС группировки ГЛОНАСС, навигационный радиосигнал, передаваемый каждым НКА на собственной несущей частоте в поддиапазонах L1 и L2, является многокомпонентным фазоманипулированным сигналом. Для каждого НКА рабочие частоты поддиапазонов L1 и L2 когерентны и формируются от общего стандарта частоты. Номинальное значение частоты этого стандарта, с точки зрения наблюдателя, находящегося на поверхности Земли, равно 5,0 МГц [2, с.14].

Прием сигнала на двух частотах позволяет устранить неизвестную дополнительную ионосферную задержку сигнала, которая зависит от частоты. Поэтому аппаратура, способная принимать сигналы на двух частотах, обладает более высокой точностью определения местоположения [12].

14) По возможностям информационного противодействия ГНСС – приемники можно разделить:

- приемники с автономным обнаружением и подавлением помех;
- приемники с внешним выявлением помех и оповещением;
- приемники без обнаружения помех.

Одними из основных функций, выполняемых приемником ГНСС являются: прием сигналов от НКА, выбор рабочего созвездия, получение информации из навигационного сообщения, передаваемого в радиосигналах и определение вектора состояния потребителя [11].

При этом можно говорить о двух этапах получения текущей оценки вектора состояния потребителя: этапе грубой (предварительной) оценки значений параметров сигналов и этапе формирования точных текущих оценок параметров сигналов и соответственного вектора состояния потребителя.

Современный приемник ГНСС – аналогово-цифровая система, сочетающая аналоговую и цифровую обработку сигналов, в общем виде включающий в себя антенну (усилитель), радиочастотный блок (РЧБ), синтезатор частот (СЧ), аналогово-цифровой преобразователь (АЦП) и цифровой вычислитель (ЦВ) (рисунок 3) [11, с.89]:

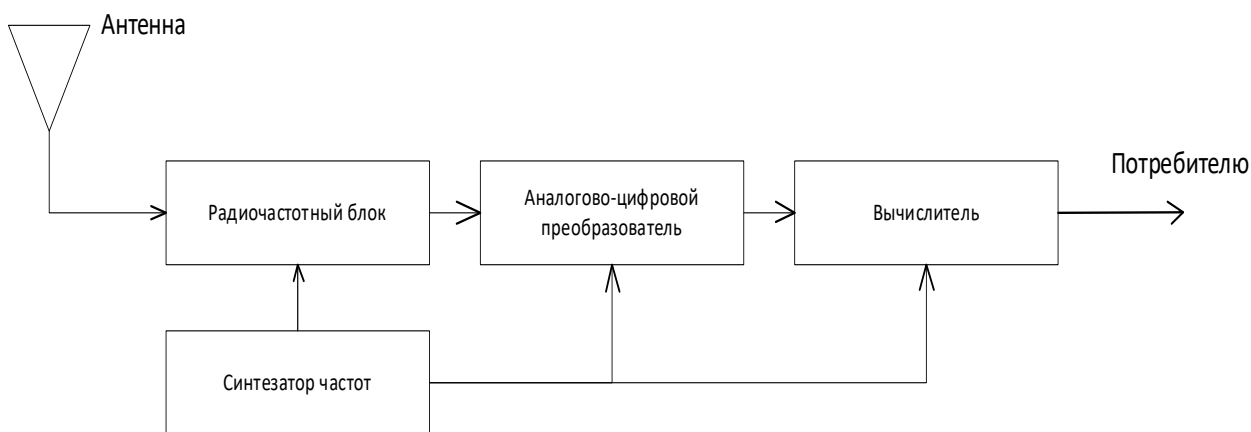


Рисунок 3 – Обобщенная структура построения приемника ГНСС

В такой схеме (рисунок 3) антенна выполняет функцию преобразователя электромагнитных волн в электрический сигнал, радиочастотный блок (радиоприемник) осуществляет усиление принятых сигналов, синтезатор частот формирует набор гармонических колебаний, необходимых для работы РЧБ, шкалу времени приемника ГНСС и тактовые сигналы, синхронизирующие работы АЦП и ЦВ, в это же время АЦП трансформирует аналоговый сигнал, поступающий с выхода РЧБ в цифровой сигнал, предназначенный для последующей обработки в ЦВ.

По выполняемым функциям ЦВ часто представляют в виде сигнального процессора и навигационного процессора. При этом сигнальный процессор выполняет первичную обработку сигналов, т.е. распараллеливание обработки входного сигнала на несколько каналов, формирование опорных сигналов дальномерного кода и управляемых опорных генераторов (гармонических колебаний), поиск сигналов по задержке и частоте и т.д.

Навигационный вычислитель решает задачи вторичной обработки, в том числе:

- декодирование эфемеридной информации, альманахов, и т.д. из навигационных сообщений,
- оценка координат потребителя и составляющих вектора его линейной скорости;
- возможная комплексная обработка оценок псевдодальностей, псевдодоплеровских частот или псевдофаз с данными других измерителей;
- реализация пользовательских алгоритмов маршрутизации, привязки к опорным точкам, вывода в заданный район и т.д.

1.3 Основные внешние факторы, влияющие на первичные навигационные измерения приемника ГНСС

Навигационный радиосигнал, излучаемый НКА, следуя по пути приемник ГНСС – НКА, претерпевает изменения, которые связаны с анизотропными (различными) свойствами земной атмосферы: тропосферы (0 – 10 км) и ионосферы (60 – 1000 км), такими как относительная диэлектрическая ε и магнитная μ проницаемости, удельная проводимость σ среды, и др. [11, с.140]. Тропосфера и ионосфера оказывают заметное влияние на качество навигационных измерений в ГНСС.

При этом искажения в навигационный радиосигнал вносят не только электрические параметры среды, но и свойства пространства-времени, выраженные в релятивистских и гравитационных эффектах. Оказывают воздействие на сигнал НКА также предметы и рельеф в месте приема сигнала, вызывающие его переотражение, то есть изменяющие первоначальное направление распространения.

Соответствующие искажения радиосигнала вносят и инструментальные погрешности как передатчика радиосигнала НКА, так и приемника ГНСС, например, антенные устройства, прямо-передающие тракты.

Во время вторичной обработки сигнала, навигационный вычислитель приемника ГНСС в числе прочего определяет псевдодальности пути приемник ГНСС – НКА, а также их погрешности и оценку, которые влияют на качество вырабатываемой приемником навигационной информации.

Псевдодальность (ПД) – это мера расстояния между НКА и антенной приемоиндикатора, отнесенная к двум моментам времени: времени излучения НКА кодового навигационного сигнала и момента детектирования (приема) этого радиосигнала приемоиндикатором [3, с.31].

Суммарную погрешность $\delta\rho$ определения ПД до НКА можно записать в виде:

$$\delta\rho = \delta\rho_{\text{ион}} + \delta\rho_{\text{троп}} + \delta\rho_{\text{млр}} + \delta\rho_{\text{ргэ}} + \delta\rho_{\text{пр шум}} + \delta\rho_t + \varepsilon_d, \quad (1.1)$$

где $\delta\rho_{\text{ион}} = \delta t_{\text{ион}}c$ – погрешность определения ПД, обусловленная влиянием ионосферы; $\delta\rho_{\text{троп}} = \delta t_{\text{троп}}c$ – погрешность, обусловленная влиянием тропосферы; $\delta\rho_{\text{млр}} = \delta t_{\text{млр}}c$ – погрешность, обусловленная наличием переотраженных сигналов – многолучевостью распространения; $\delta\rho_{\text{ргэ}} = \delta t_{\text{ргэ}}c$ – погрешность, обусловленная действием релятивистских и гравитационных эффектов; $\delta\rho_{\text{пр шум}}$ – шумовая погрешность приемника ГНСС, вносимая на этапе оценки ПД до НКА; $\delta\rho_t = \delta t_{\text{пр}}c$ – уход часов приемника ГНСС, ε_d – прочие составляющие погрешности определения ПД.

Тропосферная погрешность

Тропосфера является недиспергирующей средой, т.е. средой, электрические параметры которой не зависят от частоты радиосигнала [11, с.140].

Основная составляющая тропосферной погрешности навигационных определений – наличие тропосферной рефракции. Рефракция вызвана неоднородностями и изменением ее диэлектрической проницаемости, и тем самым, изменением показателя преломления с изменением высоты.

Значение тропосферной рефракции не зависит от частоты сигнала, на котором работают ГНСС типа ГЛОНАСС или GPS. На скорость распространения сигнала в тропосфере оказывают влияние нейтральные атомы и молекулы, состояние которых зависит от факторов, которые достаточно точно известны и прогнозируются – взаимные координаты НКА и потребителя, температуры, влажности воздуха и давления [6 с.86]. Задержка сигнала в тропосфере способна достигать от 8 (для НКА, находящихся в зените) до 80 нс (для НКА, расположенных под углом маскирования меньше $5^\circ - 10^\circ$).

Использование моделей тропосферы позволяет скомпенсировать до 90% общей погрешности так, что остаточная погрешность может составлять $\leq 0,2$ м для сигналов НКА, находящихся в зените [11, с.144].

Ионосферная погрешность

Рефракция сигналов в ионосферном слое зависит от неоднородности и изменения ее диэлектрической проницаемости с изменением высоты [6, с.88]. Время запаздывания сигнала в ионосфере возрастает за счет увеличения длины пути, проходимого сигналов в ионосфере.

Также ионосферная задержка зависит от частоты сигнала, и знак задержки может меняться в зависимости от измеряемого параметра радиосигнала – фазы огибающей или несущей. Значение задержки изменяется в широких пределах в зависимости от района Земли, где расположен приемник ГНСС (или потребитель), времени суток, года, солнечной и геомагнитной активности и т.д., и может составлять от 5 до 500 нс [11, с.142].

На частоте 1,6 ГГц среднее значение задержки в ионосфере составляет примерно 5 – 10 нс ночью и 30 – 50 нс днем для углов НКА, близких к 90° , а при углах менее 15° способна возрасти в несколько раз.

Остаточная погрешность компенсации влияния ионосферы во многом определяется внутренними шумами приемника ГНСС и не превышает 2 м.

Влияние многолучевости распространения сигнала

Погрешности из-за многолучевости возникают в тех случаях, когда вместе с прямым сигналом навигационного спутника на приемную антенну потребителя поступают

переотраженные сигналы от земной, морской поверхностей, близлежащих зданий, фюзеляжа самолета и т.п.

Погрешности из-за многолучевости (если они присутствуют) в среднем варьируются в диапазоне 10÷20 м. Наиболее сильно эти погрешности проявляются для НКА с малым углом маскирования при проведении наземных измерений, и, наоборот, для НКА, находящихся в зените при проведении спутниковых измерений на ЛА.

Погрешности из-за многолучевости трудно параметризовать, поэтому борьба с ними сводится, как правило, к тщательному выбору места установки антенны приемоиндикатора [3, с.50].

Влияние релятивистских и гравитационных эффектов

Разность гравитационных потенциалов в подстилающей точке земной поверхности и в месте нахождения приемника ГНСС, а также существенная (около 4 км/ч) скорость движения среднеорбитных НКА приводят к увеличению частоты бортового опорного генератора НКА.

Для некруговых орбит НКА за счет разницы скоростей в перигее и апогее меняется значение гравитационного параметра. Это приводит к тому, что бортовые часы идут быстрее в апогее и медленнее в перигее. Погрешность из-за данного обстоятельства может достигать 70 нс (примерно 21 м), однако компенсация данного релятивистского эффекта осуществляется в приемнике ГНСС на основе данных, содержащихся в навигационном сообщении.

Ошибки определения местоположения объекта, обусловленные вращением Земли, вызваны различным местоположением объекта в невращающейся ИСК в момент излучения сигнала НКА и в момент его приема. Данная погрешность может достигать 100 нс, и ее также необходимо компенсировать для увеличения точности определения навигационных параметров [11, с.144].

Погрешности, вносимые приемником ГНСС и передатчиком НКА

Погрешности приемника ГНСС обуславливаются особенностями функционирования следящих систем и уровнем внутреннего шума приемоиндикатора, а также динамикой движения объекта. Данные погрешности вносятся на этапе первичной обработки и для псевдодальности могут колебаться в пределах 0,5÷30 м.

Также существенный вклад в погрешности ПД вносит неточность привязки бортовых шкал времени НКА к системному времени. Такие погрешности могут составлять от 2 нс (0,5 м) до 8 нс (2,4 м) для эксплуатируемых НКА различных модификаций [11, с.145].

В качестве примера в таблице 3 приведен бюджет ошибок псевдодальности в зависимости от типа используемого приемника ГНСС [13, с.16]:

Таблица 3 – Пример бюджета ошибок псевдодальности

Источник погрешностей	Одночастотный приемник [м]	Двухчастотный приемник [м]
Шум приемника	2,57	8,0
Многолучевость	7,28	7,28
Тропосфера	0,2	0,2
Ионосфера	8,5	-
Частотно-временная поправка	3,2	3,2

1.4 Геометрический фактор

Наличие измерений ПД до четырех НКА – минимальное условие для определения пространственных координат приемника ГНСС и поправки шкалы времени.

Помимо прочих факторов, погрешность определения координат местоположения приемника ГНСС зависит от пространственного положения НКА и приемника ГНСС.

Геометрический фактор (GDOP – Geometrical Delusion of Precision) - количественная характеристика погрешности определения местоположения и поправки показаний часов, связанная с особенностями пространственного положения НКА и приемника ГНСС. Геометрический фактор показывает, во сколько раз снижается точность измерений.

Различают несколько типов факторов снижения точности:

- PDOP (Position DOP) – пространственный геометрический фактор, определяющий снижение точности определения пространственного положения;
- VDOP (Vertical DOP) – вертикальный геометрический фактор, определяющий снижение точности определения высоты;
- HDOP (Horizontal DOP) – горизонтальный геометрический фактор, определяющий снижение точности определения плановых координат;
- TDOP (Time DOP) – временной геометрический фактор, определяющий снижение точности определения времени.

1.5 Структура навигационного сообщения на примере ГЛОНАСС

Космический сегмент системы ГЛОНАСС состоит в обычном режиме из 24 НКА моделей «Глонасс-М» и «Глонасс-К», распределенных равномерно в пространстве (по восемь НКА в трех плоскостях) и формирующих непрерывное глобальное навигационное

поле на поверхности Земли и в околоземном пространстве до высоты 2000 км. НКА группировки ГЛОНАСС передают код стандартной точности на частоте L2 дополнительно к коду стандартной точности на частоте L1 [7]:

Схема генерации сигналов на НКА ГЛОНАСС приведена на рисунке 4:

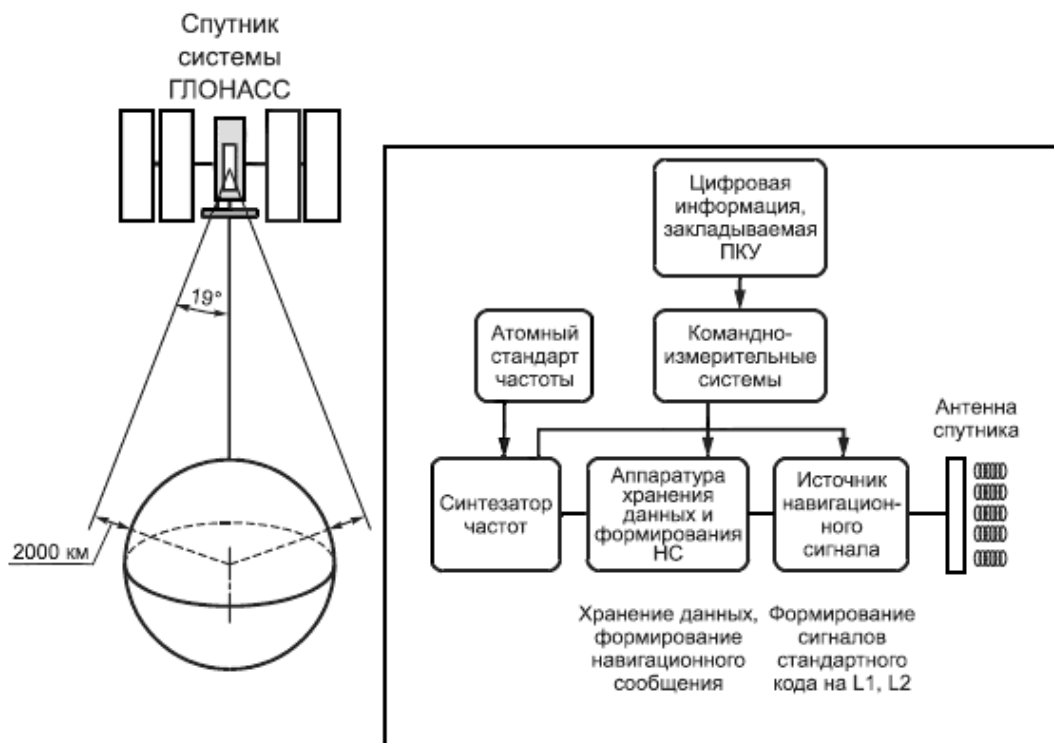


Рисунок 4 – Процесс генерации сигналов на НКА ГЛОНАСС

Каждый НКА излучает в составе радионавигационного сигнала навигационное сообщение, сформированное спутником на основе данных, закладываемых Пунктом контроля и управления 1-2 раза в сутки. Навигационное сообщение передается в виде цифровой информации, закодированной по коду Хемминга, а после преобразованной в относительный код [14, с.21].

Состав навигационного сообщения ГНСС ГЛОНАСС приведен на рисунке 5:

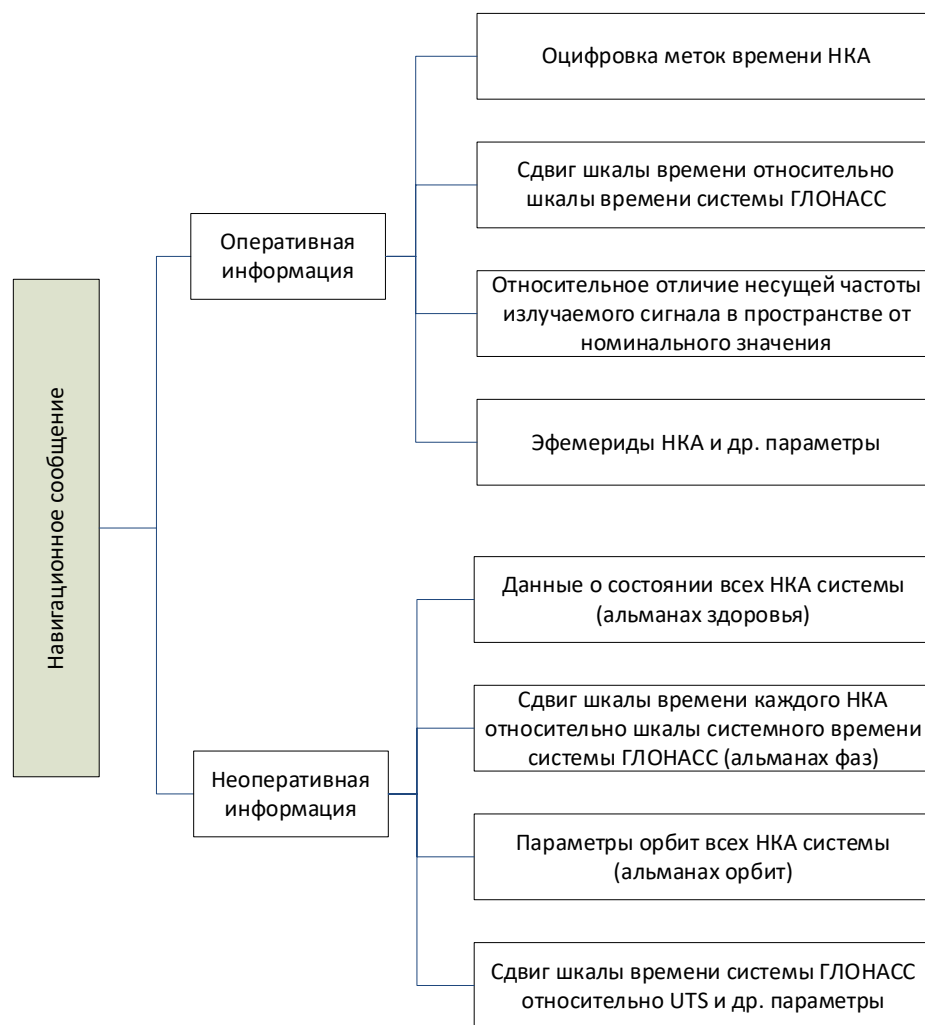


Рисунок 5 – Состав навигационного сообщения ГНСС ГЛОНАСС

Структурно поток цифровой информации, в котором находится навигационное сообщение, формируется в виде непрерывно повторяющихся суперкадров, который состоит из нескольких кадров, а кадр состоит из нескольких строк цифровой информации. В пределах каждого суперкадра передается полный объем неоперативной информации (альманах) для всех 24 НКА группировки ГЛОНАСС. Структура суперкадра представлена на рисунке 6 [14, стр.22]:

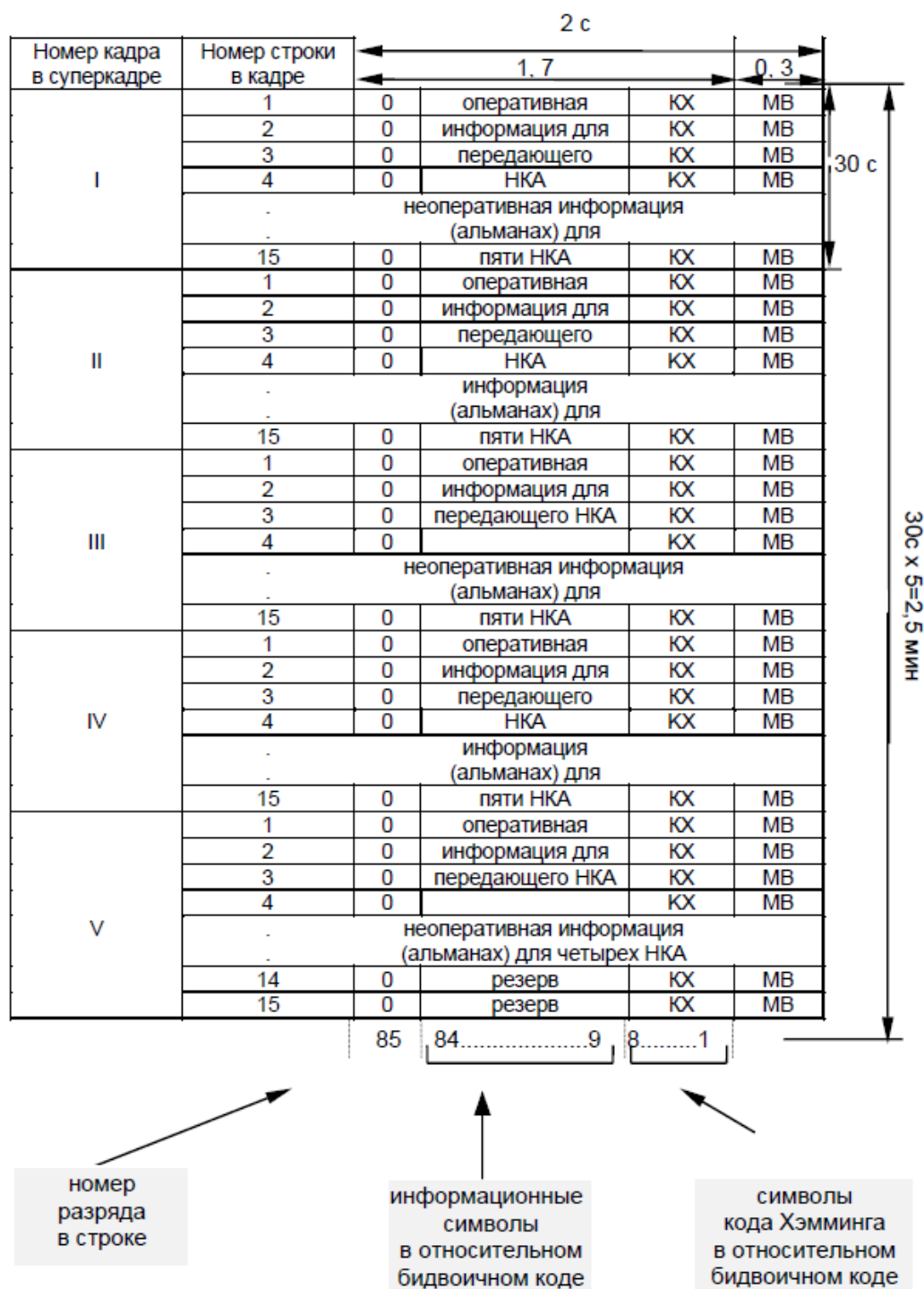


Рисунок 6 – Структура суперкадра навигационного сообщения ГЛОНАСС

2 Используемые математические модели

2.1 Ввод систем координат и связи между ними

Инерциальная система координат

Инерциальная (небесная) система координат (ИСК) закрепляется координатами опорных звезд. Начало ИСК – в центре масс Земли, ось $Z_{и}$ направлена в северный полюс мира, ось $X_{и}$ расположена в плоскости экватора и направлена в точку весеннего

равноденствия γ , ось Y_u дополняет систему до правой (рисунок 7). Полюс мира и точка весеннего равноденствия не сохраняют неизменными свое положение в пространстве с течением времени, поэтому для фиксирования инерциальной системы координат принимают стандартную эпоху 2000.0 [15, с.11].

Общеземная система координат

Общеземная система координат (декарто-гринвичская система координат (ДГСК)) - геоцентрическая пространственная системой координат с началом в центре масс Земли. Ось Z направлена к условному земному полюсу (международному условному началу), как определено рекомендациями Международной службы вращения Земли (IERS), ось X – в точку пересечения плоскости экватора и начального меридиана, установленного IERS и Международным бюро времени (BIH), ось Y дополняет систему до правой. Общеземная система координат вращается вместе с Землей (рисунок 7) [15, с.10].

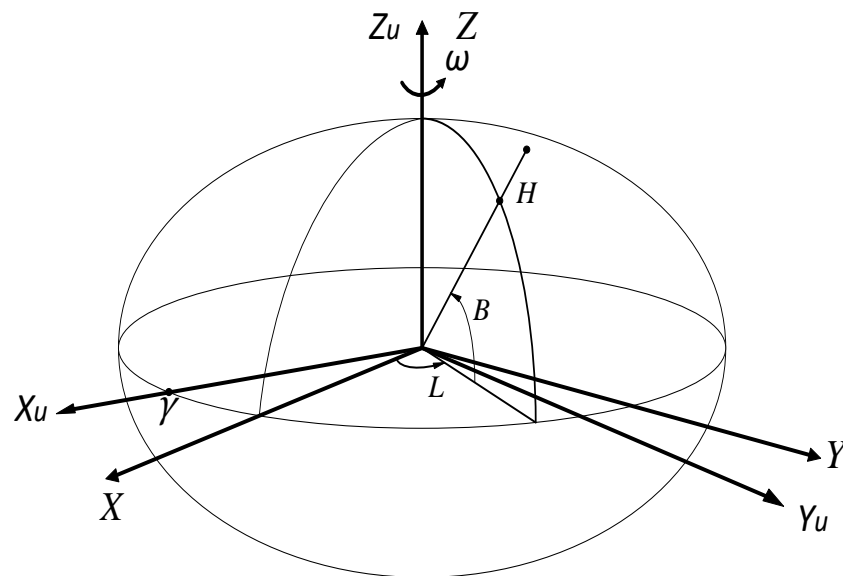


Рисунок 7 – Взаимное расположение ИСК и ДГСК

Перевод вектора координат из ИСК в ДГСК можно получить, используя следующие соотношения:

$$A = \begin{pmatrix} \cos(R_u * t) & -\sin(R_u * t) & 0 \\ \sin(R_u * t) & \cos(R_u * t) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}^{-1}, \quad (2.1)$$

$$r_{\text{дгск}}(t) = A * r_{\text{иск}}(t), \quad (2.2)$$

где $r_{иск}$ – вектор координат в ИСК, $r_{дгск}$ – вектор координат в ДГСК, R_u – скорость вращения Земли, равная $7,2921158554 \cdot 10^{-5}$ рад/с, t – текущее время.

Орбитальная система координат

Орбитальная система координат – система координат, начало которой совпадает с центром масс Земли, а основная плоскость параллельна плоскости орбиты объекта в некоторую определенную эпоху $t = t_0$; ось Z_0 перпендикулярна орбитальной плоскости, ось X_0 направлена в перицентр орбиты.

Перевод вектора координат из орбитальной системы координат в ИСК можно получить, используя следующие соотношения:

$$r_{иск}(t) = \begin{pmatrix} r(t)(\cos v \cos \Omega - \sin \omega \cos i \sin \Omega) \\ r(t)(\cos v \sin \Omega - \sin \omega \cos i \cos \Omega) \\ r(t)(\sin \omega \sin i) \end{pmatrix}, \quad (2.3)$$

где $r(t)$ – радиус-вектор, $r_{иск}$ – вектор координат в ИСК, u – аргумент широты, Ω – долгота восходящего узла, i – наклонение орбиты.

Геодезическая система координат

Геодезическая система координат также является общеземной системой координат, однако положение точки в пространстве определяется не значениями координат X , Y , Z , а геодезическими координатами B , L , H , относящимися к общеземному эллипсоиду – эллипсоиду вращения, геометрический центр которого совпадает с центром общеземной системы координат (рисунок 7). Ось Z – ось вращения эллипсоида [15, с.10].

B – геодезическая широта, определяется как угол между нормалью к эллипсоиду, проходящей через заданную точку, и плоскостью экватора.

L – геодезическая долгота, определяется как двугранный угол между плоскостью начального меридиана и плоскостью меридиана, проходящего через заданную точку.

H – геодезическая высота, определяется как отрезок нормали к общеземному эллипсоиду от его поверхности до заданной точки.

Перевод вектора координат из геодезической системы координат в ДГСК можно получить, используя следующие соотношения [15, с.32]:

$$\begin{cases} X = (N + H) \cos B \cos L \\ Y = (N + H) \cos B \sin L \\ Z = [(1 - e^2)N + H] \sin B \end{cases},$$

$$N = \frac{a}{\sqrt{1 - e^2 \sin^2 B}}, \quad (2.4)$$

$$e^2 = 2\alpha - \alpha^2,$$

где a – большая полуось эллипсоида, α – сжатие эллипсоида, N – радиус кривизны первого вертикала, e – эксцентриситет эллипсоида, B, L, H – геодезические координаты точки, X, Y, Z – координаты точки в ДГСК.

Обратный перевод координат из ДГСК в геодезические проводится по следующему алгоритму:

- 1) вычисляется вспомогательная величина r :

$$r = \sqrt{X^2 + Y^2}. \quad (2.5)$$

- 2) Анализируется значение r :

- а) если $r = 0$, то:

$$B = \frac{\pi Z}{2|Z|},$$

$$L = 0, \quad (2.6)$$

$$H = Z * \sin B - a\sqrt{1 - e^2 \sin^2 B},$$

- б) если $r > 0$, то:

$$L_a = \left| \arcsin\left(\frac{Y}{r}\right) \right|, \quad (2.7)$$

при этом

$$L = \begin{cases} L_a, & Y \geq 0, X \geq 0 \\ \pi - L_a, & Y \geq 0, X < 0 \\ 2\pi - L_a, & Y < 0, X \geq 0 \\ \pi + L_a, & Y < 0, X < 0 \end{cases}.$$

- 3) Анализируются значения Z :

- а) если $Z = 0$, то:

$$B = 0, \quad H = r - a,$$

б) во всех других случаях вычисления выполняются следующим образом:

- находятся вспомогательные величины ρ, c, p по формулам:

$$\rho = \sqrt{X^2 + Y^2 + Z^2},$$

$$c = \arcsin\left(\frac{Z}{\rho}\right),$$

$$p = \frac{e^2 a}{2\rho},$$

- реализуется итеративный процесс:

$$\begin{aligned} s_1 &= 0, \\ b &= c + s_1, \\ s_2 &= \arcsin\left(\frac{p \sin(2b)}{\sqrt{1 - e^2 \sin^2 b}}\right), \\ d &= |s_2 - s_1|. \end{aligned} \tag{2.8}$$

Если величина d меньше установленного значения допуска $0.0001''$, то:

$$B = b.$$

Если отношение $\frac{r}{Z} < 1.10^{-8}$, то производится коррекция широты близполюсной точки по формуле:

$$\begin{aligned} B &= B - \frac{r}{Z}, \\ H &= r \cos B - Z \sin B - a\sqrt{1 - e^2 \sin^2 B}. \end{aligned}$$

Если величина d равна или больше установленного значения допуска, то:

$$s_1 = s_2, \tag{2.9}$$

и вычисления повторяют, начиная с формулы (2.8).

2.2 Структура и данные из альманаха на примере ГЛОНАСС

Моделирование движения ОГ ГЛОНАСС или GPS возможно реализовать при помощи альманаха, входящего в неоперативную информацию навигационного сообщения.

Пример альманаха ОГ ГЛОНАСС представлен на рисунке 8 [16]. Формат файла альманаха GPS имеет схожий вид.

```
12 01 2022 28835
1 1 1 12 01 2022 0.320118125E+05 0.000000000E+00 0.000000000E+00 -0.381469727E-05
-0.4093132E+00 0.7408142E-02 0.7281494E-01 0.2393723E-03 -0.2655336E+04 -0.7324219E-03
12 01 2022 28839
2 -4 1 12 01 2022 0.377843438E+05 0.000000000E+00 0.000000000E+00 -0.503540039E-03
-0.5339298E+00 0.9939194E-02 -0.7467651E+00 0.1924515E-02 -0.2655789E+04 -0.6713867E-03
12 01 2022 28843
3 5 1 12 01 2022 0.224487500E+04 0.000000000E+00 0.000000000E+00 -0.495910645E-04
0.2888803E+00 0.9021759E-02 -0.7219238E+00 0.1859665E-02 -0.2655836E+04 -0.4272461E-03
12 01 2022 28847
4 6 1 12 01 2022 0.717003125E+04 0.000000000E+00 0.000000000E+00 -0.122070312E-03
0.1757574E+00 0.1076221E-01 -0.5830078E+00 0.8897781E-03 -0.2655891E+04 -0.4272461E-03
12 01 2022 28851
5 1 1 12 01 2022 0.120859688E+05 0.000000000E+00 0.000000000E+00 -0.839233398E-04
0.6244278E-01 0.1084614E-01 -0.8461609E+00 0.5941391E-03 -0.2655922E+04 -0.4882812E-03
12 01 2022 28865
6 -4 1 12 01 2022 0.178206250E+05 0.000000000E+00 0.000000000E+00 0.228881836E-04
-0.8055305E-01 0.7313728E-02 0.7737427E+00 0.6732941E-03 -0.2655770E+04 -0.6103516E-03
12 01 2022 28869
7 5 1 12 01 2022 0.227203750E+05 0.000000000E+00 0.000000000E+00 -0.305175781E-04
-0.1860819E+00 0.9066582E-02 -0.7196655E+00 0.1593590E-02 -0.2655785E+04 -0.5493164E-03
12 01 2022 28873
8 6 1 12 01 2022 0.274546250E+05 0.000000000E+00 0.000000000E+00 0.610351562E-04
-0.2959433E+00 0.9107590E-02 -0.5918579E+00 0.1942635E-02 -0.2655809E+04 -0.6103516E-03
12 01 2022 28877
9 -2 1 12 01 2022 0.309445312E+05 0.000000000E+00 0.000000000E+00 -0.305175781E-04
0.2834225E+00 0.4015923E-02 -0.8943176E+00 0.1478195E-02 -0.2655959E+04 -0.1281738E-02
12 01 2022 28881
10 -7 1 12 01 2022 0.356076562E+05 0.000000000E+00 0.000000000E+00 0.762939453E-04
0.1761398E+00 0.7906914E-02 0.7962036E-01 0.1753807E-02 -0.2656148E+04 -0.1281738E-02
12 01 2022 28895
11 0 0 12 01 2022 0.243531250E+03 0.000000000E+00 0.000000000E+00 -0.457763672E-04
0.9966812E+00 0.9394646E-02 -0.6424561E+00 0.2870560E-03 -0.2656098E+04 -0.1586914E-02
12 01 2022 28899
12 -1 1 12 01 2022 0.554862500E+04 0.000000000E+00 0.000000000E+00 -0.293731689E-03
0.8769846E+00 0.8159637E-02 -0.2882080E+00 0.9441376E-03 -0.2655928E+04 -0.1708984E-02
12 01 2022 28903
13 -2 1 12 01 2022 0.103801875E+05 0.000000000E+00 0.000000000E+00 0.152587891E-04
```

Рисунок 8 – Альманах ОГ ГЛОНАСС

Необходимый документ для использования альманаха ГНСС чаще всего носит название «Формат» - справочный материал, в котором расшифрованы данные альманаха (параметры и их размерность). Пример формата альманаха представлен на рисунке 9 [16]:

Альманах ГЛОНАСС (допускается неограниченное число данных в файле)
???_<YYYY><MM><DD><HH>.agl

12 12 1234 12345 123456789101234567890
12 12 1 12 12 1234 1.123456789E-12 1.123456789E-12 1.123456789E-12 1.123456789E-12
1.1234567E-12 1.1234567E-12 1.1234567E-12 1.1234567E-12 1.1234567E-12 1.1234567E-12

Строка 1

- 1 - число получения альманаха
- 2 - месяц получения альманаха
- 3 - год получения альманаха
- 4 - время получения альманаха от начала суток, с UTC
- 5 - комментарий (приемник с которого получено, версия SW и т.д.)

Строка 2

- 1 - номер КА в группировке
- 2 - номер частотного слота (-7 - 24)
- 3 - признак здоровья по альманаху (0 - 1)
- 4 - число
- 5 - месяц
- 6 - год
- 7 - время прохождения первого узла, на которое все дано, с
- 8 - поправка ГЛОНАСС-UTC, с
- 9 - поправка GPS-ГЛОНАСС, с
- 10 - поправка времени КА ГЛОНАСС относительно системного времени, с

Строка 3

- 1 - λ_m - долгота узла, полуциклы
- 2 - dI - коррекция наклона, полуциклы
- 3 - w - аргумент перигея, полуциклы
- 4 - e - эксцентриситет
- 5 - dT - поправка к драконическому периоду, с
- 6 - dTT - поправка к драконическому периоду, с/виток

Рисунок 9 – Формат альманаха ГЛОНАСС

2.3 Моделирование траекторий движения НКА для ГЛОНАСС

Определение координат и относительной скорости НКА для заданного момента времени является одной из вспомогательных задач для основной задачи позиционирования. Исходными данными этой задачи являются (для ГЛОНАСС):

- 1) Время, для которого определяются гринвичские координаты;
- 2) Информация из альманаха (параметры орбит):
 - ΔT – поправка к драконическому периоду, [с];
 - e – эксцентриситет;
 - ω – аргумент перигея, [полуцикл];
 - dI – коррекция наклона орбиты, [полуцикл];
 - λ – гринвичская долгота восходящего узла, [полуцикл];
 - $\Delta T'$ - поправка к драконическому периоду, [с/виток];
 - t_λ – время прохождения первого узла, на которое все дано, [с].

Для перевода из полуцикла в радианы, соответствующая величина умножается на

π .

Осуществляется следующая последовательность вычислений [2; 17]:

1. Методом последовательного приближения находится большая полуось орбиты a :

$$\begin{aligned}
 T_{\text{др}} &= T_{\text{ср}} + \Delta T \\
 i &= i_{\text{ср}} + \Delta i \\
 a^{(0)} &= \sqrt[3]{\left(\frac{T_{\text{др}}}{2\pi}\right)^2 \mu}, \\
 p^{(n)} &= a^{(n)}(1 - e^2), \quad n = 0, 1, 2 \dots - \text{шаг приближения} \\
 T_{\text{оск}}^{(n+1)} &= T_{\text{др}} \left\{ 1 + \frac{3}{2} C_{20} \left(\frac{a_e}{p^{(n)}}\right)^2 \left[\left(2 - \frac{5}{2} \sin^2 i\right) * \frac{(1 - e^2)^{\frac{3}{2}}}{(1 + e * \cos \omega)^2} + \frac{(1 + e \cos v)^3}{1 - e^2} \right] \right\}^{-1}, \\
 a^{(n+1)} &= \sqrt[3]{\left(\frac{T_{\text{оск}}^{(n+1)}}{2\pi}\right)^2 \mu},
 \end{aligned} \tag{2.10}$$

где:

$$\begin{aligned}
 v &= -\omega, \\
 \mu &= \mu_0 = 13,986004418 * 10^{14} \frac{\text{м}^3}{\text{с}^2} - \text{гравитационный параметр Земли;}
 \end{aligned}$$

За начальное приближение принимается (2.10). Приближение заканчивается при выполнении условия:

$$|a^{(n+1)} - a^{(n)}| < 10^{-3} \text{ км}$$

2. Производится перевод гринвичской долготы восходящего узла в долготу восходящего узла в ИСК Ω по следующим соотношениям:

$$\begin{aligned}
 \overline{t_{\lambda_k}} &= t_{\lambda} - T_{\text{др}} + \Delta T', \\
 t_{\lambda_k} &= [\overline{t_{\lambda_k}}]_{\text{mod } 86400}, \\
 n &= \frac{2\pi}{T_{\text{др}}}, \\
 \Omega' &= \frac{3}{2} C_{20} * n * \left(\frac{R_z}{a}\right)^2 * \cos i * (1 - e^2)^{-2}, \\
 \lambda_k &= \lambda + (\Omega' - R_u)(-T_{\text{др}} + \Delta T'),
 \end{aligned}$$

$$S = S_0 + R_u(t_{\lambda_k} - 10800),$$

$$\Omega = \lambda_k + S,$$

где S_0 – истинное звездное время на гринвичскую полночь даты N_0 , к которой относится текущее время (принять $S_0 = 24954$), R_z – большая ось общеземного эллипсоида (принять $R_z = a_e$), R_u – угловая скорость вращения Земли, C_{20} – коэффициент при второй зональной гармонике разложения геопотенциала в ряд по сферическим функциям.

3. Вычисляется средняя аномалия $M(t)$:

$$E = 2 \arctan2\left(\sqrt{1+e} * \sin \frac{v}{2}, \sqrt{1-e} * \cos \frac{v}{2}\right)$$

$$M_0 = E - e \sin E,$$

$$M(t) = M_0 + n * (t - t_{\lambda_k})$$

где t – текущий момент времени (в качестве упрощения можно начинать отсчитывать t с нуля).

4. Путем последовательных приближений решается уравнение Кеплера методом Ньютона-Рафсона:

$$E_{j+1} = E_j - \frac{E_j - e * \sin(E_j) - M(t)}{1 - e * \cos(E_j)},$$

за начальное приближение принять $E_0 = M(t)$; $j = 1 \dots 100$ – количество приближений

5. Вычисляется истинная аномалия $\vartheta(t)$:

$$\vartheta(t) = 2 \arctan2\left(\sqrt{1+e} * \sin \frac{E}{2}, \sqrt{1-e} * \cos \frac{E}{2}\right),$$

где $\arctan2$ – функция арктангенса, принимающая два аргумента:

$$\arctan2(y, x) = \begin{cases} \arctan\left(\frac{y}{x}\right), & x > 0 \\ \arctan\left(\frac{y}{x}\right) + \pi, & y \geq 0, \quad x < 0 \\ \arctan\left(\frac{y}{x}\right) - \pi, & y < 0, \quad x < 0 \\ +\frac{\pi}{2}, & y > 0, \quad x = 0 \\ -\frac{\pi}{2}, & y < 0, \quad x = 0 \\ \text{не определено,} & y = 0, \quad x = 0. \end{cases}$$

6. Находится аргумент широты u :

$$u = \vartheta + \omega.$$

7. Используя эксцентрическую аномалию $E(t)$, находится радиус-вектор $r(t)$:

$$r(t) = a(1 - e * \cos(E))$$

8. Осуществляется расчет радиус-вектора НКА в ИСК:

$$r_{\text{иск}}(t) = \begin{pmatrix} r(t)(\cos u \cos \Omega - \sin u \cos i \sin \Omega) \\ r(t)(\cos u \sin \Omega - \sin u \cos i \cos \Omega) \\ r(t)(\sin u \sin i) \end{pmatrix}$$

9. Полученный вектор (2.3) координат $r_{\text{иск}}(t)$ переводится в ДГСК, используя соотношения (2.1) и (2.2).

2.4 Моделирование траекторий движения НКА для GPS

Определение координат и относительной скорости НКА для заданного момента времени является одной из вспомогательных задач для основной задачи позиционирования. Исходными данными этой задачи являются (для GPS):

1) Время, для которого определяются гринвичские координаты;

2) Информация из альманаха (параметры орбит):

- e – эксцентриситет;
- ω – аргумент перигея, [полуцикл];
- i – наклонение орбиты, [полуцикл];
- M_0 – средняя аномалия, [полуцикл];
- Ω – гринвичская долгота восходящего узла, [полуцикл];
- \sqrt{a} – корень из большой полуоси, [$\sqrt{\text{м}}$].

Для перевода из полуцикла в радианы, соответствующая величина умножается на π .

Осуществляется следующая последовательность вычислений [17]:

1. Вычисление шага времени:

$$\Delta t = (t - t_0)$$

где Δt – шаг времени;

t – текущее время;

t_0 – время начала (в UTC).

2. Средняя аномалия орбиты $M(t)$:

$$M(t) = M_0 + \Delta t \sqrt{\frac{\mu}{a^3}}$$

где $\mu = \mu_0 = 13,986004418 * 10^{14} \frac{\text{м}^3}{\text{с}^2}$ – гравитационный параметр Земли;

В начальный момент времени: $M(t) = M_0$

При $t \neq t_0$: $M(t)$ нормализуется в диапазоне $[0, 2\pi)$.

3. Вычисление аномалии эксцентриситета кеплеровского уравнения методом последовательного приближения:

$$f(E) = E - e * \sin(E) - M$$

$$E_{j+1} = E_j - \frac{f(E_j)}{\frac{d}{dE_j} f(E_j)} = E_j - \frac{E_j - e * \sin(E_j) - M}{1 - e * \cos(E_j)},$$

При этом, начальное приближение $E_0 = M$, j – номер шага расчёта. Приближений – произвольное количество, но не менее четырех.

4. Получение истинной аномалии:

$$v(t) = 2 * \arctan2\left(\sqrt{1+e} * \sin\left(\frac{E(t)}{2}\right), \sqrt{1-e} * \cos\left(\frac{E(t)}{2}\right)\right)$$

5. Определение расстояния до центра системы координат, используя аномалии эксцентриситета:

$$r_c(t) = a (1 - e * \cos(E(t)))$$

6. Используется соотношение (2.3) для нахождения вектора координат в ИСК.

7. Полученный вектор (2.3) координат $r_{\text{иск}}(t)$ переводится в ДГСК, используя соотношения (2.1) и (2.2).

2.5 Математические модели погрешностей приемника ГНСС

2.4.1. Определение углов возвышения El и азимута Az .

Углы возвышения El и азимута Az НКА используются при параметризации моделей ионосферной и тропосферной задержек, а также для определения геометрического фактора.

Исходными данными для решения задачи определения углов El и Az являются:

- 1) координаты приемника в ДГСК: $\vec{r}_{\text{ДГСК}}^{\text{пр}} = (r_{\text{ДГСК}_1}^{\text{пр}}, r_{\text{ДГСК}_2}^{\text{пр}}, r_{\text{ДГСК}_3}^{\text{пр}})$;
- 2) координаты всех НКА в ДГСК: $\vec{r}_{\text{ДГСК}_i}^{\text{нка}} = (r_{\text{ДГСК}_1}^{\text{нка}}, r_{\text{ДГСК}_2}^{\text{нка}}, r_{\text{ДГСК}_3}^{\text{нка}})$, $i = \overline{1, N}$, где N – количество НКА в ОГ. Для ГЛОНАСС $N = 24$;

- 3) Значения всех вектора $\vec{r}_{\text{ДГСК}}^{\text{нка-прм}} = (r_{\text{ДГСК}_1}^{\text{нка-пр}}, r_{\text{ДГСК}_2}^{\text{нка-пр}}, r_{\text{ДГСК}_3}^{\text{нка-пр}})$ приемник – НКА: $\vec{r}_{\text{ДГСК}}^{\text{нка-прм}} = \vec{r}_{\text{ДГСК}}^{\text{нка}} - \vec{r}_{\text{ДГСК}}^{\text{прм}}$.

Угол возвышения El определяется как угол между горизонтальной плоскостью M_{x_1, x_2} сопровождающего точку местоположения приемника географического трехгранника M_x и вектором $\vec{r}_{\text{ДГСК}}^{\text{нка-прм}}$, отсчитываемым от плоскости M_{x_1, x_2} .

Угол азимута НКА Az – угол между проекцией вектора $\vec{r}_{\text{ДГСК}}^{\text{нка-прм}}$ на горизонтальную плоскость и направлением на север (ось M_{x_2}), отсчитываемый от этой проекции до оси M_{x_2} против часовой стрелки.

Так как при вычислении углов не требуются большие точности, в алгоритме вычисления можно использовать обобщенную модель земного эллипсоида (модель сферической формы Земли).

Осуществляется следующая последовательность вычислений [3, с.43]:

1. Определяется матрица взаимной ориентации $A_{x\eta}$ географической системы координат и ДГСК:

$$A_{x\eta} = \begin{pmatrix} -\frac{r_{\text{ДГСК}_2}^{\text{пр}}}{R_g} & \frac{r_{\text{ДГСК}_1}^{\text{пр}}}{R_g} & 0 \\ -\frac{r_{\text{ДГСК}_1}^{\text{пр}} r_{\text{ДГСК}_3}^{\text{пр}}}{R_g R} & -\frac{r_{\text{ДГСК}_2}^{\text{пр}} r_{\text{ДГСК}_3}^{\text{пр}}}{R_g R} & \frac{R_g}{R} \\ \frac{r_{\text{ДГСК}_1}^{\text{пр}}}{R} & \frac{r_{\text{ДГСК}_2}^{\text{пр}}}{R} & \frac{r_{\text{ДГСК}_3}^{\text{пр}}}{R} \end{pmatrix},$$

$$\text{где } R = \sqrt{r_{\text{ДГСК}_1}^{\text{пр}^2} + r_{\text{ДГСК}_2}^{\text{пр}^2} + r_{\text{ДГСК}_3}^{\text{пр}^2}}, R_g = \sqrt{r_{\text{ДГСК}_1}^{\text{пр}^2} + r_{\text{ДГСК}_2}^{\text{пр}^2}}.$$

2. Определяется вектор \vec{r}_x^{ST} :

$$\bar{r}_x^{sr} = A_{x\eta} \bar{r}_{\text{дгск}}^{\text{НКА-прм}} = \|\bar{r}_x^{sr}\| (\cos El \sin Az, \cos El \cos Az, \sin El)^T$$

3. По значениям компонент $(r_{x_1}^{sr}, r_{x_2}^{sr}, r_{x_3}^{sr})^T$ вектора \bar{r}_x^{sr} определяются углы возвышения El и азимута Az НКА:

а) Если $R_g = 0$, то углы Az, El не определены.

б) Вычисляются $\sin El = \frac{r_{x_3}^{sr}}{\|\bar{r}_x^{sr}\|}$, $\cos El = \sqrt{1 - \sin^2 El}$.

Если $\sin El = 1$, то $El = \frac{\pi}{2}$, иначе $El = \arctan\left(\frac{\sin El}{\cos El}\right)$.

в) Вычисляется угол азимута Az исходя из условий:

$$Az = \begin{cases} \frac{\pi}{2}, & r_{x_2}^{sr} = 0 \text{ и } r_{x_1}^{sr} > 0; \\ \frac{3\pi}{2}, & r_{x_2}^{sr} = 0 \text{ и } r_{x_1}^{sr} < 0; \\ \arctan\left(\frac{r_{x_1}^{sr}}{r_{x_2}^{sr}}\right), & r_{x_2}^{sr} \neq 0; \end{cases}$$

при этом:

$$Az = \begin{cases} Az + \pi, & r_{x_2}^{sr} < 0; \\ Az + \pi, & r_{x_2}^{sr} > 0 \text{ и } r_{x_1}^{sr} < 0. \end{cases}$$

2.4.2 Условие видимости НКА приемником ГНСС

Приемник системы ГЛОНАСС выполняет беззапросные измерения псевдодальности не менее четырех НКА, а также прием и обработку навигационных сообщений, содержащихся в составе спутниковых навигационных радиосигналов. НКА считается «наблюдаемым» из некоторой точки на Земле, если угол между направлением на НКА из этой точки не меньше заданного угла маскирования – угла между направлением на НКА из точки на Земле и плоскостью местного горизонта. При этом нужно учитывать работоспособность (здоровье) каждого НКА – пригодность НКА для проведения навигационных определений потребителя системы на момент закладки неоперативной информации (альманаха).

Для уменьшения влияния атмосферных погрешностей в приемнике ГНСС осуществляется обработка сигналов только для тех НКА, которые находятся над горизонтом выше, чем угол маскирования – то есть тех НКА, чей угол возвышения El больше угла маскирования. Обычно угол маскирования $\gamma_{\text{маск}}$ составляет $5^\circ \div 10^\circ$ в зависимости от качества используемых в приемнике алгоритмов компенсации атмосферных погрешностей.

В данной дипломной работе угол маскирования принимается равным $\gamma_{\text{маск}} = 7^\circ$.

Исходя из вышеперечисленного, можно установить условия приема сигналов НКА:

- Количество видимых НКА – не менее четырех;
- У видимых НКА угол возвышения $El > \gamma_{\text{маск}}$;
- Признак здоровья для видимых НКА, определяющий работоспособность НКА.

2.4.3 Модель ионосферной задержки

Моделирование ионосферной погрешности предполагает использование известных функциональных зависимостей, связывающих указанную задержку со значениями параметров атмосферы на участке распространения навигационного сигнала [3].

Приводится стандартизированная модель ионосферной задержки – модель Клобухара, которая рекомендована в международных документах. Параметры этой модели передаются в служебной информации ГНСС, что позволяет пользователям осуществлять компенсацию ионосферных погрешностей ($\cong 50\%$).

Исходными данными для решения задачи определения ионосферной задержки $\delta t_{\text{ион}}$ являются:

- 1) углы возвышения El [рад] и азимута Az [рад];
- 2) широта и долгота точки расположения приемника φ_u [рад] и λ_u [рад] соответственно;
- 3) ионосферные коэффициенты $\alpha_0, \alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \beta_0, \beta_1, \beta_2, \beta_3$.

Осуществляется следующая последовательность вычислений [3, с.45]:

1. Угловые величины переводятся в полуциклы:

$$Az = \frac{Az}{\pi};$$

$$El = \frac{El}{\pi};$$

$$\varphi_u = \frac{\varphi_u}{\pi};$$

$$\lambda_u = \frac{\lambda_u}{\pi}.$$

2. Определяется угол φ с вершиной в центре Земли:

$$\varphi = \frac{0,0137}{El + 0.11}$$

3. Определяется значение ионосферной широты φ_i :

$$\varphi_i = \varphi_u + \varphi \cos(Az * \pi),$$

при этом:

$$\varphi_i = \begin{cases} 0.416, & \varphi_i > 0,416, \\ -0.416, & \varphi_i < -0,416. \end{cases}$$

4. Определяется значение ионосферной долготы λ_i :

$$\lambda_i = \lambda_u + \varphi \frac{\sin(Az * \pi)}{\cos(\varphi_i * \pi)}.$$

5. Определяется значение геометрической широты φ_m точки пересечения ионосферы:

$$\varphi_m = \varphi_i + 0,064 * \cos((\lambda_i - 1,617) * \pi),$$

6. Определяется местное время для точки в ионосфере T и время передачи сигнала T_{em} :

$$T = 4,32 * 10^4 \lambda_i + T_{em},$$

$$T_{em} = \frac{\rho_{изм}}{c},$$

где $\rho_{изм}$ – измеренная (истинная) дальность от приемника до НКА, c – скорость света.

7. Вычисляются:

$$F = 1 + 16 * (0,53 - El)^3,$$

$$PER = \beta_0 + \beta_1 \varphi_m + \beta_2 \varphi_m^2 + \beta_3 \varphi_m^3,$$

$$AMP = \alpha_0 + \alpha_1 \varphi_m + \alpha_2 \varphi_m^2 + \alpha_3 \varphi_m^3.$$

Если $PER < 7200$, то $PER = 7200$.

Если $AMP < 0$, то $AMP = 0$.

8. Вычисляется ионосферная задержка $\Delta T_{\text{ион}}$:

$$x = 2\pi \frac{T - 50400}{PER} \text{ [рад]}.$$

Если $|x| > 1.57$, то:

$$\delta t_{\text{ион}} = F * 5 * 10^{-9}.$$

В противном случае:

$$\delta t_{\text{ион}} = F * (5 * 10^{-9} + AMP \left(1 - \frac{x^2}{2} + \frac{x^4}{24} \right)).$$

2.4.4 Модель тропосферной задержки

Тропосферная задержка не зависит от частоты излучаемого сигнала, но зависит от факторов, которые достаточно известны и прогнозируются: взаимные координаты объект-НКА, температура, влажность, давление.

Описывается распространенная модель Хопфилда для задержки сигнала в тропосфере [3].

Исходными данными для решения задачи определения тропосферной задержки $\delta \rho_{\text{троп}}$ являются:

- 1) углы возвышения El [рад] и азимута Az [рад];
- 2) значения температуры воздуха T_a , давления водяного пара P_v и атмосферного давления P_a , однако, могут быть использованные «стандартные» значения параметров $K_d = 2,312$ и $K_\omega = 0,084$.

Вычисления сводятся к соотношению [3, с.48]:

$$\delta \rho_{\text{троп}} = \delta t_{\text{троп}} c = \frac{K_d}{\sin(El^2 + 1,90410^{-3})} + \frac{K_\omega}{\sin(El^2 + 1,90410^{-3})} \text{ [м]},$$

где:

$$K_d = 1,55208 * \frac{10^{-4} P_a (40136 + 148,72 T_a)}{T_a + 273,16},$$

$$K_\omega = -\frac{0,282 P_v}{T_a + 273,16} + \frac{8307,2 P_v}{(T_a + 273,16)^2}.$$

2.4.5 Определение геометрического фактора

В задачах спутниковой навигации для приближенной оценки точностных возможностей спутниковых измерений используются геометрические факторы.

Исходными данными для решения задачи определения геометрических факторов $PDOP$, $HDOP$, $VDOP$ и $TDOP$ являются:

- 1) углы возвышения El [рад] и азимута Az [рад];
- 2) количество видимых НКА.

Осуществляется следующая последовательность вычислений [18]:

1. Составляется матрица DOP_A для всех i -тых видимых НКА:

$$DOP_A = \begin{pmatrix} -\cos Az_1 \cos El_1 & -\cos Az_1 \sin El_1 & -\sin El_1 & -1 \\ -\cos Az_2 \cos El_2 & -\cos Az_2 \sin El_2 & -\sin El_2 & -1 \\ \dots & \dots & \dots & -1 \\ -\cos Az_i \cos El_i & -\cos Az_i \sin El_i & -\sin El_i & -1 \end{pmatrix}$$

2. Определяется матрица Q :

$$Q = (DOP_A^T DOP_A)^{-1}$$

3. Определяются $PDOP$, $HDOP$, $VDOP$ и $TDOP$:

$$\begin{aligned} HDOP &= \sqrt{q_{11} + q_{22}} \\ VDOP &= \sqrt{q_{33}} \\ PDOP &= \sqrt{q_{11} + q_{22} + q_{33}} \\ TDOP &= \sqrt{q_{44}} \end{aligned}$$

2.6 Определение дальностей и псевдодальностей до НКА

В общем виде псевдодальность ρ можно записать в виде соотношения [6, с.95]:

$$\rho = \rho_{\text{изм}} + \delta\rho, \quad (2.11)$$

где $\rho_{\text{изм}}$ – измеренная (истинная) дальность от приемника до НКА и $\delta\rho$ – погрешность (ошибки) измерения ПД:

$$\rho_{\text{изм}} = \sqrt{(r_{\text{дгск}_1}^{\text{нка}} - r_{\text{дгск}_1}^{\text{пр}})^2 + (r_{\text{дгск}_2}^{\text{нка}} - r_{\text{дгск}_2}^{\text{пр}})^2 + (r_{\text{дгск}_3}^{\text{нка}} - r_{\text{дгск}_3}^{\text{пр}})^2}, \quad (2.12)$$

$$\delta\rho = \delta\rho_{\text{ион}} + \delta\rho_{\text{троп}} + \delta\rho_{\text{млр}} + \delta\rho_{\text{ргэ}} + \delta\rho_{\text{пр шум}} + \delta\rho_t + \varepsilon_d \quad (2.13)$$

В данной работе не учитываются влияния многолучевости, релятивистских и гравитационных задержек. Исходя из этого, соотношение (2.13) принимает вид:

$$\delta\rho = \delta t_{\text{ион}}c + \delta\rho_{\text{троп}} + \delta\rho_{\text{пр шум}} + \delta t_{\text{пр}}c, \quad (2.14)$$

где $\delta t_{\text{пр}}$ – уход часов приемника ГНСС, $\delta\rho_{\text{пр шум}}$ – шумовая составляющая погрешность приемника ГНСС, описываемая нормальным законом распределения с заранее известным математическим ожиданием $M[\delta\rho_{\text{пр шум}}]$ и среднеквадратическим отклонением σ :

$$\delta\rho_{\text{пр шум}} \in N\left(M[\delta\rho_{\text{пр шум}}], \sigma\right).$$

2.7 Математический алгоритм определения координат приемника при помощи оценки ПД до НКА

Методическую основу алгоритма составляет процедура линеаризации уравнений ПД в окрестности опорного решения с последующим применением метода наименьших квадратов (МНК) для возникающей линейной модели задачи оценивания. Результатом моделирования является оценка истинных координат приемника ГНСС в ДГСК $\hat{r}_{\text{ДГСК}}^{\text{пр}}$ и оценка метрической погрешности часов приемника ГНСС $\hat{\rho}_{\text{пр}}$ [3, с.52].

Исходными данными для решения задачи определения координат приемника при помощи оценки ПД до НКА являются:

- 1) Априорные координаты приемника в ДГСК: $\hat{r}_{\text{ДГСК}}^{\text{пр}} = (r_{\text{ДГСК}_1}^{\text{пр}}, r_{\text{ДГСК}_2}^{\text{пр}}, r_{\text{ДГСК}_3}^{\text{пр}})$;
- 2) Массив измерений ПД $\rho_i, (i = \overline{1, N})$, где N – количество видимых НКА;
- 3) Массив координат НКА, полученных в результате решения задачи позиционирования: $\hat{r}_{\text{ДГСК}}^{\text{НКА}} = (r_{\text{ДГСК}_1}^{\text{НКА}}, r_{\text{ДГСК}_2}^{\text{НКА}}, r_{\text{ДГСК}_3}^{\text{НКА}})$;
- 4) Массивы значений погрешностей ионосферы $\delta\rho_{\text{ион}} = \delta t_{\text{ион}}c$ и тропосферы $\delta\rho_{\text{троп}}$.

Осуществляется следующая последовательность вычислений [3, с.53]:

1. Осуществляется алгоритмическая компенсация погрешностей $\delta t_{\text{пр}}c$, $\delta\rho_{\text{ион}}$, $\delta\rho_{\text{троп}}$ в ПД:

$$\tilde{\rho} = \rho_{\text{изм}} + \delta t_{\text{пр}}c + \delta\rho_{\text{пр шум}} - \delta\rho_{\text{ион}} - \delta\rho_{\text{троп}} \quad (2.15)$$

2. Осуществляется линеаризация уравнений измерений (2.15) в окрестности опорного решения $r_{\text{ДГСК}}^{\text{пр} '}$, и формируются измерения «в малом»:

$$r_{\text{ДГСК}}^{\text{пр} '} = r_{\text{ДГСК}}^{\text{пр}} + \Delta r_{\text{ДГСК}}^{\text{пр}},$$

$$\rho^{\text{выч}} = \sqrt{(r_{\text{ДГСК}_1}^{\text{НКА}} - r_{\text{ДГСК}_1}^{\text{пр} '})^2 + (r_{\text{ДГСК}_2}^{\text{НКА}} - r_{\text{ДГСК}_2}^{\text{пр} '})^2 + (r_{\text{ДГСК}_3}^{\text{НКА}} - r_{\text{ДГСК}_3}^{\text{пр} '})^2},$$

$$z_{\rho} = \tilde{\rho} - \rho^{\text{выч}} \cong h^T x,$$

где $x = (\Delta r_{\text{ДГСК}_1}^{\text{пр}}, \Delta r_{\text{ДГСК}_2}^{\text{пр}}, \Delta r_{\text{ДГСК}_3}^{\text{пр}}, \delta t_{\text{пр}}c)^T$ – вектор неизвестных оцениваемых параметров, h^T – вектор-строка с компонентами:

$$h^T = \left(\frac{r_{\text{ДГСК}_1}^{\text{НКА}} - r_{\text{ДГСК}_1}^{\text{пр} '}}{\rho^{\text{выч}}}, \frac{r_{\text{ДГСК}_2}^{\text{НКА}} - r_{\text{ДГСК}_2}^{\text{пр} '}}{\rho^{\text{выч}}}, \frac{r_{\text{ДГСК}_3}^{\text{НКА}} - r_{\text{ДГСК}_3}^{\text{пр} '}}{\rho^{\text{выч}}}, 1 \right).$$

3. Определяется следующая модель задачи оценивания:

$$z = \begin{pmatrix} z_{\rho_1} \\ z_{\rho_2} \\ \dots \\ z_{\rho_N} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} h^T_{(1)} \\ h^T_{(2)} \\ \dots \\ h^T_{(N)} \end{pmatrix} x = Hx \quad (2.16)$$

4. Решение задачи (2.15) по методу наименьших квадратов имеет вид:

$$\tilde{x} = (H^T H)^{-1} H^T z \quad (2.17)$$

5. При помощи полученных оценок ошибок местоположения $\Delta r_{\text{дгск}_1}^{\text{пр}}$, $\Delta r_{\text{дгск}_2}^{\text{пр}}$, $\Delta r_{\text{дгск}_3}^{\text{пр}}$ уточняются координаты потребителя:

$$r_{\text{дгск}}^{\text{пр}} = r_{\text{дгск}}^{\text{пр}'} - \Delta r_{\text{дгск}}^{\text{пр}} \quad (2.18)$$

6. Производится несколько итераций пунктов вычислений 2 – 4. В конце каждой итерации полагается $r_{\text{дгск}}^{\text{пр}'} = r_{\text{дгск}}^{\text{пр}}$. Признаком окончания итераций служит критерий:

$$\left| r_{\text{дгск}_j}^{\text{пр}}(k+1) - r_{\text{дгск}_j}^{\text{пр}}(k) \right| < \delta_j, \quad j = 1, 2, 3, \quad (2.19)$$

где k – номер итерации, δ_j – заданная точность решения, [м].

3 Указания по выполнению лабораторных работ

Лабораторная работа №1- Моделирование траекторий движения спутникового созвездия

1) Заполните недостающие ячейки таблицы 4 исходных данных в соответствии со своим вариантом (вариант соответствует номеру студента в списке группы).

Таблица 4 – Исходные данные имитационного моделирования

	-	- номер варианта
	-	- тип созвездия (ГЛОНАСС/GPS)
	-	- дата получения альманаха
	[град]	- широта точки измерений
	[град]	- долгота точки измерений
$h = 0$	[м]	- высота точки измерений
$\delta t_{\text{прс}} = 1,5$	[м]	- постоянная ошибка ухода часов приемника НСС
$ \delta \rho_{\text{пр}} = 3$	[м]	- максимальное значение шумовой составляющей ошибки ПД
$\gamma_{\text{маск}} = 7$	[град]	- угол маскирования
$i_{\text{ср}} = 63$	[град]	- среднее наклонение плоскости орбиты НКА для ГЛОНАСС
$T_{\text{ср}} = 43200$	[с]	- среднее значение драконического периода обращения
$R_u = 7,2921158554e^{-5}$	[рад/с]	- скорость вращения земли
$R_z = 6371449,1$	[м]	- большая полуось общеземного эллипсоида
$C_{20} = -1082,62575e^{-6}$	-	- коэффициент при второй зональной гармонике разложения геопотенциала в ряд по сферическим функциям
$c = 299792458$	[м/с]	- скорость света
$\alpha = 1/298,25784$	-	- сжатие земного эллипсоида
$a_e = 6378136$	[м]	- экваториальный радиус Земли
$M [\delta \rho_{\text{пр шум}}] = 0$	[м]	- математическое ожидание шумовой ошибки приемника ГНСС

Тип созвездия выбирается исходя из четности номера студента в группе: нечетные – ГЛОНАСС, четные – GPS.

Дата получения альманаха выбирается по формуле начальная дата + (номер студента в группе – 1). Начальная дата – 1 января 2023г. Например, для студента №5 дата – 5.01.2023.

В качестве координат точки измерений предлагается выбрать координаты дома (не общежития) студента. В случае, если студент не желает распространять свой домашний адрес, допускается выбор любой другой точки на поверхности Земли в зоне покрытия GPS/ГЛОНАСС. Координаты должны быть заданы в геодезической системе координат (см. п. 2.1); высота точки над поверхностью – 0 м.

2) Реализуйте ПО чтения файла альманаха. Данные из файла должны быть получены в удобном для дальнейшей обработки формате (например, может быть сформирована структура данных «НКА», включающая в себя векторы параметров всех НКА).

3) Реализуйте ПО расчёта координат НКА в ИСК. Для этого см. п. 2.3. для ГЛОНАСС. Расчет координат НКА для GPS реализуется схожим образом, но не требует предварительного расчета большой полуоси и долготы восходящего узла (см п. 2.4). При расчете координат НКА учитывайте признак здоровья из альманаха – при наличии «больных» НКА их координаты не учитываются.

4) Постройте график траекторий движения НКА выбранного созвездия в ИСК за 12 часов с шагом 10 минут.

Лабораторная работа №2- Моделирование псевдодальностей

1) Реализуйте алгоритм перевода координат НКА из ИСК в ДГСК.

2) Реализуйте алгоритм перевода координат точки измерений из геодезической СК в ДГСК.

3) Реализуйте ПО расчета дальностей от НКА до приемника (п. 2.5) с учетом углов возвышения НКА (п.п. 2.4.1) и угла маскирования (п.п. 2.4.2). При расчете дальностей учитываются только «видимые» НКА.

4) Реализуйте алгоритм расчета псевдодальностей для «видимых» НКА с учетом модели погрешностей (формула (2.14)).

5) Постройте график количества видимых НКА для выбранной точки измерений за 12 часов с шагом 10 минут.

5) Постройте график псевдодальностей для любых пяти НКА выбранного созвездия за 12 часов с шагом 10 минут.

Лабораторная работа №3 – Построение и анализ навигационного решения ГНСС

1) Реализуйте алгоритм вычисления координат точки измерений в ДГСК методом наименьших квадратов (п. 2.6). За начальное приближение при этом могут быть выбраны координаты точки [0;0;0] или любые другие.

2) Постройте график погрешностей навигационного решения за 3 часа с шагом 1 минута. Погрешности навигационного решения вычисляются по формуле:

$$\delta r_{\text{ДГСК}_i}^{\text{пр}} = \left| r_{\text{ДГСК}_{\text{ист } i}}^{\text{пр}} - r_{\text{ДГСК}_{\text{мнк } i}}^{\text{пр}} \right|, i = 1, 2, 3,$$

где $r_{\text{ДГСК}_{\text{ист}}}^{\text{пр}}$ – истинные координаты местоположения приемника ГНСС в ДГСК, $r_{\text{ДГСК}_{\text{мнк}}}^{\text{пр}}$ – координаты приемника ГНСС в ДГСК, вычисленные по методу наименьших квадратов.

4 Общие рекомендации по выполнению лабораторных работ

ПО моделирования приемника ГНСС может быть реализовано на языках программирования MatLab, Python или другом языке по согласованию с преподавателем.

Структура реализованное ПО должна приблизительно соответствовать блок-схеме на рисунке 10.

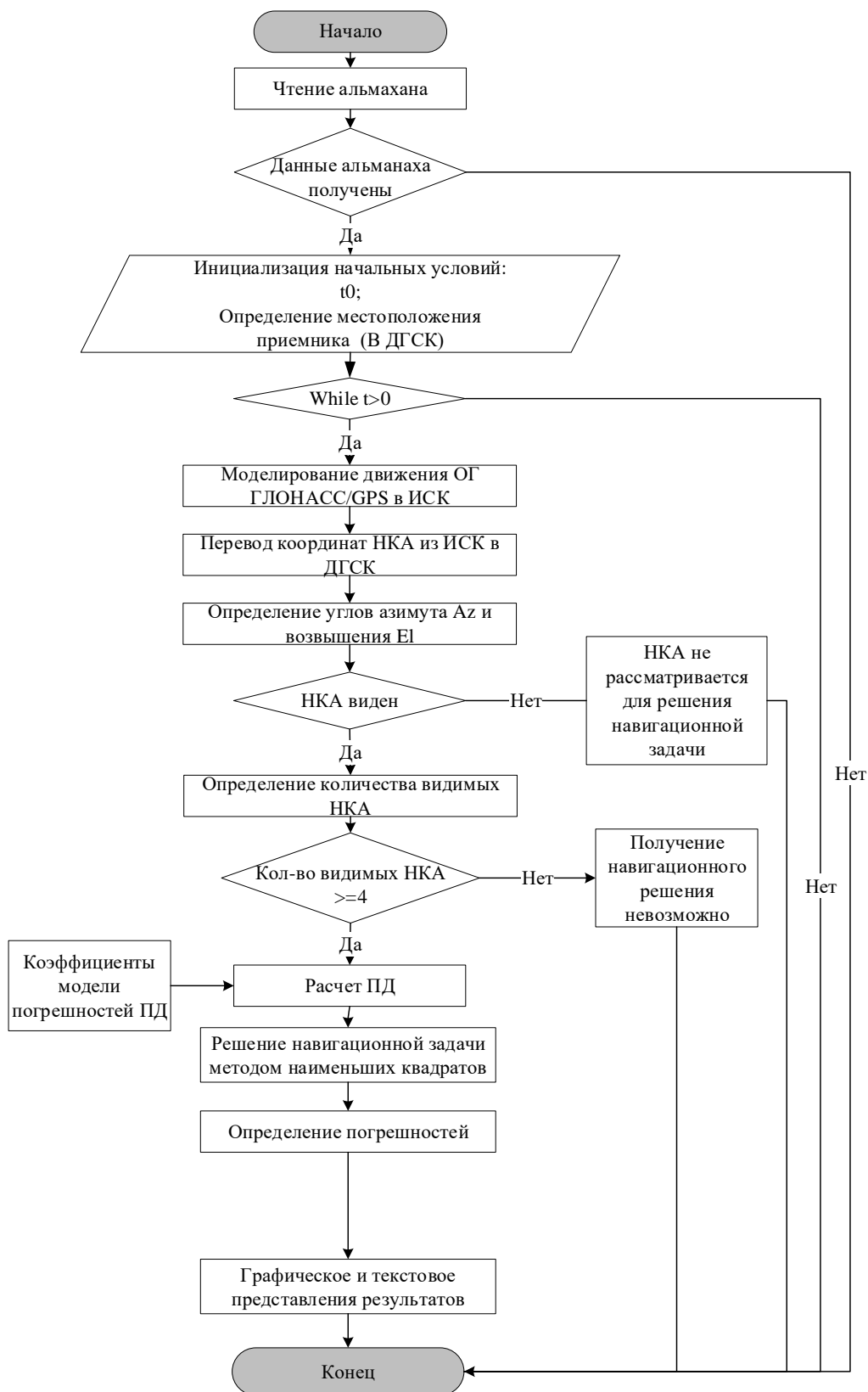


Рисунок 10 – Блок-схема ПО моделирования приемника ГНСС

Для упрощения работы вводятся следующие допущения:

- 1) Начальный момент времени моделирования $t_0 = 0$ секунд (не учитывается UTC);

2) Используется простейшая модель погрешностей псевдодальностей, не учитывающая атмосферные задержки сигналов. В этом случае, формула (2.14) представляется в виде:

$$\delta\rho = \delta\rho_{\text{пр шум}} + \delta t_{\text{пр}}c$$

где $\delta t_{\text{пр}}c$ – постоянная ошибка часов приемника; $\delta\rho_{\text{пр шум}}$ – шумовая составляющая погрешности ПД, рассчитывается на каждом шаге как случайное число в диапазоне $[-d\rho_{\text{пр}}; d\rho_{\text{пр}}]$.

Отчеты оформляются по ГОСТ 7.32.2017. Отчеты должны содержать исходные данные, краткое описание моделируемых алгоритмов, результирующие графики и выводы к ним, листинг программ. Оси координат на графиках должны быть подписаны.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. ГОСТ Р 52928-2010 Система спутниковая навигационная глобальная. Термины и определения
2. [Интерфейсный контрольный документ ГЛОНАСС. Редакция 5.1](#), Москва, 2008
3. Парусников Н.А., Вавилова Н.Б., Голован А.А., Трубников С.А. Математические модели и алгоритмы обработки измерений спутниковой навигационной системы GPS. Стандартный режим. – М.: Мех. – мат. МГУ, 2001
4. Радионавигационный план Российской Федерации от 04.09.2019, Москва, 2019
5. Введение в ГНСС. URL: <https://gnssplus.ru/articles/vvedenie-v-gnss-glava-1-obzor-gnss.html> (дата обращения 20.02.2022)
6. Спутниковые навигационные системы. – М.: каф.604 МАИ, 2004
7. ГОСТ 32545 – 2013 Глобальная навигационная спутниковая система. Параметры радионавигационного поля. Технические требования и методы испытаний
8. ГОСТ 31380 – 2009 Глобальные навигационные спутниковые системы. Аппаратура потребителей
9. ГОСТ Р 53612 – 2009 Глобальные навигационные спутниковые системы. Морские дифференциальные подсистемы. Формат передачи корректирующей информации
10. Автоматизированный справочник по геодезическому оборудованию: классификация геодезических приборов. URL: https://www.ngasu.ru/geodesy/classification/chastnye-klassifikatsii/10_GNSS.php (дата обращения 21.02.2022)
11. Емельянцев Г.И., Степанов А.П. Интегрированные инерциально-спутниковые системы ориентации и навигации – СПб.: ГНЦ РФ АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор», 2016
12. Характеристика сигналов GPS и ГЛОНАСС. Общие сведения о сигналах. URL: https://studref.com/669899/tehnika/harakteristika_signalov_glonass (дата обращения 01.03.2022)
13. Глобальная навигационная спутниковая система ГЛОНАСС. Стандарт эксплуатационных характеристик открытого сервиса (СТЭХОС), ПРИЛОЖЕНИЕ В, Редакция 2.2 (6.2019) Королев 2019 г.
14. Глобальная навигационная спутниковая система ГЛОНАСС. Стандарт эксплуатационных характеристик открытого сервиса (СТЭХОС), Редакция 2.2 (6.2019) Королев 2019 г.

15. [«Параметры Земли 1990 года» \(ПЗ-90.11\)](#). —М.: «27 ЦНИИ» Минобороны России, 2014.
16. Хранилище альманахов. URL: <ftp://ftp.glonass-iac.ru/MCC/>
17. M. Eng. Schwarz R. Memorandum Series. Memorandum №1 – 2017.
18. Bose, Anindya & Banerjee, P. (1996). Evaluation of GPS PDOP from elevation and azimuth of satellites. Indian J Radio and Space Physics. 25. 110-113